



ISSN 1005-0094
CODEN SHDUEM

BIODIVERSITY SCIENCE

生物多样性

第28卷 第4期
2020年4月

Vol. 28 No. 4
April 2020



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

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

生物多样性

SHENGWU DUOYANGXING

第28卷 第4期 2020年4月

目次

阿勒泰动物多样性专题

- 401 中国阿勒泰地区鸟类物种编目、丰富度格局和区系组成
李娜 丁晨晨 曹丹丹 初红军 戚英杰 李春旺 平晓鸽 孙悦华 蒋志刚
- 412 阿尔泰山前荒漠两种沙蜥体况指数特征及其与生态因子的关系
陶夏秋 蒋志刚 吉晟男 初红军 李娜 杨道德 李春旺
- 422 新疆阿勒泰地区额尔齐斯河和乌伦古河流域鱼类多样性演变和流域健康评价
李雪健 贾佩尧 牛诚祎 邢迎春 李浩林 刘海波 唐文乔 赵亚辉
- 435 新疆阿尔泰山喀纳斯河谷鸟兽物种的红外相机监测
崔绍朋 陈代强 王金宇 孙吉舟 初红军 李春旺 蒋志刚
- 442 阿尔泰山中蒙边境地区的雪豹及其保护意义
初雯雯 蒋志刚 李凯 胡德夫 陈刚 初红军

研究报告

植物多样性

- 445 哀牢山亚热带中山湿性常绿阔叶林树种 β 多样性格局形成的驱动力
姚志良 温韩东 邓云 曹敏 林露湘
- 455 桂西南喀斯特季节性雨林叶凋落量的时空动态
贾梦可 郭屹立 李冬兴 王斌 向悟生 王爱龙 刘晟源 丁涛 皇甫昭 文淑均 陆树华 李先琨
- 463 水杉原生种群结构及空间分布格局
黄小 朱江 姚兰 艾训儒 王进 吴漫玲 朱强 陈绍林

动物多样性

- 474 唐鱼养殖种群与广州附近4个野生种群的遗传关系
李潮 金锦锦 罗锦桢 王春晖 王俊杰 赵俊
- 485 黔西北石漠化地区两栖动物多样性及其生境选择
王存璐 陈泚 肖华 张红梅 李林芝 郭城 陈静 魏强
- 496 垂叶榕榕小蜂群落及种间互作网络季节动态
董乙义 彭艳琼 王波
- 504 澜沧江流域水生昆虫群落分类多样性和功能多样性海拔格局的空间尺度依赖性
魏慧玉 陈凯 王备新

生物编目

- 515 中国造礁石珊瑚分类厘定
黄林韬 黄晖 江雷

技术与方法

- 524 国内8款常用植物识别软件的识别能力评价
许展慧 刘诗尧 赵莹 涂文琴 常诏峰 张恩涛 郭靖 郑迪 耿鋈 顾高营 郭淳鹏 郭璐璐 王静 徐春阳 彭钊 杨腾 崔梦琪 孙伟成 张剑坛 刘皓天 巴超群 王鹤琪 贾竞超 武金洲 肖翠 马克平

书评

- 534 读《中国植物分类学纪事》的几点思考
赵云鹏
- 536 《自然资本议定书》介绍
赵阳

封面: 造礁石珊瑚是珊瑚礁框架的建造者, 具有维持珊瑚礁生态系统功能和稳定性的重要作用。黄林韬等(见本期515-523页)结合历史文献和最新分类研究进展, 全面梳理了中国造礁石珊瑚的分类变动, 编制了中国造礁石珊瑚物种名录并规范了中国造礁石珊瑚的物种中文名。封面展示了南沙群岛渚碧礁的珊瑚礁生境。(照片提供者: 黄晖)

BIODIVERSITY SCIENCE

Vol. 28 No. 4 April 2020

CONTENTS

Special Feature: Altay Animal Diversity

- 401 **Avian species census, richness patterns and faunal composition in the Altay Region, China**
Na Li, Chenchen Ding, Dandan Cao, Hongjun Chu, Yingjie Qi, Chunwang Li, Xiaoge Ping, Yuehua Sun and Zhigang Jiang
- 412 **The relationship between body condition index and ecological factors in two *Phrynocephalus* species in the piedmont desert of Altai Mountains**
Xiaqiu Tao, Zhigang Jiang, Shengnan Ji, Hongjun Chu, Na Li, Daode Yang and Chunwang Li
- 422 **Species diversity of freshwater fish and assessment on watershed health in the Irtysh River and Ulungur River basins in Xinjiang, China**
Xuejian Li, Peiyao Jia, Chengyi Niu, Yingchun Xing, Haolin Li, Haibo Liu, Wenqiao Tang and Yahui Zhao
- 435 **Camera-trapping survey on mammals and birds in the Kanas River Valley of Altai Mountains, Xinjiang, China**
Shaopeng Cui, Daiqiang Chen, Jinyu Wang, Jizhou Sun, Hongjun Chu, Chunwang Li and Zhigang Jiang
- 442 **The snow leopard in Altai Mountains, near the Sino-Mongolia border, and its conservation significance**
Wenwen Chu, Zhigang Jiang, Kai Li, Defu Hu, Gang Chen and Hongjun Chu

Original Papers

Plant Diversity

- 445 **Driving forces underlying the beta diversity of tree species in subtropical mid-mountain moist evergreen broad-leaved forests in Ailao Mountains**
Zhiliang Yao, Handong Wen, Yun Deng, Min Cao and Luxiang Lin
- 455 **Spatio-temporal dynamics of leaf litter in a karst seasonal rainforest in southwest Guangxi**
Mengke Jia, Yili Guo, Dongxing Li, Bin Wang, Wusheng Xiang, Ailong Wang, Shengyuan Liu, Tao Ding, Fuzhao Huang, Shujun Wen, Shuhua Lu and Xiankun Li

- 463 **Structure and spatial distribution pattern of a native *Metasequoia glyptostroboides* population in Hubei**
Xiao Huang, Jiang Zhu, Lan Yao, Xunru Ai, Jin Wang, Manling Wu, Qiang Zhu and Shaolin Chen

Animal Diversity

- 474 **Genetic relationships of hatchery populations and wild populations of *Tanichthys albonubes* near Guangzhou**
Chao Li, Jinjin Jin, Jinzhen Luo, Chunhui Wang, Junjie Wang and Jun Zhao
- 485 **Diversity and habitat selection of amphibians in rocky desertification area in northwestern Guizhou**
Cunlu Wang, Hu Chen, Hua Xiao, Hongmei Zhang, Linzhi Li, Cheng Guo, Jing Chen and Qiang Wei
- 496 **Seasonal dynamics of fig wasp community and interaction networks in *Ficus benjamina***
Yiyi Dong, Yanqiong Peng and Bo Wang
- 504 **The spatial scale dependency of elevational patterns of taxonomic and functional diversity in aquatic insects in the Lancang River, Yunnan, China**
Huiyu Wei, Kai Chen and Beixin Wang

Bioinventory

- 515 **A revised taxonomy for Chinese hermatypic corals**
Lintao Huang, Hui Huang and Lei Jiang

Technology and Methodology

- 524 **Evaluation of the identification ability of eight commonly used plant identification application softwares in China**
Zhanhui Xu, Shiyao Liu, Ying Zhao, Wenqin Tu, Zhaofeng Chang, Entao Zhang, Jing Guo, Di Zheng, Jun Geng, Gaoying Gu, Chunpeng Guo, Lulu Guo, Jing Wang, Chunyang Xu, Chuan Peng, Teng Yang, Mengqi Cui, Weicheng Sun, Jiantan Zhang, Haotian Liu, Chaoqun Ba, Heqi Wang, Jingchao Jia, Jinzhou Wu, Cui Xiao and Keping Ma

Book Reviews

- 534 **Brief review and implications of *A Chronicle of Plant Taxonomy in China***
Yunpeng Zhao
- 536 **Brief introduction to *Natural Capital Protocol***
Yang Zhao

Cover Illustration: As the major reef framework builder, hermatypic corals play key roles in maintaining the stability and function of coral reef ecosystems. Based on historical data of hermatypic coral and the taxonomic research results, Huang et al (see pages 515–523 of this issue) summarize the taxonomy of hermatypic corals, and present a comprehensive species list of hermatypic corals reported in China, and standardize their Chinese names. The picture is the coral reef habitat of Zhubi Reef in Nansha Islands. (Photographed by Hui Huang)



•研究报告•

中国阿勒泰地区鸟类物种编目、丰富度格局和区系组成

李娜^{1,2#} 丁晨晨^{1,2#} 曹丹丹^{1,2} 初红军^{3,4} 戚英杰³
李春旺^{1,2} 平晓鸽¹ 孙悦华^{1,2} 蒋志刚^{1,2*}

1 (中国科学院动物研究所动物生态与保护生物学重点实验室, 北京 100101)

2 (中国科学院大学, 北京 100049)

3 (新疆卡拉麦里山有蹄类自然保护区, 新疆阿勒泰 836500)

4 (新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046)

摘要: 中国阿勒泰地区位于新疆北部, 与哈萨克斯坦、俄罗斯、蒙古国交界, 该区包含阿尔泰山及山前荒漠和绿洲, 属于全球200个生物多样性最丰富和最具代表性生态区之一的阿尔泰-萨彦岭生物热点地区。阿勒泰地区生境多样, 鸟类物种资源丰富。尽管以往曾在阿勒泰地区进行过一些鸟类调查, 但对于该地区不同景观和生境类型中鸟类物种丰富度和分布尚无详尽报道。本文通过2013–2016年在中国境内阿尔泰山及山前平原地区对不同生境类型中的鸟类进行实地调查, 并总结文献资料及观鸟爱好者的记录数据, 重新整理了阿勒泰地区鸟类名录及地理分布, 分析了鸟类的物种组成、区系成分; 通过鸟类分布位点数据, 选取气候、土地覆被类型、人类足迹指数及地形共4类环境因子作为自变量建立MaxEnt生态位模型, 通过模拟77种鸟类的适宜分布区并叠加分布图层, 获得了阿勒泰地区的鸟类物种丰富度分布格局。结果表明: 阿勒泰共记录鸟类344种, 隶属19目55科149属, 其中雀形目163种。在垂直海拔带上, 鸟类物种数分别为高山裸岩带24种, 高山草甸带35种, 山地森林草原带172种, 低山灌木带130种, 荒漠草原带84种, 平原绿洲带173种, 以及各海拔带的湿地与水域生境中水鸟92种; 在区系成分上, 以北方型鸟类为主(170种, 占49.4%), 其次为广布种(93种, 占27.0%)。阿尔泰山地的鸟类区系呈现出西伯利亚动物区系特征, 山前平原地区呈现蒙新区分布特征, 因此, 阿勒泰地区动物地理区系属于古北界欧洲-西伯利亚亚界阿尔泰-萨彦岭区阿尔泰亚区; 山前平原地区属于古北界中亚亚界蒙新区西部荒漠亚区。MaxEnt模型推测阿勒泰地区山前平原绿洲地区、山地森林草原带和低山灌木带具有较高的鸟类物种丰富度, 尤其是额尔齐斯河流域下游的绿洲带宽阔, 鸟类物种丰富, 而高山区和荒漠生境中鸟类物种相对较少。模型预测的结果与实际调查情况相符。阿勒泰地区应采用生态友好的经济发展策略, 加强对乔木和灌木的保护, 这有助于维持较高的鸟类物种多样性。此外, 降低生境破碎化不仅对该地区物种保护有重要作用, 也对维持阿尔泰-萨彦岭生物热点地区的山地鸟类多样性有重要意义。

关键词: 中国阿勒泰; 阿尔泰山; 鸟类; 生境类型; 区系特征; 物种丰富度

Avian species census, richness patterns and faunal composition in the Altay Region, China

Na Li^{1,2#}, Chenchen Ding^{1,2#}, Dandan Cao^{1,2}, Hongjun Chu^{3,4}, Yingjie Qi³, Chunwang Li^{1,2}, Xiaoge Ping¹, Yuehua Sun^{1,2}, Zhigang Jiang^{1,2*}

1 Key Laboratory of Animal Ecology and Conservation Biology, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Kalamaili Mountains Ungulate Nature Reserve, Altay, Xinjiang 836500

4 College of Resource and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046

收稿日期: 2019-01-28; 接受日期: 2019-06-25

基金项目: 国家科技部重点基础性专项(2013FY110300)、国家重点研发计划(2016YFC0503303)和中国科学院战略性先导科技专项 A 类(XDA19050204)

共同第一作者 Co-first authors

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

Abstract: The Altay Region in China is located in North Xinjiang, in the border region of China, Kazakhstan, Russia and Mongolia. The region contains the Altai Mountains and the desert and riparian landscapes south of them, which constitutes the Altai-Sayan biodiversity hotspot and one of the Global 200 Biodiversity Ecoregions. Being composed of diverse habitat types, the Altay region harbors a rich avian fauna. Though there are several field studies on a few avian species in the Altay Region, few studies have focused on broad-scale species diversity and distribution patterns across different habitats and landscapes. Thus, we completed a comprehensive census across various landscapes and habitats in the region. In this study, we recorded bird species in different types of habitats on the southern slope of the Altai Mountains and the plains area south of the Altay Region from 2013 to 2016. We also collected information from the literature and local citizen science records. The resulting bird species inventory allowed us to use MaxEnt models to predict distributions and diversity patterns of 77 bird species in the Altay Region. Four classes of environmental predictor variables, i.e. climatic factors, land cover type, human footprint index and terrain were incorporated into the models. We predicted all species' distribution patterns and added all species' distribution layers together to determine broad-scale diversity patterns. In total, 19 orders, 55 families, 149 genera and 344 bird species were represented in the Altay Region of China. Along the vertical vegetation belts, there were 24 species in high mountain-bare rock belt; 35 in alpine meadows; 172 in mountain forest belt; 130 in brush land in low mountains; 84 in desert belt; 173 in riparian belt; and an additional 92 species in wetland and water areas. In the Altay Region, Palearctic type birds dominated the avian fauna with 170 species (49.4%) and followed by widespread northern species (93 species; 27.0%). The Altai Mountains belonged to Palearctic Realm, Europe-Siberia Sub-realm, Altai-Sayan Region and Altai Sub-zoogeographical Region, while the plain areas belonged to Palearctic Realm, Central Asia Sub-realm, Inner Mongolia-Xinjiang Region and West Desert Subregion. The MaxEnt models predicted high species diversity in the riparian, plains, and middle and lower montane areas, congruent with previous field data. Protecting tall trees and young saplings and shrubs through eco-friendly economic development strategies and preventing habitat fragmentation will help maintain high species richness in the Altay Region and the Altai-Sayan Ecoregion.

Key words: Altay Region; Altai Mountains; birds; habitat types; fauna; species richness

中国阿勒泰地区(85°–91° E, 45°–49° N)位于新疆维吾尔自治区北部的阿尔泰山南麓, 总面积 11.80 万 km²。其东部与蒙古接壤, 西部、北部与哈萨克斯坦、俄罗斯交界。全区地势呈山脉西高东低, 丘陵平原东高西低, 从北部阿尔泰山脊线到南部丘陵平原海拔逐渐下降, 垂直地带分布明显, 地形复杂, 植被类型多样, 野生动植物资源丰富。阿尔泰山是《中国生物多样性保护战略与行动计划》(2011–2030)确立的 35 个生物优先保护区域之一, 也属于全球 200 个关键生态区之一的阿尔泰–萨彦岭生态区(Olson & Dinerstein, 2002)。阿勒泰地区位于候鸟迁徙路线上, 其湿地是迁徙候鸟的重要栖息地。该地区的荒漠生境中生存着多种珍稀物种(董潭成等, 2014), 整个地区对物种多样性保护具有重要意义。通过制定有效的管理方案, 能够有效降低人为因素对生物多样性的影响, 但制定有效的生物多样性保护方案需要详尽、可靠的物种分布信息。

虽然此前在阿勒泰地区有过多次鸟类调查, 但对于整个阿勒泰地区不同生境中鸟类的分布特征

还未有详尽报道。向礼咳和黄牛鑫(1986)对新疆阿尔泰山鸟类的垂直分布进行了报道, 并结合他人研究结果, 记载鸟类 173 种 11 亚种。兰欣和谷景和(1993)结合实地调查及前人成果, 记录了阿尔泰山鸟类 249 种。邓杰等(1995)采用汽车沿线观察的方法, 对新疆北部阿勒泰地区的鸟类进行了调查, 共记录到鸟类 120 种。马鸣(1997)对阿尔泰山金塔斯草原自然保护区进行了动物调查, 并结合前人文献, 共记录鸟类 102 种。阿布力米提·阿布都卡迪尔等(2003)根据实地考察和以往文献资料, 记录新疆阿尔泰山区 124 种鸟类。2000 年以来阿勒泰地区新记录了一些鸟类, 包括小鸥(*Larus minutus*)(马鸣和王岐山, 2000)、北灰鹀(*Muscicapa dauurica*)(朱成立等, 2011)、剑鸻(*Charadrius shiaticula*)(邢睿等, 2010)和白腹鸻(*Circus spilonotus*)(王音明等, 2015)。另外, 贾泽信和高行宜(1992)根据对前人研究和相关资料考证, 澄清新疆并无高原山鹑(*Perdix hodgsoniae*)分布。周边三国对阿尔泰山的鸟类也有报道(Wassink & Oreel, 2007; Braunlich & Steudtner, 2008; Karyakin

et al, 2010)。

在动物地理区系上, 阿勒泰地区地跨古北界的阿尔泰-萨彦岭区和蒙新区, 也是中国唯一的古北界欧洲-西伯利亚动物分布区(张荣祖, 1999), 使得该地区具有一些动物区系成分的混合性和独特性。向礼咳和黄人鑫(1986)记录阿尔泰山95%以上的鸟类都是典型的古北界种类。阿布力米提·阿布都卡迪尔等(2003)总结的新疆阿尔泰山124种鸟类中, 古北界北方型鸟类51种(占41.1%), 中亚型鸟类31种(占25.0%), 广布种鸟类27种(占21.8%), 其他类型15种(占12.1%), 显示出该地区的鸟类区系以北方型泰加林鸟类为主的区系特征。

明确物种的空间分布格局对制定有效保护措施至关重要, 但仅靠野外调查所获得的数据难以反映物种的整体分布格局。近年来, 物种分布模型(species distribution models, SDMs)在有关物种潜在地理分布、物种保护方面得到广泛应用(Hu et al, 2010; Yu et al, 2013; 吴庆明等, 2016; 崔绍朋等, 2018; 丁晨晨等, 2018)。物种分布模型利用统计学理论响应曲线方法建立目标物种野外分布数据与环境解释变量之间的函数关系, 其中最大熵模型(maximum entropy model, MaxEnt)是基于最大熵理论建立的机器学习方法。该方法只需要依据物种存在点和环境变量数据建模, 一方面反映目标物种分布的不完整信息, 同时找出熵最大的概率分布函数进行分布预测。分布点相对较少时也能获得较准确的预测结果(Phillips et al, 2006; Phillips & Dudík, 2008; Saupé et al, 2015), 在濒危物种生境分布预测研究中被广泛使用。

2013-2019年, 我们执行国家科技基础性专项“中俄哈蒙边界地区特有动物与动物地理区系考察”, 于2013-2016年在阿勒泰地区不同生境中进行了鸟类调查, 2013-2018年, 通过文献搜集和观鸟爱好者记录的信息确定了阿勒泰地区鸟类物种名录和分布, 分析了该地区鸟类的区系特征, 并利用物种分布模型模拟了中国阿勒泰地区鸟类多样性分布格局, 以为阿勒泰地区的生物多样性保护提供参考, 并为阿尔泰-萨彦岭生物热点地区的生物地理研究提供基础信息。

1 研究区域概况

中国阿尔泰山位于欧亚大陆腹部, 属于整个阿

尔泰山的中段南坡, 山体呈西北-东南走向且逐渐降低, 长约450 km, 海拔范围从河谷约1,000 m至北部4,374 m的最高峰(友谊峰)。阿尔泰山南部邻接中亚干旱荒漠和半荒漠地带, 海拔400-1,100 m。发源于阿尔泰山的额尔齐斯河和乌伦古河于山前荒漠地带形成绿洲。受山体影响, 整个地区降水量随海拔递增并随阿尔泰山走势自西北向东南递减, 且冬夏季明显多于春秋季节, 年均降水量在500-700 mm (Cui et al, 2016)。整个地区为典型的温带大陆性气候, 夏季昼夜温差高而短暂, 冬季寒冷漫长, 气温垂直梯度变化明显, 年均温为-0.2℃。

阿勒泰地区具有完整的植被垂直带分化(向礼咳和黄人鑫, 1986; 袁国映, 1986; 邓杰等, 1995), 从上向下依次可分为: (1)高山裸岩带, 海拔2,800 m以上, 裸露岩石附生地衣等植物; (2)高山草甸带, 海拔2,300-2,800 m, 主要植被为委陵菜(*Potentilla* spp.)、嵩草(*Kobresia* spp.)等; (3)山地森林草原带, 海拔1,100-2,300 m, 乔木主要有西伯利亚落叶松(*Larix sibirica*)、西伯利亚云杉(*Picea obovata*)、白桦(*Betula* spp.)、欧洲山杨(*Populus tremula*)等, 林下灌木层主要有绣线菊(*Spiraea* spp.)、蔷薇(*Rosa* spp.)等; (4)低山灌木草原带, 海拔1,000-1,700 m, 以金丝桃叶绣线菊(*Spiraea hypericifolia*)、忍冬(*Lonicera* spp.)等植物为主; (5)平原绿洲带, 海拔400-800 m, 以天然杨树林(*Populus* spp.)为主; (6)荒漠戈壁草原带, 海拔500-1,000 m, 以茅草(*Stipa* spp.)、驼绒藜(*Ceratoides latens*)等植物为主。此外, 各植被带的湿地及水域生境, 植物以芦苇(*Phragmites* spp.)、菖蒲(*Typha* spp.)和蔗草(*Scirpus* spp.)为主。森林主要分布在陡峭的阴坡, 在趋于干旱的阳坡多为草甸草原。草地和灌木类型斑块往往和不同类型的森林斑块呈现镶嵌分布。人类对生态系统造成的干扰到处可见, 如放牧、旅游、开矿、修筑管道、道路等, 且破坏的频率和数量呈增加趋势。

2 研究方法

2.1 野外调查与文献检索

2013年8月1-13日, 在阿勒泰地区开展了第一次鸟类调查; 在第一次调查的基础上, 分别于2014年6月19日至9月29日、2015年6月20日至9月9日、2016年5月17日至8月13日开展了后续调查。调查路线涵盖阿勒泰地区山地及山前平原地区的高山裸

岩、高山草甸、山地森林草原、低山灌木草原、平原绿洲、荒漠戈壁草原、湿地及水域(图1)。在阿尔泰山,沿着河谷流域从谷底至山顶在各植被带中布设样线。(1)高山裸岩生境包括小东沟、北塔山和三道海子,由于高山裸岩带比较狭窄,每个地区设置1条样线,每条样线长3 km;该生境内样线总长度9 km。(2)高山草甸生境包括小东沟、贾登峪、红山嘴、两河源、北塔山、三道海子地区,每个地区设置1条5 km样线;该生境内样线长度共计30 km。(3)山地森林草原生境除以上所述高山草甸生境所在的各个山地,还包括大东沟、可可托海和青河地区;可可托海、青河、北塔山地区各设置1条5 km样线,大东沟设置2条5 km样线,其他各地设置3条5 km样线;该生境内样线共计20条,总长100 km。(4)低山灌木草原生境为以上山地森林草原各地区的低山区,依照植被带宽度,各地样线长度0.5 km到3 km不等,共计9条,样线总长度7.8 km。(5)在平原绿洲带,平行于河流布设样线,样线主要分布于乌伦古河和额尔齐斯河主河道及主要支流区域,从上游到下游包括布尔根河流域、杜热地区、恰克图地区和哈巴河流域,共设14条样线,每条样线长5–10 km,长度共计98 km。(6)荒漠戈壁草原生境主要包括卡

拉麦里山有蹄类自然保护区以及额尔齐斯河和乌伦古河之间的荒漠区域。在额尔齐斯河与乌伦古河之间由南至北布设1条样线,样线长度为50 km。在卡拉麦里山有蹄类自然保护区沿保护区边缘布设样线,并在保护区中央贯穿东西南北布设样线,即样线呈“田”字形,此外,还在保护区内12个水源地附近各布设1条5 km长的样线,保护区内样线总长约为360 km。

在晴好天气,日出后4 h内和日落前3 h内进行鸟类调查。在山地和河岸绿洲生境内步行,记录样线两侧50 m范围内出现的鸟类物种、个体数、行为、观察距离、经纬度、海拔和生境信息,步行速度为2 km/h。在荒漠开阔地区,除步行外,也开车考察记录所见鸟类,车速为10 km/h。除样线调查外,我们也在去往各地的途中随时记录所见鸟类。在湿地与水域生境,采用定点观察法。在晴好天气记录所有可见鸟类,较大的水域则选取多个观察点。所调查的水域生境包括富蕴县野布湖、两河源地区、可可苏里湖、依里木湖、可可托海湿地、科克苏湿地,布尔津县城区、喀纳斯湖,哈巴河县哈巴河湿地、哈巴河、白沙湖,福海县城区、乌伦古湖,青河县城区、北塔山、布尔根河、三道海子,以及乌

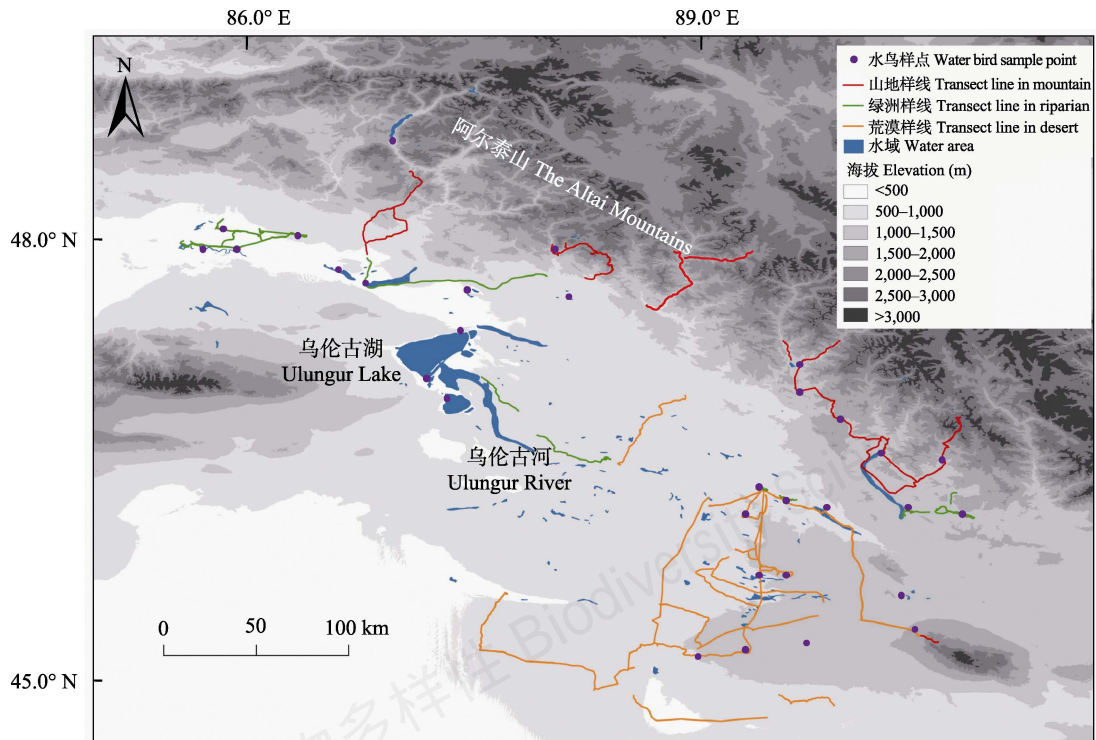


图1 中国阿勒泰地区鸟类调查样线及样点分布图

Fig. 1 Transect lines and bird sample points in Altai Region, China

伦古河和额尔齐斯河各流域。可可托海和贾登峪地区的样线和水域只分别于2015和2016年内于不同日期调查两次, 其他各地区的样线和水域至少调查两年, 每年调查两次。整个地区样线总长度约为650 km, 鸟类记录点为892个。调查人员包括第一作者和1-3名野外工作助手, 所有人员对当地鸟类有一定辨识经验。

除实地调查外, 通过中国知网检索包含“新疆”、“阿勒泰”或“阿尔泰山”和“鸟类”的关键词, 搜索相关文献、书籍, 以及观鸟爱好者观察记录、图片信息, 主要查阅荒野新疆(http://www.xj616.cn/more_nl.asp)、鸟类网(<http://niaolei.org.cn/>)以及中国观鸟记录中心(<http://www.birdreport.cn/>), 补充了阿勒泰地区鸟类物种信息。

2.2 鸟类物种统计和区系成分分析

统计阿勒泰地区鸟类的科、属、种数量及比例、栖息生境和海拔范围。根据马鸣(2011)和郑光美(2017)统计居留情况。根据张荣祖(1999)和郑光美(2017)的动物分布区类型划分系统, 对阿勒泰地区的鸟类地理区系成分进行统计。

2.3 鸟类丰富度分布格局预测

采用最大熵模型预测阿勒泰地区鸟类物种丰富度分布格局。

2.3.1 物种分布数据收集和处理

在野外调查记录到的鸟类物种中(水鸟除外), 剔除分布位点数少于5个的物种, 以减少采样偏差; 将大于5个的鸟类物种的记录点放入1 km²栅格图层中, 用Excel和ArcGIS软件对所有分布点进行反复核查以确定每个1 km栅格仅存在1个物种的1个分布点, 以减少空间自相关性; 将核查过的物种分布点数据保存为CSV格式, 用于MaxEnt模型运算。

2.3.2 环境变量选取

为运行物种分布模型, 我们共选取4类环境变量数据以表现栖息生境的生物气候特征、地形特征、植被类型和人为影响程度: (1)生物气候变量: 共19个(Bio1-Bio19), 来自于WorldClim 1.4数据库(<http://www.worldclim.org/>), 分别为年均温、昼夜温差月均值、等温线、季节温度变化、最暖月最高温、最冷月最低温、气温年较差、最湿季均温、最早季均温、最暖季均温、最冷季均温、年均降水量、最湿月降水量、最干月降水量、降水量变异系数、最湿季降水量、最早季降水量、最暖季降水和最冷季

降水。(2)地形变量: 来自于中国科学院资源环境数据中心(<http://www.resdc.cn/>), 包括海拔、坡度和坡向。(3)土地覆被类型变量(land cover type, LCT): 将土地覆被类型分为16类, 包括水域、常绿针叶林、落叶阔叶林、混交林、草地、农田、城市和建筑、裸地或低植被覆盖地等, 数据来源于全球土地覆盖利用数据库(<http://www.landcover.org/>)。 (4)人类足迹指数(human footprint index, HFI): 整合了人口居住地、土地利用类型、道路网络、基础设施建设等基本图层, 可以代表人为活动对鸟类及其生境的干扰。最后, 我们使用双线内插函数(bilinear interpolation function; Phillips et al, 2006)在ArcGIS 10.2软件中将上述环境变量统一边界和坐标系, 并重采样为同一分辨率30' (约1 km)。

2.3.3 模型的选择和使用

使用MaxEnt 3.3.3k (Phillips et al, 2006)软件建立物种分布模型, 主要采用软件默认设置: 规则化乘数(regularization multiplier)为1; 最大迭代次数(maximum iterations)为500; 收敛阈值(convergence threshold)为10⁻⁵; 最大背景点数量(maximum number of background points)设为10,000等, 研究证明这些设置能保证模型运行良好(Phillips & Dudík, 2008)。此外, 我们设置重复运行类别为交叉验证法, 随机测试数据百分比为20%, 依据发生数据量进行自动特征选择(auto feature function)。我们选择Logistic格式的输出结果, 以使每个栅格取值在0 (最不宜)到1 (最适宜)之间, 以方便模型分析解释。使用刀切法(Jackknife procedure)评价在模拟每个鸟类物种潜在分布区时各个预测变量的相对贡献, 即剔除其他变量并单独使用某变量时模型的规则化收获(regularized gain)。最后整合10次交叉验证模型的结果计算每个栅格的平均适宜性(出现概率), 得到每个物种最终的潜在分布区域。

2.3.4 鸟类物种丰富度分布格局建立

AUC (area under the receiving operator curve)值是受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic plot, ROC)下面积, 与阈值选择无关, 是被广泛应用的独立的模型精度测量方法(Wisz et al, 2008; Anderson & Raza, 2010)。AUC值越大, 表示该物种分布越偏离随机分布, 模型预测结果越可信。我们计算多次模拟的平均AUC值以评价模型表现, 选取AUC > 0.7 (Swets, 1988; Araujo et al, 2005)的鸟

类物种空间分布预测结果来建立中国阿勒泰地区鸟类物种分布格局。为将鸟类的分布预测结果的图层进行二值化处理,即每个栅格中该种鸟类有(值为1)或无(值为0),需要确定阈值。不同阈值确定方法对预测结果造成极大差异,但至今尚没有公认的最适阈值计算方法。我们选择最小训练存在法确定阈值,它是一种高度保守的方法,阈值估算偏高(Svenning et al, 2008)。如果栅格值大于阈值,则被视为高度适宜。使用ArcGIS软件将每个栅格的平均适宜性根据阈值进行二值化处理,最终得到该种鸟类在阿勒泰的潜在分布区。将所有物种的二值分布图进行空间栅格叠加,获得阿勒泰地区鸟类物种丰富度的分布格局。

3 结果

3.1 鸟类物种统计

阿勒泰地区有鸟类19目55科149属344种(附录1)。其中实地调查记录到的鸟类236种,共计32,854只次。2014年在科克苏湿地国家级自然保护区观察到1只池鹭(*Ardeola bacchus*), 2013、2014、2016年分别在科克苏、小东沟及布尔津地区记录到大嘴乌鸦(*Corvus macrorhynchos*)共22只次,以上均为阿勒泰地区鸟类新记录。记录到的阿勒泰地区鸟类物种中,新疆省级一级保护动物有11种,二级保护动物8种;国家一级重点保护野生动物9种,国家二级重点保护野生动物60种;IUCN濒危物种红色名录受威胁物种11种;《中国生物多样性红色名录——脊椎动物卷》受威胁物种30种。

阿勒泰地区鸟类以雀形目居多,有163种,占该地区鸟类总种数的47.4%。鸽形目次之,47种,占13.7%;鹰形目29种,隼形目8种,共占10.8%;雁形目23种,占6.7%;鹤形目10种,占2.9%;鸡形目12种,占3.4%;其他各目52种,占14.9%(鸢形目9种,鸮形目10种,鸽形目8种,鹞形目6种,鸊鷉目5种,佛法僧目3种,鹳形目3种,鹃形目2种,雨燕目2种,沙鸡目2种,戴胜目1种,夜鹰目1种)。

从居留类型来看,阿勒泰地区夏候鸟居多,有145种,占42.2%;有88种(占25.6%)在新疆北部地区为留鸟,但阿尔泰山地冬季寒冷,这些鸟类在阿尔泰山地的居留情况还需进一步调查才能确定;旅鸟58种,占18.6%;冬候鸟32种,占11.1%;偶见鸟、迷鸟11种。2014年在科克苏湿地记录到普通秧鸡

(*Rallus aquaticus*)、黑水鸡(*Gallinula chloropus*)、白骨顶(*Fulica atra*)、凤头麦鸡(*Vanellus vanellus*)亲鸟带幼鸟觅食及栖息行为,在北塔山地区记录到白背矶鹬(*Monticola saxatilis*)的育雏行为;2015年于福海记录到黑翅长脚鹬(*Himantopus himantopus*)亲鸟及约10日龄幼鸟;在卡拉麦里地区记录到金眶鸻(*Charadrius dubius*)亲鸟及幼鸟。此前这些鸟类在上述地区没有确切的繁殖记录。

3.2 鸟类区系成分

从分布型来看,阿勒泰地区的鸟类以北方型为主,共170种,占鸟类总数的49.4%,其中古北型(U)110种,全北型(C)60种。其他分布型的鸟类数量由高到低依次为:广布种(O)93种,占27.0%;中亚型(D)33种,占9.6%;东北型(M)21种,占6.1%;高地型(P)8种,占2.3%;东洋型(W)8种,占2.3%;季风型(E)1种,为山斑鸠(*Streptopelia orientalis*);喜马拉雅-横断山型(H)3种,为灰背伯劳(*Lanius tephronotus*)、黑冠山雀(*Parus rubidiventris*)和高原岩鹀(*Prunella himalayana*)。在阿尔泰山地共分布鸟类297种,以北方型为主,共160种:其中古北型102种,全北型58种,繁殖鸟类分别占81.4%和67.2%;中亚型鸟类24种,其中繁殖鸟类22种;高地型10种,全部能在本地繁殖(图2)。山前平原地区包括绿洲与荒漠生境,共分布鸟类278种,其中古北型92种,全北型49种,中亚型30种,繁殖鸟类分别占各分布型的78.3%、59.2%和87.1%(图2)。

3.3 鸟类物种丰富度分布格局

3.3.1 不同生境类型中鸟类物种丰富度

根据实地调查并查阅资料,阿尔泰山地鸟类物种数在垂直海拔带上分别为高山裸岩带24种,高山草甸带35种,山地森林草原带172种,低山灌木带130种,荒漠草原带84种,平原绿洲带173种。上述植被带的鸟类均不包含鸊鷉目、雁形目、鹤形目、鸽形目的水鸟,在各植被带的湿地和水域生境中共统计到92种水鸟(图3)。

在实地调查中,高山裸岩带共记录到鸟类16种,代表种类有秃鹫(*Aegypius monachus*)、高山兀鹫(*Gyps himalayensis*)、红嘴山鸦(*Pyrrhocorax pyrrhocorax*)、岩雷鸟(*Lagopus muta*);高山草甸带共记录到鸟类28种,常见物种有白鹡鸰(*Motacilla alba*)和黑耳鸢(*Milvus migrans*);山地森林草原带共记录鸟类119种,数量较多的有苍头燕雀(*Fringilla coelebs*)、

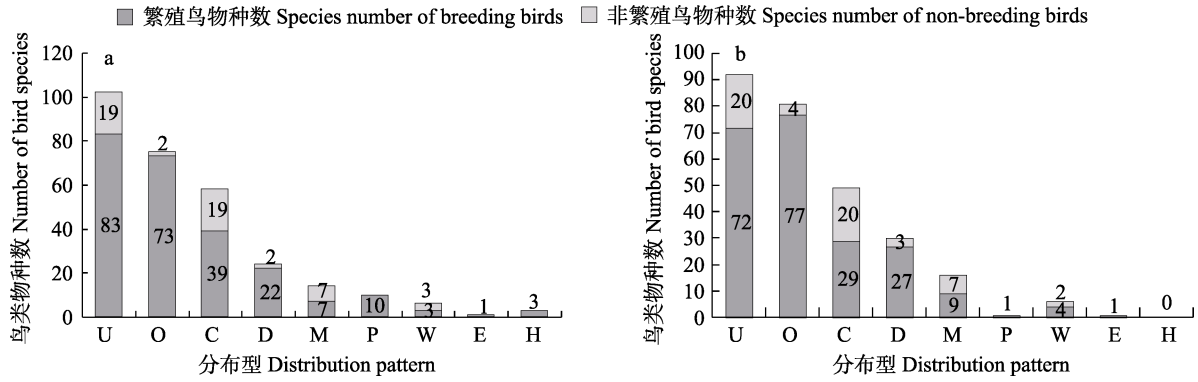


图2 阿尔泰山地(a)和山前平原地区(b)不同分布型鸟类物种数。U: 古北型; O: 广布种; C: 全北型; D: 中亚型; M: 东北型; P: 高地型; W: 东洋型; E: 季风型; H: 喜马拉雅-横断山型。

Fig. 2 Distribution patterns of birds in the Altai Mountains (a) and the plain areas (b) in the south of the Altai Mountains. U, Palearctic Type; O, Widespread Type; C, Holarctic Type; D, Central Asia Type; M, Northeast China Type; P, Highland Type; W, Oriental Type; E, Monsoon Region Type; H, Himalaya-Hengduan Mountains Type.

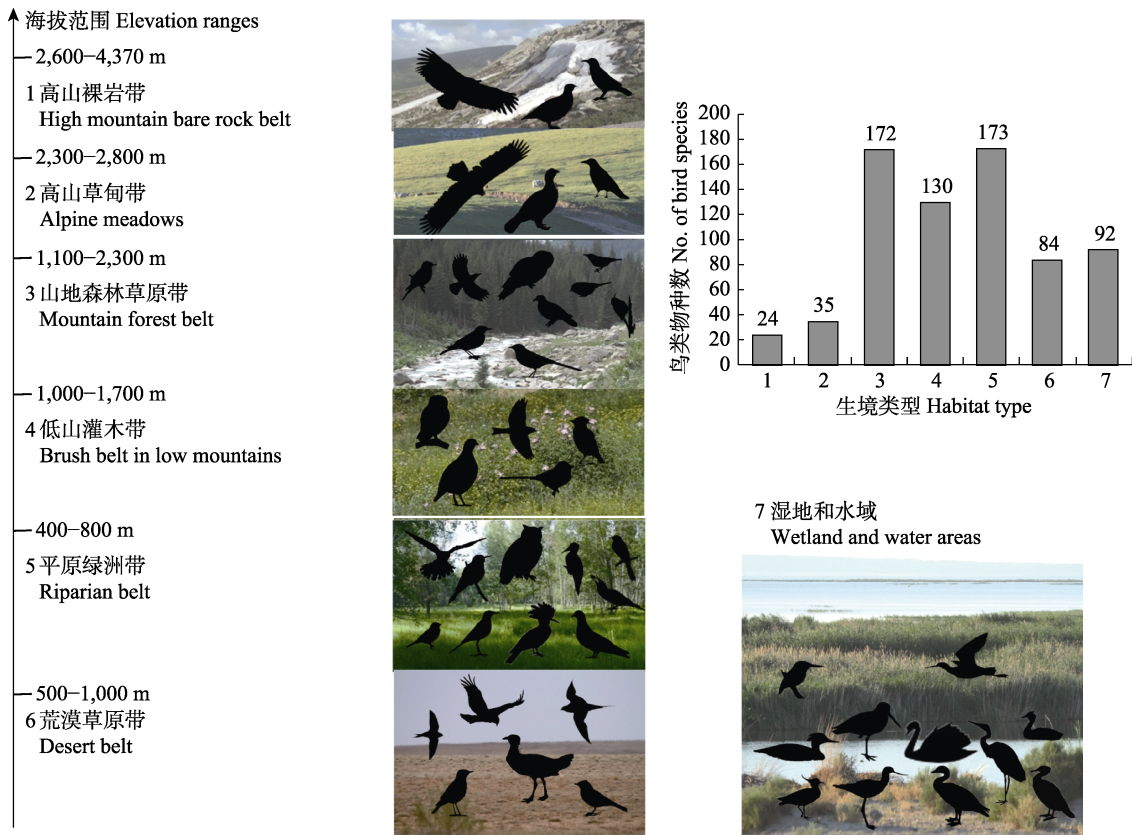


图3 中国阿勒泰地区沿海拔分布的生境类型及其中鸟类物种丰富度

Fig. 3 Bird species richness in habitat types along elevation gradients in Altay Region, China

赤颈鸫(*Turdus ruficollis*)、灰眉岩鹀(*Emberiza cia*)、斑鹀(*Muscicapa striata*)、普通朱雀(*Carpodacus erythrinus*)、灰鹊鸚(*Motacilla cinerea*); 低山灌木带共记录鸟类101种, 数量较多的有黑喉石鹀(*Saxicola maurus*)、新疆歌鸚(*Luscinia megarhynchos*)等; 荒漠草原带共记录鸟类68种, 普通鵟(*Buteo japonicus*)、

白腹毛脚燕(*Delichon urbicum*)、角百灵(*Eremophila alpestris*)、毛腿沙鸡(*Syrhaptes paradoxus*)、蒙古沙雀(*Bucanetes mongolicus*)、普通楼燕(*Apus apus*)、石鸡(*Alectoris chukar*)等数量较多; 平原绿洲带共记录鸟类124种, 红隼(*Falco tinnunculus*)、黄爪隼(*Falco naumanni*)、黄喉蜂虎(*Merops apiaster*)、蓝

胸佛法僧(*Coracias garrulus*)、紫翅椋鸟(*Sturnus vulgaris*)、原鸽(*Columba livia*)等都为常见鸟类;在各植被带的湿地与水域共记录水鸟62种,不仅物种丰富,数量也较大,赤麻鸭(*Totorna ferruginea*)、赤膀鸭(*Anas strepera*)、赤嘴潜鸭(*Netta tufina*)、黑鹳(*Ciconia nigra*)、大白鹭(*Ardea alba*)、灰雁(*Anser anser*)、银鸥(*Larus cachinnans*)数以百计,大天鹅(*Cygnus cygnus*)、蓑羽鹤(*Crus vigo*)、白鹈鹕(*Pelecanus onocrotalus*)、凤头麦鸡(*Venellus venellus*)、金眶鸻、黑翅长脚鸻、普通燕鸥(*Sterna hirundo*)等也较常见(图3)。

3.3.2 基于MaxEnt模型的鸟类物种丰富度分布格局

我们共选取了77种鸟类(AUC > 0.7)进行阿勒泰地区鸟类物种分布格局的模拟。MaxEnt模型推测山前平原绿洲地区和低山区具有较高的物种丰富度,尤其是哈巴河县和阿勒泰市的绿洲带,处于额尔齐斯河流域下游,绿洲带宽阔,鸟类物种丰富;而高山区和荒漠生境中鸟类物种相对较少(图4)。由刀切法测定的环境变化对物种分布预测影响的重要性中可以看出,对预测结果贡献最大的3个环境变量分别为土地覆被类型、人类足迹指数和海拔,其中土地覆被类型和人类足迹指数的贡献率突出(表1)。

4 讨论

4.1 鸟类物种丰富度

阿勒泰地区生境类型多样,不同生境鸟类丰富度差异极大(图3,图4)。向礼陔和黄人鑫(1986)记录阿尔泰山高山及亚高山草甸草原带鸟类11种,山地森林草原带鸟类107种,低山灌木草原带鸟类92种,盆地绿洲荒漠带鸟类103种;邓杰等(1995)记录高山裸岩地带鸟类15种,高山草甸带20种,森林地带86种,低山灌丛带53种,荒漠地带51种,河谷绿洲带84种。在我们的研究中,通过多种调查方法得到的阿勒泰地区和各生境中鸟类物种数都高于前人研究。阿勒泰地区记录的鸟类物种数逐渐增加,如此项调查中我们发现了阿勒泰新记录种池鹭和大嘴乌鸦,2015年在三道海子观测到疑似帆背潜鸭(*Aythya valisneria*)5只。不同生境中鸟类物种丰富度的实地调查、资料总结与MaxEnt模型预测结果一致:平原绿洲带、山地森林草原带和低山灌木带鸟类物种丰富度高。但是由于森林生境调查不充分、一些地区的地形难以布设样线,调查记录到的鸟类物种要低于实际情况。从整体上来看,土地覆被类型和人类足迹指数对鸟类物种丰富度预测能力较强,而

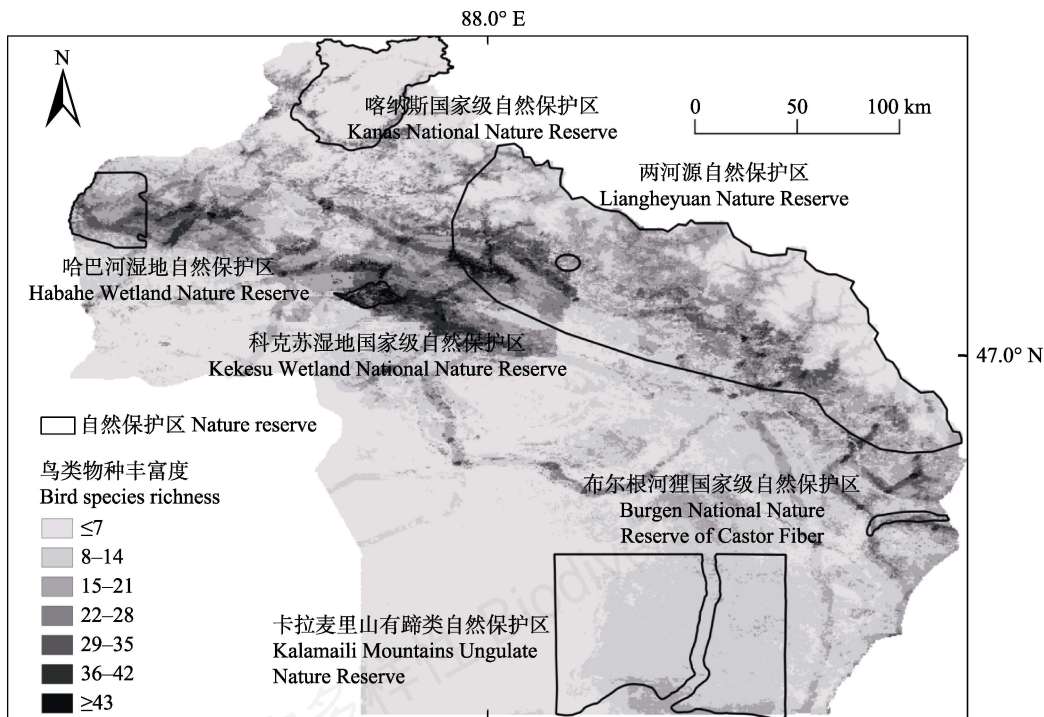


图4 阿勒泰地区鸟类物种多样性分布格局

Fig. 4 Bird species diversity distribution pattern in Altay Region, China

表1 环境因子对鸟类分布模型预测的贡献百分比

Table 1 Percent contribution of each environmental variable in predicting bird's distribution

环境因子 Environmental factors	环境因子描述 Description of environmental factors	贡献百分比 Percent contribution (%)
LCT	土地覆被类型 Land cover type	23.17
HFI	人类足迹指数 Human footprint index	19.73
Altitude	海拔 Elevation	8.91
Slope	坡度 Slope	6.75
Bio15	降水量变异系数 Variation coefficient of precipitation	4.41
Bio2	昼夜温差月均值 Monthly mean of diurnal temperature range	3.62
Bio12	年均降水量 Average annual precipitation	3.55
Bio14	最干月降水量 Precipitation of driest month	3.14
Bio1	年均温 Annual average temperature	2.97
Bio9	最早季均温 Mean temperature of driest quarter	2.87
Aspect	坡向 Aspect	2.26
Bio3	等温线 Isothermality	2.21
Bio6	最冷月最低温 Min temperature of coldest month	1.89
Bio16	最湿季降水量 Precipitation of wettest quarter	1.83
Bio8	最湿季均温 Mean temperature of wettest quarter	1.78
Bio19	最冷季降水 Precipitation of coldest quarter	1.56
Bio4	季节温度变化 Variation of temperature seasonality	1.54
Bio11	最冷季均温 Mean temperature of coldest quarter	1.45
Bio18	最暖季降水 Precipitation of warmest quarter	1.38
Bio10	最暖季均温 Mean temperature of warmest quarter	1.34
Bio13	最湿月降水量 Precipitation of wettest month	0.99
Bio7	气温年较差 Range of annual temperature	0.92
Bio17	最早季降水量 Precipitation of driest quarter	0.77
Bio5	最暖月最高温 Max temperature of warmest month	0.63

不同的鸟类对我们选取的环境变量有不同的敏感程度。

土地覆被类型对灰蓝山雀(*Parus cyanus*)、乌鸫(*Turdus merula*)、布氏苇莺(*Acrocephalus dumetorum*)、极北柳莺(*Phylloscopus borealis*)、叽咋柳莺(*P. collybita tristis*)、暗绿柳莺(*P. trochiloides*)和白喉林莺(*Sylvia curruca*)等鸟类分布的预测有很大贡献。我们用线性回归模型探索不同植被覆盖类型对鸟类物种丰富度的预测能力,结果表明包含林下灌木、树木幼苗的林地对保护鸟类多样性有重要的意义(Li et al, 2019)。大鵟(*Buteo hemilasius*)、白腰雨燕(*Apus pacificus*)、短趾百灵(*Calandrella cheleensis*)、沙鸻(*Oenanthe isabellina*)、白顶鸻(*O. pleschanka*)和红嘴山鸦(*Pyrhacorax pyrrhacorax*)等鸟类对气候变量反应敏感,全球气候变化可能会导致这些鸟类的分布范围改变。

阿尔泰山地植被多样,鸟类物种数达297种,占阿勒泰地区鸟类总数的86.3%;平原绿洲地区湿地和水域面积广阔(约5万km²),鸨形目、雁形目、鹤形目等水鸟占阿勒泰地区鸟类的27.3%,是鸟类迁徙、繁殖的重要驿站。该地区面临全球气候变化与经济压力的双重压力。当地居民的放牧活动对树木幼苗、灌丛损害较严重,造成鸟类生境丧失和破碎化,不利于生物多样性保育。此外,平原绿洲地区鸟类物种丰富,而这些区域承载着较山区更大的放牧压力。因此,加强对阿勒泰地区尤其是平原绿洲地区的乔木、灌木及幼苗的保护,对保护鸟类多样性具有重要的意义。

4.2 鸟类区系特征

阿尔泰山地是我国仅存的古北界南西伯利亚动植物区系分布区(袁国映, 1986)。本文对鸟类区系成分分析的结果与向礼咳和黄人鑫(1986)、高行宜

等(1987)、解焱等(2002)和周鹿^①一致,即阿尔泰山显示出以北方泰加林鸟类为主的独特区系特征。虽然阿尔泰山地与蒙新区接壤,二者有很多相似的成分,但也有自己独特的物种成分(向礼咳和黄牛鑫,1986),因此,阿尔泰山地属于古北界欧洲-西伯利亚亚界阿尔泰-萨彦岭区阿尔泰亚区;山前平原地区属于古北界中亚亚界蒙新区西部荒漠亚区。

此地区鸟类不仅具有几个地理分区的鸟类区系特征,也有一些在中国狭域分布的鸟种,如柳雷鸟(*Lagopus lagopus*)、岩雷鸟(*L. mutus*)和阿尔泰雪鸡(*Tetraogallus altaicus*) (马鸣,1999)。但此次调查中并未见阿尔泰雪鸡。这可能是由于高山裸岩地区样线设置较少,调查时间不充分。此外,阿尔泰雪鸡在冬季会下降至海拔较低的山地,然而由于天气寒冷和积雪覆盖,我们并未于冬季进行鸟类调查。阿尔泰雪鸡分布于阿尔泰山脉至蒙古的东北部山区(马敬能等,2000),我国于1990年在新疆北塔山发现,根据Zabelin (2007)估计,阿尔泰地区共分布阿尔泰雪鸡约5,500只。除黄牛鑫等(1992)在北塔山地区曾观察阿尔泰雪鸡,新疆境内的阿尔泰山至今尚未发现阿尔泰雪鸡的踪迹。在2013年我们对北塔山野生动物保护站的访问中,管护人员告知当地有阿尔泰雪鸡分布。

致谢:感谢新疆卡拉麦里山有蹄类自然保护区对野外工作的支持。感谢中国科学院新疆生态与地理研究所的马鸣老师在鸟类识别上给予的帮助。感谢白硕、蒙坎、端肖楠、刘宁娜、吴兵、崔绍朋、陶夏秋、汤宋华、陈静的野外工作协助。感谢崔绍朋、黄元骏在GIS分析上给予的帮助。

参考文献

- Anderson RP, Raza A (2010) The effect of the extent of the study region on GIS models of species geographic distributions and estimates of niche evolution: Preliminary tests with montane rodents (genus *Nepheleomys*) in Venezuela. *Journal of Biogeography*, 37, 1378–1393.
- Araujo M, Pearson R, Thuiller WM (2005) Validation of species-climate impact models under climate change. *Global Change Biology*, 11, 1504–1513.
- Aptimi A, Sun MJ, Shao MQ (2003) Diversity and fauna characteristics of the birds and mammals in mountain areas of

- Xinjiang. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 17(3), 117–122. (in Chinese with English abstract) [阿布力米提·阿布都卡迪尔, 孙铭娟, 邵明勤 (2003) 新疆山地鸟类和哺乳类多样性及其区系特征. *干旱区资源与环境*, 17(3), 117–122.]
- Braunlich A, Steudtner J (2008) Hodgson's bushchat *Saxicola insignis* in the Mongolian Altai. *Birding Asia*, 9, 62–66.
- Cui S, Luo X, Chen D, Sun J, Chu H, Li C, Jiang Z (2016) The adder *Vipera berus* in Southern Altay Mountains: Population characteristics, distribution, morphology and phylogenetic position. *PeerJ*, 4, e2342.
- Cui SP, Luo X, Li CW, Hu HJ, Jiang ZG (2018) Predicting the potential distribution of white-lipped deer using the MaxEnt model. *Biodiversity Science*, 26, 171–176. (in Chinese with English abstract) [崔绍朋, 罗晓, 李春旺, 胡慧建, 蒋志刚 (2018) 基于MaxEnt模型预测白唇鹿的潜在分布区. *生物多样性*, 26, 171–176.]
- Deng J, Zhang FY, Yang RL, Mark RF, Williams SC (1995) Research on birds of Altai Region, Northern Xinjiang Uigur Autonomous Region. *Forest Research*, 8(1), 62–66. (in Chinese with English abstract) [邓杰, 张孚允, 杨若莉, Mark RF, Williams SC (1995) 新疆北部阿尔泰地区鸟类调查研究. *林业科学研究*, 8(1), 62–66.]
- Ding CC, Hu YM, Li CW, Jiang ZG (2018) Distribution and habitat suitability assessment of the gaur *Bos gaurus* in China. *Biodiversity Science*, 26, 951–961. (in Chinese with English abstract) [丁晨晨, 胡一鸣, 李春旺, 蒋志刚 (2018) 印度野牛在中国的分布及栖息地适宜性分析. *生物多样性*, 26, 951–961.]
- Dong TC, Chu HJ, Wu HP, Wang Y, Ge Y, Bu L (2014) Monitoring birds and mammals through camera traps in Mount Kalamaili Ungulate Nature Reserve, Xinjiang. *Biodiversity Science*, 22, 804–807. (in Chinese with English abstract) [董潭成, 初红军, 吴洪潘, 王渊, 葛炎, 布兰 (2014) 卡拉麦里山有蹄类自然保护区鸟兽的红外相机监测. *生物多样性*, 22, 804–807.]
- Gao XY, Gu JH, Fu CL, Wang DZ (1987) Question about avian fauna and zoogeography division in the Altai Mountains, Xinjiang. *Journal of Plateau Biology*, 6, 97–102. (in Chinese) [高行宜, 谷景和, 傅春利, 王德忠 (1987) 新疆阿尔泰山地鸟类区系与动物地理区划问题. *高原生物学报*, 6, 97–102.]
- Hu JH, Hu HJ, Jiang ZG (2010) The impacts of climate change on the wintering distribution of an endangered migratory bird. *Oecologia*, 164, 555–565.
- Huang RX, Milman, Shao HG (1992) A new record of birds from China—Altai snowcock. *Acta Zootaxonomica Sinica*, 17, 501–502. (in Chinese with English abstract) [黄牛鑫, 米尔曼, 邵红光 (1992) 中国鸟类新纪录——阿尔泰雪鸡. *动物分类学报*, 17, 501–502.]
- Jia ZX, Gao XY (1992) Question about the distributions of Tibetan partridge *Perdix hodgsoniae* in Xinjiang. *Arid Zone Research*, 9(2), 64–65. (in Chinese) [贾泽信, 高行宜 (1992) 关于高原山鹑在新疆的分布问题. *干旱区研究*, 9(2), 64–65.]
- Karyakin IV, Nikolenko EG, Barashkova AN (2010) Golden eagle in the Altai-Sayan Region, Russia. *Raptors Conservation*, 18, 82–152.
- Lan X, Gu JH (1993) The species and distribution of birds in Xinjiang and its micro-computer information system. *Arid Zone Research*, 10(1), 22–28. (in Chinese with English

^① 周鹿 (2015) 新疆及其邻近地区两栖爬行动物地理区划和分布型研究. 硕士学位论文, 新疆农业大学, 乌鲁木齐.

- abstract) [兰欣, 谷景和 (1993) 新疆鸟类种类与分布及其微机信息系统. 干旱区研究, 10(1), 22–28.]
- Li N, Sun Y, Chu H, Qi Y, Zhu L, Ping X, Li C, Jiang Z (2019) Bird species diversity in Altai riparian landscapes: Wood cover plays a key role for avian abundance. *Ecology and Evolution*, 9, 9634–9643.
- Ma M (1999) Important bird areas (IBAs) and globally threatened birds in Xinjiang, China. *Arid Zone Research*, 16(3), 19–22. (in Chinese with English abstract) [马鸣 (1999) 新疆的国际性濒危鸟类及重要鸟区. 干旱区研究, 16(3), 19–22.]
- Ma M (2011) A Checklist on the distribution of the birds in Xinjiang. Science Press, Beijing. (in Chinese) [马鸣 (2011) 新疆鸟类分布名录. 科学出版社, 北京.]
- Ma M (1997) Animal fauna in Jintasi Glassland Nature Reserve in Altai Mountains. *Xinjiang Environment Protect*, 19(1), 58–61. (in Chinese) [马鸣 (1997) 阿尔泰山金塔斯草原自然保护区的动物类型. 新疆环境保护, 19(1), 58–61.]
- Ma M, Wang QS (2000) Little gull breeding population first detected in north Xinjiang. *Arid Zone Research*, 17(4), 32. (in Chinese) [马鸣, 王岐山 (2000) 新疆北部首次发现小鸥繁殖种群. 干旱区研究, 17(4), 32.]
- MacKinnon J, Phillips K, He FQ (2000) A Field Guide to the Birds of China. Hunan Education Press, Changsha. (in Chinese) [马敬能, 菲利普斯, 何芬奇 (2000) 中国鸟类野外手册. 湖南教育出版社, 长沙.]
- Olson DM, Dinerstein E (2002) The Global 200: Priority ecoregions for global conservation. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 89, 199–224.
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231–259.
- Phillips SJ, Dudík M (2008) Modeling of species distributions with MaxEnt: New extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31, 161–175.
- Saupe EE, Qiao HJ, Hendricks JR, Portell RW, Hunter SJ, Soberón J, Lieberman BS (2015) Niche breadth and geographic range size as determinants of species survival on geological time scales. *Global Ecology and Biogeography*, 24, 1159–1169.
- Swets JA (1988) Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 240, 1285–1293.
- Svenning JC, Normand S, Kayeyama M (2008) Glacial refugia of temperate trees in Europe: Insights from species distribution modelling. *Journal of Ecology*, 96, 1117–1127.
- Wang YM, Liu F, Ma M, Zhang GQ, Gou J, Wen CH (2015) Eastern marsh harrier *Circus spilonotus*, a new record of bird from Xinjiang. *Arid Land Geography*, 38, 1085–1086. (in Chinese with English abstract) [王音明, 刘枫, 马鸣, 张国强, 苟军, 文翠华 (2015) 新疆鸟类新纪录——白腹鸮(*Circus spilonotus*). 干旱区地理, 38, 1085–1086.]
- Wassink A, Oreel G (2007) *The Bird of Kazakhstan*. Alphascript Publishing, De Cocksdorp.
- Wu QM, Wang L, Zhu RP, Yang YB, Jin HY, Zou HF (2016) Nesting habitat suitability analysis of red-crowned crane in Zhalong Nature Reserve based on MaxEnt modeling. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 3758–3764. (in Chinese with English abstract) [吴庆明, 王磊, 朱瑞萍, 杨宇博, 金洪阳, 邹红菲 (2016) 基于MaxEnt模型的丹顶鹤巢生境适宜性分析——以扎龙保护区为例. 生态学报, 36, 3758–3764.]
- Wisz MS, Hijmans RJ, Li J, Peterson AT, Graham CH, Guisan A (2008) Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Diversity and Distributions*, 14, 763–773.
- Xiang LG, Huang RX (1986) Study on birds in the Altai of Xinjiang. I. Distribution of birds. *Journal of Xinjiang University*, 3(3), 90–107. (in Chinese with English abstract) [向礼咳, 黄人鑫 (1986) 新疆阿尔泰山鸟类的研究(I)—鸟类的分布. 新疆大学学报(自然科学版), 3(3), 90–107.]
- Xie Y, Li DM, MacKinnon J (2002) Preliminary researches on bio-geographical divisions of China. *Acta Ecologica Sinica*, 22, 1599–1615. (in Chinese with English abstract) [解焱, 李典谟, MacKinnon J (2002) 中国生物地理区划研究. 生态学报, 22, 1599–1615.]
- Xing R, Li WD, Ma M, Wen CH, Zhou ZX, Gao ZH (2010) Two new bird records in Xinjiang—Oriental plover *Charadrius veredus* and common ringed plover *Charadrius hiaticula*. *Sichuan Journal of Zoology*, 29, 545. (in Chinese) [邢睿, 李维东, 马鸣, 文翠华, 周展星, 高正华 (2010) 新疆鸟类新纪录二种——东方鸻、剑鸻. 四川动物, 29, 545.]
- Yuan GY (1986) The vertical zonation of the western Altai Mountains. *Acta Geographica Sinica*, 41, 32–40. (in Chinese with English abstract) [袁国映 (1986) 阿尔泰山西部地区的垂直自然带. 地理学报, 41, 32–40.]
- Yu D, Chen M, Zhou ZC, Eric R, Tang QG, Liu HZ (2013) Global climate change will severely decrease potential distribution of the East Asian coldwater fish *Rhynchocypris oxycephalus* (Actinopterygii, Cyprinidae). *Hydrobiologia*, 700, 23–32.
- Zabelin VI (2007) Ecological features of species range formation in the Altai snowcock. *Russian Journal of Ecology*, 38, 347–352.
- Zhu CL, Sun DM, Ma M, Wen ZM, Xing R (2011) Asian brown flycatcher *Muscica padaurica*—A new record in Xinjiang. *Sichuan Journal of Zoology*, 30, 44. (in Chinese) [朱成立, 孙迪明, 马鸣, 文志敏, 邢睿 (2011) 北灰鹟——新疆鸟类新纪录. 四川动物, 30, 44.]
- Zhang RZ (1999) *Zoogeography of China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张荣祖 (1999) 中国动物地理. 科学出版社, 北京.]
- Zheng GM (2017) *A Checklist on the Classification and Distribution of the Birds of China*, 3rd edn. Science Press, Beijing. (in Chinese) [郑光美 (2017) 中国鸟类分类与分布名录(第三版). 科学出版社, 北京.]

(责任编辑: 丁平 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 中国阿勒泰地区鸟类名录及物种信息

Appendix 1 Avian species census and species information in the Altay Region, China

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2019023-1.xlsx>



•研究报告•

阿尔泰山前荒漠两种沙蜥体况指数特征及其与生态因子的关系

陶夏秋^{1,2,3} 蒋志刚^{1,4} 吉晟男⁵ 初红军⁶
李娜^{1,4} 杨道德^{3*} 李春旺^{1,4*}

1 (中国科学院动物研究所动物生态与保护生物学重点实验室, 北京 100101)

2 (南京师范大学生命科学学院江苏省生物多样性与生物技术重点实验室, 南京 210023)

3 (中南林业科技大学野生动植物保护研究所, 长沙 410004)

4 (中国科学院大学, 北京 100049)

5 (中国环境科学研究院生物多样性研究中心, 北京 100012)

6 (新疆卡拉麦里山有蹄类自然保护区阿勒泰管理站, 新疆阿勒泰 836500)

摘要: 为明确奇台沙蜥(*Phrynocephalus grumgrzimaloi*)和旱地沙蜥(*P. helioscopus*)体况指数的年龄性别特征, 及其与海拔、年均温、年降水量、平均日较差之间的关系, 我们测量了阿勒泰地区84只奇台沙蜥与176只旱地沙蜥的体况数据, 用log体重/log头体长表示体况指数。结果显示: (1)旱地沙蜥与奇台沙蜥间体况指数差异显著。(2)旱地沙蜥体况指数雌雄两性差异不显著, 奇台沙蜥体况指数雌雄两性差异显著。(3)两种蜥蜴成体与亚成体间体况指数均差异明显。(4)以月份为单位, 奇台沙蜥体况指数月份差异明显, 旱地沙蜥体况指数月份差异不明显。(5)年均温对奇台沙蜥体况指数有重要影响, 而年降水量为补充因子, 主要通过与其他生态因子组合发挥作用, 海拔对旱地沙蜥体况指数有影响。这些结果表明两种沙蜥对不同环境因子的反应不同, 在不同环境的适应度也不同。

关键词: 阿勒泰地区; 沙蜥属; 体况指数; 生态因子

The relationship between body condition index and ecological factors in two *Phrynocephalus* species in the piedmont desert of Altai Mountains

Xiaqiu Tao^{1,2,3}, Zhigang Jiang^{1,4}, Shengnan Ji⁵, Hongjun Chu⁶, Na Li^{1,4}, Daode Yang^{3*}, Chunwang Li^{1,4*}

1 CAS Key Laboratory of Animal Ecology and Conservation Biology, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

2 Jiangsu Key Laboratory for Biodiversity and Biotechnology, College of Life Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210023

3 Wildlife Protection Research Institute, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

5 Biodiversity Research Center, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

6 Altay Management Station of Mt. Kalamaili Ungulate Nature Reserve, Altay, Xinjiang 836500

Abstract: We investigated the age-related and sexual characteristics in *Phrynocephalus helioscopus* and *P. grumgrzimaloi* using the body condition index and its relationship to annual mean temperature, annual precipitation, altitude, and mean diurnal range. We collected body measurement data for 176 individuals of *P. helioscopus* and 84 individuals of *P. grumgrzimaloi*. The body condition index is comprised of the ratio of log body mass to log snout-vent length. There were significant differences of the body condition index between *P. helioscopus* and *P. grumgrzimaloi*. In *P. grumgrzimaloi*, body condition indices between the sexes were significantly different but were not in *P. helioscopus*. Differences between sub-adults and adults were significant in both species. Body condition index of *P. grumgrzimaloi* differed significantly through time but remained unchanged in *P. helioscopus*. Annual mean temperature is a significant predictor for body

收稿日期: 2019-08-26; 接受日期: 2019-11-12

基金项目: 国家科技基础性工作专项(2013FY110300)、国家重点研发计划(2016YFC0503304)和国家自然科学基金(31472021)

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: csfuyydd@126.com; licw@ioz.ac.cn

condition index of *P. grumgrzimai* and interacts with annual precipitation in our models. Meanwhile, altitude had significant effects on body condition index in *P. helioscopus*. These results suggest that these two species respond differently to various environmental factors, and their adaptability to different environmental conditions are not the same.

Key words: Altai Mountains; *Phrynocephalus*; body condition index; ecological factors

体况指数(body condition index)是衡量动物身体比重的一个指标,通常被用作脂质储备或动物健康相关性状的代表,同时也可以反映动物在生境中的食物获取能力及对生态环境的适应程度(Hellgren et al, 1993; Stirling et al, 1999; Wilder et al, 2016)。从早期的Fulton状态指数 K (1911)开始,Juliano(1986)、Cavallini(1996)、Lunn和Boyd(1993)等先后提出不同的体况指数。夏武平和孙崇潞(1963)在国内首次将体况指数引入到啮齿类,而后越来越多的学者开始对陆生脊椎动物的体况指数开展研究(吴云龙,1965;房继明和孙儒泳,1995;王寿兵等,1999;欧永跃,2004;范尊龙等,2013)。体况指数将动物的质量与体积联系起来,在很多情况下具有重要作用:(1)可以提供动物在面对入侵动物威胁时的初步评估,如欧洲泽龟(*Emys orbicularis*)、红腹彩龟(*Pseudemys rubriventris*)在面对幼年巴西红耳龟(*Trachemys scripta elegans*)的竞争时,体况指数均明显降低(Cadi & Joly, 2003; Pearson et al, 2015);(2)指导哪些物种应该接受更详细的研究(Stevenson & Woods, 2006),如雄性螳螂喜欢接近并选择具有相对较大腹部(即较大体况指数)的雌性,因为较高体况指数的雌性螳螂能产出更多的卵,且产卵的潜伏期更短,对雄性的攻击性也更小(Lelito & Brown, 2006; Maxwell et al, 2010);(3)可以反映周围环境因子的变化,因为这些因子会影响动物对于资源的获取、分类和使用(Boggs, 2009)。较低的食物获取率通常会导致低脂质储备,如生活在更高城市化水平栖息地的麻雀(*Passer domesticus*)的体况指数总是比农村栖息地的差;而随着海冰的减少,北极熊(*Ursus maritimus*)的体况指数也越来越差(Liker et al, 2008; Rode et al, 2010)。

一般认为,人为干扰会对动物个体的体况指数产生负面影响,会增加个体被捕食的几率,或导致寄生虫病的传播(Allan et al, 2003; Rode et al, 2006; Lomas et al, 2015)。对于一些杂食动物来说,人为干扰强度对其体况指数的影响弱于季节、性别和年龄

(Boswell et al, 1994; Rakotoniaina et al, 2016)。许多动物能通过扩大其食物范围等手段调整摄取食物的行为,保证储能需求(Nakagawa et al, 2007)。

关于种群数量与个体体况指数之间的关系研究者并未达成一致。一些研究者发现,个体的体况指数可能与种群规模呈负相关(Solberg et al, 1999; Unglaub et al, 2018),推测这是种群数量调节的一种机制,一方面这可能是内部资源竞争的结果(Oldham et al, 2000),另一方面较差的身体状况可能导致动物繁殖力的下降(Reading & Clarke, 1995)。另一部分研究者认为对于受到食物限制的种群,低种群数量与低体况指数应该是相关的(Suorsa et al, 2004)。

沙蜥属(*Phrynocephalus*)属于爬行纲有鳞目鬣蜥科,约有40个物种(赵尔宓等,1999),在中国分布有16种。沙蜥广泛分布于不同底色的生境中,种群体色表现出了丰富的地理差异(Tao et al, 2018)。奇台沙蜥(*Phrynocephalus grumgrzimai*)和旱地沙蜥(*P. helioscopus*)均属卵生种,两者在国内均为新疆特有种,分布区有重叠,互为旁系群且海拔分布相近(Jin et al, 2018)。奇台沙蜥,又名东疆沙蜥,是新疆东部地区的优势种。主要栖息于荒漠草原及固定沙丘地带,也在农田附近和风蚀沙丘的盐渍土地上活动,以小型无脊椎动物为食。旱地沙蜥仅分布在新疆天山以北的阿勒泰和塔城地区,是一种分布在沙砾和戈壁的典型物种,并且主要依靠环境来躲避天敌。它们通常以小型无脊椎动物为食,例如甲虫和蚂蚁(Nikol'skii, 1963; Clark et al, 1966; Clark & Clark, 1973)。对于这两个物种的研究多限于行为、繁殖、食性、两性异形、分类地位等方面(Meyer & Zinke, 1992; 吾玛尔·阿布力孜和古丽波斯坦·艾则孜,1999;熊晔,2006^①;刘洋和时磊,2009;梁涛等,2015;徐峰等,2015),而关于沙蜥属动物的体况指数及相关影响因素未见报道。本文通过研究旱地沙

^① 熊晔(2006)沙蜥属部分物种分类性状评价. 硕士学位论文,中国科学院研究生院和中国科学院成都生物研究所,成都。

蜥与奇台沙蜥的体况指数及其与周围生态因子之间的关系,解析这两个近缘种对于周围环境中关键因子的敏感性,以及反映在环境上各自的适应度,期望能对这两个物种的生态适应研究有所裨益。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

实验动物采集于新疆阿勒泰地区卡拉麦里山有蹄类自然保护区(以下简称卡拉麦里保护区)与青河县塔克什肯镇。卡拉麦里保护区位于准噶尔盆地东部,包括山地、沙漠和戈壁,南部为古尔班通古特沙漠和荒漠戈壁,中北部区域分别为卡拉麦里山脉和半荒漠化丘陵地带。海拔600–1,470 m,由东向西海拔逐渐降低。属干旱半干旱地区,区内地下水储量少,且降水量极少,水资源严重匮乏,因此水资源是保护区野生动植物生存的关键影响因子。保护区年均气温4–6℃,7月平均气温20.5℃,1月为–18℃,年均降水量159.1 mm,年均蒸发量2,090 mm,冬季寒冷漫长,春、夏季炎热干旱,秋季温凉(Xu et al, 2012a, b)。

保护区内植物群落组成相对简单,主要由旱生、半旱生的荒漠化植物组成,优势种有碱韭(*Allium polyrhizum*)、盐生假木贼(*Anabasis salsa*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、木蓼(*Atraphaxis frutescens*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、角果藜(*Ceratocarpus arenarius*)、驼绒藜(*Krascheninnikovia ceratoides*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、红砂(*Reaumuria soongarica*)和沙生针茅(*Stipa glareosa*)等,植被覆盖度一般在10%–20%^①。

塔克什肯镇为中蒙边境口岸,行政区划隶属阿勒泰地区青河县,为常年性开放口岸。主要为戈壁荒滩,冬季漫长严寒,夏季短暂炎热,年最高温度为36.5℃,极端最低温度可至–53℃,年均温差达70℃,年降水量约160 mm(杨晨光等, 2013)。

1.2 研究材料

于2014年6–7月和2015年8–9月,在阿勒泰地区采集奇台沙蜥和旱地沙蜥共260只。其中,奇台沙蜥84只,分别于2014年7月在卡拉麦里保护区(66只)和2015年8月在塔克什肯镇(18只)采集;旱地沙蜥共176只,分别于2014年6–7月在卡拉麦里保护区(47

只)和2015年8–9月在塔克什肯镇(129只)采集。

用数显游标卡尺(± 0.01 mm)及天平(0.01g)测量体重(body mass)和头体长(snout-vent length),头体长为吻端至泄殖腔孔前缘的距离(赵尔宓等, 1999)。

1.3 数据处理

Labocha等(2014)通过对比17种体况指数公式,发现在雌性物种中,体重/头体长和 \log 体重/ \log 头体长要比其他的比值法和残差法更有效,在雄性物种方面, \log 体重/ \log 头体长和骨盆长与头体长之比的线性回归残差是最优的方案。故本文选择 \log 体重/ \log 头体长。

气候因子包括年均温(annual mean temperature, AMT)、年降水量(annual precipitation, AP)和平均日较差(mean diurnal range, MDR),均来自世界气候数据网站(<http://www.worldclim.org>),数据精度为1 km²。利用 ArcGIS 10.2软件对所有网格重采样,使每个调查样区都在栅格内(精度为10 km²)。

本研究的所有统计分析均在R软件中进行(Wood, 2017)。经检验,沙蜥头体长、体重、体况指数均不符合正态分布(单样本Kolmogorov-Smirnov检验, $P < 0.05$),采用非参数检验(沙蜥雌雄体况指数对比采用Mann-Whitney检验,单因素相关性分析采用Spearman相关)。使用广义相加模型(generalized additive model, GAM)对生态因子(年均温、年降水量、平均日较差、海拔)与体况指数之间的关系进行分析,筛选出最适因子。当显著性概率 $P < 0.05$ 时认为差异显著。

2 结果

2.1 奇台沙蜥与旱地沙蜥的体况指数

奇台沙蜥的头体长为2.44–6.29 cm,体重为0.63–9.14 g,体况指数为–0.4838至1.2034。2015年雌雄样本的头体长、体重、体况指数均值均小于2014年样本。旱地沙蜥的头体长为2.58–5.93 cm,体重为0.65–6.58 g,体况指数为–0.4650至1.1265。2014年卡拉麦里保护区采集的奇台沙蜥头体长、体重、体况指数均值均大于该地区的旱地沙蜥;2015年塔克什肯镇采集的奇台沙蜥头体长、体重、体况指数均值则小于该地区的旱地沙蜥(表1)。

2014年和2015年旱地沙蜥体况指数在雌雄间无显著差异($Z = -1.022$, $P = 0.307 > 0.05$),亚成体与成体间差异显著($Z = -10.418$, $P < 0.001$)。以调查

^① 古力扎提·艾买提(2017)基于RS和GIS准东荒漠露天煤矿区景观格局变化及生态服务价值分析,硕士学位论文,新疆大学,乌鲁木齐。

表1 奇台沙蜥和旱地沙蜥的头体长、体重及体况指数

Table 1 Snout-vent length, body mass and body condition index of *Phrynocephalus grumgrzimailoi* and *Phrynocephalus helioscopus*

采集时间 Collecting month	采集地点 Area	年龄 Age	性别 Sex	样本量 Sample size	头体长 Snout-vent length (cm) (Mean ± SE)	体重 Body mass (g) (Mean ± SE)	体况指数 Body condition index (Mean ± SE)
奇台沙蜥 <i>Phrynocephalus grumgrzimailoi</i>							
2014.7	卡拉麦里山有蹄类自然保护区 Mt. Kalamaili Ungulate Nature Reserve	成体 Adult	♀	51	4.89 ± 0.46	4.47 ± 1.29	0.9131 ± 0.1339
		成体 Adult	♂	15	5.20 ± 0.48	5.90 ± 1.51	1.0556 ± 0.1120
2015.8	塔克什肯镇 Takeshiken Town	成体 Adult	♀	3	4.25 ± 0.19	3.20 ± 0.63	0.7949 ± 0.1037
		成体 Adult	♂	5	4.22 ± 0.22	3.21 ± 0.38	0.8042 ± 0.0602
		亚成体 Sub-adult		10	2.67 ± 0.14	0.74 ± 0.11	-0.3205 ± 0.1598
旱地沙蜥 <i>Phrynocephalus helioscopus</i>							
2014.6	卡拉麦里山有蹄类自然保护区 Mt. Kalamaili Ungulate Nature Reserve	成体 Adult	♀	9	4.27 ± 0.45	3.42 ± 0.85	0.8264 ± 0.1196
		成体 Adult	♂	6	4.12 ± 0.29	3.33 ± 0.77	0.8317 ± 0.1217
2014.7	卡拉麦里山有蹄类自然保护区 Mt. Kalamaili Ungulate Nature Reserve	成体 Adult	♀	19	4.24 ± 0.50	3.25 ± 1.16	0.7784 ± 0.1431
		成体 Adult	♂	13	4.26 ± 0.33	3.59 ± 0.79	0.8655 ± 0.1166
2015.8	塔克什肯镇 Takeshiken Town	成体 Adult	♀	42	4.43 ± 0.46	4.18 ± 1.01	0.9187 ± 0.2224
		成体 Adult	♂	28	4.48 ± 0.20	4.30 ± 0.48	0.9685 ± 0.0637
		亚成体 Sub-adult		52	2.96 ± 0.21	1.21 ± 0.24	0.1462 ± 0.1902
2015.9	塔克什肯镇 Takeshiken Town	成体 Adult	♀	1	4.32	4.25	0.9895
		成体 Adult	♂	2	4.57 ± 0.57	4.67 ± 0.37	1.0131 ± 0.0600
		亚成体 Sub-adult		4	3.24 ± 0.32	1.58 ± 0.42	0.3479 ± 0.2535

时间为单位区分, 2014年6月、7月; 2015年8月、9月旱地沙蜥体况指数在月份间无显著差异(2014年: $Z = -0.342, P = 0.732 > 0.05$; 2015年: $Z = -0.769, P = 0.442 > 0.05$); 以性别区分, 雌性旱地沙蜥2014年6月、7月体况指数差异不显著($Z = -1.058, P = 0.290 > 0.05$), 雄性旱地沙蜥2014年6月、7月体况指数差异也不显著($Z = -0.614, P = 0.539 > 0.05$); 以年龄区分, 成体旱地沙蜥2014年6月、7月体况指数差异不显著($Z = -0.342, P = 0.732 > 0.05$)。2015年旱地沙蜥体况指数雌雄两性差异不显著($Z = -0.123, P = 0.902 > 0.05$), 同时亚成体、成体体况指数差异显著($Z = -9.278, P < 0.001$), 2015年8月的数据显示, 该月的旱地沙蜥雌雄两性差异同样显示不显著($Z = -0.042, P = 0.967 > 0.05$), 亚成体、成体间体况指数差异显著($Z = -9.055, P < 0.001$)。

2014年、2015年雌雄奇台沙蜥体况指数两性差异显著($Z = -2.264, P = 0.024 < 0.05$), 亚成体、成体

奇台沙蜥体况指数差异显著($Z = -5.111, P < 0.001$)。以调查地区为单位区分, 2014年卡拉麦里、2015年塔克什肯镇奇台沙蜥体况指数差异显著($Z = -5.418, P < 0.001$)。2014年, 奇台沙蜥体况指数两性差异显著($Z = -3.634, P < 0.001$)。

2014年, 卡拉麦里保护区的奇台沙蜥与旱地沙蜥体况指数差异显著($Z = -4.48, P < 0.001$)。2014年成体奇台沙蜥与2015年成体旱地沙蜥体况指数差异不显著($Z = -0.477, P > 0.05$)。

Spearman相关分析显示, 奇台沙蜥体况指数与4种环境因子均显著相关, 除与海拔呈负相关外, 与另外3种因子呈正相关(表2), 而旱地沙蜥体况指数与4种环境因子相关性均不显著。考虑到旱地沙蜥体况指数两性差异并不显著($Z = -1.022, P = 0.307 > 0.05$), 第二次相关性分析以年龄来划分, 结果显示成体旱地沙蜥与年均温与平均日较差有显著性相关(表3); 亚成体旱地沙蜥则仅与年均温呈

表2 奇台沙蜥、旱地沙蜥体况指数与环境因子的相关性
Table 2 Correlation between environmental factors and body condition index of *Phrynocephalus grumgrzimai* and *P. helioscopus*

	相关系数 Correlation coefficient (r)	P
奇台沙蜥 <i>Phrynocephalus grumgrzimai</i>		
海拔 Altitude	-0.352	0.001**
年均温 Annual mean temperature (AMT)	0.442	<0.001**
年降水量 Annual precipitation (AP)	0.368	0.001**
平均日较差 Mean diurnal range (MDR)	0.433	<0.001**
旱地沙蜥 <i>Phrynocephalus helioscopus</i>		
海拔 Altitude	-0.032	0.672
年均温 Annual mean temperature (AMT)	0.009	0.908
年降水量 Annual precipitation (AP)	0.021	0.778
平均日较差 Mean diurnal range (MDR)	-0.005	0.942

** $P < 0.01$

表3 旱地沙蜥成体和亚成体的体况指数与环境因子相关性
Table 3 Correlation between environmental factors and body condition index of adult and sub-adult *Phrynocephalus helioscopus*

	相关系数 Correlation coefficient (r)	P
成体旱地沙蜥 Adult <i>Phrynocephalus helioscopus</i>		
海拔 Altitude	0.065	0.478
年均温 Annual mean temperature (AMT)	-0.508	<0.001**
年降水量 Annual precipitation (AP)	-1.3	0.158
平均日较差 Mean diurnal range (MDR)	0.264	0.004**
亚成体旱地沙蜥 Sub-adult <i>Phrynocephalus helioscopus</i>		
海拔 Altitude	-0.053	0.701
年均温 Annual mean temperature (AMT)	0.307	0.021*
年降水量 Annual precipitation (AP)	-0.155	0.255
平均日较差 Mean diurnal range (MDR)	-0.85	0.533

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

表4 阿勒泰地区奇台沙蜥与旱地沙蜥体况指数与不同环境因子的广义相加模型

Table 4 Generalized additive model for the body condition index of *Phrynocephalus grumgrzimai*, *P. helioscopus*, and different factors in the Altay Prefecture

	因子 Factors	AIC	模型解释力 Model explanation (%)	P
奇台沙蜥 <i>Phrynocephalus grumgrzimai</i>	年均温、平均日较差 Annual mean temperature (AMT) and mean diurnal range (MDR)	7.5878	70.8	$P_{AMT} = 0.0000515^{***}$ $P_{MDR} = 0.287$
成体 Adult	年均温、年降水量 Annual mean temperature (AMT) and annual precipitation (AP)	-92.9955	31	$P_{AMT} = 0.246176$ $P_{AP} = 0.000772^{***}$
雌性 Female	年降水量 Annual precipitation (AP)	-69.1677	25.4	$P = 0.0139^*$
雄性 Male	年降水量、平均日较差 Annual precipitation (AP) and mean diurnal range (MDR)	-39.4951	76.6	$P_{AP} = 0.3253$ $P_{MDR} = 0.0155^*$
旱地沙蜥 <i>Phrynocephalus helioscopus</i>	海拔 Altitude	161.4543	5.98	$P_{Altitude} = 0.0324^*$
成体 Adult	年均温、海拔 Annual mean temperature (AMT) and altitude	-101.6001	17.3	$P_{AMT} = 0.00000242^{***}$ $P_{Altitude} = 0.00532^*$
亚成体 Sub-adult	海拔 Altitude	-26.59233	22.5	$P = 0.0136^*$

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$

正相关($r = 0.307$, $P = 0.021 < 0.05$; 表3)。

2.2 体况指数的影响因素

最优回归模型筛选结果表明, 温度进入了奇台沙蜥和成体奇台沙蜥类群的最优模型, 且与奇台沙蜥相关度均为显著(表4), 证明温度对奇台沙蜥体况指数起到了重要作用; 年降水量则进入了除奇台沙蜥总体外其余类群的最优模型, 但相关性较差, 解释力也较弱, 表明年降水量作为影响体况指数的辅

助因子, 主要通过与其他生态因子(海拔、温度)组合发挥作用。同时, 海拔进入了旱地沙蜥全部类群的3个最优模型(表4), 表明海拔对旱地沙蜥体况指数起到了作用。

3 讨论

3.1 体况指数的两性差异

目前研究认为, 蜥蜴两性异形产生的机制主要

有3种, 即性选择-同性选择假说(Intrasexual Selection Hypothesis)、繁殖力优势假说(Fecundity Advantage Hypothesis)和伴性生态位分离假说(Sex-specific Niche Divergence)。其中, 性选择假说是解释两性异形产生机制最流行的假说(Kratochvil & Frynta, 2002)。性选择假说指雄性通常需要激烈的繁殖竞争以获得与雌性交配的机会, 体型较大的个体在斗争中易获胜, 因而性选择是驱使雄性向较大体型方向进化的主要压力(Hedrick & Temeles, 1989); 繁殖力优势假说则认为雌性增大体型以产出更多或更大的后代, 从而提高繁殖输出, 即生育力选择是驱使雌性向较大体型方向进化的主要压力(Williams, 1966; Cooper & Vitt, 1989; Hews, 1990; Shine, 1994); 伴随生态位分离假说主要有两种解释, 一是由于雌雄两性具有不同的繁殖角色导致各自的生态位需求不同, 因而产生了不同的适应性(Hedrick & Temeles, 1989); 二是雌雄两性的生态位分化有利于减轻两性资源(如栖息地和食物等)的竞争, 如果两性的形态特征与资源利用有关, 那么为了避免种内竞争, 在资源的选择方面可能会产生差异, 进而影响两性形态的进化, 导致两性异形出现。但由于不确定作用于哪个性别的个体, 因此生态位分离因素作用下的两性异形没有明确的方向(Shine, 1989)。

以往研究结果表明蜥蜴并无统一的两性异形规律, 有些种类受性选择驱动, 如蓝尾石龙子(*Eumeces elegans*)、中国石龙子(*E. chinensis*)等(林植华和计翔, 2000; 杜卫国和计翔, 2001); 有些种类受繁殖力驱动, 如蝮蜥(*Sphenomorphus indicus*) (计翔和杜卫国, 2000); 还有许多种类两性异形不显著, 如新疆沙虎(*Teratoscincus przewalskii*)、鳄蜥(*Shinisaurus crocodilurus*)、山地麻蜥(*Eremias brenchleyi*)、宁波滑蜥(*Scincella modesta*) (许雪峰和计翔, 2003; 何南等, 2011; 罗来高等, 2012; 廖灏泓等, 2013)。即使是同一物种, 在不同地区也可能会因为不同的压力而产生差异, 例如徐峰等(2015)发现塔城地区托里县城北的旱地沙蜥雌雄头体长两性异形不显著, 梁涛等(2015)则发现阿勒泰地区北屯市西郊戈壁的旱地沙蜥雌性头体长较长; 刘洋和时磊(2009)发现乌鲁木齐市郊乌拉泊的奇台沙蜥两性体型大小差异不显著, 但王征(2011)发现奇台沙蜥雄性头体长较长。

本次研究表明, 卡拉麦里地区奇台沙蜥雌性头

体长小于雄性, 受性选择驱动, 与王征(2011)的结论相似。这可能与卡拉麦里保护区白天日照时间长, 繁殖季节长, 可用于繁殖输出的能量较多, 因而生育力选择并未变成驱动力; 同时奇台沙蜥在卡拉麦里地区属于优势种, 食物充足, 加上较高的光照强度, 雄性沙蜥行为活跃, 反而使性选择成为驱动压力。而旱地沙蜥两性异形不明显, 推测是在卡拉麦里地区, 由于奇台沙蜥的竞争限制了旱地沙蜥的食物可得性, 且雌性减少分配用于繁殖的资源有利于降低因繁殖负重带来的生存风险, 因而旱地沙蜥降低生育力和繁殖输出是对卡拉麦里沙漠环境的适应性反应; 而在塔克什肯镇, 旱地沙蜥可能是受天敌的影响, 所以这几种压力表现不明显。

根据表1, 2014年7月奇台沙蜥雌性的体况指数(0.9131 ± 0.1339)小于雄性(1.0556 ± 0.1120), 2014年6月旱地沙蜥雌性的体况指数(0.8264 ± 0.1381)略小于雄性(0.8317 ± 0.1217), 但不具备统计意义($P = 0.964 > 0.05$), 而同年7月旱地沙蜥雌性的体况指数(0.7784 ± 0.1431)同样小于雄性(0.8655 ± 0.1166), 且具有统计意义($P = 0.017 < 0.05$)。考虑到旱地沙蜥与奇台沙蜥的交配期多在4-6月, 产卵期集中在5-7月(张鹏和袁国映, 2005), 7月份雌性沙蜥由于卵的发育而消耗的大量物质除了来自食物外, 还需要动用自身储存的能量; 而雄性则由于觅偶、交配、竞争等行为的减少, 减少了能量的消耗, 造成雌性沙蜥体况指数低于雄性。2015年8月, 塔克什肯镇雌性旱地沙蜥体况指数(0.9187 ± 0.2224)虽然小于雄性(0.9685 ± 0.0637), 但差异不显著($P = 0.967 > 0.05$), 可能是由于塔克什肯镇旱地沙蜥为优势种, 食物丰富, 有利于雌性旱地沙蜥在繁殖期后育肥, 体况指数回升。

3.2 体况指数的年龄、月份差异

两种沙蜥的亚成体与成体体况指数、头体长、体重比较结果显示(表1), 随着沙蜥的生长发育, 成体的体况指数、头体长、体重均显著增长, 而其中体重的增长速度大于头体长, 或者说蜥蜴横向生长大于纵向生长, 所以成体的体况指数均大于亚成体。

以往的研究表明, 不同动物体况指数的季节性变化方式也不同。对于迁徙鸟来说, 为了给春季迁徙做准备, 积累和维持足够的能量是必须的, 因此冬季的体况指数反而较高(Johnson et al, 2006; Studds & Marra, 2011)。对于两栖爬行类等外温动物

而言,体况指数一般在冬眠后苏醒的季节最低,而后开始增长,到达最高点后开始下降,直到开始冬眠。在北半球,体况指数一般在秋季达到最高(卢欣, 1993; Milne et al, 2003; 金晨晨等, 2014)。同时环境的季节性变化也与体况指数相关。例如,加拉帕戈斯海鬣蜥(*Mblyrhynchus cristatus*)由于觅食效率的降低,在季节变化剧烈时体况指数会有明显下降(Wikelski et al, 1997)。本次研究采集样品的时间跨度较小,环境变化也不剧烈,这可能是沙蜥体况指数虽然有所增加但不显著的原因。

3.3 体况指数的影响因素

旱地沙蜥亚成体、奇台沙蜥的体况指数均与年均温呈正相关,即随着温度的升高,旱地沙蜥亚成体倾向于横向生长,使自己拥有更大的体型和体重,这与Bergmann法则相反,而成体旱地沙蜥则与该法则相同。Bergmann法则最早适用于内温动物,而外温动物中的部分类群遵循相同(Blanckenhorn & Demont, 2004),另一部分则相反(Mousseau, 1997)。可能原因在于较高的温度对于植食性昆虫的生长、发育和繁殖有帮助,使沙蜥可获取食物的多样性增多,导致温度较高的地区体型较大;而成体旱地沙蜥由于同地区奇台沙蜥竞争限制了食物可得性,导致体型与温度反而成为了负相关。

不同样地间的旱地沙蜥与奇台沙蜥的体况指数差异显著,说明沙蜥的身体状况与生存环境之间有密切的关系。我们发现年降水量虽然进入了4个奇台沙蜥体况指数模型中的3个,但却没有进入总体的最优模型中。通常认为食性是影响动物生理状况的主要因子,考虑到奇台沙蜥在个体生长发育过程中食性会发生明显变化(刘洋等, 2011),年降水量与奇台沙蜥的食物资源间的关系有待进一步研究。另一方面,海拔因子进入了旱地沙蜥全部类群的3个最优模型,且都具有较强的相关性,但模型解释力较弱,推测海拔为补充因子,通过影响其他环境因子(例如植被、食物丰富度等),或与其他环境因子结合在一起影响旱地沙蜥的生理状况。在多样性方面占据优势的沙蜥(卡拉麦里保护区:奇台沙蜥,塔克什肯镇:旱地沙蜥)体况指数也较高,这也表明奇台沙蜥与旱地沙蜥的种群增长可能偏向于食物限制的种群。

在本研究中,两种占有优势地位的沙蜥并没有表现出因受到更强的人为干扰所致的体况指数明

显下降的现象。与其他一些物种类似,人为干扰强度对沙蜥体况指数的影响弱于季节、性别和年龄(Boswell et al, 1994; Rakotoniaina et al, 2016)。推测可能是因为塔克什肯镇及周边村落的居民活动使得周围的小型无脊椎动物多样性高于沙漠地区,使当地的旱地沙蜥可以通过增加对节肢动物的取食,以保证自身的能量需求。因为不同营养级的节肢动物对城市化的反应不同(Vilisics et al, 2007)。例如,蜘蛛在不同地区的形态特征和生态特征变化不大,而农村地区的甲虫多样性则显著高于郊区和城市地区(Nagy et al, 2018)。

致谢: 感谢新疆阿勒泰地区林业局对野外工作的大力支持。感谢两位匿名审稿人提出的建议。中国科学院动物研究所崔绍朋、吴文卉,四川农业大学刘旒,新疆布尔根河狸国家级自然保护区陈刚参与了野外工作,在此一并致谢!

参考文献

- Allan BF, Keesing F, Ostfeld RS (2003) Effect of forest fragmentation on Lyme disease risk. *Conservation Biology*, 17, 267–272.
- Blanckenhorn WU, Demont M (2004) Bergmann and converse Bergmann latitudinal clines in arthropods: Two ends of a continuum? *Integrative and Comparative Biology*, 44, 413–424.
- Boggs CL (2009) Understanding insect life histories and senescence through a resource allocation lens. *Functional Ecology*, 23, 27–37.
- Boswell T, Woods SC, Kenagy GJ (1994) Seasonal changes in body mass, insulin, and glucocorticoids of free-living golden-mantled ground squirrels. *General and Comparative Endocrinology*, 96, 339–346.
- Cadi A, Joly P (2003) Competition for basking places between the endangered European pond turtle (*Emys orbicularis galloitalica*) and the introduced red-eared slider (*Trachemys scripta elegans*). *Canadian Journal of Zoology*, 81, 1392–1398.
- Cavallini P (1996) Comparison of body condition indices in the red fox (*Fissipedia*, Canidae). *Mammalia*, 60, 449–462.
- Clark RJ, Clark E (1973) Report on a Collection of Amphibians and Reptiles from Turkey. California Academy of Sciences, San Francisco.
- Clark RJ, Clark E, Anderson SC (1966) Report on Two Small Collections of Reptiles from Iran. California Academy of Sciences, San Francisco.
- Cooper WE, Vitt LJ (1989) Sexual dimorphism of head and

- body size in an iguanid lizard: Paradoxical results. *The American Naturalist*, 133, 729–735.
- Du WG, Ji X (2001) Growth, sexual size dimorphism and female reproduction of blue-tailed skinks, *Eumeces elegans*. *Zoological Research*, 22, 279–286. (in Chinese with English abstract) [杜卫国, 计翔 (2001) 蓝尾石龙子的生长, 两性异形及雌性繁殖. *动物学研究*, 22, 279–286.]
- Fan ZL, Wang Y, Du SY, Wang J (2013) Fatness degree of striped hairy-footed hamster (*Phodopus sungorus*) in Inner Mongolia, China. *Chinese Journal of Ecology*, 32, 3250–3254. (in Chinese with English abstract) [范尊龙, 王勇, 杜森云, 王军 (2013) 内蒙古黑线毛足鼠肥满度. *生态学杂志*, 32, 3250–3254.]
- Fang JM, Sun RY (1995) Analysis of body condition index of Brandt's voles and a comparison between relative fatness K and K_{WL} (weight/length index) in small mammals. *Acta Zoologica Sinica*, 41, 141–148. (in Chinese with English abstract) [房继明, 孙儒泳 (1995) 布氏田鼠肥满度分析和小型兽类肥满度指标K与 K_{WL} (重长指标)的比较. *动物学报*, 41, 141–148.]
- He N, Wu ZJ, Cai FJ, Wang ZX, Yu H, Huang CM (2011) Sexual dimorphism of *Shinisaurus crocodilurus*. *Chinese Journal of Ecology*, 30, 7–11. (in Chinese with English abstract) [何南, 武正军, 蔡凤金, 王振兴, 于海, 黄乘明 (2011) 鳄蜥的两性异形. *生态学杂志*, 30, 7–11.]
- Hedrick AV, Temeles EJ (1989) The evolution of sexual dimorphism in animals: Hypotheses and tests. *Trends in Ecology & Evolution*, 4, 136–138.
- Hellgren EC, Rogers LL, Seal US (1993) Serum chemistry and hematology of black bears: Physiological indices of habitat quality or seasonal patterns? *Journal of Mammalogy*, 74, 304–315.
- Hews DK (1990) Examining hypotheses generated by field measures of sexual selection on male lizards, *Uta palmeri*. *Evolution*, 44, 1956–1966.
- Ji X, Du WG (2000) Sexual dimorphism in body size and head size and female reproduction in a viviparous skink, *Sphenomorphus indicus*. *Zoological Research*, 21, 349–354. (in Chinese with English abstract) [计翔, 杜卫国 (2000) 蝮蜓头、体大小的两性异形和雌体繁殖. *动物学研究*, 21, 349–354.]
- Jin CC, Qu KS, Zhang ZQ (2014) Sexual and seasonal differences of the relative fatness and organ mass of *Pelodytes nigromaculata*. *Sichuan Journal of Zoology*, 33, 106–112. (in Chinese with English abstract) [金晨晨, 瞿康山, 张志强 (2014) 黑斑侧褶蛙肥满度及脏器重量的性别和季节差异. *四川动物*, 33, 106–112.]
- Jin YT, Wo YB, Tong HJ, Song S, Zhang LX, Brown RP (2018) Evolutionary analysis of mitochondrially encoded proteins of toad-headed lizards, *Phrynocephalus*, along an altitudinal gradient. *BMC Genomics*, 19, 185.
- Johnson MD, Sherry TW, Holmes RT, Marra PP (2006) Assessing habitat quality for a migratory songbird wintering in natural and agricultural habitats. *Conservation Biology*, 20, 1433–1444.
- Juliano SA (1986) Food limitation of reproduction and survival for populations of *Brachinus* (Coleoptera: Carabidae). *Ecology*, 67, 1036–1045.
- Liao HH, Xu F, Yang WK (2013) The sexual size dimorphism of *Teratoscincus przewalskii*. *Sichuan Journal of Zoology*, 32, 808–811. (in Chinese with English abstract) [廖灏泓, 徐峰, 杨维康 (2013) 新疆沙虎的两性异形. *四川动物*, 32, 808–811.]
- Kratochvil L, Frynta D (2002) Body size, male combat and the evolution of sexual dimorphism in eublepharid geckos (Squamata: Eublepharidae). *Biological Journal of the Linnean Society*, 76, 303–314.
- Labocha MK, Schutz H, Hayes JP (2014) Which body condition index is best? *Oikos*, 123, 111–119.
- Lelito JP, Brown WD (2006) Complicity or conflict over sexual cannibalism? Male risk taking in the praying mantis *Tenodera aridifolia sinensis*. *The American Naturalist*, 168, 263–269.
- Liang T, Lü SP, Wu KL, Shi L (2015) Sexual dimorphism and female reproduction of *Phrynocephalus helioscopus* (Agamidae). *Chinese Journal of Ecology*, 34, 1602–1606. (in Chinese with English abstract) [梁涛, 吕士鹏, 武开乐, 时磊 (2015) 旱地沙蜥的两性异形和雌性繁殖投入. *生态学杂志*, 34, 1602–1606.]
- Liker A, Papp Z, Bókony V, Lendvai AZ (2008) Lean birds in the city: Body size and condition of house sparrows along the urbanization gradient. *Journal of Animal Ecology*, 77, 789–795.
- Lin ZH, Ji X (2000) Food habits, sexual dimorphism and female reproduction of the skink (*Eumeces chinensis*) from a Lishui population in Zhejiang. *Acta Ecologica Sinica*, 20, 304–310. (in Chinese with English abstract) [林植华, 计翔 (2000) 浙江丽水中国石龙子的食性、两性异形和雌性繁殖. *生态学报*, 20, 304–310.]
- Liu Y, Shi L (2009) Ontogenetic shifts of sexual dimorphism in *Phrynocephalus grumgrzimailoi* (Agamidae). *Sichuan Journal of Zoology*, 28, 710–713. (in Chinese with English abstract) [刘洋, 时磊 (2009) 奇台沙蜥生长过程中的两性异形. *四川动物*, 28, 710–713.]
- Liu Y, Wang SY, Shi L (2011) Effects of age and sex on diet composition of *Phrynocephalus grumgrzimailoi*. *Chinese Journal of Zoology*, 46, 111–117. (in Chinese with English abstract) [刘洋, 王舒娅, 时磊 (2011) 年龄和性别因素对奇台沙蜥食性的影响. *动物学杂志*, 46, 111–117.]
- Lomas E, Larsen KW, Bishop CA (2015) Persistence of northern pacific rattlesnakes masks the impact of human disturbance on weight and body condition. *Animal Conservation*, 18, 548–556.
- Lu X (1993) Seasonal variations of adult's corpulence degree and other organs' indices of common frogs in Taiyue Mountain hilly lands. *Chinese Journal of Ecology*, 12(4),

33–35. (in Chinese with English abstract) [卢欣 (1993) 太岳山丘陵地带中国林蛙成体的饱满度和某些器官系数的季节变化. *生态学杂志*, 12(4), 33–35.]

- Lunn NJ, Boyd IL (1993) Effects of maternal age and condition on parturition and the perinatal period of Antarctic fur seals. *Journal of Zoology*, 229, 55–67.
- Luo LG, Wu YL, Tian XY, Xu XF (2012) Sexual size dimorphism and female reproductive output in slender forest skink, *Scincella modesta*. *Chinese Journal of Zoology*, 47(2), 23–30. (in Chinese with English abstract) [罗来高, 吴义莲, 田贤玉, 许雪峰 (2012) 宁波滑蜥两性异形和雌性繁殖. *动物学杂志*, 47(2), 23–30.]
- Maxwell MR, Gallego KM, Barry KL (2010) Effects of female feeding regime in a sexually cannibalistic mantid: Fecundity, cannibalism, and male response in *Stagmomantis limbata* (Mantodea). *Ecological Entomology*, 35, 775–787.
- Meyer F, Zinke O (1992) Zur Ökologie von *Phrynocephalus helioscopus* (Pallas, 1771) in der Dschungarischen Gobi (Reptilia; Agamidae). *Bonner Zoologische Beiträge*, 43, 131–144. (in German with English abstract)
- Milne T, Bull CM, Hutchinson MN (2003) Fitness of the endangered pygmy blue tongue lizard *Tiliqua adelaidensis* in artificial burrows. *Journal of Herpetology*, 37, 762–766.
- Mousseau TA (1997) Ectotherms follow the converse to Bergmann's rule. *Evolution*, 51, 630–632.
- Nagy DD, Magura T, Horváth R, Debnár Z, Tóthmérész B (2018) Arthropod assemblages and functional responses along an urbanization gradient: A trait-based multi-taxa approach. *Urban Forestry & Urban Greening*, 30, 157–168.
- Nakagawa M, Hyodo F, Nakashizuka T (2007) Effect of forest use on trophic levels of small mammals: An analysis using stable isotopes. *Canadian Journal of Zoology*, 85, 472–478.
- Nikol'skii AM (1963) Fauna of Russia and Adjacent Countries: Reptiles, Vol. 1. Chelonia and Sauria. Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem.
- Oldham RS, Keeble J, Swan MJS, Jeffcote M (2000) Evaluating the suitability of habitat for the great crested newt (*Triturus cristatus*). *Herpetological Journal*, 10, 143–155.
- Omar A, Gulbostan E (1999) Analysis on feeding habits of *Phrynocephalus grumgrizmaloi* and *Eremias multiocellata* from Xinjiang. *Arid Zone Research*, 16(4), 12–15. (in Chinese with English abstract) [吾玛尔·阿布力孜, 古丽波斯坦·艾则孜 (1999) 东疆沙蜥和密点麻蜥的食性研究. *干旱区研究*, 16(4), 12–15.]
- Ou YY (2004) Comparative research on relative fatness and weight/length index of *Takydromus septentrionalis*. *Journal of Chuzhou University*, 6(3), 110–112. (in Chinese) [欧永跃 (2004) 北草蜥饱满度和重长指标的比较. *滁州学院学报*, 6(3), 110–112.]
- Pearson SH, Avery HW, Spotila JR (2015) Juvenile invasive red-eared slider turtles negatively impact the growth of native turtles: Implications for global freshwater turtle populations. *Biological Conservation*, 186, 115–121.
- Rakotoniaina JH, Kappeler PM, Ravoniarimbina P, Pechou-skova E, Hämäläinen AM, Grass J, Kirschbaum C, Kraus C (2016) Does habitat disturbance affect stress, body condition and parasitism in two sympatric lemurs? *Conservation Physiology*, 4(1), cow034.
- Reading CJ, Clarke RT (1995) The effects of density, rainfall and environmental temperature on body condition and fecundity in the common toad, *Bufo bufo*. *Oecologia*, 102, 453–459.
- Rode KD, Amstrup SC, Regehr EV (2010) Reduced body size and cub recruitment in polar bears associated with sea ice decline. *Ecological Applications*, 20, 768–782.
- Rode KD, Chapman CA, McDowell LR, Stickler C (2006) Nutritional correlates of population density across habitats and logging intensities in redbelt monkeys (*Cercopithecus ascanius*). *Biotropica*, 38, 625–634.
- Shine R (1989) Ecological causes for the evolution of sexual dimorphism: A review of the evidence. *Quarterly Review of Biology*, 64, 419–461.
- Shine R (1994) Sexual size dimorphism in snakes revisited. *Copeia*, 1994, 326–346.
- Solberg EJ, Sæther BE, Strand O, Loison A (1999) Dynamics of a harvested moose population in a variable environment. *Journal of Animal Ecology*, 68, 186–204.
- Stevenson RD, Woods WA (2006) Condition indices for conservation: New uses for evolving tools. *Integrative and Comparative Biology*, 46, 1169–1190.
- Stirling I, Lunn NJ, Iacozza J (1999) Long-term trends in the population ecology of polar bears in western Hudson Bay in relation to climatic change. *Arctic*, 52, 294–306.
- Studds CE, Marra PP (2011) Rainfall-induced changes in food availability modify the spring departure programme of a migratory bird. *Proceedings of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences*, 278, 3437–3443.
- Suorsa P, Helle H, Koivunen V, Huhta E, Nikula A, Hakkarainen H (2004) Effects of forest patch size on physiological stress and immunocompetence in an area-sensitive passerine, the Eurasian Treecreeper (*Certhia familiaris*): An experiment. *Proceedings of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences*, 271, 435–440.
- Tao X, Jiang Z, Ji S, Chu H, Yang D, Li C (2018) Influence of light intensity and substrate color on dorsal gray color change in *Phrynocephalus helioscopus* and *Phrynocephalus grumgrizmailoi*. *Journal of Arid Environments*, 157, 22–26.
- Unglaub B, Steinfartz S, Kühne D, Haas A, Schmidt BR (2018) The relationships between habitat suitability, population size and body condition in a pond-breeding amphibian. *Basic and Applied Ecology*, 27, 20–29.
- Vilicis F, Elek Z, Lövei GL, Hornung E (2007) Composition of terrestrial isopod assemblages along an urbanisation gradient in Denmark. *Pedobiologia*, 51, 45–53.
- Wang SB, Jiang CG, Qu YF, Jing ZQ, Wu QH (1999) Preliminary studies on the body condition index and weight/

- length of wild and domestic *Rana chensinensis* from Liaoning. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 10, 91–94. (in Chinese with English abstract) [王寿兵, 蒋朝光, 屈云芳, 经佐琴, 吴千红 (1999) 野生和人工养殖辽宁中国林蛙肥满度和重/长指标的初步研究. *应用生态学报*, 10, 91–94.]
- Wang Z (2011) Adapting to Extreme Climate: The Evolution of Viviparity in *Phrynocephalus* Lizards. PhD dissertation, Nanjing Normal University, Nanjing. (in Chinese with English abstract) [王征 (2011) 对极端气候的适应: 沙蜥属蜥蜴的卵胎生进化. 博士学位论文, 南京师范大学, 南京.]
- Wikelski M, Carrillo V, Trillmich F (1997) Energy limits to body size in a grazing reptile, the Galápagos marine iguana. *Ecology*, 78, 2204–2217.
- Wilder SM, Raubenheimer D, Simpson SJ (2016) Moving beyond body condition indices as an estimate of fitness in ecological and evolutionary studies. *Functional Ecology*, 30, 108–115.
- Williams GC (1966) Natural selection, the costs of reproduction, and a refinement of Lack's principle. *The American Naturalist*, 100, 687–690.
- Wood SN (2017) *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. CRC, London.
- Wu YL (1965) Comparative analysis on body condition index and change in some internal organs of *Pelophylax nigromaculatus* through hibernation. *Chinese Journal of Zoology*, 7(3), 116–119. (in Chinese) [吴云龙 (1965) 黑斑蛙自然冬眠时肥满度与某些内脏器官的变化. *动物学杂志*, 7(3), 116–119.]
- Xia WP, Sun CL (1963) On the body condition index of the red-backed vole, *Clethrionomys rutilus pallas*. *Acta Zoologica Sinica*, 15, 33–43. (in Chinese) [夏武平, 孙崇澍 (1963) 红背鼯肥满度的研究. *动物学报*, 15, 33–43.]
- Xu F, Liao HH, Yang WK (2015) Sexual dimorphism of *Phrynocephalus helioscopus*. *Sichuan Journal of Zoology*, 34, 859–862. (in Chinese with English abstract) [徐峰, 廖灏泓, 杨维康 (2015) 旱地沙蜥的两性异形. *四川动物*, 34, 859–862.]
- Xu W, Xia C, Lin J, Yang W, Blank DA, Qiao J, Liu W (2012a) Diet of *Gazella subgutturosa* (Güldenstaedt, 1780) and food overlap with domestic sheep in Xinjiang, China. *Folia Zoologica*, 61, 54–61.
- Xu W, Xia C, Yang W, Blank DA, Qiao J, Liu W (2012b) Seasonal diet of Khulan (Equidae) in northern Xinjiang, China. *Italian Journal of Zoology*, 79, 92–99.
- Xu XF, Ji X (2003) Ontogenetic shifts in sexual dimorphism in head size and food habits of *Eremias brenchleyi*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 14, 557–561. (in Chinese with English abstract) [许雪峰, 计翔 (2003) 山地麻蜥个体发育过程中头部两性异形和食性的变化. *应用生态学报*, 14, 557–561.]
- Yang CG, Chen YY, Tian F, Shi B, Zhu MJ, Chu CH, Shi HT, Ai ZZ (2013) Surveillance report of the mosquitoes at Takeshiken Port and Jeminay Port in Xinjiang. *Chinese Frontier Health Quarantine*, 36, 112–114. (in Chinese with English abstract) [杨晨光, 陈胤瑜, 田锋, 石兵, 朱敏杰, 储成海, 师海涛, 艾则孜 (2013) 新疆塔克什肯、吉木乃口岸成蚊监测报告. *中国国境卫生检疫杂志*, 36, 112–114.]
- Zhang P, Yuan GY (2005) *Amphibia-reptilia of Xinjiang*. Xinjiang Science and Technology Press, Urumqi. (in Chinese) [张鹏, 袁国映 (2005) 新疆两栖爬行动物. 新疆科学技术出版社, 乌鲁木齐.]
- Zhao EM, Zhao KT, Zhou KY (1999) *Fauna Sinica · Reptilia* (Vol. 2): Squamata, Lacertilia. Science Press, Beijing. (in Chinese) [赵尔宓, 赵肯堂, 周开亚 (1999) 中国动物志·爬行纲(第二卷): 有鳞目, 蜥蜴亚目. 科学出版社, 北京.]

