

小竹山岛人工鱼礁区大型底栖动物群落结构的初步研究

孙雪婷¹ 于浩林² 唐衍力¹ 于梦杰¹ 赵伟¹ 盛化香¹

(1. 中国海洋大学 水产学院, 山东 青岛 266003; 2. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266003)

摘要: 为探究小竹山岛海域投放人工鱼礁后大型底栖动物群落结构的变化, 于2017—2020年进行了8个航次的调查, 研究鱼礁区、邻近区与对照区的大型底栖动物种类组成、优势种、生物多样性、群落结构及群落稳定性。结果显示, 共鉴定出大型底栖动物72种, 其中多毛类45种, 甲壳类16种, 软体动物8种, 棘皮动物3种, 投礁后第4年(2020年)比投礁后第1年(2017年)种类数增加了15种, 并且鱼礁区的种类数多于邻近区与对照区。优势种组成以多毛类为主。调查海域大型底栖动物生物量和丰度呈逐年上升趋势, 年份间差异显著, 2017—2020年年均生物量从2.11 g/m²上升到4.38 g/m², 年均丰度从289.31 ind./m²上升到764.14 ind./m², 区域间无显著差异。多样性指数、丰富度指数和均匀度指数在不同年份和区域之间变化不显著。聚类分析结果显示, 大型底栖动物群落结构分布格局呈现年际变化; 双因素相似性分析结果表明, 调查海域大型底栖动物群落结构的年份差异显著($P < 0.01$), 区域间无显著差异($P > 0.05$); 相似性百分比分析结果表明, 深沟毛虫(*Sigambra bassi*)、长叶索沙蚕(*Lumbrineris longifolia*)、中蚓虫(*Mediomastus californiensis*)和寡鳃齿吻沙蚕(*Micronephthys oligobranchia*)等是造成群落年际差异的主要贡献种。丰度/生物量曲线结果表明, 2017—2020年大型底栖动物群落均未受到扰动, 随着鱼礁建设时间的推移, 大型底栖动物群落更趋稳定。

关键词: 小竹山岛; 人工鱼礁; 大型底栖动物; 群落结构

中图分类号: S932 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2023)12-0080-13

DOI: 10.11759/hyxx20220829001

人工鱼礁作为一种人为放置在海中的构筑物, 可为多种海洋生物提供生息繁殖场所, 并且达到改善水域环境、修复受损生态环境的目的^[1-3]。鱼礁投放后, 会改变礁区流场^[4-5], 并会使周围的底质和沉积物类型发生改变^[6-7]。同时水层之间物质交换的加快, 有利于饵料生物的生长, 从而提升礁区的初级生产力水平^[8]。大型底栖动物生活在底层水体和表层沉积物中^[9], 在海洋生态系统的能量流动和物质循环中发挥着重要的作用^[10]。多数大型底栖动物具有生活周期长、生活环境相对稳定、迁移能力弱等特点, 对海底环境的变化扰动反应灵敏^[11]。人工鱼礁投放后, 海底环境发生变化, 大型底栖动物的种类组成和群落结构也会产生一定的响应变化^[12]。因此, 研究人工鱼礁区大型底栖动物群落组成和结构变化, 对了解人工鱼礁的生境修复和资源养护效果具有重要意义。

目前, 国内大型底栖动物的研究较为广泛^[13-15], 研究内容主要针对大型底栖动物的种类组成、生物多样性和群落结构等生态特征^[6]。随着中国海洋牧场

建设的快速发展, 国内对人工鱼礁区大型底栖动物群落也进行了相关研究。孙习武等^[16]研究了海州湾人工鱼礁建设前后大型底栖动物群落结构的变动情况, 陈晨等^[17]探究了象山港海洋牧场示范区大型底栖动物的时空变动, 以上研究均表明鱼礁建设对大型底栖动物资源的增加起到了积极作用。

小竹山岛隶属长山列岛, 位于黄渤海交汇处, 曾是多种经济鱼类的洄游、栖息场所, 但传统捕捞以及栖息地退化, 使海洋生物多样性受到威胁^[18]。人工鱼礁建设与生态渔业发展为保障长岛渔业资源的可持续利用起到了重要作用, 大型底栖动物是人工鱼礁建设评估的重要生物类群, 然而, 以往的研究主要集中在长岛群岛毗邻海域^[19-20], 针对长岛人工鱼

