

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.190211

胶州湾大型底栖动物次级生产力

全秋梅^{1,2}, 徐姗楠¹, 肖雅元¹, 李纯厚¹

1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业农村部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广东 广州 510300;
2. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306

摘要: 根据 2016—2017 年在胶州湾开展的大型底栖动物调查获得的资料, 分析报道了胶州湾大型底栖动物次级生产力及其与环境的关系。结果表明, 本次调查中胶州湾大型底栖动物年平均栖息密度为 119.17 ind/m², 年平均生物量为 20.57 [g(去灰干重, AFDW)/m²], 年平均次级生产力和 P/B 值分别为 9.64 [g(AFDW)/(m²·a)] 和 0.47/a; 空间分布上, 次级生产力在湾内北部的养殖区和湾口处较高, 形成两处次级生产力高值区, 向四周逐渐减小; 在季节上, 次级生产力为春季>冬季>夏季>秋季; 环境因子与次级生产力的相关程度均不显著($P>0.05$), 在湾内养殖区的次级生产力与底质类型相关性较大, 而湾外是溶解氧的含量影响较大; 胶州湾海域次级生产力高于我国北方大部分海域, 但 P/B 值较低, 表明群落组成中个体较小、生命周期较短和新陈代谢快的物种所占比例少于其他海域。

关键词: 大型底栖生物; 次级生产力; P/B ; 胶州湾

中图分类号: S93

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2020)04-0414-13

大型底栖动物作为海洋生态系统中重要的生物组成, 能通过摄食、吸收和排泄等过程将沉积物中的有机质重新带入食物网, 是食物链中重要的营养级, 有助于实现生态系统的物质循环和能量流动^[1]。同时, 它可通过滤食或吸附等方式降低水体中的污染物, 达到净化水体的效果。大型底栖动物次级生产力是生态系统新陈代谢的结果, 受到多种环境因子的影响, 能反映群落结构和底栖环境的变化特征, 可作为生境稳定程度的监测指标^[2]。因此, 探讨次级生产力可了解大型底栖动物群落结构特征以及生态系统中物质循环和能量流动的变化过程。

在大型底栖动物次级生产力的相关研究中, 国内外最初主要以单个种群或少数物种为研究对象, 而目前的研究主要是针对整个调查海域的大型底栖动物群落, 估算方法由采用出生率和死亡率计算的同生群法和非同生群法逐渐简化形成的

P/B 系数法、最大生物量法等经验公式, 其中由于 Brey^[3] 经验公式仅涉及丰度与栖息密度, 参数较容易获得, 在国内得到广泛的应用^[4-5], 如于子山等^[6] 首次利用 Brey^[3] 经验公式进行渤海整个大型底栖动物群落次级生产力的估算, 随后李新正等^[7-8]、李少文等^[9]、刘勇等^[10] 在南北方近岸海域(如长江口、莱州湾、胶州湾、东海等)大型底栖动物的次级生产力估算中均有采用, 另外, 该经验公式在养殖滩涂^[11]、潮间带^[12-14] 和红树林^[15] 等湿地生境中也得到广泛应用。以上研究均是通过站位的次级生产力之和获得年次级生产力, 而杜飞雁等^[16]、刘坤等^[17]、王志忠等^[18] 则是按照不同类群进行估算, 主要分为多毛类、软体动物、甲壳类、棘皮动物和其他类群, 进而计算整个底栖动物群落的总次级生产力。在两种计算方式的比较研究中, 贾胜华等^[5] 认为不分类群进行估算所得结果偏高, 且通过各类群进行总生产力的估算更

收稿日期: 2019-08-27; 修订日期: 2019-09-18.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2015CB452904); 广东省科技计划项目(2019B121201001); 中国水产科学研究院基本科研业务费专项(2020TD1b).

作者简介: 全秋梅(1997-), 女, 硕士研究生, 从事水生生物学研究. E-mail: 1091685867@qq.com

通信作者: 李纯厚, 研究员, E-mail: scslch@vip.163.com; 徐姗楠, 副研究员, E-mail: xushannan@scsfri.ac.cn

加符合 Brey^[3]经验公式计算的参考步骤。为了追求具有更高精准度的估算结果,在大量基础数据积累的前提下,经验公式逐渐发展为结合环境因子的估算模型,如 Brey^[19]、Brey^[20]、张崇良等^[21]、Brey^[22]、刘旭东等^[23]、Tumbiolo 等模型^[24]等,在不同研究中通过采用多种不同模型进行比较,可为特定海域或生境选择合适的估算方法^[23, 25]。

胶州湾位于山东半岛南部,是一个典型的半封闭海湾,湾内大型底栖动物种类丰富,是中国最早开展海湾生态研究的典型区域之一^[26-27]。随着沿岸城市和海洋经济的快速发展,胶州湾海域受到人类活动和自然因素等多重压力的影响更显著,水体理化环境日益复杂并趋向恶化,使得大型底栖动物的群落结构也出现明显的时间、空间异质性,为了能够实现生物资源的可持续利用,对该海区的大型底栖动物进行长期的生态学调查尤为重要。目前在胶州湾大型底栖动物群落组成、生物量、栖息密度、优势种等结构特征方面的研究较多^[28-31],但近年来探讨次级生产力的变化特征以及分析其与环境因子相关性的文章甚少^[32]。因此,本研究基于 2016—2017 年在胶州湾进行的生态学调查,采用国内研究居多的 Brey^[3]经验公式对大型底栖动物的次级生产力进行估算,并纵向探讨在胶州湾其近 20 年的变化特征,旨在从次级生产力的角度了解胶州湾大型底栖动物群落的动态变化,为海域的生态修复和资源养护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 调查地点

分别于 2016 年 1 月(冬季)、4 月(春季)和 11 月(秋季)和 2017 年 8 月(夏季)对胶州湾大型底栖动物进行调查采样,在湾中部和湾口海域共布设 12 个采集站位(图 1),其中 S1、S2 位于菲律宾蛤仔养殖区, S4 位于贻贝养殖区,胶州湾口附近海域设置 S7、S8、S9,于开阔的湾外海域设置 S10、S11、S12。

1.2 样品处理

各站位大型底栖动物均用 0.1 m² 的表层箱式

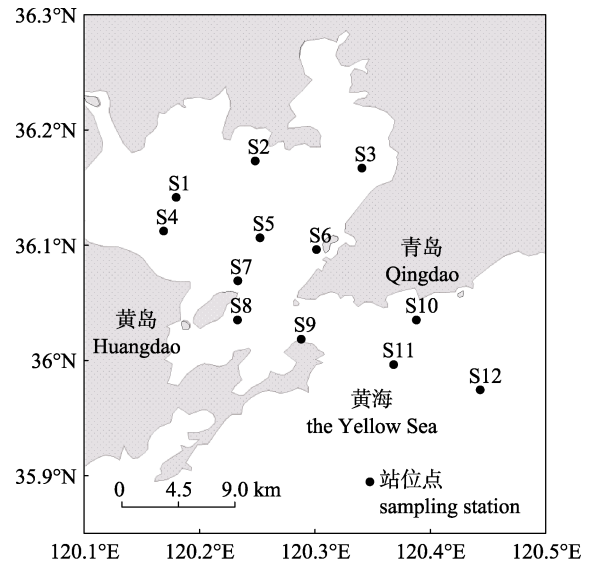


图 1 胶州湾采样站位图

Fig. 1 Sampling stations in Jiaozhou Bay

采泥器采集,经 0.5 mm 的底层套筛冲洗泥沙后获取生物样品,现场 75%酒精固定后带回实验室进一步处理。针对纽虫、多毛类破损较为严重的只鉴定到科或者属,其他生物样品均鉴定到种;计数各种生物个体数,并用 0.001 g 的电子秤称量其湿重(软体动物带壳称量),所得个体数与质量除以相应采样面积得到各种生物的栖息密度和生物量^[33]。