(责任编辑: 江建平 责任编辑: 闫文杰)



•研究报告•

新疆阿勒泰地区额尔齐斯河和乌伦古河流域 鱼类多样性演变和流域健康评价

李雪健^{1,2} 贾佩尧² 牛诚祎² 邢迎春³ 李浩林⁴
刘海波² 唐文乔^{1*} 赵亚辉^{2*}

1 (上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306)

2 (中国科学院动物研究所, 北京 100101)

3 (中国水产科学研究院, 北京 100039)

4 (天津自然博物馆, 天津 300201)

摘要: 为了解阿勒泰地区额尔齐斯河和乌伦古河流域的鱼类多样性现状和历史演变, 本研究于2013–2016年间在该流域的鱼类多样性进行了连续调查, 并结合历史资料和标本, 以Margalef丰富度指数、Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数分析评估了流域内鱼类的多样性水平和时空变化。该流域历史上分布有土著鱼类23种, 当前记录到19种, 流域内还有外来鱼类15种。阿勒泰鱼类的区系组成以鲤科种类为主, 其中特有和珍稀濒危物种占比高, 具有重要的保护价值。多样性指数计算结果显示, 2013–2016年鱼类多样性情况整体稳定, 额尔齐斯河鱼类物种数多于乌伦古河。研究还基于鱼类生物完整性指数(Fish Index of Biological Integrity, F-IBI)对34个采集点的河流健康状况进行了评价, 结果显示额尔齐斯河流域大多数调查点的健康状况处于“亚健康”或“一般”水平, 乌伦古河流域多数调查点的健康状况处于“健康”水平。水利工程、外来物种、过度捕捞是影响阿勒泰地区鱼类多样性的重要因素。未来应通过水利工程的联合调度、下泄合理生态流量、布设鱼类通道、规范养殖渔业、严控外来物种、本地土著鱼类的人工增殖放流, 以及合理的就地保护措施对阿勒泰地区的鱼类多样性加以保护, 提升水体健康程度。

关键词: 北冰洋水系; 淡水鱼类; 生物完整性指数; 河流健康; 中国

Species diversity of freshwater fish and assessment on watershed health in the Irtysh River and Ulungur River basins in Xinjiang, China

Xuejian Li^{1,2}, Peiyao Jia², Chengyi Niu², Yingchun Xing³, Haolin Li⁴, Haibo Liu², Wenqiao Tang^{1*}, Yahui Zhao^{2*}

1 College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306

2 Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

3 Chinese Academy of Fishery Sciences, Beijing 100039

4 Tianjin Natural History Museum, Tianjin 300201

Abstract: We conducted yearly field surveys between 2013 and 2016 in Altay Prefecture, Xinjiang Uygur Autonomous Region to understand the current status of fish species diversity and its change in the Irtysh River and the Ulungur River basins. The Margalef richness index, the Shannon-Wiener diversity index, and the Pielou evenness index were applied to assess the species diversity and temporal and spatial variation of freshwater fishes, based on the data collected from our field investigations, museum collection, and research literature. There were 23 native fish species distributed in the Irtysh River and the Ulungur River basins. And 19 of them were collected with 15 exotic species during our surveys. The fish fauna is dominated by cyprinid fishes. High proportions of endemic and endangered fish are distinct characteristics of fish composition in Altay Prefecture. Our results showed that the fish diversity in the basins was generally stable between 2013 and 2016. Species richness in the Irtysh River was higher than one in the Ulungur River. Additionally, the Fish

收稿日期: 2019-11-11; 接受日期: 2020-01-14

基金项目: 国家科技基础性工作专项(2013FY110300)和生态环境部生物多样性调查评估项目(2019HJ2096001006)

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: wqtang@shou.edu.cn; zhaoyh@ioz.ac.cn

Index of Biological Integrity (F-IBI) of 34 sampling sites indicated that the river health of most sites in the Irtysh River basin was at the “sub-health” or “general” level, while that of most ones in the Ulungu River basin was “healthy”. Water infrastructures, exotic species, and overexploitation of fish resources were key factors to influence freshwater fishes in the region. Aiming at the protection of fish biodiversity and improvement of river healthy, several ways should be applied in future including ecological scheduling of multi-scale coupling of reservoir group, construction of fish pass, scientific management of aquaculture to control the exotic species, artificial enhancement and releasing of endemic and endangered fish, and in situ conservation.

Key words: Arctic water system; freshwater fish; IBI; river health; China

阿勒泰地区位于新疆维吾尔自治区最北部,地处阿尔泰山南麓、准噶尔盆地北缘,西北与哈萨克斯坦、俄罗斯相连,东北与蒙古国接壤。额尔齐斯河和乌伦古河是阿勒泰地区的两条重要河流。额尔齐斯河发源于富蕴县境内的阿尔泰山,全长4,248 km,在中国境内长546 km,流域面积5.7万km²,年径流量约111亿m³,是阿勒泰地区最大的河流,也是新疆第二大河。额尔齐斯河是中国唯一一条流入北冰洋的河流,也是中国一条非常重要的国际河流(杜曼·木拉提汗和娜迪拉·木拉提汗, 2017),中国段包括克兰河、布尔津河、哈巴河、别列则克河等支流。乌伦古河发源于青河县境内阿尔泰山,全长821 km,流域面积6.14万km²,年径流量约10.7亿m³,是阿勒泰地区第二大河(努尔兰·哈再孜, 2014),也是中国一条非常重要的内陆河,并在尾闾处形成乌伦古湖。乌伦古湖可分为两部分,即大海子(布伦托海)和小海子(吉力湖),大海子属咸水湖,小海子则是淡水湖。额尔齐斯河和乌伦古河本为两个独立的水系,但由于在1986–1987年间兴建了“引额济海”工程,开凿了3 km的长渠,事实上现在乌伦古湖已成为额尔齐斯河的附属水体(刘建军, 2015)。

中国对于额尔齐斯河流域的鱼类区系组成和多样性的研究始于20世纪60年代。严安生(1964)报道了额尔齐斯河等地的鱼类14种。之后李思忠等(1966)发表了《新疆北部鱼类调查研究》,记录了额尔齐斯河流域的鱼类23种,是当时甚为完善的工作。中国科学院动物研究所等(1979)出版了《新疆鱼类志》,记录额尔齐斯河流域鱼类23种。张开翔(1991)发表了《乌伦古湖鱼类》。任慕莲等在1999–2001年间对额尔齐斯河考察的基础上发表了《中国额尔齐斯河鱼类资源及渔业》一书(任慕莲等, 2002b),书中不但对各个物种进行了描述,还增加了很多生物学方面的内容。郭焱等(2003)、阿达可

白克·可尔江(2005)、霍堂斌等(2010)等都不同程度地对额尔齐斯河流域的鱼类进行了资源调查,这些都为本项研究提供了重要的历史数据。

鱼类是水域生态系统中重要的组成部分,鱼类的多样性、时空变化等指标能在很大程度上反映水体健康程度的变化和水利设施建设等人类活动对鱼类资源的影响。阿勒泰地区蕴藏着丰富的鱼类资源,享有“塞外鱼乡”的美称。但近几十年来,随着该地区人口数量的不断增加,渔业捕捞更加频繁,加之大量水利设施修建及外来种入侵等因素,鱼类资源呈下降的趋势(孙玉英, 2013a)。因此作者于2013–2016年对阿勒泰地区额尔齐斯河和乌伦古河两大流域的鱼类多样性进行了逐年调查,同时结合历史数据,对鱼类多样性的现状和变化进行了分析,以为流域鱼类资源保护工作提供科学支持。

由于生物完整性指数(Index of Biotic Integrity, IBI)可定量描述人类干扰和生物特性之间的关系,间接反映干扰对生态系统的影响程度,以鱼类生物完整性指数(F-IBI)建立的评价体系可以较为准确地反映河流生态系统的健康状况(裴雪蛟等, 2010)。所以作者根据野外调查结果,构建了额尔齐斯河和乌伦古河的F-IBI评价体系,并进一步对河流健康做出评价,以为未来流域水生生态环境治理提供依据。

1 材料与方法

1.1 调查点

调查区域及各调查点分布如图1所示。调查河流除额尔齐斯河、乌伦古河干流外,还包括额尔齐斯河支流布尔津河、哈巴河、别列则克河和乌伦古河支流小青格里河等。根据调查流域内各河流域的不同水生生境,共设置34个调查点,其中额尔齐斯河流域有20个调查点,乌伦古河流域有14个调查点。

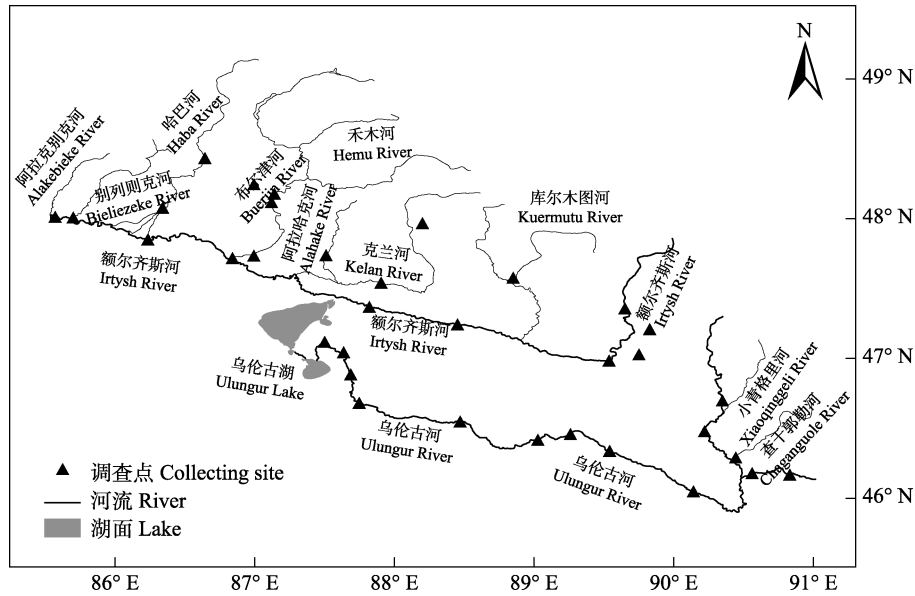


图1 额尔齐斯河流域和乌伦古河流域鱼类采集点分布图(2013–2016)

Fig. 1 Collecting sites of the Irtys River and Ulungur River basins between 2013 and 2016

1.2 鱼类标本采集

作者于2013–2016年连续4年对上述流域34个调查点进行了详细的野外鱼类采集工作,采集时间为夏季7–9月。根据调查水体和水生生境的具体情况选择合适的渔具和采集方式,在水流较缓的水域,采用围网、地笼、定置刺网等方法,在水流较湍急的水域采取手抄网、手撒网等方法收集鱼类样本。每个调查点的采集时间控制在30 min左右。采集过程中详细记录采集地点、时间和工具等信息,使用GPS记录采集点的经纬度和海拔。同时还进行了一定的市场收集,以补充鱼类标本。采集所得标本均使用10%甲醛溶液或95%以上酒精保存。

1.3 鱼类标本鉴定

鱼类标本带回实验室后置换至75%酒精中,标本固定后鉴定种类,获得种类组成和数量信息。标本全部保藏于中国科学院动物研究所国家动物博物馆鱼类标本分馆中。鱼类的鉴定和分类依据《新疆鱼类志》(中国科学院动物研究所等,1979)、《中国鲤科鱼类志》(伍献文,1981,1982)和《中国动物志》鱼类已出版各卷册(陈宜瑜,1998;乐佩琦,2000;伍汉霖和钟俊生,2008);鱼类有效名称及分类系统均依据《中国内陆鱼类物种与分布》(张春光和赵亚辉,2016)。

1.4 数据分析

多样性分析采用以下公式(马克平和刘玉明,

1994):

Margalef丰富度指数(D): $D = (S - 1)/\ln N$ 。公式中, S 为野外采集所得鱼类标本的种类总数, N 为野外采集所得鱼类标本总个体数。

Shannon-Wiener多样性指数(H'): $H' = -\sum P_i \ln P_i$ 。公式中, P_i 为第*i*种鱼类占鱼类总数的比例。

Pielou均匀度指数(E): $H_{\max} = \ln S$, $E = H'/H_{\max}$ 。公式中, H_{\max} 为群落最大多样性指数。

优势种的确定:将渔获物中单个物种个体数占渔获物总数10%以上的物种定为优势种(郁尧山等,1986)。

1.5 历史数据统计

鱼类历史研究资料主要有《新疆北部鱼类调查研究》(李思忠等,1966)、《新疆鱼类志》(中国科学院动物研究所等,1979)、《我国额尔齐斯河的鱼类及鱼类区系组成》(任慕莲等,2002a)、《额尔齐斯河中国段鱼类资源现状及合理开发》(阿达可白克·可尔江,2005)、《乌伦古湖鱼类资源现状及保护与开发对策》(阿达可白克·可尔江等,2006);历史鱼类标本均来自中国科学院动物研究所国家动物博物馆鱼类标本馆藏。

1.6 F-IBI体系的构建

1.6.1 参照点位选择

参照点位一般采用无人干扰的原始河段或利用历史数据(Barbour et al, 1996; Maxted et al,

2000; Blocksom et al, 2002; Morley & Karr, 2002), 但由于本次调查区域内无人干扰样点数量有限, 而历史数据又缺乏统一性, 再加上调查时间跨度较大, 因此选取采集时间较早、相对受人类干扰较小的2013年的调查数据作为参照。

1.6.2 生物指标筛选

根据本次鱼类调查采集工作的实际情况, 综合参考相关研究, 首先选取五大类型(物种组成、营养结构、耐受性、繁殖共位群、鱼类数量)共20个相关鱼类指标作为候选生物指标(附录1)。之后对候选的20个生物指标依次利用分布范围和判别能力进行优化和筛选。其中分布范围筛选剔除在90%以上的样点得分为0和标准差过大或过小的指标; 判别能力分析是比较参照点和观测点在25%–75%分位数范围内重叠的情况, 并进行生物判别能力(Interquartile, IQ)赋值。首先分别计算参照点和观测点的25%分位数、75%分位数、中位数, 之后判断两者之间的重叠情况, 如无重叠, 即参照点25%–75%分位数区间与观测点的无重叠情况, 则 $IQ = 3$; 部分重叠但双方中位数不在对方25%–75%分位数区间内, $IQ = 2$; 仅1个中位数在对方25%–75%分位数之内, $IQ = 1$; 都在对方之内, 则 $IQ = 0$ (裴雪姣等, 2010; 王军等, 2015)。

1.6.3 生物指标赋值

生物指标赋值采用由Karr (1981, 1993)提出的1、3、5赋值法, 将参照点和受损点内的同一生物指标排序并按大小进行三等分: 对于受干扰下降的生物指标, 最上部分赋值5分, 中间部分赋值3分, 而最下部分赋值1分; 对于受干扰而上升的生物指标, 最上部分赋值1分, 中间部分赋值3分, 最下部分赋值5分。

1.6.4 F-IBI评价标准的确立

根据已经求出的参照点的各点分值进行统计, 对于各生物指标, 以参照点得分的中位数为分界点, 中位数之上的评价为健康(即认为如果一个观测点的得分高于50%参照点的得分, 视其为健康); 中位数之下进行三等分, 评价分别为: 亚健康、一般、差。

2 结果

2.1 鱼类多样性

综合历史文献资料和馆藏标本统计, 阿勒泰地区额尔齐斯河流域和乌伦古河流域土著鱼类合计

23种, 隶属于7目9科19属(附录2)。其中鲤形目鱼类物种最多, 共有12种, 占研究流域鱼类物种总数的52%; 鲑形目鱼类次之, 共有4种; 鲟形目、鲈形目鱼类各有2种; 狗鱼目、鳊形目和鲇形目均只有1种。科级组成方面, 鲤科鱼类物种数最多, 共有8种; 鲑科鱼类有4种; 条鳅科鱼类有3种; 鲟科、鲈科有2种; 狗鱼科、花鳅科、江鳊科、杜父鱼科均只有1种。

2013–2016年本底调查共采集到鱼类标本6,989尾, 隶属于7目12科30属34种, 其中土著鱼类有6目8科16属19种。采集所得土著鱼类中, 鲤形目鱼类种类最多, 为12种, 占现有土著鱼类物种总数的63%; 其次是鲑形目和鲈形目, 各有2种; 狗鱼目、鳊形目和鲇形目各有1种。从科级水平看, 鲤科鱼类有8种; 条鳅科鱼类有3种; 鲈科、鲑科鱼类各有2种; 剩余各科均只有1种。本次调查共采集到外来鱼类15种, 隶属于3目7科15属。外来种中, 鲤形目占主要地位, 共有10种, 其中鲤科8种, 花鳅科2种; 鲈形目3种, 分别是属于鲈科鲈属的梭鲈(*Lucioperca lucioperca*)、属于沙塘鳢科小黄黝属(*Micropercops*)的小黄黝鱼(*Micropercops swinhonis*)和虾虎鱼科吻虾虎鱼属的褐吻虾虎鱼(*Rhinogobius brunneus*); 胡瓜鱼目2种, 分别是属于胡瓜鱼科公鱼属的池沼公鱼(*Hypomesus olidus*)和银鱼科大银鱼属的大银鱼(*Protosalanx hyalocranium*)。

2.2 优势种和多样性指数

整体来看, 2013和2016年采集到的鱼类物种数最多, 为23种, 2015年采集到的鱼类物种数最少, 仅有15种; 丰富度指数、多样性指数和均匀度指数的计算结果与区域鱼类物种数变化趋势基本相同, 最低值均出现在2015年, 丰富度指数为2.06, 多样性指数为1.68, 均匀度指数为0.62(表1)。

从两个流域比较来说, 额尔齐斯河流域历年采集物种数均超过乌伦古河, 其中2014年两流域物种数差距最大, 额尔齐斯河共有20种鱼类, 乌伦古河仅有8种。丰富度指数方面, 额尔齐斯河历年丰富度指数均超过乌伦古河, 其中额尔齐斯河2013年丰富度指数最高(3.42), 2015年最低(2.14); 乌伦古河2013年丰富度指数最高(3.08), 其余各年均较低且相差不大, 在1.53–1.63之间。多样性指数方面, 额尔齐斯河2015年多样性指数最低(1.75), 其余3年多样性指数接近, 在1.92–2.00之间; 乌伦古河流域2013年多样性指数最高(2.08), 2015年最低(1.32)。均

均匀度指数方面, 额尔齐斯河流域均匀度指数变化不大, 在0.63–0.67之间; 乌伦古河2014年均均匀度指数最高(0.88), 2015年最低(0.55) (表1)。

各流域鱼类优势种的统计结果如表2所示, 额尔齐斯河流域的优势种是尖鳍鮡(*Gobio acutipinnatus*)、阿勒泰鱈(*Phoxinus ujmonensis*)等。乌伦古河流域的优势种主要有贝加尔雅罗鱼(*Leuciscus baicalensis*)、北方须鳅(*Barbatula nuda*)等。

2.3 生物完整性评价结果

2.3.1 参数指标筛选结果

根据实地调查结果, 调查流域内两条河流及其支流均较浅, 难以区分中上层、中下层和底层鱼类, 所以对M7 (中上层鱼类物种数百分比)、M8 (中下层鱼类物种数百分比)、M9 (底层鱼类物种数百分比) 三项生物指标进行了剔除; M6 (鲈科鱼类物种数百分比)、M11 (植食性鱼类个体百分比)、M20 (麦穗鱼个体总数)因90%分值为0, 所以剔除, 而M18 (鱼类个体总数)因标准差过大而剔除, M15 (漂流性卵鱼类物种数百分比)因标准差过小而剔除。

将剩余的生物指标进行判别能力筛选, 额尔齐斯河和乌伦古河流域在参照点和观测点的各参数指标值如附录3所示。根据结果可筛选出生物指标, 因为额尔齐斯河没有生物判别能力(IQ) ≥ 2 的点, 所以将IQ = 1的生物指标作为核心生物指标, 即M3、M16、M17、M19共4个。而乌伦古河经过判别可筛选出M4、M5、M13、M14、M17、M19共6个核心生物指标。

2.3.2 鱼类完整性评价标准和评价结果

根据参数指标的筛选结果, 针对阿勒泰地区额

尔齐斯河和乌伦古河流域建立2套不同的F-IBI体系分别评价。将各项参数指标进行排序赋值后, 额尔齐斯河流域鱼类完整性评价标准为: 健康(≥ 14), 亚健康(10–13), 一般(5–9), 差(0–4); 乌伦古河流域鱼类完整性评价标准为: 健康(≥ 17), 亚健康(13–17), 一般(7–12), 差(0–6)。根据上述标准, 额尔齐斯河2014年的平均得分最高(11.2), 2个调查点评价为一般, 无较差点位; 2016年的平均得分最低(9.8), 11个调查点中有5个评价为一般或较差(表3)。乌伦古河流域2016年的平均得分最高(20.4), 9个调查点中8个点评价为健康, 1个调查点为亚健康; 2014年平均得分最低(19.2), 5个调查点中有3个评价为健康, 2个评价为亚健康或一般(表4)。

3 讨论

3.1 阿勒泰地区鱼类多样性现状

3.1.1 鱼类区系组成简单, 多样性较为稳定

根据标本鉴定的结果, 在阿勒泰地区额尔齐斯河水系和乌伦古河水系采集到的土著鱼类中鲤形目鱼类最多(12种), 从科级水平比较结果也显示鲤科鱼类为优势类群(8种)。在鲤科鱼类当中, 亚科的数量非常单调, 以雅罗鱼亚科的鱼类占据优势。

额尔齐斯河的鱼类以北方冷水性鱼类为代表, 充分反映了古北区北冰洋水系的鱼类区系特点, 代表性的种类有北鲑(*Stenodus leucichthys*)、江鳕(*Lota lota*)、北极茴鱼(*Thymallas arcticus*)、白斑狗鱼(*Esox lucius*)等。这些鱼类当中, 有西伯利亚分区的种类, 如北鲑、北极茴鱼、尖鳍鮡等, 还具有北欧分区的鱼类, 如丁鱈(*Tinca tinca*)、河鲈(*Perca fluviatilis*)、

表1 2013–2016年额尔齐斯河流域和乌伦古河流域的鱼类物种数、均匀度指数、丰富度指数和多样性指数

Table 1 Number of species, evenness index, species richness index and diversity index in the Irtysh River and Ulungur River basins between 2013 and 2016

	2013			2014			2015			2016		
	整体 Total	额尔齐斯河 Irtysh River	乌伦古河 Ulungur River	整体 Total	额尔齐斯河 Irtysh River	乌伦古河 Ulungur River	整体 Total	额尔齐斯河 Irtysh River	乌伦古河 Ulungur River	整体 Total	额尔齐斯河 Irtysh River	乌伦古河 Ulungur River
物种数 No. of species	23	22	18	20	20	8	15	14	11	23	21	13
均匀度指数 Evenness index	0.67	0.64	0.72	0.70	0.67	0.88	0.62	0.66	0.55	0.70	0.63	0.76
丰富度指数 Richness index	3.28	3.42	3.08	2.71	2.79	1.53	2.06	2.14	1.63	2.64	2.55	1.62
多样性指数 Diversity index	2.09	1.99	2.08	2.11	2.00	1.83	1.68	1.75	1.32	2.20	1.92	1.96

表2 2013–2016年额尔齐斯河流域和乌伦古河流域鱼类优势种统计

Table 2 Dominant species in the Irtysh River and Ulungur River basins between 2013 and 2016

优势种 Dominant species	2013			2014			2015			2016		
	整体 Total	额尔齐斯河 Irtysh River	乌伦古河 Ulungur River	整体 Total	额尔齐斯河 Irtysh River	乌伦古河 Ulungur River	整体 Total	额尔齐斯河 Irtysh River	乌伦古河 Ulungur River	整体 Total	额尔齐斯河 Irtysh River	乌伦古河 Ulungur River
尖鳍鮡 <i>Gobio acutipinnatus</i>	++++	++++	+++	+++	+++	+++	++++	++++	++++	++++	+++	++++
贝加尔雅罗鱼 <i>Leuciscus baicalensis</i>	+++	+++	++	+	+	+	+++	++	+++	+	+	++
阿勒泰鲢 <i>Phoxinus ujmonensis</i>	++	++	++++	++++	++++	+	++	+++	-	+++	++++	-
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i> *	++	++	+	+	+	-	+	+	++	++	+	+++
湖拟鲤 <i>Rutilus rutilus lacustris</i>	+	+	-	+	+	++++	-	-	-	+	+	-
北方须鲈 <i>Barbatula nuda</i>	+	+	+	+	+	++	-	-	-	++	++	++
东方欧鳊 <i>Abramis brama</i> *	+	+	+	+	+	-	+	+	-	+	++	-

++++ 第一优势种; +++ 第二优势种; ++ 优势种; + 出现; - 未出现; * 外来种。

++++ First dominant species; +++ Second dominant species; ++ Dominant species; + Present; - Absent; * Alien species.

表3 额尔齐斯河流域鱼类完整性评价结果

Table 3 Results of fish index of biological integrity in the Irtysh River Basin

点位编号 Point number	M3	M16	M17	M19	总分 Total score	平均分 Average score	评价结果 Evaluation results
2014-1	5	5	5	1	16	11.2	健康 Health
2014-2	1	3	3	5	12		亚健康 Subhealth
2014-3	5	1	1	5	12		亚健康 Subhealth
2014-4	3	1	3	3	10		亚健康 Subhealth
2014-5	3	5	3	1	12		亚健康 Subhealth
2014-6	3	1	1	1	6		一般 General
2014-7	3	3	3	3	12		亚健康 Subhealth
2014-8	3	1	1	3	8		一般 General
2014-9	1	3	1	5	10		亚健康 Subhealth
2014-10	3	3	3	5	14		健康 Health
2015-1	3	1	1	1	6	10.8	一般 General
2015-2	5	3	3	5	16		健康 Health
2015-3	1	5	3	5	14		健康 Health
2015-4	1	1	1	5	8		一般 General
2015-5	5	1	3	1	10		亚健康 Subhealth
2016-1	1	1	1	5	8	9.8	一般 General
2016-2	5	1	1	1	8		一般 General
2016-3	1	1	1	1	4		差 Poor
2016-4	1	3	3	1	8		一般 General
2016-5	1	5	5	3	14		健康 Health
2016-6	5	1	3	5	14		健康 Health
2016-7	5	1	1	1	8		一般 General
2016-8	3	1	1	5	10		亚健康 Subhealth
2016-9	1	1	3	5	10		亚健康 Subhealth
2016-10	3	1	3	5	12		亚健康 Subhealth

表4 乌伦古河流域鱼类完整性评价结果

Table 4 Results of fish index of biological integrity in the Ulungur River Basin

点位编号 Point number	M4	M5	M13	M14	M17	M19	总分 Total score	平均分 Average score	评价结果 Evaluation results
2014-1	5	5	3	3	5	5	26	19.2	健康 Health
2014-2	5	3	1	1	1	3	14		亚健康 Subhealth
2014-3	5	1	1	1	3	3	24		健康 Health
2014-4	3	1	1	1	5	1	12		一般 General
2014-5	1	3	5	5	3	3	20		健康 Health
2015-1	5	5	1	1	1	1	14	20	亚健康 Subhealth
2015-2	3	1	5	5	1	5	20		健康 Health
2015-3	1	1	5	5	3	5	20		健康 Health
2015-4	5	1	5	5	5	1	22		健康 Health
2015-5	1	3	5	5	5	5	24		健康 Health
2016-1	5	5	1	1	3	5	20	20.4	健康 Health
2016-2	5	5	1	1	1	3	16		亚健康 Subhealth
2016-3	5	5	1	1	1	5	18		健康 Health
2016-4	1	3	5	5	5	5	24		健康 Health
2016-5	3	5	1	1	3	5	18		健康 Health
2016-6	5	5	1	1	1	5	18		健康 Health
2016-7	5	5	1	1	3	5	20		健康 Health
2016-8	1	3	5	5	3	5	22		健康 Health
2016-9	3	5	5	5	5	5	28		健康 Health

高体雅罗鱼(*Leuciscus idus*)等,甚至还有一些青藏高原区的种类,如新疆高原鳅(*Triplophysa strauchii*)和小体高原鳅(*T. minuta*)。其中很多种类在我国只分布在额尔齐斯河流域。

同历史数据相比较,2013–2016年的调查结果显示有4种土著鱼类没有采集到,分别是西伯利亚鲟(*Acipenser baeri*)、小体鲟(*A. ruthenus*)、北鲑和细鳞鲑(*Brachymystax lenok*) (附录2)。前3种鱼类在流域内已经多年不见(中国科学院动物研究所等,1979;霍堂斌等,2010),细鳞鲑则在我们连续4年的调查中未有发现。在调查期间,整体鱼类多样性变化不大。物种数方面,除去2015年鱼类物种数(15种)较少之外,其余各年均均在20种左右。鱼类多样性指数、均匀度指数和丰富度指数的变化规律与鱼类物种数的变化相似。综上分析可知,阿勒泰地区鱼类物种数较少,多样性现状较稳定。

3.1.2 额尔齐斯河鱼类多样性高于乌伦古河

鱼类物种数和丰富度指数可以直观地反映流域内鱼类多样性的程度。根据历年鱼类调查结果,额尔齐斯河鱼类物种数均高于乌伦古河,丰富度指

数也高于乌伦古河。一般来说,水生生境的异质性程度可影响鱼类的物种数和丰富度,生境异质性程度高则物种数和丰富度也较高。额尔齐斯河流域面积广,流经地区多,水生生境复杂,而乌伦古河作为内陆河流无论从河流长度还是径流量各方面均低于额尔齐斯河,且径流量呈逐年下降的趋势(杨霞,2015)。另一方面水生生境的稳定程度也是影响鱼类物种数和丰富度的原因之一。鱼类生存繁殖依赖于稳定的生境,乌伦古河流经区域人类活动较为频繁且出现过断流的情况,而额尔齐斯河流经区域多为边境地区,人烟稀少,流域内又有阿勒泰科克苏湿地国家级自然保护区等,受保护程度较高,相应的生境稳定程度也较高。

均匀度指数可以反映群落中每个物种分类的均匀程度。从计算结果来看,额尔齐斯河在物种数和丰富度指数均显著高于乌伦古河的情况下,其均匀度指数却较低,原因可能是少数鱼类资源量大,数量占比大,成为该河流的优势种。根据流域优势种的统计结果(表2),额尔齐斯河流域的优势种尖鳍鲟、阿勒泰鲃等每年的标本采集数量均占到采集标

本总数的20%以上,其中2014年阿勒泰鱈的标本量接近标本总数的40%;相应的乌伦古河流域的优势种如贝加尔雅罗鱼、北方须鳅等,其总数均不超过采集鱼类总数的20%,优势种的优势程度相对于额尔齐斯河流域来说并不明显,因而导致乌伦古河鱼类均匀度较高。

3.1.3 特有种和珍稀种占比高

根据鱼类物种的鉴定和历史资料梳理的结果来看,阿勒泰地区额尔齐斯河和乌伦古河流域是部分物种在中国境内的唯一自然分布区域,如粘鲈(*Acerina cernua*)、丁鱈、白斑狗鱼等,此外还有额尔齐斯河流域特有种2种,分别是阿勒泰杜父鱼(*Cottus sibiricus altaicus*)和阿勒泰鱈。

额尔齐斯河和乌伦古河流域有珍稀濒危鱼类8种(表5),隶属于4目4科7属。其中根据IUCN红色名录的评估结果,这些鱼类当中野外灭绝(EW) 1种、濒危(EN) 1种、易危(VU) 2种;根据2016年《中国脊椎动物红色名录》的评估结果(蒋志刚等, 2016),这些鱼类当中极危(CR) 1种、濒危(EN) 2种、易危(VU) 3种;此外,列入《新疆维吾尔自治区水生野生动物保护名录》的5种,占到该保护名录的36%;列入新修订的《国家野生动物保护名录(征求意见稿)》的物种有5种。这些珍稀濒危种类合计8种,占该地区土著鱼类总数(23种)的35%;占新疆受威胁鱼类总数(17种)的47%。流域内珍稀濒危物种的比例甚至高于中国的一些主要江河(曹亮等, 2016),说明阿勒泰地区鱼类的保护在新疆乃至全国都有重要的意义。

3.1.4 外来种占比高

调查结果显示,阿勒泰地区额尔齐斯河和乌伦

古河流域鱼类外来种共计15种,隶属于3目7科15属(附录2),阿勒泰地区外来种鱼类多由于养殖原因主动引入或混杂在养殖鱼苗中进入天然水体而自然繁殖,其原产地大部分来自于中国东部地区,如鲤(*Cyprinus carpio*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)、泥鳅(*Misgurnus anguillicaudatus*)等,少部分来自于里海等水系,如东方欧鳊(*Abramis brama*)、梭鲈等。

此外,结合历史资料可以看出,阿勒泰地区外来鱼类的数量也处在逐渐增多的过程中。20世纪60年代,外来物种仅记录有鲤和东方欧鳊(李思忠等, 1966);而到2010年前的调查显示,外来鱼类的数量为11种(霍堂斌等, 2010);而我们连续多年的调查使得记录的外来鱼类数量更是达到了15种。目前阿勒泰地区的外来物种数量至少已经占到土著鱼类总数的65%,这一比例显著高于中国其他主要江河。

3.2 F-IBI体系评价分析

根据F-IBI体系对额尔齐斯河和乌伦古河流域水体健康程度的评价分析结果,乌伦古河流域水体健康程度较高,且平均得分呈逐年上升趋势;而额尔齐斯河流域水体健康程度一般,多处调查点被评价为亚健康或一般水平,平均得分也呈逐年下降的趋势。结合鱼类多样性的研究结果,额尔齐斯河流域鱼类物种数多且多样性较高,鱼类生境复杂,而其水体的健康程度却呈逐年下降的趋势,因而相对于乌伦古河来说,更应加强对额尔齐斯河流域的生境保护。

王军等(2015)曾基于大型底栖动物完整性指数对额尔齐斯河进行健康评价,尽管与我们依据的指标动物和评价等级均有所不同,但仍可以反映出一

表5 额尔齐斯河和乌伦古河流域珍稀保护鱼类名录

Table 5 Endangered and protected fish in the Irtysh River and Ulungur River basins

物种 Species	IUCN红色名录 IUCN Red List	中国脊椎动物红色名录 Red List of China's Vertebrates	国家重点保护野生 动物名录(征求意见稿) WASPC	新疆重点保护水生 野生动物名录 AWSPX
西伯利亚鲟 <i>Acipenser baerii</i> *	濒危 Endangered	濒危 Endangered	II级	I级
小体鲟 <i>Acipenser ruthenus</i> *	易危 Vulnerable	极危 Critically Endangered	II级	I级
哲罗鲑 <i>Hucho taimen</i>	易危 Vulnerable	易危 Vulnerable		
细鳞鲑 <i>Brachymystax lenok</i> *		濒危 Endangered	II级	
北鲑 <i>Stenodus leucichthys</i> *	野外灭绝 Extinct in the Wild		II级	
北极茴鱼 <i>Thymallus arcticus</i>	无危 Least Concern	易危 Vulnerable	II级	II级
高体雅罗鱼 <i>Leuciscus idus</i>				II级
阿勒泰杜父鱼 <i>Cottus sibiricus altaicus</i>		易危 Vulnerable		II级

* 本次野外调查未采集到的鱼类物种 * Uncollected fish species in this survey; WASPC: Wild Animals under Special State Protection in China; AWSPX: Aquatic Wildlife under Special State Protection in Xinjiang.

些一致的趋势。本项研究中通过F-IBI指数评价的结果显示, 额尔齐斯河中, 评价为一般(不含)等级以上的位点在2014、2015、2016三年间所占比重分别为80%、60%和55%, 总体显示额尔齐斯河流域水体在健康和亚健康之间(表3)。王军等(2015)对额尔齐斯河2012–2013年间水体健康的评价结果显示, 一般(不含)等级以上的位点占比为60%, 与我们的评价结果类似。本项研究同时还显示出, 额尔齐斯河的水体健康状况有逐年下降的趋势, 应该引起有关方面的高度重视。

底栖动物是鱼类的重要饵料来源, 在水体生态系统中和鱼类的关系最为密切, 未来应进一步将底栖动物和鱼类结合起来, 引入食物链关系, 进行IBI联合评价, 使得评价结果更能反映水体的健康程度, 为流域环境保护提供依据。同时还应建立固定监测网络进行长期跟踪, 反映水环境治理的效果。

3.3 影响阿勒泰地区鱼类多样性变化的因素

3.3.1 水利水电工程的建设

受到当地经济社会迅猛发展的影响, 目前阿勒泰地区流域水资源综合利用矛盾突出, 农业用水需求量大, 占到额尔齐斯河水资源利用总量的90%, 因此在额尔齐斯河已建山区、平原水利工程达40多处, 包括7座骨干水库、25座生态闸和7条牧业大渠(邓铭江等, 2017), 如位于额尔齐斯河上游干流的可可托海水电站、位于乌伦古河中游的萨尔铁列克电站、富蕴峡口水电站等。在7座骨干水库中包括大型水库2座、大型II型水库4座、中型水库1座(姜旭新等, 2019)。水利水电工程的建设直接导致了水生境的变化, 对栖居于其中的鱼类产生了诸多不利影响。水坝的存在打断了河流的纵向连通性, 阻隔了一些洄游鱼类的通道。例如北鲑曾经分布于额尔齐斯河布尔津以下河段, 在20世纪60年代还是额尔齐斯河的主要捕捞对象(李思忠等, 1966), 但受到哈萨克斯坦20世纪70年代以后修建的波赫塔尔明斯柯水电站、舒列宾斯克水电站(水库)等水利设施的影响, 该鱼不能上溯到中国境内产卵, 因此北鲑已在中国境内消失(郭焱等, 2003), 成为中国区域灭绝物种(曹亮等, 2016)。

有限水资源的过度利用, 加之“引额济海”工程引水以及各水库的水量调节, 使得额尔齐斯河不同河段经常发生断流现象。事实上, 额尔齐斯河中国段下游近年来所面临的重大生态问题就是河道断

流(努尔兰·加列力, 2017)。河道断流、或是主河道水量急剧减少, 水面缩小, 影响了河道两侧的苇塘、沼泽、坑洼等适宜中小型鱼类繁衍的微生境(阿达可白克·可尔江, 2005)。如果断流发生在鱼类繁殖季节, 更将对鱼类的生存繁衍产生不利影响。

水电站建设的另一直接的环境影响就是改变了水体形态, 使得原先流动的河流形态转变为几近静止的水库–湖泊形态, 因此使得那些适合急流生活的种类(如细鳞鲑)逐渐退出原水体, 而一些适合静水生活的种类(在当地主要是一些外来物种)得到了更好发展。而一系列水库群的存在, 也使得现存的流水河段间断而不连续, 这样一些产漂流性卵的鱼类如湖拟鲤(*Rutilus rutilus lacustris*)等则会因流速和流程不够而不能完成生活史。

3.3.2 外来种的影响

早在20世纪30年代, 前苏联为发展斋桑泊渔业, 向额尔齐斯河移殖了鲤, 鲤于50年代出现在中国境内; 20世纪60年代初前苏联又相继引入了东方欧鳊和梭鲈, 自此东方欧鳊逐渐成为额尔齐斯河最主要的捕捞鱼类之一(郭焱等, 2003)。之后又陆续向阿勒泰地区的自然水体引入鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)、草鱼等。1991年, 池沼公鱼被引入了吉力湖, 至1999年, 产量达到1,800 t, 占乌伦古湖和吉力湖总产量的60.4% (郭焱等, 2003)。

外来鱼类对土著鱼类多样性的影响不容忽视, 大量外来鱼类的生存与繁殖挤压了土著鱼类的生存空间, 造成土著鱼类物种数和资源量减少甚至消失。在阿勒泰地区的大部分外来鱼类已经稳定繁殖, 形成了相当大的种群规模。例如20世纪50年代额尔齐斯河的渔获物中以湖拟鲤和白斑狗鱼为主(李思忠等, 1966), 到60年代逐渐演变为以鲤和东方欧鳊为主(中国科学院动物研究所等, 1979)。而在我们调查中, 一些调查点的优势类群则是以小型的麦穗鱼(*Pseudorasbora parva*)等为主。当前外来鱼类已经对土著鱼类的种群数量产生了较大的影响, 是威胁阿勒泰地区鱼类多样性的重要因素。此外, 额尔齐斯河流域中还存在湖拟鲤和东方欧鳊的自然杂交种, 可见外来鱼类在生态和遗传上都对本地土著鱼类产生了多方面的影响。

3.3.3 渔业活动

额尔齐斯河和乌伦古河(湖)是新疆传统的渔业

产区, 20世纪50年代以后, 分别成立了哈巴河渔场和阿勒泰盐池渔场从事捕鱼生产。1960–1968年间, 渔业产量在年产200–300 t之间波动; 随后进入较快上升期, 到1971年达到了464 t, 并在1982年达到了峰值500 t。之后尽管有很多其他地区的渔民来此作业, 捕捞量持续增大, 但由于有限的野生鱼类资源, 渔业产量经历剧烈波动后, 在1994年后迅速下滑, 由1994年的438 t降到1999年的138 t (任慕莲等, 2002b)。近年来年产量更是下降到100 t以下, 甚至远低于20世纪60年代初期。无论采取什么措施, 产量都不能得到提高, 说明整个渔业正处于崩溃状态。持续高强度的捕捞压力造成重要中大型经济鱼类如白斑狗鱼、河鲈等资源严重受损, 鱼类多样性和种群数量也随之降低且个体整体小型化。此外养殖渔业的发展以及湖泊的增殖放流活动, 使得外来鱼类通过直接引入或是间接逃逸进入自然水体, 进一步加剧了外来物种对土著鱼类的不利影响。

3.4 保护建议

额尔齐斯河和乌伦古河均为阿勒泰地区的重要河流, 额尔齐斯河还是中国主要国际河流之一, 在当前全球化的趋势下, 维护国际河流中国段的河流健康对整个额尔齐斯河流域的合作管理和资源共享、维护生物多样性的稳定和促进水生生态环境的可持续发展均有重要意义。因此基于本次研究, 提出以下保护建议。

(1) 优化水库调度、建设过鱼设施

目前研究显示, 受水利工程建设等因素的综合影响, 额尔齐斯河流域河谷生态系统整体水文情势已达到中度改变(姜旭新等, 2019)。然而随着天山北坡经济带的发展, 水资源利用压力持续增大, 在这样的背景下, 大规模改变水利工程布局、拆除现有一些水坝等都是不现实的, 因此科学合理地进行水库/水利设施的联合调度, 将可在一定程度上降低水利工程给水生生态带来的不利影响。

首先应根据水生生物(特别是鱼类)的生态需求制定流域(如额尔齐斯河)水库群联合调度规划; 根据河流自然状态下丰水期、平水期和枯水期的历史水量规律, 结合鱼类空间活动需求和繁殖条件需求(水量、流速、水温等往往是鱼类性腺发育和产卵繁殖的信号), 计算合理的生态流量, 在河段不断流的前提下重点保障鱼类繁殖期(当地约为4–6月间)的水量需求。同时通过水库间的联合调度, 将高、低

流量脉冲发生次数控制在合理范围内, 避免影响鱼类等水生生物的正常生命周期(姜旭新等, 2019)。

已建大型水坝如位于额尔齐斯河上游干流的可可托海水电站、位于布尔津河上游干流的冲乎尔水电站等可以采取修建过鱼设施的方式, 恢复大坝上下鱼类种群间的沟通。过鱼设施的选择要因地制宜, 根据过鱼对象的生态学和生物学习性决定。在地形条件允许的情况下, 仿自然的旁路式鱼道应该是首要考虑的选项。

此外, 新建(拟建)水利设施一定要做好环境影响评价工作, 将鱼类保护作为一个重要前提, 切实落实规划的水生生态影响减免措施, 将水利设施建设对鱼类的影响降到最低。只有水生生物多样性得到长久的维持和提高, 才是水体(河流)健康得到提升的重要标志。

(2) 合理发展渔业、控制外来物种

渔业是阿勒泰地区的重要经济产业之一, 但近年来由于过度捕捞的原因, 鱼类多样性和资源量呈严重的下降趋势。建议设置完善休渔禁渔制度, 控制渔业作业时间和规模。当前该区域已颁布《伊犁哈萨克自治州伊犁河、额尔齐斯河渔业资源保护条例》, 规定每年4月1日至6月30日为额尔齐斯河禁渔期(孙玉英, 2013b)。禁渔期制度可在全流域进行推广, 已建立禁渔期制度的在原有基础上应适当提前禁渔开始时间, 以避免生殖洄游鱼类如北极茴鱼、江鳕等的洄游产卵高峰期。

推进鱼类养殖业的发展, 通过养殖手段可减少对流域内野生鱼类的影响, 实现渔业的可持续发展(杨君兴等, 2013)。养殖鱼类的选择应以本地具有高附加值的土著鱼类为主, 不能盲目引种。养殖过程应该做好防逃防漏工作, 同时保证养殖废水不向自然水体直接排放。当前阿勒泰地区已成功研发地方经济种白斑狗鱼、河鲈、江鳕等的人工养殖技术(武菲等, 2016; 李胜, 2016)。此外, 在流域内水库数量较多的背景下, 应严格控制或禁止水库网箱养殖, 以免破坏水体的自我净化功能, 甚至诱发水体富营养化污染整片水域(卢春娇和陈君, 2013)。

(3) 进行合理增殖放流

增殖放流可以补充鱼类资源种群与数量, 改善因过度捕捞或水利工程建设等遭受破坏的水生生态环境, 延续濒危珍稀鱼类种群, 保持鱼类生物多样性(杨君兴等, 2013)。针对阿勒泰地区鱼类多样性

的现状,增殖放流工作应逐步从经济鱼类的增殖向珍稀濒危鱼类种群的恢复转变。鼓励周边养殖企业以本地土著鱼类(特别是一些经济价值有限的种类)为亲本进行人工繁育,作为土著鱼类增殖放流种苗的来源。在增殖放流过程中应针对不同水域特性,科学规划放流鱼类的品种和数量,严防引发外来物种入侵问题。当前流域内增殖放流主要集中在乌伦古湖和额尔齐斯河干流,其中由福海县成立的水生野生动物救护中心每年可向乌伦古湖投放约一千万尾土著鱼苗(孙玉英, 2013b), 2018年新疆在包括额尔齐斯河在内的3条河流放流8万尾高体雅罗鱼,并首次对放流苗种开展标记工作(刘鸿等, 2019)。当地渔业相关部门应借鉴相关经验,以保护土著鱼类、发展当地特色渔业资源为导向,加强种质资源监测,积极开展以阿勒泰杜父鱼、河鲈、粘鲈等当地土著和经济鱼类为主的全流域的增殖放流工作。此外还应做好人工增殖放流效果评价,监测放流种群的存活情况和放流工作对野外种群的恢复效果。

(4)建立鱼类自然保护区

鱼类自然保护区可以优化水生生态环境,缓解鱼类资源衰退,减少人类活动对鱼类及其生境的影响。自然保护区应选择在鱼类资源较丰富,多样性较高且水生生态环境较好的地区。在阿勒泰地区,对鱼类多样性进行就地保护的方式有两条途径:一是依托现有的以保护其他野生动物为主的保护区,扩大保护范围来实现。例如乌伦古河流域上游支流布尔根河已建立有布尔根河狸国家级自然保护区,建议将分布于保护区河流内的湖拟鲤、贝加尔雅罗鱼等鱼类纳入保护对象。二是在自然和社会条件允许的前提下,选择适当区域建设以保护阿勒泰地区特有珍稀濒危鱼类为主要目的的水生野生动物保护区。根据我们的调查结果,可以考虑在鱼类多样性较高的额尔齐斯河上游富蕴县境内的可可托海镇至富蕴县城河段建立鱼类自然保护区。

致谢: 国家动物博物馆鱼类标本分馆曹焕喜博士、孟小伟先生在标本检视过程中提供了很大支持与帮助,在此一并致谢。

参考文献

Adakbek K (2005) Fish resources and development strategy in the China's section of the River Eerqisi. *Reservoir Fisheries*,

25(1), 48–50, 52. (in Chinese with English abstract) [阿达可白克·可尔江 (2005) 额尔齐斯河中国段鱼类资源现状及合理开发. *水利渔业*, 25(1), 48–50, 52.]

Adakbek K, Su DX, Yang Y, Ye SM, Huderat (2006) The current situation and the countermeasures of protection and development of fish resources in Ulungur Lake. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 15, 309–314. (in Chinese with English abstract) [阿达可白克·可尔江, 苏德学, 杨艳, 叶尚明, 呼德拉提 (2006) 乌伦古湖鱼类资源现状及保护与开发对策. *上海水产大学学报*, 15, 309–314.]

Barbour MT, Gerritsen J, Griffith GE (1996) A framework for biological criteria for Florida streams using benthic macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society*, 15, 185–211.

Blocksom KA, Kurtenbach JP, Klemm DJ (2002) Development and evaluation of the lake macroinvertebrate integrity index (LM II) for New Jersey lakes and reservoirs. *Environmental Monitoring and Assessment*, 77, 311–333.

Cao L, Zhang E, Zang CX, Cao WX (2016) Evaluating the status of China's continental fish and analyzing their causes of endangerment through the red list assessment. *Biodiversity Science*, 24, 598–609. (in Chinese with English abstract) [曹亮, 张鹏, 臧春鑫, 曹文宣 (2016) 通过红色名录评估研究中国内陆鱼类受威胁现状及其成因. *生物多样性*, 24, 598–609.]

Chen YY (1998) *Fauna Sinica, Osteichthyes, Cypriniformes II*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [陈宜瑜 (1998) 中国动物志硬骨鱼纲鲤形目(中卷). 科学出版社, 北京.]

Deng MJ, Huang Q, Zhang Y, Zhang LP (2017) Study on ecological scheduling of multi-scale coupling of reservoir group. *Journal of Hydraulic Engineering*, 48, 1387–1398. (in Chinese with English abstract) [邓铭江, 黄强, 张岩, 张连鹏 (2017) 额尔齐斯河水库群多尺度耦合的生态调度研究. *水利学报*, 48, 1387–1398.]

Duman M, Nadila M (2017) Analysis of the spatial and temporal variation characteristics of hydrometeorological elements in Irtysh River Basin. *Energy and Energy Conservation*, (3), 119–120, 126. (in Chinese with English abstract) [杜曼·木拉提汗, 娜迪拉·木拉提汗 (2017) 额尔齐斯河流域水文气象要素时空变化特征分析. *能源与节能*, (3), 119–120, 126.]

Guo Y, Zhang RM, Li H (2003) Degeneration causes of the aboriginal fishes and some measures for protecting them in the Ergis River, Xinjiang, China. *Arid Zone Research*, 20, 152–155. (in Chinese with English abstract) [郭焱, 张人铭, 李红 (2003) 额尔齐斯河土著鱼类资源衰退原因与保护措施. *干旱区研究*, 20, 152–155.]

Huo TB, Jiang ZF, Kargan A, Ma B, Zhang LR, Tang FJ, Cai LG, Liu LZ (2010) Status of fish distribution and species diversity in Ertix River Basin in China. *Journal of Hydroecology*, 3(4), 16–22. (in Chinese with English abstract) [霍堂斌, 姜作发, 阿达可白克·可尔江, 马波, 张荣荣, 唐富

- 江, 蔡林钢, 刘立志 (2010) 额尔齐斯河流域(中国境内) 鱼类分布及物种多样性现状研究. 水生态学杂志, 3(4), 16–22.]
- Institute of Zoology of the Chinese Academy of Sciences, Xinjiang Institute of Biological Desert Research of Chinese Academy of Sciences, Bureau of Fisheries of Xinjiang Uygur Autonomous Region (1979) Fishes of Xinjiang. Xinjiang People's Press, Urumqi. (in Chinese) [中国科学院动物研究所, 中国科学院新疆生物沙漠研究所, 新疆维吾尔自治区水产局 (1979) 新疆鱼类志. 新疆人民出版社, 乌鲁木齐.]
- Jiang XX, Huang J, Zhang Y, Li JQ (2019) Impact analysis of hydrological regime changes in Irtysh River Basin valley ecosystem and suggestions for ecological restoration. *China Rural Water and Hydropower*, (10), 12–16. (in Chinese with English abstract) [姜旭新, 黄婧, 张岩, 李继清 (2019) 额尔齐斯河流域河谷生态系统水文情势变化影响分析及生态修复建议. 中国农村水利水电, (10), 12–16.]
- Jiang ZG, Jiang JP, Wang YZ, Zhang E, Zhang YY, Li LL, Xie F, Cai B, Cao L, Zheng GM, Dong L, Zhang ZW, Ding P, Luo ZH, Ding CQ, Ma ZJ, Tang SH, Cao WX, Li CW, Hu HJ, Ma Y, Wu Y, Wang YX, Zhou KY, Liu SY, Chen YY, Li JT, Feng ZJ, Wang Y, Wang B, Li C, Song XL, Cai L, Zang CX, Zeng Y, Meng ZB, Fang HX, Ping XG (2016) Red List of China's Vertebrates. *Biodiversity Science*, 24, 500–551. (in Chinese and in English) [蒋志刚, 江建平, 王跃招, 张鹏, 张雁云, 李立立, 谢锋, 蔡波, 曹亮, 郑光美, 董路, 张正旺, 丁平, 罗振华, 丁长青, 马志军, 汤宋华, 曹文宣, 李春旺, 胡慧建, 马勇, 吴毅, 王应祥, 周开亚, 刘少英, 陈跃英, 李家堂, 冯祚建, 王燕, 王斌, 李成, 宋雪琳, 蔡蕾, 臧春鑫, 曾岩, 孟智斌, 方红霞, 平晓鸽 (2016) 中国脊椎动物红色名录. 生物多样性, 24, 500–551.]
- Karr JR (1981) Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries*, 6, 21–27.
- Karr JR (1993) Defining and assessing ecological integrity: Beyond water quality. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 12, 1521–1531.
- Le PQ (2000) *Fauna Sinica, Osteichthyes, Cypriniformes III*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [乐佩琦 (2000) 中国动物志硬骨鱼纲鲤形目(下卷). 科学出版社, 北京.]
- Li JM (2006) Causes and countermeasures for the decline of fish resources in the Irtysh River Basin in China. *China Fisheries*, (9), 76–78. (in Chinese) [李尽梅 (2006) 我国额尔齐斯河流域鱼类资源衰退的原因与对策. 中国水产, (9), 76–78.]
- Li S (2016) Artificial propagation technique and under blood release test of Irtysh River. *China Agricultural Information*, (4), 130. (in Chinese) [李胜 (2016) 额尔齐斯河江鳕的人工繁殖技术及冰下放流试验. 中国农业信息, (4), 130.]
- Li SZ, Dai DY, Zhang SY, Ma GZ, He ZW, Gao SD (1966) Notes on a collection of fishes from North Sinkiang, China. *Acta Zoologica Sinica*, 18, 41–56. (in Chinese with English abstract) [李思忠, 戴定远, 张世义, 马桂珍, 何振威, 高顺典 (1966) 新疆北部鱼类的调查研究. 动物学报, 18, 41–56.]
- Liu H, Niu JG, Shi CM, Zhang T, Jiao F, He JT, Wang S, Hu JW, Song MBo, Cai LG, Zhang RM (2019) Status of mark-recapture of indigenous fish in Xinjiang Uygur Autonomous Region. *Tianjin Agricultural Sciences*, 25(7), 56–60. [刘鸿, 牛建功, 时春明, 张涛, 焦飞, 贺疆滔, 王松, 胡江伟, 宋明波, 蔡林钢, 张人铭 (2019) 新疆维吾尔自治区土著鱼类标记放流现状. 天津农业科学, 25(7), 56–60.]
- Liu JJ (2015) Analysis on the water amount flowing into Ulungur Lake. *Energy and Energy Conservation*, (5), 103–105. (in Chinese with English abstract) [刘建军 (2015) 乌伦古湖入湖水量分析. 能源与节能, (5), 103–105.]
- Lu CJ, Chen J (2013) Analysis on the influence of freshwater net cage fish culture on water environment and countermeasures. *Agriculture and Technology*, 33(8), 153. (in Chinese) [卢春娇, 陈君 (2013) 浅析淡水网箱养鱼对水环境的影响及对策. 农业与技术, 33(8), 153.]
- Ma KP, Liu YM (1994) Measurement of biotic community diversity. I. α diversity (part 2). *Chinese Biodiversity*, 2, 231–239. (in Chinese) [马克平, 刘玉明 (1994) 生物群落多样性的测度方法. I. α 多样性的测度方法(下). 生物多样性, 2, 231–239.]
- Maxted JR, Barbour MT, Gerritsen J (2000) Assessment framework for mid-Atlantic coastal plain streams using benthic macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society*, 19, 128–144.
- Morley SA, Karr JR (2002) Assessing and restoring the health of urban streams in the Puget Sound Basin. *Conservation Biology*, 16, 1498–1509.
- Nuerlan J (2017) The influence of operation mode of reservoir on water environment in the downstream of Irtysh River. *Energy and Energy Conservation*, (6), 101–102, 133. (in Chinese with English abstract) [努尔兰·加列力 (2017) 水库运行模式对额尔齐斯河下游水环境的影响. 能源与节能, (6), 101–102, 133]
- Nurlan H (2014) Hydrological characteristics in the Ulungur River Basin. *Arid Zone Research*, 31, 798–802. (in Chinese with English abstract) [努尔兰·哈再孜 (2014) 乌伦古河流域水文特征. 干旱区研究, 31, 798–802.]
- Pei XJ, Niu CJ, Gao X, Xu C (2010) The ecological health assessment of Liao River Basin, China, based on biotic integrity index of fish. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 5736–5746. (in Chinese with English abstract) [裴雪姣, 牛翠娟, 高欣, 徐琛 (2010) 应用鱼类完整性评价体系评价辽河流域健康. 生态学报, 30, 5736–5746.]
- Ren ML, Guo Y, Zhang RM, Cai LG, Adak, Li H, Fu YL, Liu KL (2002a) Fishes and fish fauna composition in Ergis River, China. *Arid Zone Research*, 19, 62–66. (in Chinese

- with English abstract) [任慕莲, 郭焱, 张人铭, 蔡林刚, 阿达克, 李红, 付雅丽, 刘昆仑 (2002a) 我国额尔齐斯河鱼类及鱼类区系组成. 干旱区研究, 19, 62–66.]
- Ren ML, Guo Y, Zhang RM, Zhang XS, Cai LG, Li H, Adak, Fu YL, Liu KL, Deng GZ (2002b) Fish Resources and Fisheries of Irtysh River, China. Xinjiang Science and Technology Health Press, Urumqi. (in Chinese) [任慕莲, 郭焱, 张人铭, 张秀善, 蔡林刚, 李红, 阿达克, 付亚丽, 刘昆仑, 邓贵忠 (2002b) 中国额尔齐斯河鱼类资源及渔业. 新疆科技卫生出版社, 乌鲁木齐.]
- Sun YY (2013a) Investigation on the current status of fish in the Altay region. *China Agriculture Information*, (15), 144. (in Chinese) [孙玉英 (2013a) 阿勒泰地区鱼类生存现状调查研究. 中国农业信息, (15), 144.]
- Sun YY (2013b) Survey of wild fish resources in the Altay region. *Agriculture & Technology*, 33(8), 164. (in Chinese) [孙玉英 (2013b) 阿勒泰地区野生鱼类资源调查. 农业与技术, 33(8), 164.]
- Wang J, Zhou Q, Xie CX, Li H, Adakbek K, Cai LG (2015) Health assessment of Irtysh River in Xinjiang Uygur Autonomous Region, northwest China, based on benthic-index of biotic integrity (B-IBI). *Research of Environmental Sciences*, 28, 959–966. (in Chinese with English abstract) [王军, 周琼, 谢从新, 李红, 阿达可白克·可尔江, 蔡林刚 (2015) 基于大型底栖动物完整性指数的新疆额尔齐斯河健康评价. 环境科学研究, 28, 959–966.]
- Wu F, Hu WG, Wang CH, Guo Y, Mo C (2016) Genetic diversity of the cultivated and natural *Perca fluviatilis*. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 40, 181–188. (in Chinese with English abstract) [武菲, 胡文革, 王翠华, 郭颀, 莫超 (2016) 河鲈养殖与野生群体遗传多样性比较分析. 水生生物学报, 40, 181–188.]
- Wu HL, Zhong JS (2008) *Fauna Sinica, Osteichthyes, Perciformes. V. Gobioidae*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [伍汉霖, 钟俊生 (2008) 中国动物志·硬骨鱼纲·鲈形目(五) 虾虎鱼亚目. 科学出版社, 北京.]
- Wu XW (1981) *Cyprinidae of China (Vol.1)*. Shanghai Scientific & Technical Publishers, Shanghai. (in Chinese) [伍献文 (1981) 中国鲤科鱼类志(上卷). 上海科学技术出版社, 上海.]
- Wu XW (1982) *Cyprinidae of China (Vol.2)*. Shanghai Scientific & Technical Publishers, Shanghai. (in Chinese) [伍献文 (1982) 中国鲤科鱼类志(下卷). 上海科学技术出版社, 上海.]
- Yan AS (1964) The main economic fishes of the Irtysh River, Ulungur Lake, and Bosten Lake. *Selected Papers of Xinjiang Zoological Society*, 1–20. (in Chinese) [严安生 (1964) 额尔齐斯河, 乌伦古湖, 博斯腾湖的主要经济鱼类. 新疆动物学会论文选集, 1–20.]
- Yang JX, Pan XF, Chen XY, Wang XA, Zhao YP, Li JY, Li ZY (2013) Overview of the artificial enhancement and release of endemic freshwater fish in China. *Zoological Research*, 34, 267–280. (in Chinese with English abstract) [杨君兴, 潘晓斌, 陈小勇, 王晓爱, 赵亚鹏, 李建友, 李再云 (2013) 中国淡水鱼类人工增殖放流现状. 动物学研究, 34, 267–280.]
- Yang X (2015) Research on impacts of climate change on runoff of Wulungu River Basin based on SWAT model. *Environmental Protection of Xinjiang*, 37(1), 45–50. (in Chinese with English abstract) [杨霞 (2015) 基于SWAT模型的乌伦古河流域气候变化对径流影响研究. 新疆环境保护, 37(1), 45–50.]
- Yu YS, Zhang QS, Chen WM, Xu YJ (1986) A preliminary study on dominant fish species and their interspecific relations in waters of islands off the northern Zhejiang. *Journal of Fisheries of China*, 10, 137–149. (in Chinese with English abstract) [郁尧山, 张庆生, 陈卫民, 许源剑 (1986) 浙江北部岛礁周围海域鱼类优势种及其种间关系的初步研究. 水产学报, 10, 137–149.]
- Zhang CG, Zhao YH (2016) Species diversity and distribution of inland fishes in China. Science Press, Beijing (in Chinese) [张春光, 赵亚辉 (2016) 中国内陆鱼类物种与分布. 科学出版社, 北京.]
- Zhang KX (1991) *Fishes in Ulungur Lake*. Science Press, Beijing (in Chinese) [张开翔 (1991) 乌伦古湖鱼类. 科学出版社, 北京.]

(责任编辑: 陈小勇 责任编辑: 时意专)

附录 Supplementary Material

附录1 鱼类生物完整性指数候选指标列表

Appendix 1 List of fish index of biological integrity candidate metrics

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2019071-1.pdf>

附录2 阿勒泰地区额尔齐斯河流域和乌伦古河流域鱼类名录

Appendix 2 List of fish species in Irtysh River Basin and Ulungur River Basin, Altay Prefecture, Xinjiang

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2019071-2.pdf>

附录3 额尔齐斯河流域和乌伦古河流域在参照点和观测点的各参数指标及其各项数值.

Appendix 3 Point parameter index value of reference point and observation in Irtysh River and Ulungur River basins.

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2019071-3.pdf>

附录 1 鱼类生物完整性指数候选指标列表

Appendix 1 List of fish index of biological integrity candidate metrics

属性归类	候选参数指标	Candidate metrics	参数缩写	对干扰的响应
Attribute			Abbreviation	Response to disturbances
物种组成	鱼类总物种数	Number of fish species	M1	下降 Descent
Species composition				
	土著鱼总物种数	Number of native fish species	M2	下降 Descent
	土著鱼物种数百分比	Percentage of native fish species	M3	下降 Descent
	鲤科鱼类物种数百分比	Percentage of cyprinid species	M4	上升 Ascent
	条鳅科鱼类物种数百分比	Percentage of nemacheilid species	M5	下降 Descent
	鲈科鱼类物种数百分比	Percentage of percid species	M6	下降 Descent
	中上层鱼类物种数百分比	Percentage of pelagic fish species	M7	下降 Descent
	中下层鱼类物种数百分比	Percentage of mesopelagic fish species	M8	上升 Ascent
	底层鱼类物种数百分比	Percentage of demersal fish species	M9	下降 Descent
	杂食性鱼类个体百分比	Percentage of omnivorous fish species	M10	上升 Ascent
营养结构	植食性鱼类个体百分比	Percentage of phytophagous fish species	M11	下降 Descent
Nutrition structure	肉食性鱼类个体百分比	Percentage of carnivorous fish species	M12	下降 Descent
耐受性 Tolerance	敏感性鱼类个体百分比	Percentage of fish species with poor tolerance	M13	下降 Descent
	耐受性鱼类个体百分比	Percentage of fish species with high tolerance	M14	上升 Ascent
繁殖共位群	漂流性卵鱼类物种数百分比	Percentage of fish species with drifting eggs	M15	下降 Descent
Reproductive	沉性卵鱼类物种数百分比	Percentage of fish species with demersal eggs	M16	下降 Descent
	黏性卵鱼类物种数百分比	Percentage of fish species with viscid egg	M17	上升 Ascent
鱼类数量	鱼类个体总数	Number of fish individuals	M18	下降 Descent
fish species	土著鱼类个体总数	Number of native fish individuals	M19	下降 Descent
	麦穗鱼个体总数	Number of individuals of <i>Pseudorasbora parva</i>	M20	上升 Ascent

附录 2 新疆阿勒泰地区额尔齐斯河流域和乌伦古河流域鱼类名录

Appendix 2 List of fish species in Irtysh River and Ulungur River basins, Altay Prefecture, Xinjiang, China

物种名 Species	历史分布 Historical	现有分布 Present	外来种 Exotic fish
鲟形目 Acipenseriformes			
鲟科 Acipenseridae			
鲟属 <i>Acipenser</i>			
西伯利亚鲟 <i>Acipenser baeri</i>	+		
小体鲟 <i>Acipenser ruthenus</i>	+		
鲑形目 Salmoniformes			
鲑科 Salmonidae			
哲罗鲑属 <i>Hucho</i>			
哲罗鲑 <i>Hucho taimen</i>	+	+	
细鳞鲑属 <i>Brachymystax</i>			
细鳞鲑 <i>Brachymystax lenok</i>	+		
北鲑属 <i>Stenodus</i>			
北鲑 <i>Stenodus leucichthys</i>	+		
茴鱼属 <i>Thymallus</i>			
北极茴鱼 <i>Thymallus arcticus</i>	+	+	
胡瓜鱼目 Osmeriformes			
胡瓜鱼科 Osmeridae			
公鱼属 <i>Hypomesus</i>			
池沼公鱼 <i>Hypomesus olidus</i>		+	+
银鱼科 Salangidae			
大银鱼属 <i>Protosalanx</i>			
大银鱼 <i>Protosalanx hyalocranius</i>		+	+
狗鱼目 Esociformes			
狗鱼科 Esocidae			
狗鱼属 <i>Esox</i>			
白斑狗鱼 <i>Esox lucius</i>	+	+	
鲤形目 Cypriniformes			
花鳅科 Cobitidae			
花鳅属 <i>Cobitis</i>			
花鳅 <i>Cobitis taenia</i>	+	+	
泥鳅属 <i>Misgurnus</i>			
泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>		+	+
副泥鳅属 <i>Paramisgurnus</i>			
大鳞副泥鳅 <i>Paramisgurnus dabryanus</i>		+	+
条鳅科 Nemacheilidae			
须鳅属 <i>Barbatula</i>			
北方须鳅 <i>Barbatula nuda</i>	+	+	
高原鳅属 <i>Triplophysa</i>			
新疆高原鳅 <i>Triplophysa strauchii</i>	+	+	
小体高原鳅 <i>Triplophysa minuta</i>	+	+	
鲤科 Cyprinidae			
鲢亚科 Hypophthalmichthyinae			
鲢属 <i>Hypophthalmichthys</i>			
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>		+	+

物种名 Species	历史分布 Historical	现有分布 Present	外来种 Exotic fish
鲌属 <i>Aristichthys</i>			
鲌 <i>Aristichthys nobilis</i>		+	+
鲃亚科 Cultrinae			
鲃属 <i>Hemiculter</i>			
鲃 <i>Hemiculter leucisculus</i>		+	+
鲤亚科 Cyprininae			
鲤属 <i>Cyprinus</i>			
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>		+	+
鲫属 <i>Carassius</i>			
金鲫 <i>Carassius carassius</i>	+	+	
银鲫 <i>Carassius auratus gibelio</i>	+	+	
鮡亚科 Gobioidae			
麦穗鱼属 <i>Pseudorasbora</i>			
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>		+	+
鮡属 <i>Gobio</i>			
尖鳍鮡 <i>Gobio acutipinnatus</i>	+	+	
棒花鱼属 <i>Abbottina</i>			
棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>		+	+
雅罗鱼亚科 Leuciscinae			
丁鲃属 <i>Tinca</i>			
丁鲃 <i>Tinca tinca</i>	+	+	
拟鲤属 <i>Rutilus</i>			
湖拟鲤 <i>Rutilus rutilus lacustris</i>	+	+	
雅罗鱼属 <i>Leuciscus</i>			
贝加尔雅罗鱼 <i>Leuciscus baicalensis</i>	+	+	
高体雅罗鱼 <i>Leuciscus idus</i>	+	+	
鲃属 <i>Phoxinus</i>			
阿勒泰鲃 <i>Phoxinus ujmonensis</i>	+	+	
草鱼属 <i>Ctenopharyngodon</i>			
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>		+	+
鲃亚科 Cultrinae			
欧鲃属 <i>Abramis</i>			
东方欧鲃 <i>Abramis brama</i>		+	+
鲈形目 Perciformes			
鲈科 Percidae			
鲈属 <i>Perca</i>			
河鲈 <i>Perca fluviatilis</i>	+	+	
梭鲈属 <i>Lucioperca</i>			
梭鲈 <i>Lucioperca lucioperca</i>		+	+
粘鲈属 <i>Acerina</i>			
粘鲈 <i>Acerina cernua</i>	+	+	
沙塘鳢科 Odontobutidae			
小黄鲈属 <i>Micropercops</i>			
小黄鲈 <i>Micropercops swinhonis</i>		+	+
虾虎鱼科 Gobiidae			
吻虾虎鱼属 <i>Rhinogobius</i>			

李雪健, 贾佩尧, 牛诚祯, 邢迎春, 李浩林, 刘海波, 张春光, 唐文乔, 赵亚辉. 新疆阿勒泰地区额尔齐斯河和乌伦古河流域鱼类多样性演变和流域健康评价. 生物多样性, 28 (4): 422-434. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019071>

物种名 Species	历史分布 Historical	现有分布 Present	外来种 Exotic fish
褐吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius brunneus</i>		+	+
鲱形目 Gadiformes			
江鲱科 Lotidae			
江鲱属 <i>Lota</i>			
江鲱 <i>Lota lota</i>	+	+	
鲈形目 Scorpaeniformes			
杜父鱼科 Cottidae			
杜父鱼属 <i>Cottus</i>			
阿勒泰杜父鱼 <i>Cottus sibiricus altaicus</i>	+	+	

附录 3 额尔齐斯河和乌伦古河流域在参照点和观测点的各参数指标及其数值(R: 参照点; O: 受损点)

Appendix 3 Point parameter index value of reference point and observation in in Irtysh River and Ulungur River basins. R: Reference point; O: Observation point

	参数指标 Metrics	标准差		最小值		最大值		25%分位数		中位数		75%分位数	
		Standard		Minimum		Maximum		25%		Median		75%	
		R	O	R	O	R	O	R	O	R	O	R	O
额尔齐斯河流域 Irtysh River Basin													
M1		3	3	2	1	10	11	3	3	4	4	6	8
M2		2	2	2	1	6	8	3	3	3	4	5	6
M3		17	15	60	56	100	100	69	85	88	100	100	100
M4		26	23	0	33	100	100	50	50	58	64	73	77
M5		12	13	0	0	30	33	0	2	6	16	23	25
M6		12	12	0	0	33	33	0	0	0	0	19	14
M10		34	19	0	33	100	100	77	91	96	95	98	100
M11		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M12		34	19	0	0	100	67	2	0	4	5	23	9
M13		33	29	0	0	100	90	4	5	18	12	54	34
M14		33	29	0	10	100	100	46	66	82	88	96	95
M15		8	3	0	0	25	10	0	0	0	0	8	0
M16		26	18	0	0	100	67	21	18	29	24	46	27
M17		25	18	0	33	100	100	50	71	67	75	77	82
M18		37	47	4	6	125	147	22	40	40	65	72	115
M19		31	41	4	6	93	147	15	40	32	63	60	88
M20		9	7	0	0	24	25	0	0	0	0	9	2
乌伦古河流域 Ulungur River Basin													
M1		3	2	3	2	13	7	4	4	4	6	7	7
M2		2	2	2	2	8	7	3	4	3	5	5	6
M3		7	8	62	83	86	100	67	86	73	100	75	100
M4		11	34	57	0	100	100	69	29	73	50	75	71
M5		13	33	0	0	33	100	0	29	0	29	18	50
M6		10	0	0	0	25	0	11	0	19	0	25	0
M10		8	6	77	86	100	100	90	100	96	100	98	100
M11		1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
M12		8	6	0	0	23	14	2	0	4	0	9	0
M13		19	12	0	0	59	33	13	0	29	4	32	14
M14		19	12	41	67	100	100	68	86	71	96	87	100
M15		9	17	0	0	29	50	0	14	0	14	2	25
M16		11	15	0	0	33	33	11	0	15	29	25	29
M17		14	9	57	50	100	75	73	57	76	57	89	67
M18		20	34	8	28	73	132	28	65	43	71	51	86
M19		18	34	7	28	71	132	27	65	36	65	40	76
M20		4	4	1	0	12	10	1	0	2	0	3	6



•生物编目•

新疆阿尔泰山喀纳斯河谷鸟兽物种的 红外相机监测

崔绍朋^{1,2,3} 陈代强^{2,3} 王金宇¹ 孙吉舟⁴
初红军^{5,6} 李春旺^{2,3} 蒋志刚^{2,3*}

1 (山西农业大学林学院, 山西晋中 030801)

2 (中国科学院动物研究所动物生态与保护生物学重点实验室, 北京 100101)

3 (中国科学院大学, 北京 100049)

4 (新疆喀纳斯国家级自然保护区, 新疆阿勒泰 836600)

5 (新疆卡拉麦里山有蹄类自然保护区, 新疆阿勒泰 836500)

6 (新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046)

摘要: 2014年6月至2016年8月, 利用红外相机技术对新疆喀纳斯国家级自然保护区内喀纳斯河谷的兽类和鸟类多样性进行了调查, 共布设36个相机位点, 累计12,006个拍摄日, 收集独立有效照片2,038张, 共鉴定野生动物51种, 其中兽类4目8科15种, 鸟类9目15科36种。记录到国家I级重点保护野生动物3种, 即紫貂(*Martes zibellina*)、貂熊(*Gulo gulo*)和黑鹳(*Ciconia nigra*); 国家II级保护动物11种。9种被中国脊椎动物红色名录列为受威胁物种, 其中极危(CR) 1种, 即驼鹿(*Alces alces*); 濒危(EN) 3种, 即貂熊、马鹿(*Cervus canadensis*)和松鸡(*Tetrao urogallus*); 易危(VU) 5种。白背啄木鸟(*Dendrocopos leucotos*)等14种鸟类为保护区新记录, 我们首次在野外拍摄到驼鹿指名亚种(*A. a. alces*)。物种相对多度指数(relative abundance index, RAI)分析结果显示, 马鹿为喀纳斯河谷兽类优势种(RAI = 9.878), 鸟类中星鸦(*Nucifraga caryocatactes*)相对多度最高(0.258)。我们建议保护区进一步对雪豹(*Panthera uncia*)、原麝(*Moschus moschiferus*)等物种开展专项调查和评估。本论文为阿尔泰山喀纳斯河谷鸟兽多样性研究提供了基础数据, 有助于后续物种保护和管理计划的开展。

关键词: 阿尔泰山; 红外相机; 物种编目; 泰加林; 喀纳斯国家级自然保护区

Camera-trapping survey on mammals and birds in the Kanas River Valley of Altai Mountains, Xinjiang, China

Shaopeng Cui^{1,2,3}, Daiqiang Chen^{2,3}, Jinyu Wang¹, Jizhou Sun⁴, Hongjun Chu^{5,6}, Chunwang Li^{2,3}, Zhigang Jiang^{2,3*}

1 College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Jinzhong, Shanxi 030801

2 Key Laboratory of Animal Ecology and Conservation Biology, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

4 Kanas National Nature Reserve, Altay, Xinjiang 836600

5 Mt. Kalamaili Ungulate Nature Reserve, Altay, Xinjiang 836500

6 College of Resource and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046

Abstract: We conducted a camera-trapping survey in the Kanas River Valley of Xinjiang Kanas National Nature Reserve (XKNNR), China specifically for inventorying the mammal and bird diversity. We collected 2,038 independent detections from June 2014 to August 2016 over 12,006 camera-days at 36 locations. The survey identified 51 species, including 15 mammal species belonging to four orders and eight families, and

收稿日期: 2020-04-30; 接受日期: 2020-06-08

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0503303)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA23080101)、国家科技基础性工作专项(2013FY110300)和新疆国际科技合作项目(20136026-2)

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

36 avian species classified into nine orders and 15 families. The sable *Martes zibellina*, wolverine *Gulo gulo*, and black stork *Ciconia nigra* are listed as Class I National Protected Wildlife and 11 species as Class II. According to the Red List of China's Vertebrates, nine species are threatened in the reserve, while the moose *Alces alces* is Critically Endangered (CR), three species including the wolverine, wapiti *Cervus canadensis*, and capercaillie *Tetrao urogallus* as Endangered (EN), and five species as Vulnerable (VU). Fourteen avian species including white-backed woodpecker *Dendrocopos leucotos* were newly recorded in XKNNR along with the first photograph of *A. a. alces* in the wild taken during the survey. The relative abundance index (RAI) results showed *Cervus canadensis* was a dominant species at Kanas River Valley (RAI = 9.878). The most abundant avian species was the spotted nutcracker (*Nucifraga caryocatactes*, 0.258). Further investigations are recommended to determine the status and threats of the species, especially the musk deer *Moschus moschiferus* and snow leopard *Panthera uncia*. Our results added new data to the mammal and bird diversity in the Kanas River Valley of Altai Mountains, which can assist in improving species conservation and reserve management in the area.

Key words: Altai Mountains; camera trap; species inventory; Taiga; Kanas National Nature Reserve

物种编目是生物多样性研究与保护的基础, 中国是世界上生物多样性最丰富的国家之一, 但物种编目研究起步较晚, 目前尚有一些地区缺乏全面系统的本底资料调查(Gaston, 2000; 马克平, 2015)。在全球气候变化与区域经济发展的双重压力下, 生物多样性正面临人类活动的深刻影响, 而一些地区的物种本底数据仍源自20世纪末期, 并受限于传统调查手段, 调查范围、调查对象等并不全面(肖治术, 2019)。种群多度、空间分布等相关数据不足或者更新不及时, 大大降低了物种保护和管理工作的针对性及有效性(Primack, 2014)。

作为一种非损伤性调查和监测方法, 红外相机技术目前已经成为动物本底调查的常规手段(肖治术, 2019)。相比于样线法等传统调查方法, 红外相机技术具有人工成本低、全天候监测、对动物干扰小、易于记录隐蔽种、可标准化操作等优点(O'Brien et al, 2003; O'Connell et al, 2011; 李晟等, 2014), 被广泛应用于野外工作中, 为野生动物的科学保护和有效管理提供了有力支持(肖治术等, 2014)。

新疆喀纳斯国家级自然保护区(以下简称喀纳斯保护区)成立于1980年, 是我国最早建立的自然保护区之一。保护区位于我国西北端(86°54'–87°54' E, 48°35'–49°11' N), 是阿尔泰山生物多样性保护优先区内仅有的两个国家级保护区之一(环境保护部, 2011), 地处WWF Global 200关键生态区之一的阿尔泰-萨彦生态区(Altai-Sayan Ecoregion)南缘(Olson & Dinerstein, 2002), 具有典型的泰加林景观及动物类群, 是我国唯一位于古北界欧洲-西伯利

亚生物地理区的国家级保护区(马勇等, 1987; 张荣祖, 1999)。保护区地处四国交界, 地势由西南向东北逐步抬升, 海拔范围1,000–4,374 m, 相对高差在3,000 m以上, 区内最高海拔点友谊峰是阿尔泰山在中国境内的主峰。保护区总面积220,162 ha, 气候特征为典型的温带大陆性气候, 年均降水量在1,060 mm, 气温垂直梯度变化明显, 年均温–0.2°C, 7月高山雪线以下的地区平均温度为15.9°C, 1月均温为–16.0°C^①。主要保护对象为西伯利亚泰加林森林生态系统及自然景观, 典型植物包括西伯利亚红松(*Pinus sibirica*)、西伯利亚云杉(*Picea obovata*)等。

目前, 喀纳斯保护区兽类和鸟类本底调查资料特别是系统的实地调查记录很少。1987年, 林业部(现国家林草局)在该保护区组织开展了唯一一次多学科综合野外调查, 历时44 d, 记录到39种兽类和117种鸟类(林业部中南调查规划设计院, 1989)。周永恒等(1994)在喀纳斯保护区获得驼鹿指名亚种(*Alces alces alces*)标本, 首次证实我国阿尔泰山有驼鹿分布, 也是国内首次发现该亚种。马合木提等(1995)在后续调查中发现, 该保护区内驼鹿种群数量有40余头。此外, 马勇等(1987)在包括喀纳斯保护区在内的新疆北部地区针对啮齿动物开展了多次调查。在上述工作的基础上, 阿布力米提等(1999)通过补充调查和文献汇总分析, 报道喀纳斯保护区兽类共计6目17科50种。进入21世纪后, 尚未见喀纳斯保护区兽类相关调查报道。鸟类方面, 虽然整个

^① 新疆喀纳斯国家级自然保护区管理局 (2011) 新疆喀纳斯国家级自然保护区总体规划(2011–2020)。内部资料, 林产工业规划设计院, 北京。

阿尔泰山地区有过多次数鸟类调查(向礼咳和黄人鑫, 1986; 兰欣和谷景和, 1993; 马鸣, 1997; 阿布力米提等, 2003), 但至今未见针对该保护区鸟类的报道。另一方面, 上述调查主要在喀纳斯湖周围及其南部进行, 喀纳斯湖北部区域一直缺乏深入的实地科学考察。本研究利用红外相机技术对喀纳斯河谷兽类和鸟类进行了调查监测, 旨在进一步掌握保护区内的鸟兽资源现状, 为喀纳斯保护区的物种管理实践提供科学依据。

1 研究方法

1.1 红外相机布设

为确定红外相机布设区域, 2013年7–10月我们在喀纳斯保护区进行了预调查。喀纳斯河谷植被垂直分布明显, 主要包括山地灌草丛、针阔混交林、针叶林、高山草甸和冰川积雪带。综合考虑植被带谱完整性、生境代表性、人为影响状况等, 结合已有的研究基础和初步拍摄结果, 选择喀纳斯河谷作为相机布设地点。该河谷面积近110 km², 保留着典型的西伯利亚泰加林自然景观, 是保护区最有代表性的核心区域, 多年来一直被严格保护。沿河谷设有湖头站、阿克吐鲁袞站和白湖站3个管护站, 禁止游客和牧民进入(阿布力米提等, 1999; Cui et al, 2016)。依据动物活动痕迹丰富程度, 确定了36个红外相机监测点(图1), 相机布设密度约为1台/3 km²。

红外相机布设范围覆盖整个喀纳斯河谷, 从喀纳斯湖东部至中俄边境的白湖边缘(图1)。垂直方向上, 结合分层抽样和系统抽样原理, 将第一台相机放置在河边, 然后沿垂直等高线方向往山顶方向每700–1,000 m布设下一台相机, 将该过程所安放的相机视为对调查区所有生境类型的一次整体垂直抽样。按相同布设方法, 沿河谷方向每间隔2–3 km进行下一次抽样, 以期最大程度维持不同抽样之间的空间独立性(O'Connell et al, 2011)。红外相机监测位点覆盖了除冰川积雪带外所有其他生境, 每个植被带内都包含一定数量比例的相机位点。

2014–2016年, 每年6月沿喀纳斯河谷依次安放红外相机, 8–9月检查相机运行状态, 存储照片并更换电池, 以便将相机留置越冬。次年6月取回相机后, 重复上述过程, 直至2016年8月收回所有相机。夏秋季调查时, 相机布设高度一般为40–70 cm, 考虑到

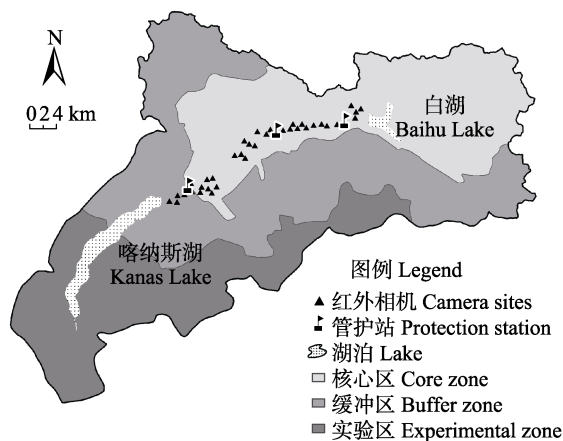


图1 喀纳斯河谷红外相机布设位点图

Fig. 1 The map of camera sites in Kanas River Valley

积雪的可能影响, 越冬相机设置高度为1.5 m, 并使其俯视拍摄。相机型号为猎科Ltl-6210MC, 参数设置、布设程序、记录内容等参考红外相机调查技术规范(肖治术等, 2014)。

1.2 数据处理与分析

依据蒋志刚等(2017)和郑光美(2017)对红外相机拍摄到的兽类和鸟类进行鉴定和分类, 其中啮齿类动物(松鼠科除外)多于夜间拍摄且体形较小, 难以识别到种, 因而未纳入分析。保护级别和濒危程度参考《国家重点保护野生动物名录》(<http://www.forestry.gov.cn>)和《中国脊椎动物红色名录》(蒋志刚等, 2016)。

采用相对多度指数(relative abundance index, RAI)评估喀纳斯保护区鸟兽的相对种群大小(李晟等, 2014; 陈立军等, 2019)。该指数基于红外相机拍摄率, 其数值大小与动物种群大小密切相关(O'Brien et al, 2003), 计算公式如下:

$$RAI_j = \left(\frac{\sum_{i=1} d_i}{\sum_{i=1} n_i} \right) \times 100 \quad (1)$$

式中: RAI_j表示物种j的相对多度指数, d_i表示该物种在相机位点 i 的有效探测(独立照片)数, n_i为相机在位点 i 的有效工作日数。相机可以自动记录触发时间, 每次安放相机时先拍摄1张照片以检查相机运行状态并记录起始时间, 相机被取回或停止拍摄前的最后一次触发时间视为工作结束, 计算拍摄时数并将相机连续运行24 h视为1个有效工作日。

参考O'Brien等(2003), 我们定义有效探测的含义如下: 相机触发时所拍动物能根据照片或视频进

行准确物种鉴定, 则该次拍摄视为对此物种的一次有效探测; 若拍到相同物种, 则相邻探测间隔应 ≥ 30 min, 即一次有效探测之后30 min内该相机连续拍到的相同物种(即使拍到不同个体)都视为同一次探测; 每次有效探测与红外相机当时拍到的动物个体数量无关。

2 结果

经过系统地布设红外相机, 36个位点累计监测12,006个有效拍摄日, 共获得独立有效照片2,038张, 其中兽类1,871张, 鸟类94张, 家畜53张, 人类活动20张, 分别占独立有效照片总数的91.8%、4.6%、2.6%和1.0% (附录1, 2)。

共鉴定出兽类15种, 隶属于4目8科, 占喀纳斯保护区历史记录兽类总数(50种)的33.3%; 鸟类36种, 隶属于9目15科, 占喀纳斯保护区历史记录鸟类总数(117种)的32.5%。本次调查记录国家I级重点保护野生动物3种, 即紫貂(*Martes zibellina*)、貂熊(*Gulo gulo*)和黑鹳(*Ciconia nigra*)。国家II级重点保护野生动物11种, 包括棕熊(*Ursus arctos*)、马鹿(*Cervus canadensis*)、驼鹿、雪兔(*Lepus timidus*)、花尾榛鸡(*Tetrastes bonasia*)、黑琴鸡(*Lyrurus tetrrix*)等(附录1)。与历史数据相比, 豆雁(*Anser fabalis*)、欧斑鸠(*Streptopelia turtur*)、丘鹑(*Scolopax rusticola*)、大鵟(*Buteo hemilasius*)、欧亚鵟(*B. buteo*)、棕尾鵟(*B. rufinus*)、白背啄木鸟(*Dendrocopos leucotos*)、虎斑地鸫(*Zoothera aurea*)、黑喉鸫(*Turdus atrogularis*)、新疆歌鸫(*Luscinia megarhynchos*)、红胁蓝尾鸫(*Tarsiger cyanurus*)、红腹红尾鸫(*Phoenicurus erythrogastrus*)、白翅交嘴雀(*Loxia leucoptera*)和红腹灰雀(*Pyrrhula pyrrhula*)等14种鸟类为保护区新记录种。同时, 我们首次在野外拍摄到驼鹿指名亚种的生态照片(附录3)。

依据《中国脊椎动物红色名录》(蒋志刚等, 2016), 共调查到受威胁物种9种, 其中驼鹿被列为极危(CR), 貂熊、马鹿和松鸡(*Tetrao urogallus*)属于濒危(EN), 棕熊、紫貂、黑鹳等5种被评为易危(VU)。

物种相对多度指数结果表明, 马鹿RAI值远远大于其余物种(RAI = 9.878), 其独立照片数占总数的58.2%。此外, 兽类中松鼠(*Sciurus vulgaris*, 1.791)、狍(*Capreolus pygargus*, 1.066)、雪兔(0.933)、紫貂(0.691)和棕熊(0.591)相对多度较高, 鸟类中星鸦

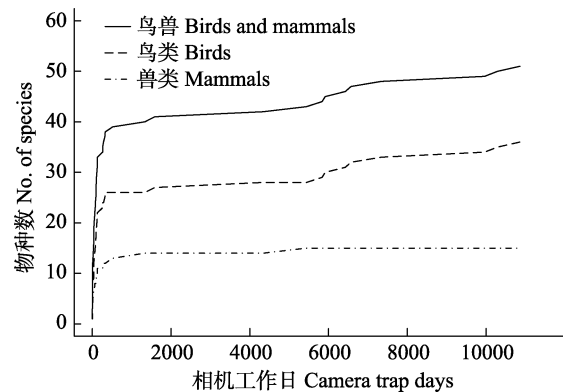


图2 喀纳斯河谷红外相机调查物种累积曲线

Fig. 2 Species accumulative curve of camera-trapping survey in Kanas River Valley

(*Nucifraga caryocatactes*, 0.258)、新疆歌鸫(0.083)和黑喉石鸫(*Saxicola maurus*, 0.058)相对多度较高。

物种累积曲线分析结果表明(图2), 兽类取样比较充分, 在500个有效相机工作日以下时, 物种数随着相机日的增加而急速上升, 至1,200个相机工作日时曲线逐渐趋于稳定; 鸟类累积曲线在0-500个相机日快速上升, 但此后物种数并未趋于平缓, 在6,000个相机日时又呈现明显的升高趋势。

3 讨论

本次调查共记录36种鸟类, 与以往的历史资料(林业部中南调查规划设计院, 1989)相比, 增加了14种保护区新记录鸟类。本次调查中鸟类独立照片数较低, 仅占独立照片总数的4.6%, 多种鸟类仅拍到1张有效照片, 并且大部分生活在森林生境。与兽类相比, 鸟类物种累积曲线在调查后期仍呈逐渐升高趋势, 这主要是由于红外相机调查主要适用于大中型的地栖性鸟类, 但实际上非地栖性鸟类数量更多, 而这些鸟类是否能被红外相机拍摄到具有偶然性。红外相机陷阱技术并不适合进行非地栖性鸟类物种编目研究, 仅可作为其补充调查手段(朱淑怡等, 2017)。

本次调查记录到的15种兽类在以往文献中均有记载。与阿布力米提等(1999)的研究结果相比, 本次红外相机调查未拍摄到北山羊(*Capra sibirica*)、原麝(*Moschus moschiferus*)和盘羊(*Ovis ammon*)等3种有蹄类, 雪豹(*Panthera uncia*)、猞猁(*Lynx lynx*)和兔狲(*Otocolobus manul*)等猫科动物也均未发现。原因可能是本次相机布设范围相对较小, 空间上没

有覆盖一些物种的特定活动家域,也可能是红外相机在探测动物类群上的局限性所致。2014年3月,我们协助保护区在实验区安放了红外相机,拍到了猞猁照片。对于兔狲,我们在非监测点拍到一张照片,也证实了该物种的存在。尽管红外相机技术具有非损伤、干扰小等诸多优点,但目前该技术并不适用于小型、夜行性或非地栖兽类,红外相机对这些物种通常难以进行有效探测或后续的物种鉴定困难(李晟等, 2014; 肖治术等, 2014)。本次调查对小型食肉动物的监测可能并不充分,而对于食虫目、啮齿目、翼手目等动物类群,需要采用活捕笼等针对性调查手段才能进行物种编目。此外,本次调查并未发现保护区内有盘羊分布,这与1987年开展的保护区综合考察结果(林业部中南调查规划设计院, 1989)相同。尽管阿布力米提等(1999)将盘羊准噶尔亚种(*O. a. sairensis*)列入保护区名录,但未具体说明列入依据。

对于雪豹,尽管有一些目击事件在民间流传,但迄今为止还没有在喀纳斯保护区拍到清晰的影像资料,保护区内是否有雪豹分布尚无确切证据。不过值得注意的是,雪豹是典型的跨境物种,我国新疆是其分布中心,全球12个雪豹分布国中有8个与新疆接壤,而阿尔泰山是雪豹在新疆的重要分布山系之一(马鸣等, 2013)。2017年,位于阿尔泰山东部的两河源自然保护区首次开展雪豹专项调查,并首次拍摄到清晰的雪豹照片(刘沿江等, 2019)。与此类似,2010年以来,在WWF等国际组织的资助下,在紧邻喀纳斯保护区的俄罗斯阿尔泰共和国境内,研究人员布设的红外相机多次拍到清晰的雪豹照片,明确了该物种的足迹(Nyhus et al, 2016)。关于原麝,尽管喀纳斯保护区标本馆收藏有原麝标本(疑为20世纪80年代综合考察所得),但经过三年多的野外监测,我们在喀纳斯河谷并未拍摄到原麝,也未发现其活动痕迹。同时,多位学者近些年来对阿尔泰山其他地区的调查也没有发现原麝(高行宜等, 2002; 初红军等, 2009; 刘元超等, 2014),因此我们推测该物种可能已在阿尔泰山局部绝灭。

本次调查的马鹿种群相对多度远高于狍、野猪等有蹄类,究其原因可能是:(1)与物种生态学特征有关。一方面,马鹿本身是喀纳斯河谷的兽类优势物种,在泰加林中占主导地位。泰加林是河谷内面

积最大的生境类型,本研究在该类生境中布设了20个相机监测位点,占总数的55.6%。野外工作时发现,针叶林内马鹿的粪便痕迹数量明显高于其他有蹄类。另一方面,不同物种的空间分布特征有差异,我们进一步讨论喀纳斯河谷主要兽类的时空分布特征时发现,喀纳斯河谷不同兽类空间分布明显分化,马鹿、驼鹿等物种海拔分布范围广泛(1,350–2,250 m),而狍和野猪偏好下游低海拔河滩区域(待发表)。(2)红外相机调查和分析技术的局限性所致。首先,该技术无法做到本底物种的全面普查,因此研究结果不能作为鸟兽物种多样性的一般特征;其次,作为一种计算简单的指标,相对多度指数应用广泛,但易受物种自身特征的影响,易被探测或家域大的物种的RAI值会被高估,而隐蔽性强或聚集分布的物种RAI偏低(Sollmann et al, 2013; 陈立军等, 2019)。(3)红外相机监测位点数量较少,取样量可能不够,同时仅调查了喀纳斯河谷区域,研究结果代表性较局限。

此外,调查还显示喀纳斯河谷有人类活动,进一步识别发现所拍摄照片均为保护区工作人员和护林员所骑马匹,并未发现外来人员或牧民家畜。以往喀纳斯河谷非法采挖虫草现象极为严重,并且屡禁不止,近些年保护区管理局在3个管护站增加了马匹数量(共约25匹),以加强河谷的日常巡护力度,有效遏制了非法采药等行为。实际上,除了护林员巡山用的马道之外,喀纳斯河谷没有其他道路,并且至今没有任何电力设施,与外界沟通困难,仅位于南端的湖头管护站拥有一部卫星电话,人为影响极小,是保护区最核心地带。不过我们发现管护站对巡山马匹的管理比较粗放,建议保护区加强管理,减少巡山马匹对野生动物的潜在影响。

综上所述,本研究首次对喀纳斯河谷进行了红外相机调查,获得了大量影像资料,丰富了保护区及其所在阿尔泰山区域的野生动物研究基础。建议在后续的野外工作中,增加监测位点数量,将保护区其他功能区以及白湖西北部核心区纳入调查范围,建立野外长期监测机制,不断补充更新保护区的野生动物本底数据。此外,亟需进一步对雪豹和原麝开展物种专项调查并完善物种管理计划,这将对两个物种在新疆阿尔泰山地区的生态研究和保护具有深远意义。

参考文献

- Aptimi A, Noriyuki O, Mahmut H, Hayashida E (1999) Characteristics of mammalian fauna and its distribution of the Kanas National Nature Reserve. *Arid Zone Research*, 16(2), 25–30. (in Chinese with English abstract) [阿布力米提·阿布都卡迪尔, 大泰司纪之, 马合木提·哈力克, 林田绘里子 (1999) 哈纳斯自然保护区兽类区系与分布特征. 干旱区研究, 16(2), 25–30.]
- Aptimi A, Sun MJ, Shao MQ (2003) Diversity and fauna characteristics of the birds and mammals in mountain areas of Xinjiang. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 17(3), 117–122. (in Chinese with English abstract) [阿布力米提·阿布都卡迪尔, 孙铭娟, 邵明勤 (2003) 新疆山地鸟类和哺乳类多样性及其区系特征. 干旱区资源与环境, 17(3), 117–122.]
- Central South Inventory and Planning Institute of Forestry Department (1989) Scientific Survey of the Kanas Nature Reserve of China. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [林业部中南调查规划设计院 (1989) 哈纳斯科学考察. 中国林业出版社, 北京.]
- Chen LJ, Xiao WH, Xiao ZS (2019) Limitations of relative abundance indices calculated from camera-trapping data. *Biodiversity Science*, 27, 243–248. (in Chinese with English abstract) [陈立军, 肖文宏, 肖治术 (2019) 物种相对多度指数在红外相机数据分析中的应用及局限. 生物多样性, 27, 243–248.]
- Chu HJ, Jiang ZG, Qi YJ, Tao YS, Li B (2009) Winter bed-site selection by argali *Ovis ammon sairensis*, *O. a. darwini* in Mt. Kekesen and Mt. Kalamaili in southern Altai Mountains. *Acta Theriologica Sinica*, 29, 125–132. (in Chinese with English abstract) [初红军, 蒋志刚, 戚英杰, 陶永善, 李斌 (2009) 阿尔泰山南部科克森山和卡拉麦里山盘羊冬季卧息地的选择. 兽类学报, 29, 125–132.]
- Cui SP, Luo X, Chen DQ, Sun JZ, Chu HJ, Li CW, Jiang ZG (2016) The adder *Vipera berus* in Southern Altay Mountains: Population characteristics, distribution, morphology and phylogenetic position. *PeerJ*, 4, e2342.
- Gao XY, Yang WK, Qiao JF, Xu KF (2002) Wild life in the Beita Mountain region, Xinjiang. *Arid Zone Research*, 19(4), 75–82. (in Chinese with English abstract) [高行宜, 杨维康, 乔建芳, 许可芬 (2002) 新疆北塔山地区的野生动物. 干旱区研究, 19(4), 75–82.]
- Gaston KJ (2000) Global patterns in biodiversity. *Nature*, 405, 220–227.
- Jiang ZG, Jiang JP, Wang YZ, Zhang E, Zhang YY, Li LL, Xie F, Cai B, Cao L, Zheng GM, Dong L, Zhang ZW, Ding P, Luo ZH, Ding CQ, Ma ZJ, Tang SH, Cao WX, Li CW, Hu HJ, Ma Y, Wu Y, Wang YX, Zhou KY, Liu SY, Chen YY, Li JT, Feng ZJ, Wang Y, Wang B, Li C, Song XL, Cai L, Zang CX, Zeng Y, Meng ZB, Fang HX, Ping XG (2016) Red list of China's vertebrates. *Biodiversity Science*, 24, 500–551. (in Chinese and in English) [蒋志刚, 江建平, 王跃招, 张鹗, 张雁云, 李立立, 谢锋, 蔡波, 曹亮, 郑光美, 董路, 张正旺, 丁平, 罗振华, 丁长青, 马志军, 汤宋华, 曹文宣, 李春旺, 胡慧建, 马勇, 吴毅, 王应祥, 周开亚, 刘少英, 陈跃英, 李家堂, 冯祚建, 王燕, 王斌, 李成, 宋雪琳, 蔡蕾, 臧春鑫, 曾岩, 孟智斌, 方红霞, 平晓鸽 (2016) 中国脊椎动物红色名录. 生物多样性, 24, 500–551.]
- Jiang ZG, Liu SY, Wu Y, Jiang XL, Zhou KY (2017) China's mammal diversity (2nd edition). *Biodiversity Science*, 25, 886–895. (in Chinese with English abstract) [蒋志刚, 刘少英, 吴毅, 蒋学龙, 周开亚 (2017) 中国哺乳动物多样性 (第2版). 生物多样性, 25, 886–895.]
- Lan X, Gu JH (1993) The species and distribution of birds in Xinjiang and its micro-computer information system. *Arid Zone Research*, 10(1), 22–28. (in Chinese with English abstract) [兰欣, 谷景和 (1993) 新疆鸟类种类与分布及其微机信息系统. 干旱区研究, 10(1), 22–28.]
- Li S, Wang DJ, Xiao ZS, Li XH, Wang TM, Feng LM, Wang Y (2014) Camera-trapping in wildlife research and conservation in China: Review and outlook. *Biodiversity Science*, 22, 685–695. (in Chinese with English abstract) [李晟, 王大军, 肖治术, 李欣海, 王天明, 冯利民, 王云 (2014) 红外相机技术在我国野生动物研究与保护中的应用与前景. 生物多样性, 22, 685–695.]
- Liu YC, Huang XW, Chu HJ, Liu DZ, Zhang F, Chen G, Qi YJ (2014) Camera trap survey of wildlife in Buergen Beaver National Nature Reserve, Xinjiang. *Biodiversity Science*, 22, 800–803. (in Chinese) [刘元超, 黄效文, 初红军, 刘冬志, 张帆, 陈刚, 戚英杰 (2014) 新疆布尔根河狸国家级自然保护区野生动物的红外相机监测. 生物多样性, 22, 800–803.]
- Liu YJ, Li XY, Liang XC, Liu YL, Cheng C, Li J, Tang PP, Qi HY, Bian XX, He B, Xing R, Li S, Shi XG, Yang CM, Xue YD, Lian XM, Awangjiumei, Xieranima, Song DZ, Xiao LY, Lü Z (2019) Where and How many? The status of snow leopard (*Panthera uncia*) density surveys and knowledge gaps in China. *Biodiversity Science*, 27, 919–931. (in Chinese with English abstract) [刘沿江, 李雪阳, 梁旭昶, 刘炎林, 程琛, 李娟, 汤飘飘, 齐惠元, 卞晓星, 何兵, 邢睿, 李晟, 施小刚, 杨创明, 薛亚东, 连新明, 阿旺久美, 谢然尼玛, 宋大昭, 肖凌云, 吕植 (2019) “在哪里”和“有多少”? 中国雪豹调查与空缺. 生物多样性, 27, 919–931.]
- Ma KP (2015) Species catalogue of China: A remarkable achievement in the field of biodiversity science in China. *Biodiversity Science*, 23, 137–138. (in Chinese) [马克平 (2015) 中国生物多样性编目取得重要进展. 生物多样性, 23, 137–138.]
- Ma M (1997) Animal fauna in Jintasi Glassland Nature Reserve in Altay Mountains. *Environmental Protection of Xinjiang*, 19(1), 58–61. (in Chinese) [马鸣 (1997) 阿尔泰山金塔斯草原自然保护区的动物类型. 新疆环境保护, 19(1), 58–61.]
- Ma M, Xu F, Cheng Y (2013) *Snow Leopards in Xinjiang*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [马鸣, 徐峰, 程芸 (2013) 新疆雪豹. 科学出版社, 北京.]

- Ma Y, Wang FG, Jin SK, Li SH (1987) Classification and Distribution of Rodent in Northern Xinjiang. Science Press, Beijing. (in Chinese) [马勇, 王逢桂, 金善科, 李思华 (1987) 新疆北部地区啮齿动物的分类和分布. 科学出版社, 北京.]
- Mahmut H, Li XP, Abuduwaili, Huang RX, Jin G, Paizidula (1995) A preliminary inspection on the elk (*Alces alces*) in Xinjiang Altai Mountain. Acta Theriologica Sinica, 15, 121, 159. (in Chinese) [马合木提·哈力克, 李新平, 阿布都外力, 黄人鑫, 金刚, 排孜都拉 (1995) 新疆阿尔泰山驼鹿的初步考察. 兽类学报, 15, 121, 159.]
- Ministry of Environmental Protection (2011) China National Biodiversity Conservation Strategy and Action Plan (2011–2030). China Environmental Science Press, Beijing. (in Chinese) [环境保护部 (2011) 中国生物多样性保护战略与行动计划(2011–2030年). 中国环境科学出版社, 北京.]
- Nyhus PJ, McCarthy T, Mallon D (2016) Snow Leopards: Biodiversity of the World: Conservation from Genes to Landscapes. Academic Press, London.
- O'Brien TG, Kinnaird MF, Wibisono HT (2003) Crouching tigers, hidden prey: Sumatran tiger and prey populations in a tropical forest landscape. Animal Conservation, 6, 131–139.
- O'Connell AF, Nichols JD, Karanth KU (2011) Camera Traps in Animal Ecology: Methods and Analyses. Springer, New York.
- Olson DM, Dinerstein E (2002) The Global 200: Priority ecoregions for global conservation. Annals of the Missouri Botanical Garden, 89, 199–224.
- Primack RB (translated by Ma KP, Jiang ZG) (2014) Essentials of Conservation Biology. Science Press, Beijing. (in Chinese) [马克平, 蒋志刚 (译) (2014) 保护生物学. 科学出版社, 北京.]
- Sollmann R, Mohamed A, Samejima H, Wilting A (2013) Risky business or simple solution—Relative abundance indices from camera-trapping. Biological Conservation, 159, 405–412.
- Xiang LG, Huang RX (1986) Study on birds in the Altai of Xinjiang. I. Distribution of birds. Journal of Xinjiang University, 3(3), 90–107. (in Chinese with English abstract) [向礼咳, 黄人鑫 (1986) 新疆阿尔泰山鸟类的研究(I) ——鸟类的分布. 新疆大学学报, 3(3), 90–107.]
- Xiao ZS (2019) Application of camera trapping to species inventory and assessment of wild animals across China's protected areas. Biodiversity Science, 27, 235–236. (in Chinese) [肖治术 (2019) 红外相机技术在我国自然保护区野生动物清查与评估中的应用. 生物多样性, 27, 235–236.]
- Xiao ZS, Li XH, Wang XZ, Zhou QH, Quan RC, Shen XL, Li S (2014) Developing camera-trapping protocols for wildlife monitoring in Chinese forests. Biodiversity Science, 22, 704–711. (in Chinese with English abstract) [肖治术, 李欣海, 王学志, 周岐海, 权锐昌, 申小莉, 李晟 (2014) 探讨我国森林野生动物红外相机监测规范. 生物多样性, 22, 704–711.]
- Zhang RZ (1999) Zoogeography of China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张荣祖 (1999) 中国动物地理. 科学出版社, 北京.]
- Zheng GM (2017) A Checklist on the Classification and Distribution of the Birds of China, 3rd edn. Science Press, Beijing. (in Chinese) [郑光美 (2017) 中国鸟类分类与分布名录(第三版). 科学出版社, 北京.]
- Zhou YH, Wang L, Gu JH, Rouzibali M, Liang GD (1994) New record of *Alces alces alces* in China. Acta Theriologica Sinica, 14, 208, 239. (in Chinese with English abstract) [周永恒, 王伦, 谷景和, 肉孜巴里·马合木提, 梁果栋 (1994) 新疆发现欧洲驼鹿——我国兽类一亚种新记录. 兽类学报, 14, 208, 239.]
- Zhu SY, Duan F, Li S (2017) Promoting diversity inventory and monitoring of birds through the camera-trapping network in China: Status, challenges and future outlook. Biodiversity Science, 25, 1114–1122. (in Chinese with English abstract) [朱淑怡, 段菲, 李晟 (2017) 基于红外相机网络促进我国鸟类多样性监测: 现状、问题与前景. 生物多样性, 25, 1114–1122.]

