

胶州湾大型底栖动物群落的年次级生产力及其影响因素的研究*

陈晨¹, 杨湘君¹, 崔雯瑶², 张蒙生³, 于子山^{1**}

(1. 中国海洋大学海洋生命学院, 山东 青岛 266003; 2. 海昌(中国)投资有限公司, 上海 200050; 3. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200050)

摘要: 根据 2018 年胶州湾 20 个站位 4 个季节的大型底栖动物调查资料, 利用 Brey(2001)模型对大型底栖动物群落的次级生产力进行了估算, 并对影响群落次级生产力的因子进行了研究。结果表明: 胶州湾大型底栖动物年平均丰度为 $1\,904.80 \text{ ind.} \cdot \text{m}^{-2}$, 年平均生物量为 $87.018\,8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 群落年次级生产力为 $45.284\,3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。大型底栖动物群落次级生产力呈现出由胶州湾中部向南北两侧增大的趋势。养殖种菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)和长牡蛎(*Crassostrea gigas*)的次级生产力占胶州湾大型底栖动物次级生产力的 89.12%。沉积物中叶绿素 *a* 含量和底盐是影响群落次级生产力的重要环境因子。

关键词: 次级生产力; 大型底栖动物; 环境因子; Brey(2001)模型; 胶州湾

中图分类号: Q958.8

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2021)09-045-12

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20210034

引用格式: 陈晨, 杨湘君, 崔雯瑶, 等. 胶州湾大型底栖动物群落的年次级生产力及其影响因素的研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, 51(9): 45-56.

Chen Chen, Yang Xiangjun, Cui Wenyao, et al. Study on annual secondary production of macrobenthos and its influencing factors in Jiaozhou Bay[J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, 51(9): 45-56.

大型底栖动物在海洋生态系统的物质循环和能量流动中有着举足轻重的作用, 在食物网中, 它主要承担着消费者和分解者的功能^[1-2]。次级生产力是指动物在生长和繁殖过程中增加的生物量或存储的能量^[3]。研究大型底栖动物群落的次级生产力, 可以了解大型底栖动物在生态系统的物质循环和能量流动过程中所起的作用, 对海洋底栖生态系统的深入研究以及海洋生物资源的合理利用, 也有一定帮助^[4-6]。

国外学者对于大型底栖动物次级生产力的研究可追溯到 1919 年, Boysen-Jensen 对莱姆峡湾单个种群生产力的计算^[1]。1970 年代后, 关于大型底栖动物种群次级生产力的研究逐渐增多, 采用的是同生群法和非同生群法, 这些方法结果较为准确, 但野外采样工作量大, 计算过程也十分复杂^[7-8]。有鉴于此, Robertson 根据 Mann 等^[9]对 P/B 值的研究成果, 提出了估算大型底栖动物种群次级生产力的回归方程。之后, Schwinghamer^[10]和 Edgar^[11]又分别提出了大型底栖动物种群次级生产力与个体体重关系的估算公式。1990 年代后, Brey^[5]相继提出了 Brey(1990)、Brey

(2001)和 Brey(2012)等大型底栖动物种群次级生产力与个体重量、生境类型、食性及移动方式等关系的公式^[12]。以上这些公式, 可以使人们依据比较简单的野外调查数据, 就能估算出种群的次级生产力。

国内对于大型底栖动物种群次级生产力的研究起步较晚且较少, 目前仅有吴宝玲等、周一兵等、林岿璇等和闫云君等^[13-16], 报道了多齿围沙蚕(*Perinereis nuntia*)、日本刺沙蚕(*Neanthes japonica*)、小头虫(*Capitella capitata*)、幽蚊(*Chaoborus* sp.)和圆扁螺(*Hippuritis* sp.)的次级生产力, 采用了同生群法和非同生群法。

1990 年代起, 随着海洋生态动力学研究的深入, 人们需要定量了解作为食物网中重要一环的底栖动物, 在能流和物流中所起的作用, 如生产量等, 亦即整个底栖动物群落的生产力。而关于群落的次级生产力, 没有现成的估算方法。于子山等^[17]首次提出了估算大型底栖动物群落年次级生产力的简单方法, 就是将野外获得的大型动物的年平均丰度和年平均生物量数据, 利用 Brey(1990)模型, 在每站逐种计算年次级生产力,

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(41576153)资助

Supported by the National Natural Science Foundation of China(41576153)

收稿日期: 2021-01-24; 修订日期: 2021-02-21

作者简介: 陈晨(1996-), 男, 硕士生, 研究方向为海洋底栖生物生态学。E-mail: 1694708455@qq.com

** 通讯作者: E-mail: yu_zishan@ouc.edu.cn.

然后将该站位出现的所有种的次级生产力相加,得到该站位群落的年次级生产力,由此得到整个渤海的大型底栖动物年次级生产力为 $6.49 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。此后,多位学者^[3,8,18-33]用此逐种累加的方法,使用 Brey (1990)、Brey(2001)和 Brey(2012)等模型,展开了对胶州湾、莱州湾、乳山湾、海州湾和大亚湾等海域大型底栖动物次级生产力的研究。

胶州湾是中国北方典型的半封闭海湾,湾周围河流提供了丰富的营养盐^[18],使湾内拥有非常高的生物多样性和生产力,是中国开展海洋生态学研究最早的海湾之一。关于胶州湾大型底栖动物群落次级生产力的研究始于 2005 年,张崇良等^[8]利用 Brey(1990)模型,研究了胶州湾西北部潮间带大型底栖动物的次级生产力;袁伟等^[20]利用 Brey(1990)模型,研究了胶州湾西部海域大型底栖动物的次级生产力;刘旭东等^[32]基于春夏秋三个季节的资料,用 Brey(1990)、Brey(2001)和 Brey(2012)模型,分别计算了胶州湾大型底栖动物次级生产力,得出 Brey(2001)模型与 Brey(2012)模型计算结果差异不显著的结论;李新正等^[18]和王金宝等^[22]利用 Brey(1990)模型,研究了 1998—2004 和 2005—2009 年间,胶州湾大型底栖动物次级生产力长期的变化;全秋梅等^[33]利用 Brey(1990)模型,对比了胶州湾内外大型底栖动物次级生产力的差别。上述研究为胶州湾大型底栖动物次级生产力的研究,奠定了基础。但这些研究多使用的是最原始的 Brey(1990)模型;或因为站位设置不够多,导致未能覆盖整个胶州湾海域,如研究中均未涉及胶州湾的牡蛎养殖在胶州湾大型底栖动物次级生产力中的贡献等,因此有必要对胶州湾大型底栖动物群落的次级生产力进行更深入的研究。另外,胶州湾大型底栖动物的群落次级生产力,受哪些环境因素的影响?目前仅见全秋梅等^[33]给出的胶州湾大型底栖动物的次级生产力与环境因子的相关程度均不显著,这方面的研究也有待继续深入。