盐度、水温、pH 和溶解氧等环境参数由便携式多参数-水质分析低仪(MS5, HACH)现场测定,水深和透明度根据《海洋调查规范》^[34]测定,表层沉积物有机质测定采用重铬酸钾容量法^[35];CILAS 940L 型激光粒度仪分析各站位表层沉积物的黏土含量、沙含量、粉沙含量、平均粒径和中值粒径,依据矩值法计算粒度参数^[36],采用 FOLK 法分析沉积物类型^[37-39]。

1.3 数据处理

采用 Brey (1990) 的经验公式^[3]

$$\lg P = (-0.47) + 1.007 \times \lg B - 0.27 \times \lg W \quad (1)$$

式中: B 为每站大型底栖动物年平均去灰干重生物量 [$\text{g(AFDW)}/\text{m}^2$], 每个站点的大型底栖动物生物量(湿重, g/m^2) 的 1/5 作为干重,干重的 9/10 作为去灰干重(ash-free dry weight, AFDW); W 为每站大型底栖动物年平均个体去灰干重 [g(AFDW)]; P 为每站大型底栖动物次级生产力 [$\text{g(AFDW)}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$].

$$W = B / A \quad (2)$$

式中: A 为每个站位大型底栖动物年平均栖息密度 (ind/m^2)。将公式(2)代入公式(1), 转换后得:

$$P = A^{0.27} \times B^{0.737} / 10^{0.47} \quad (3)$$

采用 surfer 12.0 软件绘制调查采样站位图和分布图, SPSS 17.0 软件进行 Pearson 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 大型底栖动物的群落组成

胶州湾大型底栖动物主要由环节动物、软体动物、节肢动物和棘皮动物组成, 4 个航次共采集

大型底栖动物 117 种, 见表 1。其中, 环节动物 56 种, 占总种数的 47.86%; 节肢动物 31 种, 占总种数的 26.50%; 软体动物 14 种, 占总种数的 11.97%, 棘皮动物和脊索动物均为 6 种, 各占总种数的 5.13%; 半索动物、头索动物、纽形动物和腔肠动物各 1 种。环节动物、软体动物、节肢动物和棘皮动物的年平均栖息密度分别为 $762.50 \text{ ind}/\text{m}^2$ 、 $122.50 \text{ ind}/\text{m}^2$ 、 $240.00 \text{ ind}/\text{m}^2$ 、 $147.50 \text{ ind}/\text{m}^2$, 年平均生物量分别为 $56.56 \text{ g}/\text{m}^2$ 、 $935.85 \text{ g}/\text{m}^2$ 、 $286.54 \text{ g}/\text{m}^2$ 、 $35.37 \text{ g}/\text{m}^2$ 。

表 1 胶州湾大型底栖动物物种组成

Tab. 1 The species composition of macrobenthos in Jiaozhou Bay

中文名 name in Chinese	拉丁文名 name in Latin	中文名 name in Chinese	拉丁文名 name in Latin
环节动物门	Annelida	软体动物门	Mollusca
蛭龙介科	Terebellidae	纹斑梭蛤	<i>Trapezium liratum</i>
梳鳃虫	<i>Terebellides stroemii</i>	红明樱蛤	<i>Moerella rutila</i>
树蛭虫属一种	<i>Pista</i> sp.	豆形胡桃蛤	<i>Nucula faba</i>
纳加索沙蚕	<i>Lumbrineris nagai</i>	彩虹明樱蛤	<i>Moerella iridescens</i>
海稚虫科一种	Spionidae sp.	毛蚶	<i>Scapharca subcrenata</i>
小头虫属	<i>Capitella</i> sp.	朝鲜鳞带石鳖	<i>Lepidozona coreanica</i>
领管纓虫	<i>Chone collaris</i>	菲律宾蛤仔	<i>Ruditapes philippinarum</i>
乳突半突虫	<i>Phyllococe papillosa</i>	日本镜蛤	<i>Dosinorbis japonica</i>
岩虫	<i>Marphysa sanguinea</i>	滑理蛤	<i>Theora lubrica</i>
多鳃微稚齿虫	<i>Minuspio multibranchia</i>	脉红螺	<i>Rapana venosa</i>
指节扇毛虫	<i>Ampharete anobothrusiformis</i>	玉螺科一种	Naticidae sp.
日本长手沙蚕	<i>Magelona japonica</i>	红带织纹螺	<i>assarius succinctus</i>
寡节甘吻沙蚕	<i>Goniada gurjanovae</i>	圆筒原盒螺	<i>Eocylichna braunsi</i>
蛇形杂毛虫	<i>Poecilochaetus serpens</i>	海牛科	Dorididae
足刺拟单指虫	<i>Cossurella aciculata</i>	节肢动物门	Arthropoda
丝鳃虫	<i>Cirratulus cirratus</i>	日本沙钩虾	<i>Byblis japonicus</i>
细丝鳃虫	<i>Cirratulus filiformis</i>	美原双眼钩虾	<i>Ampelisca miharaensis</i>
孟加拉海扇虫	<i>Pherusa bengalensis</i>	涟虫科	Bodotriidae
中华异稚虫	<i>Heterospio sinica</i>	塞切尔泥钩虾	<i>Eriopisella sechellensis</i>
叶须虫科	Phyllodocidae	钩虾科	Gammaridae
背蚓虫	<i>Notomastus latericeus</i>	四齿矶蟹	<i>Siriella trispina</i>
毛须鳃虫	<i>Cirriformia filigera</i>	麦杆虫属一种	<i>Caprella</i> sp.
拟特须虫	<i>Paralacydonia paradoxa</i>	日本美人虾	<i>Callianassa japonica</i>
覆瓦哈鳞虫	<i>Harmothoe imbricata</i>	日本鼓虾	<i>Alpheus japonicus</i>
非拟海鳞虫	<i>Nonparahalosydna pleiolepis</i>	口虾蛄	<i>Oratosquilla oratoria</i>
锡鳞虫科	Sigalioninae	涟虫	Cumacea
副栉虫	<i>Paramphicteis angustifolia</i>	螺赢蜚	<i>Corophium</i> sp.
长吻沙蚕	<i>Glycera chirori</i>	日本游泳水虱	<i>Natatolana japonensis</i>
吻沙蚕属	<i>Glycera</i> sp.	鲜明鼓虾	<i>Alpheus distinguendus</i>

(待续 to be continued)

(续表 1 Tab. 1 continued)