(责任编辑: 蒋学龙 责任编辑: 周玉荣)

附录 Supplementary Material

附录1 喀纳斯河谷红外相机调查兽类和鸟类物种名录

Appendix 1 List of mammal and bird species recorded by a camera-trapping survey in the Kanas River Valley
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020184-1.pdf>

附录2 喀纳斯河谷红外相机位点信息

Appendix 2 The locations of sampled camera traps in the Kanas River Valley
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020184-2.pdf>

附录3 喀纳斯河谷红外相机调查所得部分兽类和鸟类物种照片

Appendix 3 Photograph examples of mammal and bird species taken by camera traps in the Kanas River Valley
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020184-3.pdf>

附录 1 喀纳斯河谷红外相机调查兽类和鸟类物种名录

Appendix 1 List of mammal and bird species recorded by a camera-trapping survey in the Kanas River Valley

物种 Species	独立照片数 Number of independent photos	相对多度指数 Relative abundance index	拍摄位点数 Number of camera locations	中国脊椎动物红色名录 Red List of China's Vertebrates	保护级别 Protection level
哺乳纲 Mammalia					
I 食肉目 Carnivora					
1 犬科 Canidae					
(1) 狼 <i>Canis lupus</i>	10	0.083	8	NT	
(2) 赤狐 <i>Vulpes vulpes</i>	2	0.017	2	NT	
2 熊科 Ursidae					
(3) 棕熊 <i>Ursus arctos</i>	71	0.591	18	VU	II
3 鼬科 Mustelidae					
(4) 紫貂 <i>Martes zibellina</i>	83	0.691	24	VU	I
(5) 貂熊 <i>Gulo gulo</i>	18	0.150	7	EN	I
(6) 亚洲狗獾 <i>Meles leucurus</i>	4	0.033	4	NT	
II 偶蹄目 Artiodactyla					
4 猪科 Suidae					
(7) 野猪 <i>Sus scrofa</i>	2	0.017	1	LC	
5 鹿科 Cervidae					
(8) 马鹿 <i>Cervus canadensis</i>	1186	9.878	34	EN	II
(9) 狍 <i>Capreolus pygargus</i>	128	1.066	14	NT	
(10) 驼鹿 <i>Alces alces</i>	21	0.175	11	CR	II
III 啮齿目 Rodentia					
6 松鼠科 Sciuridae					
(11) 松鼠 <i>Sciurus vulgaris</i>	215	1.791	20	NT	
(12) 北花松鼠 <i>Tamias sibiricus</i>	13	0.108	2	LC	
(13) 小飞鼠 <i>Pteromys volans</i>	1	0.008	1	VU	
IV 兔形目 Lagomorpha					
7 鼠兔科 Ochotonidae					
(14) 高山鼠兔 <i>Ochotona alpina</i>	5	0.042	1	LC	
8 兔科 Leporidae					
(15) 雪兔 <i>Lepus timidus</i>	112	0.933	19	LC	II
鸟纲 Aves					
V 鸡形目 Galliformes					
9 雉科 Phasianidae					
(16) 花尾榛鸡 <i>Tetrastes bonasia</i>	2	0.017	2	LC	II
(17) 松鸡 <i>Tetrao urogallus</i>	1	0.008	1	EN	
(18) 黑琴鸡 <i>Lyrurus tetrix</i>	1	0.008	1	NT	II
VI 雁形目 Anseriformes					
10 鸭科 Anatidae					
(19) 豆雁 <i>Anser fabalis</i>	4	0.033	2	LC	
VII 鸽形目 Columbiformes					
11 鸠鸽科 Columbidae					
(20) 欧斑鸠 <i>Streptopelia turtur</i>	1	0.008	1	LC	
(21) 山斑鸠 <i>Streptopelia orientalis</i>	1	0.008	1	LC	
VIII 鸮形目 Charadriiformes					
12 鹑科 Scolopacidae					
(22) 丘鹑 <i>Scolopax rusticola</i>	1	0.008	1	LC	
IX 鸛形目 Ciconiiformes					
13 鸛科 Ciconiidae					
(23) 黑鸛 <i>Ciconia nigra</i>	1	0.008	1	VU	I
X 鹰形目 Accipitriformes					
14 鹰科 Accipitridae					
(24) 大鵟 <i>Buteo hemilasius</i>	1	0.008	1	VU	II
(25) 欧亚鵟 <i>Buteo buteo</i>	1	0.008	1	LC	II
(26) 棕尾鵟 <i>Buteo rufinus</i>	2	0.017	1	NT	II

崔绍朋, 陈代强, 王金宇, 孙吉舟, 初红军, 李春旺, 蒋志刚. 新疆阿尔泰山喀纳斯河谷鸟兽物种的红外相机监测. 生物多样性, 2020, 28 (4): 435–441. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020184>

物种 Species	独立照片数 Number of independent photos	相对多度指数 Relative abundance index	拍摄位点数 Number of camera locations	中国脊椎动物红色 名录 Red List of China's Vertebrates	保护级别 Protection level
(27) 苍鹰 <i>Accipiter gentilis</i>	1	0.008	1	NT	II
XI 鸮形目 Strigiformes					
15 鸮科 Strigidae					
(28) 长尾林鸮 <i>Strix uralensis</i>	1	0.008	1	NT	II
XII 鸢形目 Piciformes					
16 啄木鸟科 Picidae					
(29) 白背啄木鸟 <i>Dendrocopos leucotos</i>	1	0.008	1	LC	
(30) 三趾啄木鸟 <i>Picoides tridactylus</i>	1	0.008	1	LC	
XIII 雀形目 Passeriformes					
17 鸦科 Corvidae					
(31) 星鸦 <i>Nucifraga caryocatactes</i>	31	0.258	12	LC	
18 山雀科 Paridae					
(32) 沼泽山雀 <i>Poecile palustris</i>	1	0.008	1	LC	
(33) 煤山雀 <i>Periparus ater</i>	1	0.008	1	LC	
19 鹎科 Sittidae					
(34) 普通鹎 <i>Sitta europaea</i>	1	0.008	1	LC	
20 鸫科 Turdidae					
(35) 虎斑地鸫 <i>Zoothera aurea</i>	2	0.017	2	LC	
(36) 黑喉鸫 <i>Turdus atrogularis</i>	1	0.008	1	LC	
(37) 赤颈鸫 <i>Turdus ruficollis</i>	1	0.008	1	LC	
(38) 斑鸫 <i>Turdus eunomus</i>	1	0.008	1	LC	
(39) 槲鸫 <i>Turdus viscivorus</i>	1	0.008	1	LC	
21 鹟科 Muscicapidae					
(40) 黑喉石鹟 <i>Saxicola maurus</i>	7	0.058	1	LC	
(41) 新疆歌鹟 <i>Luscinia megarhynchos</i>	10	0.083	2	LC	
(42) 红胁蓝尾鸫 <i>Tarsiger cyanurus</i>	1	0.008	1	LC	
(43) 赭红尾鸫 <i>Phoenicurus ochruros</i>	1	0.008	1	LC	
(44) 红腹红尾鸫 <i>Phoenicurus erythrogastrus</i>	1	0.008	1	LC	
22 鹡鸰科 Motacillidae					
(45) 灰鹡鸰 <i>Motacilla cinerea</i>	4	0.033	1	LC	
(46) 林鹡鸰 <i>Anthus trivialis</i>	1	0.008	1	LC	
23 燕雀科 Fringillidae					
(47) 松雀 <i>Pinicola enucleator</i>	4	0.033	1	LC	
(48) 普通朱雀 <i>Carpodacus erythrinus</i>	2	0.017	1	LC	
(49) 白翅交嘴雀 <i>Loxia leucoptera</i>	1	0.008	1	LC	
(50) 红额金翅雀 <i>Carduelis carduelis</i>	1	0.008	1	LC	
(51) 红腹灰雀 <i>Pyrrhula pyrrhula</i>	1	0.008	1	LC	

濒危等级: CR、EN、VU、NT 和 LC 分别为中国脊椎动物红色名录中的极危、濒危、易危、近危和无危级别; 保护级别: I、II 分别代表国家 I、II 级重点保护野生动物。

附录 2 喀纳斯河谷红外相机位点信息

Appendix 2 The locations of sampled camera traps in the Kanas River Valley

相机编号 Camera ID	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	海拔 Altitude (m)	生境 Habitat	管护站 Protection station	累积工作日 Accumulated camera day (d)	有效照片数 Number of independent images	拍摄物种数 Captured species
J1	48° 53' 31"	87° 9' 43"	1,379	针叶林	湖头	352	81	12
J2	48° 53' 31"	87° 11' 00"	1,382	针阔混交林	湖头	353	96	10
J3	48°53'51"	87° 11' 25"	1,385	针叶林	湖头	131	27	4
J4	48°54'15"	87°11'45"	1,397	山地灌草丛	湖头	339	94	7
J5	48°54'36"	87°13'08"	1,401	针叶林	湖头	340	65	5
J6	48°55'11"	87°12'16"	1,440	山地灌草丛	湖头	94	4	1
J7	48° 54' 42"	87° 13' 30"	1,407	针阔混交林	湖头	601	111	12
J8	48°54'46"	87°14'53"	1,414	针叶林	湖头	408	35	3
J9	48° 55' 03"	87° 14' 28"	1,417	针阔混交林	湖头	106	18	3
J10	48° 55' 47"	87° 14' 08"	1,766	针阔混交林	湖头	106	11	3
J11	48° 55' 59"	87° 14' 45"	1,692	阔叶林	湖头	288	3	2
J12	48°55'20"	87° 15' 26"	1,435	针叶林	湖头	613	129	10
J13	48° 58' 19"	87° 18' 16"	1,482	针叶林	阿克吐鲁袞	638	135	13
J14	48° 58' 19"	87° 17' 43"	1,627	针阔混交林	阿克吐鲁袞	265	11	3
J15	48° 58' 08"	87° 16' 56"	2,098	针叶林	阿克吐鲁袞	285	12	3
J16	48° 59' 05"	87° 18' 59"	1,454	针叶林	阿克吐鲁袞	716	120	8
J17	48°59'11"	87°18'47"	1,578	针阔混交林	阿克吐鲁袞	516	48	8
J18	48° 59' 26"	87° 17' 47"	2,082	针叶林	阿克吐鲁袞	374	56	11
J19	49° 0' 22"	87° 19' 09"	2,056	高山草甸	阿克吐鲁袞	105	16	3
J20	49°0'18"	87°20'18"	1,525	针阔混交林	阿克吐鲁袞	330	30	6
J21	49°0'40"	87°21'09"	1,495	针阔混交林	阿克吐鲁袞	122	5	3
J22	49° 0' 51"	87° 22' 14"	1,532	针叶林	阿克吐鲁袞	605	51	8
J23	49° 1' 03"	87° 23' 02"	1,604	针叶林	阿克吐鲁袞	164	17	4
J24	49°1'30"	87°23'16"	1,976	针叶林	阿克吐鲁袞	102	15	3
J25	49°1'13"	87° 23' 56"	1,620	针叶林	阿克吐鲁袞	329	85	7
J26	49°1'38"	87°24'23"	2,145	针叶林	阿克吐鲁袞	112	15	3
J27	49° 1' 27"	87° 25' 05"	1,588	针叶林	阿克吐鲁袞	183	21	5
J28	49°1'45"	87° 25' 52"	1,623	针叶林	白湖	357	150	9
J29	49°1'54"	87°26'43"	1,644	针叶林	白湖	319	144	8
J30	49° 1' 50"	87° 27' 24"	1,685	针叶林	白湖	350	69	9
J31	49° 1' 58"	87° 28' 08"	1,703	针叶林	白湖	354	87	8
J32	49° 2' 53"	87° 30' 38"	1,785	山地灌草丛	白湖	365	49	9
J33	49° 3' 246"	87° 30' 37"	1,989	针叶林	白湖	721	50	11
J34	49°3'31"	87° 30' 28"	2,105	高山草甸	白湖	355	66	7
J35	49°3'43"	87° 31' 08"	2,040	高山草甸	白湖	307	7	4
J36	48° 55' 05"	87° 13' 38"	1,591	山地灌草丛	湖头	301	32	5

附录 3 喀纳斯河谷红外相机调查所得部分兽类和鸟类物种照片

Appendix 3 Photograph examples of mammal and bird species taken by camera traps in the Kanas River Valley



马鹿 *Cervus canadensis*



驼鹿 *Alces alces*



狍 *Capreolus pygargus*



棕熊 *Ursus arctos*



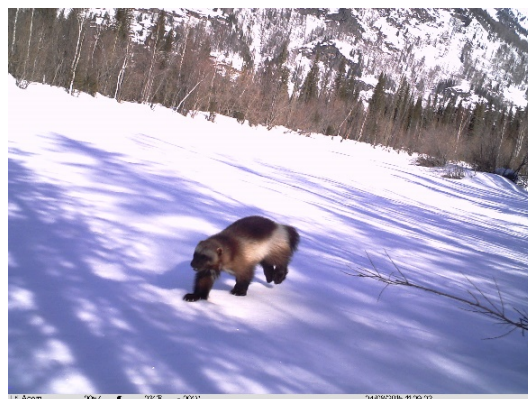
狼 *Canis lupus*



赤狐 *Vulpes vulpes*



紫貂 *Martes zibellina*



貂熊 *Gulo gulo*



黑鹳 *Ciconia nigra*



欧亚鵟 *Buteo buteo*



长尾林鸮 *Strix uralensis*



豆雁 *Anser fabalis*



• 论坛 •

阿尔泰山中蒙边境地区的雪豹及其保护意义

初雯雯¹ 蒋志刚^{2,4} 李凯¹ 胡德夫^{1*} 陈刚³ 初红军³

1 (北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083)

2 (中国科学院动物研究所, 北京 100101)

3 (新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区管理中心, 乌鲁木齐 830000)

4 (中国科学院大学生命科学学院, 北京 100049)

The snow leopard in Altai Mountains, near the Sino-Mongolia border, and its conservation significance

Wenwen Chu¹, Zhigang Jiang^{2,4}, Kai Li¹, Defu Hu^{1*}, Gang Chen³, Hongjun Chu³

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

2 Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

3 Management Center, Mt. Kalamaili Ungulate Nature Reserve, Urumqi 830000

4 College of Life Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

雪豹(*Panthera uncia*)是猫科豹亚科动物,生活在林线以上的高山带和亚高山带。据全球雪豹及其生态系统保护计划(Global Snow Leopard & Ecosystem Protection Program, GSLEP)估计,目前全球雪豹为4,000–6,500只,其分布跨越12个国家,分布面积约为180万km²,其中60%以上在中国(Snow Leopard Working Secretariat, 2013, <https://www.globalsnowleopard.org/>)。雪豹分布在高海拔陡峭偏远的山地环境,种群密度低(Xu et al, 2008),行踪诡秘,加之其烟灰色的花纹易于融入周围的裸岩环境,限制了雪豹研究的开展。

位于中国新疆北部的阿尔泰山脉是全球重要生态区“阿尔泰–萨彦生态区”的重要组成部分(<https://www.millenniumassessment.org/en/Multiscale.html>),也是具有全国性意义的陆地生物多样性关键地区。沿着海拔梯度,阿尔泰山跨越了温带荒漠、戈壁、低山丘陵、中山温带森林、亚高山针叶林(泰加林)、高山草甸和高山裸岩地带,是雪豹分布区的北界。

在新疆,雪豹主要分布在昆仑山山脉、天山山

脉和阿尔泰山山脉(马鸣, 2013)。近年来已在昆仑山脉、天山山脉发现了雪豹,但在中国境内的阿尔泰山区并未发现过雪豹实体(马鸣, 2013),仅在阿勒泰地区北塔山发现过两处雪豹抓痕(马鸣等, 2005)。尽管已发现北山羊(*Capra sibirica*)等在中蒙边界区域阿尔泰山低山乃至荒漠的小型山脉栖息,而北山羊是雪豹的主要食物,但对于这里雪豹种群状况的了解近乎空白。目前也仍不清楚雪豹在中国分布的北界具体在哪里。

1 雪豹在中国的分布北界

2013–2019年,我们在中国阿尔泰山开展了国家科技基础性专项“阿勒泰中俄哈蒙边境特有动物与动物地理区系考察”。在2013–2016年的野外监测中,在喀纳斯国家级自然保护区沿海拔梯度安放的红外相机没有拍摄到雪豹(崔绍朋等, 2020),在两河源国家级自然保护区的考察中也未发现雪豹。2016年4月到11月中旬,我们在位于阿尔泰山东部中蒙边境高山、亚高山和丘陵区的蒙其克、马哈萨提、萨尔布拉克以及喀拉加勒克布设了16台红外相机,

收稿日期: 2019-03-25; 接受日期: 2019-07-25

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0503303)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA23080101)、国家科技基础性专项(2013FY110300)和新疆国际科技合作项目(20136026-2)

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

监测以雪豹和北山羊为旗舰种的中蒙边境地区动物多样性。2016年9月30日,在阿尔泰山东部的喀拉加勒克(46°13'33" N, 90°52'9" E, 海拔1,497 m)拍摄到一只雪豹(图1)。这是首次在阿尔泰山中国一侧拍摄到雪豹清晰照片,也是雪豹在中国分布区的最北端拍摄到的雪豹。同时,在这里还拍摄到了北山羊,证实阿尔泰山东部中蒙边境亚高山和低山区是雪豹的重要栖息地,也是世界雪豹的西北分布区。



图1 在阿尔泰山东部中蒙边境喀拉加勒克首次拍摄到雪豹
Fig. 1 Snow leopard (*Panthera uncia*) first trapped by infrared camera at Kalajialeke in Altai Mountains, near the Sino-Mongolia border

2 物种分布区极点的意义

物种分布极点界定了物种的分布区(Hardie & Hutchings, 2010),对于生物地理学(Gaston, 2003)和红色名录研究中确定物种占有区(area of occupancy)和物种发生区(area of occurrence)具有重要意义(<https://www.iucnredlist.org>)。一个国家对其境内分布的濒危物种保护具有主体责任(蒋志刚等, 2020)。物种分布区极点范围内的生物地理因素影响物种分布区动态和物种形成,从而决定了针对该物种的保护对策。尽管我们尚不清楚雪豹分布区中环境、生态和进化因素是如何限制雪豹活动范围的,但由于国境边界线铁丝围栏的阻隔,该发现地点的雪豹种群是一个边缘种群。物种的边缘种群往往会偏离核心分布区,表现出较低的遗传多样性或更强的环境适应力。一个物种的边缘种群对于保护种内多样性可能具有特殊价值,同时也面临着较高的随机灭绝风险(Hardie & Hutchings, 2010)。

3 该分布点对雪豹保护的意義

该雪豹分布地点位于《保护野生动物迁徙物种

公约》(Convention on the Conservation of Migratory Species of Wild Animals)划定的中亚11号迁徙野生动物关键地点与关键迁徙通道——阿尔泰山地(<https://www.cms.int/en/document/mapping-transboundary-hotspots-central-asian-mammals-initiative>)位于中国-哈萨克斯坦-蒙古国-俄罗斯边境地区。包括中国新疆维吾尔自治区阿勒泰地区,哈萨克斯坦东部省雷蒙贝区,蒙古国Uvs和Bayan Ulgii Aimag,以及俄罗斯联邦阿尔泰共和国Kosh-Agach区、图瓦共和国的Buryatiya地区的阿尔泰山中部和东南部(47°41'–49°04' N, 87°24'–89°51' E)。除雪豹外,这一该发现地点列入《保护野生动物迁徙物种公约》附录的迁徙物种还有盘羊(*Ovis ammon*)。

《保护野生动物迁徙物种公约》估计哈萨克斯坦的雪豹数量不超过10只,俄罗斯阿尔泰-萨彦地区可能有70–90只。阿尔泰-萨彦地区仅发现分散的雄性雪豹,很少或没有繁殖的雌性雪豹(徐峰等, 2006),这里雪豹的生存依赖于生境连接性、种群扩散和重新定居的机会。位于我们此次雪豹发现地点西南的蒙古阿尔泰地区被认为是雪豹种群密度较高的地区(<https://www.cms.int/en/document/mapping-transboundary-hotspots-central-asian-mammals-initiative>)。

雪豹作为中亚山地的旗舰物种,其保护价值不言而喻。阿尔泰-萨彦地区特别是Saylyugem山脉及其国家公园对雪豹和盘羊具有重要的保护意义。该雪豹分布点及其种群构成了雪豹西北分布区的重要组成部分。然而,由于跨越4个国家,该关键地区雪豹种群受边界铁丝围栏和中国境内人类活动与放牧区的阻隔,与雪豹主要分布区的连通度差。边境围栏阻隔了雪豹及其主要食物盘羊的季节性迁徙,隔离了它们的生境甚至直接导致盘羊死亡。同时雪豹还面临盗猎压力。例如盗猎分子曾在盐池湾保护区盗猎雪豹,扒下毛皮后掩埋,巡山的森林公安仅发现了掩埋的胴体,因猫科动物形态相似而无法鉴定结案,最后利用特定的分子标记物才鉴定出被盗猎的是雪豹(Zhang et al, 2007),说明雪豹盗猎曾一度十分猖獗。此外,雪豹还面临分布区内牲畜数量增加、栖息地退化、潜在疾病传播、潜在的工业矿业发展以及人类与雪豹冲突等威胁(马鸣, 2013)。

放牧和农田耕作是导致雪豹栖息地丧失的主要原因(Jackson, 2014)。放牧也是影响雪豹栖息地选

择的主要因素之一,在牧区和非牧区两种生境中,雪豹倾向于在非牧区活动。在中蒙边境地区,除紧靠边境线的禁区外,其他区域均有放牧。一些牧场已开始耕作,并建成了“无鼠害示范区”,使得当地的自然生态系统产生了巨大变化(徐峰等,2006)。

《保护野生动物迁徙物种公约》倡议建立蒙古、俄罗斯、哈萨克斯坦和中国之间的阿尔泰跨界生物圈保护区,还建立了“中亚迁徙物种保护倡议”(Central Asia Migratory Species Initiative, CAMI)国家合作架构,开展跨界迁徙物种保护学术交流。该倡议提出在跨界迁徙野生动物热点地区开展详细考察,确定阿尔泰山野生动物迁徙国际通道范围;加强跨境合作,保护跨国迁徙动物;拆除或降低边境地区关键地点的边界围栏;管理家畜放牧;加大反偷猎力度;修订盘羊战利品狩猎(Trophy Hunting)方案,以确保当地社区有效参与跨国迁徙动物保护,直接造福当地社区和自然保育。

保护雪豹这一大型迁徙物种需要全球行动,大部分保护机构仅有能力在特定地理范围或特定种群层面上开展工作,而物种的灭绝风险却是在全球尺度进行评估的。因此,要填补这一尺度断层,有必要汇总各方面的工作,加强各个雪豹种群与栖息地保护(李小雨等,2019)。建议持续开展监测,以明晰该区域雪豹种群现状及动态变化。同时,通过与蒙古国雪豹研究团队进行交流,必要时开展跨国界的联合调查,查明我国境内阿尔泰山尤其是中蒙边境区域雪豹的生存现状和濒危原因,以期逐步恢复阿尔泰山的雪豹种群。

致谢: 端肖楠、吴兵、任松柏、甄荣、杜聪聪、阿依丁、蒙克、白硕、蒋新春、李斌等参加野外数据收集工作,新疆布尔根河狸国家级自然保护区管理局马尔哈别克、毛玉平和金格斯等给予大力支持与帮助,谨致衷心感谢!

参考文献

Cui SP, Chen DQ, Wang JY, Sun JZ, Chu HJ, Li CW, Jiang ZG (2020) Camera-trapping survey of mammals and birds in Kanas River Valley of Altai Mountains, Xinjiang. *Biodiversity Science*, 28, 435–441. (in Chinese with English abstract) [崔绍朋, 陈代强, 王金宇, 孙吉舟, 初红军, 李春旺, 蒋志刚 (2020) 新疆阿尔泰山喀纳斯河谷鸟兽物

种的红外相机监测. *生物多样性*, 28, 435–441.]

- Gaston KJ (2003) *The Structure and Dynamics of Geographic Ranges*. Oxford University Press, Oxford and New York.
- Hardie DC, Hutchings JA (2010) Evolutionary ecology at the extremes of species' ranges. *Environmental Reviews*, 18, 1–20.
- Jackson R, Mallon D, Mishra C, Noras S, Sharma R, Suryawanshi K (2014) *Snow Leopard Survival Strategy*. Snow Leopard Network, Seattle.
- Jiang ZG, Jiang JP, Wang YZ, Zhang E, Zhang YY, Cai B (2020) Significance of the country red lists of endangered species for biodiversity conservation. *Biodiversity Science*, 28, 10.17520/biods.2020149. (in Chinese with English abstract) [蒋志刚, 江建平, 王跃招, 张鸷, 张雁云, 蔡波 (2020) 国家濒危物种红色名录的生物多样性保护意义. *生物多样性*, 28, 10.17520/biods.2020149.]
- Li XY, Xiao LY, Liang XC, Cheng C, Feng C, Zhao X, Liu YL, Bian XX, He B, Zhang CZ, Alexander JS, Xing R, Huang YH, Awangjiumei, Xierannima, Song DZ, Huang QW, Zhaxisange, Peng K, Yin H, Lian XM, Yang X, Li S, Shi XG, Yang CM, Lü Z (2019) Ongoing threats and the current status of snow leopard conservation in China. *Biodiversity Science*, 27, 932–942. (in Chinese with English abstract) [李小雨, 肖凌云, 梁旭昶, 程琛, 冯琛, 赵翔, 刘炎林, 卞晓星, 何兵, 张常智, Alexander JS, 邢睿, 黄亚慧, 阿旺久美, 谢然尼玛, 宋大昭, 黄巧雯, 扎西桑俄, 彭奎, 尹杭, 连新明, 杨欣, 李晟, 施小刚, 杨创明, 吕植 (2019) 中国雪豹的威胁与保护现状. *生物多样性*, 27, 932–942.]
- Ma M (2013) *Snow Leopards in Xinjiang*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [马鸣 (2013) 新疆雪豹. 科学出版社, 北京.]
- Ma M, Munkhtsog B, Xu F, Mardan T, Yin SJ, Wei SD (2005) Markings as indicator of snow leopard in field survey, Xinjiang. *Chinese Journal of Zoology*, 40(4), 34–39. (in Chinese with English abstract) [马鸣, Munkhtsog B, 徐峰, 买尔旦, 殷守敬, 魏顺德 (2005) 新疆雪豹调查中的痕迹分析. *动物学杂志*, 40(4), 34–39.]
- Xu A, Jiang Z, Li C, Guo J, Da S, Cui Q, Yu S, Wu G (2008) Status and conservation of snow leopard in East Burhanbuda Mountain, Kunlun Mountains, China. *Oryx*, 42, 460–463.
- Xu F, Ma M, Yin SJ, Munkhtsog B (2006) Autumn habitat selection by snow leopard (*Uncia uncia*) in Beita Mountain, Xinjiang, China. *Zoological Research*, 27, 221–224. (in Chinese with English abstract) [徐峰, 马鸣, 殷守敬, Munkhtsog B (2006) 新疆北塔山雪豹对秋季栖息地的选择. *动物学研究*, 27, 221–224.]
- Zhang F, Jiang Z, Zeng Y, McCarthy T (2007) Development of primers to characterize the mitochondrial control region of snow leopard (*Uncia uncia*). *Molecular Ecology Notes*, 7, 1196–1198.

(责任编辑: 吕植 责任编辑: 周玉荣)



•研究报告•

哀牢山亚热带中山湿性常绿阔叶林树种 beta多样性格局形成的驱动力

姚志良^{1,2} 温韩东^{1,3} 邓云^{1,2,4} 曹敏¹ 林露湘^{1,4*}

1 (中国科学院西双版纳热带植物园热带森林生态学重点实验室, 昆明 650223)

2 (中国科学院大学, 北京 100049)

3 (中国科学院哀牢山亚热带森林生态系统研究站, 云南景东 676209)

4 (中国科学院西双版纳热带雨林生态系统研究站, 云南勐腊 666303)

摘要: Beta多样性通常指群落在时间和空间上物种组成的差异, 包括物种周转组分和物种丰富度差异组分。驱动beta多样性格局形成的生态过程决定了群落的时空动态, 然而关于beta多样性及其两个组分格局形成的驱动力还存在较多争议。以往研究表明, beta多样性的格局存在取样尺度的依赖性, 驱动其形成的生态过程在不同取样尺度下的相对重要性也随之改变。本研究以哀牢山亚热带中山湿性常绿阔叶林20 ha动态监测样地为研究对象, 在不同取样尺度上, 将样方间的Bray-Curtis指数分解为物种周转组分和物种丰富度差异组分, 通过典范冗余分析和方差分解的方法揭示环境过滤和扩散限制对于beta多样性及其两个组分格局形成的相对重要性及其尺度依赖性。结果表明: (1) beta多样性、物种周转组分和物种丰富度差异组分均随取样尺度的增大而减小。在不同取样尺度下, 物种周转组分对于beta多样性的贡献始终占主导地位。(2)随着取样尺度的增大, 环境过滤驱动beta多样性格局形成的相对重要性逐渐增加, 而扩散限制的相对重要性逐渐降低。本研究进一步证实了取样尺度在beta多样性格局形成及其驱动力定量评价中的重要性, 今后的研究需要进一步解析上述尺度效应的形成机制。

关键词: 群落组成; beta多样性组分; 方差分解; 环境过滤; 扩散限制; 哀牢山

Driving forces underlying the beta diversity of tree species in subtropical mid-mountain moist evergreen broad-leaved forests in Ailao Mountains

Zhiliang Yao^{1,2}, Handong Wen^{1,3}, Yun Deng^{1,2,4}, Min Cao¹, Luxiang Lin^{1,4*}

1 CAS Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Ailaoshan Station for Subtropical Forest Ecosystem Studies, Chinese Academy of Sciences, Jingdong, Yunnan 676209

4 Xishuangbanna Station for Tropical Rainforest Ecosystem Studies, Chinese Academy of Sciences, Mengla, Yunnan 666303

Abstract: Beta diversity refers to species composition variation among communities across temporal and spatial scales. Beta diversity includes species turnover and species richness differences between communities. The ecological processes that drive beta diversity patterns are determined by spatio-temporal dynamics of communities. However, the driving forces that form beta diversity and its components patterns are still controversial. Previous studies have shown that beta diversity patterns are scale-dependent as are the relative importance of underlying ecological processes. In this study, the beta diversity of tree species in the 20 ha subtropical mid-mountain moist evergreen broad-leaved forest dynamics plot in Ailao Mountains was studied. Across different spatial scales, the Bray-Curtis indices among quadrat pairs were partitioned into species turnover components and species richness components. The relative importance of scale dependent environmental filtering and dispersal limitation on beta diversity were analyzed by using a redundancy

收稿日期: 2019-11-07; 接受日期: 2019-12-03

基金项目: 中国科学院西双版纳热带植物园“一三五”专项重大突破项目(2017XTBG-T01)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: linluxa@xtbg.ac.cn

analysis and variation partitioning analysis. Our results showed that: (1) Beta diversity and its components decreased with increasing scale. The pairwise difference in species composition between quadrats was dominated by species turnover components at all scales. (2) With increasing scale, the relative importance of environment filtering on beta diversity gradually increased, while the relative importance of dispersal limitation gradually decreased. This study confirmed the importance of spatial scale on beta diversity pattern and the quantitative assessment of its driving forces. Future research should focus more on examining the mechanism of the scale effects on beta diversity and its underlying driving forces.

Key words: community composition; beta-diversity component; variation partitioning; environment filtering; dispersal limitation; Ailao Mountains

Whittaker (1960)最早提出了beta多样性的概念,将其定义为群落间物种组成的差异。半个多世纪以来, beta多样性一直是生态学的研究热点(Anderson et al, 2010; 陈圣宾等, 2010; Legendre & De Cáceres, 2013)。Beta多样性是连接alpha多样性和gamma多样性的桥梁(Lande, 1996; Jost, 2006), 通过解析驱动beta多样性格局形成的生态过程可以为探讨群落构建机制提供新的视角, 但目前对于beta多样性格局的形成机制依然存在争议(Hubbell, 2001; Condit et al, 2002)。

目前对beta多样性的度量方法主要包括倍性分配(multiplicative partitioning) (Whittaker, 1960)、加性分配(additive partitioning) (Lande, 1996)和相似性(或非相似性)指数(Magurran, 1988)。广义的beta多样性是指不同群落间的物种组成差异, 常用非相似性指数度量(如Jaccard或Sørensen指数), 但这些指数都会受到不同群落间物种丰富度的影响(Ellison, 2010)。实际上, beta多样性格局来源于物种的替换和物种的丧失或增加这两个不同的方面(Harrison et al, 1992; Williams, 1996; Lennon et al, 2001)。物种的替换会导致不同群落间共有物种数量的下降, 导致各自独有的物种数量上升; 物种的丧失或增加会导致不同群落间的物种丰富度产生差异。这两个方面共同导致了群落间的物种组成差异(Baselga, 2010; Podani & Schmera, 2011)。因此, 可以将beta多样性分解为物种周转组分和物种丰富度差异组分的加和形式(例如Baselga, 2010, 2017; Podani et al, 2013)。这两个不同的组分均可能由多个生态过程共同驱动产生, 并可能存在某个生态过程作为主要驱动力, 两个组分对于beta多样性形成的相对贡献通常也不一样(Tonkin et al, 2016; 斯幸峰等, 2017)。将beta多样性分解为上述两个组分并解析其背后的驱动力可以帮助我们更深入地探讨群落构建机制, 同

时还可以指导生物多样性保护策略的制定。例如, 当物种丰富度差异组分主导beta多样性时, 重点要保护物种丰富度较高的区域, 而以物种周转组分为主时, 则需要保护更广泛的区域(Gianuca et al, 2017)。

已有的研究普遍认为, 环境过滤和扩散限制共同驱动beta多样性的形成, 只是这两类过程的相对重要性在不同研究尺度或研究对象上存在着差异(陈圣宾等, 2010; Myers et al, 2013)。在区域尺度上, 由于地质历史、进化历史和环境变迁的不同, 不同区域之间的物种库大小存在差异, 从而造成区域间物种组成的差异(Zobel, 1997; 方精云等, 2009)。另外, 区域尺度上的环境因子(尤其是气候变量)在塑造区域物种丰富度上有着重要作用, 从而影响着区域间的物种组成差异(Tuomisto et al, 2003; Toledo et al, 2011)。在局域尺度上, 土壤养分和地形等环境因子的异质性塑造了物种环境生态位空间, 决定了物种在局域群落中的配置, 进而驱动了局域尺度上群落物种组成的空间变化(Chase & Myers, 2011)。扩散限制在局域尺度上对于群落的物种组成也有普遍的影响, 不同物种扩散能力的强弱会影响物种的空间分布格局, 进而影响群落的物种组成(Levine & Murrell, 2003; Seidler & Plotkin, 2006)。驱动局域尺度beta多样性格局形成的生态过程具有显著的取样尺度依赖性, 即随着取样尺度的增加, 环境过滤的作用逐渐增强, 而扩散限制的作用逐渐降低(Tuomisto et al, 2003; Legendre, 2009; Bin et al, 2010)。然而, 环境过滤和扩散限制的相对重要性在不同生态系统中可能存在较大差异。例如, Myers等(2013)发现热带森林的物种组成差异很大程度上是扩散限制驱动的, 而在温带森林中, 环境过滤是最重要的驱动力。

驱动beta多样性两个组分格局形成的作用力鲜

有研究报道。研究表明,在区域尺度上,由于物种的长期进化过程,地理隔离是导致物种周转的主要原因(McKnight et al, 2007; Leprieur et al, 2011)。选择性灭绝、地质历史事件则是物种丰富度差异组分的主要驱动力(Ulrich et al, 2009; Ponisio et al, 2016)。在局域尺度上,群落间的物种周转通常是由于扩散限制和环境过滤等生态过程共同驱动的。群落间的物种丰富度差异一般是由区域环境梯度上的生境过滤所驱动,例如在同一区域中,环境条件较恶劣时的群落物种组成可能是环境条件较优越时的群落物种组成的嵌套子集(Greve et al, 2005; Chase, 2007; Wang et al, 2018)。将beta多样性分解为物种周转组分和物种丰富度差异组分并探寻其形成机制的研究主要集中在较大的区域尺度上(例如 Svenning et al, 2011; Dobrovolski et al, 2012)。然而,对于在较小的局域尺度上驱动物种周转组分和物种丰富度差异组分格局形成的生态过程及其相对重要性还知之甚少(Wang et al, 2018)。

本研究以云南哀牢山亚热带中山湿性常绿阔叶林20 ha动态监测样地(以下简称哀牢山大样地)为研究平台,在不同取样尺度上,探究驱动beta多样性及其两个组分格局形成的驱动力,通过典范冗余分析和方差分解的方法揭示环境过滤和扩散限制在驱动群落间的物种组成差异、物种周转组分和物种丰富度差异组分格局形成中的相对重要性,从而探究亚热带常绿阔叶林的群落构建机制。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

哀牢山大样地位于云南省中部哀牢山北段徐家坝地区,属于哀牢山国家级自然保护区范围。由于青藏高原的隆起阻挡了干热的环流西风,同时加强了东亚季风对这一地区的影响,特别是东南季风和西南季风在这里交汇,使得该地区降雨充沛,发育了湿润性的常绿阔叶林(邱学忠和谢寿昌, 1998)。该区属于西南季风气候,旱季(11月至翌年4月)、雨季(5–10月)分明。年平均气温11.3℃。该区亚热带中山湿性常绿阔叶林保存完好,乔木层的主要优势种为壳斗科的硬斗柯(*Lithocarpus hancei*)、木果柯(*Lithocarpus xylocarpus*),山茶科的南洋木荷(*Schima noronhae*)、舟柄茶(*Hartia sinensis*)、蒙自连蕊茶(*Camellia forrestii*),樟科的黄心树(*Machilus*

bombycina)、黄丹木姜子(*Litsea elongata*),木兰科的红花木莲(*Manglietia insignis*)、多花含笑(*Michelia floribunda*)等(邱学忠和谢寿昌, 1998)。

1.2 样地概述

哀牢山大样地原点的地理位置为101°01'35" E, 24°32'20" N。样地面积为20 ha, X轴长500 m, Y轴长400 m, X轴指向为南偏东6.37°(图1)。样地内20 m桩的最低海拔为2,472 m, 最高海拔为2,628 m, 海拔高差156 m。土壤类型为山地黄棕壤, 土壤有机质含量高, 含氮量丰富, 土壤偏酸性(温韩东等, 2018)。哀牢山大样地的建设参照了美国史密森热带研究所热带森林科学中心(Center for Tropical Forest Science, CTFS)的样地建设标准(Condit, 1998)。用全站仪将整个样地划分为500个20 m × 20 m的样方, 每个样方又分为16个5 m × 5 m的小样方。对样方中所有胸径(DBH) ≥ 1 cm的木本植物个体及其分枝进行胸径测量、挂牌标记、定位和鉴定等。样地内共有44,168株DBH ≥ 1 cm的木本植物个体, 隶属于36科63属104种, 其中未鉴定到种水平的个体有7个(包括1个未鉴定个体)(温韩东等, 2018)。样地内物种数最多的前5个科依次是蔷薇科、樟科、杜鹃花科、

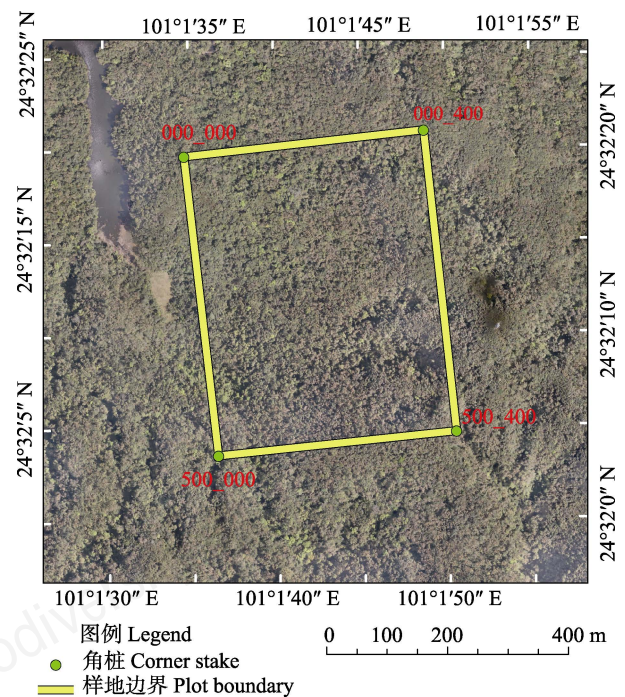


图1 哀牢山亚热带中山湿性常绿阔叶林20 ha动态监测样地示意图

Fig. 1 Diagrammatic of the 20 ha subtropical mid-mountain moist evergreen broad-leaved forest dynamics plot in Ailao Mountains

壳斗科和冬青科。

1.3 环境因子与空间结构变量

将哀牢山大样地分别划分为2,000个10 m × 10 m, 500个20 m × 20 m, 80个50 m × 50 m和20个100 m × 100 m的样方。本研究的环境因子包括土壤因子和地形因子, 分别获取上述不同取样尺度样方的各土壤因子和地形因子的取值。

土壤因子在哀牢山大样地内采用标准的地统计学方法采集。共在756个取样点取样, 将新鲜土样装入自封袋内带回实验室进行土壤理化性质测定。共测定21个理化性质指标: 土壤容重、含水量、pH值、全碳、全氮、有机碳、全磷、全钾、水解性氮、有效磷、速效钾、交换性钾、交换性钠、交换性钙、交换性镁、交换性铝、有效铁、有效铜、有效锌、有效锰、有效硼。各取样尺度样方的土壤理化性质指标的取值采用基于半变异函数的普通Kriging法进行插值得到(Cressie, 1990; Diggle et al, 1998)。采用球形模型和加权最小二乘法拟合出最佳半变异函数曲线, 进而得到每个样方内的各土壤因子的预测值。该方法采用R软件并结合gstat程序包(Pebesma, 2004)实现。

地形因子包括海拔、坡度、坡向和凹凸度。在每个样方中, 用样方4个顶点处海拔的平均值作为该样方的海拔; 以目标样方的任意三个角构成的平面与水平面夹角的平均值作为该样方的坡度; 目标样方的海拔减去其周围8个样方的平均海拔作为该样方的凹凸度, 位于样地边缘或四角的样方, 其凹凸度值则由该样方的海拔减去与其邻接的若干个样方的平均海拔获得(Harms et al, 2001; Valencia et al, 2004)。坡向(Asspect)采用如下公式计算:

$$\text{Aspect} = 180 - \arctan(fy/fx) \times (180/3.14) + 90 \times (fx/|fx|) \quad (1)$$

式中, f_x 和 f_y 分别是该样方从东到西和从北到南的海拔差。坡向是范围为 $[0, 2\pi]$ 的环形变量, 因此需要对它做正弦和余弦转化, 变成线性变量纳入后续分析中。

为了降低土壤因子和地形因子之间的共线性关系, 将土壤因子和地形因子标准化之后进行主成分分析(principal components analysis, PCA)。根据Kaiser-Guttman准则来选择进入后续分析的主成分, 即先计算所有轴的特征根平均值, 然后选择特征根超过平均值的主成分作为进入后续分析的主成分

(Jackson, 1993)。

空间结构在群落生态学研究中有至关重要的作用, 它可以由多个生态过程共同决定。一般有两个来源: 其一是群落环境条件自身的空间结构性和物种的生境关联特征共同导致了群落物种组成的空间结构; 其二是群落物种本身的空间结构性, 特别是扩散限制产生的物种分布格局常具有显著的空间结构(Hubbell, 2001)。本文中的空间结构变量使用基于距离的莫兰特征向量图(distance-based Moran's eigenvector maps, dbMEM)表示, 该方法之前被称为邻体矩阵主坐标分析(principal coordinate of neighbour matrix, PCNM) (Borcard & Legendre, 2002)。它可以有效地获得不同取样尺度下样方间的空间结构, 常用于分析群落空间变化的解释变量(Borcard et al, 2004; Dray et al, 2006; Smith & Lundholm, 2010)。在每个取样尺度下, 以各样方的中心坐标作为样方位置计算欧式距离矩阵, 最后计算得到每个取样尺度下的空间结构变量(Legendre et al, 2009; De Cáceres et al, 2012)。

1.4 beta多样性及其两个组分的计算

为探究beta多样性及其两个组分格局形成的驱动力, 需要选取合适的beta多样性并将其分解为两个组分的加和形式。本文采用基于多度的Sørensen指数(又称Bray-Curtis指数)作为配对样方之间beta多样性的度量, 通过Podani和Schmera (2011)、Carvalho等(2012)提出的beta多样性分解方法, 并结合Legendre (2014)对该方法的改进, 将beta多样性(即群落间的物种组成非相似性, 用Btotal表示)分解为物种周转组分(用Repl表示)和物种丰富度差异组分(用AbDiff表示), 具体计算公式如下:

$$B_{\text{total}} = (B + C)/(2A + B + C) \quad (2)$$

$$Repl = 2\min(B, C)/(2A + B + C) \quad (3)$$

$$AbDiff = |B - C|/(2A + B + C) \quad (4)$$

式中, A 表示两个配对样方中每个物种在两个样方间的最小多度的总和; B 表示两个配对样方中样方1的总多度减去 A 的差; C 表示样方2的总多度减去 A 的差。本文采用R软件的adespatial程序包(Dray et al, 2017)中的beta.div.comp函数来实现beta多样性分解。

1.5 beta多样性及其两个组分的冗余分析和方差分解

本文采用基于距离的冗余分析(distance-based redundancy analysis, dbRDA)来探究beta多样性及其

组分的影响因素,并通过方差分解分析其相对重要性。dbRDA方法的优点在于它可以用方差分析的方式分析广义形式的距离矩阵,但对不具有欧式属性的距离矩阵进行分析时,该方法存在缺陷(Legendre & Anderson, 1999)。McArdle和Anderson (2001)改进了该方法,使其适用于非欧氏距离矩阵。本研究中的物种丰富度差异组分是具有欧式属性的距离矩阵,而beta多样性和物种周转组分是非欧式属性的距离矩阵,故采用改进后的dbRDA方法进行方差分解分析。dbRDA方法通过R软件的vegan程序包(Oksanen et al, 2017)中的dbrda函数实现。在进行方差分解之前,需要对得到的模型进行变量筛选,消除冗余性以得到简约的模型,dbRDA分析的变量筛选操作可以通过vegan程序包(Oksanen et al, 2017)的ordistep函数实现。筛选后对响应变量有显著影响的环境因子和空间结构变量即可纳入模型进行方差分解分析。

方差分解分析中,响应变量是beta多样性、物种周转组分、物种丰富度差异组分三个不同的距离矩阵,解释变量分为两部分,一部分是显著的环境因子变量,另一部分是显著的空间结构变量。方差分解分别将beta多样性及其两个组分的总变异分为4个部分:(a)单纯的环境变异;(b)环境的空间结构;(c)单纯的空间结构;(d)未明确的部分。其中,单纯的环境变异和环境的空间结构(a + b)与环境过滤有关;单纯的空间结构(c)与扩散限制有关。值得注意的是,一些未观测到的具有空间结构的环境变量和群落动态的空间结构效应对单纯的空间结构部分有一定的贡献(Jones et al, 2008; Legendre et al, 2009)。为探讨不同取样尺度下环境因子与空间结构变量对于beta多样性及其两个组分的相对作用,在每个取样尺度都分别对beta多样性及其两个组分进行方差分解。方差分解分析可以通过vegan程序包(Oksanen et al, 2017)的varpart函数实现。

2 结果

2.1 beta多样性及其两个组分的贡献

随着取样尺度的增大,配对样方间的物种相似性(1减去样方间的物种组成非相似性,即 $1 - B_{total}$)均值也随之增大,即beta多样性随着取样尺度的增大而减小;同样地,物种周转组分和物种丰富度差

异组分也都随着取样尺度的增大而减小(图2)。不同取样尺度的物种周转组分和物种丰富度差异组分对于beta多样性的贡献,都是物种周转组分占主导地位。以20 m取样尺度为例,总共有124,750对配对样方,配对样方间的beta多样性(B_{total} , mean = 0.632, SD = 0.133)主要由物种周转组分(Repl, mean = 0.408, SD = 0.156)贡献,占比达64.6%,相比之下,物种丰富度差异组分(AbDiff, mean = 0.224, SD = 0.168)对beta多样性的占比为35.4% (图2B)。物种周转组分在beta多样性中的占比随着取样尺度的增加而逐渐增加;相反,物种丰富度差异组分在beta多样性中的占比随取样尺度的增加而逐渐减小(图3)。

2.2 beta多样性及其两个组分的驱动力

方差分解的结果反映了环境因子和空间结构对于beta多样性、物种周转组分和物种丰富度差异组分的相对作用(图4)。对于beta多样性,环境的空间结构和单纯的空间结构解释了大部分变异,而单纯的环境变异对于beta多样性的解释率不高,仅在较大的取样尺度上解释了小部分。各部分变异对于beta多样性的解释率与取样尺度有明显的关系,环境的空间结构部分对于beta多样性的解释率随着取样尺度的增大而增大,而单纯的空间结构对于beta多样性的解释率随着取样尺度的增大而呈现减小的趋势(图4A)。同样地,对于物种周转组分,环境的空间结构和单纯的空间结构解释了大部分变异,而单纯的环境变异仅在50 m取样尺度上解释了小部分变异,环境的空间结构和单纯的空间结构的解释率也与取样尺度有明显的关系(图4B)。对于物种丰富度差异组分,主要能解释该组分的是单纯的空间结构,且该解释率随着取样尺度的增大而减小。单纯的环境变异在50 m取样尺度上有一定解释率,而环境的空间结构在其余取样尺度上有一定的解释率(图4C)。

3 讨论

3.1 beta多样性及其两个组分的取样尺度依赖性

本研究发现,在不同取样尺度下,哀牢山中山湿性常绿阔叶林树种beta多样性的两个组分中,物种周转组分都占据大部分比例,这表明该区域树种beta多样性是由物种周转组分所主导的,即样方之

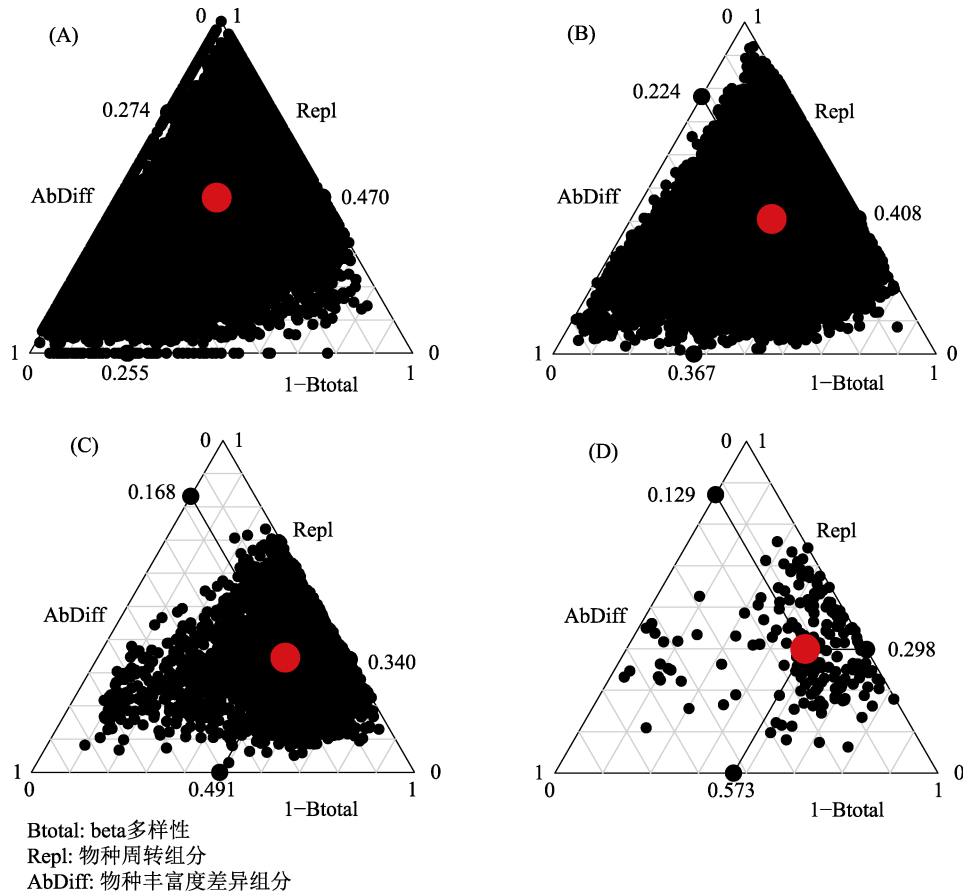


图2 不同取样尺度下的beta多样性及其两个组分的三元图。每一个黑点表示一个样方对，它们的位置由物种组成相似性(1-Btotal)、物种周转组分(Repl)、物种丰富度差异组分(AbDiff)三个值决定，三个值之和等于1；大圆点表示这些黑点的质心，较大的黑点表示三个组分的平均值；A, B, C, D分别表示10 m、20 m、50 m、100 m取样尺度下的组分关系。

Fig. 2 Triangular plots of beta diversity and its two components at different cell sizes. Each black dot represents a pair of sites. Their positions were determined by a triplet of values from the species composition similarity (1-Btotal), species turnover component (Repl), species richness difference component (AbDiff); each triplet sums to 1. The large circular dot in each graph is the centroid of the points; the larger black dots represent the mean values of the 1-Btotal, Repl, and AbDiff components; A, B, C, and D represent the relationships of three components at 10 m, 20 m, 50 m, 100 m cell sizes, respectively.

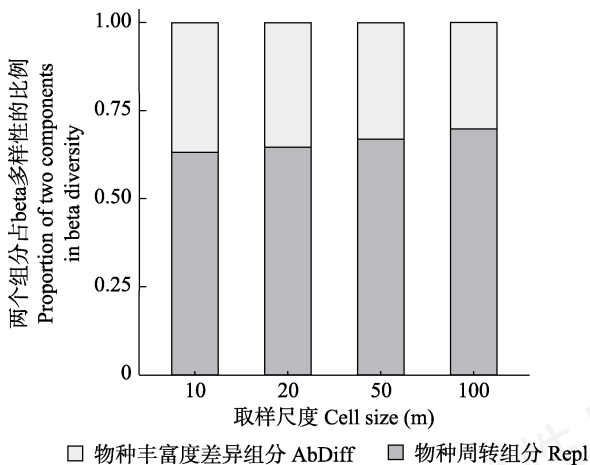


图3 不同取样尺度下两个组分占beta多样性的比例

Fig. 3 The proportion of two components in beta diversity at different cell sizes. AbDiff, Species richness difference component; Repl, Species turnover component.

间的物种组成差异主要来源于样方之间的物种替换，且样方之间没有很大程度的物种丢失或增加，样方之间的物种丰富度变化相对较小。以往的很多研究也得到过类似的结果(Tisseuil et al, 2012; Viana et al, 2016; Guo et al, 2018; Sojininen et al, 2018; Wang et al, 2018)。Sojininen等(2018)通过整合从细菌到哺乳动物的不同生物类群关于beta多样性的研究案例，并采用meta分析得出，在不同生态系统，不同生物类群的物种周转组分通常是beta多样性的最大组分。哀牢山中山湿性常绿阔叶林树种beta多样性及其两个组分的大小表现出取样尺度依赖性，取样尺度越大，beta多样性及其组分的均值就越小。这与之前的很多研究结果相似，即在特定的研究范围内，beta多样性会随着取样尺度的增大而单调减少

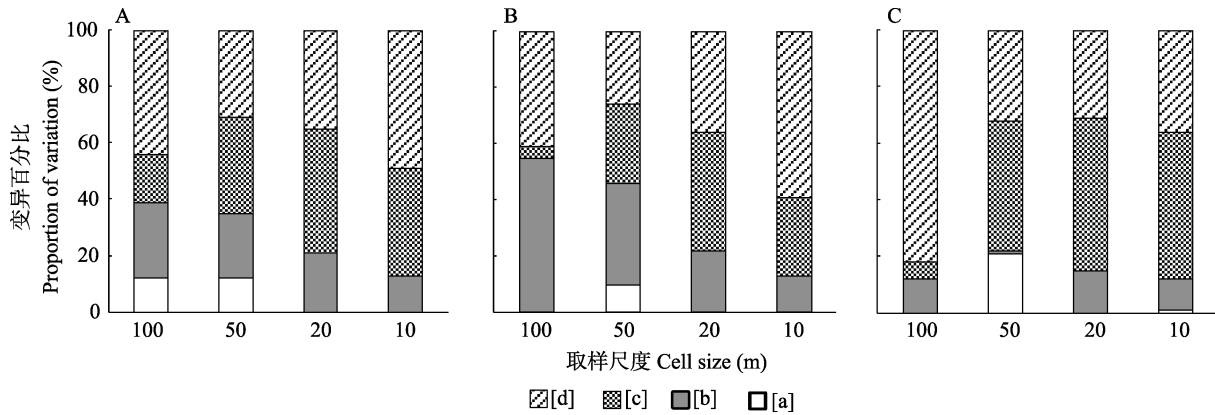


图4 beta多样性及其组分在不同取样尺度下的方差分解结果。A、B、C分别表示beta多样性、物种周转组分、物种丰富度差异组分在不同取样尺度下的方差分解结果; [a]单纯的环境变异; [b]环境的空间结构; [c]单纯的空间结构; [d]未明确的部分。

Fig. 4 Variation partitioning results of beta diversity and its components at different cell sizes. A, B, and C represent the variation partitioning results of total beta diversity, species replacement component, richness difference component at different cell sizes, respectively; [a] Pure environment variation; [b] Spatially structured of environment; [c] Pure spatially structured variation; [d] Unexplained variation.

(De Cáceres et al, 2012; Barton et al, 2013; Guo et al, 2018)。上述现象的可能原因是不同的取样尺度具有不同的环境异质性和扩散限制格局,从而影响着群落物种组成(Nekola & White, 1999; Steinbauer et al, 2012)。这说明环境异质性和扩散限制对群落物种组成的相对作用具有取样尺度依赖性。

另一方面,两个组分对于beta多样性的相对贡献也具有取样尺度依赖性:物种周转组分的相对贡献随着取样尺度的增大而增大;物种丰富度差异组分则相反,但变化的幅度不是很明显(图3)。这可能是由于尺度的增大产生了更长的扩散距离和更大差异的环境梯度(Heino et al, 2015)。但由于本研究只是在局域范围上对两个组分的相对大小进行比较,取样尺度所产生的变化还不足以推广到更大的尺度,两个组分对于beta多样性的相对贡献的尺度依赖性还需要更进一步探讨其背后的机制。

3.2 驱动beta多样性及其两个组分形成的生态过程及其尺度依赖性

以往的很多关于beta多样性格局形成的驱动力分析都只聚焦于beta多样性本身,而不区分形成beta多样性的两个来源。本研究将形成beta多样性的两个来源进行分解,并且探讨环境过滤和扩散限制对它们的作用,更加全面地揭示群落间物种组成差异格局形成的潜在机制。方差分解的结果表明,beta多样性、物种周转组分、物种丰富度差异组分的绝大部分变异都由环境的空间结构和单纯的空间结构解释(图4)。在较小的取样尺度上,单纯的空间结

构的解释率在已知的因子中总是最高的(图4)。因此在较小取样尺度上,单纯的空间结构是塑造哀牢山亚热带常绿阔叶林树种beta多样性格局的主要动因,这可能是由扩散限制等中性过程和一些未观测到的具有空间结构的环境因子造成的(Jones et al, 2008; Legendre et al, 2009)。扩散限制可能在较小取样尺度下对beta多样性格局形成有着重要的驱动作用。

环境的空间结构相比于单纯的环境变异解释率更高,表明土壤因子和地形因子具有一定的空间结构特性,这与哀牢山大样地复杂的地形和土壤因子的空间异质性紧密关联,尤其是在较小的取样尺度上更为明显。另外,在beta多样性和物种周转组分的方差分解中,各取样尺度下,有相当一部分的变异未被已知的因子解释([d]部分,约为26%–59%),该部分可能包含了一些未在本研究中观测到的非空间结构属性的生物与非生物因子。本研究还发现,在100 m取样尺度上,对于beta多样性和物种周转组分,单纯的环境变异和环境的空间结构的解释率之和已经超过了单纯的空间结构的解释率,这说明了环境过滤在较大取样尺度上的重要性。Beta多样性和物种周转组分的方差分解结果有着高度的一致性,这表明环境过滤和扩散限制共同驱动着beta多样性和物种周转组分的格局形成,且表现出类似的驱动效应和尺度依赖性,即随着取样尺度的增大,环境过滤的相对重要性逐渐增加,扩散限制的相对重要性逐渐降低。可以推测,随着取样尺度的增大,生境异质性越来越大,这是导致环境过滤相对重要

性不断上升的主要原因。这与之前关于植物群落beta多样性格局形成机制的研究得到的结论一致(Laliberté et al, 2009; Legendre et al, 2009; Page & Shanker, 2018)。

对于物种丰富度差异组分的方差进行分解发现,在较小的取样尺度上,单纯的空间结构解释了该组分的大部分变异,而在100 m取样尺度上,各部分对该组分的总解释率仅为18%,有82%的变异未能被解释。这表明,在小尺度上,扩散限制是物种丰富度差异组分格局形成的重要驱动力,而在100 m尺度上,本研究未能成功解析驱动该组分格局形成的生态过程,推测本研究未考虑的一些生态学过程(如物种间的相互作用、生态漂变等)可能是该组分格局形成的潜在驱动力,也有可能是因为某些未纳入分析的环境因子比纳入分析的更加重要。之前的一些关于物种丰富度差异组分的研究表明,物种丰富度差异组分格局形成机制可能比物种周转组分要更加复杂(Gianuca et al, 2017; Hill et al, 2017; Wang et al, 2018),物种丰富度差异组分格局形成的驱动力有待进一步研究。

综上所述,在局域尺度上,环境过滤与扩散限制共同驱动着哀牢山亚热带中山湿性常绿阔叶林的物种周转和物种丰富度差异,群落间的物种周转是树种beta多样性的主要组分。随着取样尺度的增大,环境过滤的相对重要性逐渐增加,扩散限制的相对重要性逐渐降低。Beta多样性两个组分的分解为深入理解局域尺度上beta多样性格局形成的驱动力提供了新的视角。本研究进一步证实了取样尺度在beta多样性格局形成及其驱动力定量评价中的重要性,今后的研究需要进一步解析上述尺度效应的形成机制。

致谢: 感谢马郎、马玖、沈永振等参与哀牢山大样地的建设;感谢纪金华参与植物鉴定工作;感谢中国科学院哀牢山亚热带森林生态系统研究站在样地建设期间的后勤保障工作。

参考文献

Anderson MJ, Crist TO, Chase JM, Vellend M, Inouye BD, Freestone AL, Sanders NJ, Cornell HV, Comita LS, Davies KF, Harrison SP, Kraft NJB, Stegen JC, Swenson NG (2010) Navigating the multiple meanings of β diversity: A roadmap for the practicing ecologist. *Ecology Letters*, 14,

19–28.

- Barton PS, Cunningham SA, Manning AD, Gibb H, Lindenmayer DB, Didham RK (2013) The spatial scaling of beta diversity. *Global Ecology and Biogeography*, 22, 639–647.
- Baselga A (2010) Partitioning the turnover and nestedness components of beta diversity. *Global Ecology and Biogeography*, 19, 134–143.
- Baselga A (2017) Partitioning abundance-based multiple-site dissimilarity into components: Balanced variation in abundance and abundance gradients. *Methods in Ecology and Evolution*, 8, 799–808.
- Borcard D, Legendre P (2002) All-scale spatial analysis of ecological data by means of principal coordinates of neighbour matrices. *Ecological Modelling*, 153, 51–68.
- Borcard D, Legendre P, Avois-Jacquet C, Tuomisto H (2004) Dissecting the spatial structure of ecological data at multiple scales. *Ecology*, 85, 1826–1832.
- Bin Y, Wang ZG, Wang ZM, Ye WH, Cao HL, Lian JY (2010) The effects of dispersal limitation and topographic heterogeneity on beta diversity and phylobetadiversity in a subtropical forest. *Plant Ecology*, 209, 237–256.
- Carvalho JC, Cardoso P, Gomes P (2012) Determining the relative roles of species replacement and species richness differences in generating beta-diversity patterns. *Global Ecology and Biogeography*, 21, 760–771.
- Chen SB, Ouyang ZY, Xu WH, Xiao Y (2010) A review of beta diversity studies. *Biodiversity Science*, 18, 323–335. (in Chinese with English abstract) [陈圣宾, 欧阳志云, 徐卫华, 肖焱 (2010) Beta多样性研究进展. *生物多样性*, 18, 323–335.]
- Chase JM (2007) Drought mediates the importance of stochastic community assembly. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 104, 17430–17434.
- Chase JM, Myers JA (2011) Disentangling the importance of ecological niches from stochastic processes across scales. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 366, 2351–2363.
- Condit R (1998) Tropical Forest Census Plots: Methods and Results from Barro Colorado Island, Panama and a Comparison with Other Plots. Springer-Verlag, Berlin.
- Condit R, Pitman N, Leigh EG, Chave J, Terborgh J, Foster RB, Nunez P, Aguilar S, Valencia R, Villa G, Muller-Landau HC, Losos E, Hubbell SP (2002) Beta-diversity in tropical forest trees. *Science*, 295, 666–669.
- Cressie N (1990) The origins of Kriging. *Mathematical Geology*, 22, 239–252.
- De Cáceres M, Legendre P, Valencia R, Cao M, Chang LW, Chuyong G, Condit R, Hao ZQ, Hsieh CF, Hubbell S, Kenfack D, Ma KP, Mi XC, Noor MNS, Kassim AR, Ren HB, Su SH, Sun IF, Thomas D, Ye WH, He FL (2012) The variation of tree beta diversity across a global network of forest plots. *Global Ecology and Biogeography*, 21, 1191–1202.
- Diggle PJ, Tawn JA, Moyeed RA (1998) Model-based geostatistics. *Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics*, 47, 299–326.

- Dobrovolski R, Melo AS, Cassemiro FAS, Diniz-Filho JAF (2012) Climatic history and dispersal ability explain the relative importance of turnover and nestedness components of beta diversity. *Global Ecology and Biogeography*, 21, 191–197.
- Dray S, Blanchet FG, Borcard D, Clappe S, Guénard G, Jombart T, Larocque G, Legendre P, Madi N, Wagner H (2018) *adespatial: Multivariate Multiscale Spatial Analysis*. R package version 0.2-0. <https://cran.r-project.org/web/packages/adespatial/>. (accessed on 2018-05-23)
- Dray S, Legendre P, Peres-Neto PR (2006) Spatial modelling: A comprehensive framework for principal coordinate analysis of neighbour matrices (PCNM). *Ecological Modelling*, 196, 483–493.
- Ellison AM (2010) Partitioning diversity. *Ecology*, 91, 1962–1963.
- Fang JY, Wang XP, Tang ZY (2009) Local and regional processes control species richness of plant communities: The species pool hypothesis. *Biodiversity Science*, 17, 605–612. (in Chinese with English abstract) [方精云, 王襄平, 唐志尧 (2009) 局域和区域过程共同控制着群落的物种多样性: 种库假说. *生物多样性*, 17, 605–612.]
- Gianuca AT, Declerck SAJ, Lemmens P, De Meester L (2017) Effects of dispersal and environmental heterogeneity on the replacement and nestedness components of beta-diversity. *Ecology*, 98, 525–533.
- Greve M, Gremmen NJM, Gaston KJ, Chown SL (2005) Nestedness of southern ocean island biotas: Ecological perspectives on a biogeographical conundrum. *Journal of Biogeography*, 32, 155–168.
- Guo YL, Xiang WS, Wang B, Li DX, Mallik AU, Chen HYH, Huang FZ, Ding T, Wen SJ, Lu SH, Li XK (2018) Partitioning beta diversity in a tropical karst seasonal rainforest in Southern China. *Scientific Reports*, 8, 17408.
- Harms KE, Condit R, Hubbell SP, Foster RB (2001) Habitat associations of trees and shrubs in a 50-ha neotropical forest plot. *Journal of Ecology*, 89, 947–959.
- Harrison S, Ross SJ, Lawton JH (1992) Beta-diversity on geographic gradients in Britain. *Journal of Animal Ecology*, 61, 151–158.
- Heino J, Nokela T, Soininen J, Tolkinen M, Virtanen L, Virtanen R (2015) Elements of metacommunity structure and community-environment relationships in stream organisms. *Freshwater Biology*, 60, 973–988.
- Hill MJ, Heino J, Thornhill I, Ryves DB, Wood PJ (2017) Effects of dispersal mode on the environmental and spatial correlates of nestedness and species turnover in pond communities. *Oikos*, 126, 1575–1585.
- Hubbell SP (2001) *The Unified Neutral Theory of Biodiversity and Biogeography (MPB-32)*. Princeton University Press, Princeton.
- Jackson DA (1993) Stopping rules in principal components analysis: A comparison of heuristical and statistical approaches. *Ecology*, 74, 2204–2214.
- Jones MM, Tuomisto H, Borcard D, Legendre P, Clark DB, Olivas PC (2008) Explaining variation in tropical plant community composition: Influence of environmental and spatial data quality. *Oecologia*, 155, 593–604.
- Jost L (2006) Entropy and diversity. *Oikos*, 113, 363–375.
- Laliberté E, Paquette A, Legendre P, Bouchard A (2009) Assessing the scale-specific importance of niches and other spatial processes on beta diversity: A case study from a temperate forest. *Oecologia*, 159, 377–388.
- Lande R (1996) Statistics and partitioning of species diversity, and similarity among multiple communities. *Oikos*, 76, 5–13.
- Legendre P, Anderson MJ (1999) Distance-based redundancy analysis: Testing multispecies responses in multifactorial ecological experiments. *Ecological Monographs*, 69, 1–24.
- Legendre P, De Cáceres M (2013) Beta diversity as the variance of community data: Dissimilarity coefficients and partitioning. *Ecology Letters*, 16, 951–963.
- Legendre P (2014) Interpreting the replacement and richness difference components of beta diversity. *Global Ecology and Biogeography*, 23, 1324–1334.
- Legendre P, Mi XC, Ren HB, Ma KP, Yu MJ, Sun IF, He FL (2009) Partitioning beta diversity in a subtropical broad-leaved forest of China. *Ecology*, 90, 663–674.
- Lennon JJ, Koleff P, Greenwood JJD, Gaston KJ (2001) The geographical structure of British bird distributions: Diversity, spatial turnover and scale. *Journal of Animal Ecology*, 70, 966–979.
- Leprieux F, Tedesco PA, Huguény B, Beauchard O, Durr HH, Brosse S, Oberdorff T (2011) Partitioning global patterns of freshwater fish beta diversity reveals contrasting signatures of past climate changes. *Ecology Letters*, 14, 325–334.
- Levine JM, Murrell DJ (2003) The community-level consequences of seed dispersal patterns. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34, 549–574.
- Magurran AE (1988) *Ecological Diversity and Its Measurement*. Croom-Helm, London.
- McArdle BH, Anderson MJ (2001) Fitting multivariate models to community data: A comment on distance-based redundancy analysis. *Ecology*, 82, 290–297.
- McKnight MW, White PS, McDonald RI, Lamoreux JF, Sechrest W, Ridgely RS, Stuart SN (2007) Putting beta-diversity on the map: Broad-scale congruence and coincidence in the extremes. *PLoS Biology*, 5, e272.
- Myers JA, Chase JM, Jiménez I, Jorgensen PM, Araujo-Murakami A, Paniagua-Zambrana N, Seidel R (2013) Beta-diversity in temperate and tropical forests reflects dissimilar mechanisms of community assembly. *Ecology Letters*, 16, 151–157.
- Nekola JC, White PS (1999) The distance decay of similarity in biogeography and ecology. *Journal of Biogeography*, 26, 867–878.
- Oksanen J, Blanchet FG, Friendly M, Kindt R, Legendre P, McGlinn D, Minchin PR, O'Hara RB, Simpson GL, Solyomos P, Stevens MHH, Szoecs E, Wagner H (2018) *vegan: Community Ecology Package*. R package version 2.5-2. <https://cran.r-project.org/web/packages/vegan/>. (accessed on 2018-05-17)

- Page NV, Shanker K (2018) Environment and dispersal influence changes in species composition at different scales in woody plants of the Western Ghats, India. *Journal of Vegetation Science*, 29, 74–83.
- Pebesma EJ (2004) Multivariable geostatistics in S: The gstat package. *Computers & Geosciences*, 30, 683–691.
- Podani J, Schmera D (2011) A new conceptual and methodological framework for exploring and explaining pattern in presence-absence data. *Oikos*, 120, 1625–1638.
- Podani J, Ricotta C, Schmera D (2013) A general framework for analyzing beta diversity, nestedness and related community-level phenomena based on abundance data. *Ecological Complexity*, 15, 52–61.
- Ponisio LC, M'Gonigle LK, Kremen C (2016) On-farm habitat restoration counters biotic homogenization in intensively managed agriculture. *Global Change Biology*, 22, 704–715.
- Qiu XZ, Xie SC (1998) Study on the Forest Ecosystem in Ailao Mountains, Yunnan, China. Yunnan Science and Technology Press, Kunming. (in Chinese) [邱学忠, 谢寿昌 (1998) 哀牢山森林生态系统研究. 云南科技出版社, 昆明.]
- Seidler TG, Plotkin JB (2006) Seed dispersal and spatial pattern in tropical trees. *PLoS Biology*, 4, e344.
- Si XF, Zhao YH, Chen CW, Ren P, Zeng D, Wu LB, Ding P (2017) Beta-diversity partitioning: Methods, applications and perspectives. *Biodiversity Science*, 25, 464–480. (in Chinese with English abstract) [斯幸峰, 赵郁豪, 陈传武, 任鹏, 曾嶙, 吴玲兵, 丁平 (2017) Beta多样性分解: 方法、应用与展望. 生物多样性, 25, 464–480.]
- Smith TW, Lundholm JT (2010) Variation partitioning as a tool to distinguish between niche and neutral processes. *Ecography*, 33, 648–655.
- Soininen J, Heino J, Wang JJ (2018) A meta-analysis of nestedness and turnover components of beta diversity across organisms and ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, 27, 96–109.
- Steinbauer MJ, Dolos K, Reineking B, Beierkuhnlein C (2012) Current measures for distance decay in similarity of species composition are influenced by study extent and grain size. *Global Ecology and Biogeography*, 21, 1203–1212.
- Svenning JC, Flogsgaard C, Baselga A (2011) Climate, history and neutrality as drivers of mammal beta diversity in Europe: Insights from multiscale deconstruction. *Journal of Animal Ecology*, 80, 393–402.
- Tisseuil C, Leprieur F, Grenouillet G, Vrac M, Lek S (2012) Projected impacts of climate change on spatio-temporal patterns of freshwater fish beta diversity: A deconstructing approach. *Global Ecology and Biogeography*, 21, 1213–1222.
- Toledo M, Poorter L, Peña-Claros M, Alarcón A, Balcázar J, Chuvina J, Leño C, Licona JC, Steege H, Bongers F (2011) Patterns and determinants of floristic variation across lowland forests of Bolivia. *Biotropica*, 43, 405–413.
- Tonkin JD, Stoll S, Jähnig SC, Haase P (2016) Contrasting metacommunity structure and beta diversity in an aquatic-floodplain system. *Oikos*, 125, 686–697.
- Tuomisto H, Ruokolainen K, Yli-Halla M (2003) Dispersal, environment, and floristic variation of western Amazonian forests. *Science*, 299, 241–244.
- Ulrich W, Almeida-Neto M, Gotelli NJ (2009) A consumer's guide to nestedness analysis. *Oikos*, 118, 3–17.
- Valencia R, Foster RB, Villa G, Condit R, Svenning JC, Hernández C, Romoleroux K, Losos E, Magård E, Balslev H (2004) Tree species distributions and local habitat variation in the Amazon: Large forest plot in eastern Ecuador. *Journal of Ecology*, 92, 214–229.
- Viana DS, Figuerola J, Schwenk K, Manca M, Hobæk A, Mjelde M, Preston CD, Gornall RJ, Croft JM, King RA, Green AJ, Santamaría L (2016) Assembly mechanisms determining high species turnover in aquatic communities over regional and continental scales. *Ecography*, 39, 281–288.
- Wang XG, Wiegand T, Anderson-Teixeira KJ, Bourq NA, Hao ZQ, Howe R, Jin GZ, Orwig DA, Spasojevic MJ, Wang SZ, Wolf A, Myers JA (2018) Ecological drivers of spatial community dissimilarity, species replacement and species nestedness across temperate forests. *Global Ecology and Biogeography*, 27, 581–592.
- Wen HD, Lin LX, Yang J, Hu YH, Cao M, Liu YH, Lu ZY, Xie YN (2018) Species composition and community structure of a 20 hm² plot of mid-mountain moist evergreen broad-leaved forest on the Mts. Ailaoshan, Yunnan Province, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 419–429. (in Chinese with English abstract) [温韩东, 林露湘, 杨洁, 胡跃华, 曹敏, 刘玉洪, 鲁志云, 谢有能 (2018) 云南哀牢山中山湿性常绿阔叶林20hm²动态样地的物种组成与群落结构. 植物生态学报, 42, 419–429.]
- Whittaker RH (1960) Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon and California. *Ecological Monographs*, 30, 407–407.
- Williams PH (1996) Mapping variations in the strength and breadth of biogeographic transition zones using species turnover. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 263, 579–588.
- Zobel M (1997) The relative role of species pools in determining plant species richness: An alternative explanation of species coexistence? *Trends in Ecology and Evolution*, 12, 266–269.

(责任编辑: 王绪高 责任编辑: 黄祥忠)

附录 Supplementary Material

附录1 哀牢山亚热带中山湿性常绿阔叶林20 ha动态监测样地各取样尺度下环境变量在前3个主成分中的载荷及其解释率
Appendix 1 The loading and proportion of environmental variables on the top three principal components at different cell sizes in the 20 ha subtropical mid-mountain moist evergreen broad-leaved forest dynamics plot in Ailao Mountains
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2019356-1.pdf>

附录1 哀牢山亚热带中山湿性常绿阔叶林20 ha动态监测样地各取样尺度下环境变量在前3个主成分中的载荷及其解释率

Appendix 1 The loading and proportion of environmental variables on the top three principal components at different cell sizes in the 20 ha subtropical mid-mountain moist evergreen broad-leaved forest dynamics plot in Ailao Mountains

	10 m			20 m			50 m			100 m		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
土壤含水量	0.245	0.162	0.290	0.241	0.169	0.270	0.222	0.174	0.332	-0.223	-0.213	0.178
土壤容重	-0.162	-0.192	-0.350	-0.160	-0.196	-0.326	-0.144	-0.200	-0.351	0.152	0.219	-0.221
pH 值	0.286	-0.098	0.048	0.286	-0.093	0.049	0.297	-0.049	0.062	-0.242	0.127	-0.074
全碳含量	-0.247	-0.262	0.163	-0.241	-0.262	0.173	-0.208	-0.309	0.143	0.210	0.267	0.228
全氮含量	-0.232	-0.285	0.128	-0.227	-0.286	0.137	-0.195	-0.323	0.119	0.196	0.307	0.152
有机碳含量	-0.243	-0.256	0.190	-0.237	-0.256	0.200	-0.204	-0.305	0.165	0.202	0.257	0.256
全磷含量	0.076	-0.304	-0.240	0.079	-0.305	-0.222	0.115	-0.294	-0.240	-0.014	0.288	-0.228
全钾含量	-0.062	-0.146	-0.491	-0.058	-0.154	-0.484	-0.041	-0.137	-0.474	0.125	0.134	-0.422
水解性氮含量	-0.256	-0.097	0.103	-0.250	-0.101	0.100	-0.235	-0.140	0.032	0.261	0.157	0.089
速效钾含量	0.236	-0.196	0.163	0.235	-0.188	0.159	0.255	-0.175	0.192	-0.283	0.120	0.070
交换性钾含量	0.182	-0.244	0.138	0.182	-0.237	0.138	0.205	-0.226	0.165	-0.231	0.193	0.056
交换性钠含量	-0.034	-0.139	0.099	-0.030	-0.136	0.110	-0.027	-0.137	0.082	-0.024	0.247	0.050
交换性钙含量	0.217	-0.290	0.009	0.220	-0.284	0.022	0.259	-0.252	0.001	-0.219	0.263	0.000
交换性镁含量	0.210	-0.262	0.135	0.212	-0.254	0.138	0.239	-0.231	0.172	-0.248	0.217	0.126
有效铁含量	-0.231	0.168	-0.103	-0.232	0.163	-0.106	-0.255	0.144	-0.058	0.175	-0.209	-0.027
有效铜含量	0.179	0.061	-0.402	0.178	0.059	-0.385	0.171	0.107	-0.420	-0.232	-0.078	-0.280
有效锌含量	0.012	-0.331	0.043	0.018	-0.329	0.056	0.067	-0.332	0.006	-0.164	0.269	0.165
有效锰含量	0.198	-0.213	-0.098	0.202	-0.211	-0.082	0.230	-0.157	-0.171	-0.193	0.177	0.059
有效磷含量	0.000	-0.263	-0.035	0.005	-0.259	-0.012	0.036	-0.256	-0.071	-0.031	0.227	0.123
交换性铝含量	-0.306	0.139	0.013	-0.308	0.132	0.003	-0.319	0.089	0.015	0.291	-0.106	0.045
有效硼含量	0.095	-0.025	-0.152	0.096	-0.030	-0.155	0.123	-0.012	-0.191	-0.063	0.066	-0.289
海拔	-0.308	-0.139	-0.003	-0.304	-0.146	-0.003	-0.290	-0.202	-0.014	0.293	0.192	0.004
凹凸度	-0.092	0.045	0.216	-0.101	0.103	0.212	-0.247	-0.065	0.171	0.097	-0.081	0.220
坡度	-0.266	-0.144	-0.035	-0.282	-0.152	-0.051	0.005	-0.060	-0.175	0.279	0.099	-0.280
坡向余弦值	-0.029	0.010	0.146	-0.020	0.030	0.207	0.037	0.009	0.050	0.079	-0.112	0.151
坡向正弦值	0.010	-0.023	-0.229	0.013	-0.051	-0.277	-0.023	-0.051	-0.064	-0.032	0.136	-0.386
标准偏差	2.717	2.436	1.603	2.671	2.391	1.849	2.692	2.393	1.598	2.663	2.554	1.754
方差比例	0.284	0.228	0.099	0.285	0.229	0.137	0.282	0.223	0.099	0.273	0.251	0.118
累积贡献率	0.284	0.512	0.611	0.285	0.513	0.651	0.282	0.505	0.605	0.273	0.524	0.642



•研究报告•

桂西南喀斯特季节性雨林叶凋落量的时空动态

贾梦可^{1,2,3} 郭屹立^{1,3*} 李冬兴^{1,3} 王斌^{1,3} 向悟生^{1,3} 王爱龙⁴
刘晟源⁴ 丁涛^{1,3} 黄甫昭^{1,3} 文淑均^{1,3} 陆树华^{1,3} 李先琨^{1,3*}

1 (广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室, 广西桂林 541006)

2 (广西师范大学生命科学学院, 广西桂林 541006)

3 (广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站, 广西凭祥 532699)

4 (广西弄岗国家级自然保护区管理中心, 广西龙州 532400)

摘要: 森林凋落物是森林生态系统极其重要的组成部分, 关系着森林生态系统的物质循环和养分平衡。然而, 有关异质性自然森林生态系统中生物与非生物因子对凋落物凋落量的影响机制还存在较大争议。本文以广西弄岗15 ha森林动态监测样地中设置的90个凋落物收集器所收集的凋落叶为研究对象, 选取2013–2018年连续6年的凋落叶数据探讨了森林叶凋落量的时空动态, 旨在深入了解该地区森林生态系统的物质循环过程及凋落量的影响因子。结果显示: 2013–2018年的年均叶凋落量为4,099.44 kg/ha, 标准误为232.34, 变异系数为0.15, 这表明不同年际间叶凋落量存在明显差异; 不同年际间叶凋落量的节律性变化为双峰型、三峰型或多峰型, 说明不同年份的叶凋落量存在明显的节律性差异, 但总体而言高峰期主要出现在每年的春季(3–4月)和秋季(8–10月); 生态因子对叶凋落量年际动态存在显著影响, 其累计解释率为69.3%, 其中海拔对叶凋落量的影响最强, 解释率为46.5%; 而生物因子如胸径变异系数、单位面积胸高断面之和和物种丰富度则对叶凋落量的影响较弱。多年的连续监测表明, 喀斯特季节性雨林不同年际间叶片的凋落量和节律性存在显著差异, 而非生物因子, 如海拔是形成叶凋落量空间变异的主要因素。

关键词: 喀斯特季节性雨林; 叶凋落量; 年际差异; 节律性; 生态因子

Spatio-temporal dynamics of leaf litter in a karst seasonal rainforest in southwest Guangxi

Mengke Jia^{1,2,3}, Yili Guo^{1,3*}, Dongxing Li^{1,3}, Bin Wang^{1,3}, Wusheng Xiang^{1,3}, Ailong Wang⁴, Shengyuan Liu⁴, Tao Ding^{1,3}, Fuzhao Huang^{1,3}, Shujun Wen^{1,3}, Shuhua Lu^{1,3}, Xiankun Li^{1,3*}

1 Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain, Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin, Guangxi 541006

2 College of Life Sciences, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541006

3 Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem National Research Station, Pingxiang, Guangxi 532699

4 Administration of Nonggang National Nature Reserve of Guangxi, Longzhou, Guangxi 532400

Abstract: Leaf litter production is a major contributor to ecosystem net primary productivity and biogeochemical cycles. However, various abiotic and biotic drivers influence leaf litter production in heterogeneous natural forests. In this study, we quantified leaf litter production, composition, and spatio-temporal dynamics in a 15 ha forest dynamics plot in Nonggang National Nature Reserve, Guangxi. We set up 90 litter fall traps and collected leaf litter weekly beginning in May 2012. We explored the spatial and temporal dynamics of leaf litter production in order to gain an in-depth understanding of the material circulation process of forest ecosystem in this region. Ecological factors had significant influence on the inter-annual dynamics of leaf litter volume and explained 69.3% of the cumulative deviation. The effect of altitude on leaf litter was the strongest, explaining 46.5% of the deviation. However, biological factors, such as the coefficient of variation of DBH, the sum of stand basal area per unit area, and species-richness, had

收稿日期: 2019-12-19; 接受日期: 2020-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(31760141; 31660130; 31500342)、广西重点研发计划(桂科 AB16380256)和广西自然科学基金(2016GXNSFBA380092)

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: yiligu810414@163.com; xiankunli@163.com

smaller effect sizes on annual leaf litter production. Years of continuous monitoring show that there are obvious differences in the leaf litter production between years in karst seasonal rainforests, but abiotic factors, such as altitude, heavily influence leaf litter production.

Key words: karst seasonal rainforests; leaf litter production; annual difference; rhythmicity; ecological factors

凋落物是森林生态系统极其重要的组成部分,在促进森林生态系统物质循环、能量流动和养分平衡及减少水土流失和维持生态系统功能方面具有关键作用(Vasconcelos & Luizao, 2004; Han et al, 2007)。森林凋落量是单位面积单位时间上林地所有凋落物的总量,它能间接反映森林生态系统的初级生产力水平,如热带森林生态系统中凋落物占初级生产力的41%左右(Malhi, 2012)。凋落物的动态变化是指凋落量在时间和空间上的变化,一般分为季节性动态变化和年际动态变化,是森林凋落物研究的重要内容之一。局域尺度上,生物与非生物因子均会影响凋落物的形成,而二者对凋落物形成的重要性还存在较大争议(Guo et al, 2019)。目前,有关森林凋落量及其动态的研究已有大量报道,而针对某一地区凋落物连续多年的动态监测还比较少见。

中国西南喀斯特区是全球最大的喀斯特连续分布带(Yuan, 1991)。喀斯特生态系统中,由于基岩出露面积大,又长期受溶蚀及风化作用影响,地表形成了错综复杂的溶沟、岩缝、石脊、裸露岩石等微环境结构(蒋忠诚和袁道先, 1999; 李先琨等, 2008; 郭柯等, 2011)。喀斯特环境本身的脆弱性加上人类活动的过度干扰,导致我国西南喀斯特地区森林土壤贫瘠、水土流失严重,产生了以石漠化为特征的生态环境退化(曹坤芳等, 2014)。以往有关喀斯特森林生态系统凋落量的相关工作均为小尺度上选择不同群落类型开展的短时间研究,存在凋落物收集年限短且凋落节律无重复性,缺乏长期定位监测等问题。国际统一标准下建立的弄岗15 ha森林动态监测样地为揭示该地区森林凋落物动态与机制的普遍性和特殊性规律提供了研究平台。

本文以广西南部典型季节性雨林喀斯特地质背景下的弄岗15 ha森林动态监测样地为研究平台,以样地内布设的90个凋落物收集器所收集的凋落物为研究对象,分析了2013–2018年凋落物的年际动态变化及其影响因素。由于凋落物中枝条的凋落存在偶然性和不确定性,因此本研究仅以凋落叶作

为研究对象。其目的是:(1)探讨喀斯特季节性雨林叶凋落量的年际变化规律和季节性节律;(2)分析喀斯特季节性雨林中凋落叶与生态因子的相关性,揭示影响叶凋落量的主要控制因子;(3)为进一步揭示喀斯特季节性雨林年净初级生产力及其时空分布格局与形成机制等深层次研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

弄岗国家级自然保护区位于广西龙州县以东、宁明县以北(106°42'28"–107°04'54"E, 22°13'56"–22°39'09" N),是典型的北热带季节性雨林喀斯特地貌,地形上以典型的喀斯特峰丛洼陷为特征,其地质主要由多孔石灰岩组成,有许多坑洞、洞穴和广泛的地下溪流。保护区洼地底部海拔为150–200 m左右,洼地最大深度为114 m,最大宽度为450 m。该区域地表水缺乏,而地下水通道丰富,形成了复杂的地下河系,其枯水期(12月至翌年2月)最低水位埋深在5–25 m,丰水期(5–7月)最高水位则高于地面0–3 m。保护区年平均气温为22°C,最冷月平均气温在13°C以上,每年有7个月的月平均温度在22°C以上,年均降水量为1,150–1,550 mm,最高达2,043 mm,最少为890 mm,其中76%的降水量集中在5–9月(Guo et al, 2018, 图1)。

依照CTFS (Center for Tropical Forest Science)样地建设标准(Condit, 1998),广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所于2011年在弄岗国家级自然保护区建立了15 ha森林动态监测样地。该样地东西长500 m,南北长300 m,海拔范围在180–370 m之间。样地植物群落结构复杂、物种组成丰富,具有很高的生境异质性,包含了一系列典型的“峰丛–洼地”生境类型,具有喀斯特地质背景的典型性与代表性。2011年第一次调查发现样地内DBH ≥ 1 cm的木本植物有223种,隶属于56科157属,独立个体68,010株。主要优势种有闭花木(*Cleistanthus sumatranus*)、苹婆 (*Sterculia monosperma*)、广西牡荆(*Vitex*

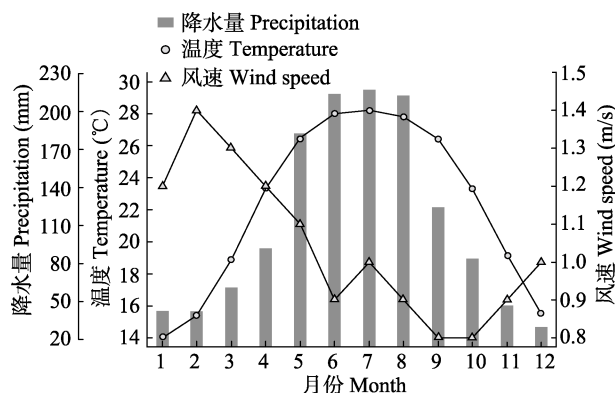


图1 广西龙州县2000年1月至2015年12月月平均降水量、风速、气温的变化

Fig. 1 Monthly variations of mean precipitation, wind speed and air temperature between January 2000 and December 2015 in Longzhou County, Guangxi

kwangsiensis)等(王斌等, 2014)。

1.2 研究方法

1.2.1 凋落物收集器布设方案

依据样地地形和群落等特征, 于2012年5月在弄岗15 ha森林动态监测样地中布设了90个凋落物收集器(图2)。其设置原则为: (1)能代表样地内所有的群落类型和生境类型; (2)基本保证同一株母树的凋落物不会自然凋落到两个收集器内, 即根据树种冠幅, 样地内两个收集器之间的距离不小于10 m; (3)为避免边缘效应, 同时也尽可能地保证凋落物都来自于样地内母树, 样地边缘20 m内不设置收集器(Du et al, 2009)。由于喀斯特地貌地形复杂, 实际操作中并不能严格按照上述规定架设凋落物收集器, 只能尽可能地选择合适的地点。如峰顶及其周边高坡位地区地形陡峭, 仅分布有大量的芸香竹(*Bonia saxatilis*), 而木本植物分布较少, 因此未布设凋落物收集器(郭屹立等, 2017; Guo et al, 2019)。

1.2.2 凋落物采样设计

结合弄岗北热带喀斯特季节性雨林的气候特征, 于每月月中和月末各收集1次, 如遇大风、降雨等不适合野外工作的天气则适当推迟收集日期。每次收集的凋落物以收集器为单位进行编号, 按花、果实、枝干(直径 < 2 cm)、叶片及其他杂物进行分类, 并对叶片和果实进行物种鉴定。在80°C烘箱中烘干至恒重(连续烘48 h以上)后, 用精度为0.01 g的电子天平称重, 记录凋落物收集器编号、收集日期、各组分重量等信息。依据CTFS标准, 藤本植物和竹亚科植物未纳入研究范围(Guo et al, 2019)。

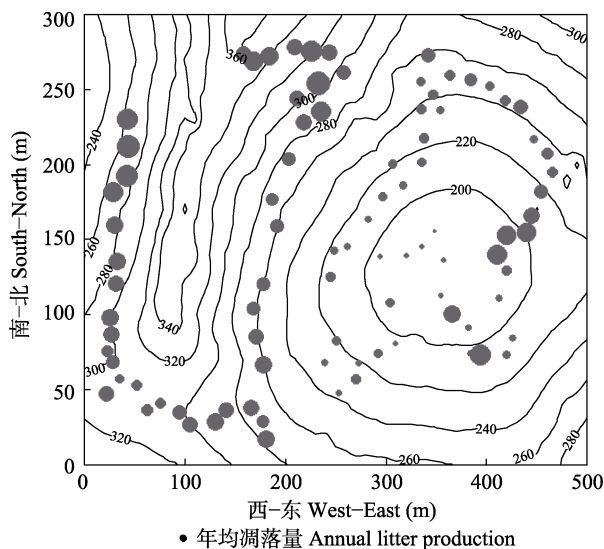


图2 弄岗15 ha森林动态监测样地等高线图及90个凋落物收集器的多年叶片年均凋落量。圆点大小代表凋落量的多少。
Fig. 2 The contour map and perennial annual leaf litter fall production of 90 litter fall traps of the 15 ha forest dynamics plot in Nonggang, Guangxi. Black dots size indicate the production of litter fall.

1.3 数据分析

以2013–2018年连续6年收集的凋落物为研究对象, 分析不同年际的凋落物动态及不同生态因子(环境因子和生物因子)的影响。其中, 环境因子为凋落物收集器所在10 m × 10 m样方的平均海拔、凹凸度、坡度、坡向、地形湿润度指数和干旱度指数等。有关环境因子的计算方法参考郭屹立等(2015)。生物因子则基于2016年弄岗15 ha样地的复查数据, 包括以凋落物收集器为圆心, 5 m为半径的圆形样方内所有胸径 ≥ 1 cm植株的胸径变异系数、胸高断面积之和、物种丰富度等(Guo et al, 2019)。其中, 单位面积样方内所有个体胸径的变异系数(DBH_{CV})常用来作为衡量群落结构多样性的指标:

$$DBH_{CV} = \sigma / \mu \quad (1)$$

其中, σ 为单位面积样方内所有个体的胸径的方差, μ 为胸径的平均值。

本研究选用广义可加模型(generalized additive model, GAM)来检验不同生态因子对凋落量的解释率。广义可加模型常用来处理响应变量与多个解释变量之间的非线性关系(Guisan et al, 2002), 它通过连接函数来建立响应变量的数学期望值与预测变量的光滑函数间的关系(Wood, 2006)。

在广义可加模型参数选择时, 首先确定90个凋

落物收集器收集的年均凋落量的概率密度分布呈现近正态分布,因此连接函数选择identity函数(Wood, 2006a)。为检验每一模型的适合度,对其偏差系数(D^2)进行估算(Swartzman et al, 1992):

$$D^2 = (ND - RD) / ND \quad (2)$$

式中, ND 为空模型偏差, RD 为剩余偏差。 D^2 值越接近1,说明模型剩余偏差越小,模型拟合度越好。

利用赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC)检验逐步加入生态因子后的模型拟合度,其值越小说明模型的拟合效果越好(Burnham & Anderson, 2002)。利用 F 检验和卡方检验分别评估环境因子的显著性及其对非参数效果的非线性贡献率。

广义可加模型拟合基于R软件mgcv包中的gam函数(Wood, 2006)进行,所有数据分析和绘图均在R 3.6.1 (R Core Team, 2019)中实现。

2 结果

2.1 叶凋落量年际动态

2013–2018年凋落叶片的年凋落量分别为: 4,186.99 kg/ha、3,664.15 kg/ha、3,178.93 kg/ha、4,198.18 kg/ha、4,363.88 kg/ha和5,004.50 kg/ha,其多年变异系数为0.15,表明叶凋落量存在明显的年际间波动(图3)。2013–2018年共鉴定到125种物种的凋落叶,占凋落物总量的83.6%。鉴定出的物种的频次和凋落量与样地中物种的多度有关,且主要为乔木层物种,以闭花木、广西牡荆、苹婆、海南椴(*Diplodiscus trichosperma*)、蚬木(*Excentrodendron tonkinense*)、劲直刺桐(*Erythrina stricta*)等为主,而个别乔木种如白头树(*Garuga forrestii*)、羽叶楸(*Stereospermum colais*)等则仅出现一次,且凋落量

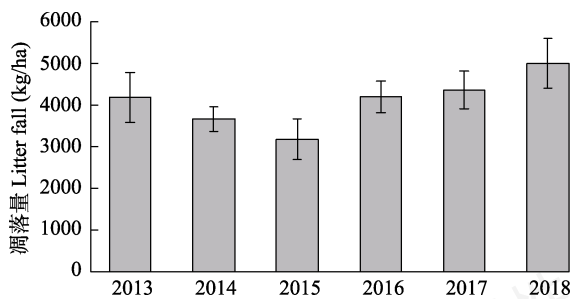


图3 弄岗15 ha森林动态监测样地2013–2018年叶凋落量的年际动态(平均值 ± SD)

Fig. 3 Annual dynamics of leaf litter fall production between 2013 and 2018 of the 15 ha forest dynamics plot in Nonggang, Guangxi (mean ± SD)

很少。多数灌木层物种未被鉴定出来,这表明灌木层物种的凋落物较少或者难以被收集器收集到。

2.2 叶凋落量季节性动态

不同年际间叶片凋落量的季节性动态存在明显差异(图4)。如,2013年叶凋落量节律表现为三峰型曲线波动,具体峰值出现在3月、6月和9月;2014年叶凋落量节律表现为双峰型,4月出现第一次峰值,之后急剧下降,并在7月后平稳上升,在9月达到第二次高峰;2015年出现多峰型,具体表现为4月、6月和9月出现峰值,之后下降,并在11月出现第4次小高峰;2016年的叶凋落量同样呈现三峰型曲线波动,具体表现为4月凋落量出现第一次峰值,于7月出现一次小高峰,并于10月再次出现高峰;2017和2018年叶凋落量动态则都呈现双峰型,峰值分别出现在4月和9月。虽然叶凋落量的多年季节性动态波动并无稳定的规律,但其高峰期大致都出现在每年的春季(3–4月)和秋季(8–11月),表现为明显的双峰型。

2.3 叶凋落量动态变化的驱动因子

对收集器内叶凋落总量和生态因子的相关性分析结果显示,年均叶凋落量与海拔、坡度、凹凸度以及干旱度指数存在显著正相关,而与湿润度指数及胸径变异系数则存在显著负相关(表1)。为了检验不同生态因子对年均凋落量的解释率,本研究采用逐一获取每个生态因子的广义可加性模型模拟结果,发现除物种丰富度外的其他生态因子均对年均凋落量的解释率表现出显著性,其中解释率最高的是海拔,为46.5%;其次为坡度和湿润度指数,分

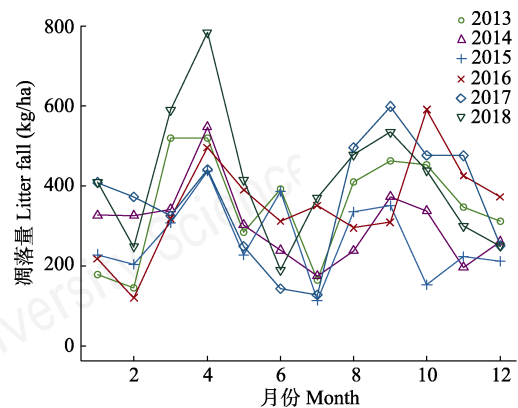


图4 弄岗15 ha森林动态监测样地2013–2018年叶凋落量的节律性

Fig. 4 Rhythmicity of leaf litter fall production between 2013 and 2018 of the 15 ha forest dynamics plot in Nonggang, Guangxi

别为29.1%和27.2% (表2); 而解释率最低的为胸径变异系数, 仅5.3%。

为了检验所有生态因子对年均凋落量的解释率, 本研究在剔除对凋落量的形成并不显著的物种丰富度指数后, 进一步采用逐步法获得广义可加性模型模拟结果。该模型对年均凋落量的累积解释率为69.3%, 其中贡献最大的为海拔, 解释率为46.5%, 而生物因子如胸径变异系数和胸高断面积之和的解释率则近于零(表3)。

3 讨论

凋落量反映了森林生态系统的初级生产力水平(Liu et al, 2004), 是森林生态系统功能大小的体现。

弄岗喀斯特季节性雨林在2013–2018年连续6年的叶年均凋落量为4099.44 kg/ha, 低于中亚热带的茂兰喀斯特森林(4,503 kg/ha) (俞国松等, 2011)和非喀斯特地质背景的中亚热带阔叶林(8,450–9,000 kg/ha) (官丽莉等, 2004; 阎恩荣等, 2008)。此外, 已有研究认为热带森林中凋落物占年净初级生产力的41%左右(Malhi, 2012), 据此估算, 北热带喀斯特季节性雨林年净初级生产力约为11.76 t/ha。

有关森林凋落物的月凋落量动态的研究已有很多, 且大多与凋落节律有关(Sharma et al, 2012; Zhang et al, 2014)。森林凋落量一般均具有明显的季节性变化规律, 其季节动态模式有单峰、双峰及不规则型(王凤友, 1989)。弄岗喀斯特季节性雨林叶片

表1 弄岗15 ha森林动态监测样地不同年际叶凋落量和生态因子间的相关性

Table 1 Correlations between leaf litter fall production and ecological factors in different years of the 15 ha forest dynamics plot in Nonggang, Guangxi. *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$.

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	平均值 Mean
海拔 Elevation	0.578**	0.670**	0.644**	0.394**	0.491**	0.697**	0.682**
坡度 Slope	0.447**	0.400**	0.421**	0.422**	0.314**	0.255*	0.411**
凹凸度 Convexity	0.276**	0.223*	0.302**	0.286**	0.238*	0.139	0.262*
坡向 Aspect	0.141	0.296**	0.095	0.01	0.046	0.222*	0.172
岩石裸露率 Rock-bareness rate	0.183*	0.223*	0.192*	0.289**	0.268**	0.334**	0.255**
湿润度指数 Topographic wetness index	-0.461**	-0.494**	-0.509**	-0.446**	-0.400**	-0.363**	-0.497**
干旱度指数 Altitude above channel	0.2	0.264*	0.324**	0.220*	0.343**	0.294**	0.316**
胸径变异系数 DBH variation	-0.281**	-0.352**	-0.284**	-0.137	-0.114	-0.326**	-0.299**
胸高断面积之和 Total basal area	0.229**	0.218**	0.229**	0.243*	0.145*	0.196*	0.234**
物种丰富度 Species richness	0.089	0.112	0.091	0.132	0.103	0.078	0.097

表2 弄岗15 ha森林动态监测样地年均叶凋落量分别与不同因子的广义可加模型(GAMs)检验

Table 2 Test of generalized additive models (GAMs) for modeling leaf annual litter fall production of the 15 ha forest dynamics plot in Nonggang, Guangxi with different indices, respectively

模型因子 Environmental parameters	r_{adj}^2	累积解释率 Cumulative explained deviation (%)	AIC	贡献拟合值 Fitted contribution values	卡方检验 $P_t(\chi)$
海拔 Elevation	0.425	46.5	116.366	9.344	0.000
坡度 Slope	0.256	29.1	1,137.742	6.254	0.000
凹凸度 Convexity	0.210	25.9	1,144.322	4.041	0.001
坡向 Aspect	0.114	16.7	1,154.586	2.161	0.056
岩石裸露率 Rock-bareness rate	0.171	22.8	1,149.297	2.848	0.008
湿润度指数 Topographic wetness index	0.257	27.2	1,135.356	13.75	0.000
干旱度指数 Altitude above channel	0.071	8.15	1,154.644	7.809	0.006
胸径变异系数 DBH variation	0.042	5.32	1,157.379	4.943	0.029
胸高断面积之和 Total basal area	0.162	22.9	1,151.089	2.598	0.015
物种丰富度 Species richness	0.044	7.87	1,159.372	1.437	0.229

$P_t(\chi)$ 表示对非参数平滑效果的非线性贡献检验得分, 其值越小效果越好。

$P_t(\chi)$ represented a type of score test to evaluate the non-linear contribution of non-parametric effects, and the lowest value meant the best.

表3 弄岗15 ha森林动态监测样地年均叶凋落量与所有因子的广义可加模型(GAMs)检验

Table 3 Test of generalized additive models (GAMs) for modeling annual leaf litter fall production of the 15 ha forest dynamics plot in Nonggang, Guangxi with all of the indices

模型因子 Environmental parameters	r_{adj}^2	累计解释率 Cumulative explained deviation (%)	AIC	F检验 $P_i(F)$	贡献拟合值 Fitted contribution values	卡方检验 $P_i(\chi)$
海拔 Elevation	0.425	46.5	1,116.366	0.000	6.108	0.000
坡度 Slope	0.458	49.2	1,110.539	0.000	0.025	0.874
凹凸度 Convexity	0.513	57.7	1,106.171	0.000	1.289	0.260
坡向 Aspect	0.525	58.9	1,104.41	0.000	2.215	0.033
岩石裸露率 Rock-bareness rate	0.596	67.5	1,093.937	0.000	2.631	0.109
湿润度指数 Topographic wetness index	0.602	69.3	1,094.793	0.000	0.887	0.349
干旱度指数 Altitude above channel	0.593	68.1	1,095.75	0.000	0.821	0.368
胸径变异系数 DBH variation	0.591	68.4	1,096.955	0.000	0.002	0.963
胸高断面积之和 Total basal area	0.594	69.1	1,097.032	0.000	1.312	0.256

$P_i(F)$ 指对本行模型与上一行模型进行离差分析时F检验所获得的值; $P_i(\chi)$ 表示对非参数平滑效果的非线性贡献检验得分, 其值越小效果越好。

$P_i(F)$ referred to the p -value from an ANOVA F-ratio test between the model for that row and the model for the previous row. $P_i(\chi)$ represented a type of score test to evaluate the non-linear contribution of non-parametric effects, and the lowest value meant the best.

凋落量多年间的节律性存在明显差异, 包含了双峰、三峰甚至多峰型。多年连续监测表明, 弄岗喀斯特季节性雨林凋落物年均凋落量的季节性动态总体表现为明显的双峰型, 即分别为每年的生长季开始前(3-4月)和生长季结束后(9-11月)。这一规律与当地的气候有关。弄岗国家级自然保护区地处北热带季风性气候区, 雨季和旱季区分明显, 雨季主要集中在每年的5-9月, 而旱季则主要在每年的10月至翌年的4月(Guo et al, 2018)。这一结论与茂兰中亚热带喀斯特森林凋落物的凋落节律基本一致, 但凋落期要滞后1-2个月(5月和10-12月达到峰值)(俞国松等, 2011)。这可能是由于地处北热带的弄岗喀斯特季节性雨林要比处于中亚热带的茂兰阔叶混交林更早进入展叶期, 相应地, 常绿物种较早进入落叶期以备后期展叶。

局域尺度上, 海拔是影响凋落量的重要因子。一般而言, 森林凋落量随海拔的升高而减少(Reiners & Lang, 1987)。然而, 在弄岗喀斯特季节性雨林180-370 m海拔范围内叶凋落量与海拔呈正相关关系, 即叶片的凋落量随着海拔的升高而增加, 且海拔是影响凋落量的第一要素。这可能是由三方面的原因造成: (1)洼地及其周边湿润生境中, 经常存在季节性水淹, 因此土壤含氧量往往较低, 从而限制了直立木本植物的生长; (2)未将广布于洼地及周边湿润生境中的木质藤本植物的凋落叶纳入到研究对象中; (3)未将海拔高、地势陡峭、土壤稀少、植被稀疏且以旱生型山顶矮林为主的峰顶包括在

内。坡度、凹凸度和干旱度指数与叶片凋落量年际动态均存在显著正相关, 而湿润度指数则与叶凋落量年际动态存在显著负相关。喀斯特季节性雨林中, 海拔是影响其他环境因子的主要因素, 如海拔越高, 地势越陡峭, 岩石裸露率越高, 土壤越干旱。因此, 不同环境因子间往往表现出显著相关性或存在共线性问题(Guo et al, 2017, 2019)。

与环境因子相比, 生物因子对凋落量的作用相对较弱, 仅单位面积胸高断面积之和与凋落量表现出较强的相关性。生物多样性与生产力常表现出一定的相关性, 如物种多样性促进生产力的提高(Poorter et al, 2015), 林层结构的多样性(胸径变异系数)也可以促进生产力的提高(Zhang & Chen, 2015)。然而, 喀斯特季节性雨林中物种多样性与凋落量仅表现出较弱的正相关性, 而林层结构的多样性与凋落量表现出较强的负相关性, 而且其对凋落量的解释率较低。这可能是由于林层结构的复杂性导致主林层(林冠层)的凋落物被下层阻挡, 减少了凋落物收集器的收集量。这一结论与Guo等(2019)运用结构方程探讨凋落物的形成机制得出的结论相似。这可能是由于喀斯特地质背景下, 以海拔为主的环境因子是形成水分梯度、土层厚度和土量、土壤营养梯度等的主要原因, 进而影响了喀斯特环境中的生物因子, 如物种多样性、群落结构和初级生产力等。比如, 海拔也是影响喀斯特季节性雨林单位面积胸高断面积之和分布格局的主要因素, 二者呈显著正相关关系(郭屹立等, 2016)。

北热带喀斯特季节性雨林中具有非常高的藤本植物丰富度,且主要分布于洼地及其周边较为湿润的生境中(蒋裕良等,2017)。藤本植物对森林群落结构与动态起着非常重要而复杂的作用。藤本植物也能通过竞争或直接的机械损伤显著地减缓树木的生长并增加树木的死亡(Ingwell et al, 2010),进而影响森林的生产力与生长量。藤本植物尤其是木质藤本植物本身亦是森林生态系统的重要组成部分,其自身的生产力和碳储量在喀斯特季节性雨林中可能占有重要作用。在喀斯特季节性雨林洼地及周边湿润的生境中,直立木本植物往往被木质藤本植物所覆盖,而这些生境中木质藤本植物的生产力和碳储量可能远高于直立木本植物。然而,依据CTFS样地建设标准,木质藤本植物未被纳入调查与监测范围,而且目前有关木质藤本植物的调查与监测仍然没有统一的标准。目前,弄岗15 ha森林动态监测样地已经开始尝试通过一定的方法来加强对木质藤本植物的监测,以期为进一步揭示北热带喀斯特季节性雨林的净初级生产力和碳储量提供准确依据。

致谢: 感谢广西弄岗国家级自然保护区管理局提供帮助;感谢崇左市龙州县逐卜乡楞垒屯苏理生、坡那屯黄春协助收集凋落物。

参考文献

- Burnham KP, Anderson DR (2002) Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach, 2nd edn. Springer, New York.
- Cao KF, Fu PL, Chen YJ, Jiang YJ, Zhu SD (2014) Implications of the ecophysiological adaptation of plants on tropical karst habitats for the ecological restoration of desertified rocky lands in southern China. *Scientia Sinica Vitae*, 44, 238–247. (in Chinese with English abstract) [曹坤芳, 付培立, 陈亚军, 姜艳娟, 朱师丹 (2014) 热带岩溶植物生理生态适应性对于南方石漠化土地生态重建的启示. *中国科学: 生命科学*, 44, 238–247.]
- Condit R (1998) Tropical Forest Census Plots: Methods and Results from Barro Colorado Island, Panama and A Comparison with Other Plots. Springer, Berlin.
- Du YJ, Mi XC, Liu XJ, Chen L, Ma KP (2009) Seed dispersal phenology and dispersal syndromes in a subtropical broad-leaved forest of China. *Forest Ecology and Management*, 258, 1147–1152.
- Guan LL, Zhou GY, Zhang DQ, Liu JX, Zhang QM (2004) Twenty years of litter fall dynamics in subtropical evergreen broad-leaved forests at the Dinghushan Forest Ecosystem Research Station. *Acta Phytocologica Sinica*, 28, 449–456. (in Chinese with English abstract) [官丽莉, 周国逸, 张德强, 刘菊秀, 张倩媚 (2004) 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林凋落物量20年动态研究. *植物生态学报*, 28, 449–456.]
- Guisan A, Edwards Jr TC, Hastie T (2002) Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: Setting the scene. *Ecological Modelling*, 157, 89–100.
- Guo K, Liu CC, Dong M (2011) Ecological adaptation of plants and control of rocky-desertification on karst region of Southwest China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 991–999. (in Chinese with English abstract) [郭柯, 刘长成, 董鸣 (2011) 我国西南喀斯特植物生态适应性与石漠化治理. *植物生态学报*, 35, 991–999.]
- Guo LB, Sims REH (1999) Litter production and nutrient return in New Zealand eucalypt short-rotation forest: Implications for land management. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 73, 93–100.
- Guo YL, Chen HYC, Mallik AU, Wang B, Li DX, Xiang WS, Li XK (2019) Predominance of abiotic drivers in the relationship between species diversity and litterfall production in a tropical karst seasonal rainforest. *Forest Ecology and Management*, 449, 117452.
- Guo YL, Li DX, Wang B, He YL, Xiang WS, Jiang YL, Li XK (2017) Composition and spatio-temporal dynamics of litter fall in a northern tropical karst seasonal rainforest in Nonggang, Guangxi, southern China. *Biodiversity Science*, 25, 265–274. (in Chinese with English abstract) [郭屹立, 李冬兴, 王斌, 何运林, 向悟生, 蒋裕良, 李先琨 (2017) 北热带喀斯特季节性雨林凋落物组分构成及时空动态特征. *生物多样性*, 25, 265–274.]
- Guo YL, Wang B, Li DX, Mallik AU, Xiang WS, Ding T, Wen SJ, Lu SH, Huang FZ, He YL, Li XK (2017) Effects of topography and spatial processes on structuring tree species composition in a diverse heterogeneous tropical karst seasonal rainforest. *Flora*, 231, 21–28.
- Guo YL, Wang B, Xiang WS, Ding T, Lu SH, Huang FZ, Wen SJ, Li DX, He YL, Li XK (2016) Responses of spatial pattern of woody plants' basal area to topographic factors in a tropical karst seasonal rainforest in Nonggang, Guangxi, southern China. *Biodiversity Science*, 24, 30–39. (in Chinese with English abstract) [郭屹立, 王斌, 向悟生, 丁涛, 陆树华, 黄甫昭, 文淑均, 李冬兴, 何运林, 李先琨 (2016) 喀斯特季节性雨林木本植物胸高断面面积分布格局及其对地形因子的响应. *生物多样性*, 24, 30–39.]
- Guo YL, Wang B, Xiang WS, Ding T, Lu SH, Huang YS, Huang FZ, Li DX, Li XK (2015) Spatial distribution of tree species in a tropical karst seasonal rainforest in Nonggang, Guangxi, southern China. *Biodiversity Science*, 23, 183–191. (in Chinese with English abstract) [郭屹立, 王斌, 向悟生, 丁涛, 陆树华, 黄俞淞, 黄甫昭, 李冬兴, 李先琨 (2015) 广西弄岗北热带喀斯特季节性雨林监测样地种群空间点格局分析. *生物多样性*, 23, 183–191.]
- Guo YL, Xiang WS, Wang B, Li DX, Mallik AU, Chen HYC, Huang FZ, Ding T, Wen SJ, Lu SH, Li XK (2018)

Partitioning beta diversity in a tropical karst seasonal rainforest in Southern China. *Scientific Reports*, 8, 17408.

- Han XY, Zhao FX, Li WY (2007) A review of researches on forest litterfall. *Forestry Science and Technology Information*, 39, 12–13, 16.
- Ingwell LL, Wright JS, Becklund KK, Hubbell SP, Schnitzer SA (2010) The impact of lianas on 10 years of tree growth and mortality on Barro Colorado Island, Panama. *Journal of Ecology*, 98, 879–887.
- Jiang YL, Li XK, Guo YL, Ding T, Wang B, Xiang WS (2017) Diversity of climbing seed plants and their reproductive habit in a karst seasonal rain forest in Nonggang, Guangxi, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 716–728. (in Chinese with English abstract) [蒋裕良, 李先琨, 郭屹立, 丁涛, 王斌, 向悟生 (2017) 广西弄岗喀斯特季节性雨林藤本种子植物多样性及繁殖习性. *植物生态学报*, 41, 716–728.]
- Jiang ZC, Yuan DX (1999) Dynamics features of the epikarst zone and their significance in environment sand resources. *Acta Geoscientica Sinica*, 20, 302–308. (in Chinese with English abstract) [蒋忠诚, 袁道先 (1999) 表层岩溶带的岩溶动力学特征及其环境和资源意义. *地球学报*, 20, 302–308.]
- Li XK, He CX, Tang JS, Jiang ZC, Huang YQ (2008) Evolution and ecological processes of karst ecosystem of Guangxi. *Guangxi Sciences*, 15, 80–86, 91. (in Chinese with English abstract) [李先琨, 何成新, 唐建生, 蒋忠诚, 黄玉清 (2008) 广西岩溶山地生态系统特征与恢复重建. *广西科学*, 15, 80–86, 91.]
- Liu CJ, Westman CJ, Berg B, Kutsch W, Wang GZ, Man RZ, Iivesniemi H (2004) Variation in litterfall-climate relationships between coniferous and broadleaf forests in Eurasia. *Global Ecology and Biogeography*, 13, 105–114.
- Malhi Y (2012) The productivity, metabolism and carbon cycle of tropical forest vegetation. *Journal of Ecology*, 100, 65–75.
- Poorter L, van der Sande MT, Thompson J, Arets EJMM, Alarcón A, Álvarez-Sánchez J, Ascarrunz N, Balvanera P, Barajas-Guzmán G, Boit A, Bongers F, Carvalho FA, Casanoves F, Cornejo-Tenorio G, Costa FRC, de Castilho CV, Duivenvoorden JF, Dutrieux LP, Enquist BJ, Fernández Méndez F, Finegan B, Gormley LHL, Healey JR, Hoosbeek MR, Ibarra-Manríquez G, Junqueira AB, Levis C, Licona JC, Lisboa LS, Magnusson WE, Martínez-Ramos M, Martínez-Yrizar A, Martorano LG, Maskell LC, Mazzei L, Meave JA, Mora F, Muñoz R, Nytech C, Pansonato MP, Parr TW, Paz H, Pérez-García EA, Rentería LY, Rodríguez-Velazquez J, Rozendaal DMA, Ruschel AR, Sakschewski B, Salgado-Negret B, Schiatti J, Simões M, Sinclair FL, Souza PF, Souza FC, Stropp J, ter Steege H, Swenson NG, Thonicke K, Toledo M, Uriarte M, van der Hout P, Walker P, Zamora N, Peña-Claros M (2015) Diversity enhances carbon storage in tropical forests. *Global Ecology and Biogeography*, 24, 1314–1328.
- 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 2019-11-15)
- Reiners WA, Lang GE (1987) Changes in litterfall along a gradient in altitude. *Journal of Ecology*, 5, 629–638.
- Sharma S, Hoque ATMR, Analuddin K, Hagihara A (2012) Litterfall dynamics in an overcrowded mangrove *Kandelia obovata* (S., L.) Yong stand over five years. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 98, 31–41.
- Swartzman G, Huang CH, Kaluzny S (1992) Spatial analysis of Bering Sea groundfish survey data using generalized additive models. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 49, 1366–1378.
- Vasconcelos HL, Luizão FJ (2004) Litter production and litter nutrient concentrations in a fragmented Amazonian landscape. *Ecological Applications*, 14, 884–892.
- Wang B, Huang YS, Li XK, Xiang WS, Ding T, Huang FZ, Lu SH, Han WH, Wen SJ, He LJ (2014) Species composition and spatial distribution of the 15 ha northern tropical karst seasonal rain forest dynamic plot in Nonggang of Guangxi, southern China. *Biodiversity Science*, 22, 141–156. (in Chinese with English abstract) [王斌, 黄俞淞, 李先琨, 向悟生, 丁涛, 皇甫昭, 陆树华, 韩文衡, 文淑均, 何兰军 (2014) 弄岗北热带喀斯特季节性雨林15 ha监测样地的树种组成与空间分布. *生物多样性*, 22, 141–156.]
- Wang FY (1989) Review on the study of forest litterfall. *Advances in Ecology*, 6(2), 82–89. (in Chinese with English abstract) [王凤友 (1989) 森林凋落量研究综述. *生态学进展*, 6(2), 82–89.]
- Wood SN (2006) *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. Chapman and Hall/CRC Press, London.
- Yan ER, Wang XH, Zhou W (2008) Characteristics of litterfall in relation to soil nutrients in mature and degraded evergreen broad-leaved forests of Tiantong, East China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32, 1–12. (in Chinese with English abstract) [阎恩荣, 王希华, 周武 (2008) 天童常绿阔叶林演替系列植物群落的N:P化学计量特征. *植物生态学报*, 32, 1–12.]
- Yu GS, Wang SJ, Rong L, Ran JC (2011) Litter dynamics of major successional communities in Maolan karst forest of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 1019–1028. (in Chinese with English abstract) [俞国松, 王世杰, 容丽, 冉景丞 (2011) 茂兰喀斯特森林主要演替群落的凋落物动态. *植物生态学报*, 35, 1019–1028.]
- Yuan DX (1991) *Karst of China*. Geological Publishing House, Beijing.
- Zhang H, Yuan W, Dong W, Liu S (2014) Seasonal patterns of litterfall in forest ecosystem worldwide. *Ecological Complexity*, 20, 240–247.
- Zhang Y, Chen HYH (2015) Individual size in equality links forest diversity and above-ground biomass. *Journal of Ecology*, 103, 1245–1252.