本研究根据 2018 年春夏秋冬四个季节在胶州湾海域均匀设置的 20 个站位的调查资料,利用 Brey(2001)模型,估算胶州湾大型底栖动物群落年次级生产力,分析养殖贝类在胶州湾大型底栖动物次级生产力中的贡献,探讨大型底栖动物群落年次级生产力与沉积物粒度、有机质、叶绿素及温盐深等环境因子的关系,并评估大型底栖动物群落年次级生产力与海域的环境承载量,为胶州湾底栖生态系统动力学的深入研究,以及底栖动物资源的持续利用,提供参考。

1 材料和方法

1.1 调查海域

于 2018 年 1 月(冬季)、5 月(春季)、9 月(夏季)、11 月(秋季)对胶州湾海域 20 个站位的大型底栖动物调查取样,调查船为“天使 1 号”,站位分布如图 1 所示。

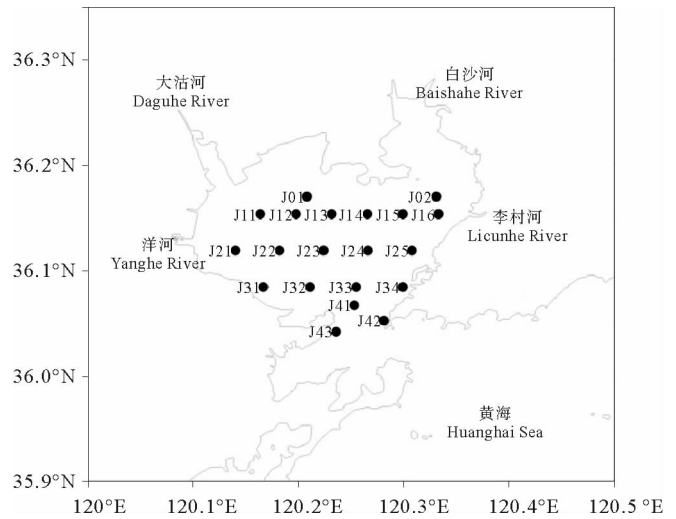


图 1 胶州湾海域大型底栖动物采样站位

Fig.1 Sampling stations of macrobenthos in Jiaozhou Bay

1.2 样品采集与处理

使用采样面积为 0.05 m^2 的 HNM 箱式采泥器采集样品,每站采样 3 次,合为一个样品。现场分选沉积物泥样所用网筛孔径为 0.5 mm ,留在筛子上的标本和渣滓全部装样品瓶,5%福尔马林溶液固定。每站取一定量的表层沉积物, $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 冷冻保存,用于沉积物粒度、有机质和叶绿素的测定。使用船载 CTD 仪现场测定各站位的水深、底温和底盐。

在实验室对大型底栖动物进行分选、鉴定、计数和称重。其中管栖多毛类去管称重,软体动物、寄居蟹去壳称重,称重(湿重)使用的电子天平感量为 0.0001 g 。野外及实验室内样品的采集和处理,均按《海洋调查规范:第 6 部分海洋生物调查》^[34]进行。

沉积物中有机质含量的测定采用重铬酸钾—硫酸氧化法^[35]。沉积物粒度利用 Cilas940L 型激光粒度仪测定,部分站位因底质颗粒较大采用筛析法^[35]。沉积物中叶绿素 *a* (Chl *a*) 和脱镁叶绿素 *a* (Ph *a*) 含量的测定采用荧光分光光度法^[34]。

1.3 数据处理

利用相对重要性指数 (IRI)^[36] 确定胶州湾大型底栖动物优势种。计算公式为:

$$IRI = (W + N) \times F.$$

式中: W 为物种生物量占总生物量的百分比; N 为物种丰度占总丰度的百分比; F 为物种出现频率。

Brey(2001)模型^[37]:

$$\text{Lg}(P/B) = 7.947 - 2.294 \text{lg}(M) - 2409.856 / (T + 273) + 0.168 / D +$$

$$0.194 Sub T + 0.180 InEpi + 0.277 MoEpi + 0.174 Taxon1 - 0.188 Taxon2 + 0.33 Taxon3 - 0.062 Habitat1 + 582.851 \lg(M)/(T+273)$$

式中: P 为大型底栖动物年均次级生产力, $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; M 为大型底栖动物年平均个体体重能值, kJ ; T 为调查海域平均底温, $^{\circ}\text{C}$; D 为调查海域平均水深, m ; B 为大型底栖动物年平均生物量能值, $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; $SubT$ 为栖息地类型: 潮下带值为 1, 潮间带为 0; $InEpi$ 为栖息方式: 底内动物值为 1, 底表动物为 0; $MoEpi$ 为移动

方式: 移动动物值为 1, 固着动物为 0; $Taxon$ 为动物类群, $Taxon1$: 多毛类或甲壳类值为 1, 其它类群为 0; $Taxon2$: 棘皮动物值为 1, 其它类群为 0; $Taxon3$: 昆虫值为 1, 其它类群为 0; $Habitat1$ 为生境类型: 湖泊生境值为 1, 其它生境值为 0。

该模型需要将湿重数据转换为能值, 但是为方便后续与历史资料比较, 还需要将模型的结果转换为去灰分干重, 转换关系见表 1^[7,24]。

表 1 Brey(2001)模型中各参数转换关系

Table 1 Transformation relation of each paramete in Brey(2001)model

类群 Groups	湿重→去灰分干重 Wet weight/g→AFDW/g	去灰分干重→能值 AFDW/g→Emergy/kJ	能值→去灰分干重 Emergy/kJ→AFDW/g
珊瑚虫纲 Anthozoa	0.138	21.54	0.046 43
涡虫纲 Turbellaria	0.211	24.82	0.040 29
多毛纲 Polychaeta	0.145	23.33	0.042 86
方格星虫纲 Sipunculidea	0.111	23.33	0.042 86
多板纲 Polyplacophora	0.144	23.04	0.043 40
腹足纲 Gastropoda	0.144	23.04	0.043 40
双壳纲 Bivalvia	0.144	23.04	0.043 40
甲壳纲 Crustacea	0.169	22.57	0.044 31
海参纲 Holothuroidea	0.085	22.59	0.044 27
蛇尾纲 Ophiuroidea	0.090	21.75	0.045 98
硬骨鱼纲 Osteichthyes	0.251	25.57	0.039 11
其它类 Others	0.120	22.30	0.044 84

本研究将 2018 年四个季节所采到的每种大型底栖动物丰度和生物量取平均值, 作为年平均丰度和年平均生物量, 利用 Brey(2001)模型估算各站位每个物种的年次级生产力, 然后将这些计算结果相加, 得到每个站位大型底栖动物群落年次级生产力。本文中生物量和次级生产力结果均为去灰分干重结果。

