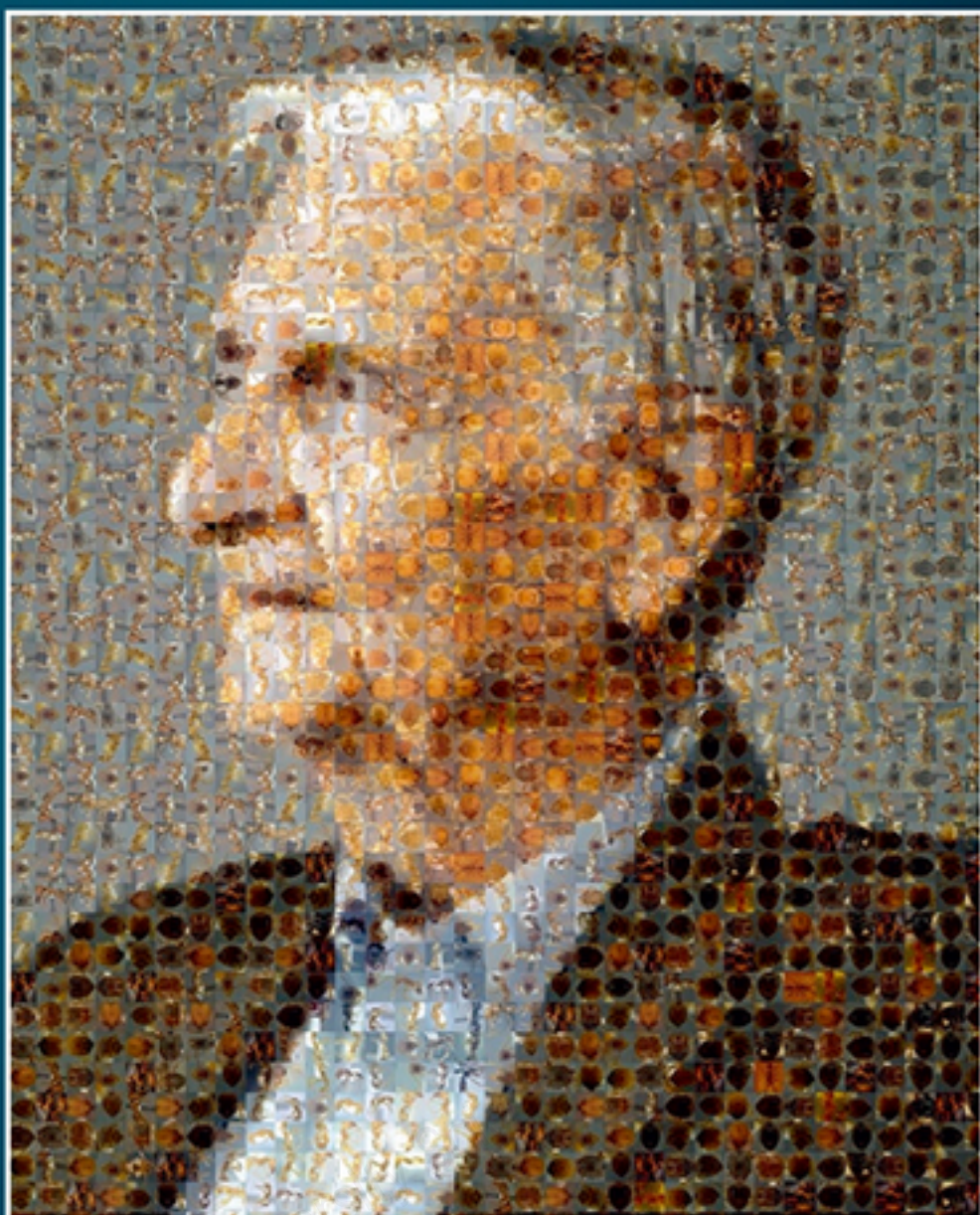
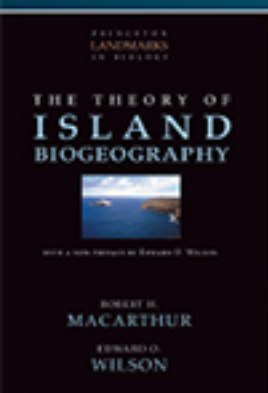




ISSN 1005-0094  
CODEN SHDUEM

# 生物多样性

BIODIVERSITY SCIENCE



纪念E. O. 威尔逊专题 | 中国国家植物园专题

## 主办

中国科学院生物多样性委员会  
中国植物学会  
中国科学院植物研究所  
中国科学院动物研究所  
中国科学院微生物研究所

Biodiversity Committee, CAS  
Botanical Society of China  
Institute of Botany, CAS  
Institute of Zoology, CAS  
Institute of Microbiology, CAS

第30卷 第1期  
2022年1月

Vol. 30 No. 1  
January 2022

<https://www.biodiversity-science.net>

# 编辑委员会 Editorial Board

## 主 编 Editor-in-Chief

马克平 Keping Ma Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences (CAS)

## 副 主 编 Deputy Editors-in-Chief

傅声雷 Shenglei Fu	Henan University	孔宏智 Hongzhi Kong	Institute of Botany, CAS
郭良栋 Liangdong Guo	Institute of Microbiology, CAS	雷富民 Fumin Lei	Institute of Zoology, CAS
郭庆华 Qinghua Guo	Peking University	吕 植 Zhi Lü	Peking University
黄晓磊 Xiaolei Huang	Fujian Agriculture and Forestry University	张 健 Jian Zhang	East China Normal University

## 特邀顾问 Advisory Board

陈宜瑜 Yiyu Chen	National Natural Science Foundation of China	刘 旭 Xu Liu	Chinese Academy of Agricultural Sciences (CAAS)
方精云 Jingyun Fang	Institute of Botany, CAS; Peking University	马建章 Jianzhang Ma	Northeast Forestry University
韩兴国 Xingguo Han	Institute of Botany, CAS	汪小全 Xiao-Quan Wang	Institute of Botany, CAS
洪德元 Deyuan Hong	Institute of Botany, CAS	魏辅文 Fuwen Wei	Institute of Zoology, CAS
季维智 Weizhi Ji	Kunming University of Science and Technology	魏江春 Jiangchun Wei	Institute of Microbiology, CAS
蒋有绪 Youxu Jiang	Chinese Academy of Forestry	吴常信 Changxin Wu	China Agricultural University
李 玉 Yu Li	Jilin Agricultural University	张亚平 Yaping Zhang	Kunming Institute of Zoology, CAS
		郑光美 Guangmei Zheng	Beijing Normal University
		庄文颖 Wenying Zhuang	Institute of Microbiology, CAS

## 编 委 Members

白 明 Ming Bai	Institute of Zoology, CAS	孙 军 Jun Sun	China University of Geosciences
车 静 Jing Che	Kunming Institute of Zoology, CAS	唐志尧 Zhiyao Tang	Peking University
陈进明 Jinming Chen	Wuhan Botanical Garden, CAS	万方浩 Fanghao Wan	Agricultural Genomics Institute at Shenzhen, CAAS
陈圣宾 Shengbin Chen	Chengdu University of Technology	王 岭 Ling Wang	Northeast Normal University
陈双林 Shuanglin Chen	Nanjing Normal University	王少鹏 Shaopeng Wang	Peking University
陈小勇 Xiaoyong Chen	Kunming Institute of Zoology, CAS	王 伟 Wei Wang	Institute of Botany, CAS
陈又生 Yousheng Chen	South China Botanical Garden, CAS	王 文 Wen Wang	Northwestern Polytechnical University
储诚进 Chengjin Chu	Sun Yat-sen University	王希华 Xihua Wang	East China Normal University
邓建明 Jianming Deng	Lanzhou University	王绪高 Xugao Wang	Institute of Applied Ecology, CAS
丁建清 Jianqing Ding	Henan University	王彦平 Yanping Wang	Nanjing Normal University
丁 平 Ping Ding	Zhejiang University	王 勇 Yong Wang	Alabama A & M University, USA
东秀珠 Xiuzhu Dong	Institute of Microbiology, CAS	王志恒 Zhiheng Wang	Peking University
冯玉龙 Yulong Feng	Shenyang Agricultural University	吴东辉 Donghui Wu	Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS
高 程 Cheng Gao	Institute of Microbiology, CAS	吴纪华 Jihua Wu	Fudan University
高连明 Lianming Gao	Kunming Institute of Botany, CAS	吴永杰 Yongjie Wu	Sichuan University
高天翔 Tianxiang Gao	Zhejiang Ocean University	肖治术 Zhishu Xiao	Institute of Zoology, CAS
葛学军 Xuejun Ge	South China Botanical Garden, CAS	星耀武 Yaowu Xing	Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, CAS
郭亚龙 Yalong Guo	Institute of Botany, CAS	徐 靖 Jing Xu	Chinese Research Academy of Environmental Sciences
何舜平 Shunping He	Institute of Hydrobiology, CAS	徐奎栋 Kuidong Xu	Institute of Oceanology, CAS
贺金生 Jinsheng He	Peking University	徐卫华 Weihua Xu	Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS
华方圆 Fangyuan Hua	Peking University	薛达元 Dayuan Xue	Minzu University of China
黄双全 Shuangquan Huang	Central China Normal University	严岳鸿 Yuehong Yan	The Orchid Conservation & Research Center of Shenzhen, China
黄振英 Zhenying Huang	Institute of Botany, CAS	杨 光 Guang Yang	Nanjing Normal University
江建平 Jianping Jiang	Chengdu Institute of Biology, CAS	杨 军 Jun Yang	Tsinghua University
蒋 林 Lin Jiang	Georgia Institute of Technology, USA	杨庆文 Qingwen Yang	Institute of Crop Sciences, CAAS
蒋学龙 Xuelong Jiang	Kunming Institute of Zoology, CAS	杨祝良 Zhuliang Yang	Kunming Institute of Botany, CAS
蒋志刚 Zhigang Jiang	Institute of Zoology, CAS	于飞海 Feihai Yu	Taizhou University
鞠瑞亭 Ruiting Ju	Fudan University	臧润国 Runguo Zang	Chinese Academy of Forestry
李彬彬 Binbin Li	Duke Kunshan University	张大勇 Dayong Zhang	Beijing Normal University
李俊生 Junsheng Li	Chinese Research Academy of Environmental Sciences	张丽梅 Limei Zhang	Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS
李仁辉 Renhui Li	Institute of Hydrobiology, CAS	张全国 Quanguo Zhang	Beijing Normal University
李 晟 Sheng Li	Peking University	张元明 Yuanming Zhang	Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS
李新正 Xinzheng Li	Institute of Oceanology, CAS	周 欣 Xin Zhou	China Agricultural University
林露湘 Luxiang Lin	Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, CAS	朱朝东 Chaodong Zhu	Institute of Zoology, CAS
龙春林 Chunlin Long	Minzu University of China	朱瑞良 Ruiliang Zhu	East China Normal University
马克明 Keming Ma	Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS		
米湘成 Xiangcheng Mi	Institute of Botany, CAS		
潘庆民 Qingmin Pan	Institute of Botany, CAS		
乔慧捷 Huijie Qiao	Institute of Zoology, CAS		
邱英雄 Yingxiong Qiu	Wuhan Botanical Garden, CAS		
沈泽昊 Zehao Shen	Peking University		

编辑 黄祥忠 Xiangzhong Huang (本期值班编辑) 李会丽 Huili Li 时意专 Yizhuan Shi 闫文杰 Wenjie Yan 周玉荣 Yurong Zhou

# 生物多样性

## SHENGWU DUOYANGXING

第30卷 第1期 2022年1月

### 目次

#### 纪念E. O. 威尔逊专题

- 22027 E. O. 威尔逊与生物多样性保护  
张晓川, 吕植
- 22018 E. O. 威尔逊的学术生涯与蚂蚁研究成就纵览  
陈炎栋, 刘聪, 陈卓, 陈志林, 白明
- 22024 E. O. 威尔逊与岛屿生物地理学理论  
阎恩荣, 斯幸峰, 张健, 陈小勇
- 22014 E. O. 威尔逊的“博物学家”头衔  
刘华杰
- 22009 E. O. 威尔逊, 一个跟自己也能决斗的勇士  
王瑞武

#### 中国国家植物园专题

- 22016 关于我国国家植物园体系建设的一点思考  
陈进
- 22006 中国国家植物园选址与迁地保护  
刘华杰
- 22013 国家植物园设立为何首选北京?  
马金双
- 22017 植物园与野生植物迁地保护  
文香英, 陈红锋

#### 研究报告

##### 植物多样性

- 21192 中国梭梭属植物历史分布格局及其驱动机制  
张丹, 马松梅, 魏博, 王春成, 张林, 闫涵

##### 动物多样性

- 21157 东北地区水獭分布格局与保护优先区识别  
张超, 陈敏豪, 杨立, 庄鸿飞, 武曙红, 湛振杰, 王嘉栋, 栾晓峰
- 21176 重大工程影响下新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区鹅喉羚的生境格局变化  
张晨, 马伟, 陈晨, 汪沐阳, 徐文轩, 杨维康
- 21204 甘肃白水江国家级自然保护区林缘社区饲养犬只对大熊猫时空节律的影响  
滕继荣, 刘兴明, 何礼文, 王钧亮, 黄建, 冯杰, 王放, 翁悦

- 21241 甘肃盐池湾黑颈鹤筑巢栖息地偏好及人为干扰的影响  
王博驰, 裴雯, 杨巨才, 色拥军, 李雪竹, 娜尔力玛, 杨海蓉

##### 微生物多样性

- 21407 中印度洋与南海西部表层海水细菌多样性  
夏呈强, 李毅, 党延茹, 察倩倩, 贺晓艳, 秦启龙

##### 技术与方法

- 21265 中国农田土壤动物长期监测样地科学调查监测的实施方法  
高梅香, 刘启龙, 朱家祺, 赵博宇, 杜嘉, 吴东辉

##### 生物编目

- 21186 安徽石台县与青阳县苔藓植物多样性  
邢诗晨, 唐录艳, 戴尊, 涂淑雯, 陈星, 张建行, 李宏庆, 彭涛, 王健
- 21229 浙江乌岩岭国家级自然保护区叶附生苔类及附主植物多样性  
戴尊, 陈星, 张建行, 朱毛洁, 宋坤, 邢诗晨, 涂淑雯, 邹璐, 雷祖培, 李宏庆, 王健

##### 综述

- 21243 有机种植对农田节肢动物多样性影响的整合分析  
黄方倩, 王超, 刘明庆, 陈秋会, 韩笑, 王磊, 席运官, 张纪兵

##### 保护与治理对策

- 21179 我国国家公园自然资源管理探讨  
李款, 李发祥

##### 论坛

- 21323 适合度的相对性与路径依赖的自然选择  
王瑞武, 李敏岚, 韩嘉旭, 王超
- 21550 “保护生物多样性, 共建干旱区生命共同体”宣言  
干旱区生物多样性保护与可持续发展国际研讨会组织委员会

致谢2021年度审稿专家

封面: 2021年12月26日, 被誉为“社会生物学之父”和“生物多样性先驱”的美国著名博物学家E. O. 威尔逊与世长辞。本封面选择了威尔逊的6本著作来纪念他对社会生物学、岛屿生物地理学、保护生物学、博物学等方面的开创性工作。封面右边是用威尔逊一生所描述的所有蚂蚁新种照片拼成的肖像图(图片提供者: 刘聪。使用的蚂蚁标本照片来自AntWiki和AntWeb)。



# BIODIVERSITY SCIENCE

Vol. 30 No. 1 January 2022

## CONTENTS

### Special Feature: Remembering Naturalist E. O. Wilson

- 22027 **E. O. Wilson and Biodiversity Conservation**  
Xiaochuan Zhang and Zhi Lü
- 22018 **Overview of E. O. Wilson's academic career and ant-research achievements**  
Yandong Chen, Cong Liu, Zhuo Chen, Zhilin Chen and Ming Bai
- 22024 **Edward O. Wilson and the Theory of Island Biogeography**  
Enrong Yan, Xingfeng Si, Jian Zhang and Xiaoyong Chen
- 22014 **On Edward O. Wilson's title naturalist**  
Huajie Liu
- 22009 **E. O. Wilson, a warrior who could even fight against himself**  
Ruiwu Wang

### Special Feature: On National Botanical Gardens of China

- 22016 **Some thoughts about China's national botanical garden system construction**  
Jin Chen
- 22006 **Site selection of national botanic gardens of China and *ex-situ* conservation**  
Huajie Liu
- 22013 **Why should Beijing be the first choice for the establishment of the National Botanical Garden?**  
Jinshuang Ma
- 22017 **Botanical gardens and *ex situ* conservation of the wild plant species**  
Xiangying Wen and Hongfeng Chen

### Original Papers

#### Plant Diversity

- 21192 **Historical distribution pattern and driving mechanism of *Haloxylon* in China**  
Dan Zhang, Songmei Ma, Bo Wei, Chuncheng Wang, Lin Zhang and Han Yan

#### Animal Diversity

- 21157 **Distribution pattern and identification of conservation priority areas of the otter in Northeast China**  
Chao Zhang, Minhao Chen, Li Yang, Hongfei Zhuang, Shuhong Wu, Zhenjie Zhan, Jiadong Wang and Xiaofeng Luan
- 21176 **Changes of habitat pattern for goitered gazelle in the Xinjiang Kalamaili Mountain Ungulate Nature Reserve under the influence of major projects**  
Chen Zhang, Wei Ma, Chen Chen, Muyang Wang, Wenxuan Xu and Weikang Yang
- 21204 **The spatio-temporal impact of domestic dogs (*Canis familiaris*) on giant panda (*Ailuropoda melanoleuca*) in Baishuijiang National Nature Reserve**

Jirong Teng, Xingming Liu, Liwen He, Junliang Wang, Jian Huang, Jie Feng, Fang Wang and Yue Weng

- 21241 **Nesting habitat preference of the black-necked crane and influence of anthropogenic disturbance in Yanchiwan, Gansu**

Bochi Wang, Wen Pei, Jucai Yang, Yongjun Se, Xuezhu Li, Naerlima and Hairong Yang

#### Microbial Diversity

- 21407 **Diversity of culturable and *in situ* bacteria in surface seawater from the central Indian Ocean and the western South China Sea**  
Chengqiang Xia, Yi Li, Yanru Dang, Qianqian Cha, Xiaoyan He and Qilong Qin

#### Technology and Methodology

- 21265 **Implementation protocol of scientific investigation and monitoring for permanent plots of agricultural soil animal in China**  
Meixiang Gao, Qilong Liu, Jiaqi Zhu, Boyu Zhao, Jia Du and Donghui Wu

#### Bioinventories

- 21186 **Bryophyte diversity in Shitai County and Qingyang County, Anhui Province**  
Shichen Xing, Luyan Tang, Zun Dai, Shuwen Tu, Xing Chen, Jianhang Zhang, Hongqing Li, Tao Peng and Jian Wang
- 21229 **Species diversity of epiphyllous liverworts and host plants in the Wuyanling National Nature Reserve, Zhejiang Province**  
Zun Dai, Xing Chen, Jianhang Zhang, Maojie Zhu, Kun Song, Shichen Xing, Shuwen Tu, Lu Zou, Zupei Lei, Hongqing Li and Jian Wang

#### Review

- 21243 **Effects of organic planting on arthropod diversity in farmland: A meta-analysis**  
Fangqian Huang, Chao Wang, Mingqing Liu, Qiuhui Chen, Xiao Han, Lei Wang, Yunguan Xi and Jibing Zhang

#### Conservation and Governance

- 21179 **Natural resource management of China's national parks**  
Kuan Li and Faxiang Li

#### Forum

- 21323 **Fitness relativity and path-dependent selection**  
Ruiwu Wang, Minlan Li, Jiayu Han and Chao Wang
- 21550 **Declaration on Conserving Biodiversity and Building a Community of All Life in Arid Lands**  
Organizing committee of the International Symposium on Biodiversity Conservation & Sustainable Development in Arid Lands

**Cover Illustration:** On December 26, 2021, the leading American naturalist Edward Osborne Wilson passed away. He has been renowned as "the father of sociobiology" and "the father of biodiversity". In the front cover, six of Wilson's books were selected to memorialize his pioneering contributions to sociobiology, the island biogeography, conservation biology, natural history and others. Wilson's mosaic portrait on the right was assembled with the images of all ant species that he has described in his life (image credit: Cong Liu. Ant images are from AntWiki and AntWeb).





•论坛• 纪念E. O. 威尔逊专题

# E. O. 威尔逊与生物多样性保护

张晓川<sup>1,2</sup>, 吕植<sup>1,2\*</sup>

1. 北京大学生命科学学院自然保护与社会发展研究中心, 北京 100871; 2. 北京大学生态研究中心, 北京 100871

张晓川, 吕植 (2022) E. O. 威尔逊与生物多样性保护. 生物多样性, 30, 22027. doi: 10.17520/biods.2022027.  
Zhang XC, Lü Z (2022) E. O. Wilson and Biodiversity Conservation. Biodiversity Science, 30, 22027. doi: 10.17520/biods.2022027.

## E. O. Wilson and Biodiversity Conservation

Xiaochuan Zhang<sup>1,2</sup>, Zhi Lü<sup>1,2\*</sup>

1 Center for Nature and Society, School of Life Science, Peking University, Beijing 100871

2 Institute of Ecology, Peking University, Beijing 100871

1980年,《哈佛杂志》(*Harvard Magazine*)的编辑邀请了7位哈佛大学教授,请他们提出未来10年全球即将面对的最大难题。其中4人提出贫穷问题,理由分别是人口过度膨胀、乡村人潮大举涌入城市,以及资本主义盛行带来的贫富差距加剧。第5位教授把焦点放在美国自身,提出福利国家和政府管控过度的议题。第6位教授则选出全球核武器威胁。第7位学者就是E. O. 威尔逊教授,也是这7人小组里唯一的自然科学家。他挑选了截然不同的主题。“物种灭绝的速度越来越快,生物圈岌岌可危;人类正大举削减自古以来的生物多样性宝藏。”威尔逊说道。

作为当时已经是全球最顶尖的进化生物学家,被称为“达尔文的天然继承人”的他,以最擅长的进化视角来阐述他心目中最严重的全球危机:“可能发生,或‘必然会’发生的最糟状况,并不是能源短缺、经济崩溃,或发生小规模核战争,或遭到极权政体的统治;这些灾难对我们来说固然可怕,但是至少它们可以在数个世代之内恢复。目前持续恶化,而未来将耗费数百万年也未必能解决的难题是:因摧毁天然栖息地而减损了基因及生物多样性。这才是后代子孙可能最无法原谅我们的愚行。”

全球的生物多样性保护,成为威尔逊教授在过去40多年里殚精竭虑的主要问题。

### 1 探究缤纷生命,发现生存危机

作为过去50年里最杰出的博物学家之一,爱德华·威尔逊有着对大自然中缤纷生命的天然热爱。他在16岁时确立了自己一生的研究对象,决定做“那些小动物的研究”。这些“小动物”虽小,而正是它们构建了整个生物圈的基础。

“它们才是世界的主人,”威尔逊教授在TED演讲中这样提到,“通过这样的方式,我来到一个非常古怪却又非常丰富的生物学领域,简直就像降临到别的星球一样。事实上,我们就生活在一个很多地方都还没有被研究过的星球上,科学家对于地球上大多数的有机体都是一无所知的。但是每一个我们不了解的物种,即使是最细小的原绿球菌,都是进化之杰作。它们都在地球上存活了千百万年,都能很好地融入到其生活环境当中,并且与其他的物种相互作用,构成我们赖以生存的生态系统。”

爱德华·威尔逊在哈佛大学获得了他的昆虫学博士学位。为了研究蚂蚁,在整个20世纪的50–60年代,他的足迹走过了古巴、墨西哥、新喀里多尼亚、澳大利亚、斐济、斯里兰卡、莫桑比克等众多地区。随着研究的深入,他意识到物种和栖息地正在他走过的每一片珍贵的土地上快速地消失。60年

收稿日期: 2022-01-15; 接受日期: 2022-01-16

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: luzhi@pku.edu.cn

代,他与罗伯特·H·麦克阿瑟(Robert H. MacArthur)在创立和发展岛屿生物地理学的过程中,发现了只要栖息地面积减少,动物及植物的物种数必定随之减少的定量关系。

“我们很粗略地估算了一下,每减少90%的森林面积(或大草原、河流水道面积),将会使得原本生活在其中的生物物种数减半。前景似乎又变得更加黯淡了。”他在自传*Naturalist*中写到。这也成为了日后他提出更先锋性的“半个地球”构想的理论基础。

## 2 “生物多样性”保护运动的奠基人

威尔逊教授自70年代末期开始大力投身生物多样性保护的实践中。他于1979年加入彼得·雷文(Peter Raven)、贾雷德·戴蒙德(Jared Diamond)、保罗·埃利希(Paul Ehrlich)等共同发起的“国家研究委员会”(National Research Council),专门研讨热带生物学研究的优先顺序,以强调最为紧迫的森林破坏及物种多样性消失的问题。不久之后,他又加入WWF美国分会的顾问团,参与了“新环境主义”(new environmentalism)的构想,尝试将保护计划和经济利益结合在一起,关注因拯救物种多样性而生活受到影响的当地居民,因此也成为了社区保护理论与实践结合的先行者。

1985年,威尔逊教授在美国国家科学院的政策刊物上发表了文章《生物多样性的危机——科学面对的挑战》(*The Biological Diversity Crisis: A Challenge to Science*),引起广泛的注意。次年,在美国国家科学院及史密森尼学会主办的“生物多样性国家论坛”上,“生物多样性”(Biodiversity)这个名词被首次公开使用。威尔逊教授负责编辑了这场会议的论文集《生物多样性》(*BioDiversity*),这本论文集后来成为国家学术出版社(National Academy Press)有史以来最畅销的著作之一,这个名词更是以惊人的速度传遍世界。到了1987年,“生物多样性”已经成为生态保护文献里最常见的词之一。生物多样性也开始成为博物馆展览及校园演讲中的热门话题。

到了1992年,在巴西里约热内卢召开的联合国环境与发展大会上,《生物多样性公约》通过并开放签署。威尔逊教授也出版了《缤纷的生命》一书,综合了生物多样性的原理和最重要的实施问题,也为生物多样性保护学科的创立和普及贡献了一部

教科书级的作品。

## 3 对科学与社会活动的思考

虽然早在40多年前就开始成为生物多样性保护的开拓者,但威尔逊每每提及此事仍然会形容自己“行动迟得难以原谅”,就如同他总会在人们将“生物多样性”一词的创立归功于他时谦虚地推辞一样。

他形容,其实早在年少求学时他就对家乡亚拉巴马州的海岸、美国本土的森林、曾探索过蚂蚁的古巴丛林等的生境退化忧心忡忡,但依旧踟蹰不决,把自己在真实世界里扮演的角色完全限定在对社会生物学这样的学术主题的研究及撰写著作上。

由于在社会生物学的理论创立过程中引发了一次较大的争议潮,他深知介于科学和政治活动之间的地带是相当复杂和险恶的。他总是对科学和社会活动、自然科学与人文的关系深入思考,而他在自传中对这个问题回答道:“如果发言太过强硬,别的科学家就会把你归为死命奉行意识形态之人;如果发言太过温和,你又等于规避了道德责任。我迟疑地选择站在谨慎行事的这一边。……然而,生态保护运动终归还是需要资深生物学家的声音。”而之后他对保护的投入和贡献,也正是体现了他作为博物学大师远胜常人的深刻思考和科学知识的融会贯通,而不仅仅是来自环境主义者的一腔热忱。

## 4 人类的亲生命性

威尔逊对这样的融会贯通的追求一直贯穿他的学术和保护实践始终。他不仅在社会生物学的研究中尝试探讨人类社会行为的基因基础,而且早在1984年出版的《亲生命性》(*Biophilia*)一书中,他还探讨了人类对自然、对生物的热爱和向往的神经生物学和进化生物学根源。他创造Biophilia一词时,就如同Biodiversity一样,不仅活泼,而且兼具庄重和顺口。他认为,人类与生俱来对其他生命形式具有亲切感,这种亲近是由不同情境激发出来的,比如喜悦,或安全感,或敬畏,甚至是混杂了憎恶的迷恋。在科技日新月异的发展中,人类与自然逐渐被钢筋混凝土和化石能源载具的钢铁洪流所割裂而患上“自然缺失症”,甚至在物种灭绝的道路上一去不返。而“亲生命性”的思想和行为正可以在这种情况下重新拉近和建立人与自然的联系,帮助人类

重新审视生物圈的未来。这一理念后来甚至成为了建筑学和城市景观设计的一大流派,这也是威尔逊为生物多样性主流化做的一次无心插柳的贡献。

## 5 知识大融合、生命大百科与半个地球

在参与创立了国际保护生物学学会(Society for Conservation Biology)、又成为了大自然保护协会(The Nature Conservancy)、保护国际(Conservation International)等几大国际NGO的理事之后,他于2005年创立了一家以自己名字命名的生物多样性保护基金会: E. O. Wilson Biodiversity Foundation (<https://eowilsonfoundation.org/>)。这家机构不仅承载了他关于建立在线生命大百科全书数据库的理想(Wilson, 2003),而且在2016年,随着他当前最具实践意义的著作《半个地球》(*Half Earth*)的出版,一个全新的同名保护计划Half Earth Project也诞生了。这个计划尝试以保护地球上半的陆地和海洋栖息地为目标,进行提高全球的保护意识与行动力的实践,希望能够获得全球范围内足够的决心和行动来应对目前严重的生物多样性丧失威胁。

在此之前,他还出版了多部专著,从他深耕的社会行为与生物性、人类行为与自然、社会与地球的资源承载力、生物多样性丧失的威胁这几个角度,不断挖掘、不断呈现。《知识大融通》(*Consilience: The Unity of Knowledge*)尝试打破人们惯常思维中关于自然科学与社会文化的认知壁垒,论述数学、生命科学、文化与社会行为等学识的共性,提出唯有多学科的融通才是解决目前全球生物圈大消退的“荒生代”(Ereozoic Era, Age of Loneliness)迫切危机的必由之路。《地球的社会性征服》(*The Social Conquest of Earth*)与《人类存在的意义》(*The Meaning of Human Existence*)则更激进地将人类对地球的开拓与真社会性昆虫的行为进行深入类比,来解答“我们是谁”“我们从哪里来”“我们要到哪里去”的本质性哲学问题,也进而探讨人类与自然、与生物多样性的关系,构成了之后提出“半个地球”构

想的论点基础。

## 6 最后的呼告

爱德华·威尔逊向公众介绍了HIPPO(英文意为“河马”)这样一个缩写词汇。H代表栖息地丧失(habitat destruction), I代表入侵物种(invasive species),两个P分别代表污染(pollution)和人口过度增长(population overgrowth), O代表过度捕猎(overhunting),用这样更加生动的方式进行着奔走呼告。同样地,他在耄耋高龄依然还参与了如考察和保护莫桑比克戈龙戈萨国家公园(Parque Nacional da Gorongosa)这样的硬核行动,以及去世前一两年还在尝试推动他坚持了近10年的为他的家乡亚拉巴马州莫比尔(Mobile)附近的莫比尔-滕索三角洲(Mobile-Tensaw Delta)成立国家公园而进行的实地研究和对政商两界支持者的奔走呼告。更令他习以为常的则是不断地在生物多样性保护的重要性论战中为他的观点积极发声辩护。在他早已等身的学术成就和先驱性的保护实践背后,是一种对当前HIPPO如死神不断敲门一般威胁全球生物圈存续的紧迫感。在他撰写的《半个地球》中,他相信这不仅仅是他一生工作的总结,更是对世界命运的警告:再不行动,这不可抗拒、不可逆转的灾难就将覆水难收。

寻找生命,理解生命,守护生命,这是爱德华·威尔逊穷其一生所尽力做的,也是他对全世界有志保护的后继者的期待。“我可能没有多少年剩下了,在这时最重要的是把我要论述的观点都讲出来。我做到了,所以我现在感到很开心。”他在完成《半个地球》的写作接受采访时,这样说。

巨人已逝,思想永存。爱德华·奥斯本·威尔逊(1929–2021),永远怀念。

本文引用的参考文献见附录1 (<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2022027-1.pdf>)。

(责任编辑:周玉荣)



## 参考文献

- Douglas E (2001) "Darwin's natural heir". The Guardian, London.
- Dreifus C (2015) E. O. Wilson Wants Us to Leave Half of the Earth Alone—Here's Why. <https://www.audubon.org/magazine/september-october-2015/eo-wilson-wants-us-leave-half-earth>. Retrieved January 11, 2022.
- "E. O. Wilson biography". AlabamaLiteraryMap.org. Archived from the original on December 8, 2010. Retrieved April 23, 2014.
- "E.O. Wilson Biodiversity Foundation » E.O. Wilson". Retrieved December 27, 2020.
- MacArthur RH, Wilson EO (2016) The Theory of Island Biogeography. Princeton University Press, Princeton and Oxford.
- McKie R (2016) Half-Earth: Our Planet's Fight for Life by Edward O Wilson—Review. <https://www.theguardian.com/books/2016/apr/11/half-earth-planets-fight-for-life-edward-o-wilson-review>. Retrieved January 11, 2022.
- TED 2007 (2007) E. O. Wilson's TED Prize wish. My wish: Build the Encyclopedia of Life. [https://www.ted.com/talks/e\\_o\\_wilson\\_my\\_wish\\_build\\_the\\_encyclopedia\\_of\\_life](https://www.ted.com/talks/e_o_wilson_my_wish_build_the_encyclopedia_of_life). Retrieved January 12, 2022.
- Wilson EO (1984) Biophilia. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts & London, England.
- Wilson EO (1992) The Diversity of Life. Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, Mass.
- Wilson EO (1998) Consilience: The Unity of Knowledge. Knopf, New York.
- Wilson EO (2000) Sociobiology: The New Synthesis. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts & London, England.
- Wilson EO (2002) The Future of Life. A Division of Random House, New York.
- Wilson EO (2003) The encyclopedia of life. Trends in Ecology & Evolution, 18, 77–80.
- Wilson EO (2006) *Naturalist*. Island Press, Washington DC & Covelo, California.
- Wilson EO (2012) The Social Conquest of Earth. WW Norton & Company, New York and London.
- Wilson EO (2014) The Meaning of Human Existence. WW Norton & Company, New York and London.
- Wilson EO (2016) Half-Earth: Our Planet's Fight for Life. WW Norton & Company, New York and London.
- Wilson EO (2019) Genesis: The Deep Origin of Societies. Penguin UK, London, England.



•论坛• 纪念E. O. 威尔逊专题

# E. O. 威尔逊的学术生涯与蚂蚁研究成就纵览

陈炎栋<sup>1</sup>, 刘聪<sup>2</sup>, 陈卓<sup>3</sup>, 陈志林<sup>4</sup>, 白明<sup>1,5\*</sup>

1. 中国科学院动物研究所动物进化与系统学院重点实验室, 北京 100101, 中国; 2. Museum of Comparative Zoology, Harvard University, Cambridge 02138, America; 3. 中国农业大学昆虫学系, 北京 100193, 中国; 4. 珍稀濒危动植物生态与环境保护教育部重点实验室(广西师范大学), 广西桂林 541006, 中国; 5. 中国科学院大学, 北京 100049, 中国

陈炎栋, 刘聪, 陈卓, 陈志林, 白明 (2022) E. O. 威尔逊的学术生涯与蚂蚁研究成就纵览. 生物多样性, 30, 22018. doi: 10.17520/biods.2022018.

Chen YD, Liu C, Chen Z, Chen ZL, Bai M (2022) Overview of E. O. Wilson's academic career and ant-research achievements. Biodiversity Science, 30, 22018. doi: 10.17520/biods.2022018.

## Overview of E. O. Wilson's academic career and ant-research achievements

Yandong Chen<sup>1</sup>, Cong Liu<sup>2</sup>, Zhuo Chen<sup>3</sup>, Zhilin Chen<sup>4</sup>, Ming Bai<sup>1,5\*</sup>

1 Key Laboratory of Zoological Systematics and Evolution, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Museum of Comparative Zoology, Harvard University, Cambridge 02138, America

3 Department of Entomology, China Agricultural University, Beijing 100193, China

4 Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and Environmental Protection (Guangxi Normal University), Guilin, Guangxi 541006, China

5 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

### 1 “蚁学巨匠” E. O. Wilson

E. O. Wilson教授被誉为当代蚂蚁研究的翘楚。他的研究领域涉及蚂蚁的分类、生态和行为等各个方面, 并由此衍生出岛屿生物地理学的理论和社会生物学的体系。这些研究成果对于当今的昆虫学和生物学其他分支学科均产生着深远的影响。

### 2 与蚁结缘

纵观Wilson教授长达七十余年的学术生涯, 不难发现, 童年时期的成长环境使他对大自然产生了非常浓厚的兴趣, 特别是鸟类与昆虫。但因一次钓鱼事故, Wilson教授右眼视力受损, 立体视觉的丧失使得他难以观察野外的大型哺乳动物与鸟类, 从而使他更专注于野外的昆虫。他9岁左右萌发了对蚂蚁的兴趣, 并在18岁时确定要将其作为毕生的研究对象(Wilson, 2006)。1949年, 他以调查美国阿拉

巴马州的蚂蚁为开端, 走上了蚂蚁研究的道路, 这项研究得到了当时美国国家自然史博物馆昆虫学家史密斯(Marion R. Smith)的肯定和帮助。在研究过程中, 他还详细调查了阿拉巴马州红火蚁(*Solenopsis saevissima* var. *richteri*)的分布情况(Wilson & Eads, 1949)。

### 3 蚂蚁分类研究

1951年, 他正式发表了第一篇分类学论文—*A New Leptothorax from Alabama* (Hymenoptera: Formicidae), 描述了他1947年亲手采自阿拉巴马州塔斯卡卢萨的第一个蚂蚁新种——*Leptothorax tuscaloosae*(图1)。1955年, 他完成了题为“*A Monographic Revision of the Ant Genus Lasius*”的博士论文, 并获得哈佛大学生物学博士学位, 同年该论文以专论的形式刊发在*Bulletin of the Museum of Comparative Zoology*上。1950–1960年, 他发表的关

收稿日期: 2022-01-11; 接受日期: 2022-01-12

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: baim@ioz.ac.cn

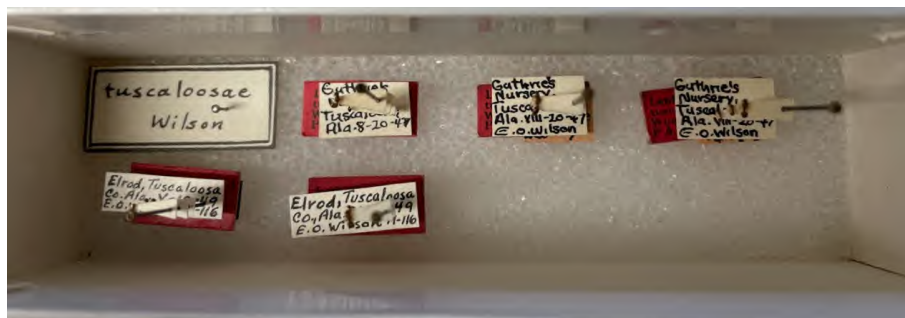


图1 Wilson教授描述的第一个蚂蚁新种模式标本照片(*Leptothorax tuscaloosae* Wilson 1950) (刘聪拍摄)  
Fig. 1 Type series of the first ant species Wilson described (*Leptothorax tuscaloosae* Wilson 1950) (taken by Cong Liu)

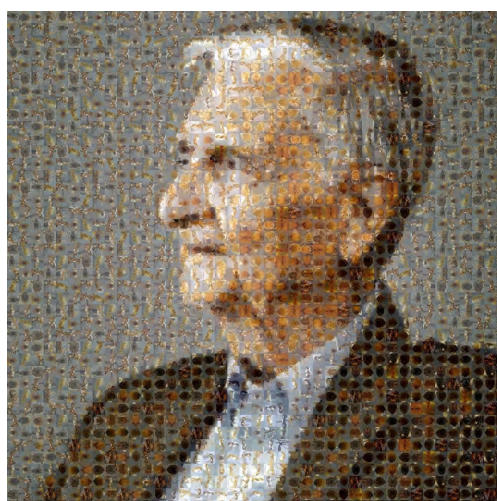


图2 Wilson教授生前描述的新种组成的肖像画(刘聪绘制)。使用的蚂蚁标本照片来自AntWiki和AntWeb。  
Fig. 2 Portraiture, made up of ant species Wilson described, of Prof. Wilson (designed by Cong Liu). Ant images are from AntWiki and AntWeb.

于美拉尼西亚和波利尼西亚蚂蚁的系列论文, 填补了此两地蚂蚁多样性研究的空白。1990年, 他与德国昆虫学家霍德伯勒(Bert Hölldobler)完成巨著*The Ants*, 该书对蚂蚁的分类、生态、行为和社会生物学进行了全面的综述, 出版次年即获颁普利策非小说类作品奖。Wilson教授一生发表蚂蚁分类学论著35篇(部), 共描述1个新亚科、7个新属、1个新亚属和429个新种(图2), 涵盖现生和灭绝的种类。尤其是2003年, 年逾古稀的Wilson教授还发表了新大陆大头蚁属(*Pheidole*)的分类学专著(Wilson, 2003), 发表了337个新种, 他形容这项研究“征服了蚂蚁分类学界的珠峰”。为了铭记Wilson在蚂蚁研究领域的贡献, 先后有1属和21种蚂蚁以他的名字命名。

虽然Wilson教授将从事分类工作的研究者形容

为生物学界的“苦行僧”, 但他对分类学的热情从未消减过。在他晚年出版的回忆录中曾专门谈及分类学的基础性和重要性, 并引用了中国的一句老话“名不正, 则言不顺”(As the Chinese say, the first step to wisdom is getting the right name)<sup>①</sup>。Wilson教授还对亚种概念和三名法提出过公开质疑, 其思想集中体现在1953年和1954年发表的2篇论文中(Wilson & Brown, 1953; Brown & Wilson, 1954), 其见解极大促进了分类理论的发展。除此之外, Wilson教授对其他的蚂蚁分类研究者也尽其所能地提供帮助。例如, 我国早期系统研究中国蚂蚁分类的学者吴坚与王常禄, 就曾拜访Wilson教授, 在蚂蚁标本的检视和文献查阅上得到他极大的帮助, 最终编撰出版我国第一部蚂蚁专著——《中国蚂蚁》。

#### 4 蚂蚁生态与进化研究

Wilson教授不仅仅是一位蚂蚁分类学家, 更为重要的是, 他在蚂蚁如何演化成为地球上最成功的生物类群之一的研究领域内做出了巨大的贡献。

Wilson教授对蚂蚁社会、行为等的观察贯穿他整个学术生涯。他对蚂蚁的观察不是仅仅停留在简单的记述上, 而是对其进行深入的思考, 这对他取得成功十分重要。这一点即使在他早期的研究中也可见一斑。在1949年, Wilson教授在阿拉巴马州详细调查入侵的红火蚁。1951年以及之后的若干篇文章中, Wilson教授对红火蚁入侵后的适应能力、演化特点、入侵危害以及防治进行了详细地讨论(Wilson, 1951, 1953, 1958)。而岛屿生物学理论的雏形, 也是他在1955年的南太平洋采集期间, 通过观察美拉尼

<sup>①</sup> 译法取自《博物学家》(杨玉龄译, 中信出版集团, 2021)。



西亚群岛蚂蚁多样性分布模式后逐渐形成的。

Wilson教授结合野外观察与实验室的研究,对蚂蚁的多型现象、预警、战争与防御、通讯、捕食以及奴役行为进行了深入研究。这些领域的研究在当时均是超前的,为后来的相关研究建立了基础。他尤其喜欢三类蚂蚁: 芭切叶蚁(*Atta* spp.)、织叶蚁(*Oecophylla* spp.)和毒针蚁(*Daceton* spp.) (图3), 对它们的生物学、生态学以及行为学进行了详细的研究。通过对大量不同类群蚂蚁的社会结构的观察, Wilson教授逐渐形成了对于蚂蚁社会性行为形成机制的看法, 并促使他思考所有动物(包括人类)的社会是如何起源的, 为提出社会生物学打下了基础。

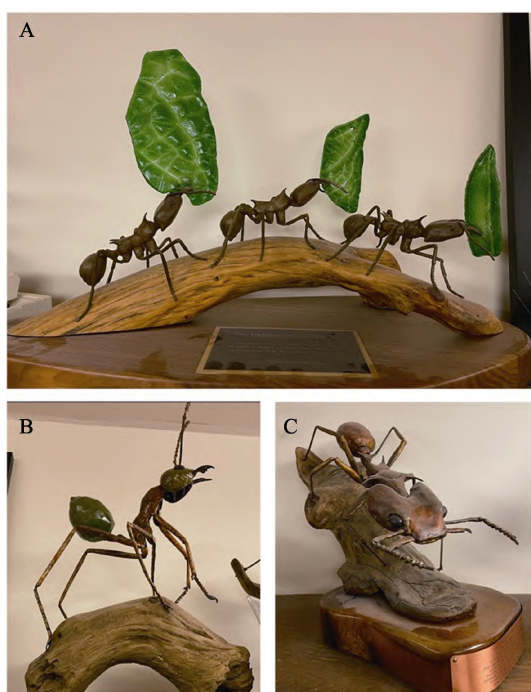


图3 Wilson教授办公室中的蚂蚁模型(刘聪摄)。A. 芭切叶蚁(*Atta* sp.); B. 织叶蚁(*Oecophylla* sp.); C. 毒针蚁(*Daceton* sp.)。

Fig. 3 Ant models in Prof. Wilson's office (taken by Cong Liu). A. *Atta* sp.; B. *Oecophylla* sp.; C. *Daceton* sp.

## 5 结语

纵观Wilson教授的一生, 他从一个博物学爱好者成为一名分类学者, 再从分类学者成为昆虫生态学家, 最终被《时代》以及《大英百科全书》认为是世界上最重要的科学家与有影响力的人物之一, 被称为“社会生物学之父”和“生物多样性之父”。他的学术生涯不仅仅为这个世界留下了众多昆虫学领域的知识财富, 也为昆虫学者如何走向成功, 进而影响世界并最终造福人类提供了完美的模板, 值得后辈学习。

## ORCID

陈炎栋 <https://orcid.org/0000-0001-7297-2405>

刘聪 <https://orcid.org/0000-0002-8664-6931>

陈卓 <https://orcid.org/0000-0003-3393-0338>

陈志林 <https://orcid.org/0000-0001-6564-1528>

白明 <https://orcid.org/0000-0001-9197-5900>

## 参考文献

- Brown WL, Wilson EO (1954) The case against the trinomen. *Systematic Biology*, 3, 174–176.
- Wilson EO (1951) Variation and adaptation in the imported fire ant. *Evolution*, 5, 68–79.
- Wilson EO (1953) Origin of the variation in the imported fire ant. *Evolution*, 7, 262–263.
- Wilson EO (1958) The fire ant. *Scientific American*, 198, 36–41.
- Wilson EO (2003) *Pheidole in the New World: A Dominant, Hyperdiverse Ant Genus (Vol. 1)*. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Wilson EO (2006) *Naturalist*. Island Press [for] Shearwater Books, Washington, DC.
- Wilson EO, Brown WL (1953) The subspecies concept and its taxonomic application. *Systematic Biology*, 2, 97–111.
- Wilson EO, Eads JH (1949) A report on the imported fire ant *Solenopsis saevissima* var. *richteri* Forel in Alabama. Special mimeographed report to the Director of the Alabama State Department of Conservation.

(责任编辑: 周玉荣)



•论坛• 纪念E. O. 威尔逊专题

# E. O. 威尔逊与岛屿生物地理学理论

阎恩荣<sup>ID\*</sup>, 斯幸峰<sup>ID</sup>, 张健<sup>ID</sup>, 陈小勇<sup>ID</sup>

华东师范大学生态与环境科学学院, 上海 200241

阎恩荣, 斯幸峰, 张健, 陈小勇 (2022) E. O. 威尔逊与岛屿生物地理学理论. 生物多样性, 30, 22024. doi: 10.17520/biods.2022024.

Yan ER, Si XF, Zhang J, Chen XY (2022) Edward O. Wilson and the Theory of Island Biogeography. Biodiversity Science, 30, 22024. doi: 10.17520/biods.2022024.

## Edward O. Wilson and the Theory of Island Biogeography

Enrong Yan<sup>ID\*</sup>, Xingfeng Si<sup>ID</sup>, Jian Zhang<sup>ID</sup>, Xiaoyong Chen<sup>ID</sup>

School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241

20世纪伟大的博物学家和生物地理学家爱德华·奥斯本·威尔逊(Edward Osborne Wilson, 1929–2021)与杰出的理论和数学生态学家罗伯特·赫尔默·麦克阿瑟(Robert Helmer MacArthur, 1930–1972)共同开创的岛屿生物地理学理论是他们青年时代的巅峰之作。但是, 由于威尔逊后来在昆虫学和社会生物学等领域的巨大成就, 加之麦克阿瑟的英年早逝, 在很多介绍威尔逊学术成就的出版物中, 往往没有详细交代他们在岛屿生物地理学理论上的合作佳话。在威尔逊刚辞世之际, 回顾他在岛屿生物地理学领域的宝贵科学遗产, 评述其对推动科学革命的贡献, 一方面为了缅怀他勇敢探索、富于创新和谦逊合作的优秀个人品质, 另一方面也启迪我们要拥有勇于挑战学术高峰的科学精神。

岛屿生物地理学理论最早在*Evolution*期刊发表(MacArthur & Wilson, 1963), 随后又以专论形式系统阐述(MacArthur & Wilson, 1967)。他们的最终目标是发展一个基于迁入、局部灭绝、物种形成等基本生态和进化过程的动态生物地理学的一般理论, 用来解释各种各样的孤岛现象, 包括物种丰富度模式、物种拓殖定居能力和生态位转换, 以及孤立生物类群的进化。多年来, 尽管受到一些批评, 岛屿

生物地理学理论为理解生物多样性的形成和维持机制奠定了可预测的理论基础, 更开辟了20世纪中期科学革命结构转变的新范式(从静态描述到动态定量)(Kuhn, 1996), 从而为生物地理学、生态学和进化生物学等提供了真正具有变革性的见解。

以下, 我们简要回顾威尔逊的物种进化知识启蒙教育、南太平洋岛屿考察、生物类群循环理论(theory of taxon cycles)、岛屿生物地理学理论及其控制实验验证, 最后, 简单总结岛屿生物地理学理论的科学价值。

### 1 物种扩散和进化知识的启蒙

威尔逊成为一名科学家的动力源于对自然界中生物(包括其毕生研究的蚂蚁类群)不可抗拒的热情。他一开始对鸟类感兴趣, 后来右眼在钓鱼时不幸误伤失明, 无法远视, 就转向研究昆虫。正如达尔文的自然选择理论受益于亚历山大·冯·洪堡(Alexander von Humboldt)、詹姆斯·赫顿(James Hutton)、查尔斯·莱伊尔(Charles Lyell)、托马斯·罗伯特·马尔萨斯(Thomas Robert Malthus)等那个时代其他有远见的科学家一样, 威尔逊攻读研究生时(1950年)就对古生物学家威廉·迪勒·马修(William

收稿日期: 2022-01-12; 接受日期: 2022-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(32030068)

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: eryan@des.ecnu.edu.cn

Diller Matthew)提出的北温带是新生代物种起源中心(Matthew, 1915), 以及后来菲利普·达林顿(Philip Darlington)将物种起源中心确定为旧世界热带地区(Darlington, 1948)的学术观点产生浓厚兴趣。据威尔逊回忆, 马修和达林顿这史诗般的全球疆域的生物地理学观点一直刻在他的脑海中, 极大地启发了他的科学想象力(Wilson, 1994)。

与大多数博物学家类似, 威尔逊也选择新世界热带地区开始自己的职业生涯。23岁时(1953年), 哈佛大学的研究生奖学金资助了他在古巴和墨西哥的科学考察。他最具影响力的导师之一达林顿是著名的昆虫学家和动物地理学家, 同时也是他在哈佛大学的同事。当他准备第一次热带采集之旅时, 达林顿为这位前途无量的研究生提供了极具帮助的建议。

## 2 结缘南太平洋岛屿

1954年3月, 达林顿向威尔逊提供了一个千载难逢的机会——去南太平洋的新几内亚群岛采集蚂蚁标本, 他毫不犹豫地接受了这份礼物。正如威尔逊在自传中所述(Wilson, 1994): “一百年前, 年轻的华莱士在那里开始动物分布研究, 并将动物地理学转化为一门科学学科, 而我也正在这个领域开始工作。谁知道这段经历会如何改变我成为一个动物地理学家的想法?”

1954年11月24日, 威尔逊离开波士顿开始了10个月的南太平洋远行。12月, 先在斐济的维提拉武岛采集到了几种当地特有的蚂蚁种类。短暂停留后, 前往美拉尼西亚群岛最南端的新喀里多尼亚, 这里的动植物是在近数百万年间陆续由澳洲往东或是由所罗门群岛经由新赫布里底群岛(New Hbrides)往南迁移而来, 彼此交流, 进化出了独特的生态谱系。在努美亚附近, 他采集的粗角蚁属(*Cerapachys*)和束蚁属(*Sphinctomyrmex*)是人类首次采集到的蚂蚁新物种。他发现, 粗角蚁属工蚁为了征服猎物, 以类似热带大陆地区的行军蚁的方式, 集体出猎。行军蚁分布于亚洲和澳洲, 无法渡过珊瑚海(Coral Sea)到达新喀里多尼亚定居。粗角蚁属蚂蚁在此地所采取的行军蚁生活方式, 或许是它们在这里如此“成功”拥有优势地位, 而罕见于其他大陆的原因。威尔逊当时对这个现象的描述和推测, 事后被证明

对于追踪蚂蚁进化过程非常重要。他在回忆录中写道: “这个想法在当时并未成形, 之所以记录它们, 纯粹是因为兴趣。然而, 三年后在重新建立行军蚁的进化起源时, 这份野外记录派上了大用场”(Wilson, 1994)。

1955年1月初, 威尔逊到达新赫布里底群岛(现在的瓦努阿图), 这里是前往西太平洋更偏远岛屿的驿站, 向北, 由纯热带的所罗门群岛接收来自亚洲的生物; 向南, 由亚热带的新喀里多尼亚接收来自澳洲的生物。那时, 从来没有人在这里采集过蚂蚁, 因此, 他的每一条记录都是新的发现。2月, 他专门去西澳大利亚的埃斯佩兰斯(Esperance)寻找最原始的大眼响蚁(*Nothomyrmecia macrops*), 用来研究蚂蚁的社会生活起源, 可惜没有找到。3月份, 转战“最标准”的热带地区新几内亚, 先在布朗河谷采集到了50种蚂蚁, 其中很多是未知的新种; 之后, 在苏加利高原山脚的雨林, 找到了以集群形式寄生在其他种类蚂蚁窝巢中的种类。

4月, 他到达新几内亚东北胡安半岛(Huon Peninsula)的沙拉威吉山脉(Sarawaget Range), 在这个从未被昆虫学家造访过的大山里采集并研究蚂蚁。这次山地之旅虽然在蚂蚁采集上没有什么特别之处, 但在返程的路上, 威尔逊却在蚂蚁的分歧进化问题上灵光乍现。他在思考新几内亚的蚂蚁分布现象。虽然每公里间的森林外貌结构变化非常小, 但蚂蚁群落的结构变化却相当惊人。这些变异来源有些是栖息地的根本变化, 但是, 许多变异并不容易解释, 尤其是地理距离增加所造成的物种变化。1958年, 他专门就此写了一篇文章(Wilson, 1994):

无论从比较生态学的哪一个层面来评价, 新几内亚蚂蚁群落最大的特点莫过于物种超级丰富。……除了单纯的数量外, 个别物种不一致的片断分布增加了整个群落的复杂度。没有任何两个地点具有完全相同的动物群落。想想看, 上百种蚂蚁因此而发生进化, 显然, 整个新几内亚动物群落的时空结构必定表现出万花筒般的面貌。这对个别蚂蚁物种的进化所产生的效果一定是非常可观的, 很可能促进了局域种群在遗传方面的分歧进化……。

威尔逊非常高兴自己能在未经训练的采集和长途考察中感悟出一个事后被证明应用广泛的生态学模式, 也就是生物类群循环理论。完成新几内



亚群岛考察后,他在澳洲昆士兰雨林继续调查了一周。之后,在斯里兰卡寻找到了全世界最罕见的西蒙原臭蚁(*Aneuretus simoni*)。至此,热带岛屿的野外工作结束。

### 3 生物类群循环理论的提出

对新几内亚和美拉尼西亚蚂蚁的考察研究,从根本上改变了威尔逊的科学生涯,使其从一个传统的系统学家和博物收藏家转变为一个非常有洞察力和口才出众的生物地理学家、进化生物学家和生物多样性保护者。从南太平洋岛屿回来不久,他就开始整理和发表考察成果,其中,有关生物类群循环的两篇论文成为了他与麦克阿瑟关于物种平衡理论的序篇。1959年,威尔逊提出了初步的理论和分析,然后成功地将这一理论扩展为更全面、更完整的岛屿生物历史和生态动态理论(Wilson, 1961)。

之前由达尔文和华莱士发展起来的起源-扩散-适应中心(the Center of Origin-Dispersal-Adaptation, CODA)思想的一个关键特征是物种和生物群落的优势现象。Matthew (1915)、Simpson (1943)和Darlington (1948)假设,从起源中心扩散出来的物种会占据主导地位,取代占据外围区域的物种。威尔逊着迷于这些观点,因此开始确定生物地理优势的生物学本质。他把CODA的传统认知从全球和地质尺度聚焦到局域尺度,如群岛和岛屿尺度。

事实上,20世纪50年代后期的生物地理学已具备了这种革命性思想成熟的时机,理论发展到极限,积累了一堆例外和问题,未能将观察到的格局与其他学科结合起来。然而,生态学、进化生物学和种群生物学的新进展,使这种综合成为可能。正如威尔逊在阐述他的理论时所描述的那样,“普遍适应的本质和主要生物迁移扩散背后的机制显然是现代进化理论的重大问题之一。我们现在的知识可以并且应该能对这些因果过程进行更精细的分析。”

威尔逊的理论确实是无与伦比的,因为它具有跨领域整合的能力,解释和证明了一系列生物地理模式和现象的因果联系。他总结道:“利用扩张、多样化和收缩循环模式的科学假说,可以解释最初扩散之后的进化事件”。他推测,大多数猛蚁(ponerine ants)是按照Darlington (1957)所描述的“迁移格局形式”,遵循“经典的过滤效应”,从东南亚入侵新几内

亚,再拓殖到美拉尼西亚(Wilson, 1959)。在岛屿和群岛上,物种组成的这种非常规律的衰减模式,相当于当代科学家所说的群落“嵌套”,在威尔逊所描述的现象中,这是一种由关键物种间迁移能力差异所驱动的模式。

威尔逊将生物类群循环定义为3个阶段的进化和生态变化序列。第一阶段的物种是那些在群岛或区域具有相对连续地理分布范围的物种,它们的性状无地理差异。岛屿种群已适应大陆来源地的海滨栖息地,因此易于扩散,并可预适应和拓殖定居于具有类似栖息地特征的岛屿边缘。随后,这些拓殖种群就会进入“进化陷阱”(Mayr, 1942; Darlington, 1957),因为海滨栖息地不仅是边缘的,而且是短暂的,容易受到演替或大规模风暴等灾难性事件的破坏。然而,一些拓殖种群可能会通过适应和入侵美拉尼西亚岛体内部的雨林,从而逃离海滨生境,并与拓殖和祖先种群隔离,最终为群岛种群的进化分歧创造条件。如果进化分歧持续到后代种群中形成新种的程度,那么它们就进入生物类群循环的第二阶段。这些岛屿特有种经历了性状更替和生态位转化,因此变得越来越特化于岛屿内部生境。

如果分化和特化进展到这个程度,岛屿本土特有种就容易在群岛内和整个群岛灭绝,从而进入生物类群循环的第三阶段。曾经广布的岛内本土特有种的地理范围缩小,成为局限于一两个岛屿的残余种。威尔逊假设:“对大多数种群来说,下一个也是最后一个步骤是局域灭绝(整个群岛),或极端特化,并可能因第一和第二阶段物种的入侵产生的新竞争而加速。”他用非常清晰而又深刻的术语描述了这一系列相互关联的进化和生态现象的驱动力:种间相互作用。在海滨及其边缘和临时栖息地的不同拓殖过程之后,种间相互作用驱动了岛内物种行为、栖息地和地理分布的改变,以及种群与特有种的分化和灭绝。

值得注意的是,虽然威尔逊在两篇论文中都没有使用“平衡”这个词,但他在1959年的论证中提出了物种周转和自然平衡的概念,并称之为“饱和”(saturation)。单岛动物群落接近岛屿大小所设定的上限。可以推断,作为一种法则,只有在原有物种灭绝为它们腾出空间的情况下,新物种才可以入侵一个岛屿。因此,威尔逊的饱和概念更类似于Lack

(1937)的填满岛屿生态空间的想法,而不是Munroe (1963)及后来麦克阿瑟和威尔逊的物种平衡概念,后者没有上限,而是代表了迁入、灭绝和成种率间的动态平衡。

Wilson (1961)通过描述物种饱和数量如何随岛屿面积和隔离度的变化,进一步论证了生物类群循环的地理背景。他将种面积关系,至少部分归因于岛屿面积和物种灭绝间的反比关系。需要指出的是,威尔逊对种面积关系的数学建模相对简单,但基于相同的公式,MacArthur和Wilson (1963)的幂函数或双对数模型将其作为数学核心。无论如何,威尔逊确实观察到幂函数模型的幂在动物类群间和动物分布区间的差异,他认为变异残差(在种面积关系中分散)是由人为干扰导致的岛屿间栖息地差异造成的,或者仅仅是由于岛屿动物取样完整性不同导致的。这就是威尔逊的初始理论的数学运算应用程度,两篇论文都没有提供描述循环过程平衡的数学公式。

虽然生物类群循环理论是描述性的,但其概念框架的前景是不可否认的,在科学革命中发挥了至关重要的先驱作用,为岛屿生物地理学提出了一个引人注目的新范式,超越了传统的岛屿生物地理学静态理论,证明了生态和进化过程是动态的、反复的和相互关联的。

#### 4 与麦克阿瑟的第一次合作: 岛屿物种平衡理论

1961年,在纽约举行的美国科学促进会会议上,拉里·斯洛博金(Larry Slobodkin)将麦克阿瑟(两人都是哈钦森的研究生)介绍给威尔逊。威尔逊和麦克阿瑟有很多共同点,包括对博物学和生态学的热爱,以及对生物多样性和地理普适性解释的渴望(Wilson 1994)。威尔逊觉得生物地理学处于“大混乱”状态,“新思想的时机已经成熟”,就给麦克阿瑟分享他关于岛屿、生物类群循环和自然平衡的想法。麦克阿瑟对生物地理学也很着迷,他很快同意与威尔逊合作,用自己的概念综合和数学抽象能力补充威尔逊的理论结构。

他们第一次合作的目标在论文最后一段有明确的说明:“处理可能适用于其他动物的通用平衡准则,以及平衡状态的一些生物学含义”

(MacArthur & Wilson, 1963)。这确实是一个非常恰当的描述。无疑,他们的模型具备实现已经酝酿了几十年的科学革命的潜力。但他们认为,首先有必要在一篇严谨的论文中阐明他们模型的基本前提,因此就促成了他们第一篇合作论文在*Evolution*发表。

但是,这篇具有革命性的论文的战略意义有限。虽然其隐含目标是进一步从定性和定量两方面发展出生物类群循环理论,但他们首次合作关注的仅是鸟类群落的物种丰富度格局及其平衡成因,或如他们所说,迁入、灭绝和成种等反复过程间“非常动态的平衡”。事实上,他们在第一次合作中过于保守,以至于将推论局限于一个特定的类群——印度-澳洲岛屿鸟类群落。除了有限的生物类别,显然,包括群岛内和跨群岛的物种组成(即镶嵌分布和群落嵌套)、性状和生态位转化、生态释放,以及岛内和岛间种群局域特化等,都是超出这篇论文以外的有趣格局。

正如他们在摘要中所述,该论文的主要目的是“表达平衡状态的标准和含义,而不是将它们扩展到印度澳洲鸟类群落之外。”威尔逊和麦克阿瑟都是杰出的博物学家,他们之前的研究清楚说明了种间差异和相互作用在塑造岛屿地理格局方面的重要性。然而,在他们的模型中,物种被视为“黑箱”。他们强调:我们知道它们是不同的,但在动态平衡的假设下,这些差异可能不是解释物种丰富度格局的必要条件。

他们构建的物种中性模型(species-neutral model)是革命性的。这一成功很大程度上源于麦克阿瑟和威尔逊采用图形和数学互补形式巧妙地解释了两物种丰富度的普适模式。对大多数科学家来说,由此产生的模型既容易理解又易于解释,而且经得起逻辑推敲和可证伪预测的考验。例如,他们不仅证明了动态平衡如何解释物种-面积关系和物种-隔离度关系,而且还证明了为什么尽管物种组成发生了变化,物种丰富度仍然相对稳定。此外,他们证明了如何采用物种中性模型的数学形式估计类群平均扩散距离等种群性质,动物多样性平衡被打破(例如飓风或火山爆发)后岛屿物种饱和度的动态,以及再次达到均衡所需的时间。模型的图形形式还能够发展出一套关于岛屿群落生物地理动态

(例如迁入、灭绝和周转率应随面积、隔离度、气候以及源区物种数量而变化)的定性和可证伪的预测,这对他们理论的评估和未来发展同样重要。

为了证明物种平衡理论,他们从威尔逊的物种适应区视角,利用Dammermann (1948)关于1883年火山爆发后喀拉喀托(Krakatau)鸟类动态的详细记录,在动态平衡背景下,计算并检验他们的理论预测。结果发现,到1933年,喀拉喀托已被6种广布的本地猛蚁所拓殖。喀拉喀托火山的案例很好地证明了岛屿物种通过快速而反复的拓殖和积累,群落趋于饱和,最终灭绝平衡了迁入——这就形成了生物类群循环的中心前提,成就了岛屿生物地理学的平衡理论。

喀拉喀托火山的事实也令人信服地证明了借助天然事件开展实验的效用,同时,也为巧妙设计岛屿生物地理学野外人工控制实验播下了创造性的种子,包括由威尔逊和他的研究生丹尼尔·辛伯洛夫(Daniel Simberloff)所设计的经典的红树林岛礁节肢动物去除实验。

## 5 与麦克阿瑟的第二次合作: 岛屿生物地理学理论

1963年论文发表后,威尔逊与麦克阿瑟成了亲密朋友。1964年12月,他们决定写一本关于岛屿生物地理学的全面书籍,目的是创造新的模型,并将他们的理论模型扩展到尽可能多的生态学领域。3年后,他们的跨时代著作*The Theory of Island Biogeography*出版。威尔逊后来在评价他们专著的成功时说:“麦克阿瑟和我完成了大部分我们要做的事情。以种群生物学为基础,我们开始统一,或至少开始统一生物地理学和生态学。”

这本专著是自达尔文和华莱士以来最全面的生物地理学理论著作。除了两章导论和发展平衡理论的第3章,其他5章探讨了广泛的主题,包括:*r/k*选择及其与进化的相关性,以及岛屿种群的建立(第4章);种群统计学、种间相互作用和生态位动态(第5章);扩散曲线、群岛几何学和生物交换(第6章);以及拓殖定居和适应性扩散之后的进化变化(第7章)。在专著中,平衡模型最具革命性的特征,但他们的目标远比这个更宏大、更全面。在该书出版之前,他们给当时在密歇根大学的斯洛博金寄送了一

份草稿和注释,提出了他们的最终目标,那就是,不仅改变岛屿生物地理学,而且改变整个生物地理学领域(Lomolino & Brown, 2009)。

与威尔逊关于生物类群循环的原始论文形成鲜明对比的是,专著*The Theory of Island Biogeography*没有包括一幅物种分布图。可以猜想,这是有意而为,重在强调普适性和综合价值,而不是过分描述和解释特殊细节。不幸的是,他们混淆了最终目标,在发展普适理论时,仍以物种和过程为基础,即物种生物地理学的基本过程(如迁入、灭绝和成种)有何不同。因此,他们在结论中回到了非常普适的主题,呼吁生物地理学领域“按照种群生态学和遗传学的首要原则重新制定……暂时不关注传统的高等类群分布和地质变化的作用问题……转而详细研究选定物种。物种的生物地理学需要理论和实验,而这些理论和实验在很大程度上必须是新颖的”。

需要指出的是,不管我们如何评价这本著作的成功或不足,它无疑对岛屿生物地理学以及生态学和进化生物学等都产生了革命性的影响(图1)。威尔逊后来也很欣慰地总结道:“岛屿生物地理学理论经历了40余年的考验,被证明总体上是正确的”(Wilson, 2009)。虽然岛屿生物地理学理论对于最大和最复杂的系统来说仍然解释力有限,但已经发挥了足够的作用,成为生态学和生物地理学的重要组成部分,也是保护生物学的基石。

## 6 寻找岛屿生物地理学理论的实验证据

虽然岛屿生物地理学构想很好地按照他们设定的目标发展,但终归是停留在书本上和口头上的理论。威尔逊是一个忠实的野外生态学家,他非常渴望在现实的岛屿上检验他们的新理论。但是,由于路途的遥远,回到美拉尼西亚是不可能的。于是,就产生了在离家近的地方建立海岛生物学自然实验室的想法。在这个梦想的诱惑下,威尔逊很快想到佛罗里达群岛是一个合乎逻辑的去处,因为有众多的岛礁可供选择。

威尔逊认为,研究实验岛屿生物地理学最好的方法是从许多生态相似但面积和距离不同的小岛开始,然后把它们变成微型的喀拉喀托火山。也就是说,找到一种方法来根除动物群落,然后跟踪物



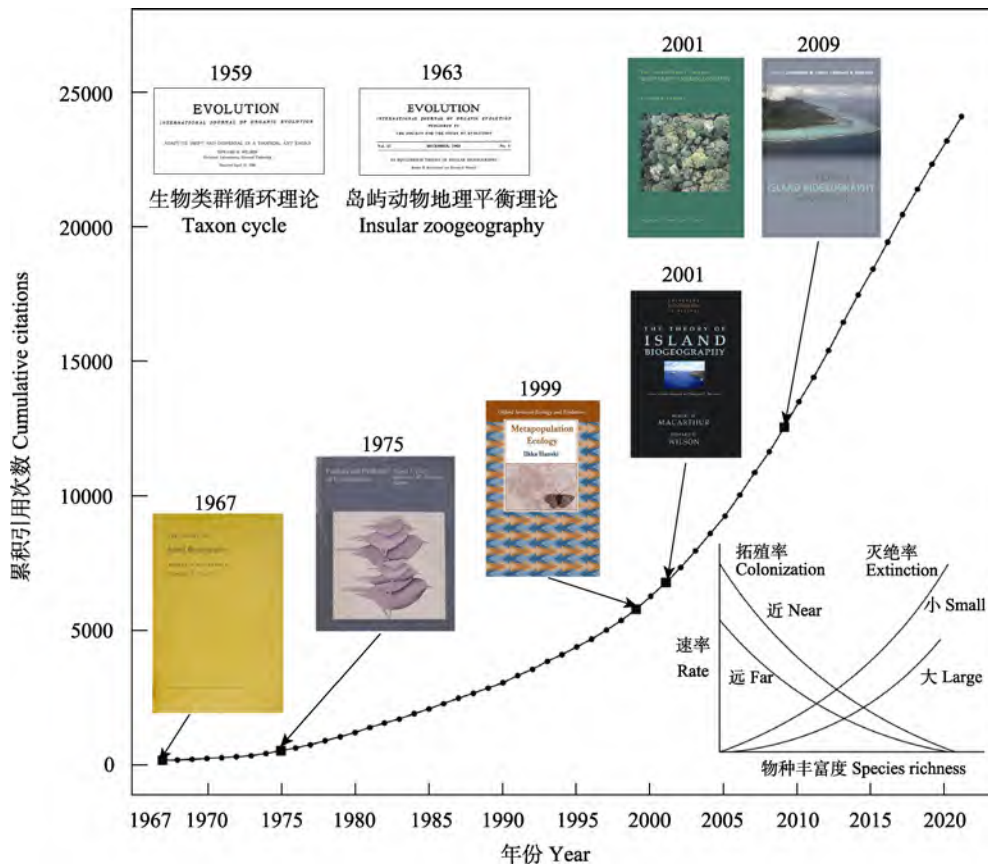


图1 《岛屿生物地理学理论》专著的累积引用次数。图示重要前期理论基础、后续纪念专辑与衍生理论(如: 集合种群理论、群落生态学的中性理论)。

Fig. 1 The cumulative citations of *The Theory of Island Biogeography*. In this figure, two important foundation works of this theory, the memorial monographs, and the derived theories (e.g., metapopulation theory, and the neutral theory in community ecology) are highlighted.

种重新拓殖的过程。第一次选择的地点是地处墨西哥湾的干龟群岛(Dry Tortugas)。1965年夏天,他与研究生系统调查了岛礁,在上面发现了为数不多的植物和节肢动物。他们的想法是让现状继续,等待飓风完全清除了岛屿生物后,跟踪观察植物和节肢动物的重新拓殖过程。如有神助,当年就有两次飓风席卷了干龟群岛。当1966年返回调查时发现,几个月前观察的岛礁没有了陆地生物。这样,他们的研究就开始了。

然而,威尔逊对这个实验的前景越来越不满意。因为岛屿和动植物群落太少,飓风太少也难以预测,并且无法控制。于是,他又去了佛罗里达湾的红树植物岛(Mangrove Islet),这里没有干龟群岛的缺点,但有其他不足,那就是飓风不可能把所有的节肢动物都从茂密的红树林叶子上带走(Wilson, 2009)。

威尔逊与博士生丹尼尔选择了位置最有利和最合适的红树植物岛,请专业的灭虫专家史蒂夫·坦德里希(Steve Tendrich)在不损害植被的情况下,使用甲基溴熏蒸法“去除”节肢动物。之后,丹尼尔开始每月对每个红树植物岛逐厘米进行检查的艰苦过程,同时,在分类学家的帮助下,将这些小岛上的甲虫、树皮虱、蛾类、蜘蛛、螨虫和其他节肢动物分类到种水平(Simberloff & Wilson, 1969)。

两年内,所有红树植物岛上的物种数量差不多恢复到了灭绝前的水平。如预期的那样,最遥远的红树植物岛一开始的物种数很少,后来又恢复到原来的低水平,从而证明了物种平衡的存在。然而,令人惊讶的是,红树植物岛间物种组成存在差异,同一岛上的物种在灭绝前后也存在差异(Simberloff & Wilson, 1971)。此外,大多数物种重新定居的速度和广泛而频繁的周转,也基本符合麦克阿瑟-威

尔逊平衡模型。

## 7 岛屿生物地理学理论: 科学革命的典范


麦克阿瑟和威尔逊的物种平衡理论强烈地影响了生物地理学、生态学和进化生物学等相关理论的科学思维(Kuhn, 1996)。岛屿生物地理学理论解决了20世纪该领域的前范式困境,即,由独立个案到多时期和多站点,以及从扩散论向起源-扩散-适应中心思想转变,这些思想达到了生物地理学传统静态理论的极限。作为回应,大胆而富有远见的威尔逊与麦克阿瑟开创性地提出了生物类群循环理论和岛屿物种平衡理论,从而化解了这场科学危机。


麦克阿瑟和威尔逊的物种平衡理论之所以能够得到迅速和压倒性的赞誉,在很大程度上可归功于3个因素:(1)相对简单性和由此产生的美学吸引力;(2)及时性,即在具备必要的科学工具的情况下取得先进性;(3)真实、协作性质,即,现实性。


岛屿生物地理学理论提出后,我们关于多尺度生物地理过程的理解取得了巨大进步(图1),在理论方面,为分析和解释宏观群落提供了生态过程新模型(Cody & Diamond, 1975),并衍生形成了集合种群理论(Hanski, 1999)和中性理论(Hubbell, 2001),在实践方面,有效地推动了生物多样性保护和自然保护区规划(Diamond et al, 1976)。2017年,在*The Theory of Island Biogeography*发表50年之际,世界各地的生态学家和生物地理学家通过各种方式纪念这一伟大成果对生态学和进化学等领域的贡献。2016年的国际岛屿生物学大会在总结该领域50年来发展成果的基础上,通过问卷调查,系统梳理了岛屿生物地理学未来的发展路线图,遴选出了50个亟需重点解决的科学问题(Patiño et al, 2017)。可以预见,生物地理学正在经历一波新的范式转变,或者更恰当地说是范式整合(Whittaker & Fernández-Palacios, 2007; Losos & Ricklefs, 2009; Warren et al, 2015; Whittaker et al, 2017)。但无论如何,新的范式应该与威尔逊的原始理论共享一些基本属性(Pickett et al, 2007; Lomolino & Brown, 2009)。

### ORCID

阎恩荣  <https://orcid.org/0000-0002-8064-3334>

斯幸峰  <https://orcid.org/0000-0003-4465-2759>

张健  <https://orcid.org/0000-0003-0589-6267>

陈小勇  <https://orcid.org/0000-0002-4795-8940>

### 参考文献

- Cody ML, Diamond JM (1975) *Ecology and Evolution of Communities*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.
- Dammermann KW (1948) The fauna of Krakatau, 1883–1933. *Koninklijke Nederlandsche Akademie Wetenschappen Verhandelingen*, 44, 1–594.
- Darlington PJ (1948) The geographical distribution of cold-blooded vertebrates. *The Quarterly Review of Biology*, 23, 1–26.
- Darlington PJ (1957) *Zoogeography: The Geographical Distribution of Animals*. John Wiley & Sons, New York.
- Diamond JM, Terborgh J, Whitcomb RF, Lynch JF, Opler PA, Robbins CS, Simberloff DS, Abele LG (1976) Island biogeography and conservation: strategy and limitations. *Science*, 193, 1027–1032.
- Hanski I (1999) *Metapopulation Ecology*. Oxford University Press, Oxford.
- Hubbell SP (2001) *The Unified Neutral Theory of Biodiversity and Biogeography*. Princeton University Press, Princeton.
- Kuhn TS (1996) *The Structure of Scientific Revolutions*, 3rd edn. University of Chicago Press, Chicago.
- Lack D (1937) The psychological factor in bird distribution. *British Birds*, 31, 130–136.
- Lomolino MV, Brown JH (2009) The reticulating phylogeny of island biogeography theory. *The Quarterly Review of Biology*, 84, 357–390.
- Losos JB, Ricklefs RE (2009) *The Theory of Island Biogeography Revisited*. Princeton University Press, Princeton.
- MacArthur RH, Wilson EO (1963) An equilibrium theory of insular zoogeography. *Evolution*, 17, 373–387.
- MacArthur RH, Wilson EO (1967) *The Theory of Island Biogeography*. Princeton University Press, Princeton.
- Matthew WD (1915) Climate and evolution. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 24, 171–318.
- Mayr E (1942) *Systematics and the Origin of Species, from the Viewpoint of a Zoologist*. Columbia University Press, New York.
- Munroe E (1963) Perspectives in biogeography. *The Canadian Entomologist*, 95, 299–308.
- Pickett STA, Kolasa J, Jones CG (2007) *Ecological Understanding: The Nature of Theory and the Theory of Nature*. Academic Press, Burlington.
- Patiño J, Whittaker RJ, Borges PAV (2017) A roadmap for island biology: 50 fundamental questions after 50 years of the Theory of Island Biogeography. *Journal of Biogeography*, 44, 963–983.
- Simberloff DS, Wilson EO (1969) Experimental zoogeography of islands: Defaunation and monitoring techniques. *Ecology*,

- 50, 267–278.
- Simberloff DS, Wilson EO (1971) Experimental zoogeography of islands: A two-year record of colonization. *Ecology*, 51, 934–937.
- Simpson GG (1943) Mammals and the nature of continents. *American Journal of Science*, 241, 1–31.
- Warren BH, Simberloff D, Ricklefs RE, Aguilée R, Condamine FL, Gravel D, Morlon H, Mouquet N, Rosindell J, Casquet J, Conti E, Cornuault J, Fernández-Palacios JM, Hengl T, Norder SJ, Rijsdijk KF, Sanmartín I, Strasberg D, Triantis KA, Valente LM, Whittaker RJ, Gillespie RG, Emerson BC, Thébaud C (2015) Islands as model systems in ecology and evolution: Prospects fifty years after MacArthur-Wilson. *Ecology Letters*, 18, 200–217.
- Wilson EO (1959) Adaptive shift and dispersal in a tropical ant fauna. *Evolution*, 13, 122–144.
- Wilson EO (1961) The nature of the taxon cycle in the Melanesian ant fauna. *The American Naturalist*, 95, 169–193.
- Wilson EO (1994) *Naturalist*. Island Press, Washington, DC.
- Wilson EO (2009) Island biogeography in the 1960s. *The Theory of Island Biogeography Revisited*. (eds Losos JB, Ricklefs RE), pp. 1–12. Princeton University Press, Princeton.
- Whittaker RJ, Fernández-Palacios JM (2007) *Island Biogeography: Ecology, Evolution and Conservation*, 2nd edn. Oxford University Press, New York.
- Whittaker RJ, Fernández-Palacios JM, Matthews TJ, Borregaard MK, Triantis KA (2017) Island biogeography: Taking the long view of nature's laboratories. *Science*, 357, eaam8326.

(责任编辑: 周玉荣)





•论坛• 纪念E. O. 威尔逊专题

# E. O. 威尔逊的“博物学家”头衔

刘华杰\*

北京大学哲学系, 北京 100871

刘华杰 (2022) E. O. 威尔逊的“博物学家”头衔. 生物多样性, 30, 22014. doi: 10.17520/biods.2022014.

Liu HJ (2022) On Edward O. Wilson's title naturalist. Biodiversity Science, 30, 22014. doi: 10.17520/biods.2022014.

## On Edward O. Wilson's title naturalist

Huajie Liu\*

Department of Philosophy, Peking University, Beijing 100871

威尔逊(Edward O. Wilson, 1929–2021)是哈佛大学著名学者, 取得多方面的成就, 有许多头衔, 如昆虫学家、演化生物学家、社会生物学家、思想家等。我特别关注他的博物学家(naturalist, 也可译作“博物者”)头衔(Nichols, 1991; MacGregor, 2018), 他本人也特别在意这个称号, 并把它用作自传《博物学家》的书名(Wilson, 1994)。

在科学界, 博物学家现在并非一个高大上的称号, 威尔逊愿意使用它不是出于谦虚。他在许多场合, 在诸多作品中都透露、确认甚至强调自己的博物学家身份, 在今日世界能这样做的人极少, 这本身就是一个值得研究的现象。当今科学界并不欣赏博物学(natural history) (Dayton & Sala, 2001; Schmidly, 2005), 科学家即使同时是博物学家, 也不愿意被同行这样称谓。现在博物学家一词在一定语境下有一定的贬义, 隐含的意思是, 只会做肤浅的工作。就像一些科学家在公开场合都赞扬科普工作, 但私下里最瞧不起做科普的一样, 如果科学圈的某人被称作“搞科普的”, 相当于被羞辱。这种倾向并非空穴来风, 1939年经贝尔纳(John D. Bernal, 1901–1971)转述的卢瑟福(Ernest Rutherford, 1871–1937)的一句名言说: “所有科学要么是物理学要么是集邮!”卢瑟福本人从事的是物理学, 是真学

问、深刻的学问; 其他人做的可能只是集邮一类的学问, 勉强可算作科学, 但相比于物理学很肤浅。比照起来, 威尔逊的一生也未能逃出上述“学科鄙视链”的嘲讽。

威尔逊清楚地知道自己属于什么传统, 有着怎样的学术抱负。除了研究昆虫, 他顺着布丰(Georges Buffon, 1707–1788)、康德(Immanuel Kant, 1724–1804)、达尔文开辟的路线前行, 以自然主义进路扎实推进着康德青年时期畅想的“万有博物学”(Allgemeine Naturgeschichte) (Kant, 1755)。万有博物学跟万有引力有关, 康德在布丰和牛顿的基础上设想了一种新型的博物学。被恩格斯高度评价的康德31岁时的一部作品, 其书名 *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels* 在中国没有被恰当地翻译过, 加上博物学式微, 人们确实不容易关注和理解。在中国, 多个译本及间接提及此书的, 迄今无一例外都误解了康德的意思, 多数学者不知道康德还有考虑过博物学。因为条件不成熟, 康德后来放弃了他“前批判时期”的宏伟计划。后来达尔文补充了生命世界统一解释的关键环节, 威尔逊则用演化论把基因、化学和文化贯通起来 (consilience) (Wilson, 1999), 丰富了达尔文的工作。有人说威尔逊是当代达尔文, 需要在这个意义上理

收稿日期: 2022-01-05; 接受日期: 2022-01-07

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: huajie@pku.edu.cn

解。今日,活跃的博物学家不算多却仍然有一些,但威尔逊这个级别的,没有第二人。扩展到所有学术领域,有如此综合各领域各层面知识之雄心者,找不到第二人,物理学家温伯格(Steven Weinberg, 1933–2021)与其相比也显逊色。

## 1 现代科学体制中不受重视的博物学与博物学家

终生研究蚂蚁的威尔逊有哪些主要成就?美国科学史家、曾经的科学史学会主席法伯(Paul L. Farber, 1944–2021)在《探寻自然的秩序》中有粗略的概括,此书副标题“从林奈到威尔逊的博物学传统”出现了威尔逊的名字(Farber, 2000)。科学史家把他的工作列为一个学术传统进行考察,这个传统就是博物学传统,在近现代起于林奈终于威尔逊。威尔逊是当今世界博物学的旗帜。他在,博物学在;他走了,谁来指引博物学的未来(刘华杰, 2022)?法伯在这本书中只写了一段历史,没写全,林奈之前博物学传统很长,一直可以顺畅地追溯到亚里士多德(公元前384年至公元前322年),也就是说西方书面有记录的博物学至少可以上溯到公元前四世纪,未记录下来的显然更久。就博物学这个术语而言,至少可顺畅追溯到老普林的*Historia Naturalis*。“顺畅”是指不绕圈直接进行,这与一些学科编史中的无限上溯非常不同。比较而言,西方科学的历史非常短,而西方博物学的历史非常长,科学家(scientist)这个词出现很晚。

约翰·雷(John Ray)、林奈等都不能算近代意义上的科学家。到了达尔文时代,对生命现象的研究仍不算标准的科学,达尔文自称博物学家,而非科学家。我专门统计过,1859年第1版《种的起源》(通常译作《物种起源》)使用博物学家(naturalist)一词97次,哲学家(philosopher) 1次,科学(science) 2次,科学家(scientist) 0次。开篇达尔文便说,作为“博物学家”自己如何如何登上了贝格尔号。威尔逊自称博物学家,也是在向前辈达尔文等大师致敬。许多媒体在报道威尔逊去世消息时,把他比作当代达尔文,有一定道理,但也不完全贴切。达尔文声名太大了,就思想深度和综合影响力而论,只有老子、亚里士多德、伽利略、牛顿、马克思、甘地等人可与之相比,威尔逊有点勉强。达尔文当年自称博物

学家,是没有选择,威尔逊则不同,供他选择的正当称号很多,如昆虫学家、社会生物学家、生物地理学家、昆虫信息素专家、科学家、生物学家、生物科学家等等,他本人偏偏喜欢一个过时的名称,必有其用意。博物学家也叫博物者、博物人,他们有何特点?博物学家也是一个谱系,种类繁多,风格不尽一致,但还是能够概括出若干共同特征:

(1)十分重视经验,在乎经验的多样性和差异性。他们普遍重视野外直接观察、收集数据。但并不等于他们不重视理论,只是比较而言通常不热衷于构造理论。经验积累到一定程度,他们也会构思自己的理论来解释现象,比如华莱士和达尔文。威尔逊也一样,他水到渠成地构思了“危险”的社会生物学理论,遭受到广泛误解。现在主流的经验科学非常重视经验,但是对合法的经验做了严格限定,只认可一定条件下的经验,普通人的诸多日常经验往往被排除在外。

(2)自然主义特征明显,采集到的数据相对肤浅、繁杂,但比较全面、多维。并非每个博物学家都能坚持彻底的自然主义(比如有的为上帝留下空间),但是多数人能用自然主义的观念看待现象,这也影响到他们对大自然的态度和研究方法。他们喜爱大自然,热衷于在大自然中探究“与环境保持着联络的”对象,而非切断了关联的孤立对象;他们会留意研究对象在更大的生态共同体中的位置、表现,因而对个体与群体、群体与环境的互动有着朴素、平衡的理解,不会走极端。关于选择层次问题,威尔逊的观点与其博物出身应当有深层关联。此类问题之争,表面上是科学之争,相当程度上是哲学、信念之争,因而很难说服对方。

(3)对世界的复杂性有充分的感受和认知,同时夹带着难以去除的情感和价值观,时常主客观不分。与后来兴起的分科之学相比,博物学家更关注“生活世界”,他们对现实世界的复杂性有相当的体认,由于经常反复观察他们锁定的对象和现象,他们掌握了自然状态下事物的较全面的信息,有较好的直觉。他们对“数理模型”和“控制实验”得出的结果,有着本能的警觉。

(4)在自然与人工对比上,他们往往倾向于前者。他们并非想否定人这个物种的独特性、创造性及其价值,而是因为更多接触自然物和其他生命,

从而更多地看到了人与其他动物的共性,比如林奈和达尔文都轻易地认识到人与猿、猩猩相距不远(在那些年代这是非常前卫的想法)。他们也因此容易避免文艺复兴、启蒙运动、主体性哲学取得成就的同时带来的主体膨胀,在思想上更容易接受非人类中心论。他们与人类学家一样,对“部落意识”(tribalism)有清醒的认知,对于教条、信仰有自然主义的见识;他们会尊重地方性知识、信仰但不会盲从。

(5)在今日社会,博物学家的研究成果整体上显得肤浅、难以直接转化为可操作的技术,与科学家相比对世界的影响也小许多。于是,一般而言,在当下博物学家通常并不能算作科学家,科学家也藐视这样的人。但反例总是有的,有的博物学家同时也是优秀的科学家,科学家中也有欣赏博物学家的。

威尔逊小时候在天堂海滩观察水母,受美国《国家地理》杂志影响而喜欢蚂蚁,博物学家的种子就已埋下。他将博物情怀保持终生,对大自然有惊奇感,直到去世他依然是那个少年。如《少年》所述:“我还是从前那个少年/没有一丝丝改变/时间只不过是考验/种在心中信念丝毫未减。”威尔逊深入领会了培根的学术推进方法论。培根是近代世界的鼓吹手、预言家、方法论大师。他的方法论没有神秘性,很好理解,但在他之前没有人把它阐述清楚。培根说要通过*historia naturalis et experimentalis* (natural and experimental history)来抵达真正的学术(Rees, 2007),此论点有肯定也有排除,肯定了古老的博物学探究方式和新兴的实验方法、否定了中世纪的经院繁琐论证。看似平凡,400年后回头审视,它依然十分精准。培根讲了两个东西,前者是博物学(相当于自然的探究),后者是实验研究。也就是说,培根在四大传统中讲了两个。英国皇家学会就是本着培根的方法论建立起来的,近现代科学在此基础上发展,势不可挡。

当代科学家高度重视控制实验传统,但严重忽视博物传统。本来生态学、地理学、昆虫学、植物学、林学、动物行为学、保护生物学这些学科有着直接的博物学起源,现在也变得越来越瞧不起自己的生母,就像所有的自然科学门类现在都排斥哲学一样。科学之创新品格鼓励忘本、喜新厌旧,这样做收获巨大,但也产生了一些不容忽视的问题,比如创新成了一种新神话,科学不断异化发展(Liu, 2019),

经常遗忘其意义基础。在我看来,坦率地说,生态学和保护生物学不可能是纯粹的自然科学,从业者强行把自己规训到自然科学的框架内,某种意义上背叛了这些学科的创始者,忘记了初心。打着科学的旗号,却仍处于“学科鄙视链”的末端,在哈佛大学、北京大学等演过的“学科大战”中难以避免受歧视,却能获得“现代性”的诸多好处。代价是,它们成为了现代科学体系中普普通通的一门学科,趋于丧失自己肩负的通向生态文明的历史使命,而其他学科可能压根不在乎虚无缥缈的生态文明,它们非常在乎“三更”(更快更高更强),即对世界的操控能力。

## 2 博物人生贯穿威尔逊的学术生涯

威尔逊去世后,中外传统媒体及自媒体的报道有一个细微的差别。英语世界的报道首先提及的是他的博物学家身份,而中文世界极少提及这一点。博物学在各地都受冷落,而我们这里尤甚。从事直接与博物类相关学科研究的若干著名学者(包括院士),甚至不知道*natural history*的基本含义。而不清楚*natural history*之起源和传承关系,就没办法理解威尔逊一生学术道路的内在关联。威尔逊在自传及多种作品中反复强调自己是一名博物学家(刘华杰, 2022),博物学之于威尔逊,犹如演化论之于生命科学。

美籍俄裔遗传学家、综合演化论创立者之一杜布赞斯基(Theodosius Dobzhansky, 1900–1975)受古人类学家德日进神父(Pierre Teilhard de Chardin, 1881–1955)的启发,讲了一句名言:“没有演化论,生物学将是一盘散沙”(Dobzhansky, 1973),意思是,不管当今对生命现象的研究有多热闹,学科分化得多厉害,也不管分子生物学、生理学研究有多深刻,但其背后隐隐约约有一条主线,一个支撑骨架,它就是博物学家达尔文开创的生命演化理论。演化是一道启蒙之光,照亮了各种分散的事实、数据和分支理论。类似地,对于威尔逊,博物学就像演化论一样,在他的一生中扮演重要角色,无论他研究蚂蚁、岛屿生物地理、社会生物学、生物多样性保育,还是撰写畅销书,背后都有博物学这根主线。而其他人士未必有这根主线,未必注意到博物学的价值。法伯的《探寻自然的秩序》以这样一句话结束了对威尔逊的评论:“博物学在生命研究中扮演主角已达两个多世纪,其重要性还会持续”(Farber, 2000)。威尔逊的



逝世,是博物学的巨大损失。希望主流学术界传承威尔逊的学术志趣,不要抛弃博物学这一古老传统。

从19世纪下半叶起,博物学渐渐退出学术主流,但来自博物学传统的洞见并非都是错误的、肤浅的。两个经典案例可以提醒后人。缪尔(John Muir)作为主流地质学界之外的博物学家,基于长时期反复的观察,提出冰川形塑内华达山脉地貌的新理论,却遭到科学家惠特尼(Josiah D. Whitney, 1819–1896)的嘲笑。惠特尼认为缪尔的看法只是“牧羊人”的荒谬想法。惠特尼的追随者金(Clarence King, 1842–1901)继续贬低缪尔,说他是业余人士,“缪尔先生的奇想不能蒙骗对加利福尼亚颇熟悉的地质学家们”(Worster, 2001)。实际上缪尔的理论是正确的,他也发表了关于冰川的系列文章(在非专业期刊上),却迟迟没有得到科学界的认可。第二个例子是关于地球年龄的,更有意思。在19世纪严格讲没有人确切知道地球的年龄,那么在定性估计上呢?博物学家(如莱尔、赫胥黎)水平远高于新兴起的严格的物理学家,比如汤姆森(William Thomson, 1824–1907)。事后看数理科学家错得离谱(Hallam, 1983)。当时双方都不知道放射性及太阳上有核反应。为何博物学家估计的年龄更准确?难道博物学家有什么制胜法宝?其实没有,如果非要找出理由,可以说是博物学家的“感觉”较好!他们对地球上地层、构造、矿物、化石等进行了持久的野外观察、描述,他们更了解这颗行星;物理学家虽然严格、深刻,但输入什么东西也输出什么东西(Garbage in, garbage out),推理的前提若是错的结果不可能对。

这种情况在21世纪的今天并没有完全杜绝,有时还严重妨碍对真相的了解。学者中,轻视野外调查,过分看重数学建模、数据加工的现象还是存在的。对于生态学、保护生物学、动物行为学、植物分类学、生物多样性保护、环境研究、可持续发展研究这些特殊的学科,传统的博物学思想和实践依然十分重要,但是野外工作十分辛苦,按现在的“论文考评机制”,野外工作“投入产出”不成比例,经济上不划算。不合理的激励机制给相关研究带来困惑,招收学生、申请经费、评奖都出现问题。威尔逊从读大学起,就利用一切机会进行野外调查,努力在自然环境中认真感受其研究对象,而这恰是许多学者所欠缺的。威尔逊能够做到多层次贯通,

从分子层面到宏观个体、群体,从昆虫信息素到昆虫生理,从动物行为到人类社会,从基因到思想,遍历昆虫学、化学、心理学、人类学、哲学、社会生物学甚至神学。博物学家气质显然起到了相当的作用,这一点上他与A.洪堡、达尔文、华莱士的进路完全一致,他们都能做到多学科交叉,对研究现象进行全方位把握。

当然,威尔逊不是保守的博物学家。自然科学发展至今,从方法论上考虑主要有四大传统:博物传统、数理传统、控制实验传统和数值模拟传统(刘华杰, 2020)。威尔逊一直努力吸收他本人原来不熟悉、不擅长的方法。他承认自己数学功底不佳,但他思想开放,先后与麦克阿瑟(Robert H. MacArthur, 1930–1972)、诺瓦克(Martin A. Nowak)等数学家合作,取得丰硕成果。他其实也不懂化学,但是仍然能够虚心学习,反而成为了专家。到后来,他本人除了对纯物理学没有很多接触外,四大传统中他差不多都有涉猎,用他开放的博物胸怀整合了分裂的自然科学研究现状。还不仅限于此,这还仅仅是就自然科学内部而言的交叉,威尔逊在此基础上与人文学术、社会科学广泛联姻,而这些是绝大多数自然科学工作者主动回避的。无论讨论什么问题,威尔逊都坚持了一以贯之的自然主义进路,他做得比达尔文更彻底,但也引来诸多评论,《地球的社会征服》出版后,神学家也有长篇反馈(Peters, 2013)。

### 3 博物学家对“利他魔咒”的基本看法

关于合作现象与利他问题,威尔逊与道金斯(Richard Dawkins, 1941–)展开论战。威尔逊出版《地球的社会征服》引来道金斯的“差评”(Dawkins, 2012; Flam, 2012),书评用了极特别的标题“威尔逊的由来”,故意模仿达尔文的书名《人类的由来及性选择》,说威尔逊犯了一大堆错误,误解了达尔文的演化论。他对威尔逊用个体与群体组合的多层选择理论取代“总和适合度理论”非常不满。道金斯特别指出威尔逊与人合作发表在《自然》上的文章(Nowak et al, 2010)引起140位演化生物学家的强烈批评!威尔逊的回应则很简短,温文尔雅。

对生物界广泛存在的合作和利他现象,科学家绞尽脑汁,试图给出一致的科学说明(科学解释),以霍尔丹(J. B. S. Haldane)、汉密尔顿(W. D.

Hamilton)、道金斯为代表,相继构造了亲缘选择、广义适合度(总和适合度)、自私的基因等概念和理论,推动演化心理学成为显学,它似乎什么都能解释。道金斯的观点与汉密尔顿的其实一样,只是表达方式不同,后者是研究者,前者是教头(Green, 2000)。但是,后来诺瓦克等与威尔逊在《美国科学院院刊》撰文指出汉密尔顿法则有致命弱点,比如缺乏预测功能(只能“预测”已经知道的数据)、成了“马后炮”、没有可证伪性等(Nowak et al, 2017),这相当于说先前受到追捧的精致理论是赝科学。威尔逊沿着自己开创的社会生物学进路行走,早期对汉密尔顿那套东西还是同情的,尽可能加以利用,但还是发现它们十分空洞,最终与之分道扬镳。威尔逊的观点是,要推进对社会起源的理解,必须依赖于传统方式,即通过野外调查和实验室探索,从大量数据里面披沙拣金、披榛采兰,做出归纳(Wilson, 2019)。威尔逊的想法依然非常接近于近代学术方法论的呐喊者、博物学思想家培根。

为什么一大批优秀的科学家被“利他魔咒”(altruistic spell)迷倒?仅仅从自然科学的角度恐怕解释不清楚。做任何研究都要先尽可能获取较多的数据,搞清基本事实。博物学家观察的结果是,在生命世界中,特别是对于社会性生物,利己(最好不称为“自私”)和利他都是普遍存在的现象,两者处于同一层面,不应当把一个当作基本事实,另一个当作导出事实或者副效应。

被“利他魔咒”迷倒的学者在方法论上存在一个未加反思的预设A:非对称性,即利己是基本的,是出发点,是说明项(explanans)之一;而利他是第二位的,是有待说明的被说明项(explanandum)。于是,对于道金斯等人,由自私的基因出发就理所当然,通过它一步一步前行,非常机智又极其蹩脚地推论出利他行为也是可能的,或者与自私行为兼容。独立研究者闵嘉德(Josh Mitteldorf)认为合作不等于亲缘选择,现代综合派的确有忽视合作的倾向,而合作在大自然中无处不在。物理学出身的闵嘉德并非行家,他与普通人一样不理解演化心理学专家的“辛劳”。作为普通博物者(中国古代就有这个称谓),也要反问一句:用自私推导出利他,有这个必要吗?为何不从合作、共生、利他出发,把它们当作基本事实,而来导出自私如何可能?鸡与鸡蛋这

一系统,现在两者都存在了,在一定时空范围由鸡可以说明鸡蛋何以产生,由鸡蛋也可以说明下一代鸡如何产生。如果研究起源的学人对这样的说明不满意,非要在根本上说明第一个蛋或第一只鸡从哪里来,这个问题是没解的。它们之前既非现在意义上的鸡也非现在意义上的鸡蛋。生命演化过程极其漫长,不是用二分法的逻辑和语言能够轻松说清楚的,要改变的是我们的思维和提问的方式。

还有第二个预设B:个体主义,即个体优先,共同体次之。这个假定在经济学、社会学、人类学、演化心理学中都广泛存在。其基本意思是,系统中个体的行为是第一位的,系统的行为要通过个体行为及其组合推导出来。它是还原论的亲戚。它经常成功,但不代表它必然成功。对于生命现象,它时常遇到麻烦,比如除病毒外,没发现什么生命个体能够单独存在,所有生命个体都要与其他生命、环境组成复杂的系统才能生存和延续,社会性生物更是如此,于是共同体、系统是既定事实,必须从一开始就考虑,不要指望把它视作副现象、次生现象。只要破除个体主义思维定式,利他就是一个普通事实。利他并非稀有事件,利他与利己都是自然现象,在博物学家看来,都是自然发生的。而利己和自私则有重大区别。把近似中性的利己都划归于自私,相当于无形中扩大了自私的指称范围。“以恶的眼光看世界,满地都是恶棍;以善的眼光看,到处都有圣人。”世界本身多姿多彩,有善有恶,而且善恶并非一成不变。同样,利己与利他也一样,是有条件的,一个人对某些人在某些时候展示利他,有时展示利己,不会针对任何条件都给出不变的反应。

威尔逊与道金斯关于选择层次与利他主义的争论展现了不同的自然观和科学观,威尔逊的多层选择理论可能与他的博物学家身份有关,他在本能上倾向于合作、群体、利他。威尔逊作为博物学家,对于上述预设A和预设B都不会接受。在威尔逊之前,道金斯的自私基因理论曾被遗传学家兰利(Charles H. Langley)严厉批评过,他称道金斯“有点达尔主义”,用的是双关语A Little Darwinism,也可以理解为“小气的达尔文主义”!道金斯在《自私的基因》中说“我们生而自私”。兰利评论道:“《自私的基因》开头有这样一句‘您差不多可以将本书作为一部科学幻想小说来阅读’。这是此书中最有用的信息,并

且恰当地被放在了最开头。书本之于科学,类似于历史幻想之于历史。历史学家可能考察事实并尝试理解事件的因果关系,而历史幻想可能只是记下事件,并针对因果现象杜撰其引人入胜的故事。类似地,道金斯很少关注在特殊物种中‘利他基因’的证据以及它实际上是如何进化的”(Langley, 1977)。他接着说:“此书(指《自私的基因》)是肤浅的,对于演化生物学这门科学的阐述是不真实的。对于有学养的读者它是一种伤害,对于外行则是一种误导”(Langley, 1977)。其实,批评了自私基因称谓之后,兰利也没必要强调“利他基因”,在基因层面最好不用宏观层面有伦理道德暗示的词语进行描述。现实中,本着诚实的态度,可以肯定人既自私也利他。重要的是不能乱用“自私”概念,也不能唱高调“毫不利己专门利人”,那样会增加社会成本,给社会造成不必要负担。为己、谋生不能简单说成是“自私”。说基因自私,等于把宏观概念扩展于微观领域,缺乏根据,还给外行的无根据推演留下了机会。那样可能暗示“人不为己天诛地灭”“恃强凌弱”有了自然科学根据。道金斯事后与其百般狡辩,还不如当初谨慎一点或者干脆承认用词不当。刚生下的幼崽就知道吮吸母亲的奶汁,那不叫“自私”,而叫合理利己或本能;在不明事理、不懂得伦理判断时,轻微侵犯了邻居、同伴的利益也不能叫作自私;拿自己应得的一份不能叫自私;电影《流浪者》中的拉兹(Raj)偷面包是为了求生,行为虽有不当甚至违法,但那不叫自私;损人不利己也不能叫自私,那叫变态。“自私”是指主体明确知道行为的后果,在非必要的情况下采取对自己有好处同时损害了其他主体利益的行为,属于明知故犯。以这样的概念界定来看,生命的大部分行为是道德中性的。

不管怎样,博物探究方式已经式微,威尔逊之类的通才越来越少,这是基本事实。但复兴博物学的声音也在增长(Fleischner, 1999)。自然科学,特别是与生物多样性保护、生态学、环境科学有关的科学,仍然有希望调整自己的运作规则、方法,不完全抛弃古老的博物学传统。在现代社会,“博物+”策略有助于每个人超越学科的人为划分、职业分工以及诸多说不清楚的禁锢,从而获得更全面的认知和生活体验。希望威尔逊的去世,能够提醒世人更加重视博物学,而不是相反。

## 参考文献

- Dawkins R (2012) The descent of Edward Wilson: A new book on evolution by a great biologist makes a slew of mistakes. Prospect, Issue 195, May 24.
- Dayton PK, Sala E (2001) Natural history: The sense of wonder, creativity and progress in ecology. *Scientia Marina*, 65 (Suppl. 2), 199–206.
- Dobzhansky T (1973) Nothing in biology makes sense except in the light of evolution. *The American Biology Teacher*, 35, 125–129.
- Farber PL (2000) *The Naturalist Tradition: From Linnaeus to E. O. Wilson*. The Johns Hopkins University Press, Baltimore and London.
- Flam F (2012) The latest in the altruism war: Richard Dawkins vs. E. O. Wilson. *The Philadelphia Inquirer*, May 30.
- Fleischner TL (1999) Revitalizing natural history. *Wild Earth*, Summer, 81–89.
- Green RF (2000) The work of W.D. Hamilton. *Biology and Philosophy*, 15, 107–117.
- Hallam A (1983) *Great Geological Controversies*. Oxford University Press, Oxford.
- Kant I (1755/1955) *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie*. Aufbau Verlag, Berlin.
- Liu HJ (2019) Science culture criticism: Intellectual arms race and natural history. *Interculturalities Chine-France*, (5), 9–38.
- Liu HJ (2020) A brief history of natural history and its role in modern society. In: *Lectures on Natural History of Plants* (ed. Ma KP), pp. 5–14. Peking University Press, Beijing. (in Chinese) [刘华杰 (2020) 博物学简史与当下博物学的定位. 见: 植物博物学讲义(马克平主编), 第5–14页. 北京大学出版社, 北京.]
- Liu HJ (2022) Who will inherit his naturalist legacy? Remembrances of Edward O. Wilson. *Wenhui Daily*, January 10. (in Chinese) [刘华杰 (2022) “博物无人继昔贤”: 悼念威尔逊. 文汇报, 1月10日.]
- Langley CH (1977) A little Darwinism. *BioScience*, 27, 692.
- MacGregor A (2018) *Naturalists in the Field: Collecting, Recording and Preserving the Natural World from the Fifteenth to the Twenty-first Century*. Brill Publishing, Leiden and Boston.
- Nichols J (1991) What is a naturalist, anyway? *Copeia*, (4), 1176–1181.
- Nowak MA, Tarnita C, Wilson EO (2010) The evolution of eusociality. *Nature*, 466, 1057–1062.
- Nowak MA, McAvoy A, Allen B, Wilson EO (2017) The general form of Hamilton’s rule makes no predictions and cannot be tested empirically. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 114, 5665–5670.
- Peters T (2013) E. O. Wilson’s conquest of earth. *Theology and Science*, 11, 86–105.
- Rees G (2007) *The Oxford Francis Bacon XII: The Instauration Magna Part III*. Clarendon Press, Oxford.
- Schmidly DJ (2005) What it means to be a naturalist and the future of natural history at American universities. *Journal of Mammalogy*, 86, 449–456.
- Wilson EO (1994) *Naturalist*. Island Press, Washington, DC.
- Wilson EO (1999) *Sensibility: The Unity of Knowledge*. Vintage, New York.
- Wilson EO (2019) *Genesis: The Deep Origin of Societies*. Liveright Publishing Co., New York.
- Worster D (2008) *A Passion for Nature: The Life of John Muir*. Oxford University Press, New York.





•论坛• 纪念E. O. 威尔逊专题

# E. O. 威尔逊，一个跟自己也能决斗的勇士

威尔逊与古尔德两个对手之间的争论，成就了两个伟大思想家

王瑞武<sup>ID\*</sup>

西北工业大学生态环境学院，西安 710072

王瑞武 (2022) E. O. 威尔逊，一个跟自己也能决斗的勇士. 生物多样性, 30, 222009. doi: 10.17520/biods.2022009.

Wang RW (2022) E. O. Wilson, a warrior who could even fight against himself. Biodiversity Science, 30, 222009 doi: 10.17520/biods.2022009.

## E. O. Wilson, a warrior who could even fight against himself

Ruiwu Wang<sup>ID\*</sup>

School of Ecology and Environment, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072

“一个人如果从不自相矛盾的话，那一定就是他什么也没做。”——米格尔·德·乌纳穆诺

我在中国科学院研究生院学习的时候，讲科学史的田洺教授讲了一个故事：北大百年校庆之际，学校邀请哈佛大学的威尔逊和古尔德前来演讲，据说两人都说彼此绝对不乘坐同一航班、同期演讲。当时我们都以为是两人性格不合或者存在着某些恩怨，为了避免尴尬所提出的要求，也就没追问其中的缘由。后来，我在阅读大量关于科学方法论和科学思想史之后，才理解这二位被誉为哈佛大学最伟大思想家之间争论的本质，即科学方法论与科学思想之间的旷世辩论。这场源于个人和种族的情感之争，却终于彼此葬礼上的“握手”。

E. O. 威尔逊(Edward Osborne Wilson)比斯蒂芬·杰·古尔德(Stephen Jay Gould) (1941–2002)年长，但古尔德却比威尔逊早去世19年。威尔逊生于1929年，2021年12月26日刚刚离开我们驾鹤西去。威尔逊专注于蚂蚁的社会生物学研究，社会生物学和进化心理学因此发展起来；古尔德则是专注古生物研究，更擅长于科学史和科学散文。

古尔德和威尔逊之间争论的本质是科学研究

中还原论与整体论或者一元主义与多元主义之间的辩论，类似我国战国时期的张仪与苏秦之间的合纵、连横的斗争——同是师出易经学说，却是两大对手！而斯蒂芬·杰·古尔德和E. O.威尔逊之间，也可谓是两大冤家，却是一对真知音。

### 1 《社会生物学：新的综合》：声望与劫难

使威尔逊声名鹊起的是他在1975年出版的《社会生物学：新的综合》(*Sociobiology: The New Synthesis*)这本专著。这本书的问世不仅标志着社会生物学这门崭新学科的诞生，还引发了一场20世纪最重要的学术争辩。作者在这本书中以社会性昆虫为例，同时借鉴其他大量动物类群，系统描述了生物中各种社会行为(如性行为、侵略行为、领地行为、合作行为以及亲子抚育等)，并借此阐述他后来被人攻击的结论：所有社会行为，包括人类自身的社会行为，都存在其遗传学基础。威尔逊在其另一著作《论人性》中，更是强调人类的绝大部分领域，从养育子女到性关系，都是与遗传进化保持一致的深层次的关系，进化心理学也正是由此而诞生。

威尔逊的《社会生物学：新的综合》出版后，其

收稿日期: 2022-01-07; 接受日期: 2022-01-10

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: wangrw@nwpu.edu.cn

遗传决定论的观点遭到了很多社会学家和人类学家的强烈反对。有人认为他是社会达尔文主义者、种族主义者, 因为威尔逊的遗传决定论将可能为种族、阶层或者性别歧视等给予理论的支持或者“科学解释”。对他攻击最厉害的人是他的两位哈佛大学同事: 古生物学家古尔德和遗传学家理查德·莱万廷(Richard Lewontin)。古尔德和理查德·莱万廷这两位犹太人对基因或者遗传决定论尤其敏感且焦虑: 如果各个种族、个体社会地位以及行为表现的差异都是基因或者遗传决定的, 那么种族歧视、性别歧视、个体歧视都将不可避免, 而且应该是理所当然。从其学术思想本身来判断, 很多学者说威尔逊是极右派, 在为种族主义辩护, 这确实是有其深层次原因的。古尔德和莱万廷正是源于这方面的担忧, 采取了公开论战的方式与威尔逊决裂。这是勇士之间的决斗, 绝不是个人攻击。其实, 在这一点上, 威尔逊自己也无法回避。他的后半生很长时间内都是在试图调和他个人信仰的矛盾, 从宣布自己是支持左派的民主党成员, 到承认快速进化和群选择, 都说明他自己深刻意识到他所主张理论的局限性, 从而试图摘掉困扰他一生的这个紧箍咒。

威尔逊被称为当代达尔文, 也被称为达尔文的传人, 就是因为他他在思想深处是完全遵循达尔文主义的。达尔文自然选择理论的方法论本质就是一元主义的因果关系论。达尔文认为个体具有自私性, 为了提高自己的适合度而竞争, 通过自然选择的途径, 竞争力强的个体被选择下来, 个体或者物种通过适者生存的法则而进化。威尔逊认为任何生物的行为特征其实都跟他的遗传基因联系在一起, 用自私的基因可以解释一切生物行为, 甚至人类的心理变化。这就是为什么他后来如此强烈支持亲选择或者基因自私说(晚年他又反对亲选择理论, 认为基于个体水平的互惠选择可以解释亲选择的支持证据)。

威尔逊还原论或者一元主义的方法论给他带来了双重的困境: 无论是道德或者社会伦理, 还是理论与现实的冲突, 都让他面临巨大的挑战。

## 2 一元主义的还原论: 动力与枷锁

威尔逊用遗传和基因决定论来解释生物的行

为特征, 在生物学家看来是理所当然的, 尤其威尔逊刚好处在遗传学快速发展的时代。他后来进一步用其来理解人类自身的演化, 这在生物学家眼里也属于理所当然。包括达尔文在内的多数生物学家存在一个共识: 一个生物学理论如果不能解释人类自身, 那一定就不具有一般性, 除非有足够的生物学证据证明人类有别于其他任何生物的本质特征。威尔逊的理论在生物学界确实存在大量的支持证据或支持者, 进化心理学也因此而发展起来。威尔逊事实上就是沿用了牛顿力学的因果关系论即还原论的方法, 种群的行为可以用个体行为的自然选择来解释, 而个体的行为则可以用基因的自私性来解释。这样的因果关系论, 即必然的确定性关系论, 应用到人类社会中, 必然会导致种族的优劣论, 遗传决定论最后导致个体歧视、性侵、犯罪等必然的合理性。从严格的科学逻辑来说, 威尔逊的理论必然会导致对这样的社会现实的认同。他的对手, 尤其是古尔德和莱万廷, 并没有恶意地攻击他, 而是在理性和逻辑的范畴内跟威尔逊辩论。事实上威尔逊也很清楚这个逻辑, 十分清楚他所主张的理论给他自己带来的现实枷锁。

在现实生活中威尔逊是一个很绅士的人, 明显不是右派也不是白人至上论的支持者, 他属于民主党, 支持平权主义。他的理论与他的真实社会关系存在一个巨大的悖论: 即自己主张的并不是自己想实践的。但是作为虔诚的学者、绅士, 又该如何来让别人甚至自己信服这样的逻辑呢? 威尔逊面对的巨大悖论同时也是他终生试图跳出的困境。

2010年, 威尔逊联合哈佛大学演化动力学研究中心的马丁·诺瓦克(Martin Nowak)在*Nature*发表论文, 认为亲缘选择理论属于可以放弃的理论。但是, 亲选择理论即基于基因自私性的理论, 却是在E. O. 威尔逊不懈努力才被国际学术界广泛认可, 而今终于发展成为当代主流的选择理论。他这次对亲选择的背叛, 如同他曾经背叛自己的左派政治团体一样, 遭到大量攻击, 而且这次攻击者都是来自学术领域的全球顶尖专家。文章发表后, 全球103个顶尖生物学家给*Nature*写信, 认为亲选择是当今进化生物学的主流理论, 是不容置疑的。威尔逊也与他曾经最亲密的战友、《自私的基因》(*The Selfish Gene*)的作者理查德·道金斯(Richard Dawkins)在学术上决裂,

道金斯仍然信奉选择的基本单元是基因, 坚持认为是基因的绝对自私性决定了生物演化的结果。

威尔逊为何如此不顾众人反对、不惜放弃自己曾经如此坚定的信仰——基因自私论或者遗传决定论? 因为他意识到了基因自私论存在不可逾越的理论困境。其实, 道金斯在其《自私的基因》第一版就意识到还原论思想必须要回答的问题: 基因为什么必须是自私的? 道金斯当时提出了一个方案: 即基因倾向于复制自身, 存在一个复制者的基因。道金斯可能很快意识到“复制者”基因的理论悖论: 为什么基因只会倾向于复制自己而不是突变成其他, 也就是说, 什么力量促使复制者基因的产生呢? 道金斯认识到了这个理论悖论, 但他没办法解决, 而是在后来的版本中删除了这部分内容, 也没有做出任何解释。威尔逊显然也意识到了基因自私论和遗传决定论所代表的还原论的思想的困境。更重要的是, 自私性的基因之间又是如何形成个体这样的选择单元呢? 显然, 在个体层面, 每个基因并不是都能无限复制自己! 威尔逊没有回避自己理论的悖论, 正如经济学的鼻祖亚当·斯密(Adam Smith)一样。

我们都知道亚当·斯密撰写了《国富论》, 并由此奠定了古典经济学基础。《国富论》假定人性是自私的, 正是人性的自私性, 即为了实现其偏好(利益)的最大化, 个体之间通过竞争实现社会财富的最大化。然而, 亚当·斯密实际上清醒地认识到了人性自私性的假定存在局限性。临去世时, 亚当·斯密又推崇他的《道德情操论》一书。在这本书中, 他认为人类是有道德的, 可以无私地帮助别人。他用两部代表性的论著完成了他自己思想中的巨大矛盾观点的表述: 人性既是自私的, 又是无私的。这一思想的矛盾, 科学史上称之为“斯密之谜”。

看懂了“斯密之谜”, 也就可以理解威尔逊的矛盾与背叛。信仰达尔文自然选择理论的威尔逊最终放弃亲选择理论即基因的绝对自私性, 却又支持了群选择理论, 而群选择理论在某些观点上又与达尔文自然选择理论存在巨大的冲突。在达尔文的自然选择理论中, 个体是基本的选择单元, 组成个体的器官、细胞等不再具有独立性, 因而不具备讨论存在的意义或者价值的条件。经典群选择理论认为群体也是自然选择的基本单元, 在群体间的竞争或者环境压力下, 群体内部的个体形成一个有机体, 个

体可以是利他性, 个体不再具有独立的适合度意义。威尔逊妥协了, 他后来承认了个体之上还存在群体意义的价值或者利益, 但仍然没有摆脱达尔文自然选择理论的束缚, 坚持个体是选择的基本单元, 而群体是其个体实现的目标。群体内的个体由于其他种群或者环境的压力, 其种群内部个体收益比不依赖种群生活的个体平均收益高。威尔逊没有视群体为一个不可分割的选择单元。而无论是达尔文自然选择理论的个体选择理论还是新达尔文主义的基因频率选择理论, 其选择单元为个体或者基因, 是不能再分割的基本选择单元。严格地说, 威尔逊使用的群选择概念与经典群选择理论的“群选择”存在概念上的差异。威尔逊使用的群选择概念事实上可以用基于个体自然选择理论的互惠选择理论来解释。

但是, 威尔逊承认了群体存在个体所不具备的独特特征或者性质, 单纯基于个体选择解释不了群体效应, 整体不再是个体性质的集合。这个理论观点实际上就是他的对手古尔德所主张的整体论的观点。古尔德这个对宇宙学有着浓厚兴趣的古生物学家, 从更大、更长的尺度来理解生物演化, 他坚定地认为个体是不能解释群体的全部性质的, 群体在特定时空下会演化出完全不同的性质。但是, 古尔德跟威尔逊一样, 都认为自己是坚定的达尔文主义者。

### 3 威尔逊与古尔德的握手: 还原论与整体论之间的边界

达尔文自然选择理论认为进化是渐进式的, 存在稳定的分子钟, 沿着固定的突变概率而进化。达尔文自然选择理论的坚定支持者赫胥黎曾直接向达尔文表示, 愿意为达尔文的自然选择理论接受火刑, 并建议达尔文放弃渐变论, 这样就为自然选择理论去掉了一个枷锁。但是达尔文拒绝了。从神学院毕业的达尔文可能比较清楚: 如果承认快速进化, 将意味着认同物种突变论, 那也就是物种神创思想。古尔德从古生物演化、甚至宇宙的演化这样更长尺度的视角, 提出间断平衡理论。古尔德认为生物演化的过程既存在渐变式的缓慢进化, 也存在突然爆发式的物种形成, 生物系统因此处于非平衡态。古尔德的理论认为生物在演化的过程中, 随着



时间或者空间的变化, 在某个特定状态的时候, 系统性质会快速发生本质变化。就像给冰加热, 在0℃时晶体的水就转变成液态的水, 中间其实没有连续的过渡态。同样, 给水加热, 在100℃时液态的水转化为气态的水蒸汽, 中间也没有连续的过渡态, 系统的物理性质发生了质变。古尔德认为生物的进化存在与这类似的过程。当物种种群在某个特定环境, 个体之间将可能粘合成一个性质完全不同的群体, 这其实就是威尔逊后期所支持的群选择理论; 而当物种在演化到某个特定条件时, 发生快速突变, 物种多样性就会出现大暴发, 这就是威尔逊在其晚年出版的《缤纷的生命》(*The Diversity of Life*)里所承认的物种快速进化。而快速进化是古尔德间断平衡理论的核心观点。

威尔逊在其《生命的多样性》一书中, 承认了快速进化的存在, 但是他认为快速进化与慢进化之间只存在量的差异, 没有实质性创新, 他认为古尔德的间断平衡理论只是对达尔文进化论的略加修正, 而不是科学界所普遍认为的那样: 间断平衡理论是对达尔文自然选择的重大挑战。有意思的是, 古尔德无论在私下还是其著作中, 都是自诩为坚定的达尔文主义的追随者。古尔德承认自然选择过程中存在达尔文渐变论思想中的慢变化。

从这个意义上看, 威尔逊和古尔德这两个学术思想上的“死敌”最后确实是在科学的思想走向统一。威尔逊似乎是沿着河流向上爬山, 而古尔德则是从山顶向下奔跑, 他们可能在山谷或河流的某处见面, 但似乎只能握手, 而不会拥抱。两个人经历完全不同的旅行, 遍历的风景也不同, 不可能分享相同的故事, 但是他们确实达到了同一个目标。

#### 4 一个真的勇士与斗士

套用一段评价一些伟大政治家的话: 他一生有很多敌人和对手, 但没有一个是因为私利而结怨的敌人。对威尔逊而言, 同样如此。他思维活跃, 对不同的新概念、新理念都是开放而拥抱的。但他又是一位最无畏、最单纯的战士, 他与同事古尔德辩论了一生, 最后又与自己亲密的战友道金斯在学术上决裂, 不惧全球数位顶尖生物学家的“围殴”, 最后又向自己曾经的信仰发起了挑战。他一直在战斗,

为了科学的执着而战斗, 更是为了一种自己都感到怀疑的信仰而战斗。威尔逊早期沿袭亚里士多德思想, 认为科学的研究主体与客体之间存在截然鸿沟, 因而研究客体(对象)独立于研究主体(研究者)的主观认识, 存在不依赖研究者主观认识的客观规律(与一元主义、基督文明的上帝唯一性存在哲学一致性)。但是, 纵观其一生全景观的科学观, 他却完美诠释了对手古尔德的科学观。

古尔德在《熊猫的拇指》一书中曾这样表述过自己的科学观: 正如我在其他几篇文章中强调的那样, 我认为科学不是客观的、一定获取真理的机器, 而是一种典型的人类活动, 从事科学的人受到情感、希望和文化偏见的影响。思维的文化传统对科学理论有很大的影响, 通常也决定了猜想的思路, 尤其是在没有材料限制人们的想象或猜想时, 更是如此。

古尔德认为科学研究的主体与客体之间不存在截然的鸿沟, 科学是一个唯心的、辩证的过程。这刚好就是现代物理学, 尤其以相对论和量子物理学为代表的现代物理学科学观, 也正是古希腊多神论与多元主义哲学观的核心思想。其实也是中国古代以易经思想为代表的辩证法、整体论的哲学观。

我曾经在《理性与自私的终结》的后记《纳什之死——他就是他自己最坚定的批判者》中写道: 如果让我来给我崇拜过、我尊敬过的、也是我批判过的纳什撰写他的墓志铭, 我更想说: 他就是他自己最坚定的批判者。这也是我们的墓志铭。我想这段墓志铭也应该属于威尔逊。

本文引用的参考文献见附录1 (<https://www.bio-diversity-science.net/fileup/PDF/2022009-1.pdf>)。

**致谢:** 马克平、刘志伟、张大勇、孙书存4位教授做了讨论与行文修改, 韩佳旭、侯猛、白壮东、李敏兰、马成存、叶楠对文献和文字编辑给予帮助。在此一并致谢!

#### ORCID

王瑞武  <https://orcid.org/0000-0002-3277-4161>

(责任编辑: 周玉荣)

王瑞武 (2022) E. O. 威尔逊, 一个跟自己也能决斗的勇士. 生物多样性, 30, 22009.  
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2022009>

## 参考文献

- Gould SJ (1992) *The Panda's Thumb: More Reflections in Natural History*. W. W. Norton & Company, New York.
- Wang RW (2021) *The End of Rationality and Selfness*. The Commercial Press, Beijing. (in Chinese) [王瑞武 (2021) 理性与自私的终结. 中国商务出版社, 北京.]
- Wilson EO (1992) *The Diversity of Life*. Harvard University Press, Cambridge.
- Wilson EO (2000) *Sociobiology: The New Synthesis, Twenty-Fifth Anniversary Edition*. Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge (MA).
- Wilson EO, Hölldobler B (2005) Eusociality: Origin and consequences. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 102, 13367–13371.



# 关于我国国家植物园体系建设的一点思考

陈进<sup>ID\*</sup>

中国科学院西双版纳热带植物园, 云南勐腊 666303

陈进 (2022) 关于我国国家植物园体系建设的一点思考. 生物多样性, 30, 22016. doi: 10.17520/biods.2022016.

Chen J (2022) Some thoughts about China's national botanical garden system construction. Biodiversity Science, 30, 22016. doi: 10.17520/biods.2022016.

## Some thoughts about China's national botanical garden system construction

Jin Chen<sup>ID\*</sup>

Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla, Yunnan 666303

2021年10月12日, 国家主席习近平在生物多样性公约第十五次缔约方大会领导人峰会上发表主旨讲话时指出:“本着统筹就地保护与迁地保护相结合的原则, 启动北京、广州等国家植物园体系建设”。2021年12月28日, 国务院国函〔2021〕136号文件正式批准建设北京国家植物园, 标志着我国国家植物园体系建设进入实质性推进阶段。与此同时, 社会上对为何要建设国家植物园体系、如何建设国家植物园及国家植物园体系出现不少讨论甚至争论。现结合本人三十余年在植物园工作的实践, 对我国国家植物园体系建设谈一点自己的思考。

### 1 植物园的功能定位

国内外学界和社会对植物园的功能定位一直存在争议。多个专业的学术期刊如*Trends in Plant Science* (2009, Vol. 14)、《生物多样性》(2017, 第9期)、*Plant Diversity* (2017, Vol. 39)等, 都曾组织专题文章就植物园的使命与功能展开讨论。造成人们对植物园的功能定位认识产生分歧的原因是多方面的。一方面, 从现代植物园500余年的发展来看, 在不同的历史阶段, 植物园的中心工作和功能定位发生了很多的变化(Heywood, 2017a; 黄宏文, 2018)。早期的植物园多以收集药用植物为主, 或为大学教

学提供植物材料; 18、19世纪, 伴随欧洲殖民扩张, 植物园的主要功能是收集、保存从他国引种到欧洲的各种植物, 并开展引种驯化和开发利用研究; 20世纪上半叶, 植物园成为世界分类学与植物学相关多个分支学科的研究中心; 直至20世纪80年代, 生物多样性的概念被首次提出, 世界范围内植物园的主要工作才逐步转移到植物多样性保护上来(Heywood, 2017a; 许再富, 2017)。另一方面, 植物园本身具有多样性, 因其规模、建园历史、资源以及地理位置各不相同, 其工作重心亦可能存在诸多差异。

洪德元院士在2016年上海辰山植物园学术委员会年会上, 以“三个‘哪些’”, 提出他对植物园功能定位的理解与思考(洪德元, 2016)。其中, “收集了哪些? 拯救了哪些?”强调植物园之于植物多样性保护的重要性, 也引发国内同行对植物园功能定位的思考与讨论(详见生物多样性, 2017年第9期)。

以笔者之见, 当今时代的植物园, 特别是一些大型、综合性的植物园, 其最基本最重要的功能即是“植物多样性保护”。植物园的保护工作有别于其他机构, 它能综合运用多种手段, 包括: 参与“就地保护”的监测管理与研究(Chen et al, 2017), 对珍稀濒危植物开展迁地保护、回归和野外种群重建(任海,

收稿日期: 2022-01-10; 接受日期: 2022-01-11

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: cj@xtbg.org.cn



2017), 为生态修复提供材料、技术支持, 以及开展多层次、多形式的保护教育与环境教育等, 以实现生物多样性保护的目标。

与此同时, 不同的植物园可以根据自身的特点, 重点在某一方面或某几方面发挥作用, 不应苛求千篇一律。除了生物多样性保护以外, 植物园还具备资源植物开发与可持续利用(贺善安和顾姻, 2017)、城市生态建设(胡永红等, 2017)、植物文化的传播(刘华杰, 2017)和国际交往等多种功能。

## 2 植物园与植物迁地保护

就地保护与迁地保护相结合的方式是开展生物多样性保护的主要手段(Heywood, 2017b)。就地保护即对野生生物的原生境开展保护, 它可以涵盖保护地中的多个物种、生态过程和生态服务功能以及生物的演化变异能力。迁地保护则可以有针对性地对一些极度濒危的物种开展抢救性保护, 针对一些现有保护区范围仍未能覆盖的受威胁物种, 以及由于全球变化需要人工辅助迁移的物种开展重点保护; 迁地保护还包括对濒危物种开展回归引种和野外种群重建工作。同样重要的是, 将珍稀濒危物种引种到植物园等场地开展繁殖、物候观察、抗逆性和病虫害以及资源可持续开发利用研究, 将极大地提高人们对这些物种的认知水平, 对它们的综合保护亦至关重要。需要强调的是, 迁地保护并非是在园区栽种一种植物, 也不需要把所有的野生植物实行迁地保护。科学有效的迁地保护是在保护生物学理论指导下, 开展有针对性的保护。

植物园是开展迁地保护的专业机构, 拥有植物分类学、生态学、园艺学等方面的专门人才和相当的土地, 可以重点针对所在地区气候带的受威胁植物开展系统的迁地保护工作。

## 3 国家植物园与国家植物园体系

国家植物园代表了一个国家植物迁地保护的最高水平, 承担履行生物多样性保护的国家任务和职能; 针对所在地区主要气候带乃至世界范围内相似气候条件下的植物开展系统的迁地保护与有针对性的回归引种、野生种群恢复重建, 系统性地开展生态文明与环境教育, 综合实力与国际影响力应位居世界植物园(树木园)前列。国家植物园应该传

承植物园建设发展历史上积累的科学内涵、艺术外貌和文化底蕴。

国家植物园体系是指由国家批准设立, 由若干国家植物园和区域性综合植物园组成的、覆盖全国主要气候带与生态系统类型的迁地保护研究网络和生态文明教育基地, 支撑国家的生态文明发展。

国家植物园体系建设是一个新鲜事物, 国际上可以参照的案例并不多。一些发达国家如欧洲, 本国的植物种类相对较少, 拯救本国植物免遭灭绝的任务并不繁重。可供借鉴的案例如南非, 在全国不同地区建立了包括13个植物园的国家植物园网络体系, 统一受南非国立生物多样性研究所(South African National Biodiversity Institute)领导, 执行统一的标准, 有针对性地在全国开展植物迁地保护工作; 同时与南非的保护地体系相互补充并形成有效的合作机制。

中国是生物多样性大国, 本土植物种类3.6万种以上, 同时中国幅员辽阔, 覆盖从热带到亚热带、温带、寒温带等多个气候带。建立国家植物园体系既是我国生态文明建设的一次创新性实践, 也是中国这样一个生物多样性大国的必然要求。

国务院批准在北京建立首个国家植物园, 是综合现有研究基础同时顺应北京作为首都的决策, 拟建的北京国家植物园可满足在文化建设、服务首都生态文明建设以及国际交往多方面的需求; 同时北京国家植物园亦可针对京津冀、华北及部分东北地区开展植物迁地保护工作。

诚然, 国家植物园体系建设是庞大、复杂的系统工程, 需要加强组织领导与顶层设计, 需要坚持标准、试点先行, 逐步推广与完善。

其一, 应把强化组织管理与支持地区发展统一起来。我国现有的植物园分别隶属于科技、教育、园林与城市建设、林业、医药等多个系统, 国家植物园体系建设要强化组织管理, 需在坚持原有隶属关系不变和“主建”的前提下, 强化国家林业和草原局的行业管理作用; 因建设过程中需要大量资金, 提倡地方政府或所在城市给予一定的资金及政策支持, 植物园发展的同时也可直接为所在地区的生态旅游、生物产业发展和就地保护提供支撑。

其二, 应组建以国内外顶级保护生物学家、植物园管理专家组成的科学委员会, 对国家植物园建

设进行指导。科学委员会负责审议体系的顶层设置、技术规程规范和质量评估, 以确保体系建设沿着健康轨道发展。

其三, 坚持质量第一、试点先行, 树立标杆。在现阶段, 全国植物园都应积极关注和参与北京、广州两地的国家植物园试点建设。一些战略地位突出、基础较好的植物园, 如西双版纳、上海、武汉等, 也应积极争取各方面支持, 创造条件, 尽早纳入国家植物园试点建设。同时, 积极推动在一些战略性关键地区, 如青藏高原、广大西部腹地、热带海岛等特殊生态区, 开展植物园或迁地保护设施的筹划建设工作(许再富, 2017; 焦阳等, 2019)。


#### 4 变化的世界中植物园的新使命

回望世界植物园发展五百多年的历史, 植物园的工作重点及功能一直在调整。如今, 地球已经进入“人类世”, 一方面, 地球生态系统无法回到原点; 另一方面, 人类必须通过科技进步和生产生活方式的变革实现人与自然和谐发展。中国是世界上首个把生态文明建设作为国家发展战略的国家。2021年和2022年在昆明召开的生物多样性公约第十五次缔约方大会, 将生物多样性主流化作为一个共同的倡议提出, 并将制订有雄心和具有可操作性的2020年后生物多样性保护目标, 这些都将深刻影响全人类的生物多样性保护工作。伴随中华民族的伟大复兴和人类命运共同体的建设, 中国治理、中国方案也将越来越多地影响着世界。

植物园事业迎来了从未有过的发展机遇, 同时也呼唤创新的工作方案。中国植物园应积极探索在变化的世界中更好地发挥自己的作用。一方面, 从人类已经拥有的技术来看, 我们可以实现植物物种的零灭绝(Chen & Corlett, 2019); 另一方面, 世界范围内植物受威胁仍然很严重。据最新的由60多个研究机构500多位科研人员对全球58,497个树种的评估, 有30%的树种仍然处于受威胁状态, 有142种已经在野外灭绝(BGCI, 2021)。中国植物园未来应对“新保护方式”(the new conservation)作积极探索, 构建全域的、更加整合的保护体系, 将就地保护、迁地保护、近地保护、生态系统修复等多个手段综合起来, 汇集所在地区各种保护力量, 包括国家公园和保护区、地方政府、企业、民间组织和广大民

众, 协调区域整体保护(Chen et al, 2017)。植物园应该开展大量的专业性的保护教育和生态文明教育, 发起保护与教育相关的公民科学项目, 吸引广大群众参与保护, 为实现全社会生产生活方式变革作出重要贡献。植物园应加强植物对气候变化适应性的系统研究, 通过遍布全国不同气候类型的植物园开展联合研究, 为未来生态系统应对气候变化提供创新方案。植物园同时应为支撑国家绿色“一带一路”建设和人类命运共同体建设提供支撑, 在时机成熟时, 可以走出国门, 帮助“一带一路”国家提高生物多样性保护能力和环境教育事业(龙春林和马克平, 2017; 焦阳等, 2019)。国家植物园和国家植物园体系建设无疑会对我国植物园担当新使命起到巨大的促进作用。

#### ORCID

陈进  <https://orcid.org/0000-0002-9490-9981>

#### 参考文献

- BGCI (2021) State of the World's Trees. BGCI, Richmond, UK.
- Chen J, Corlett RT (2019) The Xishuangbanna Declaration on Plant Conservation. *Biodiversity Science*, 27, 114–115. (in Chinese and in English) [陈进, Corlett RT (2019) 西双版纳宣言. *生物多样性*, 27, 114–115.]
- Chen J, Corlett RT, Cannon CH (2017) The role of botanic gardens in *in situ* conservation. In: *Plant Conservation Science & Practice (The Role of Botanic Gardens)* (eds. Blackmore S, Oldfield S). Cambridge University Press, Cambridge.
- He SA, Gu Y (2017) Plant exploration research and botanical garden vitality. *Biodiversity Science*, 25, 934–937. (in Chinese) [贺善安, 顾姻 (2017) 植物利用研究与植物园的生命力. *生物多样性*, 25, 934–937.]
- Heywood VH (2017a) The future of plant conservation and the role of botanic gardens. *Plant Diversity*, 39, 309–313.
- Heywood VH (2017b) Plant conservation in the Anthropocene—Challenges and future prospects. *Plant Diversity*, 39, 314–330.
- Hong DY (2016) Three “What”: Mission of a botanic garden. *Biodiversity Science*, 24, 728. (in Chinese) [洪德元 (2016) “三个哪些”: 植物园的使命. *生物多样性*, 24, 728.]
- Hu YH, Yang ST, Yang J, Vincent G, Chen XY (2017) Botanical gardens support urban sustainable development: A case study from the Shanghai Chenshan Botanical Garden. *Biodiversity Science*, 25, 951–958. (in Chinese with English abstract) [胡永红, 杨舒婷, 杨俊, 万吉尔, 陈晓亚 (2017) 植物园支持城市可持续发展的思考——以上海辰山植物

陈进: 关于我国国家植物园体系建设的一点思考

- 园为例. 生物多样性, 25, 951–958.]
- Huang HW (2018) “Science, art and responsibility”: The scientific and social function changes of a 500-year history of botanical gardens. II. Intension of sciences. *Biodiversity Science*, 26, 304–314. (in Chinese with English abstract) [黄宏文 (2018) “艺术的外貌、科学的内涵、使命的担当”——植物园500年来的科研与社会功能变迁(二): 科学的内涵. 生物多样性, 26, 304–314.]
- Jiao Y, Shao YY, Liao JP, Huang HW, Hu HB, Zhang QF, Ren H, Chen J (2019) Status and Future Strategies of Chinese Botanical Gardens. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 34, 1351–1358. (in Chinese with English abstract) [焦阳, 邵云云, 廖景平, 黄宏文, 胡华斌, 张全发, 任海, 陈进 (2019) 中国植物园现状及未来发展策略. 中国科学院院刊, 34, 1351–1358.]
- Liu HJ (2017) Promoting plant culture communication in a botanical garden from a natural history perspective. *Biodiversity Science*, 25, 938–944. (in Chinese with English abstract) [刘华杰 (2017) 从博物学视角推进植物园的植物文化传播. 生物多样性, 25, 938–944.]
- Long CL, Ma KP (2017) Challenges and opportunities for botanical gardens in a new era. *Biodiversity Science*, 25, 915–916. (in Chinese) [龙春林, 马克平 (2017) 新时期植物园的机遇和挑战. 生物多样性, 25, 915–916.]
- Ren H (2017) The role of botanical gardens in reintroduction of plants. *Biodiversity Science*, 25, 945–950. (in Chinese with English abstract) [任海 (2017) 植物园与植物回归. 生物多样性, 25, 945–950.]
- Xu ZF (2017) Botanical gardens’ challenge—correspondence with Academician De-Yuan Hong’s “Three ‘What’: Mission of a botanic garden”. *Biodiversity Science*, 25, 918–923. (in Chinese with English abstract) [许再富 (2017) 植物园的挑战——对洪德元院士的“三个‘哪些’: 植物园的使命”一文的解读. 生物多样性, 25, 918–923.]