(责任编辑: 林露湘 责任编辑: 黄祥忠)



•研究报告•

水杉原生种群结构及空间分布格局

黄小¹ 朱江^{1,2*} 姚兰^{1,2} 艾训儒^{1,2}
王进¹ 吴漫玲¹ 朱强¹ 陈绍林³

1 (湖北民族大学林学院园艺学院, 湖北恩施 445000)

2 (生物资源保护与利用湖北省重点实验室, 湖北恩施 445000)

3 (湖北省星斗山国家级自然保护区管理局, 湖北恩施 445000)

摘要: 水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)是我国特有濒危极小种群物种, 其种群的状态一直被国内外学者广泛关注。分析现存水杉原生种群结构和空间分布格局及其空间关联性, 可以从空间格局角度深入认识水杉原生种群结构和分布格局及可能的形成机理。本文基于湖北利川境内水杉原生种群的野外调查数据, 分析其径级和高度级结构, 同时运用点格局分析中的成对相关函数 $g(r)$ 以及3个零模型(完全空间随机模型、异质泊松模型、先决条件模型)分析水杉原生种群空间分布格局、各龄级空间分布格局及空间关联性。结果表明: (1)分布于研究区域内的水杉原生种群个体数共5,663株, 已死亡33株, 现存活5,630株, 其中40株濒临死亡, 465株处于衰弱状态, 部分个体呈现不同的形态特征和生长状况, 断梢和蚁害最为常见, 雷击是最致命的危害。(2)水杉原生种群结构分析显示, 其径级结构和高度级结构均呈纺锤型, 自然更新不良。(3)基于完全空间随机模型, 水杉原生种群在各尺度下均呈现聚集分布, 中龄树在较小尺度($r < 3,300$ m)上呈现聚集分布, 成年树和老龄树在较大尺度($r < 4,700$ m)上呈现聚集分布; 排除生境异质性影响后, 聚集尺度均减小, 所以种群及不同龄级的聚集尺度分别为0–3,000 m、0–2,100 m、0–2,900 m和0–2,500 m, 随后呈现为微弱的随机分布和均匀分布。(4)基于完全空间随机模型, 3个龄级之间在所有尺度均为正关联; 在排除生境异质性影响后, 不同龄级的正关联尺度减小, 均在0–2,800 m呈正关联。综上, 水杉原生种群个体数量正呈现逐步减少的趋势, 种群主要呈聚集分布, 各个龄级间具有正向的关系, 从现有的空间格局来看, 生境异质性、扩散限制和种内竞争是导致该格局的主要原因。

关键词: 水杉原生种群; 种群结构; 点格局分析; 空间关联性

Structure and spatial distribution pattern of a native *Metasequoia glyptostroboides* population in Hubei

Xiao Huang¹, Jiang Zhu^{1,2*}, Lan Yao^{1,2}, Xunru Ai^{1,2}, Jin Wang¹, Manling Wu¹, Qiang Zhu¹, Shaolin Chen³

1 School of Forestry and Horticulture, Hubei Minzu University, Enshi, Hubei 445000

2 Key Laboratory of Biological Resources Protection and Utilization of Hubei Province, Hubei Minzu University, Enshi, Hubei 445000

3 Hubei Xingdoushan National Nature Reserve Administration, Enshi, Hubei 445000

Abstract: *Metasequoia glyptostroboides* is an endemic and endangered species in China, and has therefore been heavily researched. *M. glyptostroboides*' distribution seems to have a recognizable spatial pattern, with a clear potential mechanism. To test this, we analyzed the structure and diameter classes and height level classes from survey data of parent *M. glyptostroboides* trees with a pairwise correlation function $g(r)$ and three null models (complete spatial randomness, heterogeneous Poisson process, and antecedent condition) in a point pattern analysis. The results of the spatial distribution patterns showed that: (1) There was 5,661 individuals of the native *M. glyptostroboides* population in the study area. Within this population, 31 of which were dead, 40 trees were on the verge of death, and 465 trees were classified as “weak”, with morphological characteristics and growth conditions associated with these trees such as shoot breakage, ant

收稿日期: 2019-09-08; 接受日期: 2019-11-27

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0503100)、湖北省自然科学基金(2019CFB229)、湖北省“双一流”建设专项基金和湖北民族大学博士启动基金(MY2018B027)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: 2017052@hbmy.edu.cn

damage, and lightning strike. (2) Both the diameter-class structure and the height-class structure were spindle-shaped, with poor natural renewal; (3) Based on Complete Spatial Randomness, the native *M. glyptostroboides* population showed a random distribution at all scales, the middle-aged trees showed an aggregation distribution on a small scale ($r < 3,300$ m), and the adult trees and the older trees appeared an aggregation distribution on a larger scale ($r < 4,700$ m). The aggregation scales of the population and the different age groups were 0–3,000 m, 0–2,100 m, 0–2,900 m and 0–2,500 m, respectively, and followed a weak random distribution and uniform distribution. (4) Based on Complete Spatial Randomness, there were positive correlations between the three growth stages at all scales that weakened when habitat heterogeneity was excluded (only a positive correlation between 0–2,800 m). In summary, the *M. glyptostroboides* population is decreasing gradually with poor population regeneration. The population is presented mainly as cluster distribution with positive relationship among all age classes, due to habitat heterogeneity, diffusion limitation and intra-species competition according to the existing spatial pattern.

Key words: *Metasequoia glyptostroboides*; population structure; point pattern analysis; space correlation

极小种群野生植物(Wild Plant with Extremely Small Populations, PSESP)属于极度濒危植物物种, 由于自身的生物学特征或外界干扰和破坏等因素, 现存个体数量少, 已低于稳定存活界限的最小生存种群(minimum viable population, MVP)。该类极小种群野生植物生长地区狭窄或者分布出现间断状态, 自然更新能力较差, 随时面临灭绝的风险(IUCN, 1997; 西尔维唐, 2003), 因此开展对极小种群野生植物的研究和保护对我国生物多样性保护具有重要意义。

极小种群野生植物的拯救和保护强调对种群结构和空间分布的研究。种群垂直结构和径级结构反映了种群数量动态及其发展趋势, 在一定程度上反映了种群与环境间的相互关系及其在群落的作用和地位(苏志尧等, 2000)。种群的空间分布格局是指在某个特定的区域内, 种群个体在该生境中的水平分布方式(Condit et al, 2000; Velázquez et al, 2016), 能够在一定程度上对种群空间的动态变化及变化过程进行解释, 反映种内和种间的相互作用、相互关系, 同时还可以反映出环境对种群生存和生长的影响(侯向阳和韩进轩, 1997; Kubota et al, 2007; 龚直文等, 2010)。目前已有学者对广西青梅(*Vatica guangxiensis*) (蒋迎红等, 2016)、峨眉含笑(*Michelia wilsonii*) (肖书礼等, 2019)、梓叶槭(*Acer catalpifolium*) (许恒和刘艳红, 2018)、黄梅秤锤树(*Sinojackia huangmeiensis*) (王世彤等, 2018)、铁竹(*Ferrocalamus strictus*) (喻丁香等, 2018)等极小种群野生植物种群的结构与动态开展了研究, 但是很少见到对某一极小种群野生植物所有的个体进行空间格局分析。对它们的种群结构和空间分布格局进行研究一

方面可以对种群进行定量描述, 另一方面可以揭示濒危植物种群和环境的关系, 为濒危植物的保护提供科学依据。

水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)是我国著名的柏科水杉属孑遗植物, 被誉为“活化石”。水杉原生种群分布的范围极其狭窄, 现存的个体数量较少, 2012年被列入世界自然保护联盟(IUCN)濒危物种红色名录。目前, 对水杉原生种群的研究主要集中在以下几个方面: 发现及保护(马金双, 2003; 王希群等, 2004b)、遗传特性(陈文文, 2016^①; 刘小红, 2019; 张咏祀和刘小红, 2019)、繁殖和栽培(龚维红和夏猛, 2015; 刘玉配, 2015^②)、种群特征及与环境的关系(周成河, 2006^③; 熊彪等, 2010; 林勇等, 2017; 郭秋菊等, 2018)、引种(马履一等, 2006)及药用价值(Beckmann & Geiger, 1968; 殷倩等, 2013)等方面。其中对水杉原生种群空间分布的研究仅限于建立样地, 对一定区域内的个体进行空间格局分析, 而未见有使用点格局方法对所有水杉原生种群的空间分布格局进行分析。本文以湖北利川境内水杉原生种群的5,663株母树为研究对象, 调查其生长状况, 系统地测算种群结构相关参数, 分析其结构特征, 并基于不同零模型的点格局分析方法, 采用单变量成对相关函数(pair correlation function, PCF)分析水杉原生种群及不同龄级空间分布格局特征, 采用双变量成对相关函数分析不同龄级的空间关联

① 陈文文 (2016) 水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)自然种群交配系统和扩散格局研究. 硕士学位论文, 华东师范大学, 上海.

② 刘玉配 (2015) 濒危物种水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)自然种群的更新限制研究. 硕士学位论文, 华东师范大学, 上海.

③ 周成河 (2006) 湖北利川水杉原生种群的生态学研究. 硕士学位论文, 华中农业大学, 武汉.

性,探讨了空间分布格局形成的原因,试图揭示水杉原生种群发育过程中的空间动态,为其就地保护和自然更新技术提供参考。

1 研究区域概况

水杉原生种群仅分布于湖北利川、重庆石柱、湖南龙山中间极狭窄的三角形区域内,且大部分位于利川星斗山国家级自然保护区西部小河片区(108°31′–108°48′ E、30°04′–30°14′ N),面积约为60,000 ha。该区属云贵高原东北延伸、巫山与武陵山脉交汇处,多山地、峡谷、丘陵、山间盆地等复杂地形,最高海拔为2,041.5 m,水杉原生种群分布海拔在830–1,565 m之间,平均海拔为1,028 m。该区属亚热带山地季风湿润气候,冬季严寒,夏无酷暑,降雨充沛,雨热同期,年均温12.8℃,年降水量为1,200–1,400 mm,相对湿度82%,无霜期平均230 d,年均日照1,298 h,土壤类型主要为黄壤、黄棕壤和紫色土。

水杉原生种群处于亚热带常绿落叶阔叶混交林中,群落结构复杂多样,其生境条件越来越差,受到人为干扰(剔枝、根部填埋、火烧等)和自然灾害(雷击、虫害等)的影响严重。群落中水杉原生种群仍然处于优势地位,其伴生种主要有杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、柳杉(*Cryptomeria fortunei*)、香椿(*Toona sinensis*)、枫香树(*Liquidambar formosana*)、三尖杉(*Cephalotaxus fortunei*)等,隶属36科62属72种(陈斯等,2017;林勇等,2017)。

2 研究方法

2.1 野外调查

2017年5–11月,对分布于湖北利川境内水杉原生种群的5,663株个体进行调查。调查指标包括:树高(H)、胸径(DBH)、GPS坐标及生长势,同时记录个体生长情况,如是否被雷击、风折、虫害等。胸径、冠幅、树高和GPS坐标采用实测法,生长势参考《DB11 T 478-2007古树名木评价标准》(http://yllhj.beijing.gov.cn/zwgk/fgwj/dfbz/201911/t20191130_765256.shtml),分为正常、衰弱、濒危3种。

2.2 种群径级和高度级划分

参照熊彪(2010)和金鑫等(2018)的径级划分标准,将水杉原生种群分为10个径级(采用上限排外

法,以10 cm为一个步长): I级(20 cm ≤ DBH < 30 cm)、II级(30 cm ≤ DBH < 40 cm)、III级(40 cm ≤ DBH < 50 cm)、IV级(50 cm ≤ DBH < 60 cm)、V级(60 cm ≤ DBH < 70 cm)、VI级(70 cm ≤ DBH < 80 cm)、VII级(80 cm ≤ DBH < 90 cm)、VIII级(90 cm ≤ DBH < 100 cm)、IX级(100 cm ≤ DBH < 150 cm)、X级(DBH ≥ 150 cm)。采用径级代替龄级的方法,并结合水杉的生长特性,将水杉原生种群个体分为中龄树(I级–IV级)、成年树(V级–VIII级)、老龄树(IX级、X级)。

根据水杉原生种群的树高(H)分布特征,按照上限排外法将垂直结构由低到高依次划分为9个垂直层次: I层(H < 10 m)、II层(10 m ≤ H < 15 m)、III层(15 m ≤ H < 20 m)、IV层(20 m ≤ H < 25 m)、V层(25 m ≤ H < 30 m)、VI层(30 m ≤ H < 35 m)、VII层(35 m ≤ H < 40 m)、VIII层(40 m ≤ H < 45 m)、IX层(H ≥ 45 m)。

2.3 点格局分析方法

点格局分析采用成对相关函数 $g(r)$ 进行分析。 $g(r)$ 函数是 $K(r)$ 函数的衍生,Ripley's $K(r)$ 函数是以研究区内任意一点为圆心、 r 为半径的圆内期望点数与样方点数密度的比值,而 $g(r)$ 函数是基于对所有定位的成对个体之间距离的格局分析,以任意一点为圆心、 r 为半径,指定一定宽度的圆环区域内的点的数量来进行空间点格局分析,消除了 $K(r)$ 函数在大尺度上产生的累积效应(Ripley, 1976; Thorsten et al, 2007; 祝燕和马克平, 2010)。

采用单变量 $g(r)$ 函数和双变量 $g_{12}(r)$ 函数分别分析整个水杉原生种群、不同龄级的空间分布格局和不同龄级之间的空间关联性。点格局分析中采用的圆环宽度为1 m,通过199次Monte Carlo随机模拟,分别利用模拟的最大值和最小值生成上下两条包迹线,计算99%的置信区间(Wiegand et al, 2006, 2009),最大距离尺度取5,000 m,大致为较短边长的1/4,其中单变量 $g(r)$ 函数和双变量 $g_{12}(r)$ 函数计算公式如下:

$$g(r) = (2\pi r)^{-1} dK(r) / dr \quad (1)$$

$$g_{12}(r) = (2\pi r)^{-1} dK_{12}(r) / dr \quad (2)$$

式中: r 为空间尺度的距离。当 $g(r)$ 值处于两条包迹线之上,则种群为聚集分布;处于两条包迹线之间,则种群为随机分布;处于两条包迹线之下,则种群

为均匀分布。当 $g_{12}(r)$ 值处于包迹线之上,则表现为正关联;处于包迹线之下,则表现为负关联;处于包迹线之间,则两者没有关联性(闫海冰等,2010)。

2.4 零模型检验

在进行点格局分析时,不同的分析需要选择不同的零假设模型(null model),选取正确的零模型十分重要(梁爽等,2014)。在本研究中单变量 $g(r)$ 函数采用完全空间随机模型(Complete Spatial Randomness, CSR)和异质泊松模型(Heterogeneous Poisson Process, HP),双变量 $g_{12}(r)$ 函数采用完全空间随机模型(CSR)和先决条件模型(Antecedent Condition, AC)。其中完全空间随机模型(CSR)假设样区内的每个点在任何位置上出现的几率都是等同的且相互独立的,其分布不受任何生物或非生物的影响;异质泊松模型(HP)依据密度函数 $\lambda(x, y)$ 界定个体的分布,可以排除大尺度环境异质性的影响,采用高斯核函数(Diggle, 2003)进行密度估计,选取标准差 $\sigma = 1,500$ m消除大尺度上环境异质性对空间格局的影响;先决条件模型(AC)在生成双变量 $g_{12}(r)$ 函数的包迹线时,假设对照个体的位置不变,案例中的个体随机分布。

文中数据的处理与分析使用R 3.4.1软件中的spatstat包完成,制图使用Origin 2018软件完成。

3 结果

3.1 种群生存现状

调查结果显示,分布于湖北利川境内的5,663株水杉原生个体,已有33株死亡,现存活个体数量为5,630株,其中40株濒临死亡,465株处于衰弱状态。有一些个体呈现不同的个体特征和生长状况,其中濒临死亡的个体主要表现出以下特征:雷击、断梢、树木干枯或腐烂、基部空心、树皮损害、人为剔枝等。根据统计发现(表1),虫害和断梢是最常见的现象,分别占种群所有个体的3.8%和4.8%,调查中有91株水杉曾被雷击,其中75株个体生长势呈现衰弱或濒死状态,而且个体断梢的原因大部分也是雷击所致,可见对水杉原生种群的生存最致命的风险是雷击。

3.2 种群结构分析

3.2.1 径级结构

水杉原生种群DBH最小为20.2 cm,平均为66.01 cm,其中水杉原生种群中,中龄树、成年树和

表1 水杉原生种群不同生长状况的个体数

Table 1 Number of individuals with different growth status of native *Metasequoia glyptostroboides* population

	濒死 Impending death	衰弱 Weakness	正常 Normal	总计 Total
断梢 Broken shoot	13	112	146	271
蚁害 Ant damage	1	40	171	212
雷击 Lightning strike	13	62	16	91
树木干枯 Dry-up of trees	10	44	16	70
根部空心 Root cavity	5	36	38	79
鸟害 Bird damage	0	15	51	66
树木分叉 Tree bifurcation	3	10	43	56
偏冠 Lopsided crown	0	16	36	52
根部腐烂 Root decay	4	25	19	50
雪压 Snow pressure	0	6	4	10
根部填埋 Root landfill	0	3	6	9
主干倾斜 Trunk tilt	3	3	3	9
火烧 Burn	1	3	0	4
树皮损害 Bark damage	4	0	1	5
人为剔枝 Artificial shaving	4	0	0	4

老龄树分别占全部个体的38.26%、58.51%和3.23%。个体数量主要集中分布在IV-VI级(图1A),分别为1,286株、1,387株和1,084株,合计占水杉原生种群的66.73%,而较小径级和较大径级的个体数量相对较少。这一结果显示,水杉原生种群个体胸径相对较大,种群具有一定的古老性,个体均相对成熟,径级结构呈纺锤型。

3.2.2 高度级结构

水杉原生种群个体平均树高为30.2 m,不同高度级个体数量呈正态分布(图1B),且多数集中在V层和VI层,分别有1,537株和2,751株,分别占水杉原生种群总体数量的27.3%和48.86%。

3.3 空间格局分析

3.3.1 水杉原生种群空间分布格局

研究区域内水杉原生种群个体空间分布情况如图2所示。基于完全空间随机模型(CSR)的分析结果显示(图3),在0-5,000 m尺度上,水杉原生种群的 $g(r)$ 值均处于包迹线之上,呈强烈的聚集分布;而基于异质泊松模型(HP),水杉原生种群在0-3,000 m尺度上呈现强烈的聚集分布,仅在3,100-3,200 m呈现随机分布,随后过渡为均匀分布。用异质泊松模型(HP)来排除1,500 m以上的环境异质性能效应后(图3),水杉原生种群聚集尺度缩小,反映出水杉原生种群在

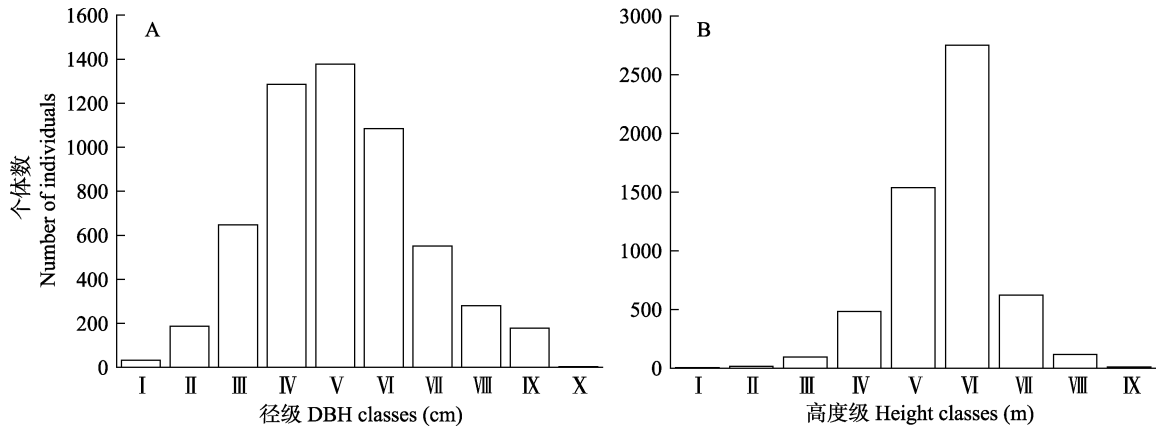


图1 水杉原生种群的径级和高度级结构

Fig. 1 Diameter and height classe structure of native *Metasequoia glyptostroboides* population

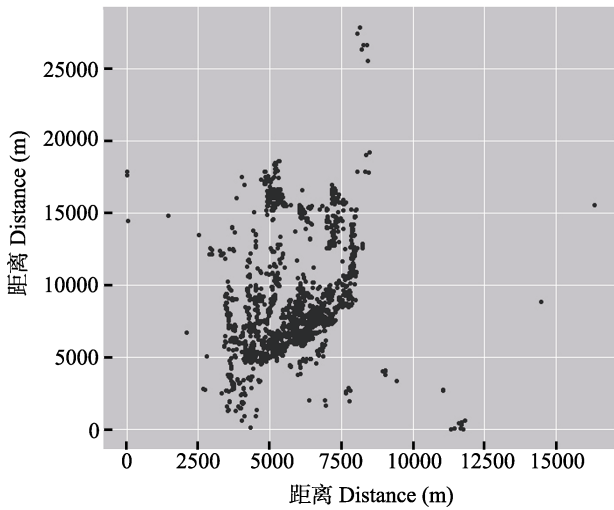


图2 水杉原生种群空间分布点图

Fig. 2 Spatial distribution point of native *Metasequoia glyptostroboides* population

3,100–5,000 m尺度上受到了明显的异质生境作用。

3.3.2 不同龄级空间分布格局

基于完全空间随机模型(CSR)的分析表明(图4), 中龄树在0–3,300 m尺度上呈现为聚集分布, 随后呈现随机或均匀分布; 成年树和老龄树均在0–4,700 m尺度上呈现聚集分布, 随后过渡为均匀分布。基于异质泊松模型(HP)在排除了1,500 m以上的大尺度环境异质性的影响后, 各龄级的聚集尺度缩小, 分别在0–2,100 m、0–2,900 m和0–2,500 m出现强烈的聚集分布, 其他尺度上均呈现微弱的随机分布或均匀分布。上述结果显示水杉原生种群空间分布格局在排除生境异质性影响后发生了明显的变化, 反映出不同龄级分别在2,200–3,200 m、3,000–4,600 m和2,600–4,600 m尺度上受到了明显的异质生境作用。

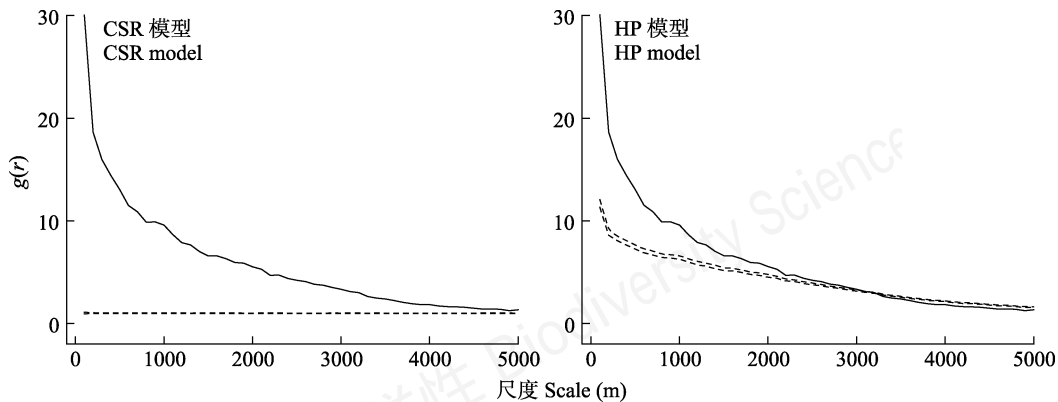


图3 采用完全空间随机模型(CSR)和异质泊松模型(HP)的水杉原生种群空间分布格局。实线为 $g(r)$ 值, 虚线为99%置信区间。
Fig. 3 Spatial patterns of the native *Metasequoia glyptostroboides* population based on Complete Spatial Randomness (CSR) and Heterogeneous Poisson Process (HP) models. The solid and dashed line are $g(r)$ value and 99% confidence envelopes, respectively.

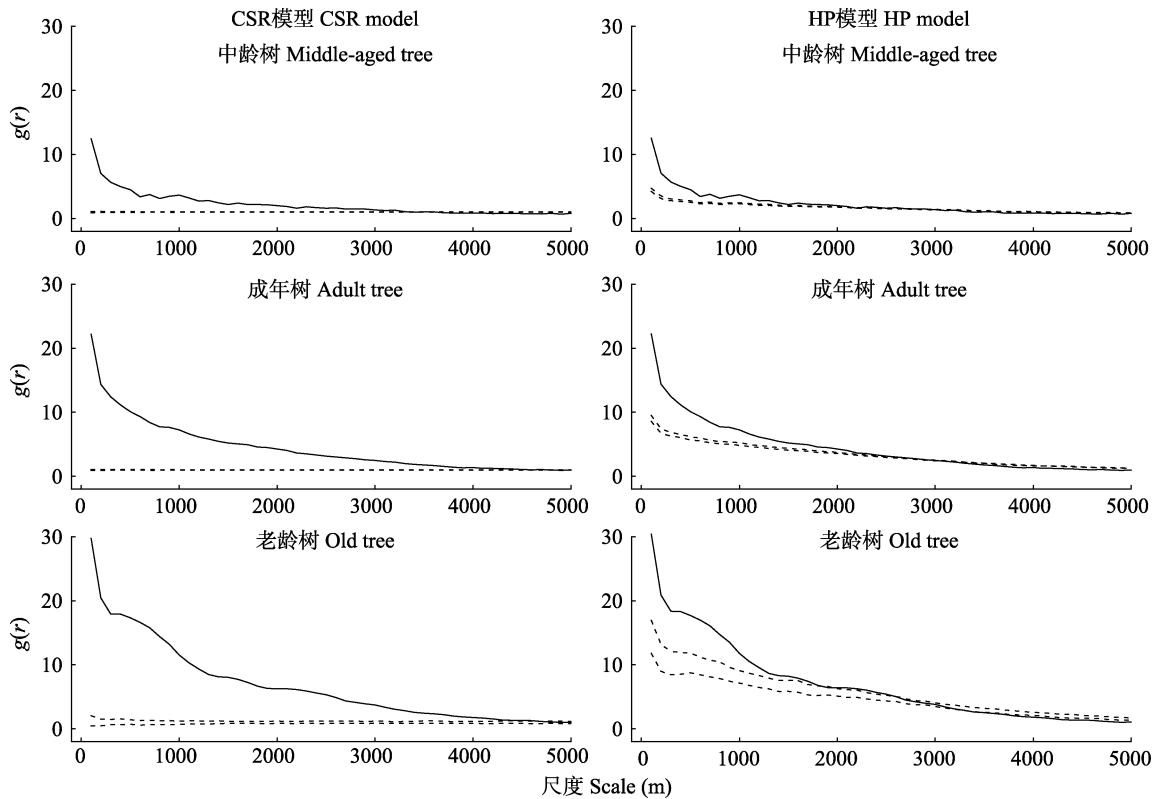


图4 采用完全空间随机模型(CSR)和异质泊松模型(HP)的不同龄级水杉原生种群空间分布格局。实线为 $g(r)$ 值, 虚线为99%置信区间。

Fig. 4 Spatial distribution pattern of different ages in the native population of *Metasequoia glyptostroboides* based on Complete Spatial Randomness (CSR) and Heterogeneous Poisson Process (HP) models. The solid and dashed lines are $g(r)$ value and 99% confidence envelopes, respectively.

3.3.3 不同龄级空间关联性分析

基于完全空间随机模型的双变量 $g_{12}(r)$ 函数分析结果表明(图5): 3个龄级在所有尺度上都表现为强烈的正相关。基于先决条件模型(AC)在排除环境异质性的分析结果表明(图5): 成年树vs.中龄树、老龄树vs.中龄树、老龄树vs.成年树两两龄级之间的空间关联性均在0–2,800 m尺度上表现为显著正关联, 其中成年树和中龄树在2,900–3,300 m尺度上表现为无明显关联性, 在 $r \geq 3,400$ m尺度上表现为显著负关联, 老龄树和中龄树、老龄树和成年树均在2,900–3,200 m尺度上表现为无明显关联性, 其他尺度呈现为显著负关联。

4 讨论

4.1 水杉原生种群的生存现状

自水杉发现至今已开展了多次调查。1983年调查发现位于湖北省利川市小河地区的水杉原生种群个体数为5,746株(王希群等, 2004a), 本研究在

2017年复查时发现现存水杉原生种群仅剩5,630株, 部分个体受到各种因素影响, 可能是导致死亡的原因。程小玲(2004)和陈绍林等(2008)研究发现, 水杉原生种群每年有1‰的个体被煤烟污染致死, 2%的个体遭受雷击和被大水侵蚀倒毁, 大部分个体受到水杉色卷蛾(*Choristoneura metasequiacola*)、黑翅土白蚁(*Odontotermes formosanus*)、蚂蚁等虫害的影响。本研究发现, 雷击对水杉造成致命的影响, 被雷击的大部分个体生长势呈现衰弱或濒死状态, 雷击也可能是导致大部分个体出现断梢、树木空心等特征的原因; 3.8%出现蚁害现象, 但对其生长势的影响较小; 较少发现煤烟危害情况, 可能是因为使用煤炭的农户减少。但是出现了新的人为因素(如树皮损害、火烧和人为剔枝), 对水杉生存产生了致命的影响, 导致个体呈现濒死状态。

4.2 水杉原生种群结构特征

种群结构可以反映种群整体生长状况, 垂直结构可反映种群个体在空间及时间上的配置状况和

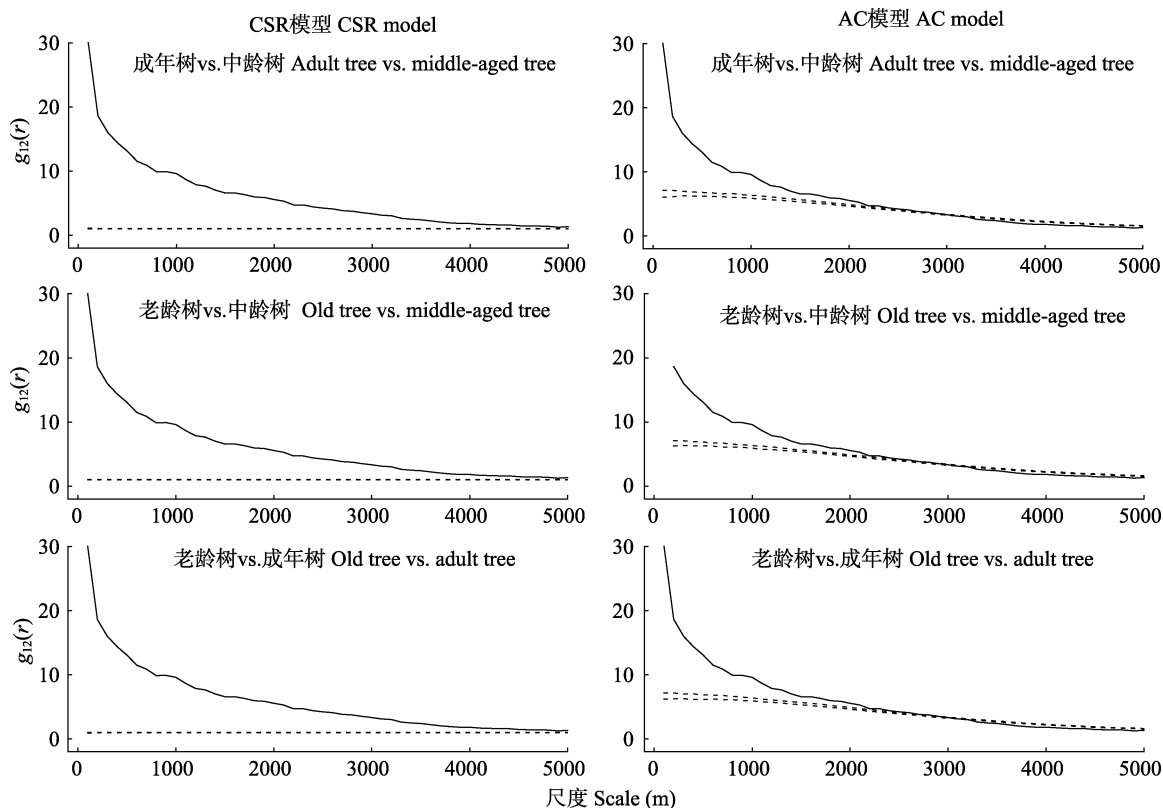


图5 采用完全空间随机模型(CSR)和先决条件模型(AC)的不同龄级水杉原生种群空间关联性。实线为 $g_{12}(r)$ 值, 虚线为99%置信区间。

Fig. 5 Spatial associations of the native population of *Metasequoia glyptostroboides* based on Complete Spatial Randomness (CSR) and Antecedent Condition (AC) models. The solid and dashed lines are $g(r)$ value and 99% confidence envelopes, respectively.

立地条件等, 年龄结构决定着种群的繁殖能力, 不同的年龄组配情况反映了种群的未来发展趋势和动态(张亚芳等, 2015; 姜在民等, 2018; 王智勇等, 2018)。研究结果显示, 种群结构呈纺锤型, 说明种群自然更新不良, 符合珍稀濒危物种的种群趋于衰退的一般规律(张文辉和祖元刚, 2002; 张文辉等, 2005)。种群的垂直结构位于 $25\text{ m} \leq H < 35\text{ m}$ 层次的个体数较多, 占总数的76.16%, 可能是由于中等高度的个体采取强烈保守的生活史策略以更好地适应环境; 采用径级代替龄级, 研究发现种群在 $50\text{ cm} \leq \text{DBH} < 80\text{ cm}$ 的存活个体数最丰富, 占总数的66.73%, 可能是因为在该阶段种群相对较稳定, 对自然环境、人为干扰的应对能力和资源的获取能力更强。最小DBH为20.2 cm, 说明天然更新极差。张卜阳和张丰云(1980)和程丹丹(2007)研究发现水杉虽然是雌雄同体物种, 但是个体生长到20年左右开雌球花, 25年左右开雄球花, 而且同一年雌雄花期也不一致, 从而影响授粉, 故水杉种子多为空粒,

无胚种子所占比例较大导致发芽率仅为5%–11%, 这是天然更新能力低的原因之一。尤冬梅和马广礼(2008)发现水杉种子质量轻, 难以通过厚积的枯落物接触到土壤, 从而影响了萌发, 导致天然更新差。自然灾害以及人为干扰也导致天然更新低(林勇等, 2017)。本次实地调查发现水杉有效胚种子较少, 种子的千粒重大概为2.5–3.5 g, 当水杉林下植被和凋落物较厚时, 种子很难接触到土壤, 部分种子生长为幼苗后, 对环境要求较高, 存活率低, 导致天然更新能力较差; 受到雷击、虫害(啄木鸟、蚁害)等自然灾害严重; 人为采种、剔枝严重和修建公路导致根部被水泥浇灌等因素也导致水杉种群的生长状况不佳, 更新能力低下。可见自身的生态学特征、自然灾害和人为干扰是导致水杉原生种群濒危和更新能力低下的原因。调查过程中在利川市林业科学研究所和星斗山国家级自然保护区发现两处自然更新的幼苗, 观察到该地林下植被较少, 推测这两处幼苗天然更新的能力较强可能与地下植被

和凋落物等较少有关。这一推测有待于进一步的实验检验。

4.3 水杉原生种群空间分布格局分析

种群空间分布一般与潜在的生物和非生物过程有内在联系(李艳丽等, 2014), 种群空间分布格局通常受到很多因素的影响(李帅锋等, 2013)。在自然条件下, 生境异质性、扩散限制、生物间的相互作用、干扰等生物和非生物因素和过程被认为是影响物种在不同空间尺度上格局形成和变化的潜在生态学机制。

环境异质性被认为是在大尺度上产生植被空间分布格局的主要原因(Takyu et al, 2002; Clark et al, 2010)。本研究中, 采用不同的零模型得出水杉原生种群的空间分布和种内关系发生了一定的变化, 基于完全空间随机模型, 水杉原生种群在整个尺度上呈现聚集分布、各个龄级呈现正关联, 排除生境异质性后, 在0–3,000 m尺度上呈现聚集分布; 各个龄级之间在0–2,800 m尺度上呈现正关联, 其余尺度存在微弱的无相关或负相关, 可以推测水杉原生种群空间分布格局的形成在很大程度上受到环境异质性的影响。通过野外调查水杉种群的特有生境偏好, 主要分布在水旁、田间、屋旁、山坡、山林中(竹林、柳杉林等)、公路旁、荒地等, 也有许多个体分布于几种生境类型组成的复杂环境。总体来看分布在水旁的个体居多, 主要是因为水杉个体的根系发达, 喜光、喜土层深厚、喜湿润或有积水的地方(熊彪等, 2010), 同时, 水杉原生种群分布的面积较大(60,000 ha), 不同地区的气候、地形会存在一定的差异, 受到环境异质性的限制, 在适应水杉个体生长的范围内出现强烈的聚集分布。水杉原生种群在较大的范围都属于正关联, 不同龄级水杉原生种群的生境偏好大概一致, 这是由同一种群的个体生物学特性的相似性决定的, 体现了同一物种利用环境资源的相似性和生态位的重叠(张俊艳等, 2014)。

在小尺度上, 种群的空间分布格局表现为种子扩散限制、种内和种间竞争因素。在排除环境异质性后, 水杉原生种群整体及龄级仍呈现聚集分布, 不同龄级的聚集尺度均有所减小, 特别是成年树和老龄树, 而中龄树在排除环境异质性后, 聚集尺度变化没有成年树和老龄树明显, 这可能是由于扩散限制导致的。水杉属于球果类植物, 球果四棱状椭圆形, 种鳞木质化, 种子呈倒卵形、扁平、周围有

窄翅(张卜阳和张丰云, 1980), 球果中的种子主要靠自然脱落而脱离球果, 主要的扩散方式靠风力传播, 大部分种子会落在个体周围, 有研究发现水杉原生种群种子借风力散播的有效距离为4–8 km (李作洲等, 2003)。在调查水杉原生种群时发现, 在个体四周发现幼苗更新的范围大概15–20 m左右, 所以受到扩散限制, 距离越远种子的数量越少, 聚集尺度也变小。

种内和种间竞争也是影响种群聚集分布的一部分原因。种群呈现聚集分布格局有利于发挥群体效应, 形成适宜自身生长的环境, 增加种间竞争力, 抵御外来物种入侵, 维持种群的正常发展(韩路等, 2007)。水杉原生种群不同龄级之间在较大的范围内都属于正关联, 种群内几乎没有相互排斥的现象, 产生了正向的关系, 个体之间存在强烈的“庇护和被庇护”效应, 形成相互有利的空间环境从而抵御种间竞争, 使种群在群落中处于优势地位, 利于种群的生存和发展, 而种间竞争则需要进一步的研究。

5 结论

总的来说, 水杉原生种群个体数正逐渐减少且部分个体生存状况不良, 雷击、人为干扰等原因直接导致个体死亡或濒危; 种群更新不良, 自身的生态学特征、自然灾害和人为干扰是导致水杉种群濒危和更新能力低下的原因, 而适当的人为干预可以增强天然更新能力; 水杉原生种群主要呈现聚集分布, 各个生长阶段间呈正关联, 其原因主要是水杉原生种群特有的生境偏好以及扩散限制等。目前该种群仍然处于濒危状态, 随时有灭绝的危险。为了加强对水杉原生种群野生植物的就地保护和种群复壮, 提出以下保护措施: (1)为个体较高的孤立木安置避雷针, 避免雷击导致的死亡; (2)加强保护, 减少人为干扰; (3)针对自然更新不良的现状, 适当去除林下灌丛, 使种子能够着生于土壤, 提高野外的更新能力; (4)加强基础研究, 寻找其生长限制因子、最适生境等, 为其创造更有利的生存环境, 为水杉原生种群的就地保护、种苗繁育和野外回归等提供参考。

参考文献

Beckmann S, Geiger H (1968) Inhaltsstoffe von *Metasequoia glyptostroboides*—II: Flavon- und flavonolglykoside.

- Phytochemistry, 7, 1667–1671.
- Chen S, Ai XR, Yao L, Lin Y, Huang W (2017) Niche of tree layer dominant population in the original *Metasequoia glyptostroboides* mother trees communities. Journal of Green Science and Technology, (8), 4–6. (in Chinese with English abstract) [陈斯, 艾训儒, 姚兰, 林勇, 黄伟 (2017) 水杉原生母树群落乔木层优势种生态位. 绿色科技, (8), 4–6.]
- Chen SL, Chen SM, Yu ZW, Du Y, Sun YY (2008) Current status and measures for the mother tree protection of *Metasequoia glyptostroboides* in Xingdou Mountain Nature Reserve. Forest Inventory and Planning, 33(4), 72–75. (in Chinese with English abstract) [陈绍林, 陈世明, 余致武, 杜勇, 孙云逸 (2008) 星斗山自然保护区水杉母树的生长状况及保护策略. 林业调查规划, 33(4), 72–75.]
- Cheng DD, Ge JW, Lai XL, Liu XQ, Fan SH (2007) Status and conservation strategy of native population of *Metasequoia glyptostroboides*. Environmental Science & Technology, 30(5), 48–50. (in Chinese with English abstract) [程丹丹, 葛继稳, 赖旭龙, 刘宪群, 范深厚 (2007) 原生水杉种群现状及保护对策. 环境科学与技术, 30(5), 48–50.]
- Cheng XL (2004) Study on the protection of primary population of *Metasequoia glyptostroboides* in Lichuan, Hubei Province. Forest Investigation Design, (2), 19–21. (in Chinese with English abstract) [程小玲 (2004) 湖北利川水杉原生种群保护的研究. 林业勘查设计, (2), 19–21.]
- Clark DB, Clark DA, Read JM (2010) Edaphic variation and the mesoscale distribution of tree species in a neotropical rain forest. Journal of Ecology, 86, 101–112.
- Condit R, Ashton PS, Baker P, Bunyavejchewin S, Gunatilleke S, Gunatilleke N, Hubbell SP, Foster RB, Itoh A, Lafrankie, JV (2000) Spatial patterns in the distribution of tropical tree species. Science, 288, 1414–1418.
- Diggle PJ (2003) Statistical Analysis of Spatial Point Patterns, (Vol. 47), 2nd edn. Hodder Education Publishers, London.
- Gong WH, Xia M (2015) Effects of different media and different growth regulators on cutting roots of *Metasequoia glyptostroboides*. Heilongjiang Agricultural Sciences, (5), 58–60. (in Chinese with English abstract) [龚维红, 夏猛 (2015) 不同基质和不同生长调节剂对金叶水杉扦插生根的影响. 黑龙江农业科学, (5), 58–60.]
- Gong ZW, Gu L, Kang XG, Yang H, Zhao HY (2010) Spatial pattern of forests during secondary succession in Changbai Mountain, northeastern China. Journal of Beijing Forestry University, 32(2), 92–99. (in Chinese with English abstract) [龚直文, 顾丽, 亢新刚, 杨华, 赵浩彦 (2010) 长白山森林次生演替过程中林木空间格局研究. 北京林业大学学报, 32(2), 92–99.]
- Guo QJ, Wang ZM, Deng ZZ (2018) Influences of different sodium selenite concentrations on seed germination of *Metasequoia glyptostroboides*. Guihaia, 38, 1319–1325. (in Chinese with English abstract) [郭秋菊, 王志鸣, 邓楨珍 (2018) 不同浓度亚硒酸钠溶液对水杉种子萌发的影响. 广西植物, 38, 1319–1325.]
- Han L, Wang HZ, Peng J, Mo ZX (2007) Spatial distribution patterns and dynamics of major population in *Populus euphratica* forest in upper reaches of Tarim River. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 27, 1668–1673. (in Chinese with English abstract) [韩路, 王海珍, 彭杰, 莫洽新 (2007) 塔里木河上游天然胡杨林种群空间分布格局与动态研究. 西北植物学报, 27, 1668–1673.]
- Hou XY, Han JX (1997) Simulation analysis of spatial patterns of main species in the Korean-pine broadleaved forest in Changbai Mountain. Acta Phytoecologica Sinica, 21, 242–249. (in Chinese with English abstract) [侯向阳, 韩进轩 (1997) 长白山红松林主要树种空间格局的模拟分析. 植物生态学报, 21, 242–249.]
- IUCN (1997) Guidelines for the Convention on Biological Diversity. Science Press, Beijing. (in Chinese) [IUCN (1997) 生物多样性公约性指南. 科学出版社, 北京.]
- Jiang YH, Shen WH, Tan CQ, Xiang WH, Peng YH, Pan GB (2016) The population structure and dynamics analysis and protection strategy of *Vatica guangxiensis* extremely small population. Ecological Science, 35(6), 67–72. (in Chinese with English abstract) [蒋迎红, 申文辉, 谭长强, 项文化, 彭玉华, 潘光波 (2016) 极小种群广西青梅种群结构、动态分析及保护策略. 生态科学, 35(6), 67–72.]
- Jiang ZM, He ZS, Su H, Zhao H, Cai J (2018) Population structure and dynamic characteristics of endangered *Syringa pinnatifolia* Hemsl. Acta Ecologica Sinica, 38, 2471–2480. (in Chinese with English abstract) [姜在民, 和子森, 宿昊, 赵涵, 蔡靖 (2018) 濒危植物羽叶丁香种群结构与动态特征. 生态学报, 38, 2471–2480.]
- Jin X, Zhang QD, Xu Q, Ji Y, Bi RC (2018) Population distribution patterns and interspecific spatial associations of *Acanthopanax senticosus* populations in Lingkong Mountain, Shanxi Province, China. Plant Science Journal, 36, 327–335. (in Chinese with English abstract) [金鑫, 张钦弟, 许强, 吉颖, 毕润成 (2018) 山西灵空山刺五加种群空间分布格局及种间空间关联性. 植物科学学报, 36, 327–335.]
- Kubota Y, Kubo H, Shimatani K (2007) Spatial pattern dynamics over 10 years in a conifer/broadleaved forest, northern Japan. Plant Ecology, 190, 143–157.
- Li SF, Liu WD, Su JR, Lang XD, Zhang ZJ (2013) Age structure and spatial distribution patterns of *Taxus yunnanensis* population in Lanping County, Yunnan Province. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 33, 792–799. (in Chinese with English abstract) [李帅锋, 刘万德, 苏建荣, 郎学东, 张志钧 (2013) 云南兰坪云南红豆杉种群年龄结构与空间分布格局分析. 西北植物学报, 33, 792–799.]
- Li YL, Yang H, Kang XG, Wang Y, Yue G, Shen L (2014) Spatial heterogeneity of natural regeneration in a spruce-fir mixed broadleaf-conifer forest in Changbai Mountains. Chinese Journal of Applied Ecology, 25, 311–317. (in Chinese with English abstract) [李艳丽, 杨华, 亢新刚, 王妍, 岳刚, 沈林 (2014) 长白山云冷杉针阔混交林天然更新

空间分布格局及其异质性. 应用生态学报, 25, 311–317.]

- Li ZZ, Gong JJ, Wang Y, Huang HW (2003) Spatial structure of AFLP genetic diversity of remnant populations of *Metasequoia glyptostroboides* (Taxodiaceae). *Biodiversity Science*, 11, 265–275. (in Chinese with English abstract) [李作洲, 龚俊杰, 王瑛, 黄宏文 (2003) 水杉子遗居群AFLP遗传变异的空分布. 生物多样性, 11, 265–275.]
- Liang S, Xu H, Lin JY, Li YD, Lin MX (2014) Spatial distribution pattern of the dominant species *Gironniera subaequalis* in tropical montane rainforest of Jianfengling, Hainan Island, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 38, 1273–1282. (in Chinese with English abstract) [梁爽, 许涵, 林家怡, 李意德, 林明献 (2014) 尖峰岭热带山地雨林优势树种白颜树空间分布格局. 植物生态学报, 38, 1273–1282.]
- Lin Y, Ai XR, Yao L, Guo QJ, Zhang MX, Chen J (2017) Population structure and dynamics of *Metasequoia glyptostroboides* parent trees. *Chinese Journal of Ecology*, 36, 1531–1538. (in Chinese with English abstract) [林勇, 艾训儒, 姚兰, 郭秋菊, 张敏霞, 陈俊 (2017) 水杉原生母树种群结构与动态. 生态学杂志, 36, 1531–1538.]
- Liu XH (2019) Analysis on long non-coding RNAs in *Metasequoia glyptostroboides*. *Molecular Plant Breeding*, 3, 853–857. (in Chinese with English abstract) [刘小红 (2019) 水杉长链非编码RNA分析. 分子植物育种, 3, 853–857.]
- Ma JS (2003) Notes on the discovery of *Metasequoia glyptostroboides*: A review of 60 years. *Plants*, (3), 37–40. (in Chinese) [马金双 (2003) 水杉发现大事记——六十年的回顾. 植物杂志, (3), 37–40.]
- Ma LY, Wang XQ, Guo BX (2006) Progress on introduction and *ex-situ* conservation on *Metasequoia glyptostroboides* in the world. *Guihaia*, 26, 235–241. (in Chinese with English abstract) [马履一, 王希群, 郭保香 (2006) 水杉引种及迁地保护进展. 广西植物, 26, 235–241.]
- Ripley BD (1976) The second-order analysis of stationary point processes. *Journal of Applied Probability*, 13, 255–266.
- Su ZY, Wu DR, Chen BG (2000) Structure and spatial pattern dynamics of dominant populations in a natural forest in North Guangdong Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 11, 337–341. (in Chinese with English abstract) [苏志尧, 吴大荣, 陈北光 (2000) 粤北天然林优势种群结构与空间格局动态. 应用生态学报, 11, 337–341.]
- Takyu M, Aiba SI, Kitayama K (2002) Effects of topography on tropical lower montane forests under different geological conditions on Mount Kinabalu, Borneo. *Plant Ecology*, 159, 35–49.
- Thorsten W, Savitri G, Nimal G, Toshinori O (2007) Analyzing the spatial structure of a Sri Lankan tree species with multiple scales of clustering. *Ecology*, 88, 3088–3102.
- Velázquez E, Martínez I, Getzin S, Moloney KA, Wiegand T (2016) An evaluation of the state of spatial point pattern analysis in ecology. *Ecography*, 39, 1042–1055.
- Wang ST, Wu H, Liu MT, Zhang JX, Liu JM, Meng HJ, Xu YZ, Qiao XJ, Wei XZ, Lu ZJ, Jiang MX (2018) Community structure and dynamics of a remnant forest dominated by a plant species with extremely small population (*Sinojackia huangmeiensis*) in Central China. *Biodiversity Science*, 26, 749–759. (in Chinese with English abstract) [王世彤, 吴浩, 刘梦婷, 张佳鑫, 刘检明, 孟红杰, 徐耀粘, 乔秀娟, 魏新增, 卢志军, 江明喜 (2018) 极小种群野生植物黄梅秤锤树群落结构与动态. 生物多样性, 26, 749–759.]
- Wang XQ, Ma LY, Guo BX (2004a) A systematic study on the discovery course of *Metasequoia glyptostroboides* Hu & Cheng. *Journal of Beijing Forestry University (Social Sciences)*, 3(1), 22–28. (in Chinese with English abstract) [王希群, 马履一, 郭保香 (2004a) 水杉发现过程的系统研究. 北京林业大学学报(社会科学版), 3(1), 22–28.]
- Wang XQ, Ma LY, Guo BX, Ge JW, Fan SH (2004b) The conservation of *Metasequoia glyptostroboides* and its current problems in China. *Biodiversity Science*, 12, 377–385. (in Chinese with English abstract) [王希群, 马履一, 郭保香, 葛继稳, 范深厚 (2004b) 水杉的保护历程和存在的问题. 生物多样性, 12, 377–385.]
- Wang ZY, Dong XB, Zhang T, Qu HF, Ma XB, Guan HW, Ruan JF (2018) Forest structure characteristics of *Larix* natural secondary forest in Daxing'an Mountains. *Journal of Northeast Forestry University*, 46(4), 6–11, 28. (in Chinese with English abstract) [王智勇, 董希斌, 张甜, 曲杭峰, 马晓波, 管惠文, 阮加甫 (2018) 大兴安岭落叶松天然次生林林分结构特征. 东北林业大学学报, 46(4), 6–11, 28.]
- Wiegand T, Kissling W, Cipriotti PM (2006) Extending point pattern analysis for objects of finite size and irregular shape. *Journal of Ecology*, 94, 825–837.
- Wiegand T, Martínez I, Huth A (2009) Recruitment in tropical tree species: Revealing complex spatial patterns. *The American Naturalist*, 174, E106–E140.
- Xi EWT (2003) *Concise Plant Population Biology*. Higher Education Press, Beijing. (in Chinese) [西尔维唐 (2003) 简明植物种群生物学, 高等教育出版社, 北京.]
- Xiao SL, Fu MY, Yang K, Chen XH (2019) Population structure and quantitative dynamics of an extremely small population, *Michelia wilsonii*. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 39, 1279–1288. (in Chinese with English abstract) [肖书礼, 付梦媛, 杨科, 陈小红 (2019) 极小种群野生植物峨眉含笑种群结构与数量动态. 西北植物学报, 39, 1279–1288.]
- Xiong B, Ai XR, Wang BQ, Yi YM, Yao L, Fan SH (2010) Study on the population of the primary *Metasequoia glyptostroboides* mother trees. *Journal of Hubei Minzu University (Natural Science Edition)*, 28, 282–285. (in Chinese with English abstract) [熊彪, 艾训儒, 王柏泉, 易咏梅, 姚兰, 范深厚 (2010) 水杉原生母树种群研究. 湖北民族学院学报(自然科学版), 28, 282–285.]
- Xu H, Liu YH (2018) Relationship between diameter class structure and intraspecific and interspecific competitions of precious and endangering plant *Acer catalpifolium*. *Acta*

- Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 38, 1160–1170. (in Chinese with English abstract) [许恒, 刘艳红 (2018) 珍稀濒危植物梓叶槭种群径级结构与种内种间竞争关系. 西北植物学报, 38, 1160–1170.]
- Yan HB, Han YZ, Yang XQ, Wang LY, Xiang XY (2010) Spatial distribution patterns and associations of tree species in typical natural secondary mountain forest communities of Northern China. Acta Ecologica Sinica, 30, 2311–2321. (in Chinese with English abstract) [闫海冰, 韩有志, 杨秀清, 王丽艳, 项小英 (2010) 华北山地典型天然次生林群落的树种空间分布格局及其关联性. 生态学报, 30, 2311–2321.]
- Yon Q, Yu YW, Gao Y, Ding QQ, Xue D, Zhang QQ (2013) Composition of volatile organic compounds in *Metasequoia glyptostroboides*, *Taxodium ascendens* and *Taxodium distichum*. Journal of Northeast Forestry University, 41(6), 23–26. (in Chinese with English abstract) [殷倩, 俞益武, 高岩, 丁倩倩, 薛丹, 张倩倩 (2013) 3种杉科植物挥发性有机化合物成分. 东北林业大学学报, 41(6), 23–26.]
- You DM, Ma GL (2008) Effects of different litter layer depth on seed germination of *Metasequoia glyptostroboides*. Journal of Nanyang Normal University, 7(6), 51–53. (in Chinese with English abstract) [尤冬梅, 马广礼 (2008) 水杉枯落物对其种子萌发的影响初探. 南阳师范学院学报, 7(6), 51–53.]
- Yu DX, Du F, Shi M, Yang C, Dai J (2018) Community characteristics and population structure of *Ferrocalamus strictus*, a rare species in Mojiang, Yunnan, China. Chinese Journal of Plant Ecology, 42, 938–945. (in Chinese with English abstract) [喻丁香, 杜凡, 石明, 杨聪, 代俊 (2018) 云南墨江极小种群物种铁竹的种群结构与群落特征. 植物生态学报, 42, 938–945.]
- Zhang BY, Zhang FY (1980) A preliminary study on the flowering and fruiting development of *Metasequoia glyptostroboides*. Hubei Forestry Science and Technology, (4), 6–10, 64. (in Chinese) [张卜阳, 张丰云 (1980) 水杉开花结实发育过程的初步研究. 湖北林业科技, (4), 6–10, 64.]
- Zhang JY, Cheng KW, Zang RG (2014) The spatial distribution patterns and associations of the principal trees and shrubs in a natural tropical coniferous forest on Hainan Island, China. Biodiversity Science, 22, 129–140. (in Chinese with English abstract) [张俊艳, 成克武, 臧润国 (2014) 海南岛热带天然针叶林主要树种的空间格局及关联性. 生物多样性, 22, 129–140.]
- Zhang WH, Xu XB, Zhou JY, Xie ZQ (2005) Population dynamics of endangered plant species *Abies chensiensis*. Chinese Journal of Applied Ecology, 16, 1799–1804. (in Chinese with English abstract) [张文辉, 许晓波, 周建云, 谢宗强 (2005) 濒危植物秦岭冷杉种群数量动态. 应用生态学报, 16, 1799–1804.]
- Zhang WH, Zu YG (2002) Population ecological characteristics and analysis on endangered cause of ten endangered plant species. Acta Ecologica Sinica, 22, 1512–1520. (in Chinese with English abstract) [张文辉, 祖元刚 (2002) 十种濒危植物的种群生态学特征及致危因素分析. 生态学报, 22, 1512–1520.]
- Zhang YF, Li DW, Wang M, Liu P (2015) Population structure and dynamics of *Juniperus rigida* in different regions of Loess Plateau. Scientia Silvae Sinicae, 51(2), 1–10. (in Chinese with English abstract) [张亚芳, 李登武, 王梅, 刘盼 (2015) 黄土高原不同地区杜松种群结构与动态. 林业科学, 51(2), 1–10.]
- Zhang YS, Liu XH (2019) Analysis on SSR sequences based on full-length transcriptome sequencing in *Metasequoia glyptostroboides*. Molecular Plant Breeding, 23, 7817–7821. (in Chinese with English abstract) [张咏祀, 刘小红 (2019) 基于全长转录组测序的水杉SSR序列分析. 分子植物育种, 23, 7817–7821.]
- Zhu Y, Ma KP (2010) Point pattern analysis and its application in the study of plant spatial distribution pattern. In: Proceedings of National Symposium on the Conservation and Sustainable Use of Biodiversity, pp. 319–331. China Meteorological Press, Beijing. (in Chinese) [祝燕, 马克平 (2010) 点格局分析及其在植物空间分布格局研究中的应用. 见: 全国生物多样性保护与持续利用研讨会论文集, 319–331页. 气象出版社, 北京.]

(责任编辑: 臧润国 责任编辑: 时意专)



• 研究报告 •

唐鱼养殖种群与广州附近4个野生种群的遗传关系

李 潮¹ 金锦锦¹ 罗锦桢^{1,2} 王春晖^{1,3} 王俊杰¹ 赵 俊^{1*}

1 (广东省水产健康安全养殖重点实验室, 广东省水产优质环保养殖工程技术研究中心, 广州市亚热带生物多样性与环境生物监测重点实验室, 华南师范大学生命科学学院, 广州 510631)

2 (佛山南海狮山石门高级中学, 广东佛山 528225)

3 (广州金域医学检验中心有限公司, 广州 510330)

摘要: 唐鱼(*Tanichthys albonubes*)是为数不多的几种原产中国的世界性观赏鱼类之一。自2003年以来, 多个唐鱼野生种群相继被发现, 其濒危状态和等级由野外灭绝降为极危。为研究唐鱼养殖种群与广州附近野生种群之间的遗传关系, 本文分析了唐鱼3个代表性养殖种群和4个野生种群, 共计186个样本的*Cyt b*基因、2个核基因(*ENC1*和*RAG1*)以及13个微卫星位点数据。基于K2P模型的遗传距离结果显示, 唐鱼野生种群间的遗传距离在0.005–0.015之间, 养殖种群间的遗传距离为0.001–0.009。系统发育分析表明, 唐鱼养殖种群包含4个单倍型谱系分支, 其中2个分别与广州附近2个野生种群聚在一起, 另外2个分别独立成支。单倍型网络亲缘关系分析显示, 清远种群只有1个单倍型且与芳村养殖种群共享, 芳村养殖种群拥有最多的单倍型。基于微卫星数据的STRUCTURE分析表明, 所有种群最佳分簇数为2, 清远种群与养殖种群聚为一簇, 良口和石门种群聚为另一簇。主成分分析结果显示, 养殖种群高度重叠并能与野生种群分开, 清远种群与养殖种群存在部分重叠。利用IMa3的基因流分析表明, 存在清远种群至芳村养殖种群的单向基因流。综合本文结果, 作者认为唐鱼养殖种群应起源于广州附近多个野生种群。清远种群来源于养殖种群中的芳村养殖种群。建议在未来唐鱼的保护策略中, 应禁止不规范的放流活动并且禁止将不同野生种群补充至养殖种群, 同时加强唐鱼养殖种群和野生种群的遗传资源管理和持续监测。

关键词: *Tanichthys albonubes*; 线粒体基因; 核基因; 微卫星; 基因流

Genetic relationships of hatchery populations and wild populations of *Tanichthys albonubes* near Guangzhou

Chao Li¹, Jinjin Jin¹, Jinzhen Luo^{1,2}, Chunhui Wang^{1,3}, Junjie Wang¹, Jun Zhao^{1*}

1 Guangdong Provincial Key Laboratory for Healthy and Safe Aquaculture, Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center for Environmentally-friendly Aquaculture, Guangzhou Key Laboratory of Subtropical Biodiversity and Biomonitoring, School of Life Sciences, South China Normal University, Guangzhou 510631

2 Foshan Nanhai Shimen Senior High School, Foshan, Guangdong 528225

3 Guangzhou Kingmed Center for Clinical Laboratory, Guangzhou 510330

Abstract: *Tanichthys albonubes* is a popular ornamental fish species which had been believed to be extinct in the wild in China. Since 2003, many wild populations have been found on Hainan and Guangxi provinces and therefore the conservation status has been modified to be Critically Endangered. We investigated the genetic relationships of hatchery populations of *T. albonubes* to their wild populations near Guangzhou. To study these genetic relationships, multilocus data (one mitochondrial gene, two nuclear genes and 13 microsatellite loci) from 186 individuals from three hatchery populations and four wild populations around the city of Guangzhou were analyzed. The K2P genetic distances based on the *Cyt b* gene among wild populations and hatchery populations of *T. albonubes* ranged from 0.005 to 0.015, and from 0.001 to 0.009, respectively. Phylogenetic relationships showed hatchery population Fangcun contained four mitochondrial clades, two of which grouped with haplotypes from two wild populations near Guangzhou

收稿日期: 2019-09-17; 接受日期: 2019-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(31372178; 31772430)、国家科技基础平台项目(2005DKA21402)、中国-东盟海上合作基金(CAMC-2018F)、国家留学基金(201906750010)、广东省高校青年优秀科研人才国际培养计划(2018010162)和华南师范大学拔尖研究生联合培养项目

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: zhaojun@sclu.edu.cn

while the remaining clustered separately. The haplotype networks revealed that the Qingyuan population consisted of one shared haplotype with population Fangcun, which had greater haplotype diversity than all other populations. STRUCTURE analyses from the hatchery and wild populations suggested these populations could be grouped into two clusters ($K = 2$), one of which was formed by a hatchery population and a Qingyuan population while the other was formed by two wild populations. Principal component analysis showed that hatchery populations and Qingyuan populations overlapped with some degree of genetic variation with these cultured stocks. Directional gene flow was detected from population Qingyuan to population Fangcun using IMA3 programme. Based on these findings, we conclude that population Fangcun originated from multiple wild populations near Guangzhou and subsequently served as the ancestor of cultured populations in Singapore and Canada. We propose that irregular releases of cultured stocks of *T. albonubes* should be forbidden and captive hatchery using different wild populations should be prevented. At the same time, genetic resources management and sustained monitoring of hatchery and wild populations of *T. albonubes* should be reinforced in the future.

Key words: *Tanichthys albonubes*; mitochondrial DNA; nuclear gene; microsatellite; gene flow

准确揭示物种养殖种群的来源和遗传组成不仅有利于了解其遗传结构,更有利于其野生种群的保护和遗传资源的管理(Larson & Burger, 2013)。缺乏对养殖种群遗传背景的知识可能导致不同野生种群甚至物种在人为介导下发生遗传混杂,进而出现不同种群或物种间的基因污染(genetic pollution)(Larson & Burger, 2013; Zhang et al, 2017)。尤其在珍稀濒危野生动物的保护实践中,具有不同遗传背景的种群在改善种质等的需求下被人为混杂而形成人工繁育种群,此时个体虽然形态上仍属同一物种,但遗传上已经变为混杂状态,将它们再放归野外可能污染甚至替代原有野生种群的纯正基因库,从而严重威胁物种遗传多样性的保护(Elstrand & Rieseberg, 2016)。国家二级保护动物中国大鲵(*Andrias davidianus*)是此现象的一个经典案例(Yan et al, 2018)。基于基因组水平的全国大鲵野生种群和养殖种群的研究结果表明,大鲵养殖种群至少混杂了5个不同的现生种,且不同的养殖种群混杂了2个或多个物种(Yan et al, 2018)。该结果对大鲵的人工养殖、增殖放流及野生种群的保护均具有非常重要的意义。在鱼类中,大西洋鲑(*Salmo salar*)是最为著名的案例(Glover et al, 2017)。研究表明,自20世纪70年代以来,上千万吨的养殖大西洋鲑逃逸至野外并与不同地理种群形成杂交后代,严重威胁到野生大西洋鲑的产量、繁殖和遗传多样性(Glover et al, 2017)。

唐鱼(*Tanichthys albonubes*)隶属于鲤形目鲤科唐鱼属,俗称白云金丝、白云山鱼、红尾鱼,分布于我国华南地区和越南东北部(陈宜瑜, 1998;

Freyhof & Herder, 2001)。据信,唐鱼最早于1935年作为观赏鱼被带入美国(Eastman, 1938),因来自中国,故名“唐鱼”,是为数不多的几种原产中国的世界性观赏鱼类之一。由于唐鱼个体娇小(最大个体体长不超过30 mm)(易祖盛等, 2004)、色彩鲜艳、价格实惠、且容易繁殖和饲养,目前全球许多国家和地区如新加坡、加拿大、英国、中国台湾等的观赏鱼市场都有它的身影。而其模式产地广州白云山自20世纪60年代后的20多年内未再发现野生种群,因此唐鱼1988年被原农业部列为国家二级保护动物,随后被认为已野外灭绝(陈宜瑜, 1998)。自2003年以来,多个唐鱼野生种群相继在广东(易祖盛等, 2004; 赵俊等, 2010)、海南(Chan & Chen, 2009)、广西(李捷和李新辉, 2011)被发现,其濒危状态和等级也被重新评估,由野外灭绝降为极危(曹亮等, 2016)。

自野生种群被重新发现后,相继有学者对唐鱼养殖种群和野生种群的形态差异、遗传多样性和遗传分化等开展了研究。形态学研究结果表明,唐鱼野生种群和养殖种群差异极显著,而且在体型大小上有明显的差异(刘汉生等, 2008; 张秀霞等, 2017)。唐鱼不同野生种群在形态上存在显著差异,且可能与地理隔离存在着某种相关性(张秀霞等, 2017)。针对唐鱼养殖种群和野生种群的遗传多样性和遗传分化等方面的研究均揭示唐鱼野生种群遗传多样性较低,而养殖种群遗传多样性较高。Luo等(2015)利用Cyt *b*基因对唐鱼的5个野生种群和2个养殖种群的遗传多样性与遗传结构的研究结果表明,唐鱼野生种群的遗传多样性较低,每个种群都各自形成单系。养殖种群(中国广州的芳村和加拿大)

与中国广东清远野生种群亲缘关系较近。Zhao等(2018)基于2个线粒体片段(*Cyt b*和D-loop)、2个核基因(*ENCI*和*RAG1*)和13个微卫星位点,对采自我国广东、广西、海南和越南的10个野生种群和3个养殖种群开展了遗传结构和遗传多样性研究,结果表明,养殖种群起源于单一种群,养殖种群遗传多样性比大多数野生种群的遗传多样性高,且与广州附近野生种群间的亲缘关系较其他野生种群近,不同野生种群间分化十分明显。另外,研究认为清远种群为放流的养殖种群。虽然该研究对养殖种群的起源提出了一个初步结论,但未能合理解释唐鱼养殖种群高遗传多样性形成的原因。同时,对于唐鱼养殖种群与广州附近野生种群的关系也未作深入探讨。此外,对于清远种群来源于养殖种群这一重要结论亦未给出充分证据。上述问题的存在给唐鱼养殖种群的管理和野生种群的保护带来了严峻挑战。

目前,在养殖唐鱼可以合法贸易的背景下,如何避免养殖种群和野生种群间的基因污染是一个十分重要的课题。本研究通过分析已发表的唐鱼3个代表性养殖种群和广州附近4个野生种群(遗传关系较广州外野生种群近)的分子数据,拟回答以下科学问题:(1)唐鱼养殖种群与广州附近现存4个野

生种群的遗传关系;(2)唐鱼养殖种群和野生种群之间的基因流大小以及方向;(3)唐鱼清远种群与主要养殖种群的关系。本研究拟为未来唐鱼养殖种群的科学管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品和数据采集

本研究所用分子数据均为已发表数据(Zhao et al, 2018)。该数据来自具有代表性的3个唐鱼观赏鱼市场(广州芳村、新加坡、加拿大)和广州附近4个唐鱼野生种群(从化良口、从化石门、清远、深圳)(图1)。本研究获取了上述样品的线粒体细胞色素*b*基因(Cytochrome *b*, *Cyt b*), 2个核基因(重组激活蛋白基, recombination-activating gene 1, *RAG1*; 外胚层神经皮层1类似蛋白基, ectoderm-neural cortex protein 1, *ENCI*)序列以及13个微卫星位点的分型数据(深圳种群只利用了线粒体数据)。相关数据均可通过GenBank获取(序列号: KX646833–KX648256)。深圳种群由于与广州附近野生种群地理距离较远,且已有研究表明其在系统发育上与养殖种群和广州附近野生种群互为姐妹群(Zhao et al, 2018),因此仅作为系统树中的外类群。养殖种群和野生种群的具体

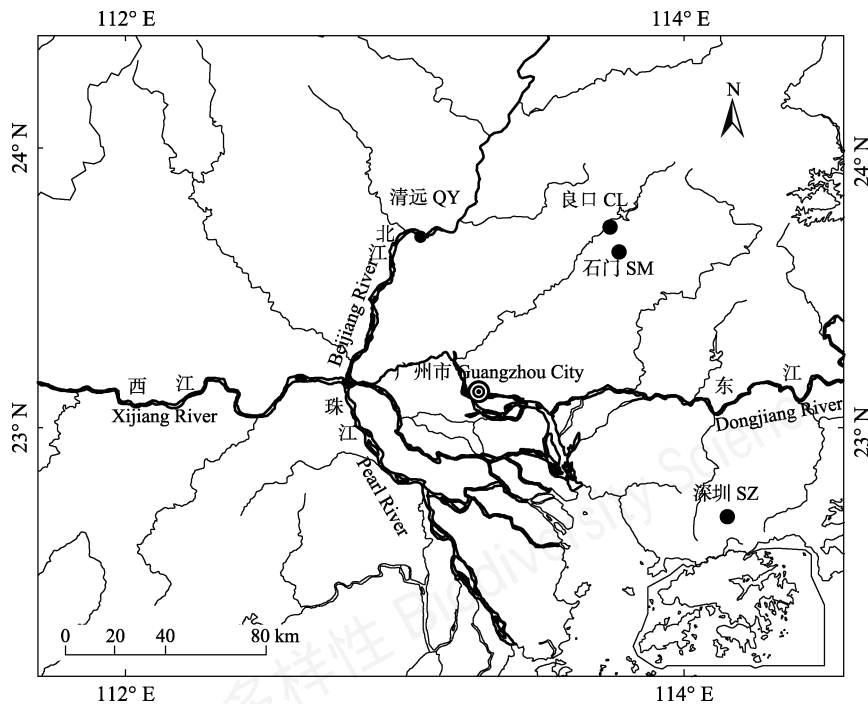


图1 本研究中唐鱼4个野生种群的采样地点(种群代号同表1)

Fig. 1 Sampling location of four wild populations of *Tanichthys albonubes* in this study. Population codes refer to Table 1.

表1 本研究的唐鱼样品信息

Table 1 Sampling information of *Tanichthys albonubes* of the present study

种群 Population	代号 Code	所属谱系 Lineage*	样本量 Sample size*		
			mtDNA	nuDNA	Microsatellites
养殖种群 Hatchery populations					
广州芳村 Fangcun, Guangzhou, China	FC	A	30	30	30
新加坡 Singapore	SIG	A	24	24	30
加拿大 Canada	CA	A	12	12	12
野生种群 Wild populations					
广州从化良口 Liangkou, Conghua, Guangzhou, China	CL	A	30	30	30
广州从化石门 Shimen, Conghua, Guangzhou, China	SM	A	30	30	30
清远 Qingyuan, China	QY	A	30	30	30
外类群					
深圳 Shenzhen, China	SZ	A	30	—	—
总计 Total			186	156	162

*谱系定义依据Zhao等(2018), 本研究所用分子数据为已发表数据(Zhao et al, 2018)。

*Definition of lineage was in accordance with Zhao et al (2018). All the data used has been published (Zhao et al, 2018).

样本量见表1。

1.2 数据分析

从GenBank获取所有样品的fasta格式的数据后, 导入Clustal X 2.1程序(Thompson et al, 1997)进行序列比对, 比对结果通过MEGA X软件(Kumar et al, 2018)对可能存在的碱基错读、漏读和多读辅以人工校对, 随后利用软件中的Kimura's two-parameter模型计算不同种群间的遗传距离。利用DNAsp 5.0软件(Librado & Rozas, 2009)检测全部样品的单倍型, 并以深圳种群作为外类群构建基于单倍型的系统发育树。使用贝叶斯推断(Bayesian inference, BI)和最大似然法(maximum-likelihood, ML)两种方法构建系统发育树。核苷酸替代模型(GTR+ G + I)通过PhyML 3.0 (Guindon et al, 2010)软件中的Smart Model Selection (Lefort et al, 2017)在AIC准则(Akaike Information Criterion)下选出。对于BI树, 利用MrBayes v3.2.6软件(Ronquist et al, 2012)运行马尔考夫链蒙特卡罗(Markov Chain Monte Carlo, MCMC) 500万代(3个热链, 1个冷链), 每5,000代抽样1次, 并将25%的样品视为burn-in, 重复运行3次以确保结果的收敛性。对于ML树, 利用RAxML-HPC2 v8.2.10软件(Stamatakis, 2014)构建, bootstrap值设为1,000次。使用 Network 5.0.1.0软件(Bandelt et al, 1999)以邻接法(Median-joining)构建各单倍型之间网络关系图, 并对图中各个单倍型进行种群对应关系分析。利用STRUCTURE v2.3.4软件(Pritchard et al, 2000)基于13个微卫星位点的分型数据推

断全部样品的种群遗传结构。为了确定最佳分簇(K), 运行20万代作为burn-in并随后运行马尔考夫链蒙特卡罗(MCMC) 200万代, K 设置为1–10并且每个 K 重复10次。最佳分簇(K)由 ΔK 确定(Evanno et al, 2005)并在Structure Harvester (Earl & vonHoldt, 2012)中实现。在R (R Development Core Team, 2015)中使用Adegenet (Jombart, 2008)软件包对13个微卫星位点数据进行主成分分析(principal component analysis, PCA), 以进一步确定是否存在明显的种群结构。为检测不同种群间是否存在明显的基因流, 使用IMa3软件(Hey et al, 2018)基于Cyt b和两个核基因的数据估算基因流的大小和方向, 运行马尔考夫链蒙特卡罗100万代并以其中10%作为burn-in, 3个位点的核酸替代模型为HKY (软件中不提供GTR模型)。重复操作3次, 并以有效取样大小(effective sample size, ESS)大于200作为收敛性的标准。

2 结果

2.1 遗传距离

基于K2P模型得到唐鱼养殖种群和野生种群间的遗传距离结果如表2所示, 范围从0.001–0.015。新加坡养殖种群和加拿大养殖种群之间以及新加坡养殖种群和清远种群之间遗传距离最小(0.001), 加拿大养殖种群和深圳种群以及石门和深圳种群之间遗传距离均最大(0.015)。野生种群间的遗传距离在0.005–0.015之间, 而养殖种群间的遗传距离为0.001–0.009。加拿大养殖种群和新加坡养殖种群与

表2 基于线粒体*Cyt b*基因的唐鱼种群间K2P遗传距离(种群代号见表1)

Table 2 K2P genetic distance among seven populations of *Tanichthys albonubes* based on *Cyt b* gene. Population codes refer to Table 1.

种群 Populations	芳村 FC	新加坡 SIG	加拿大 CA	良口 CL	石门 SM	清远 QY
新加坡 SIG	0.008					
加拿大 CA	0.009	0.001				
良口 CL	0.006	0.006	0.007			
石门 SM	0.009	0.009	0.010	0.007		
清远 QY	0.007	0.001	0.002	0.005	0.008	
深圳 SZ	0.013	0.014	0.015	0.012	0.015	0.014

清远种群之间遗传距离分别为0.001和0.002, 暗示这两个养殖种群与清远种群之间的亲缘关系很近。但同为养殖种群的芳村养殖种群却与加拿大和新加坡养殖种群遗传距离较大, 分别为0.009和0.008, 甚至达到了野生种群之间的遗传距离(如良口和石门种群之间的遗传距离也仅为0.007), 表明芳村养殖种群可能混有不同野生种群的线粒体基因。

2.2 系统发育树和单倍型网络图

利用贝叶斯推断和最大似然法构建分子系统发育树得到的拓扑结构一致, 因此将两种树合并为一种树, 结果见图2A。从系统发育树中可以看出,

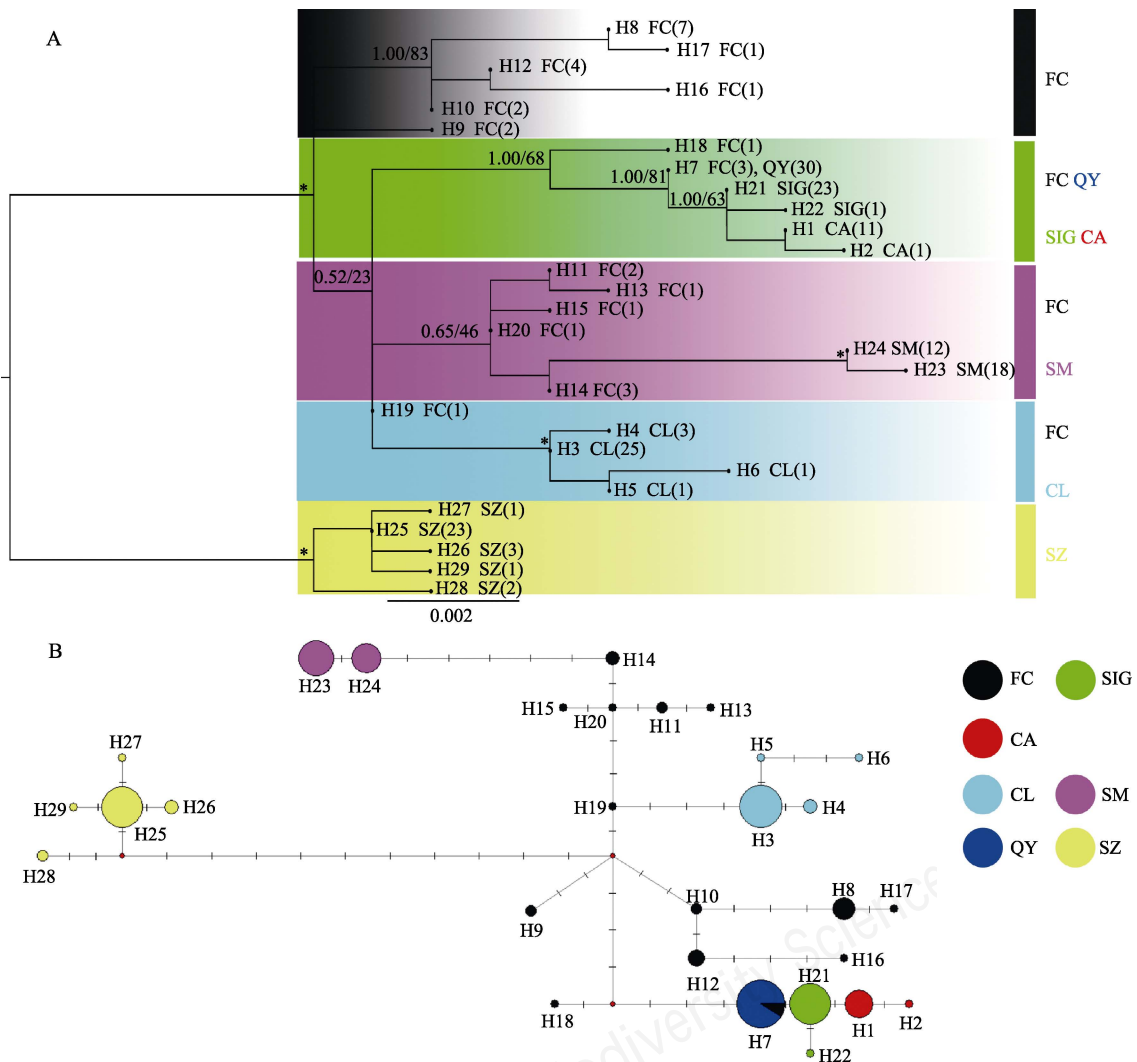


图2 基于*Cyt b*基因的唐鱼系统发育树和单倍型网络图(种群代号见表1)。(A)基于*Cyt b*基因的贝叶斯树(BI tree)和最大似然树(ML tree)。*号表示后验概率(posterior probabilities, PP) ≥ 0.90 和自举值(bootstrap values, BS) ≥ 90 ; (B)基于*Cyt b*基因的单倍型网络图(线上短线表示变异步数)。

Fig. 2 Phylogenetic trees and haplotype networks of *Tanichthys albonubes* based on *Cyt b* gene. Population codes refer to Table 1. (A) Bayesian inference (BI) and maximum-likelihood (ML) trees of *T. albonubes* based on *Cyt b* gene. The asterisks on the branches indicate posterior probabilities (PP) ≥ 0.90 and bootstrap values (BS) ≥ 90 . (B) Haplotype networks of *T. albonubes* based on *Cyt b* gene (segments above lines indicate the number of mutations).

29个单倍型可以分为5支: 深圳种群的所有单倍型构成最外面的一支, 其余4支均至少包含1个芳村(FC)养殖种群的单倍型。需要特别注意的是, FC支仅由芳村养殖种群的单倍型组成且位于系统树中内群的基部(图2A); 清远种群的单倍型与3个养殖种群的单倍型聚在一起构成FC QY SIG CA支; 剩余2支分别由石门和芳村、良口和芳村的单倍型组成。另外, 2个野生种群石门和良口的单倍型各自形成单系并获得了非常高的支持率($PP \geq 0.90$ 且 $BS \geq 90$)。

为了更好地阐明唐鱼29个单倍型之间的关系, 将本研究获得Cyt b基因的29个单倍型进行了单倍型网络亲缘关系分析, 用各单倍型之间基于碱基数差异的遗传距离绘制了单倍型网络图, 结果见图2B。从图可知, 各单倍型之间的变步数在1-10之间, 表明唐鱼养殖种群和野生种群之间的遗传分化不明显。单倍型网络图分支结构与系统发育树基本一致。芳村养殖种群拥有最多的单倍型且其单倍型位于单倍型网络图的中心位置(如H19); 清远种群只有1个单倍型且与芳村养殖种群共享(H7); 新加坡养殖种群的单倍型突变自芳村养殖种群的单倍型(H7); 而加拿大养殖种群的单倍型则突变自新加坡养殖种群的单倍型(H21)。良口、石门和深圳种群的单倍型均为特有单倍型并且位于单倍型网络图的外围。相较于深圳种群, 良口和石门种群的单倍型数量更少。

2.3 种群结构

由于基于线粒体基因所揭示的种群遗传结构具有较强的偏倚性, 因此本研究利用13个微卫星位点的分型数据进一步检测唐鱼养殖种群及广州邻近地区的野生种群是否存在明显的种群遗传结构, 结果见图3。由图3B可知, 唐鱼养殖种群和野生种群间存在明显的遗传结构, $K=2$ 为最佳分簇。从图3A可知, 芳村、加拿大、新加坡、清远分为一簇, 良口、石门分为另一簇。另外, 3个养殖种群的部分个体与良口和石门种群共享部分等位基因, 表明养殖种群可能引入了这2个野生种群的个体。虽然与养殖种群归为同一簇, 但清远种群色块组成较为单一, 表明只有很少的其他种群的基因混入其中。良口和石门种群形成同一单色块, 暗示其具有相同遗传组成且没有混杂入其他种群的基因。

主成分分析结果进一步揭示了唐鱼养殖种群和野生种群的遗传组成差别。由图3C可知, 虽然野

生种群(良口、石门、清远)和养殖种群(芳村、新加坡、加拿大)能够较好地分开, 但也存在部分相似。3个养殖种群在两个主成分上高度重叠, 表明其遗传组成有很大部分相同, 不易区分。同时, 芳村养殖种群拥有最大范围的主成分变异, 表明其基因型更为丰富。相对于良口和石门种群, 清远种群明显与3个养殖种群距离更近并存在部分重叠。此外, 与STRUCTURE结果不同, 良口和石门种群可以清楚地分开, 表明两个种群在等位基因组成上存在明显差异。

2.4 基因流

为了检测唐鱼养殖种群之间、野生种群之间以及养殖种群与野生种群之间是否存在基因流及其方向, 利用IMa3软件并基于Cyt b基因和2个核基因数据估算了不同种群之间的基因流水平, 结果见图4。由图4可知, 新加坡养殖种群和加拿大养殖种群间存在明显的双向基因流, 其中从新加坡养殖种群到加拿大养殖种群的基因流为0.617, 而从加拿大养殖种群到新加坡养殖种群的基因流为0.558。3个野生种群之间不存在明显的基因流。养殖种群与野生种群之间存在显著的由清远种群到芳村养殖种群的单向基因流(基因流为0.363)。

3 讨论

3.1 唐鱼养殖种群的来源

开展鱼类养殖种群的遗传来源和遗传结构的研究对于人工繁育、增殖放流、防范基因污染等方面均具有重要意义(Glover et al, 2017)。作为华南地区的特有鱼类之一, 唐鱼在被广泛引入全球观赏鱼市场之前据信只分布于广州白云山、清远、深圳、香港等少数几个地区(Lin et al, 1932; Weitzman & Chan, 1966; 郑慈英, 1989; 潘炯华, 1990)。因此, 世界范围内唐鱼养殖种群的野生来源应仅限于上述几个地点。随着诸多野生种群的重新发现, 是否存在部分野生种群混杂到养殖种群, 这是一个非常重要的科学问题。另外, 十多年前在广州各区广泛开展的唐鱼增殖放流活动是否对野生种群的遗传多样性和种群结构产生影响, 是另外一个值得探讨的问题。Zhao等(2018)虽然指出唐鱼养殖种群为单一起源, 但未能提供更多证据。同时, 对于芳村养殖种群比几乎所有野生种群遗传多样性高的现象也缺乏合理解释。Weitzman和Chan (1966)提出, 美国

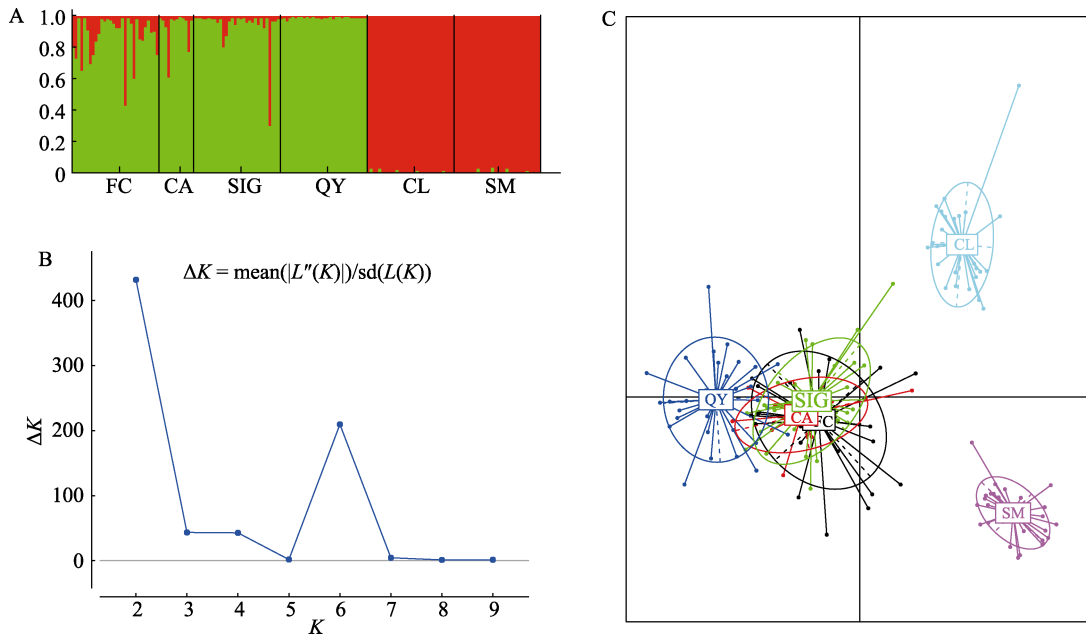


图3 唐鱼养殖种群和野生种群的种群结构分析(种群代号同表1)。(A)基于13个微卫星位点的STRUCTURE结果图($K = 2$); (B) K 取不同值时的 ΔK 值; (C)基于13个微卫星位点的主成分分析。

Fig. 3 Population structure analysis of hatchery and wild populations of *Tanichthys albonubes*. (A) STRUCTURE plots of $K = 2$ based on 13 microsatellite loci; (B) ΔK values of the different number of clusters (K); (C) PCA analysis based on 13 microsatellite loci. Population codes refer to Table 1.

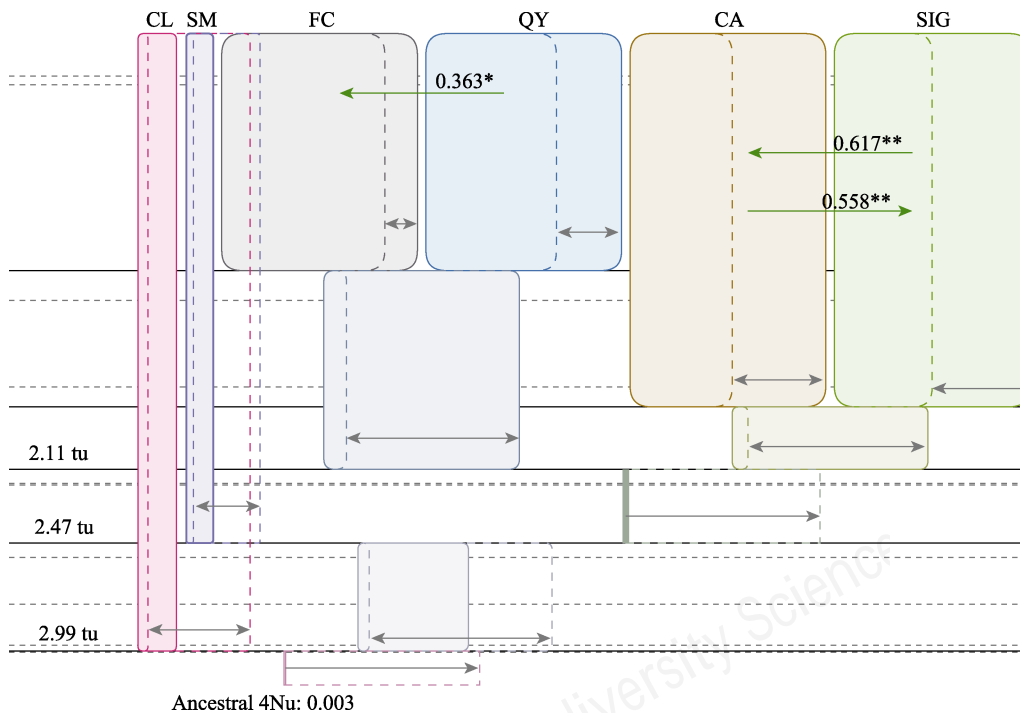


图4 唐鱼养殖种群和野生种群间的基因流估算(种群代号同表1)。灰色箭头和方框代表 tu 的边界值。 tu : 种群分开后所经历的时间。绿色箭头代表基因流的方向, 其上数字表示基因流的大小。图中只显示统计上显著的值, 显著性水平: * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$ 。

Fig. 4 Gene flow estimation among hatchery and wild populations of *Tanichthys albonubes*. Grey arrows and boxes were marginal distribution values in demographic units. tu means time since ancestral population splitting. Green arrows and the numbers above them showed the gene flows ($2Nm$ values) and their directions. Only statistically significant cases of gene flow are presented. * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$. Population codes refer to Table 1.

市场上的养殖唐鱼存在2种表型, 1种来自广州白云山, 另1种来源于香港。另外, 他们认为旧金山的养殖唐鱼已经被香港表型完全替代。这为唐鱼养殖种群的起源提供了一种可能的解释, 即唐鱼养殖种群可能是混合种群, 而非单一起源。

本研究中, 基于*Cyt b*基因的养殖种群和野生种群间的遗传距离显示, 芳村养殖种群与加拿大和新加坡养殖种群遗传距离较大, 且达到了野生种群之间的遗传距离(表2), 说明养殖种群并非起源于单一野生种群。而且芳村养殖种群在系统树上拥有多个进化支, 并且有2支与良口和石门构成姐妹支(图2A), 进一步证实芳村养殖种群拥有不同遗传背景的来源, 这一结果与Zhao等(2018)的观点不一致。单倍型网络图的结果显示, 芳村养殖种群拥有最多的单倍型且其单倍型位于单倍型网络图的中心位置(如H19)(图2B)。虽然系统树上其单倍型与良口和石门种群的单倍型关系较近, 但它们之间没有单倍型共享, 表明芳村养殖种群不是直接来源于这两个野生种群, 而可能是来源于与良口和石门种群系统发育关系较近的未采样种群。芳村养殖种群的FC支明显与其他三支分开, 表明其可能是白云山种群线粒体单倍型在目前养殖种群的遗存。Weitzman和Chan (1966)曾认为, 唐鱼自正式命名后, 一直被水族爱好者饲养, 因此可能通过线粒体基因渐渗的方式将白云山种群的单倍型传递至当前的养殖种群。系统树上, 养殖种群和清远种群构成的FC QY SIG CA支位于内群, 故推测其应起源于广州附近另一个野生种群, 而非深圳等地理距离较远的种群。如果养殖种群有混入距离广州较远的野生种群, 则必然有单倍型位于外类群以外, 有关唐鱼现存野生种群的分化情况具体见Zhao等(2018)。形态学的证据也可支持这一假设。当前养殖唐鱼臀鳍分支鳍条数与广州附近野生种群一样均为7-8, 而深圳种群则固定为8(潘炯华, 1990; 易祖盛等, 2004), 因此有理由认为养殖种群来源于广州附近的野生种群。

STRUCTURE分析结果显示(图3A), 养殖种群包含两种遗传成分, 其中一种与良口和石门的相同, 但这并不一定说明养殖种群就有部分来源于这两个种群。STRUCTURE分析是在特定模型下对等位基因频率的相似性进行分析(Pritchard et al, 2000), 从而推断种群结构, 而非基于等位基因本身进行推断。与非模型条件下的主成分分析相对比, 这一点可

以明显得到印证。从图3C可以看出, STRUCTURE结果中被分为同一簇的在主成分分析中可以明显区分, 表明这两个野生种群具有明显的等位基因差异。

综合上述证据, 唐鱼芳村养殖种群应为广州附近多个野生种群混杂而成, 而这可能是唐鱼养殖种群比大多数野生种群遗传多样性高的原因, 具有不同遗传背景的种群混杂而导致遗传多样性上升在鱼类中已有报道(Jaisuk & Senanan, 2018)。未来, 基于广州附近广泛的野生种群采样将有助于准确揭示芳村养殖种群是由哪些野生种群混杂的问题。

除国内唐鱼养殖种群的来源值得探讨外, 国外唐鱼的起源也是一个重要的问题。本研究只采集了新加坡和加拿大养殖种群, 因此仅就这两个养殖种群的起源作探讨。本研究中, 基于*Cyt b*基因29个单倍型进行的系统发育分析显示, 新加坡和加拿大养殖种群的单倍型与芳村养殖种群的单倍型聚为一支。单倍型网络图则表明新加坡养殖种群的单倍型突变自芳村养殖种群的单倍型(H7), 而加拿大养殖种群的单倍型则突变自新加坡养殖种群的单倍型(H21)。结合主成分分析中新加坡和加拿大养殖种群在两个主成分上均与芳村养殖种群完全重合的结果可以充分说明, 新加坡养殖种群来源于广州芳村, 而加拿大养殖种群则来自新加坡。这一结果与美国唐鱼的情形似乎不同(Weitzman & Chan, 1966)。通过调查, 推测形成这一现象的主要原因是, 早年大陆观赏鱼市场并未与国际市场接轨, 而香港由于政策和制度优势, 在全球观赏鱼的贸易方面比大陆方便简单许多, 相关从业人员也具有更多的技术和资金优势, 因此国外唐鱼养殖者更喜爱从香港进口唐鱼。近年来, 随着国内观赏鱼市场的进一步发展和成熟, 芳村繁殖的唐鱼也可贸易至其他国家, 且在价格和质量方面具有优势, 已逐步占领市场, 因而出现新加坡养殖种群和加拿大养殖种群在遗传特征上与芳村相同的结果。基因流分析结果显示(图4), 新加坡养殖种群和加拿大养殖种群间存在高水平的双向基因流, 这可能是种质改善的结果。未来, 基于全球范围内唐鱼养殖种群的采样将可揭示唐鱼传播至世界观赏鱼市场上的路径, 同时也将全面解释唐鱼养殖种群的起源问题。

3.2 清远种群来源于养殖种群

历史上, 清远曾有野生唐鱼的分布记录(郑慈英, 1989)。然而, Zhao等(2018)基于多种分子标记的

分析认为,采样的清远种群为养殖起源。本研究基于Zhao等(2018)发表的数据,进行了遗传距离、主成分和基因流等多方面的分析。结果表明,清远种群与新加坡养殖种群和加拿大养殖种群间遗传距离很小,未达到野生种群与养殖种群之间的水平。单倍型网络图的结果表明,清远种群只有一个线粒体单倍型且与芳村养殖种群共享(H7)(图2B)。STRUCTURE分析结果则支持清远种群与养殖种群分为一组,与主成分分析中清远种群与养殖种群存在部分重叠的结果相一致(图3A和3C)。基于以上多方面的证据,可以证明清远种群来源于养殖种群中的芳村养殖种群。

值得指出的是,养殖种群放归清远的时间应早于养殖种群引入野生种群的时间。这一推测源于STRUCTURE结果和主成分分析结果。STRUCTURE结果中清远种群色块较为单一,表明其为单种群起源,而当前的芳村养殖种群已为混合种群,因此清远种群被放流的时间应早于芳村养殖种群引入野生种群的时间。主成分分析中清远种群已经表现出与芳村养殖种群明显不同的等位基因差异,而不同于新加坡养殖种群和加拿大养殖种群与芳村养殖种群完全重合。这一差异可能是养殖种群放流至清远后,对当地环境发生了适应性演化,从而表现出独特的遗传变异。唐鱼性成熟周期短(6月龄可达性成熟)、繁殖期长、一年可繁殖多代(陈国柱等,2004)的特点为其在较短时间内积累遗传变异提供了可能。

需要指出的是,不存在芳村养殖种群起源于清远种群这一可能。理由主要有:(1)芳村养殖种群拥有众多单倍型,而清远种群只有1个且与芳村养殖种群共享;(2)同为野生种群的良口和石门种群在主成分分析中明显与养殖种群分开,而清远种群却表现出与养殖种群存在部分重叠的现象。

3.3 对唐鱼保护和管理的启示

(1)继续停止不规范的放流活动。2004年,广州市渔政部门曾委托美国的热带鱼养殖场繁育了2万尾唐鱼成鱼并放归广州花都的山溪中。然而,如前所述,当前唐鱼养殖种群为不同种群的混合种群,将混有不同遗传背景的养殖唐鱼放归原有栖息地将可能污染本地原生种群的基因库,进而威胁到唐鱼的遗传多样性。因此此类活动应该继续停止直至相应野生种群的人工繁育种群完全建立并可以稳

定成熟地提供放流种源。

(2)建立不同野生种群的人工繁育种群以提供放流种源。本研究结果揭示,芳村养殖种群是新加坡养殖种群和加拿大养殖种群的来源种群,也是清远野生种群的祖先种群。同时,芳村养殖种群应来源于广州附近的野生种群,且至少混合了2个野生种群。这一结果启示我们在未来的唐鱼增殖放流中,不能简单采用芳村养殖种群,也不能使用任何遗传背景不明的国外养殖种群,而需要重新建立各个野生种群的人工繁育种群,作为原有野生种群地点的放流种源。此外,应继续禁止从野外捕捞唐鱼补充至养殖种群,以避免不同野生种群通过养殖种群而发生遗传混杂。

(3)防止养殖种群进入野外。清远种群被证实起源于养殖种群,这对唐鱼的保护工作是一个警示,表明曾经存在或当前有不规范的放流活动,并且放流种群已经形成稳定、可自我维持的自然种群,这对原有野生种群的基因库产生了严重威胁,因此这一地点的种群建议清除,以防止基因污染。同时基因流分析表明,存在由清远种群到芳村养殖种群的单向基因流,说明仍有部分野生清远种群被用作人工繁殖。

未来,相关保护法规的重点应在于禁止不规范的放流活动,禁止捕捞不同野生种群补充至养殖种群。可喜的是,本研究暂时未发现养殖种群中有从广州附近以外的野生种群引种的迹象,STRUCTURE分析也未发现养殖种群和野生种群之间杂交的证据,但仍应该继续监测不同野生种群,以保存其遗传多样性,防止其灭绝。

致谢:感谢英国格拉斯哥大学Kevin Schneider对论文英文摘要的修改。

参考文献

- Bandelt HJ, Forster P, Röhl A (1999) Median-joining networks for inferring intraspecific phylogenies. *Molecular Biology and Evolution*, 16, 37–48.
- Cao L, Zhang E, Zang CX, Cao WX (2016) Evaluating the status of China's continental fish and analyzing their causes of endangerment through the red list assessment. *Biodiversity Science*, 24, 598–609. (in Chinese with English abstract) [曹亮, 张鄂, 臧春鑫, 曹文宣 (2016) 通过红色名录评估研究中国内陆鱼类受威胁现状及其成因. 生物

- 多样性, 24, 598–609.]
- Chan B, Chen X (2009) Discovery of *Tanichthys albonubes* Lin 1932 (Cyprinidae) on Hainan Island and notes on its ecology. *Zoological Research*, 30, 209–214.
- Chen GZ, Fang ZQ, Ma GZ (2004) Embryonic development of *Tanichthys albonubes*. *Journal of Fishery Sciences of China*, 11, 489–496. (in Chinese with English abstract) [陈国柱, 方展强, 马广智 (2004) 唐鱼胚胎发育观察. *中国水产科学*, 11, 489–496.]
- Chen YY (1998) *Fauna Sinica • Osteichthyes: Cypriniformes (II)*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [陈宜瑜 (1998) *中国动物志•硬骨鱼纲: 鲤形目(中卷)*. 科学出版社, 北京.]
- Earl DA, vonHoldt BM (2012) STRUCTURE HARVESTER: A website and program for visualizing STRUCTURE output and implementing the Evanno method. *Conservation Genetics Resources*, 4, 359–361.
- Eastman OR (1938) *Tanichthys albonubes* Lin, the new wonder fish. *The Aquarium*, 7, 73–75.
- Ellstrand NC, Rieseberg LH (2016) When gene flow really matters: Gene flow in applied evolutionary biology. *Evolutionary Applications*, 9, 833–836.
- Evanno GS, Regnaut SJ, Goudet J (2005) Detecting the number of clusters of individuals using the software STRUCTURE: A simulation study. *Molecular Ecology*, 14, 2611–2620.
- Freyhof J, Herder F (2001) *Tanichthys micagemmae*, a new miniature cyprinid fish from Central Vietnam (Cypriniformes: Cyprinidae). *Ichthyological Exploration of Freshwaters*, 12, 215–220.
- Glover KA, Solberg MF, McGinnity P, Hindar K, Verspoor E, Coulson MW, Svåsand T (2017) Half a century of genetic interaction between farmed and wild Atlantic salmon: Status of knowledge and unanswered questions. *Fish and Fisheries*, 18, 890–927.
- Guindon S, Dufayard JF, Lefort V, Anisimova M, Hordijk W, Gascuel O (2010) New algorithms and methods to estimate maximum-likelihood phylogenies: Assessing the performance of PhyML 3.0. *Systematic Biology*, 59, 307–321.
- Hey J, Chung Y, Sethuraman A, Lachance J, Tishkoff S, Sousa VC (2018) Phylogeny estimation by integration over isolation with migration models. *Molecular Biology and Evolution*, 35, 2805–2818.
- Jaisuk C, Senanan W (2018) Effects of landscape features on population genetic variation of a tropical stream fish, stone lapping minnow, *Garra cambodgiensis*, in the upper Nan River drainage basin, northern Thailand. *PeerJ*, 6, e4487.
- Jombart T (2008) adegenet: A R package for the multivariate analysis of genetic markers. *Bioinformatics*, 24, 1403–1405.
- Kumar S, Stecher G, Li M, Knyaz C, Tamura K (2018) MEGA X: Molecular evolutionary genetics analysis across computing platforms. *Molecular Biology and Evolution*, 35, 1547–1549.
- Larson G, Burger J (2013) A population genetics view of animal domestication. *Trends in Genetics*, 29, 197–205.
- Lefort V, Longueville JE, Gascuel O (2017) SMS: Smart model selection in PhyML. *Molecular Biology and Evolution*, 34, 2422–2424.
- Li J, Li XH (2011) A new record of fish *Tanichthys albonubes* (Cypriniformes: Cyprinidae) in Guangxi, China. *Chinese Journal of Zoology*, 46, 136–140. (in Chinese) [李捷, 李新辉 (2011) 广西鱼类一新纪录: 唐鱼(鲤形目: 鲤科). *动物学杂志*, 46, 136–140.]
- Librado P, Rozas J (2009) DNASP v5: A software for comprehensive analysis of DNA polymorphism data. *Bioinformatics*, 25, 1451–1452.
- Lin SY (1932) New cyprinid fishes from White Cloud Mountain, Canton. *Lingnan Science Journal*, 11, 379–383.
- Liu HS, Yi ZS, Liang JH, Li WH, Lin XT (2008) Morphological variations between the wild population and hatchery stock of *Tanichthys albonubes*. *Journal of Jinan University*, 29, 295–299. (in Chinese with English abstract) [刘汉生, 易祖盛, 梁建宏, 李伟华, 林小涛 (2008) 唐鱼野生种群和养殖群体的形态差异分析. *暨南大学学报*, 29, 295–299.]
- Luo JZ, Lin HD, Yang F, Yi ZS, Chan BP, Zhao J (2015) Population genetic structure in wild and hatchery populations of white cloud mountain minnow (*Tanichthys albonubes*): Recommendations for conservation. *Biochemical Systematics and Ecology*, 62, 142–150.
- Pan JH (1990) *Freshwater Fishes of Guangdong Province*. Guangdong Science and Technology Press, Guangzhou. (in Chinese) [潘炯华 (1990) *广东淡水鱼类志*. 广东科技出版社, 广州.]
- Pritchard JK, Stephens P, Donnelly P (2000) Inference of population structure using multilocus genotype data. *Genetics*, 155, 945–959.
- R Development Core Team (2015) R: A Language and Environment for Statistical Computing. Foundation for Statistical Computing, Vienna.
- Ronquist F, Teslenko M, van der Mark P, Ayres D, Darling A, Höhna S, Larget B, Liu L, Suchard M, Huelsenbeck J (2012) MrBayes 3.2: Efficient Bayesian phylogenetic inference and model choice across a large model space. *Systematic Biology*, 61, 539–542.
- Stamatakis A (2014) RAxML version 8: A tool for phylogenetic analysis and post-analysis of large phylogenies. *Bioinformatics*, 30, 1312–1313.
- Thompson JD, Gibson TJ, Plewniak F, Jeanmougin F, Higgins, DG (1997) The CLUSTAL_X Windows interface: Flexible strategies for multiple sequence alignment aided by quality analysis tools. *Nucleic Acids Research*, 25, 4876–4882.
- Weitzman SH, Chan LL (1966) Identification and relationships of *Tanichthys albonubes* and *Aphyocypris pooni*, two cyprinid fishes from South China and Hong Kong. *Copeia*, 1966, 285–296.
- Yan F, Lv JC, Zhang BL, Yuan ZY, Zhao HP, Huang S, Wei

- G, Mi X, Zou DH, Xu W, Chen S, Wang J, Xie F, Wu MY, Xiao HB, Liang ZQ, Jin JQ, Wu SF, Xu CS, Tapley B, Turvey ST, Papenfuss TJ, Cunningham AA, Murphy RW, Zhang YP, Che J (2018) The Chinese giant salamander exemplifies the hidden extinction of cryptic species. *Current Biology*, 28, R590–R592.
- Yi ZS, Chen XL, Wu JX, Yu SC, Huang CE (2004) Rediscovering the wild population of White Cloud Mountain minnows (*Tanichthys albonubes* Lin) in Guangdong Province. *Zoological Research*, 25, 551–555. (in Chinese) [易祖盛, 陈湘舜, 巫锦雄, 余顺昌, 黄慈恩 (2004) 野生唐鱼在广东的再发现. *动物学研究*, 25, 551–555.]
- Zhang XX, Zhu QY, Zhao, J (2017) Geometric morphometric analysis of body-form variability in populations of *Tanichthys albonubes*. *Journal of Fisheries of China*, 41, 1365–1372. (in Chinese with English abstract) [张秀霞, 朱巧莹, 赵俊 (2017) 利用几何形态测量学方法分析唐鱼群体的形态变异. *水产学报*, 41, 1365–1373.]
- Zhao J, Hsu CK, Luo JZ, Wang CH, Chan BP, Li J, Kuo PH, Lin HD (2018) Genetic diversity and population history of *Tanichthys albonubes* (Teleostei: Cyprinidae): Implications for conservation. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystem*, 28, 422–434.
- Zhao J, Yi ZS, Zhou XY, Xiao Z (2010) Background Resources of Aquatic Plants and Animals in Guangzhou. Science Press, Beijing. (in Chinese) [赵俊, 易祖盛, 周叶先, 肖智 (2010) 广州市水生动植物本底资源. 科学出版社, 北京.]
- Zheng CY (1989) The Fishes of the Zhujiang River. Science Press, Beijing. (in Chinese) [郑慈英 (1989) 珠江鱼类志. 科学出版社, 北京.]

(责任编辑: 何舜平 责任编辑: 时意专)



•研究报告•

黔西北石漠化地区两栖动物多样性及其生境选择

王存璐 陈 浒* 肖 华 张红梅 李林芝 郭 城 陈 静 魏 强

(贵州师范大学喀斯特研究院, 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 中国南方喀斯特生态环境学科创新引智基地, 贵州省喀斯特山地生态环境省部共建国家重点实验培育基地, 贵阳 550001)

摘要: 对两栖动物多样性及其生境选择的调查, 可为两栖动物的保护提供基础性资料。我们于2018年9–10月、2019年3–8月对贵州省毕节市撒拉溪石漠化综合治理示范区30个研究样方的两栖动物进行了调查, 共观察到两栖动物5,688只, 隶属2目6科9属10种。采用Shannon-Wiener多样性指数、Margalef丰富度指数、Pielou均匀度指数等分析了不同等级石漠化区域中的两栖动物物种多样性, 采用Sorenson相似性系数、聚类分析等方法分析了群落的相似性与差异性。结果显示: (1)云南小狭口蛙(*Glyphoglossus yunnanensis*)为优势种, 贵州疣螈(*Tylototriton kweichowensis*)、红点齿蟾(*Oreolalax rhodostigmatus*)、中华蟾蜍(*Bufo gargarizans*)、华西雨蛙(*Hyla annectans*)和昭觉林蛙(*Rana chaochiaoensis*)为常见种, 粗皮姬蛙(*Microhyla butleri*)、沼水蛙(*Hylarana guentheri*)、筠连臭蛙(*Odorrana junlianensis*)和威宁蛙(*Rana weiningensis*)为稀有种。(2)无石漠化区域与潜在石漠化区域两栖动物物种数、个体数以及生境类型较之其他3个等级石漠化区域更为丰富, 多样性指数、丰富度指数以无石漠化区域为最大。(3)无石漠化区域和潜在石漠化区域之间、无石漠化区域和潜在石漠化区域分别与其他3个等级石漠化区域之间表现出较强的差异性。研究表明, 喀斯特地区石漠化导致的生境差异是两栖动物分布差异的重要原因, 加强石漠化的生态治理是喀斯特地区保护两栖动物的重要途径。

关键词: 石漠化; 喀斯特; 两栖动物; 多样性; 生境选择

Diversity and habitat selection of amphibians in rocky desertification area in northwestern Guizhou

Cunlu Wang, Hu Chen*, Hua Xiao, Hongmei Zhang, Linzhi Li, Cheng Guo, Jing Chen, Qiang Wei

School of Karst Science, Guizhou Normal University, State Engineering Technology Institute for Karst Rocky Desertification Control, Overseas Expertise Introduction Center for Discipline Innovation, State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang 550001

Abstract: Amphibian protection can be encouraged through vital amphibian diversity and habitat selection studies. In September to October 2018 and March to August 2019, a total of 5,688 amphibians were recorded from the Bijie Salaxi rocky desertification comprehensive control area. The amphibians collected belonged to 2 orders, 6 families, 9 genera and 10 species. Various metrics were used to understand amphibian diversity in various environmental conditions such as the Shannon-Wiener diversity index, Margalef richness index and Pielou evenness index. Additionally, the Sorenson similarity coefficient and cluster analysis were used to analyze community similarity and difference. The results showed that: (1) *Glyphoglossus yunnanensis* was the dominant species, *Tylototriton kweichowensis*, *Oreolalax rhodostigmatus*, *Bufo gargarizans*, and *Hyla annectans*, *Rana chaochiaoensis* were the common species, *Microhyla butleri*, *Hylarana guentheri*, *Odorrana junlianensis*, and *Rana weiningensis* were the rare species. (2) The abundance of species, individuals, and habitat types increased in no rocky desertification areas and potential rocky desertification areas than in the other three grades of rocky desertification areas. Additionally, the diversity index and richness index were the largest in the non-rocky desertification areas. (3) Between no rocky desertification areas and potential rocky desertification areas; potential rocky desertification areas, and no rocky desertification areas showed strong differences with the other three grade areas. This study shows rocky desertification habitat differences

收稿日期: 2019-11-06; 接受日期: 2020-03-11

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0502601)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: gy_chenhu@163.com

in karst areas is important to distribution differences among amphibians, and strengthening the ecological control of rocky desertification is an important way to protect amphibians in karst areas.

Key words: rocky desertification; karst; amphibians; diversity; habitat selection

长期以来,生物多样性的保护被认为是保护生态环境、降低物种灭绝速率、促进可持续发展、保障生态安全的重要措施(王建英等, 2012; 冯晓娟, 2019)。两栖动物由于独特的生活史周期、特殊的生理学特性、直观的行为反应,与其他野生动物相比对环境变化更敏感,是生态系统状况是否良好的生物指示器(Mouchet et al, 2007; 姚明灿, 2014^①)。具有不同生态特征的两栖动物对不同生境的偏好程度有所不同(周绍春, 2016),其生境选择行为可在一定程度上反映生境之间的差异(杨维康, 2000)。因此,在特定生态系统中研究两栖动物多样性及其生境选择规律,对目标生物的保护及生态系统的评价具有实际意义。

以贵州省来说,2005–2020年间的两栖动物资源调查大都位于生境条件优越、生境类型比较丰富且相关部门以及周围居民对于动植物资源保护较为重视的自然保护区(王延斌, 2005, 2010; 陈继军等, 2007; 魏刚等, 2007; 徐宁等, 2008; 戴诗贵等, 2010; 张永宏等, 2012; 李仕泽等, 2015, 2017; 黄静等, 2016; 吕敬才等, 2017a, b; 姚正明等, 2018),而对于喀斯特石漠化地区两栖动物资源的调查报道几乎没有。石漠化作为喀斯特地区独特的生态系统退化现象,其发生与发展会造成植被结构单一、生态系统简单化,进而导致生物多样性下降(陈沛等, 2011),因此,本研究对贵州省毕节市撒拉溪石漠化综合治理示范区(以下简称毕节撒拉溪示范区)两栖动物物种多样性及其生境选择进行调查,旨在为喀斯特石漠化地区两栖动物及其栖息地的保护提供科学依据。

1 研究区概况

毕节撒拉溪示范区(105°01'12"–105°08'38" E, 27°11'09"–27°17'28" N)位于乌江上游六冲河流域、毕节市西部的撒拉溪镇和野角乡境内。该区属于亚热带季风湿润气候,冬春季节温和少雨,夏秋季节

湿热多雨,多年平均气温12.8℃,≥10℃年积温3,717℃,年降水量984.4 mm,降水时空分布不均,降雨集中在夏季7–9月,占全年降水量的52.6%。土壤以黄壤为主,部分地区有黄棕壤和石灰土。示范区总面积8,627.2 ha,海拔1,200–1,600 m,属于喀斯特高原山地生态环境,其中喀斯特面积6,406.1 ha,占总面积的74.3%。根据熊康宁等(2002)制定的石漠化等级划分标准,该示范区无石漠化区域1,667.2 ha(占示范区总面积的19.3%)、潜在石漠化区域1,087.2 ha(12.6%)、轻度石漠化区域2,228.9 ha(25.8%)、中度石漠化区域1,250.0 ha(14.5%)、强度石漠化区域172.9 ha(2.0%)。经调查,该示范区自然条件多样,植物资源丰富,植被以亚热带针阔叶混交林和落叶阔叶林为主。区域内共有植物720种,隶属133科437属,主要是以火棘属(*Pyracantha*)、栒子属(*Cotoneaster*)、栎属(*Quercus*)、青冈属(*Cyclobalanopsis*)、杜鹃属(*Rhododendron*)等为主的藤刺灌丛。

2 研究方法

2.1 调查时间与方法

根据研究区地形地貌特征、石漠化等级分布特征选择合适的样方,样方标准为半径100 m的圆形,每个石漠化等级选定6个样方,总计30个样方(图1)。使用样线法分别于2018年9–10月、2019年3–8月对30个样方的两栖动物进行调查,每个样方具体调查时间及两栖动物种类、数量见附录1。每次调查始于日落后30 min内,一般为晚上19:30–0:30。使用强光手电筒对样点范围内的两栖动物进行搜寻,并结合声音进行方位判断。对搜寻到的两栖动物进行拍照记录,同时记录物种类别、个体数量、生存环境等信息。若遇到无法辨认的两栖动物物种,则捕捉1个个体带回室内进行鉴定。物种鉴定根据《中国动物志:两栖纲》(费梁等, 2006, 2009a, b)、《中国两栖动物及其分布彩色图鉴》(费梁等, 2012)和中国两栖类数据库(<http://www.amphibiachina.org/>)进行。

2.2 生境划分

根据《中国动物志:两栖纲》、《中国两栖动物

^① 姚明灿 (2014) 中国两栖动物地理分布格局研究. 硕士学位论文, 中南林业科技大学, 长沙.