使用 SPSS 22.0 软件进行次级生产力与环境因子的 Pearson 相关分析。

2 结果

2.1 胶州湾大型底栖动物种类组成和优势种

本研究共采集大型底栖动物 354 种, 其中多毛类 124 种, 甲壳类 119 种, 软体动物 87 种, 棘皮动物 8 种, 其它类群 16 种, 多毛类、甲壳类和软体动物的物种数占总物种数的 93.2%。冬、春季物种数最多, 夏季次之, 秋季最少; 各季节大型底栖动物的物种组成类似, 都是多毛类物种数最多, 甲壳类、软体动物和棘皮动物次之(见表 2)。

表 2 不同季节胶州湾大型底栖动物物种组成及其物种数

Table 2 Species composition and species number of macrobenthos in Jiaozhou Bay in different seasons

季节 Seasons	多毛类 Polychaetes	软体动物 Molluscas	甲壳类 Crustaceans	棘皮动物 Echinoderms	其它 Others	总计 Totals
冬季 Winter	73	54	62	4	13	206
春季 Spring	76	42	72	4	14	208
夏季 Summer	70	45	52	6	17	190
秋季 Autumn	67	25	44	4	8	148

本研究四个季节的大型底栖动物优势种如表 3 所示,优势种以多毛类和软体动物为主,其中,菲律宾蛤仔 *R. philippinarum* 在四个季节中均为第一优势种,且相对重要性指数明显高于其它优势种。

2.2 胶州湾大型底栖动物的丰度、生物量和年次级生产力
胶州湾各站位大型底栖动物的丰度、生物量和年次级生产力的结果如表 4 所示。

表 3 不同季节胶州湾大型底栖动物优势种

Table 3 Dominant species of macrobenthos in Jiaozhou Bay in different seasons

冬季 Winter		春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn	
优势种 Dominant species	I_{RI}	优势种 Dominant species	I_{RI}	优势种 Dominant species	I_{RI}	优势种 Dominant species	I_{RI}
菲律宾蛤仔	5 777	菲律宾蛤仔	4 426	菲律宾蛤仔	1 594	菲律宾蛤仔	1 722
纽虫	678	中华螺赢蜚	1 376	中蚓虫	851	寡鳃齿吻沙蚕	1 010
中蚓虫	577	寡鳃齿吻沙蚕	591	不倒翁虫	475	不倒翁虫	755
马丁海稚虫	545	不倒翁虫	356	巴氏钩毛虫	419	豆形胡桃蛤	488
长牡蛎	447	中蚓虫	335	长牡蛎	343	中蚓虫	439

表 4 胶州湾各站位大型底栖动物丰度、生物量和年次级生产力

Table 4 The abundance, biomass and secondary production of macrobenthos at each station in Jiaozhou Bay

站位 Station	丰度 Abundance /(ind. · m ⁻²)	生物量 Biomass /(g · m ⁻²)	年次级生产力 Secondary production /(g · m ⁻² · a ⁻¹)	年次级生产力(不计养殖种) Secondary production (Regardless of cultured species) /(g · m ⁻² · a ⁻¹)
J01	2 656.67	121.993 4	106.242 2	2.624 2
J02	3 997.50	328.341 3	123.933 8	14.953 0
J11	2 361.92	56.099 9	56.385 0	3.519 8
J12	2 228.33	104.407 5	63.467 4	8.837 0
J13	1 696.67	54.381 6	47.327 0	2.768 7
J14	1 958.33	195.803 9	117.925 5	5.062 7
J15	1 025.83	416.861 9	93.510 1	6.260 1
J16	2 361.67	127.481 1	46.100 1	6.418 2
J21	1 308.33	11.566 1	8.490 7	6.242 7
J22	691.67	1.195 9	1.586 0	1.522 4
J23	740.83	28.910 1	9.442 0	9.439 1
J24	795.00	3.353 8	2.260 7	1.440 5
J25	690.00	1.631 4	1.815 4	1.691 8
J31	2 556.67	240.614 4	169.027 3	2.458 8
J32	1 613.33	3.657 1	3.802 5	3.281 2
J33	1 280.00	0.901 1	1.598 4	1.597 9
J34	1 370.00	7.028 9	4.587 1	4.525 2
J41	2 928.33	7.832 6	9.287 0	9.276 3
J42	1 486.67	5.141 4	3.754 6	3.754 6
J43	4 348.33	23.171 8	35.143 8	2.834 9
平均值 Average	1 904.80	87.018 8	45.284 3	4.925 5

胶州湾大型底栖动物年平均丰度为 1 904.80 ind./m², 丰度分布呈现出由胶州湾中部向南北两侧增大的趋势(见图 2), 丰度最高的站位为湾口附近 J43 (4 348.33 ind./m²), 菲律宾蛤仔(*R. philippinarum*) 的丰度占该站位总丰度的 61.08%。丰度最低值出现在胶州湾中部的 J25 站位, 该站位大型底栖动物的丰度仅为 690.00 ind./m²。

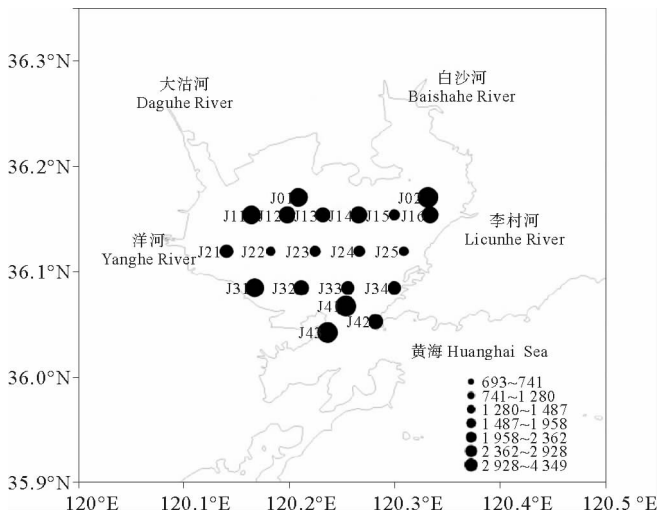


图 2 胶州湾大型底栖动物丰度平面分布(丰度单位: ind. · m⁻²)

Fig.2 Distribution of abundance of macrobenthos in Jiaozhou Bay(Abundance unit: ind. · m⁻²)

胶州湾大型底栖动物年平均生物量为 87.018 8 g/m², 生物量分布也呈现出由胶州湾中部向南北两侧增大的趋势(见图 3)。软体动物生物量占大型底

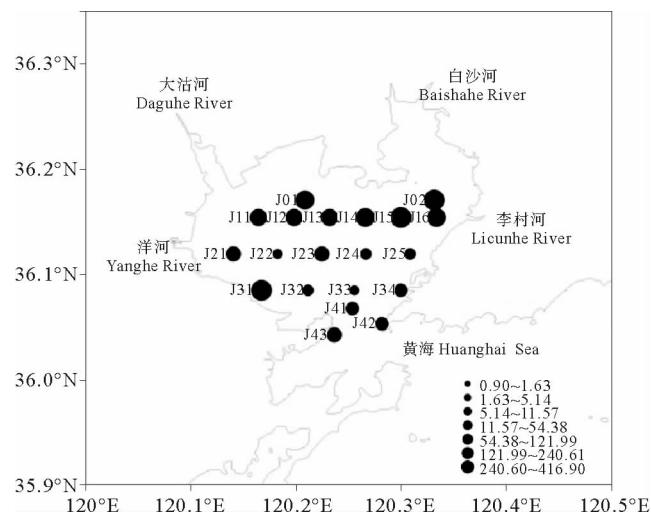


图 3 胶州湾大型底栖动物生物量平面分布(生物量单位: g · m⁻²)