锥唇吻沙蚕	<i>Glycera onomichiensis</i>	圆柱水虱属	<i>Cirolana</i> sp.
色斑角吻沙蚕	<i>Goniada maculata</i>	二齿半尖额涟虫	<i>Cumacea</i>
寡鳃齿吻沙蚕	<i>Nephtys oligobranchia</i>	诺氏原足虫	<i>Anatanais normani</i>
日本刺沙蚕	<i>Neanthes japonica</i>	日本关公蟹	<i>Dorippe japonica</i>
无疣齿蚕	<i>Nephtyidae inermis</i>	强壮菱蟹	<i>Parthenope validus</i>
中华内卷齿蚕	<i>Aglaophamus sinensis</i>	特大权蟹	<i>Macromedaeus distinguendus</i>
内卷齿蚕属	<i>Aglaophamus</i> sp.	菱蟹科	Parthenopidae
沙蚕科	<i>Nereidae</i>	大螯蛄虾	<i>Upogebia major</i>
狭细蛇潜虫	<i>Ophiodromus angutifrons</i>	豆形短眼蟹	<i>Xenophthalmus pinnotheroides</i>
深钩毛虫	<i>Sigambra bassi</i>	螺赢蜚科一种	Corophiidae
矾沙蚕科	Eunicidae	隆线强蟹	<i>Eucrate crenata</i>
哥城矾沙蚕	<i>Eumica bobiensis</i>	绒毛细足蟹	<i>Raphidopus ciliatus</i>
索沙蚕属种	<i>Lumbrineris</i> sp.	六足蟹属	<i>Hexapus</i> sp.
短叶索沙蚕	<i>Lumbrineris latreilli</i>	藤壶科一种	Balanidae
背蚓虫	<i>Notomastus latericeus</i>	细螯虾	<i>Leptocheila gracilis</i>
丝异须虫	<i>Heteromastus filiformis</i>	中华虎头蟹	<i>Orithyia sinica</i>
海女虫科	Hesionidae	棘皮动物门	Echinodermata
竹节虫科	Maldanidae	日本倍棘蛇尾	<i>Amphioplus japonicus</i>
双栉虫	<i>Ampharete acutifrons</i>	棘刺锚参	<i>Protankyra bidentata</i>
曲强真节虫	<i>Euclymene annadalei</i>	细雕刻肋海胆	<i>Temnopleurus tereumaticus</i>
长锥虫	<i>Haploscoloplos elongatus</i>	哈氏刻肋海胆	<i>Temnopleurus hardwickii</i>
独指虫属	<i>Aricidea</i> sp.	紫蛇尾	<i>Ophiopholis mirabilis</i>
不倒翁虫	<i>Sternaspis scutata</i>	金氏真蛇尾	<i>Ophiura kinbergi</i>
缨鳃虫科一种	Sabellidae	脊索动物门	Chorelata
笔帽虫科	Pectenaridae	中华栉孔虾虎鱼	<i>Ctenotrypauchen chinensis</i>
智利巢沙蚕	<i>Diopatra chiliensis</i>	拉氏狼牙虾虎鱼	<i>Odontamblyopus lacepedii</i>
深沟毛虫	<i>Sigambra bassi</i>	红狼牙虾虎鱼	<i>Odontamblyopus rubicundus</i>
纽形动物门	Nemertinea	玉筋鱼科	Ammodytidae
半索动物门	Adelochorda	六丝钝尾虾虎鱼	<i>Amblychaeturichthys hexanema</i>
三崎柱头虫	<i>Balanoglossus misakiensis</i>	孔虾虎鱼	<i>Trypauchen vagina</i>
腔肠动物门	Cnidaria	头索动物门	Cephalochordata
白沙箸海鳃	<i>Virgularia gustaviana Herklots</i>	青岛文昌鱼	<i>Brachiostoma belcheri tsingtauense</i>
山羊直筒虱	<i>Caenanthura ibex</i>		

2.2 胶州湾大型底栖动物次级生产力的空间分布

由表 2 可知, S1 站的年平均栖息密度最高, 为 225.00 ind/m², S9 站的最低, 为 50.00 ind/m², 平均生物量最高与最低站点分别为 S9 [121.29 g(AFDW)/m²]、S12 [1.16 g(AFDW)/m²]; 次级生产力在各站点的变化趋势与年平均生物量相似, 仍在 S9 和 S12 站点取得最高值和最低值, 分别为 34.45 [g(AFDW)/(m²·a)]、1.45 [g(AFDW)/(m²·a)], S1 仅次于 S9, 为 31.18 [g(AFDW)/(m²·a)]; *P/B* 分布情况与之相反, 最大值在 S12 站, 为 1.25/a, 在

S9 站有最小值, 为 0.28/a; 图 2 也表明在 S1 和 S9 形成次级生产力的两个高值中心区, 向四周减小, 而 *P/B* 值在 S6、S7 和 S12 站形成 3 个高值区, 低值中心区出现在 S9 站。

2.3 胶州湾大型底栖动物次级生产力的季节变化

胶州湾大型底栖动物的次级生产力和 *P/B* 值的季节变化见表 3, 平均栖息密度变化为冬季>春季>秋季>夏季, 在季节变化上, 平均生物量的变化趋势与次级生产力仍相似, 均为春季>冬季>夏季>秋季, 春季的平均生物量和次级生产力分别

表 2 胶州湾各调查站位大型底栖动物的次级生产力和 P/B 值
 Tab. 2 The secondary productivity and P/B ratio of macrobenthos at different stations in the Jiaozhou Bay

站位 station	年平均栖息密度/ (ind/m ²) density	年平均生物量/ [g(AFDW)/m ²] biomass	次级生产力/ [g(AFDW)/(m ² ·a)] secondary productivity	$P/B/(a^{-1})$
S1	225.00	54.28	31.18	0.57
S2	127.50	10.54	7.29	0.69
S3	160.00	29.80	16.60	0.56
S4	97.50	4.89	3.81	0.78
S5	112.50	4.67	3.13	0.67
S6	110.00	2.85	2.85	1.00
S7	135.00	2.36	2.73	1.16
S8	77.50	3.55	2.74	0.77
S9	50.00	121.29	34.45	0.28
S10	142.50	8.91	6.96	0.78
S11	97.50	2.55	2.52	0.99
S12	95.00	1.16	1.45	1.25
平均值 average	119.17	20.57	9.64	0.47

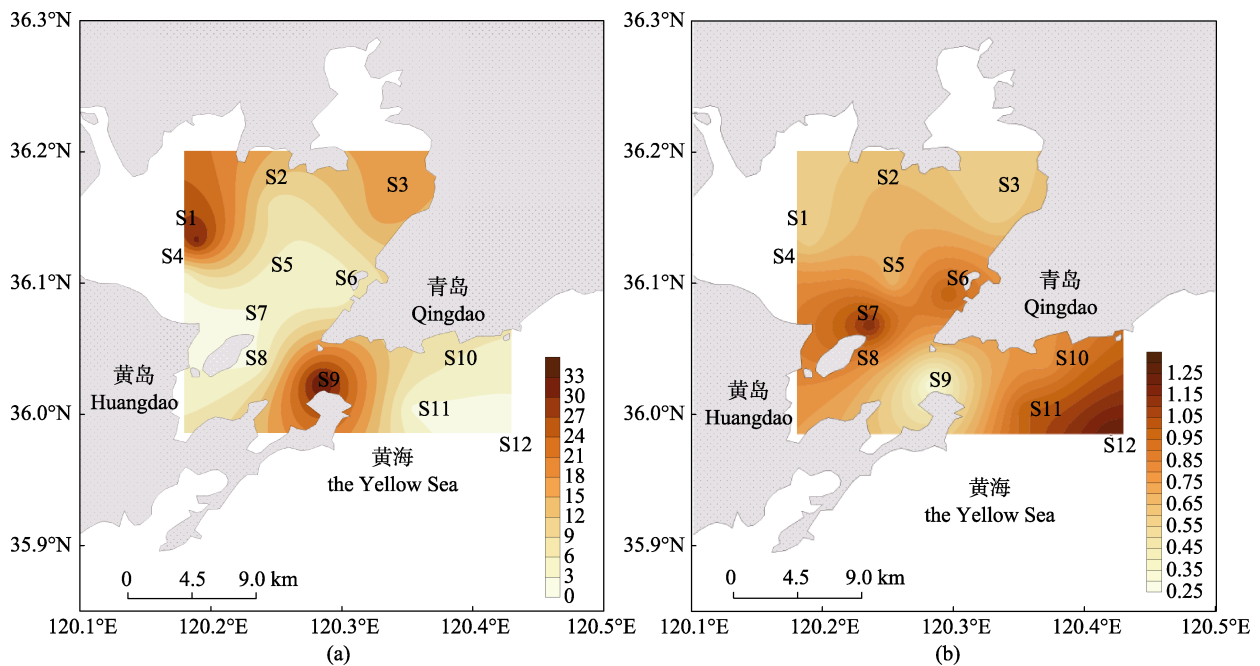


图 2 胶州湾大型底栖动物次级生产力(a)和 P/B (b)分布图
 Fig. 2 The secondary productivity (a) and P/B (b) of macrobenthic in Jiaozhou Bay

为 43.45 [g(AFDW)/m²]、17.01 [g(AFDW)/(m²·a)], 秋季的平均生物量和次级生产力分别为 1.77 [g(AFDW)/m²]、1.89 [g(AFDW)/(m²·a)], 而 P/B 值的季节变化情况与前面二者相反, 秋季最高, 为 1.07/a, 春季最低, 为 0.39/a。

2.4 胶州湾大型底栖动物次级生产力与环境因子的关系

胶州湾大型底栖动物的次级生产力与环境因子的相关性分析结果见表 4。环境因子包括水深(depth)、盐度(salinity)、水温(temperature)、pH、叶