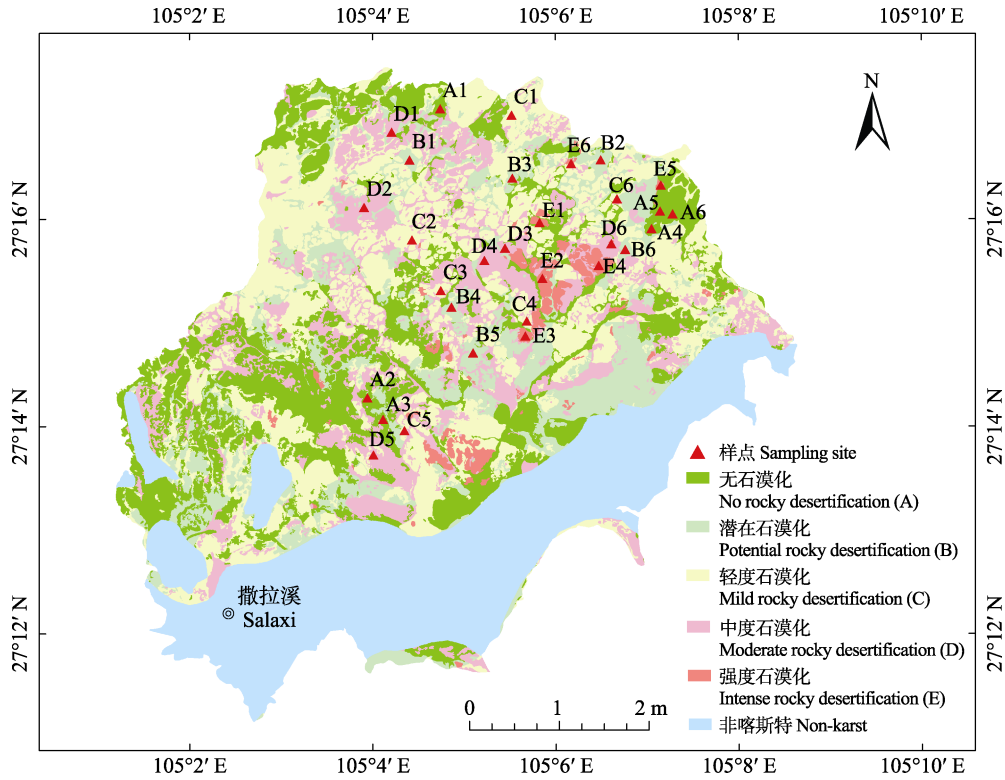


图1 毕节市撒拉溪石漠化综合治理示范区两栖动物研究样点分布图

Fig. 1 Distribution of amphibian study sampling sites in Bijie Salaxi rocky desertification comprehensive control area

及其分布彩色图鉴》和中国两栖类数据库中对两栖动物各种生存环境的界定, 以及毕节撒拉溪示范区地质地貌类型和人类活动痕迹, 将该地区两栖动物栖息的生境类型划分为15种, 分别是人工林、灌丛、草地、沼泽湿地、溪流、天然湖泊、人工池塘、临时水域、石缝、水洞、旱洞、耕地、撂荒地、道路、房舍。其中, 无石漠化区域包括所有的15种生境类型; 潜在石漠化区域包括除沼泽湿地和溪流外的其余13种生境; 轻度石漠化区域包括灌丛、草地、人工池塘、临时水域、石缝、旱洞、耕地、撂荒地、道路和房舍10种生境; 中度石漠化区域包括草地、人工池塘、临时水域、石缝、旱洞、撂荒地、道路和房舍8种生境; 强度石漠化区域包括草地、临时水域、石缝、旱洞、撂荒地和道路6种生境。

2.3 数据处理

多样性分析采用以下指数(马克平和刘玉明, 1994):

Shannon-Wiener多样性指数:

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (1)$$

式中, P_i 为种*i*的个体数占总个体数的比例; 同时, P_i 可认定为优势度值, P_i 大于10%时, 可认定为优势种; P_i 介于1%–10%, 可认定为常见种; P_i 小于1%, 可认定为稀有种。

Margalef丰富度指数:

$$SR = (S - 1) / \ln N \quad (2)$$

Pielou均匀度指数:

$$J = H' / \ln N \quad (3)$$

相似性分析采用以下指数(马克平等, 1995):

Sorenson相似性系数:

$$C = 2j / (a + b) \quad (4)$$

式中, S 为种数, N 为个体总数, j 为两区域共有物种数, a 、 b 分别为两区域各自物种数。

采用聚类分析方法, 即将各样方中两栖动物物种数和个体总数作为因变量代入Q型聚类分析中, 通过欧氏距离法将所有样方进行分类(李贲等, 2017)。

数据处理在Excel 2016、SPSS 22中进行。

3 结果

3.1 两栖动物物种组成

在2018年9–10月、2019年3–8月对毕节撒拉溪

示范区30个样方的调查中,共记录5,688只两栖动物个体,隶属于2目6科9属10种(附录2)。其中云南小狭口蛙(*Glyphoglossus yunnanensis*)为优势种,占所调查到的两栖动物总个体数的76.53%。贵州疣螈(*Tylototriton kweichowensis*)、红点齿蟾(*Oreolalax rhodostigmatus*)、中华蟾蜍(*Bufo gargarizans*)、华西雨蛙(*Hyla annectans*)和昭觉林蛙(*Rana chaochiaoensis*)为常见种,分别占所调查到的两栖动物总个体数的8.98%、3.01%、2.88%、2.34%和5.68%;粗皮姬蛙(*Microhyla butleri*)、沼水蛙(*Hylarana guentheri*)、筠连臭蛙(*Odorrana junlianensis*)和威宁蛙(*Rana weiningensis*)为稀有种,分别占所调查到的两栖动物总个体数的0.33%、0.14%、0.02%和0.09%。

区系组成上,该区两栖动物以东洋界为主,威宁蛙属东洋界西南区物种,华西雨蛙属东洋界华南区和西南区共同分布种,贵州疣螈、红点齿蟾、云南小狭口蛙、筠连臭蛙属东洋界华中区和西南区共同分布种,粗皮姬蛙、沼水蛙、昭觉林蛙属东洋界华中区、华南区和西南区共同分布种,中华蟾蜍属古北界和东洋界广布种。生态类型以陆栖静水型为主,占总物种数的60%;陆栖流水型有3种,分别为红点齿蟾、筠连臭蛙和威宁蛙;仅华西雨蛙1种为树栖型。10种两栖动物中,贵州疣螈属国家二级保护动物,其濒危等级为易危,同被列为易危等级的还有红点齿蟾、筠连臭蛙和威宁蛙;其余6种为无危。

3.2 两栖动物多样性

不同等级石漠化区域的两栖动物多样性分析结果表明(表1): Shannon-Wiener多样性指数表现为无石漠化区域 > 轻度石漠化区域 > 中度石漠化区域 > 强度石漠化区域 > 潜在石漠化区域, Margalef丰富度指数表现为无石漠化区域 > 潜在石漠化区域 > 轻度石漠化区域 > 强度石漠化区域 > 中度石漠化区域, Pielou均匀度指数表现为中度石漠化区域 > 强度石漠化区域 > 轻度石漠化区域 > 无石漠化区域 > 潜在石漠化区域。

3.3 两栖动物群落相似性

利用所调查的研究区两栖动物物种数量和个体数量,对分属不同石漠化等级的30个样方进行聚类分析,在类间距离5-10的区间将所有研究样点分为4组(图2)。

I组: 共有26个样方,包含所有6个强度石漠化样方、6个中度石漠化样方、6个轻度石漠化样方、

3个潜在石漠化样方和5个无石漠化样方。

II组: 仅1个样方,即无石漠化样方A1。在该样方中观察到249只贵州疣螈、28只中华蟾蜍,分别占到无石漠化区域此两种总个体数的91.54%和56.72%,且在该样方中还观察到2只沼水蛙,而其他无石漠化样方中并未发现沼水蛙。

III组: 含2个样方,即潜在石漠化样方B3和B4。在样方B3中观察到云南小狭口蛙1,594只、两栖动物物种5种,样方B4中观察到云南小狭口蛙1,365只、两栖动物物种6种,远高于I组中的3个潜在石漠化样方。

IV组: 仅1个样方,即潜在石漠化样方B5。虽然该样方中观察到两栖动物6种,但云南小狭口蛙个体数为1,044只,较之I组中的3个潜在石漠化样方个体数多,而较之III组中的2个潜在石漠化样方个体数稍少,故自成一类。

群落相似性分析结果显示,30个样方中两栖动物相似性系数处于0.00-1.00之间,其中无石漠化区域和潜在石漠化区域之间、无石漠化区域和潜在石漠化区域分别与其他3个石漠化等级之间表现出较强的差异性(表2)。由于轻度石漠化区域、中度石漠化区域和强度石漠化区域每个样方中两栖动物物种数单一,其相互之间的相似性指数大多呈极值状态。

3.4 两栖动物分布与生境选择

根据调查,15种生境的主要特征见附录3,不同等级石漠化区域中包含的生境类型与有两栖动物出现的生境类型对比见表3,不同种类两栖动物在各样方中栖息的生境类型见附录4。在无石漠化区域所包含的15种生境中,两栖动物出现于12种生境;在潜在石漠化区域所包含的13种生境中,两栖动物出现于10种生境,在轻度石漠化区域所包含的10种生境中,两栖动物出现于3种生境;在中度石漠化区域所包含的8种生境中,两栖动物出现于4种生境;在强度石漠化区域所包含的6种生境中,两栖动物仅出现于1种生境。

两栖动物在不同生境中的分布见表4。利用每个两栖动物物种在某一生境中分布的个体数与该两栖动物物种总个体数之比来表征两栖动物对于生境的选择,< 1%为分布稀少,1%-10%为分布一般,> 10%为分布较多。其中,贵州疣螈主要分布在天然湖泊、人工池塘和临时水域3种生境,红点齿蟾主要分布在沼泽湿地和水洞2种生境,中华蟾蜍主要分

表1 毕节市撒拉溪石漠化综合治理示范区不同等级石漠化区域两栖动物多样性指数

Table 1 Diversity index of amphibians in rocky desertification areas with different grades in Bijie Salaxi rocky desertification comprehensive control area

石漠化等级 Grade of rocky	Shannon-Wiener多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	Margalef丰富度指数 Margalef richness index	Pielou均匀度指数 Pielou evenness index
无石漠化 No rocky desertification	1.645	0.982	0.791
潜在石漠化 Potential desertification	0.414	0.954	0.199
轻度石漠化 Mild rocky desertification	0.974	0.721	0.887
中度石漠化 Moderate rocky desertification	0.688	0.334	0.993
强度石漠化 Intense rocky desertification	0.673	0.621	0.971

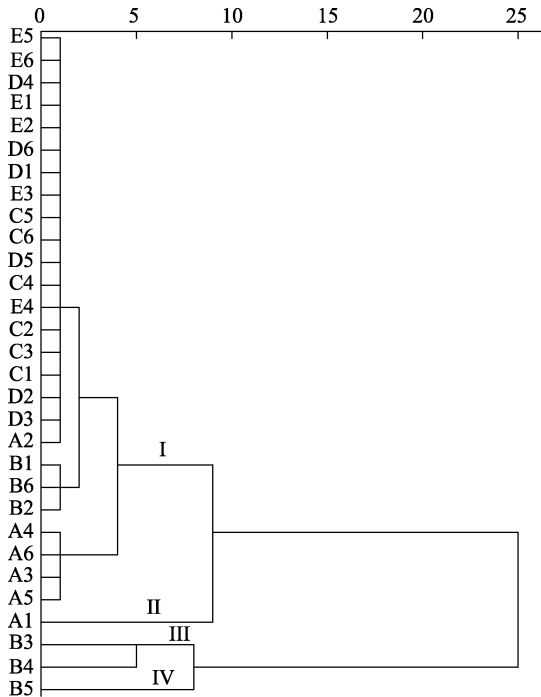


图2 毕节市撒拉溪石漠化综合治理示范区30个样方两栖群落聚类结果。A: 无石漠化; B: 潜在石漠化; C: 轻度石漠化; D: 中度石漠化; E: 强度石漠化。

Fig. 2 Clustering results of amphibian communities in 30 quadrats in Bijie Salaxi rocky desertification comprehensive control area. A, No rocky desertification; B, Potential rocky desertification; C, Mild rocky desertification; D, Moderate rocky desertification; E, Intense rocky desertification.

布在人工池塘和临时水域2种生境, 华西雨蛙主要分布在沼泽湿地、人工池塘和临时水域3种生境, 云南小狭口蛙主要分布在人工池塘和临时水域2种生境, 粗皮姬蛙主要分布在草地和临时水域2种生境, 沼水蛙主要分布在草地、天然湖泊和临时水域3种生境, 筠连臭蛙主要分布在天然湖泊1种生境, 昭觉林蛙主要分布在沼泽湿地、天然湖泊、人工池塘和临时水域4种生境, 威宁蛙主要分布在灌丛和草地2种生境。

4 讨论

4.1 喀斯特石漠化地区两栖动物物种组成对比

根据贵州省动物地理区划(伍律等, 1987; 魏刚等, 1989), 毕节撒拉溪示范区属于黔西高原中山省, 据中国两栖类数据库和最新资料显示(Wang et al, 2019), 目前该地理区内已发现两栖动物33种, 占贵州省两栖动物总数的38.82%。本研究中两栖动物仅占黔西高原中山省两栖动物总数的30.30%, 相较于贵州其他地区, 物种种类明显偏少, 这是由于毕节撒拉溪示范区作为典型喀斯特高原山地地貌类型, 石漠化较为严重, 特殊的地上地下二元结构使得地表水资源匮乏, 生态系统功能逐渐衰退; 加之当地政府及居民生态环境保护意识欠缺, 不合理的人为干扰如植被破坏、道路和房舍修建、采矿场建设、环境污染等加剧了两栖动物栖息地的破碎化, 多种原因共同作用影响了两栖动物的生存和分布, 导致研究区生物多样性偏低。

在所调查到的10种两栖动物中, 有4种处于易危状态, 分别为贵州疣螈、红点齿蟾、筠连臭蛙和威宁蛙。贵州疣螈属于国家二级保护动物, 该物种大多生活于阴暗潮湿的有灌丛杂草伴生的土洞、石缝、小水塘等地, 多在雷雨天气进行繁殖。研究区内有较多适合贵州疣螈栖息和繁殖的场所, 且在其繁殖季节雷雨天气较为频繁, 因此贵州疣螈在研究区属于常见种, 但其保护现状不容乐观。因为该物种行动较为缓慢, 研究区大范围筑路工程的开展导致其道路致死率较高。红点齿蟾在研究区内也属于常见种, 因为研究区存在一定范围的天然沼泽湿地, 当地居民多在湿地水源点修建饮用水引水窖井, 黑暗、深水且适于隐藏的环境有利于红点齿蟾的繁殖和生存; 加之研究区特殊的地质地貌条件造就了许

表2 毕节市撒拉溪石漠化综合治理示范区30个样方两栖动物群落相似性指数
Table 2 Similarity index of amphibian communities in 30 quadrats in Bijie Salaxi rocky desertification comprehensive control area

Table with 30 columns (A1-E6) and 30 rows (A1-E6) showing similarity indices between quadrats. The diagonal elements are all 1.00. The matrix is symmetric. The quadrats are labeled A1 through E6, representing different levels of desertification: A (No rocky desertification), B (Potential rocky desertification), C (Mild rocky desertification), D (Moderate rocky desertification), E (Intense rocky desertification), and E6 (No rocky desertification).

A: 无石漠化; B: 潜在石漠化; C: 轻度石漠化; D: 中度石漠化; E: 强度石漠化; E6: 无石漠化; 对角线下方为各样方中两栖动物物种数, 对角线上方为相似性指数。
A, No rocky desertification; B, Potential rocky desertification; C, Mild rocky desertification; D, Moderate rocky desertification; E, Intense rocky desertification; E6, No rocky desertification; The diagonal is the number of amphibians species in various squares, the lower of the diagonal is the number of the same species of two quadrats, and the upper of the diagonal is the similarity index.

表3 毕节市撒拉溪石漠化综合治理示范区两栖动物在不同等级石漠化区域分布的生境类型
Table 3 Habitat types of amphibians in different rocky desertification zones in Bijie Salaxi rocky desertification comprehensive control area

生境类型 Habitat type	无石漠化 No rocky desertification		潜在石漠化 Potential rocky desertification		轻度石漠化 Mild rocky desertification		中度石漠化 Moderate rocky desertification		强度石漠化 Intense rocky desertification	
	包括 Included	两栖动物分布 Amphibian distribution	包括 Included	两栖动物分布 Amphibian distribution	包括 Included	两栖动物分布 Amphibian distribution	包括 Included	两栖动物分布 Amphibian distribution	包括 Included	两栖动物分布 Amphibian distribution
人工林 Man-made forest	√	-	√	-	-	-	-	-	-	-
灌丛 Shrub	√	√	√	-	√	-	-	-	-	-
草地 Grassland	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
沼泽湿地 Marsh wetland	√	-	√	-	-	-	-	-	-	-
溪流 Stream	√	-	√	-	-	-	-	-	-	-
天然湖泊 Natural lake	√	√	√	√	-	-	-	-	-	-
人工池塘 Artificial pond	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
临时水域 Temporary waters	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
石缝 Crack in a rock	√	-	√	-	√	-	-	-	-	-
水洞 Water cave	√	√	√	√	-	-	-	-	-	-
旱洞 Dry cave	√	-	√	-	√	-	-	-	√	√
耕地 Arable land	√	-	√	√	√	-	-	-	-	-
撂荒地 Black fallow	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
道路 Road	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
房舍 Building	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√

表4 毕节市撒拉溪石漠化综合治理示范区两栖动物在不同生境中的分布
Table 4 Distribution of amphibians in different habitats in Bijie Salaxi rocky desertification comprehensive control area

物种 Species	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
贵州疣螈 <i>Tylotriton kweichowensis</i>			12 ⁺⁺	2 ⁺		304 ⁺⁺⁺	89 ⁺⁺	74 ⁺⁺⁺		27 ⁺⁺				3 ⁺	
红点齿蟾 <i>Oreolalax rhodostigmatus</i>				45 ⁺⁺⁺					13 ⁺⁺	113 ⁺⁺⁺					
中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>	1 ⁺	1 ⁺	14 ⁺⁺	11 ⁺⁺	3 ⁺⁺	5 ⁺⁺	52 ⁺⁺	60 ⁺⁺⁺			2 ⁺⁺	3 ⁺⁺	4 ⁺⁺	7 ⁺⁺	1 ⁺
华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>			13 ⁺⁺	16 ⁺⁺⁺	1 ⁺	4 ⁺⁺	16 ⁺⁺⁺	52 ⁺⁺⁺					7 ⁺⁺	4 ⁺⁺	20 ⁺⁺⁺
云南小狭口蛙 <i>Glyphoglossus yunnanensis</i>				2 ⁺		84 ⁺⁺	1,496 ⁺⁺⁺	2,746 ⁺⁺⁺			3 ⁺	1 ⁺		1 ⁺	20 ⁺
粗皮姬蛙 <i>Microhyla butleri</i>			2 ⁺⁺					17 ⁺⁺⁺							
沼水蛙 <i>Hylarana guentheri</i>			2 ⁺⁺			4 ⁺⁺		2 ⁺⁺							
筠连臭蛙 <i>Odorrana junlianensis</i>						1 ⁺⁺⁺									
昭觉林蛙 <i>Rana chaochiaotaensis</i>	5 ⁺⁺	1 ⁺	2 ⁺	92 ⁺⁺		85 ⁺⁺⁺	53 ⁺⁺⁺	81 ⁺⁺⁺	4 ⁺⁺						
威宁蛙 <i>Rana weiningensis</i>		3 ⁺⁺⁺	2 ⁺⁺⁺												

A: 人工林; B: 灌丛; C: 草地; D: 沼泽湿地; E: 溪流; F: 天然湖泊; G: 人工池塘; H: 临时水域; I: 石缝; J: 水洞; K: 旱洞; L: 耕地; M: 撂荒地; N: 道路; O: 房舍; +++: 分布较多; ++: 分布一般; +: 分布稀少。

A, Man-made forest; B, Shrub; C, Grassland; D, Marsh wetland; E, Stream; F, Natural lake; G, Artificial pond; H, Temporary waters; I, Crack in a rock; J, Water cave; K, Dry cave; L, Arable land; M, Black fallow; N, Road; O, Building. +++: More distribution; ++: General distribution; +: Rare distribution.

多地下暗河及石灰岩溶洞,这些都是红点齿蟾良好的栖息地。而筠连臭蛙和威宁蛙在研究区中较为少见,这可能是由于研究区内大型溪流较少,适合两种蛙类生存的天然栖息地较为匮乏。调查中,唯一一只筠连臭蛙于小溪沟旁的天然湖泊中被发现;威宁蛙有3只隐匿于雨后临时径流旁的灌丛下,2只记录于一个小型泉点边大石块下的草地中,这也佐证了此两种蛙类对于流水环境的偏好性。

10种两栖动物中,云南小狭口蛙的个体数多达4,353只,占调查总个体数的76.53%。该蛙个体小,种群密度高;变态周期短,在时间因素上提升了卵及幼体对外界的抗干扰能力,因此繁殖能力较强;且该蛙对于浑浊水体的适应性较强,而在道路和房屋的建设中,形成了大量临时水域和人工池塘,这些水体使得云南小狭口蛙成为研究区的优势种。

4.2 喀斯特石漠化地区两栖动物生境选择差异性

根据不同等级石漠化区域两栖动物多样性指数(表1),无石漠化区域和潜在石漠化区域拥有较高的多样性和丰富度,这是由于这两个区域拥有较高的生境多样性,不仅水体较多,且植被覆盖度高、植被类型多样,能够充分满足不同两栖动物种类对于生境的不同要求,并为其提供庇护、遮阴、攀爬的媒介;多种生境类型并存缓解了生境破碎化,能有效促进两栖动物种群间的基因交流,降低种群的灭绝风险,并形成物质循环、能量流动和信息传递的网络,有利于维持两栖动物群落内部营养系统的运转。

潜在石漠化区域均匀度指数最低,主要原因在于云南小狭口蛙个体小、种群密度高、适生性强,使得其在人工池塘和临时水域中个体数量占比相较于其他物种极度偏高,而人工池塘和临时水域属于潜在石漠化区域较为主要的生境类型。

根据两栖动物在不同生境中的分布(表4),道路上记录到的4种两栖动物即贵州疣螈、中华蟾蜍、华西雨蛙和云南小狭口蛙,均是研究区的优势种及常见种,这也从侧面反映了喀斯特石漠化地区人类活动导致了两栖动物生境的破碎化,增加了其意外死亡风险,不利于两栖动物的保护。

综合而言,无石漠化区域拥有最为丰富的生境多样性和最为丰富的两栖动物物种多样性,潜在石漠化区域拥有最为丰富的物种多样性及最多的两栖动物个体数量,在这两种石漠化等级区域,其生

态系统的组成异质性和构型异质性都很高。而轻度石漠化、中度石漠化、强度石漠化区域受人为干扰更为严重,其自然生态系统生境条件趋于恶化,物种种类组成、群落或系统结构发生改变,生物多样性降低(任海等,2004)。由此可见,石漠化的治理对于包括两栖动物在内的各种生物生存来说至关重要。

4.3 喀斯特石漠化地区两栖动物生存现状及保护建议

喀斯特地区生态环境容量小,且石漠化现象呈不断扩张的态势,导致喀斯特生态系统发生了大面积退化(罗中康,2000;彭晚霞等,2008;宋同清等,2014),两栖动物多样性较之其他地区不论种类数量或是个体数量都较少。由于喀斯特地区特殊的地表地下二元空间结构,降水入渗系数高,导致水源深埋,因此喀斯特地区地下水资源丰富但地表却水资源匮乏(袁道先,2001,2003;安吉平等,2017)。尽管多雨的季节,在喀斯特石漠化地区暂时性积水的坑塘中会有两栖动物在其中产卵繁殖,但连雨天气过后,大多数坑塘会逐渐干涸,未孵化的卵以及未完成变态发育的两栖动物幼体会因缺水而死亡。而人类对环境的过度开发和利用会成为两栖动物种群之间交流的障碍,使得生境愈加破碎化,水污染蔓延,进而导致两栖动物死亡、发育和行为异常等问题。

针对喀斯特石漠化地区两栖动物生存现状,该地区两栖动物保护可以采取以下措施:

(1)通过各种生物措施、工程措施等对石漠化进行长久治理,促进两栖动物生境恢复。

(2)构建两栖动物栖息地,例如前期开展的对原生湿地保护、地势条件较好的暂时性坑塘的防渗处理等方法都对两栖动物起到了有效的保护作用。接下来可以基于不同种类两栖动物对生境的不同偏好进行栖息地构建,也可以从大范围景观尺度上着手,例如构建两栖动物生态廊道、在道路等基础设施的规划中融入生态建设理念等。

(3)向当地居民普及生物多样性保护、生态建设等方面的知识,做到全民参与,并在两栖动物集中生活区域设立警示标志,同时根据两栖动物生活周期定期对栖息环境进行监测,逢枯水期要对一些渗漏生境进行水源引流,以确保两栖动物生存环境的稳定。

参考文献

- An JP, Wang J, Cai XF, Duan ZB, Yan MM (2017) Research progress of soil loss under the dual structure of southwest karst. *Hubei Agricultural Sciences*, 56, 1605–1610. (in Chinese with English abstract) [安吉平, 王济, 蔡雄飞, 段志斌, 颜蒙蒙 (2017) 西南喀斯特二元结构下土壤流失研究进展. *湖北农业科学*, 56, 1605–1610.]
- Chen H, Xiong KN, Liu ZB, Qiu J, Chen YB, Xiao SZ, Yang H (2011) Exploration of land consolidation based on biodiversity protection in the Hetou karst area. *Earth and Environment*, 39, 450–455. (in Chinese with English abstract) [陈浒, 熊康宁, 刘忠斌, 邱杰, 陈永毕, 肖时珍, 杨洪 (2011) 基于生物多样性保护的河头喀斯特土地整理探索. *地球与环境*, 39, 450–455.]
- Chen JJ, Zhang X, Yang SJ, Xie ZG, Pan CK, Chen JH (2007) Survey on amphibian in Leigongshan Nature Reserve. *Sichuan Journal of Zoology*, 26, 826–830. (in Chinese with English abstract) [陈继军, 张旋, 杨绍军, 谢镇国, 潘成坤, 陈继红 (2007) 贵州雷公山自然保护区两栖动物调查报告. *四川动物*, 26, 826–830.]
- Dai SG, Zhang JZ, Jiang YM, Xu N (2010) Diversity of amphibian sand reptiles in Baiqing Karst Nature Reserve of Guizhou. *Guizhou Science*, 28(1), 72–75. (in Chinese with English abstract) [戴诗贵, 张景涿, 江亚猛, 徐宁 (2010) 贵州柏箐喀斯特森林自然保护区两栖爬行动物多样性研究. *贵州科学*, 28(1), 72–75.]
- Fei L, Hu SQ, Ye CY, Huang YZ (2006) *Fauna Sinica · Amphibia (Vol. 1): General Accounts of Amphibia, Gymnophiona and Urodela*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [费梁, 胡淑琴, 叶昌媛, 黄永昭 (2006) 中国动物志·两栖纲(第一卷): 总论, 蚓螈目, 有尾目. 科学出版社, 北京.]
- Fei L, Hu SQ, Ye CY, Huang YZ (2009a) *Fauna Sinica · Amphibia (Vol. 2): Anura*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [费梁, 胡淑琴, 叶昌媛, 黄永昭 (2009a) 中国动物志·两栖纲(第二卷): 无尾目. 科学出版社, 北京.]
- Fei L, Hu SQ, Ye CY, Huang YZ (2009b) *Fauna Sinica · Amphibia (Vol. 3): Anura, Ranidae*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [费梁, 胡淑琴, 叶昌媛, 黄永昭 (2009b) 中国动物志: 两栖纲(第三卷): 无尾目, 蛙科. 科学出版社, 北京.]
- Fei L, Ye CY, Jiang JP (2012) *Colored Atlas of Chinese Amphibians and Their Distributions*. Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu. (in Chinese) [费梁, 叶昌媛, 江建平 (2012) 中国两栖动物及其分布彩色图鉴. 四川科学技术出版社, 成都.]
- Feng XJ, Mi XC, Xiao ZS, Cao L, Wu H, Ma KP (2019) Overview of Chinese Biodiversity Observation Network (Sino BON). *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 34, 1389–1398. (in Chinese with English abstract) [冯晓娟, 米湘成, 肖治术, 曹垒, 吴慧, 马克平 (2019) 中国生物多样性监测与研究网络建设及进展. *中国科学院院刊*, 34, 1389–1398.]
- Huang J, Liang S, Yin XM, Zhu HM, Wu YJ, Gan XP, Wang ZJ (2016) On amphibian resources of Chishui National Nature Reserve for *Alsophila spinulosa*. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 41(4), 64–68. (in Chinese with English abstract) [黄静, 梁盛, 印显明, 朱汉墨, 吴羿锦, 甘小平, 王志坚 (2016) 赤水桫椤国家级自然保护区两栖动物资源现状. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 41(4), 64–68.]
- Jiang JP, Xie F, Zang CX, Cai L, Li C, Wang B, Li JT, Wang J, Hu JH, Wang Y, Liu JY (2016) Assessing the threat status of amphibians in China. *Biodiversity Science*, 24, 588–597. (in Chinese with English abstract) [江建平, 谢锋, 臧春鑫, 蔡蕾, 李成, 王斌, 李家堂, 王杰, 胡军华, 王燕, 刘炯宇 (2016) 中国两栖动物受威胁现状评估. *生物多样性*, 24, 588–597.]
- Li B, Zhang W, Shu XX, Mo YM, Pei EL, Yuan X, Wang TH (2017) Distribution characteristic of amphibian in three typical habitats of rural Shanghai. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 26, 824–831. (in Chinese with English abstract) [李贲, 张伟, 束潇潇, 莫英敏, 裴恩乐, 袁晓, 王天厚 (2017) 上海郊区三类典型生境的两栖类分布特征. *长江流域资源与环境*, 26, 824–831.]
- Li SZ, Lü JC, Li C, Wei G, Xu N (2015) Investigation of herpetological resources in Mayanghe National Nature Reserve, Guizhou, China. *Chinese Journal of Zoology*, 50, 59–67. (in Chinese with English abstract) [李仕泽, 吕敬才, 李灿, 魏刚, 徐宁 (2015) 麻阳河国家级自然保护区两栖爬行动物资源调查. *动物学杂志*, 50, 59–67.]
- Li SZ, Lü JC, Xu N, Wei G (2017) Field survey on amphibians resources in Nangan Nature Reserve of Guizhou, China. *Journal of Guiyang University (Natural Sciences)*, 12(3), 65–69. (in Chinese with English abstract) [李仕泽, 吕敬才, 徐宁, 魏刚 (2017) 德江桶杆自然保护区两栖动物资源调查. *贵阳学院学报(自然科学版)*, 12(3), 65–69.]
- Luo ZK (2000) Discussion on desertification control and ecological environment construction in karst area of Guizhou Province. *Guizhou Environmental Protection Science and Technology*, 6(1), 7–10. (in Chinese) [罗中康 (2000) 贵州喀斯特地区荒漠化防治与生态环境建设浅议. *贵州环保科技*, 6(1), 7–10.]
- Lü JC, Li SZ, Niu KF, Chen J, Jiang S, Tian Y, Wei G, Xu N (2017a) Amphibian diversity and faunal analysis in Fanjingshan Aational Nature Reserve. *Guizhou Agricultural Sciences*, 45, 148–152. (in Chinese with English abstract) [吕敬才, 李仕泽, 牛克锋, 陈靖, 姜森, 田宇, 魏刚, 徐宁 (2017a) 梵净山国家级自然保护区两栖动物多样性及区系组成. *贵州农业科学*, 45, 148–152.]
- Lü JC, Zhang HB, Yuan G, Long HW, Guo X, Yu ZG (2017b) Diversity and fauna of amphibians and reptiles in Aha National Wetland Park. *Guizhou Science*, 35(6), 14–18. (in Chinese with English abstract) [吕敬才, 张海波, 袁果, 龙汉武, 郭轩, 余志刚 (2017b) 阿哈湖国家湿地公园两栖爬行动物多样性及区系. *贵州科学*, 35(6), 14–18.]

- Ma KP, Liu CR, Liu YM (1995) Measurement of biotic community diversity. II. β diversity. *Chinese Biodiversity*, 3, 38–43. (in Chinese) [马克平, 刘灿然, 刘玉明 (1995) 生物群落多样性的测度方法II. β 多样性的测度方法. 生物多样性, 3, 38–43.]
- Ma KP, Liu YM (1994) Measurement of biotic community diversity. I. α diversity (part 2). *Chinese Biodiversity*, 2, 231–239. (in Chinese) [马克平, 刘玉明 (1994) 生物群落多样性的测度方法I. α 多样性的测度方法(下). 生物多样性, 2, 231–239.]
- Mouchet F, Cren S, Cunienq C, Deydier E, Guilet R, Gauthier L (2007) Assessment of lead ecotoxicity in water using the amphibian larvae (*Xenopus laevis*) and preliminary study of its immobilization in meat and bone meal combustion residues. *Biometals*, 20, 113–127.
- Peng WX, Wang KL, Song TQ, Zeng FP, Wang JR (2008) Controlling and restoration models of complex degradation of vulnerable karst ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 28, 811–820. (in Chinese with English abstract) [彭晚霞, 王克林, 宋同清, 曾馥平, 王久荣 (2008) 喀斯特脆弱生态系统复合退化控制与重建模式. 生态学报, 28, 811–820.]
- Ren H, Peng SL, Lu HF (2004) The restoration of degraded ecosystems and restoration ecology. *Acta Ecologica Sinica*, 24, 1760–1768. (in Chinese with English abstract) [任海, 彭少麟, 陆宏芳 (2004) 退化生态系统恢复与恢复生态学. 生态学报, 24, 1760–1768.]
- Song TQ, Peng WX, Du H, Wang KL, Zeng FP (2014) Occurrence, spatial-temporal dynamics and regulation strategies of karst rocky desertification in Southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 5328–5341. (in Chinese with English abstract) [宋同清, 彭晚霞, 杜虎, 王克林, 曾馥平 (2014) 中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策. 生态学报, 34, 5328–5341.]
- Wang J, Li YL, Li Y, Chen HH, Zeng YJ, Shen JM, Wang YY (2019) Morphology, molecular genetics, and acoustics reveal two new species of the genus *Leptobranchella* from northwestern Guizhou Province, China (Anura, Megophryidae). *ZooKeys*, 848, 119–154.
- Wang JY, Li JF, Zhang LQ, Zou LL (2012) Prediction of land use structure based on biodiversity conservation. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 28, 221–226. (in Chinese with English abstract) [王建英, 李江风, 张丽琴, 邹利林 (2012) 基于生物多样性保护的土地利用结构预测. 农业工程学报, 28, 221–226.]
- Wang YB (2005) Investigation on amphibians in *Fokienia hodginsii* Nature Reserve, Jinsha and Dafang County, Guizhou. *Sichuan Journal of Zoology*, 24, 401–402. (in Chinese) [王延斌 (2005) 贵州金沙县、大方县福建柏自然保护区两栖动物调查. 四川动物, 24, 401–402.]
- Wang YB (2010) Survey of amphibians in Lengshuihe Nature Reserve in Guizhou. *Guizhou Agricultural Sciences*, 38, 191–193. (in Chinese with English abstract) [王延斌 (2010) 贵州金沙冷水河自然保护区两栖动物调查. 贵州农业科学, 38, 191–193.]
- Wei G, Chen FG, Li DJ (1989) Preliminary studies on geographical distribution and faunal regions of amphibians of Guizhou Province. *Zoological Research*, 10, 241–249. (in Chinese with English abstract) [魏刚, 陈服官, 李德俊 (1989) 贵州两栖动物区系及地理区划的初步研究. 动物学研究, 10, 241–249.]
- Wei G, Xu N, Zhang GF, Tan YM (2007) A survey of amphibians and reptiles in Dashahe Nature Reserve in Guizhou. *Sichuan Journal of Zoology*, 26, 347–350. (in Chinese with English abstract) [魏刚, 徐宁, 张国防, 谭杨梅 (2007) 贵州大沙河自然保护区两栖爬行动物多样性研究. 四川动物, 26, 347–350.]
- Wu L, Dong Q, Xu RH (1987) *Amphibians of Guizhou*. Guizhou People's Publishing House, Guiyang. (in Chinese) [伍律, 董谦, 须润华 (1987) 贵州两栖类志. 贵州人民出版社, 贵阳.]
- Xiong KN, Li P, Zhou ZF, An YL, Lü T, Lan AJ (2002) Remote Sensing of Karst Rocky Desertification—GIS Typical Research—Take Guizhou Province as An Example. Geological Publishing House, Beijing. (in Chinese) [熊康宁, 黎平, 周忠发, 安裕伦, 吕涛, 蓝安军 (2002) 喀斯特石漠化的遥感—GIS典型研究——以贵州省为例. 地质出版社, 北京.]
- Xu N, Dai SG, Zhang JZ (2008) A survey of amphibians in Qingshuihe Nature Reserve of Guizhou. *Journal of Guiyang University (Natural Sciences)*, 3(4), 6–8. (in Chinese with English abstract) [徐宁, 戴诗贵, 张景涿 (2008) 贵州省清水河风景自然保护区两栖动物调查. 贵阳学院学报(自然科学版), 3(4), 6–8.]
- Yang WK, Zhong WQ, Gao XY (2000) A review of studies on avian habitat selection. *Arid Zone Research*, 17(3), 71–78. (in Chinese with English abstract) [杨维康, 钟文勤, 高行宜 (2000) 鸟类栖息地选择研究进展. 干旱区研究, 17(3), 71–78.]
- Yao ZM, Qin LJ, Tan CJ, Deng HQ (2018) Research on amphibians' species in Maolan National Nature Reserve, Guizhou. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 36(2), 33–38. (in Chinese with English abstract) [姚正明, 覃龙江, 谭成江, 邓怀庆 (2018) 茂兰国家级自然保护区两栖类物种多样性研究. 贵州师范大学学报(自然科学版), 36(2), 33–38.]
- Yuan DX (2003) Geological environment and hydroecological problems in karst area. *Southern Land Resources*, (1), 22–25. (in Chinese) [袁道先 (2003) 岩溶地区的地质环境和水文生态问题. 南方国土资源, (1), 22–25.]
- Yuan DX (2001) World correlation of karst ecosystem: Objectives and implementation plan. *Advances in Earth Science*, 16, 461–466. (in Chinese with English abstract) [袁道先 (2001) 全球岩溶生态系统对比: 科学目标和执行计划. 地球科学进展, 16, 461–466.]
- Zhang YH, Gong DJ, Yan L, Tian G (2012) Study on amphibious reptiles in Taiyang Mountain of Congjiang County in

Guizhou Province. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 40, 194–195. (in Chinese with English abstract) [张永宏, 龚大洁, 闫礼, 田果 (2012) 贵州省从江县太阳山两栖爬行动物研究. 安徽农业科学, 40, 194–195.]
Zhou SC, Meng GT, Yin YX, Yang J, Yu HW, Ren MF, Liu H (2016) Effect of habitat characteristics on the reproductive effort of dybowsky's frogs (*Rana Dybowskii*) in eastern

Wanda Mountains, Heilongjiang Province. Acta Ecologica Sinica, 36, 2521–2527. (in Chinese with English abstract) [周绍春, 孟根同, 尹远新, 杨娇, 于洪伟, 任梦飞, 刘浩 (2016) 完达山东部林区生境特征对东北林蛙产卵的影响. 生态学报, 36, 2521–2527.]

(责任编辑: 江建平 责任编辑: 黄祥忠)

附录 Supplementary Material

附录1 毕节市撒拉溪石漠化综合治理示范区各样方调查时间及物种数

Appendix 1 Investigation time and species number of quadrat in Bijie Salaxi rocky desertification comprehensive control area
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2019351-1.pdf>

附录2 毕节市撒拉溪石漠化综合治理示范区两栖动物名录

Appendix 2 List of amphibian species in Bijie Salaxi rocky desertification comprehensive control area
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2019351-2.pdf>

附录3 毕节市撒拉溪石漠化综合治理示范区15种生境的主要环境特征

Appendix 3 Main environmental characteristics of various habitats in Bijie Salaxi rocky desertification comprehensive control area
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2019351-3.pdf>

附录4 毕节市撒拉溪石漠化综合治理示范区不同种类两栖动物在各样方中栖息的生境类型

Appendix 4 The type of habitat in which different kinds of amphibians inhabit in Bijie Salaxi rocky desertification comprehensive control area
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2019351-4.pdf>

附录1 毕节市撒拉溪石漠化综合治理示范区各样方调查时间及物种数

Appendix 1 Investigation time and species number of quadrat in Bijie Salaxi rocky desertification comprehensive control area

样方 Quadrat	调查时间 Survey time	物种 Species	个体数 Individual number
C1	2018.9.03	沼水蛙 <i>Hylarana guentheri</i>	2
		中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>	1
C2	2018.9.06	贵州疣螈 <i>Tylototriton kweichowensis</i>	3
D5	2019.4.18	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>	1
C5	2019.4.18	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>	2
A2	2019.4.19	华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>	6
		中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>	1
		贵州疣螈 <i>Tylototriton kweichowensis</i>	1
A3	2019.4.20	昭觉林蛙 <i>Rana chaochiaoensis</i>	3
		昭觉林蛙 <i>Rana chaochiaoensis</i>	114
		贵州疣螈 <i>Tylototriton kweichowensis</i>	2
		云南小狭口蛙 <i>Glyphoglossus yunnanensis</i>	36
B4	2019.4.29	红点齿蟾 <i>Oreolalax rhodostigmatus</i>	32
		华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>	5
		粗皮姬蛙 <i>Microhyla butleri</i>	2
		贵州疣螈 <i>Tylototriton kweichowensis</i>	48
		云南小狭口蛙 <i>Glyphoglossus yunnanensis</i>	1,365
		昭觉林蛙 <i>Rana chaochiaoensis</i>	7
C3	2019.4.30	威宁蛙 <i>Rana weiningensis</i>	2
		中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>	3
C4	2019.5.02	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>	3
E3	2019.5.03	贵州疣螈 <i>Tylototriton kweichowensis</i>	3
B5	2019.5.04	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>	2
		云南小狭口蛙 <i>Glyphoglossus yunnanensis</i>	1,044
		贵州疣螈 <i>Tylototriton kweichowensis</i>	43
		华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>	13
		昭觉林蛙 <i>Rana chaochiaoensis</i>	1
		粗皮姬蛙 <i>Microhyla butleri</i>	12
E4	2019.6.08	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>	5
		云南小狭口蛙 <i>Glyphoglossus yunnanensis</i>	3
D6	2019.6.08	–	–
B6	2019.6.08	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>	44
		贵州疣螈 <i>Tylototriton kweichowensis</i>	12
		粗皮姬蛙 <i>Microhyla butleri</i>	3
A4	2019.6.09	红点齿蟾 <i>Oreolalax rhodostigmatus</i>	101
		中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>	13
		华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>	10
		云南小狭口蛙 <i>Glyphoglossus yunnanensis</i>	11
		贵州疣螈 <i>Tylototriton kweichowensis</i>	2
		昭觉林蛙 <i>Rana chaochiaoensis</i>	78
		筠连臭蛙 <i>Odorrana junlianensis</i>	1
A5	2019.6.09	贵州疣螈 <i>Tylototriton kweichowensis</i>	17
		中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>	10
		华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>	14
		云南小狭口蛙 <i>Glyphoglossus yunnanensis</i>	69
		昭觉林蛙 <i>Rana chaochiaoensis</i>	30
A6	2019.6.09	红点齿蟾 <i>Oreolalax rhodostigmatus</i>	16
		中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>	5

样方 Quadrat	调查时间 Survey time	物种 Species	个体数 Individual number
		华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>	20
		云南小狭口蛙 <i>Glyphoglossus yunnanensis</i>	158
		昭觉林蛙 <i>Rana chaochiaensis</i>	2
		红点齿蟾 <i>Oreolalax rhodostigmatus</i>	22
		贵州疣螈 <i>Tylototriton kweichowensis</i>	1
E5	2019.6.10	–	–
C6	2019.6.10	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>	2
B2	2019.6.11	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>	6
		贵州疣螈 <i>Tylototriton kweichowensis</i>	61
		粗皮姬蛙 <i>Microhyla butleri</i>	2
E6	2019.6.11	–	–
B3	2019.6.12	沼水蛙 <i>Hylarana guentheri</i>	4
		中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>	15
		云南小狭口蛙 <i>Glyphoglossus yunnanensis</i>	1,594
		华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>	9
		贵州疣螈 <i>Tylototriton kweichowensis</i>	49
A1	2019.7.13	昭觉林蛙 <i>Rana chaochiaensis</i>	88
		中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>	38
		沼水蛙 <i>Hylarana guentheri</i>	2
		华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>	21
		云南小狭口蛙 <i>Glyphoglossus yunnanensis</i>	73
		贵州疣螈 <i>Tylototriton kweichowensis</i>	249
D1	2019.7.13	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>	2
B1	2019.7.13	贵州疣螈 <i>Tylototriton kweichowensis</i>	11
		华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>	35
		中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>	6
		威宁蛙 <i>Rana weiningensis</i>	3
D2	2019.7.14	贵州疣螈 <i>Tylototriton kweichowensis</i>	9
E2	2019.7.16	–	–
E1	2019.7.16	–	–
D3	2019.7.16	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>	8
D4	2019.7.16	–	–

A: 无石漠化; B: 潜在石漠化; C: 轻度石漠化; D: 中度石漠化; E: 强度石漠化。

A, No rocky desertification; B, Potential rocky desertification; C, Mild rocky desertification; D, Moderate rocky desertification; E, Intense rocky desertification.

附录2 毕节市撒拉溪石漠化综合治理示范区两栖动物名录

Appendix 2 List of amphibian species in Bijie Salaxi rocky desertification comprehensive control area

物种 Species	区系 Fauna	生态类型 Ecotype	濒危等级 Endangered category
I 有尾目 Caudata			
一 蝾螈科 Salamandridae			
1 贵州疣螈 <i>Tylotriton kweichowensis</i> *	东洋界华中–西南区 Oriental realm Central–Southwest China	陆栖静水型 Terrestrial quiet water type	易危 Vulnerable
II 无尾目 Anura			
二 角蟾科 Megophryidae			
2 红点齿蟾 <i>Oreolalax rhodostigmatus</i>	东洋界华中–西南区 Oriental realm Central–Southwest China	陆栖流水型 Terrestrial river type	易危 Vulnerable
三 蟾蜍科 Bufonidae			
3 中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>	古北界、东洋界广布种 Widely distributed in Palaearctic realm and Oriental realm	陆栖静水型 Terrestrial quiet water type	无危 Least Concern
四 雨蛙科 Hylidae			
4 华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>	东洋界华南–西南区 Oriental realm South–Southwest China	树栖型 Arboreal type	无危 Least Concern
五 姬蛙科 Microhylidae			
5 云南小狭口蛙 <i>Glyphoglossus yunnanensis</i>	东洋界华中–西南区 Oriental realm Central–Southwest China	陆栖静水型 Terrestrial quiet water type	无危 Least Concern
6 粗皮姬蛙 <i>Microhyla butleri</i>	东洋界华中–华南–西南区 Oriental realm Central–South–Southwest China	陆栖静水型 Terrestrial quiet water type	无危 Least Concern
六 蛙科 Ranidae			
7 沼水蛙 <i>Hylarana guentheri</i>	东洋界华中–华南–西南区 Oriental realm Central–South–Southwest China	陆栖静水型 Terrestrial quiet water type	无危 Least Concern
8 筠连臭蛙 <i>Odorrana junlianensis</i>	东洋界华中–西南区 Oriental realm Central–Southwest China	陆栖流水型 Terrestrial river type	易危 Vulnerable
9 昭觉林蛙 <i>Rana chaochiaoensis</i>	东洋界华中–华南–西南区 Oriental realm Central–South–Southwest China	陆栖静水型 Terrestrial quiet water type	无危 Least Concern
10 威宁蛙 <i>Rana weiningensis</i>	东洋界西南区 Oriental realm Southwest China	陆栖流水型 Terrestrial river type	易危 Vulnerable

*: 国家二级保护动物。物种名称根据《中国动物志: 两栖纲》(费梁等, 2006, 2009a, b)和中国两栖类数据库进行统计, 濒危等级来源于国内学者评估(江建平等, 2016)和世界自然保护联盟濒危物种红色名录(<https://www.iucnredlist.org/>)。

*, Animals under second class state protection in China. The name of each species was according to Fauna Sinica: Amphibia (Fei *et al*, 2006, 2009a, b) and Amphibia China. The level of endangered species was evaluated by domestic scholars (Jiang et al, 2016) and The IUCN Red List of Threatened Species (<https://www.iucnredlist.org/>).

参考文献

- Fei L, Hu SQ, Ye CY, Huang YZ (2006) Fauna Sinica · Amphibia (Vol. 1): General Accounts of Amphibia, Gymnophiona and Urodela. Science Press, Beijing. (in Chinese) [费梁, 胡淑琴, 叶昌媛, 黄永昭 (2006) 中国动物志·两栖纲(第一卷): 总论, 蚓螈目, 有尾目. 科学出版社, 北京.]
- Fei L, Hu SQ, Ye CY, Huang YZ (2009a) Fauna Sinica · Amphibia (Vol. 2): Anura. Science Press, Beijing. (in Chinese) [费梁, 胡淑琴, 叶昌媛, 黄永昭 (2009a) 中国动物志·两栖纲(第二卷): 无尾目. 科学出版社, 北京.]
- Fei L, Hu SQ, Ye CY, Huang YZ (2009b) Fauna Sinica · Amphibia (Vol. 3): Anura, Ranidae. Science Press, Beijing. (in Chinese) [费梁, 胡淑琴, 叶昌媛, 黄永昭 (2009b) 中国动物志: 两栖纲(第三卷): 无尾目, 蛙科. 科学出版社, 北京.]
- Jiang JP, Xie F, Zang CX, Cai L, Li C, Wang B, Li JT, Wang J, Hu JH, Wang Y, Liu JY (2016) Assessing the threat status of amphibians in China. Biodiversity Science, 24, 588–597. (in Chinese with English abstract) [江建平, 谢锋, 臧春鑫, 蔡蕾, 李成, 王斌, 李家堂, 王杰, 胡军华, 王燕, 刘炯宇 (2016) 中国两栖动物受威胁现状评估. 生物多样性, 24, 588–597.]

附录3 毕节市撒拉溪石漠化综合治理示范区15种生境的主要环境特征

Appendix 3 Main environmental characteristics of various habitats in Bijie Salaxi rocky desertification comprehensive control area

生境 Habitat	特征 Characteristic
人工林	通过人工种植形成的森林, 主要物种为云南松(<i>Pinus yunnanensis</i>)、柳杉(<i>Cryptomeria fortunei</i>)。
灌丛	以灌木占优势的植被类型, 建群种多为中生、簇生的灌木生活型, 优势种主要有火棘(<i>Pyracantha fortuneana</i>)、西南栒子(<i>Cotoneaster franchetii</i>)、川莓(<i>Rubus setchuensis</i>)、西南悬钩子(<i>Rubus assamensis</i>)、缙丝花(<i>Rosa roxburghii</i>)、硕苞蔷薇(<i>Rosa bracteata</i>)、贵州金丝桃(<i>Hypericum kouytchense</i>)等。
草地	主要生长草本植物, 或兼有灌丛或稀疏树木, 优势种主要有白车轴(<i>Trifolium repens</i>)、毛茛(<i>Ranunculus japonicus</i>)、蒲公英(<i>Taraxacum mongolicum</i>)、马兰(<i>Kalimeris indica</i>)、长梗通泉草(<i>Mazus longipes</i>)、尼泊尔酸模(<i>Rumex nepalensis</i>)、牛蒡(<i>Arctium lappa</i>)等。
沼泽湿地	地表经常或长期处于湿润状态, 生长湿地生物的地区, 优势种主要有莎草(<i>Cyperus rotundus</i>)、腺药珍珠菜(<i>Lysimachia stenosepala</i>)、矮桃(<i>Lysimachia clethroides</i>)、泽泻(<i>Alisma plantago-aquatica</i>)、齿果酸模(<i>Rumex dentatus</i>)、水蓼(<i>Polygonum hydropiper</i>)、水金凤(<i>Impatiens noli-tangere</i>)等。
溪流	自然山涧中的一种水流形式, 林地中水源充足地区常会形成小股水流顺石质裸地或沿细小沟谷流淌。
天然湖泊	低洼地带聚水形成的有一定水域面积的水体, 一般较小、水体较浅, 湖泊底部一般有水生植物生长, 主要物种有灯芯草(<i>Juncus effusus</i>)、车前草(<i>Plantago asiatica</i>)、香蒲(<i>Typha orientalis</i>)等。
人工池塘	人工开挖的蓄水坑塘, 一般水体较深, 水质较浑浊, 池塘内鲜有植物生长。
临时水域	道路边缘的基坑、灌木林地与草地低洼地带等, 在连续阴雨天气会形成暂时性积水, 一旦水源补给消失, 会因蒸发、渗漏等原因而干涸。
石缝	石灰岩经过自然作用如地质活动、流水侵蚀等形成大小长短不一的裂隙, 或人为干扰如修房筑路对岩壁进行破拆, 岩壁崩塌, 石块堆积形成石缝, 有些岩壁会有细小水流渗出, 周围会生长苔藓地衣等先锋植物, 形成潮湿隐蔽的小生境。
水洞	环境湿润的溶洞, 有的洞中会有水流流经, 或存在积水和洞穴滴水。
旱洞	抬升至地下水面以上的溶洞, 且无洞穴滴水, 洞中环境干旱。
耕地	主要经济作物为土豆(<i>Solanum tuberosum</i>)、玉米(<i>Zea mays</i>)、荞麦(<i>Fagopyrum esculentum</i>)等。
撂荒地	经耕种肥力下降, 荒废了的土地, 以菊科植物为主, 主要有艾蒿(<i>Artemisia argyi</i>)、佩兰(<i>Eupatorium fortunei</i>)、旋覆花(<i>Inula japonica</i>)、千里光(<i>Senecio scandens</i>)、天名精(<i>Carpesium abrotanoides</i>)等。
道路	大多数道路已进行路面硬化处理, 少数小路为石子路或泥土路。
房舍	村民聚居生活的地方。

附录4 毕节市撒拉溪石漠化综合治理示范区不同种类两栖动物在各样方中栖息的生境类型

Appendix 4 The type of habitat in which different kinds of amphibians inhabit in Bijie Salaxi rocky desertification comprehensive control area

样方 Quadrat	生境 Habitat	物种 Species
A1	人工林 Man-made forest	昭觉林蛙 <i>Rana chaochiaoensis</i>
	草地 Grassland	昭觉林蛙 <i>Rana chaochiaoensis</i>
	天然湖泊 Natural lake	贵州疣螈 <i>Tylotriton kweichowensis</i>
		昭觉林蛙 <i>Rana chaochiaoensis</i>
		华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>
	人工池塘 Artificial pond	云南小狭口蛙 <i>Glyphoglossus yunnanensis</i>
		昭觉林蛙 <i>Rana chaochiaoensis</i>
		云南小狭口蛙 <i>Glyphoglossus yunnanensis</i>
	临时水域 Temporary waters	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>
		沼水蛙 <i>Hylarana guentheri</i>
华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>		
中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>		
A2	草地 Grassland	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>
	人工池塘 Artificial pond	华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>
	临时水域 Temporary waters	贵州疣螈 <i>Tylotriton kweichowensis</i>
A3	石缝 Crack in a rock	昭觉林蛙 <i>Rana chaochiaoensis</i>
	沼泽湿地 Marsh wetland	昭觉林蛙 <i>Rana chaochiaoensis</i>
	天然湖泊 Natural lake	云南小狭口蛙 <i>Glyphoglossus yunnanensis</i>
		云南小狭口蛙 <i>Glyphoglossus yunnanensis</i>
	人工池塘 Artificial pond	贵州疣螈 <i>Tylotriton kweichowensis</i>
	临时水域 Temporary waters	昭觉林蛙 <i>Rana chaochiaoensis</i>
	水洞 Water cave	红点齿蟾 <i>Oreolalax rhodostigmatus</i>
房舍 Building	云南小狭口蛙 <i>Glyphoglossus yunnanensis</i>	
A4	人工林 Man-made forest	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>
	灌丛 Shrub	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>
	溪流 Stream	华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>
	沼泽湿地 Marsh wetland	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>
		贵州疣螈 <i>Tylotriton kweichowensis</i>
		红点齿蟾 <i>Oreolalax rhodostigmatus</i>
	天然湖泊 Natural lake	华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>
		昭觉林蛙 <i>Rana chaochiaoensis</i>
		筠连臭蛙 <i>Odorrana junlianensis</i>
	人工池塘 Artificial pond	昭觉林蛙 <i>Rana chaochiaoensis</i>
	临时水域 Temporary waters	昭觉林蛙 <i>Rana chaochiaoensis</i>
	水洞 Water cave	红点齿蟾 <i>Oreolalax rhodostigmatus</i>
	房舍 Building	云南小狭口蛙 <i>Glyphoglossus yunnanensis</i>
A5	灌丛 Shrub	昭觉林蛙 <i>Rana chaochiaoensis</i>
	草地 Grassland	华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>
	沼泽湿地 Marsh wetland	昭觉林蛙 <i>Rana chaochiaoensis</i>
		红点齿蟾 <i>Oreolalax rhodostigmatus</i>
		华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>
	溪流 Stream	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>
	天然湖泊 Natural lake	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>
		贵州疣螈 <i>Tylotriton kweichowensis</i>
人工池塘 Artificial pond	昭觉林蛙 <i>Rana chaochiaoensis</i>	
	贵州疣螈 <i>Tylotriton kweichowensis</i>	
	华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>	

样方 Quadrat	生境 Habitat	物种 Species
A6	临时水域 Temporary waters	云南小狭口蛙 <i>Glyphoglossus yunnanensis</i>
	道路 Road	贵州疣螈 <i>Tylototriton kweichowensis</i>
	草地 Grassland	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>
	沼泽湿地 Marsh wetland	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>
	临时水域 Temporary waters	贵州疣螈 <i>Tylototriton kweichowensis</i>
		华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>
		昭觉林蛙 <i>Rana chaochiaoensis</i>
		华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>
	石缝 Crack in a rock	云南小狭口蛙 <i>Glyphoglossus yunnanensis</i>
		昭觉林蛙 <i>Rana chaochiaoensis</i>
B1	水洞 Water cave	红点齿蟾 <i>Oreolalax rhodostigmatus</i>
	灌丛 Shrub	红点齿蟾 <i>Oreolalax rhodostigmatus</i>
	草地 Grassland	威宁蛙 <i>Rana weiningensis</i>
		中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>
		贵州疣螈 <i>Tylototriton kweichowensis</i>
		华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>
	临时水域 Temporary waters	华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>
	耕地 Arable land	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>
	撂荒地 Black fallow	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>
	草地 Grassland	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>
B2	人工池塘 Artificial pond	粗皮姬蛙 <i>Microhyla butleri</i>
	临时水域 Temporary waters	贵州疣螈 <i>Tylototriton kweichowensis</i>
	耕地 Arable land	贵州疣螈 <i>Tylototriton kweichowensis</i>
	天然湖泊 Natural lake	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>
		沼水蛙 <i>Hylarana guentheri</i>
		贵州疣螈 <i>Tylototriton kweichowensis</i>
	人工池塘 Artificial pond	云南小狭口蛙 <i>Glyphoglossus yunnanensis</i>
	临时水域 Temporary waters	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>
	撂荒地 Black fallow	云南小狭口蛙 <i>Glyphoglossus yunnanensis</i>
	道路 Road	华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>
B3	房舍 Building	云南小狭口蛙 <i>Glyphoglossus yunnanensis</i>
	草地 Grassland	华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>
		威宁蛙 <i>Rana weiningensis</i>
	人工池塘 Artificial pond	贵州疣螈 <i>Tylototriton kweichowensis</i>
		华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>
	临时水域 Temporary waters	云南小狭口蛙 <i>Glyphoglossus yunnanensis</i>
		昭觉林蛙 <i>Rana chaochiaoensis</i>
		粗皮姬蛙 <i>Microhyla butleri</i>
	耕地 Arable land	云南小狭口蛙 <i>Glyphoglossus yunnanensis</i>
	房舍 Building	华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>
B4	草地 Grassland	华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>
	人工池塘 Artificial pond	贵州疣螈 <i>Tylototriton kweichowensis</i>
		华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>
	临时水域 Temporary waters	云南小狭口蛙 <i>Glyphoglossus yunnanensis</i>
		昭觉林蛙 <i>Rana chaochiaoensis</i>
		粗皮姬蛙 <i>Microhyla butleri</i>
	耕地 Arable land	云南小狭口蛙 <i>Glyphoglossus yunnanensis</i>
	房舍 Building	华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>
	草地 Grassland	华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>
	人工池塘 Artificial pond	贵州疣螈 <i>Tylototriton kweichowensis</i>
B5		昭觉林蛙 <i>Rana chaochiaoensis</i>
	临时水域 Temporary waters	云南小狭口蛙 <i>Glyphoglossus yunnanensis</i>
		中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>
		华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>
		云南小狭口蛙 <i>Glyphoglossus yunnanensis</i>
		粗皮姬蛙 <i>Microhyla butleri</i>

样方 Quadrat	生境 Habitat	物种 Species
B6	水洞 Water cave	贵州疣螈 <i>Tylototriton kweichowensis</i>
	道路 Road	华西雨蛙 <i>Hyla annectans</i>
	人工池塘 Artificial pond	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>
C1	临时水域 Temporary waters	贵州疣螈 <i>Tylototriton kweichowensis</i>
	草地 Grassland	粗皮姬蛙 <i>Microhyla butleri</i>
	道路 Road	沼水蛙 <i>Hylarana guentheri</i>
C2	道路 Road	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>
C3	临时水域 Temporary waters	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>
C4	草地 Grassland	贵州疣螈 <i>Tylototriton kweichowensis</i>
C5	道路 Road	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>
C6	道路 Road	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>
D1	临时水域 Temporary waters	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>
D2	道路 Road	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>
D3	临时水域 Temporary waters	贵州疣螈 <i>Tylototriton kweichowensis</i>
D4	人工池塘 Artificial pond	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>
D5	–	–
D6	房舍 Building	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>
E1	–	–
E2	–	–
E3	旱洞 Dry cave	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>
E4	旱洞 Dry cave	云南小狭口蛙 <i>Glyphoglossus yunnanensis</i>
E5	–	–
E6	–	–

A: 无石漠化; B: 潜在石漠化; C: 轻度石漠化; D: 中度石漠化; E: 强度石漠化。

A, No rocky desertification; B, Potential rocky desertification; C, Mild rocky desertification; D, Moderate rocky desertification; E, Intense rocky desertification.



•研究报告•

垂叶榕榕小蜂群落及种间互作网络季节动态

董乙义^{1,2} 彭艳琼¹ 王波^{1*}

1 (中国科学院西双版纳热带植物园热带森林生态学重点实验室, 云南勐腊 666303)

2 (中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 群落中的物种相互作用构成了复杂的生态网络。有关物种的数量和组成的季节性动态变化已有较多的研究, 但是对于生态网络的动态变化知之甚少。揭示生态网络的动态变化对于理解群落的稳定性以及群落的动态变化过程和机理具有重要意义。本研究以垂叶榕(*Ficus benjamina*)榕小蜂群落为研究对象, 分别在西双版纳的干季和雨季采集了榕小蜂的种类和数量信息。比较了两个季节榕小蜂群落的动态变化以及共存网络的参数(例如网路直径、连接数、嵌套性和群落矩阵温度)变化。结果显示: 雨季榕果内传粉榕小蜂*Eupristina koningsbergeri*所占比例高于干季, 传粉榕小蜂的种群数量也高于干季, 而在干季非传粉榕小蜂的种类增加(干季15种小蜂, 雨季14种)。从榕树-传粉榕小蜂互利共生系统的适合度来看, 干季非传粉小蜂的增加对传粉榕小蜂和榕树的适合度是不利的。在干季, 共存网络物种间的连接数(干季0.95, 雨季0.47)多于雨季, 群落矩阵温度(干季23.24, 雨季2.64)也显著高于雨季。表明干季榕小蜂群落组成及种间关系较雨季更为复杂而多样, 高的矩阵温度暗示群落受到的干扰更大。

关键词: 榕树-榕小蜂; 昆虫群落; 生态网络; 季节动态; 种间互作

Seasonal dynamics of fig wasp community and interaction networks in *Ficus benjamina*

Yiyi Dong^{1,2}, Yanqiong Peng¹, Bo Wang^{1*}

1 Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla, Yunnan 666303

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: Species form complex interactive networks within communities, which often experience seasonal species oscillations or species composition shifts. However, the variation that occurs within such networks is poorly understood. Studying seasonal changes of ecological networks may reveal the mechanisms that maintain the stability of a community. In this study, we collected fig wasps from *Ficus benjamina* during the dry and rainy seasons in Xishuangbanna to understand how fig wasp communities may shift seasonally. We compared fig wasp abundance, species composition, and metrics of coexistence networks (e.g. network diameter, connectance, nestedness, and community temperature) between the rainy season and the dry season. The pollinating wasp, *Eupristina koningsbergeri* was the most abundant species in both rainy season and dry season. There were more non-pollinating fig wasp species during the dry season (15 fig wasp species) than the rainy season (14 fig wasp species). A higher number of non-pollinating fig wasps can be detrimental to fig-pollinator wasp mutualisms because they reduce both fig seed production and pollinator abundance. Additionally, the dry season experiences higher species connectivity (0.95 in dry season, 0.47 in rainy season), higher network temperature (23.24 in dry season, 2.64 in rainy season) than the rainy season, which indicate more complex inter-specific interactions, and a higher level of disturbance of fig wasp community in the dry season.

Key words: fig-fig wasp; insect community; ecological network; seasonal variation; species interaction

群落中共存的物种形成了互相作用的复杂网络, 这样的互作网络反映了生态系统的作用过程,

收稿日期: 2019-09-19; 接受日期: 2020-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(31570418; 31770463)、云南省基金(2016FB050)和中国科学院“一三五”规划(2017XTBG-T01)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: wangbo@xtbg.ac.cn

是生态系统产出和服务的基础(Hagen et al, 2012)。互利共生网络(mutualistic networks)和对抗网络(antagonistic networks)是两种主要的生态网络类型(Olesen, et al, 2012)。对抗网络包括传统的食物网和宿主-寄生者网络(Henri & Veen, 2011; Jacob et al, 2011); 互利共生网络包括植物-访花者(传粉者)网络(Memmott, 1999)、植物种子散布者网络(Donatti et al, 2011; Schleuning et al, 2011)和寄主-共生者网络(Guimarães et al, 2007)。这些类型代表了目前生态网络研究的主要对象。

网络的基本组成是节点(node)和连接(link)。在生态网络中, 节点可能是生物个体、物种、种群、种团、功能团或整个群落(Hagen et al, 2012)。网络结构的常见测量指标包括物种和连接数以及连接的分布(见Box 1), 其中一些测量指标与网络的复杂度、稳定性和资源分类具有某种联系(Williams & Martinez, 2000; Berlow et al, 2009)。网络同时表现出一些可辨别的亚结构模式, 通常表现为分形状模式(fractal-like manner) (Olesen et al, 2007; Stouffer & Bascompte, 2010)。例如, 食物网可以被分解成食物链, 三级营养关系最终分解成成对的种间互作关系

(Woodward et al, 2012)。嵌套性和模块性是两个得到了较多关注的网络结构测度(Lewinsohn et al, 2006; Olesen et al, 2007)。在一个嵌套的网络中, 特化物种间的连接是泛化物种间连接的子集(Bascompte et al, 2003)。模块性描述了物种的子集, 其内部具有高的连接数, 但是与其他子集之间连接较少(Olesen et al, 2007)。嵌套性和模块性常常被认为是互相排斥的(Lewinsohn et al, 2005), 但是也存在反例(Olesen et al, 2007; Fortuna et al, 2010)。

物种的丰富度、物种组成以及多样性随时间的变化是一个自然过程, 决定着种间互作网络的基本特征(节点、连接数量、嵌套性和模块性等) (Krishna, et al, 2008)。伴随着群落中物种种群大小的季节性改变, 一些物种之间的连接断裂, 而与另一些物种形成新连接。任何明显的时空干扰都可能传递到物种互作网络, 导致更进一步的物种种群大小和种间连接的改变(Santos et al, 2014)。利用网络对群落进行分析, 能为理解一个群落中物种间互作关系的动态变化和解释生态系统对干扰的响应提供新的视角。

榕树是热带雨林中的关键类群。每种榕树都有专性的传粉榕小蜂为其传粉, 同时也为多种非传粉

Box 1 网络分析术语

节点(node): 网络中的节点, 可以是物种、种群、种团、功能团等。

边(edge): 连接两个节点的连线, 暗示节点间存在联系。

网络大小(size): 网络中节点的数量。

连接数/度(connectance): 是网络中物种之间实际连接数之和占总的可能连接数的比例, 取值范围在0-1, 数值越大表明网络中节点之间的连接性越大。

连接的分布: 节点连接数的分布, 常表现出幂律分布。

直径(diameter): 计算网络中任意两个节点之间的最短距离, 其中的最大值称为网络的直径。

平均路径长度(average path length): 网络中任意两个节点之间的距离的平均值。

加权嵌套性(weighted nestedness metric based on overlap and decreasing fill, WNODF): 考虑了互作频率的嵌套性指标。取值为0-1, 0表示完全混乱, 1表示完全嵌套。

模块性(modularity): 是关于网络节点分区(或节点类型)的指标, 测量了分区(节点类型)的好坏程度或者不同的节点类型彼此之间的分离程度。

全局聚类系数(global clustering coefficient): 是反映网络中节点紧密关系的参数, 也称为传递性, 表征了整个网络的平均“成簇性质”。节点*i*的聚类系数为节点*i*的邻接点之间实际存在的边数与所有可能的边数的比值。网络的全局聚类系数为所有节点的聚类系数的均值。

群落矩阵温度(temperature, *T*): 实际观测的群落分布结构与完全嵌套结构的群落分布的偏离程度, 用于表征群落的无序性。*T*值的大小表示实际观测的群落分布结构与完全嵌套结构的群落分布的偏离程度: $T = 0$, 则是完全嵌套; $T = 100$, 则是完全随机无序。一个群落的温度越低, 表示群落越稳定。较高的温度代表群落受到的干扰较大。

榕小蜂提供了生长、发育的场所。这些非传粉榕小蜂是包括造瘿者(能将卵产在子房中致使子房膨大变为瘿花)、寄居者(将卵产于其他造瘿者产卵的瘿花子房内)和复寄生者(能将卵产于其他小蜂体内)在内的多种榕小蜂,它们属于不同的营养级(Herre, 1999; Kerdelhué et al, 2000)。因此,一个榕小蜂群落是包括了多种榕小蜂以及多营养级的复杂而相对独立的群落,是研究昆虫种间互作网络的理想模型。气候变化可能会打破榕树-榕小蜂的互利共生关系,甚至导致传粉榕小蜂灭绝,进而影响到其他营养级水平的物种组成(Jevanandam et al, 2013)。

本研究调查了西双版纳勐仑地区垂叶榕(*Ficus benjamina*)上榕小蜂群落的组成,比较了垂叶榕榕小蜂群落物种丰富度及共存网络的季节动态变化,讨论了群落的物种丰富度和共存网络结构之间的关联。通过对上述数据的分析试图回答:(1)榕小蜂群落物种组成和丰富度存在怎样的季节动态变化?(2)榕小蜂共存网络(嵌套性和连接数)是否存在明显的季节变化?(3)物种的丰富度和网络结构之间具有怎样的关联?

1 材料与方法

1.1 样点概况

研究样地位于云南省西双版纳傣族自治州(约21°08′-22°35′ N, 99°56′-101°50′ E)。该地区属于热带季风型气候,全年的气温相对稳定,年平均气温为21.8℃,一年中降水量变化显著,根据降水量、温度和湿度的变化可把一年分为雨季(6-10月)和干季(11月至翌年5月)(张克映, 1963)。来自云南西双版纳森林生态系统国家野外科学观测研究站(<http://bnf.cern.ac.cn/>)的数据显示:2002-2018年间,雨季的降水量为 7.19 ± 2.81 mm,温度为 25.37 ± 1.08 ℃,湿度为 $82.08 \pm 4.37\%$,干季的降水量为 3.97 ± 5.10 mm,温度为 20.69 ± 3.14 ℃,湿度为 $75.73 \pm 8.46\%$ (均值±标准差)。

1.2 垂叶榕及其榕小蜂群落

垂叶榕隶属于桑科榕属,雌雄同株。榕果对生或单生叶腋,成熟时呈黄色或红色。综合文献报道,垂叶榕上的榕小蜂隶属于膜翅目小蜂总科中4科8属18种,单批次果出蜂种类最多为14种。群落中小蜂种类信息及营养级水平见附录1(白莉芬等, 2006; 王振吉, 2010)。

1.3 样品采集

2018年,我们在雨季和干季收集了西双版纳傣族自治州勐仑地区的垂叶榕榕小蜂。每个季节在至少3株榕树上收集榕果,每棵树上采集30个雄花期的榕果(果壁变软、颜色发黄)带回实验室。将单个榕果沿纵轴剖开,置于120目的纱网袋中。待小蜂羽化进入袋内后,收集所有小蜂,保存于盛有无水乙醇的样品瓶中。2002年垂叶榕榕小蜂群落数据来自白莉芬等(2006)的采样,采样季节、方法及小蜂分类、计数流程与本实验相同。

1.4 榕小蜂的群落调查

使用体视显微镜(江南JSZSB-HG785940)对每个榕果内的榕小蜂进行分类、鉴定并统计数量(白莉芬等, 2006; 王仲敏等, 2010)。

1.5 数据分析

1.5.1 不同季节垂叶榕榕小蜂群落物种组成及丰富度比较

整合了白莉芬等于2002年对垂叶榕榕小蜂群落的调查结果,其中90个榕果数据来自本次采样,30个榕果数据来自白莉芬等(2006)。计算垂叶榕榕小蜂在干季和雨季各物种的比例。采用相似性分析(analysis of similarity, ANOSIM)检验垂叶榕榕小蜂群落物种在不同季节物种的组成是否具有显著差异。ANOSIM分析使用了非参数的置换检验(permutation),其过程是基于一个相似性矩阵检验组间差异的显著性比较。此处,群落间相似性矩阵采用Bray-Curtis距离进行了999次置换检验(Clarke, 1993)。

1.5.2 不同季节榕小蜂共存网络的比较

榕小蜂共存网络分析可以图形化显示榕小蜂的种间共存关系。首先将榕小蜂群落数据转换成0/1矩阵(“0”表示物种不存在,“1”表示物种存在),进一步将0/1矩阵转换成二分网络,最后通过R语言igraph包获得榕小蜂物种间的邻接矩阵并绘制网络图。网络中每个节点的颜色表示营养级水平,每条边(edge)的权重(weight)代表了物种间的连接频率。同时比较了两个季节的网络大小(size)、全局聚类系数、连接性(Wasserman & Faust, 1995)、矩阵温度(T) (Atmar & Patterson, 1993; Almeida-Neto et al, 2007)以及加权嵌套性(weight nestedness metric based on overlap and decreasing fill, WNODF)。

采用R 3.5.2 (R Development Core Team, 2018)

表1 西双版纳地区垂叶榕榕小蜂物种丰富度(均值 ± 标准差, $N = 120$)。其中90个榕果数据来自本次采样, 30个榕果数据来自白莉芬等(2006)。

Table 1 Species abundance and composition of fig wasps in *Ficus benjamina* in Xishuangbanna (mean ± SD, $N = 120$). Of the 120 figs, 90 were from our study, the other 30 were from Bai (2006).

榕小蜂 Fig wasp	可能的营养级水平 Presumable trophic level	干季 Dry season		雨季 Rainy season	
		丰富度 Richness	百分比 %	丰富度 Richness	百分比 %
<i>Eupristina koningsbergeri</i>	传粉者 Pollinator	129.01 ± 83.22	72.24	308.39 ± 183.62	93.18
<i>Acophila</i> sp. 1	造瘿者 Galler	0.32 ± 1.17	0.18	0.09 ± 0.44	0.03
<i>Ormyrus</i> sp. 1	寄生者 Parasitoid	0.46 ± 1.54	0.26	0.01 ± 0.09	< 0.01
<i>Philotrypesis</i> sp. 1	寄生者 Parasitoid	6.14 ± 10.40	3.44	17.95 ± 25.62	5.42
<i>Philotrypesis</i> sp. 2	寄生者 Parasitoid	1.37 ± 3.04	0.77	1.12 ± 4.54	0.34
<i>Philotrypesis</i> sp. 3	寄生者 Parasitoid	1.29 ± 4.69	0.72	–	–
<i>Philotrypesis tridentate</i>	寄生者 Parasitoid	7.11 ± 8.96	3.98	0.14 ± 1.06	0.04
<i>Sycobia</i> sp. 1	造瘿者 Galler	2.67 ± 4.59	1.50	0.14 ± 0.63	0.04
<i>Sycobia</i> sp. 2	造瘿者 Galler	1.43 ± 3.73	0.80	0.01 ± 0.09	< 0.01
<i>Sycobia</i> sp. 3	造瘿者 Galler	1.51 ± 2.71	0.85	0.25 ± 1.39	0.08
<i>Sycophila</i> sp. 1	寄生者 Parasitoid	1.57 ± 3.52	0.88	0.27 ± 1.05	0.08
<i>Sycoscapter</i> sp. 1	寄生者 Parasitoid	12.62 ± 26.64	7.06	0.46 ± 2.10	0.14
<i>Walkerella benjamina</i>	造瘿者 Galler	12.14 ± 10.21	6.80	1.90 ± 5.43	0.57
<i>Walkerella</i> sp. 1	造瘿者 Galler	0.78 ± 1.42	0.43	0.19 ± 1.10	0.06
<i>Walkerella</i> sp. 2	造瘿者 Galler	0.19 ± 0.77	0.11	0.04 ± 0.30	0.01

的软件包包括vegan、bipartite (Dormann et al, 2009)、agricolae、dplyr、ggplot2、qgraph、igraph、reshape2和psysy等, 以进行数据分析。

2 结果

2.1 不同季节垂叶榕榕小蜂群落物种组成及丰富度比较

干季共收集到15种小蜂, 雨季收集到14种(见表1)。在雨季没有收集到*Philotrypesis* sp. 3这种寄生蜂。ANOSIM检验结果显示干季和雨季垂叶榕榕小蜂的群落组成发生了显著变化($R = 0.28$, $P < 0.01$), 干季和雨季传粉榕小蜂占比分别为72.24%和93.18%, 非传粉榕小蜂比例分别为27.76%和6.82%。非传粉造瘿蜂*Walkerella benjamina*在干季和雨季的比例分别为6.80%和0.57%。寄生蜂*Philotrypesis* sp. 1在干季和雨季的占比变化幅度不大, 分别为3.44%和5.42%; 而寄生蜂*P. tridentate*在干季(3.98%)的所占比例高于雨季(0.04%); 复寄生蜂*Sycoscapter* sp. 1在干季的占比(7.06%)也高于雨季(0.14%)。

垂叶榕传粉榕小蜂*E. koningsbergeri*在干季平均单果出蜂达到129.01只($N = 120$), 在雨季平均308.39只, 两个季节的数量差异显著($df = 120$, $P <$

0.001)。 *Philotrypesis* sp. 1的数量也是雨季显著多于干季($df = 120$, $P < 0.001$)。而*Sycoscapter* sp. 1 ($df = 120$, $P < 0.001$)、*Walkerella benjamina* ($df = 120$, $P < 0.001$)和*P. tridentate* ($df = 120$, $P < 0.001$)的数量, 在干季显著多于雨季(图1)。

2.2 不同季节榕小蜂共存网络的比较

垂叶榕隐头果内所有榕小蜂物种进行共发生网络分析结果表明(图2), 干季榕小蜂群落包含15个节点, 100条边, 连接数为0.95, 平均路径长度为1.05, 全局聚类系数为0.96。雨季榕小蜂群落包含14个节点, 43条边, 连接数为0.47, 平均路径长度为1.53, 全局聚类系数为0.61。雨季的平均路径长度大于干季($1.53 > 1.05$)。在两个季节网络中, 干季榕小蜂群落各种榕小蜂(每个节点)的连接数为9–14, 而雨季各种榕小蜂(每个节点)的连接数为2–13。其中传粉榕小蜂的连接数均为最多(干季: 14, 雨季: 13)。

小蜂群落的矩阵温度在干季(23.24)高于雨季(2.64)。干季和雨季的榕小蜂群落的加权嵌套性WNODF数值分别为33.57和31.78。表明干季榕小蜂群落与雨季相比更不稳定, 但干季榕小蜂群落的嵌套性高于雨季。不同季节榕小蜂群落的各嵌套性和网络指标的比较结果(图3)表明, 干季的群落矩阵温

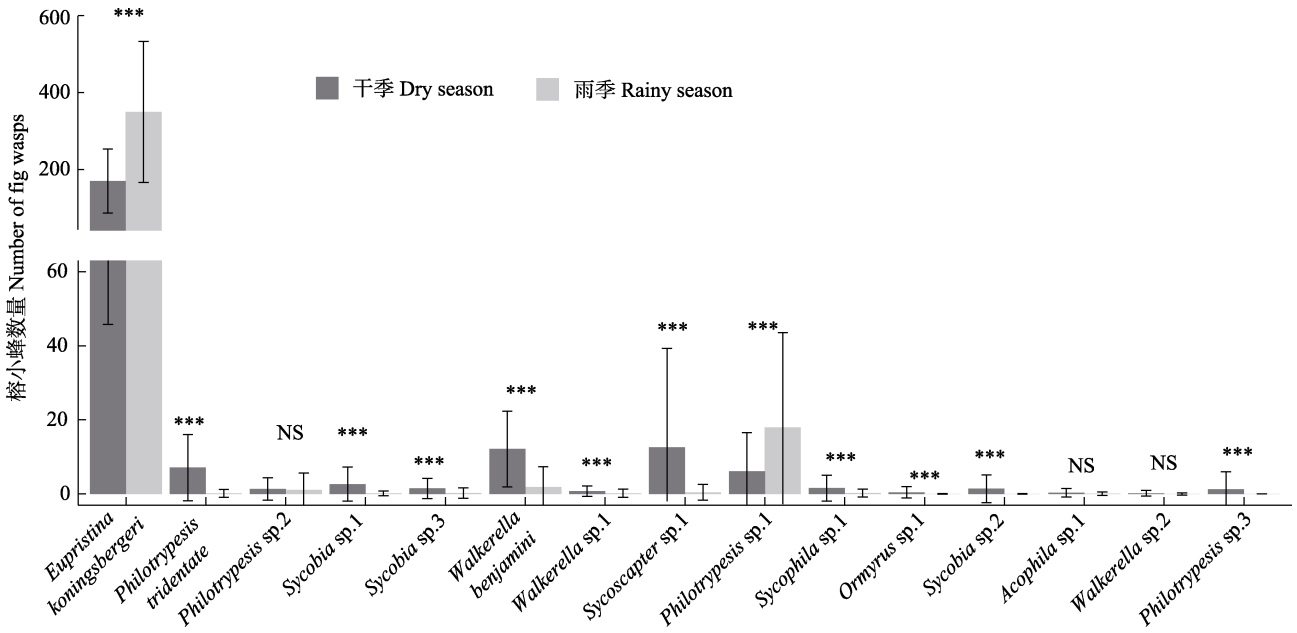


图1 西双版纳地区雨季和干季垂叶榕榕小蜂物种数量比较。采用独立样本t-检验，柱形图和误差线分别代表均值和标准差。*** $P < 0.001$; NS表示不显著。
 Fig. 1 Histogram of the fig wasp abundance of *Ficus benjamina* in Xishuangbanna. Two sample *t*-test was used to compared fig wasp abundance between rainy and dry seasons. Bars and errors represent mean \pm SD. *** $P < 0.001$; NS, Not significant.

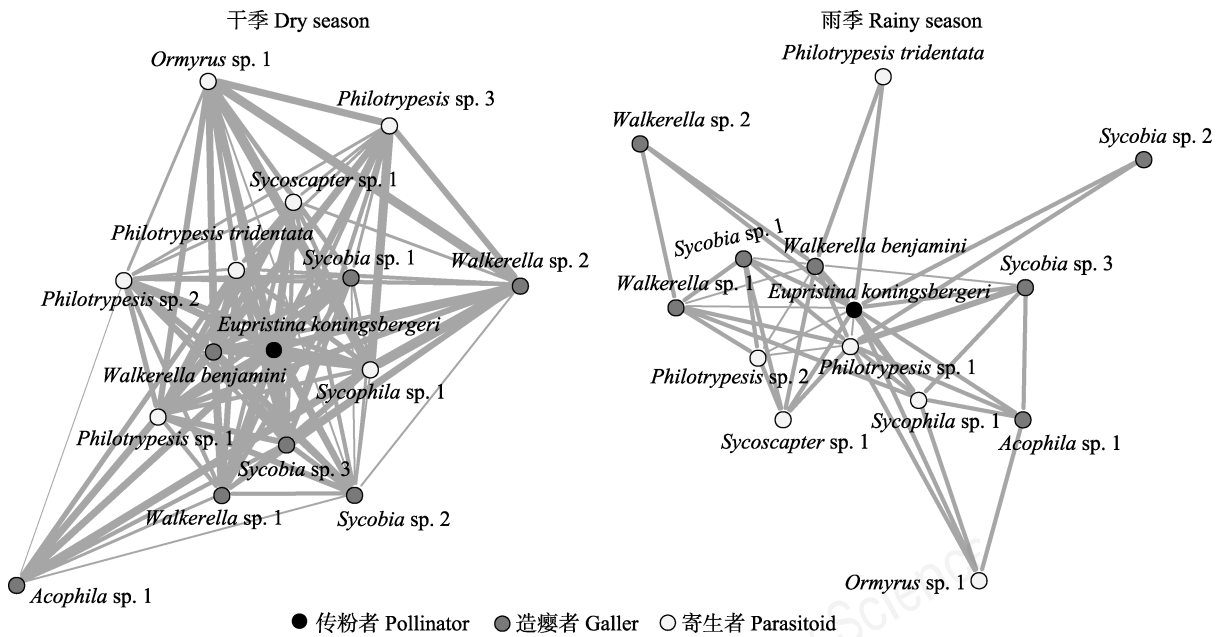


图2 西双版纳地区两个季节垂叶榕榕小蜂群落的加权共存网络。节点颜色代表可能的营养级水平，边的宽度代表物种同时出现的频率。
 Fig. 2 The weighted co-occurrence networks of the wasp community of *Ficus benjamina* in Xishuangbanna. The nodes are colored by presumable trophic level, the width of each edge is proportional to the co-occur frequency of species.

度(df = 3, $P < 0.05$)、网络距离(df = 3, $P < 0.05$)和网络的连接数(df = 3, $P < 0.05$)显著大于雨季；而群落

的嵌套性(df = 3, $P = 0.31$)和网络直径(df = 3, $P = 0.07$)在两个季节没有显著差异。

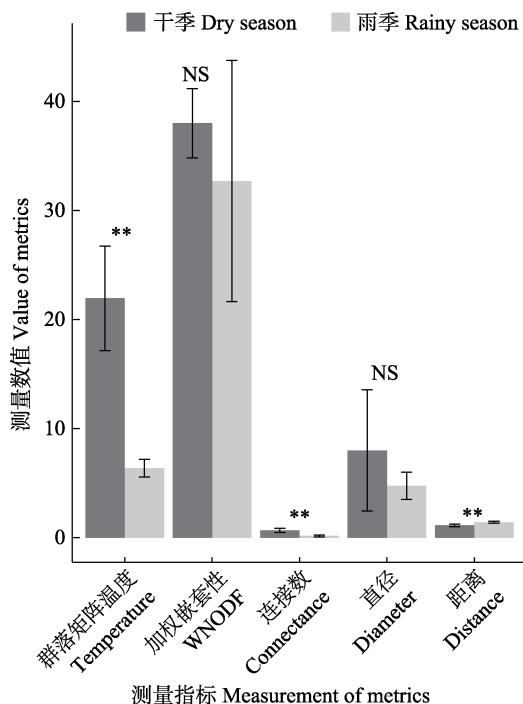


图3 西双版纳地区不同季节榕小蜂群落物种共存网络指标的比较。使用 t 检验比较了各指标两个季节的差异, 柱形图和误差线代表平均值 \pm 标准差。** $P < 0.01$; * $P < 0.05$; NS 表示不显著。

Fig. 3 Fig wasp community co-occurrence network metrics between the dry and the rainy seasons in Xishuangbanna. The difference between the dry season and the rainy season were compared with t -test, the bars and error lines are mean \pm SD. WNODEF, Weight nestedness metric based on overlap and decreasing fill. ** $P < 0.01$; * $P < 0.05$; NS, Not significant.

3 讨论

本研究比较了不同季节垂叶榕隐头果内榕小蜂共存网络的参数和群落季节动态变化。结果发现, 雨季榕果内传粉榕小蜂的占比和绝对数量均高于干季, 但干季非传粉榕小蜂的种类却多于雨季。榕小蜂共存网络的分析进一步表明干季群落矩阵温度和物种间的连接数显著高于雨季。以上结果均暗示, 干季榕小蜂群落受到的干扰更大, 但小蜂群落的组成及种间关系却较雨季更为复杂和多样。从榕树-传粉榕小蜂互利共生系统的适合度角度来看, 干季非传粉小蜂比例和数量的增加对传粉榕小蜂和榕树的互惠共生关系是不利的。

垂叶榕榕小蜂群落中包含了造瘿蜂、寄居蜂和复寄生蜂。传粉榕小蜂是特殊的造瘿蜂, 在发育过程中会取食胚珠, 并为榕树传粉, 所以传粉榕小蜂与榕树之间存在着对雌花资源利用的权衡(Wang et

al, 2013)。非传粉造瘿蜂(例如垂叶榕中 *Walkerella* 属的造瘿蜂)从榕果外部产卵于雌花中, 不会为榕树传粉。它们会与传粉榕小蜂竞争雌花资源, 它们的产卵使得传粉榕小蜂需要花费更多的时间去搜寻可产卵的雌花子房, 降低了产卵率(白莉芬等, 2006; 王仲敏等, 2010; Cardona & Kattan, 2019)。 *Sycoscapter* 和 *Philotrypsis* 属的非传粉小蜂是寄居类或复寄生类小蜂。它们能将卵产于其他榕小蜂的瘿花中或体内, 与寄主竞争营养并导致寄主死亡(白莉芬等, 2006)。寄生蜂一般以造瘿蜂为寄主, 在一定数量范围内, 寄生蜂的数量和寄主的数量呈正相关。但是大量寄生蜂的存在会减少寄主的数量, 导致两者数量呈负相关关系, 最终使得两者数量呈现复杂的动态变化(Shi et al, 2011)。此外, 复寄生蜂 *Sycophila* sp. 1、*Ormyrus* sp. 1 和 *Sycoscapter* sp. 1 能将卵产于其他造瘿者产生的瘿花子房内, 且发育过程中以榕果的胚珠为食, 导致榕树种子数量减少。因此, 非传粉造瘿蜂、寄生蜂和复寄生蜂的存在对传粉榕小蜂和榕树的繁殖均会造成负面影响(Kerdelhué & Rasplus, 1996; Weiblen, 2002; Cook & Rasplus, 2003; Kong et al, 2016)。

垂叶榕榕小蜂的群落在干季和雨季具有显著不同的物种数量和组成。传粉榕小蜂的比例在雨季显著多于干季, 并且两个季节中传粉榕小蜂均为优势种, 这与之前的研究报道结果一致(白莉芬等, 2006; 王仲敏等, 2010)。这暗示在垂叶榕榕小蜂群落中, 传粉榕小蜂可能在资源的利用上占主导地位, 非传粉榕小蜂也需要依赖传粉榕小蜂维持其在榕果中的生存。雨季的气候条件(温度高且降水量多)可能不适于非传粉榕小蜂的寄主搜寻、产卵以及子代的发育, 从而导致非传粉小蜂的比例较干季更少, 仅占6.82%。在雨季, 榕果的发育速度比干季更快, 这有利于进入榕果内产卵的传粉榕小蜂。绝大多数非传粉小蜂在果外产卵, 其产卵过程更容易受温度和降水量等气候因素的干扰。而且雨季榕果发育速率较快, 留给非传粉小蜂产卵的机会变少, 导致其子代数量变少。有些非传粉榕小蜂属于稀有种, 发生没有连续性, 且只在特定的月份或地区出现(王仲敏等, 2010)。此外, 采样点周围的生境和采样数量也会影响榕小蜂的种类和数量。基于两个季节垂叶榕榕小蜂群落的物种组成以及物种数量的季节变化, 我们推测小蜂群落可能存在分布区域上的动

态变化, 暗示在更广泛的地域范围内, 可能存在榕小蜂的集合群落(meta-community) (May et al, 2007)。

从网络的角度来看, 干季的垂叶榕榕小蜂群落的物种组成共存网络拥有更高的群落温度和连接数。高的群落温度暗示群落处于较强的干扰之下, 群落中数量稀少的物种消失的可能性极大。群落加权嵌套性在两个季节没有显著差异, 但是相比于随机群落, 两个季节的小蜂群落均呈现出极高的嵌套性。干季非传粉小蜂的占比高于雨季, 进一步表明干季群落中非传粉榕小蜂在榕果内的分布更为泛化。此外, 干季的连接数、节点和网络直径也多于雨季, 这表明干季榕小蜂物种间存在更多的关联、群落也更复杂(Jacquet et al, 2016)。温度、降雨等气候变化会影响榕小蜂对寄主的搜寻、榕果的发育历程和榕小蜂群落组成(Zhang et al, 2006; Jevanandam et al, 2013), 进而影响网络参数特征。因此, 气候因子的变化可能导致了榕小蜂种群数量、种间共存网络的季节性动态变化。

榕小蜂群落季节性动态变化与非生物因子(温度和降水量等)和榕小蜂群落中物种间的相互作用均有关。但仅从网络的测量指标(例如连接数、群落温度和嵌套性等)来探究榕小蜂群落中网络的复杂度和稳定性, 并不能完全解释群落或网络复杂度的成因。因此, 结合种间互作和非生物因子对网络复杂度进行分析, 有助于我们更好地理解群落或网络结构。对网络复杂度和稳定性的进一步认识和分析需要网络分析理论和方法上的创新。

致谢: 感谢张进媛在数据收集过程中的协助。

参考文献

- Almeida-Neto M, Guimarães PR Jr, Lewinsohn TM (2007) On nestedness analyses: Rethinking matrix temperature and anti-nestedness. *Oikos*, 116, 716–722.
- Atmar W, Patterson BD (1993) The measure of order and disorder in the distribution of species in fragmented habitat. *Oecologia*, 96, 373–382.
- Bai LF, Yang DR, Shi ZH, Peng YQ, Zhai SW (2006) Community structure of fig wasp in *Ficus benjamina* in different habitats. *Biodiversity Science*, 14, 340–344. (in Chinese with English abstract) [白莉芬, 杨大荣, 石章红, 彭艳琼, 翟树伟 (2006) 垂叶榕隐头果内小蜂群落结构与生境关系的初步研究. *生物多样性*, 14, 340–344.]
- Bascompte J, Jordano P, Melián CJ, Olesen JM (2003) The nested assembly of plant–animal mutualistic networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 100, 9383–9387.
- Berlow EL, Dunne JA, Martinez ND, Stark PB, Williams RJ, Brose U (2009) Simple prediction of interaction strengths in complex food webs. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 106, 187–191.
- Cardona W, Kattan GH (2019) Complex effects of nonpollinating wasps on the relationship between pollinating wasp and seed production in *Ficus andicola*. *Acta Oecologica*, 98, 45–49.
- Clarke KR (1993) Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology*, 18, 117–143.
- Cook JM, Rasplus JY (2003) Mutualists with attitude: Coevolving fig wasps and figs. *Trends in Ecology & Evolution*, 18, 241–248.
- Donatti CI, Guimarães PR, Galetti M, Pizo MA, Marquitti FM, Dirzo R (2011) Analysis of a hyper-diverse seed dispersal network: Modularity and underlying mechanisms. *Ecology Letters*, 14, 773–781.
- Dormann CF, Fründ J, Blüthgen N, Gruber B (2009) Indices, graphs and null models: Analyzing bipartite ecological networks. *The Open Ecology Journal*, 2, 7–24.
- Fortuna MA, Stouffer DB, Olesen JM, Jordano P, Mouillot D, Krasnov BR, Poulin R, Bascompte J (2010) Nestedness versus modularity in ecological networks: Two sides of the same coin? *Journal of Animal Ecology*, 79, 811–817.
- Guimarães PR Jr, Rico-Gray V, Oliveira PS, Izzo TJ, dos Reis SF, Thompson JN (2007) Interaction intimacy affects structure and coevolutionary dynamics in mutualistic networks. *Current Biology*, 17, 1797–1803.
- Hagen M, Kissling WD, Rasmussen C, De Aguiar MA, Brown LE, Carstensen DW, Alves-Dos-Santos I, Dupont YL, Edwards FK (2012) Biodiversity, species interactions and ecological networks in a fragmented world. *Advances in Ecological Research*, 46, 89–210.
- Henri DC, Van Veen FJF (2011) Body size, life history and the structure of host–parasitoid networks. *Advances in Ecological Research*, 45, 135–180.
- Herre EA (1999) Laws governing species interactions? Encouragement and caution from figs and their associates. In: *Levels of Selection in Evolution* (ed. Keller L), pp. 209–237. Princeton University Press, Princeton.
- Jacob U, Thierry A, Brose U, Arntz WE, Berg S, Brey T, Fetzner I, Jonsson T, Mintenbeck K, Möllmann C, Petchey OL, Riede JO, Dunne JA (2011) The role of body size in complex food webs: A cold case. *Advances in Ecological Research*, 45, 181–223.
- Jacquet C, Moritz C, Morissette L, Legagneux P, Massol F, Archambault P, Gravel D (2016) No complexity–stability relationship in empirical ecosystems. *Nature Communications*, 7, 12573.

- Jevanandam N, Goh AG, Corlett RT (2013) Climate warming and the potential extinction of fig wasps, the obligate pollinators of figs. *Biology Letters*, 9, 20130041.
- Kerdelhué C, Rasplus JY (1996) The evolution of dioecy among *Ficus* (Moraceae): An alternative hypothesis involving non-pollinating fig wasp pressure on the fig-pollinator mutualism. *Oikos*, 77, 163–166.
- Kerdelhué C, Rossi JP, Rasplus JY (2000) Comparative community ecology studies on old world figs and fig wasps. *Ecology*, 81, 2832–2849.
- Kong Y, Wang R, Yang DR, Sreekar R, Peng YQ, Compton SG (2016) Non-pollinator fig wasp impact on the reproductive success of an invasive fig tree: Why so little. *Biocontrolence & Technology*, 26, 1432–1443.
- Krishna A, Guimarães RP Jr, Jordano P, Bascompte J (2008) A neutral-niche theory of nestedness in mutualistic networks. *Oikos*, 117, 1609–1618.
- Lewinsohn TM, Novotny V, Basset Y (2005) Insects on plants: Diversity of herbivore assemblages revisited. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 36, 597–620.
- Lewinsohn TM, Paulodo PI, Jordano P, Bascompte J, Olesen JM (2006) Structure in plant-animal interaction assemblages. *Oikos*, 113, 174–184.
- May R, Mclean A (translated by Tao Y, Wang BH) (2007) *Theoretical Ecology: Principles and Applications*. Oxford University Press on Demand. [May R, Mclean A (陶毅, 王百桦译) (2010) *理论生态学——原理及应用*. 高等教育出版社, 北京.]
- Memmott J (1999) The structure of a plant-pollinator food web. *Ecology Letters*, 2, 276–280.
- Olesen JM, Bascompte J, Dupont YL, Jordano P (2007) The modularity of pollination networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 104, 19891–19896.
- Olesen JM, Dupont YL, Hagen M, Rasmussen C, Trøjelsgaard K (2012) Structure and dynamics of pollination networks: The past, present, and future. In: *Evolution of Plant-Pollinator Relationships* (ed. Patiny S), pp. 374–391. Cambridge University Press, Cambridge.
- R Development Core Team (2018) *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Santos GMM, Wesley D, Presley SJ (2014) The seasonal dynamic of ant-flower networks in a semi-arid tropical environment. *Ecological Entomology*, 39, 674–683.
- Schleuning M, Blüthgen N, Flörchinger M, Braun J, Schaefer HM, Böhning-Gaese K (2011) Specialization and interaction strength in a tropical plant-frugivore network differ among forest strata. *Ecology*, 92, 26–36.
- Shi L, Wang RW, Zhu LX, Zeng WM, Xu WL, Zheng Q (2011) Varying coefficient analysis for indeterminate species interactions with non-parametric estimation, exemplifying with a fig-fig wasp system. *Chinese Science Bulletin*, 56, 2545–2552.
- Stouffer DB, Bascompte J (2010) Understanding food-web persistence from local to global scales. *Ecology Letters*, 13, 154–161.
- Wang H, Ridley J, Dunn DW, Wang RW, Cook JM, Yu DW (2013) Biased oviposition and biased survival together help resolve a fig-wasp conflict. *Oikos*, 122, 533–540.
- Wang ZJ (2010) *Impact of Non-pollinating Fig Wasps on the Fig-fig Wasps Mutualism in Three Monoecious Ficus*. PhD dissertation, University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing. (in Chinese with English abstract) [王振吉 (2010) 非传粉榕小蜂对三种雌雄同株榕树-榕蜂互利共生系统的影响. 博士学位论文, 中国科学院大学, 北京.]
- Wang ZJ, Zhang FP, Peng YQ, Yang DR (2009) Reproductive strategy and impact on the fig-pollinator mutualism of one non-pollinating fig wasp species. *Biodiversity Science*, 17, 168–173. (in Chinese with English abstract) [王振吉, 张凤萍, 彭艳琼, 杨大荣 (2009) 一种非传粉榕小蜂的繁殖策略及其对榕-蜂互利共生系统的影响. *生物多样性*, 17, 168–173.]
- Wang ZM, Hu HY, Niu LM, Huang DW (2010) Population dynamics of 16 fig wasp species in *Ficus benjamina*. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 3858–3864. (in Chinese with English abstract) [王仲敏, 胡好远, 牛黎明, 黄大卫 (2010) 垂叶榕上16种榕小蜂的种群动态. *生态学报*, 30, 3858–3864.]
- Wasserman S, Faust K (1994) *Social Network Analysis: Methods and Applications*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Weiblen GD (2002) How to be a fig wasp. *Annual Review of Entomology*, 47, 299–330.
- Williams RJ, Martinez ND (2000) Simple rules yield complex food webs. *Nature*, 404, 180–183.
- Woodward G, Brown LE, Edwards FK, Hudson LN, Milner AM, Reuman DC, Ledger ME (2012) Climate change impacts in multispecies systems: Drought alters food web size structure in a field experiment. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 367, 2990–2997.
- Zhang KY (1963) The climatic characteristics of southern Yunnan region and its formation mechanism. *Acta Meteorologica Sinica*, 33, 218–230. (in Chinese) [张克映 (1963) 滇南气候的特征及其形成因子的初步分析. *气象学报*, 33, 218–230.]

(责任编辑: 朱朝东 责任编辑: 时意专)

附录 Supplementary Material

附录1 西双版纳地区垂叶榕榕小蜂的种类及其生物学特性

Appendix 1 List of fig wasps and their morphological characteristics of *Ficus benjamina* in Xishuangbanna

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2019294-1.pdf>

附录1 西双版纳地区垂叶榕榕小蜂的种类及其生物学特性

Appendix 1 List of fig wasps and their morphological characteristics of *Ficus benjamina* in Xishuangbanna

科/亚科 Family/sub-family	物种 Species	识别特征 Identification notes
Agaoninae/Agaoninae	<i>Eupristina koningsbergeri</i>	雌蜂体黑, 产卵器较体长更短; 雄蜂无翅 Female, body black, ovipositor length shorter than body length; male, no wings
Pteromalidae/ Epichrysomallina	<i>Sycobia</i> sp. 1	雌蜂体棕色; 雄蜂头部纵脊隆突 Female, body brown; male, with longitudinal carina on head
Pteromalidae/ Epichrysomallina	<i>Sycobia</i> sp. 2	雌蜂体黄色, 腹部带条纹; 雄蜂有翅 Female, body yellow, stripes of the gaster; male, with wings
Pteromalidae/ Epichrysomallina	<i>Sycobia</i> sp. 3	雌蜂深灰色, 头部黄色; 雄蜂有翅 Female, body dark grey and head yellow; male, with wings
Pteromalidae/ Epichrysomallina	<i>Acophila</i> sp. 1	雌蜂体呈黑色, 产卵器较体长更短; 雄蜂触角黄色 Female, body black, ovipositor length shorter than body length; male, antenna yellow
Pteromalidae/ Sycoryctinae	<i>Philotrypesis tridentate</i>	雌蜂黄色, 体型较大, 产卵器短; 雄蜂无翅 Female, body yellow, stout and robust, ovipositor length shorter than body length; male, no wings
Pteromalidae/ Sycoryctinae	<i>Philotrypesis</i> sp. 1	雌蜂体黑, 产卵器为体长2倍多 Female, body black, ovipositor length more than 2 times of body length
Pteromalidae/ Sycoryctinae	<i>Philotrypesis</i> sp. 2	雌蜂体黄色, 产卵鞘前端膨大处与体长等长 Female, body yellow, the length of anteriorly bulging of ovipositor sheath equal to body length
Pteromalidae/ Sycoryctinae	<i>Philotrypesis</i> sp. 3	雌蜂黑色; 雄蜂略带黑色 Female, body black; male, body blackish
Pteromalidae/ Sycoryctinae	<i>Sycoscapter</i> sp. 1	雌蜂体黑绿色, 产卵器较体长更长; 雄蜂无翅 Female, body black green, ovipositor length longer than body length; male, no wings
Pteromalidae/ Otitesellinae	<i>Walkerella benjamini</i>	雌蜂体呈铜绿色, 产卵器短; 雄蜂无翅 Female, body metallic green, ovipositor length shorter than body length; male, no wings
Pteromalidae/ Otitesellinae	<i>Walkerella</i> sp. 1	雌蜂体黑带铜蓝色, 产卵器向下; 雄蜂无翅 Female, body black and metallic blue, ovipositor posture prolapse; male, no wings
Pteromalidae/ Otitesellinae	<i>Walkerella</i> sp. 2	雌蜂体淡黑色, 产卵器较体长更短; 雄蜂无翅 Female, body blackish, ovipositor length shorter than body length; male, no wings
Eurytomidae	<i>Sycophila</i> sp. 1	雌蜂体黄色, 带黑色翅斑; 雄蜂有翅 Female, body yellow, black spots on the wings; male, with wings
Ormyridae	<i>Ormyrus</i> sp. 1	雌蜂体铜绿色, 产卵器较体长更短; 雄蜂有翅 Female, body metallic green, ovipositor length shorter than body length; male, with wings



•研究报告•

澜沧江流域水生昆虫群落分类多样性和功能多样性海拔格局的空间尺度依赖性

魏慧玉 陈 凯* 王备新

(南京农业大学植物保护学院昆虫系昆虫分类与水生昆虫实验室, 南京 210095)

摘要: 群落分类多样性和功能多样性的海拔格局研究, 是了解生物多样性空间分布现状、揭示多样性维持和变化机制的重要途径。当前对水生昆虫分类多样性和功能多样性沿海拔梯度分布格局, 及其尺度依赖性依旧缺乏深入研究。本文基于2013–2018年在云南澜沧江流域500–3,900 m海拔梯度共149个溪流点位的水生昆虫群落调查数据, 利用线性或二次回归模型探索并比较了局部尺度(点位尺度)和不同区域尺度(100 m、150 m、200 m、250 m海拔段)的分类多样性指数(物种丰富度指数、Simpson多样性指数和物种均匀度指数)和功能多样性指数(树状图功能多样性指数(dbFD)、Rao二次熵指数(RaoQ)和功能均匀度指数(FEve))的海拔格局。结果表明, 在局部尺度, 物种丰富度指数和dbFD指数沿海拔梯度均无显著分布特征, Simpson多样性指数、RaoQ指数、物种均匀度指数和FEve指数沿海拔梯度呈现U型或者单调递减趋势。在区域尺度, 随着区域海拔带宽度的增加, 物种丰富度指数沿海拔呈不显著的单调递减格局, 但dbFD指数沿海拔分布由U型转变为单调递减趋势; Simpson多样性指数和RaoQ指数沿海拔梯度由显著U型趋势转变为无显著分布特征; 物种均匀度指数沿海拔梯度无显著分布特征, 但FEve指数呈显著增加的海拔格局。综上, 群落分类多样性指数和功能多样性指数沿海拔梯度分布存在局部和区域尺度的空间差异, 但区域尺度下二者海拔格局随海拔带宽度的增加存在一定程度的一致性。

关键词: 生物多样性; 功能性状; 海拔梯度; 局部尺度; 区域尺度; 溪流; 生物地理学

The spatial scale dependency of elevational patterns of taxonomic and functional diversity in aquatic insects in the Lancang River, Yunnan, China

Huiyu Wei, Kai Chen*, Beixin Wang

Laboratory of Insect Taxonomy & Aquatic Insects, Department of Entomology, College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095

Abstract: Elevational patterns of taxonomic and functional diversity are important aspects of biodiversity maintenance and changes. However, the spatial scale dependency of elevational patterns on taxonomic and functional diversity of aquatic insect assemblages remains unclear. Using data collected from 149 stream sites along elevational gradients ranging between 500–3,900 m during 2013–2018 in the upper basin of Lancang River in Yunnan Province, China, we examined how elevational patterns of taxonomic and functional diversity of aquatic insect assemblages differed across local and regional scales among multiple elevational bands (i.e., 100, 150, 200, and 250 m). We used linear or quadratic regression models to explore the elevational patterns of taxonomic richness index, Simpson diversity index, evenness index, dendrogram-based functional diversity index (dbFD), Rao's Quadratic index (RaoQ), and functional evenness index (FEve). At the local scale, taxonomic richness index and dbFD index show no significant elevational patterns; while Simpson diversity index, RaoQ index, evenness index, and FEve index show either U-shaped or monotonically decreasing trends along elevation gradients. At the regional scale with increasing elevation, taxonomic richness index decreases (NS) while dbFD index changes from U-shaped to a monotonically decreasing trend along the elevational gradient. Both Simpson diversity index and RaoQ index change from a significant U-shaped to no significant regional elevational patterns. Taxonomic evenness index and FEve

index have no significant relationship with and significantly increased with regional elevations, respectively. Our results show that aquatic insect taxonomic and functional diversity are scale dependent across elevations. However, we observed a degree of consistency in elevational patterns for each taxonomic and functional diversity index across elevational bands at regional scales.

Key words: biodiversity; functional traits; elevation gradients; local scale; regional scale; stream; biogeography

海拔梯度综合了多种环境因子(如温度、降水、光照等)的梯度效应(Gaston, 2000; 唐志尧和方精云, 2004), 是影响物种组成、生物群落构建和多样性空间格局的重要因素(Sundqvist et al, 2013; 卢孟孟等, 2014)。物种多样性的海拔格局研究有助于揭示全球生物多样性现状及其维持和变化机制(李巧燕和王襄平, 2013; Laiolo et al, 2018)。作用于不同空间尺度(例如局部和区域)的多重生态学过程和空间距离等因素, 共同决定了物种沿海拔梯度的分布特征(Laiolo et al, 2017), 物种多样性海拔格局因此可能存在空间尺度依赖性(Rahbek, 2005)。分类多样性和功能多样性是物种多样性的重要组成: 分类多样性是基本组成, 描述群落物种组成、结构和多样性特征(宋普庆等, 2015); 功能多样性基于功能性状描述群落组成物种对生态过程的需求和响应及其生态功能等特征(Villéger et al, 2010)。已有研究对物种多样性海拔格局的空间尺度依赖性仍旧缺乏深入的认识; 同时探索分类多样性和功能多样性沿海拔梯度分布的空间尺度差异性, 对全面理解物种多样性的海拔格局具有重要价值。

水生昆虫是河流生态系统具有重要生态功能的组成类群(Covich et al, 1999; Mermillod-Blondin, 2011), 对自然环境和人类干扰梯度的响应敏感(Dohet et al, 2015), 可综合反映时空尺度环境作用下水生生态系统的动态变化。已有研究发现, 水生昆虫分类多样性海拔格局在局部和区域尺度主要符合单峰模型(Füreder et al, 2006; Wang et al, 2011; de Mendoza et al, 2017)和单调递减(Jacobsen, 2004; Castro et al, 2019)分布, Jacobsen (2004)发现溪流无脊椎动物丰富度沿海拔降低的分布格局呈现局部和区域尺度差异性。目前仅有部分研究探索了水生昆虫功能多样性的海拔格局, 如Lafferty^①发现落基山脉水生昆虫功能丰富度与沿海拔梯度变化的溪流大小

和流量稳定性呈正相关关系。当前依旧缺乏对水生昆虫分类多样性和功能多样性海拔格局的局部和区域尺度空间差异的探索研究。

澜沧江流域海拔高差显著, 生物多样性丰富, 是世界生物多样性研究的热点地区(王川等, 2013; 程豹等, 2018), 也是开展空间尺度影响物种多样性海拔格局研究的重要区域。本研究通过系统分析澜沧江流域云南段的水生昆虫数据, 探索和比较局部和区域尺度的分类多样性和功能多样性指数海拔格局, 探讨多重空间尺度下水生昆虫物种多样性沿海拔梯度的分布规律; 以期为澜沧江水生昆虫多样性研究提供数据积累, 并为探讨水生昆虫海拔格局的空间尺度效应等研究奠定一定基础。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

澜沧江流域云南段由北向南从迪庆藏族自治州至西双版纳勐腊县出境口, 全长910 km (冯建孟等, 2012), 海拔高差超过6,500 m (胡波等, 2006), 澜沧江河谷海拔1,200–2,000 m (杨阳等, 2016)。流域地表形态复杂且特殊, 相对高差显著, 生物多样性丰富(王川等, 2013)。该流域纵跨热带、亚热带和大陆性高寒气候带, 气温和降水随海拔升高均表现出下降趋势(何云玲和张一平, 2004)。流域由北至南土地利用垂直分带明显, 上游地区人口较少, 主要以林地灌木为主; 中下游人口密集, 主要以耕地和人工经济林为主(姜昀等, 2006)。

参照Jacobsen (2004)的方法, 沿海拔梯度在2–4级溪流分别采集56、53和40个样点, 共149个溪流样点(图1)。于2013年3月、2016年3月和10月、2018年10月雨季前后的水文平稳期共进行4次野外样品采集, 所有采样点位海拔范围介于500–3,900 m, 采样点位覆盖研究区域的典型气候特征和土地利用类型。方差分析结果表明, 除水温外, 不同溪流等级采样点位的海拔、土地利用、底质组成及其他环境变量均无显著性差异(表1)。

^① Lafferty MH (2018) Changes in Taxonomic and Functional Diversity of Aquatic Macroinvertebrates Along a Gradient of Stream Size and Flow Stability in the Northeastern Colorado Rocky Mountains. Master thesis, Colorado State University, Colorado.