Fig.3 Distribution of biomass of macrobenthos in Jiaozhou Bay (Biomass unit: g · m⁻²)

栖动物生物量的 96.60%, 长牡蛎(*C. gigas*) 和菲律宾蛤仔的生物量占软体动物生物量的 49.96% 和 41.84%。生物量最高的站位为 J15 (416.861 9 g · m⁻²), 其次为 J02 (328.341 3 g · m⁻²), 这两个站位均采集到大量的长牡蛎。生物量最低和次低的站位为 J33 (0.901 1 g · m⁻²) 和 J22 (1.195 9 g · m⁻²), 这 2 个站位均位于胶州湾中部海域。

将 20 个站位的次级生产力平均, 得到胶州湾大型底栖动物群落年次级生产力为 45.284 3 g · m⁻² · a⁻¹, 它也呈现出由胶州湾中部向南北两侧增大的趋势(见图 4), 其最高值的站位为 J31 (169.027 3 g · m⁻² · a⁻¹), J02 站位次之, 为 123.933 8 g · m⁻² · a⁻¹, 这两个站位都出现了大量的菲律宾蛤仔。J22 站位的年次级生产力最小, 仅为 1.586 0 g · m⁻² · a⁻¹, 该站位物种组成以多毛类、端足类为主, 物种的丰度和生物量均较小。

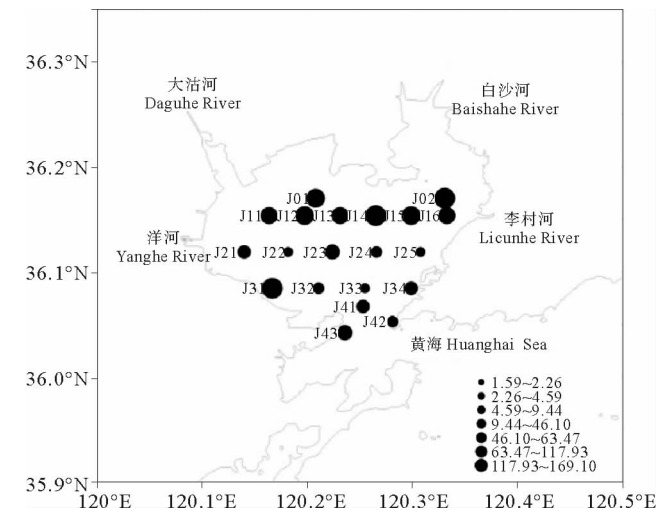


图 4 胶州湾大型底栖动物年次级生产力的平面分布(次级生产力单位: g · m⁻² · a⁻¹)

Fig.4 Distribution of secondary production of macrobenthos estimated by Brey(2001) model in Jiaozhou Bay (Secondary production unit: g · m⁻² · a⁻¹)

2.3 胶州湾大型底栖动物次级生产力与环境因子相关性

本研究计养殖种的和不计养殖种的次级生产力与环境因子相关性分析结果见表 5、6, 由表 5 可知, 计养殖种的胶州湾大型底栖动物群落年次级生产力与底盐呈显著负相关($P < 0.05$), 与沉积物中叶绿素 *a* 呈显著正相关($P < 0.05$), 与其余环境因子无显著相关性。由表 6 可知, 不计养殖种的胶州湾大型底栖动物群落年次级生产力与环境因子无显著相关性。

表5 大型底栖动物年次级生产力与环境因子的相关性

Table 5 Correlation coefficients between secondary production of macrobenthos and environmental variables

参数 ^①	年次级生产力 ^②	底温 ^③	底盐 ^④	水深 ^⑤	平均粒径 ^⑥	中值粒径 ^⑦	叶绿素 <i>a</i> ^⑧	脱镁叶绿素 <i>a</i> ^⑨	有机质 ^⑩
年次级生产力 ^②	1	0.044	-0.455*	-0.434	-0.346	-0.354	0.468*	0.294	-0.332
底温 ^③	0.044	1	0.407	0.431	0.355	0.488*	-0.037	-0.322	0.293
底盐 ^④	-0.455*	0.407	1	0.636**	0.605**	0.578**	-0.189	-0.374	0.343
水深 ^⑤	-0.434	0.431	0.636**	1	0.607**	0.654**	-0.287	-0.527*	0.010
平均粒径 ^⑥	-0.346	0.355	0.605**	0.607**	1	0.935**	-0.635**	-0.775**	-0.035
中值粒径 ^⑦	-0.354	0.488*	0.578**	0.654**	0.935**	1	-0.574**	-0.743**	0.074
叶绿素 <i>a</i> ^⑧	0.468*	-0.037	-0.189	-0.287	-0.635**	-0.574**	1	0.858**	0.064
脱镁叶绿素 <i>a</i> ^⑨	0.294	-0.322	-0.374	-0.527*	-0.775**	-0.743**	0.858**	1	0.177
有机质 ^⑩	-0.332	0.293	0.343	0.010	-0.035	0.074	0.064	0.177	1

注：* . 相关性在 0.05 层上显著(双尾)；** . 相关性在 0.01 层上显著(双尾)。

Note: Correlation was significant at 0.05 level(double-tailed);Correlation was significant at 0.05 the level(double-tailed).