收稿日期: 2022-08-29; 修回日期: 2022-12-08

基金项目: 山东近海渔业资源调查与监测(37000022P11000111802T)

[Foundation: Investigation and Monitoring of Fishery Resources in Shandong Coastal Waters, No. 37000022P11000111802T]

作者简介: 孙雪婷(1998—), 女, 山东莱州人, 硕士研究生, 主要从事大型底栖生物生态学方面研究, E-mail: 1204382796@qq.com; 唐衍力(1965—), 通信作者, 男, 山东聊城人, 教授, 主要从事选择性渔具渔法、人工鱼礁与海洋牧场方面研究, E-mail: tangyanli@ouc.edu.cn

礁区大型底栖动物的研究鲜有报道。通过对2017—2020年小竹山岛人工鱼礁区大型底栖动物的调查,本文初步研究投礁后大型底栖动物群落结构特征,并利用丰度/生物量曲线分析大型底栖动物群落稳定状态,以期为人工鱼礁建设效果评估提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 数据来源

小竹山岛位于渤海海峡中南部,2017年开始在该海域进行人工鱼礁建设,共投放人工构建礁24座,共计12 000 m³,建成人工鱼礁区146.1 hm²,周边辐射分布石块礁、小圆石、砂砾、泥等底质类型。根据人工鱼礁对大型底栖动物的影响范围^[21-22],将距鱼礁中心0~200 m样带定位为鱼礁区(底质囊括构建

礁和石块礁),200~400 m样带为邻近区(底质囊括小圆石和沙砾),400~600 m样带为对照区(底质囊括泥底或沙砾),调查站位分布如图1。

调查时间为2017年6月和8月(夏季),2018年6月和8月(夏季),2019年7月和8月(夏季)和2020年7月和8月(夏季),共8个航次的调查。采用分层随机取样法,每航次各区域3个站位,每个站位重复采样3次。使用抓斗式底质采泥器(0.05 m²)获取底栖动物样本,将所获生物使用0.5 mm孔径的网筛冲洗后得到大型底栖动物,用5%福尔马林现场固定保存带回实验室。全部样品在体视显微镜下观察,生物均鉴定至种,对所有物种进行计数,并对其湿重进行称量,测量精度0.001 g,最后换算成单位面积的丰度(ind./m²)和生物量(g/m²)。所有操作按照《海洋调查规范》(GB/T12763-2007)^[23]进行。

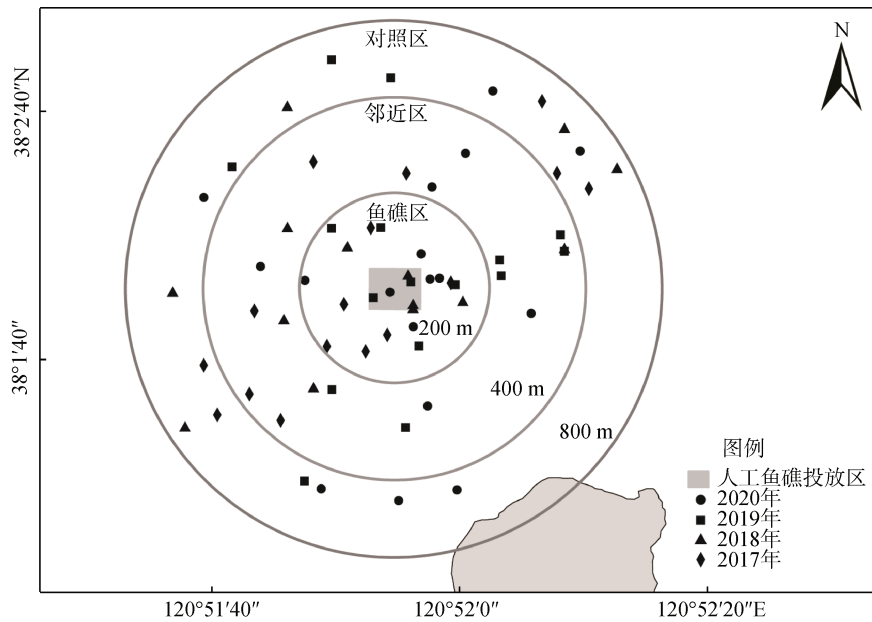


图1 采样站位

Fig. 1 Sampling stations

1.2 数据处理

优势度(Y)计算公式如下:

$$Y = \frac{n_i}{N} f_i, \quad (1)$$

式中, N 为样品中的总个体数, n_i 为样品中第 i 种的个体数, f_i 为第 i 种生物在样品中出现概率, 当优势度 $Y \geq 0.02$ 时, 该种为优势种^[24]。