(责任编辑: 周玉荣)





•论坛• 中国国家植物园专题

# 中国国家植物园选址与迁地保护

刘华杰\*

北京大学哲学系, 北京 100871

刘华杰 (2022) 中国国家植物园选址与迁地保护. 生物多样性, 30, 22006. doi: 10.17520/biods.2022006.

Liu HJ (2022) Site selection of national botanic gardens of China and *ex-situ* conservation. Biodiversity Science, 30, 22006. doi: 10.17520/biods.2022006.

## Site selection of national botanic gardens of China and *ex-situ* conservation

Huajie Liu\*

Department of Philosophy, Peking University, Beijing 100871

“国务院关于同意在北京设立国家植物园的批复” (国函〔2021〕136号)于2022年1月4日在政府网发布, 直接受益单位第一时间热情转发了此消息。当晚, 许多人在私下议论, 这说明人们关心这件大事, 也有不同看法。

中国有三万多种植物, 资源极为丰富, 从生物多样性研究、植物文化传播和国家形象展示的角度看, 有必要尽早建立国家植物园(包括国家自然博物馆)。那么, 国家植物园究竟应当建在哪里? 我作为一名局外人, 获悉人们盼望已久的中国国家植物园将在北京设立, 感觉有点突然, 但也不算意外。如果在20年前, 我也赞成在北京设立国家植物园。但是经过多年学习, 个人觉得在北京设立国家植物园不妥。

植物的生长高度依赖温度、湿度、土壤酸碱度和孔隙度等自然条件, 建立一座大型国家植物园, 选址必须首先从有利于多种植物在户外自然生长的角度考虑, 其次要考虑科研实力、政治、经济、文化、交通等方面。有关部门事先要评估项目风险, 要考虑一旦失败将导致的不利影响。北京是中国首都, 又有雄厚的科研实力和园林园艺基础, 在北京设立国家植物园符合许多人的预期, 但是慎重思考后发现, 北京不适合设立国家植物园。理由主要有

如下几点:

(1)北京纬度偏高、雨水偏少, 户外可栽培并生长良好的植物种类很有限。即使一些物种可以成活, 养护的成本也会很高。以蕨类植物为例, 在北京户外能够养护成活的物种有限, 而把大量物种放在温室内养护也不现实。当然, 广泛采集植物种子通过“种子库”加以保存无疑是非常重要的, 但这是否要由植物园来做则另当别论。

(2)北京用地紧张, 不容易找到足够大的连续园址。将北京香山地区的南北两园合并管理, 以此为基础将园区再适当扩展, 也依然显得太小。其他地区用地没有这般紧张, 从全国大局考虑把这个发展机遇留给其他地方, 没什么坏处。应当全国一盘棋, 北京占尽全国的优势, 不能什么都要做。

(3)国务院的批复文件中列出了一些指标, 其中就“尊重自然”“保护第一”“对植物类群系统收集”“完整保存”“彰显生物多样性魅力”“中国特色”“世界一流”而言, 北京并无特别的优势。我认为优势不如昆明、深圳、成都、武汉, 因为北京地区的本土植物物种数本来就不很多, 将来园区内能承载的新物种数也不会太多。植物物种是长期演化的结果, 与环境形成了较强的适应关系, 一个地方野外物种数不很多, 说明大自然施加了一些限制, 学者

收稿日期: 2022-01-05; 接受日期: 2022-01-07

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: huajie@pku.edu.cn

不能强制改变这一点。北京的野生植物种类不到秦岭地区的一半, 特色物种甚至不如东北地区。在北京建立国家植物园, 国务院批复文件中列举的目标如何实现, 真的是个问题。

(4)最近若干年学界很流行“迁地保护”, 但不宜扩大化。对于大量物种的保护而言, 这样做不现实, 也违背自然规律。一方水土养一方植物。想一想, 在大自然中演化了数百万年甚至更久的一个物种, 哪那么容易就被成功地迁地保护了? 宣传成功做到迁地保护的物种, 真的成功了吗? 做迁地保护有利于上项目、争经费、发论文是事实, 对个别物种的迁地保护暂时做得不错也是事实, 但这样做不是长久之计, 不具有普适性。迁地保护的有效性需要长时间检验。迁地保护是不是植物园的主要功能、任务, 也要议一议。统计数据显示, 中国相当一部分植物物种已经被迁地保护了。这是科学界自己宣传的成就, 似乎成绩很大。实际上非常可疑, 在试验

区和植物园养活了若干植株个体, 并不代表此物种已经得到了有效保护。众所周知, 采样少, 栽种的植物其遗传多样性很差; 采样多了, 会对相关物种造成不必要的人为破坏。

全国现有的植物园要生存和发展, 一些有特色的中小型植物园需要立即建立起来, 对此可多从迁地研究、迁地展示、服务社会的角度论证, 打着“迁地保护”的旗号建设植物园在逻辑上讲不通。

个人认为, 需要进一步明确国家植物园的功能定位, 重新考虑其选址。

有人提醒我, 说国家植物园并不是一个植物园, 而是一批植物园, 是复杂的体系。这令人想起了公司重组、高校合并及多种多样的挂牌游戏。坦率地说, 百姓对此是有意见的。希望10年或者50年后能证明我今日的担忧是不必要的, 看法是错误的。

(2022年1月5日)



•论坛• 中国国家植物园专题

# 国家植物园设立为何首选北京？

马金双<sup>ID\*</sup>

北京市植物园, 北京 100093

马金双 (2022) 国家植物园设立为何首选北京? 生物多样性, 30, 22013. doi: 10.17520/biods.2022013.

Ma JS (2022) Why should Beijing be the first choice for the establishment of the National Botanical Garden? Biodiversity Science, 30, 22013. doi: 10.17520/biods.2022013.

## Why should Beijing be the first choice for the establishment of the National Botanical Garden?

Jinshuang Ma<sup>ID\*</sup>

Beijing Botanical Garden, Beijing 100093

2021年12月28日国务院批复在北京设立国家植物园(国函〔2021〕136号),由国家林草局、住房城乡建设部、中国科学院、北京市人民政府合作共建,依托中国科学院植物研究所和北京市植物园构建南、北两个园区统一规划、统一建设、统一挂牌、统一标准、可持续发展的新格局,同时要求相关部门统筹规划、合理布局,稳步推进全国国家植物园体系建设。那么国家植物园为何首选在北京?

首先,国家植物园是国家层面从事植物收集与保护、科学研究、科普教育、园林园艺和文化休闲于一体的综合性国家级机构,也具有国家行业领域内植物园(含树木园)的标准设计、技术规范、体系监制和考核评价的权威管理与监督职能。国家植物园是国家经济、科技、文化、卫生、环境、社会可持续发展水平的标志性象征,首选在北京无疑具有统筹、管理和监督等多方面的优势。北京是中国的首都,更是中国的政治与文化中心,在北京首先设立国家植物园具有得天独厚的优势以及其他地方无法替代的作用。世界上很多著名的国家级植物园也是设在首都,如澳大利亚的国家植物园位于堪培拉、爱尔兰的国家植物园位于都柏林、美国的国家

植物园位于华盛顿、西班牙的皇家植物园位于马德里、英国的皇家植物园邱园位于伦敦等。国家植物园在北京设立仅仅是国家植物园体系建设的开始,由此将推动全国具有不同代表性的其他地区的国家植物园设立。国家植物园作为国家的象征与名片,首选在北京设立具有明显的代表性和示范性,可谓名正言顺、众望所归。

其次,植物园是公益性事业单位,需要大量的资金投入,经济上的考虑必不可少。设立国家植物园必须考虑国情,特别是中国还是一个发展中国家,设立国家植物园既要考虑紧张的土地资源,又要综合考虑人力、财力和物力。位于北京的中国科学院植物研究所及其植物园和北京市植物园不仅历史悠久、积累雄厚,而且优势明显且资源互补。特别是成立于1928年的中国科学院植物研究所在植物学领域的研究国内首屈一指,人才雄厚、队伍强大,基本设施与科研平台完善,而成立于1956年的北京市植物园在植物收集与保护、园艺展示、科学普及等领域优势突出,且具有从平原到山区的自然地理优势;南北两个园区统一规划、统一建设、统一挂牌、统一标准,建立可持续发展的新格局,不仅强强联

收稿日期: 2022-01-10; 接受日期: 2022-01-11

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: jinshuangma@gmail.com; majinshuang@beijingbg.com

<https://www.biodiversity-science.net>



合, 而且优势互补。

第三, 中国幅员辽阔, 疆域从北到南、从东到西, 各有特色, 且植物种类繁多; 不论首选南方还是北方, 内地还是沿海, 都无法兼顾不同的地域特征或者资源特色。然而, 中国毕竟是一个北温带国家, 温带面积占国土面积的大半(秦岭至淮河为公认的南北分界带), 温带气候性质明显, 国家植物园选择位于温带的北京, 具有鲜明的代表性。另一方面, 植物园保存的不仅仅是露地植物, 还有很多温室植物。温带的北京干旱少雨并不意味着不能研究或者保存植物。世界著名的邱园地理位置达北纬 $50^{\circ}$ 以上, 而北京仅北纬 $40^{\circ}$ ; 以色列以干旱著名, 其农业上的奇迹举世闻名。此外, 国家植物园面积上固然要有一定的规模, 但并不是越大越好。目前两个植物园开放总面积达304 ha (其中南园约73 ha, 北园约231 ha), 按照规划, 北园北侧山林纳入国家植物园范围, 总面积近600 ha。目前南北两家植物园的露地活植物以及温室的栽培植物总计已达274科2,200属近17,800类群(APG IV系统, 包括野生物种和栽培品种, 除双方共有的重复类群), 这样的数据无疑显示了其已有的良好基础及绝对优势。

第四, 南北两个植物园历史上就是一家。1954年, 中国科学院植物研究所的10位年轻工作人员给毛主席写信, 申请永久的植物园地址, 并建立像苏联科学院那样的总植物园; 1954年12月22日, 北京市政府正式致函中国科学院: 同意在卧佛寺附近划定566 ha, 在当时的香颐公路以南划定96.6 ha, 作为北京植物园永久园址的规划范围。1956年5月18日国务院正式批复设立北京植物园, 同时划拨专款作为第一期建园经费; 同年10月, 中国科学院与北京市委签订了合作建设合约; 1957年中国科学院和

北京市成立北京植物园规划设计委员会, 启动建园工作。尽管前者隶属于中国科学院, 后者隶属于北京市, 但两园仅一路之隔。南北两园历经几代人近七十年的艰苦努力, 在植物收集与展示、科学研究、园区建设等方面取得了卓越成就。在南北园现有基础上建设国家植物园, 既可减少建设过程中的资源重复浪费, 又可节省人力、财力和物力, 可谓一举多得。

植物是人类赖以生存的基础, 人类的衣食住行离不开植物, 而植物园是人类认识植物、改造植物并利用植物的关键场所。植物园有史以来的宗旨都是收集、研究、展示、利用。随着人类活动的影响加剧, 一些珍稀濒危植物受到威胁甚至灭绝, 再加上外来入侵植物的出现, 不仅造成巨大经济损失, 而且破坏人类赖以生存的生态系统。保护植物及其多样性便成为当今植物园的重任, 这在21世纪的今天更显得格外突出。保护不只是从野外挖回来栽培, 更重要的是要研究其濒危机制, 解析原因, 进而使之种群延续、资源永存, 同时还要保护其赖以生存的环境, 使其生物多样性和生态系统健康并持续发展, 更好地为人类服务。因此, 植物的就地保护和迁地保护便成为当今保护植物多样性不可或缺的两个部分; 国家公园等自然保护地主要针对前者, 而国家植物园则侧重后者, 两者相辅相成, 共同承担保护的使命, 使得人类不但有充足的赖以生存的基础, 还要有美丽、舒适、优雅、宜居的生存环境。

## ORCID

马金双  <https://orcid.org/0000-0001-5899-4640>

(责任编辑: 周玉荣)



•论坛• 中国国家植物园专题

# 植物园与野生植物迁地保护

文香英<sup>1,2,3\*</sup>, 陈红锋<sup>1,4</sup>

1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 国际植物园保护联盟(BGCI)中国办公室, 广州 510650; 3. 广东省数字植物园与科学传播重点实验室, 广州 510650; 4. 中国科学院植物资源保护与可持续利用重点实验室, 广州 510650

文香英, 陈红锋 (2022) 植物园与野生植物迁地保护. 生物多样性, 30, 22017. doi: 10.17520/biods.2022017.

Wen XY, Chen HF (2022) Botanical gardens and *ex situ* conservation of the wild plant species. Biodiversity Science, 30, 22017. doi: 10.17520/biods.2022017.

## Botanical gardens and *ex situ* conservation of the wild plant species

Xiangying Wen<sup>1,2,3\*</sup>, Hongfeng Chen<sup>1,4</sup>

1 South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650

2 Botanic Gardens Conservation International China Office, Guangzhou 510650

3 Key Laboratory of Digital Botanical Garden and Science Communication of Guangdong, Guangzhou 510650

4 Key Laboratory of Plant Resource Conservation and Sustainable Utilization, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650

植物资源是全球生物多样性和生态系统的核心组成部分,是人类赖以生存和发展的基础,是维系人类社会和经济可持续发展的根本保障。保护植物资源及其多样性已经成为人类发展的重大使命和国家发展的战略选择。

植物园作为专门从事野生植物收集、栽培驯化、科学研究和保护利用的研究机构,始终肩负着重要使命,是国家植物多样性保护和可持续利用、相关产业发展的植物源头保存库,是国家植物资源本底和生物战略储备的重要组成部分,也是国家宏观决策及公众教育的重要试验、示范和开放场所(黄宏文, 2018)。

野生植物资源保护主要包括就地保护和迁地保护,构建以国家公园为主体的自然保护地体系是就地保护的主要形式,建设以国家植物园为引领的植物园体系是迁地保护的主要形式,二者缺一不可、有机互补,形成我国较为完整的生物多样性保护体系。此外,新发展阶段的高质量发展将走以生态优先绿色发展为导向的新路子,而迁地保护的生物多样性可以为绿色发展提供源头植物资源。因此,

建设国家植物园体系对深入推进生态文明建设和高质量发展具有重要现实意义。

### 1 什么是迁地保护?

迁地保护指的是以整株、种子、花粉、营养繁殖体、组织或细胞培养物的形式,在其自然栖息地之外保存和维护活体样本(Oldfield & Newton, 2012)。迁地保护一般是从保护的目的地出发对特别的类群的引种收集并进行相关研究,植物园优先引种收集的植物包括珍稀濒危植物、特有植物、具有经济价值的植物以及旗舰种和那些因气候变化需要人工辅助迁移的植物物种,因为人力、物力和空间的限制,并不针对所有植物物种。

### 2 为什么要进行迁地保护?

相对于就地保护,虽然迁地保护不是首选的保护方法,但是日益增加的生境丧失、非法采伐和火灾等自然灾害、保护区的不完全覆盖以及气候变化的影响,意味着并非所有物种都能在其自然栖息地得到保护,这导致对迁地保护方法的需求不断增长

收稿日期: 2022-01-11; 接受日期: 2022-01-11

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: wx-ying@scbg.ac.cn

(Sharrock, 2020)。植物种质资源的迁地保护为野外物种灭绝事件提供了至关重要的备份(Gratzfeld, 2016)。迁地保护为种质资源的评价、研究、科普教育、开发利用、开展种群回归、重建和恢复等工作提供材料。迁地保护的主要形式包括植物园(含苗圃或种质资源圃)活植物收集保存、种质(种子、花粉、DNA材料、营养器官等)的种质资源库保存、组织培养物或苗的实验室离体保存等。植物园不但是活植物的博物馆和植物迁地保护的重要基地,也是开展植物迁地保护生物学研究的重要平台(Chen & Sun, 2018)。

迁地收集保存的保护价值取决于3个主要因素:(1)植物材料的收集类型(包括种子、外植体和活植物)随每个物种的繁殖生物学、种子特性和(或)对异地环境的适应性而变化。(2)收集方法:一般来说,只有具有良好档案记录的、野外采集时捕捉了尽可能多的遗传变异的物种的迁地收集才具有最大的保护价值和研究价值;同样重要的是,迁地收集工作必须仔细,确保不要对野外居群带来额外的风险(低强度、频繁的采集繁殖材料比高强度偶尔的采集繁殖材料对取样居群有更低的影响。所以尽可能扩展采集至两年或多年,特别是对于小的居群)。(3)对有活力的种质资源的后续维护在决定一个迁地收集的最终保护价值方面起着至关重要的作用。如果没有适当的监测管理,收集的保护价值或收集本身可能完全失去意义。具有最直接保护作用的是收集具有遗传多样性代表的物种,必须设法确保材料在遗传上是合理的并可长期用于保护活动。此外,迁地收集的管理,还应该通过多地保存来使因随机事件或自然灾害(如:工作人员的转换、盗窃、火灾、病虫害等灾难性损失)造成丧失的风险达到最低(Oldfield & Newton, 2012)。

我国目前有高等植物约3.6万种,其中受威胁的植物(即珍稀濒危植物)约4,000种,加上没有评估的种类,全国约有11%–15%的植物为受威胁种类。目前在各类自然保护地内保护的珍稀濒危植物物种约占88%,还有12%的在保护区外。对这些植物进行迁地保护是高效的方式之一(覃海宁等, 2017)。

另外,当引种采集迁地保护的植物材料的时候,对合法问题的考虑非常重要。许多国家有法律管理野外植物材料的采集,尤其是对那些濒临灭绝的种

类。所以,在规划采集前很有必要去核查这样的法律或管理条例。受过专业训练的植物科学工作者在野外的采集活动对植物的影响远小于偷盗者。

### 3 如何科学地进行迁地保护?

植物园的迁地保护不是盲目地将植物材料从野外挖回来随意种在植物园里,而是必须遵循各植物园植物引种政策进行科学引种,同时对迁地收集的植物要进行科学地管理与监测,并对迁地保护效果进行评价。

(1)迁地保护要确定优先收集类群和采样策略。虽然建立迁地收集有很多目的,比如地理区系代表物种的收集、系统发育和生态意义的物种收集/或具有文化价值的物种收集,但迁地保护急需保护的濒危植物物种已经成为植物园近几十年来的一项核心工作(Gratzfeld, 2016)。新英格兰野生花卉协会开发了确定优先收集类群等级的系统。当植物的野外种群小于5个时,需要对每个种群进行采集,每个种群最少采集50个样品,是国际上普遍采用的采样策略。Hoban和Schlarbaum提出采样时要考虑种群大小和结构、种群间遗传联系和传粉方式,指出了大种群和风媒传粉植物采样策略应与小种群和昆虫传粉物种不同(周桔等, 2021)。具体的引种采样策略可参考国际植物园保护联盟(BGCI) 2016年出版的*From Idea to Realisation: BGCI's Manual on Planning, Developing and Managing Botanic Gardens*,以及BGCI和IABG共同出版的*Species Recovery Manual* (Gratzfeld, 2016; Heywood et al, 2018)。

(2)迁地保护要了解被保护植物的遗传信息。实现野外种群遗传多样性代表的收集是植物迁地保护的一项关键工作。植物园要重视濒危植物迁地保护中遗传代表性、遗传混杂、遗传适应等遗传风险管理(周桔等, 2021)。野外种群遗传多样性代表的收集对于保持其适应性、避免近交繁殖、特别是避免那些不能自花授粉植物间异型杂交的风险至关重要。Maxted等提出用空缺分析(gap analysis)方法提高采样遗传多样性涵盖度。由美国植物保护中心(1991)和Guerrant等(2004, 2014)提出的取样指导方针是最全面的综述之一,然而他们同时强调,没有一个放之四海而皆准的正确的取样策略或方案。迁地保护是整个保护过程的一部分,它为就地保护



(如物种回归)提供材料,因此,必须强调的是只有具有遗传多样性代表的迁地收集材料才适合直接用于回归活动;只有少量个体的活植物收集具有的保护价值有限,不过,它们仍具有间接的保护价值,如开展研究、园艺和教育(Oldfield & Newton, 2012)。同时,在进行活植物收集时,还要考虑物种濒危性、遗传代表性和维持遗传代表性的采集成本。

(3)迁地保护时要综合考虑物种、生物环境及其非生物环境。当前,有关物种与其生物环境方面的研究较多,如:物种的遗传结构与风险评价、适应机理、传粉者对繁育系统的影响、有害生物的干扰、模拟群落的构建等。有关非生物环境方面的研究主要集中在气候(即光温、水湿)相似性原则方面,也有少量研究关注植物营养条件与栽培措施。但是,迁地保护不同于引种驯化,前者强调保持物种原有的遗传特性,后者是通过人为措施逐步改变物种的生物学、生态学习性,使物种适应引种地环境以达到利用的目的(周桔等, 2021)。

在过去的几十年中,就地/迁地二分法仍然在很大程度上影响了自然保护运动及其机构的发展,为国际社会普遍采纳。但是,也有专家强调综合性方法和思路,如Braverman (2014)认为保护中就地与迁地的划分已经不能满足科学发展的要求。它们与自然文化和多自然的观念以及非传统的空间观念不相容,未来要运用综合保护方法(周桔等, 2021)。

#### 4 植物园与濒危植物综合保护

近年来综合保护理念日益受到重视,即将就地保护和迁地保护相结合,同时结合物种回归和恢复,最终提高保护工作的成功率。该理念最早是由Falk在1987年提出的,考虑到生物多样性受到威胁的多样化和复杂性,任何单一的保护方法是不可能成功的,使用多种方法是必要的。就地保护和迁地保护不应被视作独立的或不同的,而应该被视作兼容的、相互加强的方法(Falk, 1987)。传统观念认为植物园的作用是在栖息地退化期间对濒危物种进行迁地保护,被称为植物的“诺亚方舟”,但是这已不再被认为是足够的。为了更有效保护珍稀濒危植物,植物园在迁地保护过程中开始关注迁地保护和野外回归相结合,迁地保护为植物回归提供了苗木资

源和技术储备。近年来,回归已越来越多地被用作一种植物保护工具,是野生植物种群恢复重建的重要途径,是迁地保护和就地保护之间的桥梁。在中国,林业系统在珍稀濒危植物的保护中发挥着管理和主导作用,而植物园却是植物回归、种群复壮研究与实践的主要承担单位。因为植物园拥有的活植物资源、知识、技术和设施,为植物回归提供了重要支撑,同时植物园的环境教育和科普活动为回归活动的开展提供公众参与机会或争取社会资金的支持(文香英, 2020)。截至2020年年底,我国植物园开展了约300个植物回归引种项目,涉及206种(Ren, 2020)。全球很多植物园和树木园越来越多地与自然保护区、林业部门、非政府组织(NGOs)以及当地社区合作,开展综合保护活动。比如:国际植物园保护联盟(BGCI)通过全球树木运动(GTC)、与植物园等保护机构合作,在基于社区参与的基础上,利用综合保护方法在全球30多个国家开展了570多种濒危树木的保护,其中在我国开展了70多种,取得了良好的保护效果,也建立了濒危植物综合保护典型模式并在国内外逐步推广。

总之,植物园在世界各地的濒危植物综合保护中发挥重要作用,在支持这些保护工作中具有独特的优势。

#### 5 植物园迁地保护取得的成效

《全球植物保护战略》(GSPC 2011–2020)目标8:“对至少75%的濒危植物物种进行迁地收集,最好在原产地收集,另将至少20%纳入恢复方案”。植物园是对野生植物进行迁地保护的主要机构,全球植物园网络或者单个植物园在实现该目标中作出了重要贡献。

根据BGCI全球植物园数据库(BGCI GardenSearch Database: [https://tools.bgci.org/garden\\_search.php](https://tools.bgci.org/garden_search.php))统计,截至2021年12月31日,全球有植物园和树木园3,736个,其中1,193个植物园共迁地收集(包括活植物收集和种子)了1,573,452份资源,代表639,359个分类单元11万多种,占全球已知高等植物的1/3 ([https://tools.bgci.org/plant\\_search.php](https://tools.bgci.org/plant_search.php))。全球有树木58,497种(Beech et al, 2021; BGCI, 2021a),其中17,510种(29.9%)濒临灭绝,2/3的树木种类至少在一个保护区内得到就地保护,大约1/3的树木种

类在全球植物园或种子库得到迁地保护(BGCI, 2021)。我国有近200个植物园(树木园), 目前共迁地收集保存了约2.3万种植物(包括本土植物和国外引种), 其中濒危植物1,289种, 占中国濒危植物种类的41%。Mounce等(2017b)的研究表明, 全球植物园共收集保存了约41%的已知濒危植物物种, 其中有些物种已经野外灭绝。除了活植物收集, 全球74个国家370个植物园的种子库保存了57,051种野生植物的种子(O'Donnell & Sharrock, 2017)。著名例子包括英国皇家植物园邱园(kew)的千年种子库(Millennium Seed Bank, MSB), 其目标是在2020年前保存25%的可保存植物物种的种子, 目前该种子库收集了2.4亿颗种子, 代表近5,800属和360多个科的40,000多种野生植物 <https://www.kew.org/wakehurst/whats-at-wakehurst/millennium-seed-bank>。中国西南野生生物种质资源库目前共保存种子85,046份10,601种, 占我国有花植物种数的36%; 植物离体培养材料2,093种24,100份; DNA分子材料7,324种65,456份; 2,280种2,280份微生物菌株和2,203种60,262份动物种质资源等, 是亚洲最大的野生生物种质资源库, 它使我国的野生生物种质资源, 尤其是我国的特有种、珍稀濒危种、具重要经济价值、生态价值和科学研究价值物种的安全得到了有力保障(<http://www.genobank.org/Departments>)。国家林木种质资源库和良种基地保存种质资源3,300余份(含引进), 深圳国家基因库保存3,000万份生物样本(周桔等, 2021)。

植物园迁地收集的活植物或者种子不仅用于支持本单位职工的科学研究, 而且支持国内外的研究者从事生物防控、传粉研究和育种等工作并带来重要经济价值, 比如: 英国千年种子库为国际农业和生物科学中心(CABI)提供21种英国本土植物(包括濒危植物) 48个种子收集以测试这些植物是否受一种甲虫的影响, 使得CABI比预期提前一年释放了其生物制剂, 伦敦经济学院估计这种提供材料支持带来的价值达到2,700万英镑至12,100万英镑之间(Smith & Yvette, 2018)。根据ARCADIS (2016, [http://www.rbge.org.uk/assets/files/about\\_us/Corporate\\_Info/Economic%20Impact%20Assessment%202016.pdf](http://www.rbge.org.uk/assets/files/about_us/Corporate_Info/Economic%20Impact%20Assessment%202016.pdf))估计: 研究人员利用爱丁堡皇家植物园的迁地收集材料对苏格兰的经济带来的利益10年期间

达到1.71亿英镑, 15年期间达到2.48亿英镑, 25年期间达到3.85亿英镑。

总之, 植物园迁地保护的重要战略资源及其保育技术将对我国生态环境保护、社会经济发展和人民生命健康提供重要的支撑作用。

**致谢:** 在该文章准备的过程中, 得到了中国科学院华南植物园任海研究员、植物研究所马克平研究员和昆明植物研究所昆明植物园孙卫邦研究员的大力支持, 在此表示衷心的感谢!

## ORCID

文香英  <https://orcid.org/0000-0003-0485-7768>

## 参考文献

- Beech E, Rivers MC, Oldfield SF, Smith PP (2021) GlobalTreeSearch download 1.5. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33593.90725>.
- BGCI (2021a) GlobalTreeSearch online database. [https://tools.bgci.org/global\\_tree\\_search.php](https://tools.bgci.org/global_tree_search.php). (accessed on 2022-01-22)
- BGCI (2021) State of the World's Trees. BGCI, Richmond, UK.
- Braverman I (2014) Conservation without nature: The trouble with *in situ* versus *ex situ* conservation. *Geoforum*, 51, 47–57.
- Center for Plant Conservation (1991) Genetic sampling guidelines for conservation collections of endangered plants. In: *Genetics and Conservation of Rare Plants* (eds Falk DA, Holsinger KE). Oxford University Press, New York.
- Chen G, Sun WB (2018) The role of botanical gardens in scientific research, conservation, and citizen science. *Plant Diversity*, 40, 181–188.
- Falk DA (1987) Integrated Conservation Strategies for Endangered Plants. *Natural Areas Journal*, 7, 118–123.
- Gratzfeld J (2016) From Idea to Realisation: BGCI's Manual on Planning, Developing and Managing Botanic Gardens. Botanic Gardens Conservation International, Richmond, UK.
- Guerrant Jr EO, Havens K, Maunder M (2004) *Ex Situ Plant Conservation: Supporting Species Survival in the Wild*. Island Press, Washington, DC.
- Guerrant Jr EO, Havens K, Vitt P (2014) Sampling for Effective Ex Situ Plant Conservation. *International Journal of Plant Sciences*, 175, 11–20.
- Heywood VS, K, Harvey-Brown Y, Smith P (2018) BGCI and IABG's Species Recovery Manual. Botanic Gardens Conservation International, Richmond, UK.
- Huang HW (2018) *The Principle and Practice of Ex Situ Plant*

- Conservation. Science Press, Beijing. (in Chinese) [黄宏文 (2018) 植物迁地保育原理与实践. 科学出版社, 北京.]
- Maxted N, Dulloo E, Ford-Lloyd BV, Iriondo JM, Jarvis A (2008) Gap analysis: A tool for complementary genetic conservation assessment. *Diversity and Distributions*, 14, 1018–1030.
- Mounce R, Smith P, Brockington S (2017) *Ex Situ Conservation of Plant Diversity in the World's Botanic Gardens*. *Nature Plants*, 3, 795–802.
- O'Donnell K, Sharrock S (2017) The contribution of botanic gardens to *ex situ* conservation through seed banking. *Plant Diversity*, 39, 373–378.
- Oldfield S, Newton AC (2012) *Integrated Conservation of Tree Species by Botanic Gardens: A Reference Manual*. Botanic Gardens Conservation International, Richmond, UK.
- Ren H (2020) *Conservation and Reintroduction of Rare and Endangered Plants in China*. Springer, Berlin.
- Qin HN, Yang Y, Dong SY, He Q, Jia Y, Zhao LN, Yu SX, Liu HY, Liu B, Yan YH, Xiang JY, Xia NH, Peng H, Li ZY, Zhang ZX, He XJ, Yin LK, Lin YL, Liu QR, Hou YT, Liu Y, Liu QX, Cao W, Li JQ, Chen SL, Jin XH, Gao TG, Chen WL, Ma HY, Geng YY, Jin XF, Chang CY, Jiang H, Cai L, Zang CX, Wu JY, Ye JF, Lai YJ, Liu B, Lin QW, Xue NX (2017) Threatened Species List of China's Higher Plants. *Biodiversity Science*, 25, 696–744. (in Chinese and in English) [覃海宁, 杨永, 董仕勇, 何强, 贾渝, 赵莉娜, 于胜祥, 刘慧圆, 刘博, 严岳鸿, 向建英, 夏念和, 彭华, 李振宇, 张志翔, 何兴金, 尹林克, 林余霖, 刘全儒, 侯元同, 刘演, 刘启新, 曹伟, 李建强, 陈世龙, 金效华, 高天刚, 陈文俐, 马海英, 耿玉英, 金孝锋, 常朝阳, 蒋宏, 蔡蕾, 臧春鑫, 武建勇, 叶建飞, 赖阳均, 刘冰, 林秦文, 薛纳新 (2017) 中国高等植物受威胁物种名录. 生物多样性, 25, 696–744.]
- Ren H, Jin XH, Wang RJ, Wen XY (2021) *Plant Diversity and Conservation in China*. Henan Science and Technology Press, Zhengzhou. (in Chinese) [任海, 金效华, 王瑞江, 文香英 (2021) 中国植物多样性与保护. 河南科学技术出版社, 郑州.]
- Sharrock S (2020) *Plant Conservation Report 2020: A Review of Progress in Implementation of the Global Strategy for Plant Conservation 2011–2020*. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montréal, Canada and Botanic Gardens Conservation International, Richmond, UK. Technical Series, 95, 68.
- Smith P, Brown YH (2018) *BGCI Technical Review. The Economic, Social and Environmental Impacts of Botanic Gardens*. Botanic Gardens Conservation International, Richmond, Surrey.
- Wen XY (2020) *Integrated Conservation of Rare and Threatened Woody Plants: Practice of and Perspectives from BGCI Programs in China (2010–2020)*. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [文香英 (2020) 珍稀濒危木本植物综合保护: 国际植物园保护联盟(BGCI) 中国实践(2010–2020)及展望. 中国林业出版社, 北京.]
- Zhou J, Yang M, Wen XY, Li N, Ren H (2021) Strengthen *ex situ* conservation of plants and promote protection and utilization of plant resources. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 36, 417–424. (in Chinese with English abstract) [周桔, 杨明, 文香英, 李楠, 任海 (2021) 加强植物迁地保护, 促进植物资源保护和利用. 中国科学院院刊, 36, 417–424.]

(责任编辑: 周玉荣)





•研究报告•

# 中国梭梭属植物历史分布格局及其驱动机制

张丹<sup>1</sup>, 马松梅<sup>2\*</sup>, 魏博<sup>1</sup>, 王春成<sup>1</sup>, 张林<sup>2</sup>, 闫涵<sup>2</sup>

1. 石河子大学生命科学学院绿洲城镇与山盆生态系统重点实验室, 新疆石河子 832000; 2. 石河子大学理学院绿洲城镇与山盆生态系统重点实验室/干旱区景观生态重点实验室, 新疆石河子 832000

**摘要:** 梭梭属(*Haloxylon*)植物是藜科的古老孑遗物种, 探究末次间冰期(last interglacial period, LIG)和末次盛冰期(last glacial maximum period, LGM)以来中国梭梭属植物的历史地理分布格局及其驱动机制, 对了解气候变化背景下旱生植物区系的发展与演化具有重要意义。本研究利用梭梭属85个自然分布点数据(60条梭梭(*Haloxylon ammodendron*)分布记录、25条白梭梭(*H. persicum*)分布记录)和2套环境因子数据, 整合GIS空间分析和9种物种分布模型, 分析了梭梭属末次间冰期以来的地理分布格局变化及其驱动机制。基于62个梭梭属种群的叶绿体基因测序数据, 利用最小成本路径方法, 模拟了末次间冰期以来梭梭属可能的扩散路径。利用R软件prcomp函数对影响梭梭属分布的环境变量进行主成分分析(principal component analysis, PCA), 评价了环境变量对梭梭属适宜分布的贡献, 并分析了关键变量与分布适宜性的相关性。结果表明: (1)集成模型的模拟精度较单一模型显著提升, 且对白梭梭的模拟精度高于梭梭; (2)末次间冰期以来, 梭梭属植物的分布均经历了显著收缩和冰后期扩张, 末次间冰期至末次盛冰期时期, 在准噶尔盆地、塔里木盆地西部广泛分布的梭梭大面积向西退缩至避难所(准噶尔盆地西北缘和塔里木盆地西北缘); 白梭梭从准噶尔盆地、塔里木盆地西端向南退缩至避难所(准噶尔盆地南缘); 末次盛冰期至今, 梭梭向东沿甘肃北部扩张直至内蒙古西部阿拉善荒漠, 白梭梭向东北方向小范围扩张, 占据了准噶尔盆地西部和南缘; (3)末次间冰期以来的气候波动对梭梭属植物的分布存在较大限制, 降水因子主导了梭梭属适宜分布面积的变化, 温度因子影响了梭梭属分布适宜性的高低。

**关键词:** 梭梭属; 历史分布格局; 冰后期扩散路径; 末次盛冰期; 末次间冰期

张丹, 马松梅, 魏博, 王春成, 张林, 闫涵 (2022) 中国梭梭属植物历史分布格局及其驱动机制. 生物多样性, 30, 21192. doi: 10.17520/biods.2021192.  
Zhang D, Ma SM, Wei B, Wang CC, Zhang L, Yan H (2022) Historical distribution pattern and driving mechanism of *Haloxylon* in China. Biodiversity Science, 30, 21192. doi: 10.17520/biods.2021192.

## Historical distribution pattern and driving mechanism of *Haloxylon* in China

Dan Zhang<sup>1</sup>, Songmei Ma<sup>2\*</sup>, Bo Wei<sup>1</sup>, Chuncheng Wang<sup>1</sup>, Lin Zhang<sup>2</sup>, Han Yan<sup>2</sup>

1 Construction Corps Key Laboratory of Oasis Town and Mountain-basin System Ecology, College of Life Sciences, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000

2 Construction Corps Key Laboratory of Oasis Town and Mountain-basin System Ecology/Key Laboratory of Landscape Ecology in Arid Areas, College of Sciences, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000

### ABSTRACT

**Aims:** Under the influence of Quaternary climate fluctuation, xerophytes may have experienced large-scale migration and expansion. It is highly important to study the historical and geographical distribution pattern of xerophytes to understand the evolution of xerophyte flora under the background of climate fluctuation. The purpose of this study is to reveal the distribution pattern and driving mechanisms of *Haloxylon* in China since the last interglacial period (LIG) and the last glacial maximum period (LGM).

**Methods:** Based on 85 natural distribution sites and 2 sets of environmental factors, the geographic distribution pattern change, and driving mechanisms of *Haloxylon* since the LIG were analyzed by integrating GIS spatial analysis and 9 species distribution models. Based on the chloroplast gene data of 62 *Haloxylon* populations, we used the least cost path

收稿日期: 2021-05-13; 接受日期: 2021-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(41561007; 41261011)和草原生态修复治理补助项目(XJCYZZ202007)

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: shzmsm@126.com

method to simulate the possible diffusion paths of *Haloxylon* since the LIG. Principal component analysis (PCA) of environmental variables affecting the distribution of *Haloxylon* was carried out by using the `prcomp` function in R 4.1.1. The contribution of environmental variables to the suitable distribution of *Haloxylon* was evaluated, and the correlation between key variables and the degree of suitability was analyzed.

**Results:** We found that the precision of the integrated model was significantly improved compared with that of the single model. Since the LIG, the distribution of *Haloxylon* has undergone a significant decrease and post-glacial expansion. From the LIG to the LGM, *Haloxylon ammodendron* retreated westward from Junggar Basin and western Tarim Basin to the northwest and eastern margin of Junggar Basin and northwest margin of Tarim Basin. *Haloxylon persicum* retreated from the western end of Junggar Basin and Tarim Basin to the south of Junggar Basin. Since the LGM, *H. ammodendron* has expanded eastward, through northern Gansu and eastern region of the Qaidam basin to Alxa Desert in western Inner Mongolia. *Haloxylon persicum* has expanded northeast on a small scale, occupying the central and western part of Junggar Basin. The change of key climatic factors in the suitable distribution area of *Haloxylon* is relatively low. PCA results showed that the score coefficient of the precipitation factor in the first principal component is higher. The analysis of the relationship between the environmental factors affecting the distribution of *Haloxylon* and the suitability of the distribution area demonstrated that there is a significant correlation between temperature factors and the suitability of the distribution of *Haloxylon*.

**Conclusion:** The climate change in Quaternary caused the geographical distribution of *Haloxylon* to narrow and then subsequently expand. The main migration paths of *Haloxylon* are through the Junggar Basin and Hexi Corridor. Precipitation factors mainly affect the change of suitable distribution area of *Haloxylon*, while temperature factors mainly affect the degree of distribution suitability of *Haloxylon*.

**Key words:** *Haloxylon*; historical distribution pattern; post glacial diffusion path; last glacial maximum period; last interglacial period

古气候记录显示, 第四纪气候发生了多次冰期和间冰期的往复振荡(鹿化煜和郭正堂, 2015), 强烈影响了植被的历史发展动态, 塑造了其现代分布格局。例如, 在末次盛冰期, 部分北方树种可能在南方避难所生长(Svenning et al, 2008); 第四纪气候变化导致黄连木属(*Pistacia*)植物历史分布迁移(Kozhoridze et al, 2015); 末次盛冰期以来的气候变化导致陀螺果(*Melioidendron xylocarpum*)适宜生境大幅度降低(王璐等, 2018); 历史气候变化促使长花马先蒿(*Pedicularis longiflora*)发生了大范围迁移扩张事件(于海彬等, 2014)。此外, 冰期-间冰期的循环往复也导致植物在寒冷的冰期退缩至生境适宜的避难所, 冰后期又从避难所迁移扩散到其他适宜地区(Soltis et al, 2006)。例如, 对青藏高原地区一些高山植物的研究表明: 在末次盛冰期, 这些植物退缩至高原东部或东南部的冰期避难所, 冰期后大规模扩张到高原上(Meng et al, 2007); 荒漠植物鹰爪柴(*Convolvulus gortschakovii*)在冰期后由准噶尔盆地边缘的避难所扩张至阿拉善沙漠(Jia & Zhang, 2021)。追溯干旱荒漠植物的迁移扩散历史动态, 对了解第四纪以来旱生植物的进化与演化历史以及旱生植物区系的发生、发展等均具有重要意义。

基于地理信息系统(geographic information

system, GIS), 将遗传和地理空间数据融合在一起, 可以将宏观景观特征与微观遗传过程联系起来, 以揭示物种的进化历史(Manel et al, 2003; Manel & Segelbacher, 2009)。近年来, 基于GIS的方法或数据开发的一些强大工具在生物地理学的许多领域发挥了重要作用, 尤其是预测物种分布的模型(species distribution models, SDMs) (Richards et al, 2007; Schorr et al, 2012)和物种扩散迁移路径的模拟与可视化方法。

我国分布的梭梭属(*Haloxylon*)植物仅包括荒漠植物梭梭(*H. ammodendron*)和沙生植物白梭梭(*H. persicum*) (郭泉水等, 2005a), 均是第三纪孑遗植物, 以这两种植物为优势的荒漠植被占西北荒漠区的10%。梭梭喜生于砾石沙漠、粘土沙漠、固定和半固定沙地以及盐地(郭泉水等, 2005b), 白梭梭则喜生于固定沙丘、半固定沙丘、流动沙丘及丘间沙地(魏岩等, 2005)。梭梭和白梭梭是荒漠地区盐生、旱生植物群落的建群种, 能很好地适应沙漠地区干旱缺水的恶劣生境, 并覆盖地表, 在维护干旱地区生态平衡方面起着不可替代的作用, 如防风固沙、改善沙区气候条件、为荒漠动物提供栖息环境等(郭泉水等, 2005a)。然而, 近半个世纪以来, 由于环境恶化、人为砍伐和过度放牧造成大面积的梭梭属植物

衰退甚至死亡, 严重威胁中国西北地区沙漠生态系统生态功能的发挥(赵天飙, 2006; 杨燕南, 2015<sup>①</sup>)。

研究气候变化对梭梭属植物潜在分布区域的影响不仅利于中国西北地区沙漠生态系统的恢复, 也有助于梭梭属植物的科学保护。但是, 过去气候变化对中国梭梭属历史分布格局的影响, 特别是末次间冰期以来梭梭属植物的种群动态及其扩散路径尚不清楚, 成为深入理解中国梭梭属历史分布对气候变化的响应机制的瓶颈。本文围绕上述科学问题, 利用R软件的Biomod2程序包集成的9种物种分布模型, 结合GIS工具, 分析了末次间冰期以来梭梭属在我国西北地区的适宜分布、迁移通道及历史气候变化对梭梭属分布格局的影响。旨在探讨: (1) 末次间冰期以来中国梭梭属的历史地理分布格局及其变迁; (2) 中国梭梭属的冰期避难所推测及扩散路径分析; (3) 影响中国梭梭属适宜地理分布的环境驱动因素。

## 1 数据和方法

### 1.1 分布数据来源与处理

对中国梭梭属的自然分布区进行野外调查, 收集到62个梭梭属的自然分布点; 通过网络爬虫检索国家标本资源共享平台(<http://www.nsii.org.cn/2017/>)、中国植物智平台(<http://www.iplant.cn/>)以及国家教学标本资源共享平台(<http://mnh.scu.edu.cn/>)的记录并检索相关文献(付贵全等, 2016; 常红等, 2018), 收集到664条分布记录, 包括新疆甘家湖梭梭林、内蒙古哈腾套海、内蒙古乌拉特和青海柴达木梭梭林4个国家级自然保护区的分布点。通过Google Earth确定详细地理坐标, 矫正分布点偏差。基于R软件raster程序包(Street, 2020)进一步剔除距离过近和重复的分布点, 最终获得85条梭梭属分布记录用于模型的模拟, 其中梭梭60条、白梭梭25条。叶绿体基因片段(*trnS-trnG*)变异的单倍型信息来自本课题组的测序数据<sup>②</sup>。

### 1.2 环境数据来源与处理

气候数据采用WorldClim (<http://www.worldclim.org>)的基准时期(1970–2000年)、末次间冰期

(~140–120 ka B.P.)、末次盛冰期(~21 ka B.P.)的19个生物气候变量。模型模拟使用的中国省级行政区划底图来源于国家基础地理信息系统网站(<http://www.ngcc.cn/ngcc/>)。考虑空间环境变量对物种的限制作用, 可通过降低变量的空间维度以避免过拟合现象, 运用R软件Hmisc程序包中的cor函数对19个气候因子进行Pearson相关性分析, 剔除相关性高(> 80%)的变量(Parolo et al, 2008)。最终共有13个气候因子用于分析(表1)。

### 1.3 模型构建与评估

Biomod2是基于R软件开发的物种分布模型集合平台, 包含多种算法, 该平台可选择不同模型类别, 设置不同的初始条件、参数和限制性来达到最好的预测效果, 目前在物种分布模型构建中被广泛使用。本研究利用Biomod2程序包中的9个生态位模型, 包括广义线性模型(generalized linear models, GLM)、广义相加模型(generalized additive models, GAM)、分类树分析(classification tree analysis, CTA)、人工神经网络(artificial neural networks, ANN)、推进式回归树(generalized boosted models, GBM)、最大熵(maximum entropy, MaxEnt)、随机森林(random forests, RF)、柔性判别分析(flexible discriminant analysis, FDA)和表面分布区分室模型(one rectilinear envelope similar to bioclim, SRE)对梭梭和白梭梭的适宜分布区分别进行模拟。由于模型构建时需要物种的分布数据和伪存在数据, 本研究基于梭梭和白梭梭的分布点数据, 利用Biomod2程序包分别生成1,000个伪存在点数据用于模型模拟。模型构建过程中, 随机选取75%的样点数据用作模型训练, 剩余25%的样点数据用于模型验证, 每个模型算法进行10次重复, 并设置训练数据集和验证数据集的分布点数据和伪存在点数据比例恒定。采用加权平均法将所有TSS (true skill statistics) 值  $\geq 0.75$  的单个模型集成, 以TSS值为权重构建组合模型, 并将所有模型结果导入QGIS3.12转换为TIFF格式(高蓓等, 2017)。为了方便模型模拟结果的可视化表达, 本研究选择模型最大TSS值作为阈值(朱妮, 2019), 将模型结果区分为“适生区”和“不适生区”, 为进一步提升可视化效果, 利用ArcGIS空间分析工具提取分布点在适宜分布图上的适应性, 并计算这些值的标准差 $\sigma$ 和平均值 $\mu$ , 选择 $\sigma + \mu$ 作

① 杨燕南 (2015) 青海柴达木梭梭林国家级自然保护区景观保护与恢复研究. 硕士学位论文, 中南林业科技大学, 长沙.

② 魏博 (2020) 荒漠植物梭梭居群的遗传特征及保护策略研究. 硕士学位论文, 石河子大学, 石河子.



表1 影响梭梭和白梭梭分布的气候变量的主成分(PC)特征值

Table 1 Principal component (PC) eigenvalues of climate variables affecting the distribution of *Haloxylon ammodendron* and *H. persicum*

气候因子 Climatic factor	梭梭 <i>Haloxylon ammodendron</i>						白梭梭 <i>Haloxylon persicum</i>					
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
平均气温日较差 Mean diurnal range (Bio2)	-0.4010	-0.023	<b>-0.4471</b>	<b>0.3015</b>	<b>0.7218</b>	-0.0155	0.0800	0.0560	<b>0.6657</b>	0.0289	0.3137	<b>0.5855</b>
温度季节性 Temperature seasonality (Bio4)	0.3534	<b>0.3672</b>	0.3143	<b>0.3992</b>	0.1067	-0.2803						
最热月最高温 Max temperature of warmest month (Bio5)							<b>-0.4205</b>	-0.3078	-0.2280	-0.2558	0.3226	0.0864
最冷月最低温 Min temperature of coldest month (Bio6)							-0.3240	0.0336	<b>-0.5535</b>	0.0760	0.1049	<b>0.4440</b>
气温年较差 Annual temperature range (Bio7)							-0.2233	<b>-0.4475</b>	<b>0.2756</b>	<b>-0.4223</b>	0.3220	<b>-0.3503</b>
最湿季平均温 Mean temperature of wettest quarter (Bio8)	-0.0631	<b>0.6370</b>	<b>0.4028</b>	-0.0623	<b>0.3398</b>	<b>0.4079</b>						
最干季平均温 Mean temperature of driest quarter (Bio9)							-0.3546	0.2862	0.0772	<b>0.6046</b>	<b>0.5461</b>	-0.2837
最冷季平均温 Mean temperature of coldest quarter (Bio11)	-0.3831	0.2188	0.0367	<b>-0.7455</b>	0.0309	-0.1367						
年均降水量 Annual precipitation (Bio12)							<b>0.4753</b>	-0.1496	-0.2554	-0.0359	<b>0.4549</b>	0.3195
最湿月降水量 Precipitation of wettest month (Bio13)	0.0528	<b>-0.5800</b>	<b>0.6229</b>	<b>-0.1540</b>	<b>0.4640</b>	-0.1687	<b>0.4583</b>	0.2152	-0.2196	-0.2281	<b>0.4103</b>	-0.2874
最干月降水量 Precipitation of driest month (Bio14)	<b>0.4469</b>	-0.0836	-0.1889	-0.2130	0.1093	0.3556						
降水季节性变化 Precipitation seasonality (Bio15)	<b>-0.4064</b>	-0.2396	0.2714	0.2735	-0.2429	<b>0.6464</b>	-0.0183	<b>0.5997</b>	-0.0048	-0.3225	0.0936	-0.1350
最冷季降水量 Precipitation of coldest season (Bio19)	<b>0.4426</b>	-0.1004	-0.2010	-0.2152	0.2551	<b>0.4042</b>	0.3162	<b>-0.4364</b>	-0.0558	<b>0.4762</b>	0.0238	-0.2155

为阈值,从“适生区”中划分出“高度适生区”(魏博等, 2019)。

模型评价选择AUC (area under the curve)和TSS两种应用最广泛的评价指标。AUC值域范围为(0-1),大于0.8表示模型结果精确; TSS值域范围为[-1, 1],取值越接近1表示模型精度越高。

#### 1.4 扩散路径分析

基于物种分布频率越高的点位具有更低的迁移成本这个假设(Chan et al, 2011),首先,将物种分布模型转换成物种生境阻力模型,即利用ArcGIS重分类工具将每个时期梭梭属组合模型的结果图层进行新值取反转换成生境阻力模型(1 - SDM);其次,使用SDMtoolbox 2.0 (<http://www.sdmttoolbox.org/>)进行最小成本路径(least-cost path method, LCP)模拟,即基于梭梭属cpDNA数据集具有共享单倍型的点位之间的迁移路线,使用梭梭属的阻力层为每个样本区域创建成本距离栅格,在成本距离栅格的基础上,在每对居群之间建立连接路径;最后,将所有成对路径层进行ArcGIS栅格叠加分析,获得并可视化梭梭属的扩散路径(Chan et al, 2011)。

#### 1.5 环境变量分析

利用ArcGIS提取梭梭属每个分布点筛选后的环境因子数值及其在集成模型结果中的适宜程度数值,利用R软件prcomp函数对上述提取的环境变量进行主成分分析(PCA),以评估气候变量对梭梭属适宜性的贡献,并利用提取的适宜程度数值进行分组,评估气候变量与适生程度的相关性,以红色至绿色的渐变表示显著性从高到低(王华辰等, 2020)。计算每个时期的PC1评分,利用 $|PC1_{\text{基准}}| - |PC1_{\text{LGM}}|$ 和 $|PC1_{\text{LGM}}| - |PC1_{\text{LIG}}|$ 标准化结果比较不同时期研究区的气候变化,低值表明气候相对稳定,高值表明气候差异较大(Jiang et al, 2019),利用ArcGIS重分类工具对标准化结果进行可视化。

## 2 结果

### 2.1 不同模型的预测精度及空间表现力

本研究中,9种模型的模拟精度存在较大差异,集成模型的精度及可视化结果较单一模型均显著提升(图1, 图2)。其中,随机森林模型的模拟精度最高且重复建模的结果较稳定,模拟结果的平均TSS

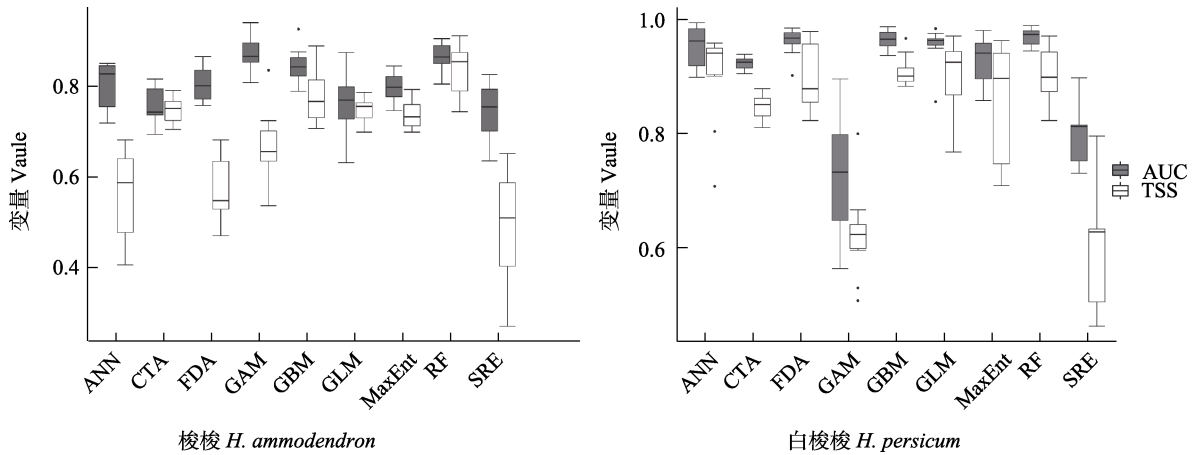


图1 不同模型预测精度评价。ANN: 人工神经网络; CTA: 分类树分析; FDA: 柔性判别分析; GAM: 广义相加模型; GBM: 推进式回归树; GLM: 广义线性模型; MaxEnt: 最大熵模型; RF: 随机森林; SRE: 表面分布区分室模型; AUC: 特征曲线下的面积; TSS: 真实技巧统计值。

Fig. 1 Evaluation of prediction results of different models. ANN, Artificial neural networks; CTA, Classification tree analysis; FDA, Flexible discriminant analysis; GAM, Generalized additive models; GBM, Generalized boosted models; GLM, Generalized linear models; MaxEnt, Maximum entropy; RF, Random forests; SRE, One rectilinear envelope similar to bioclim; AUC, Area under the curve; TSS, True skill statistics.

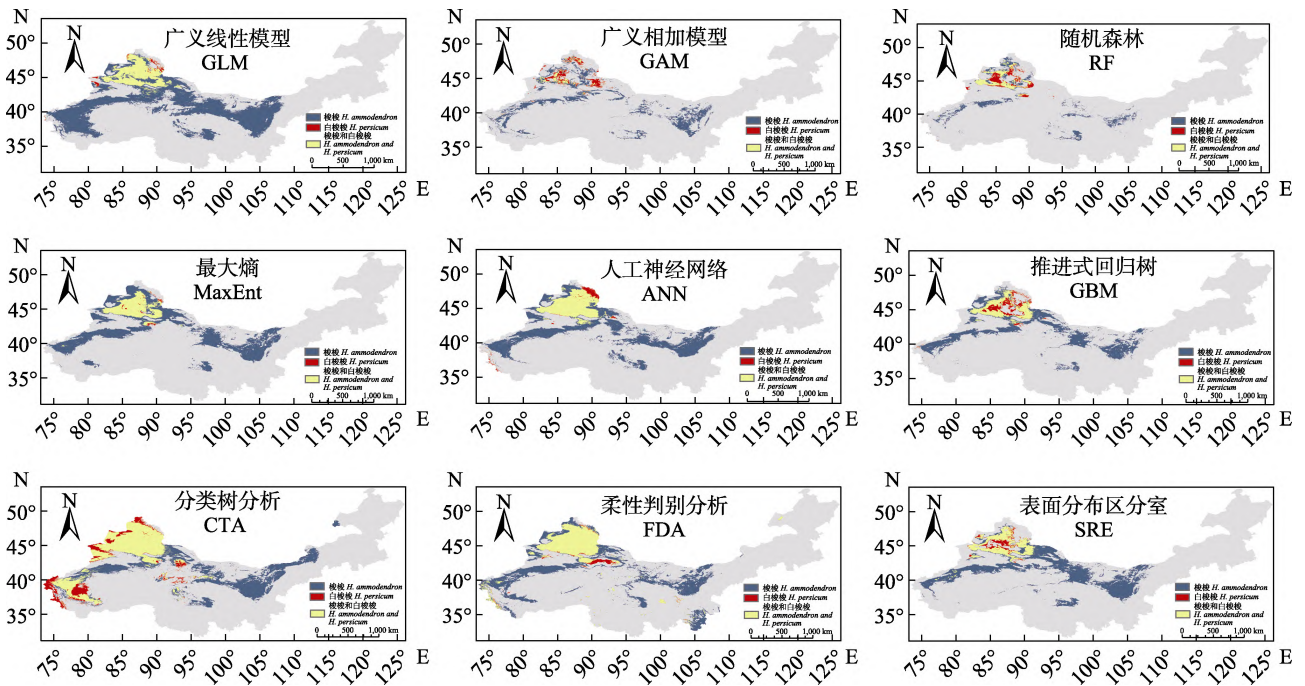


图2 基准气候(1970–2000年)条件下不同模型模拟的中国梭梭属植物的适宜分布

Fig. 2 Suitable distributions of *Haloxylon* plants in China simulated by different models in the base period (1970–2000). ANN, Artificial neural networks; CTA, Classification tree analysis; FDA, Flexible discriminant analysis; GAM, Generalized additive models; GBM, Generalized boosted models; GLM, Generalized linear models; MaxEnt, Maximum entropy; RF, Random forests; SRE, One rectilinear envelope similar to bioclim.

和AUC均高于0.8。而表面分布区分室模型和广义加法模型的表现最差, 平均TSS和AUC均低于0.74, 且检验结果不稳定, 不符合模型检验的最低标准,

因此未参与集成模型的构建。其他6种模型的模拟精度介于上述3种模型之间, 最终梭梭的集成模型结果由5个单一模型构成(ANN、GAM、GLM、

MaxEnt和RF), 白梭梭的集成模型结果由7个单一模型构成(ANN、CTA、FDA、GBM、GLM、MaxEnt和RF, 图1)。此外, 无论集成模型还是单一模型, 对梭梭和白梭梭及其不同时期的模拟结果均存在一定差异, 白梭梭的模拟精度总体均高于梭梭。

### 2.2 中国梭梭属植物历史地理分布格局

集成模型的模拟结果表明, 3个时期梭梭属植物均在准噶尔盆地和塔里木盆地存在小面积的分布, 且分布范围均经历了冰期收缩和冰后期再扩张(图3)。梭梭在末次间冰期占据了整个准噶尔盆地及塔里木盆地西部; 至末次盛冰期时大面积向西退缩至准噶尔盆地的西北缘、东缘以及塔里木盆地的西

北缘; 末次盛冰期至今, 又大面积向东沿甘肃北部、柴达木盆地东部扩张至内蒙古西部阿拉善荒漠。然而, 白梭梭在末次间冰期仅分布于准噶尔盆地以及塔里木盆地西端; 至末次盛冰期向西南方向退缩, 仅存在于准噶尔盆地南缘; 末次盛冰期至今, 仅向东北方向小范围扩张, 在准噶尔盆地的中西部有分布(图3)。

扩散路径分析结果表明, 末次间冰期以来中国梭梭属植物显示出相似的沿沙漠、戈壁迁移的扩散模式, 准噶尔盆地和河西走廊是梭梭最重要的扩散路径, 其中, 准噶尔盆地成为连接梭梭南北居群的重要路径, 河西走廊成为连接东西居群的重要路

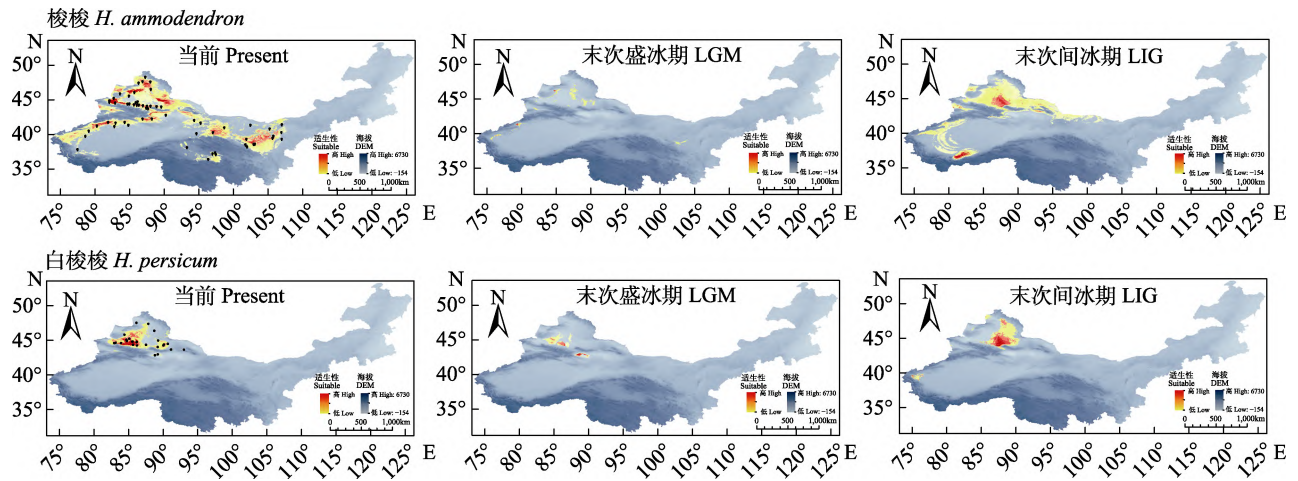


图3 中国梭梭属植物不同时期的适宜分布

Fig. 3 Suitable distribution of *Haloxylon* in different periods in China. LGM, Last glacial maximum period; LIG, Last interglacial period.

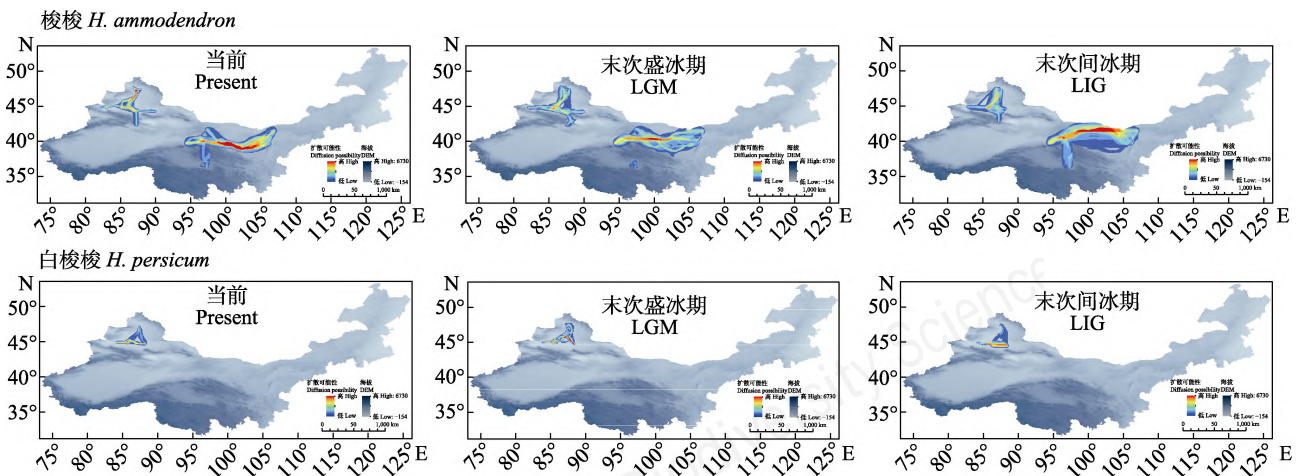


图4 中国梭梭属不同时期可能的迁移扩散路径

Fig. 4 Possible migration and diffusion paths of *Haloxylon* in different periods in China. LGM, Last glacial maximum period; LIG, Last interglacial period.



径。古尔班通古特沙漠则是连接白梭梭东西部居群的最重要的扩散路径(图4)。

### 2.3 影响梭梭属适宜分布的关键驱动因子及其异质性

基准气候因子的主成分分析结果表明, 降水因子对梭梭属分布的影响较大。其中, 梭梭的前两个主成分解释了环境因子对83.9% (PC1: 57.9%; PC2: 26.0%)的分布点的影响, 第一主成分中降水因子的得分系数较高, 而第二主成分中温度因子的得分较

高; 白梭梭的前两个主成分解释了环境因子对64.1% (PC1: 36.2%; PC2: 27.9%)的分布点的影响, 前两个主成分均显示出降水因子的得分较高(表1, 图5)。影响梭梭属分布的环境因子与分布区适宜性程度关系的分析表明, 温度因子与梭梭属分布适宜性的高低呈显著相关, 最湿季平均温和最冷季平均温与梭梭适宜性程度呈显著正相关; 最冷月最低温和最干季平均温与白梭梭的分布适宜性呈显著正相关。

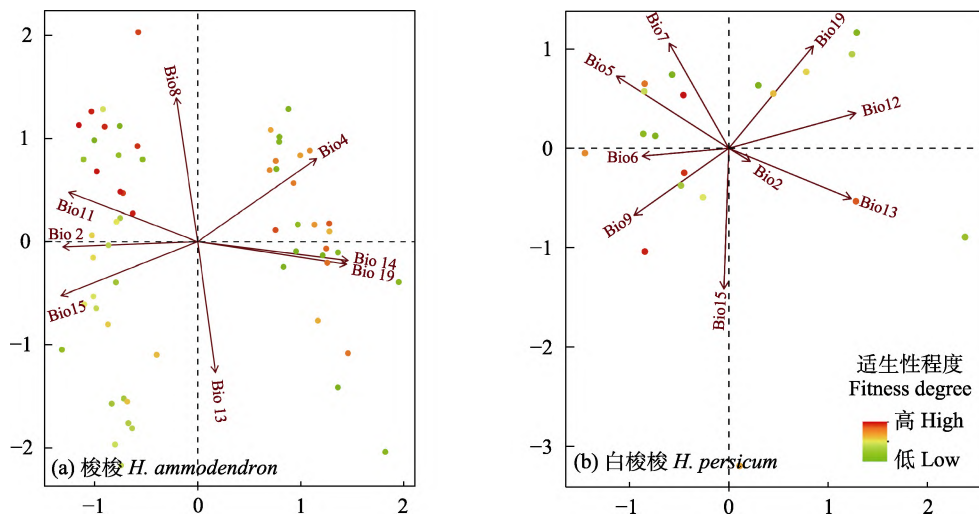


图5 基准气候(1970–2000年)条件下影响梭梭属植物分布的气候因子的主成分分析(PCA)。图中气候变量名称见表1。  
Fig. 5 Principal component analysis (PCA) of climatic factors affecting the distribution of *Haloxylon* under baseline climate (1970–2000). The names of climate variables in the figure are shown in Table 1.

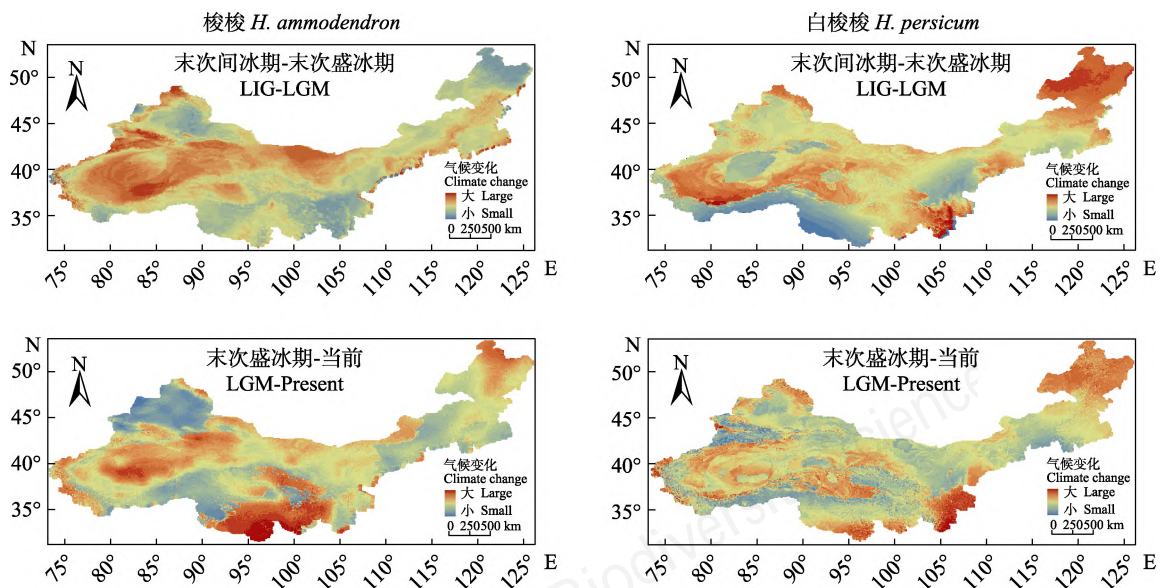


图6 不同时段影响梭梭和白梭梭分布的气候因子的变化程度  
Fig. 6 Changes of climatic factors affecting the distribution of *Haloxylon ammodendron* and *H. persicum* in different periods. LGM, Last glacial maximum period; LIG, Last interglacial period.

研究区的气候差异显示了不同时期气候因子的变化幅度(图6)。可以看出, 梭梭属植物的适生区域均分布于气候波动相对较低的区域, 如准噶尔盆地、塔里木盆地东北部和河西走廊西部等, 表明间冰期以来的气候波动对梭梭属植物的分布存在较大限制。具体来说, 末次间冰期至末次盛冰期, 准噶尔盆地南部、塔里木盆地西北部的气候波动较显著, 同时梭梭属的分布面积也大幅度收缩至准噶尔盆地中部; 而末次盛冰期至今, 研究区北部的干旱地区的气候波动较小, 如准噶尔盆地、甘肃北部、柴达木盆地以及内蒙古西部的阿拉善荒漠等, 梭梭属植物的分布也沿这些戈壁和沙漠的边缘扩张。

### 3 讨论

本研究结果表明, 集成模型在模拟精度及可视化效果方面较单一模型均有所提升(图1, 图2), 在人参(*Panax ginseng*) (赵泽芳等, 2016)、雪落樱桃(*Cerasus xueluoensis*) (王华辰等, 2020)的潜在分布模拟研究中也得到了相似的结果, 这是因为单一模型算法很难在所有情况下都能够得到最优结果, 集合模型则可以降低单一模型的不确定性, 进而显著提高物种分布预测的准确性<sup>①</sup>。相关研究表明, 物种分布的广度、聚散模式等显著影响模型模拟的准确性(Marmion et al, 2009), 本文中模型对白梭梭的模拟精度显著高于梭梭, 这是因为梭梭的分布范围较白梭梭更广, 在分布的聚散模式上也更为破碎, 因此在模型识别模拟时更为复杂。

本研究中, 第四纪以来中国梭梭属植物的历史分布均经历了先收缩后扩张(图3)。利用系统地理学方法对旱生植物的研究表明, 自末次间冰期以来麻黄属(*Ephedra*)、白刺属(*Nitraria*)植物也经历了类似的历史分布变迁(刘运东等, 2009; Yin et al, 2020)。这可能是由于第四纪冰期的气候并不是持续寒冷, 而是从年际到千年尺度的明显的气候波动, 末次间冰期表现为温暖干旱气候(刘煜, 2008), 较适宜类似梭梭属的荒漠植物生长, 因而梭梭属植物能够广泛分布于我国西北地区。而末次盛冰期, 青藏高原的隆升及季风的影响导致西北地区冷寒气候的形成, 对植物造成了极大的影响, 大多数植物在冰期

的分布范围大幅减小, 甚至消失、濒临灭绝, 梭梭属植物也可能受气候的影响经历了大范围的分布收缩。

此外, 本研究结果表明, 梭梭和白梭梭表现出相似的沿沙漠、盆地边缘扩散迁移的特点(图4)。梭梭和白梭梭为同域分布植物, 两种植物间的生态位分化并不显著(孙芳芳等, 2019), 因此可能存在较相似的进化历史。在冰后期, 随着气候逐渐回暖, 干旱的环境引发了广泛的沙漠发育, 西北地区很多荒漠植物表现出沿沙漠、戈壁大规模种群扩张现象, 但物种的扩张并不是盲目和无序的, 都会遵循最低迁移成本的原则进行, 通常会沿着河道、沟谷、平地等平缓地形进行迁移(于海彬等, 2014)。因此, 西北地区广泛分布的盆地、沙漠成为梭梭属植物迁移扩张的最佳通道, 且气候波动结果显示, 不同时期研究区的盆地、沙漠区域相对具有较小的气候差异, 更适宜梭梭和白梭梭的迁移(图6)。然而, 梭梭的扩散路径并不连续, 而是存在明显的间断式分布, 这可能是由于第四纪冰期以来, 新疆东部及甘肃西部气候波动较大, 且分布着祁连山、阿尔金山等山脉, 限制了梭梭属植物的扩散, 导致扩散路径分化。本研究结果还表明, 自末次间冰期以来, 梭梭属植物均在准噶尔盆地、塔里木盆地边缘存在小面积的高度适生的分布斑块, 推测很可能是梭梭属植物的多个分离的冰期避难所。基于孢粉数据的研究也表明, 第三纪期间准噶尔盆地及塔里木盆地存在梭梭属植物(宋之琛等, 2008)。准噶尔盆地的梭梭属居群也存在较高的遗传多样性(Suo et al, 2012)。经历气候的极端变化后, 部分植物在漫长的末次盛冰期退缩至相对适宜的区域, 并在气候条件适宜时向外扩展栖息地, 这些适宜的区域即成为了存活植物的冰期避难所。

气候变化对物种的分布甚至存亡具有重要的影响, 物种历史分布格局变迁通常又在一定程度上反映了气候的波动特征。本研究表明, 相对冰后期的气候变暖, 冰期的大幅度降温对梭梭属植物分布格局的影响较大, 导致其分布面积急速缩减(图3)。由于冰期温度的大幅下降, 青藏高原从第三纪开始的长时间连续升高, 阻碍了来自印度洋的潮湿海风, 导致中国西北部出现干旱气候, 从而形成西北地区复杂的地貌和干旱的气候, 随着干旱化向内蒙古的

<sup>①</sup> 孔晓泉 (2015) 物种分布模型的稳定性评估及应用软件. 硕士学位论文, 安庆师范学院, 芜湖.

扩展, 中新世晚期至上新世, 硬叶植物和旱生植物才逐渐形成<sup>①</sup>。因此, 相对冰后期的逐渐回暖, 末次盛冰期气温的大幅度下降对梭梭属植物的分布格局影响更大。本研究结果还表明, 降水和温度共同制约着梭梭属植物的分布, 其中降水主导着分布面积的变化, 而温度则与其适应性高低显著相关(表1, 图5)。水分在干旱区是影响植物存活、生长的主要限制因子。近几十年的研究表明, 即使梭梭和白梭梭能够分别通过不同的水分利用策略合理地利用干旱区有限的水资源以维持自身的生长发育, 但由于在干旱季节气温上升加快且波动剧烈, 导致大气干旱加剧, 引起浅层土壤水分丢失, 使得梭梭属幼苗大量死亡, 进而影响成年梭梭属植株的存活、繁殖, 制约了梭梭属种群的分布和更新。此外, 利用遥感技术对西北地区梭梭属植物的研究也表明, 梭梭属群落的盖度和生物量与生长季温度的偏相关最高(常静等, 2006)。冰期后, 西北地区的气温显著回升, 尤其是近几十年来, 春季气候急剧变暖, 这种强烈的变暖增加了沙漠生态系统的蒸散量, 也导致梭梭植被大面积退化(Zhao et al, 2021)。

## 参考文献

- Chan LM, Brown JL, Yoder AD (2011) Integrating statistical genetic and geospatial methods brings new power to phylogeography. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 59, 523–537.
- Chang H, Liu T, Liu HF, Du HY (2018) The impacts of climate change on the potential habitat of *Haloxylon ammodendron* and uncertainty analysis. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 36, 351–357. (in Chinese with English abstract) [常红, 刘彤, 刘华峰, 杜皓阳 (2018) 气候变化对我国梭梭潜在分布的影响及不确定性分析. 石河子大学学报(自然科学版), 36, 351–357.]
- Chang J, Pan CD, Shi RF (2006) Analysis on dominant species distribution patterns and relation of *Ass. Haloxylon persicum* + *H. ammodendron*. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 29(2), 26–29. (in Chinese with English abstract) [常静, 潘存德, 师瑞锋 (2006) 梭梭 - 白梭梭群落优势种群分布格局及其种间关系分析. 新疆农业大学学报, 29(2), 26–29.]
- Fu GQ, Xu XY, Ma JP, Xu MS, Liu J, Ding AQ (2016) Responses of *Haloxylon ammodendron* potential geographical distribution to the hydrothermal conditions under MaxEnt model. *Pratacultural Science*, 33, 2173–2179. (in Chinese with English abstract) [付贵全, 徐先英, 马剑平, 徐梦莎, 刘江, 丁爱强 (2016) 基于MaxEnt下梭梭潜在地理分布对水热条件的响应. 草业科学, 33, 2173–2179.]
- Gao B, Hu N, Guo YL, Gu W, Zou JY (2017) Comparison of the potential geographical distribution of foxtail millet (*Setaria italica*) predicted by different models. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 28, 3331–3340. (in Chinese with English abstract) [高蓓, 胡凝, 郭彦龙, 顾蔚, 邹继业 (2017) 中国谷子潜在地理分布的多模型比较. 应用生态学报, 28, 3331–3340.]
- Guo QS, Guo ZH, Yan H, Wang CL, Tan DY, Ma C, He HY (2005a) Study on potential distribution of *Haloxylon* plants dominated desert vegetation in China. *Acta Ecologica Sinica*, 25, 848–853, 946. (in Chinese with English abstract) [郭泉水, 郭志华, 阎洪, 王春玲, 谭德远, 马超, 何红艳 (2005a) 我国以梭梭属植物为优势的潜在荒漠植被分布. 生态学报, 25, 848–853, 946.]
- Guo QS, Wang CL, Guo ZH, Tan DY, Shi ZM (2005b) Geographic distribution of existing *Haloxylon* desert vegetation and its patch character in China. *Scientia Silvae Sinicae*, 41(5), 2–7, 219. (in Chinese with English abstract) [郭泉水, 王春玲, 郭志华, 谭德远, 史作民 (2005b) 我国现存梭梭荒漠植被地理分布及其斑块特征. 林业科学, 41(5), 2–7, 219.]
- Jia SW, Zhang ML (2021) Introgression of phylogeography lineages of *Convolvulus gortschakovii* (*Convolvulaceae*) in the northwest China. *Plant Systematics and Evolution*, 307, doi: 10.1007/s00606-020-01734-z.
- Jiang XL, An M, Zheng SS, Deng M, Su ZH (2019) Geographical isolation and environmental heterogeneity contribute to the spatial genetic patterns of *Quercus kerrii* (Fagaceae). *Heredity*, 120, 219–233.
- Kozhoridze G, Orlovsky N, Orlovsky L, Blumberg DG, Golan-Goldhirsh A (2015) Geographic distribution and migration pathways of *Pistacia*—Present, past and future. *Ecography*, 38, 1141–1154.
- Liu Y (2008) Simulations of Climate Changes over China in LGM and Mid-Holocene. PhD dissertation, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing. (in Chinese with English abstract) [刘煜 (2008) 末次冰期冰盛期和中全新世中国地区气候变化的数值研究. 博士学位论文, 南京信息工程大学, 南京.]
- Liu YD, Qi YT, Qiu YJ, Zhang H, Wang SM (2009) The geographical distribution, origin and evolution of *Ephedra*. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 23, 120–126. (in Chinese with English abstract) [刘运东, 齐妍婷, 邱远金, 张浩, 王绍明 (2009) 麻黄属的地理分布与起源演化. 干旱区资源与环境, 23, 120–126.]
- Lu HY, Guo ZT (2015) Impact of climatic change and human activity on desert and sand field in northern china since the last glacial maximum. *China Basic Science*, 17(2), 3–8. (in Chinese with English abstract) [鹿化煜, 郭正堂 (2015) 末次盛冰期以来气候变化和人类活动对我国沙漠和沙地环境的影响. 中国基础科学, 17(2), 3–8.]
- Manel S, Schwartz MK, Luikart G, Taberlet P (2003) Landscape genetics: Combining landscape ecology and population

① 应红 (2016) 柴达木盆地东缘中中新世以来气候与化学风化作用的演化. 硕士学位论文, 兰州大学, 兰州.



- genetics. *Trends in Ecology & Evolution*, 18, 189–197.
- Manel S, Segelbacher G (2009) Perspectives and challenges in landscape genetics. *Molecular Ecology*, 18, 1821–1822.
- Marmion M, Luoto M, Heikkinen RK, Thuiller W (2009) The performance of state-of-the-art modelling techniques depends on geographical distribution of species. *Ecological Modelling*, 220, 3512–3520.
- Meng LH, Yang R, Abbott RJ, Miede G, Hu TH, Liu JQ (2007) Mitochondrial and chloroplast phylogeography of *Picea crassifolia* Kom. (Pinaceae) in the Qinghai-Tibetan Plateau and adjacent highlands. *Molecular Ecology*, 16, 4128–4137.
- Parolo G, Rossi G, Ferrarini A (2008) Toward improved species niche modelling: *Arnica montana* in the Alps as a case study. *Journal of Applied Ecology*, 45, 1410–1418.
- Richards CL, Carstens BC, Lacey Knowles L (2007) Distribution modelling and statistical phylogeography: An integrative framework for generating and testing alternative biogeographical hypotheses. *Journal of Biogeography*, 34, 1833–1845.
- Schorr G, Holstein N, Pearman PB, Guisan A, Kadereit JW (2012) Integrating species distribution models (SDMs) and phylogeography for two species of alpine *Primula*. *Ecology and Evolution*, 2, 1260–1277.
- Soltis DE, Morris AB, McLachlan JS., Manos PS, Soltis PS. (2006) Comparative phylogeography of unglaciated eastern North America. *Molecular Ecology*, 15, 4261–4293.
- Song ZC, Wang WM, Mao FY (2008) Palynological implications for relationship between aridification and monsoon climate in the tertiary of NW China. *Acta Palaeontologica Sinica*, 47, 265–272. (in Chinese with English abstract) [宋之琛, 王伟铭, 毛方园 (2008) 依据孢粉资料探讨我国西北地区第三纪时期的干旱化及其与季风的关系. *古生物学报*, 47, 265–272.]
- Street GM (2020) Habitat suitability and distribution models with applications in R. *The Journal of Wildlife Management*, 84, 1212–1213.
- Sun FF, Nie YB, Ma SM, Wei B, Ji WQ (2019) Species differentiation of *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum* based on ITS and cpDNA sequences. *Scientia Silvae Sinicae*, 55(3), 43–53. (in Chinese with English abstract) [孙芳芳, 聂迎彬, 马松梅, 魏博, 吉万全 (2019) 基于ITS和cpDNA序列的梭梭和白梭梭物种分化. *林业科学*, 55(3), 43–53.]
- Suo ZL, Jia ZQ, Lu Q, Pan BR, Jin XB, Xu G, Peng XQ, Sun HB, Tao YH (2012) Distinguishing *Haloxylon persicum* and *H. ammodendron* (*Haloxylon* Bunge, Amaranthaceae) using DNA marker. *AASRI Procedia*, 1, 305–310.
- Svenning JC, Normand S, Kageyama M (2008) Glacial refugia of temperate trees in Europe: Insights from species distribution modelling. *Journal of Ecology*, 96, 1117–1127.
- Wang HC, Zhu H, Li YF, Yi XG, Li M, Nan CH, Wang XR (2020) Potential distribution and ecological characteristic of Chinese endemic species *Cerasus xueluoensis*. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 28, 136–144. (in Chinese with English abstract) [王华辰, 朱弘, 李涌福, 伊贤贵, 李蒙, 南程慧, 王贤荣 (2020) 中国特有植物雪落樱桃潜在分布及其生态特征. *热带亚热带植物学报*, 28, 136–144.]
- Wang L, Xu XG, Li Y (2018) Prediction of potential geographical distribution pattern change for *Melioidendron xylocarpum* Handel-Mazzetti since the Last Glacial Maximum. *Chinese Journal of Ecology*, 37, 278–286. (in Chinese with English abstract) [王璐, 许晓岗, 李垚 (2018) 末次盛冰期以来陀螺果潜在地理分布格局变迁预测. *生态学杂志*, 37, 278–286.]
- Wei B, Ma SM, Song J, He LY, Li XC (2019) Prediction of the potential distribution and ecological suitability of *Fritillaria walujewii*. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 228–234. (in Chinese with English abstract) [魏博, 马松梅, 宋佳, 贺凌云, 李晓辰 (2019) 新疆贝母潜在分布区域及生态适宜性预测. *生态学报*, 39, 228–234.]
- Wei Y, Yin LK, Yan C (2005) Study on the flowering and wind-borne pollination characteristics of *Haloxylon persicum*. *Arid Zone Research*, 22, 85–89. (in Chinese with English abstract) [魏岩, 尹林克, 严成 (2005) 白梭梭开花及风媒传粉特点. *干旱区研究*, 22, 85–89.]
- Yin HX, Wang LR, Shi Y, Qian CJ, Zhou HK, Wang WY, Ma XF, Tran LP, Zhang BY (2020) The East Asian winter monsoon sets as a major selective factor in the intraspecific differentiation of drought-tolerant *Nitraria tangutorum* in Northwest China. *Plants (Basel)*, 9, 1100.
- Yu HB, Zhang YL, Li SC, Qi W, Hu ZJ (2014) Predicting the dispersal routes of alpine plant *Pedicularis longiflora* (*Orobanchaceae*) based on GIS and species distribution models. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25, 1669–1673. (in Chinese with English abstract) [于海彬, 张懿锂, 李士成, 祁威, 胡忠俊 (2014) 基于GIS和物种分布模型的高山植物长花马先蒿迁移路线模拟. *应用生态学报*, 25, 1669–1673.]
- Zhao L, Li WJ, Yang G, Yan K, He XL, Li FD, Gao YL, Tian LJ (2021) Moisture, temperature, and salinity of a typical desert plant (*Haloxylon ammodendron*) in an arid oasis of Northwest China. In: *Sustainability*, 13, 1908.
- Zhao TB (2006) Studies on Spatial Distribution Pattern, Habitats Selection and Dynamic of *Rhombomys opimus* Population. PhD dissertation, Inner Mongolia University, Hohhot. (in Chinese with English abstract) [赵天飙 (2006) 大沙鼠种群空间分布格局、栖息地选择及种群动态的研究. 博士学位论文, 内蒙古大学, 呼和浩特.]
- Zhao ZF, Wei HY, Guo YL, Gu W (2016) Potential distribution of *Panax ginseng* and its predicted responses to climate change. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 27, 3607–3615. (in Chinese with English abstract) [赵泽芳, 卫海燕, 郭彦龙, 顾蔚 (2016) 人参潜在地理分布以及气候变化对其影响预测. *应用生态学报*, 27, 3607–3615.]
- Zhu N (2019) Modelling the suitable habitat distribution of *Magnolia officinalis* using ensemble model. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 37, 481–489. (in Chinese with English abstract) [朱妮 (2019) 基于组合物种分布模型(ensemble model)的厚朴适宜生境分布模拟. *四川农业大学学报*, 37, 481–489.]

(责任编辑: 陈圣宾 责任编辑: 黄祥忠)



•研究报告•

# 东北地区水獭分布格局与保护优先区识别

张超<sup>1</sup>, 陈敏豪<sup>1</sup>, 杨立<sup>2</sup>, 庄鸿飞<sup>1</sup>, 武曙红<sup>1</sup>, 湛振杰<sup>1</sup>, 王嘉栋<sup>1</sup>, 栾晓峰<sup>1\*</sup>

1. 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083; 2. 中山大学生命与科学学院, 广州 510275

**摘要:** 水獭是水生生态系统重要的指示种和旗舰种, 由于强烈的人为干扰, 中国的水獭种群数量大幅下降, 部分区域已局部灭绝。然而目前国内对水獭的调查和研究非常有限, 本底不清的状况已经严重影响到水獭的野外保育工作。本文以东北地区的欧亚水獭指名亚种(*Lutra lutra lutra*)为研究对象, 基于2016–2020年的调查数据, 使用组合建模的方法评估了水獭的潜在分布区; 利用地理信息系统和系统保护规划软件分析了水獭的保护优先区并计算了各省级行政区内水獭潜在分布区和保护优先区面临的人类压力; 结合国家级自然保护区的空间布局分析了水獭的保护现状, 并以内蒙古森工集团、大兴安岭林业集团、伊春森工集团三大国有林区为例分析了重点国有林区在水獭保护中的作用。结果表明: (1)水獭潜在分布区和保护优先区面积分别为104,515.04 km<sup>2</sup>和45,448.99 km<sup>2</sup>, 其中大兴安岭的水獭保护优先区集中连片, 并与小兴安岭的保护优先区相连, 栖息地之间没有明显地理隔离, 是维持东北地区水獭种群稳定的重中之重; (2)水獭面临的人类压力大小依次为: 辽宁 > 吉林 > 黑龙江 > 内蒙古; (3)研究区内110个国家级自然保护区中有63个包含水獭潜在分布区, 覆盖面积为12,168.93 km<sup>2</sup>, 仅占水獭潜在分布区面积的11.64%, 其中32个国家级自然保护区包含水獭保护优先区, 占水獭保护优先区面积的10.88%; (4)三大国有林区涵盖了71.18%的水獭潜在分布区和79.26%的保护优先区(面积分别为74,390.89 km<sup>2</sup>和36,022.22 km<sup>2</sup>)。由此可见, 尽管水獭潜在分布区中国家级自然保护区占比较低, 但是在天然林全面禁伐的背景下, 重点国有林区可能在未来东北地区的生物多样性保护中发挥更大作用, 因此我们建议将重点国有林区中具有重要保护价值的区域逐步纳入以国家公园为主体的自然保护地体系中, 以实现生物多样性的系统性和完整性保护。最后, 本文结合研究结果和实地调研提出以下保护建议: (1)加强对河流污染物的管理; (2)控制渔民捕鱼强度; (3)开展全面的水獭专项调查并建立长期的监测体系; (4)加大对水獭的科研投入; (5)加强宣传力度, 提升公众保护意识。

**关键词:** 欧亚水獭; 组合模型; 分布; 保护优先区; 国有林区

张超, 陈敏豪, 杨立, 庄鸿飞, 武曙红, 湛振杰, 王嘉栋, 栾晓峰 (2022) 东北地区水獭分布格局与保护优先区识别. 生物多样性, 30, 21157. doi: 10.17520/biods.2021157.

Zhang C, Chen MH, Yang L, Zhuang HF, Wu SH, Zhan ZJ, Wang JD, Luan XF (2022) Distribution pattern and identification of conservation priority areas of the otter in Northeast China. Biodiversity Science, 30, 21157. doi: 10.17520/biods.2021157.

## Distribution pattern and identification of conservation priority areas of the otter in Northeast China

Chao Zhang<sup>1</sup>, Minhao Chen<sup>1</sup>, Li Yang<sup>2</sup>, Hongfei Zhuang<sup>1</sup>, Shuhong Wu<sup>1</sup>, Zhenjie Zhan<sup>1</sup>, Jiadong Wang<sup>1</sup>, Xiaofeng Luan<sup>1\*</sup>

1 School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083

2 School of Life Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275

### ABSTRACT

**Aims:** The otter is an indicator and flagship species of aquatic ecosystems. Its populations have undergone a drastic decline in China, and have become locally extinct in some regions due to anthropogenic disturbance. However, the current literature on otters in China is inadequate, which has subsequently affected conservation of the species. We aim to assess the potential distribution and conservation priority areas of the Eurasian otter (*Lutra lutra*) in Northeast China.

收稿日期: 2021-04-24; 接受日期: 2021-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(31972944; 32000352)

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: luanxiaofeng@bjfu.edu.cn

**Methods:** In this study, we integrated species distribution models with otter survey data from 2016 to 2020 to assess Eurasian otter distribution. Then, we used the geographic information system and core-area zonation algorithm in Zonation 4.00 to identify conservation priority areas for otter protection. Using the anthropogenic pressures layer, we also evaluated anthropogenic stressors in each province. Then, we analyzed the conservation status of the otter based on the spatial distribution of national nature reserves. Furthermore, we used Inner Mongolia Forest Industry Group, Daxing'anling Forestry Group and Yichun Forest Industry Group as case studies to analyze the role of state-owned forest areas for otter conservation.

**Results:** The results demonstrate that potential distribution and conservation priority areas cover 104,515.04 km<sup>2</sup> and 45,448.99 km<sup>2</sup>, respectively. Large swathes of conservation priority areas remain for the otter in Daxing'anling which are connected with conservation priority areas in Xiaoxing'anling and there is no obvious geographical boundary between them. Therefore, these regions are mandatory to conserve to maintain the stability of otter populations in Northeast China. Otters in the Liaoning Province faced the greatest anthropogenic pressures, followed by the Jilin Province and Heilongjiang Province. Otters in the Inner Mongolia Autonomous Region faced the lowest amount of pressure. There is potential distribution for the otter in 63 nature reserves and conservation priority areas in 32 nature reserves out of the 110 reserves in the region. The study area includes 11.64% of the otter's potential distribution and 10.88% of conservation priority areas. Three state-owned forest industry groups cover 71.18% of the potential distribution of the otter (74,390.89 km<sup>2</sup>) and 79.26% of the conservation priority areas (36,022.22 km<sup>2</sup>).

**Conclusions:** This study indicates that state-owned forest areas may play a greater role in the protection of biodiversity following a comprehensive ban on logging in natural forests. Therefore, we propose that areas with important conservation value in state-owned forest land should be gradually included under the protections of national parks in order to achieve systematic and complete protection of biodiversity. Finally, we suggest: (1) strengthening the management of river pollutions; (2) reducing fishing intensity; (3) a long-term field monitoring network be established to study population changes in otters; (4) increasing the investment in scientific research on otters; and (5) raising awareness of otter conservation through public education.

**Key words:** Eurasian otter; ensemble models; distribution; conservation priority areas; state-owned forest areas

水獭属哺乳纲食肉目鼬科, 曾经是古北区分布最广的哺乳动物之一, 因其对水质高度敏感并处于食物链的顶端, 也是水生生态系统的指示种和旗舰种 (Mason & MacDonald, 1986; Kruuk, 2006; Cianfrani et al, 2011; Zhang et al, 2018)。然而受大规模人为活动的影响, 全球水獭种群和栖息地已遭受严重破坏 (Roos et al, 2015; Gomez et al, 2016)。中国分布的欧亚水獭 (*Lutra lutra*)、小爪水獭 (*Aonyx cinereus*) 和江獭 (*Lutrogale perspicillata*) 自20世纪以来种群经历了断崖式的下降, 部分地区已经野外灭绝 (雷伟和李玉春, 2008; 朴正吉, 2011; Li & Chan, 2017)。IUCN濒危物种红色名录将欧亚水獭列为近危 (NT), 小爪水獭和江獭列为易危 (VU)。在我国, 2021年调整后的《国家重点保护野生动物名录》将3种水獭列为国家二级重点保护野生动物。

建立自然保护地和实施天然林保护工程是我国保护生物多样性的重要途径 (刘惠兰和黄俊毅, 2015; 唐小平等, 2019)。多年来, 随着自然保护地体系的构建和天然林的全面商业性禁伐, 部分区域珍稀物种的种群规模已经开始恢复 (黄宝荣等, 2018)。

但日趋濒危的水獭并没有得到应有的关注, 国内对水獭的调查和研究相当有限 (Li & Chan, 2018; Zhang et al, 2018)。此外, 由于水獭作为水生野生动物由渔业部门管理, 其栖息地在空间上又主要归林草部门管理, 这样的管理方式也对水獭的调查、研究和保护造成了诸多不便 (Zhang et al, 2018)。本底不清、家底不明的状况已严重影响水獭的野外保育工作。

掌握物种的地理分布情况并对其保护优先区进行识别是保护生物学的重要基础, 同时也能为保护决策的制定和保护地规划等提供基础数据 (Guisan et al, 2013; Yang et al, 2021)。有学者曾利用多种数据来源分析了中国水獭400年的分布变化, 结果显示东北地区和西南地区是目前水獭的主要分布区 (Zhang et al, 2018)。但大尺度研究往往存在基础数据精度较低等问题, 因而不能较好地指导中小尺度的保护规划 (Hu et al, 2019)。东北林区是我国最大的国有林区, 是建立以国家公园为主体的自然保护地体系的重点地区, 也是中国北方水獭分布最为集中的区域 (郝占庆等, 1998; Zhang et al, 2018;



徐卫华等, 2021)。但由于非法捕杀、鱼类资源过度开发、栖息地破坏等原因, 曾广泛分布于东北地区欧亚水獭种群数量持续下降(Zhang et al, 2016, 2018)。因此, 科学评估东北地区的水獭分布格局并对其保护优先区进行识别可为未来水獭保护规划的制定奠定基础。

本研究基于2016–2020年的调查数据, 使用组合模型模拟了东北地区水獭的潜在分布区, 利用地理信息系统和Zonation模型识别了水獭的保护优先区并计算了各省区水獭面临的人类压力, 在此基础上结合国家级自然保护区的空间布局评估了水獭保护现状, 并以内蒙古森工集团、大兴安岭林业集团、伊春森工集团为例分析了重点国有林区在水獭保护中的作用, 以期为我国东北地区的水獭保护工作提供科学支撑和依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

研究区地跨黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古4个省级行政区(38°42′–53°17′ N, 115°30′–135°06′ E)(图1)。该地区涵盖了中温带和寒温带, 分布有我国

最大的天然林区, 主要山脉包括大兴安岭、小兴安岭、张广才岭、完达山、长白山等, 海拔0–2,691m。除了大面积的森林, 研究区内还分布着大面积的草原和湿地生态系统。多样化的生态系统孕育了大量的野生动植物, 如东北虎(*Panthera tigris altaica*)、东北豹(*P. pardus orientalis*)、貂熊(*Gulo gulo*)、丹顶鹤(*Grus japonensis*)等, 使之成为全球同纬度生物多样性最高的地区之一(吴征镒, 1980; 赵正阶, 1999; 丁一汇, 2013)。

### 1.2 数据收集

为尽可能获得准确而全面的水獭分布数据, 研究团队于2016–2020年通过访问调查、问卷调查、野外实地调查、粪便收集、文献收集等多种方法共获得水獭分布位点数据247个(附录1)。为降低空间自相关对物种分布建模的影响, 本研究利用水獭的最小家域对3 km内的分布位点进行稀疏化处理, 即3 km内的分布位点仅随机保留一个, 最终得到231个水獭分布点用于分布建模(图1)(Erlinge, 1967)。

环境变量的选择对于物种分布建模至关重要, 理想状态下应根据物种的生态学习性做出科学选择(Williams et al, 2012; Braunisch et al, 2013)。本文

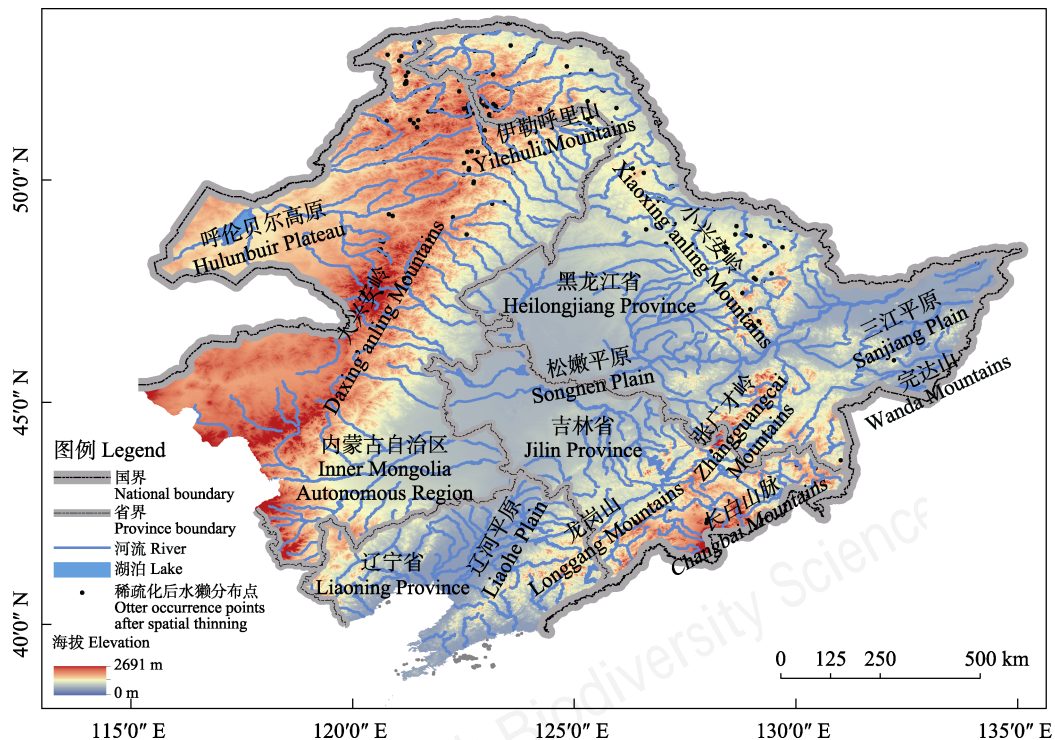


图1 中国东北地区稀疏化后水獭的231个分布位点

Fig. 1 A total of 231 occurrence points of otter after spatial thinning in Northeast China

参考前人研究并结合水獭的生态学习性选择了11个环境因子用于水獭的分布建模(Robitaille & Laurence, 2002; Remonti et al, 2009; Cianfrani et al, 2011; Zhang et al, 2018), 包括: (1) 5个与水相关的环境变量, 分别是年降水量、最湿季降水量、最干季降水量、距河流距离、湿润指数; (2) 2个地形变量, 分别是海拔和地表起伏度; (3) 1个植被变量: 有林地密度; (4) 3个人为影响变量, 分别是距道路距离、人口密度和人类压力。其中年降水量、最湿季降水量、最干季降水量下载自世界气候数据网站(<http://www.worldclim.org/>); 距河流距离和距道路距离数据来源于全国地理信息资源目录服务系统(<https://www.webmap.cn/>); 湿润指数下载自资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>); 海拔数据下载自美国航天飞机雷达地形测绘数据(SRTM 90 m Digital Elevation Database); 地表起伏度下载自全球变化科学研究数据出版系统(<http://www.geodoi.ac.cn/>); 有林地密度由资源环境科学与数据中心土地利用类型数据提取计算得到(<http://www.resdc.cn/Default.aspx>); 人口密度数据下载自资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>); 人类压力变量下载自社会经济数据和应用中心(<https://sedac.ciesin.columbia.edu/data/sets/browse>), 这一变量由13种人类对自然的压力数据模拟而来, 反映了人类对自然景观的影响程度, 取值范围0–1 (Kennedy et al, 2019)。所有环境变量均为连续性变量, 栅格大小统一定义为30" (约1 km)。因环境因子的多重共线性会影响建

模的准确性, 本研究使用方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)对所有环境变量进行预处理, 以降低变量之间的过度拟合( $VIF < 10$ ) (Dormann et al, 2013), 经过两次迭代运算最终筛选出10个环境变量用于水獭分布建模(表1)。

### 1.3 模型模拟

使用R软件开发的BIOMOD2程序包对水獭的分布状况进行模拟(Thuiller et al, 2009; Yang et al, 2021)。BIOMOD2包含10种模型, 分别是广义线性模型(GLM)、广义加法模型(GAM)、广义推进模型(GBM)、分类树模型(CTA)、人工神经网络模型(ANN)、柔性判别分析(FDA)、表面分布区分室模型(SRE/BIOCLIM)、多元适应回归样条函数(MARS)、随机森林(RF)和最大熵(MaxEnt)模型(Thuiller et al, 2009; Zhang et al, 2020)。为提高建模精度, 我们将道路30 km设置为背景点偏差校正区, 生成2,000个背景点作为水獭的无分布数据, 并在组合建模前使用真实技巧统计值(true skill statistics, TSS)和受试者操作特征曲线下的面积值(area under curve, AUC)对程序包内的10个模型进行评估, 根据模型评估标准选择TSS > 0.85且AUC > 0.9的算法作为组合建模的最优算法(Hanley & Mcneil, 1982; Allouche et al, 2006)。依据运算结果, 最终选择GBM和RF用于水獭的分布模拟(图2)。本研究在建模中随机选取70%的数据作为训练样本, 30%的数据作为验证样本, 使用BIOMOD2程序包对建模算法进行调参, 重复迭代运算30次以降低结果的不确

表1 环境变量的方差膨胀因子(VIF)及重要性

Table 1 Variance inflation factor (VIF) value and importance of environmental variables

环境变量 Environmental variables	第一次方差膨胀因子评估 VIF evaluation for the first time	第二次方差膨胀因子评估 VIF evaluation for the second time	重要性 Importance
年降水量 Annual precipitation	14.246	—	—
最湿季降水量 Precipitation of wettest quarter	6.432	2.815	0.017
最干季降水量 Precipitation of driest quarter	4.322	2.870	0.018
距河流距离 Distance from river	1.361	1.357	0.521
湿润指数 Moisture index	3.120	2.946	0.051
海拔 Elevation	7.402	7.078	0.006
地表起伏度 Relief degree of land surface	6.491	6.416	0.002
有林地密度 Forest density	2.732	2.429	0.02
距道路距离 Distance from road	1.389	1.376	0.003
人口密度 Human density	1.070	1.067	0.117
人类压力 Anthropogenic pressures	2.590	2.500	0.048

年降水量被排除(VIF > 10) Annual precipitation was excluded by the VIF (VIF > 10)

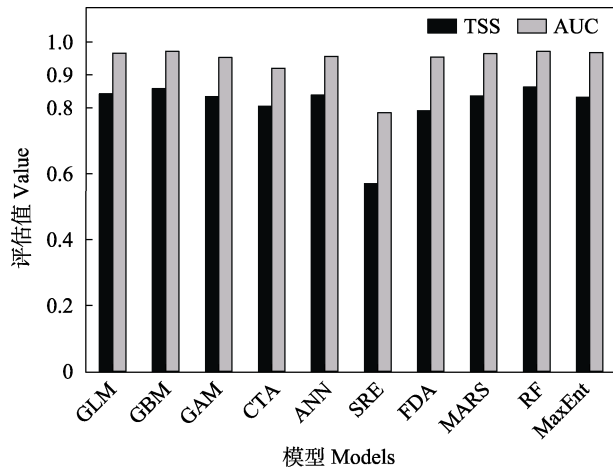


图2 模型选择标准(TSS: 真实技巧统计值; AUC: 受试者操作特征曲线下的面积值)。GLM: 广义线性模型; GBM: 广义推进模型; GAM: 广义加法模型; CTA: 分类树模型; ANN: 人工神经网络模型; SRE: 表面分布区分室模型; FDA: 柔性判别分析; MARS: 多元适应回归样条函数; RF: 随机森林; MaxEnt: 最大熵模型。

Fig. 2 Models selection (TSS, True skill statistics; AUC, Area under the receiver operating characteristic curve). GLM, Generalized linear model; GBM, Generalized boosted regression model; GAM: Generalized additive model; CTA, Classification tree analysis; ANN, Artificial neural network; SRE, Surface range envelope; FDA, Flexible discriminant analysis; MARS, Multiple adaptive regression splines; RF: Random forest; MaxEnt, Maximum entropy.

定性, 最后使用最大TSS作为切分阈值将生境适宜度图转化为分布/不分布的二值图(Thuiller et al, 2009; 张晓玲等, 2019; Yang et al, 2021)。

#### 1.4 保护优先区识别

本文使用热点分析(hot spot analysis)和Zonation模型进行水獭保护优先区的识别。热点分析既可以探测研究区内具有显著统计学意义的局部热点区域, 也可以在一定程度上削弱物种分布模型模拟结果的不确定性, 最终为保护优先区识别、自然保护地规划及保护决策制定提供支持(马克平,

2001; Li et al, 2017; 庄鸿飞等, 2018)。Zonation模型通过逐个移除保护价值最低的栅格, 最终得到一个高连通性的保护优先区排序(Moilanen et al. 2005; Moilanen, 2007)。鉴于 $G_i^*$ 系数在空间聚类统计中的优越性(张松林和张昆, 2007), 本研究使用ArcGIS 10.2.2的Getis-Ord  $G_i^*$ 空间统计工具进行热点分析, 将极显著热点区域( $G_i^*$ 统计量 > 2.58, 置信度99%)作为水獭的热点分布区。随后将这一热点区域作为Zonation程序运行的输入文件, 采用核心区域法(core area zonation)以保留适宜度较高的规划单元, 并选择边缘移除规则(rule of edge removal)以保持景观的连通性。考虑到未来的管理成本问题, 本研究使用人口密度作为Zonation模型运算的成本图层, 设置翘曲因子为“1”以保证运行结果的最优化。最终将计算结果按保护价值的高低分为一级优先区(> 60%)、二级优先区(20%–60%)和三级优先区(< 20%)。

以上数据分析在ArcGIS 10.2.2、R 3.4.3、Zonation 4.00、Excel 2018和SPSS 20.0中实现。

## 2 结果

### 2.1 模型表现和重要环境因子

使用GBM和RF组合建模后的平均TSS值达0.962, AUC值达0.997, 模型预测精度极高。组合模型的输出结果表明, 距河流距离和人口密度是影响水獭分布最重要的因子(表1), 响应曲线见附录2。

### 2.2 潜在分布区和保护优先区

物种分布建模的结果表明, 水獭潜在分布区面积约为104,515.04 km<sup>2</sup>, 其中内蒙古自治区占48.32%; 黑龙江省占46.44%; 吉林省占5.02%; 辽宁省仅占0.22% (表2, 图3)。Zonation模型的保护优先性分析结果显示, 除三级优先区分布于研究区各

表2 东北各省/自治区水獭潜在分布区和保护优先区面积及平均人类压力

Table 2 Potential distribution and conservation priority areas of the otter and mean anthropogenic pressures in each provinces/autonomous region

	潜在分布区面积 Potential distribution (km <sup>2</sup> )	保护优先区面积 Conservation priority areas (km <sup>2</sup> )	潜在分布区平均人类压力 Mean anthropogenic pressures of potential distribution (0–1)	保护优先区平均人类压力 Mean anthropogenic pressures of conservation priority areas (0–1)
内蒙古 Inner Mongolia	50,503.58	30,613.58	0.063	0.045
黑龙江 Heilongjiang	48,533.40	10,269.55	0.078	0.065
吉林 Jilin	5,250.36	4,338.16	0.148	0.135
辽宁 Liaoning	227.7	227.7	0.223	0.223



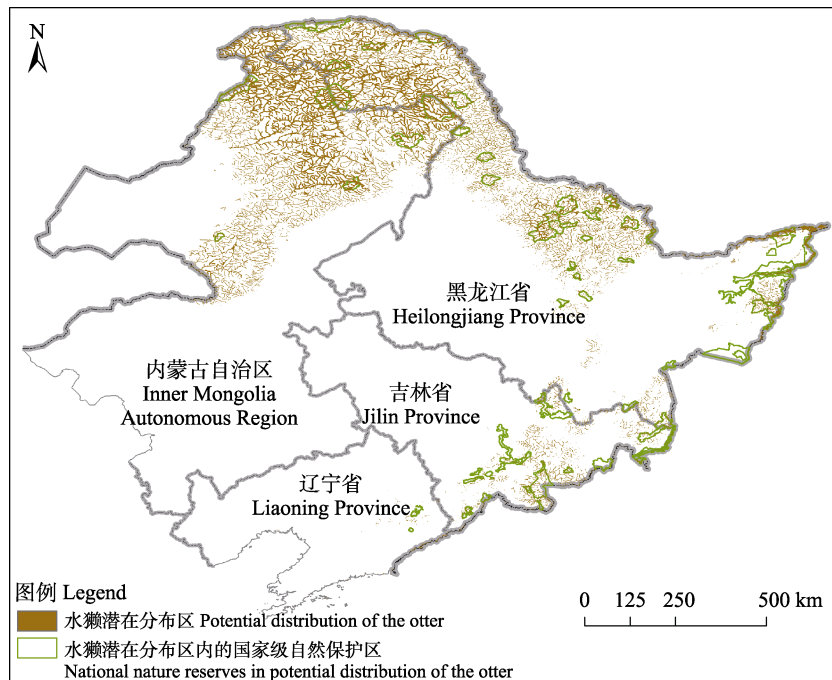


图3 东北地区水獭潜在分布区和保护现状

Fig. 3 Potential distribution and conservation status of the otter in Northeast China

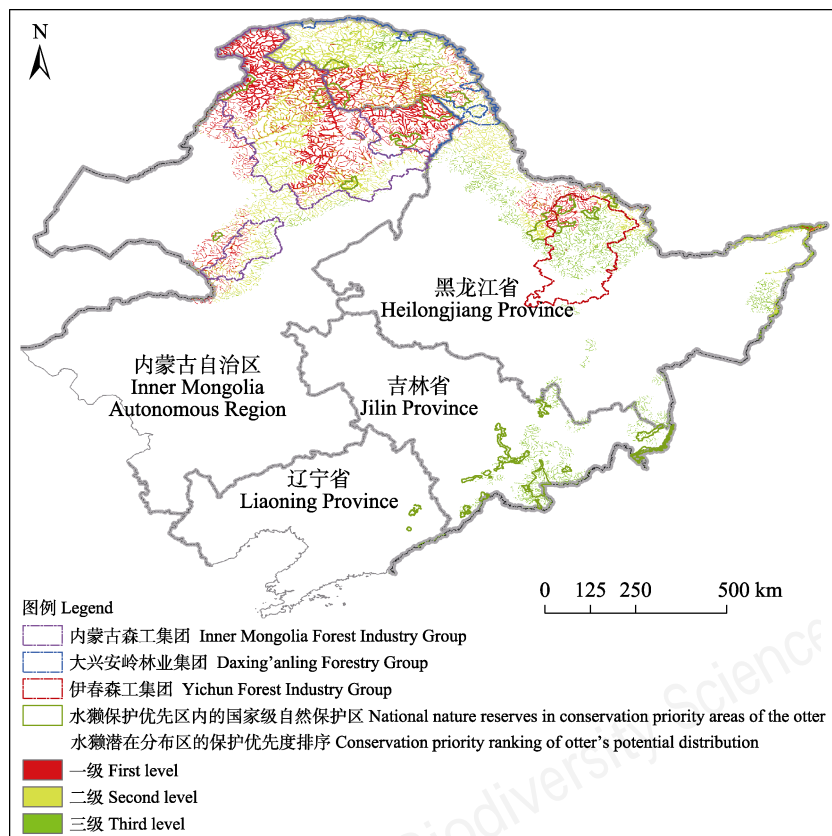


图4 水獭保护优先度排序和保护优先区保护现状

Fig. 4 Conservation priority ranking and conservation status in conservation priority areas of the otter

省外, 一级、二级优先区全部位于内蒙古和黑龙江(图4)。综合考虑保护成本及水獭在各省/自治区的分布情况, 本研究将内蒙古和黑龙江的水獭保护价值最高的一级优先区、吉林的三级优先区及辽宁的全部水獭潜在分布区作为保护优先区。保护优先区面积约为45,448.99 km<sup>2</sup>, 占水獭潜在分布区的43.49%, 主要集中于大兴安岭北部林区腹地、小兴安岭中部、三江平原靠近黑龙江和乌苏里江江边、长白山腹地及辽宁省鸭绿江流域, 行政上隶属内蒙古兴安盟、呼伦贝尔市, 黑龙江大兴安岭地区、黑河市、伊春市、佳木斯市, 吉林省延边州、白山市, 辽宁省本溪市和丹东市。使用人类压力图层评估了水獭潜在分布区和保护优先区在各省区面临的人类压力, 其大小依次为: 辽宁 > 吉林 > 黑龙江 > 内蒙古(表2, 图5)。

### 2.3 区域保护现状

鉴于国家级自然保护区在生物多样性保育中的特殊地位并考虑其他类型保护地数据的准确性, 本研究对水獭保护现状的分析仅考虑了国家级自然保护区。叠加分析结果表明, 研究区内110个国家级自然保护区中共有63个包含水獭的潜在分布区, 覆盖面积约12,168.93 km<sup>2</sup>, 占水獭潜在分布区面积的11.64% (图3, 附录3)。其中32个国家级自然保护区包含水獭的保护优先区, 覆盖面积约4,946.99 km<sup>2</sup>, 占水獭保护优先区的10.88% (图4, 附录4)。而作为重点国有林区的所在地, 内蒙古森工集团、大

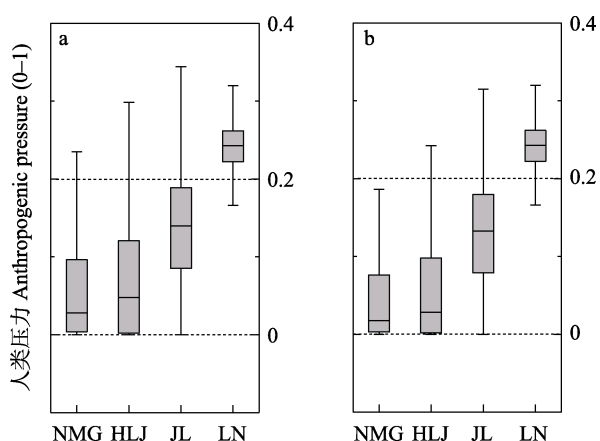


图5 水獭潜在分布区(a)和保护优先区(b)面临的人类压力。NMG: 内蒙古; HLJ: 黑龙江; JL: 吉林; LN: 辽宁。  
Fig. 5 Anthropogenic pressures in potential distribution (a) and conservation priority areas (b) of the otter. NMG: Inner Mongolia; HLJ: Heilongjiang; JL: Jilin; LN: Liaoning.

兴安岭林业集团、伊春森工集团所辖林区覆盖的水獭潜在分布区达74,390.89 km<sup>2</sup>, 保护优先区达36,022.22 km<sup>2</sup>, 分别占水獭潜在分布区和保护优先区面积的71.18%和79.26% (图4), 因此重点国有林区亦应作为水獭保护体系构建的重要组成部分。

## 3 讨论

### 3.1 物种分布建模

准确的物种分布数据是进行物种分布建模的重要基础。对水獭而言, 由于缺乏专项调查, 同时因其不在林草部门负责的全国陆生野生动物资源调查名单中, 因而准确的分布信息极其稀少, 有研究表明, 2000年后全国仅有57个确认的水獭分布点(Zhang et al, 2018)。为尽可能获取准确而又全面的分布信息, 本研究团队自2016年开始先后赴黑龙江、松花江、乌苏里江沿岸, 小兴安岭林区、大兴安岭林区、吉林省开展调查, 本研究建模使用的水獭分布数据约85%来源于实地野外调查或访谈调查, 极少数没有调查又基本确认有水獭分布的地区补充使用了文献资料。此外, 本研究从环境变量选择、模型选择等多方面着手降低建模结果的不确定性, 预测结果能较大程度地反映水獭的真实分布。

### 3.2 致危因素及保护优先性

明确物种的濒危机制是精准施策的关键(Yang et al, 2021)。根据环境变量重要性排序, 距河流距离和人口密度是影响水獭分布最重要的因子, 与前人研究结果类似, 维持高质量的河流并降低人为干扰是水獭保护的关键抓手(Prenda et al, 2001; 雷伟和李玉春, 2008)。本研究表明水獭主要集中分布于人口密度较低的河流上游, 如大兴安岭的根河、图里河、诺敏河、激流河、盘古河、呼玛河等; 小兴安岭的逊别拉河、公别拉河、库尔滨河、嘉荫河等; 长白山的头道白河、二道白河、漫江等。相比河流下游, 这些地区人烟稀少, 受人类干扰程度低, 很可能成为野生水獭种群最先复壮的区域。从保护优先性来看, 大兴安岭林区水獭保护优先区集中连片, 同时与伊春林区的保护优先区通过黑河市的法别拉河、公别拉河、逊别拉河相连, 总体来说此区域水獭分布较为集中, 种群之间没有明显的地理隔离, 并且这些区域面临的人类压力也较小, 因而是维持东北地区水獭种群稳定的重中之重。三江平原地区

是国家重要的商品粮生产基地, 在强烈的人类干扰下, 水獭现已退缩于三江国家级自然保护区、黑瞎子岛国家级自然保护区等靠近中俄边境的几个保护区内。吉林的水獭种群与三江平原类似, 保护优先区大多位于靠近边境的自然保护区。辽宁省水獭栖息地面临的人类压力最大, 保护优先性分析的结果表明仅有极小面积的三级优先区分布于靠近朝鲜边境的鸭绿江流域(图4), 因此本研究将其全部的潜在分布区纳入保护优先区以实现对其潜在残留种群的保护。

### 3.3 区域保护现状

截至2017年底, 东北地区仅国家级自然保护地就达594处(张芳玲等, 2020), 这些保护地构成了我国东北地区的物种基因库和生态保护的基本构架。其中内蒙古森工集团下辖的根河森工公司依托根河源国家湿地公园建设了水獭自然保护小区, 这也是为数不多的以水獭为主要保护对象而设立的自然保护地。尽管国家级自然保护区仅占水獭潜在分布区面积的11.64%, 但在天然林全面禁伐的背景下, 重点国有林区可能在未来东北地区生物多样性保护中发挥更大的作用, 研究发现水獭70%以上的潜在分布区和近80%的保护优先区位于国有森工集团的所辖林区(未包括龙江森工、吉林森工和长白山森工)。森工集团应进一步履行其野生动植物保护职能, 严格遵照《野生动物保护法》《野生植物保护条例》《陆生野生动物保护实施条例》等法律条令, 全面保护辖区内的野生动植物。国有林区具有生态区位重要、生态系统完整性强、权属清晰、管理体制健全的特点(庞晓峰, 2018; 唐芳林等, 2018), 根据《国家公园设立规范》(GB/T 39737-2020)中国国家公园的准入条件, 重点国有林区具有建设国家公园的天然优势。鉴于此, 本研究建议将重点国有林区中具有重要保护价值的区域逐步纳入以国家公园为主体的自然保护地体系中, 以实现生物多样性的系统性和完整性保护。

### 3.4 不足之处和保护建议

受限于河流水质、鱼类资源丰富度、盗猎威胁强弱等影响, 水獭种群数量和分布数据难以在短期内准确获得, 本研究识别的保护优先区也具有一定的局限性, 未来需进一步补充数据以构建更具指导意义的水獭保护规划。尤其是水獭栖息地面临较大

人类压力的吉林省和辽宁省, 将是下一步亟待进行更深入保护生物学研究的重点区域。

相比其他珍稀濒危物种, 水獭不仅繁殖力强且对环境的适应力强, 纬度、海拔、栖息地大小等均不是影响其分布的限制因子, 因而其种群复壮潜力巨大(徐龙辉, 1984; Roos et al, 2015)。2016年12月, 中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《关于全面推行河长制的意见》, 将水生生态系统的保护提升到新的战略高度, 这为实现水獭的全流域系统保护奠定了基础(陈雷, 2016)。在我们的访谈调查中也获悉, 近年来水獭的活动踪迹逐年增多, 部分地区的渔业生产已经受到水獭的影响, 但这一过程往往也伴随着渔网等捕鱼工具的误杀, 因此我们建议在各级河长协调下, 渔业和林业部门要重点协调好保护优先区内人民生活与野生动物保护的关系。为实现水獭种群的恢复, 我们基于实地调查和研究结果提出以下建议: (1)加强对河流污染物的管理, 禁止在水獭栖息地排放农药、杀虫剂、工业废料等污染物; (2)控制渔民捕鱼强度, 严格取缔非法捕鱼等活动, 科学设立禁渔期; (3)开展全面的水獭专项调查并建立长期监测体系, 系统掌握其种群变化情况; (4)加大对水獭科研方面的投入, 以指导水獭保护工作; (5)加强水獭保护宣传力度, 提升公众保护意识。

**致谢:** 感谢内蒙古森工集团、呼伦贝尔市林草局、黑龙江省林草局、大兴安岭林业集团、黑河林草局、伊春森工集团、佳木斯林草局、吉林省林草局等单位对调查研究工作的大力支持。

### 参考文献

- Allouche O, Tsoar A, Kadmon R (2006) Assessing the accuracy of species distribution models: Prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 43, 1223–1232.
- Braunisch V, Coppes J, Arlettaz R, Suchant R, Schmid H, Bollmann K (2013) Selecting from correlated climate variables: A major source of uncertainty for predicting species distributions under climate change. *Ecography*, 36, 971–983.
- Chen L (2016) The implementation of the concept of green development and full implementation of the River Chief System management model. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, (12), 2–3. (in Chinese) [陈雷 (2016) 落实绿色发展理念, 全面推行河长制河湖管理模式. 广东



- 水利水电, (12), 2–3.]
- Cianfrani C, Lay GL, Maiorano L, Satizábal HF, Loy A, Guisan A (2011) Adapting global conservation strategies to climate change at the European scale: The otter as a flagship species. *Biological Conservation*, 144, 2068–2080.
- Ding YH (2013) China's Climate. Science Press, Beijing. (in Chinese) [丁一汇 (2013) 中国气候. 科学出版社, 北京.]
- Dormann CF, Elith J, Bacher S, Buchmann C, Carl G, Carré G, Marquéz JRG, Gruber B, Lafourcade B, Leitão PJ, Münkemüller T, McClean C, Osborne PE, Reineking B, Schröder B, Skidmore AK, Zurell D, Lautenbach S (2013) Collinearity: A review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36, 27–46.
- Erlinge S (1967) Home range of the otter *Lutra lutra* L. in Southern Sweden. *Oikos*, 18, 186–209.
- Gomez L, Leupen B, Theng M, Fernandez K, Savage M (2016) Illegal Otter Trade: An Analysis of Seizures in Selected Asian Countries (1980–2015). Traffic Report, Malaysia.
- Guisan A, Tingley R, Baumgartner JB, Naujokaitis-Lewis I, Sutcliffe PR, Tulloch AIT, Regan TJ, Brotons L, McDonald-Madden E, Mantyka-Pringle C, Martin TG, Rhodes JR, Maggini R, Setterfield SA, Elith J, Schwartz MW, Wintle BA, Broennimann O, Austin M, Ferrier S, Kearney MR, Possingham HP, Buckley YM (2013) Predicting species distributions for conservation decisions. *Ecology Letters*, 16, 1424–1435.
- Hanley JA, McNeil BJ (1982) The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve. *Radiology*, 143, 29–36.
- Hao ZQ, Wang QL, Dai LM (1998) The importance of the national programme for natural forests conservation on biodiversity conservation in northeast State-owned forest areas of China. In: *Biodiversity Conservation in China in the 21st Century: Proceedings of the Third National Symposium on Biodiversity Conservation and Sustainable Utilization* (ed. Xu ZH), pp. 21–26. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese with English abstract) [郝占庆, 王庆礼, 代力民 (1998) 天然林保护工程在东北林区生物多样性保护中的意义. 见: 面向21世纪的中国生物多样性保护: 第三届全国生物多样性保护与持续利用研讨会论文集(许智宏主编), 21–26页. 中国林业出版社, 北京.]
- Hu YS, Luo ZH, Chapman CA, Pimm SL, Turvey ST, Lawes MJ, Peres CA, Lee TM, Fan PF (2019) Regional scientific research benefits threatened-species conservation. *National Science Review*, 6, 1076–1079.
- Huang BR, Ma YH, Huang K, Su LY, Zhang CL, Cheng DW, Wang Y (2018) Strategic approach on promoting reform of China's natural protected areas system with national parks as backbone. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 33, 1342–1351. (in Chinese with English abstract) [黄宝荣, 马永欢, 黄凯, 苏利阳, 张丛林, 程多威, 王毅 (2018) 推动以国家公园为主体的自然保护地体系改革的思考. 中国科学院院刊, 33, 1342–1351.]
- Kennedy CM, Oakleaf JR, Theobald DM, Baruch - Mordo S, Kiesecker J (2019) Managing the middle: A shift in conservation priorities based on the global human modification gradient. *Global Change Biology*, 25, 811–826.
- Kruuk H (2006) *Otters: Ecology, Behaviour and Conservation*. Oxford University Press, New York.
- Lei W, Li YC (2008) Study and conservation status of otters. *Journal of Biology*, 25, 47–50. (in Chinese with English abstract) [雷伟, 李玉春 (2008) 水獭的研究与保护现状. 生物学杂志, 25, 47–50.]
- Li F, Chan BPL (2018) Past and present: The status and distribution of otters (Carnivora: Lutrinae) in China. *Oryx*, 52, 619–626.
- Li YJ, Zhang LW, Yan JP, Wang PT, Hu NK, Cheng W, Fu BJ (2017) Mapping the hotspots and coldspots of ecosystem services in conservation priority setting. *Journal of Geographical Sciences*, 27, 681–696.
- Liu HL, Huang JY (2015) How to promote the reform of state-owned forestry—Zhao Shucong, director of the State Forestry Administration, interpreted the Reform Plan of State-owned Forest Farm and the Guiding Opinions on the Reform of State-owned Forest Areas. *Country Agriculture Farmers (A)*, (4), 11–12. (in Chinese) [刘惠兰, 黄俊毅 (2015) 国有林业改革如何扎实推进——国家林业局局长赵树丛解读《国有林场改革方案》和《国有林区改革指导意见》. 农村·农业·农民(A版), (4), 11–12.]
- Ma KP (2001) Hotspots assessment and conservation priorities identification of biodiversity in China should be emphasized. *Acta Phytoecologica Sinica*, 25, 125–126. (in Chinese) [马克平 (2001) 中国生物多样性热点地区 (Hotspot) 评估与优先保护重点的确定应该重视. 植物生态学报, 25, 125–126.]
- Mason CF, MacDonald SM (1986) *Otters: Ecology and Conservation*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Moilanen A (2007) Landscape Zonation, benefit functions and target-based planning: Unifying reserve selection strategies. *Biological Conservation*, 134, 571–579.
- Moilanen, A, Franco AMA, Early RI, Fox R, Wintle B, Thomas CD (2005) Prioritizing multiple-use landscapes for conservation: Methods for large multi-species planning problems. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 272, 1885–1891.
- Pang XF (2018) Thoughts on the establishment of national park in the north of Inner Mongolia Greater Khingan forest district. *Inner Mongolia Forestry Investigation and Design*, 41(4), 73–75. (in Chinese) [庞晓峰 (2018) 关于内蒙古大兴安岭林区北部原始林区建立国家公园的思考. 内蒙古林业调查设计, 41(4), 73–75.]