①Parameters;②Secondary production;③Temperature;④Salinity;⑤Depth;⑥Average particle size;⑦Median diameter;⑧Chlorophyll *a*;⑨Pheophytin *a*;⑩Organic matter

表6 不计养殖种的大型底栖动物年次级生产力与环境因子的相关性

Table 6 Correlation coefficients between secondary production of macrobenthos without cultured species and environmental variables

参数 ^①	年次级生产力 ^②	底温 ^③	底盐 ^④	水深 ^⑤	平均粒径 ^⑥	中值粒径 ^⑦	叶绿素 <i>a</i> ^⑧	脱镁叶绿素 <i>a</i> ^⑨	有机质 ^⑩
年次级生产力 ^②	1	0.169	-0.009	-0.064	-0.113	-0.033	0.249	0.323	0.143
底温 ^③	0.169	1	0.407	0.431	0.355	0.488*	-0.037	-0.322	0.293
底盐 ^④	-0.009	0.407	1	0.636**	0.605**	0.578**	-0.189	-0.374	0.343
水深 ^⑤	-0.064	0.431	0.636**	1	0.607**	0.654**	-0.287	-0.527*	0.010
平均粒径 ^⑥	-0.113	0.355	0.605**	0.607**	1	0.935**	-0.635**	-0.775**	-0.035
中值粒径 ^⑦	-0.033	0.488*	0.578**	0.654**	0.935**	1	-0.574**	-0.743**	0.074
叶绿素 <i>a</i> ^⑧	0.249	-0.037	-0.189	-0.287	-0.635**	-0.574**	1	0.858**	0.064
脱镁叶绿素 <i>a</i> ^⑨	0.323	-0.322	-0.374	-0.527*	-0.775**	-0.743**	0.858**	1	0.177
有机质 ^⑩	0.143	0.293	0.343	0.010	-0.035	0.074	0.064	0.177	1

注：* . 相关性在 0.05 层上显著(双尾)；** . 相关性在 0.01 层上显著(双尾)。

Note: Correlation was significant at 0.05 level(double-tailed);Correlation was significant at 0.05 the level(double-tailed).

①Parameters;②Secondary production;③Temperature;④Salinity;⑤Depth;⑥Average particle size;⑦Median diameter;⑧Chlorophyll *a*;⑨Pheophytin *a*;⑩Organic matter

3 讨论

3.1 环境因子对胶州湾大型底栖动物次级生产力的影响

本研究胶州湾底盐的平均值为 31.06,变化范围为 30.15~31.54,位于湾口附近的 J33、J41、J42 和 J43 站

位的底盐较高,位于湾北部的站位底盐较低,如 J02、J16 站位等,总体上呈现出由湾口向湾内逐渐降低的趋势。湾口位置,海水交换能力强,底盐维持在较高水平;越靠近湾北部,海水交换能力越弱,再加上陆源淡水的注入,使得底盐逐渐降低。有研究表明^[38],底盐通

过限制大型底栖动物生理机能,对大型底栖动物群落的物种组成、空间分布以及数量特征产生影响。本研究中,底盐升高,大型底栖动物群落次级生产力下降,这可能是因为较高的底盐会限制大型底栖动物的生长发育繁殖。

有研究报道^[21,23],局域尺度上沉积物表层的叶绿素 *a*,是影响大型底栖动物群落次级生产力的重要因素,本文也如此。本研究沉积物中叶绿素 *a* 的平均浓度为 1.37 $\mu\text{g/g}$,变化范围为 0.52~2.10 $\mu\text{g/g}$ 。位于湾中部的 J23 和 J24 站位,沉积物中叶绿素 *a* 浓度较低,位于湾北部的 J02、J13 站位和湾口附近的 J32、J33 站位,沉积物中叶绿素 *a* 浓度较高,其总体分布趋势与次级生产力分布趋势基本一致,呈现出由湾中部向南北两侧逐渐增大的趋势。叶绿素 *a* 的浓度代表沉积物中底栖微藻生物量的多少,而底栖微藻是贝类重要的饵料,也是许多小型底栖动物的饵料来源。小型底栖动物通过作为多毛类、虾、蟹和幼鱼等大型底栖动物的饵料,影响着大型底栖动物的生长发育繁殖^[39-40]。

3.2 胶州湾主要养殖区养殖贝类年次级生产力的估算

本研究的部分站位,分别位于红岛、红石崖和黄岛养殖区,各站位养殖贝类次级生产力见表 7。红岛

养殖区贝类年次级生产力为 73.893 5 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;红石崖养殖区养殖贝类的年次级生产力为 166.568 6 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;黄岛养殖区养殖贝类的年次级生产力为 32.308 9 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

本研究中大型底栖动物群落年次级生产力以及养殖贝类的年次级生产力分别为 45.284 3 和 40.358 9 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,养殖贝类对次级生产力的贡献率高达 89.12%。

如果不计养殖种,本研究大型底栖动物群落次级生产力结果和分布状况如表 4、图 5 所示。大型底栖动物群落年次级生产力仅为 4.925 5 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,远低于 45.284 3 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,不计养殖种的胶州湾大型底栖动物次级生产力无明显分布趋势。J02 站位的年次级生产力最高,为 14.953 0 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,对 J02 站位次级生产力贡献较大的为杂色纹藤壶(*Amphibalanus variegatus*)。位于非养殖区的 J23 和 J41 站位的年次级生产力次之,对 J23 站位次级生产力贡献较大的为毛蚶(*Scapharca subcrenata*),对 J41 站位次级生产力贡献较大的为豆形胡桃蛤(*Nucula kawamurai*)和豆形短眼蟹(*Xenopthalmus pimmothereoides*)。

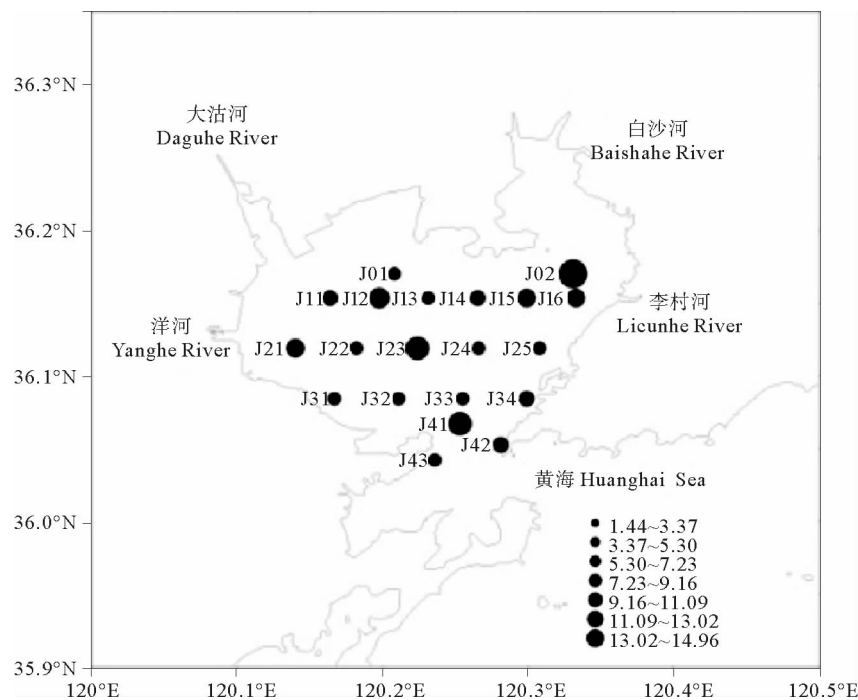


图 5 胶州湾大型底栖动物年次级生产力(不计养殖种)平面分布
(次级生产力单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)

Fig.5 Annual secondary production of macrobenthos without cultured species estimated by Brey(2001) model in Jiaozhou Bay
(Secondary production unit: $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)

表7 养殖区各站位养殖贝类年次级生产力

Table 7 Cultured species and their annual secondary production at each station in the cultured area

站位 Station	养殖种 Cultured species	养殖种年次级生产力 The annual secondary production of cultured species/ ($g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)
J01	菲律宾蛤仔	103.618 0
J02	长牡蛎	108.980 8
J11	菲律宾蛤仔	52.865 2
J12	菲律宾蛤仔	41.331 1
J13	菲律宾蛤仔	44.558 2
J14	菲律宾蛤仔	112.862 8
J15	长牡蛎	87.250 0
J16	长牡蛎	39.681 9
J31	菲律宾蛤仔	166.568 6
J43	菲律宾蛤仔	32.308 9

注: J01、J02、J11~J16 在红岛养殖区; J31 在红石崖养殖区; J43 在黄岛养殖区。

Note: The stations in Hongdao cultured area are J01, J02, J11~J16; the station in Hongshiya cultured area is J31; the station in Huangdao cultured area is J43.