表 3 胶州湾不同季度大型底栖动物次级生产力和 P/B 值
Tab. 3 Season change of the secondary productivity and P/B of macrobenthic in Jiaozhou Bay

季度 season	平均栖息密度/(ind/m ²) density	平均生物量/ [g(AFDW)/m ²] biomass	次级生产力/ [g(AFDW)/(m ² ·a)] secondary productivity	$P/B/(a^{-1})$
春季 spring	136.67	43.45	17.01	0.39
夏季 summer	51.67	8.34	5.12	0.61
秋季 autumn	110.83	1.77	1.89	1.07
冬季 winter	177.50	28.72	14.55	0.51
平均值 average	119.17	20.57	9.64	0.47

绿素(chlorophyll a)、溶解氧(dissolved oxygen)、中值粒径(median diameter)、有机质(total organic material), 其中通过相关检测和计算获得各站位的底质类型, S1、S2、S8 为沙质粉沙, S3、S11 为黏土质粉沙, S4、S5 为混合型(沙质、黏土质粉沙), S6、S12

为粉沙, S7、S9、S10 为砾沙。由表 4 中可知, 次级生产力与生物量之间为极显著相关($P<0.01$, $N=12$, $r_s=0.930$), 但与各环境因子的相关性均并未达到显著水平, 其中, 相关性较大的是 pH, 在调查区域中, pH 的范围为 9.43~10.05, 由湾口向湾顶部逐渐增加。

表 4 胶州湾大型底栖动物次级生产力和环境因子相关性分析
Tab. 4 Correlation of secondary productivity of macrobenthos with environmental factors in Jiaozhou Bay

项目 item	生物量 biomass	栖息密度 density	次级生产力 secondary productivity	水深 depth	盐度 salinity	温度 temperature	pH	叶绿素 a chlorophyll a	溶解氧 dissolved oxygen	中值粒径 median diameter
栖息密度 density	-0.086									
次级生产力 secondary productivity	0.930**	0.269								
水深 depth	0.222	-0.489	0.000							
盐度 salinity	-0.016	-0.489	-0.210	0.702*						
温度 temperature	-0.080	-0.393	-0.242	0.456	0.760**					
pH	0.590*	0.049	0.557	0.036	0.242	0.122				
叶绿素 a chlorophyll a	0.033	0.397	0.189	-0.584*	-0.901**	-0.639*	-0.418			
溶解氧 dissolved oxygen	-0.545	0.605*	-0.294	-0.667*	-0.446	-0.350	-0.164	0.211		
中值粒径 median diameter	-0.028	-0.133	-0.010	-0.197	-0.531	-0.369	-0.414	0.444	0.127	
有机质 total organic material	0.247	-0.072	0.237	-0.092	-0.658*	-0.406	-0.332	0.607*	-0.118	0.797**

注: **表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; *表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

Note: ** means correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed); * means correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

2.5 胶州湾大型底栖动物次级生产力总值估算

根据《2017 年青岛市海洋环境公报》^[40]可计算出胶州湾的最新水域面积, 约为 370.6 km², 按 2016—2017 年胶州湾大型底栖动物的平均次级生产力为 9.64 [g(AFDW)/(m²·a)] 计算, 可估算近两年整个胶州湾海域年次级生产力为 19847.69 t(湿重)。与 2005 年研究结果相比^[8], 水域面积和湿重分别减少了 13.4 km² 和 8752 t。

3 讨论

3.1 次级生产力的分布格局

在季节变化和空间分布上, 平均生物量与次级生产力的变化趋势均相似, 且二者相关性极显著($P<0.01$), 部分研究结果也证明了生物量是影响次级生产力变化的重要因素^[8, 14, 41]。在季节变化中, 次级生产力与生物量的变化趋势均为春季>冬季>

夏季>秋季, 春季次级生产力为 17.01 [g (AFDW)/(m²·a)], 从各站位的调查结果中可知, 在 S1、S3 和 S9 站位春季物种的栖息密度与其他季节没有显著差别, 但由于分别存在菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)、棘刺锚参(*Protankyra bidentata*)和脉红螺(*Rapana venosa*)等个体较大和生物量较高的主要物种, 使春季生物量明显高于其他 3 个季节, 因此该季节也具有较高的次级生产力。同时, 大部分甲壳动物在春季会进入到沿岸地区繁衍^[41]以及养殖区的菲律宾蛤仔等贝类大量繁殖^[27], 均有利于生物量和次级生产力升高。在夏、秋两个季节的航次中, S9 站位均没有采获大型底栖动物, 且其他站位的物种大多数为小个体的环节动物, 个体较大的软体动物较少, 导致总次级生产力偏低。其他学者^[14, 32, 42]同样指出菲律宾蛤仔资源的变化或一些个体较大的机会种是造成次级生产力变化的主要因素之一, 可见次级生产力高低与软体动物的平均生物量相关。根据文献记载, 自 2008 年起, 黄海近岸海域连续多年有浒苔爆发情况, 其中胶州湾受影响最严重, 浒苔暴发的时间基本上在夏秋季节^[43], 当夏秋季浒苔暴发时, 大量浮游植物、底栖藻类因营养不足而减少, 在消亡过程中大量消耗水体中的氧气, 水体逐渐恶化, 同时也会导致沉积环境中的溶氧量减少, 从而影响大型底栖动物的生长, 破坏海洋生态系统的稳定性, 推测胶州湾海域夏秋两季的物种数较少、生物量和次级生产力较低也与浒苔爆发形成的恶劣环境有关。

在空间分布上, 袁伟等^[32]、李新正等^[30]、张崇良等^[42]的调查均表明胶州湾大型底栖动物次级生产力由湾口到湾北部呈现升高趋势, 但本次研究结果有所不同, 次级生产力的空间分布以 S1 和 S9 站位形成两个高值中心区, 东北部的 S3 站仅次于前两者, 向周围变化的坡度较缓。胶州湾北部拥有多条入海河流(如大沽河、李村河、娄山河), 可为近岸海域生物提供丰富的陆源营养物质, 加上周边存在菲律宾蛤仔等贝类的海水养殖区, 丰富的营养来源和养殖区的存在均是形成 S1、S3 高值区和北部次级生产力高于南部的重要原因。从表 2 可知, S9 站的生物量和次级生产力均位居第

一, 与春冬两季调查中在此站位均采获大量脉红螺有关, 获得较高的生物量从而形成次级生产力的高值区, 这是导致与以往空间分布情况不同的主要原因, 但详细记载此处出现过大量脉红螺的文献也甚少。S9 站位处于湾口处, 水体交换速率快, 能保持较好水质, 有利于底栖动物的生长发育, 刘吉明等^[44]也指出在流水式环境中有利于脉红螺存活率较高, 但湾口处也存在船舶行驶频繁、营养物质较缺乏等不利因素, 能长期生存的底栖生物较少^[26, 45], 仅有蟹类、水媳等沙隙生物^[41]。在冬季调查结果中, S9 站出现的物种较丰富, 但在春季仅采集到脉红螺, 这可能与脉红螺生活习性有关, 有研究也表明 6—8 月是脉红螺的繁殖季节, 且会从深海向浅海或潮间带移动^[44], 但本次夏秋两季调查中没有采获到脉红螺以及其他任何物种。本次调查中春冬两季能采获到大量脉红螺, 而夏秋两季无收获的原因有待探讨, 因此持续对该海区的大型底栖动物及环境进行相关调查和研究至关重要。