- Piao ZJ, Sui YC, Wang Q, Li Z, Niu LJ (2011) Population fluctuation and resource protection of otter (*Lutra lutra*) in Changbai Mountain Nature Reserve. *Journal of Hydroecology*, 32, 115–120. (in Chinese with English abstract) [朴正吉 (2011) 长白山自然保护区水獭种群数量变动与资源保护. *水生态学杂志*, 32, 115–120.]
- Prenda J, López-Nieves P, Bravo R (2001) Conservation of otter (*Lutra lutra*) in a Mediterranean area: The importance of habitat quality and temporal variation in water availability. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 11, 343–355.
- Remonti L, Balestrieri A, Prigioni C (2009) Altitudinal gradient of Eurasian otter (*Lutra lutra*) food niche in Mediterranean habitats. *Canadian Journal of Zoology*, 87, 285–291.
- Robitaille JF, Laurence S (2002) Otter, *Lutra lutra*, occurrence in Europe and in France in relation to landscape characteristics. *Animal Conservation*, 5, 337–344.
- Roos A, Loy A, de Silva P, Hajkova P, Zemanová B (2015) *Lutra lutra*. The IUCN Red List of Threatened Species 2015. <https://www.iucnredlist.org/species/12419/21935287>. (accessed on 2014-6-20)
- Tang FL, Wang MJ, Sun HY (2018) Analysis on establishing the protected area system dominated by national park. *Forestry Construction*, (1), 1–5. (in Chinese with English abstract) [唐芳林, 王梦君, 孙鸿雁 (2018) 建立以国家公园为主体的自然保护地体系的探讨. *林业建设*, (1), 1–5.]
- Tang XP, Jiang YF, Liu ZL, Chen JZ, Liang BK, Lin C (2019) Top-level design of the natural protected area system in China. *Forest Resources Management*, (3), 1–7. (in Chinese with English abstract) [唐小平, 蒋亚芳, 刘增力, 陈君帜, 梁兵宽, 蔺琛 (2019) 中国自然保护地体系的顶层设计. *林业资源管理*, (3), 1–7.]
- Thuiller W, Lafourcade B, Engler R, Araújo MB (2009) BIOMOD—A platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography*, 32, 369–373.
- Williams KJ, Belbin L, Austin MP, Stein JL, Ferrier S (2012) Which environmental variables should I use in my biodiversity model? *International Journal of Geographical Information Science*, 26, 2009–2047.
- Wu ZY (1980) China's Vegetation. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒 (1980) 中国植被. 科学出版社, 北京.]
- Xu LH (1984) Species of otters in China and the conservation of their natural resources. *Chinese Wildlife*, 5(1), 9–11. (in Chinese with English abstract) [徐龙辉 (1984) 中国水獭种类及资源保护. *野生动物*, 5(1), 9–11.]
- Xu WH, Zang ZH, Du A, Ouyang ZY (2021) The experiences of Northeast China Tiger and Leopard National Park pilot. *Biodiversity Science*, 29, 295–297. (in Chinese) [徐卫华, 臧振华, 杜傲, 欧阳志云 (2021) 东北虎豹国家公园试点经验. *生物多样性*, 29, 295–297.]
- Yang L, Shi KC, Ma C, Ren GP, Fan PF (2021) Mechanisms underlying altitudinal and horizontal range contraction: The western black crested gibbon. *Journal of Biogeography*, 48, 321–331.
- Zhang C, Yang L, Wu SH, Xia WC, Yang L, Li MM, Chen MH, Luan XF (2020) Use of historical data to improve conservation of the black grouse (*Lyrurus tetrix*) in Northeast China. *Ecosphere*, 11, e03090.
- Zhang FL, Pu Z, Liang XY, Gu YY, Xing SH (2020) The quantitative characteristics of natural protected areas in Northeast China. *Journal of Beijing Forestry University*, 42(2), 61–67. (in Chinese with English abstract) [张芳玲, 蒲真, 梁晓玉, 古元阳, 邢韶华 (2020) 中国东北地区自然保护地数量特征分析. *北京林业大学学报*, 42(2), 61–67.]
- Zhang L, Wang QY, Yang L, Li F, Chan BPL, Xiao ZS, Li S, Song DZ, Piao ZJ, Fan PF (2018) The neglected otters in China: Distribution change in the past 400 years and current conservation status. *Biological Conservation*, 228, 259–267.
- Zhang R, Yang L, Laguardia A, Jiang Z, Huang MJ, Lü J, Ren YH, Zhang W, Luan XF (2016) Historical distribution of the otter (*Lutra lutra*) in north-east China according to historical records (1950–2014). *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 26, 602–606.
- Zhang SL, Zhang K (2007) Contrast study on Moran and Getis-ord indexes of local spatial autocorrelation indices. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 27(3), 31–34. (in Chinese with English abstract) [张松林, 张昆 (2007) 空间自相关局部指标Moran指数和G系数研究. *大地测量与地球动力学*, 27(3), 31–34.]
- Zhang XL, Li YC, Wang YY, Cai HY, Zeng H, Wang ZH (2019) Influence of future climate change in suitable habitats of tea in different countries. *Biodiversity Science*, 27, 595–606. (in Chinese with English abstract) [张晓玲, 李亦超, 王芸芸, 蔡宏宇, 曾辉, 王志恒 (2019) 未来气候变化对不同国家茶适宜分布区的影响. *生物多样性*, 27, 595–606.]
- Zhao ZJ (1999) Zoography of Rare and Endangered Species in Northeast China. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese with) [赵正阶 (1999) 中国东北地区珍稀濒危动物志. 中国林业出版社, 北京.]
- Zhuang HF, Zhang YB, Wang W, Ren YH, Liu FZ, Du JH, Zhou Y (2018) Optimized hot spot analysis for probability of species distribution under different spatial scales based on MaxEnt model: *Manglietia insignis* case. *Biodiversity Science*, 26, 931–940. (in Chinese with English abstract) [庄鸿飞, 张殷波, 王伟, 任月恒, 刘方正, 杜金鸿, 周越 (2018) 基于最大熵模型的不同尺度物种分布概率优化热点分析: 以红色木莲为例. *生物多样性*, 26, 931–940.]

(责任编辑: 乔慧捷 责任编辑: 黄祥忠)

## 附录 Supplementary Material

### 附录1 水獭分布位点信息

Appendix 1 The coordinate of otter occurrence

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021157-1.pdf>

### 附录2 水獭适应性对重要变量的响应曲线

Appendix 2 Response curves of suitability of otter to important variables

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021157-2.pdf>

### 附录3 水獭潜在分布区内的国家级自然保护区

Appendix 3 National nature reserves in potential distribution of the otter

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021157-3.pdf>

### 附录4 水獭保护优先区内的国家级自然保护区

Appendix 4 National nature reserves in conservation priority areas of the otter

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021157-4.pdf>



附录1 水獭分布位点信息

Appendix 1 The coordinate of otter occurrence

编号 ID	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	数据来源 Sources	位置 Location
1	125.63	52.04	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/呼玛县
2	125.67	52.03	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/呼玛县
3	125.95	51.63	电话访谈	黑龙江省/大兴安岭地区/呼玛县
4	123.56	52.07	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/呼中区
5	123.61	51.99	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/呼中区
6	122.91	51.86	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/呼中区
7	123.01	51.77	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/呼中区
8	123.21	51.59	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/呼中区
9	123.51	52.07	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/呼中区
10	123.75	52.18	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/呼中区
11	123.48	52.08	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/呼中区
12	123.40	51.64	粪便采集	黑龙江省/大兴安岭地区/呼中区
13	123.29	51.58	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/呼中区
14	122.86	51.79	电话访谈	黑龙江省/大兴安岭地区/呼中区
15	123.02	51.75	电话访谈	黑龙江省/大兴安岭地区/呼中区
16	122.87	51.71	电话访谈	黑龙江省/大兴安岭地区/呼中区
17	122.89	51.67	电话访谈	黑龙江省/大兴安岭地区/呼中区
18	123.04	51.67	电话访谈	黑龙江省/大兴安岭地区/呼中区
19	123.18	51.72	电话访谈	黑龙江省/大兴安岭地区/呼中区
20	123.23	51.67	电话访谈	黑龙江省/大兴安岭地区/呼中区
21	123.23	51.61	电话访谈	黑龙江省/大兴安岭地区/呼中区
22	123.08	51.49	电话访谈	黑龙江省/大兴安岭地区/呼中区
23	123.00	51.42	电话访谈	黑龙江省/大兴安岭地区/呼中区
24	123.09	51.42	电话访谈	黑龙江省/大兴安岭地区/呼中区
25	122.93	51.69	电话访谈	黑龙江省/大兴安岭地区/呼中区
26	122.87	53.46	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/漠河市
27	122.55	53.22	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/漠河市
28	122.95	53.33	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/漠河市
29	123.23	53.33	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/漠河市
30	122.75	52.92	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/漠河市
31	122.83	52.41	文献记载	黑龙江省/大兴安岭地区/漠河市
32	123.01	52.45	文献记载	黑龙江省/大兴安岭地区/漠河市
33	121.75	52.62	电话访谈	黑龙江省/大兴安岭地区/漠河市
34	121.76	52.77	电话访谈	黑龙江省/大兴安岭地区/漠河市
35	123.55	53.41	电话访谈	黑龙江省/大兴安岭地区/漠河市
36	122.48	53.17	文献记载	黑龙江省/大兴安岭地区/漠河市
37	123.56	53.04	电话访谈	黑龙江省/大兴安岭地区/漠河市
38	122.79	52.41	文献记载	黑龙江省/大兴安岭地区/漠河市
39	123.17	52.39	文献记载	黑龙江省/大兴安岭地区/漠河市
40	124.08	52.85	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/塔河县
41	124.92	52.38	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/塔河县
42	124.11	52.96	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/塔河县
43	125.38	52.48	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/塔河县
44	125.63	52.89	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/塔河县
45	123.97	52.80	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/塔河县
46	123.86	52.68	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/塔河县
47	124.04	52.83	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/塔河县
48	125.18	53.18	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/塔河县

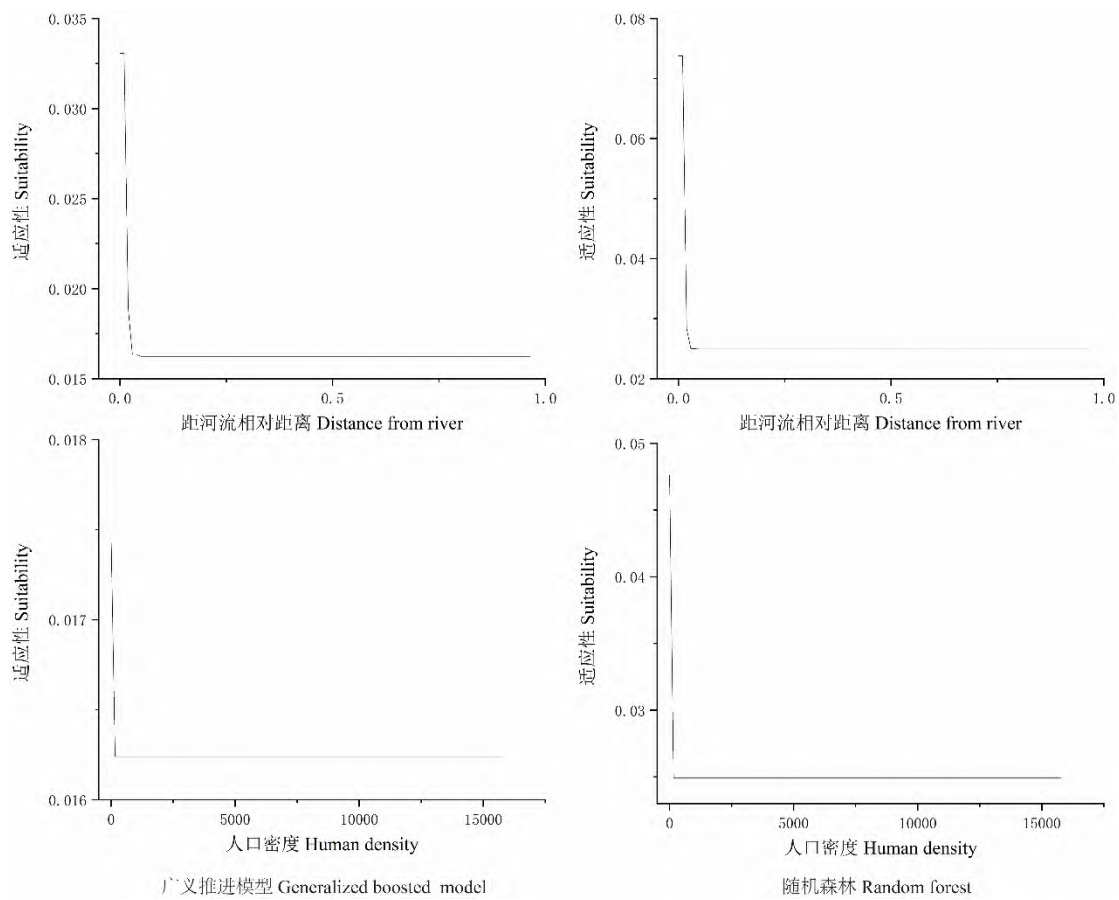
编号 ID	经度 Longitude (°E)	纬度 Latitude (°N)	数据来源 Sources	位置 Location
49	125.15	53.06	电话访谈	黑龙江省/大兴安岭地区/塔河县
50	124.84	52.57	电话访谈	黑龙江省/大兴安岭地区/塔河县
51	124.40	51.61	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/新林区
52	125.31	51.80	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/新林区
53	125.30	51.79	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/新林区
54	124.12	51.42	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/新林区
55	124.22	51.61	实地访问调查	黑龙江省/大兴安岭地区/新林区
56	128.01	44.18	文献记载	黑龙江省/哈尔滨市/五常市
57	126.57	50.17	文献记载	黑龙江省/黑河市/爱辉区
58	126.93	49.59	文献记载	黑龙江省/黑河市/爱辉区
59	126.88	49.59	问卷调查	黑龙江省/黑河市/爱辉区
60	127.19	49.86	问卷调查	黑龙江省/黑河市/爱辉区
61	126.32	50.27	问卷调查	黑龙江省/黑河市/爱辉区
62	126.92	50.35	实地访问调查	黑龙江省/黑河市/爱辉区
63	127.23	49.87	实地访问调查	黑龙江省/黑河市/爱辉区
64	127.21	48.44	文献记载	黑龙江省/黑河市/北安市
65	126.01	50.78	文献记载	黑龙江省/黑河市/嫩江市
66	127.02	49.55	文献记载	黑龙江省/黑河市/孙吴县
67	127.04	49.54	文献记载	黑龙江省/黑河市/孙吴县
68	127.07	48.57	文献记载	黑龙江省/黑河市/五大连池市
69	126.62	48.90	实地访问调查	黑龙江省/黑河市/五大连池市
70	128.14	49.36	文献记载	黑龙江省/黑河市/逊克县
71	128.89	48.77	文献记载	黑龙江省/黑河市/逊克县
72	128.40	48.48	实地访问调查	黑龙江省/黑河市/逊克县
73	128.38	48.49	实地访问调查	黑龙江省/黑河市/逊克县
74	128.63	48.78	实地访问调查	黑龙江省/黑河市/逊克县
75	128.98	48.75	实地访问调查	黑龙江省/黑河市/逊克县
76	127.94	49.46	文献记载	黑龙江省/黑河市/逊克县
77	128.85	48.77	电话访谈	黑龙江省/黑河市/逊克县
78	128.43	48.39	文献记载	黑龙江省/黑河市/逊克县
79	128.66	48.97	文献记载	黑龙江省/黑河市/逊克县
80	133.83	46.28	电话访谈	黑龙江省/鸡西市/虎林市
81	134.55	48.40	文献记载	黑龙江省/佳木斯市/抚远市
82	134.46	48.40	文献记载	黑龙江省/佳木斯市/抚远市
83	134.66	48.38	文献记载	黑龙江省/佳木斯市/抚远市
84	134.09	48.15	实地访问调查	黑龙江省/佳木斯市/抚远市
85	134.53	48.02	实地访问调查	黑龙江省/佳木斯市/抚远市
86	134.45	48.37	实地访问调查	黑龙江省/佳木斯市/抚远市
87	134.61	47.55	实地访问调查	黑龙江省/佳木斯市/抚远市
88	133.83	48.24	实地访问调查	黑龙江省/佳木斯市/同江市
89	133.08	48.06	实地访问调查	黑龙江省/佳木斯市/同江市
90	131.22	44.21	电话访谈	黑龙江省/牡丹江市/东宁市
91	131.02	43.70	电话访谈	黑龙江省/牡丹江市/东宁市
92	128.72	44.12	文献记载	黑龙江省/牡丹江市/宁安市
93	132.21	45.95	电话访谈	黑龙江省/双鸭山市/宝清县
94	128.97	47.10	实地访问调查	黑龙江省/伊春市/大箐山县
95	128.97	47.11	实地访问调查	黑龙江省/伊春市/大箐山县
96	128.96	47.10	实地访问调查	黑龙江省/伊春市/大箐山县
97	129.38	49.37	文献记载	黑龙江省/伊春市/嘉荫县
98	129.64	49.09	实地访问调查	黑龙江省/伊春市/嘉荫县

编号 ID	经度 Longitude (°E)	纬度 Latitude (°N)	数据来源 Sources	位置 Location
99	129.88	48.89	实地访问调查	黑龙江省/伊春市/嘉荫县
100	129.75	48.93	实地访问调查	黑龙江省/伊春市/嘉荫县
101	129.87	48.90	电话访谈	黑龙江省/伊春市/嘉荫县
102	129.41	48.59	实地访问调查	黑龙江省/伊春市/汤旺县
103	129.42	48.59	实地访问调查	黑龙江省/伊春市/汤旺县
104	129.40	48.60	实地访问调查	黑龙江省/伊春市/汤旺县
105	129.39	48.60	实地访问调查	黑龙江省/伊春市/汤旺县
106	129.70	48.50	实地访问调查	黑龙江省/伊春市/汤旺县
107	129.29	48.52	电话访谈	黑龙江省/伊春市/汤旺县
108	129.05	46.73	文献记载	黑龙江省/伊春市/铁力市
109	129.16	46.83	文献记载	黑龙江省/伊春市/铁力市
110	129.05	47.81	实地访问调查	黑龙江省/伊春市/乌翠区
111	129.10	47.78	实地访问调查	黑龙江省/伊春市/乌翠区
112	128.79	47.46	文献记载	黑龙江省/伊春市/乌翠区
113	129.26	47.74	实地访问调查	黑龙江省/伊春市/伊美区
114	129.45	47.90	实地访问调查	黑龙江省/伊春市/伊美区
115	127.16	42.59	电话访谈	吉林省/白山市/抚松县
116	126.56	41.76	文献记载	吉林省/白山市/浑江区
117	126.38	42.30	文献记载	吉林省/通化市/辉南县
118	126.24	41.31	电话访谈	吉林省/通化市/集安市
119	126.11	42.10	文献记载	吉林省/通化市/柳河县
120	128.00	42.35	实地访问调查	吉林省/延边州/安图县
121	128.09	42.34	实地访问调查	吉林省/延边州/安图县
122	128.04	42.38	实地访问调查	吉林省/延边州/安图县
123	127.98	42.28	电话访谈	吉林省/延边州/安图县
124	128.09	43.90	文献记载	吉林省/延边州/敦化市
125	130.41	43.18	电话访谈	吉林省/延边州/珲春市
126	130.02	43.59	电话访谈	吉林省/延边州/汪清县
127	130.44	43.52	电话访谈	吉林省/延边州/汪清县
128	122.57	48.79	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/阿荣旗
129	120.75	52.62	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/额尔古纳市
130	121.05	52.70	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/额尔古纳市
131	121.21	52.23	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/额尔古纳市
132	120.60	52.58	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/额尔古纳市
133	120.93	51.89	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/额尔古纳市
134	121.46	53.20	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/额尔古纳市
135	121.40	53.01	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/额尔古纳市
136	121.25	52.45	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/额尔古纳市
137	121.18	52.18	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/额尔古纳市
138	120.82	51.99	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/额尔古纳市
139	121.00	51.81	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/额尔古纳市
140	120.77	51.35	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/额尔古纳市
141	120.59	51.38	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/额尔古纳市
142	120.71	50.41	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/额尔古纳市
143	121.10	52.80	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/额尔古纳市
144	120.43	51.80	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/额尔古纳市
145	121.70	52.10	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/额尔古纳市
146	121.22	52.24	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/额尔古纳市
147	121.43	52.91	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/额尔古纳市
148	120.79	52.84	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/额尔古纳市



编号 ID	经度 Longitude (°E)	纬度 Latitude (°N)	数据来源 Sources	位置 Location
149	120.24	52.78	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/额尔古纳市
150	121.41	52.00	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/额尔古纳市
151	121.51	53.12	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/额尔古纳市
152	121.20	52.36	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/额尔古纳市
153	121.21	52.19	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/额尔古纳市
154	122.73	49.94	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
155	122.73	49.98	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
156	122.51	50.39	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
157	122.63	50.28	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
158	122.59	50.65	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
159	122.69	50.66	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
160	122.82	50.64	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
161	123.15	49.47	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
162	122.90	51.11	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
163	122.96	50.96	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
164	122.99	51.13	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
165	122.96	50.88	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
166	122.96	50.84	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
167	123.09	50.72	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
168	123.12	50.65	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
169	122.84	51.27	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
170	123.02	50.79	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
171	122.51	50.13	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
172	125.14	51.29	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
173	125.30	51.38	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
174	122.88	51.17	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
175	125.41	51.19	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
176	122.89	51.20	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
177	122.89	51.20	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
178	122.98	50.93	粪便采集	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
179	123.08	50.73	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
180	123.62	50.17	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
181	123.05	50.73	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
182	125.28	51.13	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
183	122.74	51.51	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
184	122.62	50.24	粪便采集	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
185	124.34	50.62	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
186	124.30	50.86	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
187	124.00	50.85	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
188	125.43	51.19	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
189	125.39	51.44	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
190	125.14	51.57	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
191	125.29	51.13	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
192	123.42	49.51	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
193	123.62	50.75	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
194	123.04	50.76	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
195	125.35	51.29	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
196	124.38	50.64	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
197	122.26	49.18	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂伦春自治旗
198	120.62	48.64	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂温克族自治旗

编号 ID	经度 Longitude (°E)	纬度 Latitude (°N)	数据来源 Sources	位置 Location
199	120.69	48.62	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂温克族自治旗
200	120.63	48.41	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂温克族自治旗
201	120.59	48.45	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂温克族自治旗
202	120.76	48.33	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂温克族自治旗
203	120.63	48.45	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/鄂温克族自治旗
204	122.05	52.17	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
205	121.46	51.20	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
206	122.65	51.47	文献记载	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
207	121.77	51.56	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
208	121.71	51.55	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
209	121.48	51.36	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
210	121.38	51.29	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
211	121.30	51.37	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
212	121.67	50.86	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
213	121.61	50.83	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
214	122.62	51.46	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
215	121.86	51.56	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
216	120.55	50.72	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
217	120.65	50.76	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
218	121.32	50.68	粪便采集	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
219	121.32	50.67	粪便采集	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
220	121.64	50.85	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
221	122.61	51.72	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
222	122.67	51.76	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
223	122.65	51.69	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
224	122.58	51.63	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
225	122.67	51.65	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
226	122.64	51.58	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
227	122.61	51.54	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
228	122.51	51.62	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
229	122.70	51.71	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
230	122.57	51.44	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
231	122.61	51.65	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
232	122.41	52.01	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
233	121.91	51.85	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
234	122.41	52.26	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
235	122.01	51.58	电话访谈	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/根河市
236	121.25	48.11	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/牙克石市
237	120.90	49.20	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/牙克石市
238	121.22	47.93	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/牙克石市
239	120.81	49.24	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/牙克石市
240	121.72	48.66	文献记载	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/牙克石市
241	121.24	47.69	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/扎兰屯市
242	120.66	47.48	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/扎兰屯市
243	121.16	47.80	实地访问调查	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/扎兰屯市
244	121.70	48.08	文献记载	内蒙古自治区/呼伦贝尔市/扎兰屯市
245	120.24	47.47	实地访问调查	内蒙古自治区/兴安盟/阿尔山市
246	120.32	47.29	实地访问调查	内蒙古自治区/兴安盟/阿尔山市
247	120.48	47.27	实地访问调查	内蒙古自治区/兴安盟/阿尔山市



附录 2 水獭适应性对重要变量的响应曲线

Appendix 2 Response curves of suitability of otter to important variables

附录 3 水獭潜在分布区内的国家级自然保护区

Appendix 3 National nature reserves in potential distribution of the otter

编号 ID	省/自治区 Province/Autonomous region	自然保护区名称 Name of nature reserves
1	内蒙古	内蒙古毕拉河国家级自然保护区
2	内蒙古	内蒙古红花尔基樟子松国家级自然保护区
3	内蒙古	内蒙古汗马国家级自然保护区
4	内蒙古	内蒙古额尔古纳国家级自然保护区
5	黑龙江	黑龙江大沾河湿地国家级自然保护区
6	黑龙江	黑龙江中央站黑嘴松鸡国家级自然保护区
7	黑龙江	黑龙江公别拉河国家级自然保护区
8	黑龙江	黑龙江胜山国家级自然保护区
9	黑龙江	黑龙江省乌伊岭国家级自然保护区
10	黑龙江	黑龙江翠北湿地国家级自然保护区
11	黑龙江	黑龙江丰林国家级自然保护区
12	黑龙江	黑龙江红星湿地国家级自然保护区
13	黑龙江	黑龙江新青白头鹤国家级自然保护区
14	黑龙江	乌马河紫貂国家级自然保护区
15	黑龙江	黑龙江碧水中华秋沙鸭国家级自然保护区
16	黑龙江	黑龙江朗乡国家级自然保护区
17	黑龙江	黑龙江凉水国家级自然保护区
18	黑龙江	黑龙江茅兰沟国家级自然保护区
19	黑龙江	黑龙江友好国家级自然保护区
20	黑龙江	黑龙江平顶山国家级自然保护区
21	黑龙江	黑龙江大峡谷国家级自然保护区
22	黑龙江	黑龙江细鳞河国家级自然保护区
23	黑龙江	黑龙江太平沟国家级自然保护区
24	黑龙江	黑龙江东方红国家级自然保护区
25	黑龙江	黑龙江凤凰山国家级自然保护区
26	黑龙江	黑龙江兴凯湖国家级自然保护区
27	黑龙江	黑龙江珍宝岛湿地国家级自然保护区
28	黑龙江	黑龙江八岔岛国家级自然保护区
29	黑龙江	黑龙江洪河国家级自然保护区
30	黑龙江	黑龙江三江国家级自然保护区
31	黑龙江	黑龙江省挠力河国家级自然保护区
32	黑龙江	黑龙江老爷岭东北虎国家级自然保护区
33	黑龙江	黑龙江穆稜东北红豆杉国家级自然保护区
34	黑龙江	黑龙江小北湖国家级自然保护区
35	黑龙江	黑龙江饶河东北黑蜂国家级自然保护区
36	黑龙江	黑龙江北极村国家级自然保护区
37	黑龙江	黑龙江岭峰国家级自然保护区
38	黑龙江	黑龙江多布库尔国家级自然保护区
39	黑龙江	黑龙江南瓮河国家级自然保护区
40	黑龙江	黑龙江呼中国家级自然保护区
41	黑龙江	黑龙江绰纳河国家级自然保护区
42	黑龙江	黑龙江盘中国家级自然保护区
43	黑龙江	黑龙江双河国家级自然保护区
44	黑龙江	黑龙江黑瞎子岛国家级自然保护区



张超, 陈敏豪, 杨立, 庄鸿飞, 武曙红, 湛振杰, 王嘉栋, 栾晓峰 (2022) 东北地区水獭分布格局与保护优先区识别. 生物多样性, 30, 21157. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2021157>

编号 ID	省/自治区 Province/Autonomous region	自然保护区名称 Name of nature reserves
45	吉林	吉林白山原麝国家级自然保护区
46	吉林	吉林哈泥国家级自然保护区
47	吉林	吉林黄泥河国家级自然保护区
48	吉林	吉林琿春东北虎国家级自然保护区
49	吉林	吉林集安国家级自然保护区
50	吉林	吉林靖宇国家级自然保护区
51	吉林	吉林龙湾国家级自然保护区
52	吉林	吉林松花江三湖国家级自然保护区
53	吉林	吉林天佛指山国家级自然保护区
54	吉林	吉林通化石湖国家级自然保护区
55	吉林	吉林头道松花江上游国家级自然保护区
56	吉林	吉林汪清国家级自然保护区
57	吉林	吉林鸭绿江上游国家级自然保护区
58	吉林	吉林雁鸣湖国家级自然保护区
59	吉林	吉林园池湿地国家级自然保护区
60	吉林	吉林甑峰岭国家级自然保护区
61	吉林	吉林长白山国家级自然保护区
62	辽宁	辽宁白石砬子国家级自然保护区
63	辽宁	辽宁老秃顶子国家级自然保护区

#### 附录 4 水獭保护优先区内的国家级自然保护区

Appendix 4 National nature reserves in conservation priority areas of the otter

编号 ID	省/自治区 Province/Autonomous region	自然保护区名称 Name of nature reserves
1	内蒙古	内蒙古毕拉河国家级自然保护区
2	内蒙古	内蒙古红花岗基樟子松国家级自然保护区
3	内蒙古	内蒙古汗马国家级自然保护区
4	内蒙古	内蒙古额尔古纳国家级自然保护区
5	黑龙江	黑龙江大沾河湿地国家级自然保护区
6	黑龙江	黑龙江省乌伊岭国家级自然保护区
7	黑龙江	黑龙江翠北湿地国家级自然保护区
8	黑龙江	黑龙江红星湿地国家级自然保护区
9	黑龙江	黑龙江茅兰沟国家级自然保护区
10	黑龙江	黑龙江友好国家级自然保护区
11	黑龙江	岭峰国家级自然保护区
12	黑龙江	多布库尔国家级自然保护区
13	黑龙江	南瓮河国家级自然保护区
14	黑龙江	呼中国家级自然保护区
15	黑龙江	绰纳河国家级自然保护区
16	黑龙江	黑龙江黑瞎子岛自然保护区
17	吉林	吉林白山原麝国家级自然保护区
18	吉林	吉林哈泥国家级自然保护区
19	吉林	吉林黄泥河国家级自然保护区
20	吉林	吉林珲春东北虎国家级自然保护区
21	吉林	吉林集安国家级自然保护区
22	吉林	吉林靖宇国家级自然保护区
23	吉林	吉林松花江三湖国家级自然保护区
24	吉林	吉林通化石湖国家级自然保护区
25	吉林	吉林头道松花江上游国家级自然保护区
26	吉林	吉林汪清国家级自然保护区
27	吉林	吉林鸭绿江上游国家级自然保护区
28	吉林	吉林园池湿地国家级自然保护区
29	吉林	吉林甑峰岭国家级自然保护区
30	吉林	吉林长白山国家级自然保护区
31	辽宁	辽宁白石砬子国家级自然保护区
32	辽宁	辽宁老秃顶子国家级自然保护区



•研究报告•

# 重大工程影响下新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区鹅喉羚的生境格局变化

张晨<sup>1,2,3,4</sup>, 马伟<sup>5</sup>, 陈晨<sup>1,2,3,4</sup>, 汪沐阳<sup>1,2,3</sup>, 徐文轩<sup>1,2,3</sup>, 杨维康<sup>1,2,3\*</sup>

1. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院新疆生态与地理研究所标本馆, 乌鲁木齐 830011; 3. 中国科学院新疆生态与地理研究所木垒野生动物生态监测实验站, 新疆木垒 831900; 4. 中国科学院大学, 北京 100049; 5. 新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区管理中心, 新疆昌吉 831100

**摘要:** 生境评价对物种保护具有重要意义。鹅喉羚(*Gazella subgutturosa*)是新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区的代表性物种, 开展其生境适宜性评价可以为该物种的保护和管理提供科学依据。作者基于2005–2019年采用样线法在保护区开展野外调查所获鹅喉羚的分布点数据, 利用最大熵(MaxEnt)模型筛选环境变量, 评估鹅喉羚在矿业开发前(2005年)、矿业开发顶峰时(2011年)和矿区生态修复后(2019年) 3个时期的生境质量; 采用质心转移和景观格局指数分析近15年鹅喉羚的生境空间格局变化特征。结果表明模型预测结果准确性较高, 3个时期鹅喉羚的潜在适宜生境面积波动较大, Jackknife检验结果表明在任一时期水源点对鹅喉羚生境选择的影响均最大。矿业开发前鹅喉羚适宜生境分布于保护区中部, 主要特征为面积大、生境斑块集中、破碎化程度低; 矿业开发顶峰时鹅喉羚的适宜生境面积较矿业开发前减少2.39%, 尤其是保护区南部大面积适宜生境丧失, 质心转移和景观格局指数分析结果显示适宜生境向保护区北部转移, 生境斑块离散破碎程度高; 实施矿区生态修复后鹅喉羚的适宜生境面积较矿业开发顶峰时增加了3.50%, 因矿业开发丧失的生境重新成为鹅喉羚的适宜生境。与2005年以前相比, 2019年鹅喉羚生境斑块仍离散化严重, 部分适宜生境因新修建的高速公路和铁路而重新丧失。基于以上研究结果, 我们从保护水源、控制交通建设、修复矿区和加强野生动物通道监测等4个方面对鹅喉羚种群保护管理提出了建议。

**关键词:** 鹅喉羚; 矿业开发; 道路建设; MaxEnt模型; 生境适宜性

张晨, 马伟, 陈晨, 汪沐阳, 徐文轩, 杨维康 (2022) 重大工程影响下新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区鹅喉羚的生境格局变化. 生物多样性, 30, 21176. doi: 10.17520/biods.2021176.

Zhang C, Ma W, Chen C, Wang MY, Xu WX, Yang WK (2022) Changes of habitat pattern for goitered gazelle in the Xinjiang Kalamaili Mountain Ungulate Nature Reserve under the influence of major projects. Biodiversity Science, 30, 21176. doi: 10.17520/biods.2021176.

## Changes of habitat pattern for goitered gazelle in the Xinjiang Kalamaili Mountain Ungulate Nature Reserve under the influence of major projects

Chen Zhang<sup>1,2,3,4</sup>, Wei Ma<sup>5</sup>, Chen Chen<sup>1,2,3,4</sup>, MUYANG WANG<sup>1,2,3</sup>, WENXUAN XU<sup>1,2,3</sup>, WEIKANG YANG<sup>1,2,3\*</sup>

1 State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011

2 The Specimen Museum of Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011

3 Mori Wildlife Monitoring and Experimentation Station, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Mori, Xinjiang 831900

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

5 Management Center of Xinjiang Kalamaili Mountain Ungulate Nature Reserve, Changji, Xinjiang 831100

### ABSTRACT

**Aims:** Habitat assessment is vital in the conservation of wildlife. The goitered gazelle (*Gazella subgutturosa*) is an important species in the Xinjiang Kalamaili Mountain Ungulate Nature Reserve (thereafter KNR). However, their habitat is under threat because of human development and mining. The evaluation of remaining suitable habitat for the

收稿日期: 2021-05-07; 接受日期: 2021-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(U2003203; 31872254)

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: yangwk@ms.xjb.ac.cn

goitered gazelle can provide a scientific basis for decision-making in species conservation and management of the reserve.

**Methods:** Based on the distribution of goitered gazelle demonstrated through field surveys from 2005 to 2019 in the KNR, we used a maximum entropy (MaxEnt) model to test important habitat variables for habitat selection. Suitable habitat for goitered gazelle was evaluated during three distinct time-periods: (1) before mining development (2005), (2) at the peak of mining development (2011), and (3) after ecological restoration but with a highway constructed through the reserve (2019). The spatial habitat quality and distribution of goitered gazelle over the last 15 years was further analyzed using centroid transfer and a landscape pattern index.

**Results:** The accuracy of MaxEnt model was high and jackknife tests demonstrated the distribution and distance to water sources had the highest impact on goitered gazelle habitat selection in all three time periods. The area of potential suitable habitat fluctuated widely over the three time-periods. Prior to the mining development in 2005, suitable habitat for goitered gazelle was mainly concentrated in the middle of the reserve with large habitat patches and a low degree of habitat fragmentation. At the peak of mine development (2011), the area of highly suitable habitat had decreased by 2.39% compared to habitat in 2005. A large area of suitable habitat in the south of the reserve was lost due to mining development, and the centroid indicated that the remaining suitable habitat was restricted to the north, with smaller, fragmented habitat patches. By 2019, 3.50% of the previously suitable goitered gazelle habitat that was lost due to mining development was recovered through ecological restoration. However, compared to 2005, the recovered habitat patches were more severely dispersed in 2019. Additionally, previously highly suitable habitats were lost due to highway and railway constructions in the KNR.

**Conclusion:** To improve the protection of goitered gazelle within the KNP, we suggest, (1) strengthening the protection of all water sources, (2) establishing and monitoring wildlife passages, (3) limiting further traffic construction, and (4) supporting mine reclamation efforts.

**Key words:** *Gazella subgutturosa*; mining development; road construction; MaxEnt model; habitat suitability

生境为野生动物提供赖以生存的食物、水源和隐蔽地等资源(Morrison et al, 2007), 其质量的变化对野生动物的生存具有深远影响, 能够直接改变一个物种的生存现状(Martín-López et al, 2011)。因此生境丧失和破碎化成为导致物种灭绝和生物多样性下降的关键因素(Fahrig, 2003)。近年来, 日益增多的矿业开发和交通建设等重大工程对自然景观和生态系统造成了难以估量的破坏, 不仅直接导致野生动物伤亡(Forman & Deblinger, 2000), 亦通过改变地貌、植被、径流、食物质量、隐蔽条件等生境特征, 制约野生动物的迁移、扩散与繁殖, 导致其生境廊道被阻隔, 生境连通性降低, 严重威胁野生动物的生存(Lesbarrères et al, 2004)。以有蹄类动物为代表的大中型兽类受矿业开发和道路工程影响更大(Cristescu et al, 2016; Poole et al, 2016), 例如矿业开发导致的生境破碎化阻断了北美驯鹿(*Rangifer tarandus*)和黑尾鹿(*Odocoileus hemionus*)等有蹄类动物的迁移廊道、阻碍其季节迁徙和扩散, 改变了它们的生境选择规律(Merrill et al, 1994; Weir et al, 2007)。封闭式的高速公路和铁路降低了大角羊(*Ovis canadensis*)种群间的基因流动(Epps et al, 2005)。为消除或缓解矿业开发和道路修建等重

大工程对野生动物的负面影响, 可以采取取缔非法矿企和修复被侵占水源以及植被, 在道路沿线修建野生动物通道等手段恢复野生动物生境(Clevenger & Waltho, 2005)。

鹅喉羚(*Gazella subgutturosa*)隶属于偶蹄目牛科瞪羚属, 又名长尾黄羊, 是分布于欧亚大陆荒漠-半荒漠地区典型的有蹄类野生动物, 中国国家二级重点保护野生动物, 世界自然保护联盟(IUCN)将其列为易危(VU)物种(IUCN, 2017)。鹅喉羚在国内主要分布于内蒙古中西部、宁夏荒漠区、甘肃西部、青海柴达木盆地和新疆等地, 其中在新疆的分布范围较广, 新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区(以下简称卡山保护区)是其集中分布区(高行宜等, 1996; 初红军等, 2009), 种群数量最多时曾达6,638–19,677只(初红军等, 2009)。然而, 近15年来卡山保护区先后经历了高强度的矿业开发、公路铁路建设和矿区生态修复等人类活动。2005年以前保护区内的人类活动主要包括放牧和216国道交通运输。2008年保护区内出现矿业开发活动, 2011年矿业开发达到顶峰, 导致保护区内形成多个矿区斑块, 栖居其内的野生动物生境面临丧失和破碎化的风险。在有关政府部门的决策下, 保护区于2015年开



始实施矿企关停和矿区生态修复工程, 至2018年矿区生态修复工程全面完成。与此同时, 2017年在保护区内开始动工建设阿富准铁路和S11高速公路, 2019年全面建成通车。目前S11高速公路、216国道与阿富准铁路3线并行穿越保护区, 成为保护区内野生动物面临的新干扰源, 势必加大鹅喉羚等有蹄类动物季节性迁徙扩散的难度, 威胁其生存。

在上述背景下, 本研究拟开展卡山保护区鹅喉羚生境质量评估, 分析和对比近15年保护区内鹅喉羚的生境格局动态。根据卡山保护区不同时期开展的重大工程活动背景, 本研究设定矿业开发前(2005年)、矿业开发顶峰时(2011年)和矿区生态修复后(2019年) 3个时期, 采用最大熵(MaxEnt)模型对这3个时期鹅喉羚的适宜生境动态进行分析, 评估矿区开发和公路铁路建设等重大工程对鹅喉羚生境质量的影响。试图回答以下科学问题: (1)影响卡山保护区鹅喉羚生境质量的关键环境因子有哪些; (2)近15年矿业开发和交通建设等人类活动如何改变鹅喉羚的生境空间格局; (3)矿区生态修复是否促进了鹅喉羚生境质量恢复, 以期能揭示重大工程对鹅喉羚生境质量的影响机制, 为卡山保护区鹅喉羚及其生境的有效保护和长期监测提供科学依据。

## 1 研究区概况

卡山保护区(88°30′–90°03′ E, 44°36′–46°00′ N)位于准噶尔盆地东缘, 地跨昌吉回族自治州和阿勒泰地区, 以保护珍稀濒危有蹄类动物及其生境为主(图1)(高行宜和姚军, 2006)。保护区内地貌类型多样, 有戈壁、沙漠、平原、山地和丘陵; 海拔高度600–1,464 m, 地势东高西低。该区域属中温带大陆性气候, 年均温仅1.99℃; 年均降水量和蒸发量分别为186.8 mm和2,090 mm(夏参军等, 2011)。保护区内无地表水分布, 仅有十几处裂隙水溢出的盐泉、低洼地降雨和融雪积水, 以及少量人工广口井, 成为旱季野生动物的天然饮水点。水资源短缺是制约该地区野生动物生存的重要因素(葛炎等, 2003)。

卡山保护区内植被组成简单、分布稀疏, 主要由超旱生、旱生灌木、小半灌木及旱生一年生灌木、多年生草本和短命植物等组成。建群植物以豆科、藜科、菊科、蓼科、莎草科、柽柳科、禾本科、麻黄科植物为主, 能够形成大片群落的优势种有梭梭

(*Haloxylon ammodendron*)、驼绒藜(*Ceratoides latens*)、假木贼(*Anabasis* spp.)、蒿(*Artemisia* spp.)、沙生针茅(*Stipa glareosa*)、琵琶柴(*Reaumuria songarica*)、碱韭(*Allium polyrhizum*)、木蓼(*Atraphaxis* spp.)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)等(徐文轩等, 2016)。卡山保护区内野生动物种类繁多, 国家重点保护野生有蹄类动物有普氏野马(*Equus ferus*)、蒙古野驴(*E. hemionus*)、盘羊(*Ovis darwini*)和鹅喉羚等(葛炎等, 2003)。

保护区内常住居民较少, 主要是以游牧为主的哈萨克族。当地政府于2005年将保护区南部总面积3,569.04 km<sup>2</sup>的野生有蹄类动物越冬地调出保护区, 2006年开始在该区域建设准东国家级经济技术开发区, 进行煤炭和稀有金属矿产开发; 2010年底工业园区基础设施包括水库等基本建成并投入使用, 煤电煤化工产业初具规模(彭向前, 2012)。之后在卡山保护区中部和北部也陆续实施了矿业开发, 至2011年达到顶峰(陈晨等, 2021)。2013年, 保护区中部西南地区乔木希拜管护站开始大量野放普氏野马(王渊, 2014)(图1)。2015–2019年, 当地政府开始关停保护区范围内所有矿企, 并着力开展矿区的生态修复, 目前保护区内已无任何矿业开发活动(张晓晨等, 2020)。1991年建设完成的开放式216国道将保护区分隔为东西两个部分。2019年, 与216国道紧邻的阿富准铁路和S11高速公路同时建成通车, 形成3条交通线从南至北并行穿越保护区的局面(陈晨等, 2021)(图1)。虽然高速公路和铁路均设计了野生动物通道, 但仍可能阻碍鹅喉羚迁移, 影响道路两侧鹅喉羚生境的连通性。

## 2 研究方法

### 2.1 鹅喉羚分布点数据

鹅喉羚分布位点数据来自我们2005–2019年在卡山保护区开展的实地野外考察。本研究采用样线法调查鹅喉羚的分布点(盛和林和徐宏发, 1992; 刘辉等, 2015)。在开展野外调查之前, 咨询当地牧民和保护区工作人员, 初步确定鹅喉羚分布区域。针对鹅喉羚种群分布状况, 参照保护区的地形地势和前人考察路线, 共布设了27条样线, 每条样线长40–200 km不等, 总长度为3,181.9 km(图2), 采用可变距离样线法在每年固定时期进行重复调查。调

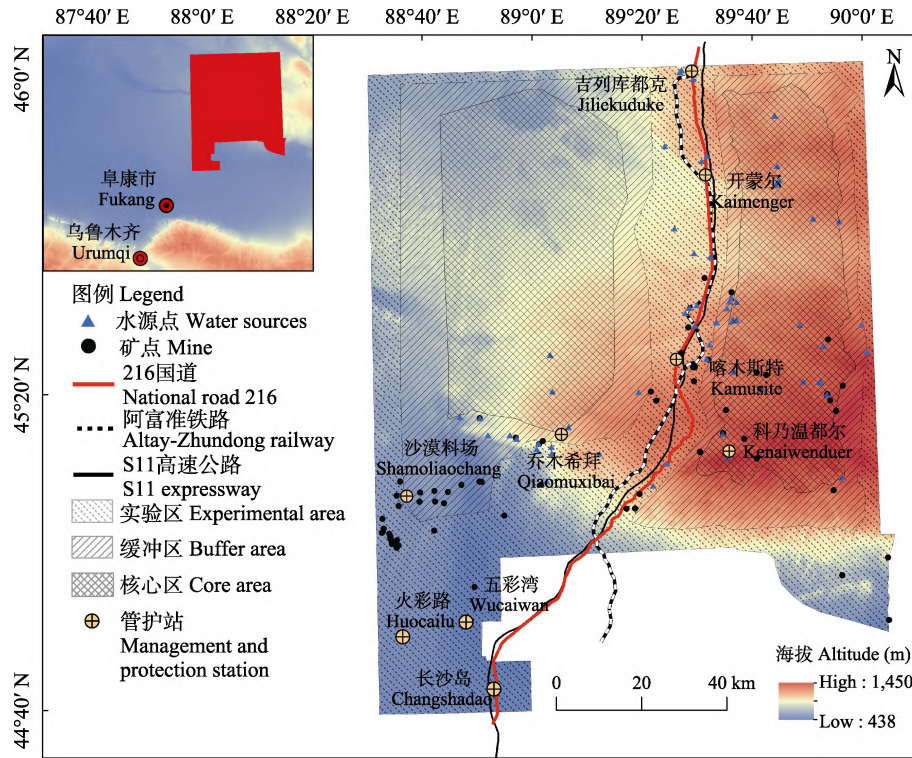


图1 新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区水源点、矿点和道路概况图  
Fig. 1 Overview of water sources, mines and roads in the Xinjiang Kalamaili Mountain Ungulate Nature Reserve

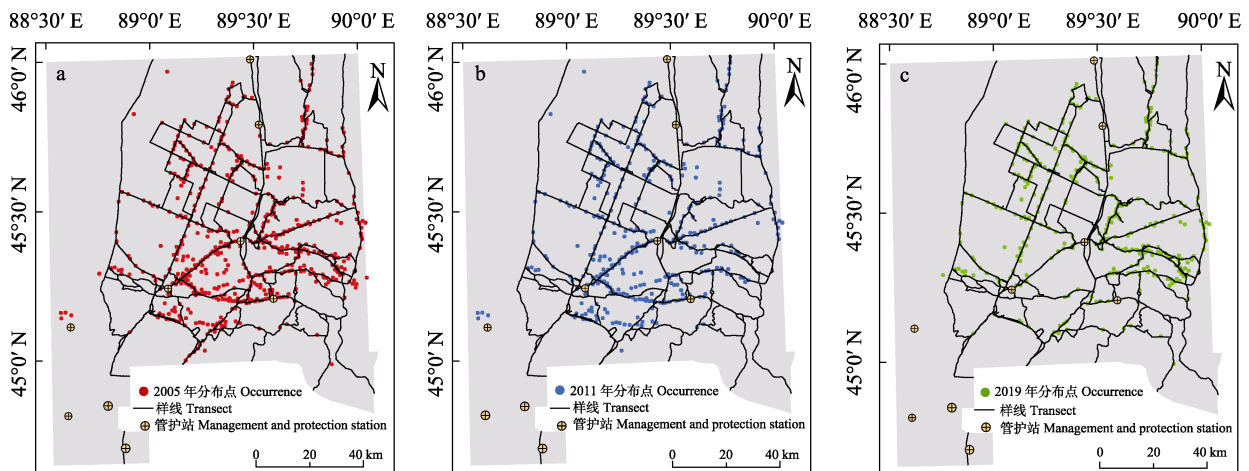


图2 新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区调查样线及鹅喉羚2005年(a)、2011年(b)和2019年(c)分布点图  
Fig. 2 Transect and occurrence of goitered gazelle in 2005(a), 2011(b), and 2019(c) in the Xinjiang Kalamaili Mountain Ungulate Nature Reserve

查时使用双筒和单筒望远镜扫视样线两侧, 当发现鹅喉羚时记录观察者所在位置的经纬度, 使用激光测距仪(蔡司T\*RF10\*54)和指南针分别测量观察者与鹅喉羚之间的距离和夹角, 以此计算鹅喉羚所在位置的精确GPS位点(宓春荣等, 2017)。因分布点过拟合可能影响模型预测的准确性, 为此我们使用缓冲区分析法筛选鹅喉羚的分布点。数据分辨率约

1 km, 因此设定缓冲半径为0.5 km, 在每个栅格中只保留其中一个分布点(李美玲等, 2019)。处理之后共获得鹅喉羚分布点数据如下: 2005年549个(图2a)、2011年381个(图2b)、2019年342个(图2c)。

## 2.2 环境数据

本研究将潜在影响鹅喉羚生境适宜性的环境变量分为以下4种: 气候、地形、人类干扰、植被(类



型)和水源(附录1),基本覆盖了影响该物种分布的所有因子。其中气候数据来自世界气候数据库(WorldClim v 2.1, <http://www.worldclim.org/>)中的19个气候因子,分辨率为30" (约1 km);地形因子选取海拔、坡度和坡向,数据来源于中国科学院科学数据库地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)下载的GDEMDEM 30 m分辨率的数字高程数据,通过ArcGIS空间分析获得;人类干扰因子包括距216国道距离、距S11高速公路距离、距阿富准铁路距离和距矿点距离。利用遥感影像、实地考察结合1/10万地形图,提取保护区内水源、道路以及矿点等分布数据,使用ArcGIS的spatial analyst tools (空间分析模块)计算各变量的欧式距离栅格图层。

植被类型能够反映鹅喉羚的食物分布状况,是影响其生境选择的重要因子。利用Landsat TM遥感影像,在野外实地验证的基础上,采用监督分类和非监督分类相结合的方法,参考《1:100万中华人民共和国植被图》(中国科学院中国植被图编译委员会,2007),辅以目视解译,生成不同时期保护区植被类型图(林杰等,2012)。

卡山保护区边界范围由保护区管理中心提供。以ArcGIS 10.6为平台,将上述全部环境因子数据按研究区域边界范围进行掩膜提取、统一坐标系为WGS\_1984\_UTM\_Zone\_45N,所有矢量图层重采样为1 km × 1 km的栅格图层,建立不同时期环境变量文件夹:2005年(19个气候因子、矿区开发前植被类型、地形因子、距水源点距离和距216国道距离)、2011年(19个气候因子、矿区开发顶峰植被类型、地形因子、距水源点距离、距216国道距离和距矿点距离)、2019年(19个气候因子、矿区生态修复后植被类型、地形因子、距水源点距离、距216国道距离、距S11高速公路距离、距阿富准铁路距离和距矿点距离),并转化为ASCII格式用于MaxEnt模型运算(附录1)。

### 2.3 MaxEnt模型的构建和验证

MaxEnt模型是最具有代表性的物种分布模型之一,具有“只需要物种出现点就可以进行预测”“即使出现点数据较少时预测精度也很高”等特征,被认为是目前预测物种潜在分布较好的模型(Phillips et al, 2006; 罗翀等, 2011)。

(1)模型构建。将不同情景下鹅喉羚的分布点数

据以及对应的环境变量导入MaxEnt中,分别随机选取75%和25%的分布点用于模型建立和验证,其余参数设为模型的默认值,构建鹅喉羚分布模型进行模拟,同时选择刀切法(Jackknife)分析环境变量的重要性,将迭代运算10次模拟结果的平均值作为最终结果(Behdarvand et al, 2014)并以Logistic格式输出,得到鹅喉羚的概率分布图。

(2)模型验证。采用受试者工作特征曲线(ROC)下的面积(AUC)评价模型预测的准确性,评价标准为:0.5-0.6为不及格,0.6-0.7较差,0.7-0.8一般,0.8-0.9良好,0.9-1.0优秀(Araújo & Peterson, 2012)。

(3)生境等级划分。将模型输出的ASCII文件导入ArcGIS 10.6中转换为浮点型栅格数据,依据MaxEnt模型采用最大化训练敏感性和特异性(maximum training sensitivity and specificity, MTSS)阈值法对模型输出结果进行转换,判定大于该阈值为鹅喉羚的适宜生境,小于该阈值为不适宜生境(Jiménez-Valverde & Lobo, 2007; 孔维尧等, 2019)。

### 2.4 生境空间变化特征

利用ArcGIS进行叠加分析,具体方法如下:

$$X = SHP \times 10 + SHL, X \in (0, 1, 10, 11) \quad (1)$$

式中,SHP和SHL分别表示前后不同时期鹅喉羚的适宜生境分布图层,取值为0(不适宜生境)和1(适宜生境)。X = 0表示两个时期都是不适宜生境;X = 1代表前一时期为不适宜生境,后一时期为适宜生境的区域,即新增适宜生境区;X = 10代表前一时期为适宜生境,后一时期为不适宜生境的区域,即丧失适宜生境区;X = 11代表两个时期都是适宜生境,即保留适宜生境区(冉巧等, 2019)。

### 2.5 适宜生境质心转移

质心是描述物种空间分布的重要指标之一,也可以用来表征物种的空间分布变化(雷璇等, 2012)。将不同时期鹅喉羚的适宜生境作为一个整体,用质心位置的转移反映鹅喉羚适宜生境的空间变化。首先将鹅喉羚不同时期的潜在适宜生境分布栅格图矢量化;再利用ArcGIS分类统计工具Zonal计算各时期适宜生境的质心位置,并比较不同时期质心位置的变化和转移距离(张殷波等, 2019)。

### 2.6 景观格局指数选取与计算

生境破碎化造成物种栖息环境破坏、生境质量下降、生境结构改变(吴昌广等, 2009; 傅伯杰等,

2011)。本文选取类别(class)尺度上的8个景观指标定量分析3个时期鹅喉羚的生境空间格局(附录2),以期了解保护区内鹅喉羚生境的破碎化程度。各景观格局指数的计算公式和描述详见邬建国(2001)。主要利用景观格局分析软件Fragstats 4.2中的移动窗口空间分析法分别探讨不同时期生境适宜度类型(适宜和不适宜)景观格局特征,揭示生境破碎化程度。

### 3 结果

#### 3.1 鹅喉羚生境适宜性评价结果

2005、2011及2019年3个时期MaxEnt模型的AUC分别为0.817、0.812和0.816,表明所建模型的预测效果均较好,预测的鹅喉羚适宜生境分布具有很强的可靠性。

MaxEnt模型可自动输出各个环境因子的综合贡献率,Jackknife检验结果表明:在3个时期对鹅喉羚空间分布贡献率最大的因子均是距水源点距离,分别为32.9%、22.5%和23.2%(表1)。其次最暖季平均温在2011年和2019年贡献率均较高。在2005年距216国道距离是贡献率最大的人类干扰因子(7.3%);2011年距矿点距离为对模型贡献率最大的人类干

扰因子(11.6%),其次为距216国道距离(6.4%);在2019年距阿富准铁路距离则成为对模型贡献率最大的人类干扰因子(12.3%)(表1)。

#### 3.2 不同时期鹅喉羚适宜生境面积变化

模型模拟结果表明,3个时期鹅喉羚的适宜度较低区域在研究区内面积最大,主要集中在保护区外围和道路沿线,适宜度较高的区域主要集中在保护区中部(图3)。3个时期存在栅格图层的阈值分别为0.351(2005年)、0.405(2011年)和0.370(2019年),据此将其生境分为适宜生境和不适宜生境。

模型模拟结果表明鹅喉羚的各类型生境面积在不同时期变化较大(表2)。从2005年到2019年,适宜生境面积呈先减少后增加的趋势。2005年至2011年适宜生境面积减少了353 km<sup>2</sup>,变化率为-8.27%;2011年至2019年适宜生境面积增加了520 km<sup>2</sup>,变化率为13.28%。与此对应的是,不适宜生境面积在2011年最大,呈先上升后减少的趋势(表2)。

#### 3.3 不同时期鹅喉羚适宜生境空间变化和质心转移

将每两个时期的适宜生境叠加得到了3个时间段(2005-2011年、2011-2019年和2005-2019年)鹅喉羚的适宜生境空间格局变化(图4)。结果表明,2005-2011年,保护区东南部鹅喉羚的大量适宜生

表1 2005、2011和2019年主要环境变量的贡献率

Table 1 Major environmental variables and their contributions in 2005, 2011, and 2019

序号 No.	2005		2011		2019	
	变量 Variable	贡献率 Contribution	变量 Variable	贡献率 Contribution	变量 Variable	贡献率 Contribution
1	距水源点距离 Distance to water source	32.9%	距水源点距离 Distance to water source	22.5%	距水源点距离 Distance to water source	23.2%
2	海拔 Altitude	13.3%	最暖季平均温 Mean temperature of warmest quarter (Bio 10)	19.9%	最暖季平均温 Mean temperature of warmest quarter (Bio 10)	18.9%
3	距216国道距离 Distance to national road 216	7.3%	距矿点距离 Distance to mining	11.6%	距阿富准铁路距离 Distance to Altay-Zhundong railway	12.3%
4	年降水量 Annual precipitation (Bio 12)	6.8%	年均温 Annual mean temperature (Bio 1)	7.7%	距矿点距离 Distance to mining	11.8%
5	月均温范围 Mean diurnal range (Bio 2)	4.9%	距216国道距离 Distance to national road 216	6.4%	年均温 Annual mean temperature (Bio 1)	4.9%
6	最湿季降水量 Precipitation of wettest quarter (Bio 16)	4.7%	最暖月最高温 Max. temperature of warmest month (Bio 5)	5.8%	最干季平均温 Mean temperature of driest quarter (Bio 9)	4.0%

表2 2005、2011和2019年鹅喉羚适宜生境面积及变化

Table 2 Suitable habitat area and changes of goitered gazelle in 2005, 2011, and 2019

年 Year	适宜生境 Suitable habitat			不适宜生境 Unsuitable habitat		
	面积 Area (km <sup>2</sup> )	占比 Percentage (%)	变化率 Variation (%)	面积 Area (km <sup>2</sup> )	占比 Percentage (%)	变化率 Variation (%)
2005	4,267	28.78	-	10,557	71.22	-
2011	3,914	26.39	-8.27	10,917	73.61	3.41
2019	4,434	29.89	13.28	10,397	70.10	-4.76



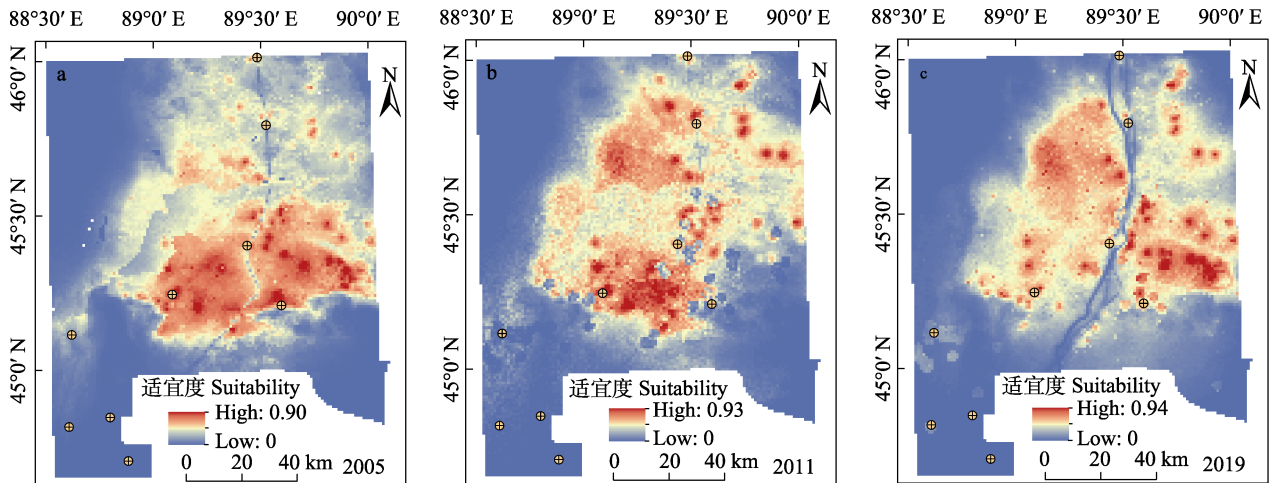


图3 2005年(a)、2011年(b)和2019年(c)鹅喉羚适宜生境分布图。蓝色表示适宜度较低区域, 红色表示适宜度最高区域。  
Fig. 3 Distribution of suitable habitat of goitered gazelle in 2005 (a), 2011 (b), and 2019 (c). Unsuitable habitat is shown in blue, and red areas represent suitable habitat.

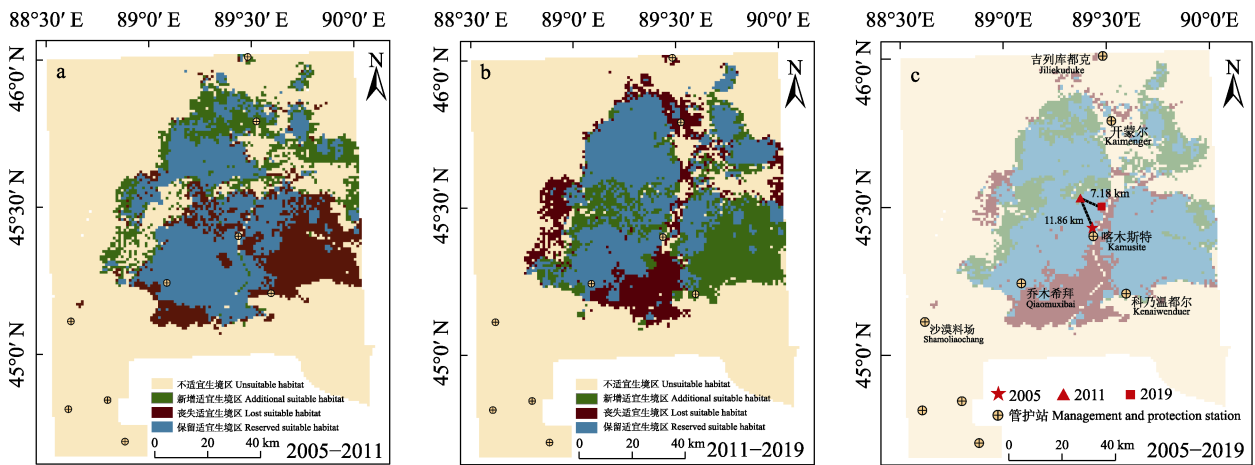


图4 不同时期鹅喉羚适宜生境空间格局变化及质心转移  
Fig. 4 The spatial pattern changes and centroid transfer of the suitable habitat of goitered gazelle under different periods

表3 2005年、2011年和2019年鹅喉羚景观格局指数  
Table 3 Landscape index of goitered gazelle in 2005, 2011, and 2019

年 Year	生境类型 Habitat type	斑块面积 Patch area (km <sup>2</sup> )	斑块数量 Number of patches (n)	斑块密度 Patch density (n/km <sup>2</sup> )	最大斑块指 数 Largest patch index (%)	景观形状指 数 Landscape shape index	相似临近比 度 Proportion of like adjacencies	聚集度指数 Aggregation index (%)	斑块类型占总面 积的比例 Percentage of Landscape (%)
2005	不适宜 Unsuitable	10,557	33	0.0033	70.57	5.97	94.17	95.10	71.20
	适宜 Suitable	4,267	49	0.0022	26.26	7.09	89.10	90.49	28.79
2011	不适宜 Unsuitable	10917	51	0.0034	72.03	7.71	92.62	93.51	73.61
	适宜 Suitable	3914	48	0.0032	24.63	10.56	82.99	84.35	26.39
2019	不适宜 Unsuitable	10,397	39	0.0026	65.57	5.30	94.79	95.73	70.10
	适宜 Suitable	4,434	29	0.0020	16.50	5.90	91.08	92.47	28.89

境丧失, 主要集中于矿区及其周围, 新增适宜生境零星分布在保护区北部的保留适宜生境区的外缘,

且面积较小较为分散(图4a)。2011-2019年新增适宜面积较广但分散, 主要集中于前一时段(2005-2011

年)丧失的适宜生境区(图4b)。保护区中部道路沿线和西南方向部分保留适宜生境丧失,主要集中在乔木希拜地区(图4b)。2005–2019年,道路两侧丧失部分鹅喉羚适宜生境面积(图4c)。

以质心定义分布区域中心点来表征鹅喉羚适宜生境位置的迁移,对不同时期鹅喉羚适宜生境的迁移变化分析表明,不同时期质心转移的方向和距离各不相同(图4c)。2005年鹅喉羚适宜生境质心在喀木斯特管护站北部附近;2005–2011年,鹅喉羚适宜生境质心向西北转移11.86 km;2011–2019年,鹅喉羚适宜生境质心在2011年基础上向东南转移7.18 km(图4c)。

### 3.4 鹅喉羚生境格局变化特征

不适宜生境的斑块面积及其占总面积的比例在3个时期中均较大,表明该类型生境斑块丰富度极高,一直是保护区内鹅喉羚的主要生境类型(表3);该类型生境的最大斑块指数和相似临近比度较大,景观形状指数较小,说明卡山保护区内一直存在大面积的、形状较为规则的不适宜生境斑块,且斑块间离散程度过高。适宜生境的景观形状指数在3个时期均较大,聚集度指数较小,说明保护区内该类型生境多由小型斑块组成,破碎化程度高,生境斑块形状复杂(表3)。2011年适宜生境类型的相似临近比度和聚集度指数相比2005年和2019年较小(表3),表明矿业开发顶峰时期适宜生境斑块团聚程度低,生境破碎化严重。

## 4 讨论

卡山保护区自2005年起10余年间先后经历了矿业开发和道路修建等一系列人类活动干扰,其中鹅喉羚的生境状况也经历了从良好到恶化再到有所缓解并开始逐渐恢复的阶段。

### 4.1 影响鹅喉羚潜在适宜生境的环境因子

本研究通过对比不同时期卡山保护区内鹅喉羚生境格局动态变化特征,重点分析了矿业开发和道路修建等重大工程对卡山保护区鹅喉羚生境的影响。总体而言,水源和温度是影响鹅喉羚生境质量最重要的自然环境因素(表1)。首先,水源在3个时期对卡山保护区鹅喉羚生境选择的贡献率均最高,表明水源是影响其生存最重要的环境因子。在同一区域开展的蒙古野驴的研究中也发现了相似

的结果(陈晨等,2021)。其次,最暖季平均温在评估模型中贡献也较大,说明温度对鹅喉羚的分布也有重要作用(表1)。鹅喉羚善于奔跑,以此来逃避天敌的捕食,因此其栖息环境需要坡度相对较小、地形平坦的区域;卡山保护区大部分区域地势较为平缓,坡度相对较小,比较适合鹅喉羚生存,因此在本研究中坡度等地形因子对鹅喉羚的分布影响较小。

### 4.2 2005年鹅喉羚生境格局特征

在人类干扰因子中,距矿点和道路距离在不同时期都对模型有一定的贡献率(表1)。在矿业开发前(2005年),鹅喉羚主要分布于保护区的中部和南部,其适宜生境较为集中,破碎化程度低(图3a)。因为保护区中部、南部坡度较为平缓,植被条件好,生长着驼绒藜、沙生针茅和梭梭等鹅喉羚喜食植物(徐文轩等,2016)。同时梭梭和驼绒藜灌丛为鹅喉羚提供了隐蔽和遮阴避风场所(杨维康等,2005;李莹等,2010),加之此处水源点较为集中(图1),使得此区域成为鹅喉羚最主要的适宜生境区(李莹等,2010)。该时期内在不考虑冬季放牧的情况下,保护区内唯一的人类干扰因素为216国道。虽然216国道的南北纵贯将保护区隔离成2个相对独立的生境单元,在一定程度上阻碍了鹅喉羚种群东西向的迁移和交流,不利于种群的生存和发展(陈晨等,2021),但此时新疆北部的社会经济发展相对滞后,216国道车流量相对较低,而且为开放式路面,鹅喉羚可以直接穿越道路。有学者观测到鹅喉羚时常穿过路面饮水或在216国道两侧低洼处采食和休憩(李莹等,2010),由此可知,216国道在这一时期对鹅喉羚的阻隔效应十分有限,并未对其生存构成严重威胁。

### 4.3 2011年鹅喉羚生境格局特征

2011年卡山保护区矿业开发活动达到顶峰,此时鹅喉羚的适宜生境面积相比2005年减少了353 km<sup>2</sup>(表2)。保护区东南部原大面积适宜生境因矿业开发而丧失,适宜生境质心显示鹅喉羚开始向保护区北部转移(图4c)。此时整体适宜生境斑块面积小,离散和破碎化程度较高(表3)。

与同区域和同时期的蒙古野驴相比(陈晨等,2021),鹅喉羚的适宜生境丧失面积较少,主要原因有两个:一是矿业开发导致的原适宜生境丧失较少。相对于蒙古野驴等大型有蹄类动物,鹅喉羚的家域面积较小,仅需要较小的适宜生境斑块面积即

可保障其生存,使得鹅喉羚能够在夹缝中继续生存。然而这种情况下,其可持续生存可能面临巨大挑战。研究发现矿业开发等人类活动能够改变野生动物的行为习性,使其由昼行性改为夜行性(Gaynor et al, 2018)。因此即使鹅喉羚能够在破碎化的生境中生存,它们也将被迫调节行为以适应更加强的人类干扰,例如增加警戒行为,降低采食行为的投入(汪沐阳等, 2020)。这种行为的被动调节将不可避免地降低鹅喉羚个体的适合度,降低其对极端环境的适应能力。因此确保鹅喉羚拥有大面积的生境斑块对其生存依然具有重要意义。二是鹅喉羚适宜生境在保护区北部和西部增加较多(图4a)。已有研究表明水源是限制荒漠野生动物空间分布的关键因子,能够重塑有蹄类动物的分布范围(林杰等, 2012; 张晨等, 2021)。卡山保护区北部水源点相对缺乏,尤其是西北部几乎无可供蒙古野驴和鹅喉羚饮用的地表水(图1),因此该区域成为鹅喉羚和蒙古野驴的不适宜生境(张晨等, 2021)。但是当保护区中部和南部的水源被矿企占用后,鹅喉羚被迫向西、向北迁移。鹅喉羚获取水分的方式比蒙古野驴更加多样化,既能够饮用地表水,也能够无地表水时,从采食的植物中获取水分(Kingswood & Blank, 1996),这就保证它们可以在保护区西部和北部勉强生存。另外,保护区西部松软的沙地不利于体型较大的蒙古野驴正常活动(张晓晨等, 2020),因此这一时期鹅喉羚在保护区西部和北部的适宜生境较蒙古野驴增加很多。上述两个因素导致此时鹅喉羚的适宜生境面积总体降低较少,适宜生境质心向西北转移(图4c)。

保护区北部地势较低,会在春季融雪和夏季降雨后形成临时性水源点,且由于矿化度相对较低,水质好,也能够为鹅喉羚提供短暂的饮水资源,因此成为鹅喉羚新的适宜生境区(图3b)。但北部新增的适宜生境面积较小,斑块较为分散,而且该区域生长着假木贼-琵琶柴群和假木贼-针茅群落,这些植物很少被鹅喉羚采食(李莹等, 2009),因此新增的适宜生境远远不能满足鹅喉羚的食物和水源需求。夏秋季经常有鹅喉羚至216国道两旁低洼地短暂积水地饮水,导致部分适宜生境零星分布在216国道两侧。由于此时保护区内已开始大量开发矿产资源,来往的车辆数量逐渐增加,216国道较2005年

对鹅喉羚的干扰显著加强,由此造成的后果是车撞导致鹅喉羚死亡事故有所增加(夏参军等, 2011)。

#### 4.4 2019年鹅喉羚生境格局特征

有关部门在2015–2019年对卡山保护区实施了生态修复。本研究发现矿区生态修复完成后(2019年),鹅喉羚的适宜生境面积较矿业开发顶峰时期(2011年)增加了520 km<sup>2</sup>,适宜生境质心向东南转移(图4c),原东部丧失的受干扰区域和矿业园区重新成为鹅喉羚的适宜生境(图4b)。因此关闭矿业并实施生态修复是保护鹅喉羚及其生境的有效措施。矿区生态恢复的关键是对植被和土壤的恢复(赵新风等, 2018),矿业活动导致矿区土壤贫瘠,重金属污染严重,虽采取了平整地形和回填矿坑等措施,但地表仍无植被覆盖,恢复后的核心区和示范区内的植被覆盖度仅为开发前的70%–80%,且植物种类组成变化很大,多为盐生草(*Halogeton glomeratus*)、猪毛菜(*Salsola arbuscula*)与叉毛蓬(*Petrosimonia sibirica*)等鹅喉羚不喜食的植物。此时鹅喉羚的生境分布格局与矿业开发前相比仍有差距,原先保护区西南部的乔木西拜地区和靠近216国道的适宜生境丧失,导致生境连通性降低,而216国道沿线适宜生境面积的丧失在于新修建的S11高速公路和铁路对216国道沿线区域构成强烈干扰。因此我们认为对卡山保护区实施生态修复后,鹅喉羚生境的恶化状况有所缓解,生境质量呈现逐渐恢复的趋势。

食物丰富度和适口性对野生动物的生境选择起着重要作用(King et al, 2002)。保护区西南部乔木希拜水源点较为丰富,2013年保护区管理部门开始在此处连续野放人工繁育的普氏野马,目前乔木希拜野马数量已增至260余匹(王渊等, 2016)。有研究表明鹅喉羚与普氏野马均喜食禾本科针茅属(*Stipa*)植物,二者营养生态位重叠度高达0.980,食物竞争非常强烈(黄艳等, 2011)。因此普氏野马与同域分布的鹅喉羚在空间生态位和营养生态位上都具有强烈的竞争。此外,野放初期普氏野马野性较弱,活动区域较小,主要集中于乔木希拜,导致该区域的草场被过度采食,鹅喉羚适宜生境大面积丧失(图4b)。当2015年矿区开始实施生态修复后,保护区东南部重新成为鹅喉羚的适宜生境区(图4b),该区域相对于乔木希拜而言食物资源更为丰富,并且距离乔木希拜较近,鹅喉羚很容易即可迁移至该区域,



因此成为鹅喉羚新的适宜生境区。

新建道路将显著增加野生动物在生境斑块间迁移的阻力(陈强强等, 2019), 不同等级的道路(国道、高速公路以及铁路)对野生动物迁移的影响程度亦不同(李帅等, 2018)。2019年在保护区内全面通车的S11高速公路和阿富准铁路为全封闭围栏设计。虽然沿公路和铁路均设计修建了野生动物通道, 但鹅喉羚仍需要一定时间才有可能适应道路干扰, 穿越通道进行迁移。尽管如此, 鹅喉羚同时穿越3条道路依然非常困难, 因此三线并行的交通工程可能对鹅喉羚的迁移和扩散构成屏障。作者野外调查发现2020年道路两侧鹅喉羚的数量较之前有所减少, 说明当前鹅喉羚对3条道路仍有一定程度的回避。未来应加强道路沿线两侧鹅喉羚的分布调查, 尤其是加强鹅喉羚等野生动物对通道的利用监测, 根据监测结果及时采取诱导措施促进其穿越通道。

#### 4.5 保护建议


卡山保护区是国内鹅喉羚种群分布最集中的地区。近年来该保护区内鹅喉羚的种群数量波动较大, 除自然因素外, 人类活动如矿业开发和道路修建等对其影响亦较为显著。综合以上研究结果, 根据鹅喉羚面临的生存问题提出以下建议:


(1)在不适宜生境区域增设人工饮水点。水是荒漠地区野生动物生存所必需的因素之一。可以看出, 尽管鹅喉羚能够在不饮水的情形下勉强生存, 但无可利用水源依旧是导致卡山保护区鹅喉羚不适宜生境面积较大的主要原因。因此可以在这些区域增设人工饮水点, 促进鹅喉羚向新区域扩散。这样一方面能够降低原适宜生境内的水源和食物竞争, 另一方面能够增加其适宜生境面积。同时建议在所增设的水源点加设贮水装置, 以延长水源的储存时间, 增加水源被利用强度(张永军等, 2014)。(2)鉴于216国道为开放式路面, 随着来往车辆的逐渐增多, 为降低车撞事故导致鹅喉羚伤亡, 建议在216国道穿越保护区路段沿线鹅喉羚活动频繁区域设立明显的限速标志, 在路面起伏较大和急转弯等驾驶员视线受影响区域设立简易围栏。(3)因地制宜, 针对不同矿区利用微地形改造实现地质土壤修复, 例如对矿区渣坡做推平放坡处理, 减缓地形起伏, 利用集水技术实现局部水分富集。在此基础上利用土壤种子库针对不同类型矿区实现植被改造(张涛等,


2017), 根据精准的水、肥、土、种配比提高受损区植被修复率, 加快矿区植被演替恢复速率, 争取将受损区域尽快恢复到矿业开发前的植被水平。(4)保护区内道路阻隔造成鹅喉羚生境破碎化, 可能阻碍其种群基因交流, 导致遗传多样性的丧失。建议开展鹅喉羚迁移廊道识别和通道利用监测等相关研究, 在破碎化的生境斑块间建立迁移廊道, 保障该物种在破碎生境中正常的季节性迁移。

**致谢:** 感谢新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区管理局在野外调查中给予的支持和帮助。感谢加拿大卡尔加里大学的Kathleen Ruckstuhl教授和中国科学院新疆生态与地理研究所毛洁菲副研究员帮助写作。感谢中国科学院新疆生态与地理研究所王光宇硕士生在图像技术方向的指导。

#### ORCID

张晨  <https://orcid.org/0000-0002-8424-7355>

汪沐阳  <http://orcid.org/0000-0002-5593-632X>

徐文轩  <http://orcid.org/0000-0001-8701-893X>

#### 参考文献

- Araújo MB, Peterson AT (2012) Uses and misuses of bioclimatic envelope modeling. *Ecology*, 93, 1527–1539.
- Behdarvand N, Kaboli M, Ahmadi M, Nourani E, Salman Mahini A, Asadi Aghbolaghi M (2014) Spatial risk model and mitigation implications for wolf-human conflict in a highly modified agroecosystem in Western Iran. *Biological Conservation*, 177, 156–164.
- Chen C, Shao CL, Ge Y, Wang MY, Zhang XC, Xu WX, Yang WK (2021) Habitat pattern dynamics and cause analysis of *Equus hemionus* in Kalamaili Mountain Ungulate Nature Reserve, Xinjiang. *Acta Ecologica Sinica*, 41, 2056–2066. (in Chinese with English abstract) [陈晨, 邵长亮, 葛炎, 汪沐阳, 张晓晨, 徐文轩, 杨维康 (2021) 卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区蒙古野驴生境格局动态及其成因分析. *生态学报*, 41, 2056–2066.]
- Chen QQ, Li ML, Wang X, Qamer FM, Wang P, Yang JW, Wang MY, Yang WK (2019) Identification of potential ecological corridors for Marco Polo sheep in Taxkorgan Wildlife Nature Reserve, Xinjiang, China. *Biodiversity Science*, 27, 186–199. (in Chinese with English abstract) [陈强强, 李美玲, 王旭, Qamer FM, 王鹏, 杨建伟, 汪沐阳, 杨维康 (2019) 新疆塔什库尔干野生动物自然保护区马可波罗盘羊潜在生态廊道识别. *生物多样性*, 27, 186–199.]
- Chu HJ, Jiang ZG, Ge Y, Jiang F, Tao YS, Wang C (2009)



- Population densities and number of khulan and goitred gazelle in Mt. Kalamaili Ungulate Nature Reserve. *Biodiversity Science*, 17, 414–422. (in Chinese with English abstract) [初红军, 蒋志刚, 葛炎, 蒋峰, 陶永善, 王臣 (2009) 卡拉麦里山有蹄类自然保护区蒙古野驴和鹅喉羚种群密度和数量. *生物多样性*, 17, 414–422.]
- Clevenger AP, Waltho N (2005) Performance indices to identify attributes of highway crossing structures facilitating movement of large mammals. *Biological Conservation*, 121, 453–464.
- Cristescu B, Stenhouse GB, Symbaluk M, Nielsen SE, Boyce MS (2016) Wildlife habitat selection on landscapes with industrial disturbance. *Environmental Conservation*, 43, 327–336.
- Editorial Committee of Vegetation Map of China, Chinese Academy of Sciences (2007) *Vegetation Map of the People's Republic of China (1 : 1000000)*. Geological Publishing House, Beijing. (in Chinese) [中国科学院中国植被图编辑委员会 (2007) 中华人民共和国植被图(1 : 1000000). 地质出版社, 北京.]
- Epps CW, Palsbøll PJ, Wehausen JD, Roderick GK, Ramey RR II, McCullough DR (2005) Highways block gene flow and cause a rapid decline in genetic diversity of desert Bighorn sheep. *Ecology Letters*, 8, 1029–1038.
- Fahrig L (2003) Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34, 487–515.
- Forman RTT, Deblinger RD (2000) The ecological road-effect zone of a Massachusetts (U.S.A.) suburban highway. *Conservation Biology*, 14, 36–46.
- Fu BJ, Chen LD, Ma KM (2011) *Principle and Application of Landscape Ecology*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [傅伯杰, 陈利顶, 马克明 (2011) 景观生态学原理及应用. 科学出版社, 北京.]
- Gao XY, Xu KF, Yao J, Jia ZX (1996) The population structure of goitred gazelle in Xinjiang. *Acta Theriologica Sinica*, 16, 14–18. (in Chinese with English abstract) [高行宜, 许可芬, 姚军, 贾泽信 (1996) 新疆鹅喉羚的种群结构. *兽类学报*, 16, 14–18.]
- Gao XY, Yao J (2006) Study on the geography distribution and population of *Gazella subgutturosa* in the Hami Basin, Xinjiang in early winter. *Arid Land Geography*, 29, 213–218. (in Chinese with English abstract) [高行宜, 姚军 (2006) 新疆哈密盆地初冬鹅喉羚的地理分布与种群数量. *干旱区地理*, 29, 213–218.]
- Gaynor KM, Hohnowski CE, Carter NH, Brashares JS (2018) The influence of human disturbance on wildlife nocturnality. *Science*, 360, 1232–1235.
- Ge Y, Liu CG, Chu HJ, Tao YS (2003) Present situation of the *Equus hemionus* resources in the Karamori Mountain Nature Reserve, Xinjiang. *Arid Zone Research*, 20, 32–34, 66. (in Chinese with English abstract) [葛炎, 刘楚光, 初红军, 陶永善 (2003) 新疆卡拉麦里山自然保护区蒙古野驴的资源现状. *干旱区研究*, 20, 32–34, 66.]
- Huang Y, Chu HJ, Lan WX, Shi K, Tao YS, Shao CL (2011) Trophic niche width and overlap of *Equus przewalskii*, *E. hemionus* and *Gazella subgutturosa* in autumn. *Arid Zone Research*, 28, 1045–1050. (in Chinese with English abstract) [黄艳, 初红军, 兰文旭, 时坤, 陶永善, 邵长亮 (2011) 重引入普氏野马、蒙古野驴和鹅喉羚的秋季营养生态位. *干旱区研究*, 28, 1045–1050.]
- IUCN (2017) *IUCN Red List of Threatened Species*. <https://www.iucnredlist.org/species/8976/50187422/>. (accessed on 2021-06-26)
- Jiménez-Valverde A, Lobo JM (2007) Threshold criteria for conversion of probability of species presence to either-or presence-absence. *Acta Oecologica*, 31, 361–369.
- King SRB (2002) Home range and habitat use of free-ranging Przewalski horses at Hustai National Park, Mongolia. *Applied Animal Behaviour Science*, 78, 103–113.
- Kingswood SC, Blank DA (1996) *Gazella subgutturosa*. *Mammalian Species*, 518, 1–10
- Kong WY, Li XH, Zou HF (2019) Optimizing MaxEnt model in the prediction of species distribution. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 30, 2116–2128. (in Chinese with English abstract) [孔维尧, 李欣海, 邹红菲 (2019) 最大熵模型在物种分布预测中的优化. *应用生态学报*, 30, 2116–2128.]
- Lei X, Yang B, Jiang WG, Yang YP, Kuenzer C, Chen Q (2012) Vegetation pattern changes and their influencing factors in the East Dongting Lake wetland. *Geographical Research*, 31, 461–470. (in Chinese with English abstract) [雷璇, 杨波, 蒋卫国, 杨一鹏, Claudia Kuenzer, 陈强 (2012) 东洞庭湿地植被格局变化及其影响因素. *地理研究*, 31, 461–470.]
- Lesbarrères D, Lodé T, Merilä J (2004) What type of amphibian tunnel could reduce road kills? *Oryx*, 38, 220–223.
- Li ML, Chen QQ, Wang MY, Yang WK, Zhang C, Luo GP, Ding JL, Lin YC (2019) Assessment of habitat suitability of *Ovis ammon polii* based on MaxEnt modeling in Taxkorgan Wildlife Nature Reserve. *Chinese Journal of Ecology*, 38, 594–603. (in Chinese with English abstract) [李美玲, 陈强强, 汪沐阳, 杨维康, 张弛, 罗格平, 丁建丽, 林昱辰 (2019) 基于MaxEnt模型的马可波罗盘羊生境适宜性评价. *生态学杂志*, 38, 594–603.]
- Li S, Zhang XF, Shi JB, Dong SK, Gao XX (2018) Effects of highway from Inner Mongolia to Xinjiang on habitat suitability of ungulates in Alashan desert. *Chinese Journal of Ecology*, 37, 103–110. (in Chinese with English abstract) [李帅, 张相锋, 石建斌, 董世魁, 高晓霞 (2018) 蒙新高速公路对阿拉善荒漠区有蹄类野生动物生境适宜性的影响. *生态学杂志*, 37, 103–110.]
- Li Y, Xu WX, Qiao JF, Yang WK (2009) Spatio-temporal distribution and habitat selection of *Gazella subgutturosa* in Kalamaili Mountain Nature Reserve in four seasons. *Arid Land Geography*, 32, 261–267. (in Chinese with English

- abstract) [李莹, 徐文轩, 乔建芳, 杨维康 (2009) 卡拉麦里山有蹄类自然保护区鹅喉羚的时空分布与生境选择. 干旱区地理, 32, 261–267.]
- Li Y, Xu WX, Yang WK, Qiao JF, Liu W, Xia CJ (2010) Habitat suitability assessment of *Gazella subgutturosa* in Kalamaili Mountain Nature Reserve. *Acta Theriologica Sinica*, 30, 11–20. (in Chinese with English abstract) [李莹, 徐文轩, 杨维康, 乔建芳, 刘伟, 夏参军 (2010) 卡拉麦里山有蹄类自然保护区鹅喉羚生境适宜性评价. 兽类学报, 30, 11–20.]
- Lin J, Xu WX, Yang WK, Xia CJ, Liu W (2012) Habitat suitability assessment of *Equus hemionus hemionus* in Kalamaili Mountain Nature Reserve. *Biodiversity Science*, 20, 411–419. (in Chinese with English abstract) [林杰, 徐文轩, 杨维康, 夏参军, 刘伟 (2012) 卡拉麦里山有蹄类自然保护区蒙古野驴生境适宜性评价. 生物多样性, 20, 411–419.]
- Liu H, Jiang GS, Li H (2015) A comparative study on four survey methods used in ungulate population size estimation in winter in North China. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 3076–3086. (in Chinese with English abstract) [刘辉, 姜广顺, 李惠 (2015) 北方冬季有蹄类动物4种数量调查方法的比较. 生态学报, 35, 3076–3086.]
- Luo C, Xu WH, Zhou ZX, Ouyang ZY, Zhang L (2011) Habitat prediction for forest musk deer (*Moschus berezovskii*) in Qinling mountain range based on niche model. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 1221–1229. (in Chinese with English abstract) [罗翀, 徐卫华, 周志翔, 欧阳志云, 张路 (2011) 基于生态位模型的秦岭山系林麝生境预测. 生态学报, 31, 1221–1229.]
- Martín-López B, García-Llorente M, Palomo I, Montes C (2011) The conservation against development paradigm in protected areas: Valuation of ecosystem services in the Doñana social-ecological system (Southwestern Spain). *Ecological Economics*, 70, 1481–1491.
- Merrill EH, Hemker TP, Woodruff KP, Kuck L (1994) Impacts of mining facilities on fall migration of mule deer. *Wildlife Society Bulletin*, 22, 68–73.
- Mi CR, Guo YM, Falk H, Han XS (2017) Species distribution model sampling contributes to the identification of target species: Take Black-necked Crane and Hooded Crane as two cases the model-based sampling approach could help to reduce areas to be investigated and it can find target species more effectively re. cost and effort. *Acta Ecologica Sinica*, 37, 4476–4482. (in Chinese with English abstract) [宓春荣, 郭玉民, Huettmann Falk, 韩雪松 (2017) 基于物种分布模型的精确采样提高目标物种发现率——以黑颈鹤 (*Grus nigricollis*)、白头鹤 (*Grus monacha*) 为例. 生态学报, 37, 4476–4482.]
- Morrison ML, Marcot BG, Mannan RW (2007) Wildlife habitat relationships: Concepts and applications. *The Condor*, 109, 980–981.
- Peng XQ (2012) Effect of the East Junggar coal-electricity and coal-chemical industry development on *Equus hemionus* in Kalamaili Mountain. *Environmental Protection of Xinjiang*, 34(4), 37–41. (in Chinese with English abstract) [彭向前 (2012) 准东煤电煤化工产业开发对卡拉麦里山蒙古野驴的影响. 新疆环境保护, 34(4), 37–41.]
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231–259.
- Poole KG, Serrouya R, Teske IE, Podrasky K (2016) Rocky Mountain Bighorn sheep (*Ovis canadensis canadensis*) winter habitat selection and seasonal movements in an area of active coal mining. *Canadian Journal of Zoology*, 94, 733–745.
- Ran Q, Wei HY, Zhao ZF, Zhang QZ, Liu J, Gu W (2019) Impact of climate change on the potential distribution and habitat fragmentation of the relict plant *Cathaya argyrophylla* Chun et Kuang. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 2481–2493. (in Chinese with English abstract) [冉巧, 卫海燕, 赵泽芳, 张权中, 刘静, 顾蔚 (2019) 气候变化对孑遗植物银杉的潜在分布及生境破碎度的影响. 生态学报, 39, 2481–2493.]
- Sheng HL, Xu HF (1992) *Mammalian Field Research Methods*. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [盛和林, 徐宏发 (1992) 哺乳动物野外研究方法. 中国林业出版社, 北京.]
- Wang MY, Ji SN, Chen C, Xu WX, Han L, Yang WK (2020) Effects of road on diurnal group pattern and vigilance behavior in goitered gazelle. *Chinese Journal of Ecology*, 39, 937–943. (in Chinese with English abstract) [汪沐阳, 吉晟男, 陈晨, 徐文轩, 韩雷, 杨维康 (2020) 道路交通对鹅喉羚昼间集群特征和警戒行为的影响. 生态学杂志, 39, 937–943.]
- Wang Y, Chu HJ, Han LL, Tao YS, Bu L, Liu Z, Jiang ZG (2016) Factors affecting the home range of reintroduced *Equus przewalskii* in the Mt. Kalamaili Ungulate Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 545–553. (in Chinese with English abstract) [王渊, 初红军, 韩丽丽, 陶永善, 布兰, 刘钊, 蒋志刚 (2016) 野放普氏野马 (*Equus przewalskii*) 家域面积及其影响因素. 生态学报, 36, 545–553.]
- Weir JN, Mahoney SP, McLaren B, Ferguson SH (2007) Effects of mine development on woodland caribou *Rangifer tarandus* distribution. *Wildlife Biology*, 13, 66–74.
- Wu CG, Zhou ZX, Wang PC, Xiao WF, Teng MJ, Peng L (2009) Evaluation of landscape connectivity based on least-cost model. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 20, 2042–2048. (in Chinese with English abstract) [吴昌广, 周志翔, 王鹏程, 肖文发, 滕明君, 彭丽 (2009) 基于最小费用模型的景观连接度评价. 应用生态学报, 20, 2042–2048.]
- Wu JG (2001) *Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Hierarchy*. Higher Education Press, Beijing. (in Chinese) [邬建国 (2001) 景观生态学——格局、过程、尺度与等

张晨等: 重大工程影响下新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区鹅喉羚的生境格局变化

级. 高等教育出版社, 北京.]

Xia CJ, Xu WX, Yang WK, Qiao JF, Liu W (2011) Diurnal activity rhythm of goitred gazelle (*Gazella subgutturosa*) in different seasons. *Arid Zone Research*, 28, 548–554. (in Chinese with English abstract) [夏参军, 徐文轩, 杨维康, 乔建芳, 刘伟 (2011) 不同季节鹅喉羚昼间活动节律特征. *干旱区研究*, 28, 548–554.]

Xu WX, Yang WK, Zhang C, Wang MY (2016) Main plant communities and characteristics of Kalamaili Ungulate Nature Reserve in east Junggar Basin. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 502–507. (in Chinese with English abstract) [徐文轩, 杨维康, 张弛, 汪沐阳 (2016) 准噶尔盆地东部卡拉麦里山有蹄类自然保护区主要植物群落及其特征. *植物生态学报*, 40, 502–507.]

Yang WK, Qiao JF, Yao J, Gao XY (2005) Characteristics of foraging habitat of goitred gazelles (*Gazella subgutturosa sairensis*) in eastern Junggar Basin, Xinjiang. *Acta Theriologica Sinica*, 25, 355–360. (in Chinese with English abstract) [杨维康, 乔建芳, 姚军, 高行宜 (2005) 新疆准噶尔盆地东部鹅喉羚采食地的特征. *兽类学报*, 25, 355–360.]

Zhang T, Chen ZP, Che KJ, Hu TG, Cheng BR, He MZ (2017) Characteristics of soil seed banks of different site types in arid mining area. *Arid Zone Research*, 34, 51–58. (in Chinese with English abstract) [张涛, 陈智平, 车克钧, 胡天光, 程斌让, 何明珠 (2017) 干旱区矿区不同立地类型土壤种子库特征. *干旱区研究*, 34, 51–58.]

Zhang XC, Shao CL, Ge Y, Chen C, Xu WX, Yang WK (2020) Suitable summer habitat of the khulan in the Mt. Kalamaili Ungulate Nature Reserve and estimation of its population.

*Chinese Journal of Applied Ecology*, 31, 2993–3004. (in Chinese with English abstract) [张晓晨, 邵长亮, 葛炎, 陈晨, 徐文轩, 杨维康 (2020) 新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区夏季蒙古野驴适宜生境与种群数量评估. *应用生态学报*, 31, 2993–3004.]

Zhang YB, Liu YL, Qin H, Meng QX (2019) Prediction on spatial migration of suitable distribution of *Elaeagnus mollis* under climate change conditions in Shanxi Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 30, 496–502. (in Chinese with English abstract) [张殷波, 刘彦岚, 秦浩, 孟庆欣 (2019) 气候变化条件下山西翅果油树适宜分布区的空间迁移预测. *应用生态学报*, 30, 496–502.]

Zhang YJ, Zhang F, Cao Q, Hu DF, Chu HJ (2014) Status and quality of water sources in the Kalamari Ungulate Nature Reserve—A case study in the released area of *Equus przewalskii*. *Arid Zone Research*, 31, 665–671. (in Chinese with English abstract) [张永军, 张峰, 曹青, 胡德夫, 初红军 (2014) 卡拉麦里山有蹄类自然保护区水源现状及水质分析——以普氏野马放归区为例. *干旱区研究*, 31, 665–671.]

Zhao XF, Xu HL, Wang XY, Xu Q, Yuan KY, Yang YQ, Zhang P (2018) Effects of artificial measures on surface recovery of gold mining area in Altai Mountain. *Chinese Journal of Ecology*, 37, 1628–1635. (in Chinese with English abstract) [赵新风, 徐海量, 王希义, 徐俏, 苑塏焯, 杨永强, 张鹏 (2018) 人工措施对阿尔泰山采金矿区地表的恢复作用. *生态学杂志*, 37, 1628–1635.]

(责任编辑: 乔慧捷 责任编辑: 黄祥忠)

## 附录 Supplementary Material

### 附录1 MaxEnt模型使用的环境变量

Appendix 1 The environmental variables used in the MaxEnt model  
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021176-1.pdf>

### 附录2 景观格局指数及其生态学意义

Appendix 2 Landscape pattern index and ecological significance  
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021176-2.pdf>

附录1 MaxEnt模型使用的环境变量

Appendix 1 The environmental variables used in the MaxEnt model

编码 Code	环境因子 Environmental factor
<b>气候因子 Climatic factors</b>	
Bio 1	年均温 Annual mean temperature (°C)
Bio 2	月均温范围 Mean diurnal range (°C)
Bio 3	等温性 Isothermality (Bio2/Bio7)
Bio 4	温度季节性 Temperature seasonality
Bio 5	最暖月最高温 Max. temperature of warmest month (°C)
Bio 6	最冷月最低温 Min. temperature of coldest month (°C)
Bio 7	气温年范围 Temperature annual range (Bio5 – Bio6) (°C)
Bio 8	最湿季平均温 Mean temperature of wettest quarter (°C)
Bio 9	最干季平均温 Mean temperature of driest quarter (°C)
Bio 10	最暖季平均温 Mean temperature of warmest quarter (°C)
Bio 11	最冷季平均温 Mean temperature of coldest quarter (°C)
Bio 12	年降水量 Annual precipitation (mm)
Bio 13	最湿月降水量 Precipitation of wettest month (mm)
Bio 14	最干月降水量 Precipitation of driest month (mm)
Bio 15	降水季节性 Precipitation seasonality
Bio 16	最湿季降水量 Precipitation of wettest quarter (mm)
Bio 17	最干季降水量 Precipitation of driest quarter (mm)
Bio 18	最暖季降水量 Precipitation of warmest quarter (mm)
Bio 19	最冷季降水量 Precipitation of coldest quarter (mm)
<b>地形因子 Terrain factors</b>	
Alt	海拔 Altitude (m)
Asp	坡度 Aspect (°)
Slope	坡向 Slope
<b>人类干扰因子 Anthropogenic influence factors</b>	
Dis-min	距矿点距离 Distance to mining (m)
Dis-G216	距216国道距离 Distance to national road 216 (m)
Dis-expr	距S11高速公路距离 Distance to S11 expressway (m)
Dis-rail	距阿富准铁路距离 Distance to Altay-Zhundong railway (m)
<b>植被(类型)和水源 Vegetation type and water source</b>	
Dis-water	距水源点距离 Distance to water source (m)
Veg	植被类型 Vegetation type



张晨, 马伟, 陈晨, 汪沐阳, 徐文轩, 杨维康 (2022) 重大工程影响下新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区鹅喉羚的生境格局变化. 生物多样性, 30, 21176. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2021176>

## 附录2 景观格局指数及其生态学意义

### Appendix 2 Landscape pattern index and ecological significance

评价指标 Evaluation index	生态学意义 Ecological significance
斑块面积 Patch area (AREA)	景观组分的基本特征, 也是度量其他指标的重要基础。 The basic characteristics of landscape composition and is also an important basis for measuring other indicators.
斑块数量 Number of patches (NP)	表示每种类型斑块数目, 与景观的破碎化呈正相关关系, NP值越大, 破碎的程度就越高。 The number of patches per type, which is positively correlated with the fragmentation of the landscape, and the greater the NP value, the higher the degree of fragmentation.
斑块密度 Patch density (PD)	反映景观整体斑块分化程度, 值越高, 破碎化程度越高。 The degree of differentiation of patches in the landscape as a whole, and the higher the value, the higher the degree of fragmentation.
最大斑块指数 Largest patch index (LPI)	表示景观中最大斑块占景观总面积百分比。 The largest patch in the landscape as a percentage of the total landscape area.
相似临近比度 Proportion of like adjacencies (PLADJ)	度量斑块间的离散程度。 The degree of dispersion between patches.
景观形状指数 Landscape shape index (LSI)	其值越大, 斑块形状越不规则, 越复杂。 The greater the value of the LSI, the more irregular and complex the patch shape.
聚集度指数 Aggregation index (AI)	描述不同类型景观斑块的团聚程度, 值高说明景观主要由少数大型斑块组成, 反之由多个小型斑块组成。 Describing the degree of reunion of different types of landscape patches, the high value indicates that the landscape is mainly composed of a small number of large patches, and vice versa by several small patches.
斑块占总面积的比例 Percentage of landscape (PLAND)	是某一类型的面积与景观总面积的比值, 其大小代表该类型斑块在整个景观中的丰富度值。 The ratio of the area of a type to the total area of the landscape, and its size represents the richness of that type of patches throughout the landscape.



•研究报告•

# 甘肃白水江国家级自然保护区林缘社区饲养犬只对大熊猫时空节律的影响

滕继荣<sup>1</sup>, 刘兴明<sup>1</sup>, 何礼文<sup>1</sup>, 王钧亮<sup>1</sup>, 黄建<sup>2</sup>, 冯杰<sup>2</sup>, 王放<sup>ID3\*</sup>, 翁悦<sup>ID3\*</sup>

1. 甘肃白水江国家级自然保护区, 甘肃陇南 756400; 2. 山水自然保护中心, 北京 100871; 3. 复旦大学生命科学学院生物多样性与生态工程教育部重点实验室, 上海 200438

**摘要:** 人类对于野生动物的影响复杂多样, 其中家养动物所产生的干扰往往被忽视, 例如保护区林缘社区饲养的家犬。半散放的家犬(*Canis familiaris*)进入野生动物栖息地, 对保护区内以大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)为代表的野生动物可能产生重要影响。为明确家犬进入林区活动范围对大熊猫的影响, 本研究采用红外相机技术和GPS项圈无线追踪技术对甘肃白水江国家级自然保护区内家犬对大熊猫潜在栖息地范围和时间节律的影响进行研究, 利用MaxEnt模型对家犬活动范围及大熊猫潜在栖息地进行预测。结果表明: 甘肃白水江国家级自然保护区内大熊猫潜在栖息地面积为885.8 km<sup>2</sup>, 约占保护区总面积的48.2%; 家犬活动面积为861.2 km<sup>2</sup>, 约占保护区总面积的47.6%。家犬活动范围与大熊猫潜在栖息地重叠的面积约占保护区面积的28.2%, 且多集中在低海拔的常绿阔叶林。大熊猫在有家犬出现的位点和没有家犬出现的位点日活动节律具有显著差异。本研究揭示了家犬进入林区对大熊猫栖息地潜在影响的空间范围, 为保护区开展生物多样性管理提供了关键信息, 对于其他保护区具有借鉴意义。

**关键词:** 大熊猫; 家犬; 栖息地; 红外相机; MaxEnt模型

滕继荣, 刘兴明, 何礼文, 王钧亮, 黄建, 冯杰, 王放, 翁悦 (2022) 甘肃白水江国家级自然保护区林缘社区饲养犬只对大熊猫时空节律的影响. 生物多样性, 30, 21204. doi: 10.17520/biods.2021204.

Teng JR, Liu XM, He LW, Wang JL, Huang J, Feng J, Wang F, Weng Y (2022) The spatio-temporal impact of domestic dogs (*Canis familiaris*) on giant panda (*Ailuropoda melanoleuca*) in Baishuijiang National Nature Reserve. Biodiversity Science, 30, 21204. doi: 10.17520/biods.2021204.

## The spatio-temporal impact of domestic dogs (*Canis familiaris*) on giant panda (*Ailuropoda melanoleuca*) in Baishuijiang National Nature Reserve

Jirong Teng<sup>1</sup>, Xingming Liu<sup>1</sup>, Liwen He<sup>1</sup>, Junliang Wang<sup>1</sup>, Jian Huang<sup>2</sup>, Jie Feng<sup>2</sup>, Fang Wang<sup>ID3\*</sup>, Yue Weng<sup>ID3\*</sup>

1 Baishuijiang National Nature Reserve, Longnan, Gansu 756400

2 Shan Shui Conservation Center, Beijing 100871

3 Ministry of Education Key Laboratory for Biodiversity Science and Ecological Engineering, School of Life Sciences, Fudan University, Shanghai 200438

### ABSTRACT

**Aims:** Anthropogenic interferences have various forms such as domestic animals, in which many have significant negative impacts but are consistently ignored in conservation planning. Most domestic dogs in Baishuijiang live with humans but act as semi-feral dogs since they are allowed to enter forests, including nature reserve, during most of the year (except for planting periods). During these periods of freedom, their home range, activity pattern, and most importantly, interaction with wild animals, remains unknown. To fill this knowledge gap, we chose the giant panda to study the response of wildlife to free-ranging dogs due to the spatial overlap of domestic dogs and giant pandas in Baishuijiang National Nature Reserve. Our objective was to: (1) track the extent of dog movements in and around nature reserve, and (2) evaluate the percent area of nature reserve where giant panda may come in contact with domestic dogs.

收稿日期: 2021-05-20; 接受日期: 2021-09-30 基金

项目: 国家自然科学基金(31971537)

\* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: wfang@fudan.edu.cn; 19210700158@fudan.edu.cn

<https://www.biodiversity-science.net>

**Methods:** To understand the extent of the impact free-range domestic dogs have on giant pandas, we used infrared cameras and GPS collars to study the repercussions of domestic dogs entering nature reserve and affecting the wildlife. We also constructed a MaxEnt model to estimate the spatial overlap of domestic dogs and giant pandas in Baishuijiang National Nature Reserve.

**Results:** The suitable habitat for giant pandas in nature reserve is 885.8 km<sup>2</sup>, around 48.2% of the overall area, while the area of domestic dog distribution is 861.2 km<sup>2</sup>, or 47.6% of the nature reserve. The overlap between domestic dogs and giant panda habitat is 28.2% of the entire nature reserve. There are significant differences in activity rhythms of giant pandas between sites with and without dog detection.

**Conclusion:** These results indicate the extent to which the trespassing of domestic dogs has affected giant pandas. The negative impact of residential areas could result in a combination of human activities (e.g., poaching, farming, livestock grazing, automobile traffic), requiring distinctive solutions to eliminate. We suggest any major residents close to nature reserves should restrain dogs at residences. Taking account for the effects of dog's movements and habitat use in the nature reserve is essential for a comprehensive conservation framework.

**Key words:** giant panda; domestic dog; habitat; camera trap; MaxEnt model

随着人口的增长,许多家养动物被有意或无意地引入到各种生态系统中(Hughes & MacDonald, 2013)。家犬(*Canis familiaris*)是世界上最具破坏性的入侵物种之一(Rong et al, 2019),它是一种杂食性动物,从野生动物和腐肉到人类供给的食物都可以成为家犬的食物(Doherty et al, 2016)。一部分家犬和人类一起生活但是处于散放状态,由于有稳定的食物来源,家犬的竞争力增强,因此家犬对于野生动物的干扰会因此被进一步放大(Vanak & Gompper, 2009)。研究表明,家犬通过捕食、竞争等方式干扰当地野生动物,对当地的脊椎动物群落具有显著的负面影响(Young et al, 2011)。有研究表明在野生动物与家犬共存的地区,野生动物会避开家犬(Meek, 1999),例如巴西草原上的鬃狼(*Chrysocyon brachyurus*)会避开家犬所在的地区(Lacerda et al, 2009);智利南部的家犬会影响南美灰狐(*Lycalopex griseus*)对栖息地的选择(Silva-Rodríguez et al, 2010)。同时,家犬可能通过容易被忽视的方式影响野生动物,如狂犬病和犬瘟热病毒的传播(Gehrt et al, 2013)。典型的例子是2014年陕西省林业科学院秦岭大熊猫繁育研究中心(原陕西省珍稀野生动物抢救饲养研究中心)圈养的大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)突发犬瘟热死亡(冯娜, 2017)。虽然家犬在保护区周围很常见,但关于它们可能引起的保护问题的规模和范围的相关研究却很少,因此了解家犬对野生动物的影响范围和方式显得尤为重要(Parsons et al, 2016)。

大熊猫是全球物种保护的旗舰种,中国生物多样性保护的伞护种(魏辅文, 2016)。全国第四次大熊

猫调查证实了野生大熊猫种群的恢复,大熊猫在IUCN物种红色名录中的级别已经从濒危(EN)降为易危(VU) (He et al, 2019)。尽管目前的保护工作取得了巨大的成就,但中国大熊猫仍然面临长远的生存挑战,根本原因是人类不同形式的干扰(Liu et al, 2017)。目前MaxEnt模型多用来量化不同环境因子对物种栖息地的影响,其作为评价物种栖息地生境质量中最常用的模型被广泛运用于各种科学研究,从两栖类到大型兽类,从昆虫到植被,在多物种多尺度范围内都取得了较好的预测结果(Cao et al, 2013)。红外相机技术作为一种非侵入性采样技术,可以日夜连续监测,并且对所研究动物无损伤还能最大限度地减少对监测动物造成的压力(Tobler et al, 2008),还可以提供长期和不间断的样本数据,近年来在野生动物空间分布方面应用广泛(McShea et al, 2016),因此通过红外相机技术可以探测大熊猫的分布和栖息地选择,为大熊猫的保护工作提供科学支持。

人为干扰对大熊猫及其栖息地的影响是一个严重的问题,已引起广泛关注和研究(Jin et al, 2017)。这一问题的规模和紧迫性,可能会随着人口增长而更加严重(White & Ward, 2010)。目前对于人类干扰的研究,多集中于放牧、挖药、打猎等直接干扰,而家犬是由于人类社会经济活动而被带入保护区内,其作为人类活动影响大熊猫栖息地的潜在途径目前研究较少(张晋东, 2017),影响程度尚不明确(Kang, 2021)。本研究采用红外相机技术和GPS无线追踪技术对甘肃白水江国家级自然保护区(以下简称白水江保护区)大熊猫和家犬分布进行研究,

其主要目的为: (1)探究家犬在保护区及其周围的活动范围, 评估其活动范围在保护区的占比; (2)探究保护区内野生大熊猫栖息地分布; (3)计算家犬活动范围与大熊猫栖息地的重叠比例, 评估家犬对野生大熊猫产生影响的程度和区域, 以期为大熊猫的保护提供有效指导, 提高保护措施的有效性。

## 1 研究区域概况

白水江保护区(104°16′–105°25′ E, 32°36′–33°00′ N)位于甘肃省南部, 包括白马河保护站、丹堡河保护站、刘家坪保护站、让水河保护站、碧口保护站、红土河保护站和大熊猫驯养繁殖中心(Wang et al, 2021)。保护区总面积1,837.99 km<sup>2</sup>, 其中核心区面积901.58 km<sup>2</sup>, 缓冲区261.32 km<sup>2</sup>, 实验区675.09 km<sup>2</sup>。该地区年均气温15.6°C, 年均降水量932.5 mm, 无霜期约276天(Rong et al, 2019)。

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源与处理

#### 2.1.1 红外相机数据

大熊猫位点数据主要来自白水江保护区所安置的红外相机调查数据和全国第四次大熊猫调查数据。在白水江保护区2017–2020年所进行的红外相机调查中, 共布设有170个红外相机位点, 其中有64个位点具有大熊猫探测记录。对于红外相机安装位置选择, 本研究将保护区划分为2 km × 2 km的网格, 相机布设人员呈“几”或“V”型沿山脊或河道前进, 采用可变宽样带调查法进行调查, 选取合适区域安放相机。相机安放原则: 原则上1个网格内安装1台相机; 优先选择兽径、水源地、盐井位置; 安放高度结合实际情况进行调整; 避免相机前有大石块或流水, 避免正对大量随风而动的枝叶, 以免引起相机误触。红外相机设置为每次触发后连续拍摄3张照片和1段30 s的视频, 灵敏度设置为“中”, 开启时间戳, 每台相机配备1张16 G或32 G的存储卡和8节南孚5号电池, 不设置引诱剂, 不进行隐蔽, 安装完毕后记录相机编号和点位。

#### 2.1.2 GPS无线追踪项圈数据

本研究将GPS无线追踪技术用于家犬中, 主要选择自由散养的家犬, 使用穿戴式GPS项圈(环球信士HQAN40S野生动物跟踪器), 该项圈重220 g,

约占犬体重的0.5%, 符合动物遥测技术中跟踪器重量不超过体重3%–5%的经验值(D'Eon & Delparte, 2005)。自2020年1月至2021年1月对白水江保护区林缘社区家犬进行项圈佩戴, 选择自由放养并且有可能进入到保护区内部的家犬, 共佩戴18个GPS项圈: 白马河2个、丹堡河4个、刘家坪4个、让水河4个、碧口4个。项圈每1 h记录1次, 包含所在位置的经纬度、海拔、温度、航向、速度等信息(Frair et al, 2004)。通过项圈的太阳能板对项圈进行供电, 保证工作的连续性, 家犬所记录的GPS位点信息会返回至Tracker Client软件中, 家犬的出现位点数据主要源于给家犬所佩戴的GPS项圈, 数据回收后对其进行初步处理, 剔除信号较弱的位点。

### 2.2 数据分析

#### 2.2.1 大熊猫和家犬潜在栖息地和活动范围分析

使用MaxEnt模型(MaxEnt 3.3.3, <https://www.cs.princeton>)计算家犬进入林区的活动范围和大熊猫潜在的栖息地分布范围。对于家犬活动的GPS位点数据, 我们使用2 h的间隔进行数据稀释, 并排除家犬所在居民点的位置(Anderson & Gonzalez, 2011)。参考之前的研究, 我们选用海拔、坡度、距居民点的距离、距道路的距离、距河流的距离、植被类型作为模型的环境变量。其中海拔、居民点、道路、河流图层来自于白水江保护区管理局, 并利用ArcGIS 10.8版本中的‘near’工具计算出距离物种分布位点的欧几里得距离。所有的环境变量均转换成ASCII格式, 在MaxEnt模型中构建家犬和大熊猫分布模型, 在构建家犬分布模型后, 我们将家犬活动范围作为变量带入大熊猫栖息地模型的构建中。采用受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)及其曲线下面积(area under curve, AUC)对模型准确性进行检验(Elith et al, 2010)。用平均训练灵敏度和特异性阈值(equal training sensitivity and specificity threshold)将MaxEnt输出的连续分布概率重新分类为分布和未分布, 并在ArcGIS中利用‘overlap’工具将家犬和大熊猫的分布范围进行叠加, 计算家犬对大熊猫的影响范围和保护区占比。

#### 2.2.2 大熊猫和家犬的重叠日活动节律分析

根据红外相机拍摄的照片, 我们提取出大熊猫和家犬出现的时间。采用非参数核密度估计法



(non-parametric circular kernel-density method)计算家犬的出现是否会影响大熊猫的日活动节律。将数据分为两种类型, 有家犬探测的位点和没有家犬探测的位点。然后比较大熊猫在两种条件下的活动模式是否有显著差异。使用重叠指数( $\Delta$ ), 范围从0(无重叠)到1(完全重叠), 来衡量当家犬有被探测或没有被探测时大熊猫活动的相似性(Linkie & Ridout, 2011)。随机运行1,000次后得到重叠指数和零分布的标准误差, 该分析在R 3.5.3程序中的“overlap”包进行(Fiske & Chandler, 2011)。

### 3 结果

#### 3.1 大熊猫潜在栖息地分布结果

白水江自然保护区探测到大熊猫的位点如图1所示。根据MaxEnt模型验证结果(AUC = 0.939)可知, 模型拟合程度良好, 预测精度高。MaxEnt模型对大熊猫潜在栖息地分布范围的计算结果表明, 白水江保护区内大熊猫栖息地面积为885.8 km<sup>2</sup>, 约占保护区总面积的48.2%。大熊猫主要分布在保护区的核心区, 远离林缘居民区(图2)。参与模型运行的环境变量权重显示, 影响大熊猫分布的主要环境因子为海拔(贡献值 = 36.1%), 其次为距居民点距离(贡献值 = 26.8%), 家犬是否出现对大熊猫栖息地有一定潜在的影响(贡献值 = 12.1%), 坡度对大熊猫栖息地选择影响较小(贡献值 = 0.8%)。

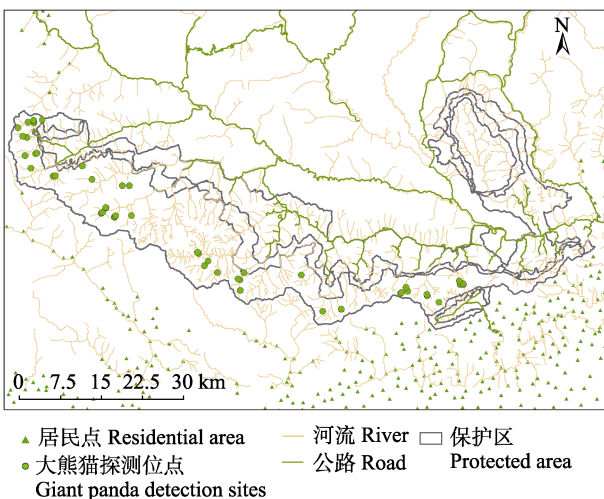


图1 甘肃白水江国家级自然保护区大熊猫探测位点分布图  
Fig. 1 Distribution of giant panda detection sites in Baishuijiang National Nature Reserve

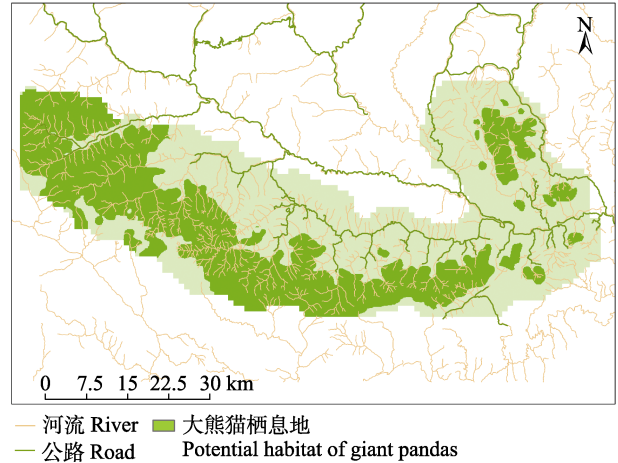


图2 基于红外相机位点数据计算出的白水江国家级自然保护区大熊猫栖息地范围

Fig. 2 The estimated habitat range of giant panda across Baishuijiang National Nature Reserve based on the camera stations

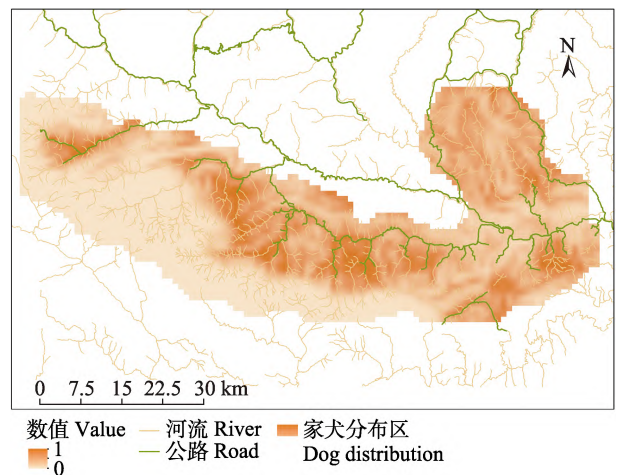


图3 基于18只家犬的GPS项圈数据计算的白水江国家级自然保护区的家犬活动范围

Fig. 3 The estimated distribution of dogs across Baishuijiang National Nature Reserve based on the tracking movements of 18 dogs

#### 3.2 家犬活动范围估计

MaxEnt模型的AUC值为0.874, 表明模型拟合程度良好, 结果准确度较高。模型输出结果表明白水江保护区内家犬的活动范围为861.2 km<sup>2</sup>, 约占保护区总面积的47.6%。活动范围主要集中在保护区外部, 距离道路和居民点较近的区域(图3)。影响家犬活动范围的主要因子为距离道路的距离(贡献值 = 56%), 其次为坡度(贡献值 = 20.3%), 森林类型对家犬活动范围的影响较小(贡献值 = 0.6%)。

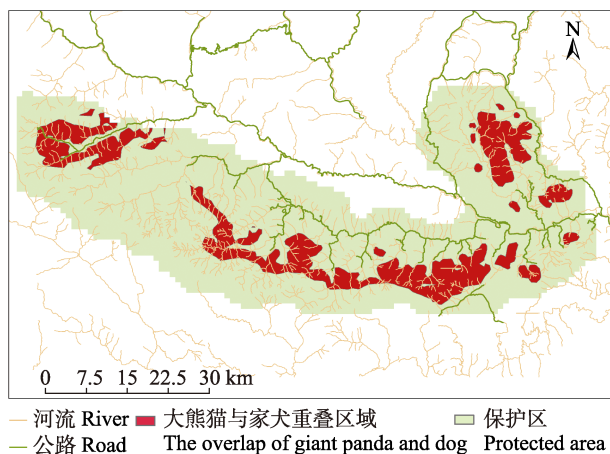


图4 白水江国家级自然保护区家犬活动范围与大熊猫栖息地重叠区域

Fig. 4 The overlap between dogs' home range and giant pandas' distributions in Baishuijiang National Nature Reserve

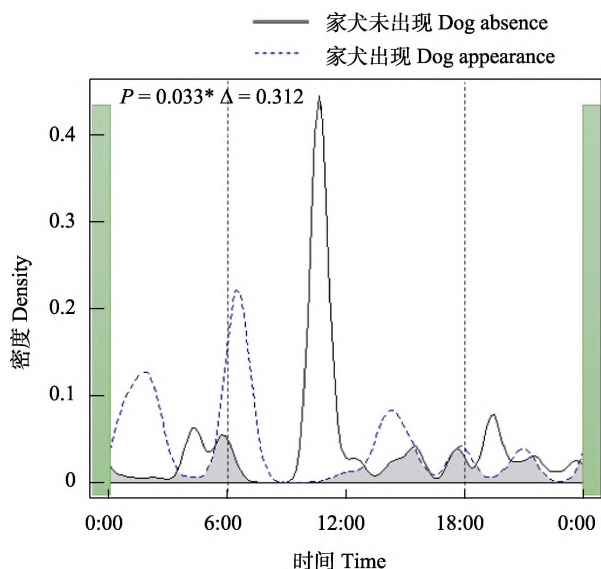


图5 大熊猫在无家犬探测点(黑色实线)和有家犬探测点(蓝色虚线)的日节律活动。 $P < 0.05$ 表明有显著性差异。

Fig. 5 Species' daily activity between sites which dog absence (black continuous curves) and dog appearance (blue curves). Significant relationships ( $P < 0.05$ ) are indicated by asterisks.

### 3.3 大熊猫和家犬活动范围的重叠

将大熊猫栖息地与家犬活动范围在ArcGIS中利用工具‘overlap’进行叠加, 结果表明(图4), 家犬活动范围与大熊猫潜在栖息地重叠部分位于保护区内部, 其重叠区域面积为517.8 km<sup>2</sup>, 约占大熊猫潜在栖息地面积的58.4%, 占保护区面积的28.2%。

### 3.4 家犬对大熊猫日活动节律的影响

在没有家犬活动的位点, 大熊猫的日活动主要

集中于10:00–12:00 (图5)。在有家犬活动的位点, 大熊猫的日活动主要集中于6:00–8:00, 其重叠指数( $\Delta$ )为0.312, 并且两者之间的 $P$ 值为0.033, 表明两种条件下大熊猫日活动节律有显著性差异。

## 4 讨论

本研究以白水江保护区家犬对大熊猫的干扰为研究目标, 探究家犬进林区活动对大熊猫栖息地的影响范围以及家犬对大熊猫日活动节律的影响。研究结果表明家犬在保护区的活动范围与大熊猫潜在栖息地重叠的面积约占保护区面积的28.2%, 模型预测的AUC值都超过0.87, 证明模型预测结果可信, 表明保护区周边社区散养的家犬对保护区内大熊猫从时间和空间上都存在潜在的威胁。

我们对大熊猫潜在栖息地的研究表明, 海拔和居民点是影响大熊猫栖息地的主要因素。保护区内道路建设可能会改变大熊猫栖息地的适宜性和格局(He et al, 2019), 还可能会造成环境污染(Zhao et al, 2019), 减少附近森林覆盖(Zhang et al, 2018), 限制道路周围竹子生长等(Zhao et al, 2019)。从大熊猫栖息地分布范围来看, 约占整个白水江保护区面积的48.2%。全国第四次大熊猫调查数据显示白水江保护区分布有大熊猫110只, 占甘肃省野生大熊猫总数的83.3%。大熊猫主要分布于保护区的中高海拔和距居民点较远的区域, 这也和之前的研究结果基本一致(龚明昊等, 2015)。在本研究中我们发现大熊猫分布对坡度、河流等环境因子不敏感, 我们的研究进一步揭示了影响大熊猫栖息地分布的环境因素, 考虑到多因素的影响对建立一个全面的保护框架至关重要。


人类活动对大熊猫栖息地的影响可能是由于耕作、放牧、交通、噪音或其他原因造成的, 家犬作为人类活动对于大熊猫栖息地干扰的一种复杂方式, 在过去的研究中常常被忽视。在计算大熊猫潜在栖息地分布时我们将家犬作为环境变量带入到模型中, 发现家犬在其中的贡献值为12.1%, 说明家犬对保护区内大熊猫栖息地也有一定的影响。本研究中的家犬主要是由保护区内林缘社区居民饲养, 尽管研究结果显示家犬活动区域主要围绕居民点和附近道路, 但二者活动重叠区域仍然占到大熊猫栖息地面积的58.4%, 比例超过一半。大量研究




发现, 即使家犬的密度很低, 也会对野生动物的空间分布造成影响, 在家犬与野生动物共存的区域, 野生动物可能趋向于回避家犬的活动范围(Elith et al, 2010)。之前的研究也证实大熊猫倾向于回避使用家养动物干扰过的栖息地(魏辅文, 2016)。在本研究中, 影响大熊猫栖息地的主要因素为海拔, 其次是距道路的距离。由于人类对于家犬的饲养作用, 导致有源源不断的食物供给, 因此很可能死亡率较低, 家犬数量可能会持续增加, 导致家犬对于大熊猫的影响作用可能被进一步放大。之前的研究表明同域野生哺乳动物可能采取不同的策略来应对家犬, 除了改变其他物种对栖息地的利用, 野生动物还可能改变日常活动, 以维持它们的活动范围(Silva-Rodríguez et al, 2010)。在本研究中大熊猫在探测到家犬的位点和没有探测到家犬的位点日活动节律具有显著差异, 这种差异可能是由于家犬在保护区内的出现对大熊猫产生了负面影响, 而动物活动节律的形成是动物对环境和各种因素变化的综合适应, 也受到各种内外因素的影响。

了解物种之间的相互作用及其影响范围, 有助于解释生物多样性的维持, 帮助管理者做出合理的保护决策(Kennedy et al, 2018)。我们的研究表明, 白水江保护区内家犬进林活动范围和大熊猫栖息地有显著的重叠, 但保护区内部重叠面积较少。从整体和长远物种保护的角度来看, 白水江保护区内常住人口数量庞大, 饲养家犬数量较多, 因此家犬对于保护区内以大熊猫为代表的野生动物及栖息地的影响不容忽视。有研究表明, 制定家犬管理规则有助于控制家犬的行为, 并能降低家犬对于野生动物的影响(Paschoal et al, 2016)。最显著的解决方案是尝试将家犬从该保护区内移走, 但由于社区经济文化等原因很难实行。然而, 有研究表明, 增加拴绳率的管理可以明显减少家犬干扰对野生动物健康的间接影响(Weston et al, 2014)。因此, 本研究建议: (1)这些自然保护区建立更全面、更有效的犬类管理制度。(2)对靠近大熊猫栖息地的家养犬只拴养并持续开展犬只的免疫, 严格管理家养犬的品种、控制数量增长等。(3)通过全面开展环境教育活动, 提高人们对饲养、免疫和绝育犬只的责任感。

## ORCID

王放  <https://orcid.org/0000-0002-3922-5851>

翁悦  <https://orcid.org/0000-0002-1926-700X>

## 参考文献

- Anderson RP, Gonzalez IJ (2011) Species-specific tuning increases robustness to sampling bias in models of species distributions: An implementation with Maxent. *Ecological Modelling*, 222, 2796–2811.
- Cao Y, DeWalt RE, Robinson JL, Tweddale T, Hinz L, Pessino M (2013) Using Maxent to model the historic distributions of stonefly species in Illinois streams: The effects of regularization and threshold selections. *Ecological Modelling*, 259, 30–39.
- D'Eon RG, Delparte D (2005) Effects of radio-collar position and orientation on GPS radio-collar performance, and the implications of PDOP in data screening. *Journal of Applied Ecology*, 42, 383–388.
- Doherty TS, Glen AS, Nimmo DG, Ritchie EG, Dickman CR (2016) Invasive predators and global biodiversity loss. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 113, 11261–11265.
- Elith J, Graham CH, Anderson RP, Dudík M, Ferrier S, Guisan A, Hijmans RJ, Huettmann F, Leathwick JR, Lehmann A (2010) Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29, 129–151.
- Feng N (2017) Epidemiological Investigation and Experimental Immune Study on Canine Distemper in Giant Panda. PhD dissertation, Jilin Agricultural University, Changchun. (in Chinese with English abstract) [冯娜 (2017) 大熊猫犬瘟热流行病学调查与实验免疫研究. 博士学位论文, 吉林农业大学, 长春.]
- Fiske I, Chandler R (2011) Unmarked: An R package for fitting hierarchical models of wildlife occurrence and abundance. *Journal of Statistical Software*, 43, 1–23.
- Frair JL, Nielsen SE, Merrill EH, Lele SR, Boyce MS, Munro RHM, Stenhouse GB, Beyer HL (2004) Removing GPS collar bias in habitat selection studies. *Journal of Applied Ecology*, 41, 201–212.
- Gehrt SD, Wilson EC, Brown JL, Anchor C (2013) Population ecology of free-roaming cats and interference competition by coyotes in urban parks. *PLoS ONE*, 8, e75718.
- Gong MH, Ouyang ZY, Xu WH, Song YL, Dai B (2015) The location of wildlife corridors under the impact of road disturbance: Case study of a giant panda conservation corridor. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 3447–3453. (in Chinese with English abstract) [龚明昊, 欧阳志云, 徐卫华, 宋延龄, 戴波 (2015) 道路影响下野生动物廊道的选址——以大熊猫保护廊道为例. *生态学报*, 35, 3447–3453.]
- He K, Dai Q, Gu XH, Zhang ZJ, Zhou J, Qi DW, Gu XD, Yang XY, Zhang W, Yang B, Yang ZS (2019) Effects of roads on giant panda distribution: A mountain range scale evaluation. *Scientific Reports*, 9, 1110.
- Hughes J, MacDonald DW (2013) A review of the interactions

- between free-roaming domestic dogs and wildlife. *Biological Conservation*, 157, 341–351.
- Jin YP, Zhang XK, Ma YS, Qiao YC, Liu XB, Zhao KH, Zhang CL, Lin DG, Fu XL, Xu XR, Wang YW, Wang HN (2017) Canine distemper viral infection threatens the giant panda population in China. *Oncotarget*, 8, 113910–113919.
- Kang DW (2021) A review of the impacts of four identified major human disturbances on the habitat and habitat use of wild giant pandas from 2015 to 2020. *Science of the total Environment*, 763, 142975.
- Kennedy B, Brown W, Vernes K, Körtner G, Butler J (2018) Dog and cat interactions in a remote aboriginal community. *Animals*, 8, 65.
- Lacerda ACR, Tomas WM, Marinho-Filho J (2009) Domestic dogs as an edge effect in the Brasília National Park, Brazil: Interactions with native mammals. *Animal Conservation*, 12, 477–487.
- Linkie M, Ridout MS (2011) Assessing tiger-prey interactions in Sumatran rainforests. *Journal of Zoology*, 284, 224–229.
- Liu XH, Wu PF, Shao XM, Songer M, Cai Q, Zhu Y, He XB (2017) Spatiotemporally monitoring forest landscape for giant panda habitat through a high learning-sensitive neural network in Guanyinshan Nature Reserve in the Qinling Mountains, China. *Environmental Earth Sciences*, 76, 1–12.
- McShea WJ, Forrester T, Costello R, He ZH, Kays R (2016) Volunteer-run cameras as distributed sensors for macro-system mammal research. *Landscape Ecology*, 31, 55–66.
- Meek PD (1999) The movement, roaming behaviour and home range of free-roaming domestic dogs, *Canis lupus familiaris*, in coastal New South Wales. *Wildlife Research*, 26, 847–855.
- Parsons AW, Bland C, Forrester T, Baker-Whatton MC, Schuttler SG, McShea WJ, Costello R, Kays R (2016) The ecological impact of humans and dogs on wildlife in protected areas in eastern North America. *Biological Conservation*, 203, 75–88.
- Paschoal AMO, Massara RL, Bailey LL, Kendall WL, Doherty PF Jr, Hirsch A, Chiarello AG, Paglia AP (2016) Use of Atlantic Forest protected areas by free-ranging dogs: Estimating abundance and persistence of use. *Ecosphere*, 7, 1–15.
- Rong ZL, Liu XM, Zhao CY, He LW, Liu JJ, Gao YF, Zang F, Xu HJ, Guo ZX, Mao YH (2019) Evaluating giant panda as a surrogate species for conservation co-occurring species in the Baishuijiang National Nature Reserve. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 8939–8948.
- Silva-Rodríguez EA, Ortega-Solís GR, Jiménez JE (2010) Conservation and ecological implications of the use of space by Chilla foxes and free-ranging dogs in a human-dominated landscape in southern Chile. *Austral Ecology*, 35, 765–777.
- Tobler MW, Carrillo-Percastegui SE, Leite Pitman R, Mares R, Powell G (2008) An evaluation of camera traps for inventorying large- and medium-sized terrestrial rainforest mammals. *Animal Conservation*, 11, 169–178.
- Vanak AT, Gompper ME (2009) Dogs (*Canis familiaris*) as carnivores: Their role and function in intraguild competition. *Mammal Review*, 39, 265–283.
- Wang H, Liu XM, Zhao CY, Chang YP, Liu YY, Zang F (2021) Spatial-temporal pattern analysis of landscape ecological risk assessment based on land use/land cover change in Baishuijiang National Nature Reserve in Gansu Province, China. *Ecological Indicators*, 124, 107454.
- Wei FW (2016) Research progress in conservation biology of endangered mammals in China. *Acta Theriologica Sinica*, 36, 255–269. (in Chinese with English abstract) [魏辅文 (2016) 我国濒危哺乳动物保护生物学研究进展. *兽类学报*, 36, 255–269.]
- Weston MA, Fitzsimons JA, Wescott G, Miller KK, Ekanayake KB, Schneider T (2014) Bark in the park: A review of domestic dogs in parks. *Environmental Management*, 54, 373–382.
- White PCL, Ward AI (2010) Interdisciplinary approaches for the management of existing and emerging human-wildlife conflicts. *Wildlife Research*, 37, 623–629.
- Young JK, Olson KA, Reading RP, Amgalanbaatar S, Berger J (2011) Is wildlife going to the dogs? Impacts of feral and free-roaming dogs on wildlife populations. *BioScience*, 61, 125–132.
- Zhang JD (2017) The research progress of the effects of human and natural disturbance on giant panda (*Ailuropoda melanoleuca*). *Journal of China West Normal University (Natural Sciences)*, 38, 227–233. (in Chinese with English abstract) [张晋东 (2017) 人类与自然干扰对大熊猫影响的研究进展. *西华师范大学学报(自然科学版)*, 38, 227–233.]
- Zhang JJ, Jiang F, Li GY, Qin W, Li SQ, Gao HM, Cai ZY, Lin GH, Zhang TZ (2019) Maxent modeling for predicting the spatial distribution of three raptors in the Sanjiangyuan National Park, China. *Ecology and Evolution*, 9, 6643–6654.
- Zhang YK, Wu YJ, Zhang QY, Ran JH, Price M (2018) Distribution of a giant panda population influenced by land cover. *The Journal of Wildlife Management*, 82, 1199–1209.
- Zhao Y, Chen YP, Ellison AM, Liu WG, Chen D (2019) Establish an environmentally sustainable giant panda national park in the Qinling Mountains. *Science of the total Environment*, 668, 979–987.