3.3 胶州湾大型底栖动物群落年次级生产力与历史资料的对比

本研究结果与历史资料的对比见表8。由表8可知, 本研究的大型底栖动物次级生产力要显著高于渤海的三大湾以及乳山湾、桑沟湾和海州湾的值, 原因是胶州湾具有高的初级生产力水平(见表9)。本研究的大型底栖动物次级生产力也高于表8中所列胶州湾其它报道的值, 原因很可能是胶州湾贝类养殖量的逐年增加所致^[41-43]。

其实, 不同的研究之间, 因调查时间和站位设置等的不同, 所得到的年次级生产力的可比性不大。因为一个站位大型底栖动物群落次级生产力值的大小, 取决于该站位出现的各种的大型底栖动物的平均个体数和平均生物量, 一年中调查取样次数越多(即取样时间间隔越短), 这两个值就越准确, 估算的群落的次级生产力就越接近真值。一个海域的大型底栖动物群落的年次级生产力, 是各站位次级生产力的平均, 站位数越多, 其平均值越接近海域的大型底栖动物群落年次级生产力的真值。因此, 站位数不同和一年中调查次数的不同, 是不同研究结果之间出现差别的重要原因。

表8 本研究与历史资料对比

Table 8 Comparison between this study and the historical data in Jiaozhou Bay

调查海域 Suvey areas	年次级生产力 Secondary production/ ($g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)	调查时间 Survey date	站位数 Number of sampling stations	年调查次数 Number of surveys per year	物种数 Species	采泥器类型 Grab	参考文献 Reference
胶州湾 Jiaozhou Bay	45.28	2018年	20	4	354	0.05 m ² 箱式采泥器	本研究
胶州湾 Jiaozhou Bay	43.20	2015—2017年	12	3	191	0.05 m ² 大洋50型采泥器	[32]
胶州湾 Jiaozhou Bay	9.64	2016—2017年	12	2	117	0.1 m ² 箱式采泥器	[33]
胶州湾 Jiaozhou Bay	23.16	2014年	14	4	251	0.05 m ² 箱式采泥器	[25]
胶州湾 Jiaozhou Bay	26.63	2005—2009年	14	4	442	0.1 m ² 箱式采泥器	[22]
胶州湾 Jiaozhou Bay	13.41	2000—2004年	10	4	—	0.1 m ² 大洋50型采泥器	[18]
胶州湾 Jiaozhou Bay	18.65	1998—1999年	10	4	—	0.1 m ² 大洋50型采泥器	[18]
渤海湾 Bohai Bay	6.12	2014年	14	2	29	0.05 m ² 箱式采泥器	[26]
莱州湾 Laizhou Bay	5.60	2011年	20	4	177	0.05 m ² 大洋50型采泥器	[23]
辽东湾 Liaodong Bay	5.59	2007年	19	2	46	0.05 m ² 箱式采泥器	[29]
海州湾 Haizhou Bay	1.50	2015年	10	4	123	0.1 m ² 箱式采泥器	[30]
乳山湾 Rushan Bay	11.06	2011年	21	2	161	0.05 m ² 箱式采泥器	[27]
桑沟湾 Sanggou Bay	4.76	2009年	9	2	—	0.05 m ² 箱式采泥器	[21]

注: “—”表示未在文献中找到该数据。

Note: “—” indicates that the data is not found in the literature.

表 9 胶州湾及其邻近海湾初级生产力水平
Table 9 The primary production of Jiaozhou Bay and its adjacent bays

海湾 Gulf	初级生产力 Primary production /(mg · m ⁻² · d ⁻¹)	参考文献 Reference
胶州湾 Jiaozhou Bay	345.510 0	[44]
渤海湾 Bohai Ba	176.717 1	[45]
莱州湾 Laizhou Bay	280.000 0	[46]
辽东湾 Liaodong Bay	127.251 4	[47]
海州湾 Haizhou Bay	21.070 0	[48]
乳山湾 Rushan Bay	137.920 0	[49]
桑沟湾 Sanggou Bay	65.380 0	[50]

3.4 胶州湾大型底栖动物高次级生产力水平与养殖容量

由表 9 可知,胶州湾初级生产力水平(以碳计)明显高于相邻海湾,仅莱州湾初级生产力水平与胶州湾接近。董世鹏等^[43]基于初级生产力水平估算的胶州湾菲律宾蛤仔(*R. philippinarum*)的养殖容量为 429.00 ind./m²,本研究养殖种的平均丰度已达 546.00 ind./m²,超过了上述的养殖容量。

3.5 大型底栖动物次级生产力估算模型的选择

目前估算大型底栖动物次级生产力使用最多的为 Brey(1990)模型,该模型未区分不同的大型底栖动物类群,也未考虑环境因素的影响。Brey(2001)模型区分了大型底栖动物不同类群,并增加了环境因素,包括底温、水深、群落的栖息地类型等。Brey(2012)模型中又增加了大型底栖动物食性和移动方式等参数,模型日趋完善。因为大型底栖动物类群众多,很多种的食性及移动方式尚不清楚,使用 Brey(2012)模型有一定的难度,所以本研究采用了 Brey(2001)模型,来估算胶州湾大型底栖动物群落的年次级生产力。

4 结论

(1)胶州湾大型底栖动物群落次级生产力的分布,呈现出从湾中部向南北两侧逐渐增大的趋势。

(2)底盐和叶绿素 *a* 是影响胶州湾大型底栖动物次级生产力的重要环境因子。

参考文献:

[1] 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(1): 79-88.
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(1): 79-88.

[2] 马骏, 付荣恕. 大型底栖动物生态学研究进展[J]. 山东农业科学, 2010(2): 78-81.

Ma J, Fu R S. Progress of ecology research on macrobenthos[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2010(2): 78-81.

[3] 贾胜华, 廖一波, 曾江宁, 等. 近岸典型生态系统大型底栖动物的次级生产力——以瓠江口、洞头列岛为例[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7140-7151.
Jia S H, Liao Y B, Zeng J N, et al. Secondary productivity of macrobenthos in typical coastal ecosystems; Oujian River estuary and Dongtou Islands as examples[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7140-7151.