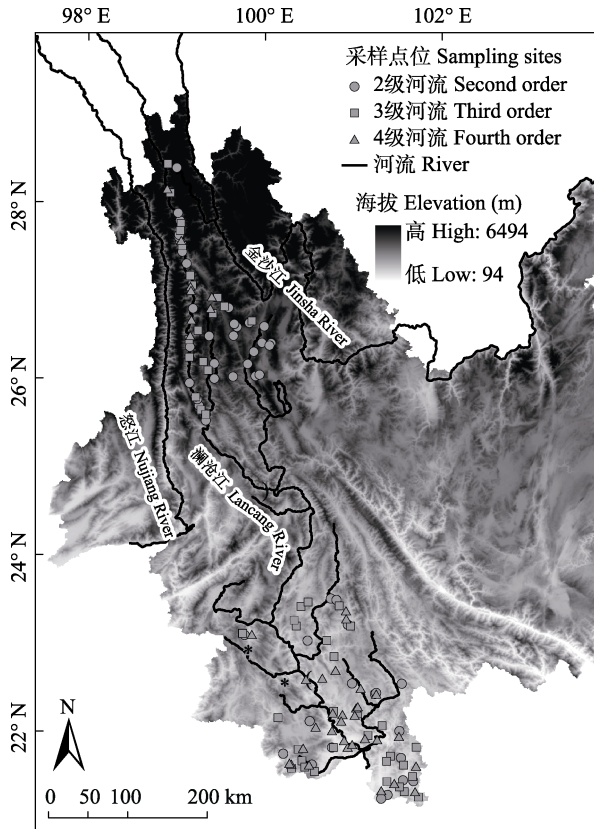


图1 澜沧江流域云南段溪流采样点位分布图

Fig. 1 Locations of sampling sites in the Lancang River in Yunnan Province, China

1.2 水生昆虫的采集与鉴定

根据多生境采样原则,在100 m长的溪流河段内根据栖境类型的出现比例分配样方数,使用D型网(直径30 cm、60目孔径)采集水生昆虫(Hughes & Peck, 2008)。每个样点共采集8–10个样方,混合成为1个样点样本后,使用60目分样筛筛洗,加入分析纯乙醇溶液固定。实验室内挑拣、鉴定和计数水生昆虫所有个体,根据已有可靠的形态学资料鉴定至可能的最低分类单元,通常为属级;其中,仅鞘翅目、半翅目和双翅目的部分类群鉴定至科级。

1.3 数据分析

1.3.1 空间尺度

首先从中国科学院国际科学数据服务平台(<http://www.resdc.cn>)下载精度为30 m的数字高程模型(DEM)数据,通过ArcGIS 10.2软件对所有野外获得的海拔数据进行校正。局部尺度,即每个采样点的点位尺度;区域尺度,共划分4个海拔段大小,分别以100 m(即500–599 m、600–699 m,以此类推),150 m(即500–649 m、650–799 m,以此类推),200 m(即500–699 m、700–899 m,以此类推),250 m(即500–749 m、750–999 m,以此类推)为单位划分海拔段(Gill et al, 2014; Carvajal-Quintero et al, 2015;

表1 不同溪流等级采样点位环境因子概况

Table 1 Summary of environmental variables across sampling sites collected from second-, third-, and fourth-order streams

环境变量 Environmental variables	2级 Second order		3级 Third order		4级 Fourth order	
	平均值 ± 标准差 Mean ± SD	范围 Range	平均值 ± 标准差 Mean ± SD	范围 Range	平均值 ± 标准差 Mean ± SD	范围 Range
海拔 Elevation (m)	1,392 ± 719	528–3,146	1,451 ± 721	502–3,935	1,311 ± 569	595–2,899
水温 Water temperature (°C)*	15.46 ± 4.69	1.10–26.10	16.63 ± 5.05	6.80–28.00	19.33 ± 4.30	10.30–26.00
泥沙含量百分比 Percent of sand (%)	8.61 ± 16.20	0.00–100.00	7.62 ± 10.79	0.00–60.00	14.09 ± 16.69	0.00–70.00
碎石含量百分比 Percent of gravel (%)	32.49 ± 24.41	0.00–100.00	30.15 ± 20.38	5.08–87.93	36.71 ± 18.25	2.78–85.00
鹅卵石含量百分比 Percent of cobbles (%)	42.82 ± 21.40	0.00–81.82	45.52 ± 17.98	0.00–72.37	39.10 ± 19.30	0.00–68.06
大石块含量百分比 Percent of boulders (%)	16.08 ± 14.53	0.00–55.00	16.71 ± 14.25	0.00–60.00	10.10 ± 11.17	0.00–45.71
农业用地占比 Percent of agricultural land (%)	1.61 ± 4.73	0.00–32.01	0.91 ± 1.51	0.00–8.44	3.11 ± 3.49	0.02–15.90
森林用地占比 Percent of forest land (%)	82.32 ± 17.73	21.58–100.00	85.89 ± 12.33	41.38–100.00	83.77 ± 11.27	54.20–96.86

* $P < 0.05$.

Laiolo et al, 2018; Castro et al, 2019)。

1.3.2 多样性指数计算

分别计算局部和区域尺度水生昆虫群落的分类多样性和功能多样性指数, 然后对多样性指数的海拔格局进行分析。点位多样性指数即为局部尺度多样性指数; 综合每个海拔段所有点位的水生昆虫组成为海拔段物种组成, 计算区域尺度多样性指数。

(1) 分类多样性指数

分类多样性指数基于群落分类特征测定群落分类组成和结构。采用物种丰富度指数(S)、Simpson多样性指数(D)和物种均匀度指数(J)综合表征局部和区域尺度的群落分类多样性特征。物种丰富度指数即群落内记录的物种总数; Simpson多样性指数(Simpson, 1949)和物种均匀度指数(Pielou, 1966)计算公式如下:

$$D = -\left(\sum_{i=1}^S N_i / N\right) N^2 \quad (1)$$

$$J = -\frac{\sum (N_i / N) \ln(N_i / N)}{\ln(S)} \quad (2)$$

式中, S 为水生昆虫物种数, N_i 为第 i 个物种的个体数, N 为水生昆虫个体总数。

(2) 功能多样性指数

选择外骨骼保护状况、体型、呼吸方式、营养习性、亲流性、生活习性和个体大小共7个对环境变化响应敏感连续型和离散型生物性状(Ding et al, 2017; 李胜利等, 2018)。参照Colzani等(2013)使用离散数字1、2、3……对每个性状进行赋值, 将所有性状划分为共25个离散类别(表2), 用于功能多样性指数计算。所有生物学性状及其赋值主要从已发表文献资料获取(Morse et al, 1994; Usseglio-Polatera et al, 2000; Poff et al, 2006; Ding et al, 2017)。

功能多样性指数表征群落物种功能性状组成和结构特征(Villéger et al, 2008), 本文选用以下3个指数: (1)树状图功能多样性指数(dendrogram-based functional diversity, dbFD)。根据功能性状矩阵构建群落性状树状图, 树状图所有分支长度的总和即为dbFD指数; 该指数结合了物种丰富度、群落组成和功能性状数量(Petchey & Gaston, 2002), 通过估算物种在性状空间的分布, 衡量物种性状的互补程度(Petchey & Gaston, 2002), 与物种多度无关(González-Maya et al, 2016)。(2) Rao二次熵指数(Rao's Quadratic,

表2 水生昆虫功能性状类别及其赋值

Table 2 Functional trait states and scores of aquatic insects

性状类别 Trait state	赋值 Score
外骨骼保护状况 Exoskeleton or external protection	
虫体柔软 Soft-bodied forms	1
轻微骨化 Lightly sclerotized	2
骨化良好 Heavily sclerotized	3
体型 Body shape	
流线型 Streamlined	1
非流线型 Not streamlined	2
呼吸方式 Respiration	
体壁呼吸 Tegument	1
鳃呼吸 Gills	2
气氧呼吸(呼吸管、气泡、气盾) Air (spiracles, tracheae, plastrons)	3
营养习性 Trophic habit	
集食者 Collector-gatherer	1
滤食者 Collector-filterer	2
刮食者 Scraper	3
捕食者 Predator	4
撕食者 Shredder	5
亲流性 Rheophily	
沉积型 Only depositional	1
沉积型和冲刷型 Depositional and erosional	2
冲刷型 Erosional	3
生活习性 Habit	
掘穴者 Burrowers	1
攀爬者 Climbers	2
匍匐者 Sprawlers	3
附着者 Clingers	4
游泳者 Swimmers	5
滑行者 Skaters	6
个体大小 Body size	
小 Small (< 9 mm)	1
中等 Medium (9–16 mm)	2
大 Large (> 16 mm)	3

RaoQ)。RaoQ指数结合了物种相对多度和物种间的成对功能差异性, 表达两个随机选择个体间的性状平均差异性(Laliberté & Legendre, 2010); RaoQ指数可视为Simpson多样性指数在功能多样性维度的扩展(Shimatani, 2001), 当所有物种间无共享性状时, Simpson多样性指数值即代表了RaoQ指数能达到的最大值(de Bello et al, 2006)。(3)功能均匀度指数(functional evenness, FEve)。FEve指数测量了物种性状在性状空间的分布规律, 值越高意味着物种性状的分布越均匀(Mason et al, 2005); FEve指数与物种均匀度指数相似, 两者分别从功能性状和分类维度

描述了物种分布规律。

1.3.3 多样性海拔格局分析

应用线性模型和二次回归模型拟合局部和区域尺度多样性指数的海拔梯度格局;局部尺度海拔格局即点位多样性指数对点位海拔的响应,区域尺度海拔格局即区域尺度多样性指数对区域海拔段中点的响应。选择赤池系数(Akaike's Information Criterion, AICc)较小且 F 检验显著($P < 0.1$)的模型为最佳拟合模型(Yamaoka et al, 1978; Mayor et al, 2017)。分析前使用广义线性模型(generalized linear models, GLM)拟合区域尺度多样性指数对海拔段采样点位数量、平均空间距离和平均纬度的响应,综合分析区域海拔段采样强度和纬度梯度对生物多样性海拔格局的影响。其中,采样点位数量即每个海拔段的采样点位数,点位平均空间距离为海拔段内所有点位欧几里得距离(Euclidean distance)的平均值,平均纬度为海拔段内所有点位的纬度平均值。使用Poisson分布拟合分类多样性指数,使用高斯分布拟合功能多样性指数(Jyväsjarvi et al, 2018)。当GLM呈显著水平($P < 0.05$)时,说明海拔段间的采样点位数量、平均空间距离和平均纬度对多样性指数影响显著,进一步计算多样性指数残差用于后续分析;当GLM呈现非显著水平($P > 0.05$)时,说明以上因素对多样性指数无显著影响,则使用原始多样性指数用于海拔格局分析。

采用R 3.6.1软件vegan功能包的diversity函数计算分类多样性指数,通过FD功能包的dbFD函数计算功能多样性指数,使用MuMIn功能包计算AICc值,应用ggplot2程序包绘图。

2 结果

2.1 水生昆虫物种组成

共鉴定水生昆虫277个分类单元,隶属10目102科;其中,双翅目(23科51分类单元)、鞘翅目(16科50分类单元)、毛翅目(20科48分类单元)、蜉蝣目(13科46分类单元)和蜻蜓目(12科46分类单元)为丰富度较高的优势类群,分别占总分类单元数的18.4%、18.1%、17.3%、16.6%和16.6%。所有2-4级溪流水生昆虫群落结构间无显著差异(附录1)。

2.2 分类多样性指数的海拔分布格局

区域尺度下,仅物种丰富度指数对海拔段间的采样点位数量、平均空间距离和平均纬度的响应关

系显著(附录2)。所有分类多样性指数中,仅Simpson多样性指数同时在局部和部分区域尺度呈现显著海拔分布特征,所有分类多样性指数在不同区域尺度下沿海拔梯度分布存在一致性(表3,图2)。物种丰富度指数在所有空间尺度均无显著的海拔分布特征,海拔格局从局部尺度的弱“U”型,变化为区域尺度下不显著单调递减趋势。Simpson多样性指数在局部和区域(除250 m海拔段)尺度沿海拔梯度变化均表现出“U”型趋势,在中海拔部分局部尺度的指数值较低,最低值出现在1,500-2,500 m海拔范围内;随着空间尺度增大,Simpson多样性指数与海拔间的显著关系逐渐降低。物种均匀度指数在局部尺度下随海拔梯度的变化表现出显著单调递减趋势,而区域尺度下均未表现出显著的变化趋势。

2.3 功能多样性指数海拔分布格局

区域尺度下,所有功能多样性指数对海拔段采样点位数量、平均空间距离和平均纬度均无显著响应关系(附录2)。所有功能多样性指数的海拔格局在局部和区域尺度均存在差异性,但所有功能多样性指数在区域尺度下沿海拔梯度分布存在一致性(表3,图2)。局部尺度dbFD指数沿海拔梯度表现出不显著的单调递增趋势;在区域尺度对海拔梯度变化存在显著响应关系,随海拔带宽度的增加,由近单调递减趋势的“U”型关系转变为单调递减的趋势。RaoQ指数沿海拔梯度由局部尺度的单调递减趋势,变化为100 m和150 m海拔带区域尺度的显著“U”型趋势,到200 m和250 m海拔带区域尺度的不显著“U”型趋势。FEve指数在所有空间尺度沿海拔梯度均呈现显著分布特征,在局部尺度沿海拔梯度呈现单调递减趋势,但在所有区域尺度下沿海拔梯度表现为单调递增趋势。

3 讨论

当前对水生昆虫群落多样性海拔格局的研究多集中在单一尺度的分类多样性(例如Wang et al, 2011; Castro et al, 2019)、或单个类群的个体大小性状分布(例如Vamosi et al, 2007; Cressa et al, 2008)等方面,对群落分类多样性和功能多样性海拔分布格局的空间差异研究缺乏深入的认识。了解生物多样性对空间尺度的响应,有助于更清晰地认识群落结构、格局、构建过程及其组织方式,为探究物种共存或物种多样性的形成和维持机制提供重要基础

(Rahbek, 2005)。本研究对云南澜沧江流域水生昆虫群落分类多样性和功能多样性海拔格局的空间差异研究表明, 水生昆虫群落多样性指数海拔格局对局部和区域尺度存在空间依赖性(Jacobsen, 2004; Rahbek, 2005); 在区域尺度下, 分类多样性和功能

多样性指数的海拔格局存在一定程度的一致性。

局部尺度水生昆虫物种丰富度指数对海拔梯度无显著响应关系(Flowers, 1991), 但区域尺度物种丰富度指数沿海拔递减的格局特征在水生昆虫中较为普遍(Jacobsen, 2003; Cárcamo et al, 2019)。已

表3 不同空间尺度下水生昆虫群落多样性指数与海拔的线性和二次回归模型

Table 3 Linear and quadratic model fitting relationships of diversity indices and elevation at different spatial scales

空间尺度 Spatial scale		线性模型 Linear model (L)			二次回归模型 Quadratic model (Q)			选择模型 Model selection
多样性指数 Diversity index		解释量 Adjusted R ²	P	赤池系数 AICc	解释量 Adjusted R ²	P	赤池系数 AICc	
局部尺度 Local scale								
	物种丰富度指数 Species richness index	<0.001	0.418	1,218.2	0.01	0.166	1,217.2	NS
	Simpson多样性指数 Simpson diversity index	0.04	0.010	-136.6	0.05	0.001	-137.4	Q
	物种均匀度指数 Species evenness index	0.06	0.001	-152.6	0.07	0.002	-152.0	L
	树状图功能多样性指数 Dendrogram-based functional diversity index (dbFD)	<0.001	0.633	364.0	<0.001	0.477	364.7	NS
	Rao二次熵指数 Rao's Quadratic index (RaoQ)	0.02	0.057	-516.4	0.02	0.074	-516.0	L
	功能均匀度指数 Functional evenness index (FEve)	0.01	0.079	-284.8	0.01	0.136	-283.7	L
区域尺度 Regional scale								
100 m	物种丰富度指数 Species richness index	<0.001	0.68	218.7	<0.001	0.50	219.3	NS
	Simpson多样性指数 Simpson diversity index	0.20	0.015	-56.6	0.28	0.011	-58.3	Q
	物种均匀度指数 Species evenness index	<0.001	0.450	-53.2	0.01	0.355	-52.9	NS
	树状图功能多样性指数 Dendrogram-based functional diversity index (dbFD)	0.52	<0.001	70.6	0.57	<0.001	68.7	Q
	Rao二次熵指数 Rao's Quadratic index (RaoQ)	0.10	0.064	-120.5	0.24	0.020	-123.6	Q
	功能均匀度指数 Functional evenness index (FEve)	0.19	0.017	-73.6	0.17	0.048	-72.2	L
150 m	物种丰富度指数 Species richness index	<0.001	0.33	143.4	<0.001	0.53	145.0	NS
	Simpson多样性指数 Simpson diversity index	0.10	0.116	-35.9	0.29	0.035	-39.1	Q
	物种均匀度指数 Species evenness index	<0.001	0.512	-40.0	0.16	0.112	-42.8	NS
	树状图功能多样性指数 Dendrogram-based functional diversity index (dbFD)	0.76	<0.001	27.9	0.82	<0.001	23.8	Q
	Rao二次熵指数 Rao's Quadratic index (RaoQ)	<0.001	0.351	-82.0	0.20	0.081	-85.1	Q
	功能均匀度指数 Functional evenness index (FEve)	0.18	0.052	-55.2	0.12	0.153	-53.2	L
200 m	物种丰富度指数 Species richness index	<0.001	0.77	116.1	<0.001	0.92	118.0	NS
	Simpson多样性指数 Simpson diversity index	0.22	0.059	-27.8	0.34	0.051	-29.1	Q
	物种均匀度指数 Species evenness index	0.02	0.285	-30.2	0.14	0.191	-31.1	NS
	树状图功能多样性指数 Dendrogram-based functional diversity index (dbFD)	0.75	<0.001	26.4	0.80	<0.001	24.2	Q
	Rao二次熵指数 Rao's Quadratic index (RaoQ)	0.06	0.208	-62.9	0.22	0.114	-64.5	NS
	功能均匀度指数 Functional evenness index (FEve)	0.31	0.027	-42.4	0.25	0.099	-40.4	L
250 m	物种丰富度指数 Species richness index	<0.001	0.66	86.4	<0.001	0.91	88.4	NS
	Simpson多样性指数 Simpson diversity index	<0.001	0.455	-18.0	0.07	0.311	-18.5	NS
	物种均匀度指数 Species evenness index	<0.001	0.964	-21.1	0.02	0.381	-21.7	NS
	树状图功能多样性指数 Dendrogram-based functional diversity index (dbFD)	0.82	<0.001	20.1	0.82	<0.001	20.6	L
	Rao二次熵指数 Rao's Quadratic index (RaoQ)	<0.001	0.773	-49.9	0.04	0.351	-50.7	NS
	功能均匀度指数 Functional evenness index (FEve)	0.26	0.062	-35.8	0.19	0.181	-33.9	L

NS表示无显著解释模型。NS indicates non-significant model selected.

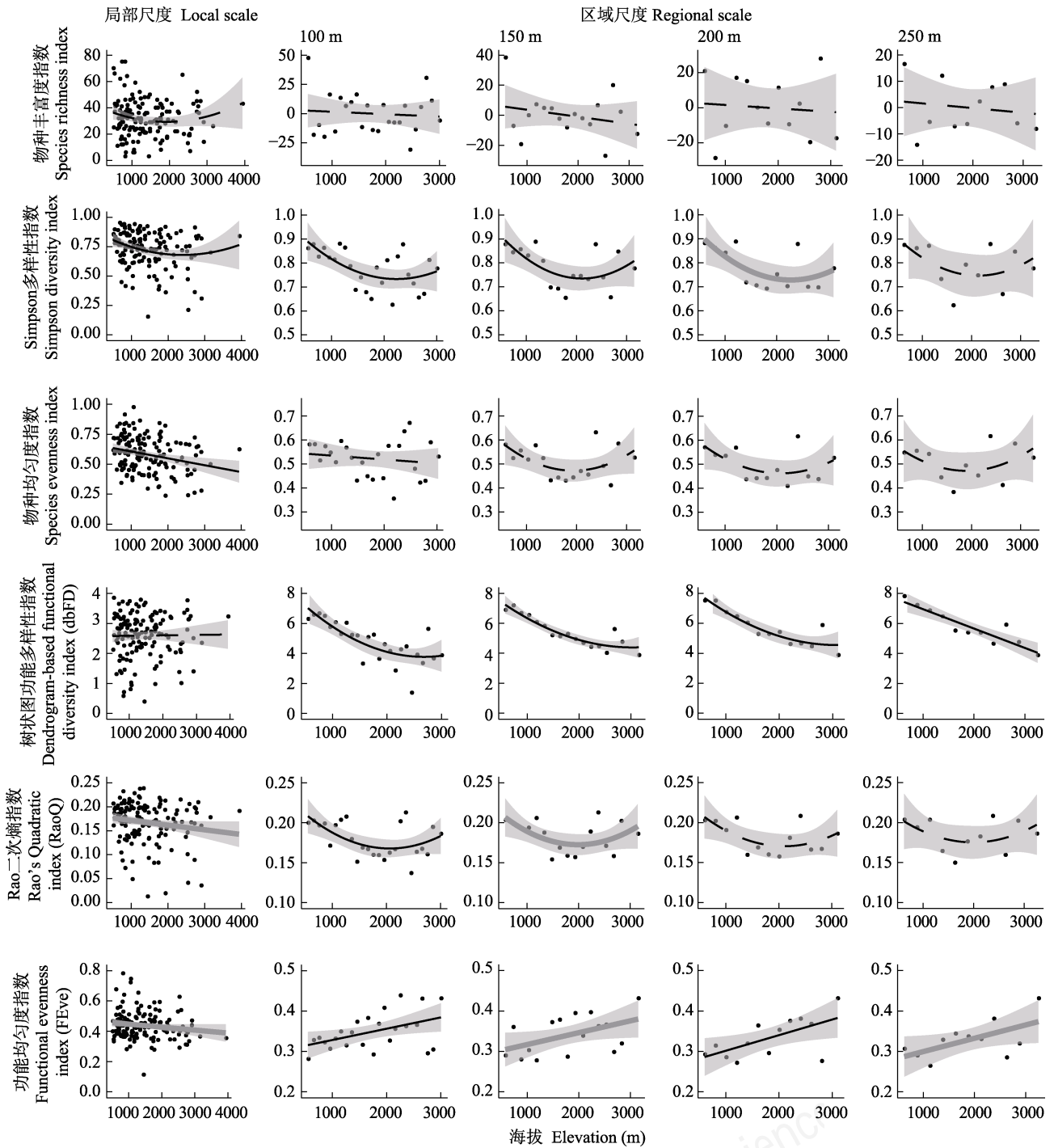


图2 局部尺度和区域尺度(100 m、150 m、200 m和250 m海拔段)水生昆虫群落分类多样性和功能多样性指数的海拔格局。黑色实线表示多样性指数对海拔梯度存在极显著($P < 0.01$)和显著($P < 0.05$)的线性或二次响应关系,灰色实线表示轻微显著($P < 0.1$)的线性或二次响应关系,黑色虚线表示无显著($P > 0.1$)的线性或二次响应关系。

Fig. 2 The relationship between taxonomic and functional diversity indices and elevation at local and regional (elevational band across 100 m, 150 m, 200 m, and 250 m) scales. Black solid line indicates highly significant ($P < 0.01$) and significant ($P < 0.05$) linear or quadratic relationships, grey solid line indicates marginally significant ($P < 0.1$) linear or quadratic relationships, and black dotted line indicates non-significant ($P > 0.1$) linear or quadratic relationships.

有研究表明物种丰富度和功能丰富度存在一定程度的相关关系(例如Edie et al, 2018),当物种丰富度

和dbFD指数相关性较高时表明群落间物种功能冗余度较低(Natalia et al, 2019)。本研究发现物种丰富

度指数和dbFD指数在局部尺度沿海拔梯度分别呈现弱“U”型和不显著的单调递增趋势,但随区域尺度海拔带宽度的增加,物种丰富度指数和dbFD指数的区域尺度海拔格局呈现递减趋势;可能表明澜沧江流域区域尺度间溪流水生昆虫类群功能冗余度较低,即区域尺度下不同物种扮演较为独立的生态功能(Mouchet et al, 2010)。物种组成通常反映了区域过程(物种扩散)和局部过程(竞争、生境异质性)相互作用的结果(Szava-Kovats et al, 2013)。沿海拔梯度升高,区域尺度下水温(Vinson & Hawkins, 2003)和降水(张景华等, 2015)等因素急剧变化(Wang et al, 2011),环境过滤作用导致适宜生态位减少,群落生物性状组成逐渐同质化(Poff et al, 2006),引起区域尺度丰富度和dbFD指数沿海拔梯度呈降低趋势。但局部尺度下,溪流生态系统提供的生物栖境异质性(如底质、水文条件和水体理化性质等)(Li FQ et al, 2012; Li ZF et al, 2019),可能在一定程度抵消了区域生态位减少的影响,因此局部尺度物种丰富度和dbFD指数的海拔格局并没有呈现显著变化趋势。

尽管当前水生昆虫多样性海拔格局的研究较少涉及Simpson多样性和RaoQ指数,但其他类群已有相关报道;如Carvajal-Quintero等(2015)对安第斯山脉鱼类多样性研究发现,250–500 m区域尺度Simpson多样性指数呈单调递减趋势。本研究发现Simpson多样性指数和RaoQ指数的区域尺度海拔格局呈现一定程度的一致性;同时,随区域尺度海拔带宽度的增加,海拔格局均转变为不显著,这种一致性可能来源于Simpson多样性指数与RaoQ指数的高相关关系(Wong & Dowd, 2015)。然而,Simpson多样性指数在局部尺度的海拔格局最为显著,RaoQ指数则在100 m海拔带区域尺度呈现显著的海拔分布格局,这种差异性可能源于分类多样性和功能多样性指数对环境因子过滤作用和空间距离的响应差异性(McConkey & O’Farrill, 2015)。如Tinoco等(2018)研究发现,景观尺度下蜂鸟的RaoQ指数对土地利用变化的敏感程度高于Simpson多样性指数。对淡水大型底栖动物来说,Simpson多样性指数和RaoQ指数均对物理栖境(如底质组成)和水体理化环境(如溶解氧)呈显著的响应关系,但空间距离同时也是影响RaoQ指数空间分布的重要因素(Wang et al, 2018; Li ZF et al, 2019)。

本文发现局部尺度物种均匀度指数沿海拔呈现单调递减趋势(Mejias, 2011),FEve指数也呈现单调递减的海拔格局,可能是由于局部尺度FEve与物种均匀度指数呈显著正相关关系所致(陈静等, 2018);但Wang等(2011)研究发现局部尺度下底栖动物物种均匀度指数沿海拔梯度呈现上升趋势。区域尺度下FEve指数表现出显著的单调递增趋势,但物种均匀度指数未表现出显著的海拔分布格局,表明水生昆虫群落组成在区域海拔段的分布均匀程度较为相似。FEve指数衡量物种性状在已占据生态位空间的分布均匀程度,值越高表明物种对环境资源的利用越充分(Mason et al, 2005)。伴随着海拔梯度上升,环境过滤作用持续增强,导致适合物种生存的生态位减少,因此在局部尺度的水生昆虫空间分布均匀度持续降低;但区域尺度下物种性状对资源的利用更为充分,因此区域尺度FEve指数沿海拔梯度呈现递增趋势。

本研究定量分析了多重空间尺度下水生昆虫物种多样性的海拔格局,结果表明水生昆虫分类多样性和功能多样性海拔格局存在空间尺度依赖性。在不同空间尺度共同作用的多重生态学过程和环境因素(如环境过滤、扩散作用和物种相互作用等)(McGill, 2010; McGill et al, 2015),是影响物种多样性海拔格局空间尺度依赖性的可能原因;进一步分析不同空间尺度下分类多样性和功能多样性海拔格局的影响因素,是理解区域多样性现状,并制定生物多样性保护对策的重要基础。

参考文献

- Cárcamo JR, Contador T, Gañán M, Troncoso CP, Márquez AM, Convey P, Kennedy J, Rozzi R (2019) Altitudinal gradients in Magellanic sub-Antarctic lagoons: The effect of elevation on freshwater macroinvertebrate diversity and distribution. *PeerJ*, 7, e7128.
- Carvajal-Quintero JD, Escobar F, Alvarado F, Villa-Navarro FA, Jaramillo-Villa Ú, Maldonado-Ocampo JA (2015) Variation in freshwater fish assemblages along a regional elevation gradient in the northern Andes, Colombia. *Ecology and Evolution*, 5, 2608–2620.
- Castro DMP, Callisto M, Solar RRC, Macedo DR, Fernandes GW (2019) Beta diversity of aquatic invertebrates increases along an altitudinal gradient in a Neotropical mountain. *Biotropica*, 51, 399–411.
- Cheng B, Wang X, Xu YQ, Yang ZJ, Liu DF, Ma J (2018) Bacterioplankton community structure in the Lancang River

- Basin and analysis of driving environmental factors. *Environmental Science*, 39, 186–196. (in Chinese with English abstract) [程豹, 望雪, 徐雅倩, 杨正健, 刘德富, 马骏 (2018) 澜沧江流域浮游细菌群落结构特征及驱动因子分析. *环境科学*, 39, 186–196.]
- Chen J, Jiang WX, He SS, Wang HK, Zhuo LL, Chen Q (2018) Study of macroinvertebrate species and functional diversity in the New Xue River, Shandong Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 340–348. (in Chinese with English abstract) [陈静, 蒋万祥, 贺诗水, 王洪凯, 卓丽玲, 陈青 (2018) 新薛河底栖动物物种多样性与功能多样性研究. *生态学报*, 38, 340–348.]
- Colzani E, Siqueira T, Suriano MT, Roque FO (2013) Responses of aquatic insect functional diversity to landscape changes in Atlantic Forest. *Biotropica*, 45, 343–350.
- Covich AP, Palmer MA, Crowl TA (1999) The role of benthic invertebrate species in freshwater ecosystems: Zoobenthic species influence energy flows and nutrient cycling. *BioScience*, 49, 119–127.
- Cressa C, Maldonado V, Segnini S, Chacon MM (2008) Size variation with elevation in adults and larvae of some Venezuelan stoneflies (Insecta: Plecoptera: Perlidae). *Aquatic Insects*, 30, 127–134.
- de Bello F, Lepš J, Sebastià MT (2006) Variations in species and functional plant diversity along climatic and grazing gradients. *Ecography*, 29, 801–810.
- de Mendoza G, Traunspurger W, Palomo A, Catalan J (2017) Nematode distributions as spatial null models for macroinvertebrate species richness across environmental gradients: A case from mountain lakes. *Ecology and Evolution*, 7, 3016–3028.
- Ding N, Yang WF, Zhou YL, González-Bergonzoni I, Zhang J, Chen K, Vidal N, Jeppesen E, Liu ZW, Wang BX (2017) Different responses of functional traits and diversity of stream macroinvertebrates to environmental and spatial factors in the Xishuangbanna watershed of the upper Mekong River Basin, China. *Science of the Total Environment*, 574, 288–299.
- Dohet A, Hlúbiková D, Wetzel CE, L'Hoste L, Iffly JF, Hoffmann L, Ector L (2015) Influence of thermal regime and land use on benthic invertebrate communities inhabiting headwater streams exposed to contrasted shading. *Science of the Total Environment*, 505, 1112–1126.
- Eddie SM, Jablonski D, Valentine JW (2018) Contrasting responses of functional diversity to major losses in taxonomic diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 115, 732–737.
- Feng JM, Mao GQ, Li ZG (2012) Latitudinal patterns of floristic elements of seed plants in Lancang River in Yunnan, Southwest China. *Ecology and Environmental Sciences*, 21, 1928–1934. (in Chinese with English abstract) [冯建孟, 毛光权, 李珍贵 (2012) 澜沧江流域(云南段)种子植物区系成分的纬度分布格局. *生态环境学报*, 21, 1928–1934.]
- Flowers RW (1991) Diversity of stream-living insects in northwestern Panamá. *Journal of the North American Benthological Society*, 10, 322–334.
- Füreder L, Ettinger R, Boggero A, Thaler B, Thies H (2006) Macroinvertebrate diversity in Alpine lakes: Effects of altitude and catchment properties. *Hydrobiologia*, 562, 123–144.
- Gaston KJ (2000) Global patterns in biodiversity. *Nature*, 405, 220–227.
- Gill BA, Harrington RA, Kondratieff BC, Zamudio KR, LeRoy PN, Chris FW (2014) Morphological taxonomy, DNA barcoding, and species diversity in southern Rocky Mountain headwater streams. *Freshwater Science*, 33, 288–301.
- González-Maya JF, Viquez-R LR, Arias-Alzate A, Belant JL, Ceballos G (2016) Spatial patterns of species richness and functional diversity in Costa Rican terrestrial mammals: Implications for conservation. *Diversity and Distributions*, 22, 43–56.
- He YL, Zhang YP (2004) The climate characteristics and change trends on basins of Lancangjiang valley in Yunnan Province. *Journal of Mountain Science*, 22, 539–548. (in Chinese with English abstract) [何云玲, 张一平 (2004) 澜沧江干流河谷盆地气候特征及变化趋势. *山地学报*, 22, 539–548.]
- Hu B, Cui BS, Yang ZF, Wang J, Zhai HJ, Yao M (2006) Calculation of ecological water requirements for in-stream in the Lancang River, Yunnan Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 26, 163–173. (in Chinese with English abstract) [胡波, 崔保山, 杨志峰, 王娟, 翟红娟, 姚敏 (2006) 澜沧江(云南段)河道生态需水量计算. *生态学报*, 26, 163–173.]
- Hughes RM, Peck DV (2008) Acquiring data for large aquatic resource surveys: The art of compromise among science, logistics, and reality. *Journal of the North American Benthological Society*, 27, 837–859.
- Jacobsen D (2003) Altitudinal changes in diversity of macroinvertebrates from small streams in the Ecuadorian Andes. *Archiv für Hydrobiologie*, 158, 145–167.
- Jacobsen D (2004) Contrasting patterns in local and zonal family richness of stream invertebrates along an Andean altitudinal gradient. *Freshwater Biology*, 49, 1293–1305.
- Jiang Y, Gao JX, Ou XK (2006) Change of land use pattern and analysis of environment impact of Lancang watershed in Yunnan. *Research of Environmental Sciences*, 19, 46–51. (in Chinese with English abstract) [姜昀, 高吉喜, 欧晓昆 (2006) 澜沧江流域云南段土地利用格局变化及环境影响分析. *环境科学研究*, 19, 46–51.]
- Jyväsjarvi J, Virtanen R, Ilmonen J, Paasivirta L, Muotka T (2018) Identifying taxonomic and functional surrogates for spring biodiversity conservation. *Conservation Biology*, 32, 883–893.
- Laiolo P, Pato J, Obeso JR (2018) Ecological and evolutionary drivers of the elevational gradient of diversity. *Ecology*

- Letters, 21, 1022–1032.
- Laiolo P, Seoane J, Obeso JR, Illera JC (2017) Ecological divergence among young lineages favours sympatry, but convergence among old ones allows coexistence in syntopy: The scale of limiting similarity. *Global Ecology and Biogeography*, 26, 601–608.
- Laliberté E, Legendre P (2010) A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits. *Ecology*, 91, 299–305.
- Li FQ, Chung N, Bae MJ, Kwon YS, Park YS (2012) Relationships between stream macroinvertebrates and environmental variables at multiple spatial scales. *Freshwater Biology*, 57, 2107–2124.
- Li QY, Wang XP (2013) Elevational pattern of species richness in the Three Gorges region of the Yangtze River: Effect of climate, geometric constraints, area and topographical heterogeneity. *Biodiversity Science*, 21, 141–152. (in Chinese with English abstract) [李巧燕, 王襄平 (2013) 长江三峡库区物种多样性的垂直分布格局: 气候、几何限制、面积及地形异质性的影响. *生物多样性*, 21, 141–152.]
- Li SL, Yi MH, Chen K, Ding N, Wang BX, Yao HR (2018) Differences in responses of macroinvertebrate traits and functional diversity to environmental variables at different spatial scales between ecoregions in the Wei River basin, China. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 2566–2578. (in Chinese with English abstract) [李胜利, 易茂红, 陈凯, 丁宁, 王备新, 姚花荣 (2018) 渭河底栖动物性状和功能对空间尺度环境变量响应的生态区差异性. *生态学报*, 38, 2566–2578.]
- Li ZF, Jiang XM, Wang J, Meng XJ, Heino J, Xie ZC (2019) Multiple facets of stream macroinvertebrate alpha diversity are driven by different ecological factors across an extensive altitudinal gradient. *Ecology and Evolution*, 9, 1306–1322.
- Lu MM, Huang XC, Ci XQ, Yang GP, Li J (2014) Phylogenetic community structure of subtropical forests along elevational gradients in Ailao Mountains of southwest China. *Biodiversity Science*, 22, 438–448. (in Chinese with English abstract) [卢孟孟, 黄小翠, 慈秀芹, 杨国平, 李捷 (2014) 沿海拔梯度变化的哀牢山亚热带森林群落系统发育结构. *生物多样性*, 22, 438–448.]
- Mason NWH, Moullot D, Lee WG, Wilson JB (2005) Functional richness, functional evenness and functional divergence: The primary components of functional diversity. *Oikos*, 111, 112–118.
- Mayor J, Sanders N, Classen A, Bardgett RD, Clément JC, Fajardo A, Lavorel S, Sundqvist MK, Bahn M, Chisholm C, Cieraad E, Gedalof Z, Grigulis K, Kudol G, Oberski DL, Wardle DA (2017) Elevation alters ecosystem properties across temperate treelines globally. *Nature*, 542, 91–95.
- McConkey KR, O’Farrill G (2015) Cryptic function loss in animal populations. *Trends in Ecology & Evolution*, 30, 182–189.
- McGill BJ (2010) Matters of scale. *Science*, 328, 575–576.
- McGill BJ, Dornelas M, Gotelli NJ, Magurran AE (2015) Fifteen forms of biodiversity trend in the Anthropocene. *Trends in Ecology & Evolution*, 30, 104–113.
- Mejias TAC (2011) Benthic Macroinvertebrates of Temperate, Sub-Antarctic Streams: The Effects of Altitudinal Zoning and Temperature on the Phenology of Aquatic Insects Associated to the Robalo River, Navarino Island (55°S), Chile. PhD dissertation, University of North Texas, Denton.
- Mermillod-Blondin F (2011) The functional significance of bioturbation and biodeposition on biogeochemical processes at the water–sediment interface in freshwater and marine ecosystems. *Journal of the North American Benthological Society*, 30, 770–778.
- Morse JC, Yang LF, Tian LX (1994) Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality. Hohai University Press, Nanjing.
- Mouchet MA, Villéger S, Mason NW, Moullot D (2010) Functional diversity measures: An overview of their redundancy and their ability to discriminate community assembly rules. *Functional Ecology*, 24, 867–876.
- Natalia MRC, Miguel BS, Lavariaga M, Moreno CE (2019) Spatial incongruence in the species richness and functional diversity of cricetid rodents. *PLoS ONE*, 14, e0217154.
- Petchey OL, Gaston KJ (2002) Functional diversity (FD), species richness and community composition. *Ecology Letters*, 5, 402–411.
- Pielou EC (1966) The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology*, 13, 131–144.
- Poff NL, Olden JD, Vieira NKM, Finn DS, Simmons MP, Kondratieff BC (2006) Functional trait niches of North American lotic insects: Traits-based ecological applications in light of phylogenetic relationships. *Journal of the North American Benthological Society*, 25, 730–755.
- Rahbek C (2005) The role of spatial scale and the perception of large-scale species-richness patterns. *Ecology Letters*, 8, 224–239.
- Shimatani K (2001) On the measurement of species diversity incorporating species differences. *Oikos*, 93, 135–147.
- Simpson EH (1949) Measurement of diversity. *Nature*, 163, 688.
- Song PQ, Lin LS, Li Y, Zhong ZH, Zhang R (2015) Species composition and stability of nekton community structure in Sandu Bay, Fujian Province. *Biodiversity Science*, 23, 519–526. (in Chinese with English abstract) [宋普庆, 林龙山, 李渊, 钟指挥, 张然 (2015) 福建三都澳游泳动物物种组成及群落结构稳定性. *生物多样性*, 23, 519–526.]
- Sundqvist MK, Sanders NJ, Wardle DA (2013) Community and ecosystem responses to elevational gradients: Processes, mechanisms, and insights for global change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 44, 261–280.
- Szava-Kovats RC, Argo R, Meelis P (2013) Pattern without bias: Local-regional richness relationship revisited. *Ecology*,

- 94, 1986–1992.
- Tang ZY, Fang JY (2004) A review on the elevational patterns of plant species diversity. *Biodiversity Science*, 12, 20–28. (in Chinese with English abstract) [唐志尧, 方精云 (2004) 植物物种多样性的垂直分布格局. *生物多样性*, 12, 20–28.]
- Tinoco BA, Santillán VE, Graham CH (2018) Land use change has stronger effects on functional diversity than taxonomic diversity in tropical Andean hummingbirds. *Ecology and Evolution*, 8, 3478–3490.
- Usseglio-Polatera P, Bournaud M, Richoux P, Tachet H (2000) Biological and ecological traits of benthic freshwater macroinvertebrates: Relationships and definition of groups with similar traits. *Freshwater Biology*, 43, 175–205.
- Vamosi SM, Naydani CJ, Vamosi JC (2007) Body size and species richness along geographical gradients in Albertan diving beetle (Coleoptera: Dytiscidae) communities. *Canadian Journal of Zoology*, 85, 443–449.
- Villéger S, Mason NWH, Mouillot D (2008) New multidimensional functional diversity indices for a multifaceted framework in functional ecology. *Ecology*, 89, 2290–2301.
- Villéger S, Miranda JR, Hernández DF, Mouillot D (2010) Contrasting changes in taxonomic vs. functional diversity of tropical fish communities after habitat degradation. *Ecological Applications*, 20, 1512–1522.
- Vinson MR, Hawkins CP (2003) Broad-scale geographical patterns in local stream insect genera richness. *Ecography*, 26, 751–767.
- Wang C, Li B, Xie SG, Jin L, Zhang YG (2013) The macrobenthic communities and distribution of the Lancang River. *Freshwater Fisheries*, 43, 37–43. (in Chinese with English abstract) [王川, 李斌, 谢嗣光, 金丽, 张耀光 (2013) 澜沧江大型底栖动物群落结构及分布格局. *淡水渔业*, 43, 37–43.]
- Wang JJ, Soininen J, Zhang Y, Wang BX, Yang XD, Shen J (2011) Contrasting patterns in elevational diversity between microorganisms and macroorganisms. *Journal of Biogeography*, 38, 595–603.
- Wang J, Jiang XM, Li ZF, Meng XL, Heino J, Xie ZC, Wang XM, Yu J (2018) Changes in multiple facets of macroinvertebrate alpha diversity are linked to afforestation in a subtropical riverine natural reserve. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 36124–36135.
- Wong MC, Dowd M (2015) Patterns in taxonomic and functional diversity of macrobenthic invertebrates across sea-grass habitats: A case study in Atlantic Canada. *Estuaries and Coasts*, 38, 2323–2336.
- Yamaoka K, Nakagawa T, Uno T (1978) Application of Akaike's information criterion (AIC) in the evaluation of linear pharmacokinetic equations. *Journal of Pharmacokinetics and Biopharmaceutics*, 6, 165–175.
- Yang Y, Han J, Liu Y, Zhongyong CR, Shi SL, Sina CL, Xu Y, Ying LX, Zhang WJ, Shen ZH (2016) A comparison of the altitudinal patterns in plant species diversity within the dry valleys of the Three Parallel Rivers region, northwestern Yunnan. *Biodiversity Science*, 24, 440–452. (in Chinese with English abstract) [杨阳, 韩杰, 刘晔, 忠永茨仁, 石松林, 斯那此里, 许玥, 应凌霄, 张婉君, 沈泽昊 (2016) 三江并流地区干旱河谷植物物种多样性海拔梯度格局比较. *生物多样性*, 24, 440–452.]
- Zhang JH, Feng ZM, Jiang LG, Yang YZ (2015) Analysis of the correlation between NDVI and climate factors in the Lancang River basin. *Journal of Natural Resources*, 30, 1425–1435. (in Chinese with English abstract) [张景华, 封志明, 姜鲁光, 杨艳昭 (2015) 澜沧江流域植被NDVI与气候因子的相关性分析. *自然资源学报*, 30, 1425–1435.]

(责任编辑: 陈圣宾 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 澜沧江不同溪流等级采样点位的水生昆虫非参数多维尺度分析

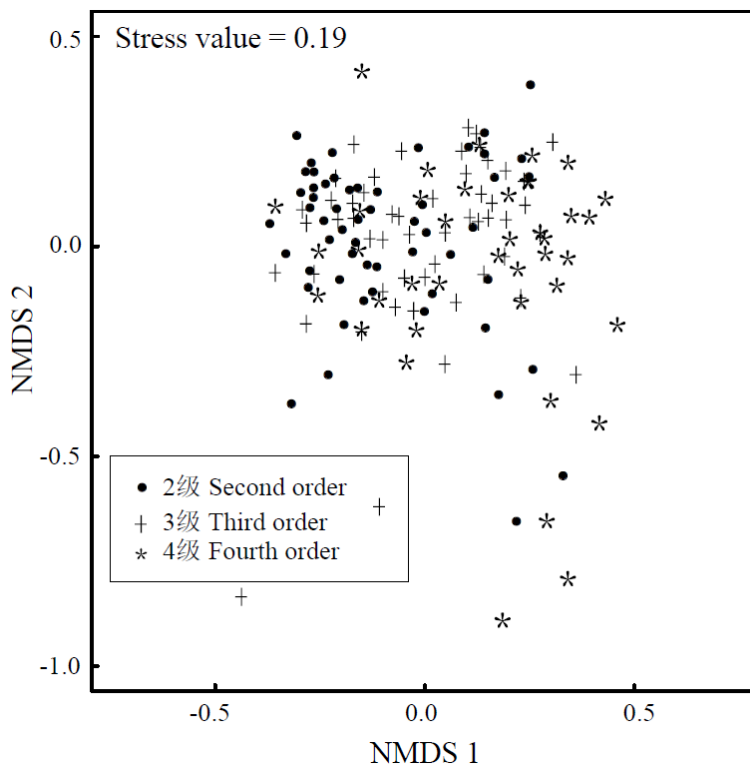
Appendix 1 Nonparametric multidimensional scaling (NMDS) ordination of sampling sites collected from different stream orders using aquatic insect assemblages

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2019359-1.pdf>

附录2 基于广义线性模型(GLM)的区域尺度水生昆虫多样性指数响应海拔段采样点位数量、平均空间距离和平均纬度的P值

Appendix 2 The *P* values of generalized linear models (GLMs) regressing taxonomic and functional diversity indices against sampling site numbers, average Euclidean distances, and average latitude across elevational bands at regional scales

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2019359-2.pdf>



附录1 澜沧江不同溪流等级采样点位的水生昆虫非参数多维尺度分析

Appendix 1 Nonparametric multidimensional scaling (NMDS) ordination of sampling sites collected from different stream orders using aquatic insect assemblages

附录2 基于广义线性模型(GLM)的区域尺度水生昆虫多样性指数响应海拔段采样点位数量、平均空间距离和平均纬度的P值
Appendix 2 The P values of generalized linear models (GLMs) regressing taxonomic and functional diversity indices against sampling site numbers, average Euclidean distances, and average latitude across elevational bands at regional scales

多样性指数 Diversity index	P			
	100 m	150 m	200 m	250 m
分类多样性指数 Taxonomic diversity index				
物种丰富度指数 Species richness index	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Simpson多样性指数 Simpson diversity index	0.99	0.99	0.94	0.98
物种均匀度指数 Species evenness index	0.99	0.96	0.95	0.99
功能多样性指数 Functional diversity index				
树状图功能多样性指数 Dendrogram-based functional diversity index (dbFD)	0.06	0.49	0.49	0.53
Rao二次熵指数 Rao's Quadratic index (RaoQ)	0.08	0.06	0.09	0.49
功能均匀度指数 Functional evenness index (FEve)	0.06	0.08	0.06	0.08



•生物编目•

中国造礁石珊瑚分类厘定

黄林韬^{1,3,4,5} 黄 晖^{1,2,3,4*} 江 雷^{1,2}

1 (中国科学院南海海洋研究所热带海洋生物资源与生态重点实验室, 广州 510301)

2 (中国科学院南海生态环境工程创新研究院, 广州 510301)

3 (中国科学院海南热带海洋生物实验站, 海南三亚 572000)

4 (海南省热带海洋生物技术重点实验室, 海南三亚 572000)

5 (中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 造礁石珊瑚是珊瑚礁框架建造者, 具有维持珊瑚礁生态系统功能和稳定性的重要作用, 其分类对于造礁石珊瑚和珊瑚礁的研究与保护至关重要。目前, 随着分子系统学的不断发展, 造礁石珊瑚的分类体系发生改变, 伴随着出现大量同物异名。近年来也出现许多无中文学名的中国造礁石珊瑚新记录种, 这些都给物种认定和命名带来困难, 阻碍了中国造礁石珊瑚的研究与保护工作。为此, 本文收集了中国造礁石珊瑚物种记录文献资料, 采用最新的造礁石珊瑚分类体系, 确认同物异名, 形成中国造礁石珊瑚物种名录, 并对中国造礁石珊瑚物种的中文名进行统一的规范和命名。结果表明, 中国共有造礁石珊瑚2个类群16科77属445种。与《中国动物志·腔肠动物门·珊瑚虫纲·石珊瑚目·造礁石珊瑚》相比, 科级分类阶元新增7个科, 变更5个科; 属级分类阶元新增26属, 变更1属, 合并3属; 种级分类阶元新增291种, 变更13种, 合并20种, 新命名305个物种的中文名。并且筛选出187个同物异名。此外, 由于造礁石珊瑚分类体系现仍有部分争议, 文章也进行了讨论说明。

关键词: 造礁石珊瑚; 名录; 中国; 生物多样性

A revised taxonomy for Chinese hermatypic corals

Lintao Huang^{1,3,4,5}, Hui Huang^{1,2,3,4*}, Lei Jiang^{1,2}

1 Key Laboratory of Tropical Marine Bio-resources and Ecology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301

2 Innovation Academy of South China Sea Ecology and Environmental Engineering, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301

3 Tropical Marine Biological Research Station in Hainan, Chinese Academy of Sciences, Sanya, Hainan 572000

4 Hainan Key Laboratory of Tropical Marine Biotechnology, Sanya, Hainan 572000

5 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: As the major reef framework builder, hermatypic corals play a key role in maintaining the stability and function of coral reef ecosystems. Understanding the taxonomy of hermatypic corals is critical to furthering research and conservation of reef corals and the ecosystem they construct. The application of molecular and small-scale morphological analyses has identified synonymous species and have challenged the traditional taxonomy of hermatypic corals, which was based merely on skeletal morphology. Moreover, many newly recorded species appeared without Chinese scientific names. These aforementioned issues hinder the progress of research and conservation of hermatypic corals in China. Here, we present a comprehensive species list of all hermatypic corals reported in China by collecting historical records, incorporating revised systematics, confirming synonymous species, and updating Chinese scientific names. Our results show that there are 445 known species of hermatypic corals in China, belonging to 16 families and 77 genera. Compared to *Fauna Sinica · Coelenterata · Anthozoa · Scleractinia · Hermatypic Coral*, we added 291 species, revised 13 species, synonymized 20 species, and designated Chinese name to 305 species. We added 26, revised 1 and synonymized 3 genera, and we added 7 and revised 5 families. Though we

收稿日期: 2019-12-04; 接受日期: 2020-01-19

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0506301)、国家自然科学基金(41676150; 41876192)、广东省基础与应用基础研究基金(2019A1515011532)和中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA13020201; XDA13020402)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: huanghui@scsio.ac.cn

identified 187 synonymous species from historical records, there are still several discrepancies in the current taxonomy. We discuss these discrepancies and explain our classification rationale herein.

Key words: hermatypic coral; checklist; China; biodiversity

造礁石珊瑚(hermatypic/reef-building coral)属于刺胞动物门珊瑚虫纲六放珊瑚亚纲石珊瑚目,其典型特征是具有文石(aragonite)晶型的碳酸钙外骨骼。造礁石珊瑚并不是分类学划分的类群,而是根据其具有珊瑚礁造礁的生态特征划分出来的。造礁石珊瑚通过钙化作用产生的碳酸钙外骨骼会对珊瑚礁的形成以及生境的构建产生巨大贡献。

中国造礁石珊瑚分布广泛,从福建、广东和广西沿岸到海南岛与台湾岛再到南海的诸多岛礁都有其分布。对于中国造礁石珊瑚分类的系统研究,最早是邹仁林等(1975)对海南浅水石珊瑚分类特征进行的描述,并报道了海南岛造礁石珊瑚13科34属和2个亚属的110种和5个亚种。而后邹仁林(2001)根据团队多年调查积累,编著了《中国动物志·腔肠动物门·珊瑚虫纲·石珊瑚目·造礁石珊瑚》一书,其中收录了我国造礁石珊瑚14科54属174种。再者,戴昌凤等对台湾造礁石珊瑚的分类进行系统研究(Dai, 1988; Hoeksema & Dai, 1991; Dai & Lin, 1992; Wallace & Dai, 1997),在2009年编著《台湾石珊瑚志》,共记录台湾岛及其邻近岛屿、东沙群岛和南沙太平岛等的12科65属281种石珊瑚(Dai & Horng, 2009a, b)。

造礁石珊瑚的分类系统几经变化,国际上最开始采用的是Wells (1956)的基于骨骼隔片小梁和隔片形状的分类体系,该体系将石珊瑚分成5个亚目,再基于体壁形态和无性生殖出芽方式等特征划分出33个科(Wells, 1956)。随着标本采集的增加证实了造礁石珊瑚具有环境差异引起的表型可塑性(Veron & Pichon, 1976)。于是,Veron (1995)在Wells (1956)分类系统的基础上,根据古代和现生骨骼结构及活体形态对造礁石珊瑚的分类体系进行了修正,该分类体系得到了同行的广泛认可。Chen等(1995)利用核糖体DNA研究造礁石珊瑚演化过程的结果支持了Veron (1995)提出的新分类体系,《中国动物志·腔肠动物门·珊瑚虫纲·石珊瑚目·造礁石珊瑚》也采用该分类体系。然而,造礁石珊瑚基因型不同引起的种内形态差异(Carlon & Budd, 2002),以及普遍存

在的造礁石珊瑚种间形态界限模糊现象,使得其分类体系依旧存在问题。近年来,分子生物学和微观形态学在造礁石珊瑚物种分类中的运用对Veron (1995)的分类体系提出了挑战(Fukami et al, 2008; Kitahara et al, 2016)。《台湾石珊瑚志》就根据新的研究结果结合Veron (1995)的体系提出了新的分类体系(Dai & Horng, 2009a, b)。根据最新的微形态学和分子生物学综合证据,Kitahara等(2016)提出了全新的分类体系,该体系得到了广泛认可,并被WoRMS (World Register of Marine Species, <http://www.marinespecies.org>)采用(Hoeksema & Cairns, 2020)。

国内学者对造礁石珊瑚分类体系的使用存在较大差异,目前多采用《中国动物志·腔肠动物门·珊瑚虫纲·石珊瑚目·造礁石珊瑚》的体系,也有研究人员选择《台湾石珊瑚志》中的分类体系,还有少部分研究人员采用WoRMS分类体系进行物种报道。由于参照的分类体系不同,使得中国造礁石珊瑚种类学名的确定出现混乱。再者,造礁石珊瑚中文学名的命名也异常杂乱,虽大部分参照《中国动物志·腔肠动物门·珊瑚虫纲·石珊瑚目·造礁石珊瑚》来命名(邹仁林, 2001),但也有部分研究采用《中国海洋生物名录》(刘瑞玉, 2008)、《中国海洋生物种类与分布》(黄宗国, 2008)和《台湾石珊瑚志》(Dai & Horng, 2009a, b)等的中文学名,甚至出现以水族俗称来命名中文学名的现象。近年来随着中国造礁石珊瑚调查广度和深度的不断增加,亦发现了许多新记录种,但尚未有中文学名。上述现象都不利于中国造礁石珊瑚的研究和交流。因此,本文拟对造礁石珊瑚的分类体系进行厘定,确认同物异名,形成中国造礁石珊瑚物种名录,并对中国造礁石珊瑚物种的中文学名进行统一规范和命名。

1 方法

1.1 中国造礁石珊瑚物种初步编目的获取

通过收集1960年以来中国造礁石珊瑚物种调查研究的文献资料及记录,形成中国造礁石珊瑚的

初步编目。

1.2 分类体系的确认

以初步编目为范围对中国造礁石珊瑚分类体系进行确认。科、属阶元主要采用Kitahara等(2016)利用微形态学特征和分子生物学信息获得的全新体系,但由于该研究中未涉及部分属的分类地位,且还存在少部分争议,因此补充参照其他相关文献中提及到的分类阶元归属情况。对于造礁石珊瑚种阶元的分类而言,鹿角珊瑚属(*Acropora*)和同孔珊瑚属(*Isopora*)下物种的分类参照国际上广泛认可的*Staghorn Corals of the World* (Wallace, 1999)及其随后研究(Wallace et al, 2012)进行,石芝珊瑚科(Fungiidae)的物种则参照国际上广泛认可的Hoeksema的研究成果进行(Hoeksema, 1989; Hoeksema & Dai, 1991; Gittenberger et al, 2011),其他造礁石珊瑚种阶元的分类则主要参照*Corals of the World* (Veron, 2000)。

1.3 同物异名的筛查

在中国造礁石珊瑚初步编目的基础上,根据新的分类体系进行同物异名筛查,发现的不存在或有疑问的物种,根据*Scleractinia of Eastern Australia* (Veron & Pichon, 1976, 1980; Veron et al, 1977; Veron, 1982; Veron & Wallace, 1984)、《中国动物志·腔肠动物门·珊瑚虫纲·石珊瑚目·造礁石珊瑚》、《台湾石珊瑚志》和其他相关文献材料进行查证(邹仁林, 2001; Dai & Horng, 2009a, b; Hoeksema & Cairns, 2020),并回溯物种名称变化的历史过程,最终确认同物异名。

1.4 各分类阶元的中文命名

《中国动物志·腔肠动物门·珊瑚虫纲·石珊瑚目·造礁石珊瑚》存在的各分类阶元中文名称依旧沿用(邹仁林, 2001)。若各分类阶元中文名称不存在,则参考《台湾石珊瑚志》(Dai & Horng, 2009a, b)、《中国海洋生物种类与分布》(黄宗国, 2008)和《中国海洋生物名录》(刘瑞玉, 2008)中存在的中文名称结合拉丁文含义重新进行中文命名。

2 结果与讨论

2.1 中国造礁石珊瑚科属阶元调整

基于已有研究和评估,对中国造礁石珊瑚的科属阶元进行调整,详细科属阶元变化情况见附录1。

2.1.1 科级及以上分类阶元调整

Romano和Palumbi (1996)通过线粒体16S rDNA将造礁石珊瑚分为坚实(robust)和复杂(complex)两个类群。其中坚实类群相对坚硬,拥有高度钙化的骨骼,群体通常是板状或团块状;复杂类群的骨骼钙化程度和密度较低,通常形成的是网状疏松结构,且珊瑚群体通常具有较为复杂的结构。随后Fukami等(2008)基于造礁石珊瑚的2个线粒体基因和1个核基因序列再次支持了该分类方式。《台湾石珊瑚志》中也认可这种分类方式(Dai & Horng, 2009a, b)。因此,中国的造礁石珊瑚物种也按照该体系进行划分。而后基于已有研究,本名录对科级分类阶元做了调整。与《中国动物志·腔肠动物门·珊瑚虫纲·石珊瑚目·造礁石珊瑚》相比,科级分类阶元新增7个科,变更5个科。

(1)新增沙珊瑚科(Psammocoridae)和筛珊瑚科(Coscinaeidae)。沙珊瑚属(*Psammocora*)和筛珊瑚属(*Coscinaeae*)在《中国动物志·腔肠动物门·珊瑚虫纲·石珊瑚目·造礁石珊瑚》中属于铁星珊瑚科(Siderastreaeidae),而后的系统发育分析认为这两属和铁星珊瑚科间存在遗传分化,因此将沙珊瑚属和筛珊瑚属提升成为沙珊瑚科和筛珊瑚科(Benzoni et al, 2007, 2012b),本名录采纳。

(2)新增双星珊瑚科(Diploastraeidae)和同星珊瑚科(Plesiastreaeidae),变更蜂巢珊瑚科(Faviidae)。研究发现蜂巢珊瑚科存在多重起源现象(Fukami et al, 2008),因此Huang等(2014b)对其进行调整,取消蜂巢珊瑚科,将该科除了双星珊瑚属(*Diploastrea*)、同星珊瑚属(*Plesiastrea*)和小星珊瑚属(*Leptastrea*)以外的其他物种归入裸肋珊瑚科(Merulinidae);双星珊瑚属则划分到双星珊瑚科;同星珊瑚属在后来被归入同星珊瑚科;而小星珊瑚属因分类地位尚无定论而暂归在未定类群(incertae sedis)(Kitahara et al, 2016),本名录认可上述调整。

(3)新增叶状珊瑚科(Lobophylliidae),变更褶叶珊瑚科(Mussidae)和梳状珊瑚科(Pectiniidae)。根据Fukami等(2008)分出的类别XVIII-XX,《台湾石珊瑚志》首次命名叶状珊瑚科(Dai & Horng, 2009b),其中包括了《中国动物志·腔肠动物门·珊瑚虫纲·石珊瑚目·造礁石珊瑚》中褶叶珊瑚科的所有属以及梳状珊瑚科的刺叶珊瑚属(*Echinophyllia*)和尖孔珊瑚属(*Oxypora*),而梳状珊瑚科的梳状珊瑚属(*Pectinia*)、

斜花珊瑚属(*Mycedium*)和囊叶珊瑚属(*Physophyllia*)则被归入裸肋珊瑚科(Arrigoni et al, 2014a; Kitahara et al, 2016), 并取消了褶叶珊瑚科和梳状珊瑚科, 本名录认可该调整。

(4)新增真叶珊瑚科(Euphylliidae), 变更丁香珊瑚科(Caryophylliidae)和枇杷珊瑚科(Oculinidae)。《中国动物志·腔肠动物门·珊瑚虫纲·石珊瑚目·造礁石珊瑚》不认可真叶珊瑚科, 而是将该科的部分物种归入丁香珊瑚科。*Corals of the World*虽认可真叶珊瑚科(Euphyllidae), 但拉丁名中少了一个字母“i”(Veron, 2000)。Budd等(2012)结合形态学和分子生物学证据, 根据Fukami等(2008)分出的类别V重新确定真叶珊瑚科, 将《中国动物志·腔肠动物门·珊瑚虫纲·石珊瑚目·造礁石珊瑚》中的枇杷珊瑚科的物种也归入其中, 并取消了丁香珊瑚科和枇杷珊瑚科, 本名录认可该调整。

(5)新增黑星珊瑚科(Oulastreidae)。黑星珊瑚属(*Oulastrea*)虽然在Kitahara等(2016)的分类体系中划入未定, 但Veron (2013)将黑星珊瑚属归入新建立的黑星珊瑚科, 认为其在形态上已经被很好地划分, WoRMS也认可该科, 因此在这里也暂时认可后者。

2.1.2 属级分类阶元调整

基于已有研究, 本名录与《中国动物志·腔肠动物门·珊瑚虫纲·石珊瑚目·造礁石珊瑚》相比, 造礁石珊瑚的属级分类阶元新增26属, 合并3属, 变更1属。

(1)新增同孔珊瑚属。《中国动物志·腔肠动物门·珊瑚虫纲·石珊瑚目·造礁石珊瑚》中尚不认可同孔珊瑚属, 但《台湾石珊瑚志》则将同孔珊瑚属从鹿角珊瑚属中分离出来。目前认为, 同孔珊瑚属多具有不止一个轴珊瑚杯, 且其繁殖方式是排幼型(brooders)而非鹿角珊瑚属的排卵型(broadcast spawners)。线粒体和核基因的系统发育分析也证明了同孔珊瑚属与鹿角珊瑚属其他物种的分别。故在此认可同孔珊瑚属从鹿角珊瑚属中分出, 单独建立新属(Wallace et al, 2007, 2012)。

(2)新增伯孔珊瑚属(*Bernardpora*)。对于《中国动物志·腔肠动物门·珊瑚虫纲·石珊瑚目·造礁石珊瑚》的滨珊瑚科(Poritidae)物种, 根据分子生物学和形态学的分析, Kitano等(2014)将穴孔珊瑚属(*Alveopora*)归到鹿角珊瑚科(Acroporidae)中, 最近的系统转录组学信息更加证实了穴孔珊瑚属属于鹿角珊瑚科这一观点(Richards et al, 2019), 这里亦

认可该调整。同时Kitano等(2014)在分析中发现, 斯氏角孔珊瑚(*Goniopora stutchburyi*)与该属其他种区别较大, 故将其归入伯孔珊瑚属。

(3)新增圆星珊瑚属(*Astrea*)、拟菊花珊瑚属(*Paragoniastrea*)和拟圆菊珊瑚属(*Paramontastraea*), 变更蜂巢珊瑚属(*Favia*)为盘星珊瑚属(*Dipsastraea*)。基于物种骨骼微细结构特征和基因序列信息, Huang等(2014b)将原裸肋珊瑚科、蜂巢珊瑚科、梳状珊瑚科和粗叶珊瑚科(Trachyphylliidae)下属的属级分类阶元进行了较大调整。在分析中发现原蜂巢珊瑚属(*Favia*)可划分为两个类群, 即大西洋类群和印度-太平洋类群。而原蜂巢珊瑚属的模式物种*Madrepora fragum* Esper, 1795为大西洋类群, 故在大西洋类群中保留*Favia*这个属名, 而将印度-太平洋类群归入盘星珊瑚属, 本名录基于此将《中国动物志·腔肠动物门·珊瑚虫纲·石珊瑚目·造礁石珊瑚》中的蜂巢珊瑚属变更为盘星珊瑚属。此外, Huang等(2014b)的分子系统学证据也支持将原来的芭萝珊瑚属(*Barabattoia*)物种合并入盘星珊瑚属, 将菊花珊瑚属(*Goniastrea*)中的部分物种归到腔星珊瑚属(*Coelastrea*)和盘星珊瑚属。原圆菊珊瑚属(*Montastraea*)印度-太平洋的物种则被拆分到角蜂巢珊瑚属(*Favites*)、圆星珊瑚属、拟圆菊珊瑚属, 而圆菊珊瑚属(*Montastrea*)的属名则被还原为*Montastraea*并认定为大西洋类群。随后, 利用形态学和分子生物学结合的证据从菊花珊瑚属中拆分出拟菊花珊瑚属, 并同时拟棍棒珊瑚属(*Paraclavarina*)合并入裸肋珊瑚属(*Merulina*)(Huang et al, 2014a), 本名录采纳上述结论, 并将种的中文名随属名作相应调整。

(4)新增刺石芝珊瑚属(*Danafungia*)、叶芝珊瑚属(*Lobactis*)和侧石芝珊瑚属(*Pleuractis*), 合并双列珊瑚属(*Diaseris*)到圆饼珊瑚属(*Cycloseris*)。Hoeksema (1989)利用珊瑚骨骼结构对石芝珊瑚科物种进行分类学调整, 但《中国动物志·腔肠动物门·珊瑚虫纲·石珊瑚目·造礁石珊瑚》没有认可其结论, 仍采纳Veron和Pichon (1980)认可的原Wells (1956)中石芝珊瑚属(*Fungia*)的6个亚属拆分为辐石芝珊瑚属(*Heliofungia*)和其他5个亚属的观点(邹仁林, 2001)。而后, Gittenberger等(2011)利用线粒体辅酶I (COI)和转录间隔区(ITS)序列对石芝珊瑚科物种进行了分类学上的再调整, 主要是将石芝珊瑚属中的部分

亚属提升为属, 包括刺石芝珊瑚属、叶芝珊瑚属和侧石芝珊瑚属。并将部分石芝珊瑚属的物种合并到石叶珊瑚属(*Lithophyllia*), 此外还将石芝珊瑚科中的双列珊瑚属合并入圆饼珊瑚属。本名录采纳该研究结果, 种的中文名随属名作相应变化。

(5) 新增同叶珊瑚属(*Homophyllia*)和小褶叶珊瑚属(*Micromussa*), 归并合叶珊瑚属(*Symphyllia*)到叶状珊瑚属(*Lobophyllia*)。Veron和Pichon (1980)认为石叶珊瑚属(*Lithophyllia*)、同叶珊瑚属和拟蓟珊瑚属(*Parascolymia*)都是蓟珊瑚属(*Scolymia*)的同物异名, 但后来的Budd等(2012)又将蓟珊瑚属中印度-太平洋的物种拆分到同叶珊瑚属和拟蓟珊瑚属; 将蓟珊瑚属的大西洋种类保留在该属中, 并将该属合并入Mussinae科。后来又将其降级为亚科并入蜂巢珊瑚科(Hoeksema & Cairns, 2020)。随后, Arrigoni等(2014b)将澳鼠珊瑚属(*Australomussa*)合并入拟蓟珊瑚属, 并因为其和Fukami等(2008)分出的类别XVIII-XX相近而将拟蓟珊瑚属归入叶状珊瑚科。而后, Huang等(2016)根据新的形态学和分子生物学证据对新叶状珊瑚科的物种进行再调整, 主要是将合叶珊瑚属和拟蓟珊瑚属的物种合并到叶状珊瑚属中, 并将棘星珊瑚属(*Acanthastrea*)的部分物种归入小褶叶珊瑚属, 本名录采纳该研究结果, 种的中文名随属名作相应变化。随后的研究认为丘形棘星珊瑚(*Acanthastrea hillae*)是包氏棘星珊瑚(*A. bowerbanki*)的同物异名, 由于其与棘星珊瑚属的其他物种有差异, 故将其归入同叶珊瑚属(Arrigoni et al, 2016), 本名录亦认可该调整。

(6) 新增纹叶珊瑚属(*Fimbriaphyllia*), 合并顶枝珊瑚属(*Acrhelia*)到盔形珊瑚属(*Galaxea*)。对真叶珊瑚属(*Euphyllia*)的物种进行分子测序后分析其系统发育, 发现原本属于真叶珊瑚属*Fimbriaphyllia*亚属的物种表现出与该属其他物种的差异, 并在水螅体特征、繁殖类型上找到支持其提升分类地位的证据, 因此认可将其提升为纹叶珊瑚属(Luzon et al, 2017)。另外, 顶枝珊瑚属在《中国动物志·腔肠动物门·珊瑚虫纲·石珊瑚目·造礁石珊瑚》中是认可的单种属(邹仁林, 2001), 但随后的研究都认可顶枝珊瑚属合并入盔形珊瑚属(Veron, 2013; Hoeksema & Cairns, 2020)。本名录采纳上述调整, 种的中文名随属名作相应变化。

(7) 调整刺叶珊瑚属(*Echinophyllia*)和尖孔珊瑚

属(*Oxypora*)部分物种。Huang等(2016)的分子证据表明, 刺叶珊瑚属和尖孔珊瑚属部分物种的归属可能存在问题, 因为根据物种的形态学特征不能将二者进行区分, 不过由于数据不充分, 并没有将这两个属中的物种进行调整。随后Arrigoni等(2019)的研究表明, 多棘刺叶珊瑚(*Echinophyllia echinata*)与尖孔珊瑚属更接近, 故将其划入尖孔珊瑚属; 平滑尖孔珊瑚(*Oxypora glabra*)也因与刺叶珊瑚属更接近而划入刺叶珊瑚属, 据此调整将两属进行清晰划分。本名录采纳该研究结果, 种的中文名随属名作相应变化。

此外, 中国造礁石珊瑚物种初步编目中出现了《中国动物志·腔肠动物门·珊瑚虫纲·石珊瑚目·造礁石珊瑚》未记录的15个属, 本名录进行调整与添加, 详细见附录1。

2.2 同物异名筛查

通过对中国造礁石珊瑚物种初步编目物种进行筛查, 一共确认187个同物异名, 其中83个是由于属级分类阶元调整出现的。详细的中国造礁石珊瑚同物异名物种对照表见附录2。

2.3 中国造礁石珊瑚物种表的形成及中文名命名

通过分类体系调整与同物异名剔除, 截至2019年我国共记录造礁石珊瑚2个类群16科77属445种。相对于《中国动物志·腔肠动物门·珊瑚虫纲·石珊瑚目·造礁石珊瑚》而言, 种级分类阶元新增291种, 变更13种, 合并20种。随后进行中文名命名, 相对于《中国动物志·腔肠动物门·珊瑚虫纲·石珊瑚目·造礁石珊瑚》, 新命名305个物种的中文名, 详细的中国造礁石珊瑚物种名录见附录3

2.4 争议

2.4.1 分类体系的争议

因为无法确定分类地位, Budd等(2012)将石珊瑚目中的8属暂时放置在未定类群中, 等待未来的研究解决其归属, 其中就包括胚褶叶珊瑚属(*Blastomussa*)、小星珊瑚属、黑星珊瑚属和同星珊瑚属。随后Benzoni等(2014)认为鳞泡珊瑚属(*Physogyra*)和泡囊珊瑚属(*Plerogyra*)在分类上和胚褶叶珊瑚属相近, 也将它们放入未定类群中。在此之前, 《台湾石珊瑚志》基于Fukami等(2008)的分析结果, 首次命名了同星珊瑚科并将胚褶叶珊瑚属、同星珊瑚属、鳞泡珊瑚属和泡囊珊瑚属归入其中(Dai & Horng, 2009b), 但由于发现同星珊瑚属与其他三属

之间存在较大的分子距离(Benzoni et al, 2014), 故单独把同星珊瑚属留在同星珊瑚科而将胚褶叶珊瑚属、鳞泡珊瑚属和泡囊珊瑚属分出到未定(Kitahara et al, 2016), 不过以上未定三属在分类上相近且区别于造礁石珊瑚的其他类群, 因此未来或成立新科。此外, 小星珊瑚属目前虽然暂时归为未定, 但是由于和其他科属都有较大差异(Benzoni et al, 2012a), 故未来可能成立新科。

对于厚丝珊瑚属(*Pachyseris*), Kitahara等(2012)利用标准厚丝珊瑚(*Pachyseris speciosa*)作为厚丝珊瑚属的代表进行COI基因系统发育分析时发现, 该属可能更加接近真叶珊瑚科的一些物种, WoRMS基于此研究将厚丝珊瑚属归入未定(Hoeksema & Cairns, 2020)。不过, 随后在Kitahara等(2016)提供的分类体系中依旧将该属归在菌珊瑚科(Agariciidae)中, 因此在这里认可后者的结论, 将其暂归入菌珊瑚科。

西沙珊瑚属(*Coeloseris*)虽属于菌珊瑚科, 但是该属和菌珊瑚科的其他物种存在较大的形态学差异。由于该物种的基因序列数据暂时缺失, 因此尽管放入菌珊瑚科, 但却存有疑惑(Kitahara et al, 2012)。随后Kitahara等(2016)也并没有对该属的归属进行说明。由于WoRMS依旧认可西沙珊瑚属归属于菌珊瑚科(Hoeksema & Cairns, 2020), 故本文亦认可。

Bernard (1896)首次专题报道了陀螺珊瑚属(*Turbinaria*)的58个物种, 但部分研究者认为其中存在许多由于环境不同而造成形态学差异的同一物种, 近年来的研究者甚至认为该属只有13–15个有效种(Veron & Pichon, 1980; Veron, 1995; Cairns et al, 1999; Cairns, 2001)。由于没有详细研究过其生长型的变化, 也尚未有修正的报道对该属的分类进行梳理, 因此陀螺珊瑚属的物种分类依旧存在问题(邹仁林, 2001)。《中国动物志·腔肠动物门·珊瑚虫纲·石珊瑚目·造礁石珊瑚》中报道了该属的12种, 但其中有4种被认为是同属其他种的同物异名(附录2), 另有5种陀螺珊瑚属物种在分类上存疑(Cairns, 2001)。由于《中国动物志·腔肠动物门·珊瑚虫纲·石珊瑚目·造礁石珊瑚》对分类存疑的物种进行了报道描述, 故暂时保留这些物种。

2.4.2 物种的争议

虽然国际上对于造礁石珊瑚的分类体系基本形成共识, 但仍有部分物种存在分类上的争议。

(1)截顶蔷薇珊瑚(*Montipora truncata*)具有表面升起的扁平分支等形态特征, 认为其与越南蔷薇珊瑚(*Montipora vietnamensis*)为同一物种; 截顶蔷薇珊瑚为1975年邹仁林在《海南浅水造礁石珊瑚》命名(邹仁林等, 1975), 而越南蔷薇珊瑚则为Veron于2000年在*Corals of the World*中命名(Veron, 2000), 根据国际动物命名法, 前者具有优先权, 故应认可截顶蔷薇珊瑚。

(2)小角孔珊瑚(*Goniopora minor*)在WoRMS上被认为是*Goniopora pedunculata*的同物异名(Hoeksema & Cairns, 2020)。但是Veron (1982)认为, *Goniopora pedunculata*的模式标本已经丢失, 尽管Edwards和Haime于1848年利用另一个标本描述了该种, 但也并无模式标本支撑(Veron, 1982)。相反, 小角孔珊瑚则拥有模式标本。故Veron (1982)认可小角孔珊瑚而弃用*Goniopora pedunculata*这一命名时间较早的名称(Veron, 1982)。《台湾石珊瑚志》亦认可该命名(Dai & Horng, 2009a), 所以本文未参照WoRMS的修订。

(3)埃氏杯形珊瑚(*Pocillopora eydouxi*)在WoRMS上被认为是*Pocillopora grandis*的同物异名(Hoeksema & Cairns, 2020)。但由于前者使用更为广泛, 因此前者被研究人员广泛认可(Veron & Pichon, 1976; Schmidt-Roach et al, 2014)。《中国动物志·腔肠动物门·珊瑚虫纲·石珊瑚目·造礁石珊瑚》中同意Veron和Pichon (1976)的观点认可埃氏杯形珊瑚, 所以本文并未参照WoRMS的修订。

(4)海氏沙珊瑚(*Psammocora haimiana*)在《中国动物志·腔肠动物门·珊瑚虫纲·石珊瑚目·造礁石珊瑚》中被认为是血红沙珊瑚(*Psammocora haimeana*)的错误拼写(邹仁林, 2001)。但Benzoni等(2010)通过对模式标本的检查发现, 广泛描述的指形沙珊瑚(*Psammocora digitata*)(Veron & Pichon, 1976; Veron, 2000; Dai & Horng, 2009b)其实是海氏沙珊瑚, 而广泛描述的血红沙珊瑚(Veron & Pichon, 1976; Veron, 2000; Dai & Horng, 2009b)和浅薄沙珊瑚(*Psammocora superficialis*)一样同为深室沙珊瑚(*P. profundacella*)的同物异名, 并非先前所认可的拼写错误。对指形沙珊瑚的模式标本进行检查却发现, 其骨骼形态学与海氏沙珊瑚存在差异, 基于rDNA和COI的基因序列分析亦发现与两者存在差异。因此认可指形沙珊瑚为新的独立物种, 并对其进行重

新描述(Benzoni et al, 2010)。对于中国的沙珊瑚而言, 由于分类上基本上参考《中国动物志·腔肠动物门·珊瑚虫纲·石珊瑚目·造礁石珊瑚》、《台湾石珊瑚志》和*Corals of the World*, 所以将历史记录的所有血红沙珊瑚都认可为深室沙珊瑚的同物异名, 所有的指形沙珊瑚确认为海氏石珊瑚。新的指形沙珊瑚则在中国暂无可靠记录(Benzoni et al, 2010)。

除了分类的问题, 由于造礁石珊瑚存在水族贸易现象, 因此个别物种虽有中国记录但其分布却难以验证。例如HKRMS数据库(Hong Kong Register of Marine Species, <http://www.marinespecies.org/hkrms/>)中提到的尼罗河珊瑚(*Catalaphyllia jardinei*)就为水族常用种类, 且并无其他文献报道其在国内的分布。因此这里并没有将这类物种列入造礁石珊瑚物种名录中。

3 结语

近年来, 通过一系列分子生物学与形态学特征分析, 造礁石珊瑚物种的分类体系得到较好的统一。本研究通过对国内外的文献资料进行整理, 缩小了我国造礁石珊瑚分类体系与国际最新公认分类体系之间的差距, 去除了同物异名现象, 规范了中文学名, 并形成中国造礁石珊瑚物种名录, 从而为造礁石珊瑚的科学研究与保护提供基础。

造礁石珊瑚是珊瑚礁框架建造者, 在维持生态系统稳定性和保障生态服务功能输出上具有重要作用。然而, 随着人类活动和气候变化的双重影响, 造礁石珊瑚正面临威胁。因此, 需要加强对造礁石珊瑚现状与未来的研究, 同时加强监管造礁石珊瑚贸易, 唤醒公众保护意识, 最终改善造礁石珊瑚物种面对的困境。

致谢: 感谢中国科学院南海海洋研究所珊瑚生物学与珊瑚礁生态学课题组各位老师对珊瑚物种记录数据的支持和文章写作的帮助; 感谢孙有方、罗勇对本论文内容与格式修改提供的指导; 感谢杨剑辉在造礁石珊瑚分类上提供的帮助; 感谢审稿专家的宝贵意见; 感谢编委和编辑辛苦的付出。

参考文献

Arrigoni R, Benzoni F, Huang DW, Fukami H, Chen CA, Berumen ML, Hoogenboom M, Thomson DP, Hoeksema

- BW, Budd AF, Zayasu Y, Terraneo TI, Kitano YF, Baird AH (2016) When forms meet genes: Revision of the scleractinian genera *Micromussa* and *Homophyllia* (Lobophylliidae) with a description of two new species and one new genus. *Contributions to Zoology*, 85, 387–422.
- Arrigoni R, Berumen ML, Stolarski J, Terraneo TI, Benzoni F (2019) Uncovering hidden coral diversity: A new cryptic lobophylliid scleractinian from the Indian Ocean. *Cladistics*, 35, 301–328.
- Arrigoni R, Richards ZT, Chen CA, Baird AH, Benzoni F (2014a) Taxonomy and phylogenetic relationships of the coral genera *Australomussa* and *Parascalomyia* (Scleractinia, Lobophylliidae). *Contributions to Zoology*, 83, 195–215.
- Arrigoni R, Terraneo TI, Galli P, Benzoni F (2014b) Lobophylliidae (Cnidaria, Scleractinia) reshuffled: Pervasive non-monophyly at genus level. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 73, 60–64.
- Benzoni F, Arrigoni R, Stefani F, Reijnen BT, Montano S, Hoeksema BW (2012a) Phylogenetic position and taxonomy of *Cycloseris explanulata* and *C. wellsii* (Scleractinia: Fungiidae): Lost mushroom corals find their way home. *Contributions to Zoology*, 81, 125–146.
- Benzoni F, Arrigoni R, Stefani F, Stolarski J (2012b) Systematics of the coral genus *Craterastrea* (Cnidaria, Anthozoa, Scleractinia) and description of a new family through combined morphological and molecular analyses. *Systematics and Biodiversity*, 10, 417–433.
- Benzoni F, Arrigoni R, Waheed Z, Stefani F, Hoeksema BW (2014) Phylogenetic relationships and revision of the genus *Blastomussa* (Cnidaria: Anthozoa: Scleractinia) with description of a new species. *Raffles Bulletin of Zoology*, 62, 358–378.
- Benzoni F, Stefani F, Pichon M, Galli P (2010) The name game: Morpho-molecular species boundaries in the genus *Psammocora* (Cnidaria, Scleractinia). *Zoological Journal of the Linnean Society*, 160, 421–456.
- Benzoni F, Stefani F, Stolarski J, Pichon M, Mitta G, Galli P (2007) Debating phylogenetic relationships of the scleractinian *Psammocora*: Molecular and morphological evidences. *Contributions to Zoology*, 76, 35–54.
- Bernard HM (1896) Catalogue of the Madreporian Corals in the British Museum (Natural History), Volume 2: The Genus *Turbinaria*, the Genus *Astraeopora*. The Trustees of the British Museum, London.
- Budd AF, Fukami H, Smith ND, Knowlton N (2012) Taxonomic classification of the reef coral family Mussidae (Cnidaria: Anthozoa: Scleractinia). *Zoological Journal of the Linnean Society*, 166, 465–529.
- Cairns SD (2001) A Generic Revision and Phylogenetic Analysis of the Dendrophylliidae (Cnidaria: Scleractinia). Smithsonian Institution Press, Washington, DC.
- Cairns SD, Hoeksema BW, van der Land J (1999) List of extant stony corals. *Atoll Research Bulletin*, 459, 13–46.

- Carlson DB, Budd AF (2002) Incipient speciation across a depth gradient in a scleractinian coral. *Evolution*, 56, 2227–2242.
- Chen CA, Odorico DM, Tenlohuis M, Veron JEN, Miller DJ (1995) Systematic relationships within the Anthozoa (Cnidaria: Anthozoa) using the 5'-end of the 28S rDNA. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 4, 175–183.
- Dai CF (1988) Scleractinia of Taiwan. I. Families Astrocoeniidae and Pocilloporidae. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 22, 83–101.
- Dai CF, Horng S (2009a) Scleractinia fauna of Taiwan. I. The Complex Group. Taiwan University, Taipei.
- Dai CF, Horng S (2009b) Scleractinia fauna of Taiwan. II. The Robust Group. Taiwan University, Taipei.
- Dai CF, Lin CH (1992) Scleractinia of Taiwan. III. Family Agariciidae. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 28, 80–101.
- Fukami H, Chen CA, Budd AF, Collins A, Wallace CC, Chuang YY, Chen C, Dai CF, Iwao K, Sheppard C, Knowlton N (2008) Mitochondrial and nuclear genes suggest that stony corals are monophyletic but most families of stony corals are not (Order Scleractinia, Class Anthozoa, Phylum Cnidaria). *PLoS ONE*, 3, e3222.
- Gittenberger A, Reijnen BT, Hoeksema BW (2011) A molecularly based phylogeny reconstruction of mushroom corals (Scleractinia: Fungiidae) with taxonomic consequences and evolutionary implications for life history traits. *Contributions to Zoology*, 80, 107–132.
- Hoeksema BW (1989) Taxonomy, phylogeny and biogeography of mushroom corals (Scleractinia: Fungiidae). *Zoologische Verhandelingen*, 254, 1–295.
- Hoeksema BW, Cairns S (2020) World List of Scleractinia. Scleractinia. <http://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=1363> (accessed on 2020-01-16)
- Hoeksema BW, Dai CF (1991) Scleractinia of Taiwan. II. Family Fungiidae (including a new species). *Bulletin of the Institute of Zoology, "Academia Sinica"*, 30, 203–228.
- Huang DW, Arrigoni R, Benzoni F, Fukami H, Knowlton N, Smith ND, Stolarski J, Chou LM, Budd AF (2016) Taxonomic classification of the reef coral family Lobophylliidae (Cnidaria: Anthozoa: Scleractinia). *Zoological Journal of the Linnean Society*, 178, 436–481.
- Huang DW, Benzoni F, Arrigoni R, Baird AH, Berumen ML, Bouwmeester J, Chou LM, Fukami H, Licuanan WY, Lovell ER, Meier R, Todd PA, Budd AF (2014a) Towards a phylogenetic classification of reef corals: The Indo-Pacific genera *Merulina*, *Goniastrea* and *Scapophyllia* (Scleractinia, Merulinidae). *Zoologica Scripta*, 43, 531–548.
- Huang DW, Benzoni F, Fukami H, Knowlton N, Smith ND, Budd AF (2014b) Taxonomic classification of the reef coral families Merulinidae, Montastraeidae, and Diploastraeidae (Cnidaria: Anthozoa: Scleractinia). *Zoological Journal of the Linnean Society*, 171, 277–355.
- Huang ZG (2008) Marine Species and Their Distribution in China. China Ocean Press, Beijing. (in Chinese) [黄宗国 (2008) 中国海洋生物种类与分布. 海洋出版社, 北京.]
- Kitahara MV, Fukami H, Benzoni F, Huang DW (2016) The new systematics of Scleractinia: Integrating molecular and morphological evidence. In: *The Cnidaria, Past, Present and Future* (eds Goffredo S, Dubinsky Z), pp. 41–59. Springer, Berlin.
- Kitahara MV, Stolarski J, Cairns SD, Benzoni F, Stake JL, Miller DJ (2012) The first modern solitary Agariciidae (Anthozoa, Scleractinia) revealed by molecular and microstructural analysis. *Invertebrate Systematics*, 26, 303–315.
- Kitano YF, Benzoni F, Arrigoni R, Shirayama Y, Wallace CC, Fukami H (2014) A phylogeny of the family Poritidae (Cnidaria, Scleractinia) based on molecular and morphological analyses. *PLoS ONE*, 9, e98406.
- Liu RY (2008) Checklist of Marine Biota of China Seas. Science Press, Beijing. (in Chinese with English abstract) [刘瑞玉 (2008) 中国海洋生物名录. 科学出版社, 北京.]
- Luzon KS, Lin MF, Ablan L, Ma CA, Licuanan WY, Chen CA (2017) Resurrecting a subgenus to genus: Molecular phylogeny of *Euphyllia* and *Fimbriaphyllia* (order Scleractinia; family Euphylliidae; clade V). *PeerJ*, 5, e4074.
- Richards ZT, Carvajal JI, Wallace CC, Wilson NG (2019) Phylotranscriptomics confirms *Alveopora* is sister to *Montipora* within the family Acroporidae. *Marine Genomics*, 50, 100703.
- Romano SL, Palumbi SR (1996) Evolution of scleractinian corals inferred from molecular systematics. *Science*, 271, 640–642.
- Schmidt-Roach S, Miller KJ, Lundgren P, Andreakis N (2014) With eyes wide open: A revision of species within and closely related to the *Pocillopora damicornis* species complex (Scleractinia; Pocilloporidae) using morphology and genetics. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 170, 1–33.
- Veron JEN (1982) Scleractinia of Eastern Australia. IV. Australian Institute of Marine Science Monograph Series, Townsville.
- Veron JEN (1995) *Corals in Space and Time: The Biogeography and Evolution of the Scleractinia*. Cornell University Press, New York.
- Veron JEN (2000) *Corals of the World*. Australian Institute of Marine Science, Townsville.
- Veron JEN (2013) Overview of the taxonomy of zooxanthellate Scleractinia. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 169, 485–508.
- Veron JEN, Odorico DM, Chen CA, Miller DJ (1996) Reassessing evolutionary relationships of scleractinian corals. *Coral Reefs*, 15, 1–9.
- Veron JEN, Pichon M (1976) Scleractinia of Eastern Australia. Part I. Australian Institute of Marine Science Monograph Series, Townsville.
- Veron JEN, Pichon M (1980) Scleractinia of Eastern Australia. Part III. Australian Institute of Marine Science Monograph

- Series, Townsville.
- Veron JEN, Pichon M, Wijsman-Best M (1977) Scleractinia of Eastern Australia. Part II. Australian Institute of Marine Science Monograph Series, Townsville.
- Veron JEN, Wallace CC (1984) Scleractinia of Eastern Australia. Part V. Australian Institute of Marine Science Monograph Series, Townsville.
- Wallace CC (1999) Staghorn Corals of the World: A Revision of the Genus *Acropora*. CSIRO Publishing, Melbourne.
- Wallace CC, Chen CA, Fukami H, Muir PR (2007) Recognition of separate genera within *Acropora* based on new morphological, reproductive and genetic evidence from *Acropora togianensis*, and elevation of the subgenus *Isopora* Studer, 1878 to genus (Scleractinia: Astrocoeniidae; Acroporidae). *Coral Reefs*, 26, 231–239.
- Wallace CC, Dai CF (1997) Scleractinia of Taiwan (IV): Review of the coral genus *Acropora* from Taiwan. *Zoological studies*, 36, 288–324.
- Wallace CC, Done BJ, Muir PR (2012) Revision and Catalogue of Worldwide Staghorn Corals *Acropora* and *Isopora* (Scleractinia: Acroporidae) in the Museum of Tropical Queensland. Queensland Museum, Queensland, Australia.
- Wells JW (1956) Scleractinia. In: *Treatise on Invertebrate Paleontology, Part F: Coelenterata* (ed. Moore RC), pp. F328–F444. Geological Society of America and University of Kansas Press, Lawrence.
- Zou RL, Song SW, Ma JH (1975) Hermatypic Scleractinia in Shallow Waters of Hainan Island. Science Press, Beijing. (in Chinese) [邹仁林, 宋善文, 马江虎 (1975) 海南浅水造礁石珊瑚. 科学出版社, 北京.]
- Zou RL (2001) *Fauna Sinica · Coelenterata · Anthozoa · Scleractinia · Hermatypic Coral*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [邹仁林 (2001) 中国动物志·腔肠动物门·珊瑚虫纲·石珊瑚目·造礁石珊瑚. 科学出版社, 北京.]

(责任编辑: 徐奎栋 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 造礁石珊瑚分类体系科属变化对照表

Appendix 1 Hermatypic corals taxonomic adjustment for families and genera
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2019384-1.pdf>

附录2 中国造礁石珊瑚同物异名对照表

Appendix 2 Comparison of synonyms of Chinese hermatypic corals
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2019384-2.pdf>

附录3 中国造礁石珊瑚物种名录

Appendix 3 Checklist of Chinese hermatypic corals
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2019384-3.pdf>

附录1 造礁石珊瑚分类体系科属变化对照表

Appendix 1 Hermatypic corals taxonomic adjustment for families and genera

Veron, 2000	邹仁林, 2001 Zou, 2001	Dai & Horng, 2009a, b	Kitahara et al, 2016	新分类体系 This study
		复杂类群 Complex	复杂类群 Complex	复杂类群 Complex
鹿角珊瑚科 Acroporidae	鹿角珊瑚科 Acroporidae	鹿角珊瑚科 Acroporidae	鹿角珊瑚科 Acroporidae	鹿角珊瑚科 Acroporidae
蔷薇珊瑚属 <i>Montipora</i>	蔷薇珊瑚属 <i>Montipora</i>	蔷薇珊瑚属 <i>Montipora</i>	蔷薇珊瑚属 <i>Montipora</i>	蔷薇珊瑚属 <i>Montipora</i>
星孔珊瑚属 <i>Astreopora</i>	星孔珊瑚属 <i>Astreopora</i>	星孔珊瑚属 <i>Astreopora</i>	星孔珊瑚属 <i>Astreopora</i>	星孔珊瑚属 <i>Astreopora</i>
假鹿角珊瑚属 <i>Anacropora</i>	假鹿角珊瑚属 <i>Anacropora</i>	假鹿角珊瑚属 <i>Anacropora</i>	假鹿角珊瑚属 <i>Anacropora</i>	假鹿角珊瑚属 <i>Anacropora</i>
鹿角珊瑚属 <i>Acropora</i>	鹿角珊瑚属 <i>Acropora</i>	鹿角珊瑚属 <i>Acropora</i>	鹿角珊瑚属 <i>Acropora</i>	鹿角珊瑚属 <i>Acropora</i>
		同孔珊瑚属 <i>Isopora</i>	同孔珊瑚属 <i>Isopora</i>	同孔珊瑚属 <i>Isopora</i>
		穴孔珊瑚属 <i>Alveopora</i>	穴孔珊瑚属 <i>Alveopora</i>	穴孔珊瑚属 <i>Alveopora</i>
真叶珊瑚科 Euphyllidae	丁香珊瑚科 Caryophylliidae	真叶珊瑚科 Euphyllidae	真叶珊瑚科 Euphyllidae	真叶珊瑚科 Euphyllidae
真叶珊瑚属 <i>Euphyllia</i>	真叶珊瑚属 <i>Euphyllia</i>	真叶珊瑚属 <i>Euphyllia</i>	真叶珊瑚属 <i>Euphyllia</i>	真叶珊瑚属 <i>Euphyllia</i>
				纹叶珊瑚属 <i>Fimbriaphyllia</i>
泡囊珊瑚属 <i>Plerogyra</i>	泡囊珊瑚属 <i>Plerogyra</i>			
鳞泡珊瑚属 <i>Physogyra</i>	无记录 No record			
枇杷珊瑚科 Oculinidae	枇杷珊瑚科 Oculinidae			
盔形珊瑚属 <i>Galaxea</i>	盔形珊瑚属 <i>Galaxea</i>	盔形珊瑚属 <i>Galaxea</i>	盔形珊瑚属 <i>Galaxea</i>	盔形珊瑚属 <i>Galaxea</i>
	顶枝珊瑚属 <i>Acrhelia</i>	顶枝珊瑚属 <i>Acrhelia</i>		
单星珊瑚属 <i>Simplastrea</i>	无记录 No record	无记录 No record	无记录 No record	单星珊瑚属 <i>Simplastrea</i>
菌珊瑚科 Agariciidae	菌珊瑚科 Agariciidae	菌珊瑚科 Agariciidae	菌珊瑚科 Agariciidae	菌珊瑚科 Agariciidae
牡丹珊瑚属 <i>Pavona</i>	牡丹珊瑚属 <i>Pavona</i>	牡丹珊瑚属 <i>Pavona</i>	牡丹珊瑚属 <i>Pavona</i>	牡丹珊瑚属 <i>Pavona</i>
薄层珊瑚属 <i>Leptoseris</i>	薄层珊瑚属 <i>Leptoseris</i>	薄层珊瑚属 <i>Leptoseris</i>	薄层珊瑚属 <i>Leptoseris</i>	薄层珊瑚属 <i>Leptoseris</i>
厚丝珊瑚属 <i>Pachyseris</i>	厚丝珊瑚属 <i>Pachyseris</i>	厚丝珊瑚属 <i>Pachyseris</i>	厚丝珊瑚属 <i>Pachyseris</i>	厚丝珊瑚属 <i>Pachyseris</i>
加德纹珊瑚属 <i>Gardineroseris</i>	无记录 No record	加德纹珊瑚属 <i>Gardineroseris</i>	加德纹珊瑚属 <i>Gardineroseris</i>	加德纹珊瑚属 <i>Gardineroseris</i>
西沙珊瑚属 <i>Coeloseris</i>	西沙珊瑚属 <i>Coeloseris</i>	西沙珊瑚属 <i>Coeloseris</i>	无记录 No record	西沙珊瑚属 <i>Coeloseris</i>
铁星珊瑚科 Siderastreidae	铁星珊瑚科 Siderastreidae	铁星珊瑚科 Siderastreidae	铁星珊瑚科 Siderastreidae	铁星珊瑚科 Siderastreidae
假铁星珊瑚属 <i>Pseudosiderastrea</i>	假铁星珊瑚属 <i>Pseudosiderastrea</i>	假铁星珊瑚属 <i>Pseudosiderastrea</i>	假铁星珊瑚属 <i>Pseudosiderastrea</i>	假铁星珊瑚属 <i>Pseudosiderastrea</i>
铁星珊瑚属 <i>Siderastrea</i>	无记录 No record	铁星珊瑚属 <i>Siderastrea</i>	铁星珊瑚属 <i>Siderastrea</i>	铁星珊瑚属 <i>Siderastrea</i>
沙珊瑚属 <i>Psammocora</i>	沙珊瑚属 <i>Psammocora</i>			
筛珊瑚属 <i>Coscinaraea</i>	筛珊瑚属 <i>Coscinaraea</i>			

滨珊瑚科 <i>Poritidae</i>	滨珊瑚科 <i>Poritidae</i>	滨珊瑚科 <i>Poritidae</i>	滨珊瑚科 <i>Poritidae</i>	滨珊瑚科 <i>Poritidae</i>
滨珊瑚属 <i>Porites</i>	滨珊瑚属 <i>Porites</i>	滨珊瑚属 <i>Porites</i>	滨珊瑚属 <i>Porites</i>	滨珊瑚属 <i>Porites</i>
角孔珊瑚属 <i>Goniopora</i>	角孔珊瑚属 <i>Goniopora</i>	角孔珊瑚属 <i>Goniopora</i>	角孔珊瑚属 <i>Goniopora</i>	角孔珊瑚属 <i>Goniopora</i> 伯孔珊瑚属 <i>Bernardpora</i>
穴孔珊瑚属 <i>Alveopora</i>	穴孔珊瑚属 <i>Alveopora</i>			
木珊瑚科 <i>Dendrophylliidae</i>	木珊瑚科 <i>Dendrophylliidae</i>	木珊瑚科 <i>Dendrophylliidae</i>	木珊瑚科 <i>Dendrophylliidae</i>	木珊瑚科 <i>Dendrophylliidae</i>
陀螺珊瑚属 <i>Turbinaria</i>	陀螺珊瑚属 <i>Turbinaria</i>	陀螺珊瑚属 <i>Turbinaria</i>	陀螺珊瑚属 <i>Turbinaria</i>	陀螺珊瑚属 <i>Turbinaria</i>
		坚实类群 <i>Robust</i>	坚实类群 <i>Robust</i>	坚实类群 <i>Robust</i>
星群珊瑚科 <i>Astrocoeniidae</i>	星群珊瑚科 <i>Astrocoeniidae</i>		星群珊瑚科 <i>Astrocoeniidae</i>	星群珊瑚科 <i>Astrocoeniidae</i>
柱群珊瑚属 <i>Stylocoeniella</i>	柱群珊瑚属 <i>Stylocoeniella</i>		柱群珊瑚属 <i>Stylocoeniella</i>	柱群珊瑚属 <i>Stylocoeniella</i>
帛星珊瑚属 <i>Palauastrea</i>	无记录 No record	无记录 No record	无记录 No record	帛星珊瑚属 <i>Palauastrea</i>
非六珊瑚属 <i>Madracis</i>			非六珊瑚属 <i>Madracis</i>	非六珊瑚属 <i>Madracis</i>
杯形珊瑚科 <i>Pocilloporidae</i>	杯形珊瑚科 <i>Pocilloporidae</i>	杯形珊瑚科 <i>Pocilloporidae</i>	杯形珊瑚科 <i>Pocilloporidae</i>	杯形珊瑚科 <i>Pocilloporidae</i>
		柱群珊瑚属 <i>Stylocoeniella</i>		
	非六珊瑚属 <i>Madracis</i>	无记录 No record		
杯形珊瑚属 <i>Pocillopora</i>	杯形珊瑚属 <i>Pocillopora</i>	杯形珊瑚属 <i>Pocillopora</i>	杯形珊瑚属 <i>Pocillopora</i>	杯形珊瑚属 <i>Pocillopora</i>
排孔珊瑚属 <i>Seriatopora</i>	排孔珊瑚属 <i>Seriatopora</i>	排孔珊瑚属 <i>Seriatopora</i>	排孔珊瑚属 <i>Seriatopora</i>	排孔珊瑚属 <i>Seriatopora</i>
柱状珊瑚属 <i>Stylophora</i>	柱状珊瑚属 <i>Stylophora</i>	柱状珊瑚属 <i>Stylophora</i>	柱状珊瑚属 <i>Stylophora</i>	柱状珊瑚属 <i>Stylophora</i>
				Oulastreidae
				黑星珊瑚属 <i>Oulastrea</i>
			筛珊瑚科 <i>Coscinaeidae</i>	筛珊瑚科 <i>Coscinaeidae</i>
			筛珊瑚属 <i>Coscinaeae</i>	筛珊瑚属 <i>Coscinaeae</i>
			沙珊瑚科 <i>Psammocoridae</i>	沙珊瑚科 <i>Psammocoridae</i>
			沙珊瑚属 <i>Psammocora</i>	沙珊瑚属 <i>Psammocora</i>
石芝珊瑚科 <i>Fungiidae</i>	石芝珊瑚科 <i>Fungiidae</i>	石芝珊瑚科 <i>Fungiidae</i>	石芝珊瑚科 <i>Fungiidae</i>	石芝珊瑚科 <i>Fungiidae</i>
多叶珊瑚属 <i>Polyphyllia</i>	多叶珊瑚属 <i>Polyphyllia</i>	多叶珊瑚属 <i>Polyphyllia</i>	多叶珊瑚属 <i>Polyphyllia</i>	多叶珊瑚属 <i>Polyphyllia</i>
绕石珊瑚属 <i>Herpolitha</i>	绕石珊瑚属 <i>Herpolitha</i>	绕石珊瑚属 <i>Herpolitha</i>	绕石珊瑚属 <i>Herpolitha</i>	绕石珊瑚属 <i>Herpolitha</i>
梳石芝珊瑚属 <i>Ctenactis</i>	石芝珊瑚属 <i>Fungia</i>	梳石芝珊瑚属 <i>Ctenactis</i>	梳石芝珊瑚属 <i>Ctenactis</i>	梳石芝珊瑚属 <i>Ctenactis</i>
石叶珊瑚属 <i>Lithophyllon</i>	石叶珊瑚属 <i>Lithophyllon</i>	石叶珊瑚属 <i>Lithophyllon</i>	石叶珊瑚属 <i>Lithophyllon</i>	石叶珊瑚属 <i>Lithophyllon</i>
石芝珊瑚属 <i>Fungia</i>	石芝珊瑚属 <i>Fungia</i>	石芝珊瑚属 <i>Fungia</i>	石芝珊瑚属 <i>Fungia</i>	石芝珊瑚属 <i>Fungia</i>
			叶芝珊瑚属 <i>Lobactis</i>	叶芝珊瑚属 <i>Lobactis</i>

			侧石芝珊瑚属 <i>Pleuractis</i>	侧石芝珊瑚属 <i>Pleuractis</i>
	无记录 No record		刺石芝珊瑚属 <i>Danafungia</i>	刺石芝珊瑚属 <i>Danafungia</i>
圆饼珊瑚属 <i>Cycloseris</i>	圆饼珊瑚属 <i>Cycloseris</i>		圆饼珊瑚属 <i>Cycloseris</i>	圆饼珊瑚属 <i>Cycloseris</i>
双列珊瑚属 <i>Diaseris</i>	双列珊瑚属 <i>Diaseris</i>			
辐石芝珊瑚属 <i>Heliofungia</i>	辐石芝珊瑚属 <i>Heliofungia</i>	辐石芝珊瑚属 <i>Heliofungia</i>	辐石芝珊瑚属 <i>Heliofungia</i>	辐石芝珊瑚属 <i>Heliofungia</i>
帽状珊瑚属 <i>Halomitra</i>	帽状珊瑚属 <i>Halomitra</i>	无记录 No record	帽状珊瑚属 <i>Halomitra</i>	帽状珊瑚属 <i>Halomitra</i>
履形珊瑚属 <i>Sandalolitha</i>	履形珊瑚属 <i>Sandalolitha</i>	履形珊瑚属 <i>Sandalolitha</i>	履形珊瑚属 <i>Sandalolitha</i>	履形珊瑚属 <i>Sandalolitha</i>
足柄珊瑚属 <i>Podabacia</i>	足柄珊瑚属 <i>Podabacia</i>	足柄珊瑚属 <i>Podabacia</i>	足柄珊瑚属 <i>Podabacia</i>	足柄珊瑚属 <i>Podabacia</i>
		小星珊瑚属 <i>Leptastrea</i>		
		沙珊瑚属 <i>Psammocora</i>		
		筛珊瑚属 <i>Coscinaraea</i>		
		黑星珊瑚属 <i>Oulastrea</i>		
粗叶珊瑚科 Trachyphylliidae		团叶珊瑚科 Agathiphylliidae	双星珊瑚科 Diploastraeidae	双星珊瑚科 Diploastraeidae
		双星珊瑚属 <i>Diploastrea</i>	双星珊瑚属 <i>Diploastrea</i>	双星珊瑚属 <i>Diploastrea</i>
粗叶珊瑚属 <i>Trachyphyllia</i>	无记录 No record	无记录 No record		
褶叶珊瑚科 Mussidae	褶叶珊瑚科 Mussidae	叶状珊瑚科 Lobophylliidae	叶状珊瑚科 Lobophylliidae	叶状珊瑚科 Lobophylliidae
棘星珊瑚属 <i>Acanthastrea</i>	棘星珊瑚属 <i>Acanthastrea</i>	棘星珊瑚属 <i>Acanthastrea</i>	同叶珊瑚属 <i>Homophyllia</i>	同叶珊瑚属 <i>Homophyllia</i>
			棘星珊瑚属 <i>Acanthastrea</i>	棘星珊瑚属 <i>Acanthastrea</i>
小褶叶珊瑚属 <i>Micromussa</i>	无记录 No record	无记录 No record	小褶叶珊瑚属 <i>Micromussa</i>	小褶叶珊瑚属 <i>Micromussa</i>
叶状珊瑚属 <i>Lobophyllia</i>	叶状珊瑚属 <i>Lobophyllia</i>	叶状珊瑚属 <i>Lobophyllia</i>		
合叶珊瑚属 <i>Symphyllia</i>	合叶珊瑚属 <i>Symphyllia</i>	合叶珊瑚属 <i>Symphyllia</i>	叶状珊瑚属 <i>Lobophyllia</i>	叶状珊瑚属 <i>Lobophyllia</i>
澳鼠珊瑚属 <i>Australomussa</i>	无记录 No record	澳鼠珊瑚属 <i>Australomussa</i>		
蓟珊瑚属 <i>Scolymia</i>	无记录 No record	蓟珊瑚属 <i>Scolymia</i>		
		无记录 No record	同叶珊瑚属 <i>Homophyllia</i>	同叶珊瑚属 <i>Homophyllia</i>
缺齿珊瑚属 <i>Cynarina</i>	无记录 No record	缺齿珊瑚属 <i>Cynarina</i>	缺齿珊瑚属 <i>Cynarina</i>	缺齿珊瑚属 <i>Cynarina</i>
胚褶叶珊瑚属 <i>Blastomussa</i>	无记录 No record			
梳状珊瑚科 Pectiniidae	梳状珊瑚科 Pectiniidae			
刺叶珊瑚属 <i>Echinophyllia</i>	刺叶珊瑚属 <i>Echinophyllia</i>	刺叶珊瑚属 <i>Echinophyllia</i>	刺叶珊瑚属 <i>Echinophyllia</i>	刺叶珊瑚属 <i>Echinophyllia</i>
				尖孔珊瑚属 <i>Oxypora</i>
尖孔珊瑚属 <i>Oxypora</i>	尖孔珊瑚属 <i>Oxypora</i>	尖孔珊瑚属 <i>Oxypora</i>	尖孔珊瑚属 <i>Oxypora</i>	刺叶珊瑚属 <i>Echinophyllia</i>
		蜂巢珊瑚科 Faviidae	裸肋珊瑚科 Merulinidae	裸肋珊瑚科 Merulinidae
斜花珊瑚属 <i>Mycedium</i>	无记录 No record	斜花珊瑚属 <i>Mycedium</i>	斜花珊瑚属 <i>Mycedium</i>	斜花珊瑚属 <i>Mycedium</i>
梳状珊瑚属 <i>Pectinia</i>	梳状珊瑚属 <i>Pectinia</i>	梳状珊瑚属 <i>Pectinia</i>	梳状珊瑚属 <i>Pectinia</i>	梳状珊瑚属 <i>Pectinia</i>

	无记录 No record	无记录 No record	无记录 No record	囊叶珊瑚属 <i>Physophyllia</i>
裸肋珊瑚科 Merulinidae	裸肋珊瑚科 Merulinidae			
刺柄珊瑚属 <i>Hydnophora</i>	刺柄珊瑚属 <i>Hydnophora</i>	刺柄珊瑚属 <i>Hydnophora</i>	刺柄珊瑚属 <i>Hydnophora</i>	刺柄珊瑚属 <i>Hydnophora</i>
裸肋珊瑚属 <i>Merulina</i>	裸肋珊瑚属 <i>Merulina</i>	裸肋珊瑚属 <i>Merulina</i>	裸肋珊瑚属 <i>Merulina</i>	裸肋珊瑚属 <i>Merulina</i>
拟棍棒珊瑚属 <i>Paraclavarina</i>	无记录 No record	无记录 No record		
葶叶珊瑚属 <i>Scapophyllia</i>	葶叶珊瑚属 <i>Scapophyllia</i>	葶叶珊瑚属 <i>Scapophyllia</i>	葶叶珊瑚属 <i>Scapophyllia</i>	葶叶珊瑚属 <i>Scapophyllia</i>
蜂巢珊瑚科 Faviidae	蜂巢珊瑚科 Faviidae			
干星珊瑚属 <i>Caulastrea</i>	干星珊瑚属 <i>Caulastrea</i>	干星珊瑚属 <i>Caulastrea</i>	干星珊瑚属 <i>Caulastraea</i>	干星珊瑚属 <i>Caulastraea</i>
圆菊珊瑚属 <i>Montastrea</i>	无记录 No record	圆菊珊瑚属 <i>Montastrea</i>	拟圆菊珊瑚属 <i>Paramontastrea</i>	拟圆菊珊瑚属 <i>Paramontastrea</i>
	同星珊瑚属 <i>Plesiastrea</i>		圆星珊瑚属 <i>Astrea</i>	圆星珊瑚属 <i>Astrea</i>
	无记录 No record		角蜂巢珊瑚属 <i>Favites</i>	角蜂巢珊瑚属 <i>Favites</i>
角蜂巢珊瑚属 <i>Favites</i>	角蜂巢珊瑚属 <i>Favites</i>	角蜂巢珊瑚属 <i>Favites</i>	盘星珊瑚属 <i>Dipsastraea</i>	盘星珊瑚属 <i>Dipsastraea</i>
菊花珊瑚属 <i>Goniastrea</i>	菊花珊瑚属 <i>Goniastrea</i>	菊花珊瑚属 <i>Goniastrea</i>		
芭罗珊瑚属 <i>Barabattoia</i>	无记录 No record	芭罗珊瑚属 <i>Barabattoia</i>	腔星珊瑚属 <i>Coelastrea</i>	腔星珊瑚属 <i>Coelastrea</i>
蜂巢珊瑚属 <i>Favia</i>	蜂巢珊瑚属 <i>Favia</i>	蜂巢珊瑚属 <i>Favia</i>		
菊花珊瑚属 <i>Goniastrea</i>	菊花珊瑚属 <i>Goniastrea</i>	菊花珊瑚属 <i>Goniastrea</i>	菊花珊瑚属 <i>Goniastrea</i>	菊花珊瑚属 <i>Goniastrea</i>
			拟菊花珊瑚属 <i>Paragoniastrea</i>	拟菊花珊瑚属 <i>Paragoniastrea</i>
角蜂巢珊瑚属 <i>Favites</i>	无记录 No record	角蜂巢珊瑚属 <i>Favites</i>		
扁脑珊瑚属 <i>Platygyra</i>	扁脑珊瑚属 <i>Platygyra</i>	扁脑珊瑚属 <i>Platygyra</i>	扁脑珊瑚属 <i>Platygyra</i>	扁脑珊瑚属 <i>Platygyra</i>
耳纹珊瑚属 <i>Oulophyllia</i>	无记录 No record	耳纹珊瑚属 <i>Oulophyllia</i>	耳纹珊瑚属 <i>Oulophyllia</i>	耳纹珊瑚属 <i>Oulophyllia</i>
肠珊瑚属 <i>Leptoria</i>	肠珊瑚属 <i>Leptoria</i>	肠珊瑚属 <i>Leptoria</i>	肠珊瑚属 <i>Leptoria</i>	肠珊瑚属 <i>Leptoria</i>
刺星珊瑚属 <i>Cyphastrea</i>	刺星珊瑚属 <i>Cyphastrea</i>	刺星珊瑚属 <i>Cyphastrea</i>	刺星珊瑚属 <i>Cyphastrea</i>	刺星珊瑚属 <i>Cyphastrea</i>
刺孔珊瑚属 <i>Echinopora</i>	刺孔珊瑚属 <i>Echinopora</i>	刺孔珊瑚属 <i>Echinopora</i>	刺孔珊瑚属 <i>Echinopora</i>	刺孔珊瑚属 <i>Echinopora</i>
黑星珊瑚属 <i>Oulastrea</i>	无记录 No record			
双星珊瑚属 <i>Diploastrea</i>	双星珊瑚属 <i>Diploastrea</i>			
同星珊瑚属 <i>Plesiastrea</i>	同星珊瑚属 <i>Plesiastrea</i>			
小星珊瑚属 <i>Leptastrea</i>	小星珊瑚属 <i>Leptastrea</i>			
			粗叶珊瑚属 <i>Trachyphyllia</i>	粗叶珊瑚属 <i>Trachyphyllia</i>
小笠原珊瑚属 <i>Boninastrea</i>	无记录 No record	无记录 No record	无记录 No record	小笠原珊瑚属 <i>Boninastrea</i>
		同星珊瑚科 Plesiastreidae	同星珊瑚科 Plesiastreidae	同星珊瑚科 Plesiastreidae
		同星珊瑚属 <i>Plesiastrea</i>	同星珊瑚属 <i>Plesiastrea</i>	同星珊瑚属 <i>Plesiastrea</i>
			Incertae sedis	Incertae sedis
		胚褶叶珊瑚属 <i>Blastomussa</i>	胚褶叶珊瑚属 <i>Blastomussa</i>	胚褶叶珊瑚属 <i>Blastomussa</i>

		鳞泡珊瑚属 <i>Physogyra</i>	鳞泡珊瑚属 <i>Physogyra</i>	鳞泡珊瑚属 <i>Physogyra</i>
		泡囊珊瑚属 <i>Plerogyra</i>	泡囊珊瑚属 <i>Plerogyra</i>	泡囊珊瑚属 <i>Plerogyra</i>
			小星珊瑚属 <i>Leptastrea</i>	小星珊瑚属 <i>Leptastrea</i>
			黑星珊瑚属 <i>Oulastrea</i>	

表格的列为不同分类体系; 表格的行从左右位置表示属级单位变化关系; 表格相同颜色为Veron 2000中的同科的属级单位, 可用于检索属级单位在其他分类体系变化状况。

参考文献

Dai CF, Horng S (2009a) Scleractinia Fauna of Taiwan. I. The Complex Group. Taiwan University, Taipei.

Dai CF, Horng S (2009b) Scleractinia Fauna of Taiwan. II. The Robust Group. Taiwan University, Taipei.