(责任编辑: 乔慧捷 责任编辑: 闫文杰)





•研究报告•

# 甘肃盐池湾黑颈鹤筑巢栖息地偏好及人为干扰的影响

王博驰<sup>1</sup>, 裴雯<sup>2</sup>, 杨巨才<sup>2</sup>, 色拥军<sup>2</sup>, 李雪竹<sup>1\*</sup>, 娜尔力玛<sup>3</sup>, 杨海蓉<sup>2</sup>

1. 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083; 2. 甘肃盐池湾国家级自然保护区管护中心, 甘肃酒泉 736300; 3. 甘肃省酒泉市肃北蒙古族自治县畜牧兽医技术服务中心, 甘肃酒泉 736300

**摘要:** 作为高原旗舰物种, 黑颈鹤(*Grus nigricollis*)是反映高原生态健康状况的重要参考。为了解黑颈鹤如何在多因素作用下适应人类改造过的栖息地环境, 本研究利用遥感解译、最近邻分析与随机森林模型对繁殖于甘肃盐池湾国家级自然保护区党河湿地的黑颈鹤的筑巢栖息地偏好及人为干扰进行研究。2019年和2020年每年的4–9月在党河湿地内对巢位点等数据进行收集。研究表明: 党河湿地内巢址与人为干扰的分布位置明显不同, 两者的主要分布区呈现镶嵌状。距深水沼泽距离、距浅水沼泽距离与距湖泊距离是影响黑颈鹤筑巢栖息地选择最关键的3个环境因子。黑颈鹤筑巢时偏好在距离深水沼泽< 125 m、距离浅水沼泽< 130 m、距离湖泊< 270 m的区域内筑巢。黑颈鹤对沼泽、湖泊等资源的偏好是其巢址分布格局的主要驱动力, 而房屋与公路等人为干扰对栖息地选择的影响很小。黑颈鹤筑巢时强烈偏好的栖息地在湿地内占比低、分布聚集且适宜范围有限, 繁殖区域较狭窄。黑颈鹤巢址间距离的上升表明黑颈鹤栖息地质量可能有所下降, 牲畜数量的增长、冬季牧场的全季节利用以及气候变化可能是主要原因。建议在党河湿地内不新增房屋及公路等人为干扰, 同时继续适当限牧, 并给予牧民充足的经济补偿。

**关键词:** 黑颈鹤; 盐池湾; 筑巢栖息地; 人为干扰; 随机森林模型

王博驰, 裴雯, 杨巨才, 色拥军, 李雪竹, 娜尔力玛, 杨海蓉 (2022) 甘肃盐池湾黑颈鹤筑巢栖息地偏好及人为干扰的影响. 生物多样性, 30, 21241. doi: 10.17520/biods.2021241.

Wang BC, Pei W, Yang JC, Se YJ, Li XZ, Naerlima, Yang HR (2022) Nesting habitat preference of the black-necked crane and influence of anthropogenic disturbance in Yanchiwan, Gansu. Biodiversity Science, 30, 21241. doi: 10.17520/biods.2021241.

## Nesting habitat preference of the black-necked crane and influence of anthropogenic disturbance in Yanchiwan, Gansu

Bochi Wang<sup>1</sup>, Wen Pei<sup>2</sup>, Jucai Yang<sup>2</sup>, Yongjun Se<sup>2</sup>, Xuezhu Li<sup>1\*</sup>, Naerlima<sup>3</sup>, Hairong Yang<sup>2</sup>

1 School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083

2 Management and Conservation Center of Yanchiwan National Nature Reserve, Jiuquan, Gansu 736300

3 Animal Husbandry and Veterinary Technical Service Center of Subei Mongolian Autonomous County, Jiuquan, Gansu 736300

### ABSTRACT

**Aims:** The black-necked crane (*Grus nigricollis*) is a flagship species of plateau and an important indicator of the health status of the plateau ecosystem. In recent years, plenty of research on black-necked cranes has been implemented, but these studies mainly focus on the migration, nest site selection, and foraging habitat selection of black-necked cranes. We know little about the preference of nesting habitat of black-necked cranes and the selection mechanism of nesting habitat. Black-necked cranes are divine birds in Tibetan Buddhism, and the species has always lived in harmony with the believers of Tibetan Buddhism. However, with the progression of human lifestyle, the problem of anthropogenic disturbance has become more prominent. Our research aims to provide a reference for understanding how black-necked cranes adapt to human modified habitats between multiple factors.

收稿日期: 2021-06-18; 接受日期: 2021-09-26

基金项目: 2019年中央财政林业改革发展资金珍稀濒危野生动植物保护补助项目

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: liyueyizhijhua@126.com

**Methods:** Nest sites and number of black-necked cranes were collected in Danghe Wetland from April to September in 2019 and 2020. Satellite interpretation was utilized to classify the habitats of the black-necked cranes. To study the distribution pattern of the nests and anthropogenic disturbance, we used nearest neighbor analysis and kernel density estimation. A random forest model was applied to explore nesting habitat selection mechanism of the black-necked cranes.

**Results:** There are two concentrated breeding grounds of black-necked crane nests in the Danghe Wetland and the nests are extremely concentrated. The two breeding grounds are located in the marsh in the north and south of the Danghe River. The houses of herders in the wetland are distributed in a strip on the gobi at the southern edge of the wetland. The density distribution of house is more concentrated on the south bank of the Danghe River, and the roads are also distributed along the south bank of the Danghe River. There is obvious geographical separation between the black-necked crane nests and anthropogenic disturbances. Meadows are the most prominent landscape type of wetland ecosystems and the sum of the proportions of marsh meadow and salinized meadow exceeds 50%. The proportion of shallow water marsh is relatively small, not exceeding 10% in two years. Deep water marsh and lake have smaller areas, below 3% and 2% respectively (average of two years). The distance from deep water marsh, shallow water marsh, and lake are the three critical environmental variables affecting the nesting habitat selection of the black-necked cranes, while the distance from houses and roads are less critical. The black-necked cranes prefer to nest in areas < 125 m from deep water marsh, < 130 m from shallow water marsh, and < 270 m from lake.

**Conclusion:** The deep water marsh, which the black-necked cranes strongly prefer when nesting in Danghe Wetland, is characterized by a relatively low percentage and clustered distribution. Meanwhile, the range of suitable habitat for the black-necked cranes to nest is narrow (< 125 m from deep water marsh, < 130 m from shallow water marsh, < 270 m from lake). Therefore, the breeding distribution of black-necked cranes is narrow. Resource factors are the main driving force for the distribution pattern of the black-necked crane nests. However, anthropogenic disturbance has little impact on nesting habitat selection. Therefore, the geographical separation between the black-necked crane nests distribution and anthropogenic disturbance is largely due to the preference for resources rather than avoiding disturbance. The habitat quality of the black-necked cranes in Danghe Wetland may decline, and the increase of livestock, multi-season utilization of pasture, and climate change may be the main reasons.

**Key words:** black-necked cranes; Yanchiwan; nesting habitat; anthropogenic disturbance; random forest model

黑颈鹤(*Grus nigricollis*)是一种仅生活在高原上的大型涉禽,为国家I级重点保护野生动物,被IUCN列为近危(NT)。在中国,黑颈鹤主要繁殖于青藏高原,越冬于云贵高原、雅鲁藏布江河谷等地。本文的研究对象,甘肃盐池湾国家级自然保护区(以下简称盐池湾)的黑颈鹤主要繁殖于盐池湾内的党河湿地。党河湿地是当地牧民主要的冬季牧场,但近些年部分牧民开始在春季和夏季也使用党河湿地进行放牧。而以往的研究表明党河湿地内黑颈鹤繁殖季的放牧活动给黑颈鹤的繁殖造成了严重干扰(Zhang et al, 2017)。在藏传佛教中,黑颈鹤被视为吉祥神圣的象征,长久以来与当地居民和谐相处(王博驰等, 2021)。但持续增长的家畜数量与牧民越来越倾向于定居的生活方式可能已经成为黑颈鹤生存的新威胁(Farrington & Zhang, 2013)。党河湿地自2019年起开始实施限牧,为期三年。但湿地内的公路、牧民房屋等人为干扰仍可能影响繁殖中的黑颈鹤,随着高原居民生存模式的改变,人为干扰问题可能会日渐突出。

了解鹤类的筑巢栖息地以及它们如何选择筑巢栖息地对于保护这些物种至关重要(Jiao et al, 2014)。以往关于黑颈鹤巢址的研究更多地关注微生境下黑颈鹤的巢址选择及巢特征等问题,而景观尺度下黑颈鹤筑巢时对不同栖息地的不均匀利用研究相对较少,或仅以描述性的方式对巢址所在栖息地类型进行说明(王有辉等, 1989; Wu et al, 2009; 邝粉良等, 2010)。本研究以遥感解译结合随机森林模型(random forest model)的方式呈现出多因素共同作用下黑颈鹤筑巢栖息地选择偏好,同时对黑颈鹤的栖息地可能存在的问题进行分析,以为管理者提供科学的保护意见,同时也为了解黑颈鹤如何适应人类改造下的栖息地提供参考依据。

## 1 研究区域概况

盐池湾位于(95°21'–97°10' E, 38°26'–39°52' N)甘肃省酒泉市肃北蒙古族自治县,地处青藏高原北缘。属典型高寒大陆性气候,夏季凉爽少雨,冬季干燥寒冷。盐池湾包罗了冰川冻土、高原荒漠、高

山草原、河流湿地等自然景观, 其中党河湿地是盐池湾内面积最大的湿地。沼泽化草甸与盐化草甸构成了党河湿地的主要景观类型, 沼泽化草甸中主要分布有华扁穗草(*Blysmus sinocompressus*)和黑褐穗薹草(*Carex atrofusca*), 盐化草甸则以西藏早熟禾(*Poa tibetica*)与赖草(*Leymus secalinus*)为主。党河湿地是盐池湾黑颈鹤的主要繁殖场所, 与此同时, 赤麻鸭(*Tadorna ferruginea*)、斑头雁(*Anser indicus*)、红脚鹬(*Tringa totanus*)等鸟类也繁殖于此。

## 2 材料与方法

### 2.1 黑颈鹤巢址位点数据采集、牧场分布调查及黑颈鹤种群数量统计

巢址位点采集与牧场分布调查: 2019年和2020年每年的4–6月在党河湿地开展黑颈鹤巢址的调查工作。乘车沿公路寻找黑颈鹤, 发现黑颈鹤繁殖对后, 使用单筒望远镜观察, 并用GPS定位鸟巢位置。同年7月和8月对当地季节性牧场的分布状况进行实地调查, 后又通过线上采访的方式对牧场分布地进一步确认。

黑颈鹤种群数量统计: 2018–2021年每年的7–9月采用望远镜观察并直接计数的方法对党河湿地内的黑颈鹤成鸟、幼鸟以及亚成体的数量进行至少2次数量普查, 当年数量以所记录数量最多的1次为准, 并计算增补率(本文定义的增补率指新增幼鸟的个数与成体及亚成体数量之和的比值)用以评估牧场多季节利用对黑颈鹤幼鸟数量的影响。

### 2.2 遥感解译划分土地类型

根据云量、湿地冰雪覆盖情况、植被生长情况以及黑颈鹤在党河湿地的繁殖时间, 分别选取2019年5月12日和2020年5月16日的卫星图, 在ENVI 5.3中进行解译, 并通过实地考察进行验证。参考刘迺发等(2010)的研究与实地调查, 将土地类型划分为10类, 即浅水沼泽、深水沼泽、河流、湖泊、沼泽化草甸、盐化草甸、戈壁、山脉、公路、房屋。其中浅水沼泽、深水沼泽、河流、湖泊、沼泽化草甸、盐化草甸为黑颈鹤筑巢时可能会利用的栖息地。房屋所占面积过小, 因此并未对其进行解译, 而以点要素代替。

### 2.3 应用最近邻与核密度估计分析鸟巢、人为干扰与栖息地的分布模式

应用最近邻分析(nearest neighbor analysis)对分

布于党河湿地内的牧民房屋、黑颈鹤巢址以及栖息地的聚集状态进行分析。最近邻分析的返回值主要有3个, 即NN比率、Z得分以及P值。定义 $P < 0.01$ 、 $NN$ 比率  $< 1$ 且 $|Z| \geq 2.58$ 时为极显著聚集分布;  $P < 0.01$ 、 $NN$ 比率  $> 1$ 且 $|Z| \geq 2.58$ 时为极显著离散分布。使用核密度估计(kernel density estimation)对鸟巢以及牧民房屋的数量分布进行评估, 热力图中颜色越冷的区域密度越低, 而颜色越暖的区域密度越高。核密度估计以及最近邻分析在ArcMap 10.8中进行。

### 2.4 筑巢栖息地选择

在所有黑颈鹤巢址位点的外围建立最小凸多边形, 将该最小凸多边形设为繁殖区。为将全部的房屋包含在内, 在上述最小凸多边形的外围建立起6 km宽的缓冲区, 将该缓冲区包围的区域设为研究区。在研究区内产生与该年份巢位点数相同的随机点, 分别计算巢位点与随机点距10种土地类型间的最小距离。将此最小距离与海拔、坡度、坡向一同定义为影响黑颈鹤筑巢的环境因子。对各环境因子进行Pearson简单相关分析, 而后使用随机森林模型对各因子进行排序。将巢址距离深水沼泽、浅水沼泽、湖泊、沼泽化草甸等资源的距离定义为资源因素, 距公路、房屋的距离定义为干扰因素, 海拔、坡度和坡向定义为地形因素。随机森林重要性排序、相关性分析在R 3.6.2中完成。距土地类型的最小距离及地形因素的提取在ArcMap 10.8中完成。

## 3 结果

### 3.1 黑颈鹤巢址分布及影响因素

黑颈鹤在党河湿地内有两处较集中的繁殖地, 鸟巢极显著聚集(表1), 两处繁殖地分别位于党河北部与南部的沼泽地带, 沼泽沿山体边缘分布, 且也呈现出聚集分布的特点。浅水沼泽分布于深水沼泽周围, 而山脉和沼泽化草甸包围着浅水沼泽, 山脉-浅水沼泽-深水沼泽-沼泽化草甸所构成的生态体系是黑颈鹤的重要繁殖生境(图1C)。湿地内的牧民房屋以带状分布在湿地南侧边缘的戈壁上, 数量较集中于党河南岸, 公路也沿党河湿地南岸分布(图1B)。党河湿地内黑颈鹤巢址与人为干扰的分布位置明显不同, 且两者分布区域呈镶嵌状(图1A, B)。环境因子相关性分析的结果显示, 距深水沼泽距离



表1 党河湿地内栖息地、房屋及黑颈鹤巢址的最近邻分析结果

Table 1 The result of nearest neighbor analysis of habitats, houses and nests of black-necked cranes in Danghe Wetland

空间要素 Spatial elements	NN比率 NN ratio	P	Z得分 Z score
2019			
深水沼泽 Deep water marsh	0.323	0.000	-104.427
浅水沼泽 Shallow water marsh	0.433	0.000	-210.412
湖泊 Lake	0.324	0.000	-175.593
2020			
深水沼泽 Deep water marsh	0.339	0.000	-98.065
浅水沼泽 Shallow water marsh	0.449	0.000	-214.506
湖泊 Lake	0.314	0.000	-142.180
两年的巢址 Nest of two years	0.550	0.000	-6.664
牧民房屋 House of herder	0.785	0.000	-3.399

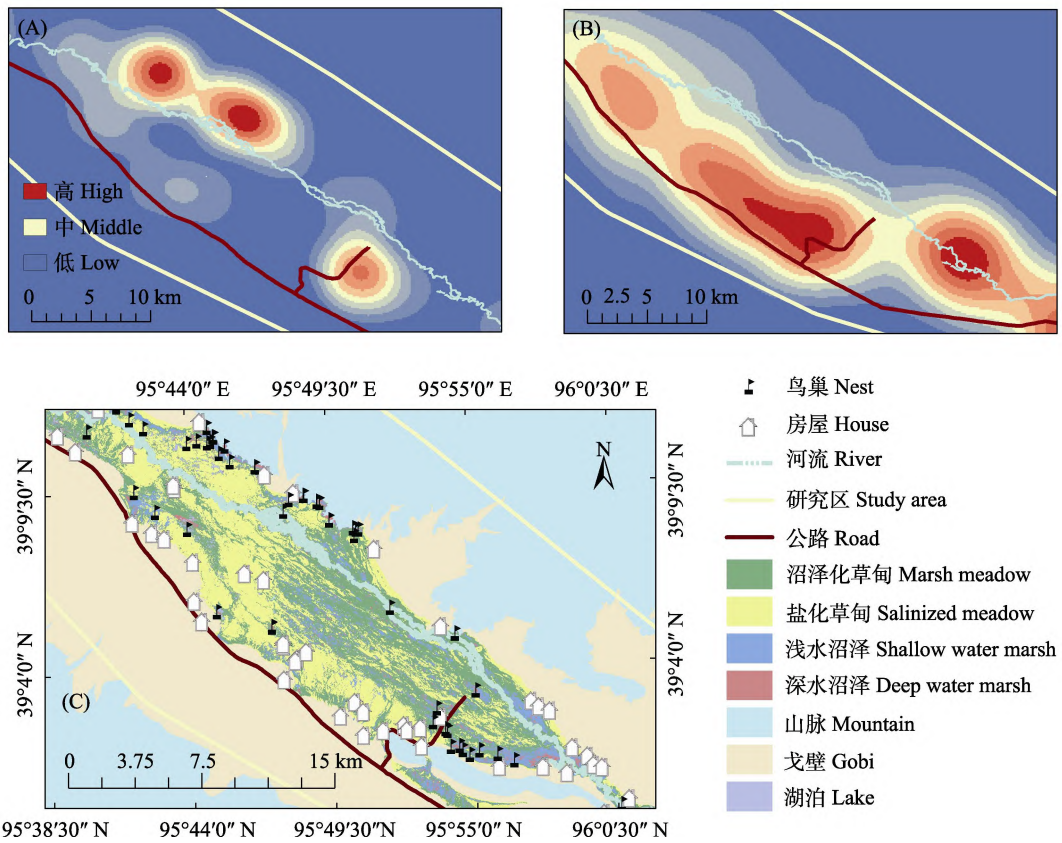


图1 党河湿地内黑颈鹤巢址(A)、牧民房屋(B)以及鸟巢、公路及房屋分布(C)

Fig. 1 The nests of black-necked cranes (A), houses of herders (B) and nests, roads and houses (C) in Danghe Wetland

与距浅水沼泽距离间有较强相关性,但考虑到两者的生态学意义,均予以保留(附录1)。栖息地选择模型显示,距深水沼泽距离、距浅水沼泽距离、距湖泊距离是影响黑颈鹤筑巢栖息地选择的最关键的3个环境因子,而距房屋距离与距公路距离的排序均在较后,且与前三位在数值上相差较大(附录2)。

### 3.2 筑巢栖息地偏好及筑巢生境分析

随机森林响应曲线显示,黑颈鹤倾向于在距离深水沼泽< 125 m、距离浅水沼泽< 130 m且距离湖泊< 270 m的区域内筑巢(图2)。卫星解译结果显示,湿地内沼泽化草甸与盐化草甸面积占比最大,两种草甸占比之和超过50%,是湿地内主要的景观类



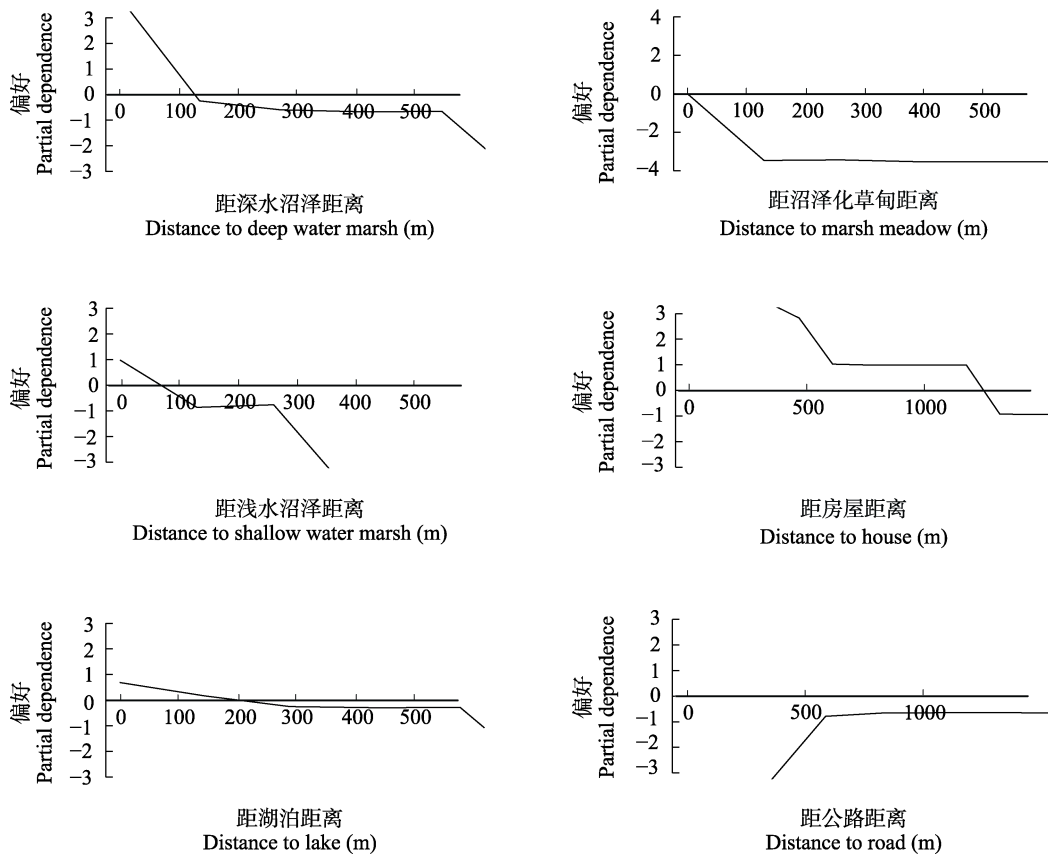


图2 黑颈鹤筑巢栖息地环境因子响应曲线

Fig. 2 Environmental variables response curves for the selection of the nesting habitat of the black-necked cranes

型。浅水沼泽占比相对较小, 两年解译均小于10%, 深水沼泽和湖泊占比最小, 分别在3%与2%以下(两年解译均值), 表明黑颈鹤偏好的3种筑巢栖息地在景观中的占比均较小(附录3)。

### 3.3 牧场分布及幼鸟数量调查

盐池湾的牧民有较明确的季节性牧场。春季牧场(如牙马图、南宁郭勒等)主要分布于党河上游平缓的山谷地带。夏季牧场主要集中在大水河西岸(如巴音泽尔肯乌勒、野牛沟等)以及党河北部的缓坡地带(如大德尔基)。冬季牧场主要集中在党河湿地内(如巴嘎德尔基)(附录4)。然而, 近些年部分牧民开始在春季和夏季也使用冬季牧场放牧, 其中巴嘎德尔基等冬季牧场位于党河北部黑颈鹤繁殖地附近。

2019年共记录到黑颈鹤巢址35处, 2020年共记录到26处, 2020年有1处巢址定位失效, 未参与分析。2018–2021年幼鸟存活数量分别为23、30、42、39只, 四年的增补率分别为15.8%、24.2%、26.9%和23.8%。

## 4 讨论

### 4.1 影响黑颈鹤筑巢栖息地偏好与巢址分布的因素

对处于繁殖期的鸟类而言, 食物的可利用性、安全性以及隐蔽等因素都可能影响其筑巢位置的选择(Bautista et al, 2004; MacDonald et al, 2016)。在党河湿地, 浅水沼泽是深水沼泽与沼泽化草甸的过渡区, 即生态交错带, 交错带中丰富的动植物种类可以为动物提供更多的筑巢、隐蔽和摄食条件(傅伯杰等, 2011)。鸟类繁殖时的适合度成本可能取决于周围的环境条件(Visser & Lessells, 2001), 高原寒冷环境的鸟类更是如此。黑颈鹤筑巢时偏好浅水沼泽, 因为浅水沼泽有利于黑颈鹤繁殖期的有效觅食。然而, 栖息地选择模型的模拟结果显示, 黑颈鹤筑巢时对深水沼泽有最强烈偏好, 其次才是浅水沼泽。而有研究表明, 水深是影响黑颈鹤巢址选择的关键因素, 较深的水可以阻挡捕食者(Wu et al, 2009)。因此, 对于盐池湾黑颈鹤而言, 安全性是筑巢栖息地

选择的第一要素, 其次才是食物。

盐池湾黑颈鹤与若尔盖黑颈鹤筑巢栖息地的偏好有较大差异, 若尔盖的黑颈鹤更倾向于将湖泊作为筑巢栖息地, 这可能是因为两地的气候条件不同。若尔盖属典型高寒湿润季风气候, 湖泊占比约5.40% (Wu et al, 2009), 而盐池湾属典型高寒大陆性气候, 湿地内的湖泊仅占1.61% (两年遥感解译结果均值), 可供黑颈鹤筑巢的湖泊相对较少。黑颈鹤筑巢时最偏好的深水沼泽在湿地内占比为2.34%, 而黑颈鹤最偏好的3种栖息地中占比面积最大的浅水沼泽也仅为8.92% (两年遥感解译结果均值), 且均呈现聚集分布。与此同时, 随机森林响应曲线的结果也显示, 在各环境因子水平上, 适宜黑颈鹤筑巢的栖息地范围较小。因此, 适宜黑颈鹤筑巢的栖息地在党河湿地内属稀缺资源, 黑颈鹤的巢址分布范围较狭窄。

#### 4.2 巢址分布格局驱动因素

Pearse等(2016)的研究显示, 在北美大平原越冬的沙丘鹤(*Antigone canadensis*)的越冬地分布有大量风力发电设备, 但近90%的风力发电设备安装在沙丘鹤不倾向选择的土地上, 沙丘鹤表现出的对风力发电设备的回避行为更多是由于资源偏好而不是躲避干扰。因此, 对资源的偏好是沙丘鹤栖息地选择的主要驱动因素。然而, 邹红菲等(2018)对丹顶鹤(*Grus japonensis*)的研究显示, 决定其巢址选择的首要驱动因素是干扰因素。在党河湿地内, 由于沼泽与湖泊附近不宜修建房屋与公路, 95.6%的房屋分布在戈壁或盐化草甸这样质地坚硬且远离沼泽及湖泊的土地类型上, 公路也主要修建在戈壁及盐化草甸上。房屋、公路与黑颈鹤筑巢时偏好的栖息地在空间上本身存在较明显的分离。栖息地选择模型的结果也显示, 对沼泽、湖泊等资源因素的偏好是黑颈鹤巢址分布格局的主要驱动力, 而房屋与公路等干扰因素对黑颈鹤栖息地选择的影响较小。因此, 黑颈鹤巢址分布与人为干扰间的地理分离很大程度上是由于对资源的偏好, 而并非回避干扰。色拥军等(2020)有关黑颈鹤巢址分布格局的研究显示, 在党河两岸, 牧民的数量分布与黑颈鹤的巢址分布呈明显的负相关, 干扰是黑颈鹤巢址分布的关键驱动因素。但该研究主要考虑了干扰这一单一因素的影响, 而忽略了资源、地形等因素的综合

作用, 因此与本研究的结果有所不同。

#### 4.3 牧场分布情况及栖息地质量下降原因

牧场分布调查显示, 部分冬季牧场可能与黑颈鹤的繁殖分布有较大程度重合, 牧场的多季节利用将会使党河湿地内的牲畜数量在黑颈鹤的繁殖季有所升高。而以往的研究表明, 牲畜和散养的犬只都是盐池湾黑颈鹤面临的主要干扰(Zhang et al, 2017)。四年的黑颈鹤数量调查结果显示, 自2019年实施限牧, 黑颈鹤幼鸟的数量开始明显提升, 2019–2021年幼鸟数量较2018年分别提高了30.4%、82.6%和69.6%, 限牧效果显著, 这从侧面说明牧场的多季节利用一直较强烈地限制着黑颈鹤的数量。与此同时, 冬季牧场的多季节利用与牲畜数量的增长(附录5)可能会导致黑颈鹤栖息地质量的下降。种群密度可以反映出栖息地的适宜程度, 尤其对于在繁殖期有强烈领地需求的鹤类动物而言, 当鹤巢间距离增大、种群密度下降时, 意味着栖息地质量的下降(Johnsgard, 1983; Leito et al, 2005)。2019和2020两年的巢址距离平均值分别为 $1,861.31 \pm 100.84$  m和 $1,777.04 \pm 315.96$  m, 2013、2014与2015年的巢址平均距离分别为 $718.66 \pm 430.50$  m、 $1,064.51 \pm 323.99$  m和 $534.99 \pm 195.45$  m (Zhang et al, 2017), 2019年和2020年有较明显的增长, 说明党河湿地的栖息地质量可能有所下降。Mahamued等(2021)的研究也显示, 高强度放牧导致的草场退化可能是阿切氏歌百灵(*Heteromirafra archeri*)种群数量下降的原因。然而, 也有研究表明放牧活动可以为无脊椎动物提供丰富的食物与庇护所, 这可能会给黑颈鹤间接地提供稳定的食物来源(Horgan, 2002; Helden et al, 2010; Liu et al, 2020), 但从限牧后幼鸟数量的增长情况来看, 放牧活动对黑颈鹤的消极影响可能更大。蒸发和降雨是高原湿地景观改变的主导因素(Li et al, 2020)。然而, 党河湿地的水位变化经常受冰川融水的影响(Zhang et al, 2017)。肃北县近十一年草甸生长期(4–8月)的温度呈现下降趋势(附录6), 较低的气温可能会影响湿地水分的补给, 进而限制湿地内植被的生长。因此, 气候变化也可能是黑颈鹤栖息地质量下降的又一原因。

## 5 保护建议

根据上述分析, 本文提出以下保护建议: (1)鼓

励、引导部分当地牧民恢复传统的轮牧转场, 在转场未完全恢复前, 继续适当限牧并给予牧民足够的经济补偿。(2)保持湿地内现有的房屋、公路分布状况, 不新增类似的人为干扰。(3)深水沼泽在党河湿地内分布并不连续, 加之面积小且分布呈现斑块状聚集的特点, 栖息地存在局域性消失的风险。因此, 建议在干旱年份适当地对深水沼泽进行人工补水, 以保证黑颈鹤的正常繁殖。

**致谢:** 感谢甘肃盐池湾国家级自然保护区管护中心的监测人员在野外给予的帮助。感谢额尔登达莱先生、孟克达拉先生、孟梗草勒先生、索郎夺尔基先生关于补偿政策、牧场分布以及牧民现状的解答。

## 参考文献

- Bautista LM, García JT, Calmaestra RG, Palacín C, Martín CA, Morales M, Bonal R, Viñuela J (2004) Effect of weekend road traffic on the use of space by raptors. *Conservation Biology*, 18, 726–732.
- Farrington JD, Zhang XL (2013) The black-necked cranes of the Longbao National Nature Reserve, Qinghai, China. *Mountain Research and Development*, 33, 305–313.
- Fu BJ, Chen LD, Ma KM, Wang YL (2011) Principles and Applications of Landscape Ecology. Science Press, Beijing. (in Chinese) [傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 王仰麟 (2011) 景观生态学原理及应用. 科学出版社, 北京.]
- Helden AJ, Anderson A, Sheridan H, Purvis G (2010) The role of grassland sward islets in the distribution of arthropods in cattle pastures. *Insect Conservation and Diversity*, 3, 291–301.
- Horgan FG (2002) Shady field boundaries and the colonisation of dung by coprophagous beetles in Central American pastures. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 91, 25–36.
- Jiao SW, Guo YM, Huettmann F, Lei GC (2014) Nest-site selection analysis of hooded crane (*Grus monacha*) in Northeastern China based on a multivariate ensemble model. *Zoological Science*, 31, 430–437.
- Johnsgard PA (1983) *Cranes of the World*. Indiana University Press, Bloomington.
- Kuang FL, Cangjuezhuma, Li JC, Yang L, Liu N (2010) Nest site characteristics and foraging habitat selection of breeding black-necked cranes in Bange, Tibet Autonomous Region, China. *Journal of Northeast Forestry University*, 38(11), 89–92. (in Chinese with English abstract) [邝粉良, 仓决卓玛, 李建川, 杨乐, 刘宁 (2010) 藏北繁殖黑颈鹤的巢址特征及觅食地选择. 东北林业大学学报, 38(11), 89–92.]
- Leito A, Ojaste I, Truu J, Palo A (2005) Nest site selection of the Eurasian crane *Grus grus* in Estonia: An analysis of nest record cards. *Ornis Fennica*, 82, 44–54.
- Li WL, Xue PF, Liu CL, Yan HP, Zhu GF, Cao YP (2020) Monitoring and landscape dynamic analysis of alpine wetland area based on multiple algorithms: A case study of Zoige Plateau. *Sensors*, 20, 7315.
- Liu NF, Zhang HC, Dou ZG (2010) *Synthetical Scientific Investigation on Yanchiwan National Reserve in Gansu Province*. Lanzhou University Press, Lanzhou. (in Chinese) [刘迺发, 张惠昌, 窦志刚 (2010) 甘肃盐池湾国家级自然保护区综合科学考察. 兰州大学出版社, 兰州.]
- Liu W, Jin YY, Wu YJ, Zhao CH, He XC, Wang B, Ran JH (2020) Home range and habitat use of breeding black-necked cranes. *Animals*, 10, 1975.
- MacDonald EC, Camfield AF, Martin M, Wilson S, Martin K (2016) Nest-site selection and consequences for nest survival among three sympatric songbirds in an alpine environment. *Journal of Ornithology*, 157, 393–405.
- Mahamued BA, Donald PF, Collar NJ, Marsden SJ, Ndang'ang'a PK, Wondafrash M, Abebe YD, Bennett J, Wotton SR, Gornall D, Lloyd H (2021) Rangeland loss and population decline of the critically endangered Liben lark *Heteromirafra archeri* in southern Ethiopia. *Bird Conservation International*, 31, 1–14.
- Pearse AT, Brandt DA, Krapu GL (2016) Wintering sandhill crane exposure to wind energy development in the central and southern Great Plains, USA. *The Condor*, 118, 391–401.
- Se YJ, Dou ZG, Yang JC, Wang YM, Dabuxilite, Ma ZB, Wang BC (2020) Distribution patterns of breeding sites of black-necked crane in Yanchiwan, Gansu Province. *Wetland Science & Management*, 16(1), 64–68. (in Chinese with English abstract) [色拥军, 窦志刚, 杨巨才, 王煜民, 达布西力特, 马志兵, 王博驰 (2020) 甘肃盐池湾黑颈鹤繁殖分布格局. 湿地科学与管理, 16(1), 64–68.]
- Visser ME, Lessells CM (2001) The costs of egg production and incubation in great tits (*Parus major*). *Proceedings of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 268, 1271–1277.
- Wang BC, Pei W, Se YJ, Yang JC, Wang YM, Yang HR, Fu HY, Yu FQ, Wang ZJ, Lang XM, Pu Z, Guo YM (2021) Colliding with power lines being the main reason of the death of satellite-tracked black-necked crane juveniles in wintering area. *Chinese Journal of Zoology*, 56, 161–170. (in Chinese with English abstract) [王博驰, 裴雯, 色拥军, 杨巨才, 王煜明, 杨海蓉, 付红彦, 于凤琴, 王子建, 郎雪敏, 蒲真, 郭玉民 (2021) 卫星跟踪揭示撞击电线是黑颈鹤幼鸟越冬地死亡的主要原因. 动物学杂志, 56, 161–170.]
- Wang YH, Wu ZK, Li ZM, Li DH, Zhou ZJ, Bishop MA (1989) An observation on the nests, eggs and chickens of black-necked cranes. *Guizhou Science*, 7(1), 50–57. (in Chinese with English abstract) [王有辉, 吴至康, 李筑眉, 李德浩, 周志军, 玛丽·安娜·比索普 (1989) 黑颈鹤巢、卵

王博驰等: 甘肃盐池湾黑颈鹤筑巢栖息地偏好及人为干扰的影响

和雏鸟的观察. 贵州科学, 7(1), 50–57.]

Wu HQ, Zha K, Zhang M, Yang XJ (2009) Nest site selection by black-necked crane *Grus nigricollis* in the Ruorgai Wetland, China. *Bird Conservation International*, 19, 277–286.

Zhang LX, An B, Shu ML, Yang XJ (2017) Nest-site selection, reproductive ecology and shifts within core-use areas of black-necked cranes at the northern limit of the Tibetan Plateau. *PeerJ*, 5, e2939.

Zou HF, Gao ZS, Wu QM, Huang HZ, Li QL, Tao R, Yang YB (2018) Using resource selection functions to study nest site selection of *Grus japonensis*. *Chinese Journal of Wildlife*, 39, 566–572. (in Chinese with English abstract) [邹红菲, 高忠斯, 吴庆明, 黄华智, 李全亮, 陶蕊, 杨宇博 (2018) 应用资源选择函数研究丹顶鹤的巢址选择. *野生动物学报*, 39, 566–572.]

(责任编辑: 丁平 责任编辑: 闫文杰)

## 附录 Supplementary Material

附录1 影响黑颈鹤筑巢栖息地偏好的环境因子间相关性系数

Appendix 1 The correlation coefficient between environmental variables which influence nesting habitat preference of black-necked cranes

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021241-1.pdf>

附录2 影响黑颈鹤筑巢栖息地偏好的环境因子的重要性排序

Appendix 2 Permutation importance of environmental variables which influence nesting habitat preference of black-necked cranes

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021241-2.pdf>

附录3 黑颈鹤不同类型栖息地的占比

Appendix 3 The proportion of different habitat types of black-necked cranes

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021241-3.pdf>

附录4 季节牧场分布

Appendix 4 The distribution of the seasonal pastures

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021241-4.pdf>

附录5 盐池湾牲畜数量

Appendix 5 The number of livestock in Yanchiwan

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021241-5.pdf>

附录6 肃北县近年来气温变化趋势

Appendix 6 Temperature change trend in Subei County in recent years

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021241-6.pdf>



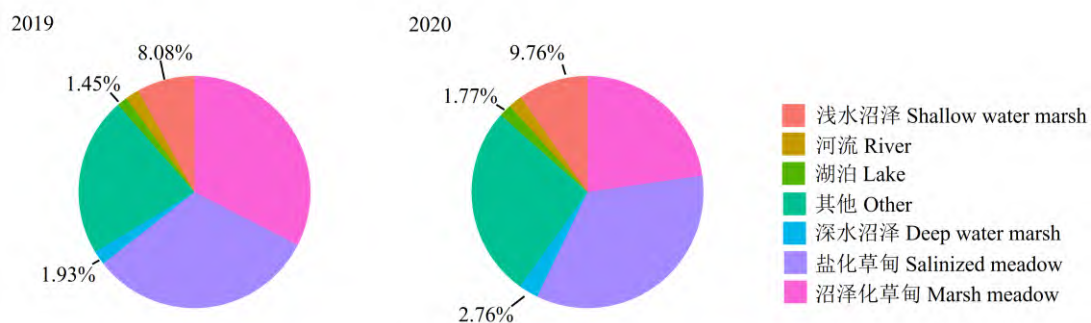
附录1 影响黑颈鹤筑巢栖息地偏好的环境因子间相关性系数(1、2、3...代表左侧对应环境因子)  
Appendix 1 The correlation coefficient between environmental variables which influence nesting habitat preference of black-necked cranes (1, 2, 3... represent left corresponding variables)

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1 距深水沼泽距离 Distance to deep water marsh	0.71	-0.14	0.45	0.48	-0.01	0.15	-0.15	-0.12	-0.21	0.00	-0.09	-0.05
2 距浅水沼泽距离 Distance to shallow water marsh		-0.07	0.34	0.36	-0.14	0.12	-0.04	-0.08	0.19	-0.04	-0.13	-0.05
3 距盐化草甸距离 Distance to salinized meadow			0.09	0.20	0.06	-0.18	0.09	-0.01	-0.07	0.04	-0.00	-0.14
4 距沼泽化草甸距离 Distance to marsh meadow				0.61	0.09	0.13	-0.01	0.01	-0.03	0.09	-0.03	-0.03
5 距湖泊距离 Distance to lake					0.06	0.02	-0.19	-0.10	-0.10	0.45	-0.13	-0.03
6 距河流距离 Distance to river						0.17	0.08	-0.15	-0.13	0.25	-0.04	-0.03
7 距山脉距离 Distance to mountain							0.17	-0.51	-0.03	-0.01	-0.35	-0.18
8 距戈壁距离 Distance to gobi								0.06	0.27	-0.06	0.08	0.19
9 距公路距离 Distance to road									-0.03	-0.03	0.57	0.28
10 距房屋距离 Distance to house										-0.09	0.06	0.01
11 海拔 Altitude											-0.12	-0.03
12 坡度 Slope												0.54
13 坡向 Aspect												

## 附录2 影响黑颈鹤筑巢栖息地偏好的环境因子的重要性排序

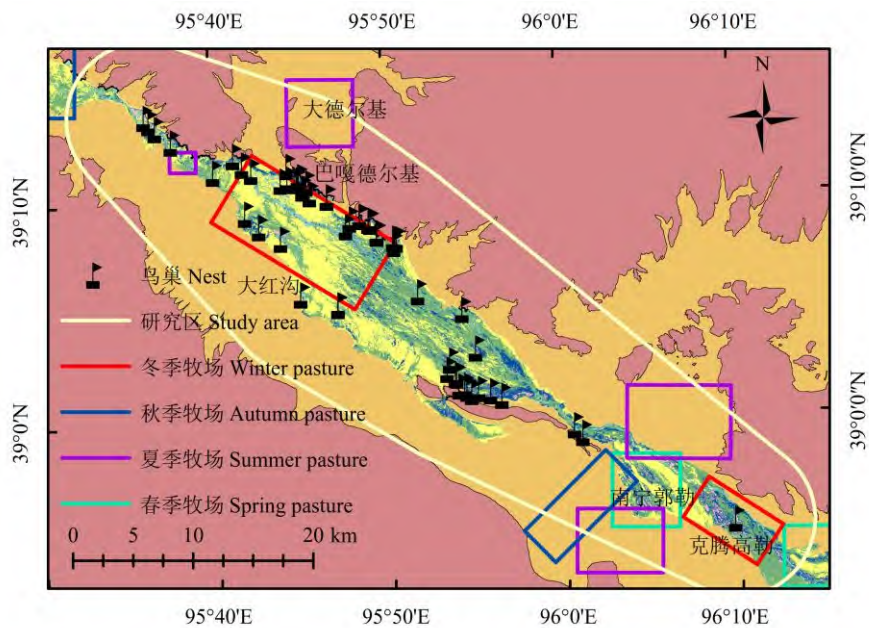
### Appendix 2 Permutation importance of environmental variables which influence nesting habitat preference of black-necked cranes

环境因子 Environmental variables	重要性 Score
距深水沼泽距离 Distance to deep water marsh	23.58
距浅水沼泽距离 Distance to shallow water marsh	20.39
距湖泊距离 Distance to lake	5.05
距戈壁距离 Distance to gobi	2.61
海拔 Altitude	1.63
距河流距离 Distance to river	1.43
距房屋距离 Distance to house	1.42
距沼泽化草甸距离 Distance to marsh meadow	1.20
距山脉距离 Distance to mountain	0.84
距公路距离 Distance to road	0.52
距盐化草甸距离 Distance to salinized meadow	0.51
坡向 Aspect	0.43
坡度 Slope	0.33



附录3 黑颈鹤不同类型栖息地的占比(其他包括公路、戈壁及山脉)

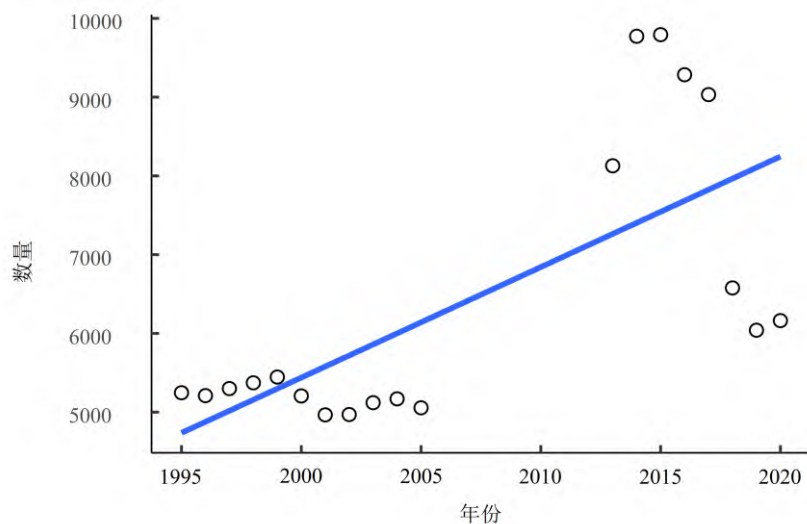
Appendix 3 The proportion of different habitat types of black-necked cranes (Other includes road, gobi and mountain)



附录4 季节牧场分布(部分)

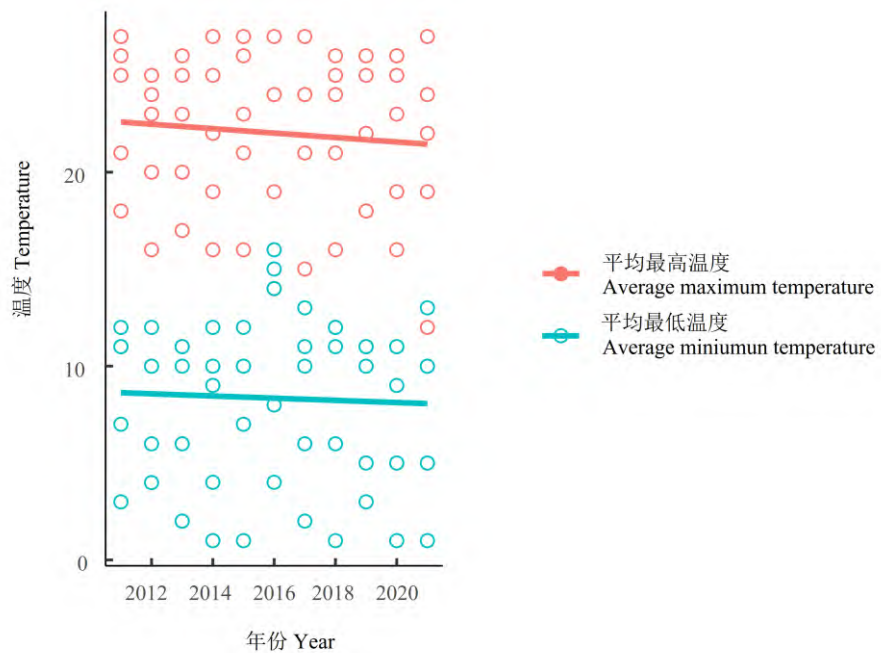
Appendix 4 The distribution of the seasonal pastures (partial)





附录5 盐池湾牲畜数量

Appendix 5 The number of livestock in Yanchiwan



附录6 肃北县近年来气温变化趋势

Appendix 6 Temperature change trend in Subei County in recent years



•研究报告•

# 中印度洋与南海西部表层海水细菌多样性

夏呈强<sup>1#</sup>, 李毅<sup>2,3##</sup>, 党延茹<sup>3</sup>, 察倩倩<sup>3</sup>, 贺晓艳<sup>3</sup>, 秦启龙<sup>3</sup>

1. 山西农业大学动物科学学院, 山西太谷 030801; 2. 山西农业大学生命科学学院, 山西太谷 030801; 3. 山东大学微生物技术国家重点实验室, 山东青岛 266237

**摘要:** 细菌在海洋生物地球化学循环中发挥着重要作用。为更好地了解海洋细菌的特征及其在海洋环境中的潜在作用, 本文利用纯培养与16S rRNA基因高通量测序技术对中印度洋与南海西部海域表层海水细菌多样性进行研究。纯培养结果表明, 自中印度洋与南海西部表层海水中共分离275株可培养海洋细菌, 隶属于4门49属75种。变形菌门是绝对优势类群(占总株数的68.7%), 其次是放线菌门(21.5%)、拟杆菌门(9.1%)和厚壁菌门(0.7%)。在属水平, 微杆菌属(*Microbacterium*)与弧菌属(*Vibrio*)是主要的优势属, 共占总株数的30.0%。在3种分离培养基中, 自1/10 × 2216E培养基中分离细菌的数目与种类最多(89株, 30属); 分离菌株中的细菌菌株有7、9与3个属分别仅在2216E、1/10 × 2216E及葡萄糖甘露糖(glucose-mannose, GM)培养基中生长。此外, 共分离培养出50株细菌(26种)可能代表潜在新分类单元。高通量测序结果显示, 中印度洋和南海西部表层海水中共有23个门531个属。优势门类为变形菌门(72.2%)和拟杆菌门(15.3%), 优势属为嗜冷杆菌属(*Psychrobacter*, 24.4%)、盐单胞菌属(*Halomonas*, 16.3%)和亚硫酸杆菌属(*Sulfitobacter*, 13.9%)。此外, 中印度洋表层海水细菌Shannon-Wiener指数与Pielou均匀度指数显著高于南海西部( $P < 0.05$ ), 且细菌群落结构显著不同( $P < 0.05$ )。综合纯培养与原位细菌数据得出, 中印度洋与南海西部海洋细菌具有丰富的多样性, 具有进一步开发研究的价值。

**关键词:** 中印度洋; 南海西部; 表层海水; 高通量测序; 细菌多样性

夏呈强, 李毅, 党延茹, 察倩倩, 贺晓艳, 秦启龙 (2022) 中印度洋与南海西部表层海水细菌多样性. 生物多样性, 30, 21407. doi: 10.17520/biods.2021407.

Xia CQ, Li Y, Dang YR, Cha QQ, He XY, Qin QL (2022) Diversity of culturable and *in situ* bacteria in surface seawater from the central Indian Ocean and the western South China Sea. Biodiversity Science, 30, 21407. doi: 10.17520/biods.2021407.

## Diversity of culturable and *in situ* bacteria in surface seawater from the central Indian Ocean and the western South China Sea

Chengqiang Xia<sup>1#</sup>, Yi Li<sup>2,3##</sup>, Yanru Dang<sup>3</sup>, Qianqian Cha<sup>3</sup>, Xiaoyan He<sup>3</sup>, Qilong Qin<sup>3</sup>

1 College of Animal Science, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801

2 College of Life Sciences, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801

3 State Key Laboratory of Microbial Technology, Shandong University, Qingdao, Shandong 266237

### ABSTRACT

**Aims:** Bacteria play an important role in driving biogeochemical cycling in the open ocean. Therefore, it is of great significance to investigate the characteristics of marine bacteria and their potential role in the marine environment.

**Methods:** In this study, surface seawater was collected from 8 sites in the central Indian Ocean and the western South China Sea. Three different media were utilized for strains isolation and identification, and the 16S rRNA gene high-throughput sequencing method was used to analyze the microbial classification and community composition of each study site.

**Results:** A total of 275 strains, belonging to 4 phyla, 49 genera and 75 species, were isolated and identified. Proteobacteria were the most dominant, accounting for 68.7% of the total isolates, followed by Actinobacteria (21.5%), Bacteroidetes (9.1%) and Firmicutes (0.7%). At the genus level, *Microbacterium* and *Vibrio* were the dominant genera,

收稿日期: 2021-10-11; 接受日期: 2021-10-20

基金项目: 山西省优秀博士来晋工作奖励项目(SXYBK Y2019024)、山西农业大学科技创新基金项目(2020BQ07)和国家自然科学基金(31870101)

# 共同第一作者 Co-first authors

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: liyi@sxau.edu.cn

accounting for 30.0% of the total number of isolates. Bacterial abundance and species (89 isolates, 30 genera) in the  $1/10 \times 2216E$  medium were the highest among the three kinds of media. Seven, nine and three genera were only found in 2216E,  $1/10 \times 2216E$  and glucose-mannose (GM) medium, respectively. Fifty strains (26 species) were identified as potential novel taxa. The sequencing analysis revealed that 23 phyla and 531 genera were found in the surface seawater. Dominant phyla were Proteobacteria (72.2%) and Bacteroidetes (15.3%), dominant genera were *Psychrobacter* (24.4%), *Halomonas* (16.3%), and *Sulfitobacter* (13.9%). In addition, the Shannon-Wiener index and Pielou's evenness index were significantly higher in the Indian Ocean than the South China Sea ( $P < 0.05$ ), and bacterial community structure was significantly different between those two regions ( $P < 0.05$ ).

**Conclusion:** The results indicated that marine bacteria from the surface seawater of central Indian Ocean and western South China Sea were rich in diversity, and help the most value for further development and research.

**Key words:** central Indian Ocean; western South China Sea; surface seawater; high throughput sequencing; bacterial diversity

海洋是地球上最大的水生生态系统, 占据了地球总表面积的71%。广阔的表层海水经常表现出不同的物理海洋过程, 如季风驱动的环流, 可造成营养物质大规模的水平运输(Qu et al, 2006; Wang et al, 2017)。在洋流的驱动下, 体积小、扩散能力强的微生物可散布到世界海洋的每个角落(Salazar et al, 2016)。这些微生物是海洋生态系统中养分循环和能量流动的主要承担者(Liu et al, 2014a)。选择性过程包括环境压力(例如风、日光和养分的可利用性)和生物相互作用(例如藻华和病毒裂解)可影响海洋微生物群落的分布格局(Hanson et al, 2012; Bryant et al, 2016)。近年来, 16S rRNA基因高通量与宏基因组测序技术的发展极大地推动了人类对全球海洋微生物群落结构与功能的研究。与陆地微生物相比, 海洋微生物在物种类群、生理代谢特性与产物等方面都存在着丰富的新颖性和多样性(Zhuang et al, 2020)。然而, 非培养技术并不能准确反映微生物的生理生化特征与生态功能, 更重要的是无法获得并利用这些微生物资源。

借助于可培养方法获得的微生物可以作为物种库与功能基因库, 并对其进行资源开发和应用。由于在实验条件下无法完全模拟海洋的环境条件, 目前只有不到1%的海洋微生物可利用培养方法获得(Rappé & Giovannoni, 2003), 大量具有应用价值的海洋微生物资源被埋没。迄今关于开阔大洋中可培养微生物的研究大多集中在沉积物环境中(Yu et al, 2015; Su et al, 2020; Lin et al, 2021), 对水体中可培养微生物的研究报道相对较少(Zhuang et al, 2020), 特别是在不同实验条件下(如不同培养基、不同海域等)对海洋微生物的规模化分离培养的研究更是罕见(Lin et al, 2021)。因此, 结合可培养方法

与高通量测序技术对海洋微生物群落进行研究, 不但能够有效挖掘微生物资源, 还有助于对海洋生物多样性有更加清晰的认识。

本研究从中印度洋及中国南海(以下简称南海)西部采集8个站位的表层海水, 采用3种不同的培养基进行规模化分离培养, 结合16S rRNA基因高通量测序技术探究细菌群落组成和多样性分布规律, 为揭示开阔海域水生微生物的生命过程及其生态功能提供独特的微生物资源库。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

本研究所用表层海水(2–5 m)样品均由“大洋一号”科考船船载CTD采集。2014年1月, 在中国大洋第30航次科考期间采集印度洋表层水(IO\_1)。2016年6–7月, 在中国大洋第39航次科考期间选取7个站位采集印度洋(IO\_14, IO\_20)与南海西部(SCS\_4, SCS\_6, SCS\_7, SCS\_8, SCS\_9)表层水(附录1), 具体站位信息如表1所示。少量新鲜水样直接用于现场平板涂布; 5 L海水样品经 $0.22 \mu\text{m}$ 滤膜过滤, 并将滤膜放入无菌离心管, 置于 $-80^\circ\text{C}$ 冰箱冷冻保存, 用于后续的高通量测序分析。

### 1.2 培养基

采用3种培养基, 分别为2216E (BD, 美国)、稀释10倍2216E ( $1/10 \times 2216E$ )及葡萄糖甘露糖培养基(glucose-mannose, GM) (成分: 0.25%葡萄糖、0.25%甘露糖及0.2%硝酸铵)对海洋细菌进行分离培养。

### 1.3 纯培养菌株的分离纯化

每个位点分别取两个梯度( $50 \mu\text{L}$ 和 $300 \mu\text{L}$ )的新鲜表层海水样品, 用一次性无菌涂布棒分别涂布



至2216E、1/10 × 2216E和GM固体培养基上, 每种培养基每个梯度设置2个平行, 置于10℃培养箱进行培养。培养时间为1–2个月(航行期间), 回实验室后挑取不同形态和颜色的单菌落, 采用连续划线法接种于2216E培养基上进行反复分离纯化。

#### 1.4 纯培养菌株16S rRNA基因鉴定与系统发育分析

使用细菌基因组DNA快速提取试剂盒(百泰克, 中国)提取各个菌株的基因组。以提取的基因组为模板, 利用通用引物27F (5'-AGAGTTTGATCCTG GCTCAG-3')和1492R (5'-TACGGTTACCTTGTTA CGACTT-3')进行细菌16S rDNA扩增。PCR扩增体系和反应条件参照Du等(2019)的方法。PCR产物送至济南博尚生物技术有限公司进行测序。

将获得的16S rRNA基因序列提交至EzBioCloud (<http://www.ezbiocloud.net/>)进行Blast比对, 得到菌株相似的种属及相似度信息, 并初步确定其分类地位。将筛选的275株细菌的16S rRNA基因序列进行muscle比对, 采用MEGA 7邻近法(neighbor-joining algorithm)构建系统发育树, 并使用在线网站EvolView (<http://www.evolgenius.info/evolview/>)编辑进化树。

#### 1.5 原位细菌群落的DNA提取及高通量测序

5 L海水样品经0.22 μm滤膜过滤后, 滤膜放入无菌离心管中, 液氮速冻后, 置于–80℃保存。利用PowerWater® DNA提取试剂盒提取滤膜菌体总DNA, 利用Nano-100微量分光光度计测定DNA浓度及纯度, 同时通过琼脂糖凝胶电泳检测DNA提取效果。以提取的总DNA为模板, 使用引物338F (5'-AC TCCTACGGGAGGCAGCA-3')和806R (5'-GGACT ACHVGGGTWTCTAAT-3')扩增细菌16S rRNA基因的V3–V4区。扩增体系与反应条件参考Li等(2018)的方法。

根据Illumina MiSeq PE300测序平台的标准流程进行双端测序。利用QIIME2软件对获得的reads进行去接头、质量控制及去重复, 并基于DADA2的聚类分析获得ASV (amplicon sequence variants)表和代表序列(Caporaso et al, 2010)。利用Silva数据库(SSU132)对每条序列进行物种分类注释。

#### 1.6 数据分析

使用QIIME2软件计算Faith系统发育多样性指

数, 使用Primer 6软件计算Margalef丰富度指数、Pielou均匀度指数、Shannon-Wiener指数和Bray-Curtis相似性。ANOSIM分析(*R*用于表征不同组间的差异性; *P*用于表征显著差异性)和Cluster聚类分析用于比较不同海域细菌群落组成差异(Gauch & Scruggs, 1980; Clarke, 1993; Keylock, 2005)。使用R软件进行Kruskal-Wallis检验和绘制堆积图与弦状图(R Core Team, 2016)。

## 2 结果

### 2.1 表层海水可培养海洋细菌多样性

本研究共获得275株海洋细菌, 隶属于4门6纲16目32科49属75种(图1, 附录2)。变形菌门(189株)、放线菌门(59株)、拟杆菌门(25株)和厚壁菌门(2株)分别占总分离菌株的68.7%、21.5%、9.1%和0.7%(图1A)。在纲水平, α-变形菌纲(134株)占绝对优势, 占总菌株数的48.7%; 其次为放线菌纲(59株; 21.5%)、γ-变形菌纲(55株; 20.0%)和黄杆菌纲(22株; 8.0%); 另外2个纲, 噬纤维菌纲包含3株, 芽孢杆菌纲仅包含2株(图1B)。在属水平, 微杆菌属(*Microbacterium*)菌株最多, 共分离出55株, 占细菌分离总数的20.0%(图2, 附录2)。弧菌属(*Vibrio*)为第二大优势属, 占细菌分离总数的10.0%。海茎状菌属(*Maricaulis*)和赤杆菌属(*Erythrobacter*)获得的菌株数目分别为19株和17株。希瓦氏菌属(*Shewanella*)和海洋柄菌属(*Oceanicaulis*)在内的18个属, 每属仅分离培养出1株。

比较不同海域分离的细菌类群发现, 中印度洋共获得菌株115株(27属), 南海西部共获得160株(38属)(图2, 附录3)。其中, 11个属的物种仅在中印度洋海域分离得到, 22个属的物种仅在南海西部地区分离得到, 16个属的物种在这两个海域都能分离得到(附录3)。这些共有类群包括微杆菌属、弧菌属与海茎状菌属等高丰度类群以及交替单胞菌属(*Alteromonas*)、德沃斯式菌属(*Devosia*)、生丝单胞菌属(*Hyphomonas*)、鼠尾菌属(*Muricauda*)、海洋柄菌属(*Ponticaulis*)、假交替单胞菌属(*Pseudoalteromonas*)、*Thalassospira*、玫瑰变色菌属(*Roseovarius*)与玫瑰色菌属(*Roseibium*)等低丰度类群(图2)。以上研究结果表明, 中印度洋及南海西部广阔海域可培养细菌具有丰富的多样性。

### 2.2 不同培养基获得的海洋细菌多样性

利用3种培养基对表层海水中海洋细菌进行分离培养发现, 2216E中获得81株细菌(27属), 1/10 × 2216E获得89株(30属), GM培养基获得52株(17属)(图3)。在纲水平, α-变形菌纲、γ-变形菌纲和放线菌纲的细菌在3种培养基均能分离得到。其中, α-变形菌纲占绝对优势, 且在1/10 × 2216E培养基上占比最高(66.3%)。与其他2种培养基相比, GM培养基中缺少黄杆菌纲和噬纤维菌纲的细菌, 但可获得芽孢杆菌纲细菌。在属水平, 2216E、1/10 × 2216E及GM培养基均获得11个属

的细菌, 其中, 微杆菌属在3种培养基中菌株数目均最多(图3A)。作为第二大优势类群, 海茎状菌属在1/10 × 2216E培养基中菌株数目相对较多。鼠尾菌属与短小杆菌属(*Brachybacterium*)仅在不同营养梯度2216E培养基中分离得到。此外, 分别有7、9与3个属的细菌仅在2216E、1/10 × 2216E及GM培养基中被培养(图3B)。

本研究共分离培养出50株潜在新分类单元, 分属于26个物种(16S rRNA基因相似度低于98.65%)(附录4)。其中, 2216E中分离出17株潜在新分类单元, 分属于10个物种, 疑似新种率为

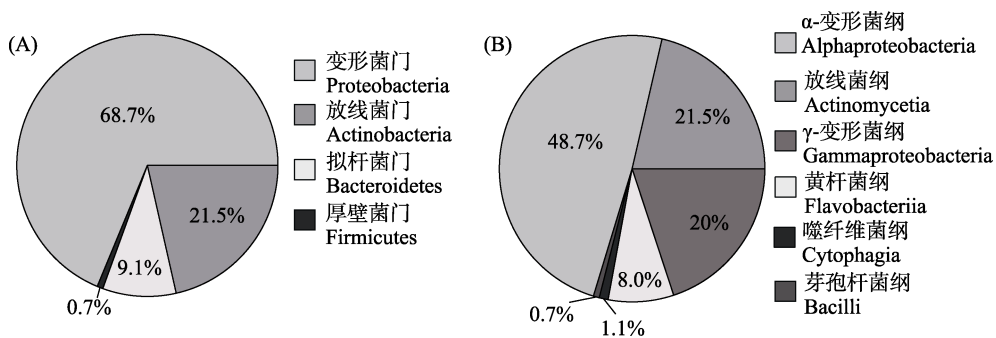


图1 表层海水可培养细菌在(A)门和(B)纲水平的组成分布

Fig. 1 Distributions of cultivable bacteria at (A) phylum and (B) class level from different surface seawaters

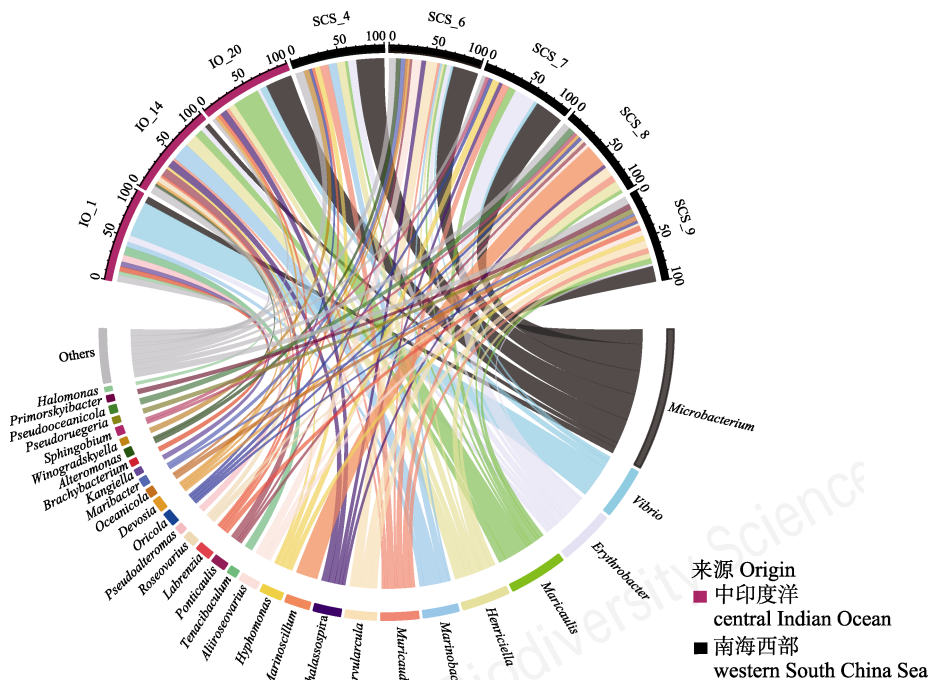


图2 表层海水可培养细菌属的多样性

Fig. 2 Cultivable bacterial diversity of genus isolated from surface seawaters

表 1 中印度洋与南海西部采样位点信息及非培养细菌群落生物多样性指数

Table 1 The information of sampling stations of the central Indian Ocean and the western South China Sea and biodiversity indices of uncultured bacterial communities

站位 Station	经度 Longitude	纬度 Latitude	温度 Temperature (°C)	OTU	Margalef丰富度指数 Margalef's richness index	Pielou均匀度指数 Pielou's evenness index	Faith系统发育多 样性指数 Faith's PD index	Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index
IO_1	51.30°E	36.93°S	19.8	519	45.15	0.75	32.00	6.77
IO_14	85.36°E	19.52°S	25.4	354	30.77	0.59	29.17	4.99
IO_20	96.62°E	11.29°S	29.2	349	30.33	0.62	26.18	5.24
SCS_4	111.47°E	9.25°N	30.5	470	40.88	0.55	35.39	4.88
SCS_6	112.52°E	12.78°N	30.0	380	33.03	0.49	31.09	4.22
SCS_7	113.25°E	15.17°N	29.6	379	32.95	0.54	30.76	4.63
SCS_8	114.20°E	17.17°N	30.0	424	36.87	0.53	35.08	4.66
SCS_9	115.45°E	19.19°N	30.9	323	28.07	0.52	27.58	4.32

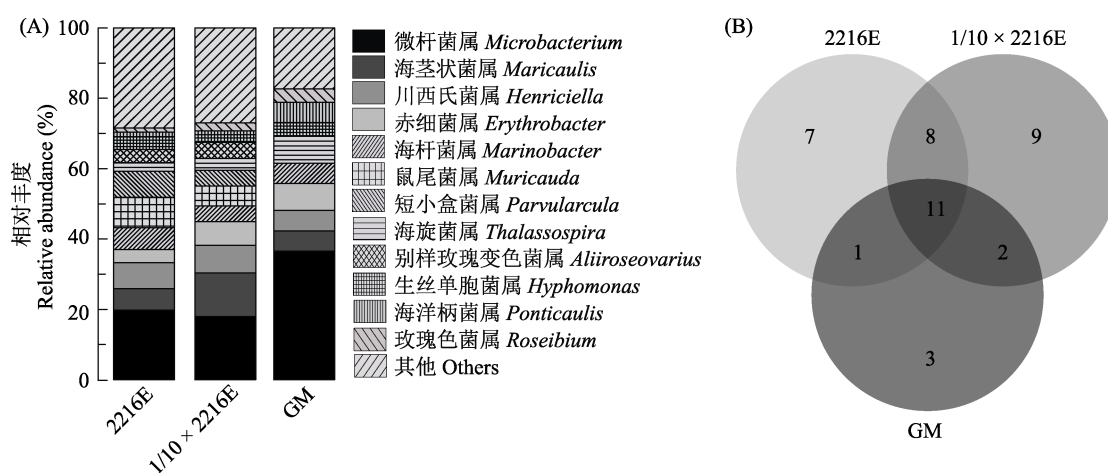


图 3 三种不同培养基分离培养的(A)细菌多样性及(B)不同属的维恩分析。2216E, 2216E培养基; 1/10 × 2216E, 稀释10倍的2216E培养基; GM, 葡萄糖甘露糖培养基。

Fig. 3 Bacterial diversity and Venn analysis of differential genera isolated in three different media. 2216E, 2216E culture medium; 1/10 × 2216E, Diluted 10 times of 2216E culture medium; GM, Glucose-mannose culture medium.

12.3%; 1/10 × 2216E中分离出25株, 分属于17个物种, 疑似新种率最高, 达19.1%; GM培养出8株, 分属于7个物种, 疑似新种率为13.5%。

### 2.3 海洋原位细菌群落多样性

通过对8个表层海水样品中的细菌16S rRNA基因序列进行Illumina测序, 发现不同样品中细菌的OTU数目范围为323–519, Margalef指数为28.07–45.15(表1)。在所有样品中, SCS\_4样品的PD值最高, 为35.39。中印度洋样品中细菌Shannon-Wiener指数为5.67, 显著高于南海西部样品(4.54) ( $P < 0.05$ )。此外, 中印度洋样品中Pielou均匀度指数也显著高于南海西部样品(0.65 vs. 0.53,  $P < 0.05$ )。

在分析的表层海水样品中, 共发现23个细菌门。变形菌门相对丰度为72.2%, 在细菌类群中占绝对优势(图4)。其中,  $\alpha$ -变形菌纲和 $\gamma$ -变形菌纲是丰度最高的变形菌, 而 $\beta$ -变形菌纲与 $\delta$ -变形菌纲丰度较低。其他主要门类有拟杆菌门、蓝细菌门、放线菌门与厚壁菌门, 其丰度分别为15.3%、5.5%、4.9%和1.3%。其中, 蓝细菌门类群在所有样品中均占主要地位, 并以原绿球藻属(*Prochlorococcus*)与聚球藻属(*Synechococcus*)为主。在属水平, 共发现531个属。其中, 丰度最高的属是嗜冷杆菌属(*Psychrobacter*), 占有样品中细菌类群的24.4%。其次是盐单胞菌属(*Halomonas*)和亚硫酸杆菌属(*Sulfitobacter*), 其相

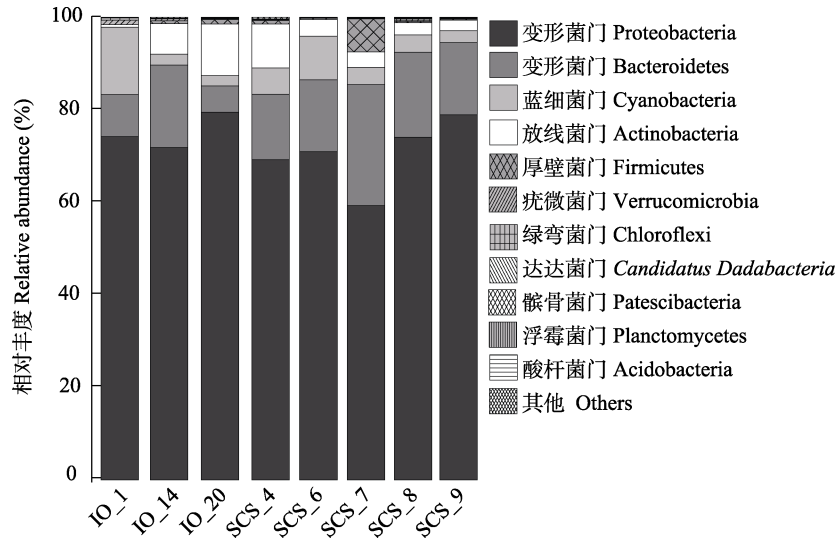


图4 中印度洋与南海西部表层海水中原位细菌在门水平上的组成分布  
 Fig. 4 *In situ* bacterial composition distributions at phylum level across the surface seawaters of the central Indian Ocean (IO) and the western South China Sea (SCS)

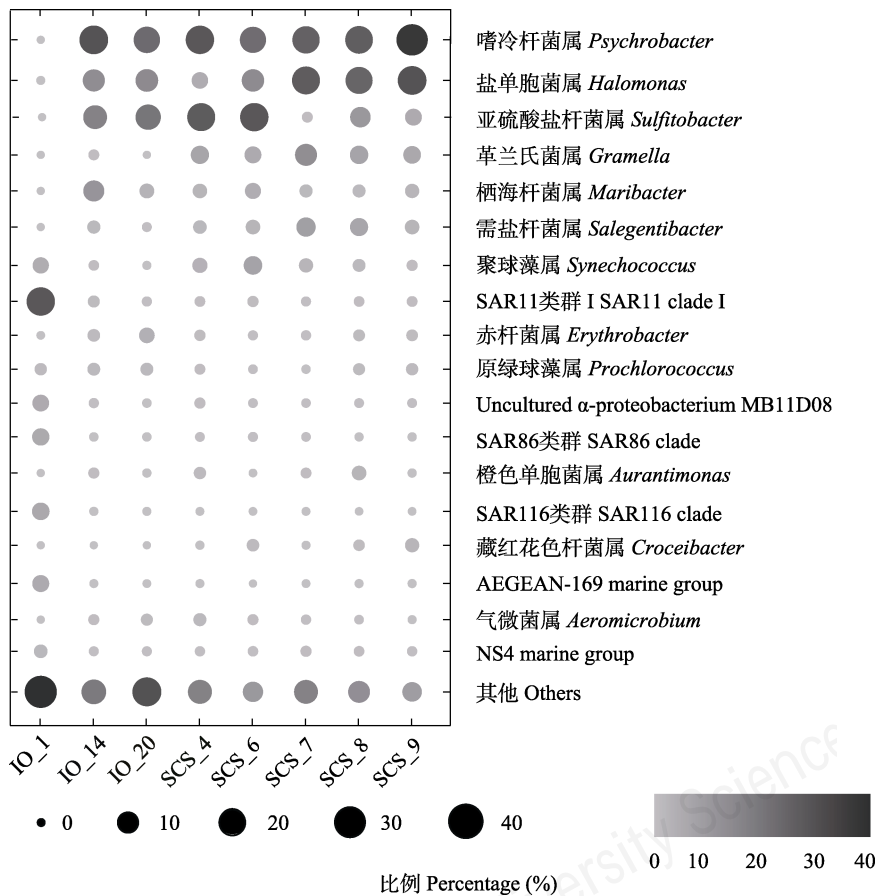


图5 中印度洋与南海西部表层海水中原位细菌在属水平上的分布  
 Fig. 5 *In situ* bacterial composition distributions at genus level across the surface seawaters of the central Indian Ocean (IO) and the western South China Sea (SCS)



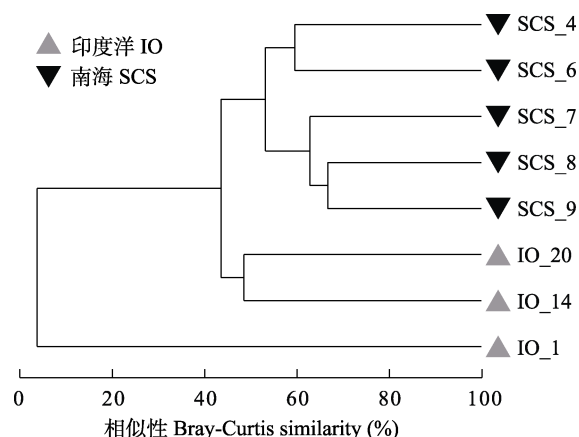


图 6 基于 Bray-Curtis 相似性的中印度洋及南海西部表层海水中 ASV 聚类分析

Fig. 6 The cluster dendrogram analysis based on Bray-Curtis similarity of ASVs in the surface seawaters of the central Indian Ocean (IO) and the western South China Sea (SCS)

对丰度分别为16.3%和13.9% (图5)。值得注意的是,在发现的SAR11类群中,85%的类群分布在中印度洋。聚类分析显示,中印度洋与南海西部的细菌类群明显分成两大组(图6)。与此结果相一致,ANOSIM分析显示,中印度洋与南海西部表层细菌类群的 $R$ 值是0.74 ( $P = 0.018$ )。相对于南海西部不同站位的细菌群落,中印度洋表层海水不同站点之间的细菌群落相似性更低。

### 3 讨论

#### 3.1 表层海水可培养优势细菌类群

海洋微生物在复杂有机物的矿化过程中发挥重要作用(Louca et al, 2016)。本研究共采集了8个表层海水样品,完成了275株海洋细菌的分离纯化及鉴定分析。这些可培养细菌分属于49属75种,所获得的可培养细菌种类远多于以往南海水体中获得的可培养细菌(6-7属)(Zhuang et al, 2020)。与本研究优势门类为变形菌门的结果不同,先前研究报道认为南海沉积物中优势门类为放线菌门(Liu et al, 2014b),我们推测可能是由于水体与沉积物生境不同及培养条件不同导致。在所有可培养海洋细菌中, $\alpha$ -变形菌类群相对丰度最高(135株,49.1%),其中,获得纯培养频率最高的是赤杆菌属,共发现4个种17株菌。以往研究报道,多数可培养赤杆菌是从浅层海水中获得(Yoon et al, 2004),可进行光合作用,是海洋初级生产力的重要组成部分(Koblizek et al,

2003)。作为本研究中第二大优势类群(59株,21.5%),放线菌门仅包含3个属,远远少于Goodfellow和Fiedler (2010)在海洋环境中发现的放线菌共50个属。在发现的拟杆菌门类群中,所有25株菌均为黄杆菌纲与噬纤维菌纲类群,其在南大洋表层海水中所占比例高达72%(Glöckner et al, 1999),它们可以水解碳水化合物以及蛋白质等含氮有机物(Qin et al, 2010),为海洋中SAR11类群和 $\gamma$ -变形杆菌的生长提供营养(Williams et al, 2013)。

#### 3.2 不同培养条件下细菌分布特征与新颖性

本研究采用3种不同营养类型与浓度的培养基对表层海水细菌进行纯化培养。结果表明,与天然培养基(2216E和1/10 × 2216E)相比,合成培养基(GM)未筛选出拟杆菌门类群。大多数拟杆菌可以产生多种胞外降解酶(Qin et al, 2010),而酶的合成与分泌需要大量的资源,特别是氮的投入(Frankena et al, 1988)。我们推测该类群需要更多类型的营养物质来供给自身代谢需要,因此很难在单一营养的GM培养基中生长。然而,本研究中分离的芽孢杆菌只在GM培养基上生长,推测与其可以形成孢子来抵御营养成分单一等不良环境的特性有关(Liu et al, 2014b)。

不同营养浓度梯度培养结果显示,2216E培养的细菌数目与种类略低于1/10 × 2216E(数目:81株 vs. 89株;种类:27属 vs. 30属)。2种培养基上可培养细菌组成结构也显著不同,分别有8与11个属只在2216E与1/10 × 2216E培养基上分离得到,这可能与培养菌株的营养浓度有关(Li et al, 2021)。之前的研究表明,常规的海洋细菌培养基的营养浓度远高于海洋细菌的生长环境,比较适合生长速度快的细菌,对于生长速度慢的细菌可能有抑制作用(Zhuang et al, 2020)。例如, Schut等(1993)发现部分海洋细菌仅能在含10 mg/L碳浓度的培养基上形成菌落。因此,推测寡营养培养可以提高细菌的可培养率,同时增加细菌群落的多样性(Zhuang et al, 2020)。

研究共分离培养出26株可代表新分类单元的菌株,疑似新种率为18.2%,分属于3门4纲7目10科23属,以 $\alpha$ -变形菌类群为主。其中, *Parvularcula* sp. SbO06-11与*Muricauda* sp. SbO07-10的多相分类鉴

定工作已经全部完成(Dang et al, 2019; Sun et al, 2019)。进一步, 1/10 × 2216E与GM培养基获得可代表新分类单元新型菌株比例高于2216E培养基。因此, 在远洋海域可培养细菌样品的采集时, 可通过寡营养培养与改变营养类型来获得更丰富的可培养微生物资源。

### 3.3 海洋原位细菌群落的结构与多样性

借助于高通量测序技术, 我们检测到中印度洋与南海西部表层海水原位细菌优势门类为变形菌门、拟杆菌门、蓝细菌门和放线菌门, 这与先前的研究结果相符(Wang et al, 2016; Zhang et al, 2018)。然而, 我们发现中印度洋与南海西部表层海水中原位细菌群落结构显著不同( $P < 0.05$ )。与南海西部相比, 中印度洋表层海水中放线菌门相对丰度较高, 而厚壁菌门相对丰度较低(图4), 该结果与之前的文献报道结果一致(Wang et al, 2016; Yu et al, 2019)。放线菌在海洋中广泛存在, 可以产生大量的活性次级代谢产物, 在海洋有机物质降解过程中发挥着重要作用(Li et al, 2012), 被普遍认为是海洋药物开发和生物活性物质的重要微生物来源(Bull et al, 2005), 根据本研究结果推测中印度洋表层海水中蕴含着更为丰富的放线菌及相关活性代谢产物资源。

中印度洋与南海西部表层海水原位细菌除了在门水平存在差异, 在属水平上也有较大差异。相比于南海西部, 中印度洋表层海水中亚硫酸杆菌属相对丰度较高, 而嗜冷杆菌属和盐单孢属相对丰度则较低(图5)。先前有研究者指出亚硫酸杆菌属的细菌可能参与海洋的硫循环(Ivanova et al, 2004), 并且与海洋原油的生物降解密切相关(Brakstad et al, 2005), 在维持海洋生态稳定性方面发挥重要作用。而嗜冷杆菌属和盐单孢属则具有特殊的生理机制可以适应较为极端的环境。中印度洋与南海西部表层海水中原位细菌群落表现出的差异, 推测可能与洋流或原位环境影响有关(Li et al, 2018)。

### ORCID

夏呈强  <https://orcid.org/0000-0001-7439-7280>

### 参考文献

Brakstad OG, Lødeng AGG (2005) Microbial diversity during biodegradation of crude oil in seawater from the North Sea. *Microbial Ecology*, 49, 94–103.

- Bryant JA, Aylward FO, Eppley JM, Karl DM, Church MJ, DeLong EF (2016) Wind and sunlight shape microbial diversity in surface waters of the North Pacific Subtropical Gyre. *The ISME Journal*, 10, 1308–1322.
- Bull AT, Stach JEM, Ward AC, Goodfellow M (2005) Marine actinobacteria: Perspectives, challenges, future directions. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 87, 65–79.
- Caporaso JG, Kuczynski J, Stombaugh J, Bittinger K, Bushman FD, Costello EK, Fierer N, Peña AG, Goodrich JK, Gordon JI, Huttley GA, Kelley ST, Knights D, Koenig JE, Ley R, Lozupone CA, McDonald D, Muegge BD, Pirrung M, Reeder J, Sevinsky JR, Turnbaugh PJ, Walters WA, Widmann J, Yatsunenkov T, Zaneveld J, Knight R (2010) QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data. *Nature Methods*, 7, 335–336.
- Clarke KR (1993) Non-parametric multivariate analysis of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology*, 18, 117–143.
- Curson ARJ, Todd JD, Sullivan MJ, Johnston AWB (2011) Catabolism of dimethylsulphoniopropionate: Microorganisms, enzymes and genes. *Nature Reviews Microbiology*, 9, 849–859.
- Dang YR, Sun YY, Sun LL, Yuan XX, Li Y, Qin QL, Chen XL, Zhang YZ, Shi M, Zhang XY (2019) *Muricauda nanhaiensis* sp. nov., isolated from seawater of the South China Sea. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 69, 2089–2094.
- Du R, Yu M, Cheng JG, Zhang JJ, Tian XR, Zhang XH (2019) Diversity and sulfur oxidation characteristics of cultivable sulfur oxidizing bacteria in hydrothermal fields of Okinawa Trough. *Acta Microbiologica Sinica*, 59, 1036–1049. (in Chinese with English abstract) [杜瑞, 于敏, 程景广, 张静静, 田晓荣, 张晓华 (2019) 冲绳海槽热液区可培养硫氧化细菌多样性及其硫氧化特性. *微生物学报*, 59, 1036–1049.]
- Frankena J, van Verseveld HW, Stouthamer AH (1988) Substrate and energy costs of the production of exocellular enzymes by *Bacillus licheniformis*. *Biotechnology and Bioengineering*, 32, 803–812.
- Gauch HG, Scruggs WM (1980) Variants of Bray-Curtis polar ordination. *Vegetatio*, 40, 147–153.
- Glöckner FO, Fuchs BM, Amann R (1999) Bacterioplankton compositions of lakes and oceans: A first comparison based on fluorescence *in situ* hybridization. *Applied and Environmental Microbiology*, 65, 3721–3726.
- Goodfellow M, Fiedler HP (2010) A guide to successful bioprospecting: Informed by actinobacterial systematics. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 98, 119–142.
- Hanson CA, Fuhrman JA, Horner-Devine MC, Martiny JBH (2012) Beyond biogeographic patterns: Processes shaping the microbial landscape. *Nature Reviews Microbiology*, 10, 497–506.
- Ivanova EP, Gorshkova NM, Sawabe T, Zhukova NV, Hayashi

- K, Kurilenko VV, Alexeeva Y, Buljan V, Nicolau DV, Mikhailov VV, Christen R (2004) *Sulfitobacter delicatus* sp. nov. and *Sulfitobacter dubius* sp. nov., respectively from a starfish (*Stellaster equestris*) and sea grass (*Zostera marina*). *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 54, 475–480.
- Keylock CJ (2005) Simpson diversity and the Shannon-Wiener index as special cases of a generalized entropy. *Oikos*, 109, 203–207.
- Koblížek M, Bějá O, Bidigare RR, Christensen S, Benitez-Nelson B, Vetriani C, Kolber MK, Falkowski PG, Kolber ZS (2003) Isolation and characterization of *Erythrobacter* sp. strains from the upper ocean. *Archives of Microbiology*, 180, 327–338.
- Li HY, Chen MX, Jiao NZ (2012) The community composition of bacterioplankton at typical station in the Changjiang Estuary. *Acta Oceanologica Sinica*, 34, 183–188. (in Chinese) [李和阳, 陈明霞, 焦念志 (2012) 长江口典型站位浮游细菌类群的组成特征研究. *海洋学报(中文版)*, 34, 183–188.]
- Li Y, Sun LL, Sun ML, Su HN, Zhang XY, Xie BB, Chen XL, Zhang YZ, Qin QL (2018) Vertical and horizontal biogeographic patterns and major factors affecting bacterial communities in the open South China Sea. *Scientific Reports*, 8, 8800.
- Li Y, Wang ZB, Zhang XY, Dang YR, Sun LL, Zhang WP, Fu HH, Yang GP, Wang M, McMinn A, Chen XL, Chen Y, Wang S, Zhang YZ, Qin QL (2021) Experimental evidence for long-term coexistence of copiotrophic and oligotrophic bacteria in pelagic surface seawater. *Environmental Microbiology*, 23, 1162–1173.
- Lin Y, Liu RH, Zhou S, Zhu XY, Wang JY, Zhang XH (2021) Diversity of culturable heterotrophic bacteria from sediments of the Mariana Trench and their ability to degrade dimethylsulfoniopropionate (DMSP). *Acta Microbiologica Sinica*, 61, 828–844. (in Chinese with English abstract) [林钰, 刘荣华, 周顺, 朱晓雨, 王金燕, 张晓华 (2021) 马里亚纳海沟沉积物可培养异养细菌的多样性及其DMSP降解能力. *微生物学报*, 61, 828–844.]
- Liu JW, Yang HM, Zhao MX, Zhang XH (2014a) Spatial distribution patterns of benthic microbial communities along the Pearl Estuary, China. *Systematic and Applied Microbiology*, 37, 578–589.
- Liu YJ, Tian XP, Huang XF, Long LJ, Zhang S (2014b) Diversity of cultivable bacteria isolated from marine sediment environments in South China Sea. *Microbiology China*, 41, 661–673. (in Chinese with English abstract) [刘玉娟, 田新朋, 黄小芳, 龙丽娟, 张偲 (2014) 中国南海沉积环境可培养细菌多样性研究. *微生物学通报*, 41, 661–673.]
- Louca S, Parfrey LW, Doebeli M (2016) Decoupling function and taxonomy in the global ocean microbiome. *Science*, 353, 1272–1277.
- Qin QL, Zhang XY, Wang XM, Liu GM, Chen XL, Xie BB, Dang HY, Zhou BC, Yu J, Zhang YZ (2010) The complete genome of *Zumongwangia profunda* SM-A87 reveals its adaptation to the deep-sea environment and ecological role in sedimentary organic nitrogen degradation. *BMC Genomics*, 11, 247.
- Qu TD, Girtton JB, Whitehead JA (2006) Deepwater overflow through Luzon Strait. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 111, C01002.
- R Core Team (2016) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Rappé MS, Giovannoni SJ (2003) The uncultured microbial majority. *Annual Review of Microbiology*, 57, 369–394.
- Salazar G, Cornejo-Castillo FM, Benítez-Barrios V, Fraile-Nuez E, Álvarez-Salgado XA, Duarte CM, Gasol JM, Acinas SG (2016) Global diversity and biogeography of deep-sea pelagic prokaryotes. *The ISME Journal*, 10, 596–608.
- Schut F, de Vries EJ, Gottschal JC, Robertson BR, Harder W, Prins RA, Button DK (1993) Isolation of typical marine bacteria by dilution culture: Growth, maintenance, and characteristics of isolates under laboratory conditions. *Applied and Environmental Microbiology*, 59, 2150–2160.
- Su J, Ming HX, Chen QR, Zhang CX, Guan DM, Fan JF (2020) Analysis on bacterial diversity in Nansha deep-sea sediments. *Journal of Biology*, 37(1), 50–53. (in Chinese with English abstract) [苏洁, 明红霞, 陈泉睿, 张春鑫, 关道明, 樊景凤 (2020) 南沙海区深海沉积物中细菌多样性分析. *生物学杂志*, 37(1), 50–53.]
- Sun LL, Dang YR, Li Y, Qin QL, Su HN, Li PY, Chen XL, Zhang YZ, Zhang XY (2019) *Parvularcula marina* sp. nov., isolated from surface water of the South China Sea, and emended description of the genus *Parvularcula*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 69, 2571–2576.
- Wang J, Kan JJ, Borecki L, Zhang XD, Wang DX, Sun J (2016) A snapshot on spatial and vertical distribution of bacterial communities in the eastern Indian Ocean. *Acta Oceanologica Sinica*, 35, 85–93.
- Wang XW, Liu ZY, Peng SQ (2017) Impact of tidal mixing on water mass transformation and circulation in the South China Sea. *Journal of Physical Oceanography*, 47, 419–432.
- Williams TJ, Wilkins D, Long E, Evans F, DeMaere MZ, Raftery MJ, Cavicchioli R (2013) The role of planktonic Flavobacteria in processing algal organic matter in coastal East Antarctica revealed using metagenomics and metaproteomics. *Environmental Microbiology*, 15, 1302–1317.
- Yoon JH, Kang KH, Oh TK, Park YH (2004) *Erythrobacter aquimaris* sp. nov., isolated from sea water of a tidal flat of the Yellow Sea in Korea. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 54, 1981–1985.

夏呈强等: 中印度洋与南海西部表层海水细菌多样性

Yu QW, Hu LQ, Li F, Yi XX, Gao CH (2015) Diversity and biotoxicity of cultivable marine bacteria isolated from deep-sea sediment of the South China Sea. *Journal of Southern Agriculture*, 46, 2203–2208. (in Chinese with English abstract) [于清武, 胡丽琴, 李菲, 易湘茜, 高程海 (2015) 南海深海沉积物可培养细菌多样性及其生物毒性分析. *南方农业学报*, 46, 2203–2208.]

Yu SX, Wang YC, Li JL, Pang YL, Qin S (2019) Comparative analysis of bacteria communities from water and surface sediment in northern South China Sea. *Advances in Marine Science*, 37(1), 102–114. (in Chinese with English abstract) [于淑贤, 王寅初, 李佳霖, 庞云龙, 秦松 (2019) 南海北部水层间及沉积表层细菌群落的比较分析. *海洋科学进展*, 37(1), 102–114.]

Zhang Y, Li J, Cheng XH, Luo YF, Mai ZM, Zhang S (2018)

Community differentiation of bacterioplankton in the epipelagic layer in the South China Sea. *Ecology and Evolution*, 8, 4932–4948.

Zhuang K, Hu XJ, Cao YC, Xu YN, Zhang JS, Wen GL (2020) Bacterial community structure and its utilization characteristics of carbon sources in water of South China Sea under different low-nutrient culture conditions. *Microbiology China*, 47, 2697–2710. (in Chinese with English abstract) [庄康, 胡晓娟, 曹煜成, 许云娜, 张建设, 文国樑 (2020) 不同寡营养培养条件下南海水体细菌群落结构及其对碳源的利用特征. *微生物学通报*, 47, 2697–2710.]

(责任编辑: 东秀珠 责任编辑: 李会丽)

## 附录 Supplementary Material

### 附录1 中印度洋及南海西部研究站位示意图

Appendix 1 The research stations in the central Indian Ocean and the western South China Sea  
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021407-1.pdf>

### 附录2 基于16S rRNA基因序列构建中印度洋及南海西部表层海水可培养细菌的邻近系统发育树

Appendix 2 Neighbor-joining phylogenetic tree of cultivable bacteria isolated from the surface seawaters of the central Indian Ocean and the western South China Sea based on 16S rRNA gene sequences  
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021407-2.pdf>

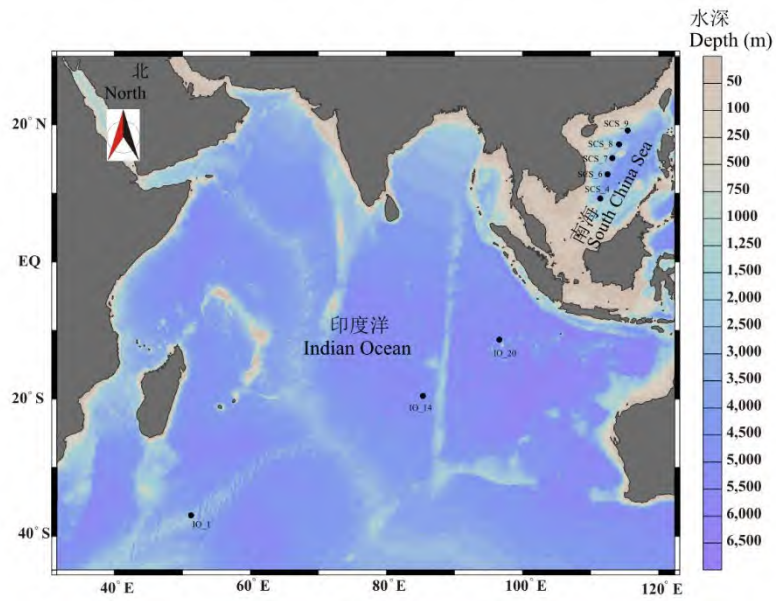
### 附录3 中印度洋和南海西部表层海水不同属的维恩分析

Appendix 3 Venn analysis of differential genera in the surface seawaters of the central Indian Ocean and the western South China Sea  
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021407-3.pdf>

### 附录4 印度洋及南海表层海水中潜在新型菌株

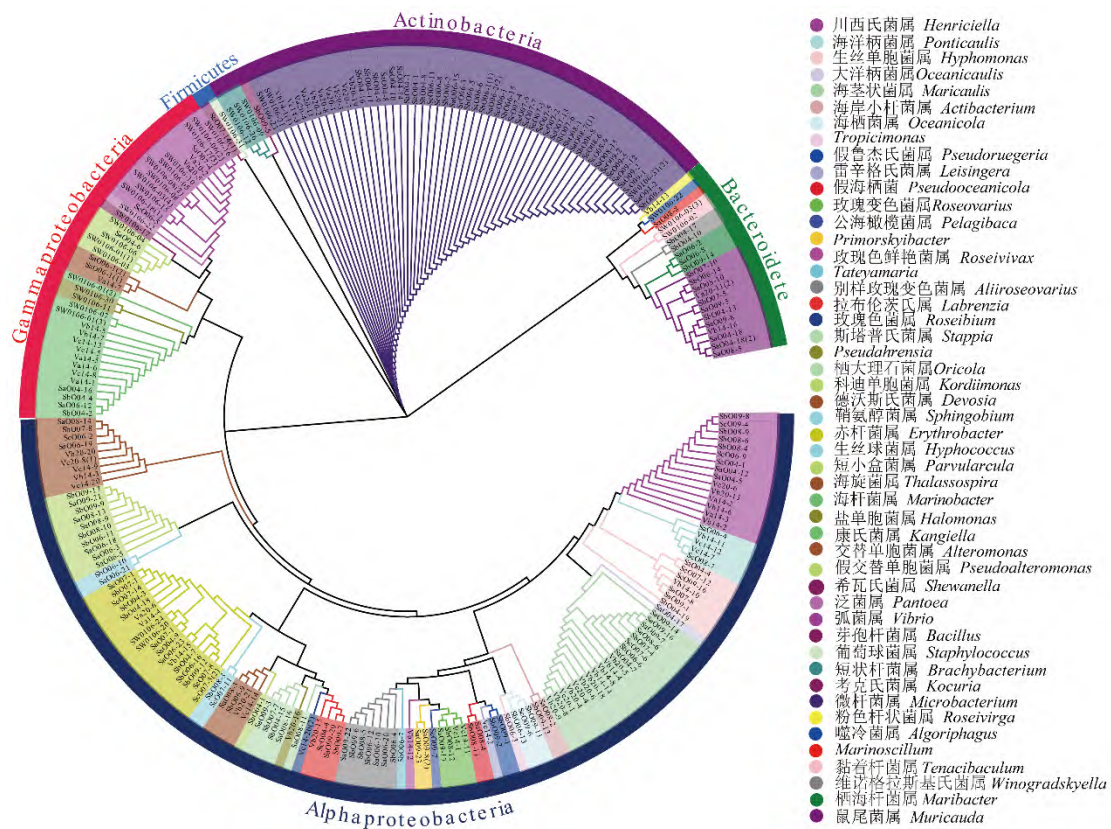
Appendix 4 Potential novel taxa of bacteria in the surface seawater of the central Indian Ocean and the western South China Sea  
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021407-4.pdf>



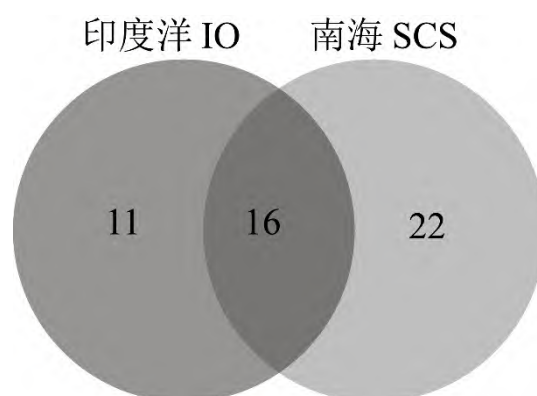


附录 1 中印度洋及南海西部研究站位示意图

Appendix 1 The research stations in the central Indian Ocean and the western South China Sea



附录2 基于16S rRNA基因序列构建中印度洋及南海西部表层海水可培养细菌的邻近系统发育树  
 Appendix 2 Neighbor-joining phylogenetic tree of cultivable bacteria isolated from the surface seawaters of the central Indian Ocean and the western South China Sea based on 16S rRNA gene sequences



附录3 中印度洋和南海西部表层海水不同属的韦恩分析

Appendix 3 Venn analysis of differential genera in the surface seawaters of the central Indian Ocean and the western South China Sea

附录4 印度洋及南海表层海水中潜在新型菌株

Appendix 4 Potential novel taxa of bacteria in the surface seawater of the central Indian Ocean and the western South China Sea

代表菌株 Strain	中文名称 Chinese name	相似菌株 Closest relatives	相似度 Similarity (%)	登录号 Accession number
SaO09-8	威廉港鼠尾菌	<i>Muricauda ruestringensis</i> DSM 13258	98.63	CP002999
ScO07-14 (1)	婴儿芽胞杆菌	<i>Bacillus infantis</i> NRRL B-14911	98.59	AY706935
ScO09-6	海滨范尼尔菌	<i>Vanniella litorea</i> DSM 29440	98.57	jgi.1107645
SaO06-4	深海海洋柄菌	<i>Ponticaulis profundi</i> YC239	98.51	MF039068
SbO04-7	普通钱培元菌	<i>Qipengyuania vulgaris</i> 022 2-10	98.31	AY706935
SbO07-7	解纤维素居海岸菌	<i>Oriicola cellulositytica</i> CC-AMH-0	98.15	KF582604
SbO04-3	南海赤杆菌	<i>Erythrobacter nanhaiensis</i> JLT1363	98.15	AEUE01000008
Vc14-20	碱蓬玫瑰色菌	<i>Roseibium suaedae</i> DSM 22153	98.14	jgi.1107719
SaO06-23	海水钱培元菌	<i>Qipengyuania aquimaris</i> SW-110	98.07	AY461441
SbO08-12	印度洋玫瑰变色菌	<i>Roseovarius indicus</i> B108	98.05	LAXI01000023
SbO06-7	海螺立山菌	<i>Tateyamaria omphalii</i> MKT107	97.87	AB193438
Va14-7	白色交替单胞菌	<i>Alteromonas alba</i> 190	97.72	MG856904
SaO06-1 (1)	大洋交替单胞菌	<i>Alteromonas oceani</i> S35	97.69	MF687202
SbO08-3	土壤新鞘氨醇菌	<i>Sphingobium soli</i> THG-SQA7	97.67	KM598233
ScO07-3	碱蓬赤杆菌	<i>Erythrobacter suaedae</i> GH3-15	97.49	MG905438
Vc14-2	雷辛格氏菌 (加词待译)	<i>Leisingera caerulea</i> DSM 24564(T)	97.38	KI421513
SaO08-2	解脲海岸小杆菌	<i>Actibacterium ureilyticum</i> LS-811	97.35	NSBT01000007
SbO09-2	海水假鲁杰氏菌	<i>Pseudoruegeria aquimaris</i> CECT 7680	97.11	FWFQ01000052
SbO09-13	紫色小红卵菌	<i>Rhodovulum iodosum</i> N1	96.76	Y15011
SbO06-10	黄色生丝球菌	<i>Hyphococcus flavus</i> HSF6	96.69	KX418769
SbO06-11	百慕大短小盒菌	<i>Parvularcula bermudensis</i> HTCC2503	96.52	AAMU01000003
SbO06-3	-	<i>Silicimonas algicola</i> KC90	95.36	KU926270
SbO07-10	-	<i>Muricauda ochracea</i> JGD-17	96.26	MN908334
SbO04-19	大西洋生丝单胞菌	<i>Hyphomonas atlantica</i> 22II1-22F38	95.20	AWFH01000061
Vb20-16	-	<i>Salaquimonas pukyongi</i> RR3-28	95.02	CP019044
SaO08-8	-	<i>Marinoscillum luteum</i> SJP7	93.29	HM161878





•技术与方法•

# 中国农田土壤动物长期监测样地科学调查监测的实施方法

高梅香<sup>1,2</sup>, 刘启龙<sup>3</sup>, 朱家祺<sup>1</sup>, 赵博宇<sup>4</sup>, 杜嘉<sup>4</sup>, 吴东辉<sup>4\*</sup>

1. 宁波大学地理与空间信息技术系, 浙江宁波 315211; 2. 宁波市高等学校协同创新中心“宁波陆海国土空间利用与治理协同创新中心”, 浙江宁波 315211; 3. 哈尔滨师范大学地理科学学院, 哈尔滨 150025; 4. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102

**摘要:** 我国农田土壤动物面临严峻的多样性丧失问题, 建设监测样地并开展长期监测是解决该问题的重要途径, 但至今国内外仍缺乏农田土壤动物长期监测样地科学调查监测的实施方法。依据BCI 50 ha大型固定样地建设规范, 参照我国已建成的森林和农田土壤动物大型固定样地监测经验, 本文提出了农田土壤动物长期监测样地科学调查监测的实施方法。首先, 需要明确科学问题, 确定科学调查监测应遵守的基本原则。其次, 需要规范长期调查监测涉及的专业术语, 依据研究目的和实际情况选择地点和样地, 参照建设规范和农田特征建立农田土壤动物大型固定样地。第三, 以研究农田土壤动物多样性为核心, 揭示土壤动物在农田生态系统健康和功能中的作用, 有选择性地开展4类27项科学指标的长期监测工作, 要求按照统一的、规范化的工作流程开展野外调查和室内实验。最后, 要科学规范地完成标本的鉴定描述和保存保管, 研发体现农田土壤动物特征的数据库和管理信息系统。希望本文的研究结果能推动我国乃至世界范围的规范化样地建设和标准化网络监测, 为我国农田土壤动物评估与保护提供长期可靠的数据支撑。

**关键词:** 农田生态系统; 土壤动物多样性; 土壤动物监测指标; 土壤动物监测方法; 生物多样性保护和利用

高梅香, 刘启龙, 朱家祺, 赵博宇, 杜嘉, 吴东辉 (2022) 中国农田土壤动物长期监测样地科学调查监测的实施方法. 生物多样性, 30, 21265. doi: 10.17520/biods.2021265.

Gao MX, Liu QL, Zhu JQ, Zhao BY, Du J, Wu DH (2022) Implementation protocol of scientific investigation and monitoring for permanent plots of agricultural soil animal in China. Biodiversity Science, 30, 21265. doi: 10.17520/biods.2021265.

## Implementation protocol of scientific investigation and monitoring for permanent plots of agricultural soil animal in China

Meixiang Gao<sup>1,2</sup>, Qilong Liu<sup>3</sup>, Jiaqi Zhu<sup>1</sup>, Boyu Zhao<sup>4</sup>, Jia Du<sup>4</sup>, Donghui Wu<sup>4\*</sup>

1 Department of Geography and Spatial Information Techniques, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211

2 Ningbo Universities Collaborative Innovation Center for Land and Marine Spatial Utilization and Governance Research at Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211

3 Geographical Science College, Harbin Normal University, Harbin 150025

4 Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102

### ABSTRACT

**Aims:** The soil ecosystem includes a lot of animals with representatives from almost all major taxa of terrestrial animals and may stand for one quarter of all currently described biodiversity. Nevertheless, biodiversity loss of soil animals has become a serious problem for agricultural ecosystems globally, especially in China. Though many solutions have been proposed, this problem has not been effectively tackled. Constructing permanent plots and monitoring them long-term has been regarded as an important and effective method for solving the challenge of soil animal biodiversity loss. However, we still know little about the implementation protocol of scientific investigation and monitoring of a permanent plot of agricultural soil animals, until now.

**Methods:** We propose the implementation protocol for scientific investigation and monitoring of permanent plots of

收稿日期: 2021-07-03; 接受日期: 2021-09-29

基金项目: 科技基础资源调查专项(2018FY100300)

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: wudonghui@iga.ac.cn

agricultural soil animals in this study. The plot establishment and field investigation design are conducted according to the field protocol of the 50-ha Forest Dynamics Plot on Barro Colorado Island (BCI), Panama. The field investigation and long-term monitoring are carried out according to prior research of forest and farmland utilizing large permanent plots of soil animal in China.

**Results:** First, we must confirm which scientific questions need to be solved and decide the basic principles to be observed for scientific investigation and monitoring in permanent plots of agricultural soil animals. Eighteen scientific questions have been proposed from a basic theory and practical application standpoint, and four basic principles have been proposed: integrating the needs and ideas of scientific research and agricultural practice, scientific setting and selecting monitoring indices, concerning spatio-temporal heterogeneity and detection probability of monitoring indices, and emphasizing the effects of agricultural productions and human activities. Second, we need to standardize the terminology for long-term investigation and monitoring, such as site, plot, square, sample and specimen. Sites and plots should be selected according to research objectives and study area, and priority should be given to sites that are representative of typical agricultural activities and regional climatic characteristics. Then, the large permanent plot of agricultural soil animal can be established in terms of BCI 50-ha field protocols. Third, focusing on soil animal biodiversity and its effects on agricultural ecosystem health and function, we need to carry out long-term monitoring for four-class and twenty-seven-item scientific indices. Moreover, the field investigation and laboratory experiment should be performed based on a unified and standardized workflow. For field investigation, the working processes include drawing detailed sampling point map, training all investigators, looking for and locating the permanent plot of agricultural soil animals in the field using GPS or other instruments, labeling the sampling points in the permanent plot, and collecting samples. For laboratory experiment, different extracting methods for soil animals should be used according to different taxa characteristics and research objectives. Finally, we need to identify, describe, and preserve specimens scientifically. Researching and developing database and management information system that encompass the characteristics of soil animal are recommended. This process will help with data invoking, checking, analyzing, and mining later.

**Conclusion:** This study systematically puts forward the implementation protocol of scientific investigation and long-term monitoring of permanent plots of agricultural soil animals. The implementation protocol can be widely applied to almost agricultural ecosystems in China and can be used effectively to investigate and monitor all taxa of soil animals. The results of this study will promote standardized plot construction and network monitoring in China, and globally, as well as provide reliable long-term scientific data support for the assessment and protection of agricultural soil animals in China.

**Key words:** agriculture ecosystem; soil animal biodiversity; monitoring index of soil animal; monitoring method of soil animal; biodiversity conservation and utilization

土壤动物是农田生态系统重要的生物组分, 高的多样性对于提高土壤质量、维持土壤健康和保障粮食安全至关重要(Bardgett & van der Putten, 2014; 孙新等, 2021)。随着人类活动干扰和环境变化的不断加剧, 全球农田土壤动物正面临生物多样性减少、丰富度降低、均质化加剧等严峻问题(Geisen et al, 2019; Marsden et al, 2020; Beaumelle et al, 2021)。我国农田土壤动物同样面临前所未有的挑战和威胁(张卫信等, 2020), 为了应对前述挑战, 亟需解决我国农田土壤动物的几个关键科学问题: 我国农田土壤动物多样性现状如何? 在全球气候变化和人类活动强烈干扰下其动态发展规律是什么? 这种动态发展规律的驱动因素是什么? 如何保护和维持我国农田土壤动物多样性的结构和功能? 如何通过管理土壤动物多样性达到改善和提高农田土

壤质量的目的? 然而, 我们至今仍无法回答这些关键科学问题的一个重要原因是缺少标准化的土壤动物长期监测样地及调查规范、监测指标, 缺少长期的、连续的和高质量的土壤动物数据。

建立农田土壤动物长期监测样地, 开展长期、连续、科学、标准化的调查监测, 评估农田土壤动物多样性动态变化规律, 是揭示全球气候变化和人类活动等复杂过程影响下农田土壤动物多样性维持机制的重要基础, 也是保护农田土壤动物多样性、提高农田土壤质量和维持农田土壤健康的重要前提(马克平, 2011; 潘开文等, 2016)。国际上, 欧盟、加拿大等国家和地区较早开展了区域性的农田生物多样性监测和评价工作, 如欧盟的农场景观异质性、生物多样性和生态系统服务国际网络计划(International Network on Farmed Landscape

Heterogeneity, Biodiversity and Ecosystem Services), 该计划在德国、法国、西班牙、英国和加拿大等国的8个农业区, 调查了鸟类、维管植物、蝴蝶、蜜蜂、食蚜蝇、步甲和蜘蛛等生物类群的多样性 (<https://www.farmland-biodiversity.org/index.php?subject=1&lang=en>)。一些西欧国家和埃及共同发起的“有机和低投入农田系统的生物多样性指标”(Biodiversity indicators for organic and low-input farming systems)项目, 调查了蚯蚓、维管植物、蜜蜂和蜘蛛等几个重要的农田生物类群(Dennis et al, 2009)。这些调查和监测工作同时兼顾了多个类群, 但均未将土壤动物作为主要研究对象, 国内外以土壤动物为研究对象的农田长期监测工作仍需完善和发展。

农田土壤动物的长期调查监测需应对更大的困难和挑战。不同于较早开展的植被、鸟类、蝴蝶等类群的调查监测, 土壤动物多样性的野外调查需要在不透明的、复杂的、三维的地下生境中, 调查体型微小的、移动性强的、数量丰富的土壤动物, 且后续的分离、分拣和鉴定也是耗时的、极具挑战性的工作, 这是目前全球农田土壤动物多样性监测工作相对困难和落后的主要原因之一。我国农田土壤动物长期监测工作起步相对较晚, 2015年在吉林省德惠市建设了我国第一个东北黑土农田土壤动物大型固定样地, 并开展了系统性的长期调查监测(刘洁等, 2017), 该样地对揭示我国东北黑土农田土壤动物多样性维持机制发挥了重要作用(Guo et al, 2019; Liu et al, 2019; Gao et al, 2021)。但在国家尺度上, 农田土壤动物长期监测样地尚未完善, 亟需在我国农业区建设监测网络并开展长期监测。

大型固定样地为生物多样性长期调查监测提供了有效平台(马克平, 2008), 该类样地监测面积大、监测周期长、建设和监测标准统一, 为解决生物多样性关键科学问题提供了有效途径(Condit, 1995)。中国从2004年开始建设了基于大型监测样地的中国森林生物多样性监测网络(CForBio, [www.cfobiodiv.org](http://www.cfobiodiv.org)), 该平台的研究成果在探讨森林物种分布格局和生物多样性维持机制等方面做出了重要贡献(马克平和徐学红, 2020)。我国学者已经基于森林大型固定样地开展了较长时间的土壤动物多样性监测与研究(Gao et al, 2017, 2018; 高梅香

等, 2018a, b), 积累了一定的认识, 但缺乏基于农田土壤动物大型固定样地的研究(刘洁等, 2017; Liu et al, 2019), 国际上相关样地的建设、监测和研究成果更是少见。依据BCI (Barro Colorado Island) 50-ha大型固定样地建设规范(Condit, 1995), 参照我国森林和农田土壤动物大型固定样地的建设和监测经验(刘洁等, 2017; Gao et al, 2018), 本文将阐述农田土壤动物长期监测样地的建设及监测方案, 以期推动我国乃至世界农田土壤动物多样性监测工作的开展。

## 1 科学问题和基本原则

### 1.1 拟解决的科学问题

农田土壤动物长期监测样地拟解决的科学问题为: 阐明农田土壤动物多样性的基本特征、动态变化规律、维持机制和功能作用, 揭示全球变化、人类活动和生物多样性入侵等多重胁迫下农田土壤动物多样性的响应规律和驱动机制, 为保护和维持农田土壤动物多样性、维持和改善土壤健康等科学实践和管理决策提供理论指导。以下从两方面来叙述拟解决的具体科学问题:

(1)在基础理论方面。主要以农田土壤动物多样性为核心, 在物种、功能和遗传多样性等多个维度上, 阐明土壤动物多样性的时空格局及其动态变化规律, 说明多样性与自然环境因子之间的相互作用关系, 揭示多样性的维持机制, 研究多样性的时空尺度依赖性, 阐明多样性对农田生态系统功能的作用, 揭示土壤动物多样性对土壤修复、土壤健康和粮食安全的作用等(Box 1, I-1到I-8)。说明土壤动物多样性与农业耕种历史、人类持续活动和社会生产需求之间的关系, 揭示在全球变化和人类活动等多重胁迫下农田土壤动物多样性的动态变化规律, 阐明该动态变化的关键驱动因子和内在机理, 从区域性、社会性和系统性的视角为土壤动物多样性保护提供理论指导(Box 1, I-9到I-13)。

(2)在实践应用方面。将科学研究获得的理论知识和方法技术相结合, 应用于具体的多样性维护、农田管理和生产实践中, 以提高农田土壤动物多样性、维持多样性的稳定性、发挥多样性的多功能为基本目标, 以期在改善农田土壤质量、调控农业病虫害、发展生态农业、实现绿色生产和保障粮食安全等方面发挥作用(Box 1, II-1到II-5)。



### Box 1 农田土壤动物长期监测样地拟解决的科学问题(英文对照见附录1)

#### 基础理论

- I-1 我国农田土壤动物多样性的现状如何? 其物种、功能和遗传多样性有何特征?
- I-2 我国农田土壤动物 $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $\gamma$ 多样性的时空格局是什么? 形成和维持这些时空格局的机制是什么?
- I-3 我国农田土壤动物多样性与自然因子、人类活动如何相互作用? 农田中强烈的人类活动是否改变了土壤动物与自然环境之间的相互作用关系?
- I-4 我国不同农业区农田土壤动物多样性的时空格局是什么? 形成和维持不同农业区土壤动物多样性时空格局的因子和机制是什么?
- I-5 土壤动物多样性与农田生态系统的生产力和稳定性有什么关系? 土壤动物多样性对农田生态系统的生产力和稳定性有什么作用?
- I-6 农田土壤动物多样性的生态系统功能表现在哪些方面? 在强烈人类活动干扰下农田土壤动物多样性的生态系统功能如何动态响应和变化?
- I-7 土壤动物多样性与其他类群多样性有何关系(如土壤微生物、田鼠、鸟类、授粉昆虫、植株害虫)? 土壤动物与其他类群多样性的级联效应与关键生态系统功能(如作物产量、碳固持)存在怎样的内在联系? 其作用机制是什么?
- I-8 全球变化背景下土壤动物与作物、其他动物物候规律的匹配度如何? 这种匹配度有怎样的动态变化规律? 其背后机制是什么?
- I-9 我国农田土壤动物多样性在农业开发历史过程中发生了怎样的变化? 哪些物种对农业活动响应敏感? 哪些物种适应强烈的农业活动?
- I-10 我国不同农业区农田土壤动物多样性的变化规律是什么? 哪些物种及哪些区域是土壤动物多样性保护的热点?
- I-11 人类活动是否导致农田土壤动物多样性的均质化现象? 哪些农业区的均质化现象最明显? 从局域到区域尺度应对农田土壤动物均质化现象的对策是什么?
- I-12 在当前农业管理模式和未来可能的气候变化情景下,我国农田土壤动物多样性会怎样变化和响应? 不同农业区的农田土壤动物如何变化和响应? 应该如何高效地监测和预测这些变化和响应?
- I-13 土壤动物多样性指示农田生态系统健康的关键生态系统功能有哪些?

#### 实践应用

- II-1 哪些实践活动可以提高和维持农田土壤动物多样性? 如何有效指导农户和当地相关部门提高和维持农田土壤动物多样性?
- II-2 哪些实践活动可以维持土壤动物多样性的稳定性、抗干扰性和持续性? 如何指导农户和当地相关部门维持农田土壤动物多样性的稳定性、抗干扰性和持续性?
- II-3 哪些实践活动可以维持和发挥农田土壤动物多样性的功能,如维持较高生产力、调控害虫、维持生态平衡等?
- II-4 哪些以土壤动物多样性为核心的实践活动可以提高土壤质量、维持土壤健康和提高粮食产量? 如何通过指导实践活动达成前述目标?
- II-5 哪些以土壤动物多样性为核心的实践活动可以促进生态农业旅游发展、提高农民收入和维持乡村稳定?

## 1.2 应遵守的基本原则

农田土壤动物长期监测样地的建设和监测应遵循如下原则:

(1)整合科学研究和农业实践两方面的需求与理念。目前生物多样性监测网络较多关注科学研究方面的需求,这对于揭示生物多样性维持机制、阐明生物多样性与生态系统稳定性关系、明确生物多样性的功能作用、预测生物多样性对多重胁迫的响应有突出贡献。但农田生态系统还兼具生产、生活

与服务功能,农田健康和农业持续是粮食生产和人类福祉的基础保障,所以农田土壤动物长期监测不能忽视农业实践这一重要过程。只有秉持科学研究和农业实践双赢的需求和理念,才能获得更有科学和社会价值的监测数据,才能为生物多样性保护和人类健康提供高质量的、可靠的数据积累(万宏伟等,2013)。

(2)科学地设置和筛选监测指标。必须保证农田土壤动物长期监测数据的质量,这是实现科学研究



与农业实践双赢的基础前提, 监测指标的数量和质量直接影响监测数据质量。少而精的监测指标能实现具体和灵活的监测工作, 所获数据能满足科学研究和农业实践的基本需求, 优点是可获得针对单个类群的高质量和高精度数据, 维持和运行长期监测的任务轻且投入小, 缺点是无法全面反映土壤动物多样性的整体规律和变化。多而全的监测指标能实现系统和全面的监测工作, 所获数据能满足科学研究和农业实践的深度需求, 优点是可获得生物多样性整体的现状和变化规律, 缺点是不得不简化针对单个类群的监测内容, 导致监测数据的精度无法满足单个类群研究的需求, 且维持和运行长期监测的任务重、投入大。因此, 建立农田土壤动物多样性长期监测指标体系时, 需要对监测指标进行科学的设置、评估与筛选(万宏伟等, 2013)。

(3)关注监测指标的时空异质性和检出概率。不同物种具有不同的时空分布特征, 单个物种在其分布区内也存在明显的时空异质性。因此, 长期监测样地的面积、位置及监测时间和方法, 均会影响监测指标的检出概率和准确度、精确度。所以, 建设农田土壤动物长期监测样地要科学与合理地设置样地数量、面积、位置及监测时间和方法, 兼顾监测指标的时空异质性, 提高监测指标的检出概率和准确度、精确度(万宏伟等, 2013)。

(4)重视农业生产和人类活动的影响。农田土壤动物受强烈、持续的农业生产和人类活动影响(Bandeira et al, 2020; Mcinga et al, 2020), 因此农田土壤动物的长期监测要重视与农业生产和人类活动相关的监测指标, 这是在农田生态系统监测土壤动物多样性的独特之处。

## 2 建设方案

### 2.1 样地建设和监测的专业术语

农田土壤动物长期监测样地由若干个农田土壤动物大型固定样地组成, 单个大型固定样地涉及以下几个专业术语: 地点、样地、样方、样品和标本(图1)。

(1)地点。指的是大型固定样地所在的地点, 如商丘市9 ha农田土壤动物大型固定样地的地点为我国河南省商丘市(33°44′–34°52′ N, 116°39′–144°49′ E)(图1a)。

(2)样地。指的是大型固定样地, 如已建成的商丘市9 ha农田土壤动物大型固定样地(34°30′ N, 115°35′ E)(图1b)。

(3)样方。指的是在大型固定样地内划分的样方, 包括最小样方和实际调查样方。最小样方指的是该大型固定样地建设的最小空间粒度的样方, 如商丘市9 ha农田土壤动物大型固定样地是按照5 m为间隔进行划分的, 划分出了3,600个5 m × 5 m的小样方, 则该大型固定样地的最小样方为5 m × 5 m。实际调查样方指的是根据研究目的而设计的实际调查样方大小, 如在商丘市9 ha农田土壤动物大型固定样地内, 根据研究目的需要以20 m为间隔调查中型土壤动物样品, 则该样地内的225个20 m × 20 m的样方即为实际调查样方; 又如设置5个10 m × 10 m的小样方以调查蚯蚓群落, 则这5个10 m × 10 m的小样方即为实际调查样方。所以, 对于一个农田土壤动物大型固定样地来说, 最小样方的面积在样地建设之初是固定的, 具有相对的稳定性, 当然后期也可以进一步细化最小样方面积; 而实际调查样方的大小则是根据研究目的进行调整和设置的, 具有相对的灵活性和变异性(图1c)。

(4)样品。指的是在样地内使用一定的调查和监测方法获得的实验样品, 如使用内径为7 cm的土钻挖取的0–15 cm土壤样品, 使用直径为7 cm的陷阱捕获的地表节肢动物样品, 这里的土壤样品和地表节肢动物样品都被称为样品(图1d)。

(5)标本。指的是对采集的样品进行实验处理之后获取的标本, 例如从一个0–15 cm土壤样品中分离出来的所有跳虫标本, 使用陷阱捕获到的所有地表节肢动物标本(图1e)。

### 2.2 农田环境及地点的选择

选择和确定农田环境及地点是建设农田土壤动物长期监测样地首先要考虑的问题, 应选择具有代表性的农田环境及地点。所谓代表性, 是指在该农田环境和地点进行的农业生产活动能体现该区域的人类活动特征和气候环境特征。例如, 已经完成和正在建设的我国4个农田土壤动物大型固定样地, 便体现了其分布区域农业生产活动的典型特征(表1)。分布在不同地点的农田土壤动物大型固定样地, 构成了建设标准统一、监测方法规范的中国农田土壤动物长期监测网络。

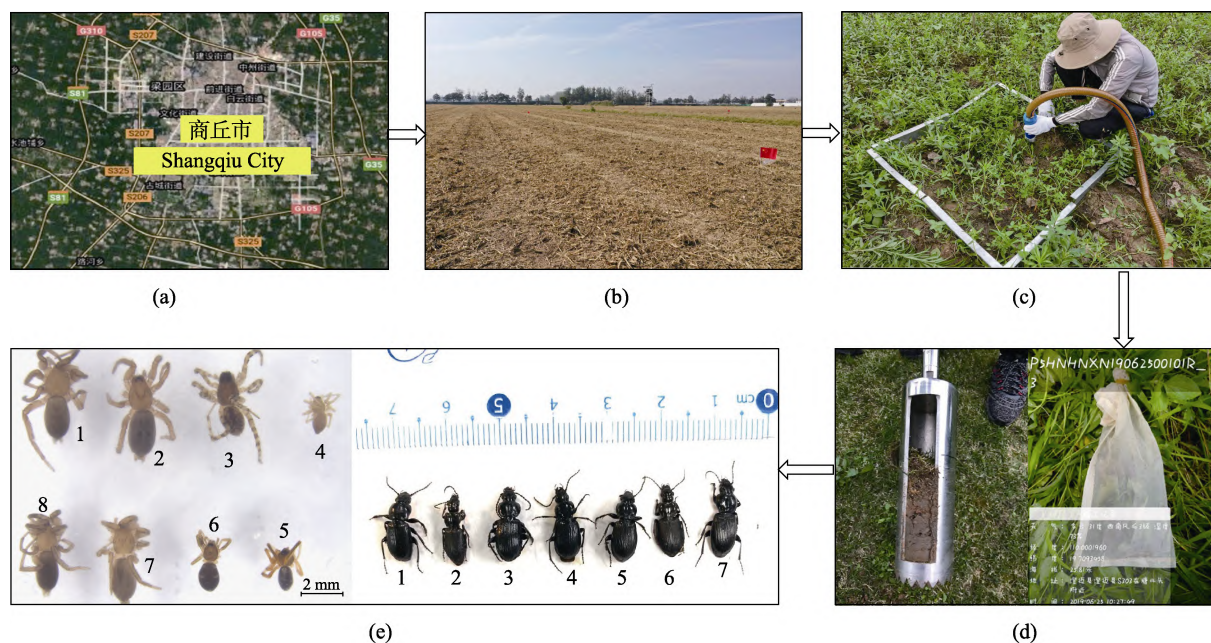


图1 农田土壤动物长期监测样地建设和监测的基本概念。(a)、(b)、(c)、(d)和(e)分别为地点、样地、样方、样品和标本。图片(e)中的数字代表每只动物的序号。

Fig. 1 Basic conceptions of constructing and monitoring in agricultural soil animal permanent plot. (a), (b), (c), (d) and (e) represent site, plot, square, sample and specimen, respectively. The numbers labeled in picture (e) represent animal's orders.