本文采用 2016 年春、秋和冬以及 2017 年夏季的大型底栖动物数据计算年平均次级生产力, 并与 1998—2014 年在胶州湾已有的调查结果进行比较(表 5), 可见本研究中次级生产力明显偏低, 仅有 9.64 [g(AFDW)/(m²·a)], 在空间上显著低于仅在胶州湾潮间带或西部海域的次级生产力。参考关于大型底栖动物次级生产力的相关文献, 如于子山等^[6]、李新正等^[7]、王志忠等^[18]分别在渤海、东海和黄河入海口的研究中也均采用相邻年份不连续的季节进行年次级生产力的计算^[6-7, 18], 为了能全面地反映全年平均次级生产力, 且四个季节的调查站位均一样, 因此, 本文结合 2017 年夏季的大型底栖动物数据, 得出 2016—2017 年胶州湾大型底栖动物的年平均次级生产力同样具有客观性和合理性。根据 2016 年、2017 年青岛市海洋环境公报^[40, 46], 可知近两年胶州湾海水环境质量逐渐转好, 但北部总体仍存在营养盐超标、石油类含量上升、浒苔爆发等现象, 水域生境恶化并不利于养殖区生物的生长繁殖, 减少养殖活动对周边底栖环境的“耕种”作用; 其次, 随着逐渐注重海湾生态环境的改善, 岸线整治与生态修复工程等

项目实施必不可少,如修复淤泥质海滩以及建立人工海滩、监测和治理河口水域、清理水产养殖筏架等,其中在养殖区及其附近海域的底栖生物影响可能较大,使得部分以往主要依靠养殖物种而获得较高次级生产力的海区,其生产力将会显著下降,导致在生态修复的初期次级生产力总体出现较大程度地降低。国外有相关调查也表明将对大型底栖动物产生干扰的因素去除后,大型底栖动物需要较长一段时间恢复才能其生态功能,如在德国湾的研究^[47]指出根据生境类型和规模,即使在禁止拖网以及其他渔业行为关闭后,恢复底

栖生物生境可能需要长达八年甚至更长时间;在相对没有压力的海洋环境中,经过疏浚处理的底栖生物的恢复通常需要3年左右^[48]。由胶州湾次级生产力的年际变化可在一定程度上反映出存在人为活动的影响,随着社会发展的需要,人类在海湾周边开发以及向海洋索取资源的力度加强,对海洋环境和生物造成的生态问题也不可避免,杜飞雁等^[16]在大亚湾的研究中也表明人为干扰是造成大型底栖动物次级生产力和生命周期发生变化的重要原因。因此,可推测次级生产力的年际变化与调查站位设置、养殖情况和生态修复工程等有关。

表5 大型底栖动物次级生产力在1998–2017年之间的比较
Tab. 5 Comparison of the secondary production of macrobenthos during 1998–2017

年份 year	调查站位 sampling station	次级生产力/ [g(AFDW)/(m ² ·a)] secondary productivity	P/B/(a ⁻¹)	环境因子(P<0.05) environmental factor	参考文献 reference
2016–2017	胶州湾 Jiaozhou Bay	9.64	0.47	–	本研究
2014	胶州湾 Jiaozhou Bay	23.73	1.06	水深 water depth	[49]
2009	胶州湾潮间带海域 Jiaozhou Bay intertidal zone	29.90	–	–	[42]
2009		24.26	0.81		
2008		13.82	0.81		
2007	胶州湾 Jiaozhou Bay	33.98	0.72	–	[50]
2006		33.34	0.77		
2005		27.77	0.83		
2003–2004	胶州湾西部海域 west Jiaozhou Bay	47.34	0.58	Chl-a	[32]
2000–2004	胶州湾 Jiaozhou Bay	13.41	1.05	–	[30]
1998–1999		18.65	1.05		

3.2 胶州湾大型底栖动物次级生产力与其他近岸海域的比较

结合胶州湾附近海域次级生产力的文献资料进行分析^[51],可知胶州湾海域次级生产力在逐渐减小的情况下,仍比附近大部分近岸海域高,如高于2001年南黄海^[52][4.09 g(AFDW)/(m²·a)]、2007年北黄海^[53][7.60 g(AFDW)/(m²·a)]、2009年桑沟湾海域^[54][4.76 g(AFDW)/(m²·a)]、2011年莱州湾^[9][5.60 g(AFDW)/(m²·a)]、2012年滨州浅海^[18][6.21 g(AFDW)/(m²·a)]、2014年江苏潮间带^[14][8.57 g(AFDW)/(m²·a)]、2015年海州湾^[55][1.50 g(AFDW)/(m²·a)],但低于2011年乳山湾^[56][26.43 g(AFDW)/(m²·a)]。在环境要素方面,不同海区环境

之间存在空间异质性,如沉积环境、水深等,在营养物质丰富且细小的底质中更有利于底栖生物的存活和生长繁殖;而在水域较深的环境中因光合作用强度会随水深增加而减弱,底栖动物能量输入也随之减少,将间接影响其新陈代谢^[57],与李新正等^[30]、周细平等^[58]研究结论一致。胶州湾具有相对较高的次级生产力可能与海域平均深度有关,其平均水深为7 m,除了桑沟湾,均低于上述其他研究海域。在物种组成方面,本调查中软体动物是次级生产力的主要贡献者,栖息密度最小,但其生物量高达935.85 g/m²,位居第一,直接增加总次级生产力,与在大亚湾的研究结果^[16]相似,表明个体、生物量较大的软体动物对次级生产力

的贡献远高于个体小的环节动物,部分研究也表明在次级生产力相对较高的海区可能是生物量较大的物种较常见,而次级生产力较低的海区则以生活史较短、个体较小的多毛类为主^[59],例如桑沟湾,生活史短、个体较小且新陈代谢快的多毛类占 80%以上,造成次级生产力低而 P/B 值高^[54];另外,各海湾周边经济发展速度和人类干扰程度不同,大型底栖动物主要物种因环境的变化而有别,如海上作业频繁以及废弃物排放污染越严重的海区中,耐污能力越强、对环境变化不敏感的个体才能长期生存,容易造成大部分大型底栖动物种类减少甚至消失^[55],底栖群落逐渐以个体较小、周转率快的物种为主,从而导致次级生产力降低。各海域开发程度、海水养殖范围、水质及沉积环境、优势种以及采用的计算模型等不同均可能是造成次级生产力产生差异的原因,因此底栖动物的种类分布、次级生产力变化趋势在各海域存在局部性特点,但在大尺度范围中难以找到通用规律。

3.3 胶州湾大型底栖动物次级生产力与环境因子的关系

在本次研究中,整个调查海域大型底栖动物的次级生产力与环境因子之间的相关性均不显著,只与生物量呈极显著相关。但由于胶州湾内分布大规模养殖场,且有众多河流排放到湾内,受到陆源污染或人为干扰较多,而湾外受到污染程度较低,推测湾内外的水文环境和沉积类型可能有较大差异,因此,当仅将位于养殖区附近的站位(S1、S2、S4、S5)进行 Pearson 相关性分析,发现中值粒径与生物量、栖息密度和次级生产力均呈现极显著负相关($P < 0.01$, $N=4$, $r_s = -0.991$),而中值粒径的大小反映底质类型,不同的底质类型又决定不同底栖动物的分布,其中底质环境稳定且主要为细粒物质的沉积区更适合大型底栖动物栖息^[14]。养殖区附近的底质类型有沙质粉沙、黏土质粉沙和二者混合型,中值粒径越小的沙质,其有机质含量较高^[28],有利于大型底栖动物的生长繁殖,从而提高次级生产力,有相关研究也表明适量的外源有机质输入有利于提高大型底栖动物的次级生产力^[17]。当将湾口附近及湾外的站位与环境因

子同样进行相关性分析,发现溶解氧对次级生产力产生显著负影响($P < 0.05$, $N=6$, $r_s = -0.870$),水体底质中含氧量较低,尤其在污染水体中底栖动物对溶氧量的变化较敏感^[10],可能与湾口船舶航行频繁有关,扰动水体的稳定性,并不利于大部分大型底栖动物的长期生存。