Kitahara MV, Fukami H, Benzoni F, Huang DW (2016) The New Systematics of Scleractinia: Integrating Molecular and Morphological Evidence. In: The Cnidaria, Past, Present and Future (eds Goffredo S, Dubinsky Z), pp. 41–59. Springer, Berlin.

Veron JEN (2000) Corals of the World. Australian Institute of Marine Science, Townsville.

Zou RL (2001) Fauna Sinica · Coelenterata · Anthozoa · Scleractinia · Hermatypic Coral. Science Press, Beijing. (in Chinese) [邹仁林 (2001) 中国动物志·腔肠动物门·珊瑚虫纲·石珊瑚目·造礁石珊瑚. 科学出版社, 北京.]

附录2 中国造礁石珊瑚同物异名对照表

Appendix 2 Comparison of synonyms of Chinese hermatypic corals

旧种名 Old species names	新种名 New species names	旧物种来源文献 Original description	文献依据 Basis of record
<i>Acanthastrea faviaformis</i>	<i>Dipsastraea matthaii</i>	Zhao et al, 2017	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Acanthastrea hillae</i>	<i>Homophyllia bowerbanki</i>	Dai & Horng, 2009b	Arrigoni et al, 2016
<i>Acanthastrea lordhowensis</i>	<i>Micomussa lordhowensis</i>	陈乃观等, 2005	Arrigoni et al, 2016
<i>Acrhelia horrescens</i>	<i>Galaxea horrescens</i>	邹仁林, 2001	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Acropora</i> aff. <i>Guppyi</i>	<i>Acropora humilis</i>	Д.В.纳乌莫夫等, 1960	邹仁林, 2001
<i>Acropora affinis</i>	<i>Acropora florida</i>	邹仁林等, 1975	Wallace, 1999
<i>Acropora armata</i>	<i>Acropora cytherea</i>	于登攀和邹仁林, 1996; 邹仁林, 2001	邹仁林, 2001
<i>Acropora azurea</i>	<i>Acropora nana</i>	Dai & Horng, 2009a; 潘子良, 2017	Wallace, 1999
<i>Acropora brueggemanni</i>	<i>Isopora brueggemanni</i>	邹仁林, 2001	Wallace et al, 2007; Dai & Horng, 2009a
<i>Acropora complanata</i>	<i>Acropora clathrata</i>	Yang & Dai, 1981	Wallace, 1999
<i>Acropora conferta</i>	<i>Acropora hyacinthus</i>	邹仁林等, 1975; 于登攀和邹仁林, 1996	Wallace, 1999; 邹仁林, 2001
<i>Acropora corymbosa</i>	<i>Acropora cytherea</i>	邹仁林等, 1975, 2001	Wallace, 1999
<i>Acropora crateriformis</i>	<i>Isopora crateriformis</i>	黄晖等, 2011	Wallace et al, 2007
<i>Acropora cuneata</i>	<i>Isopora cuneata</i>	黄晖等, 2011	Wallace et al, 2007; Dai & Horng, 2009a
<i>Acropora danai</i>	<i>Acropora abrotanoides</i>	Dai & Horng, 2009a, b	Wallace, 1999
<i>Acropora decipiens</i>	<i>Acropora robusta</i>	邹仁林等, 1975	Wallace, 1999; 邹仁林, 2001
<i>Acropora deliculata</i> <i>Acropora delicatula</i>	<i>Acropora selago</i>	邹仁林等, 1975	Wallace, 1999
<i>Acropora dissimilis</i>	<i>Acropora valida</i>	邹仁林等, 1975; 李颖虹等, 2004	Wallace, 1999
<i>Acropora exquisita</i>	<i>Acropora muricata</i>	Dai & Horng, 2009a; Zhao et al, 2017	Wallace, 1999
<i>Acropora formosa</i>	<i>Acropora muricata</i>	Dai, 1991; 邹仁林, 2001; 吴钟解等, 2011; 黄晖等, 2012a	Wallace, 1999
<i>Acropora haimeii</i>	<i>Acropora yongei</i>	邹仁林等, 1975, 2001; 梁文等, 2010	Wallace, 1999; 邹仁林, 2001
<i>Acropora navini</i>	<i>Acropora longicyathus</i>	Zhao et al, 2013	Wallace et al, 2012
<i>Acropora nobilis</i>	<i>Acropora intermedia</i>	Zhao et al, 2013, 2017	Wallace, 1999
<i>Acropora pacifica</i>	<i>Acropora robusta</i>	邹仁林等, 1975; Zhao et al, 2017	Wallace, 1999; 邹仁林, 2001
<i>Acropora palifera</i>	<i>Isopora palifera</i>	邹仁林, 2001	Wallace et al, 2007
<i>Acropora plana</i>	<i>Acropora tenuis</i>	黄晖等, 2011	Wallace, 1999

<i>Acropora prostrata</i>	<i>Acropora millepora</i>	邹仁林等, 1975; 梁文等, 2010	Wallace, 1999
<i>Acropora pyramidalis</i>	<i>Acropora digitifera</i>	Д.В.纳乌莫夫等, 1960	Wallace, 1999; 邹仁林, 2001
<i>Acropora rosaria</i>	<i>Acropora loripes</i>	邹仁林, 2001; 黄晖等, 2011; Zhao et al, 2013, 2017; 潘子良, 2017	Wallace, 1999
<i>Acropora stellulata</i>	<i>Acropora pruinosa</i>	黄晖等, 2012b	原文数据错误
<i>Acropora surculosa</i>	<i>Acropora hyacinthus</i>	邹仁林等, 1975	Wallace, 1999; 邹仁林, 2001
<i>Acropora syringodes</i>	<i>Acropora longicyathus</i>	Yang & Dai, 1981	Wallace, 1999
<i>Acropora tizardi</i>	<i>Acropora cerealis</i>	邹仁林等, 1975	邹仁林, 2001
<i>Alveopora irregularis</i>	<i>Goniopora stokesi</i>	Zou et al, 1992; 邹仁林, 2001	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Alveopora polyformis</i>	<i>Goniopora polyformis</i>	吴钟解等, 2011	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Anacropora matthaii</i>	<i>Anacropora matthaii</i>	Dai, 1991; 戴昌凤, 2004, 2007	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Australomussa rowleyensis</i>	<i>Lobophyllia rowleyensis</i>	Dai & Horng, 2009b	Arrigoni et al, 2014
<i>Barabattoia amicornum</i>	<i>Dipsastraea amicornum</i>	黄晖等, 2011, 2012c	Huang et al, 2014b
<i>Barabattoia mirabilis</i>	<i>Dipsastraea amicornum</i>	Yang & Dai, 1981	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Caulastrea tumida</i>	<i>Caulastraea tumida</i>	Dai & Horng, 2009b	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Caulastrea curvata</i>	<i>Caulastraea curvata</i>	黄晖等, 2013	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Caulastrea echinulata</i>	<i>Caulastraea echinulata</i>	Dai & Horng, 2009b	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Caulastrea furcata</i>	<i>Caulastraea furcata</i>	邹仁林, 2001; Dai & Horng, 2009b; 黄晖等, 2013	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Coeloria daedalea</i>	<i>Platygyra daedalea</i>	Д.В.纳乌莫夫等, 1960	邹仁林, 2001
<i>Coeloria stricta</i>	<i>Platygyra sinensis</i>	Д.В.纳乌莫夫等, 1960	邹仁林, 2001
<i>Cycloseris patelliformis</i>	<i>Cycloseris fragilis</i>	黄宗国, 2008	Hoeksema, 1989
<i>Diaseris fragilis</i>	<i>Cycloseris fragilis</i>	邹仁林, 2001	Hoeksema, 1989
<i>Dipsastraea danae</i>	<i>Dipsastraea danai</i>	Duprey et al, 2016	Huang et al, 2014b
<i>Echinophyllia echinata</i>	<i>Oxypora echinata</i>	Dai & Horng, 2009b	Arrigoni et al, 2019
<i>Euphyllia ancora</i>	<i>Fimbriaphyllia ancora</i>	Dai & Horng, 2009a	Luzon et al, 2017
<i>Euphyllia divisa</i>	<i>Fimbriaphyllia divisa</i>	戴昌凤, 2003, 2004, 2007	Luzon et al, 2017
<i>Euphyllia paraancora</i>	<i>Fimbriaphyllia paraancora</i>	Dai & Horng, 2009a	Luzon et al, 2017
<i>Favia danae</i>	<i>Dipsastraea danai</i>	Zhao et al, 2017	Huang et al, 2014b
<i>Favia danai</i>	<i>Dipsastraea danai</i>	黄晖等, 2018	Huang et al, 2014b
<i>Favia fавus</i>	<i>Dipsastraea fавus</i>	邹仁林, 2001	Huang et al, 2014b

<i>Favia helianthoides</i>	<i>Dipsastraea helianthoides</i>	陈乃观等, 2005	Huang et al, 2014b
<i>Favia laxa</i>	<i>Dipsastraea laxa</i>	Dai & Horng, 2009b	Huang et al, 2014b
<i>Favia lizardensis</i>	<i>Dipsastraea lizardensis</i>	Dai & Horng, 2009b	Huang et al, 2014b
<i>Favia maritima</i>	<i>Dipsastraea maritima</i>	Dai & Horng, 2009b	Huang et al, 2014b
<i>Favia matthaii</i>	<i>Dipsastraea matthaii</i>	Dai & Horng, 2009b	Huang et al, 2014b
<i>Favia maxima</i>	<i>Dipsastraea maxima</i>	Dai & Horng, 2009b	Huang et al, 2014b
<i>Favia palauensis</i>	<i>Coelastrea palauensis</i>	邹仁林, 2001	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Favia pallida</i>	<i>Dipsastraea pallida</i>	Dai & Horng, 2009b	Huang et al, 2014b
<i>Favia rotumana</i>	<i>Dipsastraea rotumana</i>	邹仁林, 2001; Dai & Horng, 2009b	Huang et al, 2014b
<i>Favia rotundata</i>	<i>Favites rotundata</i>	Dai & Horng, 2009b	Huang et al, 2014b
<i>Favia speciosa</i>	<i>Dipsastraea speciosa</i>	邹仁林, 2001; Dai & Horng, 2009b	Huang et al, 2014b
<i>Favia stelligera</i>	<i>Goniastrea stelligera</i>	Dai & Horng, 2009b	Huang et al, 2014b
<i>Favia veroni</i>	<i>Dipsastraea veroni</i>	Dai & Horng, 2009b	Huang et al, 2014b
<i>Favia vietnamensis</i>	<i>Dipsastraea vietnamensis</i>	Dai & Horng, 2009b	Huang et al, 2014b
<i>Favites aspera</i>	<i>Coelastrea aspera</i>	Yang & Dai, 1981	Huang et al, 2014b
<i>Favites micropentagona</i>	<i>Favites micropentagonus</i>	陈乃观等, 2005	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Favites russelli</i>	<i>Paragoniastrea russelli</i>	Dai & Horng, 2009b	Huang et al, 2014a
<i>Favites virens</i>	<i>Favites abdita</i>	Yang & Dai, 1981	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Favites yamanarii</i>	<i>Favites chinensis</i>	Yang & Dai, 1981	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Fungia concinna</i>	<i>Lithophyllon concinna</i>	Dai & Horng, 2009b	Gittenberger et al, 2011
<i>Fungia costulata</i>	<i>Cycloseris costulata</i>	Dai & Horng, 2009b	Gittenberger et al, 2011
<i>Fungia cyclolites</i>	<i>Cycloseris cyclolites</i>	Dai & Horng, 2009b	Gittenberger et al, 2011
<i>Fungia danai</i>	<i>Danafungia horrida</i>	黄晖等, 2011, 2013, 2018	Gittenberger et al, 2011
<i>Fungia echinata</i>	<i>Ctenactis echinata</i>	邹仁林, 2001	Hoeksema, 1989
<i>Fungia fragilis</i>	<i>Cycloseris fragilis</i>	Dai & Horng, 2009b	Gittenberger et al, 2011
<i>Fungia granulosa</i>	<i>Pleuractis granulosa</i>	Dai & Horng, 2009b	Gittenberger et al, 2011
<i>Fungia gravis</i>	<i>Pleuractis gravis</i>	Dai & Horng, 2009b	Gittenberger et al, 2011
<i>Fungia horrida</i>	<i>Danafungia horrida</i>	Dai & Horng, 2009b	Gittenberger et al, 2011
<i>Fungia moluccensis</i>	<i>Pleuractis moluccensis</i>	Dai & Horng, 2009b	Gittenberger et al, 2011
<i>Fungia paumotensis</i>	<i>Pleuractis paumotensis</i>	邹仁林, 2001; Dai & Horng, 2009b	Gittenberger et al, 2011
<i>Fungia repanda</i>	<i>Lithophyllon repanda</i>	Dai & Horng, 2009b	Gittenberger et al, 2011
<i>Fungia scabra</i>	<i>Pleuractis granulosa</i>	黄晖等, 2011	Hoeksema, 1989
<i>Fungia scruposa</i>	<i>Danafungia scruposa</i>	Dai & Horng, 2009b	Gittenberger et al, 2011
<i>Fungia scutaria</i>	<i>Lobactis scutaria</i>	邹仁林, 2001; Dai & Horng, 2009b	Gittenberger et al, 2011
<i>Fungia sinensis</i>	<i>Cycloseris sinensis</i>	Dai & Horng, 2009b	Gittenberger et al, 2011
<i>Fungia taiwanensis</i>	<i>Pleuractis taiwanensis</i>	Dai & Horng, 2009b	Gittenberger et al, 2011
<i>Fungia tenuis</i>	<i>Cycloseris tenuis</i>	Dai & Horng, 2009b	Gittenberger et al, 2011
<i>Fungia valida</i>	<i>Danafungia horrida</i>	郑明修, 2008; 戴昌凤, 2012	Gittenberger et al, 2011

<i>Fungia vaughani</i>	<i>Cycloseris vaughani</i>	Dai & Horng, 2009b	Gittenberger et al, 2011
<i>Galaxea aspera</i>	<i>Galaxea fascicularis</i>	邹仁林等, 1975; Zou et al, 1988; 李颖虹等, 2004	邹仁林, 2001
<i>Galaxea lamarcki</i>	<i>Galaxea astreata</i>	邹仁林等, 1975; 于登攀和邹仁林, 1996	邹仁林, 2001
<i>Galaxea musicalis</i>	<i>Galaxea astreata</i>	Yang & Dai, 1981	Dai & Horng, 2009a
<i>Goniastrea aspera</i>	<i>Coelastrea aspera</i>	邹仁林, 2001; Dai & Horng, 2009b	Huang et al, 2014b
<i>Goniastrea australensis</i>	<i>Paragoniastrea australensis</i>	Dai & Horng, 2009b	Huang et al, 2014a
<i>Goniastrea benhami</i>	<i>Paragoniastrea australensis</i>	Yang & Dai, 1981	Huang et al, 2014a
<i>Goniastrea deformis</i>	<i>Paragoniastrea deformis</i>	戴昌凤, 2003, 2004; Hsieh, 2008	Huang et al, 2014a
<i>Goniastrea halicora</i>	<i>Favites halicora</i>	Д.В.纳乌莫夫等, 1960	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Goniastrea palauensis</i>	<i>Coelastrea palauensis</i>	邹仁林, 2001; Dai & Horng, 2009b	Huang et al, 2014b
<i>Goniastrea parvistella</i>	<i>Goniastrea edwardsi</i>	Yang & Dai, 1981	Dai & Horng, 2009b
<i>Goniastrea speciosa</i>	<i>Dipsastraea speciosa</i>	王云祥等, 2017	Huang et al, 2014b
<i>Goniastrea yamanarii</i>	<i>Favites chinensis</i>	邹仁林等, 1975, 2001	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Goniastrea yamanarii profunda</i>	<i>Favites chinensis</i>	邹仁林等, 1975, 2001	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Goniopora duofasciata</i>	<i>Goniopora planulata</i>	邹仁林, 2001	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Goniopora stutchburyi</i>	<i>Bernardpora stutchburyi</i>	邹仁林, 2001; Dai & Horng, 2009a	Kitano et al, 2014
<i>Goniopora wotouensis</i>	<i>Bernardpora stutchburyi</i>	张元林和邹仁林, 1987; Chen et al, 2009	邹仁林, 2001
<i>Halomitra philippinensis</i>	<i>Halomitra pileus</i>	Yang & Dai, 1981	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Hydnophora contignatio</i>	<i>Hydnophora exesa</i>	邹仁林, 2001	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Leptastrea ehrenbergiana</i>	<i>Leptastrea purpurea</i>	Д.В.纳乌莫夫等, 1960	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Leptoria gracilis</i>	<i>Leptoria phrygia</i>	戴昌凤, 2007	Dai & Horng, 2009b
<i>Leptoseris tenuis</i>	<i>Leptoseris hawaiiensis</i>	Zhao et al, 2017	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Lithophyllon edwardsi</i>	<i>Lithophyllon undulatum</i>	邹仁林, 2001	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Lithophyllon mokai</i>	<i>Cycloseris mokai</i>	Dai & Horng, 2009b	Gittenberger et al, 2011
<i>Lobophyllia costata</i>	<i>Lobophyllia hemprichii</i>	邹仁林等, 1975; 于登攀和邹仁林, 1996	邹仁林, 2001
<i>Lobophyllia pachysepta</i>	<i>Acanthastrea pachysepta</i>	Dai & Horng, 2009a, b; 黄晖等, 2018	Huang et al, 2016
<i>Merulina laxa</i>	<i>Hydnophora rigida</i>	邹仁林等, 1975	邹仁林, 2001

<i>Merulina vaughani</i>	<i>Merulina ampliata</i>	Yang & Dai, 1981	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Micromussa minuta</i>	<i>Acanthastrea minuta</i>	陈乃观等, 2005; 陈天然, 2006	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Montastrea annuligera</i>	<i>Astrea annuligera</i>	Dai & Horng, 2009b	Huang et al, 2014b
<i>Montastrea colemani</i>	<i>Favites colemani</i>	Zhao et al, 2013	Huang et al, 2014b
<i>Montastrea curta</i>	<i>Astrea curta</i>	黄晖等, 2018	Huang et al, 2014b
<i>Montastrea magnistellata</i>	<i>Favites magnistellata</i>	Dai & Horng, 2009b	Huang et al, 2014b
<i>Montastrea valenciennesi</i>	<i>Favites valenciennesi</i>	Dai & Horng, 2009b	Huang et al, 2014b
<i>Montipora composita</i>	<i>Montipora aequituberculata</i>	Yang & Dai, 1981	Dai & Horng, 2009a
<i>Montipora cristagalli</i>	<i>Montipora circumvallata</i>	邹仁林等, 1975; 于登攀和邹仁林, 1996	邹仁林, 2001
<i>Montipora divaricata</i>	<i>Montipora digitata</i>	Yang & Dai, 1981	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Montipora fruticosa</i>	<i>Montipora digitata</i>	邹仁林等, 1975	邹仁林, 2001
<i>Montipora hirsuta</i>	<i>Montipora hispida</i>	Zhao et al, 2017	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Montipora lichen</i>	<i>Porites lichen</i>	Dai, 1991	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Montipora ramosa</i>	<i>Montipora angulata</i>	Zhao et al, 2017	Dai & Horng, 2009a
<i>Montipora sinensis</i>	<i>Montipora monasteriata</i>	邹仁林等, 1975; 于登攀和邹仁林, 1996; Chen et al, 2009	邹仁林, 2001
<i>Montipora socialis</i>	<i>Montipora foveolata</i>	Yang & Dai, 1981	Dai & Horng, 2009a
<i>Montipora solanderi</i>	<i>Montipora stellata</i>	邹仁林, 2001	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Montipora striata</i>	<i>Montipora stellata</i>	邹仁林等, 1975	邹仁林, 2001
<i>Montipora trabeculata</i>	<i>Montipora efflorescens</i>	邹仁林等, 1975	邹仁林, 2001
<i>Montipora vietnamensis</i>	<i>Montipora truncata</i>	赵美霞等, 2009	邹仁林, 2001
<i>Mycedium tenuicostatum</i>	<i>Mycedium elephantotus</i>	Yang & Dai, 1981	Dai & Horng, 2009b
<i>Oxypora glabra</i>	<i>Echinophyllia glabra</i>	Dai & Horng, 2009b	Arrigoni et al, 2019
<i>Paraclavaria triangularis</i>	<i>Merulina triangularis</i>	黄晖等, 2018	Huang et al, 2014a
<i>Parahalomitra robusta</i>	<i>Sandalolitha robusta</i>	邹仁林等, 1975	邹仁林, 2001
<i>Pavona lata</i>	<i>Pavona decussata</i>	杨晨等, 2011	邹仁林, 2001
<i>Pavona liliacea</i>	<i>Pavona clavus</i>	戴昌凤, 2003	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Pavona minikoiensis</i>	<i>Pavona varians</i>	于登攀和邹仁林, 1996	邹仁林, 2001
<i>Pavona Polyastra obtusata</i>	<i>Pavona venosa</i>	Yang & Dai, 1981	Dai & Horng, 2009a

<i>Pavona praelorta</i>	<i>Pavona cactus</i>	邹仁林等, 1975	邹仁林, 2001; Dai & Horng, 2009a
<i>Pectinia ayleni</i>	<i>Physophyllia ayleni</i>	黄晖等, 2018	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Platygyra astreiformis</i>	<i>Platygyra daedalea</i>	黄宗国, 2008	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Platygyra phrygia</i>	<i>Leptoria phrygia</i>	邹仁林等, 1975	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Platygyra rustica</i>	<i>Platygyra daedalea</i>	Yang & Dai, 1981; Zou et al, 1992; Chen et al, 2009	邹仁林, 2001
<i>Plesiastrea curta</i>	<i>Astrea curta</i>	邹仁林, 2001	Huang et al, 2014b
<i>Pocillopora brevicornis</i>	<i>Pocillopora damicornis</i>	李颖虹等, 2004	邹仁林, 2001
<i>Pocillopora danae</i>	<i>Pocillopora verrucosa</i>	邹仁林等, 1975	邹仁林, 2001
<i>Podabacia elegans</i>	<i>Lithophyllon undulatum</i>	Д.В.纳乌莫夫等, 1960; Yang & Dai, 1981; Zou et al, 1992	Dai & Horng, 2009b
<i>Porites andrewsi</i>	<i>Porites cylindrica</i>	邹仁林, 2001; Zhao et al, 2017	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Porites cocosensis</i>	<i>Porites lutea</i>	Zhao et al, 2013	讨论暂定
<i>Porites iwayamaensis</i>	<i>Porites rus</i>	Yang & Dai, 1981	Dai & Horng, 2009b
<i>Porites tenuis</i>	<i>Porites lutea</i>	Dai, 1991; 郑明修, 2008; 戴昌凤, 2012	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Porites tuberculosa</i>	<i>Montipora tuberculosa</i>	Dai & Fan, 1996; Zhao et al, 2013	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Psammocora contigua pulchra</i>	<i>Psammocora contigua</i>	邹仁林等, 1975	邹仁林, 2001
<i>Psammocora digitata</i>	<i>Psammocora haimiana</i>	Dai & Horng, 2009b	Benzoni et al, 2010
<i>Psammocora divaricata</i>	<i>Psammocora contigua</i>	李颖虹等, 2004	邹仁林, 2001
<i>Psammocora exesa</i>	<i>Coscinaraea exesa</i>	李元超等, 2018	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Psammocora haimeana</i>	<i>Psammocora profundacella</i>	邹仁林, 2001; Dai & Horng, 2009b	Benzoni et al, 2010
<i>Psammocora superficialis</i>	<i>Psammocora profundacella</i>	邹仁林, 2001; Dai & Horng, 2009b	Benzoni et al, 2010
<i>Psammocora vaughani</i>	<i>Psammocora nierstraszi</i>	Zhao et al, 2017	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Scolymia vitiensis</i>	<i>Lobophyllia vitiensis</i>	Dai & Horng, 2009b	Huang et al, 2016
<i>Seriatopora angulata</i>	<i>Seriatopora hystrix</i>	李颖虹等, 2004	邹仁林, 2001
<i>Stylophora armata</i>	<i>Stylocoeniella armata</i>	Yang & Dai, 1981	邹仁林, 2001
<i>Stylophora elongata</i>	<i>Stylophora pistillata</i>	Д.В.纳乌莫夫等, 1960	邹仁林, 2001
<i>Stylophora mordax</i>	<i>Stylophora pistillata</i>	戴昌凤, 2007	Dai & Horng, 2009b
<i>Symphyllia agaricia</i>	<i>Lobophyllia agaricia</i>	邹仁林, 2001; Dai & Horng, 2009b	Huang et al, 2016
<i>Symphyllia gigantea</i>	<i>Oulophyllia crispa</i>	蔡泽富等, 2015	Hoeksema & Cairns, 2020

<i>Symphyllia nobilis</i>	<i>Lobophyllia recta</i>	邹仁林, 2001	Huang et al, 2016
<i>Symphyllia radians</i>	<i>Lobophyllia radians</i>	邹仁林, 2001; Dai & Horng, 2009b	Huang et al, 2016
<i>Symphyllia recta</i>	<i>Lobophyllia recta</i>	邹仁林, 2001; Dai & Horng, 2009b	Huang et al, 2016
<i>Symphyllia valenciennesii</i>	<i>Lobophyllia valenciennesii</i>	Dai & Horng, 2009b	Huang et al, 2016
<i>Synaraea undulata</i>	<i>Porites rus</i>	Д.В.纳乌莫夫等, 1960	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Turbinaria contorta</i>	<i>Turbinaria frondens</i>	Yang & Dai, 1981; 张元林和邹仁林, 1987	邹仁林, 2001; Dai & Horng, 2009a
<i>Turbinaria elegans</i>	<i>Turbinaria stellulata</i>	邹仁林, 2001; 周浩郎和黎广钊, 2014	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Turbinaria foliosa</i>	<i>Turbinaria frondens</i>	邹仁林, 2001	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Turbinaria mantonae</i>	<i>Turbinaria stellulata</i>	邹仁林等, 1975, 2001	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Turbinaria titizimaensis</i>	<i>Turbinaria stellulata</i>	邹仁林, 2001	Hoeksema & Cairns, 2020
<i>Turbinaria tubifera</i>	<i>Turbinaria mesenterina</i>	Yang & Dai, 1981	Dai & Horng, 2009a

参考文献

- Arrigoni R, Benzoni F, Huang DW, Fukami H, Chen CA, Berumen ML, Hoogenboom M, Thomson DP, Hoeksema BW, Budd AF, Zayasu Y, Terraneo TI, Kitano YF, Baird AH (2016) When forms meet genes: Revision of the scleractinian genera *Micromussa* and *Homophyllia* (Lobophylliidae) with a description of two new species and one new genus. *Contributions to Zoology*, 85, 387–422.
- Arrigoni R, Richards ZT, Chen CA, Baird AH, Benzoni F (2014) Taxonomy and phylogenetic relationships of the coral genera *Australomussa* and *Parascolumia* (Scleractinia, Lobophylliidae). *Contributions to Zoology*, 83, 195–215.
- Arrigoni R, Berumen ML, Stolarski J, Terraneo TI, Benzoni F (2019) Uncovering hidden coral diversity: A new cryptic lobophylliid scleractinian from the Indian Ocean. *Cladistics*, 35, 301–328.
- Benzoni F, Stefani F, Pichon M, Galli P (2010) The name game: Morpho-molecular species boundaries in the genus *Psammocora* (Cnidaria, Scleractinia). *Zoological Journal of the Linnean Society*, 160, 421–456.
- Cai ZF, Chen SQ, Wu ZJ, Tong YH, Huang JY, Zhang GX, Li XM (2015) The spatial and temporal distribution characteristics of hermatypic corals in the coastal waters of northeastern Hainan Island. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 3, 78–86. (in Chinese with English abstract) [蔡泽富, 陈石泉, 吴钟解, 童玉和, 黄洁英, 张光星, 李向民 (2015) 海南岛东北部沿岸造礁石珊瑚时空分布特征. *海洋湖沼通报*, 3, 78–86.]
- Chan ALK, Choi CLS, McCorry D, Chan KK, Lee MW, Ang PJ (2005) Field guide to hard corals of Hong Kong. Agriculture, Fisheries and Conservation Department, Hong Kong. (in Chinese with English abstract) [陈乃观, 蔡莉斯, 麦海莉, 陈璠, 李美华, 伍泽赓 (2005) 香港石珊瑚图鉴. 渔农自然护理署, 香港.]
- Chen TR, Yu KF, Shi Q, Li S, Price GJ, Wang R, Zhao MX, Chen TG, Zhao JX (2009) Twenty-five years of change in scleractinian coral communities of Daya Bay (northern South China Sea) and its response to the 2008 AD extreme cold climate event. *Chinese Science Bulletin*, 54, 2107–2117.
- Chen TR, Yu KF, Shi Q, Li S, Wang R, Zhao MX (2006) Distribution and status of scleractinian coral communities in the Daya Bay. *Guangdong Tropical Geography*, 27, 493–498. (in Chinese with English abstract) [陈天然, 余克服, 施祺, 李淑, 王嵘, 赵美霞 (2006) 广东大亚湾石珊瑚群落的分布及动态变化. *热带地理*, 27, 493–498.]

- Dai CF (1991) Reef environment and coral fauna of southern Taiwan. *Atoll Research Bulletin*, 354, 1–28.
- Dai CF (2007) Distribution and Species Diversity of Reef Corals in Taiwan (III). Fisheries Agent, “Council of Agriculture”, Taipei. (in Chinese with English abstract) [戴昌凤 (2007) 台湾海域珊瑚礁分布及珊瑚多样性调查研究(III). “行政院”农业委员会渔业署, 台北.]
- Dai CF (2012) Analysis on the Natural Resources and Management Strategies of the Dongsha Atoll National Park. Marine “National” Park Headquarters, Gaoxiang. (in Chinese with English abstract) [戴昌凤 (2012) 东沙环礁国家公园自然资源与经营管理策略评析成果报告. 海洋“国家公园”管理处, 高雄.]
- Dai CF, Fan TY (1996) Coral fauna of Taiping Island (Itu Aba Island) in the spratlys of the south China Sea. *Atoll Research Bulletin*, 436, 1–21.
- Dai CF, Horng S (2009a) Scleractinia Fauna of Taiwan. I. The Complex Group. Taiwan University, Taipei.
- Dai CF, Horng S (2009b) Scleractinia Fauna of Taiwan. II. The Robust Group. Taiwan University, Taipei.
- Dai CF, Soong K, Jeng MS, Chen CA, Fang TY (2003) Status of Coral Reefs in Taiwan. Fisheries Agent, “Council of Agriculture”, Taipei. (in Chinese with English abstract) [戴昌凤, 宋克义, 郑明修, 陈昭伦, 樊同云 (2003) 台湾海域珊瑚礁现状调查. “行政院”农业委员会渔业署, 台北.]
- Dai CF, Soong K, Jeng MS, Chen CA, Fang TY (2005) Status of Coral Reefs in Taiwan. Fisheries Agent, “Council of Agriculture”, Taipei. (in Chinese with English abstract) [戴昌凤, 宋克义, 郑明修, 陈昭伦, 樊同云 (2005) 台湾海域珊瑚礁现状调查. “行政院”农业委员会渔业署, 台北.]
- Duprey NN, Yasuhara M, Baker DM (2016) Reefs of tomorrow: Eutrophication reduces coral biodiversity in an urbanized seascape. *Global Change Biology*, 22, 3550–3565.
- Gittenberger A, Reijnen BT, Hoeksema BW (2011) A molecularly based phylogeny reconstruction of mushroom corals (Scleractinia: Fungiidae) with taxonomic consequences and evolutionary implications for life history traits. *Contributions to Zoology*, 80, 107–132.
- Hoeksema BW (1989) Taxonomy, phylogeny and biogeography of mushroom corals (Scleractinia: Fungiidae). *Zoologische Verhandelingen*, 254, 1–295.
- Hoeksema BW, Cairns S (2020) World List of Scleractinia. <http://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=1363> (accessed on 2020-01-16)
- Hsieh HJ (2008) Subtropical Coral Communities in Penghu Islands. PhD dissertation, Taiwan University, Taipei.
- Huang DW, Arrigoni R, Benzoni F, Fukami H, Knowlton N, Smith ND, Stolarski J, Chou LM, Budd AF (2016) Taxonomic classification of the reef coral family Lobophylliidae (Cnidaria: Anthozoa: Scleractinia). *Zoological Journal of the Linnean Society*, 178, 436–481.
- Huang DW, Benzoni F, Arrigoni R, Baird AH, Berumen ML, Bouwmeester J, Chou LM, Fukami H, Licuanan WY, Lovell ER, Meier R, Todd PA, Budd AF (2014a) Towards a phylogenetic classification of reef corals: The Indo-Pacific genera *Merulina*, *Goniastrea* and *Scapophyllia* (Scleractinia, Merulinidae). *Zoologica Scripta*, 43, 531–548.
- Huang DW, Benzoni F, Fukami H, Knowlton N, Smith ND, Budd AF (2014b) Taxonomic classification of the reef coral families Merulinidae, Montastraeidae, and Diploastraeidae (Cnidaria: Anthozoa: Scleractinia). *Zoological Journal of the Linnean Society*, 171, 277–355.
- Huang H, Yang JH, Dong ZJ (2013) Coral Reef Atlas of Zhubi, Nansha Islands. Science Press, Beijing. (in Chinese) [黄晖, 杨剑辉, 董志军 (2013) 南沙群岛渚碧礁珊瑚礁生物图册. 科学出版社, 北京.]
- Huang H, Yang JH, Jiang L, Ma HJ (2018) Coral Reef Atlas of Xisha Islands. Science Press, Beijing. (in Chinese) [黄晖, 杨剑辉, 江雷, 马宏杰 (2018) 西沙群岛珊瑚礁生物图册. 科学出版社, 北京.]
- Huang H, You F, Lian JS, Yang JH, Li XB, Dong ZJ, Zhang CL, Yuan T (2011) Species diversity and distribution of scleractinian coral at Xisha Islands, China. *Biodiversity Science*, 19, 710–715. (in Chinese with English abstract) [黄晖, 尤丰, 练健生, 杨剑辉, 李

- 秀保, 董志军, 张成龙, 袁涛 (2011) 西沙群岛海域造礁石珊瑚物种多样性与分布特点. 生物多样性, 19, 710–715.]
- Huang H, You F, Lian JS, Zhang CL, Yang JH, Li XB, Yuan T, Dong ZJ (2012a) Composition and distribution of scleractinian coral in the northwest of Hainan Island. *Marine Sciences*, 36, 64–74. (in Chinese with English abstract) [黄晖, 尤丰, 练健生, 张成龙, 杨剑辉, 李秀保, 袁涛, 董志军 (2012a) 海南岛西北部海域珊瑚礁造礁石珊瑚种类组成与分布. 海洋科学, 36, 64–74.]
- Huang H, You F, Lian JS, Zhang CL, Yang JH, Li XB, Yuan T, Zhang YY, Zhou GW (2012b) Status and conservation strategies of the scleractinian coral community in the Wanshan Islands at Pearl River Estuary. *Marine Science Bulletin*, 31, 189–197. (in Chinese with English abstract) [黄晖, 尤丰, 练健生, 张成龙, 杨剑辉, 李秀保, 袁涛, 张浴阳, 周国伟 (2012b) 珠江口万山群岛海域造礁石珊瑚群落分布与保护. 海洋通报, 31, 189–197.]
- Huang H, Zhang CL, Yang JH, You F, Lian JS, Tan YH (2012c) Scleractinian coral community characteristics in Zhubi reef sea area of Nansha Islands. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 31, 79–84. (in Chinese with English abstract) [黄晖, 张成龙, 杨剑辉, 尤丰, 练健生, 谭焯辉 (2012c) 南沙群岛渚碧礁海域造礁石珊瑚群落特征. 台湾海峡, 31, 79–84.]
- Jeng MX (2008) Investigation and Monitoring of Ecological Resources of Dongsha Coral Reefs (2). Marine "National" Park Headquarters, Gaoxiong. (in Chinese with English abstract) [郑明修 (2008) 东沙海域珊瑚礁生态资源调查与监测(二). 海洋“国家公园”管理处, 高雄.]
- Kitano YF, Benzoni F, Arrigoni R, Shirayama Y, Wallace CC, Fukami H (2014) A phylogeny of the family Poritidae (cnidaria, scleractinia) based on molecular and morphological analyses. *PLoS ONE*, 9, e98406.
- Li YH, Huang XP, Yue WZ, Lin YT, Zou RL, Huang H (2004) Ecological study on coral reef and intertidal benthos around Yongxing Island, South China Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 35, 176–182. (in Chinese with English abstract) [李颖虹, 黄小平, 岳维忠, 林燕棠, 邹仁林, 黄晖 (2004) 西沙永兴岛珊瑚礁与礁坪生物生态学研究. 海洋与湖沼, 35, 176–182.]
- Li YC, Chen SQ, Zheng XQ, Cai ZF, Wu ZJ, Wang DR, Lan JX (2018) Analysis of the change of Hermatypic corals in Yongxing Island and Qilianyu Island in nearly a decade. *Haiyang Xuebao*, 40, 97–109. (in Chinese with English abstract) [李元超, 陈石泉, 郑新庆, 蔡泽富, 吴钟解, 王道儒, 兰建新 (2018) 永兴岛及七连屿造礁石珊瑚近10年变化分析. 海洋学报 (中文版), 40, 97–109.]
- Liang W, Li GZ, Fan HQ, Wang X, Nong HQ, Huang H, Li XB, Lan GB (2010) Species composition and distribution of coral on Weizhou Island, Guangxi. *Guangxi Sciences*, 17, 93–96. (in Chinese with English abstract) [梁文, 黎广钊, 范航清, 王欣, 农华琼, 黄晖, 李秀保, 兰国宝 (2010) 广西涠洲岛造礁石珊瑚属种组成及其分布特征. 广西科学, 17, 93–96.]
- Luzon KS, Lin MF, Ablan LMCA, Licuanan WRY, Chen CA (2017) Resurrecting a subgenus to genus: Molecular phylogeny of *Euphyllia* and *Fimbriaphyllia* (order Scleractinia; family Euphyllidae; clade V). *PeerJ*, 5, e4074.
- Naymov DV, Yan JS, Huang MX, Li HP (1960) Main type of coral reefs of Hainan Island. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 3, 157–178. (in Chinese) [Д.В.纳乌莫夫, 颜京松, 黄明显, 李和平 (1960) 海南岛珊瑚礁的主要类型. 海洋与湖沼, 3, 157–178.]
- Pan ZL (2017) Interspecies and spatial diversity of Symbiodinium diversity in Coral species from the Huangyan Island, and its ecological significance. Master dissertation, Guangxi University, Nanning. (in Chinese with English abstract) [潘子良 (2017) 黄岩岛造礁石珊瑚共生藻密度的种间、空间差异及其生态意义. 硕士学位论文, 广西大学, 南宁.]
- Wallace CC (1999) *Staghorn Corals of the World: A Revision of the Genus Acropora*. CSIRO Publishing, Melbourne.
- Wallace CC, Chen CA, Fukami H, Muir PR (2007) Recognition of separate genera within *Acropora* based on new morphological, reproductive and genetic evidence from *Acropora togianensis*, and elevation of the subgenus *Isopora* Studer, 1878 to genus (Scleractinia: Astrocoeniidae; Acroporidae). *Coral Reefs*, 26, 231–239.
- Wallace CC, Done BJ, Muir PR (2012) Revision and Catalogue of Worldwide Staghorn Corals *Acropora* and *Isopora* (Scleractinia: Acroporidae) in the Museum of Tropical Queensland. Queensland Museum, Queensland, Australia.
- Wang YX, Qin CX, Chen PM, Yuan HR, Tong F, Feng X, Li XG (2017) Species diversity and distribution of scleractinian corals in Shenzhen Sea area. *Marine Fisheries*, 39, 131–139. (in Chinese with English abstract) [王云祥, 秦传新, 陈丕茂, 袁华荣, 佟飞,

- 冯雪, 黎小国 (2017) 深圳海域造礁石珊瑚分布特点与多样性. 海洋渔业, 39, 131–139.]
- Wu ZJ, Wu R, Wang DR, Li YC (2011) A preliminary study on the status of coral reef health in the Southeast Coastal regions of Hainan Island. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 32, 122–130. (in Chinese with English abstract) [吴钟解, 吴瑞, 王道儒, 李元超 (2011) 海南岛东、南部珊瑚礁生态健康状况初步分析. 热带作物学报, 32, 122–130.]
- Yang C, Yang YH, Song PX, Li HW (2011) Diversity of coral species along the Yunlong Bay coastal waters in Longlou Town of Wenchang City. *Journal of Hainan Normal University (Natural Science)*, 24, 201–203. (in Chinese with English abstract) [杨晨, 杨亚辉, 宋培学, 李洪武 (2011) 海南省文昌市龙楼镇云龙湾石珊瑚的物种多样性调查. 海南师范大学学报(自然科学版), 24, 201–203.]
- Yang RT, Dai CF (1981) Coral communities in Yen-liao Bay, Taiwan. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 13, 167–180.
- Yu DP, Zou RL (1996) Study on the species diversity of the scleractinian coral community on Luhuitou fringing reef. *Acta Ecologica Sinica*, 16, 475–496. (in Chinese with English abstract) [于登攀, 邹仁林 (1996) 鹿回头库礁造礁石珊瑚物种多样性的研究. 生态学报, 16, 475–496.]
- Zhao MX, Yu KF, Shi Q, Chen TR, Zhang HL, Chen TG (2013) Coral communities of the remote atoll reefs in the Nansha Islands, southern South China Sea. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185, 7381–7392.
- Zhao MX, Yu KF, Shi Q, Yang HQ, Riegl B, Zhang QM, Yan HQ, Chen TR, Liu GH, Lin ZY (2017) Comparison of coral diversity between big and small atolls: A case study of Yongle atoll and Lingyang reef, Xisha Islands, central of South China Sea. *Biodiversity and Conservation*, 26, 1143–1159.
- Zhao MX, Yu KF, Zhang QM, Shi Q (2009) Evolution and its environmental significance of coral diversity on Luhuitou fringing reef, Sanya. *Marine Environmental Science*, 28, 11–16. (in Chinese with English abstract) [赵美霞, 余克服, 张乔民, 施祺 (2009) 近50a来三亚鹿回头石珊瑚物种多样性的演变特征及其环境意义. 海洋环境科学, 28, 11–16.]
- Zhang YL, Zou RL (1987) Community structure of shallow water stony corals in Daya Bay. *Tropic Oceanology*, 6, 12–18. (in Chinese with English abstract) [张元林, 邹仁林 (1987) 大亚湾浅水石珊瑚群落结构的研究. 热带海洋学报, 6, 12–18.]
- Zhou HL, Li GZ (2014) Assessment on the health of coral reefs at Weizhou Island. *Journal of Guangxi Academy*, 30, 238–247. (in Chinese with English abstract) [周浩郎, 黎广钊 (2014) 涠洲岛珊瑚礁健康评估. 广西科学院学报, 30, 238–247.]
- Zou RL (2001) *Fauna Sinica · Coelenterata · Anthozoa · Scleractinia · Hermatypic Coral*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [邹仁林 (2001) 中国动物志·腔肠动物门·珊瑚虫纲·石珊瑚目·造礁石珊瑚. 科学出版社, 北京.]
- Zou RL, Wang ZH, Cheung CPS (1992) A Resurvey of the Corals at Hoi Ha Wan After Eight Years and the Tai Leng Tun Borrow Area, The Marine Flora and Fauna of Hong Kong and Southern China. III. In: *Proceedings of the 4th International Marine Biological Workshop: The Marine Flora and Fauna of Hong Kong and Southern China*, pp. 837–849. Hong Kong University Press, Hong Kong.
- Zou RL, Zhang YL, Xie YK (1988) An Ecological Study of Reef Corals Around Weizhou Island. In: *Proceedings on Marine Biology of the South China Sea*, pp. 201–211. China Ocean Press, Beijing.
- Zou RL, Song SW, Ma JH (1975) *Hermatypic Scleractinia in Shallow Waters of Hainan Island*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [邹仁林, 宋善文, 马江虎 (1975) 海南浅水造礁石珊瑚. 科学出版社, 北京.]

附录3 中国造礁石珊瑚物种名录

Appendix 3 Checklist of Chinese hermatypic corals

1. 复杂类群 Complex

1.1. 鹿角珊瑚科 Acroporidae

1.1.1 鹿角珊瑚属 *Acropora*

- 丘突鹿角珊瑚 *Acropora abrotanoides* (Lamarck, 1816)
尖锐鹿角珊瑚 *Acropora aculeus* (Dana, 1846)
繁枝鹿角珊瑚 *Acropora acuminata* (Verrill, 1864)
钩鹿角珊瑚 *Acropora aduncata* Zou, 1984
花柄鹿角珊瑚 *Acropora anthocercis* (Brook, 1893)
矛枝鹿角珊瑚 *Acropora aspera* (Dana, 1846)
简单鹿角珊瑚 *Acropora austera* (Dana, 1846)
巴氏鹿角珊瑚 *Acropora batunai* Wallace, 1997
刺鹿角珊瑚 *Acropora carduus* (Dana, 1846)
卡罗鹿角珊瑚 *Acropora caroliniana* Nemenzo, 1976
谷鹿角珊瑚 *Acropora cerealis* (Dana, 1846)
方格鹿角珊瑚 *Acropora clathrata* (Brook, 1891)
浪花鹿角珊瑚 *Acropora cytherea* (Dana, 1846)
树形鹿角珊瑚 *Acropora dendrum* (Bassett-Smith, 1890)
细致鹿角珊瑚 *Acropora derawanensis* Wallace, 1997
指形鹿角珊瑚 *Acropora digitifera* (Dana, 1846)
两叉鹿角珊瑚 *Acropora divaricata* (Dana, 1846)
董氏鹿角珊瑚 *Acropora donei* Veron & Wallace, 1984
棘鹿角珊瑚 *Acropora echinata* (Dana, 1846)
旁枝鹿角珊瑚 *Acropora elseyi* (Brook, 1892)
花鹿角珊瑚 *Acropora florida* (Dana, 1846)
芽枝鹿角珊瑚 *Acropora gemmifera* (Brook, 1892)
板叶鹿角珊瑚 *Acropora glauca* (Brook, 1893)
巨枝鹿角珊瑚 *Acropora grandis* (Brook, 1892)
颗粒鹿角珊瑚 *Acropora granulosa* (Milne Edwards, 1860)
丑鹿角珊瑚 *Acropora horrida* (Dana, 1846)
粗野鹿角珊瑚 *Acropora humilis* (Dana, 1846)
风信子鹿角珊瑚 *Acropora hyacinthus* (Dana, 1846)
彰显鹿角珊瑚 *Acropora insignis* Nemenzo, 1967
中间鹿角珊瑚 *Acropora intermedia* (Brook, 1891)
杰氏鹿角珊瑚 *Acropora jacquelineae* Wallace, 1994
日本鹿角珊瑚 *Acropora japonica* Veron, 2000
基尔斯蒂鹿角珊瑚 *Acropora kirstyae* Veron & Wallace, 1984
盘枝鹿角珊瑚 *Acropora latistella* (Brook, 1892)
列枝鹿角珊瑚 *Acropora listeri* (Brook, 1893)
罗肯鹿角珊瑚 *Acropora lokani* Wallace, 1994
长巢鹿角珊瑚 *Acropora longicyathus* (Milne Edwards, 1860)
奇枝鹿角珊瑚 *Acropora loripes* (Brook, 1892)
宽片鹿角珊瑚 *Acropora lutkeni* Crossland, 1952

- 灌丛鹿角珊瑚 *Acropora microclados* (Ehrenberg, 1834)
小叶鹿角珊瑚 *Acropora microphthalma* (Verrill, 1869)
多孔鹿角珊瑚 *Acropora millepora* (Ehrenberg, 1834)
巨锥鹿角珊瑚 *Acropora monticulosa* (Brüggemann, 1879)
美丽鹿角珊瑚 *Acropora muricata* (Linnaeus, 1758)
细枝鹿角珊瑚 *Acropora nana* (Studer, 1879)
鼻形鹿角珊瑚 *Acropora nasuta* (Dana, 1846)
匍匐鹿角珊瑚 *Acropora palmerae* Wells, 1954
圆锥鹿角珊瑚 *Acropora paniculata* Verrill, 1902
乳突鹿角珊瑚 *Acropora papillare* Latypov, 1992
多盘鹿角珊瑚 *Acropora polystoma* (Brook, 1891)
霜鹿角珊瑚 *Acropora pruinosa* (Brook, 1893)
佳丽鹿角珊瑚 *Acropora pulchra* (Brook, 1891)
瑞图萨鹿角珊瑚 *Acropora retusa* (Dana, 1846)
壮实鹿角珊瑚 *Acropora robusta* (Dana, 1846)
萨摩尔鹿角珊瑚 *Acropora samoensis* (Brook, 1891)
短小鹿角珊瑚 *Acropora sarmentosa* (Brook, 1892)
穗枝鹿角珊瑚 *Acropora secale* (Studer, 1878)
石松鹿角珊瑚 *Acropora selago* (Studer, 1879)
单独鹿角珊瑚 *Acropora solitaryensis* Veron & Wallace, 1984
匙形鹿角珊瑚 *Acropora spathulata* (Brook, 1891)
标准鹿角珊瑚 *Acropora speciosa* (Quelch, 1886)
刺枝鹿角珊瑚 *Acropora spicifera* (Dana, 1846)
条纹鹿角珊瑚 *Acropora striata* (Verrill, 1866)
次生鹿角珊瑚 *Acropora subglabra* (Brook, 1891)
浅盘鹿角珊瑚 *Acropora subulata* (Dana, 1846)
小鹿角珊瑚 *Acropora tenella* (Brook, 1892)
柔枝鹿角珊瑚 *Acropora tenuis* (Dana, 1846)
隆起鹿角珊瑚 *Acropora tumida* (Verrill, 1866)
华伦鹿角珊瑚 *Acropora valenciennesi* (Milne Edwards, 1860)
强壮鹿角珊瑚 *Acropora valida* (Dana, 1846)
华氏鹿角珊瑚 *Acropora vaughani* Wells, 1954
小丛鹿角珊瑚 *Acropora verweyi* Veron & Wallace, 1984
威氏鹿角珊瑚 *Acropora willisae* Veron & Wallace, 1984
杨氏鹿角珊瑚 *Acropora yongei* Veron & Wallace, 1984

1.1.2 假鹿角珊瑚属 *Anacropora*

- 福贝假鹿角珊瑚 *Anacropora forbesi* Ridley, 1884
马氏假鹿角珊瑚 *Anacropora matthai* Pillai, 1973
尖锥假鹿角珊瑚 *Anacropora tapera* Zou, Song & Ma, 1975

1.1.3 同孔珊瑚属 *Isopora*

- 松枝同孔珊瑚 *Isopora brueggemanni* (Brook, 1893)
杯状同孔珊瑚 *Isopora crateriformis* (Gardiner, 1898)
楔形同孔珊瑚 *Isopora cuneata* (Dana, 1846)

栅列同孔珊瑚 *Isopora palifera* (Lamarck, 1816)

1.1.4 穴孔珊瑚属 *Alveopora*

阿林格穴孔珊瑚 *Alveopora allingi* Hoffmeister, 1925

卡氏穴孔珊瑚 *Alveopora catalai* Wells, 1968

高穴孔珊瑚 *Alveopora excelsa* Verrill, 1864

窗形穴孔珊瑚 *Alveopora fenestrata* (Lamarck, 1816)

大穴孔珊瑚 *Alveopora gigas* Veron, 1985

日本穴孔珊瑚 *Alveopora japonica* Eguchi, 1965

海绵穴孔珊瑚 *Alveopora spongiosa* Dana, 1846

平滑穴孔珊瑚 *Alveopora tizardi* Bassett-Smith, 1890

佛氏穴孔珊瑚 *Alveopora verrilliana* Dana, 1846

1.1.5 星孔珊瑚属 *Astreopora*

兜状星孔珊瑚 *Astreopora cucullata* Lamberts, 1980

板叶星孔珊瑚 *Astreopora expansa* (Brüggemann, 1877)

疣星孔珊瑚 *Astreopora gracilis* Bernard, 1896

卷叶星孔珊瑚 *Astreopora incrustans* Bernard, 1896

潜伏星孔珊瑚 *Astreopora listeri* Bernard, 1896

多星孔珊瑚 *Astreopora myriophthalma* (Lamarck, 1816)

圆目星孔珊瑚 *Astreopora ocellata* Bernard, 1896

蓝德尔星孔珊瑚 *Astreopora randalli* Lamberts, 1980

半球星孔珊瑚 *Astreopora suggesta* Wells, 1954

1.1.6 蔷薇珊瑚属 *Montipora*

疑惑蔷薇珊瑚 *Montipora aenigmatica* Bernard, 1897

瘦叶蔷薇珊瑚 *Montipora aequituberculata* Bernard, 1897

直枝蔷薇珊瑚 *Montipora altasepta* Nemenzo, 1967

角枝蔷薇珊瑚 *Montipora angulata* (Lamarck, 1816)

仙人掌蔷薇珊瑚 *Montipora cactus* Bernard, 1897

杯形蔷薇珊瑚 *Montipora caliculata* (Dana, 1846)

龙骨蔷薇珊瑚 *Montipora carinata* Nemenzo, 1967

塞布蔷薇珊瑚 *Montipora cebuensis* Nemenzo, 1976

壁垒蔷薇珊瑚 *Montipora circumvallata* (Ehrenberg, 1834)

圆突蔷薇珊瑚 *Montipora danae* Milne Edwards & Haime, 1851

指状蔷薇珊瑚 *Montipora digitata* (Dana, 1846)

艾氏蔷薇珊瑚 *Montipora edwardsi* Bernard, 1897

繁锦蔷薇珊瑚 *Montipora efflorescens* Bernard, 1897

爱氏蔷薇珊瑚 *Montipora ehrenbergi* Verrill, 1872

花蔷薇珊瑚 *Montipora florida* Nemenzo, 1967

叶状蔷薇珊瑚 *Montipora foliosa* (Pallas, 1766)

浅窝蔷薇珊瑚 *Montipora foveolata* (Dana, 1846)

脆蔷薇珊瑚 *Montipora fragilis* Quelch, 1886

脆弱蔷薇珊瑚 *Montipora friabilis* Bernard, 1897

横错蔷薇珊瑚 *Montipora gaimardi* Bernard, 1897

青灰蔷薇珊瑚 *Montipora grisea* Bernard, 1897

- 鬃刺蔷薇珊瑚 *Montipora hispida* (Dana, 1846)
贺氏蔷薇珊瑚 *Montipora hoffmeisteri* Wells, 1954
厚板蔷薇珊瑚 *Montipora incrassata* (Dana, 1846)
变形蔷薇珊瑚 *Montipora informis* Bernard, 1897
多曲蔷薇珊瑚 *Montipora maeandrina* (Ehrenberg, 1834)
马绍尔蔷薇珊瑚 *Montipora marshallensis* Wells, 1954
多孔蔷薇珊瑚 *Montipora millepora* Crossland, 1952
弯柔蔷薇珊瑚 *Montipora mollis* Bernard, 1897
单星蔷薇珊瑚 *Montipora monasteriata* (Forskål, 1775)
柱节蔷薇珊瑚 *Montipora nodosa* (Dana, 1846)
平展蔷薇珊瑚 *Montipora patula* Verrill, 1870
翼形蔷薇珊瑚 *Montipora peltiformis* Bernard, 1897
微孔蔷薇珊瑚 *Montipora porites* Veron, 2000
指蔷薇珊瑚 *Montipora samarensis* Nemenzo, 1967
海绵蔷薇珊瑚 *Montipora spongodes* Bernard, 1897
泡沫蔷薇珊瑚 *Montipora spumosa* (Lamarck, 1816)
斑星蔷薇珊瑚 *Montipora stellata* Bernard, 1897
台湾蔷薇珊瑚 *Montipora taiwanensis* Veron, 2000
截顶蔷薇珊瑚 *Montipora truncata* Zou, Song & Ma, 1975
结节蔷薇珊瑚 *Montipora tuberculosa* (Lamarck, 1816)
膨胀蔷薇珊瑚 *Montipora turgescens* Bernard, 1897
龟岛蔷薇珊瑚 *Montipora turtlensis* Veron & Wallace, 1984
波形蔷薇珊瑚 *Montipora undata* Bernard, 1897
脉状蔷薇珊瑚 *Montipora venosa* (Ehrenberg, 1834)
疣突蔷薇珊瑚 *Montipora verrucosa* (Lamarck, 1816)

1.2 滨珊瑚科 Poritidae

1.2.1 角孔珊瑚属 *Goniopora*

- 柱形角孔珊瑚 *Goniopora columna* Dana, 1846
大角孔珊瑚 *Goniopora djiboutiensis* Vaughan, 1907
细长角孔珊瑚 *Goniopora fruticosa* Saville-Kent, 1891
细角孔珊瑚 *Goniopora gracilis* (Milne Edwards & Haime, 1849)
团块角孔珊瑚 *Goniopora lobata* Milne Edwards, 1860
小角孔珊瑚 *Goniopora minor* Crossland, 1952
诺福克角孔珊瑚 *Goniopora norfolkensis* Veron & Pichon, 1982
潘朵拉角孔珊瑚 *Goniopora pandoraensis* Veron & Pichon, 1982
钟摆角孔珊瑚 *Goniopora pendulus* Veron, 1985
扁平角孔珊瑚 *Goniopora planulata* (Ehrenberg, 1834)
多形角孔珊瑚 *Goniopora polyformis* (Zou, 1980)
索马里角孔珊瑚 *Goniopora somaliensis* Vaughan, 1907
斯托科斯角孔珊瑚 *Goniopora stokesi* Milne Edwards & Haime, 1851
细巧角孔珊瑚 *Goniopora tenella* (Quelch, 1886)
柔软角孔珊瑚 *Goniopora tenuidens* (Quelch, 1886)
纤维角孔珊瑚 *Goniopora cellulosa* Veron, 1990

1.2.2 伯孔珊瑚属 *Bernardpora*

斯氏伯孔珊瑚 *Bernardpora stutchburyi* (Wells, 1955)

1.2.3 滨珊瑚属 *Porites*

- 疣滨珊瑚 *Porites annae* Crossland, 1952
亚氏滨珊瑚 *Porites aranetai* Nemenzo, 1955
渐尖滨珊瑚 *Porites attenuata* Nemenzo, 1955
澳洲滨珊瑚 *Porites australiensis* Vaughan, 1918
扁缩滨珊瑚 *Porites compressa* Dana, 1846
累积滨珊瑚 *Porites cumulatus* Nemenzo, 1955
细柱滨珊瑚 *Porites cylindrica* Dana, 1846
变形滨珊瑚 *Porites deformis* Nemenzo, 1955
波江滨珊瑚 *Porites eridani* Umbgrove, 1940
埃氏滨珊瑚 *Porites evermanni* Vaughan, 1907
水平滨珊瑚 *Porites horizontalata* Hoffmeister, 1925
盘枝滨珊瑚 *Porites latistellata* Quelch, 1886
地衣滨珊瑚 *Porites lichen* (Dana, 1846)
团块滨珊瑚 *Porites lobata* Dana, 1846
澄黄滨珊瑚 *Porites lutea* Milne Edwards & Haime, 1851
融板滨珊瑚 *Porites matthaii* Wells, 1954
梅氏滨珊瑚 *Porites mayeri* Vaughan, 1918
巨锥滨珊瑚 *Porites monticulosa* Dana, 1846
莫氏滨珊瑚 *Porites murrayensis* Vaughan, 1918
短枝滨珊瑚 *Porites negrosensis* Veron, 1990
灰黑滨珊瑚 *Porites nigrescens* Dana, 1846
冲绳滨珊瑚 *Porites okinawensis* Veron, 1990
普哥滨珊瑚 *Porites pukoensis* Vaughan, 1907
火焰滨珊瑚 *Porites rus* (Forskål, 1775)
坚实滨珊瑚 *Porites solida* (Forskål, 1775)
史提芬滨珊瑚 *Porites stephensoni* Crossland, 1952
结节滨珊瑚 *Porites tuberculatus* Veron, 2000
华氏滨珊瑚 *Porites vauhani* Crossland, 1952

1.3 菌珊瑚科 *Agariciidae*

1.3.1 西沙珊瑚属 *Coeloseris*

西沙珊瑚 *Coeloseris mayeri* Vaughan, 1918

1.3.2 加德纹珊瑚属 *Gardineroseris*

加德纹珊瑚 *Gardineroseris planulata* (Dana, 1846)

1.3.3 薄层珊瑚属 *Leptoseris*

- 环薄层珊瑚 *Leptoseris explanata* Yabe & Sugiyama, 1941
叶状薄层珊瑚 *Leptoseris foliosa* Dinesen, 1980
片薄层珊瑚 *Leptoseris gardineri* (van der Horst, 1922)
夏威夷薄层珊瑚 *Leptoseris hawaiiensis* Vaughan, 1907
壳状薄层珊瑚 *Leptoseris incrustans* (Quelch, 1886)
南沙薄层珊瑚 *Leptoseris kalayaanensis* Licuanan & Alino, 2009

类菌薄层珊瑚 *Leptoseris mycetoseroides* Wells, 1954

纸薄层珊瑚 *Leptoseris papyracea* (Dana, 1846)

凹凸薄层珊瑚 *Leptoseris scabra* Vaughan, 1907

管形薄层珊瑚 *Leptoseris tubulifera* Vaughan, 1907

辐叶薄层珊瑚 *Leptoseris yabei* (Pillai & Scheer, 1976)

1.3.4 厚丝珊瑚属 *Pachyseris*

叶状厚丝珊瑚 *Pachyseris foliosa* Veron, 1990

芽突厚丝珊瑚 *Pachyseris gemmae* Nemenzo, 1955

卷叶厚丝珊瑚 *Pachyseris involuta* Studer, 1878

皱纹厚丝珊瑚 *Pachyseris rugosa* (Lamarck, 1801)

标准厚丝珊瑚 *Pachyseris speciosa* (Dana, 1846)

1.3.5 牡丹珊瑚属 *Pavona*

球牡丹珊瑚 *Pavona cactus* (Forskål, 1775)

柱形牡丹珊瑚 *Pavona clavus* (Dana, 1846)

丹氏牡丹珊瑚 *Pavona danai* Milne Edwards, 1860

十字牡丹珊瑚 *Pavona decussata* (Dana, 1846)

叉状牡丹珊瑚 *Pavona divaricata* (Lamarck, 1816)

厚板牡丹珊瑚 *Pavona duerdeni* Vaughan, 1907

变形牡丹珊瑚 *Pavona explanulata* (Lamarck, 1816)

叶形牡丹珊瑚 *Pavona frondifera* (Lamarck, 1816)

马岛牡丹珊瑚 *Pavona maldivensis* (Gardiner, 1905)

小牡丹珊瑚 *Pavona minuta* Wells, 1954

易变牡丹珊瑚 *Pavona varians* (Verrill, 1864)

板叶牡丹珊瑚 *Pavona venosa* (Ehrenberg, 1834)

1.4 真叶珊瑚科 *Euphyllia*

1.4.1 真叶珊瑚属 *Euphyllia*

联合真叶珊瑚 *Euphyllia cristata* Chevalier, 1971

纓真叶珊瑚 *Euphyllia fimbriata* (Spengler, 1799)

滑真叶珊瑚 *Euphyllia glabrescens* (Chamisso & Eysenhardt, 1821)

拟滑真叶珊瑚 *Euphyllia paraglabrescens* Veron, 1990

1.4.2 纹叶珊瑚属 *Fimbriaphyllia*

肾形纹叶珊瑚 *Fimbriaphyllia ancora* (Veron & Pichon, 1980)

花散纹叶珊瑚 *Fimbriaphyllia divisa* (Veron & Pichon, 1980)

拟肾形纹叶珊瑚 *Fimbriaphyllia paraancora* (Veron, 1990)

1.4.3 盔形珊瑚属 *Galaxea*

稀杯盔形珊瑚 *Galaxea astreata* (Lamarck, 1816)

丛生盔形珊瑚 *Galaxea fascicularis* (Linnaeus, 1767)

刺枝盔形珊瑚 *Galaxea horrescens* (Dana, 1846)

长刺盔形珊瑚 *Galaxea longisepta* Fenner & Veron, 2000

小片盔形珊瑚 *Galaxea paucisepta* Claereboudt, 1990

1.4.4 单星珊瑚属 *Simplastrea*

泡囊单星珊瑚 *Simplastrea vesicularis* Umbgrove, 1939

1.5 铁星珊瑚科 *Siderastreidae*

1.5.1 铁星珊瑚属 *Siderastrea*

网格铁星珊瑚 *Siderastrea savignyana* Milne Edwards & Haime, 1850

1.5.2 假铁星珊瑚属 *Pseudosiderastrea*

假铁星珊瑚 *Pseudosiderastrea tayamai* Yabe & Sugiyama, 1935

1.6 木珊瑚科 *Dendrophylliidae*

1.6.1 陀螺珊瑚属 *Turbinaria*

耳形陀螺珊瑚 *Turbinaria auricularis* Bernard, 1896

漏斗陀螺珊瑚 *Turbinaria crater* (Pallas, 1766)

复叶陀螺珊瑚 *Turbinaria frondens* (Dana, 1846)

凹孔陀螺珊瑚 *Turbinaria immersa* Yabe & Sugiyama, 1941

不规则陀螺珊瑚 *Turbinaria irregularis* Bernard, 1896

皱折陀螺珊瑚 *Turbinaria mesenterina* (Lamarck, 1816)

盾形陀螺珊瑚 *Turbinaria peltata* (Esper, 1794)

肾形陀螺珊瑚 *Turbinaria reniformis* Bernard, 1896

小星陀螺珊瑚 *Turbinaria stellulata* (Lamarck, 1816)

波形陀螺珊瑚 *Turbinaria undata* Bernard, 1896

菌状陀螺珊瑚 *Turbinaria agaricia* Bernard, 1896

2. 坚实类群 *Robust*

2.1 星群珊瑚科 *Astrocoeniidae*

2.1.1 柱群珊瑚属 *Stylocoeniella*

甲冑柱群珊瑚 *Stylocoeniella armata* (Ehrenberg, 1834)

科科斯柱群珊瑚 *Stylocoeniella cocosensis* Veron, 1990

罩柱群珊瑚 *Stylocoeniella guentheri* (Bassett-Smith, 1890)

2.1.2 非六珊瑚属 *Madracis*

克氏非六珊瑚 *Madracis kirbyi* Veron & Pichon, 1976

2.1.3 帛星珊瑚属 *Palauastrea*

多枝帛星珊瑚 *Palauastrea ramosa* Yabe & Sugiyama, 1941

2.2 杯形珊瑚科 *Pocilloporidae*

2.2.1 杯形珊瑚属 *Pocillopora*

安氏杯形珊瑚 *Pocillopora ankei* Scheer & Pillai, 1974

鹿角杯形珊瑚 *Pocillopora damicornis* (Linnaeus, 1758)

埃氏杯形珊瑚 *Pocillopora eydouxi* Milne Edwards, 1860

多曲杯形珊瑚 *Pocillopora meandrina* Dana, 1846

疣状杯形珊瑚 *Pocillopora verrucosa* (Ellis & Solander, 1786)

伍氏杯形珊瑚 *Pocillopora woodjonesi* Vaughan, 1918

2.2.2 排孔珊瑚属 *Seriatopora*

浅杯排孔珊瑚 *Seriatopora caliendrum* Ehrenberg, 1834

箭排孔珊瑚 *Seriatopora hystrix* Dana, 1846

星排孔珊瑚 *Seriatopora stellata* Quelch, 1886

2.2.3 柱状珊瑚属 *Stylophora*

板柱状珊瑚 *Stylophora danae* Milne Edwards & Haime, 1850

柱状珊瑚 *Stylophora pistillata* Esper, 1797

亚列柱状珊瑚 *Stylophora subseriata* (Ehrenberg, 1834)

2.3 石芝珊瑚科 Fungiidae

2.3.1 圆饼珊瑚属 *Cycloseris*

- 直肋圆饼珊瑚 *Cycloseris costulata* (Ortmann, 1889)
圆饼珊瑚 *Cycloseris cyclolites* (Lamarck, 1815)
碎圆饼珊瑚 *Cycloseris fragilis* (Alcock, 1893)
摩卡氏圆饼珊瑚 *Cycloseris mokai* (Hoeksema, 1989)
中国圆饼珊瑚 *Cycloseris sinensis* Milne Edwards & Haime, 1851
细致圆饼珊瑚 *Cycloseris tenuis* (Dana, 1846)
佛氏圆饼珊瑚 *Cycloseris vaughani* (Boschma, 1923)

2.3.2 石叶珊瑚属 *Lithophyllon*

- 和谐石叶珊瑚 *Lithophyllon concinna* (Verrill, 1864)
弯石叶珊瑚 *Lithophyllon repanda* (Dana, 1846)
鳞状石叶珊瑚 *Lithophyllon scabra* (Döderlein, 1901)
波形石叶珊瑚 *Lithophyllon undulatum* Rehberg, 1892

2.3.3 刺石芝珊瑚属 *Danafungia*

- 多刺石芝珊瑚 *Danafungia horrida* (Dana, 1846)
礁刺石芝珊瑚 *Danafungia scruposa* (Klunzinger, 1879)

2.3.4 石芝珊瑚属 *Fungia*

- 石芝珊瑚 *Fungia fungites* (Linnaeus, 1758)

2.3.5 叶芝珊瑚属 *Lobactis*

- 椭圆形叶芝珊瑚 *Lobactis scutaria* (Lamarck, 1801)

2.3.6 侧石芝珊瑚属 *Pleuractis*

- 颗粒侧石芝珊瑚 *Pleuractis granulosa* (Klunzinger, 1879)
沉重侧石芝珊瑚 *Pleuractis gravis* (Nemanzo, 1955)
摩鹿加侧石芝珊瑚 *Pleuractis moluccensis* (Van der Horst, 1919)
波莫特侧石芝珊瑚 *Pleuractis paumotensis* (Stutchbury, 1833)
台湾侧石芝珊瑚 *Pleuractis taiwanensis* (Hoeksema & Dai, 1991)

2.3.7 梳石芝珊瑚属 *Ctenactis*

- 厚实梳石芝珊瑚 *Ctenactis crassa* (Dana, 1846)
刺梳石芝珊瑚 *Ctenactis echinata* (Pallas, 1766)

2.3.8 绕石珊瑚属 *Herpolitha*

- 绕石珊瑚 *Herpolitha limax* (Esper, 1797)

2.3.9 多叶珊瑚属 *Polyphyllia*

- 多叶珊瑚 *Polyphyllia talpina* (Lamarck, 1801)

2.3.10 履形珊瑚属 *Sandalolitha*

- 锯齿履形珊瑚 *Sandalolitha dentata* Quelch, 1884
健壮履形珊瑚 *Sandalolitha robusta* (Quelch, 1886)

2.3.11 帽状珊瑚属 *Halomitra*

- 小帽状珊瑚 *Halomitra pileus* (Linnaeus, 1758)

2.3.12 足柄珊瑚属 *Podabacia*

- 壳形足柄珊瑚 *Podabacia crustacea* (Pallas, 1766)

2.3.13 辐石芝珊瑚属 *Heliofungia*

- 辐石芝珊瑚 *Heliofungia actiniformis* (Quoy & Gaimard, 1833)

2.4 沙珊瑚科 *Psammocoridae*

2.4.1 沙珊瑚属 *Psammocora*

- 毗邻沙珊瑚 *Psammocora contigua* (Esper, 1794)
指形沙珊瑚 *Psammocora digitata* Milne Edwards & Haime, 1851
海氏沙珊瑚 *Psammocora haimiana* Milne Edwards & Haime, 1851
不等脊膝沙珊瑚 *Psammocora nierstraszi* Van der Horst, 1921
深室沙珊瑚 *Psammocora profundacella* Gardiner, 1898

2.5 筛珊瑚科 *Coscinaraeidae*

2.5.1 筛珊瑚属 *Coscinaraea*

- 柱形筛珊瑚 *Coscinaraea columna* (Dana, 1846)
粗糙筛珊瑚 *Coscinaraea crassa* Veron & Pichon, 1980
吞蚀筛珊瑚 *Coscinaraea exesa* (Dana, 1846)
马氏筛珊瑚 *Coscinaraea marshae* Wells, 1962
珠状筛珊瑚 *Coscinaraea monile* (Forskål, 1775)

2.6 黑星珊瑚科 *Oulastreidae*

2.6.1 黑星珊瑚属 *Oulastrea*

- 黑星珊瑚 *Oulastrea crispata* (Lamarck, 1816)

2.7 叶状珊瑚科 *Lobophylliidae*

2.7.1 小褶叶珊瑚属 *Micromussa*

- 天草小褶叶珊瑚 *Micromussa amakusensis* (Veron, 1990)
豪岛小褶叶珊瑚 *Micromussa lordhowensis* (Veron & Pichon, 1982)
规则小褶叶珊瑚 *Micromussa regularis* (Veron, 2000)

2.7.2 同叶珊瑚属 *Homophyllia*

- 澳洲同叶珊瑚 *Homophyllia australis* (Milne Edwards & Haime, 1848)
包氏同叶珊瑚 *Homophyllia bowerbanki* (Milne Edwards & Haime, 1857)

2.7.3 棘星珊瑚属 *Acanthastrea*

- 刺状棘星珊瑚 *Acanthastrea brevis* Milne Edwards & Haime, 1849
棘星珊瑚 *Acanthastrea echinata* (Dana, 1846)
联合棘星珊瑚 *Acanthastrea hemprichii* (Ehrenberg, 1834)
小棘星珊瑚 *Acanthastrea minuta* Moll & Best, 1984
厚片棘星珊瑚 *Acanthastrea pachysepta* (Chevalier, 1975)
圆盘棘星珊瑚 *Acanthastrea rotundoflora* Chevalier, 1975
底次棘星珊瑚 *Acanthastrea subechinata* Veron, 2000

2.7.4 刺叶珊瑚属 *Echinophyllia*

- 粗糙刺叶珊瑚 *Echinophyllia aspera* (Ellis & Solander, 1786)
小刺叶珊瑚 *Echinophyllia echinoporoides* Veron & Pichon, 1980
平滑刺叶珊瑚 *Echinophyllia glabra* (Nemanzo, 1959)
奥芬刺叶珊瑚 *Echinophyllia orpheensis* Veron & Pichon, 1980
平展刺叶珊瑚 *Echinophyllia patula* (Hodgson & Ross, 1982)

2.7.5 尖孔珊瑚属 *Oxypora*

- 粗棘尖孔珊瑚 *Oxypora crassispinosa* Nemanzo, 1979
多棘尖孔珊瑚 *Oxypora echinata* (Saville Kent, 1871)
撕裂尖孔珊瑚 *Oxypora lacera* (Verrill, 1864)

2.7.6 缺齿珊瑚属 *Cynarina*

缺齿珊瑚 *Cynarina lacrymalis* (Milne Edwards & Haime, 1848)

2.7.7 叶状珊瑚属 *Lobophyllia*

菌形叶状珊瑚 *Lobophyllia agaricia* (Milne Edwards & Haime, 1849)

伞房叶状珊瑚 *Lobophyllia corymbosa* (Forskål, 1775)

矮小叶状珊瑚 *Lobophyllia diminuta* Veron, 1985

褶曲叶状珊瑚 *Lobophyllia flabelliformis* Veron, 2000

哈氏叶状珊瑚 *Lobophyllia hassi* (Pillai & Scheer, 1976)

盔形叶状珊瑚 *Lobophyllia hataii* Yabe, Sugiyama & Eguchi, 1936

赫氏叶状珊瑚 *Lobophyllia hemprichii* (Ehrenberg, 1834)

辐射叶状珊瑚 *Lobophyllia radians* (Milne Edwards & Haime, 1849)

直纹叶状珊瑚 *Lobophyllia recta* (Dana, 1846)

粗大叶状珊瑚 *Lobophyllia robusta* Yabe & Sugiyama, 1936

罗列叶状珊瑚 *Lobophyllia rowleyensis* (Veron, 1985)

华伦叶状珊瑚 *Lobophyllia valenciennesii* (Milne Edwards & Haime, 1849)

斐济叶状珊瑚 *Lobophyllia vitiensis* (Brüggemann, 1877)

2.8 裸肋珊瑚科 *Merulinidae*

2.8.1 拟圆菊珊瑚属 *Paramonastrea*

崎拟圆菊珊瑚 *Paramonastrea salebrosa* (Nemenzo, 1959)

2.8.2 刺孔珊瑚属 *Echinopora*

宝石刺孔珊瑚 *Echinopora gemmacea* (Lamarck, 1816)

丑刺孔珊瑚 *Echinopora horrida* Dana, 1846

薄片刺孔珊瑚 *Echinopora lamellosa* (Esper, 1795)

瘤突刺孔珊瑚 *Echinopora mammiformis* (Nemenzo, 1959)

太平洋刺孔珊瑚 *Echinopora pacifica* Veron, 1990

泰氏刺孔珊瑚 *Echinopora taylorae* (Veron, 2000)

2.8.3 刺星珊瑚属 *Cyphastrea*

阿加西刺星珊瑚 *Cyphastrea agassizi* (Vaughan, 1907)

礁突刺星珊瑚 *Cyphastrea chalcidicum* (Forskål, 1775)

枝状刺星珊瑚 *Cyphastrea decadia* Moll & Best, 1984

日本刺星珊瑚 *Cyphastrea japonica* Yabe & Sugiyama, 1932

小叶刺星珊瑚 *Cyphastrea microphthalma* (Lamarck, 1816)

板状刺星珊瑚 *Cyphastrea ocellina* (Dana, 1846)

锯齿刺星珊瑚 *Cyphastrea serailia* (Forskål, 1775)

中建刺星珊瑚 *Cyphastrea zhongjianensis* Zou, 1980

2.8.4 拟菊花珊瑚属 *Paragoniastrea*

澳洲拟菊花珊瑚 *Paragoniastrea australensis* (Milne Edwards & Haime, 1857)

变形拟菊花珊瑚 *Paragoniastrea deformis* (Veron, 1990)

罗素拟菊花珊瑚 *Paragoniastrea russelli* (Wells, 1954)

2.8.5 菊花珊瑚属 *Goniastrea*

艾氏菊花珊瑚 *Goniastrea edwardsi* Chevalier, 1971

似蜂巢菊花珊瑚 *Goniastrea favulus* (Dana, 1846)

小粒菊花珊瑚 *Goniastrea minuta* Veron, 2000

梳状菊花珊瑚 *Goniastrea pectinata* (Ehrenberg, 1834)

网状菊花珊瑚 *Goniastrea retiformis* (Lamarck, 1816)

带刺菊花珊瑚 *Goniastrea stelligera* (Dana, 1846)

2.8.6 裸肋珊瑚属 *Merulina*

阔裸肋珊瑚 *Merulina ampliata* (Ellis & Solander, 1786)

粗裸肋珊瑚 *Merulina scabricula* Dana, 1846

三角裸肋珊瑚 *Merulina triangularis* (Veron & Pichon, 1980)

2.8.7 葶叶珊瑚属 *Scapophyllia*

葶叶珊瑚 *Scapophyllia cylindrica* Milne Edwards & Haime, 1849

2.8.8 刺柄珊瑚属 *Hydnophora*

膨刺柄珊瑚 *Hydnophora bonsai* Veron, 1990

腐蚀刺柄珊瑚 *Hydnophora exesa* (Pallas, 1766)

大刺柄珊瑚 *Hydnophora grandis* Gardiner, 1904

小角刺柄珊瑚 *Hydnophora microconos* (Lamarck, 1816)

硬刺柄珊瑚 *Hydnophora rigida* (Dana, 1846)

2.8.9 圆星珊瑚属 *Astrea*

简短圆星珊瑚 *Astrea annuligera* Milne Edwards & Haime, 1849

曲圆星珊瑚 *Astrea curta* Dana, 1846

2.8.10 粗叶珊瑚属 *Trachyphyllia*

高氏粗叶珊瑚 *Trachyphyllia geoffroyi* (Audouin, 1826)

2.8.11 腔星珊瑚属 *Coelastrea*

粗糙腔星珊瑚 *Coelastrea aspera* (Verrill, 1866)

帛琉腔星珊瑚 *Coelastrea palauensis* (Yabe & Sugiyama, 1936)

2.8.12 盘星珊瑚属 *Dipsastraea*

和平盘星珊瑚 *Dipsastraea amicorum* (Milne Edwards & Haime, 1849)

丹氏盘星珊瑚 *Dipsastraea danai* (Milne Edwards & Haime, 1857)

黄癣盘星珊瑚 *Dipsastraea favus* (Forskål, 1775)

向日葵盘星珊瑚 *Dipsastraea helianthoides* (Wells, 1954)

疏盘星珊瑚 *Dipsastraea laxa* (Klunzinger, 1879)

蜥岛盘星珊瑚 *Dipsastraea lizardensis* (Veron, Pichon & Wijsman-Best, 1977)

海洋盘星珊瑚 *Dipsastraea maritima* (Nemenzo, 1971)

翘齿盘星珊瑚 *Dipsastraea matthaii* (Vaughan, 1918)

大盘星珊瑚 *Dipsastraea maxima* (Veron, Pichon & Wijsman-Best, 1977)

圆纹盘星珊瑚 *Dipsastraea pallida* (Dana, 1846)

罗图马盘星珊瑚 *Dipsastraea rotumana* (Gardiner, 1899)

标准盘星珊瑚 *Dipsastraea speciosa* (Dana, 1846)

美龙氏盘星珊瑚 *Dipsastraea veroni* (Moll & Best, 1984)

越南盘星珊瑚 *Dipsastraea vietnamensis* (Veron, 2000)

2.8.13 肠珊瑚属 *Leptoria*

不规则肠珊瑚 *Leptoria irregularis* Veron, 1990

弗利吉亚肠珊瑚 *Leptoria phrygia* (Ellis & Solander, 1786)

2.8.14 扁脑珊瑚属 *Platygyra*

尖边扁脑珊瑚 *Platygyra acuta* Veron, 2000

肉质扁脑珊瑚 *Platygyra carnosa* Veron, 2000
卷曲扁脑珊瑚 *Platygyra contorta* Veron, 1990
交替扁脑珊瑚 *Platygyra crosslandi* (Matthai, 1928)
精巧扁脑珊瑚 *Platygyra daedalea* (Ellis & Solander, 1786)
片扁脑珊瑚 *Platygyra lamellina* (Ehrenberg, 1834)
小扁脑珊瑚 *Platygyra pini* Chevalier, 1975
琉球扁脑珊瑚 *Platygyra ryukyuensis* Yabe & Sugiyama, 1935
中华扁脑珊瑚 *Platygyra sinensis* (Milne Edwards & Haime, 1849)
小业扁脑珊瑚 *Platygyra verweyi* Wijsman-Best, 1976
八重山扁脑珊瑚 *Platygyra yaeyamaensis* (Eguchi & Shirai, 1977)

2.8.15 角蜂巢珊瑚属 *Favites*

秘密角蜂巢珊瑚 *Favites abdita* (Ellis & Solander, 1786)
尖丘角蜂巢珊瑚 *Favites acuticollis* (Ortmann, 1889)
中华角蜂巢珊瑚 *Favites chinensis* (Verrill, 1866)
克里蒙氏角蜂巢珊瑚 *Favites colemani* (Veron, 2000)
板叶角蜂巢珊瑚 *Favites complanata* (Ehrenberg, 1834)
多弯角蜂巢珊瑚 *Favites flexuosa* (Dana, 1846)
海孔角蜂巢珊瑚 *Favites halicora* (Ehrenberg, 1834)
大角蜂巢珊瑚 *Favites magnistellata* (Milne Edwards & Haime, 1849)
小五边角蜂巢珊瑚 *Favites micropentagonus* Veron, 2000
转边多弯角蜂巢珊瑚 *Favites paraflexuosus* Veron, 2000
五边角蜂巢珊瑚 *Favites pentagona* (Esper, 1795)
圆形角蜂巢珊瑚 *Favites rotundata* Veron, Pichon & Wijsman-Best, 1977
齿状角蜂巢珊瑚 *Favites stylifera* Yabe & Sugiyama, 1937
华伦角蜂巢珊瑚 *Favites valenciennesii* (Milne Edwards & Haime, 1849)
巨型角蜂巢珊瑚 *Favites vasta* (Klunzinger, 1879)

2.8.16 耳纹珊瑚属 *Oulophyllia*

贝氏耳纹珊瑚 *Oulophyllia bennettiae* (Veron, Pichon & Wijsman-Best, 1977)
卷曲耳纹珊瑚 *Oulophyllia crispa* (Lamarck, 1816)
平滑耳纹珊瑚 *Oulophyllia levis* (Nemenzo, 1959)

2.8.17 干星珊瑚属 *Caulastraea*

弯干星珊瑚 *Caulastraea curvata* Wijsman-Best, 1972
粗糙干星珊瑚 *Caulastraea echinulata* (Milne Edwards & Haime, 1849)
叉干星珊瑚 *Caulastraea furcata* Dana, 1846
短枝干星珊瑚 *Caulastraea tumida* Matthai, 1928

2.8.18 梳状珊瑚属 *Pectinia*

叉角梳状珊瑚 *Pectinia alcicornis* (Saville Kent, 1871)
莴苣梳状珊瑚 *Pectinia lactuca* (Pallas, 1766)
牡丹梳状珊瑚 *Pectinia paeonia* (Dana, 1846)

2.8.19 斜花珊瑚属 *Mycedium*

象鼻斜花珊瑚 *Mycedium elephantotus* (Pallas, 1766)
曲边斜花珊瑚 *Mycedium mancaoi* Nemenzo, 1979
小斜花珊瑚 *Mycedium robokaki* Moll & Best, 1984

2.8.20 囊叶珊瑚属 *Physophyllia*

艾氏囊叶珊瑚 *Physophyllia ayleni* (Wells, 1934)

2.8.21 小笠原珊瑚属 *Boninastrea*

小笠原珊瑚 *Boninastrea boninensis* Yabe & Sugiyama, 1935

2.9 同星珊瑚科 Plesiastreidae

2.9.1 同星珊瑚属 *Plesiastrea*

多孔同星珊瑚 *Plesiastrea versipora* (Lamarck, 1816)

2.10 双星珊瑚科 Diploastraeidae

2.10.1 双星珊瑚属 *Diploastrea*

同双星珊瑚 *Diploastrea heliopora* (Lamarck, 1816)

2.11 未定类群 *Incertae sedis*

2.11.1 小星珊瑚属 *Leptastrea*

比威小星珊瑚 *Leptastrea bewickensis* Veron, Pichon & Best, 1977

粗突小星珊瑚 *Leptastrea bottae* (Milne Edwards & Haime, 1849)

不均小星珊瑚 *Leptastrea inaequalis* Klunzinger, 1879

白斑小星珊瑚 *Leptastrea pruinosa* Crossland, 1952

紫小星珊瑚 *Leptastrea purpurea* (Dana, 1846)

横小星珊瑚 *Leptastrea transversa* Klunzinger, 1879

2.11.2 泡囊珊瑚属 *Plerogyra*

分枝泡囊珊瑚 *Plerogyra simplex* Rehberg, 1892

泡囊珊瑚 *Plerogyra sinuosa* (Dana, 1846)

2.11.3 鳞泡珊瑚属 *Physogyra*

轻巧鳞泡珊瑚 *Physogyra lichtensteini* (Milne Edwards & Haime, 1851)

2.11.4 胚褶叶珊瑚属 *Blastomussa*

马勒胚褶叶珊瑚 *Blastomussa merleti* (Wells, 1961)

威尔胚褶叶珊瑚 *Blastomussa wellsi* Wijsman-Best, 1973



•技术与方法•

国内8款常用植物识别软件的识别能力评价

许展慧¹ 刘诗尧¹ 赵莹¹ 涂文琴¹ 常诏峰¹ 张恩涛¹ 郭靖¹
 郑迪¹ 耿鋆¹ 顾高营¹ 郭淳鹏¹ 郭璐璐¹ 王静¹ 徐春阳¹
 彭钊¹ 杨腾¹ 崔梦琪¹ 孙伟成¹ 张剑坛¹ 刘皓天¹ 巴超群¹
 王鹤琪¹ 贾竞超¹ 武金洲¹ 肖翠² 马克平^{2*}

1 (中国科学院大学, 北京 100049)

2 (中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093)

摘要: 随着智能手机和人工智能技术的发展, 以手机app为载体的植物识别软件慢慢走进公众生活、科普活动和科研活动的各个方面。植物识别app的识别正确率是决定其使用价值和用户体验的关键因素。目前, 国内应用市场上有许多植物识别app, 它们的开发目的和应用范围各异, 软件本身的关注点、数据库来源、算法、硬件要求也存在很大差异。对于不同人群, 植物识别app有不同的意义, 如对于科研人员来说, 识别能力强的app是提高效率的一大工具; 对植物爱好者来说, 具一定准确率的识别app可以作为入门的工具。因此, 对各app的识别能力进行分析与评价显得尤为重要。本文选取了8款常用的app, 分别对400张已准确鉴定的植物图片进行识别, 其中干旱半干旱区、温带、热带和亚热带4个区各选取100张。这些图片共计122科164属340种, 涵盖了乔木、灌木、草本、草质藤本和木质藤本5种生长型, 包含23种国家级保护植物。种、属、科准确识别正确分别计4分、2分、1分, 以此标准对软件识别能力按总得分进行排序, 正确率得分由高到低依次为花帮主、百度识图、花伴侣、形色、花卉识别、植物识别、发现识花、微软识花。

关键词: 植物识别软件; 花帮主; 百度识图; 花伴侣; 形色; 花卉识别; 植物识别; 发现识花; 微软识花

Evaluation of the identification ability of eight commonly used plant identification application softwares in China

Zhanhui Xu¹, Shiyao Liu¹, Ying Zhao¹, Wenqin Tu¹, Zhaofeng Chang¹, Entao Zhang¹, Jing Guo¹, Di Zheng¹, Jun Geng¹, Gaoying Gu¹, Chungpeng Guo¹, Lulu Guo¹, Jing Wang¹, Chunyang Xu¹, Chuan Peng¹, Teng Yang¹, Mengqi Cui¹, Weicheng Sun¹, Jiantan Zhang¹, Haotian Liu¹, Chaoqun Ba¹, Heqi Wang¹, Jingchao Jia¹, Jinzhou Wu¹, Cui Xiao², Keping Ma^{2*}

1 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

2 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093

Abstract: Smart phone and artificial intelligence technology development has led to various plant recognition softwares on mobile applications. These applications have gradually entered all aspects of public life, popular science activities, and scientific research activities. Presently, there are many plant recognition apps in China, which have varying development purposes and application scopes. Among these differences include variation in software concerns, database sources, algorithms, and hardware which could implicate large discrepancies between apps, making it important to analyze and evaluate the accuracy, scope of application and potential use of each software. In this paper, eight apps were selected to identify 400 accurately identified plant photos, 100 photos being chosen from arid and semi-arid zones, temperate zones, tropical zones, and subtropical zones, respectively. In total, these photos belong to 122 families, 164 genera and 340 species, covering five growth forms of trees, shrubs, herbs, herbaceous vines and woody vines, as

收稿日期: 2019-09-01; 接受日期: 2020-01-21

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA19050404)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: kpma@ibcas.ac.cn

well as 23 national protected plant species. Accurate identification of species, genera and families was scored 4, 2 and 1 points, respectively. The software recognition ability was sorted according to total scores, and the results are as follows: HuaBangZhu, Baidu-Shitu, HuaBanLv, XingSe, Huahui-Shibie, Zhiwu-Shibie, Faxian-Shihua, Flower Recognition.

Key words: Plant recognition software; HuaBangZhu; Baidu-Shitu; HuaBanLv; XingSe; Huahui-Shibie; Zhiwu-Shibie; Faxian-Shihua; Flower recognition

植物分类学是一门传统基础学科,对植物进行分类识别对生物多样性保护、生态学、林学、园林、生物安全等领域均有重要意义。传统的植物识别与分类主要由人工完成,对专业水平要求高、工作量大、耗时长,且难以保证客观性(曹香滢等,2018)。随着科学研究和科普事业的发展,科研人员及大众对准确便捷识别植物的需求不断增加。

利用计算机技术进行植物种类识别是最近30年的事情。国外的研究机构已经有过一些相关的分析和研究,国内利用计算机技术进行植物种类识别起步比较晚,在20世纪90年代中期才开始进行相关的研究,并开始尝试将这方面的技术应用在农业生产领域^①。

在开发植物识别软件的初期,识别对象主要是植物叶片,多为基于关系结构匹配、统计学和机器学习的识别方法(张宁和刘文萍,2011)。植物叶片具有的扁平叶面结构在拍照处理、特征提取和技术建模上具有优势,但缺点是叶片的性状不稳定,易受环境影响,且不同物种因为适应环境可能会出现相似的性状^②。相比之下,花是植物更为稳定的性状,因此以花朵为依据进行植物的分类识别更加可靠,也是植物识别app的发展趋势。随着深度学习(deep learning)理论的发展,卷积神经网络(convolutional neural networks)逐渐推广应用,早期出现的过拟合问题在一定程度上得到解决。随着机器学习方法应用更加广泛,植物识别器官也扩展到花、果实和种子等(张宁和刘文萍,2011)。

早期的植物识别软件主要安装在PC端,有不便携带、费用高、难以普及等局限。在手机端植物识别软件出现之前,有些高校开发出了一些局部地区植物识别软件,如浙江农林大学“校园植物通”结合校园地图记录了校园内2,500多种植物,可先识别植物的位置,再分析植物的特征,从数据库中提

取植物的信息(张健捷等,2017)。但这只能满足查询、记录的功能,利用定位信息从数据库中提取结果,严格来说算不上真正意义的识别。北京林业大学的学生团队利用误差反向传播(back propagation, BP)神经网络技术开发了植物叶片识别系统——百叶通客户端,取得了较好的效果,但其识别的植物种类依然很有限(钟刚亮等,2015)。张玉琢和李柏依(2016)设计了云计算与移动终端结合的植物远程快速识别系统,即通过上传植物图像至云服务器,将其与叶片标准库中的图像进行比对以识别植物,取得了一定的成果。王礼等(2018)基于iOS操作系统设计了一款利用叶片识别观赏植物的应用程序,并选取了浙江农林大学校园内的8种常见观赏植物进行测评,发现平均识别率为92%,平均用时2.6 s。

在技术成熟之后,国外开发了一批相对优秀但关注点各不相同的手机应用软件。Pl@ntNet是2009年以来由Agropolis Foundation支持的植物生物多样性研究和教育计划。该计划开发的植物识别功能完全免费公开,同时支持Web端和手机端(<https://identify.plantnet.org/>)。其中手机端app名为PlantNet Plant Identification,可识别大约20,000种有花植物和蕨类植物(<http://play.google.com/store/apps/details?id=org.plantnet&hl/>)。Leafsnap是第一个使用自动视觉识别植物的移动应用程序,可离线使用。它由哥伦比亚大学、马里兰大学和史密森学会于2011年合作开发,该软件可利用花朵、果实、叶柄、种子和树皮的照片来识别树木(<http://leafsnap.com/about/>)。该系统用计算机视觉组件分割叶的形态、提取多尺度上代表叶轮廓曲率的特征,以此对植物加以识别(Kumar et al, 2012)。Leafsnap分英国版本和美国版本,能识别英国的156种树种,美国东北部的185种树种,关于英国、美国的物种信息较全面,包括生长型、栖息地类型、开花时间和分布等(<http://leafsnap.com/dataset/>; <https://www.nhm.ac.uk/take-part/identify-nature/leafsnap-uk-app.html>)。PlantSnap软件

^① 张岩 (2017) 植物花朵识别系统的设计与实现. 硕士学位论文, 华中科技大学, 武汉.

于2012年面世,识别类型涵盖花卉、树木、蘑菇、多肉植物,目前该软件数据库中有625,000多种,并将持续把更多物种添加到训练算法中(<https://www.plantsnap.com/>)。2015年,LikeThat Garden发布,除植物外,该app还可识别蝴蝶。识别完成后,可跳转维基百科,提供更详尽的物种信息,同时还有带定位分享结果的功能(<https://appadvice.com/app/likethat-garden-flower-identification/>)。

在我国,植物识别app的发展离不开互联网创业公司“互联网+”创新思维,与国家在中国科学院“一三五”规划中提出的建设“90个国家花卉种质资源库”、中国科学院植物研究所部署的“数字植物与物种快速鉴定”等项目也密切相关^①。2010年12月13日,百度识图测试版上线,这是百度公司推出的一项搜索相似图片的服务。用户可以上传本地图片或输入图片的url地址进行搜索,随后百度公司把百度识图与百度图片搜索集成。百度识图不仅具有相同/相似图像搜索、全网人脸搜索等功能,也能够辨别植物。对于识别的植物,直接跳转百度百科,可获得更详尽的描述。这也是最初使用百度网站识别植物的方法。截至目前,百度识图只是百度App上的一个子功能,没有独立的手机移动端应用,但其仍具有相当大的潜力。2015年8月,形色上线。形色App由杭州睿琪软件有限公司与中国自然标本馆(CFH)合作开发,其他合作单位还有中国科学院植物研究所和中国科学院上海辰山植物园等(李珉葶, 2017)。除了鉴别花卉,形色还为用户搭建了一个功能更丰富的社交平台。形色App的识别结果包括植物种属、花语、植物价值、植物养护等,同时还有景点推荐、热点话题和鉴定求助等功能(王加希, 2019)。2016年9月,微软识花上线,其关注点主要集中在花卉识别。它由微软亚洲研究院和中国科学院植物研究所携手研发,应用深度学习技术,基于中国科学院植物研究所的260万张花的鉴定照片对机器识别模型进行训练。特别的是,它是一款离线应用,可在无法连接互联网的场所使用。2016年10月,鲁朗软件有限公司与中国科学院植物研究所合作,利用数百万张植物彩色照片开发的植物识别app花伴侣上线,这是一款基于大数据和深度学习算法的产品,拥有数量庞大的学习训练图片和可靠的分类

学信息(王桢和何建勇, 2017),以中国植物图像库海量植物分类图片为基础,可识别5,000种常见植物(李敏, 2018)。花帮主是一款定位为“养花者的大本营”的软件,与花伴侣为同一团队所运行,包含养花问题解答、园艺知识和相关资讯播报等功能,亦有着较高的识别率,并且对温带地区的野外植物具有识别优势。

随着智能手机的快速普及,基于深度学习的新一代植物识别算法不断完善,促成多个植物识别app面世。深度学习技术在植物识别中的应用过程中,训练算法所用的图片质量与算法本身的优劣同样重要,而高像素、大内存的智能手机满足了这一要求。总体而言,促成当前植物识别软件快速发展的条件有4个:(1)海量且准确鉴定的植物图片;(2)先进的人工智能算法;(3)良好的存储和运算能力以及网络传输能力;(4)高性能智能手机的快速普及。智能手机及其应用程序可以替代许多传统的手持式传感器、计算器和数据存储设备。

但各个app的服务定位及功能各有侧重,识别能力也有所差异。本文选取了8款国内目前较热门的植物识别app,希望对它们的识别能力进行基本的分析与评价。

1 数据来源与方法

1.1 数据来源

将中国植被区划的8个区域中植物区系相对相似的区域归并,选择温带区(包括寒温带针叶林区、温带针阔混交林区和暖温带落叶阔叶林区)、亚热带区(亚热带常绿阔叶林区)、热带区(热带雨林、季雨林区)和干旱半干旱区(温带草原区和温带荒漠区)4个区。然后,在中国自然标本馆网站(<http://www.cfh.ac.cn/>)分别从每个区选择100张图片作为基本数据集,用以比较不同软件的植物识别能力。为了便于更多人可进行重复测试,已将鉴定准确的400张照片上传至NSII服务器(<http://www.nsii.org.cn/2017/testPhoto.php/>)。这些照片共计有植物122科164属340种,以野生种为主,少量栽培植物。在400张照片中,有乔木98张,灌木99张,草本180张,木质藤本13张,草质藤本10张。根据国家重点保护野生植物名录,这400张照片中包含国家一、二级保护植物图片23张。

^① 林心怡 (2017) 我国植物辨识科普发展研究. 硕士学位论文, 西北农林科技大学, 杨凌.

1.2 研究方法

测试时间为2019年3月。识别测试的基本单元为照片, 无空白对照, 无重复, 仅记录每张图片首次识别的结果。移动端识别分为本地识别和远程识别, 在此采用本地识别的方法。首先选出测试所用的软件: 从国内的应用商店优化(App Store Optimization)网站以“植物识别”为搜索关键词, 比较了七麦数据(<https://www.qimai.cn/>)、蝉大师(<https://www.chandashi.com/>)以及德普优化(<https://www.deepaso.com/>) 3个应用商店优化网站的结果后, 选取了与关键词相关性较强、下载量较大、评分相对较高的7款软件, 加上具有百度识图功能的百度App, 总计8款软件, 即花帮主、形色、花帮主、百度识图、微软识花、植物识别、花卉识别、发现识花。第二步, 整理待识别植物的物种名及科名和属名的中文名与拉丁名。第三步, 将4个区的共400张图片存入手机相册。最后, 用选取的8款软件分别对图片进行识别, 控制测试环境(网络环境、手机内存足够)的统一, 记录识别结果的中文名、拉丁名、科名和属名。每个识别软件都会给出中文种名, 但由于植物的中文种名很多存在同物异名现象, 因此对不一致的中文种名需要核实其拉丁名。对于识别结果中没有拉丁名的植物, 以中国植物志网站(<http://frps.iplant.cn/>)上检索出的拉丁名为准。

大部分识别软件的识别结果并不具唯一性, 会有多个备选结果, 对于这样的情况, 选择其中可能性最高的作为识别的结果。将结果整理成表格, 按照计分标准记录各软件对每种植物的识别得分。

1.3 分析方法

以照片为测试的基本单元, 按照生物分类阶元识别的难易程度赋予不同的分值: 识别结果精确到种, 计4分, 精确到属, 计2分, 精确到科, 计1分, 识别错误则计0分。种是最重要的分类阶元, 还可与真实存在的物种一一对应, 故正确识别到种得分最高

在获得8款软件对每一张照片的识别结果后, 记录具体分值, 将每个软件的具体分值相加, 进行如下排序: 总得分排序、不同气候研究区的识别结果得分排序、对不同生长型的识别结果排序。对于各软件针对不同生长型以及国家一、二级重点保护植物识别到科、属、种的结果用比例来表示(因为样本中5种生长型的数量不同), 再进行比较和排序。

2 结果

2.1 总得分排序

从总体的识别结果来看, 花帮主得分最高, 其次是百度识图、花帮主、形色, 这4款app的得分较高且比较接近, 与其余4款相比有较明显的差异(图1)。在排名较后的4款app中, 花卉识别与植物识别的得分较接近, 而与发现识花和微软识花有比较明显的差异。

2.2 对不同气候区图片的识别结果

对于干旱半干旱区、温带、亚热带、热带这4个不同的气候区, 除了亚热带区外, 均是花帮主的得分最高(图2)。而百度识图在亚热带区表现最佳, 且在其他地区得分也较高。8个app在干旱半干旱区的得分均低于其他3个区。在识别准确率最高的4款

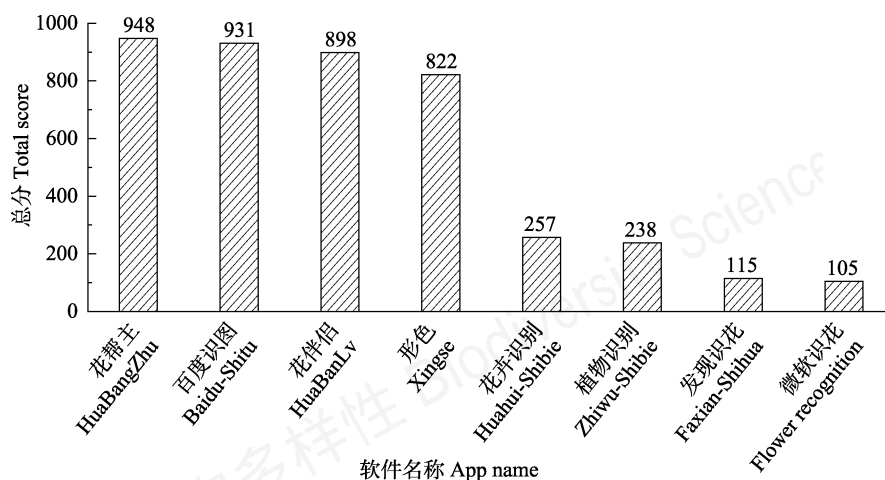


图1 国内8款常用植物识别软件总得分排序

Fig. 1 Total score ranking of eight commonly used plant identification application softwares in China

软件中,花帮主表现最佳,但在亚热带区,其识别准确率却排在百度识图、花伴侣、形色之后。百度识图在4个区的表现都较稳定。花伴侣与形色也在4个区都有较高的识别率,且在亚热带区表现较好,在其他区的表现次于花帮主和百度识图。

就单个软件来说,花帮主在4个区的得分都较高,其中识别效果最佳的是在温带区;百度识图在4个区的得分也较高,且更为均衡,其中识别效果最佳的是在亚热带区;花伴侣的得分仅次于花帮主和百度识图,在温带区、亚热带区表现均较好;形色的整体得分较高,在热带和亚热带区表现最好;微软识花、植物识别、花卉识别、发现识花这4款app表现最好的区分别是:温带以及干旱半干旱区、

温带区、热带区(图2)。

2.3 对于不同生长型的识别结果

对不同生长型的识别结果进行比较发现,花伴侣、形色、花帮主、百度识图对乔木、灌木、草本、木质藤本、草质藤本5种生长型的识别得分更高,且4款app间的分差别不大,总体而言以花帮主略占优势,形色稍逊于其他3款。微软识花、植物识别、花卉识别、发现识花虽得分不如上述4款app,但也有一定的识别效果,其中,植物识别、花卉识别的识别效果要好于微软识花和发现识花(图3)。

对于乔木的识别,花伴侣、形色、花帮主、百度识图4款app正确识别(即识别到种)的比例在50%左右,以花帮主的53%为最高。微软识花、植物识

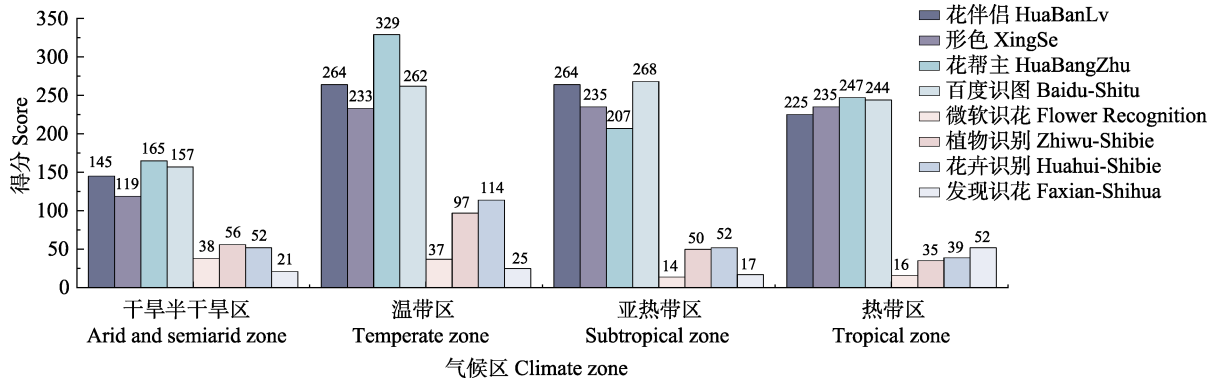


图2 国内8款常用植物识别软件在气候区的得分排序

Fig. 2 Score ranking by climate zone of eight commonly used plant identification application softwares in China

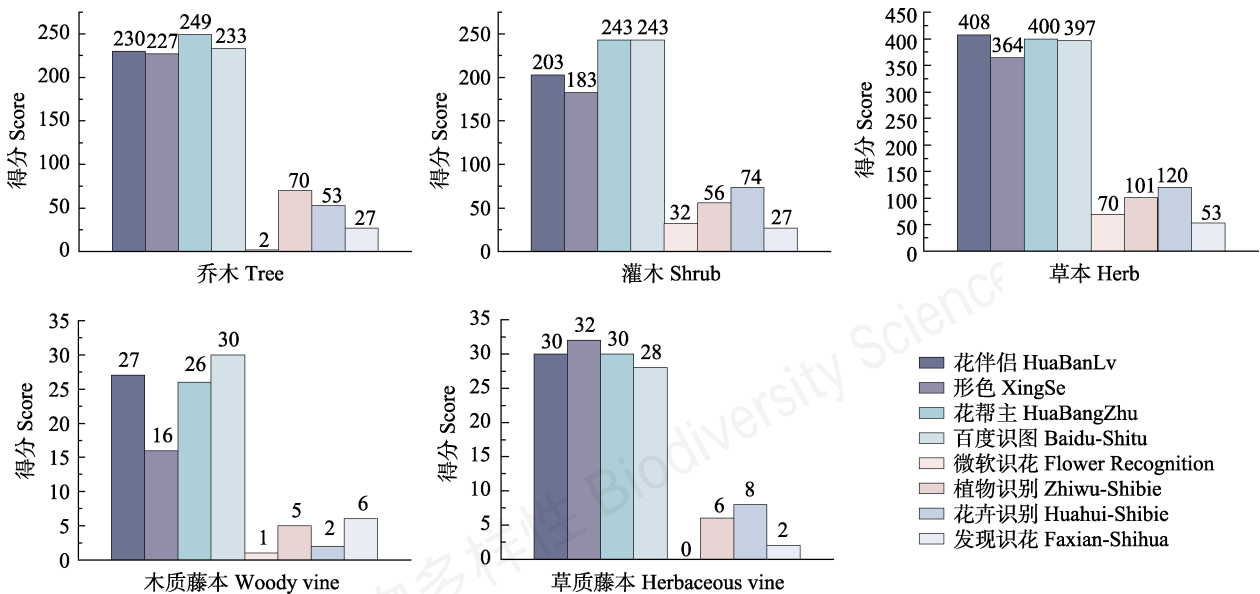


图3 国内8款常用植物识别软件对于不同生长型的识别结果得分

Fig. 3 Score of identification result of eight commonly used plant identification application softwares in China for different growth forms

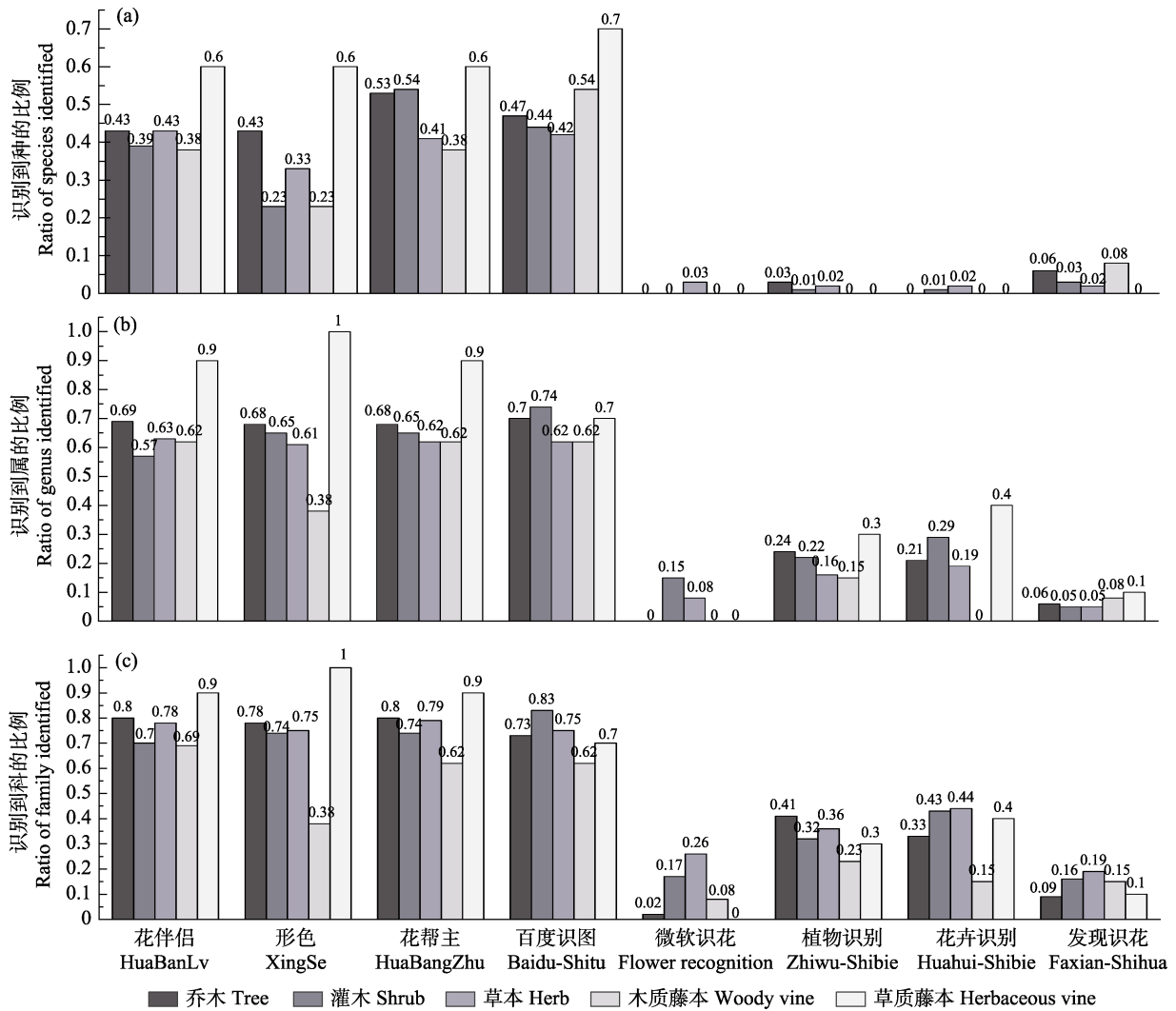


图4 国内8款常用植物识别软件对于不同生长型识别到种(a)、属(b)、科(c)的比例

Fig. 4 Identification results of eight commonly used plant identification application softwares in China for different growth forms (a) Ratio of species identified; (b) Ratio of genus identified; (c) Ratio of family identified.