表1 中国东部农区农田土壤动物大型固定样地的基本信息

Table 1 Basic information in permanent plots of agricultural soil animal in agricultural regions in eastern China

区域 Area	空间坐标 Space coordinates	样地名称 Plot name	地点 Location	土壤类型 Soil type	耕作模式 Farming mode
东北平原 Northeast Plain	44°52' N, 125°72' E	德惠黑土农田土壤动物大型固定样地 Large Permanent Plot of Soil Animal in Black Soil Farmland in Dehui	吉林省德惠市 Dehui City, Jilin Province	黑土 Black soil	旱地, 玉米 Dry land, corn
华北平原 North China Plain	34°30' N, 115°35' E	商丘潮土农田土壤动物大型固定样地 Large Permanent Plot of Soil Animal in Fluvo-aquic Soil Farmland in Shangqiu	河南省商丘市 Shangqiu City, Henan Province	潮土 Fluvo-aquic soil	旱地, 小麦-玉米轮作 Dry land, wheat-corn rotation
长江中下游平原 The plains of the middle and lower reaches of the Yangtze River	29°76' N, 121°56' E	宁波黄壤农田土壤动物大型固定样地 Large Permanent Plot of Soil Animal in Yellow Soil Farmland in Ningbo	浙江省宁波市 Ningbo City, Zhejiang Province	黄壤 Yellow soil	小麦-水稻轮作 Wheat-rice rotation
珠江三角洲 Pearl River Delta	23°18' N, 114°48' E	惠州红壤农田土壤动物大型固定样地 Large Permanent Plot of Soil Animal in Red Soil Farmland in Huizhou	广东省惠州市 Huizhou City, Guangdong Province	红壤 Red soil	小麦-水稻轮作 Wheat-rice rotation

### 2.3 样地的选择

确定农田土壤动物大型固定样地的农田环境和地点之后, 在当地典型的农田生态系统中选择与设置大型固定样地。依据BCI 50 ha大型固定样地建设规范(Condit, 1995), 参照我国森林和农田土壤动物大型固定样地的建设和监测经验(刘洁等, 2017; Gao et al, 2018), 考虑农田生态系统和农田土壤动物的特征, 建议将农田土壤动物大型固定样地的基

本面积设置为300 m × 300 m。森林大型固定样地的面积多为1–60 ha (投影面积) (许涵等, 2015), 农田土壤动物大型固定样地的基本面积也是可变的。受到野外农田环境复杂性和所有权、使用权等限制, 可以根据需要和实际情况设置相对面积更大或更小的样地。需尽量保证样地为正方形, 这有利于后续的统计分析和数据挖掘。选择样地的原则如下:

(1)典型性。研究者需参考航片、地形图、统计



年鉴等资料, 并与当地农户、专家和相关部门等交流, 通过多次野外踏查来考察地形地貌、土壤类型、种植方式、管理方式等特点, 确保样地在气候、土壤、地形、耕作历史、耕作模式、作物类型等方面具有所在区域的典型性和代表性。当然, 为了扩大和丰富农田土壤动物长期监测样地的类型和监测内容, 也可以选择那些不具有典型性、却具有鲜明特色和发展潜力的农田来建设样地, 如油菜、花生、马铃薯农田等。

(2)完整性。指的是农田面积需占样地总面积的90%以上, 样地尽量不要被道路、河流、村庄及其他生境斑块(如湿地、林地)等分割。样地最好远离村庄、河流、畜禽场所等, 避免这些场所对样地建设和长期监测带来的潜在影响。

(3)便利性。样地所在位置和基础设施要便于野外长期调查监测。样地建设和后续的长期监测需要大量的工具和材料, 采集的样品量较大, 如果交通不便或基础设施无保障, 一方面会增加工作的难度, 另一方面会降低长期监测的效率, 从而降低调查和监测数据的质量。

(4)监测和保护的持续性。多次调查和长期监测是实现数据长期积累的重要前提。建议将农田设置在农业站或生态站等长期监测平台内, 一方面这些平台有齐全的本底和历史资料, 有助于深入挖掘监测数据并解决相关科学问题; 另一方面这些平台有长期稳定的运行机制, 有助于保证样地的完整性和持久性。如果所选择区域没有可供选择的农业站或生态站, 可以和农户、相关部门等签订长期租赁合同。

(5)面积、形状和方向的一致性。可根据所选择农田的实际情况进行设计和建设。土壤动物大型固定样地的面积通常为9 ha, 根据需要可以设置更大或更小的样地。形状尽量为正方形, 样地的建设即单元格网的走向最好与田垄走向保持一致。

## 2.4 样地的建设

以商丘市9 ha农田土壤动物大型固定样地为例, 其建设流程如下:

(1)布设样地控制网。森林大型固定样地内胸径 $\geq 1$  cm的木本植物都被进行了定位和调查(Condit, 1995), 但农田大型固定样地内无法对所有的土壤动物个体进行定位和调查。可以将其分割成大量的较小样方进行调查以达到类似效果, 根据需要可将

最小样方定义为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 、 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 、 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 、 $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ 甚至更小。农田土壤动物大型固定样地的最小样方并没有固定面积, 显然最小样方的面积越小越能详尽地揭示土壤动物多样性特征, 但也要考虑测绘精度、测量误差和研究目的等方面。所以在选择的商丘市样地内布设控制网时, 首先使用经纬仪和RTK选取1个面积为 $300\text{ m} \times 300\text{ m}$ 的样地, 然后将样地划分成3,600个 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 的最小样方; 该 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 的最小样方并非固定, 将来可以将其进一步划分为面积更小的最小样方。然后标注该样地内所有网格交叉点的空间位置和空间坐标, 标注样地内所有特殊地物的空间坐标, 如水井、供电箱、电线杆等。

(2)测量样地和布置地面控制点。选择样地的1个顶点(如西南角顶点)作为该样地的坐标原点, 记为O点(0, 0), 实地测量该原点的地理坐标、海拔高度、周围地形特征等数据。农田土壤动物大型固定样地至少需测量4个地面控制点, 包括3个永久和1个备用地面控制点。精确地选择和布置地面控制点, 既是样地长期监测过程中再放样的精准参照, 也是对全球所有样地进行精准定位和大尺度分析的关键信息。地面控制点可以作为样地的永久地标, 建议布设在大型固定样地的外围, 最好同时具备地物标记明显、不易发生变动、容易寻找和再定位的典型特征。使用经纬仪和RTK精准确定每个地面控制点的坐标, 然后做永久标记。可以采用以下几种方法永久标记地面控制点: (1)将永久地标埋设于地表。在地下挖出大小合适的土坑, 埋设用来做标记的水泥桩, 在露出地面的水泥桩上进行地理标记。该方法的缺点是过于明显, 若影响到当地人的正常生产活动, 很容易被当地农民移除。(2)将永久地标埋设于地下。在地下挖取1 m深的土坑, 然后灌注满水泥, 待稍干后进行地理标记。其优点是不易被发现, 但若是遇到当地农户更改土地利用方式, 该地标也会被发现、破坏和移除。(3)使用干石灰做标记, 俗称灰桩。使用土钻打出深度为1 m的土坑, 在土坑内灌满粉末状干石灰。优点是标记时间持久, 即便是上层土壤被挖取或移除(只要深度不超过1 m), 下层石灰仍可起到永久标记的作用(附录2)。

(3)绘制室内地形图和设计图。基于AutoCAD等软件, 生成商丘市农田土壤动物大型固定样地完

整的地形图和设计图, 包括等高线、地物特征符号和规则格网等(附录3), 然后将该空间信息传输到RTK中。

(4)野外放样和定位。使用经纬仪和RTK放样, 将所有的样点都放到农田大型固定样地中, 误差控制在3–5 cm。在每个样点插上临时空间地标, 如红色小旗、彩色园艺标签等(附录4)。这些临时地标仅用于野外调查, 调查结束后可移除。

(5)检查样地和拍摄图片。样地建设完毕后对所有空间样点进行整理和检查, 对于需要添加和修改的空间样点进行再次测绘和放样, 为后续调查工作做充分准备。使用无人机拍摄农田土壤动物大型固

定样地的整体图片, 使用普通相机获得多个不同视角、体现不同特征的图片, 用于后期数据库建设和数据挖掘工作(附录4)。

### 3 监测指标体系和监测方法

#### 3.1 监测项目和监测指标

根据农田土壤动物长期监测样地的总体目标和拟解决的科学问题, 我们提出一个以农田土壤动物多样性为核心, 兼顾土壤动物在农田生态系统健康和功能中作用, 包括4类27项具体指标的监测指标体系(表2)。表2中, I是农田土壤动物多样性野外调查内容和监测指标, 其目的是获取物种和功能多

表2 农田土壤动物长期监测样地中的获取指标

Table 2 Collected indices obtained from agricultural soil animal permanent plot

类别 Type	序号 No.	监测对象 Monitoring object	监测指标 Index	获取途径 Acquiring source	调查必要性 Necessity of investigation
I	1	土壤动物群落物种组成 Species composition of soil animal community	土壤动物物种名录 Species list of soil animal community	野外取样和室内分析 Field sampling and laboratory analysis	必须 Essential
	2	土壤动物多度 Soil animal abundance	生物量和密度 Biomass and density	野外取样和室内分析 Field sampling and laboratory analysis	必须 Essential
	3	物种功能性状 Species functional trait	体长、体宽、翅长等 Length, width, wing length, etc. (依据不同类群特征确定 Selecting according to the characteristics of target group)	野外取样、室内分析、文献检索 Field sampling, laboratory analysis and literature retrieval	必须 Essential
	4	多样性 Diversity	$\alpha$ 多样性、 $\beta$ 多样性、 $\gamma$ 多样性、物种丰富度、物种均匀度、功能多样性、遗传多样性 $\alpha$ diversity, $\beta$ diversity, $\gamma$ diversity, species richness, species evenness, functional diversity and genetic diversity	计算分析 Calculation and analysis	必须 Essential
II	5	微生物多样性 Microbial diversity	分类操作单元 Operational taxonomic units (OTUs)	野外取样和室内分析 Field sampling and laboratory analysis	可选 Selectable
	6	啮齿动物多样性 Rodent diversity	物种数、个体数、生物量、活动时间、物种多样性指数、功能性状指数等 Species richness, individual, biomass, activity time, species diversity index, functional trait index, etc.	野外调查和社会调研 Field sampling and social investigation	可选 Selectable
	7	植株上的昆虫多样性 Insect diversity in plant	物种数、个体数、物种多样性指数、功能性状指数等 Species richness, individual, species diversity index, functional trait index, etc.	野外取样和室内分析 Field sampling and laboratory analysis	可选 Selectable
	8	鸟类多样性 Bird diversity	物种数、个体数、生物量、活动时间、物种多样性指数、功能性状指数等 Species richness, individual, biomass, activity time, species diversity index, functional trait index, etc.	野外取样和室内分析 Field sampling and laboratory analysis	可选 Selectable
	9	蝴蝶多样性 Butterfly diversity	物种数、个体数、生物量、活动时间、物种多样性指数、功能性状指数等 Species richness, individual, biomass, activity time, species diversity index, functional trait index, etc.	野外取样, 室内分析 Field sampling and laboratory analysis	可选 Selectable
	10	授粉者多样性 Pollinator diversity	物种数、个体数、生物量、活动时间、物种多样性指数、功能性状指数等 Species richness, individual, biomass, activity time, species diversity index, functional trait index, etc.	野外取样, 室内分析 Field sampling and laboratory analysis	可选 Selectable
	11	害虫多样性 Pest diversity	物种数、个体数、生物量、活动时间、物种多样性指数、功能性状指数等 Species richness, individual, biomass, activity time, species diversity index, functional trait index, etc.	野外取样和室内分析 Field sampling and laboratory analysis	可选 Selectable



表2 (续) Table 2 (continued)

类别 Type	序号 No.	监测对象 Monitoring object	监测指标 Index	获取途径 Acquiring source	调查必要性 Necessity of investigation
III	12	土壤碳、氮、磷储量 Carbon, nitrogen and phosphorus reserves in soil	土壤碳、氮、磷含量 Soil carbon, nitrogen and phosphorus content	野外取样和室内分析 Field sampling and laboratory analysis	必须 Essential
	13	土壤养分 Soil nutrient	全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾、pH等 Total N, total P, total K, available N, available P, available K, soil pH, etc.	野外取样、室内分析、台站共享、无人机遥感等 Field sampling, laboratory analysis, data share by ecological station, unmanned aerial remote sensing, etc.	必须 Essential
	14	土壤微量元素和重金属元素 Trace element and heavy metal element in soil	全锰、有效锰、全锌、有效锌、全铜、有效铜、全铁、有效铁等 Total Mn, available Mn, total Zn, available Zn, total Cu, available Cu, total Fe, available Fe, etc.	野外取样、室内分析、台站共享等 Field sampling, laboratory analysis, data share by ecological station, etc.	可选 Selectable
	15	土壤物理性质 Soil physical property	土壤类型、质地、孔隙度、含水量、容重、机械组成、土层深度等 Soil type, texture, porosity, water content, bulk density, mechanical composition, soil depth, etc.	野外取样、室内分析、台站共享、无人机遥感等 Field sampling, laboratory analysis, data share by ecological station, unmanned aerial remote sensing, etc.	必须 Essential
	16	土壤速效微量元素 Soil available trace element	有效铁、有效铜、有效锰、有效锌等 Available Fe, available Cu, available Mn, available Zn, etc.	野外取样、室内分析、台站共享等 Field sampling, laboratory analysis, data share by ecological station, etc.	可选 Selectable
	17	土壤可溶性盐 Soil soluble salt	碳酸根、重碳酸根、硫酸根、氯根、钙离子、镁离子、钾离子、钠离子、全盐量、电导率等 Carbonate, bicarbonate, sulfate radical, chloride, calcium ion, magnesium ion, potassium ion, sodium ion, total salt content, conductivity, etc.	野外取样、室内分析、台站共享等 Field sampling, laboratory analysis, data share by ecological station, etc.	可选 Selectable
	18	农作物基本要素 Basic element of crop	作物种类、名称、品种、播种面积、单产、总产、产值、根部生物量、农田的复种指数、轮作体系等 Crop type, name, variety, sown area, yield, total yield, production value, root biomass, multiple cropping index of farmland, rotation system, etc.	野外取样、室内分析、台站共享、无人机遥感等 Field sampling, laboratory analysis, data share by ecological station, unmanned aerial remote sensing, etc.	必须 Essential
	19	空间坐标 Space coordinates	样地的空间坐标、样品的空间坐标 Space coordinates of the site, space coordinates of the sample	野外测量 Field survey	必须 Essential
	20	地形因素 Topographic factor	海拔、坡向、坡度、地表起伏度等 Elevation, aspect, slope, relief degree of land surface, etc.	现场勘测和DEM数据计算获得 Site survey and calculation from DEM data	必须 Essential
	21	土地利用 Land use	土地利用类型、强度、历史等 Land use type, intensity, history, etc.	遥感、社会调查、文献检索 Remote sensing, social survey and document retrieval	必须 Essential
22	景观因素 Landscape factor	斑块面积、斑块密度、景观分离指数、Shannon多样性指数 Patch area, patch density, landscape separation index and Shannon's diversity index	遥感 Remote sensing	可选 Selectable	
23	地史进化因素 Geographical evolution factor	地质历史和进化历史 Geological and evolutionary history	文献检索和谱系分析 Document retrieval and phylogenetic analysis	可选 Selectable	
IV	24	社会经济因素 Socioeconomic factor	人口数量、生活来源、人均收入、学校数量、人口老龄化指标等 Population size, source of income, per capita income, no. of schools, population aging indicators, etc.	社会调研、年鉴统计、资料检索 Social investigation, statistical yearbook and document retrieval	必须 Essential
	25	肥料投入情况 Fertilizer inputs	施用肥料名称、作物生育时期、施用日期、施用方式、施用量、含氮量、含磷量、含钾量等 Name of fertilizer, crop growth period, application date, application method, application amount, nitrogen content, phosphorus content, potassium content, etc.	野外采样和台站共享 Field sampling and data share by ecological station	必须 Essential
	26	农药、除草剂、生长剂投入情况 Inputs of pesticide, herbicide, growth promoter	施用药剂名称、主要有效成分、施用日期、施用量、施用方式等 Drug name, main active ingredient, application date, application amount, application method, etc.	野外采样和台站共享 Field sampling and data share by ecological station	必须 Essential
	27	灌溉制度 Irrigation system	灌溉时间、作物生育期、灌溉水源、灌溉方式、灌溉水量等 Irrigation time, crop growth period, irrigation water source, irrigation method, irrigation water volume, etc.	野外采样, 台站共享 Field sampling and data share by ecological station	必须 Essential

多样性指标, 其调查必要性均为必选; II是农田生态系统健康和关键生态系统功能指标, 其目的是获取土壤动物与农田健康和功能紧密相关的重要指标, 其调查必要性均为可选, 可依据研究目的选择是否长期监测; III是关键环境因子指标, 其目的是获取与土壤动物多样性维持、功能作用等相关的自然环境指标, 其调查必要性为必选和可选; IV为人类管理行为和社会经济影响指标, 其目的是获取土壤动物对人类活动响应相关的指标, 因为农田土壤动物受人类活动的强烈干扰和影响, 所以这些指标为必选。

### 3.2 野外调查和监测流程

野外调查之前首先确定调查的样点数量、类群、方法、时间和人员等, 制定详细的野外调查方案和工作计划, 并绘制详细的采样方案布点图(图2)。图2a为农田土壤动物长期固定样地调查时通用的样点布点方案, 这首先是参照CTFS土壤采样方案进行的规划与设计, 便于与全球森林生物多样性监测网络(CTFS, <http://www.ctfs.si.edu/>)和中国森林生物多样性监测网络(CForBio, [www.cfbi.org/](http://www.cfbi.org/))的样地数据进行对比(Anderson-Teixeira et al, 2015; 马克平, 2015); 其次CTFS土壤取样设计结合了规

则采样和随机采样方法, 鉴于土壤动物室内鉴定及相关分析的复杂性、耗时性, 考虑减少对农田土壤破坏的目的, 农田土壤动物长期固定样地采样方案仅保留了CTFS土壤取样设计中的规则采样方法。图2b和图2c为根据调查目的的可选方案。图2b为调查商丘农田土壤动物长期固定样地内蚯蚓多样性的采样方案布点图, 常用的手拣法会对农田土壤产生强干扰, 也会对农作物带来破坏性影响, 故不宜采用高密度的空间样点布点方案, 当然在非作物生长季节可以根据实验目的适当增加采样点。图2c为采集不同体型土壤生物的空间样点布点方案。当同时采集大型(蚯蚓)、中小型(甲螨)、微型(线虫)土壤动物和土壤微生物时, 因为不同体型土壤动物的移动能力和空间自相关距离不同, 若采用图2a和图2b中的等间距空间样点布点方案, 便难以反映不同体型土壤动物的空间格局特征, 尤其是体型较小的微型土壤动物和土壤微生物, 故推荐采用兼顾不同体型土壤动物的镶嵌式采样方案(Bahram et al, 2015)。

农田土壤动物长期监测样地的调查监测需要较多的工作人员相互配合、协调工作, 为了保证调查过程、操作流程的规范性、标准性及调查结果的

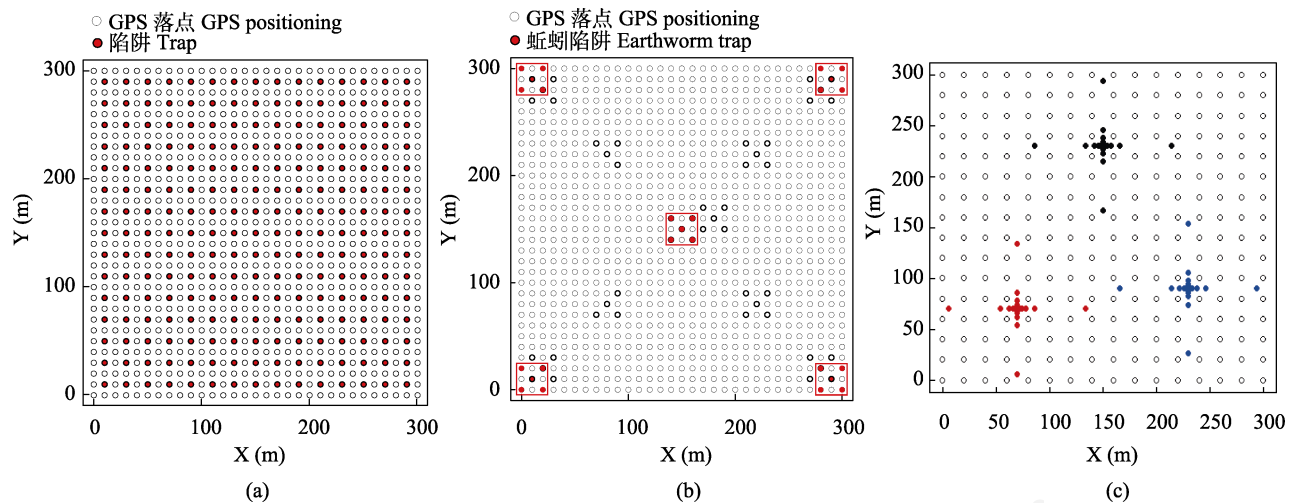


图2 农田土壤动物大型固定样地采样方案。(a)农田土壤动物长期监测样地调查时的通用方案(白点代表以10 m为间隔的采样点, 红点代表以20 m为间隔的采样点); (b)在商丘市农田土壤动物大型固定样地调查蚯蚓的采样方案(红框和红点分别为蚯蚓采样区域和采样点); (c)在商丘市农田土壤动物大型固定样地调查中型土壤动物(螨和跳虫)、小型土壤动物(线虫)和微生物的采样方案(红点、蓝点和黑点为采样点)

Fig. 2 Sampling plan in large permanent plot of agricultural soil animal. (a) shows the normal sampling plan in permanent plot of agricultural soil animal (the white dots represent sampling points spaced at 10 m intervals; the red dots represent sampling points spaced at 20 m intervals); (b) shows the sampling plan for earthworms in permanent plot of agricultural soil animal in Shangqiu City (red squares and red dots represent sampling areas and sampling points for earthworm); (c) shows the sampling plan for soil mesofauna (mite and springtail), soil microfauna (nematode) and microorganisms in permanent plot of agricultural animal in Shangqiu (red, blue and black dots represent sampling points).

精准性、严谨性, 需对调查人员进行系统的技术培训。野外调查监测的工作流程如下:

(1) 将事先规划好的路径信息导入GPS或手机App, 寻找和定位设计好的农田土壤动物大型固定样地。将绘制的图件信息导入RTK, 根据设计的采样方案布点图放样, 精度控制在3-5 cm, 同时在每个采样点安置临时空间地标作为标记。

(2) 根据调查方案采集样品。可使用土柱法、陷阱法采集中小型土壤动物, 手拣法、筛网法采集大型土壤动物, 陷阱法、诱捕法、吸虫器法等采集地表节肢动物。同时采集表2中列举的调查必要性为“必须”的指标, 可根据研究目的有选择地调查必要性为“可选”的指标。

完成调查取样后, 收集、整理并清点实验材料, 并务必将挖取的土坑填平, 最大限度地减少对农田样地的干扰和破坏。

### 3.3 室内分拣标本

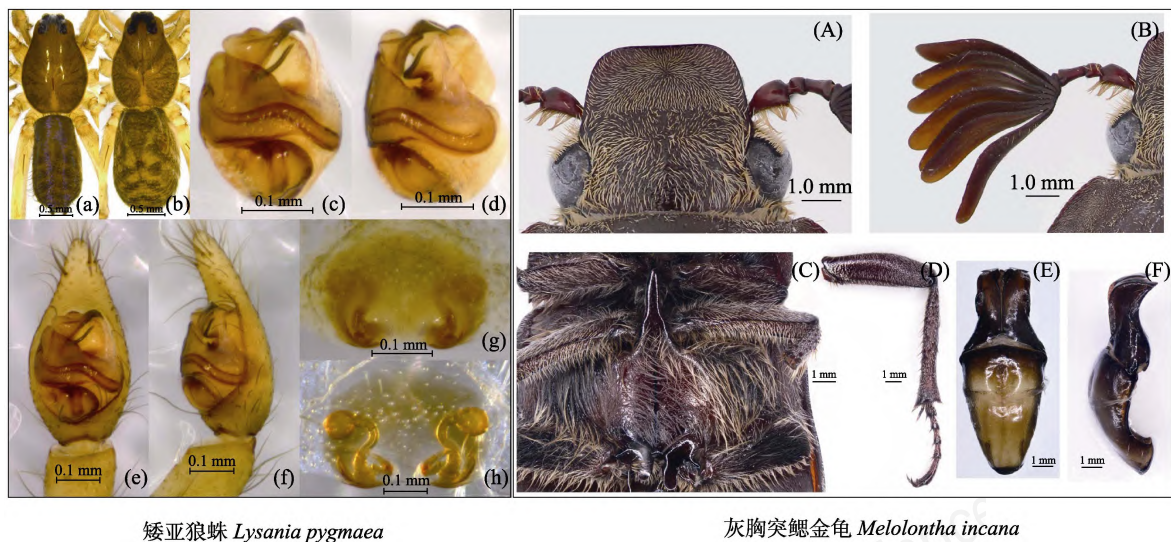
在保证分离效率的前提下, 根据研究目的和类群特征采用规范的方法分拣标本。如采用Tullgren干漏斗法分离中型土壤动物标本, 湿漏斗法、蔗糖离心法等分离微型土壤动物标本, 手拣法分离大型

土壤动物标本。针对需进行DNA分析的土壤动物标本, 野外采集当天多使用分析纯酒精保存。对于体型较大的土壤动物(如蜘蛛、甲虫和蚂蚁), 因为其自身的含水量会稀释酒精从而影响DNA分析结果, 可在第二天更换为75%酒精保存。若后续样品用于同位素分析, 可将样品放入饱和食盐水中, 并置于-20℃冰箱保存备用。

## 4 标本鉴定保存、数据库建设和管理系统开发

### 4.1 标本的鉴定与描述

农田土壤动物长期监测样地的所有标本和数据, 都需要进行规范化、标准化和系统化管理。规范化地进行物种鉴定与信息描述, 包括样地编号、生物界门、纲、目、科、属和种名等信息。按拉丁语正规写法书写生物分类单位, 按双名法的格式书写种名, 描述界、门、纲、目、科、属和种的中文名信息, 规范填写物种描述相关信息数据表(附录5)并拍摄物种特征照片(图3)。这种规范化描述与管理有助于对大量数据进行规范存储、信息管理、长期保存和数据挖掘, 便于和国内外学者开展深度的交



矮亚狼蛛 *Lysania pygmaea*

灰胸突鳃金龟 *Melolontha incana*

图3 农田土壤动物长期监测样地内物种特征照片(以矮亚狼蛛和灰胸突鳃金龟为例)。(a)雄蛛背面观;(b)雌蛛背面观;(c)雄蛛触肢器生殖球腹面观;(d)雄蛛触肢器生殖球外侧观;(e)雄蛛触肢器腹面观;(f)雄蛛触肢器外侧观;(g)外雌器腹面观;(h)外雌器背面观。(A)头;(B)触角;(C)中胸腹突;(D)后足;(E)雄外生殖器背面观;(F)雄外生殖器侧面观。

Fig. 3 Species characteristic photos in permanent plot of agricultural soil animal (take *Lysania pygmaea* and *Melolontha incana* for example). (a) Male in dorsal view; (b) Female in dorsal view; (c) Male palp bulb in ventral view; (d) Male palp bulb in tetrolateral view; (e) Male palp in ventral view; (f) Male palp in retrolateral view; (g) Epigynum in ventral view; (h) Epigynum in retrolateral view. (A) Head in dorsal view; (B) Antennae; (C) Mesosternum process; (D) Hind leg; (E) Male genitalia in dorsal view; (F) Male genitalia in lateral view.



流合作。

#### 4.2 标本的保存和保管

标本包括实物标本和电子标本。实物标本为野外采集的土壤动物标本实体, 依据不同类群的特征和研究目的采用多种形式保存, 如用玻片标本保存跳虫, 液浸标本保存蜘蛛, 针插标本保存甲虫等。保存时注意明确保存地点、保存单位、联系人等信息。

电子标本指以图片形式保存和保管的所有标本。包括物种特征照片(图3)、单个物种照片(附录6A)和群落内所有物种的照片(附录6B)等。电子标本可保存于采集单位, 也可保存于数据共享平台。需明确电子标本的保存规范, 包括完整标本的照片或图片、添加比例尺、标准化命名等, 同时需规范电子标本的存储格式和大小等基本信息。电子标本是农田土壤动物长期监测样地重要的标本保存形式, 可为土壤动物标本的数字化展示、数字化展馆建设、智能科普教育及基于人工智能的深度挖掘等提供重要信息。

#### 4.3 数据库的建设与维护

中国农田土壤动物长期监测样地的调查监测会获取海量的多源异构数据资料, 需要建立规范的数据库进行统一存档管理, 便于后续的调用、查看、共享和深度挖掘等, 这是目前我国土壤动物数据科学管理与应用的现实需要, 也是我国土壤动物学服务农业持续发展和农田土壤健康的基本保障。建库流程包括软硬件准备工作、数据收集与整理、异构数据标准化、数据汇总与拼接、质量检查、数据库参数设置、数据入库、数据库运行和测试等。我国科学家正努力推动中国生物多样性大数据平台(马克平等, 2018)和农业生物多样性大数据平台(许哲平等, 2019)的建设工作, 中国农田土壤动物长期监测样地的数据库建设除了考虑土壤动物、农区生态环境的特征之外, 还要充分考虑与现有平台的对接和整合, 这将极大地发挥农田土壤动物数据库在科学研究、农业发展和社会经济领域的作用与价值。

数据库可以采用Geodatabase模型, 基于大型关系数据库SQLServer存储和管理土壤动物物种多样性数据, 以ArcSDE引擎为中间件进行空间数据库的操作; 建立时空动态GIS数据管理机制, 实现对土壤动物多样性历史库和现时库数据的动态统一

管理。在数据库中, 创建表单和数据图层。对数据库及其中的表单和图层进行参数设置, 包括数据的数学精度和属性字段长度、空间参考、数据库的存储空间等参数设置。依据ArcSDE+成熟商业数据库的空间数据管理技术, 将数据进行分析 and 分类, 进行数据库框架设计。通过ArcSDE空间数据引擎, 数据管理员和用户可与成熟商业数据库进行紧密连接, 实现数据有效、快速存取(图4)。

#### 4.4 管理信息系统的研发

设计与研发农田土壤动物长期监测样地综合管理信息系统至关重要, 这个系统能够真实、准确、科学、高效地管理采集的数据, 实现对数据、人员、设施、调查活动的综合管理, 提高农田土壤动物长期监测样地建设的效率及监测数据资源的共享能力, 将成为深入挖掘农田土壤动物数据和解决农田面临问题的重要平台。

在符合数据库管理机制的基础上, 系统在C#环境下, 基于ArcGIS嵌入式开发组件ArcEngine开发, 采用Windows操作模式设计系统界面, 同时基于WebGIS进行网络发布以期实现远程访问开发管理系统, 实现不同级别的安全认证; 在Windows系统下, 基于WebGIS技术, 开发地图发布系统, 实现土壤动物多样性数据库的发布、浏览、查询、分析等功能。管理信息系统通过汇集、管理信息资源, 应用海量图形管理技术和地图引擎驱动技术, 为土壤

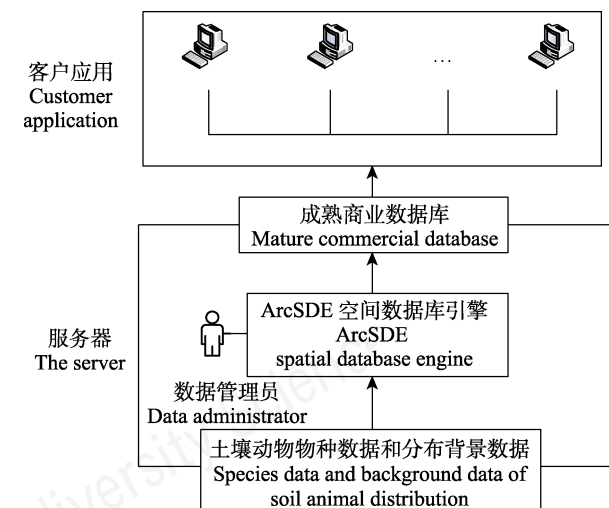


图4 农田土壤动物长期监测样地数据库框架  
Fig. 4 Database framework for permanent plot of agricultural soil animal



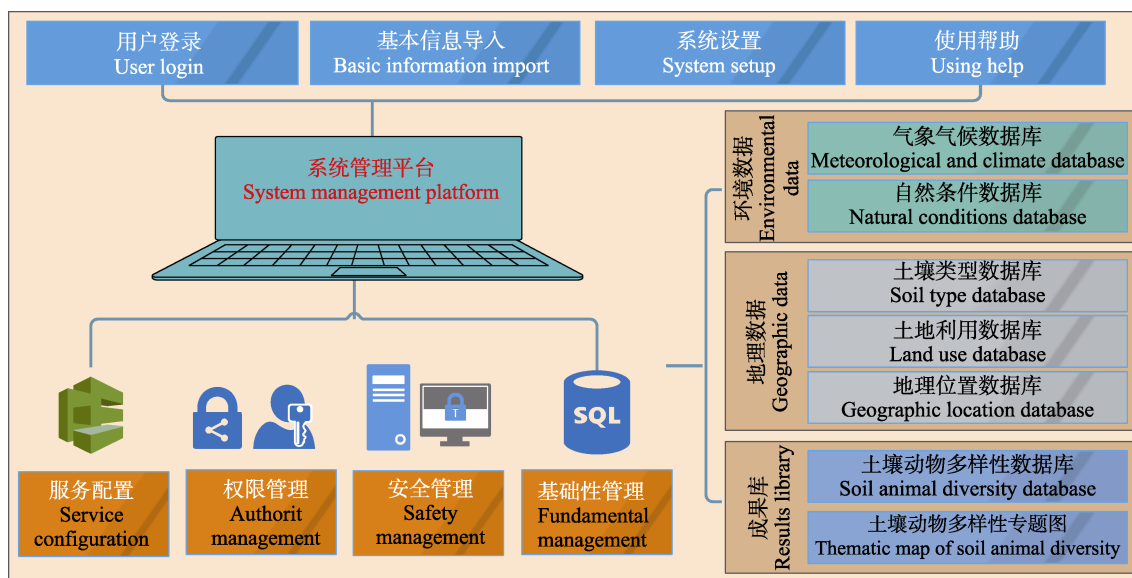


图5 农田土壤动物管理信息系统的系统管理功能  
Fig. 5 System management functions of agricultural soil animal management information system

动物多样性数据提供可视化、智能化的支持。主要功能包括系统管理、数据管理、数据服务、应用服务、工具服务等功能(图5)。

## 5 结语

土壤动物多样性的调查监测越来越受到研究人员、科研机构和相关单位的重视, 为了应对国内外缺乏农田土壤动物长期监测样地和调查规范现状, 本文提出了中国农田土壤动物长期监测样地的实施方案。该实施方案可以在我国几乎所有的农田生态系统实施和应用, 可以有效调查几乎所有类群的农田土壤动物。基于该方案将有望建立规范化的我国农田土壤动物长期监测网络, 将获取标准化、规范化、长期的海量数据资料, 在数据库、管理信息系统、人工智能等现代技术的支撑下, 我国农田土壤动物研究将有望率先进入数据科学时代; 将为土壤动物学、农业生态学、土壤生态学研究提供重要的第一手资料, 为解决我国农业重要科学问题和重大战略问题提供重要的数据支撑和决策依据。

**致谢:** 感谢中国科学院植物研究所马克平研究员提出的宝贵意见, 感谢沈阳农业大学方红、西南大学张志升、河北大学张超和吉林大学王军老师以及中

国科学院东北地理与农业生态研究所刘冬研究员提供的图片资料, 感谢西南大学段美春老师提供的文献资料。

## ORCID

高梅香 <https://orcid.org/0000-0002-5841-9918>  
杜嘉 <https://orcid.org/0000-0003-3590-6358>  
吴东辉 <https://orcid.org/0000-0001-8778-0107>

## 参考文献

- Anderson-Teixeira KJ, Davies SJ, Bennett AC, Gonzalez-Akre EB, Muller-Landau HC, Wright SJ, Abu SK, Almeyda Zambrano AM, Alonso A, Baltzer JL, Basset Y, Bourg NA, Broadbent EN, Brockelman WY, Bunyavejchewin S, Burslem DFRP, Butt N, Cao M, Cardenas D, Chuyong GB, Clay K, Cordell S, Dattaraja HS, Deng XB, Detto M, Du XJ, Duque A, Erikson DL, Ewango CEN, Fischer GA, Fletcher C, Foster RB, Giardina CP, Gilbert GS, Gunatilleke N, Gunatilleke S, Hao ZQ, Hargrove WW, Hart TB, Hau BCH, He FL, Hoffman FM, Howe RW, Hubbell SP, Inman-Narahari FM, Jansen PA, Jiang MX, Johnson DJ, Kanzaki M, Kassim AR, Kenfack D, Kibet S, Kinnaird MF, Korte L, Kral K, Kumar J, Larson AJ, Li YD, Li XK, Liu SR, Lum SKY, Lutz JA, Ma KP, Maddalena DM, Makana JR, Malhi Y, Marthews T, Mat Serudin R, McMahon SM, McShea WJ, Memiaghe HR, Mi XC, Mizuno T, Morecroft M, Myers JA, Novotny V, de Oliveira AA, Ong PS, Orwig DA, Ostertag R, den Ouden J, Parker GG, Phillips RP, Sack L, Sainge MN, Sang WG, Sri-Ngernyuan K, Sukumar R, Sun IF, Sungpalee W, Suresh HS, Tan S, Thomas SC,

- Thomas DW, Thompson J, Turner BL, Uriarte M, Valencia R, Vallejo MI, Vicentini A, Vrška T, Wang XH, Wang XG, Weiblen G, Wolf A, Xu H, Yap S, Zimmerman J (2015) CTFS-ForestGEO: A worldwide network monitoring forests in an era of global change. *Global Change Biology*, 21, 528–549.
- Bahram M, Kohout P, Anslan S, Harend H, Abarenkov K, Tedersoo L (2015) Stochastic distribution of small soil eukaryotes resulting from high dispersal and drift in a local environment. *The ISME Journal*, 10, 885–896.
- Bandeira FO, Alves PRL, Hennig TB, Schiehl A, Cardoso EJBN, Baretta D (2020) Toxicity of imidacloprid to the earthworm *Eisenia andrei* and collembolan *Folsomia candida* in three contrasting tropical soils. *Journal of Soils and Sediments*, 20, 1997–2007.
- Bardgett RD, van der Putten WH (2014) Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, 515, 505–511.
- Beaumelle L, Thouvenot L, Hines J, Jochum M, Eisenhauer N, Phillips HRP (2021) Soil fauna diversity and chemical stressors: A review of knowledge gaps and roadmap for future research. *Ecography*, 44, 845–859.
- Condit R (1995) Research in large, long-term tropical forest plots. *Trends in Ecology & Evolution*, 10, 18–22.
- Dennis P, Arndorfer M, Balázs K, Bailey D, Boller B, Bunce RGH, Centeri C, Orporaal A, Cuming D, Deconchat M, Dramstad W, Elyakime B, Falusi E, Fjellstad W, Fraser MD, Freyer B, Friedel JK, Geijzendorffer I, Jongman R, Kainz M, Marcos GM, Gomiero T, Grausgruber-Gröger S, Herzog F, Hofer G, Jeanneret P, Kelemen E, Kölliker R, Moakes SR, Nicholas P, Paoletti MG, Podmaniczky L, Pointereau P, Sarthou JP, Siebrecht N, Sommaggio D, Stoyanova SD, Teufelbauer N, Viaggi D, Vialatte A, Walter T, Widmer F, Wolfrum S (2009) Conceptual foundations for biodiversity indicator selection for organic and low-input farming systems. Indicators for biodiversity in organic and low-input farming systems. <https://cordis.europa.eu/project/id/227161/reporting>.
- Gao MX, Cheng SS, Ni JP, Lin L, Lu TY, Wu DH (2017) Negative spatial and coexistence patterns and species associations are uncommon for carrion beetles (Coleoptera: Silphidae) at a small scale. *European Journal of Soil Biology*, 83, 52–57.
- Gao MX, Guo YX, Liu J, Liu JW, Adl S, Wu DH, Lu TY (2021) Contrasting beta diversity of spiders, carabids, and ants at local and regional scales in a black soil region, Northeast China. *Soil Ecology Letters*, 3, 103–114.
- Gao MX, Sun X, Qiao ZH, Hou HY, Lu TY, Wu DH, Jin GZ (2018) Distinct patterns suggest that assembly processes differ for dominant arthropods in above-ground and below-ground ecosystems. *Pedobiologia*, 69, 17–28.
- Gao MX, Zhang C, Qiao ZH, Hou HY, Jin GZ, Lu TY, Wu DH (2018a) Metacommunity patterns of ground-beetle assemblages in two mixed broad-leaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) forests in the Xiao Xing'an Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 5636–5648. (in Chinese with English abstract) [高梅香, 张超, 乔志宏, 侯宏宇, 金光泽, 卢廷玉, 吴东辉 (2018a) 小兴安岭阔叶红松林地表甲虫 Metacommunity格局. *生态学报*, 38, 5636–5648.]
- Gao MX, Zhu JY, Ni JP, Li JK, Lin L, Wu DH (2018b) Beta diversities of ground-beetle assemblages in two broad-leaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forests in Xiaoxing'an Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 457–463. (in Chinese with English abstract) [高梅香, 朱纪元, 倪娟平, 李景科, 林琳, 吴东辉 (2018b) 小兴安岭阔叶红松林地表甲虫Beta多样性. *生态学报*, 38, 457–463.]
- Geisen S, Wall DH, van der Putten WH (2019) Challenges and opportunities for soil biodiversity in the anthropocene. *Current Biology*, 29, R1036–R1044.
- Guo YX, Gao MX, Liu J, Zaitsev AS, Wu DH (2019) Disentangling the drivers of ground-dwelling macro-arthropod metacommunity structure at two different spatial scales. *Soil Biology and Biochemistry*, 130, 55–62.
- Liu J, Gao MX, Ma YL, Sun X, Zhu XY, Adl S, Wu DH (2019) Spatial and environmental factors are minor structuring forces in a soil Collembola metacommunity in a maize agroecosystem. *Pedobiologia*, 76, 150572.
- Liu J, Gao MX, Wu DH (2017) Characteristics of ground-dwelling soil macro-arthropod communities in a biodiversity monitoring plot of black soil cropland, Northeastern China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 28, 3965–3975. (in Chinese with English abstract) [刘洁, 高梅香, 吴东辉 (2017) 基于黑土农田生物多样性监测样地的地表大型节肢动物群落特征. *应用生态学报*, 28, 3965–3975.]
- Ma KP (2008) Large scale permanent plots: Important platform for long term research on biodiversity in forest ecosystem. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32, 237. (in Chinese) [马克平 (2008) 大型固定样地: 森林生物多样性定位研究的平台. *植物生态学报*, 32, 237.]
- Ma KP (2011) Assessing progress of biodiversity conservation with monitoring approach. *Biodiversity Science*, 19, 125–126. (in Chinese) [马克平 (2011) 监测是评估生物多样性保护进展的有效途径. *生物多样性*, 19, 125–126.]
- Ma KP (2015) Biodiversity monitoring in China: From CForBio to Sino BON. *Biodiversity Science*, 23, 1–2. (in Chinese) [马克平 (2015) 中国生物多样性监测网络建设: 从CForBio到Sino BON. *生物多样性*, 23, 1–2.]
- Ma KP, Xu XH (2020) Chinese Forest Biodiversity Monitoring Network well developed for community assembly studies. *Scientia Sinica Vitae*, 50, 359–361. (in Chinese) [马克平, 徐学红 (2020) 中国森林生物多样性监测网络有力支撑生物群落维持机制研究. *中国科学: 生命科学*, 50, 359–361.]
- Ma KP, Zhu M, Ji LQ, Ma JC, Guo QH, Ouyang ZY, Zhu L (2018) Establishing China infrastructure for big biodiversity data. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 33,

- 838–845. (in Chinese with English abstract) [马克平, 朱敏, 纪力强, 马俊才, 郭庆华, 欧阳志云, 朱丽 (2018) 中国生物多样性大数据平台建设. 中国科学院院刊, 33, 838–845.]
- Marsden C, Martin-Chave A, Cortet J, Hedde M, Capowicz Y (2020) How agroforestry systems influence soil fauna and their functions—A review. *Plant and Soil*, 453, 29–44.
- Mcinga S, Muzangwa L, Janhi K, Mnkeni PNS (2020) Conservation agriculture practices can improve earthworm species richness and abundance in the semi-arid climate of eastern cape, South Africa. *Agriculture*, 10, 1–12.
- Pan KW, Zhang L, Shao YH, Fu SL (2016) Thematic monitoring network of soil fauna diversity in China: Exploring the mystery of soils. *Biodiversity Science*, 24, 1234–1239. (in Chinese with English abstract) [潘开文, 张林, 邵元虎, 傅声雷 (2016) 中国土壤动物多样性监测: 探知土壤中的奥秘. 生物多样性, 24, 1234–1239.]
- Sun X, Li Q, Yao HF, Liu MQ, Wu DH, Zhu D, Zhu YG (2021) Soil fauna and soil health. *Acta Pedologica Sinica*, doi: 10.11766/trxb202012290717. (in Chinese with English abstract) [孙新, 李琪, 姚海凤, 刘满强, 吴东辉, 朱冬, 朱永官 (2021) 土壤动物与土壤健康. 土壤学报. doi: 10.11766/trxb202012290717.]
- Wan HW, Pan QM, Bai YF (2013) China grassland biodiversity monitoring network: Indicators and implementation plan. *Biodiversity Science*, 21, 639–650. (in Chinese with English abstract) [万宏伟, 潘庆民, 白永飞 (2013) 中国草地生物多样性监测网络的指标体系及实施方案. 生物多样性, 21, 639–650.]
- Xu H, Li YD, Lin MX, Wu JH, Luo TS, Zhou Z, Chen DX, Yang H, Li GJ, Liu SR (2015) Community characteristics of a 60 ha dynamics plot in the tropical montane rain forest in Jianfengling, Hainan Island. *Biodiversity Science*, 23, 192–201. (in Chinese with English abstract) [许涵, 李意德, 林明献, 吴建辉, 骆士寿, 周璋, 陈德祥, 杨怀, 李广建, 刘世荣 (2015) 海南尖峰岭热带山地雨林60 ha动态监测样地群落结构特征. 生物多样性, 23, 192–201.]
- Xu ZP, Shao ZT, Zhu XJ, Wang F, Wang YY, Xiao M, Ma KP (2019) Big data portal development in agrobiodiversity: Current research and future outlooks. *Journal of Agricultural Big Data*, 1, 76–87. (in Chinese with English abstract) [许哲平, 邵曾婷, 朱学军, 王昉, 王媛媛, 肖曼, 马克平 (2019) 农业生物多样性大数据平台建设研究和展望. 农业大数据学报, 1, 76–87.]
- Zhang WX, Shen ZF, Shao YH, Shi LL, Liu SJ, Shi NN, Fu SL (2020) Soil biota and sustainable agriculture: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 3183–3206. (in Chinese with English abstract) [张卫信, 申智锋, 邵元虎, 时雷雷, 刘胜杰, 史楠楠, 傅声雷 (2020) 土壤生物与可持续农业研究进展. 生态学报, 40, 3183–3206.]

(责任编辑: 傅声雷 责任编辑: 闫文杰)

## 附录 Supplementary Material

### 附录1 农田土壤动物长期监测样地拟解决的科学问题(Box 1的英文对照)

Appendix 1 Scientific questions to be solved in permanent plot of agricultural soil animal (corresponding English for Box 1)  
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021265-1.pdf>

### 附录2 农田土壤动物大型固定样地地面控制点的标记方法

Appendix 2 Marking methods of ground control points in large permanent plots of agricultural soil animal  
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021265-2.pdf>

### 附录3 河南商丘9 ha农田土壤动物大型固定样地的设计图

Appendix 3 Map of 9 ha large permanent plot of agricultural soil animal in Shangqiu, Henan Province  
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021265-3.pdf>

### 附录4 河南商丘9 ha农田土壤动物大型固定样地的俯瞰图和近景图

Appendix 4 Aerial view and close shot picture of 9 ha large permanent plot of agricultural soil animal in Shangqiu  
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021265-4.pdf>

### 附录5 土壤动物物种描述相关信息数据表

Appendix 5 Species description sheet of soil animal species  
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021265-5.pdf>

### 附录6 农田土壤动物长期监测样地内物种和群落照片

Appendix 6 Photos of species and community in permanent plot of agricultural soil animal  
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021265-6.pdf>

附录1 农田土壤动物长期监测样地拟解决的科学问题(Box 1的英文对照)

Appendix 1 Scientific questions to be solved in permanent plot of agricultural soil animal (corresponding English for Box 1)

**Basic theory**

I-1 What is the status of agricultural soil animal diversity in China? What are the characteristics of species, functional and genetic diversity of agricultural soil animal in China?

I-2 What are the temporal and spatial patterns of  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\gamma$  diversity of agricultural soil animal in China? What are the mechanisms that form and maintain these temporal and spatial patterns?

I-3 How does agricultural soil animal diversity interact with natural factor and human activity? Do the intense human activity in agriculture change the interaction between the soil animal diversity and the natural environment?

I-4 What are the temporal and spatial patterns of soil animal diversity in different agricultural areas in China? What are the factors and mechanisms that form and maintain the temporal and spatial patterns of soil animal diversity in different agricultural areas?

I-5 What is the relationship between soil animal diversity and the productivity and stability of agricultural ecosystem? What effect does soil animal diversity have on the productivity and stability of agricultural ecosystem?

I-6 What are the ecosystem functions of agricultural soil animal diversity? How does the ecosystem function of agricultural soil animal diversity dynamic change under the intense human activity?

I-7 What is the relationship between the soil animal and other taxa diversities (such as soil microorganism, vole, bird, pollinating insect, plant pest)? What are the internal connection and mechanisms between the cascading effect of soil animal and other taxa diversities and key ecosystem functions (such as crop yield, carbon sequestration)?

I-8 Under the background of global change, what is the matching degree of phenology between soil animal, crop, and other animals. What are the dynamic and mechanisms of the matching degree?

I-9 How has the diversity of soil animals changed during the history of agricultural development in China? Which species are sensitive to intense agricultural activities? Which species are adapted to intense agricultural activities?

I-10 What is the dynamic change in agriculture soil animal diversity in different agricultural areas in China? Which species and areas are the hot spots for protecting soil animal diversity?

I-11 Do human activities lead to the homogenization of agricultural soil animal diversity? Which agricultural areas have the most obvious homogenization? What are the countermeasures for the homogenization of agricultural soil animals from local to regional scale?

I-12 Under the current agricultural management model and possible future climate change scenarios, how will the diversity of agricultural soil animal change and response in China? How do agricultural soil animal change and response to different agricultural areas? How to efficiently monitor and predict the change and response?

I-13 What are the key ecosystem functions that soil animal diversity indicates the agricultural ecosystem health?

**Practical application**

II-1 Which practical activities can improve and maintain the diversity of agricultural soil animal? How to effectively help farmers and local relevant departments to improve and maintain the diversity of agricultural soil animal?

II-2 Which practical activities can maintain the stability, anti-interference and sustainability of agricultural soil animal diversity? How to help farmers and local relevant departments to maintain the stability, anti-interference and sustainability of the agricultural soil animal diversity?

II-3 Which practical activities can maintain and perform the functions of the agricultural soil animal diversity, such as maintaining high productivity, controlling pest, and maintaining ecological balance?

II-4 Which practical activities targeting on soil animal diversity can improve soil quality, maintain soil health and increase food production? How to achieve the mentioned goals through providing guidelines for practice activities?

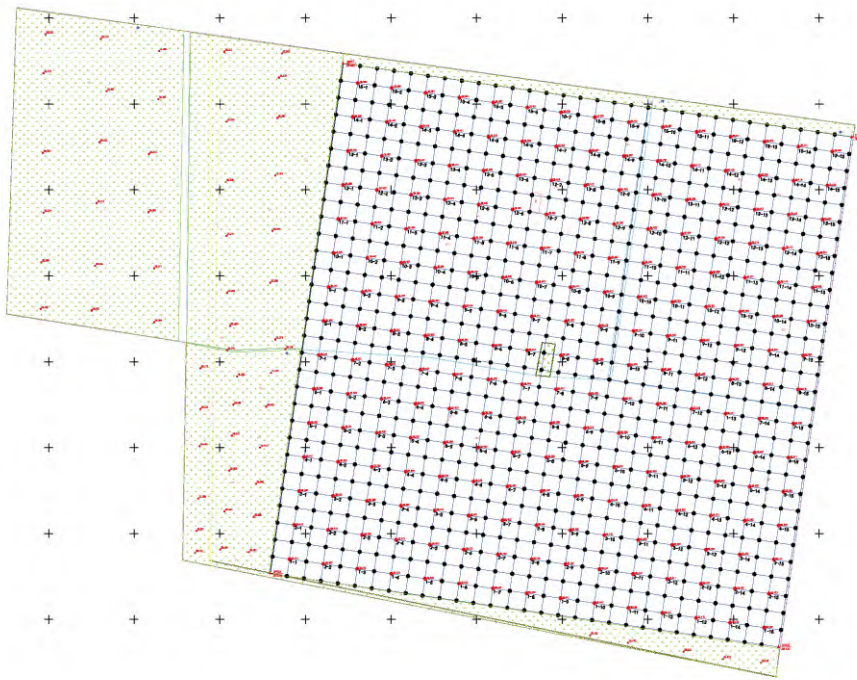
II-5 What practical activities targeting on soil animal diversity can promote eco-agricultural tourism development, increase farmers' income and maintain rural stability?





附录2 农田土壤动物大型固定样地地面控制点的标记方法。(a)和(b)分别为德惠和商丘农田土壤动物大型固定样地中使用的水泥和灰桩标记方法。

Appendix 2 Marking methods of ground control points in large permanent plots of agricultural soil animal. (a) and (b) are marking methods of concrete and ash pile used in Dehui and Shangqiu large permanent plots of agricultural soil animal, respectively.



附录3 河南商丘9 ha农田土壤动物大型固定样地的设计图。网格线上的黑点代表以5 m为间隔的采样点。  
Appendix 3 Map of 9 ha large permanent plot of agricultural soil animal in Shangqiu, Henan Province. The black dots on the grid line represent sampling points spaced at 5 m intervals.



(a)



(b)

附录4 河南商丘9 ha农田土壤动物大型固定样地的俯瞰图(a)和近景图(b)。(b)中小红旗是临时地标。

Appendix 4 Aerial view (a) and close shot picture (b) of 9 ha large permanent plot of agricultural soil animal in Shangqiu. The small red flags in the picture (b) are temporary marks.

附录5 土壤动物物种描述相关信息数据表  
Appendix 5 Species description sheet of soil animal species

名称 Name	描述 Description	名称 Name	描述 Description
物种序号 Species No.	物种的序号 Species No.	纬度 Latitude	物种采集地点的纬度 The latitude which the species were collected
样点编号 Site No.	采集样点的编号 Site No.	经度 Longitude	物种采集地点的经度 The longitude which the species were collected
样品编号 Sample No.	样品的编号 Sample No.	海拔 Altitude	物种采集地点的海拔 The altitude which the species were collected
生物界 Biological kingdom	物种所属界 The biological kingdom the species belonging to	物种优势度 Species dominance	物种的优势度 Species dominance
门 Phylum	物种所属门 The phylum the species belonging to	土地利用类型 Land use type	物种采集地点的土地利用类型 The land use type which the species were collected
纲 Class	物种所属纲 The class the species belonging to	土壤类型 Soil type	物种采集地点的土壤类型 The soil type which the species were collected
目 Order	物种所属目 The order the species belonging to	农作物种类 Types of crop and vegetable	物种采集地点的农作物种类 The crop type which the species were collected
科名称 Family	物种所属科 The family the species belonging to	保存单位 Preservation unit	保存物种标本的单位 The organization where the samples are kept
属名 Genus	物种所属属 The genus the species belonging to	标本采集人 Specimen collector	标本的主要采集人 The main collector of the specimen
种名 Species name	物种的种名 Species name	采集日期 Collection date	标本采集日期 Specimen collection date
中文名称 Chinese name	物种的中文名 Chinese name of the species	鉴定人 Appraiser	标本鉴定人 Specimen appraiser
国家 Country	物种采集点所在的国家 The country which the species were collected	鉴定时间 Identification time	标本鉴定时间 Specimen identification time
省份 Province	物种采集点所在的省份 The province which the species were collected	联系人 Contact	对物种标本负责的联系人 The contact responsible for the specimen
县市 County and city	物种采集点所在的县市 The county and/or city which the species were collected	地址 Address	联系人的通讯地址 Correspondence address of the contact





附录6 农田土壤动物长期监测样地内物种和群落照片。A和B分别表示物种和群落照片。A中(a)、(b)、(c)、(d)、(e)分别为甲虫(灰胸突鳃金龟 *Melolontha incana*)、甲螨(中华端三甲螨 *Acrotritia sinensis*)、蓟马(齿呆蓟 *Anaphothrips dentatus*)、蚂蚁(日本弓背蚁 *Camponotus japonicus*)和蜘蛛(日斯坦蛛 *Stemmops nipponicus*)的物种照片; B中(A)、(B)、(C)分别为甲虫、甲螨和蓟马群落照片, (A)、(B)、(C)中的数字表示该群落中每只动物的序号。

Appendix 6 Photos of species and community in permanent plot of agricultural soil animal. A and B are photos of species and community, respectively. (a), (b), (c), (d) and (e) within A part are species photos of beetle (*Melolontha incana*), oribatid mite (*Acrotritia sinensis*), thrip (*Anaphothrips dentatus*), ant (*Camponotus japonicus*) and spider (*Stemmops nipponicus*). (A), (B) and (C) within B part are photos of beetle, oribatid mite and thrip communities. The numbers labeled in (A), (B) and (C) within B part represent animal's orders.



•生物编目•

# 安徽石台县与青阳县苔藓植物多样性

邢诗晨<sup>1#</sup>, 唐录艳<sup>2#</sup>, 戴尊<sup>1</sup>, 涂淑雯<sup>1</sup>, 陈星<sup>1</sup>, 张建行<sup>1</sup>, 李宏庆<sup>1</sup>, 彭涛<sup>2\*</sup>, 王健<sup>1\*</sup>

1. 华东师范大学生命科学学院, 上海 200241; 2. 贵州师范大学生命科学学院, 贵阳 550025

**摘要:** 生物多样性保护优先区域代表了生物多样性富集区、典型生态系统与关键物种分布区, 对于生物多样性保护具有重要意义, 但优先区域内自然保护地覆盖率通常较低, 存在很大的保护空缺。苔藓植物作为生物多样性的一个重要组成部分, 在生态系统中发挥着重要作用, 但由于个体细小、分类鉴定困难等, 使得其多样性保护成为整个生物多样性保护中较为薄弱的一环。为了了解我国生物多样性保护优先区域苔藓植物多样性及受保护情况, 本文以黄山-怀玉山生物多样性保护优先区域内的石台县和青阳县为例, 通过系统的样线法调查优先区域内自然保护地内、外的苔藓植物多样性, 比较了其物种组成特点及相似性。结果表明, 该区域共有苔藓植物64科140属344种, 包括苔类植物27科40属106种、藓类植物37科100属238种, 其中有5种为濒危物种。自然保护地内有60科120属270种, 保护地外有46科90属185种, 保护地内、外苔藓植物科、属、种的Jaccard相似性系数分别为0.66、0.50和0.32, 表明自然保护地内、外物种组成差异很大。与石台县和青阳县苔藓植物历史数据相比, 本研究新增苔藓植物14科64属273种, 其中包括安徽省新记录2科9属96种, 而且有18种仅分布于自然保护地外。根据对该区域物种累积曲线及外推估计分析, 当采集足够充分时, 基于标本数的物种多样性预测值为485种, 基于样线数的预测值为563种, 说明石台县和青阳县的苔藓植物多样性仍存在被低估的可能。本研究结果一方面表明了自然保护地之外的苔藓植物在保护中有重要价值, 另一方面也反映了苔藓植物的野外就地保护存在空缺。建议在我国其他生物多样性保护优先区域开展类似的调查和研究, 以期为今后对苔藓植物的分布规律及保护研究提供翔实的基础数据。

**关键词:** 苔藓植物; 物种多样性; 采样方法; 样线调查; 自然保护区

邢诗晨, 唐录艳, 戴尊, 涂淑雯, 陈星, 张建行, 李宏庆, 彭涛, 王健 (2022) 安徽石台县与青阳县苔藓植物多样性. 生物多样性, 30, 21186. doi: 10.17520/biods.2021186.

Xing SC, Tang LY, Dai Z, Tu SW, Chen X, Zhang JH, Li HQ, Peng T, Wang J (2022) Bryophyte diversity in Shitai County and Qingyang County, Anhui Province. Biodiversity Science, 30, 21186. doi: 10.17520/biods.2021186.

## Bryophyte diversity in Shitai County and Qingyang County, Anhui Province

Shichen Xing<sup>1#</sup>, Luyan Tang<sup>2#</sup>, Zun Dai<sup>1</sup>, Shuwen Tu<sup>1</sup>, Xing Chen<sup>1</sup>, Jianhang Zhang<sup>1</sup>, Hongqing Li<sup>1</sup>, Tao Peng<sup>2\*</sup>, Jian Wang<sup>1\*</sup>

1 School of Life Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241

2 School of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550025

### ABSTRACT

**Aims:** Biodiversity conservation priority areas represent the richest biodiverse regions, typical ecosystems, distribution areas of key species, and are of great significance for biodiversity conservation. However, the coverage of nature protected areas in biodiversity priority areas is often relatively low, and there are large gaps in protection. Bryophytes play an important role in the ecosystem. However, due to the small size of individuals and difficulties in identification, the protection of bryophyte diversity is relatively weak. To understand bryophyte diversity and protection status of biodiversity conservation priority areas in China, we carried out studies on the diversity of bryophytes in Shitai County and Qingyang County, which are located in Huangshan-Huaiyushan biodiversity protection priority area.

收稿日期: 2021-05-11; 接受日期: 2021-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(31770371; 32070228)和生态环保部生物多样性调查、观察与评估项目(2019–2023)

# 共同第一作者 Co-first authors

\* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: pengtao@gznu.edu.cn; jwang@bio.ecnu.edu.cn.

**Methods:** Based on the systematic line transect method, the composition characteristics and similarity of bryophytes inside and outside the nature protected areas in the priority areas were inventoried and compared.

**Results:** In total, 344 species (in 140 genera and 64 families) were recorded in the area. Of these, 106 species (in 40 genera of 27 families) were liverworts and 238 species (in 100 genera of 37 families) were mosses, including 5 endangered species. Among them, 270 species belonging to 120 genera and 60 families distributed inside the nature protected areas and 185 species belonging to 90 genera and 46 families distributed outside the nature protected areas. The Jaccard similarity coefficients between the nature protected areas and unprotected areas were 0.66, 0.50 and 0.32 at the family, genus and species levels, respectively, indicating that the composition of species inside and outside the nature protected area is very different. Compared with the historical data of bryophytes of Shitai County and Qingyang County, 273 species, 64 genera and 14 families were newly recorded in this study. Among them, 96 species, 9 genera and 2 families were newly added in Anhui Province. Of these, 18 species only distributed outside the nature protected areas. Based on the species accumulation curve and extrapolation estimation, when the number of individuals collected was sufficient, the predicted value of species diversity based on the number of specimens is 485, and the predicted value based on the number of line transects was 563, indicating that the bryophyte diversity in the area may be underestimated.

**Conclusion:** The results of this study on the one hand highlight the important value of bryophyte protection outside the nature protected areas. On the other hand, it also reflects that it is insufficient in the protection *in situ* of bryophytes. We suggested to carry out similar surveys and studies in other priority areas of biodiversity conservation of China, to provide detailed and reliable data for future study on the distribution and conservation of bryophytes.

**Key words:** bryophytes; species diversity; sampling method; line transect survey; nature reserve

在生物多样性保护中, 为了以最小的投入获得最大范围和最大程度的生物多样性保护成效, 2010年环境保护部颁布的《中国生物多样性保护战略与行动计划(2011–2030)》划定了我国32个内陆陆地及水域生物多样性保护优先区域和3个海洋与海岸生物多样性保护优先区域([http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201009/t20100921\\_194841.htm](http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201009/t20100921_194841.htm))。生物多样性保护优先区域代表了生物多样性富集区、典型生态系统与关键物种分布区, 是开展我国生物多样性保护各项工作的重点区域, 对生物多样性保护具有重要意义(李俊生等, 2016)。但是, 在这些保护优先区域中仅有7个优先区域内的自然保护地面积占比超过30%, 其余保护比例较低的优先区域大多位于人口较多的地区, 存在大量的保护空缺(Tian et al, 2019)。而且, 在确定以保护物种为主要目的的保护区优先性时, 往往只考虑了重点保护的野生动植物信息, 未能包含全部的保护物种(陈雅涵等, 2009)。

苔藓植物的多样性仅次于被子植物, 是生物多样性的的重要组成部分(Patiño & Vanderpoorten, 2018)。作为陆生生态系统的重要组成部分, 苔藓植物在水土保持、全球碳循环及森林群落演替和更新中发挥着重要的生态功能(Turesky, 2003; Soudzilovskaia et al, 2011; Tuba et al, 2011), 但由于个体细小、种类繁多、野外采集及分类鉴定困难, 其

多样性保护成为整个生物多样性保护中较为薄弱的一环, 在我国生物多样性保护优先区的调查与研究中也仅见个别报道(刘艳等, 2016; 刘艳和杨钰爽, 2019)。

石台县和青阳县位于安徽省南部的池州市东南部(29°59′–30°51′ N, 117°12′–118°05′ E), 属北亚热带湿润型季风气候, 区域内河流湖泊众多, 森林覆盖率高, 自然资源丰富。其中, 石台县全境和青阳县部分乡镇属于黄山–怀玉山生物多样性保护优先区域(附录1, 李俊生等, 2016)。在该区域内, 除了有牯牛降国家级自然保护区和九华山森林公园等重要自然保护地外, 还分布有醉山野、仙寓山、鱼龙洞、秋浦河、怪潭和蓬莱仙洞等风景名胜区。此前关于安徽苔藓植物的调查和研究主要集中在皖南和皖西地区。根据安徽省最新苔藓植物名录, 该省共有苔藓植物95科253属778种, 其中分布于石台和青阳两县的有57科101属154种(师雪芹和王健, 2021)。

为了了解我国生物多样性保护优先区域内苔藓植物多样性及其受保护情况, 本研究以黄山–怀玉山生物多样性保护优先区域内的石台县和青阳县为例, 在两县共布设了31条样线进行苔藓植物多样性的系统调查, 调查范围涵盖了自然保护地及外围未受保护区域, 目的在于了解: (1)采样充分程度



对一个地区苔藓植物多样性的影响; (2) 自然保护区内、外苔藓植物丰富度及组成的差异, 以期对苔藓植物多样性保护及政策制定提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 标本采集和鉴定

以石台和青阳两县为地域范围, 以“2000国家大地坐标系”为基准, 以10 km × 10 km的网格为单位, 按照苔藓植物多样性调查与评估技术规定, 综合考虑不同地形地貌、海拔段、坡位、坡向等进行样线布设, 每条调查线路长度不低于3 km (图1)。通过徒步行走开展样线调查, 记录所观察到的每种苔藓植物的种类、生境、经纬度及海拔, 并采集标本。

分别于2019年8月、9月、10月及2020年5月在两县境内进行了4次野外考察, 共计31条样线, 其中石台县18条, 青阳县13条(图1, 附录2)。对采集到的标本在实验室进行鉴定, 部分疑难标本请国内相关类群专家协助鉴定。所有凭证标本存放在华东师范大学生物博物馆(HSNU)。

### 1.2 数据处理

整理野外采集及标本鉴定信息, 分析其物种多样性组成, 并对照《安徽省苔藓植物名录》(师雪芹和王健, 2021)和《中国高等植物受威胁物种名录》(覃海宁等, 2017), 确定安徽省新记录物种及受威胁物种; 根据石台县和青阳县文献资料(郭新弧等, 1990; 师雪芹等, 2018)等, 比较历史记录与当前采集的苔藓植物的种类差异, 分析自然保护区内、外

苔藓植物多样性及组成差异。

采用Jaccard相似性系数( $J$ ) (Jaccard, 1912)对两县自然保护区内、外的苔藓植物物种组成进行比较。 $J = c/(a + b - c)$ , 其中 $a$ 为地区A的种(属或科)数,  $b$ 为地区B的种(属或科)数,  $c$ 为地区A和B的共有种(属或科)数。Jaccard相似性系数介于0–1之间, 其值越接近1, 表明两个地区分类单元的相似性程度越高。若两个区域的物种相似性程度较低, 则说明其物种组成均具有代表性, 都具有保护价值。反之则说明两者的物种组成趋于相同, 那么在保护成本有限的条件下, 可以考虑选择物种多样性水平相对较高的区域优先进行保护。

基于标本份数的稀疏和外推采样曲线(rarefaction and extrapolation sampling curves)及采样充分性曲线(sample completeness curves)通过iNEXT网站(<https://chao.shinyapps.io/iNEXTOnline/>)在线完成(Chao et al, 2016), 用以量化及预测物种多样性及采集充分性。采集充分性通过采样覆盖率(sample coverage)表示, 其值越大表示采样越充分。

基于样线数的物种累积曲线分析利用R v4.0.2 (R Core Team, 2019)中的软件包vegan (Oksanen et al, 2018)完成, 使用EstimateS 9.1.0 (Colwell, 2013)外推估计物种丰富度。由于本研究所采用的样线调查法不便对采样面积进行度量, 故采用非参数估计方法, 根据Xu等(2012)推荐的基于物种二元(有/无)数据的第二阶Jackknife重取样估计Jack2 (Burnham & Overton, 1978, 1979)。

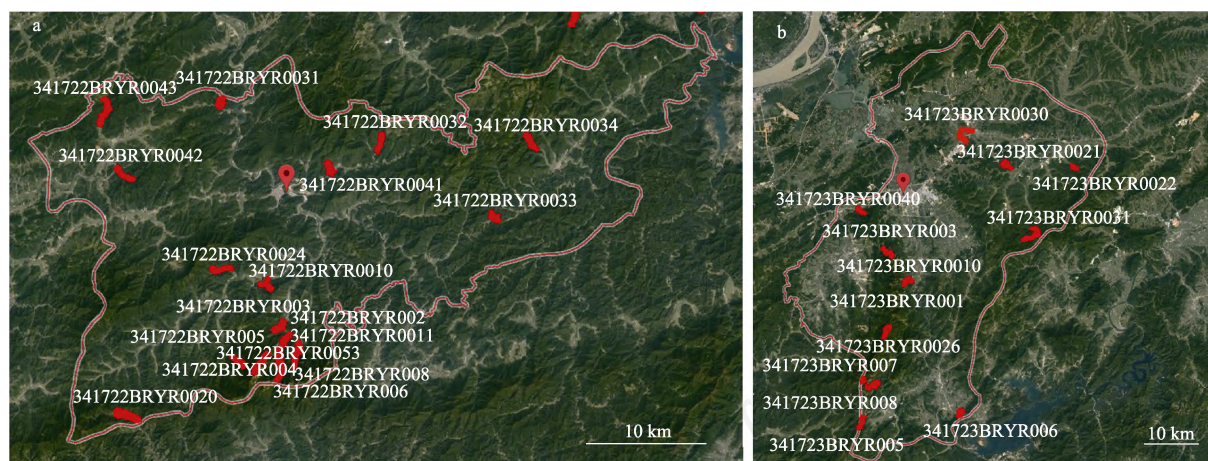


图1 安徽石台县(a)和青阳县(b)苔藓植物采样线路分布图(实线内为两县县域范围)

Fig. 1 Map of sampling line transects of bryophytes in Shitai County (a) and Qingyang County (b), Anhui Province. The two counties are inside the solid lines



## 2 结果

### 2.1 苔藓植物种类组成及优势科属

本次调查共采集苔藓植物标本1,378份, 其中苔类460份, 藓类918份, 隶属于64科140属344种, 其中苔类植物27科40属106种, 藓类植物37科100属238种(附录3)。

将苔藓植物物种数 $\geq 10$ 个的科定义为优势科, 则该区域优势科有11个(表1), 共包含57属170种, 分别占该区域所采集苔藓植物总属数和总种数的40.7%和49.4%。其中, 青藓科所含的种数最多, 为31种, 占总种数的9.0%。将物种数 $\geq 7$ 个的属定义为优势属, 则该区域优势属有10个(表1), 共包含81种, 占该区域苔藓植物总种数的23.5%。其中, 凤尾藓属(*Fissidens*)所含种数最多, 为13种, 占总种数的3.8%。

### 2.2 受威胁物种

该区域受威胁苔藓植物共5种, 其中密枝灰藓(*Hypnum densirameum*)为濒危(EN), 带叶牛舌藓(*Anomodon perlingulatus*)、长刺刺果藓(*Symphyodon echinatus*)、大隅耳叶苔(*Frullania osumiensis*)和白绿细鳞苔(*Lejeunea pallidevirens*)为易危(VU)。带叶牛舌藓仅在石台县仙寓乡梨树松、七都镇前山屋和杜村村平顶组发现, 位于自然保护地之外。

### 2.3 石台县、青阳县及安徽省苔藓植物新记录

对比石台县和青阳县历史记录, 本研究新增苔藓植物14科(苔类7科, 藓类7科) 64属(苔类14属, 藓类50属) 273种(苔类78种, 藓类195种), 其中安徽省

新记录有2科9属96种, 包括苔类42种, 藓类54种(图2, 附录3)。新增的2个新记录科分别为碎米藓科和刺果藓科, 新增的9个新记录属分别为大萼苔属(*Cephalozia*)、疣胞藓属(*Clastobryum*)、碎米藓属(*Fabronia*)、拟同叶藓属(*Isopterygiopsis*)、狭叶苔属(*Liochlaena*)、拟平藓属(*Neckeropsis*)、耳蔓藓属(*Neonoguchia*)、折瓣苔属(*Sphenolobus*)和刺果藓属(*Symphyodon*)。

师雪芹和王健(2021)将带叶苔(*Pallavicinia lyellii*)、齿叶麻羽藓(*Claopodium prionophyllum*)、南亚小曲尾藓(*Dicranella coarctata*)、净口藓(*Gymnostomum calcareum*)、小树平藓(*Homaliiodendron exiguum*) 5种作为存疑种处理, 本研究确定了这5种在安徽的分布。

但是, 历史名录中有7科(苔类3科, 藓类4科) 26属(苔类7属, 藓类19属) 83种(苔类29种, 藓类54种)在本研究中未采集到(图2a)。综合历史数据及本研究结果, 石台县和青阳县共有苔藓植物71科166属427种(附录3)。

### 2.4 苔藓植物在自然保护地内、外分布的比较

本研究调查的31条样线中有15条位于自然保护地内, 包括石台县大演乡牯牛降国家级自然保护区、青阳县九华山景区等, 16条位于保护地外, 包括石台县仁里镇、七都镇及青阳县乔木乡、木镇等, 其中1条样线部分位于保护地内(附录2)。保护地内的样线多分布在地山之中, 最高海拔可达1,723 m; 保护地外的样线多位于海拔较低的村落, 最高海拔不超过600 m。

表1 安徽石台县和青阳县苔藓植物优势科和优势属

Table 1 The dominant families and genera of bryophytes in Shitai County and Qingyang County, Anhui Province

优势科 Dominant families	种数 No. of species	%	优势属 Dominant genera	种数 No. of species	%
1 青藓科 Brachytheciaceae	31	9.0	凤尾藓属 <i>Fissidens</i>	13	3.8
2 细鳞苔科 Lejeuneaceae	23	6.7	青藓属 <i>Brachythecium</i>	10	2.9
3 丛藓科 Pottiaceae	18	5.2	耳叶苔属 <i>Frullania</i>	8	2.3
4 灰藓科 Hypnaceae	15	4.4	疣鳞苔属 <i>Cololejeunea</i>	8	2.3
5 提灯藓科 Mniaceae	14	4.1	匍灯藓属 <i>Plagiomnium</i>	7	2.0
6 白发藓科 Leucobryaceae	14	4.1	美喙藓属 <i>Eurhynchium</i>	7	2.0
7 凤尾藓科 Fissidentaceae	13	3.8	曲柄藓属 <i>Campylopus</i>	7	2.0
8 平藓科 Neckeraceae	11	3.2	真藓属 <i>Bryum</i>	7	2.0
9 齿萼苔科 Lophocoleaceae	11	3.2	扁萼苔属 <i>Radula</i>	7	2.0
10 真藓科 Bryaceae	10	2.9	细鳞苔属 <i>Lejeunea</i>	7	2.0
11 毛锦藓科 Pylaisiadelphaceae	10	2.9			
总计	170	49.4		81	23.5

选取位于牯牛降国家级自然保护区内的2条样线(341722BRYR0002和341722BRYR0003)及与其邻近但位于保护区外的2条样线(341722BRYR0010和341722BRYR0024)进行比较,发现保护区内的苔藓植物有89种,保护区外有51种,保护区内、外的物种Jaccard相似性系数为0.138。对比两县自然保护区内、外总的苔藓植物种类发现,保护地内共有60科120属270种(苔类26科38属98种,藓类34科82属172种),保护地外共有46科90属185种(苔类18科21属42种,藓类28科69属143种)(附录4)。有159种(苔类64种,藓类95种)仅分布在自然保护区内,有74种(苔类8种,藓类66种)仅分布于保护地外。自然保护区内、外共有苔藓植物42科70属111种(苔类17科19属34种,藓类25科51属77种),计算得自然保护区内、外苔藓植物的科、属、种Jaccard相似性系数分

别为0.66、0.50和0.32。

新增的273种中,在自然保护区内、外均有分布的为81种,仅分布在自然保护区内的有130种,仅分布在保护区外的有62种。在96种安徽省苔藓植物新记录中,有19种为自然保护区内、外共有种类,有59种仅分布在自然保护区内,有18种仅分布于保护地外(图2b)。

### 2.5 基于标本量的物种丰富度稀疏和外推采样曲线、采样充分性曲线

iNEXT可以有效地使用数据进行更细致、更稳定的推断,从获得的物种丰富度稀疏和外推采样曲线及采样充分性曲线中可以看出,随着所采标本数量的增加,物种多样性先迅速增加,随后增速变缓,当采集份数达到1,378份时,对应物种数为344种,采样覆盖率达0.91(图3)。对结果进行外推估计,当

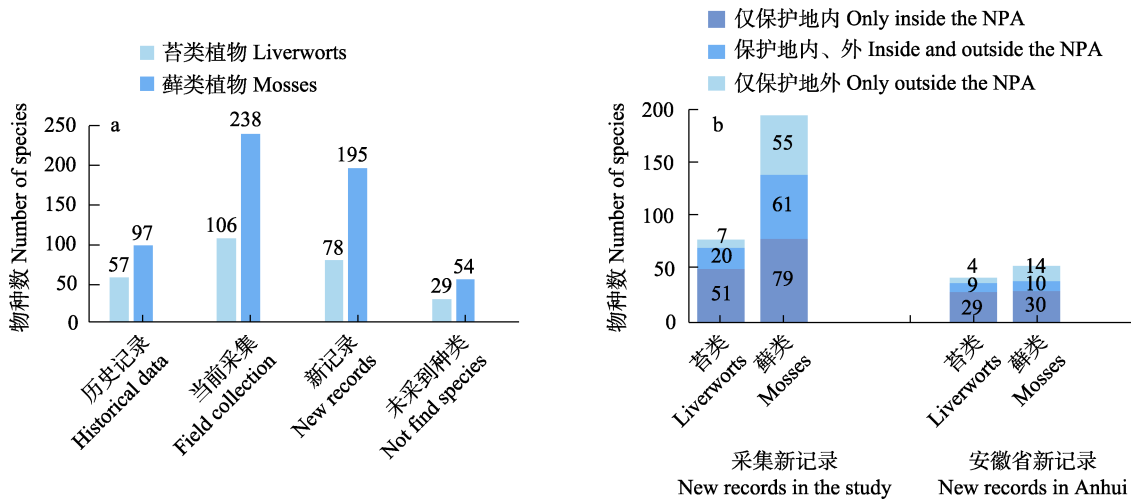


图2 本研究在安徽石台县和青阳县采集到的苔藓植物丰富度与历史记录对比(a)及采集新记录和安徽省新记录在自然保护区(NPA)内外的分布情况(b)

Fig. 2 The richness collected and compared with historical records of bryophytes in Shitai County and Qingyang County, Anhui Province (a); the distribution of new collected records and Anhui Province new records inside and outside the nature protected areas (NPA) (b) in the study

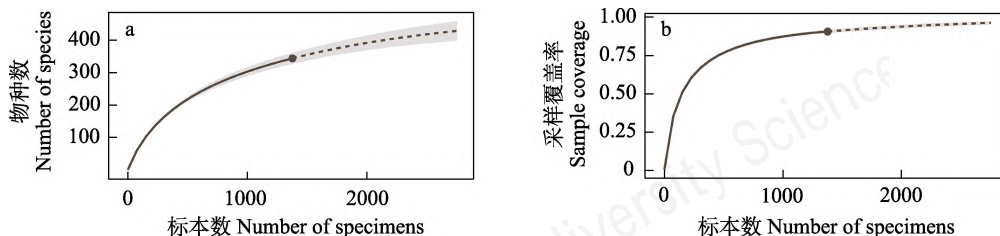


图3 安徽石台县和青阳县苔藓植物物种丰富度的稀疏(实线)和外推(虚线)采样曲线(a)及采样充分性曲线(b),阴影表示95%置信区间。

Fig. 3 Rarefaction (solid line) and extrapolation (dotted line) sampling curves for species richness (a) and sample completeness curves (b) of bryophytes in Shitai County and Qingyang County, with 95% confidence intervals (shaded areas).

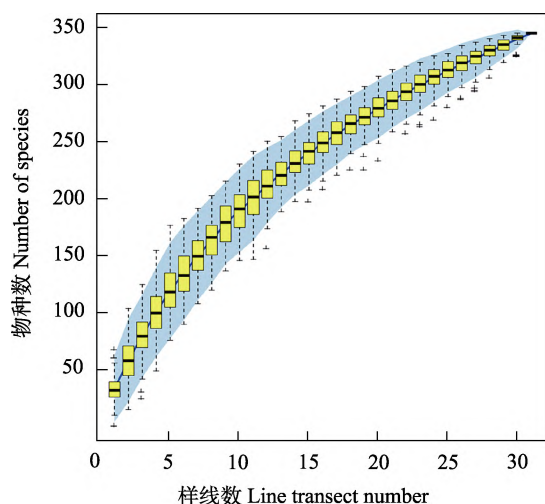


图4 石台县和青阳县苔藓植物基于样线数的物种累积曲线  
Fig. 4 Species accumulation curve based on line transects of bryophytes in Shitai County and Qingyang County

采集足够充分时, 所调查区域苔藓植物物种多样性将达到485种。

## 2.6 基于样线数的物种累积曲线分析及丰富度外推估计

该地区物种累积曲线随样线数的增加先急剧上升, 当增至第9条时, 物种多样性约达到总物种多样性的一半, 随后增速趋缓但仍继续增加(图4)。从外推估计结果可以看出, 基于物种二元(有/无)数据的Jack2值为563.5。本次调查到的物种数为344种, 为外推估算值的61.0%, 综合历史记录后共有427种, 为外推估计值的75.8%。

## 3 讨论

生物多样性保护优先区域是关键物种分布区, 也是生态环境脆弱区域(李俊生等, 2016), 对其生物多样性保护的前提是摸清这些区域的物种多样性家底。安徽省石台县全境和青阳县部分区域属于黄山-怀玉山优先保护区域, 该区域保存了较为完整的亚热带森林生态系统, 复杂的地形地貌、茂盛的植被及类型多样的小生境为苔藓植物的生长提供了良好条件(师雪芹和王健, 2021)。本文基于系统的野外调查, 共获得石台县和青阳县苔藓植物64科140属344种, 与历史数据相比新增了14科64属273种, 其中安徽省新记录有2科9属96种。这一结果表明, 尽管皖南地区的苔藓植物调查和研究开展时间较早且较为充分, 但对石台县和青阳县的调查仍存在不足。事实上, 针对这两县较为系统的苔藓植物

调查和研究也仅见于20世纪90年代对牯牛降国家级自然保护区苔藓植物的考察和报道(郭新弧等, 1990)。

本研究在不同季节多次对两县内自然保护区内、外的区域进行了较为系统的调查, 采样覆盖范围更广泛, 采样充分程度更大, 这可能是本研究获得较高苔藓植物多样性的一个重要原因。基于标本量的物种丰富度稀疏和外推曲线分析表明, 当采集份数达到1,378份时, 采样覆盖率达0.91, 达到了较高的采样充分性。但是, 基于样线数的物种累积曲线分析表明, 尽管当采集样线数达9条时, 物种多样性约达到总物种多样性的一半并增速趋缓, 但仍未停止增加。根据对12种物种丰富度估算方法的比较, Xu等(2012)发现基于面积的方法一般会高估物种多样性, 而基于非参数的方法一般会低估其多样性。本研究基于非参数的Jack2方法估算两县苔藓植物物种数为563.5种, 而实际调查到的物种数为344种, 即使加上历史记录也才有427种, 表明该地区仍可能有丰富的苔藓植物有待发现, 随着今后系统和深入的调查, 必然会有更多的类群被发现。

传统上, 分类学家一般更倾向于对物种多样性丰富的自然保护区的采集或热衷于对一些稀有及新类群的发现(Aranda et al, 2010)。基于这些采集数据所获得的一个地区的物种名录及分布数据是不完整的, 很难反映出其真实的物种多样性及分布情况(Sastre & Lobo, 2009)。本研究开展的生物多样性保护优先区域内苔藓植物的调查, 在方法上采用了网格化样线式系统调查, 在取样范围上覆盖了整个县域, 使得研究结果更加可靠, 也更能客观地反映出苔藓植物多样性在县域尺度上的分布规律。










另外, 本研究通过对研究区自然保护区内、外苔藓植物的比较研究, 发现其物种组成相似性仅0.32, 具有很大的差异, 在新增的苔藓植物种类中, 有62种仅分布在保护地外, 其中包括18种安徽省新记录种及1种受威胁种类。研究结果一方面凸显了自然保护区之外的苔藓植物在保护中的重要价值, 另一方面也反映了苔藓植物的野外就地保护存在空缺, 但目前仍没有可借鉴的措施来解决这一问题。生物多样性保护优先区域到底该如何发挥其在保护中的作用? 如何协调好生物多样性保护与经济的关系? 这些仍需要进一步的探索, 但获得



我国生物多样性保护优先区域各个类群可靠的本底数据是对其开展保护的首要前提。

综上, 本研究按不同季节、网格化样线式的对保护地内、外的调查方法, 体现出较大的采样充分程度, 与历史记录相比新增了较多种类, 表明采样充分程度对获得一个地区苔藓植物多样性有重要影响。鉴于本研究的调查方法对全面了解某地区苔藓植物多样性的重要性, 对某一特定区域生物多样性编目工作具有重要的借鉴意义, 建议在我国其他生物多样性保护优先区域开展类似的调查和研究, 以期今后开展对其分布规律及保护研究提供翔实的基础数据。

## ORCID

邢诗晨  <https://orcid.org/0000-0002-1544-3432>  
唐录艳  <https://orcid.org/0000-0001-6378-1391>  
戴尊  <https://orcid.org/0000-0001-8229-5348>  
涂淑雯  <https://orcid.org/0000-0001-9219-7231>  
陈星  <https://orcid.org/0000-0002-3746-7101>  
张建行  <https://orcid.org/0000-0003-1898-1348>  
李宏庆  <https://orcid.org/0000-0003-0658-6295>  
彭涛  <https://orcid.org/0000-0002-9255-8751>  
王健  <https://orcid.org/0000-0003-4309-0176>

## 参考文献

- Aranda SC, Gabriel R, Borges PAV, Lobo JM (2010) Assessing the completeness of bryophytes inventories: An oceanic island as a case study (Terceira, Azorean archipelago). *Biodiversity and Conservation*, 19, 2469–2484.
- Burnham KP, Overton WS (1978) Estimation of the size of a closed population when capture probabilities vary among animals. *Biometrika*, 65, 625–633.
- Burnham KP, Overton WS (1979) Robust estimation of population size when capture probabilities vary among animals. *Ecology*, 60, 927–936.
- Chao A, Ma KH, Hsieh TC (2016) iNEXT (iNterpolation and EXTrapolation) Online. <https://chao.shinyapps.io/iNEXTOnline/>. (accessed on 2020-09-01)
- Chen YH, Tang ZY, Fang JY (2009) Distribution of nature reserves and status of biodiversity protection in China. *Biodiversity Science*, 17, 664–674. (in Chinese with English abstract) [陈雅涵, 唐志尧, 方精云 (2009) 中国自然保护区分布现状及合理布局的探讨. *生物多样性*, 17, 664–674.]
- Colwell RK (2013) EstimateS: Statistical Estimation of Species Richness and Shared Species from Samples. Version 9.1.0. <http://viceroy.eeb.uconn.edu/estimates/>. (accessed on 2021-04-25)
- Guo XH, Liu ZL, Hu RL, Wang YF (1990) The bryophytes of Guniujiang Natural Conservation. In: *Science Investigation in Guniujiang Natural Conservation* (ed. Han YL), pp. 247–260, 414–429. China Prospect Press, Beijing. (in Chinese) [郭新弧, 刘仲苓, 胡人亮, 王幼芳 (1990) 牯牛降苔藓植物. 见: 牯牛降科学考察集(韩也良主编), 247–260页, 414–429页. 中国展望出版社, 北京.]
- Jaccard P (1912) The distribution of the flora in the alpine zone. *New Phytologist*, 11, 37–50.
- Li JS, Jin YC, Wang W, Zhao ZP, Wu XP (2016) *Terrestrial Priority Areas for China's Biodiversity Conservation*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [李俊生, 靳勇超, 王伟, 赵志平, 吴晓莆 (2016) 中国陆域生物多样性保护优先区域. 科学出版社, 北京.]
- Liu Y, Pi CY, Tian S (2016) Bryophyte biodiversity of the Dabashan National Nature Reserve in Chongqing. *Biodiversity Science*, 24, 244–247. (in Chinese with English abstract) [刘艳, 皮春燕, 田尚 (2016) 重庆大巴山国家级自然保护区苔藓植物多样性. *生物多样性*, 24, 244–247.]
- Liu Y, Yang YS (2019) Importance of conservation priority areas for bryophyte biodiversity in Chongqing. *Biodiversity Science*, 27, 677–682. (in Chinese with English abstract) [刘艳, 杨钰爽 (2019) 生物多样性保护优先区对重庆苔藓植物多样性保护的重要性. *生物多样性*, 27, 677–682.]
- Oksanen J, Blanchet FG, Kindt R, Legendre P, Minchin PR, O'Hara RB, Simpson GL, Solymos P, Henry M, Stevens H, Wagner H (2018) *Vegan: Community Ecology Package*. R Package Version 2.5-4. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan/>. (accessed on 2020-09-01)
- Patiño J, Vanderpoorten A (2018) Bryophyte biogeography. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 37, 175–209.
- Qin HN, Yang Y, Dong SY, He Q, Jia Y, Zhao LN, Yu SX, Liu HY, Liu B, Yan YH, Xiang JY, Xia NH, Peng H, Li ZY, Zhang ZX, He XJ, Yin LK, Lin YL, Liu QR, Hou YT, Liu Y, Liu QX, Cao W, Li JQ, Chen SL, Jin XH, Gao TG, Chen WL, Ma HY, Geng YY, Jin XF, Chang CY, Jiang H, Cai L, Zang CX, Wu JY, Ye JF, Lai YJ, Liu B, Lin QW, Xue NX (2017) Threatened species list of China's higher plants. *Biodiversity Science*, 25, 696–744. (in Chinese and in English) [覃海宁, 杨永, 董仕勇, 何强, 贾渝, 赵莉娜, 于胜祥, 刘慧圆, 刘博, 严岳鸿, 向建英, 夏念和, 彭华, 李振宇, 张志翔, 何兴金, 尹林克, 林余霖, 刘全儒, 侯元同, 刘演, 刘启新, 曹伟, 李建强, 陈世龙, 金效华, 高天刚, 陈文俐, 马海英, 耿玉英, 金孝锋, 常朝阳, 蒋宏, 蔡蕾, 臧春鑫, 武建勇, 叶建飞, 赖阳均, 刘冰, 林秦文, 薛纳新 (2017) 中国高等植物受威胁物种名录. *生物多样性*, 25, 696–744.]
- R Core Team (2019) *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <https://www.r-project.org/>. (accessed on 2020-09-01)
- Sastre P, Lobo JM (2009) Taxonomist survey biases and the unveiling of biodiversity patterns. *Biological Conservation*, 142, 462–467.
- Shi XQ, Tang X, Wei YM, Wang J (2018) Study and



- investigation of Lejeuneaceae species diversity in Anhui Province. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, (4), 138–146. (in Chinese with English abstract) [师雪芹, 唐霞, 韦玉梅, 王健 (2018) 安徽省细鳞苔科植物物种多样性调查与研究. *华东师范大学学报(自然科学版)*, (4), 138–146.]
- Shi XQ, Wang J (2021) Bryophyte checklist of Anhui Province, China. *Biodiversity Science*, 29, 798–804. (in Chinese with English abstract) [师雪芹, 王健 (2021) 安徽省苔藓植物名录. *生物多样性*, 29, 798–804.]
- Soudzilovskaia NA, Graae BJ, Douma JC, Grau O, Milbau A, Shevtsova A, Wolters L, Cornelissen JHC (2011) How do bryophytes govern generative recruitment of vascular plants? *New Phytologist*, 190, 1019–1031.
- Tian DX, Xie Y, Barnosky AD, Wei FW (2019) Defining the balance point between conservation and development. *Conservation Biology*, 33, 231–238.
- Tuba Z, Slack NG, Stark LR (2011) *Bryophyte Ecology and Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Turetsky MR (2003) The role of bryophytes in carbon and nitrogen cycling. *The Bryologist*, 106, 395–409.
- Xu H, Liu SR, Li YD, Zang RG, He FL (2012) Assessing non-parametric and area-based methods for estimating regional species richness. *Journal of Vegetation Science*, 23, 1006–1012.

(责任编辑: 严岳鸿 责任编辑: 黄祥忠)

## 附录 Supplementary Material

### 附录1 黄山-怀玉山生物多样性保护优先区在石台县和青阳县的分布(绿色部分)及10 km × 10 km工作网格

Appendix 1 Map of Huangshan-Huaiyushan priority area for biodiversity conservation in Shitai County and Qingyang County (green area) and 10 km × 10 km working grid

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021186-1.pdf>

### 附录2 安徽省石台县和青阳县苔藓植物标本采集样线信息

Appendix 2 Details of sampling line transects information of specimen collection of bryophytes in Shitai County and Qingyang County, Anhui Province

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021186-2.pdf>

### 附录3 安徽省石台县和青阳县苔藓植物名录

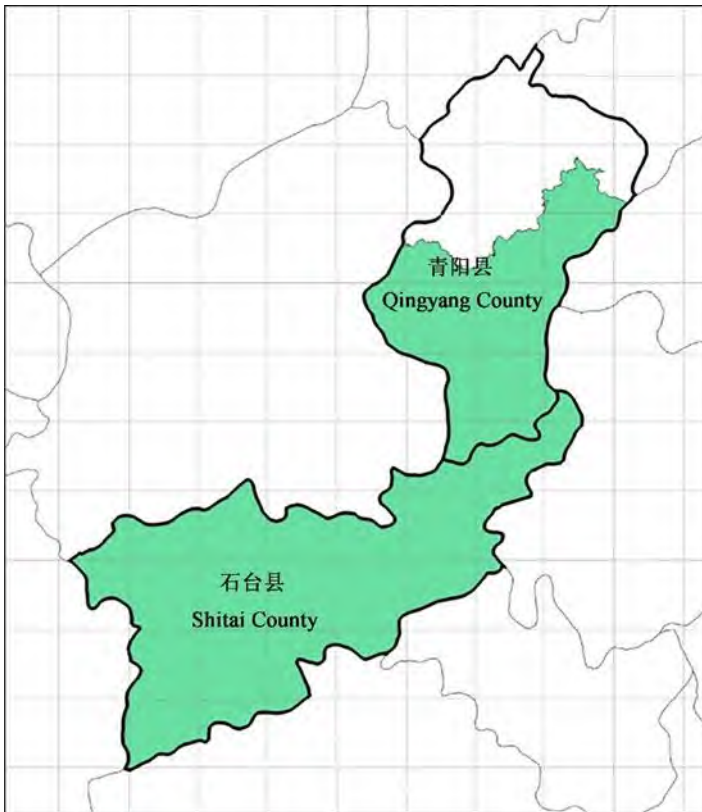
Appendix 3 A checklist of bryophytes of Shitai County and Qingyang County, Anhui Province

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021186-3.pdf>

### 附录4 安徽省石台县和青阳县苔藓植物采集物种在自然保护地(NPA)内外的分布

Appendix 4 The distribution of collected bryophytes of the present study inside and outside the nature protected areas (NPA) of Shitai County and Qingyang County, Anhui Province

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021186-4.pdf>



附录1 黄山-怀玉山生物多样性保护优先区在石台县和青阳县的分布(绿色部分)及10 km × 10 km工作网格  
Appendix 1 Map of Huangshan-Huaiyushan priority area for biodiversity conservation in Shitai County and Qingyang County (green area) and 10 km × 10 km working grid

邢诗晨, 唐录艳, 戴尊, 涂淑雯, 陈星, 张建行, 李宏庆, 彭涛, 王健 (2022) 安徽石台县与青阳县苔藓植物多样性. 生物多样性, 30, 21186. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2021186>

附录2 安徽省石台县和青阳县苔藓植物标本采集样线信息

Appendix 2 Details of sampling line transects information of specimen collection of bryophytes in Shitai County and Qingyang County, Anhui Province. NPA: Nature protected area.

样线号	地点	调查日期	起始点	海拔	样线长度	苔藓植物物种丰富度	自然保护地内	自然保护地外
Line transect number	Locality	Survey date	Starting point	Elevation	Line transect length	Bryophytes richness	Inside the NPA	Outside the NPA
341722BRYR0002	石台县大演乡新农村横山组	2019-07-31	30.0747° N, 117.5° E	394–514 m	3,200 m	54	+	
341722BRYR0003	石台县大演乡新农村合山组	2019-08-01	30.0935° N, 117.483° E	165–487 m	3,100 m	63	+	
341722BRYR0004	石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰	2019-08-02	30.0492° N, 117.4585° E	1,086–1,723 m	3,000 m	44	+	
341722BRYR0005	石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近	2019-08-03	30.061° N, 117.4317° E	347–727 m	3,100 m	48	+	
341722BRYR0006	石台县大演乡新火村张天坳至双河口	2019-09-17	30.0567° N, 117.4826° E	552–803 m	3,130 m	36	+	
341722BRYR0008	石台县大演乡新农村燕窝岩	2019-09-19	30.0686° N, 117.5011° E	423–621 m	3,000 m	40	+	
341722BRYR0010	石台县大演乡陈田村	2019-09-21	30.1294° N, 117.466° E	92–256 m	3,490 m	27		+
341722BRYR0011	石台县大演乡新火村	2019-07-30	30.0812° N, 117.4905° E	244–453 m	3,100 m	70	+	
341722BRYR0020	石台县仙寓乡大山村七彩石景观、双坑组	2019-09-18	30.01° N, 117.3117° E	395–563 m	3,670 m	36	+	
341722BRYR0024	石台县仙寓乡梨树松	2019-09-20	30.1426° N, 117.4096° E	109–303 m	3,100 m	29		+
341722BRYR0031	石台县矶滩乡洪墩村东风组	2019-09-24	30.2543° N, 117.5848° E	127–412 m	3,530 m	10		+
341722BRYR0032	石台县仁里镇贡溪村	2019-09-24	30.2543° N, 117.5848° E	127–412 m	2,680 m	12		+
341722BRYR0033	石台县七都镇前山屋	2019-10-13	30.1887° N, 117.7049° E	236–244 m	2,780 m	37		+
341722BRYR0034	石台县七都镇大岭脚	2019-10-13	30.2548° N, 117.7478° E	269–401 m	3,670 m	30		+
341722BRYR0041	石台县仁里镇杜村村平顶组、蓬莱仙洞	2019-09-22	30.2387° N, 117.5308° E	97–216 m	3,260 m	19	+	+
341722BRYR0042	石台县小河镇郑村村、大麦坑	2019-09-23	30.2261° N, 117.3152° E	61–87 m	3,360 m	24		+
341722BRYR0043	石台县小河镇外叶村	2019-09-23	30.2937° N, 117.2971° E	61–154 m	4,390 m	16		+
341722BRYR0053	石台县牯牛降长涧口到祁门叉	2020-05-20	30.0817° N, 117.4903° E	192–583 m	5,930 m	44	+	
341723BRYR0001	青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近	2019-08-05	30.4819° N, 117.8246° E	1,066–1,250 m	3,340 m	38	+	
341723BRYR0003	青阳县庙前镇莲花峰、平坦寺	2019-08-06	30.579° N, 117.8198° E	252–983 m	3,000 m	20	+	
341723BRYR0005	青阳县陵阳镇管冲村	2019-10-14	30.3762° N, 117.7912° E	279–432 m	4,130 m	37		+
341723BRYR0006	青阳县陵阳镇周家村	2019-10-14	30.3779° N, 117.9243° E	121–161 m	3,280 m	17		+

邢诗晨, 唐录艳, 戴尊, 涂淑雯, 陈星, 张建行, 李宏庆, 彭涛, 王健 (2022) 安徽石台县与青阳县苔藓植物多样性. 生物多样性, 30, 21186. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2021186>

341723BRYR0007	青阳县陵阳镇神龙谷	2019-10-15	30.4163° N, 117.8125° E	336–456 m	3,740 m	32	+	
341723BRYR0008	青阳县陵阳镇一天门	2019-10-15	30.42° N, 117.7948° E	661–753 m	1,230 m	30	+	
341723BRYR0010	青阳县朱备镇东桥村	2019-10-16	30.5403° N, 117.8567° E	116–574 m	3,000 m	32		+
341723BRYR0021	青阳县酉华镇李家村	2019-10-17	30.6759° N, 117.9907° E	45–83 m	3,550 m	29		+
341723BRYR0022	青阳县乔木乡官塘村	2019-10-17	30.6761° N, 118.0809° E	59–70 m	2,030 m	23		+
341723BRYR0026	青阳县九华山栈道	2020-05-24	30.485° N, 117.8283° E	1,135–1,281 m	2,880 m	3	+	
341723BRYR0030	青阳县木镇南河村	2020-05-22	30.7176° N, 117.9426° E	9–34 m	4,810 m	9		+
341723BRYR0031	青阳县盘台保护区	2020-05-23	30.6006° N, 118.0311° E	145–360 m	3,450 m	28	+	
341723BRYR0040	青阳县土地堂	2020-05-21	30.6241° N, 117.7847° E	84–176 m	2,450 m	9		+



### 附录3 安徽省石台县和青阳县苔藓植物名录

Appendix 3 A checklist of bryophytes of Shitai County and Qingyang County, Anhui Province

(1)科、属、种按拉丁字母顺序排列。\*为安徽省新记录种; #为历史记录中本研究未采到种类。

(2)所有凭证标本存放于华东师范大学生物标本馆(HSNU)。

## 苔类植物门 Marchantiophyta

### 隐蒴苔科 Adelanthaceae

#### 对耳苔属 *Syzygiella* Spruce

1. 筒萼对耳苔 *Syzygiella autumnalis* (DC.) K.Feldberg, Váňa, Hentschel et Heinrichs, 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-025, R006-042。

### 挺叶苔科 Anastrophyllaceae

#### 折瓣苔属 *Sphenolobus* (Lindb.) Berggr.

2. \*小挺叶苔 *Sphenolobus minutus* (Schreb. ex D.Crantz) Berggr., 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-002, R001-094; 石台县大演乡新火村张天坳, 王健 20190917-25。

#### 褶萼苔属 *Plicanthus* R.M.Schust.

3. 全缘褶萼苔 *Plicanthus birmensis* (Steph.) R.M.Schust., 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-007。
4. 齿边褶萼苔 *Plicanthus hirtellus* (F.Weber) R.M.Schust., 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-005, R004-051; 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-47。

### 绿片苔科 Aneuraceae

#### 片叶苔属 *Riccardia* Gray

5. \*羽枝片叶苔小亚种 *Riccardia multifida* subsp. *decrescens* (Steph.) Furuki, 青阳县盘台保护区, 邢诗晨 20200523025。
6. \*掌状片叶苔 *Riccardia palmata* (Hedw.) Carruth., 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-067, R005-068; 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-20。
7. \*密疣片叶苔 *Riccardia tamariscina* (Steph.) Schiffn., 石台县大演乡新火村张天坳, 王健 20190917-23。

### 疣冠苔科 Aytoniaceae

#### 紫背苔属 *Plagiochasma* Lehm.

8. \*钝鳞紫背苔 *Plagiochasma appendiculatum* Lehm. et. Lindenb., 石台县仁里镇贡溪村, 王健 20190924-6。
9. #无纹紫背苔 *Plagiochasma intermedium* Lindenb. et Gottsche, 石台县(郭新弧等, 1990)。

#### 石地钱属 *Reboulia* Raddi

10. 石地钱 *Reboulia hemisphaerica* (L.) Raddi, 青阳县盘台保护区, 邢诗晨 20200523024; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 20200520018。

### 睫毛苔科 Blepharostomataceae

#### 睫毛苔属 *Blepharostoma* (Dumort.) Dumort.

11. 小睫毛苔 *Blepharostoma minor* Horik., 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-032E。
12. 睫毛苔 *Blepharostoma trichophyllum* (L.) Dumort., 石台县大演乡新火村张天坳, 王健 20190917-24。

## 护蒴苔科 *Calypogeiaceae*

### 护蒴苔属 *Calypogeia* Raddi

13. 刺叶护蒴苔 *Calypogeia arguta* Nees et Mont., 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 20191014-22(0035), 20191014-30(0035), 20191014-31(0035), 20191014-43(0035); 青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 20191015-32(0008); 青阳县陵阳镇周家村, 戴尊 20191014-11(0036), 20191014-13(0036), 20191014-29(0036); 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-005, R006-006, R006-012; 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 20191016-51(0010), 20191016-56(0010), 20191016-61(0010); 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-029, R005-043, R005-058; 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-008, R001-059, R001-085, R001-087, R001-088; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-022; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-005, R002-008, R002-024, R002-025, R002-030, R002-065; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 20200520045。
14. 三角护蒴苔 *Calypogeia azurea* Stotler et Crotz, 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-040; 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-042; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-062, R002-081。
15. \*护蒴苔 *Calypogeia fissa* (L.) Raddi, 安徽青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 20191014-29(0035); 安徽青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 20191015-31(0008), 20191015-33(0008), 20191015-34(0008); 安徽石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-028; 安徽石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-013; 安徽石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-014, R003-048; 安徽石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-078;
16. \*全缘护蒴苔 *Calypogeia japonica* Steph., 安徽青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 20191015-10(0007), 20191015-15(0007); 安徽青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 20191015-11(0008), 20191015-30(0008); 安徽石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-016, R005-044, R005-052; 安徽石台县大演乡新火村张天坳, 王健 20190917-26; 安徽石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-040, R002-053, R002-080;
17. 双齿护蒴苔 *Calypogeia tosana* (Steph.) Steph., 安徽青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 20191016-36(0010); 安徽石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-096; 安徽石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-045, R003-084; 安徽石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-042, R002-043, R002-047A;

## 大萼苔科 *Cephaloziaceae*

### 大萼苔属 *Cephalozia* (Dumort.) Dumort.

18. \*毛口大萼苔 *Cephalozia lacinulata* (J.B.Jack ex Gottsche et Rabenh.) Spruce, 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-032C; 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 20191013-32(0034)。
19. \*短瓣大萼苔 *Cephalozia macounii* (Austin) Austin, 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-010A。

### 棕萼苔属 *Fuscocephaloziopsis* Fulford

20. \*喙叶棕萼苔 *Fuscocephaloziopsis connivens* (Dicks.) Vána et L.Söderstr., 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-027, R006-044, R006-048; 石台县大演乡新火村双河口, 王健 20190917-17; 石台县大演乡新火村张天坳, 王健 20190917-33。

### 拳叶苔属 *Nowellia* Mitt.

21. 无毛拳叶苔 *Nowellia aciliata* (P.C.Chen et P.C.Wu) Mizut., 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-026; 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-48。
22. 拳叶苔 *Nowellia curvifolia* (Dicks.) Mitt., 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-048, R004-072, R004-078, R004-082。

**裂齿苔属 *Odontoschisma* (Dumort.) Dumort.**

23. 合叶裂齿苔 *Odontoschisma denudatum* (Mart.) Dumort., 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-039, R004-071。
24. \*粗疣裂齿苔 *Odontoschisma grosseverrucosum* Steph., 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-019; 石台县大演乡新火村双河口, 王健 20190917-2。

**拟大萼苔科 *Cephaloziellaceae***

**拟大萼苔属 *Cephaloziella* (Spruce) Schiffn.**

25. \*小叶拟大萼苔 *Cephaloziella microphylla* (Steph.) Douin, 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-022; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 20200520022。
26. 刺茎拟大萼苔 *Cephaloziella spinicaulis* Douin, 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 20191016-17(0010), 20191016-25(0010); 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-032。

**筒萼苔属 *Cylindrocolea* R.M.Schust.**

27. \*弯叶筒萼苔 *Cylindrocolea recurvifolia* (Steph.) Inoue, 石台县(郭新弧等, 1990 as *Cephaloziella recurvifolia*)。

**蛇苔科 *Conocephalaceae***

**蛇苔属 *Conocephalum* Hill**

28. 蛇苔 *Conocephalum conicum* (L.) Dumort., 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-077; 石台县矶滩乡洪墩村东风组, 王健 20190924-16; 石台县仙寓乡大山村双坑组, 王健 20190918-6。
29. 小蛇苔 *Conocephalum japonicum* (Thunb.) Grolle, 石台县仁里镇贡溪村, 王健 20190924-14; 石台县仙寓乡大山村双坑组, 王健 20190918-12。
30. \*暗色蛇苔 *Conocephalum salebrosum* Szweyk., Buczk. et Odrzyk., 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 20191014-05(0035)。

**毛地钱科 *Dumortieraceae***

**毛地钱属 *Dumortiera* Nees**

31. 毛地钱 *Dumortiera hirsuta* (Sw.) Nees, 青阳县盘台保护区, 邢诗晨 20200523010, 20200523020; 石台县大演乡陈田村, 王健 20190921-11; 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-064, R005-075, R005-076, R005-081; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-026, R003-037; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-076; 石台县矶滩乡洪墩村东风组, 王健 20190924-9; 石台县仁里镇杜村村平顶组, 王健 20190922-18; 石台县仙寓乡大山村双坑组, 王健 20190918-7; 石台县仙寓乡梨树松, 王健 20190920-14; 石台县小河镇郑村村, 王健 20190923-26。

**小叶苔科 *Fossombroniaceae***

**小叶苔属 *Fossombronia* Raddi**

32. 日本小叶苔 *Fossombronia japonica* Schiffn., 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-027, R002-028。

**耳叶苔科 *Frullaniaceae***

**耳叶苔属 *Frullania* Raddi**

33. 青山耳叶苔 *Frullania aoshimensis* Horik., 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-052A; 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-014, R001-022, R001-036, R001-052, R001-073, R001-083B, R001-105; 石台县大演乡新火村双河口, 王健 20190917-8; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-054B; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-073A; 石台县小河镇大麦坑, 王健 20190923-21。
34. #筒瓣耳叶苔 *Frullania diversitexta* Steph., 石台县(郭新弧等, 1990)。
35. \*暗绿耳叶苔 *Frullania fuscovirens* Steph., 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-079A。
36. 钩瓣耳叶苔 *Frullania hamatiloba* Steph., 石台县七都镇前山屋, 戴尊 20191013-16B(0033)。
37. #石生耳叶苔内弯变种 *Frullania inflata* var. *mayebarae* (S.Hatt.) K.Yamada, 石台县(郭新弧等, 1990 as *F. mayebarae*)。
38. 列胞耳叶苔 *Frullania moniliata* (Reinw., Blume et Nees) Mont., 青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 20191015-38(0008); 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-31, 20190919-38, 20190919-41, 20190919-7。
39. #羊角耳叶苔 *Frullania monocera* (Hook. f. et Taylor) Gottsche, Lindenb. et Nees, 石台县(郭新弧等, 1990 as *F. hampeana*)。
40. 盔瓣耳叶苔 *Frullania muscicola* Steph., 青阳县西华镇李家村, 戴尊 20191017-35(0021), 20191017-36(0021); 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 20191016-20(0010), 20191016-22(0010), 20191016-24(0010), 20191016-27(0010); 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-062; 石台县矾滩乡洪墩村东风组, 王健 20190924-11, 20190924-15A; 石台县七都镇前山屋, 戴尊 20191013-14(0033); 石台县仁里镇杜村村平顶组, 王健 20190922-20; 石台县仁里镇贡溪村, 王健 20190924-12; 石台县仙寓乡梨树耘, 王健 20190920-10; 石台县小河镇外叶村, 王健 20190923-29, 20190923-42。
41. \*大隅耳叶苔 *Frullania osumiensis* (S.Hatt.) S.Hatt., 青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 20191015-09(0008); 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-33。
42. \*钟瓣耳叶苔 *Frullania parvistipula* Steph., 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-040, R001-041, R001-076; 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-27, 20190919-28; 石台县仁里镇杜村村蓬莱仙洞, 王健 20190922-24; 石台县仙寓乡大山村七彩石景观, 王健 20190918-28, 20190918-29A, 20190918-32; 石台县仙寓乡梨树耘, 王健 20190920-30。
43. #陕西耳叶苔 *Frullania schensiana* C.Massal., 石台县(郭新弧等, 1990)。
44. \*中华耳叶苔 *Frullania sinensis* Steph., 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 20200520013B; 石台县七都镇前山屋, 戴尊 20191013-11(0033), 20191013-16A(0033)。
45. #欧耳叶苔 *Frullania tamarisci* (L.) Dumort., 石台县(郭新弧等, 1990)。
46. #硬叶耳叶苔 *Frullania valida* Steph., 石台县(郭新弧等, 1990)。

### 全萼苔科 *Gymnomitriaceae*

#### 钱袋苔属 *Marsupella* Dumort.

47. #钱袋苔小亚种 *Marsupella emarginata* subsp. *tubulosa* (Steph.) N.Kitag., 石台县(郭新弧等, 1990)。

#### 被蒴苔属 *Nardia* Gray

48. #南亚被蒴苔 *Nardia assamica* (Mitt.) Amakawa, 石台县(郭新弧等, 1990 as *N. sieboldii*)。

### 剪叶苔科 *Herbertaceae*

#### 剪叶苔属 *Herbertus* Gray

49. #剪叶苔 *Herbertus aduncus* (Dicks.) Gray, 石台县(郭新弧等, 1990)。
50. 长角剪叶苔 *Herbertus dicranus* (Gottsche, Lindenb. et Nees) Trevis., 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-008。
51. \*小叶剪叶苔 *Herbertus tenuis* A.Evans, 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-018。



## 毛耳苔科 *Jubulaceae*

### 毛耳苔属 *Jubula* Dumort.

52. #爪哇毛耳苔 *Jubula hutchinsiae* subsp. *javanica* (Steph.) Verd., 石台县(郭新弧等, 1990 as *J. javanica*)。

## 叶苔科 *Jungermanniaceae*

### 狭叶苔属 *Liochlaena* Nees

53. \*狭叶苔 *Liochlaena lanceolata* Nees, 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-020。

## 细鳞苔科 *Lejeuneaceae*

### 顶鳞苔属 *Acrolejeunea* (Spruce) Schiffn.

54. 南亚顶鳞苔 *Acrolejeunea sandvicensis* (Gottsche) Steph., 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 20191015-35(0007); 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-060; 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-017; 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-34; 石台县仁里镇杜村村平顶组, 王健 20190922-15, 20190922-19, 20190922-21; 石台县仙寓乡大山村七彩石景观, 王健 20190918-23, 20190918-36; 石台县仙寓乡梨树耘, 王健 20190920-29, 20190920-33, 20190920-8; 石台县小河镇大麦坑, 王健 20190923-19。

### 唇鳞苔属 *Cheilolejeunea* (Spruce) Steph.

55. 粗茎唇鳞苔 *Cheilolejeunea trapezia* (Nees) Kachroo et R.M.Schust., 青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 20191015-42(0008); 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-004, R006-061; 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-079B; 石台县大演乡新火村双河口, 王健 20190917-9A。

### 疣鳞苔属 *Cololejeunea* (Spruce) Steph.

56. \*薄叶疣鳞苔 *Cololejeunea appressa* (A.Evans) Benedix, 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-37D。
57. \*东亚疣鳞苔 *Cololejeunea japonica* (Schiffn.) Mizut., 青阳县西华镇李家村, 戴尊 20191017-18(0021); 石台县仙寓乡梨树耘, 王健 20190920-12。
58. #鳞叶疣鳞苔 *Cololejeunea longifolia* (Mitt.) Benedix ex Mizut., 石台县(师雪芹等, 2018)。
59. 距齿疣鳞苔 *Cololejeunea macounii* (Spruce) A.Evans, 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-37C, 20190919-5。
60. 粗柱疣鳞苔 *Cololejeunea ornata* A.Evans, 石台县大演乡陈田村, 王健 20190921-7。
61. \*拟棉毛疣鳞苔 *Cololejeunea pseudofloccosa* (Horik.) Benedix, 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-37A。
62. 拟疣鳞苔 *Cololejeunea raduliloba* Steph., 青阳县乔木乡官塘村, 戴尊 20191017-22(0022), 20191017-26(0022); 青阳县西华镇李家村, 戴尊 20191017-20(0021), 20191017-32(0021), 20191017-33(0021), 20191017-40(0021); 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-035; 石台县仙寓乡梨树耘, 王健 20190920-27; 石台县小河镇大麦坑, 王健 20190923-8; 石台县小河镇外叶村, 王健 20190923-30, 20190923-38。
63. 刺疣鳞苔 *Cololejeunea spinosa* (Horik.) Pand éet R.N.Misra, 青阳县乔木乡官塘村, 戴尊 20191017-24(0022); 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-048; 石台县七都镇前山屋, 戴尊 20191013-39(0033)。
64. \*疣瓣疣鳞苔 *Cololejeunea subkodamae* Mizut., 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-37B。

### 角鳞苔属 *Drepanolejeunea* (Spruce) Steph.

65. #狭叶角鳞苔 *Drepanolejeunea angustifolia* (Mitt.) Grolle, 石台县(郭新弧等, 1990)。

66. \*云南角鳞苔 *Drepanolejeunea yunnanensis* (P.C.Chen) Grolle et R.L.Zhu, 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-40。

#### 细鳞苔属 *Lejeunea* Lib.

67. 狭瓣细鳞苔 *Lejeunea anisophylla* Mont., 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-043; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-048, R002-049A。
68. #湿生细鳞苔 *Lejeunea aquatica* Horik., 青阳县(师雪芹等, 2018)。
69. #耳瓣细鳞苔 *Lejeunea compacta* (Steph.) Steph., 青阳县(Zhu & So, 1999)。
70. 黄色细鳞苔 *Lejeunea flava* (Sw.) Nees, 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-089。
71. 日本细鳞苔 *Lejeunea japonica* Mitt., 青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 20191015-05(0008), 20191015-16(0008), 20191015-17(0008); 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-047; 石台县大演乡新火村张天坳, 王健 20190917-39; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-012; 石台县仙寓乡大山村七彩石景观, 王健 20190918-33。
72. #尖叶细鳞苔 *Lejeunea neelgherriana* Gottsche, 青阳县(师雪芹等, 2018)。
73. 暗绿细鳞苔 *Lejeunea obscura* Mitt., 青阳县盘台保护区, 邢诗晨 20200523012; 石台县小河镇郑村村, 王健 20190923-24。
74. 白绿细鳞苔 *Lejeunea pallidevirens* S.Hatt., 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-080B, R001-081A, R001-081B, R001-101; 石台县大演乡新火村双河口, 王健 20190917-9B; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-044, R003-052; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-073B。
75. 小叶细鳞苔 *Lejeunea parva* (S.Hatt.) Mizut., 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-052B; 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-055B; 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-4; 石台县小河镇大麦坑, 王健 20190923-22。
76. \*疣萼细鳞苔 *Lejeunea tuberculosa* Steph., 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-069, R003-071; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-049B; 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-37E; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 20200520068B。

#### 纤鳞苔属 *Microlejeunea* (Spruce) Steph.

77. 斑叶纤鳞苔 *Microlejeunea punctiformis* (Taylor) Steph., 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-24。

#### 皱萼苔属 *Ptychanthus* Nees

78. #皱萼苔 *Ptychanthus striatus* (Lehm. et Lindenb.) Nees, 石台县(师雪芹等, 2018)。

#### 多褶苔属 *Spruceanthus* Verd.

79. 镰状多褶苔 *Spruceanthus falcatus* X.Q.Shi, R.L.Zhu et Gradst., 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-080A; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-027; 石台县仙寓乡大山村七彩石景观, 王健 20190918-24B。
80. \*东亚多褶苔 *Spruceanthus kiushianus* (Horik.) X.Q.Shi, R.L.Zhu et Gradst., 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-109; 石台县大演乡新火村张天坳, 王健 20190917-42; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 20200520068A。
81. \*平叶多褶苔 *Spruceanthus planiusculus* (Mitt.) X.Q.Shi, R.L.Zhu et Gradst., 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-055A。
82. 多褶苔 *Spruceanthus semirepandus* (Nees) Verd., 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-43。

#### 指叶苔科 *Lepidoziaceae*

##### 鞭苔属 *Bazzania* Gray

83. #厚角鞭苔 *Bazzania fauriana* (Steph.) S.Hatt., 石台县(郭新弧等, 1990)。

84. 日本鞭苔 *Bazzania japonica* (Sande Lac.) Lindb., 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 20191015-44(0007); 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-059; 石台县大演乡新火村双河口, 王健 20190917-1, 20190917-16; 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-49。
85. 三裂鞭苔 *Bazzania tridens* (Reinw., Blume et Nees) Trevis., 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 20191015-25(0007); 青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 20191015-41(0008); 青阳县陵阳镇周家村, 戴尊 20191014-31(0036), 20191014-32(0036); 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 20191016-15(0010), 20191016-57(0010); 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-009, R001-084, R001-097; 石台县大演乡新火村张天坳, 王健 20190917-35; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-040, R003-047, R003-086, R003-087, R003-090, R003-091; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-046, R002-047B, R002-056A, R002-066; 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-12; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 20200520012; 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 20191013-33(0034); 石台县仁里镇杜村村平顶组, 王健 20190922-11; 石台县小河镇外叶村, 王健 20190923-43, 20190923-44。

### 齿萼苔科 *Lophocoleaceae*

#### 裂萼苔属 *Chiloscyphus* Corda

86. \*中华裂萼苔 *Chiloscyphus sinensis* J.J.Engel et R.M.Schust., 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-077。

#### 异萼苔属 *Heteroscyphus* Schiffn.

87. 四齿异萼苔 *Heteroscyphus argutus* (Reinw., Blume et Nees) Schiffn., 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 20191016-60(0010); 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-069, R005-071; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 20200520032。
88. 双齿异萼苔 *Heteroscyphus coalitus* (Hook.) Schiffn., 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-032B, R005-048, R005-063, R005-073; 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-17。
89. 叉齿异萼苔 *Heteroscyphus lophocoleoides* S.Hatt., 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-049; 青阳县庙前镇莲花峰、平坦寺, 涂淑雯 R007-025; 石台县仁里镇杜村村平顶组, 王健 20190922-14。
90. 平叶异萼苔 *Heteroscyphus planus* (Mitt.) Schiffn., 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 20191014-17(0035); 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-030; 石台县大演乡陈田村, 王健 20190921-6; 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-056; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-031, R003-034; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 20200520070B; 石台县仙寓乡大山村七彩石景观, 王健 20190918-31。
91. \*三齿异萼苔 *Heteroscyphus tridentatus* (Sande Lac.) Grolle, 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 20191014-47(0035); 青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 20191015-13(0008), 20191015-18(0008), 20191015-19(0008), 20191015-22(0008), 20191015-23(0008); 青阳县陵阳镇周家村, 戴尊 20191014-25(0036), 20191014-26(0036); 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-021, R006-023, R006-024, R006-035, R006-041, R006-045, R006-050, R006-051; 青阳县盘台保护区, 邢诗晨 20200523021, 20200523026; 青阳县西华镇李家村, 戴尊 20191017-23(0021); 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-041; 石台县仙寓乡梨树松, 王健 20190920-22; 石台县小河镇大麦坑, 王健 20190923-13。
92. 南亚异萼苔 *Heteroscyphus zollingeri* (Gottsche) Schiffn., 青阳县陵阳镇周家村, 戴尊 20191014-14(0036); 青阳县盘台保护区, 邢诗晨 20200523032; 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-018, R005-024; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-030, R003-036。

#### 齿萼苔属 *Lophocolea* (Dumort.) Dumort.

93. \*双齿齿萼苔 *Lophocolea bidentata* (L.) Dumort., 青阳县盘台保护区, 邢诗晨 20200523027; 石台县大演乡陈田村, 王健 20190921-21; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-069。
94. 异叶齿萼苔 *Lophocolea heterophylla* (Schrad.) Dumort., 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 20191014-40(0035), 20191014-53(0035); 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 20191015-05(0007); 青阳县酉华镇李家村, 戴尊 20191017-29(0021); 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-054; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 20200520038。
95. \*圆叶齿萼苔 *Lophocolea horikawana* S.Hatt., 石台县仙寓乡大山村七彩石景观, 王健 20190918-34。
96. \*疏叶齿萼苔 *Lophocolea itoana* Inoue, 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-009。

### 南溪苔科 *Makinoaceae*

#### 南溪苔属 *Makinoa* Miyake

97. #南溪苔 *Makinoa crispata* (Steph.) Miyake, 石台县(郭新弧等, 1990)。

### 地钱科 *Marchantiaceae*

#### 地钱属 *Marchantia* L.

98. \*楔瓣地钱东亚亚种 *Marchantia emarginata* subsp. *tosana* (Steph.) Bischl., 石台县大演乡陈田村, 王健 20190921-13; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-088; 石台县仁里镇杜村村平顶组, 王健 20190922-13; 石台县仙寓乡梨树松, 王健 20190920-32。
99. #粗裂地钱 *Marchantia paleacea* Bertol., 石台县(郭新弧等, 1990)。
100. \*粗裂地钱凤兜亚种 *Marchantia paleacea* subsp. *diptera* (Nees et Mont.) Inoue, 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-059。
101. \*地钱土生亚种 *Marchantia polymorpha* subsp. *ruderalis* Bischl. et Boissel.-Dub., 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-082。

### 叉苔科 *Metzgeriaceae*

#### 叉苔属 *Metzgeria* Raddi

102. 平叉苔 *Metzgeria conjugata* Lindb., 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-034; 涂淑雯 R005-035。
103. \*大叉苔 *Metzgeria fruticulosa* (Dicks.) A.Evans, 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-064。
104. 叉苔 *Metzgeria furcata* (L.) Corda, 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-043; 石台县仙寓乡大山村七彩石景观, 王健 20190918-18。

### 带叶苔科 *Pallaviciniaceae*

#### 带叶苔属 *Pallavicinia* Gray

105. 带叶苔 *Pallavicinia lyellii* (Hook.) Gray, 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-092; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-070; 石台县仙寓乡大山村双坑组, 王健 20190918-10。

### 溪苔科 *Pelliaceae*

#### 溪苔属 *Pellia* Raddi

106. #花叶溪苔 *Pellia endiviifolia* (Dicks.) Dumort., 石台县(郭新弧等, 1990)。
107. 溪苔 *Pellia epiphylla* (L.) Corda, 石台县仁里镇贡溪村, 王健 20190924-15B; 石台县仙寓乡大山村双坑组, 王健 20190918-13。



## 羽苔科 *Plagiochilaceae*

### 鞭羽苔属 *Chiastocaulon* Carl

108. \*羽状鞭羽苔 *Chiastocaulon dendroides* (Nees) Carl, 石台县(郭新弧等, 1990 as *Plagiochila dendroides*)。

### 羽苔属 *Plagiochila* (Dumort.) Dumort.

109. \*卵叶羽苔 *Plagiochila ovalifolia* Mitt., 石台县(郭新弧等, 1990)。

110. 刺叶羽苔 *Plagiochila sciophila* Nees, 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 20191015-37(0007); 青阳县盘台保护区, 邢诗晨 20200523008, 20200523009; 青阳县乔木乡官塘村, 戴尊 20191017-12(0022), 20191017-15(0022); 石台县大演乡陈田村, 王健 20190921-12。

111. \*延叶羽苔 *Plagiochila semidecurrens* (Lehm. et Lindenb.) Lindenb., 石台县(郭新弧等, 1990)。

## 光萼苔科 *Porellaceae*

### 光萼苔属 *Porella* L.

112. 丛生光萼苔 *Porella caespitans* (Steph.) S.Hatt., 青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 20191015-07(0008)。

113. \*丛生光萼苔日本变种 *Porella caespitans* var. *nipponica* S.Hatt., 石台县(郭新弧等, 1990)。

114. 中华光萼苔 *Porella chinensis* (Steph.) S.Hatt., 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 20191014-10(0035), 20191014-11(0035); 青阳县乔木乡官塘村, 戴尊 20191017-09(0022)。

115. 密叶光萼苔 *Porella densifolia* (Steph.) S.Hatt., 石台县大演乡陈田村, 王健 20190921-25; 石台县仁里镇杜村村蓬莱仙洞, 王健 20190922-3; 石台县仙寓乡大山村七彩石景观, 王健 20190918-39。

116. 亮叶光萼苔 *Porella nitens* (Steph.) S.Hatt., 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-075。

117. 毛边光萼苔齿叶变种 *Porella perrottetiana* var. *ciliatodentata* (P.C.Chen et P.C.Wu) S.Hatt., 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-104。

118. 多瓣光萼苔 *Porella ulophylla* (Steph.) S.Hatt., 石台县仙寓乡大山村七彩石景观, 王健 20190918-29B。

## 扁萼苔科 *Radulaceae*

### 扁萼苔属 *Radula* Dumort.

119. 尖舌扁萼苔 *Radula acuminata* Steph., 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-083A。

120. \**Radula acuta* Mitt., 石台县(郭新弧等, 1990 as *R. apiculata*)。

121. 大瓣扁萼苔 *Radula cavifolia* Hampe ex Gottsche, 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-057; 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-014, R004-015, R004-022, R004-026, R004-027, R004-030, R004-033, R004-034, R004-037, R004-040, R004-044, R004-056, R004-070。

122. \*扁萼苔 *Radula complanata* (L.) Dumort., 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-058, R003-079; 石台县小河镇大麦坑, 王健 20190923-23; 石台县小河镇郑村村, 王健 20190923-25。

123. 日本扁萼苔 *Radula japonica* Gottsche, 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 20191015-32(0007); 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 20191016-37(0010); 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-068, R001-077; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-070; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-018, R002-068; 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-32, 20190919-6; 石台县仙寓乡大山村七彩石景观, 王健 20190918-24A, 20190918-37。

124. 尖叶扁萼苔 *Radula kojana* Steph., 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 20191015-23(0007); 青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 20191015-21(0008), 20191015-39(0008); 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水库附近, 涂淑雯 R005-032A; 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-066; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯

R003-054A; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-072; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 20200520070A。

125. 芽胞扁萼苔 *Radula lindenberiana* Gottsche ex C.Hartm., 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 20191015-08(0007); 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-055; 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-074, R004-075; 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-033; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-060, R003-072; 石台县七都镇前山屋, 戴尊 20191013-34(0033); 石台县仁里镇杜村村蓬莱仙洞, 王健 20190922-8; 石台县仙寓乡梨树耘, 王健 20190920-34; 石台县小河镇外叶村, 王健 20190923-37。
126. \*热带扁萼苔 *Radula madagascariensis* Gottsche, 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-35; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 20200520013A。

### 钱苔科 Ricciaceae

#### 浮苔属 *Ricciocarpos* Corda

127. 浮苔 *Ricciocarpos natans* (L.) Corda, 青阳县木镇南河村, 邢诗晨 20200522022。

### 合叶苔科 Scapaniaceae

#### 合叶苔属 *Scapania* (Dumort.) Dumort.

128. \*柯氏合叶苔 *Scapania koponenii* Potemkin, 石台县大演乡新火村双河口, 王健 20190917-15。
129. 舌叶合叶苔多齿亚种 *Scapania ligulata* subsp. *stephanii* (Müll.Frib.) Potemkin, Piippo et T.J.Kop., 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-032D; 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-010B, R001-012; 石台县大演乡新火村双河口, 王健 20190917-11, 20190917-21; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 20200520062, 20200520063。
130. \*大合叶苔 *Scapania paludosa* (Müll.Frib.) Müll.Frib., 石台县仙寓乡梨树耘, 王健 20190920-25。
131. #弯瓣合叶苔 *Scapania parvitexta* Steph., 石台县(郭新弧等, 1990)。

### 管口苔科 Solenostomataceae

#### 管口苔属 *Solenostoma* Mitt.

132. 褐绿管口苔 *Solenostoma infusum* (Mitt.) Hentschel, 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 20191014-24(0035); 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-036; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-056B。
133. #倒卵叶管口苔 *Solenostoma obovatum* (Nees) C.Massal., 石台县(郭新弧等, 1990)。
134. \*莲座管口苔 *Solenostoma rosulans* (Steph.) Váňa et D.G.Long, 石台县大演乡新火村张天坳, 王健 20190917-27。
135. \*截叶管口苔 *Solenostoma truncatum* (Nees) R.M.Schust. ex Váňa et D.G.Long, 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 20191014-35(0035), 20191014-36(0035); 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 20191015-19(0007), 20191015-20(0007); 青阳县陵阳镇周家村, 戴尊 20191014-09(0036), 20191014-10(0036); 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-047; 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-042, R005-050, R005-080; 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-082; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-017, R003-082; 石台县仙寓乡大山村双坑组, 王健 20190918-14。

## 藓类植物门 Bryophyta

### 柳叶藓科 Amblystegiaceae

#### 细湿藓属 *Campylium* (Sull.) Mitt.

136. #长肋细湿藓 *Campylium polygamum* (Schimp.) C.E.O.Jensen, 石台县(郭新弧等, 1990)。

**镰刀藓属 *Drepanocladus* (Müll.Hal.) G.Roth**

137. #镰刀藓直叶变种 *Drepanocladus aduncus* var. *kneiffii* (Bruch et Schimp.) Mönk., 青阳县(胡人亮和王幼芳, 2005; Hu et al, 2008)。

### 牛舌藓科 **Anomodontaceae**

**牛舌藓属 *Anomodon* Hook. et Taylor**

138. 小牛舌藓 *Anomodon minor* (Hedw.) Lindb., 石台县大演乡陈田村, 王健 20190921-2A; 青阳县酉华镇李家村, 戴尊 R0021-20191017-04; 青阳县酉华镇李家村, 戴尊 R0021-20191017-12; 青阳县酉华镇李家村, 戴尊 R0021-20191017-41。

139. \*带叶牛舌藓 *Anomodon perlingulatus* Broth. ex P.C.Wu et Y.Jia, 石台县仙寓乡梨树松, 王健 20190920-3; 石台县仁里镇杜村村平顶组, 王健 20190922-5; 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-17。

140. 牛舌藓 *Anomodon viticulosus* (Hedw.) Hook. et Taylor, 石台县大演乡陈田村, 王健 20190921-5; 青阳县乔木乡官塘村, 戴尊 R0022-20191017-11; 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-30; 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 R0034-20191013-04。

**多枝藓属 *Haplohymenium* Dozy et Molk.**

141. 鞭枝多枝藓 *Haplohymenium flagelliforme* L.I.Savicz, 石台县矾滩乡洪墩村东风组, 王健 20190924-13。

142. 拟多枝藓 *Haplohymenium pseudo-triste* (Müll.Hal.) Broth., 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-25; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-037; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-056; 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-025; 青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 R008-20191015-12A; 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-32。

143. 暗绿多枝藓 *Haplohymenium triste* (Ces.) Kindb., 石台县仙寓乡, 王健 20190920-5; 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-045, R004-080; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520060B; 青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 R008-20191015-08; 青阳县酉华镇李家村, 戴尊 R0021-20191017-14, R0021-20191017-19; 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-09B, R0033-20191013-13, R0033-20191013-15A。

**羊角藓属 *Herpetineuron* (Müll.Hal.) Cardot**

144. 羊角藓 *Herpetineuron toccoae* (Sull. et Lesq.) Cardot, 石台县仙寓乡大山村七彩石景观, 王健 20190918-20; 石台县小河镇大麦坑, 王健 20190923-1, 20190923-14, 20190923-16; 石台县小河镇外叶村, 王健 20190923-31; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-014; 青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 R008-20191015-25B, R008-20191015-39A; 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-19; 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 R0035-20191014-03, R0035-20191014-04, R0035-20191014-51B。

**拟附干藓属 *Schwetschkeopsis* Broth.**

145. 拟附干藓 *Schwetschkeopsis fabronia* (Schw ägr.) Broth., 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-074; 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 R007-20191015-29; 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 R0035-20191014-12, R0035-20191014-49, R0035-20191014-51A。

### 珠藓科 **Bartramiaceae**

**珠藓属 *Bartramia* Hedw.**

146. 直叶珠藓 *Bartramia ithyphylla* Brid., 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-025A。

**泽藓属 *Philonotis* Brid.**

147. \*垂蒴泽藓 *Philonotis cernua* (Wilson) D.G.Griffin et W.R.Buck, 青阳县盘台保护区, 邢诗晨 R0031-20200523030。
148. 偏叶泽藓 *Philonotis falcata* (Hook.) Mitt., 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-075; 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-093。
149. 柔叶泽藓 *Philonotis mollis* (Dozy et Molk.) Mitt., 石台县仙寓乡大山村双坑组, 王健 20190918-11; 石台县小河镇大麦坑, 王健 20190923-3; 石台县小河镇外叶村, 王健 20190923-36; 石台县小河镇大麦坑, 王健 20190923-5A; 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 R0035-20191014-50A。
150. #齿缘泽藓 *Philonotis seriata* Mitt., 青阳县(黎兴江, 2006)。
151. 细叶泽藓 *Philonotis thwaitesii* Mitt., 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 R0010-20191016-05。
152. 东亚泽藓 *Philonotis turneriana* (Schw ägr.) Mitt., 石台县大演乡陈田村, 王健 20190921-24; 石台县仁里镇贡溪村, 王健 20190924-9B; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-005; 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 R0010-20191016-32A; 青阳县乔木乡官塘村, 戴尊 R0022-20191017-20A。

### 青藓科 *Brachytheciaceae*

#### 青藓属 *Brachythecium* Schimp.

153. 灰白青藓 *Brachythecium albicans* (Hedw.) Schimp., 青阳县西华镇李家村, 戴尊 R0021-20191017-39A; 青阳县陵阳镇周家村, 戴尊 R0036-20191014-02。
154. 密枝青藓 *Brachythecium amnicola* Müll.Hal., 青阳县木镇南河村, 邢诗晨 R0022-20200522004。
155. \*耳叶青藓 *Brachythecium auriculatum* A.Jaeger, 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 R0034-20191013-02。
156. 勃氏青藓 *Brachythecium brotheri* Paris, 青阳县西华镇李家村, 戴尊 R0021-20191017-02。
157. #多褶青藓 *Brachythecium buchananii* (Hook.) A.Jaeger, 石台县(郭新弧等, 1990)。
158. 多枝青藓 *Brachythecium fasciculirameum* Müll.Hal., 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 R0035-20191014-48。
159. 皱叶青藓 *Brachythecium kuroishicum* Besch., 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-036。
160. 毛尖青藓 *Brachythecium piligerum* Cardot, 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-083; 青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 R008-20191015-15。
161. #羽枝青藓 *Brachythecium plumosum* (Hedw.) Schimp., 石台县(郭新弧等, 1990)。
162. 匍枝青藓 *Brachythecium procumbens* (Mitt.) A.Jager, 石台县大演乡陈田村, 王健 20190921-20。
163. 林地青藓 *Brachythecium starkei* (Brid.) Schimp., 青阳县木镇南河村, 邢诗晨 R0022-20200522007。
164. 绒叶青藓 *Brachythecium velutinum* (Hedw.) Schimp., 王健 20190918-35。

#### 燕尾藓属 *Bryhnia* Kaurin

165. 短枝燕尾藓 *Bryhnia brachycladula* Cardot, 青阳县陵阳镇周家村, 戴尊 R0036-20191014-15, R0036-20191014-19。
166. 短尖燕尾藓 *Bryhnia hultenii* E.B.Bartram, 石台县仙寓乡梨树松, 王健 20190920-18; 石台县仁里镇贡溪村, 王健 20190924-4A; 青阳县陵阳镇周家村, 戴尊 R0036-20191014-17A。
167. 毛尖燕尾藓 *Bryhnia trichomitria* Dixon et Thér., 石台县仙寓乡梨树松, 王健 20190920-1。

#### 美喙藓属 *Eurhynchium* Schimp.

168. 短尖美喙藓 *Eurhynchium angustirete* (Broth.) T.J.Kop., 石台县仙寓乡梨树松, 王健 20190920-19; 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 R0034-20191013-34。
169. 狭叶美喙藓 *Eurhynchium coarctum* Müll.Hal., 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-029。
170. 尖叶美喙藓 *Eurhynchium eustegium* (Besch.) Dixon, 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-037。
171. 扭尖美喙藓 *Eurhynchium kirishimense* Takaki, 青阳县乔木乡官塘村, 戴尊 R0022-20191017-14。



172. 疏网美喙藓 *Eurhynchium laxirete* Broth., 石台县仙寓乡大山村双坑组, 王健 20190918-15; 青阳县盘台保护区, 邢诗晨 R0031-20200523029; 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-072; 青阳县西华镇李家村, 戴尊 R0021-20191017-26D; 青阳县乔木乡官塘村, 戴尊 R0022-20191017-06A, R0022-20191017-16A; 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 R0034-20191013-28B。
173. 羽枝美喙藓 *Eurhynchium longirameum* (Müll.Hal.) Y.F.Wang et R.L.Hu, 青阳县乔木乡官塘村, 戴尊 R0022-20191017-16B。
174. 密叶美喙藓 *Eurhynchium savatieri* Schimp. ex Besch., 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-065。

#### 同蒴藓属 *Homalothecium* Schimp.

175. 斜蒴同蒴藓 *Homalothecium lutescens* (Hedw.) H.Rob., 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-078; 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-036。
176. 无疣同蒴藓 *Homalothecium laevisetum* Sande Lac., 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-28。

#### 鼠尾藓属 *Myuroclada* Besch.

177. 鼠尾藓 *Myuroclada maximowiczii* (G.G.Borshch.) Steere et W.B.Schofield, 青阳县木镇南河村, 邢诗晨 R0022-20200522002, R0022-20200522005A; 青阳县盘台保护区, 邢诗晨 R0031-20200523017A。

#### 褶叶藓属 *Palamocladium* Müll.Hal.

178. 深绿褶叶藓 *Palamocladium euchloron* (Bruch ex Müll.Hal.) Wijk et Margad., 石台县七都镇前山屋, 戴尊 20191013-19B; 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 R007-20191015-30; 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 R0034-20191013-06, R0034-20191013-23。
179. 褶叶藓 *Palamocladium leskeoides* (Hook.) E.Britton, 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 R0034-20191013-18, R0034-20191013-40, R0034-20191013-10。

#### 细喙藓属 *Rhynchostegiella* (Schimp.) Limpr.

180. \*光柄细喙藓 *Rhynchostegiella laeviseta* Broth., 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-028; 青阳县西华镇李家村, 戴尊 R0021-20191017-10。

#### 长喙藓属 *Rhynchostegium* Schimp.

181. \*卵叶长喙藓 *Rhynchostegium ovalifolium* S.Okamura, 青阳县西华镇李家村, 戴尊 R0021-20191017-43B。
182. 淡叶长喙藓 *Rhynchostegium pallidifolium* (Mitt.) A.Jaeger, 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-44; 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 R0035-20191014-33。
183. 水生长喙藓 *Rhynchostegium riparioides* (Hedw.) Cardot, 石台县矾滩乡洪墩村东风组, 王健 20190924-7B; 石台县仁里镇贡溪村, 王健 20190924-9A。
184. \*美丽长喙藓 *Rhynchostegium subspeciosum* (Müll.Hal.) Müll.Hal., 青阳县乔木乡官塘村, 戴尊 R0022-20191017-08。
185. #泛生长喙藓 *Rhynchostegium vagans* A.Jaeger, 石台县(郭新弧等, 1990)。

#### 拟青藓属 *Sciuro-hypnum* (Hampe) Hampe

186. 弯叶拟青藓 *Sciuro-hypnum reflexum* (Starke) Schimp., 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-002; 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-009。

#### 真藓科 Bryaceae

##### 短月藓属 *Brachymenium* Schw ägr.

187. 饰边短月藓 *Brachymenium longidens* Renauld et Cardot, 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 R0035-20191014-50B。
188. #短月藓 *Brachymenium nepalense* Hook., 石台县(郭新弧等, 1990)。

189. 丛生短月藓 *Brachymenium pendulum* Mont., 青阳县西华镇李家村, 戴尊 R0021-20191017-16C, R0021-20191017-17; 青阳县乔木乡官塘村, 戴尊 R0022-20191017-01A; 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 R0034-20191013-38B。

#### 真藓属 *Bryum* Hedw.

190. 毛状真藓 *Bryum apiculatum* Schw ägr., 石台县小河镇外叶村, 王健 20190923-35。  
191. 真藓 *Bryum argenteum* Hedw., 青阳县土地堂, 邢诗晨 R0040-20200521006A, R0040-20200521003; 青阳县西华镇李家村, 戴尊 R0021-20191017-16A; 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-35。  
192. 比拉真藓 *Bryum billarderi* Schw ägr., 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-035, R002-036A; 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-023; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520002A。  
193. 细叶真藓 *Bryum capillare* Hedw., 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-032B; 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 R0034-20191013-38A。  
194. \*蕊形真藓 *Bryum coronatum* Schw ägr., 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-18。  
195. 双色真藓 *Bryum dichotomum* Hedw., 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 R0035-20191014-13。  
196. #灰黄真藓 *Bryum pallens* Sw., 青阳县(黎兴江, 2006; Li et al, 2007)。  
197. 黄色真藓 *Bryum pallescens* Schleich. ex Schw ägr., 石台县小河镇大麦坑, 王健 20190923-5B。

#### 大叶藓属 *Rhodobryum* (Schimp.) Limpr.

198. #暖地大叶藓 *Rhodobryum giganteum* (Schw ägr.) Paris, 石台县(郭新弧等, 1990)。

#### 平蒴藓属 *Plagiobryum* Lindb.

199. \*尖叶平蒴藓 *Plagiobryum demissum* (Hook.) Lindb., 青阳县西华镇李家村, 戴尊 R0021-20191017-09; 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-05。

#### 小黄藓科 *Daltoniaceae*

##### 黄藓属 *Distichophyllum* Dozy et Molk.

200. \*厚角黄藓原变种 *Distichophyllum collenchymatosum* Cardot var. *collenchymatosum*, 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-13。

#### 曲尾藓科 *Dicranaceae*

##### 曲尾藓属 *Dicranum* Hedw.

201. 阿萨姆曲尾藓 *Dicranum assamicum* Dixon, 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 R007-20191015-43。  
202. 钩叶曲尾藓 *Dicranum hamulosum* Mitt., 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-42。  
203. 日本曲尾藓 *Dicranum japonicum* Mitt., 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-046B; 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-049。  
204. \*克什米尔曲尾藓 *Dicranum kashmirensense* Broth., 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-080。  
205. #曲尾藓 *Dicranum scoparium* Hedw., 石台县(郭新弧等, 1990)。

##### 拟白发藓属 *Paraleucobryum* (Lindb. ex Limpr.) Loeske

206. #疣肋拟白发藓 *Paraleucobryum schwarzii* (Schimp.) C.Gao et Vitt., 石台县(郭新弧等, 1990 as *D. schwarzii*)。

#### 小曲尾藓科 *Dicranellaceae*

##### 小曲尾藓属 *Dicranella* (Müll.Hal.) Schimp.

207. \*短颈小曲尾藓 *Dicranella cerviculata* (Hedw.) Schimp., 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-056。

208. 南亚小曲尾藓 *Dicranella coarctata* (Müll.Hal.) Bosch et Sande Lac., 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-022B。
209. \*疏叶小曲尾藓 *Dicranella divaricatula* Besch., 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-36; 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 R0010-20191016-18, R0010-20191016-53。
210. 多形小曲尾藓 *Dicranella heteromalla* (Hedw.) Schimp., 青阳县庙前镇莲花峰、平坦寺, 涂淑雯 R007-004; 青阳县九华山栈道, 邢诗晨 R0026-20200524003, R0026-20202524001。
211. 细叶小曲尾藓 *Dicranella micro-divaricata* (Müll.Hal.) Paris., 石台县大演乡新火村双河口, 王健 20190917-4。
212. 偏叶小曲尾藓 *Dicranella subulata* (Hedw.) Schimp., 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 R0035-20191014-41; 青阳县陵阳镇周家村, 戴尊 R0036-20191014-04, R0036-20191014-05A, R0036-20191014-08, R0036-20191014-28。

### 短颈藓科 *Diphysciaceae*

#### 短颈藓属 *Diphyscium* D.Mohr

213. \*短颈藓 *Diphyscium foliosum* (Hedw.) D.Mohr, 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520025A。
214. 东亚短颈藓 *Diphyscium fulvifolium* Mitt., 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-031。

### 牛毛藓科 *Ditrichaceae*

#### 牛毛藓属 *Ditrichum* Timm ex Hampe

215. #牛毛藓 *Ditrichum heteromallum* (Hedw.) E.Britton, 青阳县(吴明开等, 2008)。
216. #黄牛毛藓 *Ditrichum pallidum* (Hedw.) Hampe, 石台县(郭新弧等, 1990)。

#### 丛毛藓属 *Pleuridium* Rabenh.

217. #丛毛藓 *Pleuridium subulatum* (Hedw.) Rabenh., 石台县(郭新弧等, 1990)。

### 木衣藓科 *Drummondiaceae*

#### 木衣藓属 *Drummondia* Hook.

218. #中华木衣藓 *Drummondia sinensis* Müll.Hal., 青阳县(吴鹏程和贾渝, 2011; Wu et al, 2011)。

### 绢藓科 *Entodontaceae*

#### 绢藓属 *Entodon* Müll.Hal.

219. 绢藓 *Entodon cladorrhizans* (Hedw.) Müll.Hal., 石台县仙寓乡梨树坛, 王健 20190920-6, 20190920-7, 20190920-9; 石台县大演乡陈田村, 王健 20190921-1, 20190921-2B; 石台县小河镇外叶村, 王健 20190923-39; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-008, R003-021, R003-078, R003-020; 青阳县盘台保护区, 邢诗晨 R0031-20200523004; 青阳县酉华镇李家村, 戴尊 R0021-20191017-28; 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-21B; 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 R0035-20191014-52。
220. 长叶绢藓 *Entodon longifolius* (Müll.Hal.) A.Jaeger, 石台县仙寓乡大山村双坑组, 王健 20190918-30; 石台县小河镇大麦坑, 王健 20190923-6。
221. 深绿绢藓 *Entodon luridus* (Griff.) A.Jaeger, 石台县仁里镇杜村村平顶组, 王健 20190922-16; 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-018, R001-058。
222. 钝叶绢藓 *Entodon obtusatus* Broth., 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 R0035-20191014-07; 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 R0035-20191014-09。
223. 皱叶绢藓 *Entodon plicatus* Müll.Hal., 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 R0034-20191013-39。

224. 绿叶绢藓 *Entodon viridulus* Cardot, 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520031; 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 R0034-20191013-16, R0034-20191013-28A。

#### 赤齿藓属 *Erythrodonium* Hampe

225. \*穗枝赤齿藓 *Erythrodonium julaceum* (Schw ägr.) Paris, 石台县(郭新弧等, 1990)。

#### 碎米藓科 *Fabroniaceae*

##### 碎米藓属 *Fabronia* Raddi

226. \*八齿碎米藓 *Fabronia ciliaris* (Brid.) Brid., 青阳县西华镇李家村, 戴尊 R0021-20191017-07, R0021-20191017-13, R0021-20191017-37。

#### 凤尾藓科 *Fissidentaceae*

##### 凤尾藓属 *Fissidens* Hedw.

227. 异形凤尾藓 *Fissidens anomalus* Mont., 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-028; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-041, R002-091; 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-046。

228. 齿叶凤尾藓 *Fissidens crenulatus* Mitt., 石台县仙寓乡大山村双坑组, 王健 20190918-16。

229. 卷叶凤尾藓 *Fissidens dubius* P.Beauv, 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-21A, R0033-20191013-22; 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 R0034-20191013-22; 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 R007-20191015-36B。

230. \*短肋凤尾藓 *Fissidens gardneri* Mitt., 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520067。

231. 内卷凤尾藓 *Fissidens involutus* Wilson ex. Mitt., 青阳县盘台保护区, 邢诗晨 R0031-20200523015B, R0031-20200523019; 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-054; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520042。

232. \*线叶凤尾藓暗色变种 *Fissidens linearis* var. *obscuriretis* (Broth. et Paris) I.G.Stone, 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520030; 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 R0010-20191016-38A; 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 R0035-20191014-39。

233. 大风尾藓 *Fissidens nobilis* Griff., 石台县仙寓乡梨树坛, 王健 20190920-28B; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-028; 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-041, R005-061; 青阳县乔木乡官塘村, 戴尊 R0022-20191017-13。

234. \*垂叶凤尾藓 *Fissidens obscurus* Mitt., 青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 R007-20191015-40。

235. \*延叶凤尾藓 *Fissidens perdecurrens* Besch., 石台县仙寓乡大山村双坑组, 王健 20190918-4; 石台县大演乡陈田村, 王健 20190921-22; 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-060; 青阳县盘台保护区, 邢诗晨 R0031-20200523031。

236. \*锐齿凤尾藓 *Fissidens serratus* Müll.Hal., 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-002B, R001-044。

237. 鳞叶凤尾藓 *Fissidens taxifolius* Hedw., 青阳县西华镇李家村, 戴尊 R0021-20191017-22B; 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-40; 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-079。

238. 南京凤尾藓 *Fissidens teysmannianus* Dozy et Molk., 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-046; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-009, R003-025; 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-034, R006-038; 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 R0035-20191014-26; 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-077。

239. 拟小凤尾藓 *Fissidens tosaensis* Broth., 青阳县盘台保护区, 邢诗晨 R0031-20200523001, R0031-20200523018; 青阳县乔木乡官塘村, 戴尊 R0022-20191017-02, R0022-20191017-03。



### 葫芦藓科 *Funariaceae*

#### 葫芦藓属 *Funaria* Hedw.

240. #葫芦藓 *Funaria hygrometrica* Hedw., 石台县(郭新弧等, 1990; 黎兴江, 2000; Gao et al, 2003).