大型底栖动物次级生产力和环境因子之间关系十分复杂,即使在相同海域中,影响大型底栖动物次级生产力的环境因子也随时间发生变化,如 2003—2004 年袁伟等^[32]在胶州湾西部海域的研究表明叶绿素 a 是影响次级生产力的重要因子,而本次研究中以湾内站位进行分析的结果显示底质类型是重要的影响因素;在长江口海域同样存在环境影响因子的时间差异性,2004 年在长江口海区中大型底栖动物次级生产力与水深、盐度和亚硝酸盐浓度紧密相关,与氨氮相关性不显著^[10],但在 2011 年研究表明总氮与次级生产力有极显著相关性^[12],指出农业和生活污水的大量排放是导致氮含量逐渐升高的主要原因。在空间差异性方面,各个海区有独特的环境特征,如水深、温盐度、海流、营养盐和底质类型等因素的不同,不同的生境条件对次级生产力的影响有别,如金亮等^[11]在涓洲湾调查中表明次级生产力的季节变化差异主要由于陆地径流导致盐度不同;而任中华^[59]在莱州湾及黄河口海域的研究显示水深增加降低底层光合作用强度从而次级生产力也随之减小。由表 4 可知,部分环境因子之间同样存在显著相关性($P < 0.05$),如水深与溶解氧、叶绿素;叶绿素与有机质;有机质与中值粒径等,环境因子之间存在相互影响,因此,环境因子对次级生产力的影响需结合相关因子进行综合考虑,并针对性地结合研究海域的基本环境特征进行分析和总结。海域水文条件(如水深、水流等)、底层环境(营养盐、水温、含氧量、底质类型等)和人类干扰(海水养殖、航行、垃圾倾倒等)均会不同程度地影响着大型底栖动物的分布特征和生存状况,从而决定大型底栖动物群落次级生产力的高低。综上分析可知,环境要素对次级生产力的影响会因调查站位、调查时间的不同而产生不同的结果。

3.4 P/B 值

P/B 系数又称为周转率, 是指在一定的时间内种群或群落的生产力与平均生物量的比, 该值高低与生物的生命周期有关, 可反映生态系统新陈代谢的快慢^[4]。本次调查胶州湾大型底栖动物的 P/B 值较小, 分布在 0.28/a ~ 1.25/a 之间; 在 P/B 值相对较低的站位中, 生物量贡献率较大的物种主要为菲律宾蛤仔、脉红螺、棘刺锚参、细雕刻肋海胆; 而 P/B 值较高的站位中, 主要的种类为丝异须虫等多毛类; 总平均 P/B 值为 0.47/a, 推测其物种的平均世代更替速度大约为 2.13 年一代, 低于大部分海域, 如东海(1.41/a)^[7]、莱州湾(1.59/a)^[9]、桑沟湾(1.45/a)^[54]。表明近年来胶州湾的底栖动物组成中个体小、新陈代谢快和生命周期短的物种所占比例低于其他海域。

4 结论

(1) 胶州湾大型底栖动物的次级生产力为 9.64 [g(AFDW)/(m²·a)], 湾口处和湾内北部均为高值中心区, 逐渐向四周递减, 湾口处 S9 站位出现的大量脉红螺是导致与以往分布趋势不同的主要原因。

(2) 在季节变化中, 次级生产力与生物量的变化趋势均为春季>冬季>夏季>秋季, 相比秋夏两季, 春冬两季获得较高的次级生产力与在 S9 站采获到大量脉红螺有关, 而秋、夏季在该站位的采获量为零。

(3) 2016—2017 年胶州湾年平均次级生产力比历年的偏低, 近两年岸线整治与生态修复工程项目的实施有一定程度的影响, 在生态修复的初期, 使得以往主要依靠养殖物种而获得较高次级生产力的海区, 其次级生产力可能出现较大程度地降低。

(4) 本次调查中显示湾内养殖场较多区域的次级生产力与底质类型有呈显著相关, 中值粒径越小的沉积类型更易于底栖动物的生存, 而溶解氧含量对湾外部海域的底栖动物具有显著影响。

致谢: 谨向中国海洋研究所宋金明研究员课题组提供的水环境因子数据表示感谢!

参考文献:

- [1] Shou L, Zeng J N, Liao Y B, et al. Seasonal distribution of macrozoobenthos and its relations to environmental factors in Oujiang River estuary sea area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(8): 1958-1964. [寿鹿, 曾江宁, 廖一波, 等. 瓯江口海域大型底栖动物分布及其与环境的关系[J]. 应用生态学报, 2009, 20(8): 1958-1964.]
- [2] Pelletier M C, Gold A J, Heltshe J F, et al. A method to identify estuarine macroinvertebrate pollution indicator species in the Virginian Biogeographic Province[J]. Ecological Indicators, 2010, 10(5): 1037-1048.
- [3] Brey T. Estimating productivity of macrobenthic invertebrates from biomass and mean individual weight[J]. Archive of Fishery and Marine Research, 1990, 32(4): 329-343.
- [4] Gong Z J, Xie P, Yan Y J. Theories and methods of studies on the secondary production of zoobenthos[J]. Journal of Lake Sciences, 2001, 13(1): 79-88. [龚志军, 谢平, 阎云君. 底栖动物次级生产力研究的理论与方法[J]. 湖泊科学, 2001, 13(1): 79-88.]
- [5] Jia S H, Shou L, Liao Y B, et al. Research progress and application evaluation of predictive models for secondary production of marine macrobenthos community[J]. Marine Science Bulletin, 2017, 36(4): 370-378. [贾胜华, 寿鹿, 廖一波, 等. 海洋大型底栖动物群落次级生产力估算模型研究进展及应用评价[J]. 海洋通报, 2017, 36(4): 370-378.]
- [6] Yu Z S, Zhang Z N, Han J. Primary study on secondary production of macrobenthos in Bohai Sea[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2001, 31(6): 867-871. [于子山, 张志南, 韩洁. 渤海大型底栖动物次级生产力的初步研究[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2001, 31(6): 867-871.]
- [7] Li X Z, Wang J B, Wang H F, et al. Secondary production of macrobenthos from the East China Sea[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2005, 11(4): 459-462. [李新正, 王金宝, 王洪法, 等. 东海大型底栖生物次级生产力研究[J]. 应用与环境生物学报, 2005, 11(4): 459-462.]
- [8] Li X Z, Wang H F, Zhang B L. The secondary production of macrobenthos in Jiaozhou Bay, Shandong[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2005, 36(6): 527-533. [李新正, 王洪法, 张宝琳. 胶州湾大型底栖动物次级生产力初探[J]. 海洋与湖沼, 2005, 36(6): 527-533.]
- [9] Li S W, Li F, Zhang Y, et al. Secondary productivity of macrobenthos in Laizhou Bay, East China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(1): 190-197. [李少文, 李凡, 张莹, 等. 莱州湾大型底栖动物的次级生产力[J]. 生态学杂志, 2014, 33(1): 190-197.]
- [10] Liu Y, Xian W W, Sun S C, et al. Primary studies on the biomass abundance and secondary production of macrobenthos in Changjiang estuary[J]. Periodical of Ocean University of China, 2008, 38(5): 749-756. [刘勇, 线薇薇, 孙世春, 等. 长江口及其邻近海域大型底栖动物生物量、丰度和次级生产力的初步研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2008, 38(5): 749-756.]
- [11] Jin L, Lin X C, Cai L Z. Study on secondary production of macrobenthos in shellfish-farming mudflat in Meizhou