[4] Cusson M, Bourget E. Global patterns of macroinvertebrate production in marine benthic habitats[J]. Marine Ecology Progress Series, 2005, 297: 1-14.

[5] 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.

[6] Petracco M, Cardoso R S, Corbisier T N, et al. Secondary production of sandy beach macrofauna: An evaluation of predictive models[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2012, 115: 359-365.

[7] 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.
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.

[8] 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.
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.

[9] Robertson A I. The relationship between annual production: Biomass ratios and lifespans for marine macrobenthos[J]. Oecologia, 1979, 38(2): 193-202.

[10] Schwinghamer P, Hargrave B, Peer D, et al. Partitioning of production and respiration among size groups of organisms in an intertidal benthic community[J]. Marine Ecology Progress Series, 1986, 31(2): 131-142.

[11] Edgar Graham J. The use of the size structure of benthic macrofaunal communities to estimate faunal biomass and secondary production[J]. Edgar Graham J, 1990, 137(3): 195-214.

[12] Lin H S, Wang J J, Liu K, et al. Benthic macrofaunal production for a typical shelf-slope-basin region in the western Arctic Ocean[J]. Continental Shelf Research, 2016, 113: 30-37.

[13] 周一兵, 谢祚浑. 虾池中日本刺沙蚕的次级生产力研究[J]. 水产学报, 1995(2): 140-150.
Zhou Y B, Xie Z H. Secondary production of *Neanthe japonica* in shrimp ponds[J]. Journal of Fisheries of China, 1995(2): 140-150.

[14] 吴宝铃, 丘建文. 青岛多齿围沙蚕的生产量[J]. 生态学报, 1992(1): 61-67.
Wu B L, Qiu J W. Production of *Perinereis nuntia* (savigny) at a Qingdao beach[J]. Acta Ecologica Sinica, 1992(1): 61-67.

[15] 林岩璇, 韩洁, 林旭吟, 等. 厦门潮间带小头虫(*Capitella capitata*)

- ta)的种群动态及次级生产力研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2008(3): 314-318.
- Lin K X, Han J, Lin X Y, et al. Population dynamics and secondary production of the *Capitella capitata* in the intertidal zone in Xiamen[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition), 2008(3): 314-318.
- [16] 闫云君, 梁彦龄. 扁担塘两种底栖动物的周年生产量[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2005(6): 117-119.
- Yan Y J, Liang Y L. Annual production of two species of macrozoobenthos in Biandantang lake[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2005(6): 117-119.
- [17] 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(6): 867-871.
- Yu Z S, Zhang Z N, Han J. Primary study on secondary production of macrobenthos in Bohai Sea[J]. Journal of Qingdao Ocean University (Natural Science Edition), 2001(6): 867-871.
- [18] 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(6): 49-55.
- Li X Z, Wang H F, Zhang B L. The secondary production of macrobenthos in Jiaozhou Bay, Shandong[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2005(6): 49-55.
- [19] 王金辉, 杨春旺, 孙亚伟, 等. 象山港大型底栖动物的生物多样性和次级生产力研究[J]. 天津农学院学报, 2006(2): 24-28.
- Wang J H, Yang C W, Sun Y W, et al. Secondary productivity and biodiversity of macrobenthos in Xiangshan Bay[J]. Journal of Tianjin Agricultural University, 2006(2): 24-28.
- [20] 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(1): 145-150.
- Yuan W, Zhang Z N, Yu Z S. Secondary productivity of macrobenthos in Jiaozhou Bay[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007(1): 145-150.
- [21] 王宗兴, 孙丕喜, 刘彩霞, 等. 桑沟湾大型底栖动物的次级生产[J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(4): 495-498.
- 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.
- [22] 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.
- Wang J B, Li X Z, Wang H F, et al. Ecological study on the macrobenthos in Jiaozhou Bay in 2005—2009 [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2011, 42(5): 728-737.
- [23] 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.
- Li S W, Fan L, Zhang Y, et al. Secondary productivity of macrobenthos in Laizhou Bay, East China [J]. Journal of Ecology, 2014, 33(1): 190-197.
- [24] 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.
- 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.
- [25] 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.
- Xu Z D. Preliminary Study of Functional Groups and Ecological Study of Macrofauna in Jiaozhou Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [26] 张萍, 缴建华, 孙万胜, 等. 渤海湾天津近岸海域大型底栖动物群落结构及次级生产力的初步研究[J]. 大连海洋大学学报, 2016, 31(3): 324-330.
- Zhang P, Jiao J H, Sun W S, et al. Community structure and secondary production of macrobenthos in Tianjin coastal seawaters in Bohai Bay[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2016, 31(3): 324-330.
- [27] 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.
- 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]. Journal of Ocean University of China (Natural Science Edition), 2016, 46(6): 134-141.
- [28] 刘坤. 白令海大型底栖动物群落结构和次级生产力及其与环境因子的关系[D]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2016.
- Liu K. Community Structure and Secondary Productivity of Macrobenthos in Bering Sea and Their Relationship with Environmental Factors[D]. Xiamen: Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2016.
- [29] 李轶平, 于旭光, 孙明, 等. 辽东湾海域底栖动物次级生产力研究及生境适宜性评价[J]. 水产科学, 2017, 36(6): 728-734.
- Li Y P, Yu X G, Sun M, et al. Secondary productivity of zoobenthos and habitat suitability evaluation in Liaodong Bay [J]. Fisheries Science, 2017, 36(6): 728-734.
- [30] 袁健美, 张虎, 贲成恺, 等. 海洲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.
- Yuan J M, Zhang H, Ben C K, et al. Macrobenthic community composition and secondary productivity in Haizhou Bay[J]. Marine Fisheries, 2018, 40(1): 19-26.
- [31] 刘开珍, 杜飞雁, 李亚芳, 等. 大亚湾大型底栖动物近30年次级生产力变化特征[J]. 南方水产科学, 2018, 14(2): 1-9.
- Liu K Z, Du F Y, Li Y F, et al. Variation characteristics of macrobenthic secondary productivity in Daya Bay of South China Sea for nearly 30 years[J]. South China Fisheries Science, 1996(2): 18-31.
- [32] 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.
- 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.
- [33] 全秋梅, 徐姗姗, 肖雅元, 等. 胶州湾大型底栖动物次级生产力[J]. 中国水产科学, 2020, 27(4): 414-426.
- Quan Q M, Xu S N, Xiao Y Y, et al. Secondary productivity of macrobenthos in Jiaozhou Bay[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(4): 414-426.
- [34] 国家标准化管理委员会. GB/T 12763.6-2007 海洋调查规范 第6部分: 海洋生物调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- Standardization Administration of China. GB/T 12763.6-2007 Specifications for Oceanographic Survey—Part 6: Marine Biological Survey[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.