#### 立碗藓属 *Physcomitrium* (Brid.) Brid.

241. 红蒴立碗藓 *Physcomitrium eurystomum* Sendtn., 青阳县木镇南河村, 邢诗晨 R0022-20200522010, R0022-20200522012; 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 R0035-20191014-25。

242. 立碗藓 *Physcomitrium sphaericum* (Ludw.) Fürtm., 青阳县木镇南河村, 邢诗晨 R0022-20200522001; 青阳县土地堂, 邢诗晨 R0040-20200521002, R0040-20200521009。

### 紫萼藓科 *Grimmiaceae*

#### 无尖藓属 *Codriophorus* P.Beauv.

243. 黄无尖藓 *Codriophorus anomodontoides* (Cardot) Bednarek.-Ochyra et Ochyra, 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, R0053-202000520069。

244. 短柄无尖藓 *Codriophorus brevisetus* (Lindb.) Bednarek.-Ochyra et Ochyra, 石台县大演乡新火村双河口到张天坳, 王健 20190917-12; 石台县大演乡新火村张天坳, 王健 20190917-28, 20190917-30, 20190917-32; 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-017, R004-020, R004-059; 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-013; 青阳县庙前镇莲花峰、平坦寺, 涂淑雯 R007-026。

#### 紫萼藓属 *Grimmia* Hedw.

245. \*直叶紫萼藓 *Grimmia elatior* Bruch ex Bals.-Criv. et De Not., 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-016。

246. #高山紫萼藓 *Grimmia montana* Bruch et Schimp., 石台县(郭新弧等, 1990)。

247. #卵叶紫萼藓 *Grimmia ovalis* (Hedw.) Lindb., 石台县(郭新弧等, 1990 as *G. commutata*)。

#### 长齿藓属 *Niphotrichum* (Bednarek-Ochyra) Bednarek-Ochyra et Ochyra

248. #长齿藓 *Niphotrichum canescens* (Hedw.) Bednarek-Ochyra et Ochyra, 石台县(郭新弧等, 1990 as *R. canescens*)。

249. 东亚长齿藓 *Niphotrichum japonicum* (Dozy et Molk.) Bedn.-Ochyra et Ochyra, 石台县矶滩乡洪墩村东风组, 王健 20190924-6; 青阳县土地堂, 邢诗晨 R0040-20200521008; 青阳县庙前镇莲花峰、平坦寺, 涂淑雯 R007-012。

#### 连轴藓属 *Schistidium* Bruch et Schimp.

250. #圆蒴连轴藓 *Schistidium apocarpum* (Hedw.) Bruch et Schimp., 石台县(郭新弧等, 1990 as *G. apocarpa*)。

### 虎尾藓科 *Hedwigiaceae*

#### 虎尾藓属 *Hedwigia* P.Beauv.

251. 虎尾藓 *Hedwigia ciliata* (Hedw.) P.Beauv., 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-032A, R002-033; 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-056; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-002; 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 R0010-20191016-09。

### 异枝藓科 *Heterocladiaceae*

#### 粗疣藓属 *Fauriella* Besch.

252. 小粗疣藓 *Fauriella tenerrima* Broth., 石台县大演乡新火村双河口到张天坳, 王健 20190917-18; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-051。

#### 油藓科 Hookeriaceae

##### 油藓属 *Hookeria* Schw ägr.

253. 尖叶油藓 *Hookeria acutifolia* Hook. et Grev., 石台县大演乡新火村双河口到张天坳, 王健 20190917-20; 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-21A; 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-047, R005-051, R005-053, R005-055。

#### 塔藓科 Hylcomiaceae

##### 梳藓属 *Ctenidium* (Schimp.) Mitt.

254. 柔枝梳藓 *Ctenidium andoi* N.Nishim., 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-064; 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-102, R001-023, R001-061A, R001-064; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-093; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520021B。
255. #毛叶梳藓 *Ctenidium capillifolium* (Mitt.) Broth., 石台县(郭新弧等, 1990)。
256. 平叶梳藓 *Ctenidium homalophyllum* Broth. et Yasuda ex Ihsiba, 石台县大演乡陈田村, 王健 20190921-16; 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 R007-20191015-28B。
257. \*麻齿梳藓 *Ctenidium malacobolum* (Müll.Hal.) Broth., 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-052A; 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-029, R001-021, R001-051; 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-011, R005-026, R005-031。
258. 梳藓 *Ctenidium molluscum* (Hedw.) Mitt., 石台县大演乡陈田村, 王健 20190921-8A; 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-010, R005-013。
259. \*羽枝梳藓 *Ctenidium pinnatum* (Broth. et Paris) Broth., 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-3, 20190919-30; 石台县仙寓乡梨树砧, 王健 20190920-28A; 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-054A; 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-005; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520059。

##### 小蔓藓属 *Meteoriella* S.Okamura

260. #小蔓藓 *Meteoriella soluta* (Mitt.) S.Okamura, 石台县(郭新弧等, 1990)。

#### 灰藓科 Hypnaceae

##### 偏蒴藓属 *Ectropothecium* Mitt.

261. \*大偏蒴藓 *Ectropothecium penzigianum* M.Fleisch., 石台县大演乡新火村张天坳, 王健 20190917-31; 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-10; 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-007, R001-099, R001-106; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-071。
262. 平叶偏蒴藓 *Ectropothecium zollingeri* (Müll.Hal.) A.Jaeger, 石台县小河镇郑村村, 王健 20190923-27。

##### 粗枝藓属 *Gollania* Broth.

263. \*粗枝藓 *Gollania clarescens* (Mitt.) Broth., 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-031。

##### 灰藓属 *Hypnum* Hedw.

264. 钙生灰藓 *Hypnum calcicola* Ando, 石台县大演乡新火村双河口, 王健 20190917-5; 石台县仁里镇杜村村平顶组, 王健 20190922-12; 石台县小河镇外叶村, 王健 20190923-45; 石台县仁里镇贡溪村, 王健 20190924-2B; 石台县矶滩乡洪墩村东风组, 王健 20190924-4B; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-011; 青阳县木镇南河村, 邢诗晨 R0022-20200522013; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-019; 青阳县盘台保护区, 邢诗晨 R0031-20200523033B; 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂

- 淑雯 R004-011, R004-016, R004-024, R004-057; 青阳县庙前镇莲花峰、平坦寺, 涂淑雯 R007-014A, R007-021; 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 R007-20191015-01A, R007-20191015-45; 青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 R008-20191015-27; 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 R0010-20191016-02; 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-23B; 青阳县陵阳镇周家村, 戴尊 R0036-20191014-21, R0036-20191014-23, R0036-20191014-30。
265. 灰藓 *Hypnum cupressiforme* Hedw., 石台县小河镇外叶村, 王健 20190923-33; 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-024, R001-050; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-034; 青阳县土地堂, 邢诗晨 R0040-20200521007A。
266. \*密枝灰藓 *Hypnum densirameum* Ando, 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-035, R001-091; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-003, R002-021; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-001; 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-047; 青阳县庙前镇莲花峰、平坦寺, 涂淑雯 R007-002。
267. 长喙灰藓 *Hypnum fujiyamae* (Broth.) Paris, 石台县大演乡陈田村, 王健 20190921-7; 石台县小河镇大麦坑, 王健 20190923-7。
268. 美灰藓 *Hypnum leptothallum* (Müll.Hal.) Paris, 石台县仙寓乡梨树耘, 王健 20190920-2; 石台县仁里镇杜村村平顶组, 王健 20190922-6; 石台县小河镇大麦坑, 王健 20190923-17; 青阳县庙前镇莲花峰、平坦寺, 涂淑雯 R007-005A; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-023; 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 R0034-20191013-30, R0034-20191013-36, R0034-20191013-37。
269. 南亚灰藓 *Hypnum oldhamii* (Mitt.) A.Jaeger, 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-002; 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 R007-20191015-04; 青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 R008-20191015-39B。
270. 黄灰藓 *Hypnum pallescens* (Hedw.) P.Beauv., 石台县仙寓乡大山村双坑组, 王健 20190918-3; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-012; 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-046, R006-018。
271. #大灰藓 *Hypnum plumaeforme* Wilson, 石台县(郭新弧等, 1990)。
272. #卷叶灰藓 *Hypnum revolutum* (Mitt.) Lindb., 石台县(郭新弧等, 1990)。

**拟鳞叶藓属 *Pseudotaxiphyllum* Z.Iwats.**

273. \*密叶拟鳞叶藓 *Pseudotaxiphyllum densum* (Cardot) Z.Iwats., 石台县仙寓乡大山村七彩石景观, 王健 20190918-19; 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-19, 20190919-21B, 20190919-23B, 20190919-24; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-045, R002-060; 青阳县九华山栈道, 邢诗晨 R0026-20200524004; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-083; 青阳县土地堂, 邢诗晨 R0040-20200521005; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520003, R0053-20200520054; 青阳县庙前镇莲花峰、平坦寺, 涂淑雯 R007-024; 青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 R008-20191015-12B。
274. 东亚拟鳞叶藓 *Pseudotaxiphyllum pohliaecarpum* (Sull. et Lesq.) Z.Iwats., 石台县大演乡新火村双河口到张天坳, 王健 20190917-14; 石台县大演乡新火村张天坳, 王健 20190917-43; 石台县仙寓乡大山村双坑组, 王健 20190918-17; 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-22; 石台县仙寓乡梨树耘, 王健 20190920-17; 石台县大演乡陈田村, 王健 20190921-10; 石台县仁里镇杜村村平顶组, 王健 20190922-17A, 20190922-4; 石台县小河镇大麦坑, 王健 20190923-20; 石台县仁里镇贡溪村, 王健 20190924-7A; 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-005, R001-011, R001-025, R001-086, R001-095; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-001, R002-006, R002-007, R002-057, R002-059, R002-063; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-089; 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-018A, R004-021, R004-032, R004-042, R004-053, R004-058, R004-060A, R004-061, R004-065, R004-088; 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近涂淑雯 R005-017, R005-022, R005-023, R005-074; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520001C, R0053-20200520011, R0053-20200520044,

R0053-20200520066; 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-008, R006-009, R006-011A, R006-014, R006-033; 青阳县庙前镇莲花峰、平坦寺, 涂淑雯 R007-006A, R007-013, R007-015, R007-016, R007-019A, R007-022, R007-023, R007-027; 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 R007-20191015-26, R007-20191015-72; 青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 R008-20191015-38; 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 R0010-20191016-11, R0010-20191016-16, R0010-20191016-31A, R0010-20191016-39, R0010-20191016-42, R0010-20191016-47, R0010-20191016-49, R0010-20191016-50A, R0010-20191016-52, R0010-20191016-54, R0010-20191016-55; 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 R0035-20191014-21, R0035-20191014-45C; , R0035-20191014-46A; 青阳县陵阳镇周家村, 戴尊 R0036-20191014-12A, R0036-20191014-22, R0036-20191014-24。

#### 鳞叶藓属 *Taxiphyllum* M.Fleisch.

275. \*细尖鳞叶藓 *Taxiphyllum aomoriense* (Besch.) Z.Iwats., 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-067; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520025B。
276. 凸尖鳞叶藓 *Taxiphyllum cuspidifolium* (Cardot) Z.Iwats., 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-020; 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-038; 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 R0035-20191014-45A。
277. 鳞叶藓 *Taxiphyllum taxirameum* (Mitt.) M.Fleisch., 石台县小河镇大麦坑, 王健 20190923-4; 青阳县盘台保护区, 邢诗晨 R0031-20200523007; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520061; 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 R007-20191015-16; 青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 R008-20191015-25A, R008-20191015-26; 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 R0010-20191016-38B, R0010-20191016-58A; 青阳县西华镇李家村, 戴尊 R0021-20191017-42; 青阳县乔木乡官塘村, 戴尊 R0022-20191017-05, R0022-20191017-17; 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-04B; 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 R0034-20191013-13; 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 R0035-20191014-08; 青阳县陵阳镇周家村, 戴尊 R0036-20191014-20, R0036-20191014-27; 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-020。

#### 孔雀藓科 *Hypopterygiaceae*

##### 雉尾藓属 *Cyathophorum* P.Beauv.

278. 短肋雉尾藓 *Cyathophorum hookerianum* (Griff.) Mitt., 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-033。

##### 孔雀藓属 *Hypopterygium* Brid.

279. 黄边孔雀藓 *Hypopterygium flavolimbatum* Müll.Hal., 石台县七都镇前山屋, 戴尊 20191013-19A, 20191013-24; 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 R0034-20191013-21B; 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-062。
280. \*南亚孔雀藓 *Hypopterygium tamarisci* (Sw.) Brid. ex Müll.Hal., 石台县大演乡陈田村, 王健 20190921-23; 青阳县盘台保护区, 邢诗晨 R0031-20200523023A。

#### 薄罗藓科 *Leskeaceae*

##### 麻羽藓属 *Claopodium* (Lesq. et James) Renaud et Cardot

281. 狭叶麻羽藓 *Claopodium aciculum* (Broth.) Broth., 青阳县乔木乡官塘村, 戴尊 R0022-20191017-06B。
282. 齿叶麻羽藓 *Claopodium prionophyllum* (Müll.Hal.) Broth., 青阳县盘台保护区, 邢诗晨 R0031-20200523023B。
283. 偏叶麻羽藓 *Claopodium rugulosifolium* S.Y.Zeng, 青阳县西华镇李家村, 戴尊 R0021-20191017-03, R0021-20191017-15, R0021-20191017-05A; 青阳县乔木乡官塘村, 戴尊 R0022-20191017-20B; 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-01, R0033-20191013-02B, R0033-20191013-04C。



**褶藓属 *Okamuraea* Broth.**

284. 长枝褶藓 *Okamuraea hakoniensis* (Mitt.) Broth., 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-09A, R0033-20191013-10, R0033-20191013-12。

**拟草藓属 *Pseudoleskeopsis* Broth.**

285. 拟草藓 *Pseudoleskeopsis zippelii* (Dozy et Molk.) Broth., 石台县仙寓乡梨树坛, 王健 20190920-21; 石台县仁里镇贡溪村, 王健 20190924-1。

**附干藓属 *Schwetschkea* Müll.Hal.**

286. \*东亚附干藓 *Schwetschkea laxa* (Wilson) A.Jaeger, 石台县小河镇外叶村, 王健 20190923-32。

**白发藓科 *Leucobryaceae***

**白氏藓属 *Brothera* Müll.Hal.**

287. 白氏藓 *Brothera leana* (Sull.) Müll.Hal., 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 R0035-20191014-46B。

**曲柄藓属 *Campylopus* Brid.**

288. 长叶曲柄藓 *Campylopus atrovirens* De Not., 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-004。

289. 尾尖曲柄藓 *Campylopus comosus* (Schw ägr.) Bosch et Sande Lac., 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-098; 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-001, R004-003, R004-005A, R004-006, R004-007B, R004-009; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520001B, R0053-20200520009; 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-002; 青阳县庙前镇莲花峰、平坦寺, 涂淑雯 R007-011。

290. 曲柄藓 *Campylopus flexuosus* (Hedw.) Brid., 石台县仙寓乡大山村双坑组, 王健 20190918-1; 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-007。

291. \*脆枝曲柄藓 *Campylopus fragilis* (Brid.) Bruch et Schimp., 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-016。

292. \*大曲柄藓 *Campylopus hemitrichius* (Müll.Hal.) A.Jaeger, 青阳县九华山栈道, 邢诗晨 R0026-20200524002。

293. 疏网曲柄藓 *Campylopus laxitextus* Sande Lac., 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-003。

294. #中华曲柄藓 *Campylopus sinensis* (Müll.Hal.) J.P.Frahm, 石台县(郭新弧等, 1990 as *C. japonicus*)。

295. 节茎曲柄藓 *Campylopus umbellatus* (Arn.) Paris, 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-007, R003-018; 青阳县庙前镇莲花峰、平坦寺, 涂淑雯 R007-003A; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-019; 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 R0010-20191016-32B, R0010-20191016-33, R0010-20191016-40。

**青毛藓属 *Dicranodontium* Bruch et Schimp.**

296. \*丛叶青毛藓 *Dicranodontium caespitosum* (Mitt.) Paris, 石台县大演乡新火村张天坳, 王健 20190917-22。

297. #青毛藓 *Dicranodontium denudatum* (Brid.) E.Britton ex Williams, 石台县(郭新弧等, 1990)。

298. \*毛叶青毛藓 *Dicranodontium filifolium* Broth., 石台县仙寓乡大山村七彩石景观, 王健 20190918-22; 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-028B。

**白发藓属 *Leucobryum* Hampe**

299. #粗叶白发藓 *Leucobryum boninense* Sull. et Lesq., 石台县(郭新弧等, 1990 as *L. scaberulum*)。

300. 狭叶白发藓 *Leucobryum bowringii* Mitt., 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-003。

301. 绿色白发藓 *Leucobryum chlorophyllosum* Müll.Hal., 石台县仙寓乡大山村七彩石景观, 王健 20190918-21; 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-1, 20190919-15, 20190919-16, 20190919-45; 石台县仙寓乡梨树坛, 王健 20190920-24; 石台县仁里镇杜村村平顶组, 王健 20190922-10, 20190922-11A;

- 石台县小河镇大麦坑, 王健 20190923-15; 石台县小河镇外叶村, 王健 20190923-34; 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-049, R001-070; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-013, R002-055; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-042; 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-002; 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-021; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520021A, R0053-20200520064; 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-001; 青阳县庙前镇莲花峰、平坦寺, 涂淑雯 R007-006B, R007-014B; 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 R007-20191015-02B; 青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 R008-20191015-11; 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 R0010-20191016-03, R0010-20191016-34, R0010-20191016-45B; 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-27; 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 R0035-20191014-28, R0035-20191014-45B。
302. 爪哇白发藓 *Leucobryum javense* (Brid.) Mitt., 石台县大演乡新火村双河口到张天坳, 王健 20190917-3; 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-065; 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-011B。
303. 桧叶白发藓 *Leucobryum juniperoideum* (Brid.) Müll.Hal., 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-030; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-036B; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-076A, R003-077; 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-046A。

#### 白齿藓科 Leucodontaceae

##### 白齿藓属 *Leucodon* Schw.ägr.

304. #鞭枝白齿藓 *Leucodon flagelliformis* Müll.Hal., 石台县(郭新弧等, 1990)。
305. #中华白齿藓 *Leucodon sinensis* Th.ér., 石台县(吴鹏程和贾渝, 2011; Wu et al, 2011)。

#### 蔓藓科 Meteoriaceae

##### 灰气藓属 *Aerobryopsis* M.Fleisch.

306. 大灰气藓原亚种 *Aerobryopsis subdivergens* (Broth.) Broth. subsp. *subdivergens*, 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 R007-20191015-31; 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 R0034-20191013-07。

##### 绿锯藓属 *Duthiella* Müll.Hal. ex Broth.

307. \*软枝绿锯藓 *Duthiella flaccida* Broth., 石台县仁里镇贡溪村, 王健 20190924-2A。

##### 丝带藓属 *Floribundaria* M.Fleisch.

308. 四川丝带藓 *Floribundaria setschwanica* Broth., 石台县大演乡陈田村, 王健 20190921-18; 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-063。

##### 粗蔓藓属 *Meteoriopsis* M.Fleisch. ex Broth.

309. 粗蔓藓 *Meteoriopsis squarrosa* (Hook. ex Harv.) M.Fleisch., 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-012。

##### 蔓藓属 *Meteorium* Dozy et Molk.

310. 蔓藓 *Meteorium polytrichum* Dozy et Molk., 石台县仙寓乡梨树耘, 王健 20190920-36, 20190920-4; 石台县小河镇外叶村, 王健 20190923-40; 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 R0034-20191013-09。

311. 粗枝蔓藓 *Meteorium subpolytrichum* (Besch.) Broth., 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-040B。

##### 新丝藓属 *Neodictadiella* (Nog.) W.R.Buck

312. #新丝藓 *Neodictadiella pendula* (Sull.) W.R.Buck, 石台县(郭新弧等, 1990 as *P. pendula*)。

##### 耳蔓藓属 *Neonoguchia* S.H.Lin

313. \*耳蔓藓 *Neonoguchia auriculata* (Copp. ex Th.ér.) S.H.Lin, 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-068。

### 多疣藓属 *Sinskea* W.R.Buck

314. \*小多疣藓 *Sinskea flammea* (Mitt.) W.R.Buck, 石台县(郭新弧等, 1990 as *C. flammeum*)。

### 扭叶藓属 *Trachypus* Reinw. et Hornsch.

315. 扭叶藓 *Trachypus bicolor* Reinw. et Hornsch., 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-015, R001-057, R001-053; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-074。

316. 小扭叶藓 *Trachypus humilis* Lindb., 石台县大演乡新火村张天坳, 王健 20190917-41; 石台县仙寓乡大山村七彩石景观, 王健 20190918-25; 石台县大演乡陈田村, 王健 20190921-15。

### 提灯藓科 *Mniaceae*

#### 提灯藓属 *Mnium* Hedw.

317. 平肋提灯藓 *Mnium laevinerve* Cardot, 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-062, R001-063。

318. 长叶提灯藓 *Mnium lycopodioides* Schw ägr., 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-015。

#### 匍灯藓属 *Plagiomnium* T.J.Kop.

319. 尖叶匍灯藓 *Plagiomnium acutum* (Lindb.) T.J.Kop., 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-36, R0033-20191013-41。

320. 匍灯藓 *Plagiomnium cuspidatum* (Hedw.) T.J.Kop., 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-013; 青阳县酉华镇李家村, 戴尊 R0021-20191017-26C, R0021-20191017-27B, R0021-20191017-43A; 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-31; 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 R0034-20191013-15; 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 R0035-20191014-20; 青阳县陵阳镇周家村, 戴尊 R0036-20191014-17B, R0036-20191014-18。

321. \*阔边匍灯藓 *Plagiomnium ellipticum* (Brid.) T.J.Kop., 青阳县木镇南河村, 邢诗晨 R0022-20200522005B, R0022-20200522009; 青阳县土地堂, 邢诗晨 R0040-20200521007B; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520036。

322. 侧枝匍灯藓 *Plagiomnium maximoviczii* (Lindb.) T.J.Kop., 石台县仙寓乡大山村双坑组, 王健 20190918-8; 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 R0034-20191013-03。

323. 具喙匍灯藓 *Plagiomnium rhynchophorum* (Hook.) T.J.Kop., 石台县仙寓乡梨树耘, 王健 20190920-20; 石台县小河镇外叶村, 王健 20190923-12; 青阳县盘台保护区, 邢诗晨 R0031-20200523022。

324. 钝叶匍灯藓 *Plagiomnium rostratum* (Schrad.) T.J.Kop., 石台县大演乡陈田村, 王健 20190921-17。

325. 大叶匍灯藓 *Plagiomnium succulentum* (Mitt.) T.J.Kop., 石台县仙寓乡梨树耘, 王健 20190920-16; 石台县大演乡陈田村, 王健 20190921-19; 石台县矾滩乡洪墩村东风组, 王健 20190924-8; 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-038; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-029; 青阳县盘台保护区, 邢诗晨 R0031-20200523028; 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-070。

#### 丝瓜藓属 *Pohlia* Hedw.

326. \*南亚丝瓜藓 *Pohlia gadeana* (Bosch. et Sande Lac.) Gangulee, 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-016。

327. \*明齿丝瓜藓 *Pohlia hyaloperistoma* Da C.Zhang, X.J.Li et Higuchi, 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 R007-20191015-12; 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 R007-20191015-14。

328. 卵蒴丝瓜藓 *Pohlia prolifera* (Kindb.) Lindb. ex Arnell, 石台县大演乡陈田村, 王健 20190921-8B。

329. \*白色丝瓜藓 *Pohlia wahlenbergii* (F.Weber et D.Mohr) A.L.Andrews, 青阳县庙前镇莲花峰、平坦寺, 涂淑雯 R007-008。

#### 疣灯藓属 *Trachycystis* Lindb.

330. 疣灯藓 *Trachycystis microphylla* (Dozy et Molk.) Lindb., 石台县大演乡新火村张天坳, 王健 20190917-37B; 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-067, R001-072; 青阳县盘台保护区, 邢诗晨 R0031-20200523002; 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-019; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520023; 青阳县庙前镇莲花峰、平坦寺, 涂淑雯 R007-005B, R007-019B; 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 R007-20191015-02A, R007-20191015-28A, R007-20191015-36A; 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 R0010-20191016-23; 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-24, R0033-20191013-25, R0033-20191013-28。

#### 平藓科 Neckeraceae

##### 残齿藓属 *Forsstroemia* Lindb.

331. \*残齿藓 *Forsstroemia trichomitria* (Hedw.) Lindb., 青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 R008-20191015-24。

##### 拟扁枝藓属 *Homaliadelphus* Dixon et P. de la Varde

332. 拟扁枝藓 *Homaliadelphus targionianus* (Mitt.) Dix et P.de la Varde, 石台县仙寓乡大山村双坑组, 王健 20190918-27; 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-39; 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-079, R001-034; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520019, R0053-20200520060A。

##### 树平藓属 *Homaliodendron* M.Fleisch.

333. 小树平藓 *Homaliodendron exiguum* (Bosch et Sande Lac.) M.Fleisch., 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-067。
334. 刀叶树平藓 *Homaliodendron scalpellifolium* (Mitt.) M.Fleisch., 石台县大演乡新火村张天坳, 王健 20190917-38A; 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-037; 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-019; 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-006, R005-007, R005-008, R005-014, R005-030, R005-057; 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-043; 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 R007-20191015-24, R007-20191015-34。

##### *Isodrepanium* (Mitt.) E.Britton

335. 钝头弯叶藓 *Isodrepanium arcuatum* (Bosch et Sande Lac.) J.J.Wang et Y.Jia= *Taxiphyllum arcuatum* (Besch. et Sande Lac.) S.He, 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-081。

##### 平藓属 *Neckera* Hedw.

336. \*延叶平藓 *Neckera decurrens* Broth., 石台县仁里镇杜村村平顶组, 王健 20190922-2。
337. #平藓 *Neckera pennata* Hedw., 石台县(郭新弧等, 1990)。
338. 短齿平藓 *Neckera yezoana* Besch., 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-076。

##### 拟平藓属 *Neckeropsis* Reichardt

339. \*截叶拟平藓 *Neckeropsis lepinea* (Mont.) M.Fleisch., 石台县仙寓乡南坞口, 王健 20190920-35。
340. \*光叶拟平藓 *Neckeropsis nitidula* (Mitt.) M.Fleisch., 石台县小河镇郑村村, 王健 20190923-28; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-053; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-066。

##### 木藓属 *Thamnobryum* Nieuwl.

341. 褶叶木藓 *Thamnobryum plicatulum* (Sande Lac.) Z.Iwats., 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-015; 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-037。
342. 匙叶木藓 *Thamnobryum subseriatum* (Mitt. ex Sande Lac.) B.C.Tan, 石台县大演乡陈田村, 王健 20190921-14。

#### 木灵藓科 Orthotrichaceae

##### 直叶藓属 *Macrocoma* (Hornsch. ex Müll.Hal.) Grout



343. #细枝直叶藓 *Macrocoma sullivantii* (Müll.Hal.) Grout, 石台县(郭新弧等, 1990 as *M. hymenostoma*).

**藓属 *Macromitrium* Brid.**

344. #中华藓 *Macromitrium cavaleriei* Cardot et Thér., 青阳县( Wu et al, 2011).

345. 缺齿藓 *Macromitrium gymnostomum* Sull. et Lesq., 石台县大演乡新火村张天坳, 王健 20190917-40; 石台县仙寓乡大山村双坑组, 王健 20190918-26; 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-29; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-017。

346. 钝叶藓 *Macromitrium japonicum* Dozy et Molk., 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-15B。

347. #乳胞藓 *Macromitrium uraiense* Nog., 石台县(郭新弧等, 1990)。

**木灵藓属 *Orthotrichum* Hedw.**

348. #丛生木灵藓 *Orthotrichum consobrinum* Cardot, 石台县(郭新弧等, 1990)。

349. #红叶木灵藓 *Orthotrichum erubescens* Müll.Hal., 石台县(郭新弧等, 1990)。

350. \*中国木灵藓 *Orthotrichum hookeri* Wilson ex Mitt., 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-33。

351. #粗柄木灵藓 *Orthotrichum subpumilum* E.B.Bartram ex Lewinsky, 青阳县(Lewinsky, 1992; Redfearn et al, 1996; 吴鹏程和贾渝, 2011; Wu et al, 2011)。

**火藓属 *Schlotheimia* Brid.**

352. 小火藓 *Schlotheimia pungens* E.B.Bartram, 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-045。

**卷叶藓属 *Uloa* D.Mohr**

353. 卷叶藓 *Uloa crispa* (Hedw.) Brid., 石台县仁里镇杜村村平顶组, 王健 20190922-7。

**棉藓科 *Plagiotheciaceae***

**长灰藓属 *Herzogiella* Broth.**

354. #沼生长灰藓 *Herzogiella turfacea* (Lindb.) Z.Iwats., 石台县(郭新弧等, 1990)。

**拟同叶藓属 *Isopterygiopsis* Z.Iwats.**

355. \*美丽拟同叶藓 *Isopterygiopsis pulchella* (Hedw.) Z.Iwats., 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-103。

**棉藓属 *Plagiothecium* Schimp.**

356. #圆条棉藓 *Plagiothecium cavifolium* (Brid.) Z.Iwats., 青阳县(Hu et al, 2008); 石台县(郭新弧等, 1990)。

357. #圆条棉藓阔叶变种 *Plagiothecium cavifolium* var. *fallax* (Cardot et Thér.) Z.Iwats., 青阳县(胡人亮和王幼芳, 2005); 石台县(Cai, 2002)

358. 光泽棉藓 *Plagiothecium laetum* Schimp., 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-019; 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 R0010-20191016-43。

359. #扁平棉藓 *Plagiothecium neckeroideum* Bruch et Schimp., 石台县(郭新弧等, 1990)。

360. 垂蒴棉藓 *Plagiothecium nemorale* (Mitt.) A.Jaeger, 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-076B。

361. 台湾棉藓直叶变种 *Plagiothecium formosicum* var. *rectiapex* D.K.Li, 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-003。

362. 圆条棉藓 *Plagiothecium cavifolium* (Brid.) Z.Iwats., 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-069; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-075; 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-038, R004-055; 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 R0010-20191016-44。

**金发藓科 *Polytrichaceae***

**仙鹤藓属 *Atrichum* P.Beauv.**

363. 小仙鹤藓 *Atrichum crispulum* Schimp. ex Besch., 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-027; 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 R0010-20191016-48; 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 R0010-20191016-50B。

364. 小胞仙鹤藓 *Atrichum rhytostophyllum* (Müll.Hal.) Paris, 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-015; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-015; 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-039; 青阳县盘台保护区, 邢诗晨 R0031-20200523011; 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-084; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520057; 青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 R008-20191015-29。

365. 仙鹤藓多蒴变种 *Atrichum undulatum* (Hedw.) P.Beauv. var. *gracilisetum* Besch., 石台县仙寓乡大山村双坑组, 王健 20190918-2; 石台县小河镇外叶村, 王健 20190923-46。

#### 小金发藓属 *Pogonatum* P.Beauv.

366. \*刺边小金发藓 *Pogonatum cirratum* (Sw.) Brid., 石台县大演乡新火村双河口到张天坳, 王健 20190917-10B。

367. 东亚小金发藓 *Pogonatum inflexum* (Lindb.) Sande Lac., 石台县大演乡新火村张天坳, 王健 20190917-34; 石台县大演乡陈田村, 王健 20190921-4; 石台县小河镇大麦坑, 王健 20190923-9; 石台县矾滩乡洪墩村东风组, 王健 20190924-5; 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-026, R001-043; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-026, R002-029, R002-051, R002-052B; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-085; 青阳县土地堂, 邢诗晨 R0040-20200521004; 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-054, R004-085; 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-016; 青阳县庙前镇莲花峰、平坦寺, 涂淑雯 R007-003B; 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 R007-20191015-13B; 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 R0010-20191016-30, R0010-20191016-31B; 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 R0035-20191014-23, R0035-20191014-14; 青阳县陵阳镇周家村, 戴尊 R0036-20191014-05B, R0036-20191014-06, R0036-20191014-07, R0036-20191014-12B。

368. #苞叶小金发藓 *Pogonatum spinulosum* Mitt., 石台县(郭新弧等, 1990)。

#### 拟金发藓属 *Polytrichastrum* G.L.Sm.

369. 台湾拟金发藓 *Polytrichastrum formosum* (Hedw.) G.L.Sm., 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-050, R004-052; 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-059。

#### 金发藓属 *Polytrichum* Hedw.

370. 金发藓 *Polytrichum commune* Hedw., 青阳县盘台保护区, 邢诗晨 R0031-20200523033A。

### 丛藓科 Pottiaceae

#### 丛本藓属 *Anoetangium* Schw ägr.

371. \*阔叶丛本藓 *Anoetangium clarum* Mitt., 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-001; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-006。

372. 扭叶丛本藓 *Anoetangium stracheyanum* Mitt., 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-023; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-011, R003-071。

#### 扭口藓属 *Barbula* Hedw.

373. \*东亚扭口藓 *Barbula subcomosa* Broth., 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 R0034-20191013-05, R0034-20191013-25。

374. 扭口藓 *Barbula unguiculata* Hedw., 青阳县土地堂, 邢诗晨 R0040-20200521006B; 青阳县西华镇李家村, 戴尊 R0021-20191017-08B, R0021-20191017-25; 青阳县乔木乡官塘村, 戴尊 R0022-20191017-04; 青阳县陵阳镇周家村, 戴尊 R0036-20191014-01。

#### 对齿藓属 *Didymodon* Hedw.

375. 尖叶对齿藓原变种 *Didymodon constrictus* (Mitt.) K.Saito var. *constrictus*, 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-08A; 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 R0034-20191013-38C。

376. 长尖对齿藓 *Didymodon ditrichoides* (Broth.) X.J.Li et S.He, 青阳县西华镇李家村, 戴尊 R0021-20191017-05B。

377. #反叶对齿藓 *Didymodon ferrugineus* (Schimp. ex Besch.) M.O.Hill, 青阳县(高谦, 1996 as *Barbula reflexa*; Li et al, 2001)。

**净口藓属 *Gymnostomum* Nees et Hornsch.**

378. 净口藓 *Gymnostomum calcareum* Nees et Hornsch., 青阳县乔木乡官塘村, 戴尊 R0022-20191017-01B。

**立膜藓属 *Hymenostylium* Brid.**

379. #立膜藓 *Hymenostylium recurvirostrum* (Hedw.) Dixon, 石台县(郭新弧等, 1990 as *G. recurvirostrum*)。

**湿地藓属 *Hyophila* Brid.**

380. 卷叶湿地藓 *Hyophila involuta* (Hook.) A.Jaeger, 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-004; 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 R007-20191015-27; 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-08C; 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 R0035-20191014-06; 青阳县陵阳镇周家村, 戴尊 R0036-20191014-16。

381. 花状湿地藓 *Hyophila nymaniana* (M.Fleisch.) Menzel, 石台县大演乡新火村张天坳, 王健 20190917-36; 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-23A; 石台县大演乡陈田村, 王健 20190921-9; 石台县小河镇大麦坑, 王健 20190923-2; 石台县小河镇外叶村, 王健 20190923-41; 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-03。

**拟合睫藓属 *Pseudosymblypharis* Broth.**

382. 狭叶拟合睫藓 *Pseudosymblypharis angustata* (Mitt.) Hilp., 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-090; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-038, R002-039; 青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 R008-20191015-40; 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 R0034-20191013-26。

**反纽藓属 *Timmiella* (De Not.) Limpr.**

383. #反纽藓 *Timmiella anomala* (Bruch et Schimp.) Limpr., 青阳县(高谦, 1996 as *R. crassicostatum*; Li et al, 2001)。

**纽藓属 *Tortella* (Müll.Hal.) Limpr.**

384. 纽藓 *Tortella humilis* (Hedw.) Jenn., 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520002B; 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 R0034-20191013-17。

385. 长叶纽藓 *Tortella tortuosa* (Schrad. ex Hedw.) Limpr., 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-039。

**墙藓属 *Tortula* Hedw.**

386. #泛生墙藓原变种 *Tortula muralis* Hedw., 石台县(郭新弧等, 1990)。

**毛口藓属 *Trichostomum* Bruch**

387. 卷叶毛口藓 *Trichostomum hattorianum* B.C.Tan et Z.Iwats., 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-9; 石台县小河镇大麦坑, 王健 20190923-11; 青阳县乔木乡官塘村, 戴尊 R0022-20191017-28; 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 R0034-20191013-08, R0034-20191013-11, R0034-20191013-27。

388. 阔叶毛口藓 *Trichostomum platyphyllum* (Broth. ex Ihsiba) P.C.Chen, 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 R0034-20191013-21A。

389. 波边毛口藓 *Trichostomum tenuirostre* (Hook. f. et Taylor) Lindb., 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-107; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-014。

**小石藓属 *Weissia* Hedw.**

390. 小石藓 *Weissia controversa* Hedw., 青阳县庙前镇莲花峰、平坦寺, 涂淑雯 R007-001; 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-06。

391. 缺齿小石藓 *Weissia edentula* Mitt., 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520017B; 青阳县酉华镇李家村, 戴尊 R0021-20191017-11, R0021-20191017-16B; 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-07, R0033-20191013-02A, R0033-20191013-04A; 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 R0035-20191014-37。
392. 东亚小石藓 *Weissia exserta* (Broth.) P.C.Chen, 青阳县酉华镇李家村, 戴尊 R0021-20191017-05C; 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 R0035-20191014-15, R0035-20191014-34, R0035-20191014-38。

### 缩叶藓科 *Ptychomitriaceae*

#### 缩叶藓属 *Ptychomitrium* Fürnr.

393. #东亚缩叶藓 *Ptychomitrium fauriei* Besch., 石台县(郭新弧等, 1990)。
394. \*台湾缩叶藓 *Ptychomitrium formosicum* Broth. et Yasuda, 青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 R008-20191015-14。
395. 多枝缩叶藓 *Ptychomitrium gardneri* Lesp., 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-004。
396. #狭叶缩叶藓 *Ptychomitrium linearifolium* Reimers, 石台县(郭新弧等, 1990)。

### 金灰藓科 *Pylaisiaceae*

#### 毛灰藓属 *Homomallium* (Schimp.) Loeske

397. #东亚毛灰藓 *Homomallium connexum* (Cardot) Broth., 青阳县(吴鹏程和贾渝, 2004; Wu et al, 2005)。
398. \*墨西哥毛灰藓 *Homomallium mexicanum* Cardot, 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 R0010-20191016-26A。

#### 金灰藓属 *Pylaisia* Schimp.

399. 金灰藓 *Pylaisia polyantha* (Hedw.) Schimp., 青阳县酉华镇李家村, 戴尊 R0021-20191017-26A; 青阳县酉华镇李家村, 戴尊 R0021-20191017-27A。

### 毛锦藓科 *Pylaisiadelphaceae*

#### 小锦藓属 *Brotherella* Loeske ex M.Fleisch.

400. 东亚小锦藓 *Brotherella fauriei* (Besch. ex Cardot) Broth., 石台县仙寓乡大山村双坑组, 王健 20190918-38。
401. 南方小锦藓 *Brotherella henonii* (Duby) M.Fleisch., 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520060C, R0053-20200520068; 石台县大演乡新火村双河口, 王健 20190917-7; 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-092; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-050, R002-061; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-046, R003-063; 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 R0010-20191016-14, R0010-20191016-29, R0010-20191016-35, R0010-20191016-45A。
402. 垂蒴小锦藓 *Brotherella nictans* (Mitt.) Broth., 石台县矾滩乡洪墩村东风组, 王健 20190924-12; 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-010; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520033; 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-003, R006-028A。

#### 疣胞藓属 *Clastobryum* Dozy et Molk.

403. \*三列疣胞藓 *Clastobryum glabrescens* (Z.Iwats.) B.C.Tan, Z.Iwats. et D.H.Norris, 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-031。

#### 同叶藓属 *Isopterygium* Mitt.

404. 淡色同叶藓 *Isopterygium albescens* (Hook.) A.Jaeger, 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-081。



405. 华东同叶藓 *Isopterygium courtoisii* Broth. et Paris, 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-004; 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 R007-20191015-03; 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 R0010-20191016-04; 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-29。
406. 纤枝同叶藓 *Isopterygium minutirameum* (Müll.Hal.) A.Jaeger, 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 R0010-20191016-46; 青阳县西华镇李家村, 戴尊 R0021-20191017-24; 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 R0035-20191014-42。
407. 齿边同叶藓 *Isopterygium serrulatum* M.Fleisch., 石台县仙寓乡梨树耘, 王健 20190920-11。
408. #柔叶同叶藓 *Isopterygium tenerum* (Sw.) Mitt., 石台县(吴鹏程和贾渝, 2004; Wu et al, 2005)。

#### 毛锦藓属 *Pylaisiadelpha* Cardot

409. 短叶毛锦藓 *Pylaisiadelpha yokohamae* (Broth.) W.R.Buck, 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-035, R004-066, R004-069; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520026, R0053-20200520039; 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-029, R006-031, R006-058; 青阳县庙前镇莲花峰、平坦寺, 涂淑雯 R007-020; 青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 R008-20191015-42; 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 R0010-20191016-01, R0010-20191016-21。

#### 刺枝藓属 *Wijkia* H.A.Crum

410. \*弯叶刺枝藓 *Wijkia deflexifolia* (Mitt. ex Renauld et Cardot) H.A.Crum, 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-004, R004-062; 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-010。

#### 卷柏藓科 *Racopilaceae*

##### 卷柏藓属 *Racopilum* P.Beauv.

411. 薄壁卷柏藓 *Racopilum cuspidigerum* (Schw ägr.) Ångström, 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-060; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-033; 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 R0034-20191013-29。

#### 桧藓科 *Rhizogoniaceae*

##### 桧藓属 *Pyrrhobryum* Mitt.

412. 大桧藓 *Pyrrhobryum dozyanum* (Sande Lac.) Manuel, 石台县大演乡新火村双河口到张天坳, 王健 20190917-19; 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-46。
413. #刺叶桧藓 *Pyrrhobryum spiniforme* (Hedw.) Mitt., 石台县(郭新弧等, 1990 as *R. spiniforme*)。

#### 锦藓科 *Sematophyllaceae*

##### 锦藓属 *Sematophyllum* Mitt.

414. \*橙色锦藓 *Sematophyllum phoeniceum* (Müll.Hal.) M.Fleisch, 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-054, R001-074; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520020, R0053-20200520027, R0053-20200520028B; 青阳县庙前镇莲花峰、平坦寺, 涂淑雯 R007-010; 青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 R008-20191015-20A; 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 R0010-20191016-06, R0010-20191016-12。
415. 矮锦藓 *Sematophyllum subhumile* (Müll.Hal.) M.Fleisch., 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-8; 石台县仙寓乡梨树耘, 王健 20190920-31; 石台县仁里镇杜村村平顶组, 王健 20190922-1; 石台县小河镇大麦坑, 王健 20190923-18; 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 R0010-20191016-13, R0010-20191016-28, R0010-20191016-62。
416. 锦藓 *Sematophyllum subpinnatum* (Brid.) E.Britton, 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-073。

#### 泥炭藓科 *Sphagnaceae*

### 泥炭藓属 *Sphagnum* L.

417. \*暖地泥炭藓 *Sphagnum junghuhnianum* Dozy et Molk., 石台县(郭新弧等, 1990)。  
418. 泥炭藓 *Sphagnum palustre* L., 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520072。

### 刺果藓科 *Symphyodontaceae*

#### 刺果藓属 *Symphyodon* Mont.

419. \*长刺刺果藓 *Symphyodon echinatus* (Mitt.) A.Jaeger, 青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 R008-20191015-41。

### 羽藓科 *Thuidiaceae*

#### 小羽藓属 *Haplocladium* (Müll.Hal.) Müll.Hal.

420. 狭叶小羽藓 *Haplocladium angustifolium* (Hampe et Müll.Hal.) Broth., 青阳县木镇南河村, 邢诗晨 R0022-20200522003, R0022-20200522011; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-032; 青阳县盘台保护区, 邢诗晨 R0031-20200523003, R0031-20200523006, R0031-20200523017B; 青阳县土地堂, 邢诗晨 R0040-20200521001; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520029; 青阳县庙前镇莲花峰、平坦寺, 涂淑雯 R007-009; 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 R007-20191015-09; 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 R0010-20191016-10A; 青阳县西华镇李家村, 戴尊 R0021-20191017-06, R0021-20191017-08A, R0021-20191017-26B; 青阳县乔木乡官塘村, 戴尊 R0022-20191017-07, R0022-20191017-21, R0022-20191017-23; 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-38; 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 R0035-20191014-02; 青阳县陵阳镇周家村, 戴尊 R0036-20191014-03。
421. 细叶小羽藓 *Haplocladium microphyllum* (Sw. ex Hedw.) Broth., 青阳县盘台保护区, 邢诗晨 R0031-20200523014; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520015, R0053-20200520035, R0053-20200520037, R0053-20200520040; 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 R0010-20191016-08; 青阳县西华镇李家村, 戴尊 R0021-20191017-01, R0021-20191017-21, R0021-20191017-22A; 青阳县乔木乡官塘村, 戴尊 R0022-20191017-27; 青阳县盘台保护区, 邢诗晨 R0031-20200523013; 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 R0034-20191013-14; 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 R0035-20191014-16, R0035-20191014-18, R0035-20191014-19, R0035-20191014-44。

#### 羽藓属 *Thuidium* Schimp.

422. 大羽藓 *Thuidium cymbifolium* (Dozy et Molk.) Dozy et Molk., 石台县仙寓乡大山村双坑组, 王健 20190918-5; 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-012; 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-23A; 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 R0034-20191013-31。
423. 细枝羽藓 *Thuidium delicatulum* (Hedw.) Schimp., 石台县大演乡新火村双河口到张天坳, 王健 20190917-10A; 石台县大演乡新火村张天坳, 王健 20190917-37A; 石台县大演乡新火村双河口, 王健 20190917-6; 石台县大演乡陈田村, 王健 20190921-3。
424. 拟灰羽藓 *Thuidium glaucinoides* Broth., 石台县大演乡新火村张天坳, 王健 20190917-38B; 石台县小河镇大麦坑, 王健 20190923-10; 青阳县盘台保护区, 邢诗晨 R0031-20200523005; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520043。
425. 短肋羽藓 *Thuidium kanedae* Sakurai, 石台县大演乡新农村燕窝岩, 王健 20190919-2; 石台县仙寓乡梨树坛, 王健 20190920-13; 石台县仁里镇杜村村平顶组, 王健 20190922-9; 石台县仁里镇贡溪村, 王健 20190924-11; 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-039, R001-061B; 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-010; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-010; 青阳县盘台保护区, 邢诗晨 R0031-20200523016; 石台县大演乡封顶村核桃沟至主峰, 涂淑雯 R004-083; 石台县大演乡奇峰村新华电站东岸蓄水坝附近, 涂淑雯 R005-001, R005-020; 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-040A; 青阳县庙前镇莲花峰、平坦寺, 涂淑雯 R007-007; 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 R007-

- 20191015-01B; 青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 R008-20191015-02; 青阳县朱备镇东桥村, 戴尊 R0010-20191016-07; 青阳县乔木乡官塘村, 戴尊 R0022-20191017-18; 石台县七都镇前山屋, 戴尊 R0033-20191013-20, R0033-20191013-37; 石台县七都镇大岭脚, 戴尊 R0034-20191013-01, R0034-20191013-12; 青阳县陵阳镇管冲村, 戴尊 R0035-20191014-01。
426. 灰羽藓 *Thuidium pristocalyx* (Müll.Hal.) A.Jaeger, 石台县大演乡新农村横山组, 涂淑雯 R002-044; 石台县大演乡新农村合山组, 涂淑雯 R003-024; 石台县牯牛降长涧口到祁门叉, 邢诗晨 R0053-20200520016, R0053-20200520017A, R0053-20200520034; 青阳县庙前镇九华山栈道到莲台峰附近, 涂淑雯 R006-022A, R006-039; 青阳县陵阳镇神龙谷, 戴尊 R007-20191015-28C; 青阳县陵阳镇一天门, 戴尊 R008-20191015-20B。
427. 羽藓 *Thuidium tamariscinum* (Hedw.) Bruch et Schimp., 石台县大演乡新火村, 涂淑雯 R001-006。

参考文献:

- Cai KH (2002) A list of the bryophytes of Mt. Baimajian Houshan county, Anhui Province, SE China. *Chenia*, 7, 149–159.
- Gao C (1996) *Flora Bryophytarum Sinicorum*, Vol. 2. Science Press, Beijing. (in Chinese) [高谦 (1996) 中国苔藓志(第2卷). 科学出版社, 北京.]
- Gao C, Crosby MR, He S (2003) *Moss Flora of China*, vol. 3. Grimmiaceae—Tetraphidaceae. Science Press & Missouri Botanical Garden, Beijing, New York & St. Louis.
- Guo XH, Liu ZL, Hu RL, Wang YF (1990) The bryophytes of Guniujiang Natrual Conservation. In: *Science Investigation in Guniujiang Natural Conservation* (ed. Han YL), pp. 247–260, 414–420. China Prospect Press, Beijing. (in Chinese) [郭新弧, 刘仲苓, 胡人亮, 王幼芳 (1990) 牯牛降苔藓植物. 见: 牯牛降科学考察集(韩也良主编), 247–260 页, 414–420 页. 中国展望出版社, 北京.]
- Hu RL, Wang YF (2005) *Flora Bryophytarum Sinicorum*, vol. 7. Science Press, Beijing. (in Chinese) [胡人亮, 王幼芳 (2005) 中国苔藓志(第7卷). 科学出版社, 北京.]
- Hu RL, Wang YF, Crosby MR, He S (2008) *Moss Flora of China*, Vol. 7. Amblystegiaceae—Plagiotheciaceae. Science Press & Missouri Botanical Garden, Beijing, New York & St. Louis.
- Lewinsky J (1992) The genus *Orthotrichum* Hedw. (Orthotrichaceae, Musci) in Southeast Asia. A taxonomic revision. *Journal of the Hattori Botanical Laboratory*, 72, 1–88.
- Li XJ (2000) *Flora Bryophytarum Sinicorum*, vol. 3. Science Press, Beijing. (in Chinese) [黎兴江 (2000) 中国苔藓志(第3卷). 科学出版社, 北京.]
- Li XJ (2006) *Flora Bryophytarum Sinicorum*, vol. 4. Science Press, Beijing. (in Chinese) [黎兴江 (2006) 中国苔藓志(第4卷). 科学出版社, 北京.]
- Li XJ, Crosby MR, He S (2001) *Moss Flora of China*, vol. 2. Fissidentaceae—Ptychomitriaceae. Science Press & Missouri Botanical Garden, Beijing, New York & St. Louis.
- Li XJ, Crosby MR, He S (2007) *Moss Flora of China*, English Version, vol. 4. Bryaceae—Timmiaceae. Science Press & Missouri Botanical Garden, Beijing, New York & St. Louis.
- Redfearn Jr PL, Tan BC, He S (1996) A newly updated and annotated checklist of Chinese mosses. *Journal of the Hattori Botanical Laboratory*, 79, 163–357.

邢诗晨, 唐录艳, 戴尊, 涂淑雯, 陈星, 张建行, 李宏庆, 彭涛, 王健 (2022) 安徽石台县与青阳县苔藓植物多样性. 生物多样性, 30, 21186. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2021186>

Wu MK, Cao T, Zhang XP (2008) Study on moss flora of Anhui Province, China. *Acta Botanica Yunnanica*, 30, 645–654. (in Chinese with English abstract) [吴明开, 张小平, 曹同 (2008) 安徽藓类植物区系. 云南植物研究, 30, 645-654.]

Wu PC, Crosby MR, He S (2005) Moss Flora of China, vol. 8. *Sematophyllaceae—Polytrichaceae*. Science Press & Missouri Botanical Garden, Beijing, New York & St. Louis.

Wu PC, Crosby MR, He S (2011) Moss Flora of China, vol. 5. *Erpodiaceae—Climaciaceae*. Science Press & Missouri Botanical Garden, Beijing, New York & St. Louis.

Wu PC, Jia Y (2004) *Flora Bryophytarum Sinicorum*, vol. 8. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴鹏程, 贾渝 (2004) 中国苔藓志(第 8 卷). 科学出版社, 北京.]

Wu PC, Jia Y (2011) *Flora Bryophytarum Sinicorum*, vol. 5. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴鹏程, 贾渝 (2011) 中国苔藓志(第 5 卷). 科学出版社, 北京.]



邢诗晨, 唐录艳, 戴尊, 涂淑雯, 陈星, 张建行, 李宏庆, 彭涛, 王健 (2022) 安徽石台县与青阳县苔藓植物多样性. 生物多样性, 30, 21186. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2021186>

附录4 安徽省石台县和青阳县苔藓植物采集物种在自然保护地(NPA)内外的分布

Appendix 4 The distribution of collected bryophytes of the present study inside and outside the nature protected areas (NPA) of Shitai County and Qingyang County, Anhui Province

按种名拉丁字母顺序排列。\*为安徽省新记录种; +为在该区域内有分布。

序号 No.	中文名 Species	拉丁名 Latin name	保护地内 Inside the NPA	保护地外 Outside the NPA
	<b>苔类植物门</b>	<b>Marchantiophyta</b>		
1	南亚顶鳞苔	<i>Acrolejeunea sandvicensis</i> (Gottsche) Steph.	+	+
2	日本鞭苔	<i>Bazzania japonica</i> (Sande Lac.) Lindb.	+	
3	三裂鞭苔	<i>Bazzania tridens</i> (Reinw., Blume et Nees) Trevis.	+	+
4	小睫毛苔	<i>Blepharostoma minor</i> Horik.	+	
5	睫毛苔	<i>Blepharostoma trichophyllum</i> (L.) Dumort.	+	
6	刺叶护蒴苔	<i>Calypogeia arguta</i> Nees et Mont.	+	+
7	三角护蒴苔	<i>Calypogeia azurea</i> Stotler et Crotz	+	
8	*护蒴苔	<i>Calypogeia fissa</i> (L.) Raddi	+	+
9	*全缘护蒴苔	<i>Calypogeia japonica</i> Steph.	+	
10	双齿护蒴苔	<i>Calypogeia tosana</i> (Steph.) Steph.	+	+
11	*毛口大萼苔	<i>Cephalozia laciniolata</i> (J.B.Jack ex Gottsche et Rabenh.) Spruce	+	+
12	*短瓣大萼苔	<i>Cephalozia macounii</i> (Austin) Austin	+	
13	*小叶拟大萼苔	<i>Cephaloziella microphylla</i> (Steph.) Douin	+	
14	刺茎拟大萼苔	<i>Cephaloziella spinicaulis</i> Douin	+	+
15	粗茎唇鳞苔	<i>Cheilolejeunea trapezia</i> (Nees) Kachroo et R.M.Schust.	+	
16	*中华裂萼苔	<i>Chiloscyphus sinensis</i> J.J.Engel et R.M.Schust.	+	
17	*薄叶疣鳞苔	<i>Cololejeunea appressa</i> (A.Evans) Benedix	+	
18	*东亚疣鳞苔	<i>Cololejeunea japonica</i> (Schiffn.) Mizut.		+
19	距齿疣鳞苔	<i>Cololejeunea macounii</i> (Spruce) A.Evans	+	
20	粗柱疣鳞苔	<i>Cololejeunea ornata</i> A.Evans		+
21	*拟棉毛疣鳞苔	<i>Cololejeunea pseudofloccosa</i> (Horik.) Benedix	+	
22	拟疣鳞苔	<i>Cololejeunea raduliloba</i> Steph.	+	+
23	刺疣鳞苔	<i>Cololejeunea spinosa</i> (Horik.) Pandé et R.N.Misra	+	+
24	*疣瓣疣鳞苔	<i>Cololejeunea subkodamae</i> Mizut.	+	
25	蛇苔	<i>Conocephalum conicum</i> (L.) Dumort.	+	+
26	小蛇苔	<i>Conocephalum japonicum</i> (Thunb.) Grolle	+	+
27	*暗色蛇苔	<i>Conocephalum salebrosum</i> Szweyk., Buczk. et Odrzyk.		+
28	*云南角鳞苔	<i>Drepanolejeunea yunnanensis</i> (P.C.Chen) Grolle et R.L.Zhu	+	
29	毛地钱	<i>Dumortiera hirsuta</i> (Sw.) Nees	+	+
30	日本小叶苔	<i>Fossombronina japonica</i> Schiffn.	+	
31	*大隅耳叶苔	<i>Frullania osumiensis</i> (S.Hatt.) S.Hatt.	+	
32	青山耳叶苔	<i>Frullania aoshimensis</i> Horik.	+	+
33	*暗绿耳叶苔	<i>Frullania fuscovirens</i> Steph.	+	
34	钩瓣耳叶苔	<i>Frullania hamatiloba</i> Steph.		+
35	列胞耳叶苔	<i>Frullania moniliata</i> (Reinw., Blume et Nees) Mont.	+	
36	盔瓣耳叶苔	<i>Frullania muscicola</i> Steph.	+	+

序号 No.	中文名 Species	拉丁名 Latin name	保护地内 Inside the NPA	保护地外 Outside the NPA
37	*钟瓣耳叶苔	<i>Frullania parvistipula</i> Steph.	+	+
38	*中华耳叶苔	<i>Frullania sinensis</i> Steph.	+	+
39	*喙叶棕萼苔	<i>Fuscocephaloziopsis connivens</i> (Dicks.) Váňa et L.Söderstr.	+	
40	长角剪叶苔	<i>Herbertus dicranus</i> (Gottsche, Lindenb. et Nees) Trevis.	+	
41	*小叶剪叶苔	<i>Herbertus tenuis</i> A.Evans	+	
42	四齿异萼苔	<i>Heteroscyphus argutus</i> (Reinw., Blume et Nees) Schiffn.	+	+
43	双齿异萼苔	<i>Heteroscyphus coalitus</i> (Hook.) Schiffn.	+	
44	叉齿异萼苔	<i>Heteroscyphus lophocoleoides</i> S.Hatt.	+	+
45	平叶异萼苔	<i>Heteroscyphus planus</i> (Mitt.) Schiffn.	+	+
46	*三齿异萼苔	<i>Heteroscyphus tridentatus</i> (Sande Lac.) Grolle	+	+
47	南亚异萼苔	<i>Heteroscyphus zollingeri</i> (Gottsche) Schiffn.	+	+
48	狭瓣细鳞苔	<i>Lejeunea anisophylla</i> Mont.	+	
49	黄色细鳞苔	<i>Lejeunea flava</i> (Sw.) Nees	+	
50	日本细鳞苔	<i>Lejeunea japonica</i> Mitt.	+	
51	暗绿细鳞苔	<i>Lejeunea obscura</i> Mitt.	+	+
52	白绿细鳞苔	<i>Lejeunea pallidivirens</i> S.Hatt.	+	
53	小叶细鳞苔	<i>Lejeunea parva</i> (S.Hatt.) Mizut.	+	+
54	*疣萼细鳞苔	<i>Lejeunea tuberculosa</i> Steph.	+	
55	*狭叶苔	<i>Liochlaena lanceolata</i> Nees	+	
56	*双齿齿萼苔	<i>Lophocolea bidentata</i> (L.) Dumort.	+	+
57	异叶齿萼苔	<i>Lophocolea heterophylla</i> (Schrad.) Dumort.	+	+
58	*圆叶齿萼苔	<i>Lophocolea horikawana</i> S.Hatt.	+	
59	*疏叶齿萼苔	<i>Lophocolea itoana</i> Inoue	+	
60	*楔瓣地钱东亚亚种	<i>Marchantia emarginata</i> subsp. <i>tosana</i> (Steph.) Bischl.	+	+
61	*粗裂地钱凤兜亚种	<i>Marchantia paleacea</i> subsp. <i>diptera</i> (Nees et Mont.) Inoue	+	
62	*地钱土生亚种	<i>Marchantia polymorpha</i> subsp. <i>ruderalis</i> Bischl. et Boissel.-Dub.	+	
63	平叉苔	<i>Metzgeria conjugata</i> Lindb.	+	
64	*大叉苔	<i>Metzgeria fruticulosa</i> (Dicks.) A.Evans	+	
65	叉苔	<i>Metzgeria furcata</i> (L.) Corda	+	
66	斑叶纤鳞苔	<i>Microlejeunea punctiformis</i> (Taylor) Steph.	+	
67	无毛拳叶苔	<i>Nowellia aciliata</i> (P.C.Chen et P.C.Wu) Mizut.	+	
68	拳叶苔	<i>Nowellia curvifolia</i> (Dicks.) Mitt.	+	
69	合叶裂齿苔	<i>Odontoschisma denudatum</i> (Mart.) Dumort.	+	
70	*粗疣裂齿苔	<i>Odontoschisma grosseverrucosum</i> Steph.	+	
71	带叶苔	<i>Pallavicinia lyellii</i> (Hook.) Gray	+	
72	溪苔	<i>Pellia epiphylla</i> (L.) Corda	+	+
73	*钝鳞紫背苔	<i>Plagiochasma appendiculatum</i> Lehm. et. Lindenb.		+
74	刺叶羽苔	<i>Plagiochila sciophila</i> Nees	+	+
75	全缘褶萼苔	<i>Plicanthus birmensis</i> (Steph.) R.M.Schust.	+	
76	齿边褶萼苔	<i>Plicanthus hirtellus</i> (F.Weber) R.M.Schust.	+	
77	丛生光萼苔	<i>Porella caespitans</i> (Steph.) S.Hatt	+	

序号 No.	中文名 Species	拉丁名 Latin name	保护地内 Inside the NPA	保护地外 Outside the NPA
78	中华光萼苔	<i>Porella chinensis</i> (Steph.) S.Hatt.		+
79	密叶光萼苔	<i>Porella densifolia</i> (Steph.) S.Hatt.	+	+
80	亮叶光萼苔	<i>Porella nitens</i> (Steph.) S.Hatt.	+	
81	毛边光萼苔齿叶变种	<i>Porella perrottetiana</i> var. <i>ciliatodentata</i> (P.C.Chen et P.C.Wu) S.Hatt.	+	
82	多瓣光萼苔	<i>Porella ulophylla</i> (Steph.) S.Hatt.	+	
83	尖舌扁萼苔	<i>Radula acuminata</i> Steph.	+	
84	大瓣扁萼苔	<i>Radula cavifolia</i> Hampe ex Gottsche	+	
85	*扁萼苔	<i>Radula complanata</i> (L.) Dumort.	+	+
86	日本扁萼苔	<i>Radula japonica</i> Gottsche	+	+
87	尖叶扁萼苔	<i>Radula kojana</i> Steph.	+	
88	芽胞扁萼苔	<i>Radula lindenbergiana</i> Gottsche ex C.Hartm.	+	+
89	*热带扁萼苔	<i>Radula madagascariensis</i> Gottsche	+	
90	石地钱	<i>Reboulia hemisphaerica</i> (L.) Raddi	+	
91	*羽枝片叶苔小亚种	<i>Riccardia multifida</i> subsp. <i>decrescens</i> (Steph.) Furuki	+	
92	*掌状片叶苔	<i>Riccardia palmata</i> (Hedw.) Carruth.	+	
93	*密疣片叶苔	<i>Riccardia tamariscina</i> (Steph.) Schiffn.	+	
94	浮苔	<i>Ricciocarpos natans</i> (L.) Corda		+
95	*柯氏合叶苔	<i>Scapania koponenii</i> Potemkin	+	
96	舌叶合叶苔多齿亚种	<i>Scapania ligulata</i> subsp. <i>stephanii</i> (Müll.Frib.) Potemkin, Piippo et T.J.Kop.	+	
97	*大合叶苔	<i>Scapania paludosa</i> (Müll.Frib.) Müll.Frib		+
98	褐绿管口苔	<i>Solenostoma infusum</i> (Mitt.) Hentschel	+	+
99	*莲座管口苔	<i>Solenostoma rosulans</i> (Steph.) Váňa et D.G.Long	+	
100	*截叶管口苔	<i>Solenostoma truncatum</i> (Nees) R.M.Schust. ex Váňa et D.G.Long	+	+
101	*小挺叶苔	<i>Sphenolobus minutus</i> (Schreb. ex D.Crantz) Berggr.	+	
102	镰状多褶苔	<i>Spruceanthus falcatus</i> X.Q.Shi, R.L.Zhu et Gradst.	+	
103	*东亚多褶苔	<i>Spruceanthus kiushianus</i> (Horik.) X.Q.Shi, R.L.Zhu et Gradst.	+	
104	*平叶多褶苔	<i>Spruceanthus planiusculus</i> (Mitt.) X.Q.Shi, R.L.Zhu et Gradst.	+	
105	多褶苔	<i>Spruceanthus semirepandus</i> (Nees) Verd.	+	
106	筒萼对耳苔	<i>Syzygiella autumnalis</i> (DC.) K.Feldberg, Váňa, Hentschel et Heinrichs	+	
<b>藓类植物门</b>		<b>Bryophyta</b>		
107	大灰气藓原亚种	<i>Aerobryopsis subdivergens</i> (Broth.) Broth. subsp. <i>subdivergens</i>	+	+
108	*阔叶丛本藓	<i>Anoetangium clarum</i> Mitt.	+	
109	扭叶丛本藓	<i>Anoetangium stracheyanum</i> Mitt.	+	
110	小牛舌藓	<i>Anomodon minor</i> (Hedw.) Lindb.		+
111	*带叶牛舌藓	<i>Anomodon perlingulatus</i> Broth. ex P.C.Wu et Y.Jia		+
112	牛舌藓	<i>Anomodon viticulosus</i> (Hedw.) Hook. et Taylor		+
113	小仙鹤藓	<i>Atrichum crispulum</i> Schimp. ex Besch.	+	+
114	小胞仙鹤藓	<i>Atrichum rhystophyllum</i> (Müll.Hal.) Paris	+	
115	仙鹤藓多蒴变种	<i>Atrichum undulatum</i> (Hedw.) P.Beauv. var. <i>gracilisetum</i> Besch	+	+
116	*东亚扭口藓	<i>Barbula subcomosa</i> Broth.		+



序号 No.	中文名 Species	拉丁名 Latin name	保护地内 Inside the NPA	保护地外 Outside the NPA
117	扭口藓	<i>Barbula unguiculata</i> Hedw.		+
118	直叶珠藓	<i>Bartramia ithyphylla</i> Brid.	+	
119	饰边短月藓	<i>Brachymenium longidens</i> Renaud et Cardot		+
120	丛生短月藓	<i>Brachymenium pendulum</i> Mont.		+
121	灰白青藓	<i>Brachythecium albicans</i> (Hedw.) Schimp.		+
122	密枝青藓	<i>Brachythecium amnicola</i> Müll.Hal.		+
123	*耳叶青藓	<i>Brachythecium auriculatum</i> A.Jaeger		+
124	勃氏青藓	<i>Brachythecium brotheri</i> Paris		+
125	多枝青藓	<i>Brachythecium fasciculirameum</i> Müll.Hal.		+
126	皱叶青藓	<i>Brachythecium kuroishicum</i> Besch.	+	
127	毛尖青藓	<i>Brachythecium piligerum</i> Cardot	+	
128	匍枝青藓	<i>Brachythecium procumbens</i> (Mitt.) A.Jager		+
129	林地青藓	<i>Brachythecium starkei</i> (Brid.) Schimp.		+
130	绒叶青藓	<i>Brachythecium velutinum</i> (Hedw.) Schimp.	+	
131	白氏藓	<i>Brothera leana</i> (Sull.) Müll.Hal.		+
132	东亚小锦藓	<i>Brotherella fauriei</i> (Besch. ex Cardot) Broth.	+	
133	南方小锦藓	<i>Brotherella henonii</i> (Duby) M.Fleisch.	+	+
134	垂蒴小锦藓	<i>Brotherella nictans</i> (Mitt.) Broth.	+	+
135	短枝燕尾藓	<i>Bryhnia brachycladula</i> Cardot		+
136	短尖燕尾藓	<i>Bryhnia hultenii</i> E.B.Bartram		+
137	毛尖燕尾藓	<i>Bryhnia trichomitria</i> Dixon et Thér.		+
138	毛状真藓	<i>Bryum apiculatum</i> Schwägr.		+
139	真藓	<i>Bryum argenteum</i> Hedw.		+
140	比拉真藓	<i>Bryum billarderi</i> Schwägr.	+	
141	细叶真藓	<i>Bryum capillare</i> Hedw.	+	+
142	*蕊形真藓	<i>Bryum coronatum</i> Schwägr.		+
143	双色真藓	<i>Bryum dichotomum</i> Hedw.		+
144	黄色真藓	<i>Bryum pallescens</i> Schleich. ex Schwägr.		+
145	长叶曲柄藓	<i>Campylopus atrovirens</i> De Not.	+	
146	尾尖曲柄藓	<i>Campylopus comosus</i> (Schwägr.) Bosch et Sande Lac.	+	
147	曲柄藓	<i>Campylopus flexuosus</i> (Hedw.) Brid.	+	
148	*脆枝曲柄藓	<i>Campylopus fragilis</i> (Brid.) Bruch et Schimp.	+	
149	*大曲柄藓	<i>Campylopus hemitrichus</i> (Müll.Hal.) A.Jaeger	+	
150	疏网曲柄藓	<i>Campylopus laxitextus</i> Sande Lac.	+	
151	节茎曲柄藓	<i>Campylopus umbellatus</i> (Arn.) Paris	+	+
152	狭叶麻羽藓	<i>Claopodium aciculum</i> (Broth.) Broth.		+
153	齿叶麻羽藓	<i>Claopodium prionophyllum</i> (Müll.Hal.) Broth.	+	
154	偏叶麻羽藓	<i>Claopodium rugulosifolium</i> S.Y.Zeng		+
155	*三列疣胞藓	<i>Clastobryum glabrescens</i> (Z.Iwats.) B.C.Tan, Z.Iwats. et D.H.Norris	+	
156	黄无尖藓	<i>Codriophorus anomodontoides</i> (Cardot) Bednarek.-Ochyra et Ochyra	+	
157	短柄无尖藓	<i>Codriophorus brevisetus</i> (Lindb.) Bednarek.-Ochyra et Ochyra	+	

序号 No.	中文名 Species	拉丁名 Latin name	保护地内 Inside the NPA	保护地外 Outside the NPA
158	柔枝梳藓	<i>Ctenidium andoi</i> N.Nishim.	+	
159	平叶梳藓	<i>Ctenidium homalophyllum</i> Broth. et Yasuda ex Ihsiba	+	+
160	*麻齿梳藓	<i>Ctenidium malacobolum</i> (Müll.Hal.) Broth.	+	
161	梳藓	<i>Ctenidium molluscum</i> (Hedw.) Mitt.	+	+
162	*羽枝梳藓	<i>Ctenidium pinnatum</i> (Broth. et Paris) Broth.	+	+
163	短肋雉尾藓	<i>Cyathophorum hookerianum</i> (Griff.) Mitt.	+	
164	*短颈小曲尾藓	<i>Dicranella cerviculata</i> (Hedw.) Schimp.	+	
165	南亚小曲尾藓	<i>Dicranella coarctata</i> (Müll.Hal.) Bosch et Sande Lac.	+	
166	*疏叶小曲尾藓	<i>Dicranella divaricatula</i> Besch.	+	+
167	多形小曲尾藓	<i>Dicranella heteromalla</i> (Hedw.) Schimp.	+	
168	细叶小曲尾藓	<i>Dicranella micro-divariata</i> (Müll.Hal.) Paris.	+	
169	偏叶小曲尾藓	<i>Dicranella subulata</i> (Hedw.) Schimp.		+
170	*丛叶青毛藓	<i>Dicranodontium caespitosum</i> (Mitt.) Paris	+	
171	*毛叶青毛藓	<i>Dicranodontium filifolium</i> Broth.	+	
172	阿萨姆曲尾藓	<i>Dicranum assamicum</i> Dixon	+	
173	钩叶曲尾藓	<i>Dicranum hamulosum</i> Mitt.	+	
174	日本曲尾藓	<i>Dicranum japonicum</i> Mitt.	+	
175	*克什米尔曲尾藓	<i>Dicranum kashmirensis</i> Broth.	+	
176	尖叶对齿藓原变种	<i>Didymodon constrictus</i> (Mitt.) K.Saito var. <i>constrictus</i>		+
177	长尖对齿藓	<i>Didymodon ditrichoides</i> (Broth.) X.J.Li et S.He		+
178	*短颈藓	<i>Diphyscium foliosum</i> (Hedw.) D.Mohr	+	
179	东亚短颈藓	<i>Diphyscium fulvifolium</i> Mitt.	+	
180	*厚角黄藓原变种	<i>Distichophyllum collenchymatosum</i> Cardot var. <i>collenchymatosum</i>	+	
181	*软枝绿锯藓	<i>Duthiella flaccida</i> Broth.		+
182	*大偏蒴藓	<i>Ectropothecium penzigianum</i> M.Fleisch.	+	
183	平叶偏蒴藓	<i>Ectropothecium zollingeri</i> (Müll.Hal.) A.Jaeger		+
184	绢藓	<i>Entodon cladorrhizans</i> (Hedw.) Müll.Hal.	+	+
185	深绿绢藓	<i>Entodon luridus</i> (Griff.) A.Jaeger	+	+
186	长叶绢藓	<i>Entodon longifolius</i> (Müll.Hal.) A.Jaeger	+	+
187	钝叶绢藓	<i>Entodon obtusatus</i> Broth.		+
188	皱叶绢藓	<i>Entodon plicatus</i> Müll.Hal.		+
189	绿叶绢藓	<i>Entodon viridulus</i> Cardot	+	+
190	短尖美喙藓	<i>Eurhynchium angustirete</i> (Broth.) T.J.Kop.		+
191	狭叶美喙藓	<i>Eurhynchium coarctum</i> Müll.Hal.	+	+
192	尖叶美喙藓	<i>Eurhynchium eustegium</i> (Besch.) Dixon	+	
193	扭尖美喙藓	<i>Eurhynchium kirishimense</i> Takaki		+
194	疏网美喙藓	<i>Eurhynchium laxirete</i> Broth.	+	+
195	羽枝美喙藓	<i>Eurhynchium longirameum</i> (Müll.Hal.) Y.F.Wang et R.L.Hu		+
196	密叶美喙藓	<i>Eurhynchium savatieri</i> Schimp. ex Besch.	+	+
197	*八齿碎米藓	<i>Fabronia ciliaris</i> (Brid.) Brid.		+
198	小粗疣藓	<i>Fauriella tenerrima</i> Broth.	+	

序号 No.	中文名 Species	拉丁名 Latin name	保护地内 Inside the NPA	保护地外 Outside the NPA
199	异形凤尾藓	<i>Fissidens anomalus</i> Mont.	+	
200	齿叶凤尾藓	<i>Fissidens crenulatus</i> Mitt.	+	
201	卷叶凤尾藓	<i>Fissidens dubius</i> P.Beauv	+	+
202	*短肋凤尾藓	<i>Fissidens gardneri</i> Mitt.	+	
203	内卷凤尾藓	<i>Fissidens involutus</i> Wilson ex. Mitt.	+	
204	*线叶凤尾藓暗色变种	<i>Fissidens linearis</i> var. <i>obscuriretis</i> (Broth. et Paris) I.G.Stone	+	+
205	大凤尾藓	<i>Fissidens nobilis</i> Griff.	+	+
206	*垂叶凤尾藓	<i>Fissidens obscurus</i> Mitt.	+	
207	*延叶凤尾藓	<i>Fissidens perdecurrens</i> Besch.	+	+
208	*锐齿凤尾藓	<i>Fissidens serratus</i> Müll.Hal.	+	
209	鳞叶凤尾藓	<i>Fissidens taxifolius</i> Hedw.	+	+
210	南京凤尾藓	<i>Fissidens teysmannianus</i> Dozy et Molk.	+	+
211	拟小凤尾藓	<i>Fissidens tosaensis</i> Broth.	+	+
212	四川丝带藓	<i>Floribundaria setschwanica</i> Broth.	+	+
213	*残齿藓	<i>Forsstroemia trichomitria</i> (Hedw.) Lindb.	+	
214	*粗枝藓	<i>Gollania clarescens</i> (Mitt.) Broth.	+	
215	*直叶紫萼藓	<i>Grimmia elatior</i> Bruch ex Bals.-Criv. et De Not.	+	
216	净口藓	<i>Gymnostomum calcareum</i> Nees et Hornsch.		+
217	狭叶小羽藓	<i>Haplocladium angustifolium</i> (Hampe et Müll.Hal.) Broth.	+	+
218	细叶小羽藓	<i>Haplocladium microphyllum</i> (Sw. ex Hedw.) Broth.	+	+
219	鞭枝多枝藓	<i>Haplohymenium flagelliforme</i> L.I.Savicz		+
220	拟多枝藓	<i>Haplohymenium pseudo-triste</i> (Müll.Hal.) Broth.	+	+
221	暗绿多枝藓	<i>Haplohymenium triste</i> (Ces.) Kindb.	+	+
222	虎尾藓	<i>Hedwigia ciliata</i> (Hedw.) P.Beauv.	+	+
223	羊角藓	<i>Herpetineuron toccocae</i> (Sull. et Lesq.) Cardot	+	+
224	拟扁枝藓	<i>Homaliadelphus targionianus</i> (Mitt.) Diox et P.de la Varde	+	
225	小树平藓	<i>Homaliodendron exiguum</i> (Bosch et Sande Lac.) M.Fleisch.	+	
226	刀叶树平藓	<i>Homaliodendron scalpellifolium</i> (Mitt.) M.Fleisch.	+	
227	无疣同蒴藓	<i>Homalothecium laevisetum</i> Sande Lac.	+	
228	斜蒴同蒴藓	<i>Homalothecium lutescens</i> (Hedw.) H.Rob.	+	
229	*墨西哥毛灰藓	<i>Homomallium mexicanum</i> Cardot		+
230	尖叶油藓	<i>Hookeria acutifolia</i> Hook. et Grev.	+	
231	卷叶湿地藓	<i>Hyophila involuta</i> (Hook.) A.Jaeger	+	+
232	花状湿地藓	<i>Hyophila nymaniana</i> (M.Fleisch.) Menzel	+	+
233	钙生灰藓	<i>Hypnum calcicola</i> Ando	+	+
234	灰藓	<i>Hypnum cupressiforme</i> Hedw.	+	+
235	*密枝灰藓	<i>Hypnum densirameum</i> Ando	+	
236	长喙灰藓	<i>Hypnum fujiyamae</i> (Broth.) Paris		+
237	美灰藓	<i>Hypnum leptothallum</i> (Müll.Hal.) Paris	+	+
238	南亚灰藓	<i>Hypnum oldhamii</i> (Mitt.) A.Jaeger	+	
239	黄灰藓	<i>Hypnum pallescens</i> (Hedw.) P.Beauv.	+	

序号 No.	中文名 Species	拉丁名 Latin name	保护地内 Inside the NPA	保护地外 Outside the NPA
240	黄边孔雀藓	<i>Hypopterygium flavolimbatum</i> Müll.Hal.	+	+
241	*南亚孔雀藓	<i>Hypopterygium tamarisci</i> (Sw.) Brid. ex Müll.Hal.	+	+
242	钝头弯叶藓	<i>Isodrepanium arcuatum</i> (Bosch et Sande Lac.) J.J.Wang et Y.Jia	+	
243	*美丽拟同叶藓	<i>Isopterygiopsis pulchella</i> (Hedw.) Z.Iwts.	+	
244	淡色同叶藓	<i>Isopterygium albescens</i> (Hook.) A.Jaeger	+	
245	华东同叶藓	<i>Isopterygium courtoisii</i> Broth. et Paris	+	+
246	纤枝同叶藓	<i>Isopterygium minutirameum</i> (Müll.Hal.) A.Jaeger		+
247	齿边同叶藓	<i>Isopterygium serrulatum</i> M.Fleisch.		+
248	狭叶白发藓	<i>Leucobryum bowringii</i> Mitt.	+	
249	绿色白发藓	<i>Leucobryum chlorophyllosum</i> Müll.Hal.	+	+
250	爪哇白发藓	<i>Leucobryum javense</i> (Brid.) Mitt.	+	
251	桧叶白发藓	<i>Leucobryum juniperoideum</i> (Brid.) Müll.Hal.	+	
252	缺齿藓	<i>Macromitrium gymnostomum</i> Sull. et Lesq.	+	
253	钝叶藓	<i>Macromitrium japonicum</i> Dozy et Molk.		+
254	粗蔓藓	<i>Meteoriopsis squarrosa</i> (Hook. ex Harv.) M.Fleisch.	+	
255	蔓藓	<i>Meteorium polytrichum</i> Dozy et Molk.		+
256	粗枝蔓藓	<i>Meteorium subpolytrichum</i> (Besch.) Broth.	+	
257	平肋提灯藓	<i>Mnium laevinerve</i> Cardot	+	
258	长叶提灯藓	<i>Mnium lycopodioides</i> Schwägr.	+	
259	鼠尾藓	<i>Myuroclada maximowiczii</i> (G.G.Borshch.) Steere et W.B.Schofield	+	+
260	*延叶平藓	<i>Neckera decurrens</i> Broth.		+
261	短齿平藓	<i>Neckera yezoana</i> Besch.	+	
262	*截叶拟平藓	<i>Neckeropsis lepineaana</i> (Mont.) M.Fleisch.		+
263	*光叶拟平藓	<i>Neckeropsis nitidula</i> (Mitt.) M.Fleisch.	+	+
264	*耳蔓藓	<i>Neonoguchia auriculata</i> (Copp. ex Thér.) S.H.Lin	+	
265	东亚长齿藓	<i>Niphotrichum japonicum</i> (Dozy et Molk.) Bedn.-Ochyra et Ochyra	+	+
266	长枝褶藓	<i>Okamuraea hakoniensis</i> (Mitt.) Broth.		+
267	*中国木灵藓	<i>Orthotrichum hookeri</i> Wilson ex Mitt.		+
268	深绿褶叶藓	<i>Palamocladium euchloron</i> (Müll.Hal.) Wijk et Margad.	+	+
269	褶叶藓	<i>Palamocladium leskeoides</i> (Hook.) E.Britton		+
270	*垂蒴泽藓	<i>Philonotis cernua</i> (Wilson) D.G.Griffin et W.R.Buck	+	
271	偏叶泽藓	<i>Philonotis falcata</i> (Hook.) Mitt.	+	
272	柔叶泽藓	<i>Philonotis mollis</i> (Dozy et Molk.) Mitt.	+	+
273	细叶泽藓	<i>Philonotis thwaitesii</i> Mitt.		+
274	东亚泽藓	<i>Philonotis turneriana</i> (Schwägr.) Mitt.	+	+
275	红蒴立碗藓	<i>Physcomitrium eurystomum</i> Sendtn.		+
276	立碗藓	<i>Physcomitrium sphaericum</i> (Ludw.) Fürnr.		+
277	*尖叶平蒴藓	<i>Plagiobryum demissum</i> (Hook.) Lindb.		+
278	尖叶匍灯藓	<i>Plagiomnium acutum</i> (Lindb.) T.J.Kop.		+
279	匍灯藓	<i>Plagiomnium cuspidatum</i> (Hedw.) T.J.Kop.	+	+
280	*阔边匍灯藓	<i>Plagiomnium ellipticum</i> (Brid.) T.J.Kop.	+	+



序号 No.	中文名 Species	拉丁名 Latin name	保护地内 Inside the NPA	保护地外 Outside the NPA
281	侧枝匍灯藓	<i>Plagiomnium maximoviczii</i> (Lindb.) T.J.Kop.	+	+
282	具喙匍灯藓	<i>Plagiomnium rhynchophorum</i> (Hook.) T.J.Kop.	+	+
283	钝叶匍灯藓	<i>Plagiomnium rostratum</i> (Schrad.) T.J.Kop.		+
284	大叶匍灯藓	<i>Plagiomnium succulentum</i> (Mitt.) T.J.Kop.	+	+
285	台湾棉藓直叶变种	<i>Plagiothecium formosicum</i> var. <i>rectiapex</i> D.K.Li	+	
286	圆条棉藓	<i>Plagiothecium cavifolium</i> (Brid.) Z.Iwats.	+	+
287	光泽棉藓	<i>Plagiothecium laetum</i> Schimp.	+	+
288	垂蒴棉藓	<i>Plagiothecium nemorale</i> (Mitt.) A.Jaeger	+	
289	*刺边小金发藓	<i>Pogonatum cirratum</i> (Sw.) Brid.	+	
290	东亚小金发藓	<i>Pogonatum inflexum</i> (Lindb.) Sande Lac.	+	+
291	*南亚丝瓜藓	<i>Pohlia gadeana</i> (Bosch. et Sande Lac.) Gangulee	+	
292	*明齿丝瓜藓	<i>Pohlia hyaloperistoma</i> Da C.Zhang, X.J.Li et Higuchi	+	
293	卵蒴丝瓜藓	<i>Pohlia prolifera</i> (Kindb.) Lindb. ex Arnell		+
294	*白色丝瓜藓	<i>Pohlia wahlenbergii</i> (F.Weber et D.Mohr) A.L.Andrews	+	
295	台湾拟金发藓	<i>Polytrichastrum formosum</i> (Hedw.) G.L.Sm.	+	
296	金发藓	<i>Polytrichum commune</i> Hedw.	+	
297	拟草藓	<i>Pseudoleskeopsis zippelii</i> (Dozy et Molke.) Broth.		+
298	狭叶拟合睫藓	<i>Pseudosymblypharis angustata</i> (Mitt.) Hilp.	+	+
299	*密叶拟鳞叶藓	<i>Pseudotaxiphyllum densum</i> (Cardot) Z.Iwats.	+	+
300	东亚拟鳞叶藓	<i>Pseudotaxiphyllum pohliaecarpum</i> (Sull. et Lesq.) Z.Iwats.	+	+
301	*台湾缩叶藓	<i>Ptychomitrium formosicum</i> Broth. et Yasuda	+	
302	多枝缩叶藓	<i>Ptychomitrium gardneri</i> Lesp.	+	
303	金灰藓	<i>Pylaisia polyantha</i> (Hedw.) Schimp.		+
304	短叶毛锦藓	<i>Pylaisiadelpha yokohamae</i> (Broth.) W.R.Buck	+	+
305	大桧藓	<i>Pyrrhobryum dozyanum</i> (Sande Lac.) Manuel	+	
306	薄壁卷柏藓	<i>Racopilum cuspidigerum</i> (Schwägr.) Ångström	+	+
307	*光柄细喙藓	<i>Rhynchostegiella laeviseta</i> Broth.	+	+
308	*卵叶长喙藓	<i>Rhynchostegium ovalifolium</i> S.Okamura		+
309	淡叶长喙藓	<i>Rhynchostegium pallidifolium</i> (Mitt.) A.Jaeger	+	+
310	水生长喙藓	<i>Rhynchostegium riparioides</i> (Hedw.) Cardot		+
311	*美丽长喙藓	<i>Rhynchostegium subspicosum</i> (Müll.Hal.) Müll.Hal.		+
312	小火藓	<i>Schlotheimia pungens</i> E.B.Bartram	+	
313	*东亚附干藓	<i>Schwetschkea laxa</i> (Wilson) A.Jaeger		+
314	拟附干藓	<i>Schwetschkeopsis fabronia</i> (Schwägr.) Broth.	+	+
315	弯叶拟青藓	<i>Sciuro-hypnum reflexum</i> (Starke) Schimp.	+	
316	*橙色锦藓	<i>Sematophyllum phoeniceum</i> (Müll.Hal.) M.Fleisch	+	+
317	矮锦藓	<i>Sematophyllum subhumile</i> (Müll.Hal.) M.Fleisch.	+	+
318	锦藓	<i>Sematophyllum subpinnatum</i> (Brid.) E.Britton	+	
319	泥炭藓	<i>Sphagnum palustre</i> L.	+	
320	*长刺刺果藓	<i>Symphiodon echinatus</i> (Mitt.) A.Jaeger	+	
321	*细尖鳞叶藓	<i>Taxiphyllum aomoriense</i> (Besch.) Z.Iwats.	+	

序号	中文名	拉丁名	保护地内	保护地外
No.	Species	Latin name	Inside the NPA	Outside the NPA
322	凸尖鳞叶藓	<i>Taxiphyllum cuspidifolium</i> (Cardot) Z.Iwats.	+	+
323	鳞叶藓	<i>Taxiphyllum taxirameum</i> (Mitt.) M.Fleisch.	+	+
324	褶叶木藓	<i>Thamnobryum plicatulum</i> (Sande Lac.) Z.Iwats.	+	
325	匙叶木藓	<i>Thamnobryum subseriatum</i> (Mitt. ex Sande Lac.) B.C.Tan		+
326	大羽藓	<i>Thuidium cymbifolium</i> (Dozy et Molck.) Dozy et Molck.	+	+
327	细枝羽藓	<i>Thuidium delicatulum</i> (Hedw.) Schimp.	+	+
328	拟灰羽藓	<i>Thuidium glaucinoides</i> Broth.	+	+
329	短肋羽藓	<i>Thuidium kanedae</i> Sakurai	+	+
330	灰羽藓	<i>Thuidium pristocalyx</i> (Müll.Hal.) A.Jaeger	+	
331	羽藓	<i>Thuidium tamariscinum</i> (Hedw.) Bruch et Schimp.	+	
332	扭藓	<i>Tortella humilis</i> (Hedw.) Jenn.	+	+
333	长叶扭藓	<i>Tortella tortuosa</i> (Schrad. ex Hedw.) Limpr.	+	
334	疣灯藓	<i>Trachycystis microphylla</i> (Dozy et Molck.) Lindb.	+	+
335	扭叶藓	<i>Trachypus bicolor</i> Reinw. et Hornsch.	+	
336	小扭叶藓	<i>Trachypus humilis</i> Lindb.	+	+
337	卷叶毛口藓	<i>Trichostomum hattorianum</i> B.C.Tan et Z.Iwats.	+	+
338	阔叶毛口藓	<i>Trichostomum platyphyllum</i> (Ihsiba) P.C.Chen		+
339	波边毛口藓	<i>Trichostomum tenuirostre</i> (Hook. f. et Taylor) Lindb.	+	
340	卷叶藓	<i>Ulotia crispa</i> Brid.		+
341	小石藓	<i>Weissia controversa</i> Hedw.	+	+
342	缺齿小石藓	<i>Weissia edentula</i> Mitt.	+	+
343	东亚小石藓	<i>Weissia exserta</i> (Broth.) P.C.Chen		+
344	*弯叶刺枝藓	<i>Wijkia deflexifolia</i> (Mitt. ex Renauld et Cardot) H.A.Crum	+	



•生物编目•

# 浙江乌岩岭国家级自然保护区叶附生苔类及附主植物多样性

戴尊<sup>1#</sup>, 陈星<sup>1#</sup>, 张建行<sup>1</sup>, 朱毛洁<sup>1</sup>, 宋坤<sup>2</sup>, 邢诗晨<sup>1</sup>, 涂淑雯<sup>1</sup>, 邹璐<sup>1</sup>, 雷祖培<sup>3</sup>, 李宏庆<sup>1\*</sup>, 王健<sup>1\*</sup>

1. 华东师范大学生命科学学院, 上海 200241; 2. 华东师范大学生态与环境科学学院, 上海 200241; 3. 浙江乌岩岭国家级自然保护区管理局, 浙江泰顺 325500

**摘要:** 叶附生苔类植物是一类主要生长在热带雨林和亚热带常绿阔叶林维管植物叶片表面的苔类植物, 具有重要的生态价值, 是苔藓植物中最需要关注和保护的一个类群。但由于其个体细小、分类困难等原因, 此前针对我国叶附生苔类植物的采样可能存在低估其多样性的情况。为了解采样方式可能对叶附生苔类植物多样性的影响, 本研究在乌岩岭国家级自然保护区对叶附生苔开展了系统的采样及比较研究。根据叶附生苔附主植物的叶片特性、分布位置等因素, 对保护区内的叶附生苔类植物及附主植物开展沿海拔梯度的系统调查和取样, 分析了叶附生苔类植物和附主植物的多样性及物种组成情况。结果显示, 该保护区共有叶附生苔类植物5科14属49种, 叶附生苔附主植物57科84属119种。与历史数据相比, 本研究区新增叶附生苔2科5属35种, 其中浙江省新记录苔类4种。叶附生苔物种丰富度表现出随海拔升高呈单峰型分布的模式, 在500–900 m海拔段的种数最多。基于叶片数的物种累积曲线及随机抽样分析表明, 该保护区叶附生苔在不同生境及同一附主植物不同叶片间表现出较大的种类组成差异。鉴于本研究采集方法获得的较高叶附生苔物种多样性, 建议在我国叶附生苔多样性其他分布中心开展类似的研究, 以进一步摸清我国叶附生苔类植物物种多样性。

**关键词:** 生物多样性保护优先区域; 苔藓植物; 采样方法; 物种多样性

戴尊, 陈星, 张建行, 朱毛洁, 宋坤, 邢诗晨, 涂淑雯, 邹璐, 雷祖培, 李宏庆, 王健 (2022) 浙江乌岩岭国家级自然保护区叶附生苔类及附主植物多样性. 生物多样性, 30, 21229. doi: 10.17520/biods.2021229.

Dai Z, Chen X, Zhang JH, Zhu MJ, Song K, Xing SC, Tu SW, Zou L, Lei ZP, Li HQ, Wang J (2022) Species diversity of epiphyllous liverworts and host plants in the Wuyanling National Nature Reserve, Zhejiang Province. Biodiversity Science, 30, 21229. doi: 10.17520/biods.2021229.

## Species diversity of epiphyllous liverworts and host plants in the Wuyanling National Nature Reserve, Zhejiang Province

Zun Dai<sup>1#</sup>, Xing Chen<sup>1#</sup>, Jianhang Zhang<sup>1</sup>, Maojie Zhu<sup>1</sup>, Kun Song<sup>2</sup>, Shichen Xing<sup>1</sup>, Shuwen Tu<sup>1</sup>, Lu Zou<sup>1</sup>, Zupei Lei<sup>3</sup>, Hongqing Li<sup>1\*</sup>, Jian Wang<sup>1\*</sup>

1 School of Life Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241

2 School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241

3 Zhejiang Wuyanling National Nature Reserve Management Bureau, Taishun, Zhejiang 325500

### ABSTRACT

**Aims:** Epiphyllous liverworts are a group of bryophytes that mainly grow on the leaf surfaces of vascular plants in tropical rainforests and subtropical evergreen broad-leaved forests. These species have important value in the ecosystem and are the group of bryophytes that need the most attention and protection by conservationists. However, due to the physically small size and the difficulty of classifying specimens, previous surveys of epiphyllous liverworts in China may have underestimated their diversity. In order to understand the possible impact of sampling methods on the

收稿日期: 2021-06-03; 接受日期: 2021-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(31770371; 32070228)和生态环保部生物多样性调查、观察与评估项目(2019–2023)

# 共同第一作者 Co-first authors

\* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: hqli@bio.ecnu.edu.cn; jwang@bio.ecnu.edu.cn

perceived diversity of epiphyllous liverworts, the present study conducted systematic sampling and comparative analysis on the epiphyllous liverworts in the Wuyanling National Nature Reserve.

**Methods:** Utilizing the Wuyanling National Nature Reserve as the study area, this study carried out systematic investigations on the diversity of epiphyllous liverworts and their host plants along altitude gradients according to the leaf characteristics and distribution position of host plants. Species richness and composition of epiphyllous liverworts and its host plants were analyzed.

**Results:** There are 49 species of epiphyllous liverworts obtained from 14 genera in 5 families and 119 species of host plants obtained from 84 genera in 57 families. Compared with historical data, 35 species, 5 genera and 2 families were newly recorded in the area, including 4 new species recorded in Zhejiang Province. A humped relationship is observed between species richness of epiphyllous liverworts and elevation, with a maximum richness between the altitude of 500 m and 900 m. The species accumulation curve and random sampling analysis based on the number of leaves indicated that the epiphyllous liverworts in the reserve demonstrated great differences in species composition in different habitats and different leaves of the same host plant.

**Conclusion:** In view of the higher species diversity of epiphyllous liverworts obtained by the sampling method in this study, it is recommended to conduct similar studies in other distribution centers of the species in order to better understand the species diversity of epiphyllous liverworts in China.

**Key words:** biodiversity conservation priority areas; bryophytes; sampling method; species diversity

叶附生苔类植物(epiphyllous liverworts)是一类主要生长在热带和亚热带常绿阔叶林中维管植物叶片表面的苔类植物,是苔藓植物中较为复杂的一个类群(Pócs, 1996; Benavides & Jesús, 2011)。作为苔藓植物中对环境水分和温度变化敏感的类群,叶附生苔类植物的多样性及分布可以直接反映森林的质量和完整度,特别适合作为应对气候变化的指示类群(Pócs, 1996)。同时,叶附生苔类植物对森林生物多样性的形成和维持、生态系统的物质和能量循环也具有重要意义(Jiang et al, 2014)。作为整个苔藓植物中特有率最高的一个类群(Pócs, 1996),叶附生苔类植物的研究及保护极为重要。

我国早期关于叶附生苔类植物最重要的文献是陈邦杰和吴鹏程(1964)的《中国叶附生苔类植物的研究(一)》,记载了中国有分布的76种叶附生苔类植物。随后,各地的叶附生苔类植物被陆续采集和报道,目前在海南、香港、广东、广西、云南、福建、江西、湖南、贵州、浙江、安徽、湖北、四川和西藏等15个省、自治区和特别行政区都有分布(Zhu & So, 2001; Jiang et al, 2014)。2001年,Zhu和So发表的*Epiphyllous Liverworts of China*系统地收录了中国此前所采集的叶附生苔类植物约6,000份标本,共包括10科28属168种,确定了海南、台湾、浙江西南部和福建北部、云南南部、云南西北部和西藏东南部等5个中国叶附生苔多样性分布中心。

尽管中国叶附生苔的研究历史相对悠久,但此前的研究多是基于随机采样的结果,很少针对一个

地区的叶附生苔类植物开展系统的采样和分析。不同采样方式可能对叶附生苔多样性结果产生重要影响。在热带地区,Gradstein等(1996)研究发现,附主植物叶片的老幼、形状、在枝条上的位置及所采集的叶片数量等都与所获得的叶附生苔类植物多样性之间有着密切的关系。但是,由于其多数种类个体细小,在野外很难鉴定种类,难以根据采集者的经验来判断一个地区叶附生苔类植物的多样性。在采样时,究竟该采集多少棵附主植物或采集多少片叶片才能反映出一个地区的叶附生苔类植物多样性,而同时又不会因为过度采样而破坏其多样性?此外,叶附生苔类植物对附主植物的选择是否存在严格的特异性一直存在较多争论。有研究表明特定的叶附生苔倾向于附生在特定的附主植物叶片上(Berrie & Eze, 1975; Richards, 1984),但也有研究表明叶附生苔可以无差别地生长在塑料模拟叶片上(Monge-Nájera & Blanco, 1995)。一般来说,一个地区附主植物的数量一般要高于附生于其叶片上的苔类植物1.5-4倍(Zhu & So, 2001),故了解一个地区附主植物的多样性有助于正确估计该地区叶附生苔类植物多样性。

为了探讨以上问题,本研究以乌岩岭国家级自然保护区为例,根据附主植物的叶片特性、在附主植物上的分布位置等,对保护区内的叶附生苔类植物及附主植物开展沿海拔梯度的系统调查和取样,以期了解该保护区叶附生苔类植物和附主植物的多样性及物种组成,为其他地区叶附生苔类植物的

采样提供参考。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区域

乌岩岭国家级自然保护区位于浙江省泰顺县西北部(27°40′–27°43′ N, 119°38′–119°41′ E), 南连福建省寿宁县, 北接浙江省云和县, 是我国武夷山生物多样性保护优先区域的关键区域。该保护区属于浙闽边境洞宫山脉的一部分, 处于中亚热带的南北亚热带分界线上, 主峰1,611 m, 其“U”形山体阻挡了冬季的寒流, 并使得来自海洋的温暖东南季风气流得以长时间停留(Zhu, 1990)。该区气候条件优越, 生物多样性资源十分丰富, 森林覆盖率达92.8%, 区系较为复杂, 区内植被比较完整、典型, 是我国亚热带常绿阔叶林东部地区保存较好的地点之一(Zhu, 1990), 也为叶附生苔类植物的生长提供了优良的环境。复杂的生境加上特殊的气候模式使得该地区苔藓植物十分丰富, 也孕育了丰富的叶附生苔类植物(朱瑞良和胡人亮, 1991; Zhu et al, 1998)。

### 1.2 标本采集、鉴定和数据处理

于2020年8月对浙江乌岩岭国家级自然保护区进行叶附生苔类植物的调查, 此次调查覆盖双坑口保护站、黄桥保护站、铁炉基至黄家岱及黄连山至

溪斗村4个区域(图1)。参考Gradstein等(1996)的结论及建议, 对上述4个区域的叶附生苔类植物沿海拔梯度进行连续的调查和采集。为保证不同海拔采样的可比性, 以登山道两侧5 m范围内可发现的叶附生苔为对象进行标本采集, 海拔范围194–1,213 m, 共采集了160株附主植物。每株植物个体按东、西、南、北4个方位各取1根枝条, 同时顶部随机选取1根枝条, 在枝条的基部和顶端各取1片苔类分布界限清晰的树叶, 每株附主植物所采集的叶片作为1份标本(蕨类植物只采集1片完整叶片)。所有凭证标本存放在华东师范大学生物博物馆(HSNU)。对每株附主植物进行记录, 不能确定物种的需采集标本带回室内进行鉴定。

为了解乌岩岭国家级自然保护区与省内其他地区叶附生苔类植物多样性及物种组成的差异, 本研究选取浙江省内有叶附生苔分布的6个自然保护区进行比较, 分别是百山祖(Zhu et al, 1994a; 陈星等, 2021)、凤阳山(Zhu et al, 1994b)、钱江源(白杨等, 2020)、西天目山(Tang et al, 2018; Dai et al, 2019)、九龙山(刘仲苓, 1986)及西湖风景名胜区(杜晓孟等, 2020)。在比较这7个地区的叶附生苔区系前, 依据最新的世界苔类植物分类系统(Söderström et al, 2016)和其他最新的分类对名录处理进行更新。物种的中文名主要依据《中国生物物种名录: 苔藓植物》

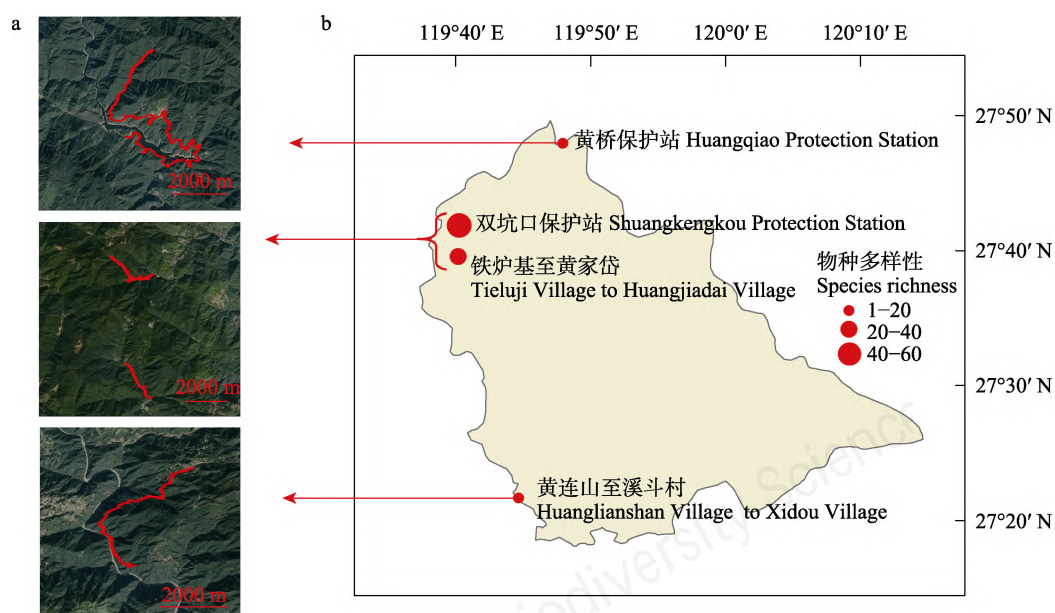


图1 浙江省乌岩岭国家级自然保护区叶附生苔调查样线(a)及采样点(b)分布图

Fig. 1 Map of sampling lines (a) and sites (b) of epiphyllous liverworts in the Wuyanling National Nature Reserve, Zhejiang Province



(王利松等, 2018)。

不同地区间物种相似性采用Jaccard相似性系数( $J$ )进行衡量:  $J = c/(a + b - c)$ , 式中 $a$ 为地区A的种(属或科)数,  $b$ 为地区B的种(属或科)数,  $c$ 为地区A和B的共有种(属或科)数。Jaccard相似性系数介于0–1之间。其值越接近1, 表明两个地区分类单元的相似性程度越高(Jaccard, 1912)。

基于附主植物个数及叶片数, 利用EstimateS 9.1.0及Excel 2016软件分别完成物种累积曲线分析及物种丰富度的外推估计(Colwell, 2013)。丰富度的外推采用非参数估计方法, 参考Xu等(2012)推荐的基于附主植物个数及叶片数物种二元(有/无)数据的第二阶Jackknife重取样估计(Jack2) (Burnham & Overton, 1978, 1979)。

为探究同一株附主植物上叶片采集数量对物种多样性的影响, 本研究从160份叶附生苔类标本中, 选择采集10片叶片及以上的标本进行随机抽样, 共选出63份标本, 包括33种叶附生苔。每次抽样从各份标本中随机抽取数量相等的叶片, 并统计所有抽取叶片上所包含的苔类物种数量。每份标本所抽取的叶片数由1逐渐增至10, 重复1,000次。随机抽样和统计均在R 4.0.5 (R Core Team, 2019)中完成, 并使用ggpubr包(Kassambara, 2020)完成对数据分析结果的可视化处理。

## 2 结果

### 2.1 叶附生苔种类组成及特点

通过调查, 共获得叶附生苔类5科14属49种(附录1), 与前人的报道相比新增2科5属35种(图版见附录2), 新增的种类主要为疣鳞苔属(*Cololejeunea*)。49种叶附生苔全部属于叶苔纲, 包括细鳞苔科(10属37种)、耳叶苔科(1属4种)、羽苔科(1属1种)、叉苔科(1属1种)和扁萼苔科(1属6种)。双坑口保护站、铁炉基至黄家岱、黄连山至溪斗村及黄桥保护站4个区域依次有43种、23种、16种和12种(图1)。

本次调查新增浙江省苔类植物新记录4种(含变种), 分别为鼎湖疣鳞苔(*Cololejeunea dinghuiana*)、粗疣鳞苔(*C. grossepapillosa*)、羊角耳叶苔喙尖变种(*Frullania monocera* var. *acutiloba*)和异胞扁萼苔(*Radula gedena*)。

综合前人的报道, 乌岩岭国家级自然保护区共有叶附生苔类植物5科14属52种, 其中细鳞苔科为该地区的优势科, 有39种; 疣鳞苔属(*Cololejeunea*)为优势属, 有19种。薄叶疣鳞苔(*C. appressa*)、长叶疣鳞苔(*C. longifolia*)、刺疣鳞苔(*C. spinosa*)、细角管叶苔(*Colura tenuicornis*)、黄色细鳞苔(*Lejeunea flava*)和尖叶薄鳞苔(*Leptolejeunea subacuta*)等6个种广布于所调查的4个区域, 是乌岩岭国家级自然保护区最常见种类(附录1)。本次在乌岩岭国家级自然保护区采集的叶附生苔在海拔194–1,213 m间均有分布(图2), 700–900 m海拔段的叶附生苔种类最多, 有39种, 100–300 m和1,100–1,300 m海拔段最少, 均为4种, 由此可以看出叶附生苔在该保护区沿海拔梯度呈单峰型分布模式。尖叶薄鳞苔和疣萼鳞苔(*Cololejeunea peraffinis*)这两个种的海拔分布范围最广, 在446–1,213 m间均有分布。

### 2.2 与省内其他保护区的叶附生苔比较

与浙江省内其他6个有叶附生苔分布的保护区相比, 乌岩岭国家级自然保护区叶附生苔的科、属、种数均位列第一(附录3), 且有12种仅在本区分布(附录4)。从附录5可知, 乌岩岭国家级自然保护区的叶附生苔在科、属上与百山祖国家级自然保护区完全相同。在种类组成上, 与百山祖国家级自然保护区的相似性最高, 其次是与凤阳山和钱江源, 与西天目山、九龙山和西湖的种相似性较低。

### 2.3 叶附生苔的附主植物组成

经对野外照片及标本的鉴定, 发现乌岩岭国家

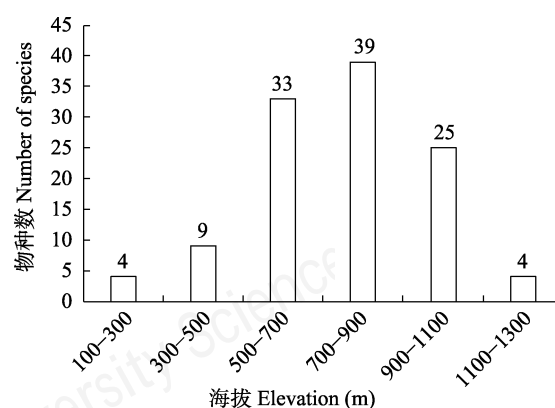


图2 浙江省乌岩岭国家级自然保护区叶附生苔多样性沿海拔梯度的分布

Fig. 2 Distribution of epiphyllous liverworts diversity along elevational gradients in the Wuyanling National Nature Reserve, Zhejiang Province

级自然保护区叶附生苔附主植物57科84属119种(附录6)。其中,物种数在6–8种的的优势科有壳斗科、樟科、五列木科、茜草科和山茶科;物种数在5–6种的的优势属有山茶属(*Camellia*)、锥属(*Castanopsis*)、铃木属(*Eurya*)和冬青属(*Ilex*);物种数在1–4种的附主植物占51科65属。

#### 2.4 基于附主植物个数和叶片数的物种累积曲线及丰富度外推估计

从基于附主植物个数的物种累积曲线可以看出,叶附生苔物种丰富度随附主植物个数的增加而急剧上升,当附主植物个数增至19–20个时,叶附生苔物种多样性达到总物种多样性的50.0%;随后增速趋缓,当附主植物个数增至105个时,叶附生苔物种多样性达到总物种多样性的90.0%,并渐趋平缓(图3a)。基于物种二元(有/无)数据对叶附生苔丰富度外推的Jack2值为67.87,本次采集的叶附生苔物种数为49种,为外推估算值的72.2%。

从基于叶片数的物种累积曲线可以看出,叶附生苔物种丰富度随叶片数的增加而急剧上升,当叶片数增至74–75时,叶附生苔物种多样性达到总物种多样性的50.0%;随后增速趋缓,当叶片数增至580,叶附生苔物种多样性达到总物种多样性的90.0%,并渐趋平缓(图3b)。基于物种二元(有/无)数据对叶附生苔丰富度外推的Jack2值为64.98。本次采集的叶附生苔物种数为外推估计值的75.4%。

#### 2.5 基于叶片数的随机抽样对物种多样性的影响

中值不受分布数列的极大或极小值影响,可以反映数组的一般水平(何文胜等, 2018),对分布数列具有一定的代表性。随机抽样结果显示,随着每份标本抽取叶片数量的增加,其所包含的叶附生苔物种丰富度也呈现逐渐增加的趋势,随机抽取1–10片叶片对应的物种丰富度中值分别为18、22、25、29、29、30、31、32、33及33种(图4箱型图中的黑色实线)。当随机抽样增至8片叶片时,所累积的叶附生苔物种多样性为总物种多样性的97.0%。

### 3 讨论

叶附生苔类植物主要为细鳞苔科和扁萼苔科,其中细鳞苔科占到总种数的95.0%,但由于其种类多、个体小及可用于分类的特征较少等原因,是苔类植物中最难分类的一个类群(Gradstein, 1997)。尤

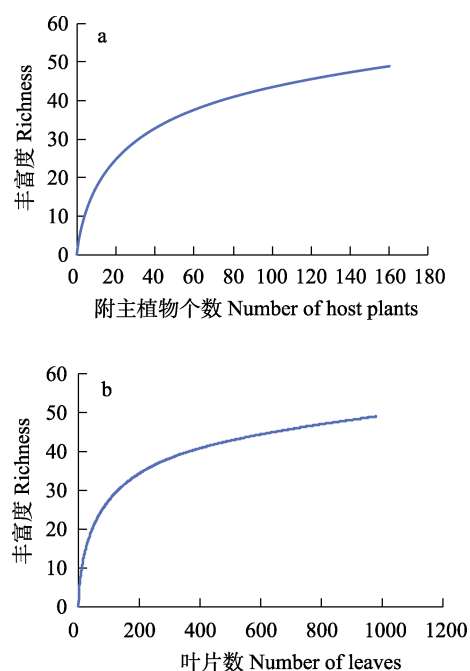


图3 浙江省乌岩岭国家级自然保护区叶附生苔基于附主植物个数(a)和叶片数(b)的物种累积曲线

Fig. 3 Species accumulation curve of epiphyllous liverworts based on the numbers (a) and the leaves (b) of host plants in the Wuyanling National Nature Reserve, Zhejiang Province

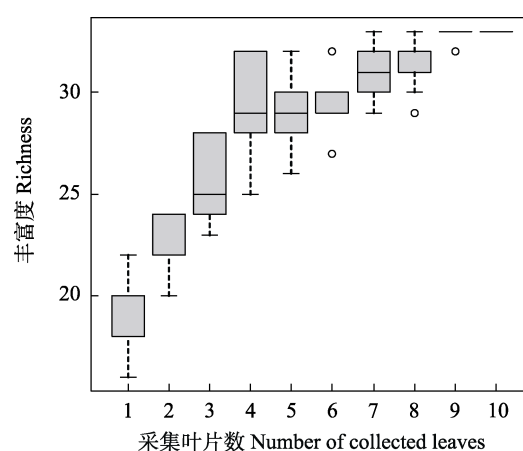


图4 浙江省乌岩岭国家级自然保护区附主植物采集叶片数与叶附生苔物种多样性箱型图(箱中实线示中值)

Fig. 4 Relationship between the number of collected leaves from host plants and richness of epiphyllous liverworts in the Wuyanling National Nature Reserve, Zhejiang Province (solid line in the box shows the mid-value)

其是作为细鳞苔科中第一大属的疣鳞苔属,主要以叶附生环境为主,其种类繁多、个体更为细小,隐形种现象特别常见(Yu et al, 2013),使得该属不同亚属及种间分类尤其困难,野外很难识别到种,很难根据采集者经验了解一个地区的多样性。通过系

统的采样, 本研究获得乌岩岭国家级自然保护区49种叶附生苔类植物, 综合前人的文献该保护区的叶附生苔增至52种, 多样性位居浙江省各保护区之首。同时, 与省内其他6个保护区相比, 乌岩岭国家级自然保护区独有的叶附生苔有12种, 也进一步突出了该保护区叶附生苔类植物的保护价值。

本研究调查到乌岩岭国家级自然保护区叶附生苔类植物5科14属49种, 附主植物57科84属119种, 提供了一个较为系统的叶附生苔和附主植物名录, 也为今后开展更大范围内的叶附生苔与附主植物之间关系的研究提供了重要的基础资料。叶附生苔与附主植物之间是否存在特异性关系至今没有定论, 但研究发现叶附生苔的物种组成与附主植物叶片的年龄、大小、厚度、硬度、表面质地、光滑及黏着度等物理性质密切相关(Coley et al, 1993; Pócs & Tóthmérész, 1997)。本研究在该保护区所发现的叶附生苔附主植物优势科主要为壳斗科、樟科、五列木科、茜草科和山茶科等, 这些科的叶片多具有常绿、革质、表面较光滑且质地较厚等特征, 与前人的结论一致(陈邦杰和吴鹏程, 1964; Zhu & So, 2001)。另外, 本研究发现的附主植物种数是叶附生苔类植物的2.43倍, 与Zhu和So (2001)的结论(1.5–4倍)较为吻合。与基于采集叶片数的物种二元(有/无)数据对叶附生苔丰富度外推的Jack2值(64.98)相比, 本次采集的叶附生苔物种数为外推估计值的75.4%, 反映出较高的采集充分性。

在海拔上, 叶附生苔在我国的分布范围为30–3,000 m, 而最适的海拔范围为700–1,600 m(姜炎彬和邵小明, 2016)。乌岩岭国家级自然保护区的叶附生苔在500–900 m海拔段的种数最多, 物种丰富度表现出随海拔升高呈单峰型分布的模式。在保护区下辖的4个调查区域中, 物种多样性最高的是双坑口保护站, 其次为铁炉基至黄家岱, 而黄连山至溪斗村及黄桥保护站2个区域种类较少。一般而言, 叶附生苔分布地点均是降水较多、湿度高、具有峡谷地貌和完整的热带雨林或常绿阔叶林地区, 可为叶附生苔的繁殖和生长提供必要条件(Pócs, 1996)。Jiang等(2013)还发现叶附生苔在中国的出现概率与常绿阔叶林的覆盖度呈显著正相关关系, 只有当常绿阔叶林的覆盖度超过14%时, 叶附生苔才有可能出现。物种多样性较高的双坑口保护站和铁












炉基至黄家岱两个区域, 沿着登山道均分布有一较宽的沟谷, 沟中溪水常流带来了稳定的水汽, 为叶附生苔的生长营造了良好的环境。其中主景区沟谷两岸植被茂盛, 从海拔194–1,213 m均有叶附生苔的分布, 而铁炉基至黄家岱区域由于即将修建水库, 已有部分树木被砍伐, 叶附生苔的多样性和分布频率均少于主景区。其余两个叶附生苔种类较少的黄桥保护站和黄连山至溪斗村则不具备优良的叶附生苔适生环境, 且这两个区域均位于保护区边界附近, 而溪斗村受到的人为干扰更大, 可能是导致其叶附生苔物种多样性较低的原因。

为了避免过度采集对当地叶附生苔类植物多样性的破坏作用, Gradstein等(1996)建议在对一个地区开展研究之前, 首先要判断该地区叶附生苔类植物的丰富程度, 然后再制定采集计划。在热带地区(哥斯达黎加), 针对叶附生苔丰富度较低(如48种)的区域, 采集9片叶片可获得总多样性的50.0%, 采集62片叶片可获得总多样性的90.0%, 而对于叶附生苔丰富度较高(如177种)的区域, 采集31片叶片可获得总多样性的50.0%, 要获得90.0%的多样性则需要采集360片叶片(Gradstein et al, 1996)。由此可知, 要想获得一个较为准确和全面的叶附生苔物种组成, 多样性高的地方所采集的叶片要比多样性低的地方多出很多, 花费的时间也更长。需要注意的是, 本研究结果表明, 在我国一个叶附生苔物种数为49 (与热带地区的低丰富度相当)的地区, 要获得总多样性50.0%的叶附生苔类植物, 需要采集74–75片叶片, 而要想获得90.0%的多样性则需要采集580片。这表明在我国亚热带山地, 叶附生苔类植物的分布更为均匀, 不同生境之间的种类差异较大。本研究基于叶片数的随机抽样结果也支持这一观点, 只有当随机抽样增至第8片叶片时, 所累积的叶附生苔物种多样性才达到总物种多样性的97.0%, 意味着同一株附主植物不同叶片上的叶附生苔类物种组成差异也较大。结合本研究的结论, 建议在我国亚热带地区进行叶附生苔采集时, 适当扩大采集范围, 使之覆盖不同的生境及更多的附主植物, 以获得更高的物种多样性。同时, 鉴于本研究的采集方法获得了较高叶附生苔物种多样性, 建议在我国叶附生苔多样性其他分布中心开展类似的研究, 以进一步摸清我国叶附生苔类植物物种多



样性。

## ORCID

戴尊  <https://orcid.org/0000-0001-8229-5348>  
陈星  <https://orcid.org/0000-0002-3746-7101>  
张建行  <https://orcid.org/0000-0003-1898-1348>  
朱毛洁  <https://orcid.org/0000-0003-3502-6393>  
宋坤  <https://orcid.org/0000-0001-8019-9707>  
邢诗晨  <https://orcid.org/0000-0002-1544-3432>  
涂淑雯  <https://orcid.org/0000-0001-9219-7231>  
邹璐  <https://orcid.org/0000-0002-7346-8128>  
雷祖培  <https://orcid.org/0000-0002-0761-2646>  
李宏庆  <https://orcid.org/0000-0003-0658-6295>  
王健  <https://orcid.org/0000-0003-4309-0176>

## 参考文献

- Bai Y, Chen SW, Qian HY, Yu SH, Xu YM, Zhang ZX, Shen C, Chen YQ, Zhang MQ, Yu JP, Zhu RL (2020) Species diversity of epiphyllous liverworts in Qianjiangyuan National Park, Zhejiang. *Biodiversity Science*, 28, 231–237. (in Chinese with English abstract) [白杨, 陈声文, 钱海源, 余顺海, 徐谊明, 张芷昕, 沈超, 陈雨奇, 张美琪, 余建平, 朱瑞良 (2020) 钱江源国家公园叶附生苔类植物的物种多样性. *生物多样性*, 28, 231–237.]
- Benavides JC, Jesús ISD (2011) Diversity and rarity of epiphyllous bryophytes in a superhumid tropical lowland forest of Chocó-Colombia. *Cryptogamie, Bryologie*, 32, 119–133.
- Berrie GK, Eze JMO (1975) The relationship between an epiphyllous liverwort and host leaves. *Annals of Botany*, 39, 955–963.
- Burnham KP, Overton WS (1978) Estimation of the size of a closed population when capture probabilities vary among animals. *Biometrika*, 65, 625–633.
- Burnham KP, Overton WS (1979) Robust estimation of population size when capture probabilities vary among animals. *Ecology*, 60, 927–936.
- Chen PC, Wu PC (1964) Study on epiphyllous liverworts of China (I). *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 9, 213–276. (in Chinese with English abstract) [陈邦杰, 吴鹏程 (1964) 中国叶附生苔类植物的研究(一). *植物分类学报*, 9, 213–276.]
- Chen X, Dai Z, Xing SC, Wang J (2021) Effectiveness of *in-situ* conservation of epiphyllous liverworts in Qingyuan County, Zhejiang Province. *Journal of Zhejiang A&F University*, 38, doi: 10.11833/j.issn.2095-0756.20210241. (in Chinese with English abstract) [陈星, 戴尊, 邢诗晨, 王健 (2021) 浙江省庆元县叶附生苔的就地保护成效. *浙江农林大学学报*, 38, doi: 10.11833/j.issn.2095-0756.20210241.]
- Coley PD, Kursar TA, Machado JL (1993) Colonization of tropical rain forest leaves by epiphylls: Effects of site and host plant leaf lifetime. *Ecology*, 74, 619–623.
- Colwell RK (2013) EstimateS: Statistical Estimation of Species Richness and Shared Species from Samples. Version 9.1.0. <http://viceroy.eeb.uconn.edu/estimates/>. (accessed on 2021-04-25)
- Dai Z, Tang X, Tu SW, Zhuang LJ, Zhu MJ, Zhao MS, Zhang ZC, Wang J (2019) *Cololejeunea tianmuensis*, a new epiphyllous species of *Cololejeunea* (Lejeuneaceae, Marchantiophyta) from Zhejiang, China. *Phytotaxa*, 402, 57–62.
- Du XM, Zheng G, Fang YW, Ji MC (2020) Description on epiphyllous liverworts from Hangzhou West Lake scenic area. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 46, 484–488. (in Chinese with English abstract) [杜晓孟, 郑钢, 方逸文, 季梦成 (2020) 杭州西湖风景名胜区内叶附生苔类植物记述. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 46, 484–488.]
- Gradstein SR (1997) The taxonomic diversity of epiphyllous bryophytes. *Abstracta Botanica*, 21(1), 15–19.
- Gradstein SR, Hietz P, Lücking R, Lücking A, Sipman H, Vester H, Wolf J, Gardette E (1996) How to sample the epiphytic diversity of tropical rain forests. *Ecotropica*, 2, 59–72.
- He WS, Chen W, Chen C (2018) Analysis of heteroskedasticity based on the same variation coefficient. *Statistics & Decision*, 34, 74–76. (in Chinese with English abstract) [何文胜, 陈武, 陈尘 (2018) 中位数计算公式及数学性质的新认识. *统计与决策*, 34, 74–76.]
- Jaccard P (1912) The distribution of the flora in the alpine zone. *New Phytologist*, 11, 37–50.
- Jiang YB, de Bie CAJM, Wang TJ, Skidmore AK, Liu XH, Song SS, Shao XM (2013) Hyper-temporal remote sensing helps in relating epiphyllous liverworts and evergreen forests. *Journal of Vegetation Science*, 24, 214–226.
- Jiang YB, Shao XM (2016) Diversity and distribution pattern of epiphyllous liverworts and its ecological determinants. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 523–532. (in Chinese with English abstract) [姜炎彬, 邵小明 (2016) 叶附生苔植物物种多样性分布格局及生态成因. *植物生态学报*, 40, 523–532.]
- Jiang YB, Wang TJ, de Bie CAJM, Skidmore AK, Liu XH, Song SS, Zhang L, Wang J, Shao XM (2014) Satellite-derived vegetation indices contribute significantly to the prediction of epiphyllous liverworts. *Ecological Indicators*, 38, 72–80.
- Kassambara A (2020) ‘ggplot2’ Based Publication Ready Plots. R Package Version 0.4.0. <https://CRAN.R-project.org/package=ggpubr/>. (accessed on 2020-06-27)
- Liu ZL (1986) A preliminary study of Hepaticae from Mt. Jiulongshan, Prov. Zhejiang, Eastern China. *Investigatio et Studium Naturae*, 5, 133–152. (in Chinese with English abstract) [刘仲苓 (1986) 浙江九龙山苔类植物的初步研究. *考察与研究*, 5, 133–152.]
- Monge-Nájera J, Blanco MA (1995) The influence of leaf characteristics on epiphyllous cover: A test of hypotheses with artificial leaves. *Bryophyte Diversity and Evolution*, 11, 147.
- Pócs T (1996) Epiphyllous liverwort diversity at worldwide level and its threat and conservation. *Anales-Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Seris Botanica*, 67, 109–127.
- Pócs T, Tóthmérész B (1997) Follicolous bryophyte diversity in tropical rainforests. *Abstracta Botanica*, 21, 135–144.