- Bay[J]. *Marine Environmental Science*, 2009, 28(S1): 8-11. [金亮, 林秀春, 蔡立哲. 湄洲湾贝类养殖滩涂大型底栖动物次级生产力研究[J]. *海洋环境科学*, 2009, 28(S1): 8-11.]
- [12] Yan J, Zhuang P, Hou J L, et al. Secondary production of macrobenthos from intertidal in the Changjiang estuary and its impact factors[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2012, 18(6): 935-942. [严娟, 庄平, 侯俊利, 等. 长江口潮间带大型底栖动物次级生产力及其影响因素[J]. *应用与环境生物学报*, 2012, 18(6): 935-942.]
- [13] He B Y, Lai T H, Wang X, et al. Secondary productivity of benthic macrofaunal community in intertidal zone of Lianzhou Bay, China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(8): 2104-2112. [何斌源, 赖廷和, 王欣, 等. 廉州湾滨海湿地潮间带大型底栖动物群落次级生产力[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(8): 2104-2112.]
- [14] Yuan J M, Zhang H, Tang X H, et al. Community structure and secondary production of macrobenthos in intertidal zone of Jiangsu[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(11): 3357-3363. [袁健美, 张虎, 汤晓鸿, 等. 江苏潮间带大型底栖动物群落组成及次级生产力[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(11): 3357-3363.]
- [15] Cai L Z, Xu P, Fu S J, et al. Secondary productivity of macrobenthos in mangrove and salt marsh in Gaoqiao of Zhanjiang, Guangdong Province of South China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(4): 965-971. [蔡立哲, 许鹏, 傅素晶, 等. 湛江高桥红树林和盐沼湿地的大型底栖动物次级生产力[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(4): 965-971.]
- [16] Du F Y, Wang X H, Jia X P, et al. Variation characteristics of macrobenthos productivity in Daya Bay of South China Sea[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(4): 873-880. [杜飞雁, 王雪辉, 贾晓平, 等. 大亚湾大型底栖动物次级生产力变化特征[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(4): 873-880.]
- [17] Liu K, Lin H S, Wang J J, et al. Secondary productivity of macrozoobenthos in Xiamen coastal waters[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(12): 3409-3415. [刘坤, 林和山, 王建军, 等. 厦门近岸海域大型底栖动物次级生产力[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(12): 3409-3415.]
- [18] Wang Z Z, Zhang J L, Gong J X, et al. Study on the secondary productivity of macrozoobenthos in Binzhou shallow Sea waters[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2016, 13(21): 29-33, 3. [王志忠, 张金路, 巩俊霞, 等. 滨州浅海大型底栖动物次级生产力研究[J]. *长江大学学报(自科版)*, 2016, 13(21): 29-33, 3.]
- [19] Brey T. A collection of empirical relations for use in ecological Modelling[J]. *Naga*, 1999, 22(3): 24-28.
- [20] Brey T. Population dynamics in benthic invertebrates[OL]. <http://www.thomas-brey.de/science/virtualhandbook/navlog/index.html>.
- [21] Zhang C L, Xu B D, Ren Y P, et al. The spatio-temporal change in the secondary production of macrozoobenthos in the intertidal zone of Jiaozhou Bay[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(17): 5071-5080. [张崇良, 徐宾铎, 任一平, 等. 胶州湾潮间带大型底栖动物次级生产力的时空变化[J]. *生态学报*, 2011, 31(17): 5071-5080.]
- [22] Brey T. A multi-parameter artificial neural network model to estimate macrobenthic invertebrate productivity and production[J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2012, 10(8): 581-589.
- [23] Liu X D, Yu J Z, Zhang X H, et al. The secondary production of macrozoobenthos in Jiaozhou Bay[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2018, 34(6): 47-61. [刘旭东, 于建钊, 张晓红, 等. 胶州湾大型底栖动物的次级生产力[J]. *中国环境监测*, 2018, 34(6): 47-61.]
- [24] Tumbiolo M L, Downing J A. An empirical model for the prediction of secondary production in marine benthic invertebrate populations[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1994, 114: 165-174.
- [25] Ji Y L, Zhao N, Yang C P, et al. Primary study on secondary production of macrobenthos in western water of Liaodong Bay[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2015, 45(4): 53-58. [纪莹璐, 赵宁, 杨传平, 等. 辽东湾西部海域大型底栖动物群落次级生产力初探[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2015, 45(4): 53-58.]
- [26] Yu H Y, Li X Z, Li B Q, et al. The species diversity of macrobenthic fauna in Jiaozhou Bay[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2): 416-422. [于海燕, 李新正, 李宝泉, 等. 胶州湾大型底栖动物生物多样性现状[J]. *生态学报*, 2006, 26(2): 416-422.]
- [27] Yang M, Li X Z, Xu Y, et al. Seasonal variations in macrobenthic communities in the subtidal zones of Jiaozhou Bay[J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24(7): 820-830. [杨梅, 李新正, 徐勇, 等. 胶州湾潮下带大型底栖动物群落季节变化的生物多样性[J]. *生物多样性*, 2016, 24(7): 820-830.]
- [28] Bi H S, Sun S, Sun D Y. Changes of macrobenthic communities in Jiaozhou Bay[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2001, 32(2): 132-138. [毕洪生, 孙松, 孙道元. 胶州湾大型底栖生物群落的变化[J]. *海洋与湖沼*, 2001, 32(2): 132-138.]
- [29] Wang J B, Li X Z, Wang H F. Ecological characteristics of dominant polychaete species from the Jiaozhou Bay[J]. *Acta Zoologica Sinica*, 2006, 52(1): 63-69. [王金宝, 李新正, 王洪法. 胶州湾多毛类环节动物优势种的生态特点[J]. *动物学报*, 2006, 52(1): 63-69.]
- [30] Li X Z, Wang H F, Yu H Y, et al. Relationship between distribution of echinoderms and environmental factors in the Jiaozhou Bay[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2004, 10(5): 618-622. [李新正, 王洪法, 于海燕, 等. 胶州湾棘皮动物的数量变化及与环境因子的关系[J]. *应用与环境生物学报*, 2004, 10(5): 618-622.]
- [31] Yu H Y, Li X Z, Li B Q, et al. Distribution of macrobenthic crustacean in Jiaozhou bay[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2005, 36(4): 289-295. [于海燕, 李新正, 李宝泉, 等. 胶州湾大型底栖甲壳动物数量动态变化[J]. *海洋与湖沼*, 2005, 36(4): 289-295.]
- [32] Yuan W, Zhang Z N, Yu Z S. Secondary productivity of macrobenthos in Jiaozhou Bay[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(1): 145-150. [袁伟, 张志南, 于子山. 胶州湾西部海域大型底栖动物次级生产力初步研究[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(1): 145-150.]
- [33] Tian S Y, Zhang W L, Yu Z S, et al. Abundance, biomass