- [35] 国家标准化管理委员会. GB 17378.5-2007 海洋监测规范 第 5 部分: 沉积物分析[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
Standardization Administration of China. GB 17378.5-2007 Specifications for Oceanographic Survey—Part 5: Survey of Acoustical and Optical Parameters in the Sea[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [36] Pianka E R. Ecology of the agamid lizard *Amphibolurus isolepis* in western Australia[J]. *Copeia*, 1971(3): 527-536.
- [37] Soliman Y S, Rowe G T. Secondary production of *Ampelisca mississippiana* Soliman and Wicksten 2007(Amphipoda, Crustacea) in the head of the Mississippi Canyon, northern Gulf of Mexico [J]. *Deep-Sea Research Part II*, 2008, 55(24): 2692-2698.
- [38] 符芳菲. 胶州湾大型底栖动物群落结构特征研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.
Fu F F. The Study of Community Structure of Macrobenthos in Jiaozhou Bay, China[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017.
- [39] 林俊辉. 台湾海峡及其邻近海域多毛类的大尺度分布研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2008.
Lin J H. Studies on Large-Scale Distribution of Polychaetes in Taiwan Strait and Its Adjacent Waters[D]. Xiamen: Xiamen University, 2008.
- [40] 王开立, 王运磊. 海洋底栖动物在海洋生态系统中的重要性[J]. *农村经济与科技*, 2017, 28(15): 54-55.
Wang K L, Wang Y L. Importance of marine benthos in marine ecosystem[J]. *Rural Economy and Science*, 2017, 28(15): 54-55.
- [41] 徐岩, 朱玉贵. 山东省海水贝类养殖产业变化特征分析[J]. *现代农业科技*, 2020(12): 215-216, 220.
Xu Y, Zhu Y G. Analysis on change characteristics of seawater shellfish breeding industry in Shandong Province[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2020(12): 215-216, 220.
- [42] 王波, 韩立民. 我国贝类养殖发展的基本态势与模式研究[J]. *中国海洋大学学报(社会科学版)*, 2017(3): 5-12.
Wang B, Han L M. A study on the basic situation and pattern of shellfish breeding in China[J]. *Journal of Ocean University of China(Social Sciences)*, 2017(3): 5-12.
- [43] 董世鹏, 蔺凡, 姜妮妮, 等. 叶绿素 *a* 时空分布的胶州湾菲律宾蛤仔养殖容量评估[J]. *渔业科学进展*, 2020, 41(6): 100-107.
Dong S P, Lin F, Jiang W W, et al. Estimation of carrying capacity of manila clam (*Ruditapes philippinarum*) in Jiaozhou Bay based on spatial and temporal distribution of chlorophyll *a* [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2020, 41(6): 100-107.
- [44] 孙晓霞, 孙松, 张永山, 等. 胶州湾叶绿素 *a* 及初级生产力的长期变化[J]. *海洋与湖沼*, 2011, 42(5): 654-661.
Sun X X, Sun S, Zhang Y S, et al. Long-term changes of Chlorophyll-*a* concentration and primary productivity in the Jiaozhou Bay[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2011, 42(5): 654-661.
- [45] 李伟, 刘洋, 魏皓. 两种海色卫星数据对渤海湾初级生产力的估算[C]. 杭州: 智能信息技术应用学会, 2011.
Li W, Liu Y, Wei H. Estimation of Primary Productivity of Bohai Bay by Two Kinds of Sea Color Satellite Data[C]. Hangzhou: Intelligent Information Technology Application Association, 2011.
- [46] 蔡昱明, 宁修仁, 刘子琳, 等. 莱州湾浮游植物粒径分级叶绿素 *a* 和初级生产力及新生产力[J]. *海洋科学集刊*, 2002(44): 1-10.
Cai Y M, Ning X R, Liu Z L, et al. Size-fractionated chlorophyll *a*, primary production and new phytoplankton in Laizhou Bay[J]. *Proceedings of the Marine Sciences*, 2002(44): 1-10.
- [47] 马志强, 周遵春, 薛克, 等. 辽东湾北部海区初级生产力与渔业资源的关系[J]. *水产科学*, 2004(4): 12-15.
Ma Z Q, Zhou Z C, Xue K, et al. The relationship between the primary production and fishery resources in the northern waters of Liaodong Bay[J]. *Fisheries Science*, 2004(4): 12-15.
- [48] 张玉荣, 丁跃平, 李铁军, 等. 东海区叶绿素 *a* 和初级生产力季节变化特征[J]. *海洋与湖沼*, 2016, 47(1): 261-268.
Zhang Y R, Ding Y P, Li T J, et al. Annual variations of chlorophyll *a* and primary productivity in the East China Sea[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2016, 47(1): 261-268.
- [49] 尹晖, 孙耀, 徐林梅, 等. 乳山湾滩涂贝类养殖容量的估算[J]. *水产学报*, 2007(5): 669-674.
Yin H, Sun Y, Xu L M, et al. Estimation of carrying capacity for shellfish in Rushan Bay[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2007(5): 669-674.
- [50] 方建光, 匡世焕, 孙慧玲, 等. 桑沟湾栉孔扇贝养殖容量的研究[J]. *海洋水产研究*, 1996(2): 18-31.
Fang J H, Kuang S H, Sun H L, et al. Study on the carrying capacity of Sanggou Bay for the culture of scallop *Chlamys farreri* [J]. *Marine Fisheries Research*, 1996(2): 18-31.

Study on Annual Secondary Production of Macrobenthos and Its Influencing Factors in Jiaozhou Bay

Chen Chen¹, Yang Xiangjun¹, Cui Wenyao², Zhang Mengsheng³, Yu Zishan¹

(1. College of Marine Life Sciences, Ocean University of China, Qingdao, 266003, China; 2. Haichang (China) Investment Co. Ltd., Shanghai 200050, China; 3. Survey and Design Institute of Shanghai, Shanghai 200050, China)

Abstract: According to the data of macrobenthos collected from 20 stations of four seasons of Jiaozhou Bay in 2018, the secondary production of macrobenthos was estimated by Brey(2001) models, and the factors affecting secondary production of macrobenthos were studied. The results showed that the annual average abundance and biomass of macrobenthos in Jiaozhou Bay were $1\,904.80 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$ and $87.0188 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively, The annual secondary production of macrobenthos in Jiaozhou Bay was $45.2843 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. It's increasing of the secondary production of macrobenthos from the center part to the northern and southern part of Jiaozhou Bay. The secondary production of *Ruditapes philippinarum* and *Crassostrea gigas* accounted for 89.12% of the total secondary production of macrobenthos in Jiaozhou Bay. The content of chlorophyll a and bottom salt were important factors affecting the secondary production of macrobenthos.

Key words: secondary production; macrobenthos; environmental factors; Brey(2001)model; Jiaozhou Bay

责任编辑 高蓓