- R Core Team (2019) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <https://www.r-project.org/>. (accessed on 2020-09-01)
- Richards PW (1984) The ecology of tropical forest bryophytes. *New Manual of Bryology*, 2, 1233–1270.
- Söderström L, Hagborg A, von Konrat M, Bartholomew-Began S, Bell D, Briscoe L, Brown E, Cargill DC, Costa DP, Crandall-Stotler BJ, Cooper ED, Dauphin G, Engel JJ, Feldberg K, Glenny D, Gradstein SR, He XL, Heinrichs J, Hentschel J, Ilkiu-Borges AL, Katagiri T, Konstantinova NA, Larrain J, Long DG, Nebel M, Pócs T, Puche F, Reiner-Drehwald E, Renner MAM, Sass-Gyarmati A, Schäfer-Verwimp A, Segarra-Moragues JG, Stotler RE, Sukkharak P, Thiers BM, Uribe J, Vána J, Villarreal JC, Wigginton M, Zhang L, Zhu RL (2016) World checklist of hornworts and liverworts. *PhytoKeys*, 59, 1–828.
- Tang X, Gradstein SR, Sun LW, Zhu MJ, Shi RP, Wei QQ, Chen YQ, Zhou XX, Wang J (2018) A contribution to the knowledge of epiphyllous bryophytes in Tianmushan National Nature Reserve (Zhejiang, China), with remarks on climate warming and nature conservation. *Lindbergia*, 41, 01103.
- Wang LS, Jia Y, Zhang XC, Qin HN (2018) Species Catalogue of China (Vol.1): Plants, A Synoptic Checklist (I). Science Press, Beijing. (in Chinese) [王利松, 贾渝, 张宪春, 覃海宁 (2018) 中国生物物种名录(第一卷): 植物总名录(上卷). 科学出版社, 北京.]
- Xu H, Liu SR, Li YD, Zang RG, He FL (2012) Assessing non-parametric and area-based methods for estimating regional species richness. *Journal of Vegetation Science*, 23, 1006–1012.
- Yu Y, Heinrichs J, Zhu RL, Schneider H (2013) Empirical evidence supporting frequent cryptic speciation in epiphyllous liverworts: A case study of the *Cololejeunea lanciloba* complex. *PLoS ONE*, 8, e84124.
- Zhu RL (1990) The bryoflora of Wuyanling Nature Reserve in Zhejiang Province, China. *Acta Bryolichenologica Asiatica*, 2, 25–32.
- Zhu RL, Hu RL (1991) A study on the epiphyllous liverworts from Wuyanling of Zhejiang Province. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, (3), 98–103. (in Chinese with English abstract) [朱瑞良, 胡人亮 (1991) 浙江乌岩岭叶附生苔类植物的研究. 华东师范大学学报(自然科学版), (3), 98–103.]
- Zhu RL, Hu RL, Zhang GZ (1994a) Epiphyllous liverworts from Baishanzu Nature Reserve, Zhejiang Province, China. *Hikobia*, 11, 543–547.
- Zhu RL, Ye LX, Cai HZ (1994b) Epiphyllous liverworts of Fengyangshan Nature Reserve, Zhejiang Province, China. *The Bryologist*, 97, 277–279.
- Zhu RL, So ML (2001) Epiphyllous liverworts of China. *Nova Hedwigia Beiheft*, 121, 1–418.
- Zhu RL, So ML, Ye LX (1998) A synopsis of the hepatic flora of Zhejiang, China. *Journal of the Hattori Botanical Laboratory*, 84, 159–174.

(责任编辑: 朱瑞良 责任编辑: 黄祥忠)

## 附录 Supplementary Material

### 附录1 浙江乌岩岭国家级自然保护区叶附生苔类植物名录

Appendix 1 A checklist of epiphyllous liverworts of the Wuyanling National Nature Reserve, Zhejiang Province  
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021229-1.pdf>

### 附录2 浙江乌岩岭国家级自然保护区新增叶附生苔类植物的显微照片

Appendix 2 Photomicrographs of the added epiphyllous liverworts from the Wuyanling National Nature Reserve, Zhejiang Province  
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021229-2.pdf>

### 附录3 浙江省7个自然保护区内叶附生苔的物种数

Appendix 3 Species number of epiphyllous liverworts from seven nature reserves in Zhejiang Province  
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021229-3.pdf>

### 附录4 浙江乌岩岭国家级自然保护区叶附生苔在浙江其他6个保护区内的分布

Appendix 4 Distribution of epiphyllous liverworts of the Wuyanling National Nature Reserve in other six nature reserves in Zhejiang Province  
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021229-4.pdf>

### 附录5 浙江乌岩岭国家级自然保护区与浙江省其他6个保护区叶附生种的相似性系数

Appendix 5 Similarity coefficient of epiphyllous species between the Wuyanling National Nature Reserve and other six nature reserves in Zhejiang Province  
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021229-5.pdf>

### 附录6 浙江乌岩岭国家级自然保护区叶附生苔类附主植物名录

Appendix 6 Checklist of the host plants of epiphyllous liverworts in the Wuyanling National Nature Reserve, Zhejiang Province  
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021229-6.pdf>



附录1 浙江乌岩岭国家级自然保护区叶附生苔类植物名录

Appendix 1 A checklist of epiphyllous liverworts of the Wuyanling National Nature Reserve, Zhejiang Province

本研究新采集标本后附凭证标本备查, \*为在朱瑞良和胡人亮(1991)基础上新增种类, #为浙江新纪录。

Newly collected specimens in this research are attached with voucher specimens for check, \* represents the added species based on Zhu RL and Hu RL (1991), and # represents new records in Zhejiang province.

I. 耳叶苔科 Frullaniaceae

- (1) \*青山耳叶苔 *Frullania aoshimensis* Horik., 铁炉基至黄家岱, 27°39' N, 119°40' E, 575 m, 叶附生, 王健等 20200805-86-B; 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°40' E, 723 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-17-D; 27°42' N, 119°39' E, 958 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-34-F; 27°42' N, 119°39' E, 1,071 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-54-D; 27°42' N, 119°40' E, 733 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-25-B; 27°42' N, 119°40' E, 733 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-26-K。
- (2) 列胞耳叶苔 *Frullania moniliata* (Reinw., Blume et Nees) Mont., 黄桥保护站, 27°48' N, 119°48' E, 614 m, 叶附生, 王健等 20200804-60-A; 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°40' E, 807 m, 叶附生, 王健等 20200808-46-B; 27°42' N, 119°39' E, 958 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-33-F; 27°42' N, 119°40' E, 752 m, 叶附生, 王健等 20200809-07-B; 27°42' N, 119°40' E, 769 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-08-A; 27°42' N, 119°40' E, 716 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-28-D; 27°42' N, 119°40' E, 706 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-29-C。
- (3) \*#羊角耳叶苔喙尖变种 *Frullania monocera* var. *acutiloba* (Mitt.) Hentschel et von Konrat, 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°39' E, 799 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-26-D。
- (4) 盔瓣耳叶苔 *Frullania muscicola* Steph., 黄连山至溪斗村, 27°22' N, 119°45' E, 571 m, 叶附生, 王健等 20200806-25-E; 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°40' E, 807 m, 叶附生, 王健等 20200808-46-C; 27°42' N, 119°39' E, 967 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-40-D; 27°42' N, 119°39' E, 1071 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-54-E。

II. 细鳞苔科 Lejeuneaceae

- (5) \*粗茎唇鳞苔 *Cheilolejeunea trapezia* (Nees) Kachroo et R.M.Schust., 铁炉基至黄家岱, 27°39' N, 119°40' E, 575 m, 叶附生, 王健等 20200805-89-A; 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°40' E, 677 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-08-A; 王健等 20200809 1-09-A; 王健等 20200809 1-10-D; 王健等 20200809 1-12-A; 27°42' N, 119°40' E, 731 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-18-A; 27°42' N, 119°39' E, 799 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-26-A; 王健等 20200809 1-27-A; 27°42' N, 119°39' E, 986 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-43-A; 27°42' N, 119°40' E, 752 m, 叶附生, 王健等 20200809-07-D; 27°42' N, 119°40' E, 711 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-24-A; 27°42' N, 119°40' E, 733 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-26-A。
- (6) 卷边唇鳞苔 *Cheilolejeunea xanthocarpa* (Lehm. et Lindenb.) Malombe, 铁炉基至黄家岱, 27°39' N, 119°40' E, 575 m, 叶附生, 王健等 20200805-88-A; 王健等 20200805-89-B; 黄连山至溪斗村, 27°22' N, 119°45' E, 571 m, 叶附生, 王健等 20200806-29-A; 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°39' E, 940 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-31-A; 27°42' N, 119°39' E, 986 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-47-A。
- (7) \*薄叶疣鳞苔 *Cololejeunea appressa* (A.Evans) Benedix, 黄桥保护站, 27°48' N, 119°48' E, 614 m, 叶附生, 王健等 20200804-54-A; 铁炉基至黄家岱, 27°39' N, 119°40' E, 561 m, 叶附生, 王健等 20200805-48-C; 27°39' N, 119°40' E, 575 m, 叶附生, 王健等 20200805-89-C; 黄连山至溪斗村, 27°22' N, 119°45' E, 571 m, 叶附生, 王健等 20200806-07-A; 王健等 20200806-08-A; 王健等 20200806-28-A; 27°21' N, 119°44' E, 194 m, 叶附生, 王健等 20200806-47-A; 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°39' E, 799 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-26-B; 27°42' N, 119°39' E, 818 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-28-A; 27°42' N, 119°39' E, 958 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-33-A; 王健等 20200809 1-34-A; 27°42' N, 119°39' E, 964 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-38-A; 27°42' N, 119°39' E, 986 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-47-B; 27°42' N, 119°40' E, 691 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-02-A; 27°42' N, 119°40' E, 709 m, 叶附生, 王健等

- 20200810 2-06-A; 27°42' N, 119°40' E, 710 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-22-A; 27°42' N, 119°40' E, 716 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-28-A; 乌岩岭景区外水沟, 27°42' N, 119°40' E, 676 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-33-A; 27°42' N, 119°41' E, 640 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-39-A。
- (8) \*细齿疣鳞苔 *Cololejeunea denticulata* (Horik.) S.Hatt., 铁炉基至黄家岱, 27°39' N, 119°40' E, 575 m, 叶附生, 王健等 20200805-80-B; 王健等 20200805-85-I。
- (9) \*鼎湖疣鳞苔 *Cololejeunea dinghuiana* R.L.Zhu et Y.F.Wang, 黄连山至溪斗村, 27°21' N, 119°44' E, 194 m, 叶附生, 王健等 20200806-47-B。
- (10) \*粗疣鳞苔 *Cololejeunea grossepapillosa* (Horik.) N.Kitag., 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°40' E, 695 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-01-A; 27°42' N, 119°40' E, 691 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-04-A; 27°42' N, 119°40' E, 691 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-02-B。
- (11) 白边疣鳞苔 *Cololejeunea inflata* Steph., 黄桥保护站, 27°48' N, 119°48' E, 604 m, 叶附生, 王健等 20200804-49-A; 王健等 20200804-50-A; 王健等 20200804-51-A; 27°48' N, 119°48' E, 614 m, 叶附生, 王健等 20200804-57-A; 黄连山至溪斗村, 27°22' N, 119°45' E, 571 m, 叶附生, 王健等 20200806-08-B; 王健等 20200806-28-B; 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°40' E, 807 m, 叶附生, 王健等 20200808-04-A; 王健等 20200808-05-A; 王健等 20200808-43-A; 27°42' N, 119°40' E, 723 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-17-A; 27°42' N, 119°40' E, 742 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-21-A; 27°42' N, 119°40' E, 736 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-25-A; 27°42' N, 119°39' E, 818 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-28-B; 27°42' N, 119°39' E, 960 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-36-A; 27°42' N, 119°40' E, 695 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-01-B; 27°42' N, 119°40' E, 691 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-04-B; 27°42' N, 119°40' E, 715 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-05-A; 27°42' N, 119°40' E, 709 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-06-B; 27°42' N, 119°40' E, 751 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-13-A; 27°42' N, 119°40' E, 733 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-26-B; 乌岩岭景区外水沟, 27°42' N, 119°40' E, 676 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-33-B。
- (12) \*长叶疣鳞苔 *Cololejeunea longifolia* (Mitt.) Benedix ex Mizut., 黄桥保护站, 27°47' N, 119°48' E, 446 m, 叶附生, 王健等 20200804-05-A; 王健等 20200804-11-A; 27°48' N, 119°48' E, 604 m, 叶附生, 王健等 20200804-51-B; 27°48' N, 119°48' E, 614 m, 叶附生, 王健等 20200804-57-B; 铁炉基至黄家岱, 27°39' N, 119°40' E, 584 m, 叶附生, 王健等 20200805-55-A; 27°39' N, 119°40' E, 585 m, 叶附生, 王健等 20200805-69-A; 27°39' N, 119°40' E, 617 m, 叶附生, 王健等 20200805-79-A; 27°39' N, 119°40' E, 575 m, 叶附生, 王健等 20200805-85-A; 王健等 20200805-89-D; 黄连山至溪斗村, 27°22' N, 119°45' E, 571 m, 叶附生, 王健等 20200806-07-B; 王健等 20200806-08-C; 王健等 20200806-12-A; 王健等 20200806-25-A; 27°22' N, 119°45' E, 545 m, 叶附生, 王健等 20200806-33; 王健等 20200806-34-B; 王健等 20200806-36; 王健等 20200806-37-A; 27°22' N, 119°45' E, 481 m, 叶附生, 王健等 20200806-38-A; 27°22' N, 119°44' E, 468 m, 叶附生, 王健等 20200806-40-B; 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°39' E, 914 m, 叶附生, 王健等 20200808-108-A; 27°42' N, 119°39' E, 954 m, 叶附生, 王健等 20200808-131-A; 27°42' N, 119°40' E, 677 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-03-A; 王健等 20200809 1-05-A; 27°42' N, 119°40' E, 723 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-17-B; 27°42' N, 119°40' E, 737 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-24-C; 27°42' N, 119°39' E, 958 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-32-A; 王健等 20200809 1-33-B; 27°42' N, 119°39' E, 967 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-40-A; 27°42' N, 119°39' E, 998 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-51-A; 27°42' N, 119°39' E, 1005 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-52-A; 27°42' N, 119°39' E, 1071 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-53-A; 27°42' N, 119°40' E, 695 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-01-C; 27°42' N, 119°40' E, 691 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-02-C; 王健等 20200810 2-04-C; 27°42' N, 119°40' E, 760 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-10-A; 27°42' N, 119°40' E, 751 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-13-B; 27°42' N, 119°40' E, 733 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-26-C; 27°42' N, 119°40' E, 723 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-27-A; 乌岩岭景区外水沟, 27°42' N, 119°40' E, 676 m, 叶附生, 王健等

- 20200810 2-33-C; 27°42' N, 119°41' E, 640 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-39-B; 27°42' N, 119°41' E, 638 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-44-A; 27°42' N, 119°41' E, 646 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-45-A。
- (13) 距齿疣鳞苔 *Cololejeunea macounii* (Spruce) A.Evans, 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°40' E, 807 m, 叶附生, 王健等 20200808-43-B; 27°42' N, 119°39' E, 859m, 叶附生, 王健等 20200808-97-A; 27°42' N, 119°40' E, 716 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-28-B。
- (14) 列胞疣鳞苔 *Cololejeunea ocellata* (Horik.) Benedix, 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°39' E, 954 m, 叶附生, 王健等 20200808-119-A; 27°42' N, 119°39' E, 1213 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-56-A; 27°42' N, 119°40' E, 733 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-26-D; 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°39' E, 962 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-37-A; 27°42' N, 119°39' E, 958 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-34-B; 27°42' N, 119°39' E, 960 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-36-C; 27°42' N, 119°39' E, 962 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-37-C。
- (15) \*疣萼疣鳞苔 *Cololejeunea peraffinis* (Schiffn.) Schiffn., 黄桥保护站, 27°47' N, 119°48' E, 446 m, 叶附生, 王健等 20200804-05-B; 27°48' N, 119°48' E, 604 m, 叶附生, 王健等 20200804-50-B; 铁炉基至黄家岱, 27°39' N, 119°40' E, 584 m, 叶附生, 王健等 20200805-33-B; 27°39' N, 119°40' E, 561 m, 叶附生, 王健等 20200805-47-A; 27°39' N, 119°40' E, 585 m, 叶附生, 王健等 20200805-59-A; 27°39' N, 119°40' E, 617 m, 叶附生, 王健等 20200805-78-A; 27°39' N, 119°40' E, 575 m, 叶附生, 王健等 20200805-85-B; 王健等 20200805-87-B; 王健等 20200805-89-E; 27°42' N, 119°39' E, 954 m, 叶附生, 王健等 20200808-128-A; 27°42' N, 119°40' E, 742 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-21-B; 27°42' N, 119°40' E, 736 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-25-B; 27°42' N, 119°39' E, 960 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-36-B; 27°42' N, 119°39' E, 987 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-45-A; 27°42' N, 119°39' E, 988 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-46-A; 27°42' N, 119°39' E, 984 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-48-A; 27°42' N, 119°39' E, 988 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-50-A; 27°42' N, 119°39' E, 998 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-51-B; 27°42' N, 119°39' E, 1005 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-52-B; 27°42' N, 119°39' E, 1210 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-55-A; 27°42' N, 119°39' E, 1213 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-56-B; 27°42' N, 119°40' E, 695 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-01-D; 27°42' N, 119°40' E, 691 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-02-D; 王健等 20200810 2-04-D; 27°42' N, 119°40' E, 733 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-26-E。
- (16) 粗齿疣鳞苔 *Cololejeunea planissima* (Mitt.) Abeyw., 铁炉基至黄家岱, 27°39' N, 119°40' E, 584 m, 叶附生, 王健等 20200805-33-C; 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°40' E, 695 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-01-E; 27°42' N, 119°40' E, 733 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-26-F; 黄连山至溪斗村, 27°22' N, 119°45' E, 571 m, 叶附生, 王健等 20200806-34-A; 27°22' N, 119°44' E, 468 m, 叶附生, 王健等 20200806-40-A。
- (17) 拟棉毛疣鳞苔 *Cololejeunea pseudofloccosa* (Horik.) Benedix, 铁炉基至黄家岱, 27°39' N, 119°40' E, 575 m, 叶附生, 王健等 20200805-85-C; 王健等 20200805-89-F; 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°39' E, 859 m, 叶附生, 王健等 20200808-101; 27°42' N, 119°39' E, 940 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-31-B; 27°42' N, 119°39' E, 962 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-37-B; 27°42' N, 119°39' E, 964 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-38-B; 27°42' N, 119°39' E, 986 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-43-B; 27°42' N, 119°39' E, 1005 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-52-C; 27°42' N, 119°40' E, 701 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-32-A。
- (18) \*拟疣鳞苔 *Cololejeunea raduliloba* Steph., 黄连山至溪斗村, 27°22' N, 119°45' E, 545 m, 叶附生, 王健等 20200806-37-B。
- (19) \*锯齿疣鳞苔 *Cololejeunea serrulata* Steph., 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°39' E, 818 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-28-C。
- (20) \*刺疣鳞苔 *Cololejeunea spinosa* (Horik.) Pandé et R.N.Misra, 黄桥保护站, 27°48' N, 119°48' E, 604 m,

叶附生, 王健等 20200804-50-C; 王健等 20200804-51-A; 铁炉基至黄家岱, 27°39' N, 119°40' E, 617 m, 叶附生, 王健等 20200805-74-A; 黄连山至溪斗村, 27°22' N, 119°45' E, 571 m, 叶附生, 王健等 20200806-08-D; 王健等 20200806-25-B; 叶附生, 王健等 20200806-28-C; 27°22' N, 119°44' E, 468 m, 叶附生, 王健等 20200806-40-C; 27°21' N, 119°44' E, 194 m, 叶附生, 王健等 20200806-42-A; 王健等 20200806-47-C; 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°40' E, 807 m, 叶附生, 王健等 20200808-43-C; 27°42' N, 119°39' E, 908 m, 叶附生, 王健等 20200808-63; 27°42' N, 119°40' E, 737 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-24-D; 27°42' N, 119°40' E, 751 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-13-C; 27°42' N, 119°40' E, 731 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-19-A; 乌岩岭景区内外水沟, 27°42' N, 119°40' E, 677 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-36-A。

- (21)\***短肋疣鳞苔** *Cololejeunea subfloccosa* Mizut., 铁炉基至黄家岱, 27°39' N, 119°40' E, 585 m, 叶附生, 王健等 20200805-59-B; 黄连山至溪斗村, 27°22' N, 119°45' E, 571 m, 叶附生, 王健等 20200806-25-C; 王健等 20200806-28-D; 27°21' N, 119°44' E, 194 m, 叶附生, 王健等 20200806-42-B。
- (22)\***疣瓣疣鳞苔** *Cololejeunea subkodamae* Mizut., 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°39' E, 859 m, 叶附生, 王健等 20200808-97-B。
- (23)\***南亚疣鳞苔** *Cololejeunea tenella* Benedix, 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°39' E, 957 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-35-A; 乌岩岭景区外水沟, 27°42' N, 119°41' E, 638 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-43-A。
- (24)**单体疣鳞苔** *Cololejeunea trichomanis* (Gottsche) Besch., 黄桥保护站, 27°47' N, 119°48' E, 446 m, 叶附生, 王健等 20200804-11-B。
- (25)\***佛氏疣鳞苔** *Cololejeunea verdoornii* (S.Hatt.) S.Hatt., 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°40' E, 807 m, 叶附生, 王健等 20200808-04-B; 王健等 20200808-46-A; 27°42' N, 119°39' E, 954 m, 叶附生, 王健等 20200808-119-B; 27°42' N, 119°39' E, 837 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-29-A; 27°42' N, 119°39' E, 958 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-33-C; 王健等 20200809 1-34-C; 27°42' N, 119°39' E, 960 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-36-D; 27°42' N, 119°39' E, 962 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-37-D; 27°42' N, 119°39' E, 964 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-38-C; 27°42' N, 119°39' E, 998 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-51-C; 27°42' N, 119°40' E, 715 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-05-B; 27°42' N, 119°40' E, 733 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-26-G; 27°42' N, 119°40' E, 706 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-29-A。
- (26)\***细角管叶苔** *Colura tenuicornis* (A.Evans) Steph., 黄桥保护站, 27°47' N, 119°48' E, 446 m, 叶附生, 王健等 20200804-10-A; 27°48' N, 119°48' E, 604 m, 叶附生, 王健等 20200804-50-D; 王健等 20200804-51-B; 27°48' N, 119°48' E, 614 m, 叶附生, 王健等 20200804-52-A; 王健等 20200804-53-A; 王健等 20200804-54-B; 铁炉基至黄家岱, 27°39' N, 119°40' E, 617 m, 叶附生, 王健等 20200805-78-B; 27°39' N, 119°40' E, 575 m, 叶附生, 王健等 20200805-85-D; 王健等 20200805-89-G; 27°22' N, 119°45' E, 571 m, 叶附生, 王健等 20200806-09-A; 王健等 20200806-25-D; 王健等 20200806-29-B; 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°40' E, 807 m, 叶附生, 王健等 20200808-04-C; 王健等 20200808-05-B; 27°42' N, 119°40' E, 677 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-01-A; 王健等 20200809 1-05-B; 27°42' N, 119°40' E, 723 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-17-C; 27°42' N, 119°40' E, 742 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-21-C; 27°42' N, 119°40' E, 742 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-23-A; 27°42' N, 119°40' E, 737 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-24-A; 27°42' N, 119°39' E, 958 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-32-B; 27°42' N, 119°39' E, 957 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-35-B; 27°42' N, 119°39' E, 960 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-36-E; 27°42' N, 119°39' E, 964 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-38-D; 27°42' N, 119°39' E, 967 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-40-B; 27°42' N, 119°39' E, 988 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-46-B; 27°42' N, 119°39' E, 998 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-51-D; 27°42' N, 119°39' E, 1005 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-52-D; 27°42' N, 119°39' E, 1071 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-53-B; 王健等 20200809 1-54-A; 27°42' N, 119°40' E, 691 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-02-E; 27°42' N, 119°40' E, 770 m, 叶附生, 王健等



20200810 2-07-A; 27°42' N, 119°40' E, 751 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-13-D; 27°42' N, 119°40' E, 708 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-31-A; 乌岩岭景区外水沟, 27°42' N, 119°40' E, 683 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-34-A; 27°42' N, 119°40' E, 679 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-35-A; 27°42' N, 119°41' E, 641 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-38-A; 27°42' N, 119°41' E, 639 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-40-A; 27°42' N, 119°41' E, 638 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-41-A; 王健等 20200810 2-42-A; 王健等 20200810 2-43-B; 王健等 20200810 2-44-B; 27°42' N, 119°41' E, 646 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-45-B。

(27)\***线角鳞苔** *Drepanolejeunea angustifolia* (Mitt.) Grolle, 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°40' E, 751 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-14-B; 27°42' N, 119°40' E, 733 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-26-J。

(28)\***东亚角鳞苔** *Drepanolejeunea commutata* Grolle et R.L.Zhu, 铁炉基至黄家岱, 27°39' N, 119°40' E, 617 m, 叶附生, 王健等 20200805-74-B; 27°39' N, 119°40' E, 575 m, 叶附生, 王健等 20200805-85-E; 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°40' E, 807 m, 叶附生, 王健等 20200808-04-D; 27°42' N, 119°39' E, 914 m, 叶附生, 王健等 20200808-108-B; 27°42' N, 119°39' E, 954 m, 叶附生, 王健等 20200808-119-C; 王健等 20200808-128-B; 王健等 20200808-133-A; 27°42' N, 119°40' E, 677 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-07; 王健等 20200809 1-08-B; 王健等 20200809 1-09-B; 王健等 20200809 1-11-A; 王健等 20200809 1-12-B; 27°42' N, 119°40' E, 720 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-13-A; 27°42' N, 119°40' E, 722 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-14-A; 27°42' N, 119°40' E, 719 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-15-A; 27°42' N, 119°40' E, 734 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-19-B; 27°42' N, 119°40' E, 737 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-24-E; 27°42' N, 119°39' E, 799 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-27-B; 27°42' N, 119°39' E, 818 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-28-D; 27°42' N, 119°39' E, 895 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-30-A; 27°42' N, 119°39' E, 940 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-31-C; 27°42' N, 119°39' E, 958 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-32-C; 王健等 20200809 1-33-D; 王健等 20200809 1-34-D; 27°42' N, 119°39' E, 960 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-36-F; 27°42' N, 119°39' E, 962 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-37-E; 27°42' N, 119°39' E, 964 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-38-E; 王健等 20200809 1-39-A; 27°42' N, 119°39' E, 967 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-40-C; 27°42' N, 119°39' E, 971 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-41-A; 27°42' N, 119°39' E, 975 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-42; 27°42' N, 119°39' E, 986 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-43-C; 王健等 20200809 1-44; 27°42' N, 119°39' E, 987 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-45-B; 27°42' N, 119°39' E, 1005 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-52-E; 27°42' N, 119°39' E, 1071 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-53-C; 王健等 20200809 1-54-B; 27°42' N, 119°40' E, 751 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-13-E; 27°42' N, 119°40' E, 728 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-16-A; 27°42' N, 119°40' E, 731 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-18-A; 27°42' N, 119°40' E, 733 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-26-H; 27°42' N, 119°40' E, 723 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-27-B; 27°42' N, 119°40' E, 708 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-31-B。

(29)**日本角鳞苔** *Drepanolejeunea erecta* (Steph.) Mizut., 黄桥保护站, 27°48' N, 119°48' E, 614 m, 叶附生, 王健等 20200804-52-B; 铁炉基至黄家岱, 27°39' N, 119°40' E, 584 m, 叶附生, 王健等 20200805-33-D; 27°39' N, 119°40' E, 575 m, 叶附生, 王健等 20200805-85-F; 王健等 20200805-86-A; 王健等 20200805-87-C; 王健等 20200805-89-H; 27°42' N, 119°40' E, 807 m, 叶附生, 王健等 20200808-04-E; 王健等 20200808-05-C; 王健等 20200808-38-A; 27°42' N, 119°39' E, 859m, 叶附生, 王健等 20200808-87-A; 27°42' N, 119°39' E, 954 m, 叶附生, 王健等 20200808-119-D; 27°42' N, 119°40' E, 720 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-13-B; 27°42' N, 119°40' E, 731 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-18-B; 27°42' N, 119°40' E, 740 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-20-B; 27°42' N, 119°40' E, 742 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-21-D; 27°42' N, 119°40' E, 742 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-23-B; 27°42' N, 119°40' E, 737 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-24-F; 27°42' N, 119°40' E, 736 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-25-C; 乌岩岭景区内,

27°42' N, 119°39' E, 799 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-26-C; 27°42' N, 119°39' E, 895 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-30-B; 27°42' N, 119°39' E, 940 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-31-D; 27°42' N, 119°39' E, 958 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-32-D; 王健等 20200809 1-33-E; 王健等 20200809 1-34-E; 27°42' N, 119°39' E, 957 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-35-C; 27°42' N, 119°39' E, 960 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-36-G; 27°42' N, 119°39' E, 962 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-37-F; 27°42' N, 119°39' E, 971 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-41-B; 27°42' N, 119°39' E, 986 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-47-C; 27°42' N, 119°39' E, 988 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-50-B; 27°42' N, 119°39' E, 1005 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-52-F; 27°42' N, 119°39' E, 1071 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-54-C; 27°42' N, 119°40' E, 770 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-07-B; 27°42' N, 119°40' E, 765 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-09-A; 27°42' N, 119°40' E, 760 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-10-B; 27°42' N, 119°40' E, 756 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-11-A; 27°42' N, 119°40' E, 750 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-12-A; 27°42' N, 119°40' E, 751 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-13-F; 27°42' N, 119°40' E, 751 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-14-A; 27°42' N, 119°40' E, 711 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-24-B; 27°42' N, 119°40' E, 733 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-25-A; 27°42' N, 119°40' E, 733 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-26-I; 27°42' N, 119°40' E, 723 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-27-C; 27°42' N, 119°40' E, 716 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-28-C; 27°42' N, 119°40' E, 706 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-29-B; 27°42' N, 119°40' E, 708 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-31-C。

(30) 叶生角鳞苔 *Drepanolejeunea foliicola* Horik. (朱瑞良和胡人亮, 1991 as *Rhaphidolejeunea foliicola*)。

(31) \*云南角鳞苔 *Drepanolejeunea yunnanensis* (P.C.Chen) Grolle et R.L.Zhu, 铁炉基至黄家岱, 27°39' N, 119°40' E, 584 m, 叶附生, 王健等 20200805-33-E; 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°40' E, 677 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-10-E; 27°42' N, 119°39' E, 957 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-35-D; 27°42' N, 119°39' E, 960 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-36-H。

(32) \*异叶细鳞苔 *Lejeunea anisophylla* Mont., 黄连山至溪斗村, 27°22' N, 119°45' E, 571 m, 叶附生, 王健等 20200806-09-B。

(33) \*芽叶细鳞苔 *Lejeunea cocoes* Mitt., 铁炉基至黄家岱, 27°39' N, 119°40' E, 575 m, 叶附生, 王健等 20200805-85-G; 王健等 20200805-86-C; 王健等 20200805-87-A; 王健等 20200805-88-B; 王健等 20200805-89-I; 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°39' E, 986 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-43-D; 27°42' N, 119°39' E, 988 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-50-C; 27°42' N, 119°39' E, 1071 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-54-F; 27°42' N, 119°39' E, 1213 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-56-C; 27°42' N, 119°40' E, 733 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-26-L。

(34) 黄色细鳞苔 *Lejeunea flava* (Sw.) Nees, 黄桥保护站, 27°47' N, 119°48' E, 446 m, 叶附生, 王健等 20200804-11-C; 27°48' N, 119°48' E, 614 m, 叶附生, 王健等 20200804-53-B; 铁炉基至黄家岱, 27°39' N, 119°40' E, 561 m, 叶附生, 王健等 20200805-48-D; 27°39' N, 119°40' E, 575 m, 叶附生, 王健等 20200805-86-D; 王健等 20200805-88-C; 王健等 20200805-89-J; 黄连山至溪斗村, 27°22' N, 119°45' E, 571 m, 叶附生, 王健等 20200806-27-A; 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°40' E, 677 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-01-B; 27°42' N, 119°40' E, 719 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-15-B; 27°42' N, 119°40' E, 723 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-17-E; 27°42' N, 119°39' E, 799 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-26-E; 27°42' N, 119°39' E, 958 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-34-G; 27°42' N, 119°39' E, 962 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-37-G; 27°42' N, 119°39' E, 964 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-39-B; 27°42' N, 119°39' E, 986 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-43-E; 27°42' N, 119°39' E, 987 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-45-C; 27°42' N, 119°39' E, 986 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-47-D; 27°42' N, 119°39' E, 1071 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-54-G; 27°42' N, 119°40' E, 769 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-08-B; 27°42' N, 119°40' E, 751 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-13-G; 27°42' N, 119°40' E, 751 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-

14-C; 27°42' N, 119°40' E, 710 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-22-B; 27°42' N, 119°40' E, 711 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-23-A; 27°42' N, 119°40' E, 733 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-26-M; 27°42' N, 119°40' E, 706 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-29-D。

(35)\*白绿细鳞苔 *Lejeunea pallide-virens* S.Hatt., 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°40' E, 723 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-17-F。

(36)小叶细鳞苔 *Lejeunea parva* (S.Hatt.) Mizut. (朱瑞良和胡人亮, 1991 as *Lejeunea rotundistipula*)。

(37)尖叶薄鳞苔 *Leptolejeunea subacuta* Steph. ex A.Evans, 黄桥保护站, 27°47' N, 119°48' E, 446 m, 叶附生, 王健等 20200804-05-C; 王健等 20200804-10-B; 王健等 20200804-11-D; 27°48' N, 119°48' E, 604 m, 叶附生, 王健等 20200804-49-B; 王健等 20200804-50-E; 王健等 20200804-51-D; 27°48' N, 119°48' E, 614 m, 叶附生, 王健等 20200804-52-C; 王健等 20200804-53-C; 王健等 20200804-54-D; 王健等 20200804-57-C; 叶附生, 王健等 20200804-60-B; 铁炉基至黄家岱, 27°39' N, 119°40' E, 584 m, 叶附生, 王健等 20200805-27; 王健等 20200805-33-G; 27°39' N, 119°40' E, 561 m, 叶附生, 王健等 20200805-47-B; 王健等 20200805-48-E; 王健等 20200805-55; 27°39' N, 119°40' E, 585 m, 叶附生, 王健等 20200805-59-C; 王健等 20200805-69-B; 27°39' N, 119°40' E, 617 m, 叶附生, 王健等 20200805-74-C; 王健等 20200805-78-C; 王健等 20200805-79-B; 27°39' N, 119°40' E, 575 m, 叶附生, 王健等 20200805-85-H; 王健等 20200805-86-E; 王健等 20200805-89-K; 黄连山至溪斗村, 27°22' N, 119°45' E, 571 m, 叶附生, 王健等 20200806-07-C; 王健等 20200806-08-E; 王健等 20200806-09-C; 王健等 20200806-12-B; 王健等 20200806-18; 王健等 20200806-25-F; 王健等 20200806-27-B; 王健等 20200806-28-E; 王健等 20200806-29-D; 27°22' N, 119°45' E, 481 m, 叶附生, 王健等 20200806-38-B; 27°22' N, 119°44' E, 468 m, 叶附生, 王健等 20200806-40-D; 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°40' E, 807 m, 叶附生, 王健等 20200808-04-F; 27°42' N, 119°40' E, 807 m, 叶附生, 王健等 20200808-05-D; 王健等 20200808-38-B; 27°42' N, 119°39' E, 859m, 叶附生, 王健等 20200808-87-B; 27°42' N, 119°39' E, 954 m, 叶附生, 王健等 20200808-119-E; 王健等 20200808-128-D; 王健等 20200808-133-B; 27°42' N, 119°40' E, 684 m, 叶附生, 王健等 20200809-03; 27°42' N, 119°40' E, 677 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-01-C; 王健等 20200809 1-02; 王健等 20200809 1-03-B; 王健等 20200809 1-04; 王健等 20200809 1-05-C; 王健等 20200809 1-06; 王健等 20200809 1-09-C; 王健等 20200809 1-11-B; 27°42' N, 119°40' E, 720 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-13-C; 27°42' N, 119°40' E, 719 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-15-C; 27°42' N, 119°40' E, 720 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-16; 27°42' N, 119°40' E, 723 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-17-G; 27°42' N, 119°40' E, 731 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-18-C; 27°42' N, 119°40' E, 734 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-19-A; 27°42' N, 119°40' E, 740 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-20-A; 27°42' N, 119°40' E, 742 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-21-E; 27°42' N, 119°40' E, 738 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-22; 27°42' N, 119°40' E, 742 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-23-C; 27°42' N, 119°40' E, 737 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-24-B; 27°42' N, 119°40' E, 736 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-25-D; 27°42' N, 119°39' E, 837 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-29-B; 27°42' N, 119°39' E, 940 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-31-F; 27°42' N, 119°39' E, 958 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-32-E; 27°42' N, 119°39' E, 958 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-33-G; 王健等 20200809 1-34-H; 27°42' N, 119°39' E, 957 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-35-E; 27°42' N, 119°39' E, 960 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-36-I; 27°42' N, 119°39' E, 962 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-37-H; 27°42' N, 119°39' E, 964 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-38-F; 王健等 20200809 1-39-C; 27°42' N, 119°39' E, 967 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-40-F; 27°42' N, 119°39' E, 971 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-41-C; 27°42' N, 119°39' E, 987 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-45-E; 27°42' N, 119°39' E, 988 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-46-C; 27°42' N, 119°39' E, 984 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-48-B; 27°42' N, 119°39' E, 985 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-49; 27°42' N, 119°39' E, 988 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-50-E; 27°42' N, 119°39' E, 998 m, 叶附生,

王健等 20200809 1-51-E; 27°42' N, 119°39' E, 1005 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-52-H; 27°42' N, 119°39' E, 1071 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-54-H; 27°42' N, 119°39' E, 1210 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-55-B; 27°42' N, 119°39' E, 1213 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-56-D; 27°42' N, 119°40' E, 695 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-01-G; 27°42' N, 119°40' E, 691 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-02-F; 27°42' N, 119°40' E, 691 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-03; 王健等 20200810 2-04-E; 27°42' N, 119°40' E, 715 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-05-C; 27°42' N, 119°40' E, 709 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-06-C; 27°42' N, 119°40' E, 770 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-07-C; 27°42' N, 119°40' E, 765 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-09-B; 27°42' N, 119°40' E, 760 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-10-C; 27°42' N, 119°40' E, 756 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-11-C; 27°42' N, 119°40' E, 750 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-12-B; 27°42' N, 119°40' E, 751 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-13-H; 27°42' N, 119°40' E, 751 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-14-D; 27°42' N, 119°40' E, 728 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-16-B; 27°42' N, 119°40' E, 731 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-18-B; 27°42' N, 119°40' E, 731 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-19-B; 27°42' N, 119°40' E, 710 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-22-C; 27°42' N, 119°40' E, 711 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-23-B; 27°42' N, 119°40' E, 711 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-24-C; 27°42' N, 119°40' E, 733 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-25-C; 27°42' N, 119°40' E, 733 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-26-O; 27°42' N, 119°40' E, 723 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-27-D; 27°42' N, 119°40' E, 716 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-28-E; 27°42' N, 119°40' E, 706 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-29-E; 27°42' N, 119°40' E, 708 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-31-D; 27°42' N, 119°40' E, 701, 叶附生, 王健等 20200810 2-32-B; 乌岩岭景区外水沟, 27°42' N, 119°40' E, 676 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-33-D; 27°42' N, 119°40' E, 683 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-34-B; 27°42' N, 119°40' E, 679 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-35-B; 27°42' N, 119°40' E, 677 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-36-B; 27°42' N, 119°41' E, 635 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-37; 27°42' N, 119°41' E, 641 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-38-B; 27°42' N, 119°41' E, 640 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-39-C; 27°42' N, 119°41' E, 639 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-40-B; 27°42' N, 119°41' E, 638 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-41-B; 王健等 20200810 2-42-B; 王健等 20200810 2-43-C; 王健等 20200810 2-44-C; 27°42' N, 119°41' E, 646 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-45-C。

- (38)\*黑色冠鳞苔 *Lopholejeunea nigricans* (Lindenb.) Schiffn., 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°40' E, 723 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-27-E。
- (39)\*褐冠鳞苔 *Lopholejeunea subfusca* (Nees) Schiffn., 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°40' E, 751 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-14-E; 27°42' N, 119°40' E, 731 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-20-A。
- (40)斑叶纤鳞苔 *Microlejeunea punctiformis* (Taylor) Steph., 黄连山至溪斗村, 27°22' N, 119°44' E, 468 m, 叶附生, 王健等 20200806-40-D; 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°40' E, 807 m, 叶附生, 王健等 20200808-05-E; 27°42' N, 119°40' E, 677 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-01-D; 27°42' N, 119°39' E, 799 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-26-G; 27°42' N, 119°39' E, 962 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-37-I; 27°42' N, 119°39' E, 986 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-47-E; 27°42' N, 119°40' E, 769 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-08-C。
- (41)\*东亚多褶苔 *Spruceanthus kiushianus* (Horik.) X.Q.Shi, R.L.Zhu et Gradst, 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°40' E, 723 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-27-F。
- (42)\*多褶苔 *Spruceanthus semirepandus* (Nees) Verd., 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°40' E, 751 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-14-H。
- (43)鞍叶苔 *Tuyamaella molischii* (Schiffn.) S.Hatt., 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°40' E, 807 m, 叶附生, 王健等 20200808-04-G; 27°42' N, 119°39' E, 1071 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-54-K; 27°42' N, 119°40' E, 733 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-26-R; 乌岩岭景区内水沟, 27°42' N, 119°40' E, 677 m, 叶附生,

王健等 20200810 2-36-C。

### III. 叉苔科 Metzgeriaceae

(44) 平叉苔 *Metzgeria conjugata* Lindb. (朱瑞良和胡人亮, 1991)。

(45) \*叉苔 *Metzgeria furcata* (L.) Corda, 铁炉基至黄家岱, 27°39' N, 119°40' E, 585 m, 叶附生, 王健等 20200805-59-D; 27°39' N, 119°40' E, 575 m, 叶附生, 王健等 20200805-89-L; 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°39' E, 799 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-26-F; 27°42' N, 119°39' E, 1071 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-54-I; 27°42' N, 119°40' E, 751 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-14-F; 27°42' N, 119°40' E, 733 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-26-P。

### IV. 羽苔科 Plagiochilaceae

(46) \*多齿羽苔 *Plagiochila sciophila* Nees, 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°40' E, 807 m, 叶附生, 王健等 20200808-46-D; 27°42' N, 119°39' E, 799 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-26-H。

### V. 扁萼苔科 Radulaceae

(47) \*尖舌扁萼苔 *Radula acuminata* Steph., 黄桥保护站, 27°48' N, 119°48' E, 614 m, 叶附生, 王健等 20200804-52-D; 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°40' E, 731 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-18-D; 27°42' N, 119°40' E, 734 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-19-C; 27°42' N, 119°40' E, 740 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-20-C; 27°42' N, 119°40' E, 742 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-21-F; 27°42' N, 119°40' E, 737 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-24-G; 27°42' N, 119°40' E, 752 m, 叶附生, 王健等 20200809-07-C; 27°42' N, 119°40' E, 728 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-16-C; 27°42' N, 119°40' E, 730 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-17; 27°42' N, 119°40' E, 731 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-18-C; 王健等 20200810 2-19-C; 27°42' N, 119°40' E, 734 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-21。

(48) \*大瓣扁萼苔 *Radula cavifolia* Hampe ex Gottsche, Lindenb. et Nees, 铁炉基至黄家岱, 27°39' N, 119°40' E, 575 m, 叶附生, 王健等 20200805-89-M; 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°39' E, 799 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-26-I; 27°42' N, 119°39' E, 988 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-50-F; 27°42' N, 119°39' E, 1071 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-54-J; 27°42' N, 119°40' E, 731 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-18-C; 27°42' N, 119°40' E, 751 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-14-G。

(49) \*#异胞扁萼苔 *Radula gedena* Gottsche, 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°40' E, 807 m, 叶附生, 王健等 20200808-05-F; 27°42' N, 119°40' E, 731 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-18-E; 27°42' N, 119°40' E, 740 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-20-D。

(50) \*爪哇扁萼苔 *Radula javanica* Gottsche, 铁炉基至黄家岱, 27°39' N, 119°40' E, 617 m, 叶附生, 王健等 20200805-74-D; 27°39' N, 119°40' E, 575 m, 叶附生, 王健等 20200805-87-D; 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°40' E, 740 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-20-E; 27°42' N, 119°39' E, 799 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-26-J; 27°42' N, 119°40' E, 752 m, 叶附生, 王健等 20200809-07-D。

(51) \*尖叶扁萼苔 *Radula kojana* Steph., 铁炉基至黄家岱, 27°39' N, 119°40' E, 617 m, 叶附生, 王健等 20200805-74-E; 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°40' E, 731 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-18-F。

(52) \*拟尖舌扁萼苔 *Radula subacuminata* L.N.Zhang et R.L.Zhu, 铁炉基至黄家岱, 27°39' N, 119°40' E, 575 m, 叶附生, 王健等 20200805-80-D; 黄连山至溪斗村, 27°22' N, 119°45' E, 571 m, 叶附生, 王健等 20200806-25-G; 乌岩岭景区内, 27°42' N, 119°40' E, 720 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-13-D; 27°42' N, 119°40' E, 722 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-14-B; 27°42' N, 119°40' E, 734 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-19-D; 27°42' N, 119°40' E, 742 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-21-G; 27°42' N, 119°39' E, 799 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-26-K; 27°42' N, 119°39' E, 799 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-27-C; 27°42' N, 119°39' E, 818 m, 叶附生, 王健等 20200809 1-28-E; 27°42' N, 119°40' E, 731 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-20-B; 27°42' N, 119°40' E, 733 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-26-Q; 27°42' N, 119°40' E, 706 m, 叶附生, 王健等 20200810 2-30。



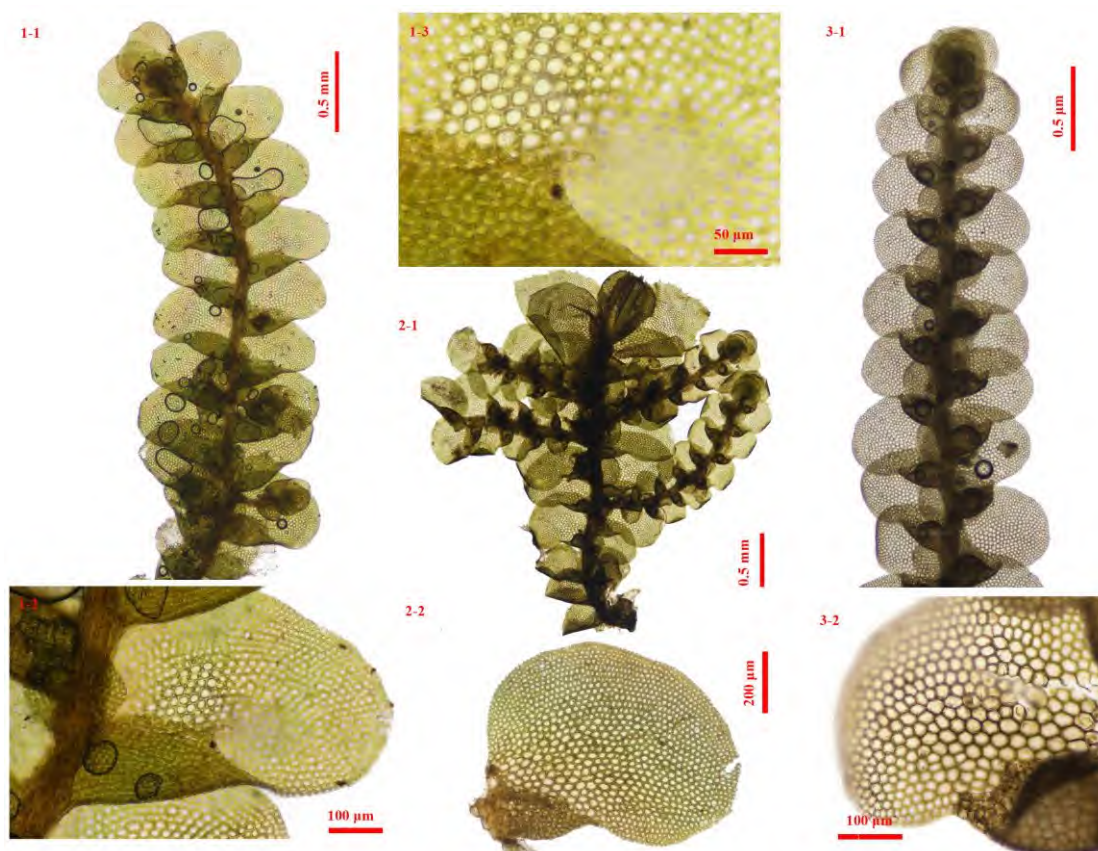
戴尊, 陈星, 张建行, 朱毛洁, 宋坤, 邢诗晨, 涂淑雯, 邹璐, 雷祖培, 李宏庆, 王健 (2022) 浙江乌岩岭国家级自然保护区叶附生苔类及附主植物多样性. 生物多样性, 30, 21229. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2021229>

#### 参考文献

Zhu RL, Hu RL (1991) A study on the epiphyllous liverworts from Wuyanling of Zhejiang. *Journal of East China Normal University (Natural Sciences)*, (3), 98-105. (in Chinese) [朱瑞良, 胡人亮 (1991) 浙江乌岩岭叶附生苔类植物的研究. 华东师范大学学报(自然科学版), (3), 98-105.]

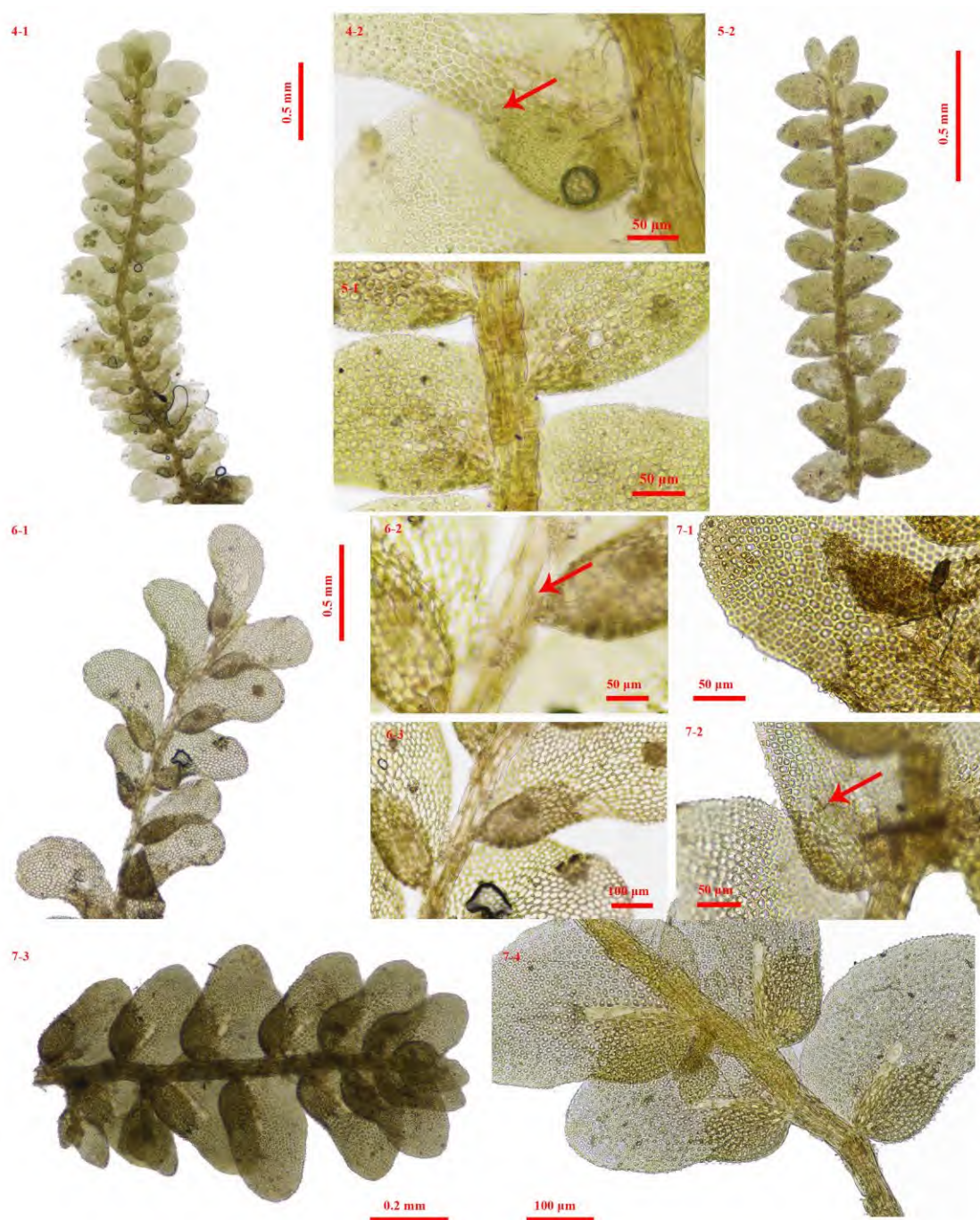
附录2 浙江乌岩岭国家级自然保护区新增叶附生苔类植物的显微照片

Appendix 2 Photomicrographs of the added epiphyllous liverworts from the Wuyanling National Nature Reserve, Zhejiang Province



1. 粗茎唇鳞苔, 王健等 20200809 1-27-A; 2. 黑色冠鳞苔, 王健等 20200810 2-27-E; 3. 褐冠鳞苔, 王健等 20200810 2-14-E。

1. *Cheilolejeunea trapezia* (Nees) Kachroo et R.M.Schust., Wang et al, 20200809 1-27-A; 2. *Lopholejeunea nigricans* (Lindenb.) Schiffn., Wang et al, 20200810 2-27-E; 3. *Lopholejeunea subfusca* (Nees) Schiffn., Wang et al, 20200810 2-14-E.



4. 薄叶疣鳞苔(4-2: 箭头示透明疣), 王健等 20200805-48-C; 5. 鼎湖疣鳞苔, 王健等 20200806-47-A; 6. 细齿疣鳞苔(6-2: 箭头示附体), 王健等 20200805-85-I; 7. 疣萼疣鳞苔(7-2: 箭头示透明疣), 王健等 20200805-47-A。

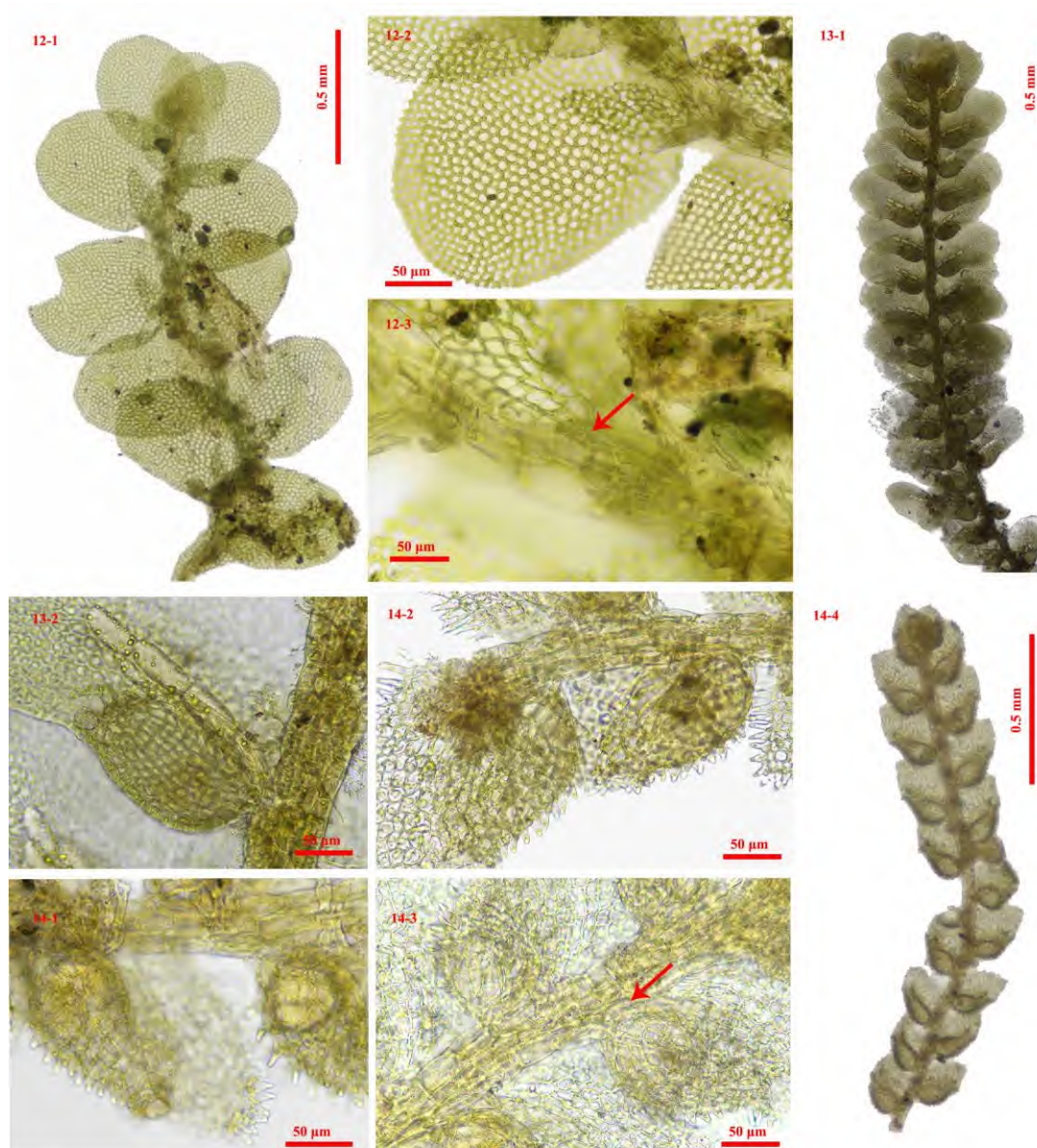
4. *Cololejeunea appressa* (A.Evans) Benedix (4-2: Arrow indicates hyaline papilla), Wang et al, 20200805-48-C; 5. *Cololejeunea dinghuiana* R.L.Zhu et Y.F.Wang, Wang et al, 20200806-47-A; 6. *Cololejeunea denticulata* (Horik.) S.Hatt. (6-2: Arrow indicates stylus), Wang et al, 20200805-85-I; 7. *Cololejeunea peraffinis* (Schiffn.) Schiffn. (7-2: Arrow indicates hyaline papilla), Wang et al, 20200805-47-A.





8. 粗疣鳞苔, 王健等 20200810 2-04-A; 9. 长叶疣鳞苔, 王健等 20200806-37-A; 10. 锯齿疣鳞苔(10-4: 箭头示附体), 王健等 20200808 1-28; 11. 刺疣鳞苔, 王健等 20200804-50-C.

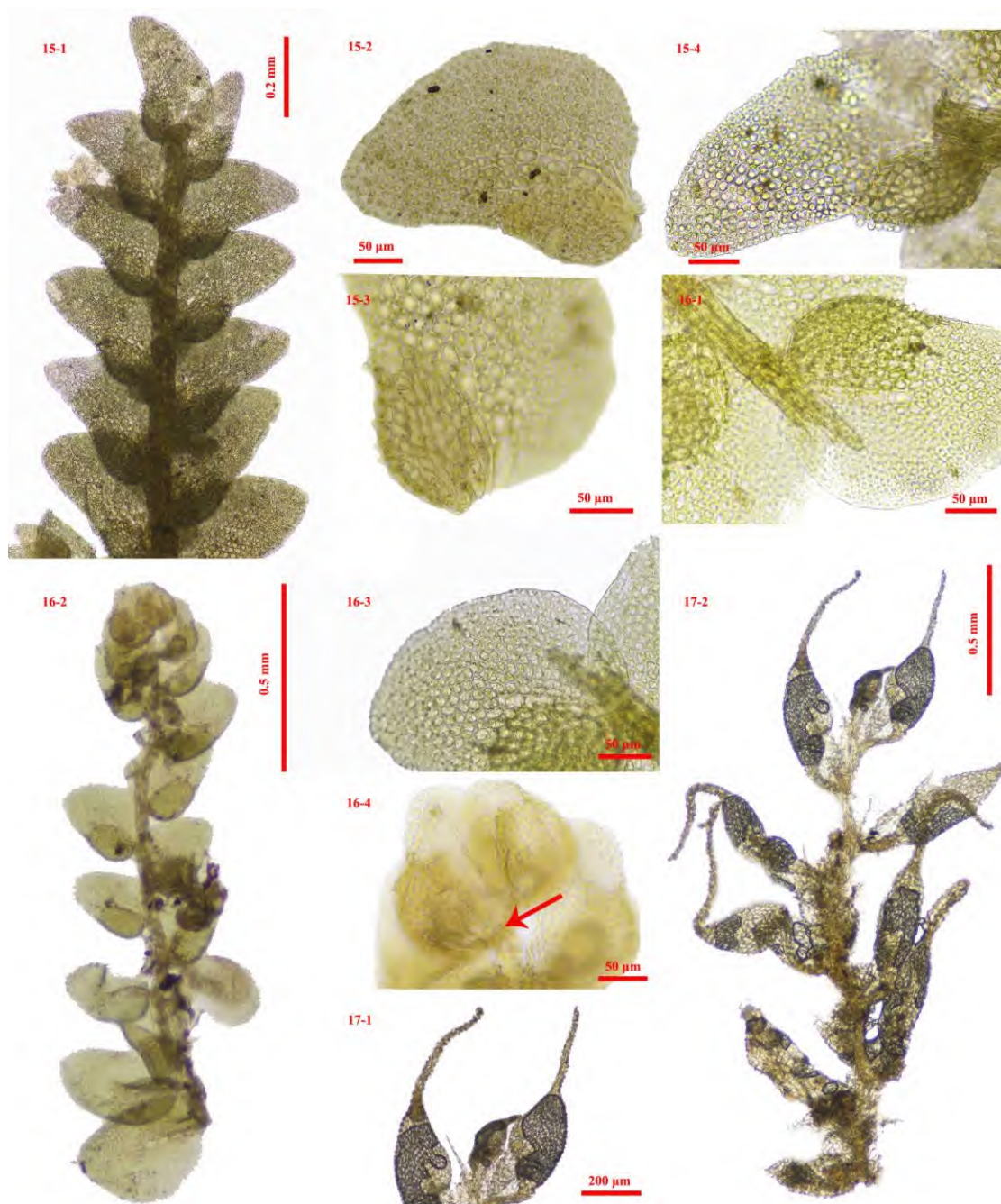
8. *Cololejeunea grossepapillosa* (Horik.) N.Kitag., Wang et al, 20200810 2-04-A; 9. *Cololejeunea longifolia* (Mitt.) Benedix ex Mizut., Wang et al, 20200806-37-A; 10. *Cololejeunea serrulata* Steph. (10-4: Arrow indicates stylus), Wang et al, 20200808 1-28; 11. *Cololejeunea spinosa* (Horik.) Pandé et R.N.Misra., Wang et al, 20200804-50-C.



12. 拟疣鳞苔(12-3: 箭头示附体), 王健等 20200806-37-B; 13. 短肋疣鳞苔, 王健等 20200806-42-B; 14. 疣瓣疣鳞苔(14-3: 箭头示附体), 王健等 20200808-97-B。

12. *Cololejeunea raduliloba* Steph. (12-3: Arrow indicates stylus), Wang et al, 20200806-37-B; 13. *Cololejeunea subfloccosa* Mizut., Wang et al, 20200806-42-B; 14. *Cololejeunea subkodamae* Mizut. (14-3: Arrow indicates stylus), Wang et al, 20200808-97-B.





15. 南亚疣鳞苔, 王健等 20200809 1-35-A; 16. 佛氏疣鳞苔(16-4: 箭头示附体), 王健等 20200808-04-B; 17. 细角管叶苔, 王健等 20200806-29-B。

15. *Cololejeunea tenella* Benedix, Wang et al, 20200809 1-35-A; 16. *Cololejeunea verdoornii* (S.Hatt.) S.Hatt. (16-4: Arrow indicates stylus), Wang et al, 20200808-04-B; 17. *Colura tenuicornis* (A.Evans) Steph., Wang et al, 20200806-29-B.



18. 线角鳞苔, 王健等 20200810 2-14-B; 19. 东亚角鳞苔, 王健等 20200809 1-37-E; 20. 云南角鳞苔, 王健等 20200805-33-E。

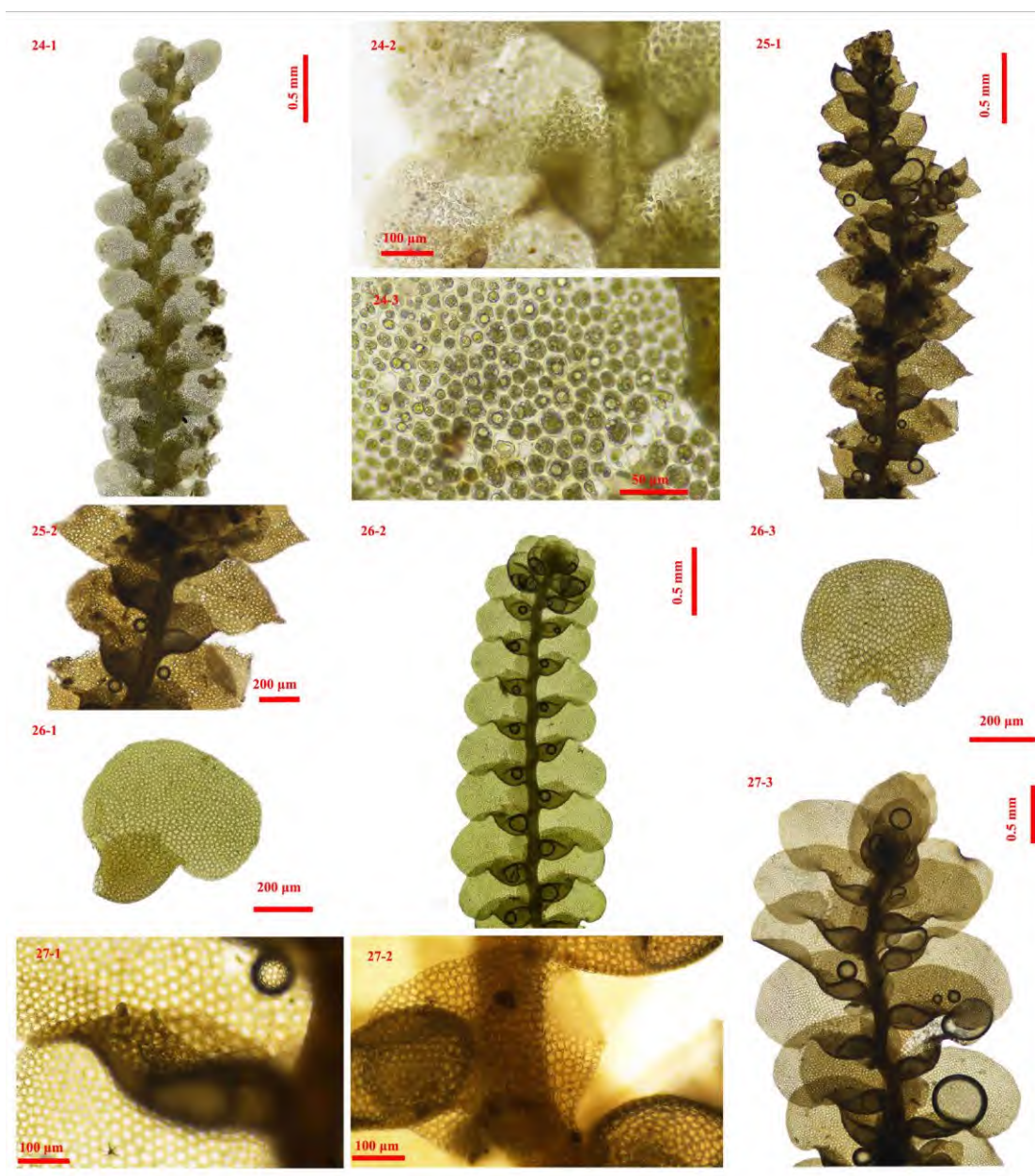
18. *Drepanolejeunea angustifolia* (Mitt.) Groll, Wang et al, 20200810 2-14-B; 19. *Drepanolejeunea commutata* Grolle et R.L.Zhu, Wang et al, 20200809 1-37-E; 20. *Drepanolejeunea yunnanensis* (P.C.Chen) Grolle et R.L.Zhu., Wang et al, 20200805-33-E.





21. 异叶细鳞苔, 王健等 20200806-09-B; 22. 芽叶细鳞苔, 王健等 20200805-85-G; 23. 白绿细鳞苔, 王健等 20200809 1-17-F。

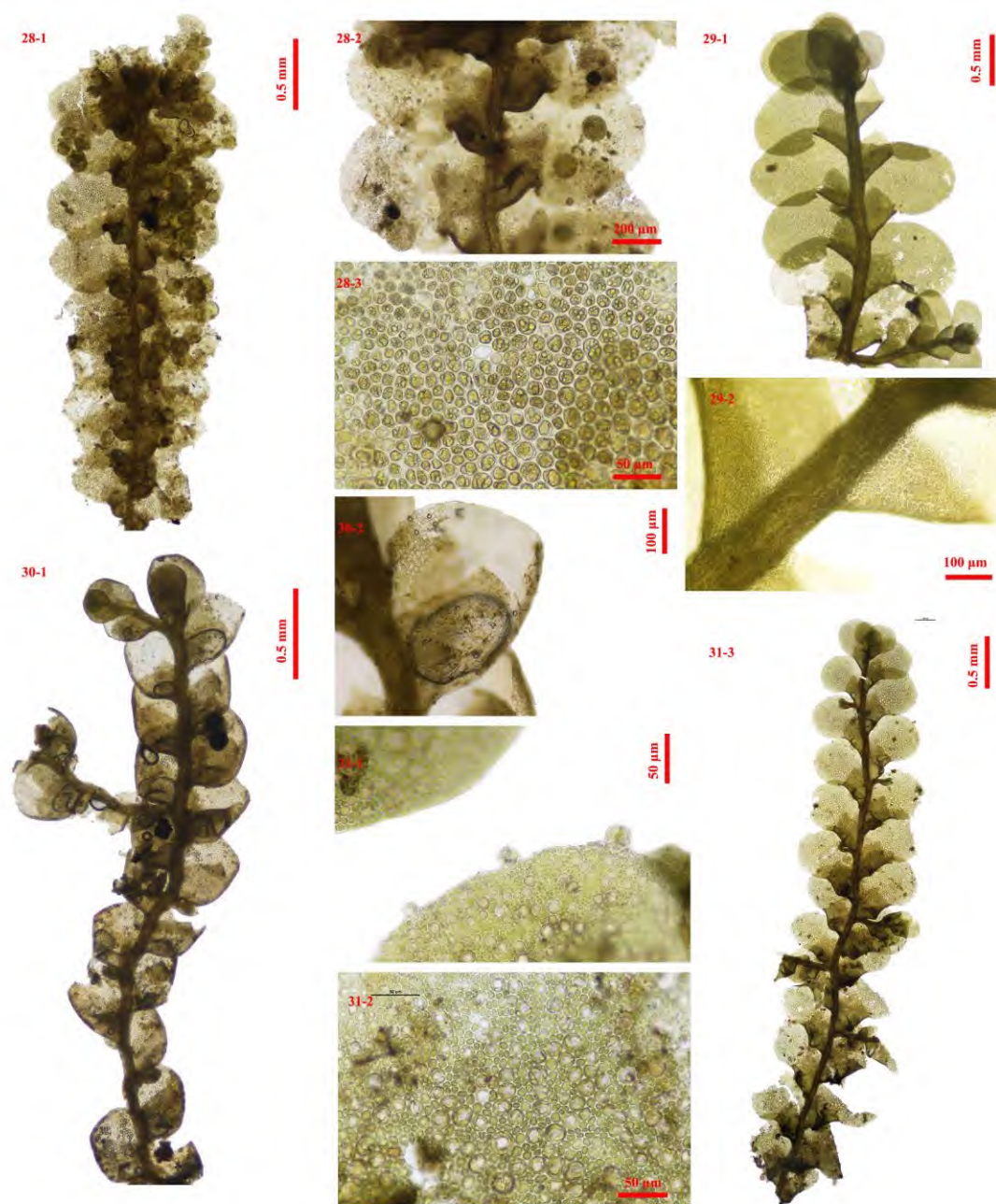
21. *Lejeunea anisophylla* Mont, Wang et al, 20200806-09-B; 22. *Lejeunea cocoes* Mitt., Wang et al, 20200805-85-G; 23. *Lejeunea pallide-virens* S.Hatt., Wang et al, 20200809 1-17-F.



24. 拟尖舌扁萼苔, 王健等 20200810 2-20-B; 25. 尖叶扁萼苔, 王健等 20200809 1-18-F; 26. 东亚多褶苔, 王健等 20200810 2-27-F; 27. 多褶苔, 王健等 20200810 2-14-H.

24. *Radula subacuminata* L.N.Zhang et R.L.Zhu, Wang et al, 20200810 2-20-B; 25. *Radula kojana* Steph., Wang et al, 20200809 1-18-F; 26. *Spruceanthus kiushianus* (Horik.) X.Q.Shi, R.L.Zhu et Gradst., Wang et al, 20200810 2-27-F; 27. *Spruceanthus semirepandus* (Nees) Verd., Wang et al, 20200810 2-14-H.

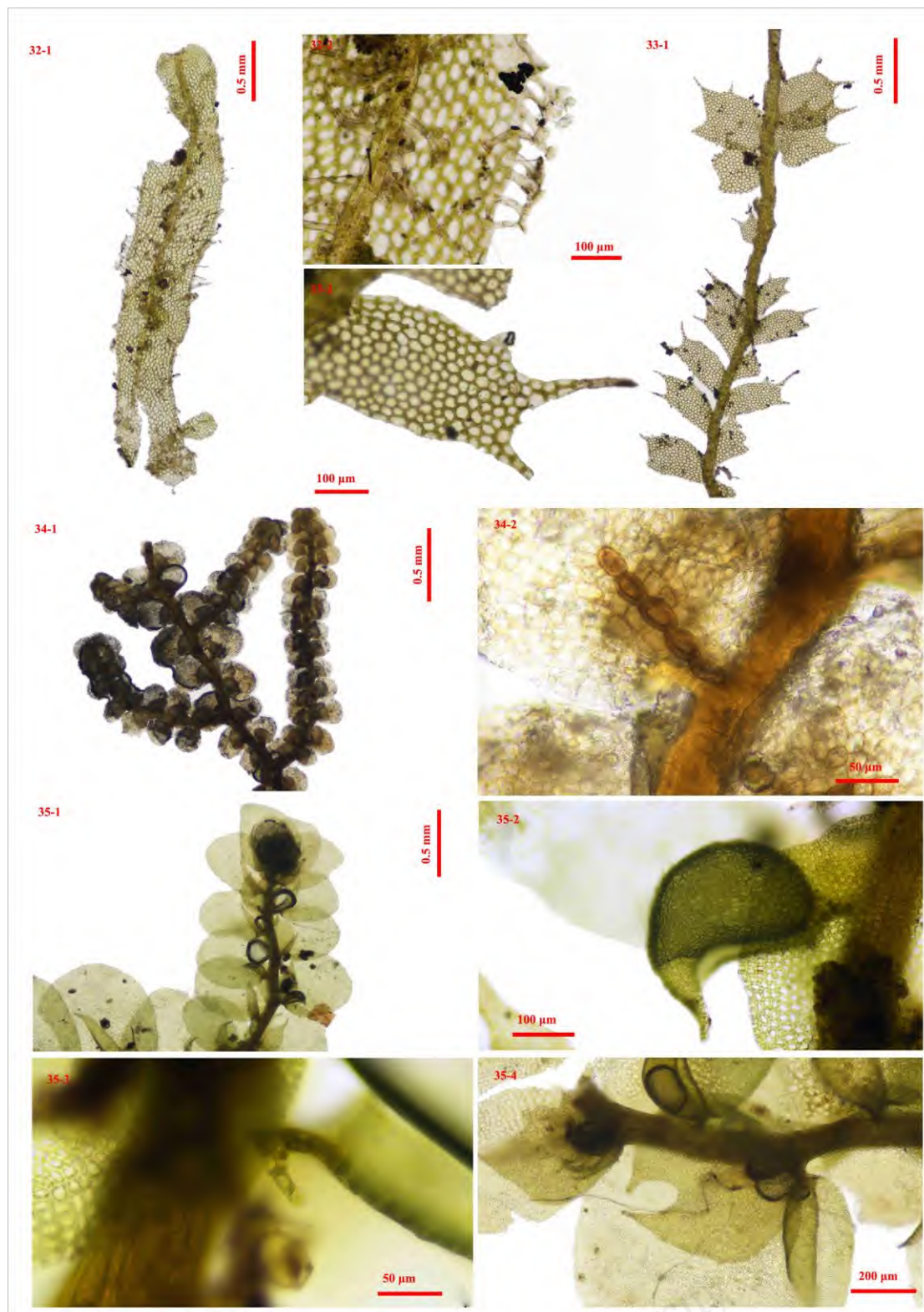




28. 尖舌扁萼苔, 王健等 20200810 2-21; 29. 爪哇扁萼苔, 王健等 20200809-07-D; 30. 大瓣扁萼苔, 王健等 20200810 2-18-C; 31. 异胞扁萼苔, 王健等 20200809 1-20-D。

28. *Radula acuminata* Steph., Wang et al, 20200810 2-21; 29. *Radula javanica* Gottsche, Wang et al, 20200809-07-D; 30. *Radula cavifolia* Hampe ex Gottsche, Lindenb. et Nees, Wang et al, 20200810 2-18-C; 31. *Radula gedena* Gottsche., Wang et al, 20200809 1-20-D.





32. 叉苔, 王健等 20200805-59-D; 33. 多齿羽苔, 王健等 20200808-46-D; 34. 青山耳叶苔, 王健等 20200809 1-54-D; 35. 羊角耳叶苔喙尖变种, 王健等 20200809 1-26-D。

32. *Metzgeria furcata* (L.) Corda, Wang et al, 20200805-59-D; 33. *Plagiochila sciophila* Nees, Wang et al, 20200808-46-D; 34. *Frullania aoshimensis* Horik., Wang et al, 20200809 1-54-D; 35. *Frullania monocera* var. *acutiloba* (Mitt.) Hentschel et von Konrat., Wang et al, 20200809 1-26-D.

附录3 浙江省7个自然保护区内叶附生苔的物种数

Appendix 3 Species number of epiphyllous liverworts from seven nature reserves in Zhejiang Province

地点	北纬	东经	科数	属数	种数	数据来源
Locality	North latitude	East longitude	No. of families	No. of genera	No. of species	Reference
乌岩岭 Wuyanling	27°20'–27°48'	119°37'–119°50'	5	14	52	朱瑞良和胡人亮, 1991; 本研究
百山祖 Baishanzu	27°37'–27°50'	119°7'–119°19'	5	14	41	Zhu et al, 1994a; 陈星等, 2021
凤阳山 Fengyangshan	27°55'	119°11'	5	12	33	Zhu et al, 1994b
钱江源 Qianjiangyuan	29°14'–29°24'	118°06'–118°20'	4	9	19	白杨等, 2020
西天目山 West Tianmushan	30°18'–30°25'	119°24'–119°28'	2	3	7	Tang et al, 2018; Dai et al, 2019; 未公布数据
九龙山 Jiulongshan	28°21'	118°52'	1	3	3	刘仲苓, 1986
西湖风景名胜区 West Lake Scenic Area	30°10'–30°15'	120°04'–120°09'	1	2	2	杜晓孟等, 2020

参考文献

- Bai Y, Chen SW, Qian HY, Yu SH, Xu YM, Zhang ZX, Shen C, Chen YQ, Zhang MQ, Yu JP, Zhu RL (2020) Species diversity of epiphyllous liverworts in Qianjiangyuan National Park, Zhejiang. *Biodiversity Science*, 28, 231–237. (in Chinese with English abstract) [白杨, 陈声文, 钱海源, 余顺海, 徐谊明, 张芷昕, 沈超, 陈雨奇, 张美琪, 余建平, 朱瑞良 (2020) 钱江源国家公园叶附生苔类植物的物种多样性. 生物多样性, 28, 231–237.]
- Chen X, Dai Z, Xing SC, Wang J (2021) Effective of in-situ conservation of epiphyllous liverworts in Qingyuan County, Zhejiang Province. *Journal of Zhejiang A&F University*, 38, doi: 10.11833/j.issn.2095-0756.20210241. (in Chinese with English abstract) [陈星, 戴尊, 邢诗晨, 王健 (2021) 浙江省庆元县叶附生苔的就地保护成效. 浙江农林大学学报, 38, doi: 10.11833/j.issn.2095-0756.20210241.]
- Dai Z, Tang X, Tu SW, Zhuang LJ, Zhu MJ, Zhao MS, Zhang ZC, Wang J (2019) *Cololejeunea tianmuensis*, a new epiphyllous species of *Cololejeunea* (Lejeuneaceae, Marchantiophyta) from Zhejiang, China. *Phytotaxa*, 402, 57–62.
- Du XM, Zheng G, Fang YW, Ji MC (2020) Description on epiphyllous liverworts from Hangzhou West Lake scenic area. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 46, 484–488. (in Chinese with English abstract) [杜晓孟, 郑钢, 方逸文, 季梦成 (2020) 杭州西湖风景名胜区叶附生苔类植物记述. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 46, 484–488.]
- Liu ZL (1986) A preliminary study of Hepaticae from Mt. Jiulongshan, Prov. Zhejiang, Eastern China. *Investigatio et Studium Naturae*, 5, 133–152. (in Chinese with English abstract) [刘仲苓 (1986) 浙江九龙山苔类植物的初步研究. 考察与研究, 5, 133–152.]
- Tang X, Gradstein SR, Sun LW, Zhu MJ, Shi RP, Wei QQ, Chen YQ, Zhou XX, Wang J (2018) A contribution to the knowledge of epiphyllous bryophytes in Tianmushan National Nature Reserve (Zhejiang, China), with remarks on climate warming and nature conservation. *Lindbergia*, 41, 1–7.
- Zhu RL, Hu RL (1991) A study on the epiphyllous liverworts from Wuyanling of Zhejiang. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, (3), 98–105. (in Chinese) [朱瑞良, 胡人亮 (1991) 浙江乌岩岭叶附生苔类植物的研究. 华东师范大学学报(自然科学版), (3), 98–105.]
- Zhu RL, Hu RL, Zhang GZ (1994a) Epiphyllous liverworts from Baishanzu Nature Reserve, Zhejiang Province, China. *Hikobia*, 11, 543–547.
- Zhu RL, Ye LX, Cai HZ (1994b) Epiphyllous liverworts of Fengyangshan Nature Reserve, Zhejiang Province, China. *The Bryologist*, 97, 277–279.

戴尊, 陈星, 张建行, 朱毛洁, 宋坤, 邢诗晨, 涂淑雯, 邹璐, 雷祖培, 李宏庆, 王健 (2022) 浙江乌岩岭国家级自然保护区叶附生苔类及附主植物多样性. 生物多样性, 30, 21229. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2021229>

附录4 浙江乌岩岭国家级自然保护区叶附生苔在浙江其他6个保护区内的分布

Appendix 4 Distribution of epiphyllous liverworts of the Wuyanling National Nature Reserve in other six nature reserves in Zhejiang Province

物种 Species	乌岩岭 Wuyanling	百山祖 Baishanzu	凤阳山 Fengyangshan	钱江源 Qianjiangyuan	西天目山 West Tianmushan	九龙山 Jiulongshan	西湖风景名胜区 West Lake Scenic Area
粗茎唇鳞苔 <i>Cheilolejeunea trapezia</i>	+	+	+	+		+	
卷边唇鳞苔 <i>Cheilolejeunea xanthocarpa</i>	+	+					
薄叶疣鳞苔 <i>Cololejeunea appressa</i>	+	+	+				
细齿疣鳞苔 <i>Cololejeunea denticulata</i>	+	+					
鼎湖疣鳞苔 <i>Cololejeunea dinghuiana</i>	+						
粗疣鳞苔 <i>Cololejeunea grossepapillosa</i>	+						
白边疣鳞苔 <i>Cololejeunea inflata</i>	+	+	+	+			
长叶疣鳞苔 <i>Cololejeunea longifolia</i>	+	+	+	+	+		
距齿疣鳞苔 <i>Cololejeunea macounii</i>	+	+	+	+			
列胞疣鳞苔 <i>Cololejeunea ocellata</i>	+	+					
疣萼疣鳞苔 <i>Cololejeunea peraffinis</i>	+	+		+			
粗齿疣鳞苔 <i>Cololejeunea planissima</i>	+	+	+	+			
拟棉毛疣鳞苔 <i>Cololejeunea pseudofloccosa</i>	+	+	+				
拟疣鳞苔 <i>Cololejeunea raduliloba</i>	+		+		+		+
锯齿疣鳞苔 <i>Cololejeunea serrulata</i>	+						
刺疣鳞苔 <i>Cololejeunea spinosa</i>	+	+	+	+	+		
短肋疣鳞苔 <i>Cololejeunea subfloccosa</i>	+	+		+			
疣瓣疣鳞苔 <i>Cololejeunea subkodamae</i>	+		+	+			
南亚疣鳞苔 <i>Cololejeunea tenella</i>	+						
单体疣鳞苔 <i>Cololejeunea trichomanis</i>	+	+	+	+			
佛氏疣鳞苔 <i>Cololejeunea verdoornii</i>	+	+	+				
细角管叶苔 <i>Colura tenuicornis</i>	+	+	+				
线角鳞苔 <i>Drepanolejeunea angustifolia</i>	+	+	+				
东亚角鳞苔 <i>Drepanolejeunea commutata</i>	+	+		+			
日本角鳞苔 <i>Drepanolejeunea erecta</i>	+	+	+	+			
叶生角鳞苔 <i>Drepanolejeunea foliicola</i>	+	+	+			+	
云南角鳞苔 <i>Drepanolejeunea yunnanensis</i>	+	+					
异叶细鳞苔 <i>Lejeunea anisophylla</i>	+	+	+				
芽叶细鳞苔 <i>Lejeunea cocoes</i>	+						
黄色细鳞苔 <i>Lejeunea flava</i>	+	+	+				
小叶细鳞苔 <i>Lejeunea parva</i>	+	+	+				
白绿细鳞苔 <i>Lejeunea pallide-virens</i>	+						
尖叶薄鳞苔 <i>Leptolejeunea subacuta</i>	+	+	+	+		+	+
黑色冠鳞苔 <i>Lopholejeunea nigricans</i>	+						
褐冠鳞苔 <i>Lopholejeunea subfusca</i>	+	+					
斑叶纤鳞苔 <i>Microlejeunea punctiformis</i>	+			+	+		
东亚多褶苔 <i>Spruceanthus kiushianus</i>	+						
多褶苔 <i>Spruceanthus semirepandus</i>	+	+					
鞍叶苔 <i>Tuyamaella molischii</i>	+	+					
青山耳叶苔 <i>Frullania aoshimensis</i>	+	+					
列胞耳叶苔 <i>Frullania moniliata</i>	+	+	+	+			
羊角耳叶苔喙尖变种 <i>Frullania monocera</i> var. <i>acutiloba</i>	+						
盔瓣耳叶苔 <i>Frullania muscicola</i>	+	+	+				
平叉苔 <i>Metzgeria conjugata</i>	+			+			

戴尊, 陈星, 张建行, 朱毛洁, 宋坤, 邢诗晨, 涂淑雯, 邹璐, 雷祖培, 李宏庆, 王健 (2022) 浙江乌岩岭国家级自然保护区叶附生苔类及附主植物多样性. 生物多样性, 30, 21229. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2021229>

物种 Species	乌岩岭 Wuyanling	百山祖 Baishanzu	凤阳山 Fengyangshan	钱江源 Qianjiangyuan	西天目山 West Tianmushan	九龙山 Jiulongshan	西湖风景名胜区 West Lake Scenic Area
叉苔 <i>Metzgeria furcata</i>	+	+	+		+		
多齿羽苔 <i>Plagiochila sciophila</i>	+	+					
尖舌扁萼苔 <i>Radula acuminata</i>	+	+	+	+			
大瓣扁萼苔 <i>Radula cavifolia</i>	+	+					
异胞扁萼苔 <i>Radula gedena</i>	+						
爪哇扁萼苔 <i>Radula javanica</i>	+						
尖叶扁萼苔 <i>Radula kojana</i>	+		+				
拟尖舌扁萼苔 <i>Radula subacuminata</i>	+						



戴尊, 陈星, 张建行, 朱毛洁, 宋坤, 邢诗晨, 涂淑雯, 邹璐, 雷祖培, 李宏庆, 王健 (2022) 浙江乌岩岭国家级自然保护区叶附生苔类及附主植物多样性. 生物多样性, 30, 21229. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2021229>

附录5 浙江乌岩岭国家级自然保护区与浙江省其他6个保护区叶附生种的相似性系数

Appendix 5 Similarity coefficient of epiphyllous species between the Wuyanling National Nature Reserve and other six nature reserves in Zhejiang Province

地点 Locality	共有科数 No. of common families	科的相似性系数 Similarity coefficient of families	共有属数 No. of common genera	属的相似性系数 Similarity coefficient of genera	共有种数 No. of common species	种的相似性系数 Similarity coefficient of species
乌岩岭 Wuyanling	5	1	14	1	52	1
百山祖 Baishanzu	5	1	14	1	35	0.603
凤阳山 Fengyangshan	4	0.667	10	0.625	25	0.417
钱江源 Qianjiangyuan	4	0.8	9	0.643	17	0.315
西天目山 West Tianmushan	2	0.4	3	0.214	5	0.093
九龙山 Jiulongshan	1	0.2	3	0.214	3	0.058
西湖风景名胜区 West Lake Scenic Area	1	0.2	2	0.143	2	0.038

附录6 浙江乌岩岭国家级自然保护区叶附生苔类附主植物名录

Appendix 6 Checklist of the host plants of epiphyllous liverworts in the Wuyanling National Nature Reserve, Zhejiang Province

编号 No.	科 Family	属 Genus	物种 Species
1	伞形科 Apiaceae	变豆菜属 <i>Sanicula</i>	变豆菜 <i>Sanicula chinensis</i>
2	夹竹桃科 Apocynaceae	链珠藤属 <i>Alyxia</i>	链珠藤 <i>Alyxia sinensis</i>
3		牛奶菜属 <i>Marsdenia</i>	牛奶菜 <i>Marsdenia sinensis</i>
4		络石属 <i>Trachelospermum</i>	紫花络石 <i>Trachelospermum axillare</i>
5			络石 <i>Trachelospermum jasminoides</i>
6	冬青科 Aquifoliaceae	冬青属 <i>Ilex</i>	冬青 <i>Ilex chinensis</i>
7			光叶细刺枸骨 <i>Ilex hylonoma</i> var. <i>glabra</i>
8			大叶冬青 <i>Ilex latifolia</i>
9			矮冬青 <i>Ilex lohfauiensis</i>
10			毛冬青 <i>Ilex pubescens</i>
11	五加科 Araliaceae	树参属 <i>Dendropanax</i>	树参 <i>Dendropanax dentiger</i>
12	马兜铃科 Aristolochiaceae	细辛属 <i>Asarum</i>	长毛细辛 <i>Asarum pulchellum</i>
13	蹄盖蕨科 Athyriaceae	双盖蕨属 <i>Diplazium</i>	江南双盖蕨 <i>Diplazium mettenianum</i>
14	天门冬科 Asparagaceae	山麦冬属 <i>Liriope</i>	阔叶山麦冬 <i>Liriope muscari</i>
15	乌毛蕨科 Blechnaceae	狗脊属 <i>Woodwardia</i>	狗脊 <i>Woodwardia japonica</i>
16	黄杨科 Buxaceae	野扇花属 <i>Sarcococca</i>	野扇花 <i>Sarcococca ruscifolia</i>
17	忍冬科 Caprifoliaceae	忍冬属 <i>Lonicera</i>	淡红忍冬 <i>Lonicera acuminata</i>
18	金粟兰科 Chloranthaceae	草珊瑚属 <i>Sarcandra</i>	草珊瑚 <i>Sarcandra glabra</i>
19	菊科 Compositae	假福王草属 <i>Paraprenanthes</i>	假福王草 <i>Paraprenanthes sororia</i>
20	莎草科 Cyperaceae	藁草属 <i>Carex</i>	浆果藁草 <i>Carex baccans</i>
21			十字藁草 <i>Carex cruciata</i>
22	虎皮楠科 Daphniphyllaceae	虎皮楠属 <i>Daphniphyllum</i>	交让木 <i>Daphniphyllum macropodum</i>
23	鳞毛蕨科 Dryopteridaceae	复叶耳蕨属 <i>Arachniodes</i>	斜方复叶耳蕨 <i>Arachniodes amabilis</i>
24		耳蕨属 <i>polystichum</i>	巴郎耳蕨 <i>Polystichum balansae</i>
25	杜英科 Elaeocarpaceae	杜英属 <i>Elaeocarpus</i>	杜英 <i>Elaeocarpus decipiens</i>
26	杜鹃花科 Ericaceae	珍珠花属 <i>Lyonia</i>	毛果珍珠花 <i>Lyonia ovalifolia</i> var. <i>hebecarpa</i>
27		杜鹃花属 <i>Rhododendron</i>	刺毛杜鹃 <i>Rhododendron championiae</i>
28			马银花 <i>Rhododendron ovatum</i>
29	豆科 Fabaceae	鸡血藤属 <i>Callerya</i>	香花鸡血藤 <i>Callerya dielsiana</i>
30	壳斗科 Fagaceae	锥属 <i>Castanopsis</i>	甜槠 <i>Castanopsis eyrei</i>
31			罗浮锥 <i>Castanopsis fabri</i>
32			栲 <i>Castanopsis fargesii</i>
33			毛锥 <i>Castanopsis fordii</i>
34			苦槠 <i>Castanopsis sclerophylla</i>
35		青冈属 <i>Cyclobalanopsis</i>	青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i>
36			褐叶青冈 <i>Cyclobalanopsis stewardiana</i>
37		柯属 <i>Lithocarpus</i>	短尾柯 <i>Lithocarpus brevicaudatus</i>
38	丝缨花科 Garryaceae	桃叶珊瑚属 <i>Aucuba</i>	长叶珊瑚 <i>Aucuba himalaica</i> var. <i>dolichophylla</i>
39	苦苣苔科 Gesneriaceae	粗筒苣苔属 <i>Briggsia</i>	浙皖粗筒苣苔 <i>Briggsia chienii</i>
40	里白科 Gleicheniaceae	里白属 <i>Hicriopteris</i>	中华里白 <i>Diplopterygium chinense</i>

编号 No.	科 Family	属 Genus	物种 Species
41			里白 <i>Diplazium glaucum</i>
42	金缕梅科 Hamamelidaceae	檵木属 <i>Loropetalum</i>	檵木 <i>Loropetalum chinense</i>
43			红花檵木 <i>Loropetalum chinense</i> var. <i>rubrum</i>
44	鼠刺科 Iteaceae	鼠刺属 <i>Itea</i>	峨眉鼠刺 <i>Itea omeiensis</i>
45	木通科 Lardizabalaceae	野木瓜属 <i>Stauntonia</i>	钝药野木瓜 <i>Stauntonia leucantha</i>
46			尾叶那藤 <i>Stauntonia obovatifoliola</i> subsp. <i>urophylla</i>
47	樟科 Lauraceae	樟属 <i>Cinnamomum</i>	华南桂 <i>Cinnamomum austrosinense</i>
48		木姜子属 <i>Litsea</i>	豹皮樟 <i>Litsea coreana</i> var. <i>sinensis</i>
49			黄丹木姜子 <i>Litsea elongata</i>
50		润楠属 <i>Machilus</i>	薄叶润楠 <i>Machilus leptophylla</i>
51			刨花润楠 <i>Machilus pauhoi</i>
52			红楠 <i>Machilus thunbergii</i>
53		楠属 <i>Phoebe</i>	紫楠 <i>Phoebe sheareri</i>
54	木兰科 Magnoliaceae	木莲属 <i>Manglietia</i>	木莲 <i>Manglietia fordiana</i>
55		含笑属 <i>Michelia</i>	深山含笑 <i>Michelia maudiae</i>
56	野牡丹科 Melastomataceae	野海棠属 <i>Bredia</i>	过路惊 <i>Bredia quadrangularis</i>
57		锦香草属 <i>Phyllagathis</i>	锦香草 <i>Phyllagathis cavaleriei</i>
58	防己科 Menispermaceae	细圆藤属 <i>Pericampylus</i>	细圆藤 <i>Pericampylus glaucus</i>
59	桑科 Moraceae	榕属 <i>Ficus</i>	珍珠莲 <i>Ficus sarmentosa</i> var. <i>henryi</i>
60	桃金娘科 Myrtaceae	蒲桃属 <i>Syzygium</i>	赤楠 <i>Syzygium buxifolium</i>
61	木犀科 Oleaceae	木犀属 <i>Osmanthus</i>	木犀 <i>Osmanthus fragrans</i>
62	兰科 Orchidaceae	虾脊兰属 <i>Calanthe</i>	钩距虾脊兰 <i>Calanthe graciliflora</i>
63		斑叶兰属 <i>Goodyera</i>	斑叶兰 <i>Goodyera schlechtendaliana</i>
64	紫萁科 Osmundaceae	紫萁属 <i>Osmunda</i>	紫萁 <i>Osmunda japonica</i>
65	五列木科 Pentaphragmataceae	杨桐属 <i>Adinandra</i>	大萼杨桐 <i>Adinandra glischroloma</i> var. <i>macrosepala</i>
66		柃木属 <i>Eurya</i>	微毛柃 <i>Eurya hebeclados</i>
67			柃木 <i>Eurya japonica</i>
68			细枝柃 <i>Eurya loquaiana</i>
69			金叶细枝柃 <i>Eurya loquaiana</i> var. <i>aureopunctata</i>
70			格药柃 <i>Eurya muricata</i>
71			细齿叶柃 <i>Eurya nitida</i>
72			窄基红褐柃 <i>Eurya rubiginosa</i> var. <i>attenuata</i>
73	胡椒科 Piperaceae	胡椒属 <i>Piper</i>	山蒟 <i>Piper hancei</i>
74	海桐科 Pittosporaceae	海桐属 <i>Pittosporum</i>	海金子 <i>Pittosporum illicioides</i>
75	瘤足蕨科 Plagiogyriaceae	瘤足蕨属 <i>Plagiogyria</i>	华中瘤足蕨 <i>Plagiogyria euphlesia</i>
76			镰羽瘤足蕨 <i>Plagiogyria falcata</i>
77	车前科 Plantaginaceae	腹水草属 <i>Veronicastrum</i>	爬岩红 <i>Veronicastrum axillare</i>
78	禾本科 Poaceae	箬竹属 <i>Indocalamus</i>	箬竹 <i>Indocalamus tessellatus</i>
79	水龙骨科 Polypodiaceae	骨牌蕨属 <i>Lepidogrammitis</i>	抱石莲 <i>Lemmaphyllum drymoglossoides</i>
80		鳞果星蕨属 <i>Lepidomicrosorium</i>	鳞果星蕨 <i>Lepidomicrosorium buergerianum</i>
81		瓦韦属 <i>Lepisorus</i>	瓦韦 <i>Lepisorus thunbergianus</i>
82	报春花科 Primulaceae	紫金牛属 <i>Ardisia</i>	百两金 <i>Ardisia crispa</i>

编号 No.	科 Family	属 Genus	物种 Species
83		酸藤子属 <i>Embelia</i>	密齿酸藤子 <i>Embelia vestita</i>
84		杜茎山属 <i>Maesa</i>	杜茎山 <i>Maesa japonica</i>
85		密花树属 <i>Rapanea</i>	密花树 <i>Myrsine seguinii</i>
86	毛茛科 Ranunculaceae	铁线莲属 <i>Clematis</i>	山木通 <i>Clematis finetiana</i>
87	鼠李科 Rhamnaceae	雀梅藤属 <i>Sageretia</i>	钩枝雀梅藤 <i>Sageretia hamosa</i>
88	蔷薇科 Rosaceae	石楠属 <i>Photinia</i>	贵州石楠 <i>Photinia bodinieri</i>
89			石楠 <i>Photinia serratifolia</i>
90		悬钩子属 <i>Rubus</i>	寒莓 <i>Rubus buergeri</i>
91			尾叶悬钩子 <i>Rubus caudifolius</i>
92	茜草科 Rubiaceae	流苏子属 <i>Coptosapelta</i>	流苏子 <i>Coptosapelta diffusa</i>
93		虎刺属 <i>Damnacanthus</i>	虎刺 <i>Damnacanthus indicus</i>
94			浙皖虎刺 <i>Damnacanthus macrophyllus</i>
95		狗骨柴属 <i>Diplospora</i>	狗骨柴 <i>Diplospora dubia</i>
96		粗叶木属 <i>Lasianthus</i>	日本粗叶木 <i>Lasianthus japonicus</i>
97		蛇根草属 <i>Ophiorrhiza</i>	日本蛇根草 <i>Ophiorrhiza japonica</i>
98		茜草属 <i>Rubia</i>	金剑草 <i>Rubia alata</i>
99		乌口树属 <i>Tarenna</i>	白花苦灯笼 <i>Tarenna mollissima</i>
100	芸香科 Rutaceae	花椒属 <i>Zanthoxylum</i>	花椒箭 <i>Zanthoxylum scandens</i>
101	无患子科 Sapindaceae	槭属 <i>Acer</i>	青榨枫 <i>Acer davidii</i>
102	五味子科 Schisandraceae	八角属 <i>Illicium</i>	红毒茴 <i>Illicium lanceolatum</i>
103		南五味子属 <i>Kadsura</i>	南五味子 <i>Kadsura longipedunculata</i>
104	卷柏科 Selaginellaceae	卷柏属 <i>Selaginella</i>	深绿卷柏 <i>Selaginella doederleinii</i>
105	菝葜科 Smilacaceae	菝葜属 <i>Smilax</i>	土茯苓 <i>Smilax glabra</i>
106			华东菝葜 <i>Smilax sieboldii</i>
107	安息香科 Styracaceae	安息香属 <i>Styrax</i>	越南安息香 <i>Styrax tonkinensis</i>
108	山矾科 Symplocaceae	山矾属 <i>Symplocos</i>	老鼠矢 <i>Symplocos stellaris</i>
109	山茶科 Theaceae	山茶属 <i>Camellia</i>	浙江山茶 <i>Camellia chekiangoleosa</i>
110			连蕊茶 <i>Camellia cuspidata</i>
111			毛花连蕊茶 <i>Camellia fraterna</i>
112			茶 <i>Camellia sinensis</i>
113			毛枝连蕊茶 <i>Camellia trichoclada</i>
114		木荷属 <i>Schima</i>	木荷 <i>Schima superba</i>
115	荨麻科 Urticaceae	赤车属 <i>Pellionia</i>	赤车 <i>Pellionia radicans</i>
116			曲毛赤车 <i>Pellionia retrohispidata</i>
117			蔓赤车 <i>Pellionia scabra</i>
118	葡萄科 Vitaceae	崖爬藤属 <i>Tetrastigma</i>	三叶崖爬藤 <i>Tetrastigma hemsleyanum</i>
119	姜科 Zingiberaceae	山姜属 <i>Alpinia</i>	山姜 <i>Alpinia japonica</i>





•综述•

# 有机种植对农田节肢动物多样性影响的整合分析

黄方倩, 王超, 刘明庆<sup>ID</sup>, 陈秋会<sup>ID</sup>, 韩笑<sup>ID\*</sup>, 王磊\*, 席运官, 张纪兵

生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042

**摘要:** 有机农业是生态环境友好的生产方式, 对农业生物多样性保护具有重要意义。个体研究的差异不利于有机农业的生态环境效益评估。本研究利用文献整合分析, 以对农田生态环境具有良好指示作用的节肢动物为研究对象, 探讨了有机种植对农田生物多样性的保护效果及影响因素。结果表明, 相比常规种植, 有机种植可使节肢动物的丰富度、多度及均匀度显著提升34.95%、64.95%及12.09%; 天敌和害虫的物种丰富度分别显著提升了22.50%和31.03%; 同时天敌的个体数量比常规显著增加了71.80%, 害虫减少了10.46%。经过3年及以上的有机种植后, 节肢动物的丰富度和多度均显著高于常规种植。常规种植化学农药施用频率可显著影响节肢动物丰富度和均匀度指数, 施药次数每增加1次, 节肢动物丰富度相比有机种植显著降低13.54%, 均匀度显著降低2.64%。有机水田对节肢动物多度的提升效果显著优于有机旱地, 为后者的4.7倍; 但二者的丰富度和均匀度没有显著差异。蔬菜和茶叶种植体系对节肢动物多样性指数的综合提升效果优于其他作物类型, 丰富度、多度和均匀度指数分别显著提升了81.46%、74.14%、18.55%和48.86%、49.06%、30.88%。鼓励常规种植减少农药施用频次, 加大有机和生态化管理措施的应用程度, 是保护农业生物多样性、实现农业绿色高质量发展的有效途径。

**关键词:** 农业生物多样性; 有机种植; 常规种植; 节肢动物; 整合分析

黄方倩, 王超, 刘明庆, 陈秋会, 韩笑, 王磊, 席运官, 张纪兵 (2022) 有机种植对农田节肢动物多样性影响的整合分析. 生物多样性, 30, 21243. doi: 10.17520/biods.2021243.

Huang FQ, Wang C, Liu MQ, Chen QH, Han X, Wang L, Xi YG, Zhang JB (2022) Effects of organic planting on arthropod diversity in farmland: A meta-analysis. Biodiversity Science, 30, 21243. doi: 10.17520/biods.2021243.

## Effects of organic planting on arthropod diversity in farmland: A meta-analysis

Fangqian Huang, Chao Wang, Mingqing Liu<sup>ID</sup>, Qiuhui Chen<sup>ID</sup>, Xiao Han<sup>ID\*</sup>, Lei Wang\*, Yunguan Xi, Jibing Zhang

Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042

### ABSTRACT

**Aims:** Organic planting is widely considered an environment-friendly agricultural management pattern that plays a crucial role in the protection of agricultural biodiversity. The change of arthropod biodiversity is proposed as a key ecological indicator for agricultural sustainability. However, the effects of organic planting on arthropod biodiversity remain inconsistent in published studies, which may have resulted from the durations of organic planting, land use and cropping systems across the individual studies. The diverse results from previous studies could weaken the practicability of their conclusions in policymaking, which highlighted the necessity of conducting a meta-analysis to provide a generalized understanding of the effects of organic planting on arthropod diversity. This study aims to quantify the impact of organic planting on arthropod biodiversity using meta-analysis and provide scientific support for the formulation of ecological compensation policy under organic planting.

**Methods:** This meta-analysis conducted a literature review of peer-reviewed papers published before the end of 2020 which compared the impacts of organic and conventional planting on arthropod biodiversity. The results from 75 experimental sites, which contained 227 paired valid datasets, were selected for our analysis. To distinguish between the sources of variation for the responses of biodiversity to organic planting, the paired measurements were further subdivided into subgroups according to the factors of duration, land use, crop variety, pesticide application frequency in conventional planting, and arthropod functional groups.

收稿日期: 2021-06-20; 接受日期: 2021-09-22

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(GYZX210516)、国家科技支撑计划(2014BAK19B01)和环保公益性行业科研专项(201309036)

\* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: hxofrc@126.com; wlofrc@126.com

**Results:** The results showed that compared with conventional planting, organic planting significantly improved the richness, abundance, and evenness of arthropods by the rate of 34.95%, 64.95%, and 12.09%, respectively. The abundance of the natural enemies of arthropods increased by 71.80% ( $P < 0.05$ ) while the abundance of pests decreased by 10.46% under organic planting. The richness of the natural enemies and pests under organic planting were both increased by 22.50% and 31.03% respectively, relative to conventional planting ( $P < 0.05$ ). The application of pesticides significantly decreased the arthropod biodiversity in conventional planting. Compared with the organic planting, an increase in the time of pesticide application in the conventional planting lead to decreases in the arthropod richness and evenness of arthropods by 13.54% and 2.64%, respectively. The responses of arthropod richness and abundance to organic planting were significantly positive when the duration was equal to or exceeded three years. The positive effect of organic planting on arthropod abundance in paddy fields was 4.7 times higher than that in dryland ( $P < 0.05$ ), but the responses of richness and evenness to organic planting were comparable between paddy and dryland ( $P > 0.05$ ). The responses of arthropod richness, abundance, and evenness to organic planting under the vegetable system were 81.46%, 74.14%, and 18.55%, respectively ( $P < 0.05$ ); and under the tea-planting system were 48.86%, 49.06%, 30.88% ( $P < 0.05$ ), respectively. The benefits of organic planting on arthropod biodiversity under the cropping systems of vegetable and tea were demonstrated to be more significant than that under other cropping systems.

**Conclusions:** Our meta-analysis suggests that organic planting plays an important role in protecting and improving biodiversity in croplands by increasing the abundance of natural enemies and decreasing pests abundance. The frequency of pesticide application was observed to be the key factor which significantly regulates the change of arthropod biodiversity. To promote the positive effects of organic planting on the protection of biodiversity in cropland, policymakers should not only to encourage the implementation of organic planting in regions where necessary conditions are satisfied, but also facilitate the ecological innovation of conventional planting by introducing the principles, concepts, and technologies of organic planting into conventional planting. This will be of more practical significance to agricultural biodiversity conservation in China.

**Key words:** agricultural biodiversity; organic planting; conventional planting; arthropod; meta-analysis

农业生物多样性是生物多样性的重要组成部分,在保障粮食安全、耕地生态健康和应对气候变化等方面发挥着重要作用(陈海坚等, 2005; 初炳瑶等, 2020)。然而,集约化的农业管理中对化学农药的大量应用导致的农业生态环境简单化,已成为农业生物多样性降低的主要原因之一,严重制约了农业的可持续健康发展(Birkhofer et al, 2014; 潘扬等, 2020; 高磊等, 2021)。有机种植被认为是生态环境友好的种植方式,已在全球范围内大规模推广,截至2019年底全球有机农地种植面积达7,230万ha(国家市场监督管理总局和中国农业大学, 2019)。与常规种植相比,有机种植在生产过程中禁止使用化学合成的农药、化肥、生长调节剂、饲料添加剂等物质,采用农作物间作、轮作等农田管理措施以及生物或物理方式防治病虫害,有利于农田生态系统的平衡与修复、降低害虫发生频次,对保护农业生物多样性具有重要作用(周子杨, 2011<sup>①</sup>; 邢树文等, 2017)。

节肢动物在农田生态系统的传粉、微生物种群

调节、有机物分解和生物营养循环中起着重要作用,影响着农田生物群落结构演替,是农田生态系统的重要组成部分(Doles et al, 2001)。因其世代周期短、直接或间接以植物为食、种群数量巨大等特点,节肢动物对栖息地生态环境变化具有良好的指示作用,可用作生态系统生物多样性的指示物,并有学者建议将其用于生物多样性保护(李巧等, 2006)。近年来有机农业对生物多样性的影响受到国内外学者的关注,其中对节肢动物多样性的研究开展相对较早(潘扬等, 2020)。但由于不同研究之间受有机种植年限、种植作物类型以及农田管理措施等客观条件影响,结论存在一定差异性。如Morente等(2018)对不同种植方式下节肢动物的多样性进行研究发现,相比常规种植,有机种植方式下节肢动物的物种丰富度较高,但均匀度较低。而张蓉等(2010)对有机与常规枸杞园中节肢动物群落进行系统调查,结果表明,有机种植园中节肢动物的丰富度、多度以及均匀度均高于常规种植园。不同研究结果的差异不利于政府对有机农业生态环境价值的评估。

文献整合分析是将同一主题下的多个独立实验(研究)进行综合的统计分析方法,通过增加样本

<sup>①</sup> 周子杨 (2011) 不同类型稻田非作物生境的节肢动物多样性. 硕士学位论文, 南京农业大学, 南京.

量以达到提高统计学检验功效的目的(彭少麟和郑凤英, 1999; 雷相东等, 2006)。本研究采用此方法定量分析有机种植对农田节肢动物多样性的影响, 并从有机种植年限、耕地利用方式、作物种类、常规种植田农药施用次数以及天敌和害虫功能类群的角度分析其影响因素差异, 以期在更大的时空尺度上定量、系统地回答有机种植如何影响节肢动物多样性, 为有机农业生态环境效益评估提供数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

本研究的数据资料来自中国知网和Web of Science数据库所收录的有机种植对节肢动物多样性影响的相关文献, 文献出版时间为1980–2020年。检索关键词为有机农业、有机种植、节肢动物、物种多样性、生物多样性、organic agriculture、organic planting、organic farming、arthropod、biological diversity。根据研究目的, 检出的文献需符合以下筛选标准: (1)研究基于田间试验, 且试验同时设置了有机种植处理和常规种植处理; (2)有机和常规种植处理除农事操作不同外, 作物类型和试验区域应一致; (3)试验年数应在3年以上(含3年); (4)节肢动物多样性数据应可以从文献文字、图表中提

取, 或者可以通过计算获得; (5)若同一点位的试验结果发表了多篇文章, 则不重复纳入文献样本。最终, 筛选出符合以上条件的有效文献54篇(附录1), 其中中文文献27篇, 英文文献27篇; 提取有效数据227组, 共计75个点位试验, 所涉研究区域如表1所示。

本研究从耕地类型、有机种植年限、常规种植每年杀虫剂的施用次数、种植作物类型以及节肢动物功能类群, 将试验样本按照不同水平分组(表2), 以期明确有机和常规种植对节肢动物多样性的影响机制。其中, 常规种植年施药次数指有机种植的对照处理(常规种植)中每年化学杀虫剂的施用次数; 害虫主要为植食性节肢动物, 天敌包括捕食性和寄生性节肢动物。

### 1.2 数据处理与分析

采用Margalef丰富度指数(richness,  $R$ )、多度(abundance,  $A$ )以及Pielou均匀度指数(evenness,  $E$ )作为节肢动物的多样性测度指数(钱迎倩和马克平, 1994)。其中, 多度( $A$ )用于反映节肢动物群落全部物种的总个体数(Lichtenberg et al, 2017)。若文献图表或文字描述中已给出相应指数数值则直接采用, 若未直接给出但可通过文献结果计算得出, 则通过计算获取相应指数。Margalef丰富度指数( $R$ )用以反映节肢动物群落的丰富度, 计算公式如下:

表1 整合分析纳入的文献所涉及的研究区域分布

Table 1 The distribution of research area contained in the meta analysis

样点分布区域(国内) Distribution of research area in China	试验点位数量 No. of experimental sites	样点分布区域(国外) Distribution of research area outside China	试验点位数量 No. of experimental sites
新疆 Xinjiang	1	克罗地亚 Croatia	1
宁夏 Ningxia	2	巴西 Brazil	3
四川 Sichuan	1	德国 Germany	2
贵州 Guizhou	1	法国 France	1
广西 Guangxi	2	美国 The United States	14
广东 Guangdong	5	葡萄牙 Portugal	2
湖南 Hunan	4	瑞士 Switzerland	5
江西 Jiangxi	2	西班牙 Spain	3
福建 Fujian	2	希腊 Greece	4
安徽 Anhui	2	意大利 Italy	1
上海 Shanghai	2	英国 The United Kingdom	5
江苏 Jiangsu	6		
山东 Shandong	2		
河北 Hebei	1		
北京 Beijing	1		

表2 影响因素的不同分组水平

Table 2 Classification of categorical variables as explanatory factors

亚组类别	Categorical variable	亚组水平	Categorical level
有机种植年限	Years of organic planting (years)	3-10、11-15、> 15	
耕地类型	Land use	旱地、水田	Dryland, paddy
作物类型	Crop variety	粮食、茶叶、蔬菜、水果、药材、油料作物	Grain, tea, vegetable, fruit, crude drug, oil crop
常规种植年施药次数	Pesticide application frequency in conventional planting (times/year)	1-5、6-10、11-15、> 15	
功能类群	Arthropod communities	天敌、害虫	Natural enemy, pest

$$R = (S - 1) / \ln A \quad (1)$$

式中,  $S$ 为群落内的物种数。

Pielou均匀度指数( $E$ )用以反映节肢动物群落中不同物种的多度分布的均匀程度:

$$E = H' / \ln S \quad (2)$$

式中,  $H'$ 为Shannon-Wiener多样性指数, 计算公式如下:

$$H' = -\sum (P_i \times \ln P_i) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, S) \quad (3)$$

其中,  $P_i$ 是群落中第*i*个物种的个体数( $N_i$ )与所有物种个体总数( $N$ )的比值。

采用效应值反映实验组相比对照组的变化水平, 即有机种植相比常规, 其节肢动物多样性指数的变化水平。本研究采用反应比( $\ln R$ )来计算效应值 (Rosenberg et al, 2000), 公式如下:

$$\ln R = \ln(X_e / X_c) = \ln X_e - \ln X_c \quad (4)$$

式中,  $X_e$ 和 $X_c$ 分别为一个独立研究中实验组和对照组的平均值。在本研究中,  $X_e$ 为所获取的一项独立研究中有有机种植处理的Margalef丰富度指数、多度或Pielou均匀度指数;  $X_c$ 为常规种植处理的Margalef丰富度指数、多度或Pielou均匀度指数。为了方便地从生物学角度理解和描述结果, 将反应比通过公式(5)转换为变化百分率:

$$V = (\exp(\ln R) - 1) \times 100\% \quad (5)$$

本研究采用随机效应模型, 利用MetaWin2.1软件对数据进行整合分析。因并非所有文献都报道了标准差, 为尽可能多地纳入研究样本, 本研究采用无权分析法(Hedges et al, 1999; Chivenge et al, 2011)。运用靴襻法(bootstrapping)重复取样999次来

计算效应值( $\ln R$ )及其95%置信区间(Rosenberg et al, 2000; 郑凤英等, 2004)。若计算所得效应值均值为正值则表明有机种植相比常规种植可提高节肢动物多样性, 若为负值则有机种植相比常规种植降低了节肢动物的多样性。若效应值的95%置信区间不包含0, 则此效应显著; 若包含0则效应不显著。如果两项效应值的95%置信区间没有重叠, 则可认为这两个因素之间存在显著差异( $P < 0.05$ ) (Chivenge et al, 2011)。在亚组分析中, 当组间异质性( $Q_b$ )的*P*值小于0.05时, 效应值在各因素水平之间存在显著差异。

本研究采用SPSS 20.0对节肢动物多样性的变化量与常规种植年施药次数进行回归分析, 使用GetData软件提取文献图中的数据, 采用Origin 2019软件作图。

## 2 结果

### 2.1 有机种植对节肢动物生物多样性指数的影响

本研究从筛选后的54篇文献中提取了82组有机种植与常规种植节肢动物丰富度数据, 90组多度数据以及52组均匀度数据(图1)。与常规种植相比,

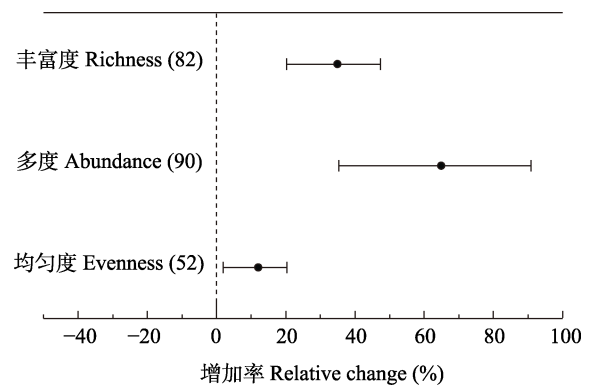


图1 有机种植相比常规种植节肢动物多样性指数的增加率。图中圆点为效应值, 即有机种植相比常规种植其节肢动物多样性指数的变化量, 误差线为效应值的95%置信区间, 括号内的数值为该效应值的样本量。若效应值的95%置信区间未跨越零轴, 则表示该效应与对照相比差异显著。

Fig. 1 The relative change of arthropod biodiversity under organic planting compared with conventional planting. The dots in the figure are the mean effect sizes, which represent the relative change of arthropod diversity under organic planting compared with conventional planting. The error lines indicate the 95% confidence interval (95% CIs) of the mean effect sizes, and the value in brackets is the sample size. Mean effect sizes were considered to be significantly different from the control if their 95% CIs did not cross the zero axis.



有机种植方式下农田节肢动物的丰富度、多度及均匀度指数均有显著提升( $P < 0.05$ ), 分别为34.95%、64.95%及12.09%。

## 2.2 不同影响因素下节肢动物丰富度指数对有机种植响应

由图2A可知, 3年以上的有机种植均可显著提升节肢动物的丰富度; 随有机种植年限的增加, 节肢动物丰富度效应值呈现降低的趋势。当种植年限为3–10年时, 有机种植节肢动物丰富度比常规种植高37.54%; 种植年限为11–15年时, 有机比常规高28.15%; 大于15年时为16.07%, 有机对节肢动物丰富度的提升水平不足3–10年的1/2; 但不同时期的效应值差异不显著( $P > 0.05$ )。在水田或者旱地上进行有机种植, 节肢动物丰富度指数均得到了显著提升, 但耕地类型对提升程度的影响无显著差异( $P > 0.05$ )。种植不同作物类型时节肢动物丰富度对有机种植响应水平为蔬菜 > 茶叶 > 粮食 > 水果 > 油料作物 > 药材。其中, 蔬菜(81.46%)显著高于油料作物(14.66%)和药材(4.91%) ( $P < 0.05$ ); 作物类型为茶叶时, 其效应值(48.86%)是粮食(25.56%)和水果作物(19.54%)的1.9和2.5倍, 但差异不显著( $P > 0.05$ )。

有机种植相比常规种植对节肢动物丰富度指数的提升效果与常规种植农药的施用次数密切相关。当常规种植年施药次数在1–5次时, 有机种植可使节肢动物丰富度提升14.50%; 施药次数为6–10次、11–15次时, 效应值分别为33.65%和35.80%; 常规种植年施药次数 > 15次时, 有机种植对丰富度的提升作用可达220.63%, 分别是年施药1–5次和6–10次分组的15.2倍和6.5倍(图2A,  $P < 0.05$ )。回归分析结果表明, 常规种植年施药次数能解释63%的节肢动物丰富度效应值的变异水平; 常规种植年施药次数每增加1次, 其节肢动物丰富度指数相比有机种植降低13.54% (图3,  $R^2 = 0.63$ ,  $P < 0.01$ )。

## 2.3 不同影响因素下节肢动物多度指数对有机种植响应

相比常规种植, 3年以上的有机种植均可显著提升节肢动物的多度; 种植年限为11–15年时, 节肢动物多度指数效应值(87.79%)高于3–10年(50.31%)和> 15年(61.67%), 但不同年限之间差异不显著( $P > 0.05$ )。在水田上进行有机种植, 节肢动

物多度指数的提高幅度(194.08%)显著高于旱地(41.30%,  $P < 0.05$ ), 约为旱地的4.7倍。种植不同作物类型时节肢动物多度对有机种植响应水平为粮食(86.37%) > 蔬菜(74.14%) > 茶叶(49.06%) > 油料作物(37.82%) > 水果(22.38%), 但水果及油料作物对节肢动物多度指数的提升效果不显著( $P > 0.05$ )。当常规种植年施药次数 < 15次时, 相应有机种植田的节肢动物多度指数比常规种植显著提高36.08%–92.50%; 值得注意的是, 当常规种植年施药次数大于15次时, 有机种植方式对节肢动物多度的提升作用并不显著( $P > 0.05$ ) (图2B)。

## 2.4 不同影响因素下节肢动物均匀度指数对有机种植响应

年限小于15年时有机种植对节肢动物均匀度的提升作用并不显著( $P > 0.05$ ), 大于15年时可使均匀度指数显著提高22.01%。在水田上进行有机种植, 节肢动物均匀度的效应值有高于旱地的趋势, 但差异不显著。种植不同作物类型时节肢动物均匀度对有机种植响应水平为茶叶(30.88%) > 蔬菜(18.55%) > 水果(13.92%) > 药材(12.15%) > 粮食(4.09%) > 油料作物(-3.89%), 但水果、粮食和油料作物对有机种植响应不显著( $P > 0.05$ )。当常规种植年施药次数小于11次时, 有机种植对节肢动物均匀度无显著影响; 大于11次时, 则节肢动物均匀度指数显著提高24.48%–37.07% ( $P < 0.05$ ) (图2C)。由回归分析可知, 常规种植年施药次数能解释33%的节肢动物均匀度效应值的变异水平; 常规种植年施药次数每增加1次, 其节肢动物的均匀度相比有机种植模式会降低2.64% (图4,  $R^2 = 0.33$ ,  $P < 0.01$ )。

## 2.5 不同功能类群节肢动物多样性指数对有机种植响应

根据文献描述和物种取食习性将获取的节肢动物样本划分为天敌类群和害虫类群, 分析其丰富度和多度指数对有机种植响应, 结果表明(表3), 有机种植相比常规种植, 天敌和害虫的丰富度指数分别提升了22.50%和31.03%, 害虫丰富度提升程度虽高于天敌, 但二者差异不显著( $P = 0.45$ )。有机种植相比常规种植, 天敌的多度指数显著提升了71.80%, 害虫则降低了10.46%, 且二者差异显著( $P = 0.001$ )。因此, 相比常规种植, 采用有机种植的管理方式可显著提升节肢动物种群的多样性和天敌

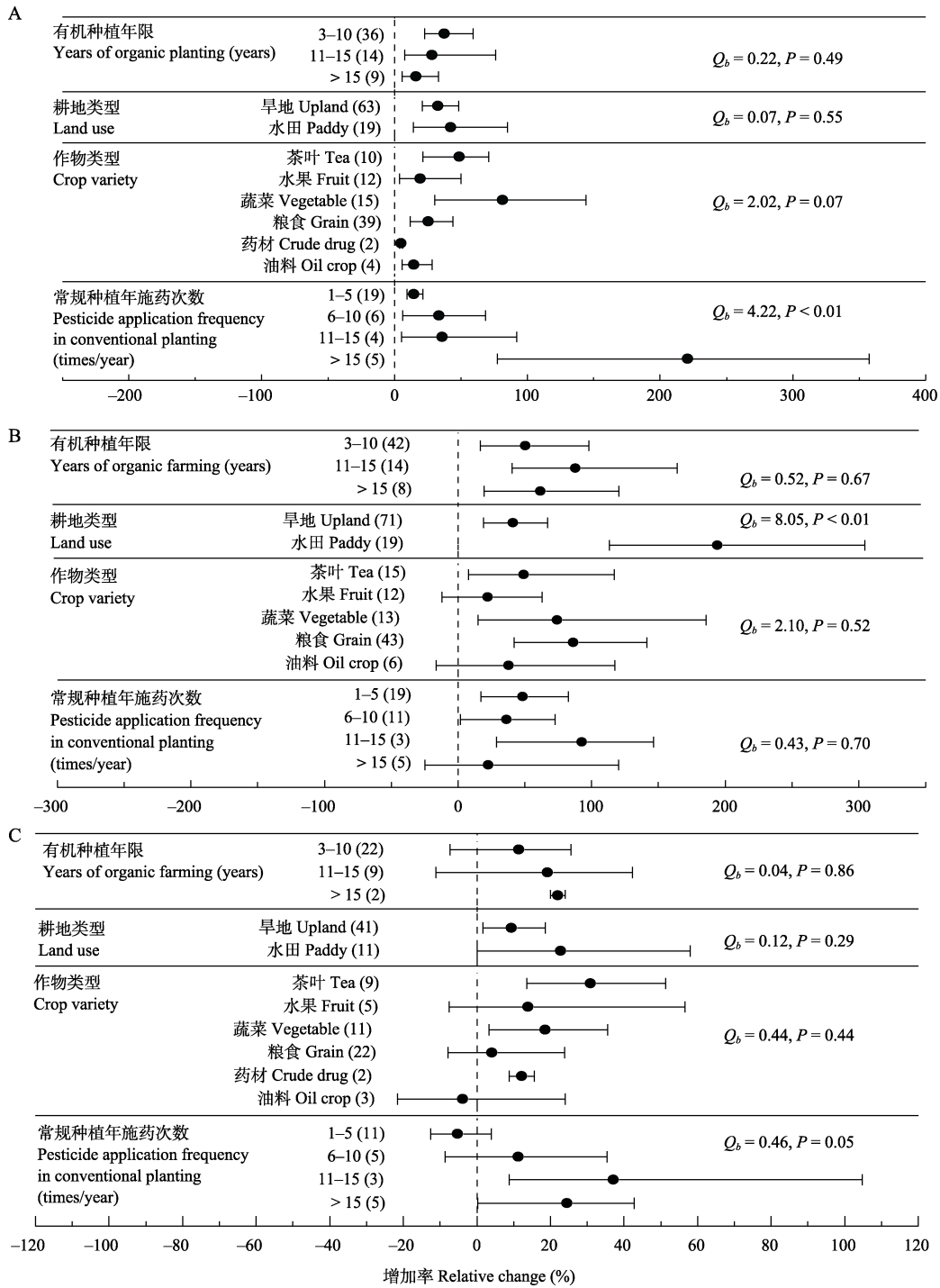


图2 有机种植相比常规种植对节肢动物丰富度(A)、多度(B)、均匀度(C)指数的增加率。图中圆点为效应值,即有机种植相比常规种植节肢动物多样性指数的相对变化百分率,误差线为效应值的95%置信区间,括号内的数值为该效应值的样本量。若效应值的95%置信区间未跨越零轴,则表示该效应与对照相比差异显著;若亚组内不同水平的效应值95%置信区间未重叠,则说明分类水平的差异显著。 $Q_b$  (组间异质性)和P值用来描述不同水平分类因素多样性指数效应值的统计学差异。

Fig. 2 The relative change of arthropod richness (A), abundance (B), and evenness (C) under organic planting compared with conventional planting. The dots in the figure are the mean effect sizes, which represent the relative change of different diversity index (%) under organic planting compared with conventional planting. The error lines indicate the 95% confidence interval (95% CIs) of the mean effect sizes, and the value in brackets is the sample size. Mean effect sizes were considered to be significantly different from the control if their 95% CIs did not cross the zero axis, and were considered to be significantly different if their 95% CIs did not overlap. Between-group heterogeneity ( $Q_b$ ) and the probability ( $P$ ) were used to describe statistical differences in the diversity index responses between different levels of the categorized factors.