- and secondary production of macrobenthos in the Jiaozhou Bay, China[J]. Marine Sciences, 2010, 34(6): 81-87. [田胜艳, 张文亮, 于子山, 等. 胶州湾大型底栖动物的丰度、生物量和生产量研究[J]. 海洋科学, 2010, 34(6): 81-87.]
- [34] Standardization Administration of the People's Republic of China. Specifications for Oceanographic Survey Part 6: Marine Biological Survey GB/T 12763.6-2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. [中国国家标准化管理委员会. 海洋调查规范第6部分: 海洋生物调查 GB/T 12763.6-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.]
- [35] Ministry of agriculture of the People's Republic of China. NY/T 1121. 6-2006 Soil testing part 6: Method for determination of soil organic matter[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006. [中华人民共和国农业部. NY/T 1121.6-2006 土壤检测第6部分: 土壤有机质的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.]
- [36] Liu Z J, Gong Y F, Zhou S W, et al. A comparative study on the grain-size parameters of marine sediments derived from three different computing methods[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 35(3): 179-188. [刘志杰, 公衍芬, 周松望, 等. 海洋沉积物粒度参数3种计算方法的对比研究[J]. 海洋学报(中文版), 2013, 35(3): 179-188.]
- [37] Liu Z J, Yin R G. Discussion of the shallow sea sediment classification system[J]. Marine Science Bulletin, 2011, 30(2): 194-199. [刘志杰, 殷汝广. 浅海沉积物分类方法探讨[J]. 海洋通报, 2011, 30(2): 194-199.]
- [38] Hu G, Bi S P, Zhang Y, et al. Distribution pattern and depositional mechanism of surface sediments offshore southern Shandong peninsula[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(6): 17-23. [胡刚, 毕世普, 张勇, 等. 山东半岛中南部滨浅海地区表层沉积物分布特征及形成机制[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(6): 17-23.]
- [39] Wang Z B, Li R H, Zhang Z X, et al. Grain size composition and distribution pattern of seafloor sediments in Bohai and adjacent areas[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2016, 36(6): 101-109. [王中波, 李日辉, 张志珣, 等. 渤海及邻近海区表层沉积物粒度组成及沉积分区[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(6): 101-109.]
- [40] Qingdao Marine Development Bureau. Qingdao marine environment bulletin, 2017[EB/OL]. <http://ocean.qingdao.gov.cn/n12479801/n32205288/180321100520491850.html>. [青岛市海洋发展局. 2017年青岛市海洋环境公报[EB/OL]. <http://ocean.qingdao.gov.cn/n12479801/n32205288/180321100520491850.html>.]
- [41] Bi H S. The environmental influences on macrobenthos in Jiaozhou Bay[J]. Marine Sciences, 1997, 21(1): 37-40. [毕洪生. 胶州湾环境对底栖生物的影响[J]. 海洋科学, 1997, 21(1): 37-40.]
- [42] Zhang C L. Study on community ecology of macrobenthos in the tidal flat wetland of Jiaozhou Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012: 1-8. [张崇良. 胶州湾潮滩湿地大型底栖动物群落生态学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012: 1-8.]
- [43] Li D P, Yang Y Q, Dong H Y, et al. Cause analysis and synoptic characteristics for outbreaks of enteromorpha around Qingdao in 2008[J]. Periodical of Ocean University of China, 2009, 39(6): 1165-1170. [李德萍, 杨育强, 董海鹰, 等. 2008年青岛海域浒苔大爆发天气特征及成因分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2009, 39(6): 1165-1170.]
- [44] Liu J M, Ren F H, Yang H. Preliminary study on the ecological characteristic of *Rapana venosa* (Valenciennes)[J]. Fisheries Science, 2003, 22(1): 17-18. [刘吉明, 任福海, 杨辉. 脉红螺生态习性的初步研究[J]. 水产科学, 2003, 22(1): 17-18.]
- [45] Li X Z, Yu H Y, Wang Y Q, et al. Study on species diversity of macrobenthic fauna in Jiaozhou Bay[J]. Chinese Biodiversity, 2001, 9(1): 80-84. [李新正, 于海燕, 王永强, 等. 胶州湾大型底栖动物的物种多样性现状[J]. 生物多样性, 2001, 9(1): 80-84.]
- [46] Qingdao Marine Development Bureau. Qingdao marine environment bulletin, 2016[EB/OL]. <http://ao.gov.cn/n12479801/n32205288/170418102939607318.html>. [青岛市海洋发展局. 2016年青岛市海洋环境公报[EB/OL]. <http://ocean.qingdao.gov.cn/n12479801/n32205288/170418102939607318.html>.]
- [47] Ghodrati Shojaei M, Gutow L, Dannheim J, et al. Common trends in German Bight benthic macrofaunal communities: Assessing temporal variability and the relative importance of environmental variables[J]. Journal of Sea Research, 2016, 107: 25-33.
- [48] Tu Do V, de Montaudouin X, Blanchet H, et al. Seagrass burial by dredged sediments: Benthic community alteration, secondary production loss, biotic index reaction and recovery possibility[J]. Marine Pollution Bulletin, 2012, 64(11): 2340-2350.
- [49] Xu Z D. Preliminary study of functional groups and ecological study of macrofauna in Jiaozhou Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015: 59-63. [徐兆东. 胶州湾大型底栖动物生态学研究及功能群初探[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015: 59-63.]
- [50] Wang J B, Li X Z, Wang H F, et al. Ecological study on the macrobenthos in the Jiaozhou Bay in 2005-2009[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2011, 42(5): 728-737. [王金宝, 李新正, 王洪法, 等. 2005-2009年胶州湾大型底栖动物生态学研究[J]. 海洋与湖沼, 2011, 42(5): 728-737.]
- [51] Fu F F, Li C H, Xu S N. Analysis of the characteristics of the macrobenthic community of Jiaozhou Bay in winter[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(1): 159-168. [符芳菲, 李纯厚, 徐姗楠. 胶州湾冬季大型底栖动物群落结构及其与环境因子的相关性[J]. 中国水产科学, 2018, 25(1): 159-168.]
- [52] Li X Z, Zhang B L, Wang H F. Secondary production of macrobenthos from the anchovy spawning ground in the southern Yellow Sea[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2005, 11(3): 324-327. [李新正, 张宝琳, 王洪法. 南黄海鳀鱼产卵场大型底栖生物次级生产力研究[J]. 应用与环境生物学报, 2005, 11(3): 324-327.]
- [53] Qu F Y. The ecological study of macrobenthos in North Yellow sea in spring and autumn[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010: 58-67. [曲方圆. 北黄海春秋大型底栖动物生态学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010:

- 58-67.]
- [54] Wang Z X, Sun P X, Liu C X, et al. Secondary production of macrobenthos in the Sanggou Bay, Shandong, China[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2011, 17(4): 495-498. [王宗兴, 孙丕喜, 刘彩霞, 等. 桑沟湾大型底栖动物的次级生产力[J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(4): 495-498.]
- [55] Yuan J M, Zhang H, Ben C K, et al. Macrobenthic community composition and its secondary productivity in the Haizhou Bay[J]. Marine Fisheries, 2018, 40(1): 19-26. [袁健美, 张虎, 贲成恺, 等. 海州湾大型底栖动物群落组成及次级生产力[J]. 海洋渔业, 2018, 40(1): 19-26.]
- [56] Wang S H, Wang Z Z, Ji X X, et al. The preliminary study on secondary production of macrobenthos inside and outside of the Rushan Bay[J]. Periodical of Ocean University of China, 2016, 46(6): 134-141. [王淑慧, 王振钟, 季相星, 等. 乳山湾内外大型底栖动物群落次级生产力初步研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(6): 134-141.]
- [57] Suess E. Particulate organic carbon flux in the oceans—surface productivity and oxygen utilization[J]. Nature, 1980, 288(5788): 260-263.
- [58] Zhou X P, Cai L Z, Liang J Y, et al. The secondary production of macrobenthos in Xiamen sea area[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2008, 47(6): 902-906. [周细平, 蔡立哲, 梁俊彦, 等. 厦门海域大型底栖动物次级生产力的初步研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2008, 47(6): 902-906.]
- [59] Ren Z H. The diversity of community and the ecology of macrobenthos in Laizhou Bay[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016: 52-57. [任中华. 莱州湾及黄河口海域大型底栖生物群落结构多样性及其生态学研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016: 52-57.]

Secondary productivity of macrozoobenthos in Jiaozhou Bay

QUAN Qiumei^{1,2}, XU Shannan¹, XIAO Yayuan¹, LI Chunhou¹

1. Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China;
2. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: Based on the data obtained from four cruise investigations during 2016-2017, the secondary production and the P/B ratio of the macrobenthos in Jiaozhou Bay were analyzed using Brey's empirical formula (first devised by Brey in 1990), and the relationship between environmental factors and secondary productivity was analyzed with Pearson's correlation. The results showed that the annual mean abundance was 19.17 ind/m², mean biomass in ash-free dry weight (AFDW) was 20.57 g/m², mean secondary productivity in AFDW was 9.64 g/(m²·a), and the mean P/B ratio was 0.47/a. In terms of spatial distribution, sampling stations with high secondary productivity were mainly located in areas near aquaculture systems and coastal sea areas, highlighting these as high productivity centers. For seasonal distribution, the seasonal variation of secondary productivity was spring>winter>summer>autumn. The correlation analysis indicated that the relationship between environmental factors and secondary productivity was not significant ($P>0.05$). The secondary productivity near the aquaculture area in the bay was closely correlated with sediment type, while being greatly correlated with dissolved oxygen outside the bay. Comparing the results of the present study with other similar studies, secondary productivity in Jiaozhou Bay was higher than that of most sea areas of North China, but the P/B ratio was lower. The results showed that species with small body size, short life and quick metabolism were accounted for less in the community composition of Jiaozhou Bay.

Key words: macrobenthos; secondary production; P/B ratio; Jiaozhou Bay

Corresponding author: LI Chunhou, E-mail: scslch@vip.163.com; XU Shannan, E-mail: xushannan@scsfri.ac.cn