别、花卉识别、发现识花的比例较低,有比例为0%的情况出现。比较乔木识别到属、科的比例,8款app的差距减小,微软识花、植物识别、花卉识别、发现识花这4款app仍具备一定的识别效果,其中植物识别、花卉识别的比例较高。其他生长型的识别情况与乔木的大致相同:灌木正确识别(即识别到种)比例最高的为花帮主(54%);草本为花伴侣(43%);木质藤本为百度识图(54%);草质藤本为百度识图(70%)(图4a)。其中,在对草质藤本的识别中,形色表现也较好:识别到种的比例为60%,而识别到属和科的比例均为100% (图4b、c)。从图中分析,在本测试中,表现较好且较稳定的app为花帮主和百度识图。

2.4 对国家级保护植物的识别结果

从识别比例来分析,花帮主对于国家一、二级保护植物的正确识别(识别到种)比例得分最高,花伴侣、形色次之。对于识别到科的比例,百度识图最高,为83%,花伴侣、形色、花帮主的比例相等。花卉识别、植物识别、发现识花、微软识花4款app的正确比例相对较低。其中,微软识花的3项数据均为0,即科属种全部识别错误(图5)。

3 讨论

3.1 识别结果分析

本文所测试的8款app均为目前在教育、科研以及科普方面应用较广、用户下载量较大的软件,每

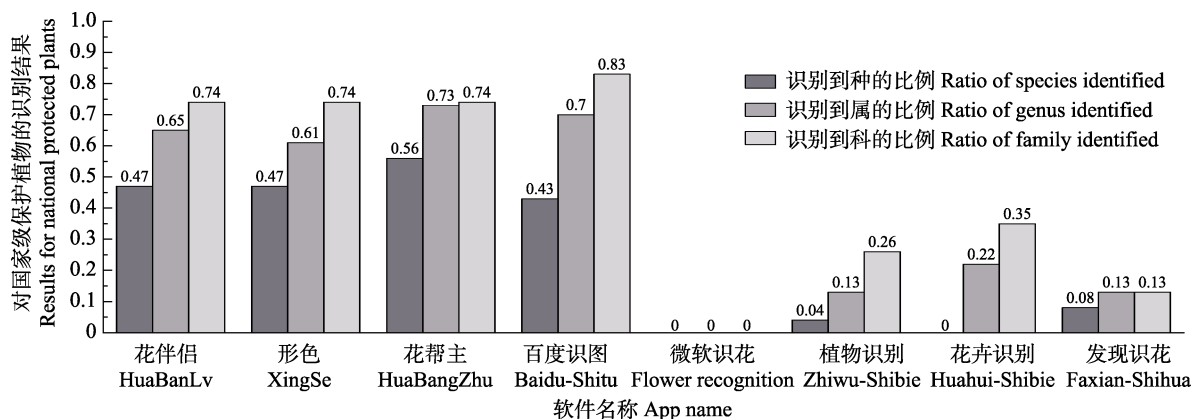


图5 国内8款常用植物识别软件对国家级保护植物(共23张图片)的识别结果

Fig. 5 Identification results of eight commonly used plant identification application softwares in China for national protected plants (23 pictures in total)

款app都具有丰富的图片资源和算法支持。对识别软件来说,植物分类图像库是最为核心和重要的资源,图像库中图片的数量和质量十分关键,同时算法和硬件也是重要因素之一。除此之外,测试环境也可以决定识别的结果,手机品牌、系统、性能、内存、照片背景颜色、相机分辨率、光线、拍摄角度等等都会导致或大或小的差异(袁银等, 2018)。本测试仅控制了手机性能、手机内存、网络环境、拍摄角度、图片质量等因素,故只能部分地反映各个app的识别能力。

在本测试中,花帮主、百度识图、花伴侣、百度识图这4款app识别结果的准确率较高,但对于不同气候区、不同生活型的植物,识别结果略有差异,总体来说,花帮主表现最好。值得注意的是,智能识别是一个自我学习和自我修正的系统,准确率提升依赖于数据的丰富性,也就是说用户量越大,数据积累越丰富,模型更新得越快,系统的识别能力也会随之提高。花帮主、百度识图、花伴侣和形色研发较早,占据了较大的市场份额,用户范围也相对较广。此外,相对而言,百度识图拥有比其他识别软件更庞大的图像数据资源,其数据资源来自整个互联网,没有倾向性。

从4个气候区的得分情况来看,干旱半干旱区最低。根据王礼等(2018)的观点,植物识别app的识别系统往往依托庞大的植物数据库,采用人工智能识别技术,但其植物识别过程较粗放、不精细,可能是因为过于庞大的数据库反而容易产生误差,导致识别结果不够准确。

值得注意的是,花帮主软件本身的关注点在于园艺花卉,但在本次测试中其识别准确率却高于由同一团队开发的关注点为华北野花的花伴侣,其中原因有待探究。此外,微软识花是唯一一款可以离线使用的软件,但在本次测试中准确率是8款中最低的。

3.2 植物识别app的局限性

值得指出的是,虽然植物识别app的使用使鉴别植物变得更简单,降低了植物分类学知识积累的门槛,但它们只是识别植物的一种辅助手段,一方面是因为植物识别app的准确率尚待提高,另一方面是它们始终不能取代植物学家。因为识别软件的算法与传统的分类学、形态学的原理始终不同,所以对于学者来说,扎实掌握分类学的知识和原则是准确判断植物种类的关键。对于学生和爱好者而言,如果没有系统扎实的分类学基础,当植物识别app给出易混淆的识别结果的时候,容易被误导,也难以纠错。

4 展望

4.1 识别软件可应用的领域

4.1.1 教学

植物识别app可在高校植物学、树木学、生态学等一些课程教学、科研项目训练中推广。对许多农林院校来说,校园内信息不全的挂牌、简单的记录或查询系统已经不能满足系统学习植物分类学的需要,此时植物识别软件可派上用场。植物识别app有灵活、便携、直观、反馈快速等优点,可作为

老师课堂教学内容的补充。在第十届应用信息学远程学习国际科学会议上, Vesely (2014)等展示了将新型的基于互联网的系统应用于植物学教学的成果。经过持续22周的观察,总结了园艺专业大学生植物识别能力的提升情况,研究者发现,创建一个可持续的基于互联网的学生教育平台是可行的。在野外实习时,植物识别app也可帮助学生快速且较准确地识别植物。植物识别app还为学生利用碎片化时间学习植物的相关知识提供了条件,也可激发同学们的学习兴趣,拓宽视野。根据测评结果,在教学活动中,优先推荐花帮主、百度识花、花伴侣以及形色。

4.1.2 科研

植物系统分类学是其他生命科学分支的基础,对于研究物种的适应、进化、生理、地理分布和保护等均具有重要意义。植物识别软件可以帮助科研工作者快速识别植物,即便有时识别精度不够,但仍然是一个为科研工作者减轻负担、提高效率的方法。在森林资源清查中,生物多样性普查是非常重要的一个方面。广东有3,000多个地块,过去工作人员只能通过拍摄图片请专家识别,而植物识别软件的应用大大提高了工作效率(王桢和何建勇,2017)。广东森林资源调查规划院在2017年的森林资源连续清查工作中使用了花伴侣。同时,植物大数据平台能够为生态监测、物种多样性调查、珍稀濒危植物保护、区域物种分布、野生植物资源调查和利用等提供数据支撑。从上述不同气候区、不同生活型以及对国家一、二级保护植物的识别结果来看,优先推荐花帮主和百度识花。

4.1.3 公众科学与科学普及

公众科学(citizen science)是指全部或部分由业余(或非专业)爱好者进行的科学研究。它是一种以协同合作方式进行的科学活动,具有开放、协作、公共的特点。中国的公众科学方兴未艾,而智能手机的普及拓宽了其发展道路。

植物识别软件可作为知识传播和辅助科学研究的重要工具。近年来,我国公众科学素质呈现不断上升的趋势,从互联网上获取科技信息的公众数量越来越多,通过互联网传播科学信息也逐渐成为向民众普及科学知识以及教育的重要手段^①。植物

识别软件的科普及社交版块为用户快速入门提供了可能。它能让用户熟悉身边的植物,对自然产生兴趣。尤其是针对珍稀濒危植物的识别,可帮助用户形成物种保护的意识。

数据的收集和分类是公众科学的重要内容。目前在生物学、生态学研究中,有大量有关鸟类、蝴蝶、天文学、珊瑚礁的数据来自公众科学(张健等,2013)。与此同时,公众科学和社交网络工具的出现促成了自然观察网络平台的诞生,如e-bird (<https://ebird.org/home>), inaturalist (<https://www.inaturalist.org/>), tela botanica (<https://www.tela-botanica.org/>), 这些公众科学网站已十分成熟并有自主开发的app。再如 xeno canto (<https://www.xeno-canto.org/>)和ispot (<https://www.ispotnature.org/>)这两个网站则拥有成熟的植物识别网络社区,甚至提供在线公开课(Joly et al, 2016)。植物物种信息可以作为一个新的方向,植物识别软件有望成为相关领域的高质量数据的主要来源,为决策者和科学家提供帮助,大量节省时间、成本。同时,公众科学还能增加普通民众对科学的参与感,使其不再高不可攀。基于总体的识别结果,优先推荐花帮主、百度识图、花伴侣和形色。

4.1.4 园林设计方面的应用

在2017年北京智慧园林论坛上,吴安东在题为《大数据+AI图像识别技术在园林行业应用探索》的演讲中提出,像花伴侣这样的植物识别软件,除了对普通市民起到科普工具的作用外,对于公园风景区以及农林业的一线工作人员都能产生价值。

对于园林工作者来说,通过植物识别软件了解植物的开花时间、习性、分布区等信息,可帮助他们选择适合的园林绿化、园林造景植物。对于园林的游览者来说,了解当季的花卉、植物的名称、寓意、物候信息可提升园林游赏体验。普通民众不仅可以知晓植物的物候,还可以拍摄和上传照片/视频,帮助管理者掌握第一手信息(王桢,2017)。从测试结果和软件本身的属性来看,优先推荐科普功能较齐全的形色和花帮主。

4.2 识别软件发展趋势及优化途径

可以预见,植物识别软件将有更多作为,其功能将不断完善并广泛应用于各个领域。各个识别软件应着眼于扩大图像库的数据量、优化算法、拓展功能、优化用户体验,吸引更多用户。如百度的“AI

^① 姬洪瑜 (2015) 基于iPad平台的植物科普应用软件的设计与实现. 硕士学位论文, 北京林业大学, 北京.

植物园计划”已经与5所国内知名植物园达成合作意向,并落地“百度探花郎”产品,兼顾拍照识花、全景科普以及智能导览三大功能。国外的iNaturalist开发出不同语言的网络版本,广泛搜集生物图片及其地理分布信息,已成为生物多样性信息学研究的有力工具。

植物识别软件功能还可以更具针对性,增强应用性。如开发适合不同地区(如保护地)和专门用途(如植物标本鉴定、花粉/孢粉鉴定)的植物识别软件;与野外植物考察结合,实现识别与记录同步(如中国科学院昆明植物所研究开发的Biotracks);与其他生物类群识别整合,开发综合的生物识别软件(如中国科学院动物研究所的“生物记”)。在农业上,可开发出识别常见病虫害的功能,帮助农民解决难题;在物种保护领域,可着眼于对珍稀、濒危和重要资源植物的识别;在生物安全领域,可用软件识别有害生物,如外来入侵种等。随着植物识别软件功能变得更全面、识别变得更智能,我们可以便捷地了解身边的一草一木,并为保护环境、发展产业和丰富生活做出贡献。

参考文献

- Cao XY, Sun WM, Zhu YX, Qian X, Li XY, Ye N (2018) Plant image recognition based on family priority strategy. *Journal of Computer Application*, 38(11), 195–199. (in Chinese with English abstract) [曹香滢, 孙卫民, 朱悠翔, 钱鑫, 李晓宇, 业宁 (2018) 基于科优先策略的植物图像识别. *计算机应用*, 38(11), 195–199.]
- Joly A, Bonnet P, Goeau H, Barbe J, Selmi S, Champ J, Kowalski SD, Affouard A, Carre J, Molino JF, Boujemaa N, Barthelemy D (2016) A look inside the PI@ntNet experience. *Multimedia Systems*, 22, 751–766.
- Kumar N, Belhumeur PN, Biswas A, Jacobs DW, Kress WJ, Lopez I, Soares JVB (2012) Leafsnap: A computer vision system for automatic plant species identification. In: *European Conference on Computer Vision* (eds Fitzgibbon A, Lazebnik S, Perona P, Sato Y, Schmid C), pp. 502–516. Springer-Verlag, Berlin.
- Li M (2018) “flower partners”: A new medium of knowledge service in the era of artificial intelligence. *Publishing Reference*, (8), 23–24. (in Chinese) [李敏 (2018) “花伴侣”: 人工智能时代知识服务的新媒介. 出版参考, (8), 23–24.]
- Li MT, Zhang JT, Lei YH (2017) Influence analysis of Chinese plant science popularization app based on user demand—A case study of “HuabanLv” App. *Science and Technology Communication*, 9(22), 211–213. (in Chinese) [李珉亭, 张健涛, 雷耀华 (2017) 基于用户需求的国内植物类科普app影响力分析——以花伴侣App为例. *科技传播*, 9(22), 211–213.]
- Vesely O, Vild O, Stastny J (2014) A novel approach for the increase in student’s learning motivation. In: *DIVAI 2014: The 10th International Scientific Conference on Distance Learning in Applied Informatics*, pp. 529–536. Wolters Kluwer, Sturovo.
- Wang JX (2019) Research on the communication effect of “huajian” article on shape-color App based on “5W” communication mode. *Audio-Visual*, 142(2), 131–132. (in Chinese). [王加希 (2019) 基于“5W”传播模式对形色App“花间”文章传播效果的探究. *视听*, 142(2), 131–132.]
- Wang L, Hong ZB, Fang LM, Chen X, Wu C (2018) Plant leaf recognition technology based on image analysis. *Journal of Zhejiang A & F University*, 35, 900–907. (in Chinese with English abstract) [王礼, 洪祖兵, 方陆明, 陈珣, 吴超 (2018) 基于iOS系统的观赏植物识别. *浙江农林大学学报*, 35, 900–907.]
- Wang Z, He JY (2017) “HuaBanLv”: Put the encyclopedia of plants into pocket. *Greening and Life*, (10), 30–33. (in Chinese) [王桢, 何建勇 (2017) 花伴侣: 把“植物大百科”装进小口袋. *绿化与生活*, (10), 30–33.]
- Yuan Y, Huang ZQ, Ding SF, Liu YJ, Feng ZJ (2018) Research on sampling method of plants based on big data analysis. *Modern Agricultural Science and Technology*, (3), 149–151. (in Chinese with English abstract) [袁银, 黄稚清, 丁释丰, 刘永金, 冯志坚 (2018) 基于大数据分析的植物标本取样方法研究. *现代农业科技*, (3), 149–151.]
- Zhang J, Chen SB, Chen B, Du YJ, Huang XL, Pan XB, Zhang Q (2013) Citizen science: Integrating scientific research, ecological conservation and public participation. *Biodiversity Science*, 21, 738–749. (in Chinese with English abstract) [张健, 陈圣宾, 陈彬, 杜彦君, 黄晓磊, 潘绪斌, 张强 (2013) 公众科学: 整合科学研究、生态保护和公众参与. *生物多样性*, 21, 738–749.]
- Zhang JJ, Guo JH, Wang ZZ, Wang PB, Wu XS (2017) “Campus Plants”, Design and development of the plant-recognize software—Take Donghu campus of Zhejiang Agricultural and Forestry University as an example. *South Agricultural Machinery*, 48(5), 80–81. (in Chinese) [张健捷, 郭建辉, 王志真, 王拼搏, 吴小双 (2017) “校园植物通”定位识别软件设计与研发——以浙江农林大学东湖校区为例. *南方农机*, 48(5), 80–81.]
- Zhang N, Liu WP (2011) Plant leaf recognition technology based on image analysis. *Application Research of Computers*, 28, 4001–4007. (in Chinese with English abstract) [张宁, 刘文萍 (2011) 基于图像分析的植物叶片识别技术综述. *计算机应用研究*, 28, 4001–4007.]
- Zhang YZ, Li BY (2016) Remote rapid recognition method for plants. *Journal of Computer Applications*, 36(S2), 206–209.

(in Chinese with English abstract) [张玉琢, 李柏依 (2016) 植物远程快速识别的方法. 计算机应用, 36(S2), 206-209.]
Zhong GL, Wang Q, Li MR, Lu Y (2015) Know-It-All—A recognition system of leaves. Internet of Things Technologies, 5(12), 6-7. (in Chinese) [钟刚亮, 王强, 李

梦如, 卢遥 (2015) 百叶通——植物叶片识别系统. 物联网技术, 5(12), 6-7.]

(责任编辑: 黄晓磊 责任编辑: 黄祥忠)

附录 Supplementary Material

附录1 国内8款常用植物识别软件的主要特点比较

Appendix 1 Comparison of the main characteristics of eight commonly used plant identification application softwares in China under evaluation

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2019272-1.pdf>

附录2 测评所用的400张植物图片

Appendix 2 400 pictures used for evaluation

<http://www.nsii.org.cn/2017/testPhoto.php>

附录3 测评所用的照片对应的植物名录

Appendix 3 A list of plants corresponding to the photographs used for the evaluation

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2019272-2.pdf>

附录4 国内8款常用植物识别软件的识别结果统计表

Appendix 4 Identification results of eight commonly used plant identification application softwares in China

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2019272-3.xlsx>

许展慧, 刘诗尧, 赵莹, 涂文琴, 常诏峰, 张恩涛, 郭靖, 郑迪, 耿鋈, 顾高营, 郭淳鹏, 郭璐璐, 王静, 徐春阳, 彭钊, 杨腾, 崔梦琪, 孙伟成, 张剑坛, 刘皓天, 巴超群, 王鹤琪, 贾竞超, 武金洲, 肖翠, 马克平. 国内8款常用植物识别软件的识别能力评价. 生物多样性, 2020, 28 (4):524–533. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019272>

附录1 国内8款常用植物识别软件的主要特点比较

Appendix 1 Comparison of the main characteristics of eight commonly used plant identification application softwares in China under evaluation

App名称	基于资源	算法	硬件	关注点	可识别植物种数
App name	Resources based	Algorithm	Hardware	Concerns	No. of species identified
花伴侣	中国科学院植物研究所+北京鲁	核心算法一致	中国科学院植物	华北野花	11,000种
HuaBanLv	朗公司		研究所服务器		
形色	中国科学院植物研究所+杭州大	核心算法一致	公司服务器	所有植物	4,000种
XingSe	拿公司				
花帮主	中国科学院植物研究所+北京鲁	核心算法一致	公司服务器	园艺	未公开
HuaBangZhu	朗公司				
百度识图	中国科学院植物研究所专家清	互联网公开的核心算法	最为强大	所有植物	未公开
Baidu-Shitu	洗数据+大量互联网信息	+专家清洗数据(整个互 联网资源)			
微软识花	个别专家图库	核心算法一致	公司服务器	花卉	未公开
Flower recognition					
植物识别	未知	核心算法一致	公司服务器	所有植物	未公开
Zhiwu-Shibie					
花卉识别	网络资源	核心算法一致	公司服务器	花卉	未公开
Huahui-Shibie					
发现识花	网络资源	核心算法一致	公司服务器	花卉	未公开
Faxian-Shihua					

许展慧, 刘诗尧, 赵莹, 涂文琴, 常诏峰, 张恩涛, 郭靖, 郑迪, 耿鋈, 顾高营, 郭淳鹏, 郭璐璐, 王静, 徐春阳, 彭钊, 杨腾, 崔梦琪, 孙伟成, 张剑坛, 刘皓天, 巴超群, 王鹤琪, 贾竞超, 武金洲, 肖翠, 马克平. 国内8款常用植物识别软件的识别能力评价. 生物多样性, 2020, 28 (4):524–533. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019272>

附录3 测评所用的照片对应的植物名录

Appendix 3 A list of plants corresponding to the photographs used for the evaluation

物种	照片在 NSII 网页的地址
一、干旱半干旱区	
1.麻黄科 <i>Ephedraceae</i>	
1.麻黄属 <i>Ephedra</i>	
1.蓝枝麻黄 <i>Ephedra glauca</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/蓝枝麻黄（果实）(Ephedra glauca) DSC_0065.jpg
2.膜果麻黄 <i>Ephedra przewalskii</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/膜果麻黄（Ephedra przewalskii）段士民.jpg
3.草麻黄 <i>Ephedra sinica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/草麻黄（Ephedra sinica）段士民 DSC_0044.jpg
2.杨柳科 <i>Salicaceae</i>	
1.杨属 <i>Ephedra</i>	
1.胡杨 <i>Populus euphratica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/胡杨（Populus euphratica）段士民.jpg
2.灰胡杨 <i>Populus pruinosa</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/灰胡杨（Populus pruinosa）.jpg
3.蓼科 <i>Polygonaceae</i>	
1.木蓼属 <i>Atraphaxis</i>	
1.长枝木蓼 <i>Atraphaxis virgata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/长枝木蓼（Atraphaxis virgata）段士民.jpg
4.石竹科 <i>Caryophyllaceae</i>	
1.刺叶属 <i>Acanthophyllum</i>	
1.刺叶 <i>Acanthophyllum pungens</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/刺叶（Acanthophyllum pungens）段士民.jpg
2.蝇子草属 <i>Silene</i>	
1.米瓦罐 <i>Silene conoidea</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/米瓦罐（Silene conoidea），新疆策勒县.jpg
5.藜科 <i>Chenopodiaceae</i>	
1.假木贼属 <i>Anabasis</i>	
1.短叶假木贼 <i>Anabasis brevifolia</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/短叶假木贼（Anabasis brevifolia）段士民.jpg
2.驼绒藜属 <i>Ceratoides</i>	
1.驼绒藜 <i>Ceratoides latens</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/驼绒藜（Ceratoides latens）段士民 DSC_0013.jpg
3.角果藜属 <i>Ceratocarpus</i>	
1.角果藜 <i>Ceratocarpus arenarius</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/角果藜（Ceratocarpus arenarius）段士民 DSC_0038.jpg
4.藜属 <i>Chenopodium</i>	
1.球花藜 <i>Chenopodium foliosum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/球花藜（Chenopodium foliosum）段士民 DSC_2612.jpg
5.盐生草属 <i>Halogeton</i>	
1.盐生草 <i>Halogeton glomeratus</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/盐生草（Halogeton glomeratus）段士民 DSC_0157.jpg
6.梭梭属 <i>Haloxylon</i>	

许展慧, 刘诗尧, 赵莹, 涂文琴, 常诏峰, 张恩涛, 郭靖, 郑迪, 耿鋈, 顾高营, 郭淳鹏, 郭璐璐, 王静, 徐春阳, 彭钊, 杨腾, 崔梦琪, 孙伟成, 张剑坛, 刘皓天, 巴超群, 王鹤琪, 贾竞超, 武金洲, 肖翠, 马克平. 国内8款常用植物识别软件的识别能力评价. 生物多样性, 2020, 28 (4):524–533. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019272>

物种	照片在 NSII 网页的地址
1.无叶梭梭 <i>Haloxylon aphyllum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/无叶梭梭（果实）(Haloxylon aphyllum) - 王喜勇.jpg
2.白梭梭 <i>Haloxylon persicum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/白梭梭（Haloxylon persicum）果实，新疆精河县.jpg
7.戈壁藜属 <i>Ijinia</i>	
1.戈壁藜 <i>Ijinia regelii</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/戈壁藜（Ijinia regelii）段士民.jpg
8.盐角草属 <i>Salicornia</i>	
1.盐角草 <i>Salicornia europaea</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/盐角草（Salicornia europaea）段士民.jpg
9.猪毛菜属 <i>Salsola</i>	
1.散枝猪毛菜 <i>Salsola brachiata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/散枝猪毛菜（Salsola brachiata）段士民.jpg
2.浆果猪毛菜 <i>Salsola foliosa</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/浆果猪毛菜（Salsola foliosa）段士民.jpg
6.毛茛科 <i>Ranunculaceae</i>	
1.角果毛茛属 <i>Ceratocephala</i>	
1.角果毛茛 <i>Ceratocephala testiculata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/角果毛茛（Ceratocephala testiculata）段士民 DSC_0184.jpg
2.铁线莲属 <i>Clematis</i>	
1.甘青铁线莲 <i>Clematis tangutica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/甘青铁线莲（Clematis tangutica）段士民 DSC_0058.jpg
7.罂粟科 <i>Papaveraceae</i>	
1.海罂粟属 <i>Glaucium</i>	
1.鳞果海罂粟 <i>Glaucium squamigerum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/鳞果海罂粟（Glaucium squamigerum）段士民.jpg
8.十字花科 <i>Cruciferae</i>	
1.群心菜属 <i>Cardaria</i>	
毛果群心菜 <i>Cardaria pubescens</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/毛果群心菜（Cardaria pubescens）段士民 DSC_0015.jpg
2.涩芥属 <i>Malcolmia</i>	
1.涩芥 <i>Malcolmia africana</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/涩芥（Malcolmia africana），新疆乌鲁木齐.jpg
3.菥蓂属 <i>Thlaspi</i>	
1.菥蓂 <i>Thlaspi arvense</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/菥蓂（Thlaspi arvense），段士民 DSC_0026.jpg
9.蔷薇科 <i>Rosaceae</i>	
1.蔷薇属 <i>Hulthemia</i>	
1.单叶蔷薇 <i>Hulthemia berberifolia</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/单叶蔷薇（Hulthemia berberifolia），段士民.jpg
2.绣线菊属 <i>Spiraea</i>	
1.金丝桃叶绣线菊 <i>Spiraea hypericifolia</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/金丝桃叶绣线菊（Spiraea hypericifolia）段士民 DSC_0202.jpg
10.豆科 <i>Fabaceae</i>	
1.骆驼刺属 <i>Alhagi</i>	

许展慧, 刘诗尧, 赵莹, 涂文琴, 常诏峰, 张恩涛, 郭靖, 郑迪, 耿鋈, 顾高营, 郭淳鹏, 郭璐璐, 王静, 徐春阳, 彭钊, 杨腾, 崔梦琪, 孙伟成, 张剑坛, 刘皓天, 巴超群, 王鹤琪, 贾竞超, 武金洲, 肖翠, 马克平. 国内8款常用植物识别软件的识别能力评价. 生物多样性, 2020, 28 (4):524–533. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019272>

物种	照片在 NSII 网页的地址
1.骆驼刺 <i>Alhagi sparsifolia</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/骆驼刺 (Alhagi sparsifolia) 段士民 IMG_8534.jpg
2.沙冬青属 <i>Ammopiptanthus</i>	
1.沙冬青 <i>Ammopiptanthus mongolicus</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/沙冬青 (Ammopiptanthus mongolicus) 段士民 DSC_0083.jpg
2.小沙冬青 <i>Ammopiptanthus nanus</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/小沙冬青 (Ammopiptanthus nanus) 段士民 DSC_0002.jpg
3.黄耆属 <i>Astragalus</i>	
1.长毛荚黄耆 <i>Astragalus macrotrichus</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/长毛荚黄耆 (Astragalus macrotrichus) 段士民.jpg
2.茧荚黄耆 <i>Astragalus lehmannianus</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/茧荚黄耆 (Astragalus lehmannianus) 段士民.jpg
4.无叶豆属 <i>Eremosparton</i>	
1.准噶尔无叶豆 <i>Eremosparton songoricum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/准噶尔无叶豆 (Eremosparton songoricum) 段士民 DSC_0062.jpg
5.锦鸡儿属 <i>Caragana</i>	
1.刺叶锦鸡儿 <i>Caragana acanthophylla</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/刺叶锦鸡儿 (Caragana acanthophylla) 段士民 DSC_0123.jpg
6.甘草属 <i>Glycyrrhiza</i>	
1.粗毛甘草 <i>Glycyrrhiza aspera</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/粗毛甘草 (Glycyrrhiza aspera) 段士民.jpg
2.胀果甘草 <i>Glycyrrhiza inflata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/胀果甘草 (Glycyrrhiza inflata) 段士民 DSC_0072.jpg
3.甘草 <i>Glycyrrhiza uralensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/甘草 (Glycyrrhiza uralensis), 新疆青河县.jpg
7.铃铛刺属 <i>Halimodendron</i>	
1.铃铛刺 <i>Halimodendron halodendron</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/铃铛刺 (Halimodendron halodendron) 段士民.jpg
8.岩黄耆属 <i>Hedysarum</i>	
1.细枝岩黄耆 <i>Hedysarum scoparium</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/细枝岩黄耆 (Hedysarum scoparium) 段士民.jpg
9.苦马豆属 <i>Sphaerophysa</i>	
1.苦马豆 <i>Sphaerophysa salsula</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/苦马豆 (Sphaerophysa salsula) 段士民 DSC_0084.jpg
11.蒺藜科 Zygophyllaceae	
1.白刺属 <i>Nitraria</i>	
1.泡果白刺 <i>Nitraria sphaerocarpa</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/泡果白刺 (Nitraria sphaerocarpa) 段士民 DSC_0046.jpg
2.唐古特白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/唐古特白刺 (Nitraria tangutorum) 段士民 DSC_0054.jpg
2.骆驼蓬属 <i>Peganum</i>	
1.骆驼蓬 <i>Peganum harmala</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/骆驼蓬 (Peganum harmala) 段士民 DSC_0066.jpg

许展慧, 刘诗尧, 赵莹, 涂文琴, 常诏峰, 张恩涛, 郭靖, 郑迪, 耿鋈, 顾高营, 郭淳鹏, 郭璐璐, 王静, 徐春阳, 彭钊, 杨腾, 崔梦琪, 孙伟成, 张剑坛, 刘皓天, 巴超群, 王鹤琪, 贾竞超, 武金洲, 肖翠, 马克平. 国内8款常用植物识别软件的识别能力评价. 生物多样性, 2020, 28 (4):524–533. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019272>

物种	照片在 NSII 网页的地址
3. 驼蹄瓣属 <i>Zygophyllum</i>	
1. 驼蹄瓣 <i>Zygophyllum fabago</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/驼蹄瓣 (Zygophyllum fabago) 段士民.jpg
2. 大花霸王 <i>Zygophyllum potaninii</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/大花霸王 (Zygophyllum potaninii) 段士民 DSC_0077.jpg
12. 亚麻科 Linaceae	
1. 亚麻属 <i>Linum</i>	
1. 亚麻 <i>Linum usitatissimum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/亚麻 (Linum usitatissimum) -王喜勇.jpg
13. 胡颓子科 Elaeagnaceae	
1. 胡颓子属 <i>Elaeagnus</i>	
1. 尖果沙枣 <i>Elaeagnus oxycarpa</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/尖果沙枣 (Elaeagnus oxycarpa) 段士民.jpg
2. 沙棘属 <i>Hippophae</i>	
1. 沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/沙棘 (Hippophae rhamnoides) 段士民.jpg
14. 半日花科 Cistaceae	
1. 半日花属 <i>Helianthemum</i>	
1. 半日花 <i>Helianthemum songaricum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/半日花 (Helianthemum songaricum) 段士民, 新疆伊犁.jpg
15. 柽柳科 Tamaricaceae	
1. 柽柳属 <i>Tamarix</i>	
1. 短穗柽柳 <i>Tamarix laxa</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/短穗柽柳 (Tamarix laxa) 段士民 DSC_0014.jpg
2. 细穗柽柳 <i>Tamarix leptostachys</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/细穗柽柳 (Tamarix leptostachys) 段士民 DSC_0013.jpg
3. 多枝柽柳 <i>Tamarix ramosissima</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/多枝柽柳 (Tamarix ramosissima) 段士民.jpg
16. 锁阳科 Cynomoriaceae	
1. 锁阳属 <i>Cynomorium</i>	
1. 锁阳 <i>Cynomorium songaricum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/锁阳 (Cynomorium songaricum) 段士民 DSC_0018.jpg
17. 锦葵科 Malvaceae	
1. 木槿属 <i>Hibiscus</i>	
1. 野西瓜苗 <i>Hibiscus trionum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/野西瓜苗 (Hibiscus trionum) 段士民 DSC_0043.jpg
18. 白花丹科 Plumbaginaceae	
1. 补血草属 <i>Limonium</i>	
1. 簇枝补血草 <i>Limonium chrysocomum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/簇枝补血草 (Limonium chrysocomum) 段士民 DSC_0083.jpg
2. 鸡娃草属 <i>Plumbagella</i>	
1. 鸡娃草 <i>Plumbagella micrantha</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/鸡娃草 (Plumbagella micrantha), 新疆乌鲁木齐.jpg
3. 驼舌草属 <i>Goniolimon</i>	
1. 驼舌草 <i>Goniolimon speciosum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/驼舌草 (Goniolimon speciosum) 段士民 DSC_0167.jpg

许展慧, 刘诗尧, 赵莹, 涂文琴, 常诏峰, 张恩涛, 郭靖, 郑迪, 耿鋈, 顾高营, 郭淳鹏, 郭璐璐, 王静, 徐春阳, 彭钊, 杨腾, 崔梦琪, 孙伟成, 张剑坛, 刘皓天, 巴超群, 王鹤琪, 贾竞超, 武金洲, 肖翠, 马克平. 国内8款常用植物识别软件的识别能力评价. 生物多样性, 2020, 28 (4):524–533. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019272>

物种	照片在 NSII 网页的地址
19.夹竹桃科 Apocynaceae	
1.白麻属 <i>Poacynum</i>	
1.大叶白麻 <i>Poacynum hendersonii</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/大叶白麻 (Poacynum hendersonii) 段士民.jpg
20.旋花科 Convolvulaceae	
1.旋花属 <i>Convolvulus</i>	
1.田旋花 <i>Convolvulus arvensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/田旋花 (Convolvulus arvensis) 段士民.jpg
2.菟丝子属 <i>Cuscuta</i>	
1.南方菟丝子 <i>Cuscuta australis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/南方菟丝子 (Cuscuta australis) 段士民 DSC_0034.jpg
21.紫草科 Boraginaceae	
1.软紫草属 <i>Arnebia</i>	
1.黄花软紫草 <i>Arnebia guttata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/黄花软紫草 (Arnebia guttata) 段士民.jpg
2.蓝蓟属 <i>Echium</i>	
1.蓝蓟 <i>Echium vulgare</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/蓝蓟 (Echium vulgare) 段士民 DSC_0004.jpg
3.长柱琉璃草属 <i>Lindelofia</i>	
1.长柱琉璃草 <i>Lindelofia stylosa</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/长柱琉璃草 (Lindelofia stylosa) 段士民.jpg
4.假狼紫草属 <i>Nonea</i>	
1.假狼紫草 <i>Nonea caspica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/假狼紫草 (Nonea caspica) 段士民 DSC_0130.jpg
22.唇形科 Labiatae	
1.沙穗属 <i>Eremostachys</i>	
1.沙穗 <i>Eremostachys moluccelloides</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/沙穗 (Eremostachys moluccelloides) 段士民.jpg
2.鼠尾草属 <i>Salvia</i>	
1.新疆鼠尾草 <i>Salvia deserta</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/新疆鼠尾草 (Salvia deserta) 段士民 DSC_0138.jpg
3.黄芩属 <i>Scutellaria</i>	
1.盔状黄芩 <i>Scutellaria galericulata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/盔状黄芩 (Scutellaria galericulata) 段士民 DSC_0041.jpg
4.新塔花属 <i>Ziziphora</i>	
1.小新塔花 <i>Ziziphora tenuior</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/小新塔花 (Ziziphora tenuior), 新疆玛纳斯县.jpg
23.茄科 Solanaceae	
1.茄属 <i>Solanum</i>	
1.红果龙葵 <i>Solanum villosum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/红果龙葵 (Solanum villosum) 段士民.jpg
2.天仙子属 <i>Hyoscyamus</i>	
1.天仙子 <i>Hyoscyamus niger</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/天仙子 (Hyoscyamus niger) 段士民.jpg
3.枸杞属 <i>Lycium</i>	

许展慧, 刘诗尧, 赵莹, 涂文琴, 常诏峰, 张恩涛, 郭靖, 郑迪, 耿鋈, 顾高营, 郭淳鹏, 郭璐璐, 王静, 徐春阳, 彭钊, 杨腾, 崔梦琪, 孙伟成, 张剑坛, 刘皓天, 巴超群, 王鹤琪, 贾竞超, 武金洲, 肖翠, 马克平. 国内8款常用植物识别软件的识别能力评价. 生物多样性, 2020, 28 (4):524–533. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019272>

物种	照片在 NSII 网页的地址
1.宁夏枸杞 <i>Lycium barbarum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/宁夏枸杞 (Lycium barbarum) 段士民 DSC_0275.jpg
2.黑果枸杞 <i>Lycium ruthenicum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/黑果枸杞 (Lycium ruthenicum) 段士民 DSC_0008.jpg
4.泡囊草属 <i>Physochlaina</i>	
1.泡囊草 <i>Physochlaina physaloides</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/泡囊草 (Physochlaina physaloides) 段士民.jpg
24.玄参科 Scrophulariaceae	
1.毛蕊花属 <i>Verbascum</i>	
1.准噶尔毛蕊花 <i>Verbascum songaricum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/准噶尔毛蕊花 (Verbascum songaricum) 段士民 DSC_0112.jpg
25.列当科 Orobanchaceae	
1.黄筒花属 <i>Phacellanthus</i>	
1.管花肉苁蓉 <i>Cistanche tubulosa</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/管花肉苁蓉 (Cistanche tubulosa) 段士民.jpg
26.车前科 Plantaginaceae	
1.车前属 <i>Plantago</i>	
1.小车前 <i>Plantago minuta</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/小车前 (Plantago minuta), 新疆巴里坤县.jpg
27.菊科 Compositae	
1.顶羽菊属 <i>Acroptilon</i>	
1.顶羽菊 <i>Acroptilon repens</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/顶羽菊 (Acroptilon repens) 段士民.jpg
2.牛蒡属 <i>Arctium</i>	
1.毛头牛蒡 <i>Arctium tomentosum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/毛头牛蒡 (Arctium tomentosum) 段士民 DSC_0119.jpg
3.矢车菊属 <i>Centaurea</i>	
1.针刺矢车菊 <i>Centaurea iberica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/针刺矢车菊 Centaurea iberica.jpg
4.菊苣属 <i>Cichorium</i>	
1.菊苣 <i>Cichorium intybus</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/菊苣 (Cichorium intybus) 段士民 DSC_025.jpg
5.刺头菊属 <i>Cousinia</i>	
1.刺头菊 <i>Cousinia affinis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/刺头菊 (Cousinia affinis) 段士民 DSC_0009.jpg
6.蓝刺头属 <i>Echinops</i>	
1.大蓝刺头 <i>Echinops talassicus</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/大蓝刺头 (Echinops talassicus) 段士民.jpg
2.天山蓝刺头 <i>Echinops tjanschanicus</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/天山蓝刺头 (Echinops tjanschanicus), 新疆阿勒泰.jpg
7.苦苣菜属 <i>Sonchus</i>	
1.苦苣菜 <i>Sonchus oleraceus</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/苦苣菜 (Sonchus oleraceus) 段士民 DSC_0047.jpg
8.异喙菊属 <i>Heteracia</i>	
1.异喙菊 <i>Heteracia szovitsii</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/异喙菊 (Heteracia szovitsii), 新疆昌吉.jpg

许展慧, 刘诗尧, 赵莹, 涂文琴, 常诏峰, 张恩涛, 郭靖, 郑迪, 耿鋈, 顾高营, 郭淳鹏, 郭璐璐, 王静, 徐春阳, 彭钊, 杨腾, 崔梦琪, 孙伟成, 张剑坛, 刘皓天, 巴超群, 王鹤琪, 贾竞超, 武金洲, 肖翠, 马克平. 国内8款常用植物识别软件的识别能力评价. 生物多样性, 2020, 28 (4):524–533. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019272>

物种	照片在 NSII 网页的地址
9.大翅蓟属 <i>Onopordum</i>	
1.大翅蓟 <i>Onopordum acanthium</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/大翅蓟 (Onopordum acanthium) 段士民.jpg
28.百合科 Liliaceae	
1.葱属 <i>Allium</i>	
1.棱叶韭 <i>Allium caeruleum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/棱叶韭 (Allium caeruleum) 段士民 DSC_0087.jpg
2.沙葱 <i>Allium mongolicum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/沙葱 (Allium mongolicum), 新疆青河县.jpg
3.蜜囊韭 <i>Allium subtilissimum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/蜜囊韭 (Allium subtilissimum), 新疆伊吾县.jpg
2.天门冬属 <i>Asparagus</i>	
1.戈壁天门冬 <i>Asparagus gobicus</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/戈壁天门冬 (Asparagus gobicus) 段士民.jpg
3.独尾草属 <i>Eremurus</i>	
1.粗柄独尾草 <i>Eremurus inderiensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/粗柄独尾草 (Eremurus inderiensis), 段士民.jpg
4.郁金香属 <i>Tulipa</i>	
1.异瓣郁金香 <i>Tulipa heteropetala</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/异瓣郁金香 (Tulipa heteropetala) 段士民 DSC_0273.jpg
29.石蒜科 Amaryllidaceae	
1.鸢尾蒜属 <i>Ixiolirion</i>	
1.鸢尾蒜 <i>Ixiolirion tataricum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/鸢尾蒜 (Ixiolirion tataricum) 段士民 DSC_0286.jpg
30.莎草科 Cyperaceae	
1.薹草属 <i>Carex</i>	
1.囊果薹草 <i>Carex physodes</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/囊果薹草 (Carex physodes) 段士民.jpg
31.禾本科 Gramineae	
1.山羊草属 <i>Aegilops</i>	
1.节节麦 <i>Aegilops tauschii</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/节节麦 (Aegilops tauschii), 新疆霍城县.jpg
2.三芒草属 <i>Aristida</i>	
1.羽毛三芒草 <i>Aristida pennata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/羽毛三芒草 (Aristida pennata), 段士民 DSC_0183.jpg
3.虎尾草属 <i>Chloris</i>	
1.虎尾草 <i>Chloris virgata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/虎尾草 (Chloris virgata) 新疆阜康县.jpg
4.旱麦草属 <i>Eremopyrum</i>	
1.光穗旱麦草 <i>Eremopyrum bonaepartis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/光穗旱麦草 (Eremopyrum bonaepartis) 段士民 DSC_0006.jpg
2.旱麦草 <i>Eremopyrum triticeum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/1d/original/旱麦草 (Eremopyrum triticeum) 新疆阜康县.jpg
二、热带区	

许展慧, 刘诗尧, 赵莹, 涂文琴, 常诏峰, 张恩涛, 郭靖, 郑迪, 耿鋈, 顾高营, 郭淳鹏, 郭璐璐, 王静, 徐春阳, 彭钊, 杨腾, 崔梦琪, 孙伟成, 张剑坛, 刘皓天, 巴超群, 王鹤琪, 贾竞超, 武金洲, 肖翠, 马克平. 国内8款常用植物识别软件的识别能力评价. 生物多样性, 2020, 28 (4):524–533. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019272>

物种	照片在 NSII 网页的地址
1.水蕨科 Parkeriaceae	
1.水蕨属 <i>Ceratopteris</i>	
1.水蕨 <i>Ceratopteris thalictroides</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/2 国家二级保护植物水蕨 <i>Ceratopteris thalictroides</i> .JPG
2.水龙骨科 Polypodiaceae	
1.星蕨属 <i>Microsorium</i>	
1.江南星蕨 <i>Microsorium fortunei</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/ 江南星蕨 <i>Microsorium fortunei</i> P1260590.JPG
2.江南星蕨 <i>Microsorium fortunei</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/ 江南星蕨 <i>Microsorium fortunei</i> .JPG
3.桑科 Moraceae	
1.号角树属 <i>Cecropia</i>	
1.号角树 <i>Cecropia peltata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/ 号角树 <i>Cecropia peltata</i> 蚁栖树 P2120297.JPG
2.榕属 <i>Ficus</i>	
1.高山榕 <i>Ficus altissima</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/ 高山榕 P1300652.JPG
2.垂叶榕 <i>Ficus benjamina</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/ 垂叶榕 <i>Ficus benjamina</i> .JPG
3.水同木 <i>Ficus fistulosa</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/ 水同木 <i>Ficus fistulosa</i> .JPG
3.牛筋藤属 <i>Malaisia</i>	
1.牛筋藤 <i>Malaisia scandens</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/ 牛筋藤 <i>Malaisia scandens</i> P2040126.JPG
4.紫茉莉科 Nyctaginaceae	
1.黏腺果属 <i>Commicarpus</i>	
1.中华黏腺果 <i>Commicarpus lantsangensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/ 中华黏腺果 <i>Commicarpus lantsangensis</i> P1290253.JPG
2.中华黏腺果 <i>Commicarpus lantsangensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/ 中华黏腺果 <i>Commicarpus lantsangensis</i> P1290253.JPG
5.落葵科 Basellaceae	
1.落葵属 <i>Basella</i>	
1.落葵 <i>Basella alba</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/ 落葵 <i>Basella alba</i> .JPG
6.龙脑香科 Dipterocarpaceae	
1.坡垒属 <i>Hopea</i>	
1.坡垒 <i>Hopea hainanensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/ 坡垒 <i>Hopea hainanensis</i> P1230517.JPG
7.藤黄科 <i>Guttiferae</i>	
1.红厚壳属 <i>Calophyllum</i>	
1.红厚壳 <i>Calophyllum inophyllum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/8 红厚壳 <i>Calophyllum inophyllum</i> P1210685.JPG
8.罂粟科 Papaveraceae	
1.薊罂粟属 <i>Argemone</i>	
1.薊罂粟 <i>Argemone mexicana</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/ 薊罂粟 <i>Argemone mexicana</i> P2041302.JPG
9.山柑科 Capparaceae	
1.白花菜属 <i>Cleome</i> <i>Crassulaceae</i>	
1.白花菜 <i>Cleome gynandra</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/ 白花菜 <i>Cleome gynandra</i> .JPG
10.辣木科 Moringaceae	

许展慧, 刘诗尧, 赵莹, 涂文琴, 常诏峰, 张恩涛, 郭靖, 郑迪, 耿鋈, 顾高营, 郭淳鹏, 郭璐璐, 王静, 徐春阳, 彭钊, 杨腾, 崔梦琪, 孙伟成, 张剑坛, 刘皓天, 巴超群, 王鹤琪, 贾竞超, 武金洲, 肖翠, 马克平. 国内8款常用植物识别软件的识别能力评价. 生物多样性, 2020, 28 (4):524–533. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019272>

物种	照片在 NSII 网页的地址
1.辣木属 <i>Moringa</i>	
1.象腿树 <i>Moringa drouhardii</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/象腿树 Moringa drouhardii P1300518.JPG
11.豆科 Fabaceae	
1.合欢属 <i>Albizia</i>	
1.楹树 <i>Albizia chinensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/15 楹树 Albizia chinensis P2130570.JPG
2.朱缨花属 <i>Calliandra</i>	
1.朱缨花 <i>Calliandra haematocephala</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/朱缨花 DSC_5582.JPG
3.楹藤属 <i>Entada</i>	
1.楹藤 <i>Entada phaseoloides</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/楹藤 Entada phaseoloides 又叫眼睛豆 P2060274.JPG
4.刺桐属 <i>Erythrina</i>	
1.鸡冠刺桐 <i>Erythrina crista-galli</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/12 鸡冠刺桐 Erythrina crista-galli.JPG
2.乳黄刺桐 <i>Erythrina mitis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/20 乳黄刺桐 Erythrina mitis P2120403.JPG
5.木蓝属 <i>Indigofera</i>	
1.硬毛木蓝 <i>Indigofera hirsuta</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/29 硬毛木蓝 Indigofera hirsuta P1290309.JPG
2.野青树 <i>Indigofera suffruticosa</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/27 野青树 Indigofera suffruticosa P2040078.JPG
6.大翼豆属 <i>Maackia</i>	
1.大翼豆 <i>Macroptilium atropurpureum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/大翼豆 Macroptiliumatropurpureum.JPG
7.崖豆藤属 <i>Millettia</i>	
1.厚果崖豆藤 <i>Millettia pachycarpa</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/厚果崖豆藤 Millettia pachycarpa.JPG
8.含羞草属 <i>Mimosa</i>	
1.巴西含羞草 <i>Mimosa invisa</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/巴西含羞草 Mimosa invisa P1290112.JPG
9.无忧花属 <i>Saraca</i>	
1.无忧花 <i>Saraca dives</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/14 无忧花 Saraca dives P2070202.JPG
2.无忧花 <i>Saraca dives</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/14 无忧花 Saraca dives.JPG
12.酢浆草科 Oxalidaceae	
1.阳桃属 <i>Averrhoa</i>	
1.阳桃 <i>Averrhoa carambola</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/阳桃 Averrhoa carambola P1260081.JPG
13.大戟科 Euphorbiaceae	
1.大戟属 <i>Euphorbia</i>	
1.霸王鞭 <i>Euphorbia royleana</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/18 霸王鞭 Euphorbia royleana.JPG
2.海漆属 <i>Excoecaria</i>	
1.红背桂花 <i>Excoecaria cochinchinensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/9 红背桂花 Excoecaria cochinchinensis.JPG
2.红背桂花 <i>Excoecaria cochinchinensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/9 红背桂 Excoecaria cochinchinensis.JPG
3.橡胶树属 <i>Hevea</i>	
1.橡胶树 <i>Hevea brasiliensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/橡胶树 Hevea brasiliensis P1260203.JPG
14.芸香科 Rutaceae	
1.小芸木属 <i>Micromelum</i>	

许展慧, 刘诗尧, 赵莹, 涂文琴, 常诏峰, 张恩涛, 郭靖, 郑迪, 耿鋈, 顾高营, 郭淳鹏, 郭璐璐, 王静, 徐春阳, 彭钊, 杨腾, 崔梦琪, 孙伟成, 张剑坛, 刘皓天, 巴超群, 王鹤琪, 贾竞超, 武金洲, 肖翠, 马克平. 国内8款常用植物识别软件的识别能力评价. 生物多样性, 2020, 28 (4):524–533. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019272>

物种	照片在 NSII 网页的地址
1.大管 <i>Micromelum falcatum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/26 大管 <i>Micromelum falcatum</i> .JPG
2.九里香属 <i>Murraya</i>	
1.九里香 <i>Murraya exotica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/九里香 DSC_5256.JPG
2.九里香 <i>Murraya exotica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/九里香 <i>Murraya exotica</i> P2060013.JPG
15.漆树科 <i>Anacardiaceae</i>	
1.杧果属 <i>Mangifera</i>	
1.杧果 <i>Mangifera indica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/杧果 <i>Mangifera indica</i> P1310876.JPG
2.杧果 <i>Mangifera indica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/25 杧果 <i>Mangifera indica</i> 2.JPG
3.杧果 <i>Mangifera indica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/25 杧果 <i>Mangifera indica</i> 1.JPG
16.无患子科 <i>Sapindaceae</i>	
1.倒地铃属 <i>Cardiospermum</i>	
1.倒地铃 <i>Cardiospermum halicacabum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/30 倒地铃 <i>Cardiospermum halicacabum</i> 2.JPG
2.倒地铃 <i>Cardiospermum halicacabum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/30 倒地铃 <i>Cardiospermum halicacabum</i> 1.JPG
17.刺茉莉科 <i>Salvadoraceae</i>	
1.刺茉莉属 <i>Azima</i>	
1.刺茉莉 <i>Azima sarmentosa</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/7 刺茉莉 <i>Azima sarmentosa</i> P2100602.JPG
18.红木科 <i>Bixaceae</i>	
1.红木属 <i>Bixa</i>	
1.红木 <i>Bixa orellana</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/红木 <i>Bixa orellana</i> P1230761.JPG
19.桃金娘科 <i>Myrtaceae</i>	
1.蒲桃属 <i>Syzygium</i>	
1.洋蒲桃 <i>Syzygium samarangense</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/3 洋蒲桃 <i>Syzygium samarangense</i> P1250760.JPG
2.洋蒲桃 <i>Syzygium samarangense</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/3 洋蒲桃 <i>Syzygium samarangense</i> P2020308.JPG
3.洋蒲桃 <i>Syzygium samarangense</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/洋蒲桃 DSC_5207.JPG
20.野牡丹科 <i>Melastomataceae</i>	
1.野牡丹属 <i>Melastoma</i>	
1.毛茛 <i>Melastoma sanguineum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/23 毛茛 <i>Melastoma sanguineum</i> P1240838.JPG
21.锦葵科 <i>Malvaceae</i>	
1.木槿属 <i>Hibiscus</i>	
1.朱槿 <i>Hibiscus rosa-sinensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/朱槿 DSC_5492.JPG
2.白背黄花稔 <i>Sida rhombifolia</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/白背黄花稔 <i>Sida rhombifolia</i> .JPG
22.木棉科 <i>Bombacaceae</i>	
1.木棉属 <i>Bombax</i>	
1.木棉 <i>Bombax ceiba</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/13 木棉 <i>Bombax ceiba</i> .JPG
2.吉贝属 <i>Ceiba</i>	
1.吉贝 <i>Ceiba pentandra</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/5 吉贝 <i>Ceiba pentandra</i> .JPG
2.吉贝 <i>Ceiba pentandra</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/5 吉贝 <i>Ceiba pentandra</i> P1300696.JPG

许展慧, 刘诗尧, 赵莹, 涂文琴, 常诏峰, 张恩涛, 郭靖, 郑迪, 耿鋈, 顾高营, 郭淳鹏, 郭璐璐, 王静, 徐春阳, 彭钊, 杨腾, 崔梦琪, 孙伟成, 张剑坛, 刘皓天, 巴超群, 王鹤琪, 贾竞超, 武金洲, 肖翠, 马克平. 国内8款常用植物识别软件的识别能力评价. 生物多样性, 2020, 28 (4):524–533. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019272>

物种	照片在 NSII 网页的地址
3.吉贝 <i>Ceiba pentandra</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/吉贝 Ceiba pentandra P1300696.JPG
23.梧桐科 Sterculiaceae	
1.可乐果属 <i>Cola</i>	
1.光亮可乐果 <i>Cola nitida</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/4 光亮可乐果 Cola nitida.JPG
2.马松子属 <i>Melochia</i>	
1.马松子 <i>Melochia corchorifolia</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/马松子 Melochia corchorifolia.JPG
3.苹婆属 <i>Sterculia</i>	
1.假苹婆 <i>Sterculia lanceolata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/假苹婆 Sterculia lanceolata P2050245.JPG
24.紫金牛科 Myrsinaceae	
1.紫金牛属 <i>Ardisia</i>	
1.雪下红 <i>Ardisia villosa</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/雪下红 Ardisia villosa P2050129.JPG
25.杜鹃花科 Ericaceae	
1.杜鹃属 <i>Rhododendron</i>	
1.多花杜鹃 <i>Rhododendron cavaleriei</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/6 多花杜鹃 Rhododendron cavaleriei P1240776.JPG
26.白花丹科 Plumbaginaceae	
1.白花丹属 <i>Plumbago</i>	
1.白花丹 <i>Plumbago zeylanica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/白花丹 Plumbago zeylanica.JPG
27.山榄科 Sapotaceae	
1.铁线子属 <i>Manilkara</i>	
1.人心果 <i>Manilkara zapota</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/人心果 Manilkara zapota.JPG
27.夹竹桃科 Apocynaceae	
1.黄蝉属 <i>Allamanda</i>	
1.紫蝉花 <i>Allamanda violacea</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/16 紫蝉花 Allamanda violacea P2020939.JPG
2.软枝黄蝉 <i>Allemanda cathartica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/21 软枝黄蝉 Allemanda cathartica.JPG
2.鸡骨常山属 <i>Alstonia</i>	
1.糖胶树 <i>Allamanda violacea</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/糖胶树 Alstonia scholaris P1300723.JPG
3.萝芙木属 <i>Rauvolfia</i>	
1.萝芙木 <i>Rauvolfia verticillata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/萝芙木 Rauvolfia verticillata P1240492.JPG
28.萝藦科 Asclepiadaceae	
1.牛角瓜属 <i>Calotropis</i>	
1.牛角瓜 <i>Calotropis gigantea</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/牛角瓜 Calotropis gigantea.JPG
29.茜草科 Rubiaceae	
1.咖啡属 <i>Coffea</i>	
1.大粒咖啡 <i>Coffea liberica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/17 大粒咖啡 Coffea liberica.JPG
2.九节属 <i>Psychotria</i>	
1.九节 <i>Psychotria rubra</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/24 九节 Psychotria rubra.JPG
3.墨苜蓿属 <i>Richardia</i>	
1.墨苜蓿 <i>Richardia brasiliensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/墨苜蓿 Richardia brasiliensis.JPG
2.墨苜蓿 <i>Richardia brasiliensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/墨苜蓿 Richardia brasiliensis (2).JPG

许展慧, 刘诗尧, 赵莹, 涂文琴, 常诏峰, 张恩涛, 郭靖, 郑迪, 耿鋆, 顾高营, 郭淳鹏, 郭璐璐, 王静, 徐春阳, 彭钊, 杨腾, 崔梦琪, 孙伟成, 张剑坛, 刘皓天, 巴超群, 王鹤琪, 贾竞超, 武金洲, 肖翠, 马克平. 国内8款常用植物识别软件的识别能力评价. 生物多样性, 2020, 28 (4):524–533. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019272>

物种	照片在 NSII 网页的地址
30.旋花科 Convolvulaceae	
1.番薯属 <i>Ipomoea</i>	
1.蕹菜 <i>Ipomoea aquatica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/蕹菜 Ipomoea aquatica.JPG
2.金鱼花属 <i>Mina</i>	
1.金鱼花 <i>Mina lobata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/金鱼花 DSC_5667.JPG
31.马鞭草科 Verbenaceae	
1.大青属 <i>Clerodendrum</i>	
1.烟火树 <i>Clerodendrum quadriloculare</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/28 烟火树 Clerodendrum quadriloculare P2031092.JPG
2.假连翘属 <i>Duranta</i>	
1.假连翘 <i>Duranta erecta</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/假连翘 Duranta erecta P2050293.JPG
32.唇形科 Labiatae	
1.四棱草属 <i>Stachytarpheta</i>	
1.假马鞭草 <i>Stachytarpheta jamaicensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/假马鞭草 Stachytarpheta jamaicensis.JPG
33.紫葳科 Bignoniaceae	
1.葫芦树属 <i>Crescentia</i>	
1.葫芦树 <i>Crescentia cujete</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/葫芦树 Crescentia cujete 铁西瓜 P1250335.JPG
2.蜡烛树属 <i>Parmentiera</i>	
1.蜡烛树 <i>Parmentiera cerifera</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/蜡烛树 Parmentiera cereifera P2070278.JPG
3.炮仗藤属 <i>Pyrostegia</i>	
1.炮仗花 <i>Pyrostegia venusta</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/19 炮仗花 Pyrostegia venusta.JPG
4.火焰树属 <i>Spathodea</i>	
1.火焰树 <i>Spathodea campanulata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/11 火焰树 Spathodea campanulata.JPG
5.风铃木属 <i>Tabebuia</i>	
1.粉花风铃木 <i>Tabebuia chrysantha</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/10 粉花风铃木 Tabebuia chrysantha.JPG
34.爵床科 Acanthaceae	
1.十万错属 <i>Asystasia</i>	
1.小花宽叶十万错 <i>Asystasia gangetica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/小花宽叶十万错 Asystasia gangeticaP1290071.JPG
2.狗肝菜属 <i>Dicliptera</i>	
1.印度狗肝菜 <i>Dicliptera bupleuroides</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/印度狗肝菜 Dicliptera bupleuroides P2050098.JPG
3.叉花草属 <i>Difflugossa</i>	
1.叉花草 <i>Difflugossa colorata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/叉花草 Difflugossa colorata.JPG
4.喜花草属 <i>Eranthemum</i>	
1.喜花草 <i>Eranthemum pulchellum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/喜花草 Eranthemum pulchellum P2020967 6.JPG
2.喜花草 <i>Eranthemum pulchellum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/喜花草 DSC_5776.JPG
5.山牵牛属 <i>Thunbergia</i>	
1.桂叶山牵牛 <i>Thunbergia laurifolia</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/桂叶山牵牛 Thunbergia laurifolia.JPG

许展慧, 刘诗尧, 赵莹, 涂文琴, 常诏峰, 张恩涛, 郭靖, 郑迪, 耿鋈, 顾高营, 郭淳鹏, 郭璐璐, 王静, 徐春阳, 彭钊, 杨腾, 崔梦琪, 孙伟成, 张剑坛, 刘皓天, 巴超群, 王鹤琪, 贾竞超, 武金洲, 肖翠, 马克平. 国内8款常用植物识别软件的识别能力评价. 生物多样性, 2020, 28 (4):524–533. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019272>

物种	照片在 NSII 网页的地址
35.草海桐科 Goodeniaceae	
1.草海桐属 <i>Scaevola</i>	
1.草海桐 <i>Scaevola sericea</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/草海桐_Scaevola sericea.JPG
36.菊科 Compositae	
1.菊苣属 <i>Erechtites</i>	
1.败酱叶菊苣 <i>Erechtites valerianaefolia</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/败酱叶菊苣 Erechtites valerianaefolia P2041476.JPG
2.螞蝗菊属 <i>Wedelia</i>	
1.三裂螞蝗菊 <i>Wedelia trilobata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/三裂螞蝗菊 Wedelia trilobata P1300592.JPG
3.李花菊属 <i>Wollastonia</i>	
1.李花菊 <i>Wollastonia biflora</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/李花菊 Melanthera biflora.JPG
37.水鳖科 Hydrocharitaceae	
1.水车前属 <i>Ottelia</i>	
1.水菜花 <i>Ottelia cordata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/1_国家二级保护植物水菜花 Ottelia cordata P1311321 (1).JPG
2.水菜花 <i>Ottelia cordata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/1_水菜花 Ottelia cordata P1311321 (2).JPG
37.鸭跖草科 Commelinaceae	
1.吊竹梅属 <i>Tradescantia</i>	
1.吊竹梅 <i>Tradescantia zebrina</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/吊竹梅 DSC_5376.JPG
2.吊竹梅 <i>Tradescantia zebrina</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/吊竹梅 Tradescantia zebrina.JPG
38.棕榈科 Palmae	
1.霸王棕属 <i>Bismarckia</i>	
1.霸王棕 <i>Bismarckia nobilis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/霸王棕 P2010147.JPG
2.蒲葵属 <i>Livistona</i>	
1.蒲葵 <i>Livistona chinensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/蒲葵 Livistona chinensis P1310988.JPG
3.水椰属 <i>Nypa</i>	
1.水椰 <i>Nypa fructicans</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/水椰 Nypa fructicans P2041652.JPG
4.王棕属 <i>Roystonea</i>	
1.王棕 <i>Roystonea regia</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/22_王棕 Roystonea regia.JPG
5.狐尾椰属 <i>Wodyetia</i>	
1.狐尾椰 <i>Wodyetia bifurcata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/狐尾椰 Wodyetia bifurcata.JPG
39.露兜树科 Pandanaceae	
1.露兜树属 <i>Pandanus</i>	
1.红刺露兜树 <i>Pandanus utilis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/红刺露兜树 Pandanus utilis P2010027.JPG
2.红刺露兜树 <i>Pandanus utilis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/4l/original/红刺露兜树 P2010027.JPG
三、亚热带区	
1.里白科 Gleicheniaceae	
1.里白属 <i>Hicriopteris</i>	
1.里白 <i>Diplazium glaucum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Diplazium glaucum_里白_浙江古田山_陈彬_2008-05-14_17-03-46.jpg

许展慧, 刘诗尧, 赵莹, 涂文琴, 常诏峰, 张恩涛, 郭靖, 郑迪, 耿鋈, 顾高营, 郭淳鹏, 郭璐璐, 王静, 徐春阳, 彭钊, 杨腾, 崔梦琪, 孙伟成, 张剑坛, 刘皓天, 巴超群, 王鹤琪, 贾竞超, 武金洲, 肖翠, 马克平. 国内8款常用植物识别软件的识别能力评价. 生物多样性, 2020, 28 (4):524–533. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019272>

物种	照片在 NSII 网页的地址
2.里白 <i>Diplazium glaucum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Diplazium glaucum_里白_浙江古田山_陈彬 2008-05-14 17-03-36.jpg
2.芒萁属 <i>Dicranopteris</i>	
1.芒萁 <i>Dicranopteris pedata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Dicranopteris pedata_芒萁_浙江古田山_陈彬 2008-05-14 17-03-21.jpg
2.鳞毛蕨科 <i>Dryopteridaceae</i>	
1.复叶耳蕨属 <i>Arachniodes</i>	
1.斜方复叶耳蕨 <i>Arachniodes amabilis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Arachniodes amabilis_斜方复叶耳蕨_浙江古田山_陈彬 2008-05-12 17-04-44.jpg
2.刺头复叶耳蕨 <i>Arachniodes aristata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Arachniodes aristata_刺头复叶耳蕨_浙江古田山_陈彬 2008-05-15 17-41-55.jpg
3.刺头复叶耳蕨 <i>Arachniodes aristata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Arachniodes aristata_刺头复叶耳蕨_浙江古田山_陈彬 2008-05-16 10-25-02.jpg
2.贯众属 <i>Cyrtomium</i>	
1.镰羽贯众 <i>Cyrtomium balansae</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Cyrtomium balansae_镰羽贯众_浙江古田山_陈彬 2008-05-16 10-06-56.jpg
2.镰羽贯众 <i>Cyrtomium balansae</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Cyrtomium balansae_镰羽贯众_浙江古田山_陈彬 2008-05-16 10-06-21.jpg
3.镰羽贯众 <i>Cyrtomium balansae</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Cyrtomium balansae_镰羽贯众_浙江古田山_陈彬 2008-05-16 10-06-02.jpg
4.镰羽贯众 <i>Cyrtomium balansae</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Cyrtomium balansae_镰羽贯众_浙江古田山_陈彬 2008-05-16 10-05-30.jpg
3.舌蕨科 <i>Elaphoglossaceae</i>	
1.舌蕨属 <i>Elaphoglossum</i>	
1.华南舌蕨 <i>Elaphoglossum yoshinagae</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Elaphoglossum yoshinagae_华南舌蕨_浙江古田山_陈彬 2008-05-13 15-37-38.jpg
2.华南舌蕨 <i>Elaphoglossum yoshinagae</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Elaphoglossum yoshinagae_华南舌蕨_浙江古田山_陈彬 2008-05-13 15-37-23.jpg
4.书带蕨科 <i>Vittariaceae</i>	
1.书带蕨属 <i>Haplopteris</i>	
1.书带蕨 <i>Haplopteris flexuosa</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Haplopteris flexuosa_书带蕨_浙江古田山_陈彬 2008-05-16 09-46-49.jpg
5.银杏科 <i>Ginkgoaceae</i>	
1.银杏属 <i>Ginkgo</i>	
1.银杏 <i>Ginkgo biloba</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Ginkgo biloba_银杏_浙江古田山_陈彬 2008-05-15 18-26-18.jpg
6.桦木科 <i>Betulaceae</i>	
1.鹅耳枥属 <i>Carpinus</i>	
1.鹅耳枥 <i>Carpinus turczaninowii</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Carpinus turczaninowii_鹅耳枥_浙江古田山_陈彬 2008-05-14 09-12-42.jpg
7.壳斗科 <i>Fagaceae</i>	
1.栗属 <i>Castanea</i>	

许展慧, 刘诗尧, 赵莹, 涂文琴, 常诏峰, 张恩涛, 郭靖, 郑迪, 耿鋈, 顾高营, 郭淳鹏, 郭璐璐, 王静, 徐春阳, 彭钊, 杨腾, 崔梦琪, 孙伟成, 张剑坛, 刘皓天, 巴超群, 王鹤琪, 贾竞超, 武金洲, 肖翠, 马克平. 国内8款常用植物识别软件的识别能力评价. 生物多样性, 2020, 28 (4):524–533. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019272>

物种	照片在 NSII 网页的地址
1.栗 <i>Castanea mollissima</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Castanea mollissima_栗_浙江古田山_陈彬 2008-05-12 18-19-15.jpg
2.栗 <i>Castanea mollissima</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Castanea mollissima_栗_浙江古田山_陈彬 2008-05-14 07-59-35.jpg
3.茅栗 <i>Castanea seguinii</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Castanea seguinii_茅栗_浙江古田山_陈彬 2008-05-14 16-44-50.jpg
2.青冈属 <i>Cyclobalanopsis</i>	
1.青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Cyclobalanopsis glauca_青冈_浙江古田山_陈彬 2008-05-15 15-55-16.jpg
2.青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Cyclobalanopsis glauca_青冈_浙江古田山_陈彬 2008-05-15 15-55-40.jpg
3.水青冈属 <i>Cyclobalanopsis</i>	
1.水青冈 <i>Fagus longipetiolata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Fagus longipetiolata_水青冈_浙江古田山_陈彬 2008-05-14 08-08-54.jpg
8.桑科 Moraceae	
1.榕属 <i>Ficus</i>	
1.天仙果 <i>Ficus erecta</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Ficus erecta_天仙果_浙江古田山_陈彬 2008-05-16 09-58-21.jpg
2.天仙果 <i>Ficus erecta</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Ficus erecta_天仙果_浙江古田山_陈彬 2008-05-16 09-58-41.jpg
9.荨麻科 Urticaceae	
1.糯米团属 <i>Gonostegia</i>	
1.糯米团 <i>Gonostegia hirta</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Gonostegia hirta_糯米团_浙江古田山_陈彬 2008-05-13 17-08-37.jpg
10.蜡梅科 Calycanthaceae	
1.蜡梅属 <i>Chimonanthus</i>	
1.柳叶蜡梅 <i>Chimonanthus salicifolius</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Chimonanthus salicifolius_柳叶蜡梅_浙江古田山_陈彬 2008-05-15 14-58-14.jpg
11.小檗科 Berberidaceae	
1.鬼白属 <i>Dysosma</i>	
1.八角莲 <i>Dysosma versipellis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Dysosma versipellis_八角莲_浙江古田山_陈彬 2008-05-14 17-40-56.jpg
2.八角莲 <i>Dysosma versipellis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Dysosma versipellis_八角莲_浙江古田山_陈彬 2008-05-14 17-40-58.jpg
12.防己科 Menispermaceae	
1.木防己属 <i>Cocculus</i>	
1.木防己 <i>Cocculus orbiculatus</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Cocculus orbiculatus_木防己_浙江古田山_陈彬 2008-05-13 10-47-37.jpg
13.三白草科 Saururaceae	
1.葎菜属 <i>Houttuynia</i>	
1.葎菜 <i>Houttuynia cordata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Houttuynia cordata_葎菜_浙江古田山_陈彬 2008-05-12 17-56-25.jpg

许展慧, 刘诗尧, 赵莹, 涂文琴, 常诏峰, 张恩涛, 郭靖, 郑迪, 耿鋈, 顾高营, 郭淳鹏, 郭璐璐, 王静, 徐春阳, 彭钊, 杨腾, 崔梦琪, 孙伟成, 张剑坛, 刘皓天, 巴超群, 王鹤琪, 贾竞超, 武金洲, 肖翠, 马克平. 国内8款常用植物识别软件的识别能力评价. 生物多样性, 2020, 28 (4):524–533. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019272>

物种	照片在 NSII 网页的地址
14. 猕猴桃科 Actinidiaceae	
1. 猕猴桃属 <i>Actinidia</i>	
1. 小叶猕猴桃 <i>Actinidia lanceolata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Actinidia lanceolata_小叶猕猴桃_浙江古田山_陈彬 2008-05-15 14-26-14.jpg
15. 马兜铃科 Aristolochiaceae	
1. 马兜铃属 <i>Aristolochia</i>	
1. 管花马兜铃 <i>Aristolochia tubiflora</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Aristolochia tubiflora_管花马兜铃_浙江古田山_陈彬 2008-05-12 17-13-15.jpg
2. 细辛属 <i>Asarum</i>	
1. 祁阳细辛 <i>Asarum magnificum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Asarum magnificum_祁阳细辛_浙江古田山_陈彬 2008-05-12 17-33-14.jpg
16. 山茶科 Theaceae	
1. 柃木属 <i>Eurya</i>	
1. 格药柃 <i>Eurya muricata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Eurya muricata_格药柃_浙江古田山_陈彬 2008-05-14 13-34-30.jpg
2. 杨桐属 <i>Adinandra</i>	
1. 杨桐 <i>Adinandra millettii</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Adinandra millettii_杨桐_浙江古田山_陈彬 2008-05-13 09-33-07.jpg
3. 山茶属 <i>Camellia</i>	
1. 浙江红山茶 <i>Camellia chekiangoleosa</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Camellia chekiangoleosa_浙江红山茶_浙江古田山_陈彬 2008-05-14 09-22-32.jpg
2. 茶 <i>Camellia sinensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Camellia sinensis_茶_浙江古田山_陈彬 2008-05-14 16-55-27.jpg
17. 十字花科 Cruciferae	
1. 芸苔属 <i>Brassica</i>	
1. 欧洲油菜 <i>Brassica napus</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Brassica napus_欧洲油菜_浙江古田山_陈彬 2008-05-13 09-55-40.jpg
18. 虎耳草科 Saxifragaceae	
1. 绣球属 <i>Hydrangea</i>	
1. 中国绣球 <i>Hydrangea chinensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Hydrangea chinensis_中国绣球_浙江古田山_陈彬 2008-05-12 17-23-20.jpg
2. 中国绣球 <i>Hydrangea chinensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Hydrangea chinensis_中国绣球_浙江古田山_陈彬 2008-05-13 16-04-21.jpg
3. 中国绣球 <i>Hydrangea chinensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Hydrangea chinensis_中国绣球_浙江古田山_陈彬 2008-05-13 16-04-28.jpg
4. 中国绣球 <i>Hydrangea chinensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Hydrangea chinensis_中国绣球_浙江古田山_陈彬 2008-05-13 16-04-38.jpg
5. 中国绣球 <i>Hydrangea chinensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Hydrangea chinensis_中国绣球_浙江古田山_陈彬 2008-05-14 09-38-00.jpg
19. 蔷薇科 Rosaceae	
1. 樱属 <i>Cerasus</i>	

许展慧, 刘诗尧, 赵莹, 涂文琴, 常诏峰, 张恩涛, 郭靖, 郑迪, 耿鋈, 顾高营, 郭淳鹏, 郭璐璐, 王静, 徐春阳, 彭钊, 杨腾, 崔梦琪, 孙伟成, 张剑坛, 刘皓天, 巴超群, 王鹤琪, 贾竞超, 武金洲, 肖翠, 马克平. 国内8款常用植物识别软件的识别能力评价. 生物多样性, 2020, 28 (4):524–533. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019272>

物种	照片在 NSII 网页的地址
1. 浙闽樱桃 <i>Cerasus schneideriana</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Cerasus schneideriana_浙闽樱桃_浙江古田山_陈彬 2008-05-13 11-44-26.jpg
20. 豆科 Fabaceae	
1. 仪花属 <i>Lysidice</i>	
1. 仪花 <i>Lysidice rhodostegia</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/仪花 Lysidice rhodostegia.jpg
21. 槭树科 Aceraceae	
1. 槭属 <i>Acer</i>	
1. 阔叶槭 <i>Acer amplum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Acer amplum_阔叶槭_浙江古田山_陈彬 2008-05-14 15-00-26.jpg
2. 紫果槭 <i>Acer cordatum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Acer cordatum_紫果槭_浙江古田山_陈彬 2008-05-14 17-07-56.jpg
3. 青榨槭 <i>Acer davidii</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Acer davidii_青榨槭_浙江古田山_陈彬 2008-05-14 14-27-39.jpg
4. 秀丽槭 <i>Acer elegantulum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Acer elegantulum_秀丽槭_浙江古田山_陈彬 2008-05-13 08-43-49.jpg
5. 鸡爪槭 <i>Acer palmatum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Acer palmatum_鸡爪槭_浙江古田山_陈彬 2008-05-16 11-06-17.jpg
22. 冬青科 Aquifoliaceae	
1. 冬青属 <i>Ilex</i>	
1. 大叶冬青 <i>Ilex latifolia</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Ilex latifolia_大叶冬青_浙江古田山_陈彬 2008-05-16 09-29-39.jpg
2. 大叶冬青 <i>Ilex latifolia</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Ilex latifolia_大叶冬青_浙江古田山_陈彬 2008-05-16 09-30-04.jpg
2. 木姜冬青 <i>Ilex litseifolia</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Ilex litseifolia_木姜冬青_浙江古田山_陈彬 2008-05-14 17-10-43.jpg
23. 卫矛科 Celastraceae	
1. 南蛇藤属 <i>Celastrus</i>	
1. 窄叶南蛇藤 <i>Celastrus oblanceifolius</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Celastrus oblanceifolius_窄叶南蛇藤_浙江古田山_陈彬 2008-05-14 11-19-32.jpg
24. 省沽油科 Staphyleaceae	
1. 野鸦椿属 <i>Euscaphis</i>	
1. 野鸦椿 <i>Euscaphis japonica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Euscaphis japonica_野鸦椿_浙江古田山_陈彬 2008-05-13 09-47-53.jpg
25. 金粟兰科 Chloranthaceae	
1. 金粟兰属 <i>Chloranthus</i>	
1. 及己 <i>Chloranthus serratus</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Chloranthus serratus_及己_浙江古田山_陈彬 2008-05-12 17-08-46.jpg
26. 大风子科 Flacourtiaceae	
1. 山桐子属 <i>Idesia</i>	
1. 山桐子 <i>Idesia polycarpa</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Idesia polycarpa_山桐子_浙江古田山_陈彬 2008-05-13 15-01-37.jpg

许展慧, 刘诗尧, 赵莹, 涂文琴, 常诏峰, 张恩涛, 郭靖, 郑迪, 耿鋈, 顾高营, 郭淳鹏, 郭璐璐, 王静, 徐春阳, 彭钊, 杨腾, 崔梦琪, 孙伟成, 张剑坛, 刘皓天, 巴超群, 王鹤琪, 贾竞超, 武金洲, 肖翠, 马克平. 国内8款常用植物识别软件的识别能力评价. 生物多样性, 2020, 28 (4):524–533. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019272>

物种	照片在 NSII 网页的地址
2.山桐子 <i>Idesia polycarpa</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Idesia polycarpa_山桐子_浙江古田山_陈彬2008-05-13 15-01-40.jpg
3.山桐子 <i>Idesia polycarpa</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Idesia polycarpa_山桐子_浙江古田山_陈彬2008-05-13 15-02-12.jpg
27.小二仙草科 Haloragidaceae	
1.小二仙草属 <i>Haloragis</i>	
1.小二仙草 <i>Haloragis micrantha</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Gonocarpus micranthus_小二仙草_浙江古田山_陈彬2008-05-14 13-57-38.jpg
28.槭叶树科 Clethraceae	
1.槭叶树属 <i>Clethra</i>	
1.髭脉槭叶树 <i>Clethra barbinervis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Clethra barbinervis_髭脉槭叶树_浙江古田山_陈彬2008-05-14 13-14-34.jpg
29.虎皮楠科 Daphniphyllaceae	
1.虎皮楠属 <i>Daphniphyllum</i>	
1.交让木 <i>Daphniphyllum macropodum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Daphniphyllum macropodum_交让木_浙江古田山_陈彬2008-05-14 13-17-45.jpg
2.虎皮楠 <i>Daphniphyllum oldhami</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Daphniphyllum oldhami_浙江古田山_陈彬2008-05-15 16-43-46.jpg
30.八角枫科 Alangiaceae	
1.八角枫属 <i>Alangium</i>	
1.八角枫 <i>Alangium chinense</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Alangium chinense_八角枫_浙江古田山_陈彬2008-05-13 15-50-46.jpg
31.鼠李科 Rhamnaceae	
1.勾儿茶属 <i>Berchemia</i>	
1.多花勾儿茶 <i>Berchemia floribunda</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Berchemia floribunda_多花勾儿茶_浙江古田山_陈彬2008-05-13 08-52-03.jpg
32.葡萄科 Vitaceae	
1.蛇葡萄属 <i>Ampelopsis</i>	
1.广东蛇葡萄 <i>Ampelopsis cantoniensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Ampelopsis cantoniensis_广东蛇葡萄_浙江古田山_陈彬2008-05-13 08-22-49.jpg
2.白藜 <i>Ampelopsis japonica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Ampelopsis japonica_白藜_浙江古田山_陈彬2008-05-14 07-24-28.jpg
2.乌藜莓属 <i>Cayratia</i>	
1.角花乌藜莓 <i>Cayratia corniculata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Cayratia corniculata_角花乌藜莓_浙江古田山_陈彬2008-05-13 16-14-10.jpg
33.杜英科 Elaeocarpaceae	
1.杜英属 <i>Elaeocarpus</i>	
1.中华杜英 <i>Elaeocarpus chinensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Elaeocarpus chinensis_中华杜英_浙江古田山_陈彬2008-05-13 10-38-25.jpg
34.紫金牛科 Myrsinaceae	
1.紫金牛属 <i>Ardisia</i>	

许展慧, 刘诗尧, 赵莹, 涂文琴, 常诏峰, 张恩涛, 郭靖, 郑迪, 耿鋈, 顾高营, 郭淳鹏, 郭璐璐, 王静, 徐春阳, 彭钊, 杨腾, 崔梦琪, 孙伟成, 张剑坛, 刘皓天, 巴超群, 王鹤琪, 贾竞超, 武金洲, 肖翠, 马克平. 国内8款常用植物识别软件的识别能力评价. 生物多样性, 2020, 28 (4):524–533. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019272>

物种	照片在 NSII 网页的地址
1.网脉酸藤子 <i>Embelia rudis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Embelia rudis_网脉酸藤子_浙江古田山_陈彬 2008-05-13 10-39-38.jpg
35.安息香科 Styracaceae	
1.赤杨叶属 <i>Alniphyllum</i>	
1.赤杨叶 <i>Alniphyllum fortunei</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Alniphyllum fortunei_赤杨叶_浙江古田山_陈彬 2008-05-14 15-38-43.jpg
36.木樨科 Oleaceae	
1.栲属 <i>Fraxinus</i>	
1.苦枥木 <i>Fraxinus insularis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Fraxinus insularis_苦枥木_浙江古田山_陈彬 2008-05-14 12-53-01.jpg
2.茉莉花 <i>Jasminum sambac</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/茉莉花 Jasminum sambac.jpg
2.素馨属 <i>Jasminum</i>	
1.粗糠树 <i>Ehretia macrophylla</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Ehretia macrophylla_粗糠树_浙江古田山_陈彬 2008-05-12 17-16-33.jpg
37.苦苣苔科 Gesneriaceae	
1.粗筒苣苔属 <i>Briggsia</i>	
1.浙皖粗筒苣苔 <i>Briggsia chienii</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Briggsia chienii_浙皖粗筒苣苔_浙江古田山_陈彬 2008-05-13 11-16-17.jpg
2.唇柱苣苔属 <i>Chirita</i>	
1.羽裂唇柱苣苔 <i>Chirita pinnatifida</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Chirita pinnatifida_羽裂唇柱苣苔_浙江古田山_陈彬 2008-05-13 15-38-50.jpg
38.桔梗科 Campanulaceae	
1.沙参属 <i>Adenophora</i>	
1.芥苣 <i>Adenophora trachelioides</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Adenophora trachelioides_芥苣_浙江古田山_陈彬 2008-05-16 10-57-31.jpg
2.党参属 <i>Codonopsis</i>	
1.羊乳 <i>Codonopsis lanceolata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Codonopsis lanceolata_羊乳_浙江古田山_陈彬 2008-05-13 17-17-56.jpg
39.菊科 Compositae	
1.下田菊属 <i>Adenostemma</i>	
1.下田菊 <i>Adenostemma lavenia</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Adenostemma lavenia_下田菊_浙江古田山_陈彬 2008-05-12 17-04-21.jpg
2.兔儿风属 <i>Ainsliaea</i>	
1.阿里山兔儿风 <i>Ainsliaea macroclinidioides</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Ainsliaea macroclinidioides_阿里山兔儿风_浙江古田山_陈彬 2008-05-14 07-30-36.jpg
3.蒿属 <i>Artemisia</i>	
1.南牡蒿 <i>Artemisia eriopoda</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Artemisia eriopoda_南牡蒿_浙江古田山_陈彬 2008-05-15 16-23-32.jpg
4.紫菀属 <i>Aster</i>	
1.三脉紫菀 <i>Aster ageratoides</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Aster ageratoides_三脉紫菀_浙江古田山_陈彬 2008-05-12 17-33-37.jpg
5.蓟属 <i>Cirsium</i>	

许展慧, 刘诗尧, 赵莹, 涂文琴, 常诏峰, 张恩涛, 郭靖, 郑迪, 耿鋈, 顾高营, 郭淳鹏, 郭璐璐, 王静, 徐春阳, 彭钊, 杨腾, 崔梦琪, 孙伟成, 张剑坛, 刘皓天, 巴超群, 王鹤琪, 贾竞超, 武金洲, 肖翠, 马克平. 国内8款常用植物识别软件的识别能力评价. 生物多样性, 2020, 28 (4):524–533. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019272>

物种	照片在 NSII 网页的地址
1. 蓟 <i>Cirsium japonicum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Cirsium japonicum_蓟_浙江古田山_陈彬 2008-05-12 16-44-19.jpg
6. 野苘蒿属 <i>Crassocephalum</i>	
1. 野苘蒿 <i>Crassocephalum crepidioides</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Crassocephalum crepidioides_野苘蒿_浙江古田山_陈彬 2008-05-15 17-00-27.jpg
7. 黄瓜菜属 <i>Crepidiastrum</i>	
1. 黄瓜菜 <i>Crepidiastrum denticulatum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Crepidiastrum denticulatum_黄瓜菜_浙江古田山_陈彬 2008-05-12 17-00-37.jpg
8. 飞蓬属 <i>Erigeron</i>	
1. 一年蓬 <i>Erigeron annuus</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Erigeron annuus_一年蓬_浙江古田山_陈彬 2008-05-12 17- 13-27.jpg
2. 一年蓬 <i>Erigeron annuus</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Erigeron annuus_一年蓬_浙江古田山_陈彬 2008-05-12 17-29-37.jpg
40. 百合科 Liliaceae	
1. 粉条儿菜属 <i>Aletris</i>	
1. 粉条儿菜 <i>Aletris spicata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Aletris spicata_粉条儿菜_浙江古田山_陈彬 2008-05-14 09-33-09.jpg
2. 萱草属 <i>Hemerocallis</i>	
1. 萱草 <i>Hemerocallis fulva</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Hemerocallis fulva_萱草_浙江古田山_陈彬 2008-05-14 11-49-03.jpg
41. 薯蓣科 Dioscoreaceae	
1. 薯蓣属 <i>Dioscorea</i>	
1. 日本薯蓣 <i>Dioscorea japonica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Dioscorea japonica_日本薯蓣_浙江古田山_陈彬 2008--05-15 15-32-14.jpg
2. 日本薯蓣 <i>Dioscorea japonica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Dioscorea japonica_日本薯蓣_浙江古田山_陈彬 2008-05-13 16-32-32.jpg
42. 天南星科 Araceae	
1. 菖蒲属 <i>Acorus</i>	
1. 金钱蒲 <i>Acorus gramineus</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Acorus gramineus_金钱蒲_浙江古田山_陈彬 2008-05-15 14-32-22.jpg
2. 天南星属 <i>Arisaema</i>	
1. 灯台莲 <i>Arisaema bockii</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Arisaema bockii_灯台莲_浙江古田山_陈彬 2008-05-16 10-09-28.jpg
2. 一把伞南星 <i>Arisaema erubescens</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Arisaema erubescens_一把伞南星_浙江古田山_陈彬 2008-05-14 11-21-53.jpg
43. 姜科 Zingiberaceae	
1. 山姜属 <i>Alpinia</i>	
1. 山姜 <i>Alpinia japonica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Alpinia japonica_山姜_浙江古田山_陈彬 2008-05-13 08-32-24.jpg
2. 山姜 <i>Alpinia japonica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Alpinia japonica_山姜_浙江古田山_陈彬 2008-05-13 08-35-27.jpg
44. 兰科 Orchidaceae	

许展慧, 刘诗尧, 赵莹, 涂文琴, 常诏峰, 张恩涛, 郭靖, 郑迪, 耿鋈, 顾高营, 郭淳鹏, 郭璐璐, 王静, 徐春阳, 彭钊, 杨腾, 崔梦琪, 孙伟成, 张剑坛, 刘皓天, 巴超群, 王鹤琪, 贾竞超, 武金洲, 肖翠, 马克平. 国内8款常用植物识别软件的识别能力评价. 生物多样性, 2020, 28 (4):524–533. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019272>

物种	照片在 NSII 网页的地址
1.头蕊兰属 <i>Cephalanthera</i>	
1.金兰 <i>Cephalanthera falcata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Cephalanthera falcata_金兰_浙江古田山_陈彬_2008-05-14_09-23-25.jpg
2.金兰 <i>Cephalanthera falcata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Cephalanthera falcata_金兰_浙江古田山_陈彬_2008-05-14_09-23-28.jpg
2.兰属 <i>Cymbidium</i>	
1.多花兰 <i>Cymbidium floribundum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/3c/original/Cymbidium floribundum_多花兰_浙江古田山_陈彬_2008-05-15_17-52-42.jpg
四、温带区	
1.松科 Pinaceae	
1.冷杉属 <i>Abies</i>	
1.臭冷杉 <i>Abies nephrolepis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/臭冷杉_(2).JPG
2.臭冷杉 <i>Abies nephrolepis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/臭冷杉_0882722.JPG
2.云杉属 <i>Picea</i>	
1.鱼鳞云杉 <i>Picea jezoensis</i> var. <i>microsperma</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/鱼鳞云杉_2940.JPG
2.鱼鳞云杉 <i>Picea jezoensis</i> var. <i>microsperma</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/鱼鳞云杉_1989.JPG
3.松属 <i>Pinus</i>	
1.长白松 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>sylvestriformis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/长白松_DSC_0094.JPG
2.红松 <i>Pinus koraiensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/红松_DSC_4347.JPG
3.红松 <i>Pinus koraiensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/红松_周海成_0812513.JPG
4.落叶松属 <i>Larix</i>	
1.落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/落叶松_P6140760.JPG
2.落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/落叶松_(22).JPG
2.桦木科 Betulaceae	
1.桤木属 <i>Alnus</i>	
1.东北桤木 <i>Alnus mandshurica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/东北桤木_DSC_6028.JPG
2.桦木属 <i>Betula</i>	
1.黑桦 <i>Betula dahurica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/黑桦_Betula dahurica_0206.JPG
2.岳桦 <i>Betula ermanii</i> var. <i>ermanii</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/岳桦_周海成_雌果穗_2000m_7959.JPG
3.白桦 <i>Betula platyphylla</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/白桦_Betula platyphylla Betula szechuanica_DSC_2730.JPG
3.壳斗科 Fagaceae	
1.栎属 <i>Quercus</i>	
1.蒙古栎 <i>Quercus mongolica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/蒙古栎_种子_4548.JPG
4.榆科 Ulmaceae	
1.榆属 <i>Ulmus</i>	
1.春榆 <i>Ulmus davidiana</i> var. <i>japonica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/春榆.JPG
2.春榆 <i>Ulmus davidiana</i> var. <i>japonica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/春榆_Ulmus davidiana var japonica_DSCN0098.JPG

许展慧, 刘诗尧, 赵莹, 涂文琴, 常诏峰, 张恩涛, 郭靖, 郑迪, 耿鋈, 顾高营, 郭淳鹏, 郭璐璐, 王静, 徐春阳, 彭钊, 杨腾, 崔梦琪, 孙伟成, 张剑坛, 刘皓天, 巴超群, 王鹤琪, 贾竞超, 武金洲, 肖翠, 马克平. 国内8款常用植物识别软件的识别能力评价. 生物多样性, 2020, 28 (4):524–533. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019272>

物种	照片在 NSII 网页的地址
3.春榆 <i>Ulmus davidiana</i> var. <i>japonica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/春榆_Ulmus davidiana var japonica DSCN0097.JPG
4. 裂叶榆 <i>Ulmus laciniata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/裂叶榆_DSC_0178.jpg
4.石竹科 Caryophyllaceae	
1.繁缕属 <i>Stellaria</i>	
1.叉歧繁缕 <i>Stellaria dichotoma</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/叉歧繁缕_DSC_2335.JPG
5.木兰科 Magnoliaceae	
1.五味子属 <i>Schisandra</i>	
1.五味子 <i>Schisandra chinensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/五味子.JPG
6.毛茛科 Ranunculaceae	
1.侧金盏花属 <i>Adonis</i>	
1.侧金盏花 <i>Adonis amurensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/侧金盏花_(2).JPG
2.辽吉侧金盏 <i>Adonis pseudoamurensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/辽吉侧金盏.JPG
2.银莲花属 <i>Anemone</i>	
1.钝裂银莲花 <i>Anemone obtusiloba</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/钝裂银莲花_SC_3209.JPG
3.耧斗菜属 <i>Aquilegia</i>	
1.长白耧斗菜 <i>Aquilegia flabellata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/长白耧斗菜_Aquilegia flabellata DSC_6290.JPG
2.长白耧斗菜 <i>Aquilegia flabellata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/长白耧斗菜_Aquilegia flabellata DSC_5997.JPG
3.长白耧斗菜 <i>Aquilegia flabellata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/长白耧斗菜_Aquilegia flabellata DSC_5984.JPG
4.驴蹄草属 <i>Caltha</i>	
1.驴蹄草 <i>Caltha palustris</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/驴蹄草_(9).JPG
5.铁线莲属 <i>Clematis</i>	
1.槭叶铁线莲 <i>Clematis acerifolia</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/槭叶铁线莲.JPG
7.猕猴桃科 Actinidiaceae	
1.猕猴桃属 <i>Actinidia</i>	
1.狗枣猕猴桃 <i>Actinidia kolomikta</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/狗枣猕猴桃_(1).JPG
8.罂粟科 Papaveraceae	
1.荷青花属 <i>Hylomecon</i>	
1.荷青花 <i>Hylomecon japonica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/荷青花_(2).JPG
2.罂粟属 <i>Papaver</i>	
1.高山罂粟 <i>Papaver alpinum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/高山罂粟_Papaver alpinum DSC_7247.JPG
2.高山罂粟 <i>Papaver alpinum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/高山罂粟_Papaver alpinum DSC_7248.JPG
9.十字花科 Cruciferae	
1.念珠芥属 <i>Torularia</i>	
1.蚰果芥 <i>Torularia humilis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/蚰果芥.JPG
10.景天科 Crassulaceae	
1.红景天属 <i>Rhodiola</i>	
1.高山红景天 <i>Rhodiola cretinii</i> subsp. <i>sino-alpina</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/高山红景天_DSC_6100.JPG

许展慧, 刘诗尧, 赵莹, 涂文琴, 常诏峰, 张恩涛, 郭靖, 郑迪, 耿鋈, 顾高营, 郭淳鹏, 郭璐璐, 王静, 徐春阳, 彭钊, 杨腾, 崔梦琪, 孙伟成, 张剑坛, 刘皓天, 巴超群, 王鹤琪, 贾竞超, 武金洲, 肖翠, 马克平. 国内8款常用植物识别软件的识别能力评价. 生物多样性, 2020, 28 (4):524–533. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019272>

物种	照片在 NSII 网页的地址
2.高山红景天 <i>Rhodiola cretinii</i> subsp. <i>sino-alpina</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/高山红景天 DSC_6106.JPG
3.高山红景天 <i>Rhodiola cretinii</i> subsp. <i>sino-alpina</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/高山红景天 DSC_6477.JPG
4.红景天 <i>Rhodiola cretinii</i> subsp. <i>sino-alpina</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/红景天 DSC_2842.JPG
2.景天属 <i>Sedum</i>	
1.费菜 <i>Sedum aizoon</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/费菜 DSC_2533.JPG
11.虎耳草科 Saxifragaceae	
1.金腰属 <i>Chrysosplenium</i>	
1.五台金腰 <i>Chrysosplenium serreanum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/五台金腰 DSC_3325.JPG
2.茶藨子属 <i>Ribes</i>	
1.刺果茶藨子 <i>Ribes burejense</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/刺果茶藨子 DSC_2365.JPG
12.蔷薇科 Rosaceae	
1.仙女木属 <i>Dryas</i>	
1.仙女木 <i>Dryas octopetala</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/仙女木 Dryas octopetala P7011199.JPG
2.仙女木 <i>Dryas octopetala</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/仙女木 DSC_5843.JPG
3.仙女木 <i>Dryas octopetala</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/仙女木.JPG
2.草莓属 <i>Fragaria</i>	
1.野草莓 <i>Fragaria vesca</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/野草莓.JPG
3.委陵菜属 <i>Potentilla</i>	
1.银露梅 <i>Potentilla glabra</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/银露梅 DSC_5663.JPG
4.蔷薇属 <i>Rosa</i>	
1.刺蔷薇 <i>Rosa acicularis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/刺蔷薇 DSC_6790.JPG
2.刺蔷薇 <i>Rosa acicularis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/刺蔷薇 Rosa acicularis P6140724.JPG
3.美蔷薇 <i>Rosa bella</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/美蔷薇 DSC_2406.JPG
5.花楸属 <i>Sorbus</i>	
1.花楸树 <i>Sorbus pohuashanensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/花楸树 DSC_0162.JPG
6.悬钩子属 <i>Rubus</i>	
1.山楂叶悬钩子 <i>Rubus crataegifolius</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/山楂叶悬钩子.JPG
13.豆科 Fabaceae	
1.马鞍树属 <i>Maackia</i>	
1.朝鲜槐 <i>Maackia amurensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/朝鲜槐 DSC_6656.JPG
14.槭树科 Aceraceae	
1.槭属 <i>Acer</i>	
1.簇毛槭 <i>Acer barbinerve</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/簇毛槭 (3).JPG
2.色木槭 <i>Acer mono</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/色木槭 DSC_0604.JPG
3.假色槭 <i>Acer pseudosieboldianum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/假色槭.JPG
4.假色槭 <i>Acer pseudosieboldianum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/紫花槭 DSC_3855.JPG
5.花楷槭 <i>Acer ukurunduense</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/花楷槭 (2).JPG
15.卫矛科 Celastraceae	

许展慧, 刘诗尧, 赵莹, 涂文琴, 常诏峰, 张恩涛, 郭靖, 郑迪, 耿鋈, 顾高营, 郭淳鹏, 郭璐璐, 王静, 徐春阳, 彭钊, 杨腾, 崔梦琪, 孙伟成, 张剑坛, 刘皓天, 巴超群, 王鹤琪, 贾竞超, 武金洲, 肖翠, 马克平. 国内8款常用植物识别软件的识别能力评价. 生物多样性, 2020, 28 (4):524–533. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019272>

物种	照片在 NSII 网页的地址
1.卫矛属 <i>Euonymus</i>	
1.瘤枝卫矛 <i>Euonymus verrucosus</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/瘤枝卫矛 (11).JPG
16.五加科 <i>Araliaceae</i>	
1.五加属 <i>Acanthopanax</i>	
1.刺五加 <i>Acanthopanax senticosus</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/刺五加 (16).JPG
17.椴树科 <i>Tiliaceae</i>	
1.椴树属 <i>Tilia</i>	
1.紫椴 <i>Tilia amurensis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/紫椴 DSC_8542.JPG
18.鹿蹄草科 <i>Pyrolaceae</i>	
1.鹿蹄草属 <i>Pyrola</i>	
1.红花鹿蹄草 <i>Pyrola incarnata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/红花鹿蹄草.jpg
2.红花鹿蹄草 <i>Pyrola incarnata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/红花鹿蹄草 DSC_2602.jpg
2.假水晶兰属 <i>Cheilotheca</i>	
1.球果假水晶兰 <i>Cheilotheca humilis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/球果假水晶兰.JPG
19.杜鹃花科 <i>Ericaceae</i>	
1.杜香属 <i>Ledum</i>	
1.杜香 <i>Ledum palustre</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/杜香 DSC_5233.JPG
2.松毛翠属 <i>Phyllodoce</i>	
1.松毛翠 <i>Phyllodoce caerulea</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/松毛翠.JPG
2.松毛翠 <i>Phyllodoce caerulea</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/松毛翠 周海成 9853.JPG
2.杜鹃属 <i>Rhododendron</i>	
1.牛皮杜鹃 <i>Rhododendron aureum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/牛皮杜鹃 周海成 花 9840.JPG
2.牛皮杜鹃 <i>Rhododendron aureum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/牛皮杜鹃 周海成 苔原 281.JPG
3.苞叶杜鹃 <i>Rhododendron bracteatum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/苞叶杜鹃.JPG
4.苞叶杜鹃 <i>Rhododendron bracteatum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/苞叶杜鹃 周海成 花 西大坡 243.JPG
5.照山白 <i>Rhododendron micranthum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/照山白 DSC_2418.JPG
3.越桔属 <i>Vaccinium</i>	
1.笃斯越桔 <i>Vaccinium uliginosum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/笃斯越桔.JPG
2.笃斯越桔 <i>Vaccinium uliginosum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/笃斯越桔 DSC_5937.JPG
3.笃斯越桔 <i>Vaccinium uliginosum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/笃斯越桔 DSC_5796.JPG
4.笃斯越桔 <i>Vaccinium uliginosum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/笃斯越桔 DSC_6813.JPG
20.报春花科 <i>Primulaceae</i>	
1.假报春属 <i>Cortusa</i>	
1.假报春 <i>Cortusa matthioli</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/假报春 DSC_2655.jpg
2.报春花属 <i>Primula</i>	
1.胭脂花 <i>Primula maximowiczii</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/胭脂花 DSC_2680.jpg
20.龙胆科 <i>Gentianaceae</i>	
1.龙胆属 <i>Gentiana</i>	
1.长白山龙胆 <i>Gentiana jamesii</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/长白山龙胆.JPG
2.睡菜属 <i>Menyanthes</i>	
1.睡菜 <i>Menyanthes trifoliata</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/睡菜.JPG
21.木樨科 <i>Oleaceae</i>	

许展慧, 刘诗尧, 赵莹, 涂文琴, 常诏峰, 张恩涛, 郭靖, 郑迪, 耿鋈, 顾高营, 郭淳鹏, 郭璐璐, 王静, 徐春阳, 彭钊, 杨腾, 崔梦琪, 孙伟成, 张剑坛, 刘皓天, 巴超群, 王鹤琪, 贾竞超, 武金洲, 肖翠, 马克平. 国内8款常用植物识别软件的识别能力评价. 生物多样性, 2020, 28 (4):524–533. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019272>

物种	照片在 NSII 网页的地址
1. 栲属 <i>Fraxinus</i>	
1. 水曲柳 <i>Fraxinus mandshurica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/水曲柳_DSC_6627.JPG
22. 萝藦科 Asclepiadaceae	
1. 鹅绒藤属 <i>Cynanchum</i>	
1. 竹灵消 <i>Cynanchum inamoenum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/竹灵消_DSC_2449.JPG
23. 花荵科 Polemoniaceae	
1. 花荵属 <i>Polemonium</i>	
1. 花荵 <i>Polemonium coeruleum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/花荵.JPG
24. 紫草科 Boraginaceae	
1. 勿忘草属 <i>Myosotis</i>	
1. 勿忘草 <i>Myosotis silvatica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/勿忘草_DSC_2795.jpg
25. 玄参科 Scrophulariaceae	
1. 婆婆纳属 <i>Veronica</i>	
1. 长白婆婆纳 <i>Veronica stelleri</i> var. <i>longistyla</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/长白婆婆纳.JPG
26. 列当科 Orobanchaceae	
1. 黄筒花属 <i>Phacellanthus</i>	
1. 黄筒花 <i>Phacellanthus tubiflorus</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/黄筒花.JPG
27. 菊科 Compositae	
1. 菊属 <i>Dendranthema</i>	
1. 小山菊 <i>Dendranthema oreastrum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/小山菊_DSC_6195.JPG
2. 小山菊 <i>Dendranthema oreastrum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/小山菊.JPG
2. 橐吾属 <i>Ligularia</i>	
1. 狭苞橐吾 <i>Ligularia intermedia</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/狭苞橐吾_DSC_2357.JPG
2. 西伯利亚橐吾 <i>Ligularia sibirica</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/西伯利亚橐吾_DSC_3779.jpg
3. 蜂斗菜属 <i>Petasites</i>	
1. 蜂斗菜 <i>Petasites japonicus</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/蜂斗菜.JPG
4. 风毛菊属 <i>Saussurea</i>	
1. 高岭风毛菊 <i>Saussurea tomentosa</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/高岭风毛菊_Saussurea_tomentosa_DSC_5607.JPG
2. 高岭风毛菊 <i>Saussurea tomentosa</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/高岭风毛菊_Saussurea_tomentosa_DSC_6509.JPG
5. 款冬属 <i>Tussilago</i>	
1. 款冬 <i>Tussilago farfara</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/款冬.JPG
28. 忍冬科 Caprifoliaceae	
1. 忍冬属 <i>Lonicera</i>	
1. 长白忍冬 <i>Lonicera ruprechtiana</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/长白忍冬_周海成果_0812111.JPG
29. 百合科 Liliaceae	
1. 铃兰属 <i>Convallaria</i>	
1. 铃兰 <i>Convallaria majalis</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/铃兰.JPG
2. 贝母属 <i>Fritillaria</i>	
1. 轮叶贝母 <i>Fritillaria maximowiczii</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/轮叶贝母.JPG

许展慧, 刘诗尧, 赵莹, 涂文琴, 常诏峰, 张恩涛, 郭靖, 郑迪, 耿鋆, 顾高营, 郭淳鹏, 郭璐璐, 王静, 徐春阳, 彭钊, 杨腾, 崔梦琪, 孙伟成, 张剑坛, 刘皓天, 巴超群, 王鹤琪, 贾竞超, 武金洲, 肖翠, 马克平. 国内8款常用植物识别软件的识别能力评价. 生物多样性, 2020, 28 (4):524–533. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2019272>

物种	照片在 NSII 网页的地址
3.百合属 <i>Lilium</i>	
1.有斑百合 <i>Lilium concolor</i> var. <i>pulchellum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/有斑百合_DSC_2457.jpg
4.延龄草属 <i>Trillium</i>	
1.白花延龄草 <i>Trillium kamschaticum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/白花延龄草.JPG
5.藜芦属 <i>Veratrum</i>	
1.藜芦 <i>Veratrum nigrum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/藜芦.JPG
30.天南星科 Araceae	
1.犁头尖属 <i>Typhonium</i>	
1.独角莲 <i>Typhonium giganteum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/独角莲.jpg
31.兰科 Orchidaceae	
1.杓兰属 <i>Cypripedium</i>	
1.大花杓兰 <i>Cypripedium macranthum</i>	http://www.nsii.org.cn/nsiireources/media/photo/testPhoto/2x/original/大花杓兰.JPG



•新书评介•

读《中国植物分类学纪事》的几点思考

赵云鹏*

(浙江大学生命科学院植物系统进化与生物多样性实验室, 杭州 310058)

Brief review and implications of *A Chronicle of Plant Taxonomy in China*

Yunpeng Zhao*

Laboratory of Systematic and Evolutionary Botany and Biodiversity, College of Life Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058

马金双主编, 胡宗刚、廖帅、叶文、鲍捷伟 (David E. Boufford) 共同编写的《中国植物分类学纪事》一书由河南科学技术出版社于2020年正式出版发行。本书以编年纪事方式记载了中国植物分类学在1753–2017年264年间的主要发展历程, 包括植物分类学的主要研究机构, 主要学者及其成就, 图书、期刊及重要论著, 全国性与国际性植物分类学会议, 以及重要的采集活动等。全书共686页, 其中正文551页, 序言、前言和附录135页, 并配以大量档案照片。本书附录收录中国植物分类学者540人770个名字, 索引共有中文人名610个, 西文人名740个, 中文期刊和图书663本, 西文期刊和图书653本。本书是编写团队多年细致工作的结晶, 也是马金双研究员《东亚高等植物分类学文献概览》一书的姊妹成果。

虽然近年来陆续出版了一些有关我国植物标本采集史、植物研究机构史、植物志编纂史、地区植物研究史、主要分类学者传记等相关的文章和专著, 特别是马金双、胡宗刚研究员的多部著作, 但是本书首次系统全面地梳理了中国植物分类学的历史档案和文献, 中国科学院华南植物园胡启明先生评价此书为“中国植物分类学首部历史纪事”。概览全书, 笔者认为本书有以下特点:

第一, 资料力求全面、详细、准确、系统。基于植物分类学文献、档案资料、标本, 通过收集、整理、考证、挖掘等方法, 按照标本、文献、人物、机构、学术交流等多条脉络, 系统梳理了海量资料。不仅全面、系统, 而且挖掘出不少新资料, 如哈佛大学植物分类学第一位华裔女博士陈秀英, 1913年留学法国

的刘厚(刘大悲)博士, 1918年留学美国的刘汝强(刘毅然)博士等。特别值得一提的是, 本书相当一部分照片属首次发表。这些梳理和新发现足见编写团队的功力, 特别是在我国科学档案保存不规范、管理不完善、历史损毁多、涉及面广、开放度不高的背景下, 需要极强的使命感、勇气和智慧。

第二, 明确了中国现代植物分类学发端的若干重要节点。虽然现代植物分类学多以1753年《植物种志》的发表为起点, 但是在此之前, 中国的植物标本采集就已被外国人涉足, 如1751–1752年林奈的学生Peter Osbeck在广州黄埔的采集, 1740–1757年法国传教士Père d'Incarville在北京和澳门的采集。此外, 还有本书未收录的1701年J. Cunningham在浙江舟山的采集, 其中1份标本后来被Robert Brown指定为*Hamamelis chinensis* (即榿木*Loropetalum chinense* (R. Br.) Oliv.)的合模。目前所知国人用于植物学研究的最早采集是黄以仁于1904年6月18日采自四川峨眉山的台湾相思树(*Acacia confuse* Merr.)标本, 现存于海军军医大学(原第二军医大学)植物标本室(SMMU-BH)。1916年, 钱崇澍先生在*Rhodora*发表毛茛属(*Ranunculus*)两新种, 是第一篇由中国植物分类学者描述中国植物新种的近代植物分类学文章, 标志着植物分类学作为一门学科在中国的正式确立。

第三, 勾勒了植物分类学研究人才培养的脉络。中国植物分类学研究者的培养最初源自海外留学, 特别是1916年钱崇澍和胡先骕先生分别回国, 1919年陈焕镛先生回国。包括这3位老先生在内的一批先行者不仅开创了中国植物分类学科, 而且如王文采先生在本书的《序言》中所言: “上述诸老的

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: ypzha@zju.edu.cn

分类学研究成果的发表宣告了西方植物学家掌握中国植物分类学研究局面的结束”,由此揭开了中国植物分类学研究人才本土培养与出国留学进修并行模式的序幕。1935年,中国开始了研究生教育,陈焕镛教授在当时的国立中山大学农林植物研究所招收了研究生李日光和王孝。1981年11月26日,国务院学位委员会批准博士学位授予点和首批博士生导师,其中植物分类学导师包括中国科学院植物研究所秦仁昌、俞德浚,中国林业科学研究院郑万钧,北京医学院诚静容,中山大学张宏达,东北林学院杨衍晋,中国科学院林业土壤研究所王战,武汉大学孙祥钟,四川大学方文培。1985年11月,首批本土植物分类学博士毕业,包括叶创兴(导师:张宏达教授)、赵佐成(导师:孙祥钟教授)。1985年12月,第一批博士后流动站启动,其中设立植物学专业的研究机构包括中国科学院植物研究所、北京大学、中山大学和武汉大学。期待进一步挖掘和丰富本土人才培养的资料。

第四,采用中性叙述,不加编者评论。即使史书或多或少都会带有编者个人的偏好,主编马金双研究员在《东亚高等植物分类学文献概览》一书有许多个性鲜明的精彩评论,为原书增色不少。但在本书中编者保持了克制,只述不评。胡启明先生略有遗憾地说:“若适当评论会使其更有可读性与感染力”。当然,两本姊妹书所用两种叙述方式效果如何也看读者个人喜好。

第五,中英文对照,图文并茂,既方便了国内读者,也扩大了国际读者。从知识体系的角度看,中国植物分类学的过去、现在和将来都需要立足中国和面向全球。大量的档案照片不仅丰富了资料形式,更提升了阅读效果。

第六,编排方式采用纪年体。纪年体的好处是,若逐页阅读,可随时间轴推进逐步了解学科发展的历史进程;若采用特定年份查阅法,则可快速定位信息。纪年编排方式连同书后的3个附录和6个索引充分体现了本书的工具书属性。我在查证银杏(*Ginkgo biloba*)的多份早期标本时,遇到信息不全和不一致以及采集背景不详等问题,就在本书查到了采集人Père Émile Licent的相关资料,核对了采集信息和背景。

皇皇纪事,呕沥成书。如何尽可能发挥本书的作用,并不断加以完善是成书后的又一大挑战。拟提几点个人建议,抛砖引玉。

第一,创造条件数字化和网络化。一则方便读者检索和使用,二则方便历史资料更正、补充以及管理和维护,特别是系统学资料,三则便于本书资料收集截止日期(2017年7月31日)之后的资料持续更新,四则数据可做进一步文献分析、数据挖掘和可视化表达。最好能建立本书条目与NSII、CVH、BHL-China、IPNI等专业数据库的文献、标本、人名等数据的链接,更好地服务于分类学研究。但是实现此目标并不容易,不仅需要编者的努力,更需要学界和社会各界的大力支持。

第二,鼓励更多学者共同研究植物分类学史,包括与科技哲学、博物学、档案学等领域的合作,多角度解读。不仅可以产出新成果,扩大影响,同时也可补充新资料,进一步验证现有资料的准确性。

第三,鼓励从本地化的角度挖掘本书资料的价值。研究院所、大学、学会、期刊、出版社等机构的相关学者或工作人员可以植物分类学史为抓手,研究和挖掘本单位的校史、所史、学科史、标本馆(室)史,既加强了单位文化建设,同时也保存和管理好本单位的档案资料,并建立信息共享的机制。通过梳理标本的采集和流传、志书的组织和编写、成果的产出和传播、机构的创建和变迁、人才的培养和成长、平台的搭建和发展,对学者自己的科学研究、教学育人、社会服务和文化遗产工作或都有可汲取的智慧和经验。

第四,鼓励运用本书资料到教书育人和科学传播中。比如,在教材和科普图书中编写基于分类学史的知识内容和科学故事;在植物学等专业课程中设计学科历史的课程内容;在讲授课程绪论时,抓住学科发展主线,采用讲故事的方式,不仅要讲现在的认知体系,也要讲知识的根源、主干和演变过程,不仅传授知识,还要激发兴趣,培养科学精神和家国情怀。

唯有传承采标本和修志书的创业精神,秉承实事求是、开拓创新的科学精神,才能更好实现本书倡导的“回顾历史,纪念先贤,开拓视野,启迪后人”之宗旨,促进学科焕发新生机,更好服务于人才培养、知识创新、国家社会发展和人类福祉。

致谢:感谢中国科学院植物研究所马克平研究员邀稿,感谢北京大学刘华杰教授和浙江大学刘军老师的建议。



•新书评介•

《自然资本议定书》介绍

(Natural Capital Coalition 著, 赵阳 译)



2014年, 自然资本联盟(Natural Capital Coalition, NCC)由生态系统与生物多样性经济学(The Economics of Ecosystems and Biodiversity, TEEB)商业联盟的原班人马组成。世界自然保护联盟(IUCN)与世界可持续发展工商理事会(World Business Council for Sustainable Development, WBCSD)加入该联盟后, 共同召集了近200个国际组织、跨国公司和研究机构, 通过企业试点实施和案例研究, 于2016年制定发布了 Natural Capital Protocol, 本协议定书由笔者译成中文, 即《自然资本议定书》于2019年7月由中国环境出版集团出版, 全书132页。

本协议定书旨在整合、协调包括《生态系统与生物多样性经济学》(TEEB)、《企业生态系统估值指南》(Guide to Corporate Ecosystem Valuation, CEV)等在内的已有研究成果, 形成全球多利益相关方普遍接受的统一框架, 以解决在自然价值核算领域多种倡议和举措并存的困惑及混乱局面。框架是一个包含四个阶段共九个步骤的标准化流程, 用来生成识别(identify)、计量(measure)和估算(value)对自然资本依赖和影响的成本、效益、潜在风险和机会的可靠且可操作信息, 为企业决策制定提供支持。整个框架遵循相同的结构: 提出本步骤要解决的具体问题; 介绍相关概念或方法, 侧重比较不同工具在定性、定量和货币化估值的适用性; 详细说明要完成本步骤所需操作; 列出完成本步骤的预期产出。

第一阶段: 设立框架。包含步骤1: 启动评估流程。本阶段回答企业为什么要进行自然资本估值的问题, 指导如何将自然资本概念应用于特定企业环境等操作, 并提供矩阵工具, 分析依赖和影响自然资本导致的风险或机会。本阶段开篇给出了自然资本的定义, 即组合起来能够产生带给人们利益或服务流量的地球上可再生和不可再生的自然资源存量。自然资本核算是针对某区域或生态系统总的自然资源存量和服务流量的计算过程。

第二阶段: 确定范围。包含步骤2–4, 对评估目的、范围和实质性标准进行确定。本阶段提供一系列方法, 例如在确定目标时使用广泛但简便的方法,

评估公司或价值链中的多重生态影响, 或者局部但深入的方法以强调对少数问题进行充分分析。评估范围应包含哪些成本或效益很大程度上取决于价值观选择, 即追求投入产出比、代表公司财务或股东价值的商业价值观和代表更广泛社会成本及效益的社会价值观。

书中概括了评估应用的5种类型: (1)分析风险机会(如探索新的土地用途或碳汇、水权交易市场); (2)比较备选方案(如哪种并购或投资计划的生态风险最低); (3)评估利益相关方(如哪些群体受企业活动影响最大, 性质和规模如何); (4)估算总值或净影响(如企业拥有的土地、自然资源或生态资产价值几何以及如何降低环境、社会成本); (5)改进内外部沟通(如发布报告吸引投资机构和消费者), 并提供矩阵工具, 用来分析构成完整评估的三要素, 即对自身的影响、对社会的影响和企业依赖性。

第三阶段: 计量和估算。包含步骤5–7。影响驱动因子(步骤5)指的是用作生产、可计量的自然资源投入(量), 或业务活动中可计量的非产品输出。影响驱动因子与影响不同, 后者作为后果, 是由于前者导致发生的自然资本数量或质量变化(步骤6), 例如土壤污染物浓度增加, 或自然栖息地中指示性物种数量下降30%。选择使用3种估值类型的近20种方法(步骤7)评估自然资本变化导致的环境后果(如生态修复的投入)和社会成本(如健康损害蒙受的医疗费用)。3种估值方法分别是定性估值、定量估值和货

币化估值。定性估值包括意见调查法、审议法和相对估值法,定量估值包括结构化调查法、指数法和运用计分或加权的多准则分析法,货币化估值包括:(1)基于市场和金融价格的生产函数法、机会成本法、缓解成本法、厌恶行为法和疾病医疗费用法;(2)基于成本的替代成本法及损害成本法;(3)基于消费意愿的享乐定价法、旅行成本法和陈述偏好法;(4)价值转移法。通常从定性开始,然后定量,最后估算货币价值,三个步骤循序渐进、互为因果。

第四阶段:应用结果。包含步骤8-9。本阶段解读和验证估值结果的可靠性,为企业决策提供信息,并将自然资本融入现有管理体系和企业长期战略。为避免过度估值和估值不足等问题,需对评估开展敏感性测试,改变假设或变量以观察所导致的估值效果是否波动过大,尤其是在涉及到生态阈值时,为避免物种灭绝风险,务必要使用谨慎保守的估值工具(步骤8)。采用分布分析法帮助了解企业对自然资本的影响和依赖将给哪些利益相关方带来多大

的成本和效益,预测受商业决策影响的人群的损益规模,并确定企业根据估值结果采取何种缓解措施最为有效(步骤9)。

总之,该议定书阐释、厘清和界定了以前环境经济学没有解决而私营部门最为关注的核心问题,即生物多样性与自然资源和生态资产有哪些相互依存的内在关系。自然资本作为它们中间的过渡环节,弥补了从自然存量(实物量)到市场流量(价值量)之间的“缺环”,弥合了不同部门利益相关方对价值的分析,填补了相关领域的理论空白:自然资本是自然资源里能够通过组合产生向社会和市场流动的服务及利益流量(生态系统服务是流量的基础)的那一部分存量(生物多样性是存量的基础),并提出了影响驱动因子、定性、定量和货币化估值等自然资本核算的概念、流程与方法,解决了企业“如果不能计量,就无法管理”的理念困惑和技术难点。

(生态环境部对外合作与交流中心 赵阳)