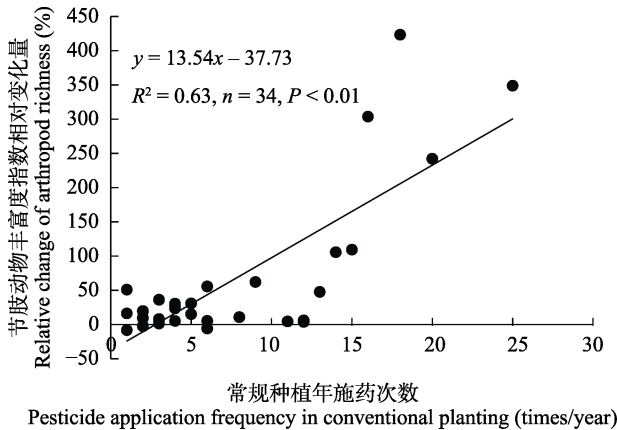


图3 有机种植相比常规种植节肢动物丰富度指数相对变化量与常规种植年施药次数的回归分析

Fig. 3 The relationship between the relative changes of arthropod richness under organic planting compared with conventional planting and the pesticide application frequency in conventional planting

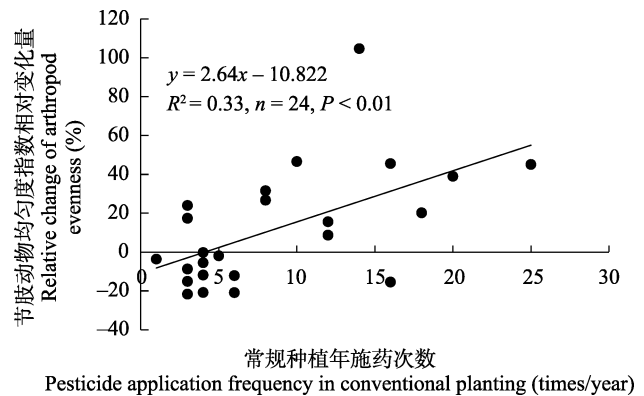


图4 有机种植相比常规种植节肢动物均匀度指数相对变化量与常规种植年施药次数的回归分析

Fig. 4 The relationship between the relative changes of arthropod evenness under organic planting compared with conventional planting and the pesticide application frequency in conventional planting

表3 节肢动物害虫和天敌功能群多样性指数对有机种植响应

Table 3 Responses of arthropod pest and natural enemy subcommunities diversity to organic planting over conventional planting

多样性指数 Diversity index	功能类群 Arthropod communities	总效应值 Total effect size (%)	95%置信区间 95% confidence interval (%)	样本量 Sample size (n)	组间异质性 Between-group heterogeneity ( $Q_b$ )	显著性差异 Probability (P)
丰富度 Richness	天敌 Natural enemy	22.50	13.76–33.62	40	0.81	0.45
	害虫 Pest	31.03	9.22–53.18	18		
多度 Abundance	天敌 Natural enemy	71.80	45.25–105.15	49	5.82	0.001
	害虫 Pest	-10.46	-38.62–28.19	19		

的数量,同时抑制害虫种群数量,降低了害虫种群数量暴发的几率。由于提取的样本中仅有5组为天敌均匀度数据,且未收集到害虫均匀度数据,因此没有对天敌和害虫的均匀度指数对有机种植响应情况进行分析。

### 3 讨论

本研究表明,相比常规种植,有机种植能维持较高的节肢动物丰富度、多度及均匀度,有利于节肢动物群落稳定性的提高和多样性的保护,这与Lichtenberg等(2017)的研究结论一致。有机种植过程中禁止使用化学农药,对农田生态系统的恢复能力与保护作用均显著高于常规农业。常规集约化农业中对化学农药(杀虫剂)的不合理施用会显著降低节肢动物的物种丰富度,甚至导致部分物种灭绝(侯有明等,2001)。孔建等(2001)研究发现,果园常用化学杀虫剂对节肢动物中瓢虫、中华草蛉

(*Chrysopa sinica*)等天敌幼虫的作用是毁灭性的,会造成70%–90%的虫卵无法孵化。常规农业的施药次数频繁,加重了对农田生态系统的人为干扰,导致节肢动物群落结构不稳定及个体数量下降。张清泉等(2014)研究表明,外界干涉越频繁,对农田节肢动物的分布及多样性越不利,致使节肢动物结构趋于单一化。本研究结果显示,只要施用化学农药,常规种植下节肢动物的丰富度指数就会显著降低;施药次数每增加1次,常规种植节肢动物丰富度相比有机种植减少13.54%,均匀度降低2.64%。施药次数若大于11次/年,常规种植的节肢动物均匀度相比有机种植会显著降低;若超过15次/年,常规种植下节肢动物丰富度指数相比有机种植急剧降低,降低程度分别是年施药水平1–5次和6–15次的15倍和6倍。值得注意的是,对照处理农药施用>15次/年时,有机种植对节肢动物多度指数的提升作用不再显著,可能是由于常规田块耐药性强的害虫种群暴发,



导致常规种植节肢动物个体数高于不施用任何化学农药的有机种植(张翼翹和唐振华, 2005; 李浩, 2010<sup>①</sup>)。德国的一项研究表明, 施用农药对植食性节肢动物多度的抑制效果仅能维持两周, 在小麦生育季后期害虫种群密度甚至高于喷施农药之前, 而捕食性节肢动物的多度则显著低于不施用农药的常规小麦(Krauss et al, 2011)。因此, 保护农田生态系统生物多样性, 一方面要推行有机的管理方式, 另一方面在常规种植的管理中应尽可能地减少对农药的施用, 建议不超过15次/年, 最好控制在11次/年以下。

随着农业生物多样性保护越来越受到国际社会的重视, 采用有机农业的理念和技术对常规农业进行生态化改造在农业发达国家和地区被广泛接受和推广(Bommarco et al, 2013)。如英国南部的常规小麦采用生态化措施防治害虫, 减少了农药的使用, 由此降低了与有机农场节肢动物多样性的差距(Moreby et al, 1994); 印度政府大规模推行不施用任何农用化学品的“零预算自然农业”(高磊等, 2021), 德国和荷兰鼓励农民建立多种类型的人工播种的农田边缘带(Marshall et al, 2002)等。目前我国农业生产中对绿肥种植、作物多样化栽培以及非作物生境维护等有机措施的重视和应用程度相比农业发达国家还有一定差距。在实际生产中, 集约化农业往往大面积种植单一作物, 作物生境趋于同质化; 滥用除草剂导致非作物生境的杂草和蜜源植物等植被多样性大大降低(Fritch et al, 2017)。有机农业重视作物的间套作和绿肥轮作, 提倡保留一部分杂草, 引入和镶嵌植物篱笆及灌木丛来区分农田的不同区域, 这些措施增加了有机农田生境中的植被多样性, 为天敌的繁殖、取食等提供了多样化的栖息环境, 保障了农田生态系统中天敌种群的丰富度和数量(Altieri, 1999), 有利于农业害虫的生态化防治。本研究结果也显示有机种植模式下天敌和害虫的丰富度均有显著提升, 天敌多度比常规种植显著提高了71.80%, 而害虫多度则下降了10.46%。大量研究表明, 景观异质性和生境多样性对节肢动物多样性有重要影响(Letourneau et al, 2011; Han et al, 2014)。如有机葡萄园通过构建多样化的行间植被,

蜘蛛种类的丰富度显著高于常规葡萄园(Kolb et al, 2020); 冬闲时种植紫云英的水稻田, 其蜘蛛群落多度明显高于闲田-水稻田(袁伟等, 2010); 在棉田套种玉米、高粱等诱集棉铃虫产卵的作物, 使其集中产卵, 有利于集中诱杀和保护天敌(陆萍等, 2004)。本研究中有有机水田的节肢动物多度显著高于有机旱地, 可能是由于相比旱地, 水田的非作物生境增加了环境异质性、提高了稻田生态系统中的生境多样性与复杂性(刘雨芳等, 2000; 周子杨, 2011<sup>②</sup>)。非作物生境中的植被或杂草可为一些同翅目(如蚜虫)和鞘翅目(如甲虫和象虫)害虫生长和发育提供食物及避难场所(俞晓平等, 1996), 同时, 也为有益节肢动物(如天敌、授粉昆虫)提供了替代猎物或寄主、营养来源和庇护场所(毛润乾等, 2000)。因此, 在农业生产过程中, 维护生境的植物多样性对保护节肢动物的群落多样性具有重要的作用。

从作物类型来看, 在蔬菜和茶叶作物种植体系上进行有机种植, 对节肢动物多样性指数的综合提升效果优于其他作物类型, 尤其是蔬菜。相比常规种植, 有机菜园节肢动物丰富度、多度和均匀度指数显著提升了81.46%、74.14%、18.55%, 有机茶园显著提升48.86%、49.06%、30.88%。近年来我国有机产业呈现快速、稳定的发展态势, 根据《中国有机产品认证与有机产业发展(2019)》, 我国有机种植面积从2005年的46.4万ha上升到2019年的221.5万ha, 增加了约4.8倍, 而其中有机茶叶和蔬菜的种植面积仅为6.6万ha和3.7万ha, 仅占总有机种植面积的2.98%和1.67%。2018年有机茶种植面积占全国茶叶总种植面积的2.38%, 2019年有机蔬菜占全国蔬菜总种植面积的0.08% (<http://zdscxx.moa.gov.cn:8080/nyb/pc/frequency.jsp>), 蔬菜和茶叶的有机种植面积还存在巨大的增长空间。在蔬菜和茶叶这两种作物体系中优先推行有机生产, 树立农田生物多样性保护的样本和典型, 可对农田生物多样性起到示范和推动作用。

总体来说, 有机种植显著提升了农田节肢动物多样性指数, 有助于促进农田害虫的生态化防治。在常规种植中加大对有机和生态化管理措施如减少农药施用、维持生境植物多样性等的应用程度,

① 李浩 (2010) 有机果园与非有机果园节肢动物群落结构及多样性比较. 硕士学位论文, 天津师范大学, 天津.

② 周子杨 (2011) 不同类型稻田非作物生境的节肢动物多样性. 硕士学位论文, 南京农业大学, 南京.





对保护农业生物多样性具有重要的现实意义。我国应完善以绿色生态为导向的农业生态治理补贴制度, 通过加强生态保护补偿等相关政策引导农业生产方式的绿色转型, 以实现保障粮食安全和保护农业生物多样性的双赢目标。本文未对有机种植下节肢动物多样性提升的经济效益进行定量核算, 后续研究可从采用有机管理措施所节约的以及额外支付的成本、授粉昆虫及天敌的增加带来的经济效益等角度进行生态成本与收益的核算和探讨, 为生态补偿政策的制定提供参考。

**致谢:** 对纳入本文的文献研究的各位作者表示诚挚的感谢; 感谢南京师范大学李鹏副教授、河北工程大学张旭珠博士对本文写作内容的指导; 感谢编辑部 and 审稿专家在审稿过程中所提出的宝贵意见!

## ORCID

刘明庆  <https://orcid.org/0000-0001-5448-8273>

陈秋会  <https://orcid.org/0000-0002-1008-6157>

韩笑  <https://orcid.org/0000-0003-3277-3342>

## 参考文献

- Altieri MA (1999) The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 74, 19–31.
- Birkhofer K, Ekroos J, Corlett EB, Smith HG (2014) Winners and losers of organic cereal farming in animal communities across central and northern Europe. *Biological Conservation*, 175, 25–33.
- Bommarco R, Kleijn D, Potts SG (2013) Ecological intensification: Harnessing ecosystem services for food security. *Trends in Ecology & Evolution*, 28, 230–238.
- Chen HJ, Huang ZF, Li RB, Peng ZB, Mai QF, Jiang JS (2005) Connotation, function and conservation of agriculture biological diversity. *Journal of South China University of Tropical Agriculture*, 11(2), 24–27. (in Chinese) [陈海坚, 黄昭奋, 黎瑞波, 彭宗波, 麦全法, 蒋菊生 (2005) 农业生物多样性的内涵与功能及其保护. *华南热带农业大学学报*, 11(2), 24–27.]
- Chivenge P, Vanlauwe B, Six J (2011) Does the combined application of organic and mineral nutrient sources influence maize productivity? A meta-analysis. *Plant and Soil*, 342, 1–30.
- Chu BY, Chen FJ, Ma ZH (2020) Principles of using agricultural biodiversity to control pests and crop diseases. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57, 28–40. (in Chinese with English abstract) [初炳瑶, 陈法军, 马占鸿 (2020) 农业生物多样性控制作物病虫害的方法与原理. *应用昆虫学报*, 57, 28–40.]
- Doles JL, Zimmerman RJ, Moore JC (2001) Soil microarthropod community structure and dynamics in organic and conventionally managed apple orchards in western Colorado, USA. *Applied Soil Ecology*, 18, 83–96.
- Fritch RA, Sheridan H, Finn JA, McCormack S, Ó hUallacháin D (2017) Enhancing the diversity of breeding invertebrates within field margins of intensively managed grassland: Effects of alternative management practices. *Ecology and Evolution*, 7, 9763–9774.
- Gao L, Wang L, Hu FL, Yang LR (2021) Recent progress of agro-biodiversity conservation and implications for agricultural development in China. *Biodiversity Science*, 29, 177–183. (in Chinese with English abstract) [高磊, 王蕾, 胡飞龙, 杨礼荣 (2021) 农业生物多样性保护履约进展及对我国农业发展的启示. *生物多样性*, 29, 177–183.]
- Han P, Niu CY, Desneux N (2014) Identification of top-down forces regulating cotton aphid population growth in transgenic *Bt* cotton in central China. *PLoS ONE*, 9, e102980.
- Hedges LV, Gurevitch J, Curtis PS (1999) The meta-analysis of response ratios in experimental ecology. *Ecology*, 80, 1150–1156.
- Hou YM, Pang XF, Liang GW, You MS (2001) Effect of chemical insecticides on the diversity of arthropods in vegetable fields. *Acta Ecologica Sinica*, 21, 1262–1268. (in Chinese with English abstract) [侯有明, 庞雄飞, 梁广文, 尤民生 (2001) 化学杀虫剂对菜园节肢动物多样性的影响. *生态学报*, 21, 1262–1268.]
- Kolb S, Uzman D, Leyer I, Reineke A, Entling MH (2020) Differential effects of semi-natural habitats and organic management on spiders in viticultural landscapes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 287, 106695.
- Kong J, Wang HY, Zhao BG, Ren YD, Liu YX, Chen HJ, Shan LN, Wang AC (2001) Study on ecological regulation system of the pest control in apple orchard. *Acta Ecologica Sinica*, 21, 789–794. (in Chinese with English abstract) [孔建, 王海燕, 赵白鸽, 任应党, 刘玉霞, 陈汉杰, 单林娜, 王安超 (2001) 苹果园主要害虫生态调控体系的研究. *生态学报*, 21, 789–794.]
- Krauss J, Gallenberger I, Steffan-Dewenter I (2011) Decreased functional diversity and biological pest control in conventional compared to organic crop fields. *PLoS ONE*, 6, e19502.
- Lei XD, Peng CH, Tian DL, Sun JF (2006) Meta-analysis and its application in global change. *Chinese Science Bulletin*, 51, 2587–2597. (in Chinese) [雷相东, 彭长辉, 田大伦, 孙剑峰 (2006) 整合分析(meta-analysis)方法及其在全球变化中的应用研究. *科学通报*, 51, 2587–2597.]
- Letourneau DK, Armbrrecht I, Rivera BS, Lerma JM, Carmona EJ, Daza MC, Escobar S, Galindo V, Gutiérrez C, López SD, Mejía JL, Rangel AMA, Rangel JH, Rivera L, Saavedra

- CA, Torres AM, Trujillo AR (2011) Does plant diversity benefit agroecosystems? A synthetic review. *Ecological Applications*, 21, 9–21.
- Li Q, Chen YQ, Guo X, Chen YL (2006) Arthropod used as bio-indicator to assess the success of ecological restoration. *Journal of Central South Forestry University*, 26, 117–122. (in Chinese with English abstract) [李巧, 陈又清, 郭萧, 陈彦林 (2006) 节肢动物作为生物指示物对生态恢复的评价. *中南林学院学报*, 26, 117–122.]
- Lichtenberg EM, Kennedy CM, Kremen C, Batáry P, Berendse F, Bommarco R, Bosque-Pérez NA, Carvalheiro LG, Snyder WE, Williams NM, Winfree R, Klatt BK, Åström S, Benjamin F, Brittain C, Chaplin-Kramer R, Clough Y, Danforth B, Diekötter T, Eigenbrode SD, Ekroos J, Elle E, Freitas BM, Fukuda Y, Gaines-Day HR, Grab H, Gratton C, Holzschuh A, Isaacs R, Isaia M, Jha S, Jonason D, Jones VP, Klein AM, Krauss J, Letourneau DK, MacFadyen S, Mallinger RE, Martin EA, Martinez E, Memmott J, Morandin L, Neame L, Otieno M, Park MG, Pfiffner L, Pockock MJO, Ponce C, Potts SG, Poveda K, Ramos M, Rosenheim JA, Rundlöf M, Sardiñas H, Saunders ME, Schon NL, Sciligo AR, Sidhu CS, Steffan-Dewenter I, Tscharrnke T, Veselý M, Weisser WW, Wilson JK, Crowder DW (2017) A global synthesis of the effects of diversified farming systems on arthropod diversity within fields and across agricultural landscapes. *Global Change Biology*, 23, 4946–4957.
- Liu YF, Zhang GR, Gu DX (2000) Effect and the acting mechanisms of the habitats and vegetational diversity on arthropod community in agroecosystem. *Journal of Xiangtan Normal University (Social Science Edition)*, 21(6), 74–78. (in Chinese) [刘雨芳, 张古忍, 古德祥 (2000) 农田生态系统中生境与植被多样性对节肢动物群落的影响及其作用机制探讨. *湘潭师范学院学报(社会科学版)*, 21(6), 74–78.]
- Lu P, Mao NH, Liu B (2004) Core techniques and measures of plant protection in organic agriculture. *China Plant Protection*, 24(4), 36–39. (in Chinese) [陆萍, 冒乃和, 刘波 (2004) 有机农业植物保护的核心技术和措施. *中国植保导刊*, 24(4), 36–39.]
- Mao RQ, Zhang WQ, Zhang GR, Gu DX (2000) Studies on the structure of egg-parasitoid community of rice planthopper in non-rice habitat. *Natural Enemies of Insects*, 22, 171–176. (in Chinese with English abstract) [毛润乾, 张文庆, 张古忍, 古德祥 (2000) 非稻田生境中稻飞虱卵寄生蜂群落结构研究. *昆虫天敌*, 22, 171–176.]
- Marshall J, Baudry J, Burel F, Joenje W, Gerowitt B, Paoletti M, Thomas G, Kleijn D, Le Coeur D, Moonen C (2002) Field boundary habitats for wildlife, crop, and environmental protection. In: *Landscape Ecology in Agroecosystems Management* (ed. Marshall J), pp. 219–248. CRC Press, Washington, D. C.
- Moreby SJ, Aebischer NJ, Southway SE, Sotherton NW (1994) A comparison of the flora and arthropod fauna of organically and conventionally grown winter wheat in southern England. *Annals of Applied Biology*, 125, 13–27.
- Morente M, Campos M, Ruano F (2018) Evaluation of two different methods to measure the effects of the management regime on the olive-canopy arthropod community. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 259, 111–118.
- Pan Y, Xi YG, Tian W, Zhou KX, Chen QH, Gao JX (2020) Research status and hotspot analysis of international organic agriculture biodiversity research based on bibliometrics. *Journal of Agro-Environment Science*, 39, 1429–1441. (in Chinese with English abstract) [潘扬, 席运官, 田伟, 周可新, 陈秋会, 高吉喜 (2020) 基于文献计量的国际有机农业生物多样性研究现状与热点分析. *农业环境科学学报*, 39, 1429–1441.]
- Peng SL, Zheng FY (1999) Introduction of MetaWin software. *Soil and Environmental Sciences*, 8, 295–299. (in Chinese with English abstract) [彭少麟, 郑凤英 (1999) Meta分析及MetaWin软件. *土壤与环境*, 8, 295–299.]
- Qian YQ, Ma KP (1994) *Principles and Methods of Biodiversity Research*. China Science & Technology Press, Beijing. (in Chinese) [钱迎倩, 马克平 (1994) 生物多样性研究的原理与方法. 中国科学技术出版社, 北京.]
- Rosenberg MS, Adams DC, Gurevitch J (2000) *Statistical Software for Meta-Analysis, version 2.0*. Sinauer Associates, Sunderland, MA, USA.
- State Administration for Market Regulation, China Agricultural University (2019) *China Organic Product Certification and Organic Industry Development (2019)*. China Agricultural Science and Technology Press, Beijing. (in Chinese) [国家市场监督管理总局, 中国农业大学 (2019) 中国有机产品认证与有机产业发展(2019). 中国农业科学技术出版社, 北京.]
- Xing SW, Zhu H, Ma RJ, Du YQ, Sun YJ, Zha GC (2017) Effects of different habitats and management on the spider communities in tea plantations. *Acta Ecologica Sinica*, 37, 4236–4246. (in Chinese with English abstract) [邢树文, 朱慧, 马瑞君, 杜颖青, 孙延杰, 查广才 (2017) 不同生境条件与管理方式对茶园蜘蛛群落结构及多样性的影响. *生态学报*, 37, 4236–4246.]
- Yu XP, Hu C, Heong KL (1996) The effects of non-crop habitats on crop pests and their natural enemies. *Chinese Journal of Biological Control*, 12(3), 130–133. (in Chinese) [俞晓平, 胡萃, Heong KL (1996) 非作物生境对农业害虫及其天敌的影响. *中国生物防治学报*, 12(3), 130–133.]
- Yuan W, Liu H, Zhang SX, Li WY (2010) Evaluation of communities of insect pests and natural enemies in organic rice fields of Changjiang Farm. *Acta Agriculturae Shanghai*, 26, 132–136. (in Chinese with English abstract) [袁伟, 刘洪, 张士新, 黎伟裕 (2010) 长江农场有机稻田害虫与天敌群落评价. *上海农业学报*, 26, 132–136.]
- Zhang QQ, Wang HS, Qin BR, Xie YL, Huang CY, Wang F, Wang KX (2014) Study on community structure and

黄方倩等: 有机种植对农田节肢动物多样性影响的整合分析

diversity of arthropods in ecological rice paddy fields. *China Plant Protection*, 34(4), 19–24. (in Chinese with English abstract) [张清泉, 王华生, 覃保荣, 谢义灵, 黄超燕, 王峰, 王凯学 (2014) 生态稻田节肢动物群落结构及其多样性研究. *中国植保导刊*, 34(4), 19–24.]

Zhang R, Zhao ZH, He DH, Wang F, Zhang ZS, Wang XP (2010) The structure and dynamics of arthropod communities in Chinese wolfberry fields under different disturbances. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 2656–2664. (in Chinese with English abstract) [张蓉, 赵紫华, 贺达汉, 王芳, 张宗山, 王新谱 (2010) 不同干扰条件下枸杞园节肢动物群落结构与动态. *生态学报*, 30, 2656–2664.]

Zhang YX, Tang ZH (2005) Current status of arthropod resistance development. *World Pesticide*, 27(4), 1–6. (in Chinese) [张翼翹, 唐振华 (2005) 节肢动物抗药性发展的现状. *世界农药*, 27(4), 1–6.]

Zheng FY, Lu HF, Peng SL (2004) Non-parametric test for meta-analysis: Application of resampling tests. *Ecology and Environment*, 13, 616–618. (in Chinese with English abstract) [郑凤英, 陆宏芳, 彭少麟 (2004) 整合分析中的非参数检验: 重复取样检验法的实例应用. *生态环境*, 13, 616–618.]

(责任编辑: 傅声雷 责任编辑: 闫文杰)

## 附录 Supplementary Material

### 附录1 本研究纳入的文献

Appendix 1 The literature included in the meta-analysis

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021243-1.pdf>

## 附录1 本研究纳入的文献

### Appendix 1 The literature included in the meta-analysis

- Alvarez T, Frampton GK, Goulson D (2001) Epigeic Collembola in winter wheat under organic, integrated and conventional farm management regimes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 83, 95–110.
- Caprio E, Nervo B, Isaia M, Allegro G, Rolando A (2015) Organic versus conventional systems in viticulture: Comparative effects on spiders and carabids in vineyards and adjacent forests. *Agricultural Systems*, 136, 61–69.
- Chen HF, Li KS, Yu P, Huang JH (2015) Analysis on arthropod community structure parameters in paddy fields by the yellow board trap sampling. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 35, 447–450. (in Chinese with English abstract) [陈洪凡, 李快生, 余鹏, 黄建华 (2015) 黄板诱集法取样下稻田节肢动物群落结构特征参数分析. 山西农业大学学报(自然科学版), 35, 447–450.]
- Chen HF, Liang YY, Ye DP, Lan B, Li XM, Yang YQ (2017) Analysis of the arthropod community composition in paddy fields by sweep net sampling. *Journal of Anhui Agricultural University*, 44, 1124–1130. (in Chinese with English abstract) [陈洪凡, 梁玉勇, 叶德萍, 兰波, 李湘民, 杨迎青 (2017) 扫网法取样下稻田节肢动物群落组成分析. 安徽农业大学学报, 44, 1124–1130.]
- Doles JL, Zimmerman RJ, Moore JC (2001) Soil microarthropod community structure and dynamics in organic and conventionally managed apple orchards in Western Colorado, USA. *Applied Soil Ecology*, 18, 83–96.
- Drinkwater LE, Letourneau DK, Workneh F, van Bruggen AHC, Shennan C (1995) Fundamental differences between conventional and organic tomato agroecosystems in California. *Ecological Applications*, 5, 1098–1112.
- Dritschilo W, Erwin TL (1982) Responses in abundance and diversity of cornfield carabid communities to differences in farm practices. *Ecology*, 63, 900–904.
- Dritschilo W, Wanner D (1980) Ground beetle abundance in organic and conventional corn fields. *Environmental Entomology*, 9, 629–631.
- Feber RE, Bell J, Johnson PJ, Firbank LG, MacDonald DW (1998) The effects of organic farming on surface-active spider (Araneae) assemblages in wheat in southern England, UK. *Journal of Arachnology*, 26, 190–202.
- Froidevaux JSP, Louboutin B, Jones G (2017) Does organic farming enhance biodiversity in Mediterranean vineyards? A case study with bats and arachnids. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 249, 112–122.
- Gkissakis V, Volakakis N, Kollaros D, Bãrberi P, Kabourakis EM (2016) Soil arthropod community in the olive agroecosystem: Determined by environment and farming practices in different management systems and agroecological zones. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 218, 178–189.
- Gu SS, Hu QL, Gong ZH, Yang ZX, Li J, Tan L (2019) Community structure of arthropods in tea plantations under different management modes. *Guizhou Agricultural Sciences*, 47, 31–35. (in Chinese with English abstract) [顾松松, 胡秋龙, 龚志华, 杨中侠, 李娟, 谭琳 (2019) 不同管理模式下茶园节肢动物的群落结构. 贵州农业科学, 47, 31–35.]
- Hadjicharalampous E, Kalburtji KL, Mamolos AP (2002) Soil arthropods (Coleoptera, Isopoda) in organic and conventional agroecosystems. *Environmental Management*, 29, 683–690.
- Han BY (2005) Difference in dynamic and structure of spider communities in organic and non-pollution and common tea gardens. *Acta Arachnologica Sinica*, 14, 104–107. (in Chinese with English abstract) [韩宝瑜 (2005) 有机、无公害和普通茶园蜘蛛群落组成及动态差异. 蛛形学报, 14, 104–107.]



黄方倩, 王超, 刘明庆, 陈秋会, 韩笑, 王磊, 席运官, 张纪兵 (2022) 有机种植对农田节肢动物多样性影响的整合分析. 生物多样性, 30, 21243. <https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2021243>

- Han BY, Cui L, Dong WX (2006) The effect of farming methods in organic, safety, and common tea gardens on the composition of arthropod communities and the abundances of main pests. *Acta Ecologica Sinica*, 26, 1438–1443. (in Chinese with English abstract) [韩宝瑜, 崔林, 董文霞 (2006) 有机、无公害和普通茶园管理方式对节肢动物群落和主要害虫的影响. *生态学报*, 26, 1438–1443.]
- Han BY, Zhou P, Cui L, Zhou XG, Xia Y (2007) Impact of farming methods and tea garden habitats on population density of *Ectopis oblique* and its main natural enemies. *Acta Phytophylacica Sinica*, 34, 15–21. (in Chinese with English abstract) [韩宝瑜, 周鹏, 崔林, 周孝贵, 夏艳 (2007) 不同管理方式的茶园生境中茶尺蠖及其天敌密度的差异. *植物保护学报*, 34, 15–21.]
- Han Y, Dai PP, Li X, Song X, Li J, Liu YH (2015) Effects of organic farming on diversity of arthropods in farmlands of North China plain in summer. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 31, 697–703. (in Chinese with English abstract) [韩印, 戴漂漂, 李想, 宋潇, 李季, 刘云慧 (2015) 华北平原有机农业对夏季农田节肢动物多样性的影响. *生态与农村环境学报*, 31, 697–703.]
- Hesler LS, Grigarick AA, Orazo MJ, Palrang AT (1993) Arthropod fauna of conventional and organic rice fields in California. *Journal of Economic Entomology*, 86, 149–158.
- Hou YM, Pang XF, Liang GW, You MS (2001) Effect of chemical insecticides on the diversity of arthropods in vegetable fields. *Acta Ecologica Sinica*, 21, 1262–1268. (in Chinese with English abstract) [侯有明, 庞雄飞, 梁广文, 尤民生 (2001) 化学杀虫剂对菜田节肢动物多样性的影响. *生态学报*, 21, 1262–1268.]
- Huang XC (2011) Arthropod biodiversity in paddy fields under different management regimes. Master dissertation, Nanjing Agricultural University, Nanjing. (in Chinese with English abstract) [黄先才 (2011) 不同管理模式稻田节肢动物多样性研究. 硕士学位论文, 南京农业大学, 南京.]
- Huang ZE, Du XG, Dong M, Yang DP, Zhang LD (2004) Effects of organic management on the stability of arthropods in organic tea gardens. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 20, 57–59, 98. (in Chinese with English abstract) [黄正恩, 杜相革, 董民, 杨东鹏, 张禄达 (2004) 有机管理对茶园节肢动物群落稳定性的影响. *中国农学通报*, 20, 57–59, 98.]
- Isaia M, Bona F, Badino G (2006) Influence of landscape diversity and agricultural practices on spider assemblage in Italian vineyards of langa astigiana (northwest Italy). *Environmental Entomology*, 35, 297–307.
- Kolb S, Uzman D, Leyer I, Reineke A, Entling MH (2020) Differential effects of semi-natural habitats and organic management on spiders in viticultural landscapes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 287, 106695.
- Krauss J, Gallenberger I, Steffan-Dewenter I (2011) Decreased functional diversity and biological pest control in conventional compared to organic crop fields. *PLoS ONE*, 6, e19502.
- Letourneau DK, Goldstein B (2001) Pest damage and arthropod community structure in organic vs. conventional tomato production in California. *Journal of Applied Ecology*, 38, 557–570.
- Li H (2010) The comparison of arthropod community structure and diversity between the organic orchard and non-organic orchard. Master dissertation, Tianjin Normal University, Tianjin. (in Chinese with English abstract) [李浩 (2010) 有机果园与非有机果园节肢动物群落结构及多样性比较. 硕士学位论文, 天津师范大学, 天津.]
- Li ZQ, Liang GW, Cen YJ, Zeng L (2009) Roles of organic management in restoration of arthropod community diversity in Citrus orchard. *Chinese Journal of Ecology*, 28, 1515–1519. (in Chinese with English abstract) [李志强, 梁广文, 岑伊静, 曾玲 (2009) 有机管理对柑橘园节肢动物群落多样性恢复的作用. *生态学杂志*, 28, 1515–1519.]
- Lin J, Zou W, Wang SJ, Lin NQ (2008) A preliminary investigation on the arthropod community at three plantations in Fu'an. *Entomological Journal of East China*, 17, 194–199. (in Chinese with English abstract) [林瑾, 邹武, 王水金, 林乃铨 (2008)

黄方倩, 王超, 刘明庆, 陈秋会, 韩笑, 王磊, 席运官, 张纪兵 (2022) 有机种植对农田节肢动物多样性影响的整合分析. 生物多样性, 30, 21243. <https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2021243>

福安三种不同茶园节肢动物群落的消长动态调查. 华东昆虫学报, 17, 194–199.]

Liu JH (2017) Contrasting arthropod communities in wolfberry orchards of different management regimes in northwestern China. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 54, 595–605.

Mao M, Zhang X, Wang L, Xiao XJ, Wang H, Li HX, Jiao JG, Wang X (2019) Survey on soil fauna diversity under organic farming. *Soils*, 51, 698–707. (in Chinese with English abstract) [毛妙, 张欣, 王磊, 肖兴基, 王辉, 李辉信, 焦加国, 王霞 (2019) 有机种植模式土壤动物多样性的调查研究. *土壤*, 51, 698–707.]

Moreby SJ, Aebischer NJ, Southway SE, Sotherton NW (1994) A comparison of the flora and arthropod fauna of organically and conventionally grown winter wheat in southern England. *Annals of Applied Biology*, 125, 13–27.

Morente M, Campos M, Ruano F (2018) Evaluation of two different methods to measure the effects of the management regime on the olive-canopy arthropod community. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 259, 111–118.

Pang DH, Xiao RL, Hou BH, Shan WX, Chen P (2010) Effect of ecological management on arthropod community structure and diversity in hilly tea plantation. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 18, 1272–1276. (in Chinese with English abstract) [庞冬辉, 肖润林, 侯柏华, 单武雄, 陈佩 (2010) 生态管理对茶园节肢动物群落结构和多样性的影响. *中国生态农业学报*, 18, 1272–1276.]

Pfiffner L, Luka H (2003) Effects of low-input farming systems on carabids and epigeal spiders—A paired farm approach. *Basic and Applied Ecology*, 4, 117–127.

Pfiffner L, Niggli U (1996) Effects of bio-dynamic, organic and conventional farming on ground beetles (Col. Carabidae) and other epigeal arthropods in winter wheat. *Biological Agriculture & Horticulture*, 12, 353–364.

Ponce C, Bravo C, León DGD, Magaña M, Alonso JC (2011) Effects of organic farming on plant and arthropod communities: A case study in Mediterranean dryland cereal. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 141, 193–201.

Ruano F, Lozano C, Garcia P, Pena A, Tinaut A, Pascual F, Campos M (2004) Use of arthropods for the evaluation of the olive-orchard management regimes. *Agricultural and Forest Entomology*, 6, 111–120.

Rubens PDB, Ligia SR, Isabelle CSM, Miriany DOP, Ana CBDL, Claudio GDS, Jaciara MPES, João GDC, Elio CG (2018) Diversity of insects in conventional and organic tomato crops (*Solanum lycopersicum* L., Solanaceae). *African Journal of Agricultural Research*, 13, 460–469.

Santos LAOD, Naranjo-Guevara N, Fernandes OA (2017) Diversity and abundance of edaphic arthropods associated with conventional and organic sugarcane crops in Brazil. *Florida Entomologist*, 100, 134–144.

Santos SAP, Pereira JA, Torres LM, Nogueira AJA (2007) Evaluation of the effects, on canopy arthropods, of two agricultural management systems to control pests in olive groves from north-east of Portugal. *Chemosphere*, 67, 131–139.

Sean Clark M (1999) Ground beetle abundance and community composition in conventional and organic tomato systems of California's Central Valley. *Applied Soil Ecology*, 11, 199–206.

Tan JC, Deng X, Yuan ZM (1998) Community structure of insects and spiders in different types of tea plantation. *Acta Ecologica Sinica*, 18, 289–294. (in Chinese with English abstract) [谭济才, 邓欣, 袁哲明 (1998) 不同类型茶园昆虫、蜘蛛群落结构分析. *生态学报*, 18, 289–294.]

Vitanović E, Ivezić M, Kačić S, Katalinić M, Durbešić P, Igre Barčić J (2018) Arthropod communities within the olive canopy as bioindicators of different management systems. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 16, e0301. DOI:10.5424/sjar/2018162-12385.

Wang CY, Wang G, Wan SW, Qin P (2007) Effects of organic and conventional farming systems on farmland biodiversity. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 23, 75–80. (in Chinese with English abstract) [王长永, 王光, 万树文, 钦佩 (2007) 有

黄方倩, 王超, 刘明庆, 陈秋会, 韩笑, 王磊, 席运官, 张纪兵 (2022) 有机种植对农田节肢动物多样性影响的整合分析. 生物多样性, 30, 21243. <https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2021243>

机农业与常规农业对农田生物多样性影响的比较研究进展. 生态与农村环境学报, 23, 75–80.]

Wang L, Li G, Xi YG, Chen QH, Li Y, Tian W, Zhang C, Li P, Yang H, Zhang JB, Xiao XJ (2018) Investigation on animal diversity in different paddy fields with organic farming: A case study in Daizhuang of Jurong County, Jiangsu Province, China.

*Journal of Ecology and Rural Environment*, 34, 614–621. (in Chinese with English abstract) [王磊, 李刚, 席运官, 陈秋会,

李妍, 田伟, 张弛, 李鹏, 杨豪, 张纪兵, 肖兴基 (2018) 有机种植方式对稻田动物多样性的影响: 以句容戴庄为例. 生态与农村环境学报, 34, 614–621.]

Wang XW, Ding XH, Tu EX, Fu KY, He J, Ban XL, Fu WJ, Guan ZJ, Liu W, Guo WC (2017) The structure and diversity of arthropod communities in paddy fields under different management models in Yili river valley. *Xinjiang Agricultural Sciences*,

54, 1875–1886. (in Chinese with English abstract) [王小武, 丁新华, 吐尔逊, 付开赞, 何江, 班小莉, 付文君, 关志坚,

刘文, 郭文超 (2017) 伊犁河谷不同管理模式稻田节肢动物群落结构及多样性. 新疆农业科学, 54, 1875–1886.]

Xing SW, Zhu H, Ma RJ, Du YQ, Sun YJ, Zha GC (2017) Effects of different habitats and management on the spider communities in tea plantations. *Acta Ecologica Sinica*, 37, 4236–4246. (in Chinese with English abstract) [邢树文, 朱慧, 马瑞君, 杜颖

青, 孙延杰, 查广才 (2017) 不同生境条件与管理方式对茶园蜘蛛群落结构及多样性的影响. 生态学报, 37, 4236–4246.]

Yang GQ, Wu JC, Zhang SX, Zhang JH, Yang YQ, Wang HQ (2004) The relationship among structures, intrinsic rate of increase of functional guilds, and link numbers of arthropod community in three types of rice field under organic rice production system. *Acta Ecologica Sinica*, 24, 686–692. (in Chinese with English abstract) [杨国庆, 吴进才, 张士新, 张建汉, 杨衍

强, 王洪全 (2004) 三种类型稻田节肢动物群落结构、亚群落内禀增长率与链节数的关系. 生态学报, 24, 686–692.]

Zeng LB, Cheng Y, Yan Z, Ma J, Ren SX, Wei L, Xue ZD (2016) Effects of different control strategies on the structure of the arthropod community in the cauliflower field. *Scientia Agricultura Sinica*, 49, 2965–2976. (in Chinese with English abstract)

[曾粮斌, 程毅, 严准, 马骏, 任顺祥, 魏林, 薛召东 (2016) 不同防治措施对花椰菜地节肢动物群落结构的影响. 中国农业科学, 49, 2965–2976.]

Zeng MS, Wu GY, Wang QS, Yu SH (2008) Preliminary study on Fujian's spider species and their community population fluctuation in tea plantations. *Guizhou Science*, 26, 34–38. (in Chinese with English abstract) [曾明森, 吴光远, 王庆森, 余

素红 (2008) 福建茶园蜘蛛种类与种群动态的初步研究. 贵州科学, 26, 34–38.]

Zeng ZA, Liang GW (2008) The impact of different management methods on arthropod community in litchi orchards. *Journal of Environmental Entomology*, 30, 16–21. (in Chinese with English abstract) [曾赞安, 梁广文 (2008) 不同管理方式下荔枝

园节肢动物群落的调查. 环境昆虫学报, 30, 16–21.]

Zhang R, Zhao ZH, He DH, Wang F, Zhang ZS, Wang XP (2010) The structure and dynamics of arthropod communities in Chinese wolfberry fields under different disturbances. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 2656–2664. (in Chinese with English abstract) [张

蓉, 赵紫华, 贺达汉, 王芳, 张宗山, 王新谱 (2010) 不同干扰条件下枸杞园节肢动物群落结构与动态. 生态学报, 30, 2656–2664.]

Zhong J, Dai LD, Mao JH, Yao L, Chen Y (2016) A study of insect pests and natural enemies in different tea gardens in Mingshan. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 37, 97–101. (in Chinese with English abstract) [钟金, 代立东, 毛建

辉, 姚琳, 陈宇 (2016) 名山不同类型茶园害虫及天敌研究. 四川林业科技, 37, 97–101.]

Zhou ZY (2011) Arthropod diversity in non-crop habitats at margins of paddy fields of different types. Master dissertation, Nanjing Agricultural University, Nanjing. (in Chinese with English abstract) [周子杨 (2011) 不同类型稻田非作物生境的节肢动

物多样性. 硕士学位论文, 南京农业大学, 南京.]



•保护与治理对策•

# 我国国家公园自然资源管理探讨

李款<sup>1,2,3,4\*</sup>, 李发祥<sup>1</sup>

1. 三江源国家公园管理局, 西宁 810000; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 青海省治多县索加乡人民政府, 青海玉树 815000

**摘要:** 2017年, 我国在部分国家公园体制试点区启动了国有自然资源资产管理体制试点, 旨在为国家公园等重要生态空间自然资源管理积累经验。2021年10月12日, 习近平主席宣布设立第一批国家公园。因此, 探讨国家公园的自然资源管理具有重要的现实意义, 可为未来资源环境领域的管理提供参考。本文对国家公园自然资源管理体制试点开展了调研。研究发现, 国家公园自然资源管理工作在机构设置、地方立法、权责划分等方面取得进展。我国已建立中央垂直管理、中央和地方共同管理、地方管理等国家公园自然资源管理体制, 各省级立法机构共出台了5部国家公园地方性法规, 为国家公园自然资源管理提供了法律依据。此外, 南山国家公园管理局和武夷山国家公园管理局印发了权责清单, 为国家公园自然资源管理职责划分做了有益探索。但还存在一些问题, 如国家公园自然资源管理体制映射关系复杂、自然资源权属需进一步厘清、顶层设计需进一步加快等。为此, 本文从构建集中统一管理体制、完善国家公园法治体系、厘清自然资源权属关系、有序开展社区人口转移等方面提出了建议, 以期为国家公园自然资源管理提供参考。

**关键词:** 国家公园; 自然资源管理; 管理体制; 土地权属

李款, 李发祥 (2022) 我国国家公园自然资源管理探讨. 生物多样性, 30, 21179. doi: 10.17520/biods.2021179.

Li K, Li FX (2022) Natural resource management of China's national parks. Biodiversity Science, 30, 21179. doi: 10.17520/biods.2021179.

## Natural resource management of China's national parks

Kuan Li<sup>1,2,3,4\*</sup>, Faxiang Li<sup>1</sup>

1 *Three-River-Source National Park Service, Xining 810007*

2 *Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*

3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

4 *People's Government of Suojia Town, Zhiduo County, Qinghai Province, Yushu, Qinghai 815000*

### ABSTRACT

**Background & Aims:** In 2017, China launched a pilot state-owned natural resource asset management system in some pilot areas of the national park system, aiming to accumulate experience in the management of important ecological space natural resources such as national parks. On October 12, 2021, President Xi Jinping announced the creation of the first national parks. Therefore, it is of great practical significance to explore the management of natural resources in national parks, and it can provide reference for the future management of resources and environment. In order to summarize the pilot experience and promote the management of natural resources assets in national parks, we investigate the pilot of natural resource management system in national parks.

**Progress:** The results indicated that the management of natural resources in the national park pilots has made progress in the institutional setup, local legislation, and with distribution of powers and responsibilities. In terms of the organizational framework, China has built three forms of national park management, including central vertical management, central and local joint management, and local management. The provincial legislature issued five laws and regulations for national parks that inform matters such as natural resources investigation and registration, natural resources inventory, and the prohibited behavior of natural resources, which provides a legal basis for national park managers. The Nanshan, Shennongjia and Wuyishan national park services have issued a list of powers and responsibilities to clarify the division of responsibilities. However, there are still some problems with the national parks,

收稿日期: 2021-05-08; 接受日期: 2021-10-01

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: likuan@nieer.ac.cn



such as the complex mapping relationship of natural resource management system in national parks, the need for further rationalization of natural resource tenure, the need to speed up the top-level design of the parks, and more.

**Suggestions:** Based on our results, we propose the following management suggestions: (1) building a centralized and unified management system to uniformly perform the duties of owners of natural resources, land use regulation, ecological protection, and restoration in national parks; (2) improving the legal system for national parks; (3) clarifying the ownership relationship of natural resources; (4) implementing community population transfer in an orderly manner.

**Key words:** national park; natural resource management; organization framework; land ownership

党的十八届三中全会提出了健全国家自然资源资产管理体制和建立国家公园体制两项改革任务，并开展了试点工作(新华社, 2013)。实践证明，地方试点探索是推动改革的基本动力之一，但需要在中央和地方有效互动并形成相互支撑的前提下才能够有效发挥作用。一般来讲，中央设立目标和原则，地方采取多元化实践来检验，并促进政策调整完善。

自然资源和国家公园体制改革是生态文明建设的重要内容，也是央地互动的重要领域(秦天宝和刘彤彤, 2020)。一方面，国家公园自然资源属于国家战略性自然资源使用和保护基本公共服务范畴，应当由中央行使国家公园财政事权；另一方面，国家公园的本质是生态保护和经济发展平衡的议题，具有很强的地方属性。

2021年10月12日，习近平主席宣布设立第一批国家公园。因此，开展国家公园自然资源管理央地关系探讨具有较强现实意义，能够为资源环境领域未来管理提供参考。

## 1 中央政策目标和地方实践

中央在国家公园体制试点区开展了国有自然资源资产管理体制试点，同时快速推进党和国家机构改革，建立了自然资源管理体制(韩受惠, 2019)。但在实际运行过程中，国家层面尚未建立国家公园等重要生态空间的自然资源管理体制，省级层面国家公园管理机构未能有效履行国有自然资源资产所有者职责。因此，根据试点经验完善自然资源管理体制，建立切合实际的国家公园自然资源管理体系成为当前十分紧迫的问题(周戡等, 2020)。

### 1.1 国家公园自然资源管理政策演进

2017年，《建立国家公园体制总体方案》提出，“统筹考虑生态系统功能重要程度、生态系统功能外溢效应、是否跨省级行政区和管理效率等因素，

国家公园内全民所有自然资源资产所有权由中央政府和省级政府分级行使。其中，部分国家公园的全民所有自然资源资产所有权由中央政府直接行使，其他的委托省级政府代理行使。条件成熟时，逐步过渡到国家公园内全民所有自然资源资产所有权由中央政府直接行使”。2019年，《关于统筹推进自然资源资产产权制度改革的指导意见》对以上内容再次予以明确，并提出将国家公园全民所有自然资源资产所有权代表行使主体登记为国务院自然资源主管部门。2020年，《自然资源领域中央与地方财政事权和支出责任划分改革方案》提出，“根据建立国家公园体制试点进展情况，将国家公园建设与管理的具休事务，分类确定为中央与地方财政事权，中央与地方分别承担相应的支出责任”。

从政策演进来看，中央主要聚焦于确定国家公园国有自然资源所有权主体。由于构建自然资源管理体系是一项敏感而细致的政治和法制系统工程，中央尚未完全明确管理体制构建、机构职责划分、事权支出责任等内容，需要丰富的地方实践经验和更多的央地互动予以支撑(孙鸿雁和张小鹏, 2019)。

### 1.2 国家公园自然资源管理实践

目前我国共有10个国家公园体制试点(欧阳志云等, 2021)。试点期间，各个试点区的自然资源管理主要围绕确立管理主体、推动相关立法、明确职责划分三个方面开展实践。

在确定国家公园管理主体方面，我国构建了形式多样的国家公园自然资源管理体制，大致可以归为三类：一是由中央政府委托国家林业和草原局(国家公园管理局)管理，具体由国家公园管理机构行使。如东北虎豹国家公园管理局(东北虎豹国家公园国有自然资源管理局)，二是中央政府委托省政府管理，具体由国家公园管理机构行使，如三江源国家公园管理局(三江源国有自然资源资产管理局)。三是地方政府委托国家公园管理机构行使，如

神农架国家公园管理局。

在推动相关立法方面，各省级立法机构相继出台了《三江源国家公园条例(试行)》等5部国家公园地方性法规，主要围绕自然资源本底调查、自然资源统一确权登记、自然资源禁止利用行为等方面作出了规定，为国家公园自然资源管理提供了法律依据。由于立法时间不同和政策的发展演进，各国家公园地方性法规的功能分区和管控措施不尽相同。如《云南省国家公园管理条例》将国家公园分为四类功能分区，而《三江源国家公园条例(试行)》将国家公园分为三类功能分区，实行不同的空间管制措施。

在明确职责划分方面，南山、神农架、武夷山等国家公园管理机构印发了权责清单。其中，《湖南南山国家公园管理局行政权力清单(试行)》根据省相关部门授权，设置了6项关于自然资源利用的行政许可，但无相关行政处罚规定；《神农架国家公园管理局权责清单》设置了自然资源利用相关行政处罚条款，但未设置相关行政许可；《武夷山国家公园管理局权责清单》设置了林木采伐行政许可1项，其他自然资源利用行政处罚20余项。

## 2 国家公园自然资源管理存在的问题

中央要求在条件成熟时，逐步过渡到国家公园内全民所有自然资源资产所有权由中央政府直接行使，目前国家公园自然资源管理仍在过渡阶段，尚未完成自然资源管理由分级行使到集中统一行使的转变，这主要是自然资源管理体制、自然资源权属、管理顶层设计等原因所致(李博炎等, 2021)。

### 2.1 国家公园自然资源管理体制映射关系复杂

从政策演进来看，组建对各类国有自然资源统一行使所有权的机构其条件尚不成熟，也因此形成了土地、矿产、草地、林地、水资源、野生动物等自然资源有偿使用仍由自然资源、林草、水利、农业农村部门来行使的“九龙治水”局面。现行自然资源管理体制投射到国家公园等重要生态空间则显得尤为复杂。尽管中央文件明确“国家公园管理机构主要负责国家公园范围内自然资源资产管理和生态保护修复的职能定位”，但由于国家公园上位法缺失、改革没有完全到位，国家林业和草原局(国家公园管理局)尚未落实国家公园范围内土地、矿

产、水资源、水生野生动物等自然资源管理权限，而是仍由自然资源部、水利部、农业农村部等部门行使。以三江源国家公园为例，2017年，组建了三江源国有自然资源资产管理局和相应的县级管理机构，承担三江源国家公园范围内各类全民所有自然资源资产所有者职责，从中央到省州对应自然资源、林草、农业农村、水利等多个部门。由于自然资源管理是分级管理体制，且从中央到省州均有相对应的管理部门，大部分国家公园管理机构未开展自然资源相关行政许可，国家公园自然资源所有者职责尚未得到落实。

### 2.2 国家公园自然资源权属需进一步厘清

目前，10个国家公园体制试点区内约有50万居民，涉及大量国有土地和集体土地，自然资源权属较为复杂，人地矛盾突出(方言和吴静, 2017; 何思源和苏扬, 2021; 臧振华等, 2021)。如何处理好自然资源国家所有权和集体所有权、所有权和承包权、承包权和经营权的关系，是国家公园处理生态保护和经济发展之间关系的根本所在，也是未来国家公园自然资源所有权由分级行使到集中统一行使的条件之一。厘清自然资源所有权和承包权也是解决目前国家公园范围内人兽冲突、野生动物与家畜争夺草场、生态移民搬迁等问题的关键所在。

目前，国家公园自然资源权属不清晰主要表现在三个方面：一是所有权不清晰。主要是由于历史原因而存在自然资源产权纠纷，如省界纠纷、集体纠纷等问题。如三江源国家公园地处青海与西藏边界，草场产权存在纠纷。二是承包权有待保障。目前生态搬迁虽有相应补偿，但多为一次性安置费用，无法实现农牧民家庭的长期可持续发展，不利于国家公园人口有序转移。如部分国家公园体制试点区，搬迁群众已不再从事农牧业生产，丧失了原来的生产生活资料。由于文化水平、身体健康等因素，部分群众存在返贫风险。三是经营权有待保障。主要是指土地承包到户后，流转 to 合作社或生产大户进行集约化、规模化经营，从而获取一定的地租或分红收入。对于这部分租赁未到期的土地，如果强行流转，极易引发纠纷和矛盾。

### 2.3 管理顶层设计需进一步加快

国家公园自然资源管理在我国是新生事物，尽管地方在立法、明确职责划分等方面开展了探索，

但中央在立法、权责关系、事权与支出责任等方面的管理顶层设计需要进一步加快。一是国家公园立法暂时空缺。目前,《国家公园法》正在研究和起草阶段,与自然资源相关法律修订缺乏统筹协调,国家公园自然资源管理工作缺乏法律依据。尽管各省出台了国家公园地方性法规,但受《中华人民共和国自然保护区条例》限制,较难落地实施。二是国家公园自然资源管理方式有待明确。中央要求由国务院自然资源主管部门行使或委托相关部门、省级政府代理行使,在条件成熟时过渡到由中央政府统一行使。然而在实践探索中,大部分国家公园自然资源所有权仍由各级政府分级行使。因此,未来国家公园自然资源管理继续由各级政府分级行使还是由中央政府或地方政府集中统一行使仍有待进一步明确。三是国家公园自然资源管理支出责任有待明确。国家公园对于维护国家生态安全屏障具有战略地位,国家公园自然资源管理应当由中央承担支出责任。然而,国家公园实际的资金来源较为分散,中央未设立专门的国家公园资金渠道,也没有列入中央财政一般预算。例如,三江源国家公园中央财政资金以藏区专项、文化旅游提升工程、三江源生态保护和建设二期工程及退牧还草工程项目资金为主,资金来源分散,不具有可持续性。

### 3 国家公园自然资源管理的建议

目前,中央从概念上将自然保护地划分为国家公园、自然保护区、自然公园3种类型,但在管理体制、财政事权、自然资源保护利用、范围大小和管控措施、人口密度等方面尚未作出明确界定,国家公园定位需进一步清晰。从央地关系视角来看,其中国家公园自然资源管理最为关键。因此,针对国家公园自然资源管理笔者提出如下建议。

(1)构建集中统一管理体制。中央层面,统筹国家公园、大江大河等重要生态空间,由国家林业和草原局(国家公园管理局)负责国家公园等重要生态空间的自然资源资产管理、国土空间用途管制和生态保护修复职责,衔接现有制度体系,新增国家公园自然资源管理若干司局和执法总队,具体负责国家公园重要自然资源的占有、使用、出让、收益、行政执法等工作。地方层面,成立国家公园管理局分局,为国家公园管理局派出机构,由中央保障编


制和财政支出,负责国家公园自然资源日常工作。

(2)完善国家公园法治体系。加快立法进程,重点推进《国家公园法》《自然保护地法》的立法工作,同时启动《中华人民共和国自然保护区条例》修订工作;找准国家公园定位,明确范围大小、功能分区、人口密度、财权事权等量化指标,确定国家公园设立与退出机制,与自然保护区、自然公园严格区分,为构建以国家公园为主体的自然保护地体系提供法律支撑;注重统筹协调,推动自然资源相关法律修改,明确国家公园管理机构履行国家公园自然资源所有者职责;鼓励开门立法,从全国抽调人员组建立法小组,充分汲取地方立法经验,广泛听取各方意见,增强立法的民主性和开放性。

(3)厘清自然资源权属关系。利用自然资源统一确权登记成果,加强自然资源统一调查,进一步划清国家公园全民所有和集体所有的边界以及不同集体所有者的边界,将国家公园全民所有自然资源所有权主体登记为国务院自然资源主管部门。因地制宜开展赎买、租赁和协议共管等方式,减少国家公园集体所有自然资源比例,逐步收回国家公园自然资源承包权和经营权。坚持中央政府集中统一行使国家公园自然资源所有权原则,同时充分调动地方政府积极性,研究制定国家公园分级行使所有权自然资源清单,划清全民所有、不同层级政府行使所有权的边界。

(4)有序开展社区人口转移。与土地承包政策相衔接,根据实际情况,设立30-60年过渡期。完善生态补偿政策,对不再利用原有土地的国家公园居民,置换同等土地或逐年补偿土地收益,原有土地纳入中央政府直接行使所有权的资源清单。培育特色产业,因地制宜发展特色农业、生态体验、民族产品加工等产业,提供多渠道就业机会,促进国家公园社区群众转产转业。充分发挥对口支援优势,加大异地办学力度,提升国家公园社区居民受教育水平。

### ORCID

李款  <https://orcid.org/0000-0001-7560-6670>

### 参考文献

Fang Y, Wu J (2017) A research on the land ownership of national parks and man-land relationship in China. *Tourism Science*, 31(3), 14-23. (in Chinese with English abstract)



- [方言, 吴静 (2017) 中国国家公园的土地权属与人地关系研究. *旅游科学*, 31(3), 14–23.]
- Han AH (2019) Discussion on natural resources asset management in national parks. *Forest Resources Management*, (1), 1–5, 37. (in Chinese with English abstract) [韩爱惠 (2019) 国家公园自然资源资产管理探讨. *林业资源管理*, (1), 1–5, 37.]
- He SY, Su Y (2021) Experience and improvement recommendations of Wuyishan National Park pilot: Difficulty and solutions in the reform of national park located in the collective forest area in South China. *Biodiversity Science*, 29, 321–324. (in Chinese) [何思源, 苏杨 (2021) 武夷山试点经验及改进建议: 南方集体林区国家公园保护的困难和改革的出路. *生物多样性*, 29, 321–324.]
- Li BY, Zhu YP, Liu WW, Li S, Fu MD, Ren YH, Cai X, Li JS (2021) Pilot areas for national park system in China: Progress, problems and recommendations. *Biodiversity Science*, 29, 283–289. (in Chinese with English abstract) [李博炎, 朱彦鹏, 刘伟玮, 李爽, 付梦娣, 任月恒, 蔡让, 李俊生 (2021) 中国国家公园体制试点进展、问题及对策建议. *生物多样性*, 29, 283–289.]
- Ouyang ZY, Xu WH, Zang ZH (2021) Suggestions on improving the management system of national parks. *Biodiversity Science*, 29, 272–274. (in Chinese) [欧阳志云, 徐卫华, 臧振华 (2021) 完善国家公园管理体制的建议. *生物多样性*, 29, 272–274.]
- Qin TB, Liu TT (2020) Constructing China's administrative system for national parks from the perspective of central-local relations. *Dong Yue Tribune*, 41(10), 162–171, 192. (in Chinese) [秦天宝, 刘彤彤 (2020) 央地关系视角下我国国家公园管理体制之建构. *东岳论丛*, 41(10), 162–171, 192.]
- Sun HY, Zhang XP (2019) Discussion on natural resources management of national Parks. *Forestry Construction*, (2), 6–9. (in Chinese with English abstract) [孙鸿雁, 张小鹏 (2019) 国家公园自然资源管理的探讨. *林业建设*, (2), 6–9.]
- Xinhua News Agency (2013) Decision of the Central Committee of the Communist Party of China on Some Major Issues Concerning Comprehensively Deepening the Reform. (in Chinese) [新华社(2013) 中共中央关于全面深化改革若干重大问题的决定.] <https://www.fmprc.gov.cn/ce/cemx/chn/gdxw/t1100200.htm>. (accessed on 2021-11-30)
- Zang ZH, Xu WH, Ouyang ZY (2021) Exploration on the value realization of ecological products in China's National Park system pilots. *Biodiversity Science*, 29, 275–277. (in Chinese) [臧振华, 徐卫华, 欧阳志云 (2021) 国家公园体制试点区生态产品价值实现探索. *生物多样性*, 29, 275–277.]
- Zhou K, Wang L, Li X, Zhang D, Liu TK, Lin J, Liu P (2020) Natural resources management in US national Parks: Principles, problems, and enlightenments. *Journal of Beijing Forestry University (Social Sciences)*, 19, 46–54. (in Chinese with English abstract) [周戡, 王丽, 李想, 张多, 刘天科, 林进, 刘鹏 (2020) 美国国家公园自然资源管理: 原则、问题及启示. *北京林业大学学报(社会科学版)*, 19, 46–54.]

(责任编辑: 徐卫华 责任编辑: 时意专、李会丽)



•论坛•

# 适合度的相对性与路径依赖的自然选择

王瑞武<sup>1\*</sup>, 李敏岚<sup>1,2</sup>, 韩嘉旭<sup>1</sup>, 王超<sup>1\*</sup>

1. 西北工业大学生态环境学院, 西安 710072; 2. 西北工业大学数学与统计学院, 西安 710072

**摘要:** 自然选择理论认为生物个体或者种群在进化的过程中, 其基因或者性状、行为策略的选择一定是能够提高其适合度或者达到某个可期的“目标”。然而, 随着某个突变基因或者性状特征、行为策略在种群中扩散, 其期望收益将随着其在种群中分布的密度变化或环境改变而发生改变, 这就是适合度景观的悖论, 即静态的、固定可期望的收益可能因此而不存在。基于动态而非静态适合度景观的概念, 我们提出路径依赖的自然选择概念。路径依赖的自然选择过程中, 一个突变的基因或表型在某种环境下随机产生, 但是该基因或表型在某些特定环境下会产生正反馈。尤其是在正反馈与随机漂变的共同作用下, 多条路径的演化就可能发生, 并且其路径的形成将同时受到其种群进化历史过程和空间特征分布等因素的强烈影响。而在不同路径下, 由于观测维度、角度和尺度的不同, 适合度意义将因此而存在不同。在此意义下, 自然选择更可能选择路径频率而不是适合度大小。基于上述概念, 我们借鉴现代物理学中复函数的方法, 来描述多重动力对物种形成或者生物特征、种群进化等路径依赖的演化过程, 以期为同域物种、隐存种形成以及生物多样性演化提供解释机制。

**关键词:** 自然选择; 适合度; 路径依赖; 物种形成; 生物多样性

王瑞武, 李敏岚, 韩嘉旭, 王超 (2022) 适合度的相对性与路径依赖的自然选择. 生物多样性, 30, 21323. doi: 10.17520/biods.2021323.

Wang RW, Li ML, Han JX, Wang C (2022) Fitness relativity and path-dependent selection. Biodiversity Science, 30, 21323. doi: 10.17520/biods.2021323.

## Fitness relativity and path-dependent selection

Ruiwu Wang<sup>1\*</sup>, Minlan Li<sup>1,2</sup>, Jiaxu Han<sup>1</sup>, Chao Wang<sup>1\*</sup>

1 School of Ecology and Environment, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072

2 School of Mathematics and Statistics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072

### ABSTRACT

**Background & Aims:** Natural selection assumes that there is an expected fitness advantage (or aim) for any selection of gene mutations or phenotypic characteristics. However, the fitness of the selected gene mutation/phenotypic characteristic might vary as it spreads throughout a population or might vary with changing living environments over both evolutionary and ecological scales. This may result in a “paradox of stationary fitness landscape” in which an expected fitness advantage of a selected gene mutation/phenotypic characteristic might therefore not exist. Based on a dynamic state but not a stationary fitness landscape, we propose that natural selection might exhibit path-dependent selection.

**Summary:** In path-dependent selection, the gene mutation or phenotypic characteristics are produced completely at random, but some might meet a specific condition which could generate positive feedback as they spread. Such positive feedback might also be that such matched conditions could further facilitate the occurrence of a genetic trait/phenotypic characteristic. The positive feedback effect will therefore increase the probability of a genetic trait or phenotypic characteristic in specific conditions, meaning natural selection will depend on the probability of path, but not fitness value. Analogy to that many paths lead to a bus stop near your office building, the path-dependent selection argues that the quickest path might be mostly selected, especially when the bus stop is at a fixed location and selection pressure is strong. However, the other paths may also be selected especially when the bus stop could change location or selection pressure is weak. In path-dependent selection, both evolutionary history and distribution of ecological characteristics

收稿日期: 2021-08-17; 接受日期: 2021-10-21

基金项目: NSFC-云南联合基金(U1302267)、国家杰出青年科学基金(31325005)和国家自然科学基金(32171482)

\* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: chaowang@nwpu.edu.cn; wangrw@nwpu.edu.cn



will greatly affect the evolution of any path. Using this understanding, different pathways can be understood as different points of speciation, where the distribution of species is similar to the peaks of a mountain in which the paths with a high probability will shape peaks, while many other species with low path probability will not separate into other peaks, creating sister species, cryptic species, or redundant species.

**Prospects:** Path-dependent selection can be described by the complex function, a mathematical skill widely used in modern physics. Through complex function, we can describe how multiple factors shape a probability of path-dependent selection in speciation peaks and the oscillation of species peaks. Different pathways, which could also be understood as different dimensional viewpoints, will demonstrate a different understanding of the evolutionary aim of a gene mutation, phenotypic characteristic.

**Key words:** natural selection; fitness; path-dependent selection; speciation; species diversity

正如我在其他几篇文章中强调的那样,我认为科学不是客观的、一定获取真理的机器,而是一种典型的人类活动,从事科学的人受到情感、希望和文化偏见的影响。思维的文化传统对科学理论有很大的影响,通常也决定了猜想的思路,尤其在材料限制人们的想象或猜想时,更是如此。

——斯蒂芬·杰·古德尔

在现代生命科学的探索过程中,无论是试图理解生物物种形成还是其性状、行为策略的选择,都是基于一个不言而喻的前提:即物种演化或者个体行为策略选择是由于存在某种特定原因而实现某个特定的“目的”或者“目标”。这其实就是伽利略和牛顿开创的现代科学方法论在生命科学中的应用。伽利略开创了科学实验的“可重复性”方法论,而后,牛顿力学体系从逻辑上论证了科学实验“可重复性”是由于我们观测到的现象与其背后作用力存在因果关系(Newton, 2006)。“可重复性”与“因果性”基本上奠定了现代科学体系的方法论基础(王瑞武, 2021)。亚当·斯密的“看不见手”理论认为人类的理性就是实现其利益或者偏好最大化,即绝对自私性,这是人类所有社会活动的根本性原因(Smith, 1776)。而达尔文则认为一切生物个体都是自私的,生物个体进化的根本性动力就是提高其适合度,也就是繁殖更多后代并存活更长时间(Darwin, 1859)。绝对自私性或者理性,这种理解人类行为与生命个体进化不言而喻的本质动力,是古典经济学和达尔文自然选择理论的基本出发点。

然而,可重复实验和因果关系这两大现代科学基石就真的那么可靠吗? *Nature*对1,576位研究者调查发现70%的论文实验结果无法重复,甚至50%的研究者也难以重复自己的实验结果(Baker, 2016)。

事实上,到目前为止,物理学上没有任何人能够完全重复伽利略两个铁球同时落地的实验(Cavasinni et al, 1986)。同样,生物学中也没有人能重现孟德尔的豌豆遗传学实验——红花豌豆与白花豌豆3:1的完美比例(Mendel, 1925; Fisher, 1936)。科学实验反而证明了“人不能两次踏进同一条河流”。

同样,现代科学的另外一个方法论基石因果论也难以实现其逻辑自治。因果关系论没有回答人类个体为什么要自私,为什么要实现自身利益最大化。《自私的基因》的作者道金斯在该书第一版中认为:生物个体存活的本质动力是将自己的基因更多地遗传给下一代(Dawkins, 1976),这就是基因自私性理论,也是亲选择理论的基本前提假设(Queller, 1992)。最后他认为由于存在“复制者”这个基因,生物个体因而倾向于复制更多与自己相同的拷贝,这是典型的“目的因”哲学观,即结果就是其目的或者原因。基因自私性没有回答的问题是:什么动力导致“复制者”的诞生?为什么基因要拷贝自己,而不是变异成其他的基因?如果一定要打破砂锅问到底的话,同牛顿当时认为三大定律背后的推动力是上帝一样(Newton, 2006),进化生物学家也许只能将生物个体自私性归结为“毒苹果”了(王瑞武, 2021)。

本文试图以进化生物学理论最基本概念适合度为例,论述源于牛顿力学体系中确定性因果关系的方法论只能用来解释静态的、一个时间和空间内绝对二元独立世界中或时间或空间截面所观测到的生物现象。而对于一个动态、全景的生物现象则需要引入现代物理学的思想和方法论。基于现代物理学思想和方法,本文将尝试从多维角度或者尺度来理解生物进化过程中的适合度问题,并据此提出路径依赖的生物演化或者物种形成机制。

## 1 适合度概念的悖论

达尔文在《物种起源》(Darwin, 1859)中指出, 适合度是衡量一个个体存活和繁殖成功机会的参量。一个基因的突变或者表型特征能否在自然选择的过程中保留下来, 其核心的动力就是该基因突变或者表型特征能否提高个体的适合度。上述自然选择理论思想作了一个基本的前提假设, 即该突变基因或者性状特征的期望收益是个固定常数。在图1展示的静态适合度景观中, 表型演化至生态位1和生态位2时适合度达到局部最优, 表型向着这两个对应的表型值演化以提高自己的适合度(图1)。然而, 自然选择理论这个基本的前提假设却面临着一个巨大的理论挑战: 随着某个突变或者表型特征在种群中扩散, 其在种群中的密度分布将因此而改变,

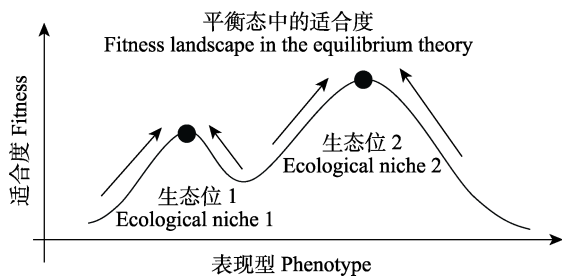


图1 适合度演化的经典理论。适合度景观保持静态, 物种性状向适合度大的地方演化。

Fig. 1 Fitness landscape in classical theory, in which the fitness of each trait keeps constant, and the traits with locally maximum fitness become the evolutionary aim.

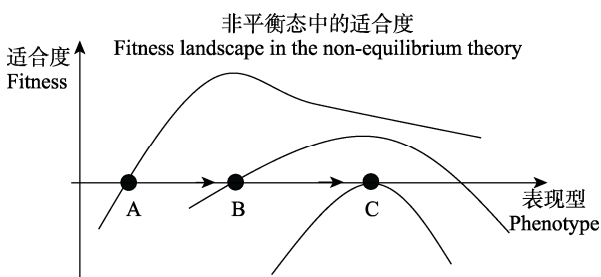


图2 适合度演化的非平衡态理论。这时适合度景观是动态的。在A点时, 右侧性状适合度比较大, 物种向适合度较大的B性状演化。但演化到B点时, 适合度景观发生变化, 适合度并没有如预期增长。

Fig. 2 Fitness landscape in the nonequilibrium theory, in which the fitness of each phenotype might vary greatly. For example, when trait A evolves to trait B who has higher fitness, the individual's fitness with trait A will not increase as expected. This is because the fitness of each trait might vary with the change of population structure and environment.

基因突变或者表型特征的期望收益也将必然发生改变。例如在图2所示的动态适合度景观中, 在A点时, 右侧性状适合度比较大, 物种向适合度较大的B性状演化; 但演化到B点时, 在物种之间的相互作用和环境反馈的共同作用下, 适合度景观发生变化, 适合度并没有如预期增长。

适合度不仅会随着基因或者表型特征在种群中的分布频率变化而变化, 也会随着环境变化而变化。不同时间和空间状态下的适合度不同, 并且不同维度下同样的突变基因或表型特征也会表现出不同的适合度。在时间维度下, 突变体的适合度主要由环境决定; 而在空间维度下, 其适合度主要是由种群中该特征的密度决定的。这里我们以经典的“鹰鸽策略”为例(Houston, 1988)来说明其基因或者表型特征的适合度将可能由于其分布频率差异或者环境变化而发生改变。假定在一个初始种群中个体都比较温和, 是更倾向于“鸽策略”的种群, 如果突变出一个“鹰策略”的个体, 那么, 这个“鹰策略”的个体由于其攻击性而在“鸽策略”种群中具有更高的适合度, 采取“鹰策略”的基因或者表型特征将在种群中扩散。然而, 随着“鹰策略”个体在种群中频率的增加, 其相互遇见的几率也将增加, 这类个体相互竞争将导致双方适合度降低, “鹰策略”个体的期望收益显然将会降低。此外, “鹰策略”或者“鸽策略”的选择还与外界环境的选择压力密切相关: 如果环境选择压力小, 种群总是处于高密度, 其种群个体与天敌竞争频率很高, 选择“鹰策略”的个体频率将可能因此而上升。

事实上, 某个具有选择优势的基因突变或者表型特征的期望不是一个固定的特征值, 而是不确定性的(Nowak & Sigmund, 2004)。就如同爬山, 假如山的高度就是我们期望的适合度, 在静态的观念下, 山峰的高度就是一个定值。但是, 如果动态地看, 如果在爬山的过程中山峰的高度发生了变化(地质尺度上来说, 山峰的高度就是在变化), 爬山者所期望的目标(山的高度)将是不确定的。因此具有选择优势的基因或者表型特征的分布将不一定会存在确定的均衡点(进化目标)。

在进化过程尺度上, 具有选择优势的、能够提高适合度的突变或者表型特征可能在平均意义上存在适合度的优势, 但是随着其空间分布频率或者

位置的变化, 其适合度将发生改变。例如, 在榕树-小蜂互惠合作系统中, 传粉小蜂由于给植物传粉而获得植物的奖励, 因而提高了自己的适合度。但是, 当进入榕果的传粉小蜂数量太少或者太多时, 榕树将惩罚这些传粉小蜂。或者当寄生小蜂密度增加, 榕树也会将已经授粉的榕果脱落, 同时也将杀死全部的传粉小蜂(Wang et al, 2010, 2015)。同理, 在生态或者空间尺度具有适合度优势的特征在进化尺度上却可能没有意义。比如孔雀的尾巴, 在繁殖行为过程中具有性选择的优势, 但是在进化尺度上则可能导致其容易被捕食的命运(Prum, 2017)。从不同尺度观测和不同角度理解, 其适合度的意义存在巨大的差异。

从种群内部个体角度来看, 由于种群结构或者等级因素, 个体甚至可能完全因为随机因素而改变其空间位置, 其适合度将可能因此发生巨大的改变。例如, 在高度社会性的蜜蜂系统中, 一枚蜂卵刚好被工蜂选择放进王台而发育成蜂后, 其寿命可达十几年、甚至几十年, 而且垄断了繁殖的权利, 而工蜂生命比较短, 通常是几个月或者一年左右(Huang & Robinson, 1996)。在有些生态系统中, 物种随机先成为奠基物种, 其种群大小将可能远远大于其他物种, 发育成为该生态系统的优势物种。一个生态系统中不同物种的种群大小存在巨大差异, 它们的适合度大小可能并不存在均衡点。

## 2 适合度时空波动的叠加性与适合度的不确定性

空间尺度上表型特征分布频率、种群大小等生态特征都随着空间的变化而波动(Moreno-Fernández et al, 2016)。同样, 时间尺度上遗传突变速率、遗传特征分布频率也会随着时间变化而波动(Thomas & Hahn, 2014)。时间和空间两个不同维度的波动将会产生叠加性, 当二者以非线性方式叠加时, 就会产生诸如混沌等复杂性(Egolf et al, 2000)。理论上, 无论是进化遗传层面或者空间尺度上物种种群的波动, 都会因为初值敏感性而在种群层面出现巨大波动, 进而出现种群大爆发或者大灭绝(Gavrilets & Hastings, 1996)。由此, 种群波动或者遗传突变便可以通过这种非线性叠加产生的复杂性导致种群特征的不可预测性(Kirkwood et al, 1994)。随着环境变化的日益加剧, 同一区域内特征很相似的物种进

入到相同的新环境中可能会有截然相反的结果: 有的物种爆发式增长、有的物种濒临灭绝(Rehage et al, 2004)。一种生态学解释是, 一个物种能否在新的环境中存活, 与当前环境和该物种过去所处环境的相似程度有关。物种过去所经历的环境选择压力塑造了其行为倾向, 决定了物种如何对新环境做出反应(Sih et al, 2011)。如果新环境与过去环境匹配, 动物的反应会很好; 而如果新环境造成了进化上的不匹配, 动物的适应就会很差(Ehlman et al, 2019)。

生物演化过程的时间维度特征与空间生态学特征是可以相互转化的, 而经典遗传学和生态学将种群遗传与生态过程表型特征、种群绝对独立在一维空间变化, 并将空间与时间特征绝对独立地研究其进化或者生态学规律。一个物种的基因记录了该物种适应过去所经历的环境, 该物种在当下环境中适合度的高低取决于过去的适应(即遗传学尺度上的基因)是否与当下的环境相匹配, 而匹配的结果(即适合度)就表征在生态学尺度上的种群大小等特征上(Ehlman et al, 2019)。

获得性遗传在某种程度上架起了生物进化过程中时间与空间效应相互转换的桥梁。进化过程中的质粒转移、基因跳跃、基因空间结构变化等属于进化在时间尺度上部分可逆。在空间上, 生物性状特征分布或者个体所在的空间位置(种群结构)也只是部分可以互换, 属于部分可逆的特征, 比如蜂王和工蜂之间的空间位置就是不能完全互换的, 一旦互换, 原有系统就崩溃了。当时间和空间特征都存在部分可逆的情况下, 通过获得性遗传, 实现生物演化过程的时空效应互换。生物在某些特定条件下, 有些表型特征频率会较大地升高, 而如果此环境特征持续维持这一表型的频率, 则通过环境适应性进化机制影响该物种的遗传特征, 其空间上的表型可塑性特征转化为时间尺度上的遗传特征, 快速进化就因此而可能存在。反之, 如果物种历史遗传的印迹遇到与现实空间刚好匹配的环境, 种群就可能大爆发(入侵生物在新的环境出现大爆发)。获得性遗传正是生物演化过程中的空间特征与时间特征转化的桥梁之一。

## 3 路径依赖的自然选择

自然演化过程中, 生物个体或种群基因或表型



特征与适合度之间不存在严格的因果关系, 这意味着基因突变或者表型特征的产生可能存在随机性。Kimura (1983)的中性选择理论就认为分子突变可能是中性的, 完全随机发生, 基因漂变导致基因频率变化。Hubbell (2001)基于热带雨林中现实数据分析而提出的中性理论认为生态系统的各个物种是等价的, 也就是说假定了生物群落中每个个体具有相同的出生率、死亡率、迁移机会。该理论较好地解释了热带雨林物种的多样性。但是Kimura (1983)的分子中性选择理论仍然难以解释遗传突变过程的正向效应, 而Hubbell (2001)的生态中性选择理论则难以解释生态群落中物种分布的不均衡性, 即有些物种丰度明显高于其他物种, 而某些稀有种或者冗余种无论种群数量还是分布都极为稀少。

路径依赖的自然选择认为自然突变或者表型特征的产生完全是随机的, 但是某些随机突变或者表型特征在一些特定的条件下能够扎根后迅速创造条件, 反过来促进相似的突变或者性状特征的产生, 形成正反馈, 促使具有相同特征的其他个体或者生物物种繁殖与发展。还有另外一种解释就是某种相同的外界环境选择, 会导致相同的突变更容易发生。其关键动力就是在某种特殊压力或者环境下, 突变或者表型特征的发生存在正反馈。这种正反馈也可能源于某些基因突变个体, 其个体并不会发生随机性交流, 而是存在惰性, 不倾向于扩散。这就导致在某些情况下 (比如在种群密度低的情况下), 个体不扩散反而形成密度的促进效应, 并因此而发展成局域性种群。在一个较长的时间尺度上形成具有独特特征的种群, 但是不同种群之间存在扩散、交流。其扩散、交流的频率大小将决定其是否能够形成局域性具有稳定特征的群体。这就类似植物种子的散布, 随风飘扬的种子少数刚好落在适宜其发育的环境中, 比如落在一堆牛粪上, 该种子发育成长后又改变了周边的环境, 使其后代或者其他飘落过来的种子更容易发育成长, 并因此而逐渐发展成种群或者一个生态系统。由于其固有的惰性, 类似于遗传学的遗传因素, 生物个体具有倾向于原有环境, 这将进一步强化其正反馈作用, 创造出更有利于其他个体的生存环境或者有利于相似突变产生的环境。科学技术与理论诞生也具有类似的机制。思想或者技术的火花就像随风漂泊的种子, 遇到了

合适群体的时候, 其他人的加入进一步帮助完善思想理论或者技术体系, 这种正反馈作用形成的路径体系将进一步加速该理论思想和技术的传播与应用(王瑞武, 2021)。

路径依赖的自然选择将不再视适合度为其进化或者选择的“目的”或者“目标”, 而是选择的路径频率。这就好比办公楼前有一块巨大的草坪, 而草坪对面有一个公交车站, 从办公楼走到公交车站要穿过草坪。长期下来, 草坪上形成了多条通往公交车站的小路。但是显然各条小路的印迹并不相同, 有些小路走的人多, 而有些小路走的人很少。其中走的最多的那条小路, 可能就是行程最短的路, 也就是最优的那条路。因此自然选择可能不是选择收益或者适合度最高的, 而是一个路径频率的选择过程。某些路径可能被选择得更多, 而另一些路径则可能被选择得少一些, 但是这些路径都存在被选择的可能性。随着演化压力的增大, 可以被允许的路径会变少, 但选择的结果不是只存在一条最优路径, 而可能是多条, 尤其是当公交车站的停车位点存在变动的情况下。当存在多条路径的情况下, 自然选择实际上就是路径频率的选择。也就是说, 生物进化的过程中各条路径都有存在的可能性, 差异就在于选择各条路径的频率不同。

从动态的角度来看, 路径依赖的演化不存在适合度最优的结果。路径依赖的自然选择过程中, 物种或者基因时间、空间效应的叠加性在其路径形成过程中扮演着十分重要的角色。当一个物种从一个稳定环境进入新的波动环境后, 该物种不断地将过去的经历与新环境匹配, 并做出生理或行为上的反应。这些反应将影响之后演化路径的选择。一方面, 这种反应影响其生存的外界环境(包括生物环境和非生物环境), 另一方面这些外部环境反过来也会进一步影响该物种自身。如果该物种种群对环境的影响反过来对自身种群的增长形成了正反馈效应, 该路径将更容易形成。

种群增长的正反馈效应也有可能来自其初始的生理或行为上的反应, 这种反应更多地被使用, 甚至跨代遗传给后代(Donelan et al, 2020)。路径依赖的自然选择在演化前期时, 物种遇到的随机环境对其演化路径产生极大的影响(Blount et al, 2008)。或者说, 演化前期的随机环境选择了路径。而经过



一段时间的选择之后, 随机环境对路径的选择作用越来越小, 因为此时转移到别的路径需要付出很大的退出成本或沉没成本, 从而使得路径被锁定。这时, 路径依赖的自然选择的结果将可能不是一个全局最优的结果, 而是一个次优结果, 或者说是一个接近局部最优的结果。当然, 如果遇到一个新的环境与该物种过去的路径非常不匹配, 就会导致该物种的灭亡, 或者开始一段新的路径依赖的自然选择。

生态系统中熵流大小(Bertola & Cafaro, 2008; Gallavotti, 2012) (类似河流的流量大小), 将决定系统内物种或者基因所能够形成路径的多少。熵流越大, 路径越多, 生态系统就越接近于随机选择或者中性选择(Ludovisi, 2006; Lin, 2015)。这就类似在一条流量很大的河流中间丢一片树叶, 树叶的运动方向就接近于随机分布, 而如果在流量较小的小溪, 树叶只能沿着水流的方向运动。类似地, 物种的演化路径在熵流很大的系统, 如热带雨林系统——其物质和能量流都很大, 其物种的分布更可能是完全随机的。在这样的情况下, 物种的路径多, 演化速度也快, 达尔文的自然选择力量将会降低, 甚至很弱。而在熵流很小的系统, 如极地或者荒漠系统, 由于其系统的熵流较小, 路径也就比较少, 物种或者个体就将可能选择距离或时间最短的路径, 接近自然选择理论的最优理论(Ludovisi, 2006; Lin, 2015)。

#### 4 路径之间的概率转移与物种多样性

基于静态的适合度景观思想, Traulsen等(2007)讨论了进化最优路径的问题。他们认为表型特征是沿着时间或者速度最快的路径进化的, 因而就存在所谓的最优路径。在此情况下, 自然选择过程也许存在多条路径, 在选择强度较大时, 所需时间最短的路径被自然选择下来。然而, 正如前文所述, 适合度景观并非是静态的, 而是随着其性状特征空间分布的频率变化而变化, 存在动态变化(李敏岚等, 2021) (图2)。也就是说, 当进化目标不固定时, 路径最短或者速度最快的最优路径将失去其逻辑的合理性。

在图2所展示的动态适合度景观的A点时, 右侧表型的适合度较大, 物种向适合度较大的B点演化。但演化至B点时, 种群结构的改变使得适合度

景观发生变化, 适合度并没有如预期增长。这是因为, 有限种群中的表型在演化的过程中同时受到随机漂变和选择的力量(Ewens, 2004), 其适合度会发生改变。以合作策略在种群中的演化为例, 其适合度表示为:  $f_i = 1 - w + wF_i$ , 其中,  $w$ 表示选择强度,  $F_i$ 表示合作者在博弈中的收益,  $F_i$ 是 $i$ 的函数。可以看到, 适合度是依赖于选择强度和种群密度的。很显然, 这两者在种群演化的过程中几乎是时刻变化的。自然地, 适合度景观也随之变化。

表型在动态的适合度景观上演化时, 一方面向着下一时刻的最优表型进化, 另一方面受到随机漂变因素的影响, 下一时刻可以通过复制和突变的方式以一定的概率(即所谓的转移概率)演化至不同的状态。某一表型在每个时刻的不同表型值遵循这样的规则演化便可在一段时间后形成演化的路径(图3)。以表型A的频率为例, 其频率在 $t_0$ 时刻为 $a_1$ , 在 $t_n$ 时刻为 $a_n$ , 中间经过 $t_k$ 时刻, 频率为 $a_k$ 。记从 $a_1$ 到 $a_k$ 的概率为 $P_{a_1 a_k}$ , 从 $a_k$ 到 $a_n$ 的概率为 $P_{a_k a_n}$ , 从 $a_1$ 到 $a_n$ 的概率为 $P_{a_1 a_n}$ , 则 $P_{a_1 a_n} = P_{a_1 a_k} P_{a_k a_n}$ 。表型A从 $a_1$ 到 $a_n$ 的演化过程中, 中间频率 $a_k$ 可能有很多值, 因此,

$$P_{a_1 a_n} = \sum_{a_k} P_{a_1 a_k} P_{a_k a_n} \quad (1)$$

当我们测量每一代的频率时,

$$P_{a_n | a_1} = \sum_{a_1} \sum_{a_2} \dots \sum_{a_{n-1}} P_{a_1 a_2} P_{a_2 a_3} \dots P_{a_{n-1} a_n} \quad (2)$$

此时, 时间间隔( $\delta t$ )足够小, 指的是一代的时间。每一代的测量值变成了连续变量上的一系列值。表型A在 $t_i$ 时刻的频率为 $x_i$ ,  $x_i$ 即为前面所说的 $a_i$ 。利用路径积分的方法可以求得从 $x_0$ 到 $x_n$ 的转移概率, 该概率是由从 $x_0$ 到 $x_n$ 的所有路径的求和得到的, 求和由积分替代。即:

$$f(x_n | x_0; t) = \iint \dots \int f(x_1 | x_0; \delta t) f(x_2 | x_1; \delta t) \dots f(x_{n-1} | x_n; \delta t) dx_1 dx_2 \dots dx_{n-1} \quad (3)$$

这里 $f(x_1 | x_0; \delta t)$ 指的是从上一代演化至下一代时状态从 $x_0$ 到 $x_1$ 的转移概率, 以此类推。

通过上面的公式, 我们可以计算出在一段时间内表型A从一个表型值进化到另一个表型值的概率, 该概率是两个表型值之间所有可能经历的路径概率的求和。结合初始时刻的表型分布, 新的表型以

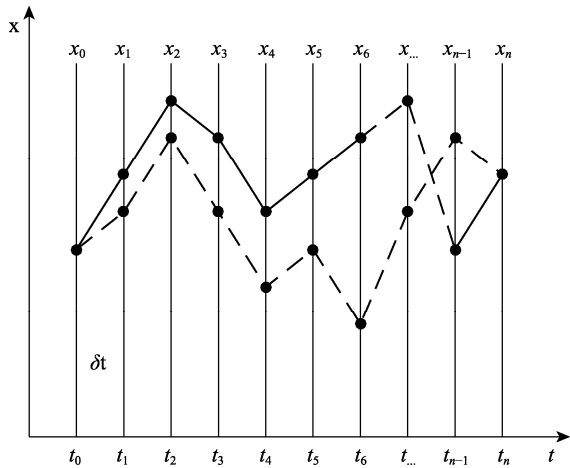


图3 表型A从表型值 $x_0$ 出发演化到表型值 $x_n$ 的其中两条路径。从 $x_0$ 到 $x_n$ 的转移概率是两个表型值之间所有可能经历的类似路径的概率求和。

Fig. 3 Two paths as the example of all of the paths that the trait A evolves from  $x_0$  to  $x_n$ . The probability evolving from  $x_0$  to  $x_n$ , is the sum of all of the paths' probabilities.

不同的概率出现, 形成了当前时刻的表型分布。

在某个时刻观测时, 可以在表型的分布空间中看到多表型共存的情形, 同时存在洪德元(2016)定义的形态-生物学概念中所提到的种内形态性状的多态性和变异的连续性。对于分布密度较高的表型, 若它们之间满足统计数量关系(体现在密度差异较小, 表型差异性较大), 则可以认为这样的表型是分化成功的表型, 可以作为物种鉴定的依据(以表型特征为主的物种界定)。根据上述概念, 我们给出物种鉴定的定义: 针对基因、表型性状、生态过程等任一状态下两个群体内个体的多个变量做统计分析, 若同时在两个或多个维度状态下群体间呈现出的不连续性  $d$  大于群体内变量呈现出的差异性  $\sigma_k$  则拥有相应变量的个体属于不同物种(李敏岚等, 2021)。

如上所述, 不仅是表型, 基因型、生态过程甚至物种等状态同样遵循路径依赖的演化机制。从一个状态出发便会演化出多条路径, 这些路径受到频率的反馈作用。在演化的后期, 若环境波动较小, 路径便相对固定, 路径之间很难进行转移, 表型依赖路径更容易演化出显著的特征, 进而形成物种。除非环境发生剧烈波动, 表型才会开始新一轮的演化。演化形成的每条路径都有相应的频率, 当选择强度有限时, 选择允许频率较高的多条路径存在,

物种多样性将因此而形成。这样以进化路径为选择对象的进化原则, 可以解释下面的现象: 为什么某个时刻适合度较低的表型也可以被选择下来? 因为结合其演化路径, 该表型所在路径存在的概率并不一定很低。

在一定的选择强度下, 不同概率的进化路径的存在显示了物种之间的连续性与分立性, 为不同类型的物种存在提供了理论解释。概率较高的路径上的物种大量存在于自然界中, 形成了进化树上独立的物种; 而概率较低的路径上的物种由于其与独立物种在概率分布上的统计特性不满足物种定义中的条件, 因此可以视为姐妹种、同域物种、冗余种, 形成了物种分布的山峰图(图4)。

## 5 复函数引入

任何适合度实现或者性状特征表达等观测结果往往受到多重因素, 甚至受拮抗作用的调控。在遗传学上, 多数性状的控制也受到多个等位基因的控制。以两个等位基因A和a为例。根据遗传学连锁分离定理, 这两个基因将会出现4种组合, AA、Aa、aA、aa, 其中Aa和AA对应显性性状, aa对应隐性性状(Bamshad et al, 2012)。如果认为Aa、AA在表达量方面的差异甚小而忽略其影响, 那么对于自

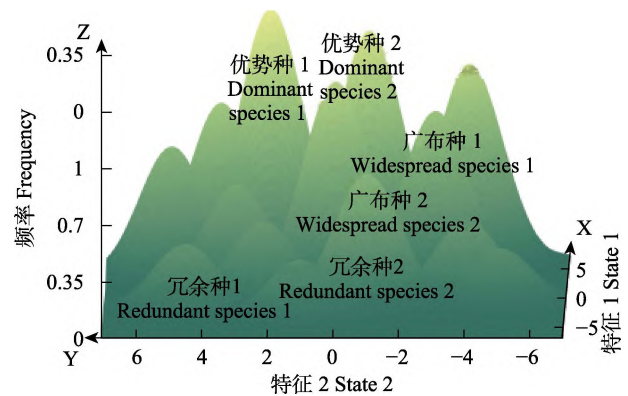


图4 物种分布示意图。沿路径依赖的自然选择下形成的物种根据其所在路径的概率不同, 在某个时刻形成物种分布的山峰图, 连绵的山脉和独立的山头分别体现了物种的连续性和分立性。

Fig. 4 Conceptual diagram of species distribution. In path-dependent speciation, the shape of species peaks at a specific time will depend on the probability of its evolutionary path. The continuous mountains and the independent peaks represent the continuity and separation of species, respectively.

然选择来说, Aa和AA对应着同样的显性表现型, 它们被选择时是无差异的, 也就是说自然无法直接辨识Aa和AA。但这两者在遗传层面带来的结果又是完全不同的: AA可以提供两个显性基因A, Aa只能提供一个显性基因, 这两者的差异仅在未来才可以体现出来。对于这种情况, 我们可以用复函数来表示相应的演化过程。

通常意义下, 复数通常只被视作纯数学的辅助工具。复数由实数和虚数两部分组成, 它们通常被写作 $a + bi$ 的形式,  $a$ 和 $b$ 都是实数,  $i$ 是虚数, 被定义为 $-1$ 的平方根。考虑一个连续动态的过程, 复函数的虚部就可以表示未来或者过去的状态, 这部分内容被掩盖在当前时刻状态(实部)背后, 只有在时间继续演化时, 虚部的作用才会显现出来。如果采用辐角的形式, 我们可以用一个复相位来代表生物量在时间上的波动。遗传基因和表现性状就可以被显式表示为复函数的振荡。基因型和表现型作为两个维度按一定的规则平行的演化但又相互依赖, 选择合适的复函数形式可以很好地描述这种关系。通过引入复函数, 我们将遗传和表型两个维度同时考虑并纳入演化方程, 它们之间就通过复函数的实部与虚部之间的关系有机地连接起来。假定亲代的基因型频率为 $z_t = a_t + b_t i$ , 它们的实部和虚部分别对应显性纯合子和杂合子的频率。子代的基因型频率是亲代的函数, 其频率应为 $z_{t+1} = a_{t+1} + b_{t+1} i$ , 其中 $a_{t+1} = f_a(a_t, b_t)$ 和 $b_{t+1} = f_b(a_t, b_t)$ 分别是亲代纯合子和杂合子频率 $a_t$ 、 $b_t$ 的函数。在此处, 亲代的实部 $a_t$ 和虚部 $b_t$ , 对子代的实部 $a_{t+1}$ 和虚部 $b_{t+1}$ 都有影响。

在生物演化过程中, 表征时间效应的遗传因素与表征空间效应的种群分布存在类似的效应。经典的遗传学理论或者生态种群理论几乎都是将二者的效应作为二元绝对独立来处理的。一个显然的逻辑就是空间意义上的种群分布一定受到历史经历或印迹等遗传因素影响, 而这种影响通常又是不能简单相加考虑。这就好比考虑国家、企业或者个人行为策略选择时, 通常都是只基于现实(空间效应)面临的各种利益博弈来分析, 但是这些国家、企业或者个人行为策略选择毫无疑问地受到历史经历的影响(Mahoney, 2000)。因此, 如果同时考虑遗传和表型两个维度的贡献, 并且考虑两者之间的映射

关联, 一个含时的复函数来描述随时间变化的演化过程将更为合理。

## 6 进化过程中分立性vs.连续性与间断性vs.平衡性

进化过程中, 演化的不同路径之间既存在分立性也存在连续性。物种作为进化的基本单元, 是一个分立的概念。这种分立性也是物种能稳定存在的前提要求。但是, 从进化过程的意义上来说, 物种的形成又是一个连续的过程(Wang et al, 2020)。经典的达尔文自然选择理论则认为自然演化是渐变的、连续的(Huxley, 1942), 自然演化的过程中突变是某种特征的概率发生, 因而存在进化过程的“分子钟”。强调渐变和连续性的达尔文自然选择理论无法解释生物进化历史上的物种爆发现象; 同样, 也无法解释进化树上为什么有些支系进化出很多的物种, 而有些支系却物种很少, 甚至走向停滞(Gould, 1989)。渐变理论也没有解释在连续的进化过程中, 物种又是如何通过分立而演化出区别于其他物种的独特特征的(Gould, 2002)。

古生物学家N.埃尔德雷奇和S.J.古尔德在1972年提出了“间断平衡假说”(Eldredge et al, 1972; Gould & Eldredge, 1977)。该理论认为: 新种只能通过线系分支产生, 只能以跳跃的方式快速形成, 且新种一旦形成就处于保守或进化停滞状态, 直到下一次物种形成事件发生之前, 表型上都不会有明显变化, 进化是跳跃与停滞相间, 不存在匀速、平滑、渐变的进化。“间断平衡假说”较好地解释了物种的形成以及物种或者生物多样性历史上非连续发生(Newman et al, 1985)。

从路径依赖的选择来看, 达尔文渐变理论与“间断平衡假说”都能得到合理的解释。从路径选择的角度来看, 渐变理论与“间断平衡假说”主要是由驱动路径演化因素的差异所导致。生物的进化过程包含三个步骤: 复制、突变和选择(Nowak, 2006)。一方面, 生物个体会倾向于复制与自己相似度高的性状和基因, 这使得进化延续原有路径; 另一方面, 生物又可以突变并保存具有更强竞争力的性状和基因, 这使生物存在产生新路径的概率。这两种因素通过选择相互拮抗, 形成若干条独立的进化通道。突变通常在复制过程中按一定比例产生, 这个



比例通常是定值。复制则可能随外界环境改变而改变, 当环境逐渐变差时, 复制的绝对数量将逐渐减小, 突变和复制之间的概率的差异就会减小。对于这一问题, 我们可以用一个简单的例子说明: 1和10两个数字间的差异远远小于10和100间的差异, 尽管这两组数字的比例完全相同。当环境容纳量较大时, 复制的数量就远远大于突变数量, 进化路径通常由复制主导, 突变的因素仅作为进化过程的精细调节, 此时我们看到的进化过程是“渐变的”, 进化展现出连续性。

如果外界环境容纳量使得复制数量变小, 按照前文所述, 复制和突变两种因素产生的差异也会变小, 两种因素动力相当。此时两种力量就会剧烈对抗, 系统处于临界点上。当其中一种因素占上风时, 系统的稳定性就会发生相变, 影响系统进化方式的主导因素便会从一种过渡到另一种, 从形态上就会发生所谓的“突变”过程, 我们观察到的进化便是间断的。在进化的过程中, 复制和突变两种力量往往受到环境和物种自身结构的影响, 这两个影响因素作用力的大小决定了当前过程是间断的还是连续的。由于环境的波动和物种自身结构的改变, 我们看到的进化过程通常是间断和连续过程的交替产生。因此, 间断和连续的问题, 本质上是可以通过进化的路径得到一定的解释, 它取决于进化路径分支在当前以及邻近时间点上对应的特征分布。事实上, 我们必须明确连续和分立本来就是一个相对的概念。

## 7 不同观测维度、尺度、角度, 不同的观测结果

在生命科学的研究中, 对同一观测系统却经常存在不同的理解, 甚至得出完全相反的结论, 并因此形成不同的学派。这些不同理解或者结论往往都是从不同的维度、角度或者观测尺度所得出的 (Dada & Mendes, 2011)。在演化的过程中, 不同的时间节点、不同的空间位置都可能演化出不同维度, 从而沿着不同的路径演化。而处在不同维度或者路径中, 观测角度、演化的方向将因此存在差异。也就是说, 由于不同路径的“目的”或者“目标”不同, 自然不可能得出相同的结论或者理解。

在研究合作系统动力演化的科学群体中, 在合

作行为的演化动力和维持方面, 长期存在不同学派之间的争论, 而这种争论很大程度上就是由于观测维度、角度或者观测尺度不同而导致。在榕树与榕小蜂之间的互惠合作系统中, 同样存在两个学派之间的争论 (Wang, 2008, 2011)。从宏观行为特征观测, 传粉的小蜂发育独特花粉囊来收集花粉, 而小蜂自己并不取食花粉, 进入榕果后, 首先给榕果内的小花传粉, 而后再产卵, 为典型的利他行为。而榕树则是提供一部分雌花供小蜂产卵, 小蜂的幼虫取食榕树雌花的子房而完成其发育过程。小蜂发育成成蜂后, 又收集其栖居的榕果花粉并散布花粉, 双方形成互惠合作关系。在很多观测中, 传粉的小蜂越多, 榕树的种子数也越多, 小蜂的后代数也相应更多。无论是从利益互换的角度还是宏观行为观测来看, 榕树与传粉小蜂之间属于互惠合作的性质 (Bronstein, 2001)。

然而当深入研究到小蜂的个体特征、行为后, 发现并非如之前所观测的那样。有些传粉小蜂个体花粉囊消失了, 有些小蜂花粉囊空着而并没有花粉, 显然这些个体并不都是诚实的合作者。而那些携带花粉的小蜂进入榕果后, 也并不是都给榕树的授粉做出了贡献。有些小蜂进入榕果后, 可能由于进入的小蜂数量多, 相互之间发生剧烈争斗, 严重减少了传粉量, 导致传粉不足, 降低了榕树的适合度。而有些传粉小蜂虽然没有发生打斗, 但由于榕果的雌花资源有限, 后进入的小蜂可能会因过度产卵导致发育成榕树种子的雌花减少, 同样会降低榕树的适合度(利益)。在这样的情况下, 诚实的小蜂也会招致榕树的惩罚。此时, 榕树和传粉小蜂可能会表现为竞争或者敌对关系, 而不是友好的合作关系 (Herre & West, 1997; Herre et al, 1999)。

事实上, 亚当·斯密和达尔文理论提出之初, 已经意识到其自私性的理性概念或者适者生存的概念并不具有普适性: 从整个社会或者种群的角度看, 大多数更为理性或者自私的物种或者个体能够获得更大的生存空间 (Ashraf et al, 2005)。但是, 在个体层面上, 亚当·斯密和达尔文都已经注意到了一些与自私、理性相悖的利他行为, 例如一些人类个体对素不相识者的捐助行为, 甚至牺牲自己的生命来帮助别人的行为。亚当·斯密当时就已经认识到自私的理性人的假设难以解释利他性社会合作



现象。他在他另外一本他自认为更重要的专著《道德情操论》中, 认为人是高级生物, 是有道德的, 可以无私。

达尔文同样也意识到基于生物个体自私性的“适者生存”理论难以解释生物演化的所有现象(Darwin, 1859)。自然界中, 像蚂蚁、蜜蜂、白蚁等高度社会性昆虫, 工蚁(蜂)完全不繁殖, 而利他性地帮助蜂王或者蚁后繁殖; 兵蚁或工蜂在遇到天敌或者外敌入侵时, 经常用自杀性的方式去保护蚁群或者蜂群(Drapeau et al, 2006; Matsuura et al, 2010)。显然, “自私性”难以解释社会性昆虫很多个体放弃自己的繁殖利益甚至生命去帮助其它个体的行为。因此达尔文在《物种起源》的序言中说: 对于我的结论一直被极大地误解——有人认为我将物种改变完全归因于自然选择——我应该指出, 在这本书的第一版和以后的几版中, 我在最明显的地方, 即绪论的结尾部分, 写下了这样的话: “我确信自然选择是主要的, 但不是唯一的修饰式”(Darwin, 1859)。

不同的观测者或者研究者, 由于其经历、知识背景不同, 因此对人性或者生物演化动力的理解存在差异, 甚至一个人不同成长阶段都存在巨大的差异。这些差异事实上就构成维度或者演化路径的差异, 只是在较小的尺度上, 受限于观察尺度或者检测手段, 分辨不出它们的差异。由于研究手段和技术的提高, 许多截然不同的结论随之产生, 比如冗余种概念(Walker, 1992)。从静态的空间效应看, 冗余种几乎对生态系统没有任何生态意义或者影响(就像过去认为阑尾是一个生物进化过程中退化性器官, 没有任何功能意义)。但是, 如果从生态系统的演化历史角度分析, 冗余种可能扮演着极为重要的角色, 当生态系统崩溃后, 冗余种可能在重构新生态系统中发挥着重要作用, 就像现代医学从机体免疫学的角度来看, 阑尾仍然具有重要的免疫方面的功能意义(Bollinger et al, 2007)。

## 8 结论

中性选择理论事实上就是假定生物演化过程中基因突变或者性状、行为甚至物种的产生完全是随机的, 没有方向性。然而, 现实的生态系统中, 我们经常观测到的性状、行为特征以及物种的分布却

不是完全随机的。在很多情况下某些性状、行为特征具有显著优势, 某些物种在生态系统占据统治性地位, 但性状、行为特征和物种又存在高度的多样性。优势性状、行为特征和物种的演化与多样性之间的相互矛盾可以通过路径依赖的自然选择机制实现调和。

路径依赖的自然选择认为基因突变或者性状、行为和物种的产生存在随机性, 但是在某些特定的条件下, 这些因素之间形成正反馈, 并形成其路径。新的环境会对该物种的演化路径产生重大影响, 但随着该物种在某条路径上经过较长时间演化后, 再遇到环境的波动就不会对路径有太大影响, 因为此时转移到别的路径需要付出很大的退出成本或沉没成本。但是这些路径之间仍然存在概率转移, 也就是说路径之间存在信息交流或者路径交换, 因此路径之间将存在路径的分立性也存在连续性, 演化成路径山脉图, 每一条路径就类似一座山峰。路径的山峰高低将会随着时间和空间的变化而变化, 甚至相互交换。不同的路径下, 也可以理解为不同维度下, 基因突变或者性状、行为和物种演化的适合度将存在不同的意义或者大小。

在路径依赖的自然选择过程中, 自然选择将是选择那些能瞬时而非能长期提高其适合度的基因突变、性状行为或者物种, 并强烈依赖于其历史上所经历的路径, 选择的是路径频率而不是适合度。路径频率越高的则更容易被选择, 类似人类前往某个目的地而选择道路一样, 人们选择行走的路线通常是走的人多的那条路线, 而不是路途最短或者行走效率越高的那条路线。但是由于演化的“目的”或者“目标”会随着环境变化或者种群结构的变化而发生改变, 不存在所谓的最优路径, 而是多条路径并存。不同路径上, 生物个体或者物种相对适合度或者“目的”“目标”将因此而不同。


**致谢:** 感谢云南财经大学张锋教授对论文的修改和有关复数部分内容的重要讨论。

## ORCID

王瑞武  <https://orcid.org/0000-0002-3277-4161>

李敏岚  <https://orcid.org/0000-0002-3864-0711>

韩嘉旭  <https://orcid.org/0000-0002-6230-2325>

王超  <https://orcid.org/0000-0002-9336-9725>

## 参考文献

- Ashraf N, Camerer CF, Loewenstein G (2005) Adam Smith, behavioral economist. *Journal of Economic Perspectives*, 19, 131–145.
- Baker M (2016) 1,500 scientists lift the lid on reproducibility. *Nature*, 533, 452–454.
- Bamshad MJ, Shendure JA, Valle D, Hamosh A, Lupski JR, Gibbs RA, Boerwinkle E, Lifton RP, Gerstein M, Gunel M, Mane S, Nickerson DA, Genomics CFM (2012) The Centers for Mendelian Genomics: A new large-scale initiative to identify the genes underlying rare Mendelian conditions. *American Journal of Medical Genetics Part A*, 158A, 1523–1525.
- Bertola V, Cafaro E (2008) A critical analysis of the minimum entropy production theorem and its application to heat and fluid flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, 1907–1912.
- Blount ZD, Borland CZ, Lenski RE (2008) Historical contingency and the evolution of a key innovation in an experimental population of *Escherichia coli*. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 105, 7899–7906.
- Bollinger RR, Barbas AS, Bush EL, Lin SS, Parker W (2007) Biofilms in the large bowel suggest an apparent function of the human vermiform appendix. *Journal of Theoretical Biology*, 249, 826–831.
- Bronstein JL (2001) The costs of mutualism. *American Zoologist*, 41, 825–839.
- Cavasinni V, Iacopini E, Polacco E, Stefanini G (1986) Galileo's experiment on free-falling bodies using modern optical techniques. *Physics Letters A*, 116, 157–161.
- Dada JO, Mendes P (2011) Multi-scale modelling and simulation in systems biology. *Integrative Biology*, 3, 86–96.
- Darwin, CR (1859) *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. John Murray, London.
- Dawkins R (1976) *The Extended Selfish Gene*. Oxford University Press, New York.
- Donelan SC, Hellmann JK, Bell AM, Luttbeg B, Orrock JL, Sheriff MJ, Sih A (2020) Transgenerational plasticity in human-altered environments. *Trends in Ecology & Evolution*, 35, 115–124.
- Drapeau MD, Albert S, Kucharski R, Prusko C, Maleszka R (2006) Evolution of the Yellow/Major Royal Jelly Protein family and the emergence of social behavior in honey bees. *Genome Research*, 16, 1385–1394.
- Egolf DA, Melnikov IV, Pesch W, Ecke RE (2000) Mechanisms of extensive spatiotemporal chaos in Rayleigh-Bénard convection. *Nature*, 404, 733–736.
- Ehlman SM, Trimmer PC, Sih A (2019) Prey responses to exotic predators: Effects of old risks and new cues. *The American Naturalist*, 193, 575–587.
- Eldredge N, Gould SJ (1972) Punctuated equilibria: An alternative to phyletic gradualism. In: *Models in Paleobiology* (ed. Schöpfung TJM), pp. 82–115, Freeman Cooper & Company, San Francisco.
- Ewens WJ (2004) *Mathematical Population Genetics I: Theoretical Introduction*. Springer, New York.
- Fisher RA (1936) Has Mendel's work been rediscovered? *Annals of Science*, 1, 115–137.
- Gallavotti G (2012) Nonequilibrium thermodynamics. *Physics*, 82, 438–462.
- Gavrilets S, Hastings A (1996) Founder effect speciation: A Theoretical Reassessment. *The American Naturalist*, 147, 466–491.
- Gould SJ (1989) *Wonderful Life: The Burgess Shale and the Nature of History*. W. W. Norton & Company, New York.
- Gould SJ (2002) *The Structure of Evolutionary Theory*. Harvard University Press, Cambridge.
- Gould SJ, Eldredge N (1977) Punctuated equilibria: The tempo and mode of evolution reconsidered. *Paleobiology*, 3, 115–151.
- Herre EA, Knowlton N, Mueller UG, Rehner SA (1999) The evolution of mutualisms: Exploring the paths between conflict and cooperation. *Trends in Ecology & Evolution*, 14, 49–53.
- Herre EA, West SA (1997) Conflict of interest in a mutualism: Documenting the elusive fig wasp-seed trade-off. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 264, 1501–1507.
- Hong DY (2016) Biodiversity pursuits need a scientific and operative species concept. *Biodiversity Science*, 24, 979–999. (in Chinese with English abstract) [洪德元 (2016) 生物多样性事业需要科学、可操作的物种概念. 生物多样性, 24, 979–999.]
- Houston AI, McNamara JM (1988) Fighting for food: A dynamic version of the Hawk-Dove game. *Evolutionary Ecology*, 2, 51–64.
- Huang ZY, Robinson GE (1996) Regulation of honey bee division of labor by colony age demography. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 39, 147–158.
- Hubbell SP (2001) *The Unified Neutral Theory of Biodiversity and Biogeography*. Princeton University Press, Princeton.
- Huxley JS (1942) *Evolution, the Modern Synthesis*. Allen & Unwin, London.
- Kimura M (1983) *The Neutral Theory of Molecular Evolution*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kirkwood TB, Bangham CR (1994) Cycles, chaos, and evolution in virus cultures: A model of defective interfering particles. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 91, 8685–8689.
- Li ML, Wang C, Wang RW (2021) Path-dependent speciation in the process of evolution. *Biodiversity Science*, 29, 409–418. (in Chinese with English abstract) [李敏岚, 王超, 王瑞武 (2021) 路径依赖下的物种形成机制. 生物多样性, 29, 409–418.]

- 性, 29, 409–418.]
- Lin H (2015) Thermodynamic entropy fluxes reflect ecosystem characteristics and succession. *Ecological Modelling*, 298, 75–86.
- Ludovisi A (2006) Use of thermodynamic indices as ecological indicators of the development state of lake ecosystems: Specific dissipation. *Ecological Indicators*, 6, 30–42.
- Mahoney J (2000) Path dependence in historical sociology. *Theory & Society*, 29, 507–548.
- Matsuura K, Himuro C, Yokoi T, Yamamoto Y, Vargo EL, Keller L (2010) Identification of a pheromone regulating caste differentiation in termites. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 107, 12963–12968.
- Mendel G, Bateson W (1925) Experiments in plant-hybridisation. *British Medical Journal*, 2, 694.
- Moreno-Fernández D, Hernández L, Sánchez-González M, Cañellas I, Montes F (2016) Space-time modeling of changes in the abundance and distribution of tree species. *Forest Ecology and Management*, 372, 206–216.
- Newman CM, Cohen JE, Kipnis C (1985) Neo-Darwinian evolution implies punctuated equilibria. *Nature*, 315, 400–401.
- Newton I (2006) *The Mathematical Principles of Natural Philosophy* (ed. Wang KD). Beijing Publishing Group, Beijing. (in Chinese) [Newton I (2006) 自然哲学之数学原理(王克迪译). 北京出版社, 北京.]
- Nowak MA (2006) *Evolutionary Dynamics: Exploring the Equations of Life*. Harvard University Press, Cambridge.
- Nowak MA, Sigmund K (2004) Evolutionary dynamics of biological games. *Science*, 303, 793–799.
- Prum RO (2017) *The evolution of beauty: How Darwin's forgotten theory of mate choice shapes the animal world—and us*. Doubleday, New York.
- Queller DC (1992) A general model for kin selection. *Evolution*, 46, 376–380.
- Rehage JS, Sih A (2004) Dispersal behavior, boldness, and the link to invasiveness: A comparison of four *Gambusia* species. *Biological Invasions*, 6, 379–391.
- Sih A, Ferrari MCO, Harris DJ (2011) Evolution and behavioural responses to human-induced rapid environmental change. *Evolutionary Applications*, 4, 367–387.
- Smith A (1776) *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*, Vol. 1. W. Strahan and T. Cadell, London.
- Thomas GWC, Hahn MW (2014) The human mutation rate is increasing, even as it slows. *Molecular Biology and Evolution*, 31, 253–257.
- Traulsen A, Iwasa Y, Nowak MA (2007) The fastest evolutionary trajectory. *Journal of Theoretical Biology*, 249, 617–623.
- Walker BH (1992) Biodiversity and ecological redundancy. *Conservation Biology*, 6, 18–23.
- Wang RW (2021) *The End of Rationality and Selfness*. China Commerce and Trade Press, Beijing. (in Chinese) [王瑞武 (2021) 理性与自私的终结. 中国商务出版社, 北京.]
- Wang RW, Shi L, Ai SM, Zheng Q (2008) Trade-off between reciprocal mutualists: Local resource availability-oriented interaction in fig/fig wasp mutualism. *Journal of Animal Ecology*, 77, 616–623.
- Wang RW, Sun BF, Yang Y (2015) Discriminative host sanction together with relatedness promote the cooperation in fig/fig wasp mutualism. *The Journal of Animal Ecology*, 84, 1133–1139.
- Wang RW, Sun BF, Zheng Q (2010) Diffusive coevolution and mutualism maintenance mechanisms in a fig-fig wasp system. *Ecology*, 91, 1308–1316.
- Wang RW, Sun BF, Zheng Q, Shi L, Zhu LX (2011) Asymmetric interaction and indeterminate fitness correlation between cooperative partners in the fig-fig wasp mutualism. *Journal of the Royal Society Interface*, 8, 1487–1496.
- Wang XF, He ZW, Shi SH, Wu CI (2020) Genes and speciation: Is it time to abandon the biological species concept? *National Science Review*, 7, 1387–1397.

(责任编辑: 张大勇 责任编辑: 时意专、李会丽)



•论坛•

# “保护生物多样性，共建干旱区生命共同体”宣言

## 干旱区生物多样性保护与可持续发展国际研讨会组织委员会

(联系人: 张元明, 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011, E-mail: zhangym@ms.xjb.ac.cn; 曹京华, “一带一路”国际科学组织联盟, 北京 100101, E-mail: jinghua.cao@anso.org.cn; 马克平, 中国科学院植物研究所, 北京 100093, E-mail: kpma@ibcas.ac.cn)

干旱区生物多样性保护与可持续发展国际研讨会组织委员会 (2022)“保护生物多样性, 共建干旱区生命共同体”宣言. 生物多样性, 30, 21550. doi: 10.17520/biods.2021550.

Organizing Committee of the International Symposium on Biodiversity Conservation & Sustainable Development in Arid Lands (2022) Declaration on Conserving Biodiversity and Building a Community of All Life in Arid Lands. Biodiversity Science, 30, 21550. doi: 10.17520/biods.2021550.

## Declaration on Conserving Biodiversity and Building a Community of All Life in Arid Lands

Organizing Committee of the International Symposium on Biodiversity Conservation & Sustainable Development in Arid Lands

(Correspondence: Yuanming Zhang, Xinjiang Institute of Ecology & Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, E-mail: zhangym@ms.xjb.ac.cn; Jinghua Cao, International Alliance of Science Organizations, Beijing 100101, E-mail: jinghua.cao@anso.org.cn; Keping Ma, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, E-mail: kpma@ibcas.ac.cn)

中国科学院新疆生态与地理研究所联合“一带一路”国际科学组织联盟, 于2021年12月16–17日共同举办了“干旱区生物多样性保护与可持续发展国际研讨会”, 会议主题是“保护生物多样性, 共建干旱区生命共同体”。来自中国生态环境部、联合国环境规划署、生物多样性公约秘书处、联合国防治荒漠化公约秘书处、联合国开发计划署、联合国教科文组织驻华代表处、“一带一路”国际科学组织联盟等机构的相关部门负责人及代表, 与来自中国、南非、塞内加尔、毛里塔尼亚、埃塞俄比亚、美国、德国、中亚五国、波兰等十多个国家和地区的专家学者共200多人, 线上线下参加会议。

经所有参会专家认真讨论, 一致同意发布下列宣言。

**1.** 干旱区因其生态系统的特殊性而拥有丰富而独特的生物多样性, 是支撑人类生计和社会福祉的重要物质保障。同时, 认为干旱区生物多样性的保护在实现里约三公约目标的协同增效方面有显著效果, 是实现可持续发展目标的重要组成部分。

**2.** 一致认为, 随着人类社会经济活动的加剧, 全球生物多样性受到严重破坏, 干旱区这种情况显得尤为突出, 对气候变化等因素的影响更加敏感。尽管区域内许多国家和国际社会为扭转干旱区生物多样性丧失付出了巨大努力, 但仍不足以

减缓生物多样性的丧失趋势。

**3.** 认同干旱区生物多样性主要面临的挑战和危机包括: 人口增加以及土地利用变化、生物资源的不合理和不可持续利用、大型工程项目的开发、气候变化、外来物种入侵、政策法规和管理体系缺失与不完善、信息共享严重不足等。

**4.** 共同倡议需采取的战略应对主要包括以下方面:

**a.** 敦促区域内所有国家把干旱区生物多样性的保护和可持续利用纳入国家政策、规划、战略和行动的主流, 制定更具有前瞻性和目标为导



向的技术路线将有助于目标的实现。

**b.** 呼吁通过自然恢复的方法来保护和恢复现有的原始生态系统，以保护干旱区独特的物种。

**c.** 减少对生物多样性的压力并促进可持续利用。

**d.** 提高生物多样性和生态系统服务为人类带来的惠益。

**e.** 确保干旱生态系统在保护区计划中得到充分的支持。

**f.** 制定法律法规，确保在开发或改变干旱土地生态系统之前进行有效的环境影响评估，并防止种植非本土和潜在的入侵物种。

**g.** 增加流入干旱区国家的资金，并加强能力建设、技术转让和科学合作，加强干旱区的履约工作。

**5.** 共同倡议应采取的干旱区生物多样性保护行动计划包括以下方面：

**a.** 成立“干旱区生物多样性保护联盟”，建立适合于各利益相关方的合作机制，为联合研究和能力建设提供国际化平台。

**b.** 加强干旱区生物多样性本底调查和信息化工作，建立共享数据库，纳入国际主流信息库，以期达到全球共享干旱区生物多样性信息的目的。

**c.** 发展伙伴关系，解决非洲和亚洲之间干旱区物种贸易的不可持续利用问题。

**d.** 帮助制定指导方针，防止不可持续的发展和干旱生态系统的改变，并向决策者和其他行动者提供教育，以了解对这些系统进行可持续管

理的需要。

**e.** 建立“干旱区生物种质资源保育与研究中心”，有效保育珍贵生物种质资源，并在遗传资源挖掘和抗逆新种质培育方面提供更多适应性强的新品种，以适应气候变化和人类活动产生的胁迫效应。

**f.** 加强生物多样性监测和评估，注重跨区域、跨境合作保护，尤其是提高对入侵物种的监控能力；提升自然保护地、国家公园和野生动物/植物园建设和管理能力。

**g.** 充分挖掘当地居民和社区对生物多样性保护和利用的传统知识，促进社区参与式的生物多样性保护模式的形成，将生物资源保护和利用有机融合。

**h.** 采取积极措施，联合政府机构、政府间组织和非政府组织力量，开展干旱区生物多样性保护知识普及，提高公众参与意识，尤其是对决策者和政策制定者产生积极影响。

**i.** 加强里约三公约之间的协同作用，以提高其有效性，更好地维护生物多样性，实现全球气候目标；同时加强联合国《保护野生动物迁徙物种公约》(CMS)的作用。

**j.** 有效利用遥感数据，探索将遥感信息与地面数据收集整合的新模式，实现干旱生态系统跨时空的更有效监测，实现2020后全球生物多样性框架的监测目标。

**k.** 建立一个多元网络，以加强在干旱生态系统中制定有效指标和保护生物多样性方面的能力。

(上接后页)

杨雪飞 杨永 杨永川 杨祝良 姚小洪 叶建飞 叶文 雍怡 于丹丹 于飞海 于富强 于海彬  
于宏伟 于文轩 于晓平 袁海生 袁智勇 原作强 岳明 臧润国 曾江宁 曾昭清 张保卫 张春田  
张丛林 张大勇 张道远 张锋 张健 张力 张丽梅 张路 张明罡 张明海 张乃莉 张强  
张文驹 张宪春 张小勇 张宇阳 张毓 张元明 张正旺 张志强 张志翔 张志勇 赵富伟 赵杰  
赵凯 赵学勇 赵亚辉 赵玉金 赵郁豪 赵云鹏 赵志刚 郑国 郑兰平 郑苗壮 郑勇 钟泳林  
周华坤 周进 周立志 周岐海 周淑荣 周伟 周文君 周欣 周友兵 周正奎 朱朝东 朱飞飞  
朱耿平 朱华 朱欢 朱瑞良 朱新玉 朱彦鹏 朱永恒 朱志红 祝燕 邹发生 邹红菲

(按姓氏字母排列，如有遗漏，请与编辑部联系)

①中国科学院植物研究所；②中国环境科学研究院。

•The English version•

## **Declaration on Conserving Biodiversity and Building a Community of All Life in Arid Lands**

Organizing Committee of the International Symposium on Biodiversity Conservation & Sustainable Development in Arid Lands

(Correspondence: Yuanming Zhang, Xinjiang Institute of Ecology & Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, E-mail: [zhangym@ms.xjb.ac.cn](mailto:zhangym@ms.xjb.ac.cn); Jinghua Cao, International Alliance of Science Organizations, Beijing 100101, E-mail: [jinghua.cao@anso.org.cn](mailto:jinghua.cao@anso.org.cn); Keping Ma, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, E-mail: [kpma@ibcas.ac.cn](mailto:kpma@ibcas.ac.cn))

*The International Symposium on Biodiversity Conservation & Sustainable Development in Arid Lands, co-organized by Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences (XIEG-CAS) and the International Alliance of Science Organizations (ANSO) was successfully held on December 16–17, 2021 in Urumqi, China. The theme of this symposium was “Conserving Biodiversity and Building Life Community in Arid Lands”. It attracted more than 200 experts and scholars from 10 plus countries, including China, South Africa, Senegal, Mauritania, Ethiopia, the United States, Germany, Belgium, Poland, Kazakhstan, Kyrgyzstan, Tajikistan, Uzbekistan, Turkmenistan, Nepal and India, and the representatives from the Ministry of Ecology and Environment of China, UNEP, CBD, UNCCD, UNDP, UNESCO and ANSO as well.*

*All experts participating at this Symposium agreed and proposed with releasing the following Declaration after exchange of views and interests and further discussion.*

- 1.** Due to the particularity of their ecosystems, arid lands have rich and unique biodiversity, which is an important material assurance to support human livelihood and social well-being. And considering that biodiversity conservation in arid lands will contribute to the synergies to the commitments of Rio conventions, and is important component of the way to meet the Sustainable Development Goals.
- 2.** Recognizing that global biodiversity has suffered severe damage as human activities have increased, which is particularly prominent in arid lands. Arid lands are more sensitive to the affection of climate change. Though many nations and international organizations have made great efforts to reversing some negative biodiversity trends, overall, progress towards halting biodiversity loss is still insufficient.
- 3.** Acknowledging that challenges to biodiversity in arid lands include: rapid population growth, land use patterns changing, unsustainable and unreasonable use of biological resources, large-scale construction, climate change, alien species invasions, weak policies and management mechanism, and insufficiency of information sharing.
- 4.** Proposing the strategy for addressing causes of biodiversity loss in arid lands includes:
  - a.** Mainstream the biodiversity conservation in arid lands into state policies, plans, strategies and practices could be achieved with more proactive and goal-oriented approaches.
  - b.** Call for conserving and restoring the degraded original ecosystem by nature based solution to protect the unique plant species in arid lands.
  - c.** Decline pressures and promote sustainable management of biodiversity and ecosystem.
  - d.** Improve contributions of biodiversity and ecosystem services benefit to livelihood.
  - e.** Ensure that arid ecosystems are adequately encompassed state strategy and plan of protected area.
  - f.** Promote legislation to ensure environmental impact assessments prior to development or modification of arid land ecosystems, and prevent the plantation of nonnative, and potentially invasive species.
  - g.** Mobilize financial resources to the countries in arid lands, strengthen capacity building, accelerate technology transfer and scientific cooperation, and improve governance skill at various levels in arid lands.
- 5.** Proposing the actions adopted for biodiversity conservation in arid lands includes:
  - a.** Establish a biodiversity conservation alliance as a cooperation mechanisms adopted by all stakeholders for creating platforms for joint scientific research, capacity building, and programme implementation in arid lands.
  - b.** Strengthen biodiversity background investigation and digitization in arid lands and establish shared

databases for the global sharing of biodiversity information in arid lands.

- c.** Develop partnerships to avoid and stop unsustainable utilization of arid-land species traded between Africa and Asia.
- d.** Create technical and administrative guidance to prevent unsustainable development and modification of arid land ecosystems and to provide education to policy-makers and other actors to understand the needs for sustainable management of arid land ecosystems.
- e.** Establish a germplasm conservation and research center for arid lands, effectively conserve valuable wild germplasm resources, and produce more adaptable new crop varieties with better performing genetic characteristics and stress-resistance.
- f.** Enhance biodiversity monitoring and assessment, with an emphasis on invasive species; increase cross-border regional cooperation, strengthen the construction and management of natural protected areas, national parks, wildlife reserves and botanic gardens in arid land regions.
- g.** Engage local communities by employing the knowledge and customary practices of local peoples to synergize biological conservation with sustainable utilization.
- h.** Adopt measures to collaborate with governmental agencies and Civil Society Organizations (CSOs) to disseminate knowledge and best practices, to promote building capacity and to strengthen public awareness on biodiversity conservation, with a positive impact preferred on policy and decision makers in particular.
- i.** Strengthen the synergies among the Rio conventions to enhance the effective implementation and better maintain biodiversity whilst achieving global targets of UN SDGs, as well as the Convention on Migratory Species (CMS) for migratory species which rely on connectivity in arid land regions.
- j.** Apply remote sensing technique to enable more effective monitoring of arid ecosystems and meet the goals of the proposed monitoring of the Post-2020 Global Biodiversity Framework.
- k.** Build a network to enhance capacity and implementation of the development of effective indicators and the conservation of biodiversity in arid ecosystems.

## 致谢2021年度审稿专家

2021年度(1月1日至12月31日), 以下专家为《生物多样性》审阅稿件, 在此向各位专家致以诚挚的谢意! 正是因为有了专家们认真、细致、及时地审阅稿件, 才保障了刊物的学术质量, 缩短了稿件的处理周期, 从而使刊物赢得了更多读者和作者的信赖。

白德凤 白明 白文明 白杨 彩万志 蔡邦平 蔡杰 蔡立哲 蔡永久 曹槟 曹坤芳 曹岚  
曹亮 曹铭昌 曹越 常朝阳 车静 陈宝明 陈彬 陈传武 陈锋 陈高 陈华燕 陈亮  
陈龙 陈明勇 陈沛霖 陈清华 陈尚 陈圣宾 陈世龙 陈水华 陈顺德 陈蔚涛 陈小勇 陈艳  
陈又生 陈宇顺 陈禹衡 陈振宁 陈中义 成功 程栋梁 程在全 褚海燕 崔国发 崔鹏 代力民  
戴志聪 邓建明 邓梁春 邓旺秋 邓文洪 邓志军 翟俊文 丁建清 丁平 丁少雄 丁圣彦 丁文娜  
丁小余 丁易 东秀珠 董锋 董路 董世魁 杜傲 杜诚 杜道林 段元文 樊凡 方强  
房帅 冯刚 冯虎元 冯彦皓 冯玉龙 傅声雷 高程 高连明 高天翔 高欣 高秀兵 葛德燕  
葛学军 龚春梅 龚骏 龚维 官天培 郭宝成 郭良栋 郭鹏 郭青海 郭庆华 郭文永 郭亚龙  
郭延平 韩辉林 韩丽丽 韩庆喜 韩廷申 何德奎 何杰坤 何舜平 何思源 贺金生 侯学良 胡军华  
胡若成 胡天宇 胡跃华 华方圆 黄宝荣 黄国华 黄继红 黄建辉 黄亮亮 黄乔乔 黄双全 黄松  
黄伟 黄晓磊 黄振英 惠争创 霍斌 季妞妞 贾渝 江建平 江明喜 姜广顺 姜雨 蒋宏  
蒋学龙 蒋志刚 蒋智林 金冬梅 金江群 金效华 金毅 井新 鞠瑞亭 阚显照 康明 柯欣  
孔宏智 赖江山 雷富民 雷光春 雷霆 黎大勇 黎绍鹏 李宝泉 李彬彬 李波 李晟 李春旺  
李迪强 李飞 李辉信 李建强 李静 李娟 李俊生 李黎 李利平 李琪 李仁辉 李帅锋  
李泰辉 李添明 李文楷 李先琨 李欣海 李新江 李新正 李学友 李玉春 李媛媛 李镇清 李治霖  
李忠秋 郦珊 连新明 梁爱萍 梁尔源 梁伟 梁宇 廖金宝 林聪田 林露湘 刘爱忠 刘晨  
刘定震 刘芳 刘国方 刘红梅 刘佳佳 刘建全 刘金龙 刘静 刘军会 刘丽 刘满强 刘鸣章  
刘少英 刘松林 刘夙 刘小勇 刘晓娟 刘星月 刘秀群 刘宣 刘演 刘艳杰 刘阳 刘颖  
刘宇婧 刘振生 刘镇盛 刘仲健 龙春林 龙宇晓 娄安如 卢新民 鲁丽敏 陆家海 陆明星 栾晓峰  
罗静 罗明宇 罗世孝 罗旭 罗亚皇 罗振华 吕晓涛 吕植 吕植桐 马方舟 马金双 马克明  
马克平 马涛 马志军 毛康珊 毛岭峰 米湘成 苗运法 莫明和 倪健 聂永刚 聂泽龙 潘庆民  
潘晓云 庞虹 彭奎 彭蔚嘉 彭艳琼 彭羽 彭作刚 钱法文 乔慧捷 乔秀娟 覃海宁 秦天宝  
秦新生 邱服斌 邱鹭 邱英雄 曲家鹏 权擎 阙华勇 冉江洪 饶定齐 饶胜 任国栋 任明迅  
任宗昕 桑卫国 邵小明 邵元虎 邵宗泽 申国珍 申小莉 沈国春 沈泽昊 时坤 帅凌鹰 斯金平  
斯幸峰 宋博 宋刚 宋理洪 宋晓阳 苏红巧 苏艳军 苏杨 隋吉星 孙典荣 孙军 孙磊  
孙杉 孙永帅 孙振钧 索南吉 谭敦炎 谭江丽 谭运洪 唐志尧 田怀珍 田明义 田长富 万方浩  
万基中 汪松 王彬 王春生 王聪 王放 王红 王建军 王杰 王金旺 王婧 王凯  
王岭 王美娜 王敏 王年 王其兵 王洽 王庆刚 王戎疆 王嵘 王瑞 王瑞江 王少鹏  
王生位 王天明 王伟<sup>①</sup> 王伟<sup>②</sup> 王文 王文娟 王希华 王新谱 王绪高 王彦平 王英勇 王永慧  
王永龙 王勇 王志恒 王智 韦中 魏铁铮 魏伟 魏新增 温知新 文陇英 吴宝成 吴东东  
吴东辉 吴飞 吴海龙 吴纪华 吴军 吴凌云 吴鹏飞 吴诗宝 吴小平 吴新卫 吴毅 吴永杰  
吴玉环 武彬蔚 武春生 武海涛 武建勇 武瑞东 夏念和 向春雷 向建英 向小果 向左甫 肖凌云  
肖文宏 肖治术 谢宗强 星耀武 邢丁亮 邢鹏 徐驰 徐基良 徐建龙 徐靖 徐奎栋 徐勤增  
徐卫华 徐武兵 徐晓婷 徐艳春 徐耀粘 徐雨 薛达元 闫小玲 闫昱晶 严岳鸿 阳文静 杨道德  
杨剑焕 杨洁 杨军 杨连东 杨渺 杨庆文 杨锐 杨天燕 杨维康 杨晓东 杨晓君 杨效东

(下转前页)



# 天空地一体化全方位立体结构生物多样性监测系统

雷达监测

热成像可见光转台监测



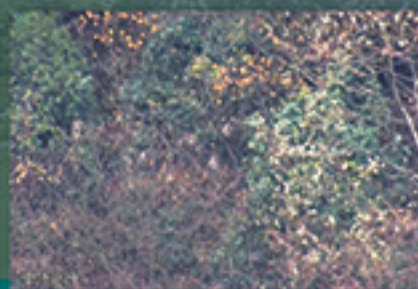
发现目标、定位目标  
统计目标数量

跟踪拍摄目标

录像存储

## 功能特点

- ★监测：雷达+光电转台 双重监测  
监测半径  $\geq 5\text{km}$ ；目标大小  $\geq 0.5\text{m}^2$ ；移动速度  $\geq 0.2\text{m/s}$ ；  
范围  $0 \sim 360^\circ$ （水平）， $-15 \sim +90^\circ$ （俯仰）；  
扫描时间  $10\text{s}/360^\circ$ （MAX）；  
分辨率  $\geq 300$ 万像素（可见光）， $\geq 640 \times 480$ 像素（热成像）；
- ★搜索：雷达实时对地面、空域巡航搜索监测移动生物目标；
- ★发现+跟踪：雷达发现所有移动生物目标，实施跟踪监测，同时将生物目标位置传送到光电转台；
- ★锁定+识别：光电转台接收雷达报送生物目标位置后，进行生物目标锁定、跟踪、抓拍，通过深度学习、大数据分析进行生物识别；
- ★计数+分析：雷达对监测目标进行数量统计，光电转台视频图像直观数量核实并存储；中心平台基于人工智能技术分析辖区生物分布，种群数量。



西安知语云智能科技有限公司  
Xi'an Zhiyu Cloud Intelligence Technology Co., Ltd.

地址：西安市高新区科技5路橡树星座8座4层

网址：<http://www.zyai2021.com>

电话：029-89381578



中国科技期刊卓越行动计划项目(2019–2023)  
中文科技期刊精品建设计划项目(2018)  
中国科协精品科技期刊择优支持(2008–2014)、TOP50 (2015–2017)  
中国科学院科学出版基金择优支持(2013–2015, 2017–2018)  
百种中国杰出学术期刊(2007–2010, 2012–2013, 2015–2020)  
中国精品科技期刊(2008–2023)  
北京大学《中文核心期刊要目总览》收录期刊  
中国科技核心期刊(中国科技论文统计源期刊)  
中国国际影响力优秀学术期刊(2012, 2014–2021)

## 《生物多样性》2020年引证指标

	数值	学科排名
核心影响因子	1.758	生物学基础学科类第二
核心总被引频次	3380	生物学基础学科类第一
核心综合评价总分	70	生物学基础学科类第一

根据中国科学技术信息研究所2021年版《中国科技期刊引证报告(核心版)》

**生物多样性**  
**SHENGWU DUOYANGXING**  
(月刊, 1993年10月创刊)  
第30卷 第1期 2022年1月

**BIODIVERSITY SCIENCE**  
(Monthly)  
(Started in October, 1993)  
Vol. 30 No. 1 January, 2022

编辑 《生物多样性》编辑部  
(北京香山南辛村20号, 邮政编码: 100093)  
电子信箱: biodiversity@ibcas.ac.cn  
网址: www.biodiversity-science.net  
电话: 010-62836137, 62836665

主编 马克平  
主管单位 中国科学院  
主办单位 中国科学院生物多样性委员会  
中国植物学会  
中国科学院植物研究所  
中国科学院动物研究所  
中国科学院微生物研究所

出版 《生物多样性》编辑部  
印刷 北京科信印刷有限公司  
发行 北京报刊发行局  
订购 全国各地邮局  
国外总发行 中国国际图书贸易集团有限公司  
(北京399信箱, 邮政编码: 100044)  
广告发布登记 京海工商广登字20170247号

Edited by the Editorial Office of Biodiversity Science  
(20 Nanxincun Xiangshan, Beijing 100093, China)  
E-mail: biodiversity@ibcas.ac.cn  
https://www.biodiversity-science.net  
Tel: 86-10-62836137, 62836665

Editor-in-Chief: Keping Ma  
Responsible Institution: The Chinese Academy of Sciences  
Sponsored by Biodiversity Committee of the Chinese Academy of Sciences (CAS), Botanical Society of China, Institute of Botany, Institute of Zoology and Institute of Microbiology, CAS

Published by the Editorial Office of Biodiversity Science  
Printed by Beijing Kexin Printing Company  
Distributed by

Domestic: Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Foreign: China International Book Trading Corporation  
(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)  
E-mail: zw@ww.cibtc.com.cn

国内外公开发行 ISSN 1005-0094 国内邮发代号: 82-858 国外发行代号: M1395 国内定价: 100.00元  
CN 11-3247/Q



生物多样性微信号



生物多样性官网

ISSN 1005-0094



9 771005 009220

0.1>