采用 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Margalef 物种丰富度指数(D)、Pielou 均匀度指数(J')进行多样

性分析, 计算公式如下:

$$H' = -\sum \left(\frac{n_i}{N} \right) \times \log_2 \left(\frac{n_i}{N} \right), \quad (2)$$

$$D = (S - 1) / \log_2 N, \quad (3)$$

$$J' = H' / \log_2 S, \quad (4)$$

式中, S 为样品中的物种总数, N 为样品中的大型底栖动物总个体数, n_i 为样品中第 i 种的个体数。

使用 SPSS26.0 统计软件对不同年份和区域的大型底栖动物群落结构特征指数(种类数、丰度、生物

量、多样性指数、丰富度指数和均匀度指数)进行非参数检验,显著性水平设置为 $\alpha=0.05$ 。

使用 PRIMER6.0 软件对大型底栖生物的丰度数据进行 $\log(X+1)$ 转换,建立 Bray-Curtis 相似矩阵进行聚类分析(CLUSTER),对群落结构进行分析。利用组间差异分析(ANOSIM)检验大型底栖动物群落在年际和区域间的差异显著性,并运用相似性百分比(SIMPER)方法分别分析大型底栖生物群落的主要特征种^[25]。采用丰度/生物量曲线(ABC 曲线)分析大型底栖动物群落结构稳定性^[26]。

2 结果与分析

2.1 大型底栖动物种类组成及优势种分析

调查海域共鉴定出大型底栖动物 72 种,其中,多毛类 45 种,占 62.50%;甲壳类 16 种,占 22.22%;软体动物 8 种,占 11.11%;棘皮动物 3 种,占 4.17%(图 2)。投礁第 1 年(2017 年)大型底栖动物种类数共计 32 种,投礁后第 4 年(2020 年)种类数增加至 47 种(图 3)。同时,鱼礁区大型底栖动物种类最丰富,共有大型底栖动物 51 种;邻近区次之,共有大型底栖动物 41 种;对照区最少,共有大型底栖动物 37 种。

各年大型底栖动物优势种($Y \geq 0.02$)共有 25 种(表 1),投礁后第 2 年 21 种,投礁后第 3 年 17 种,投礁后第 1 年 15 种,投礁后第 4 年 11 种,依次递减。3 个区域在投礁后第 1 年(2017 年)和第 2 年(2018 年)共同优势种为长叶索沙蚕(*Lumbrineris longiforlia*)、寡鳃齿吻沙蚕(*Micronephthys oligobranchia*)和深沟毛虫(*Sigambra bassi*);投礁后第 3 年(2019 年)共同优势种为独指虫(*Aricidea fragilis*)、中蚓虫(*Mediomastus*

californiensis)和深沟毛虫(*Sigambra bassi*);投礁后第 4 年(2020 年)无共同优势种,鱼礁区和对照区的第一优势种为中蚓虫(*Mediomastus californiensis*),邻近区的第一优势种为深沟毛虫(*Sigambra bassi*)。优势种组成在不同年份存在一定的差异,但均以多毛类为主。

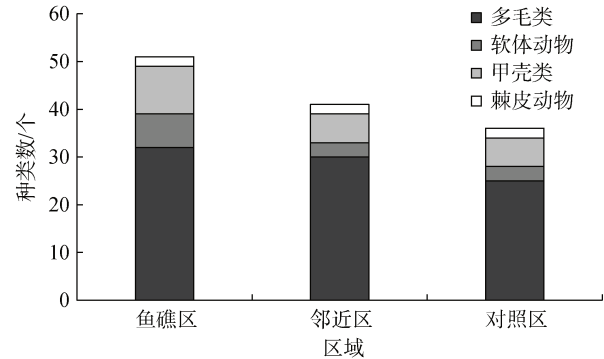


图 2 鱼礁区、邻近区和对照区大型底栖动物种类组成
Fig. 2 Macrobenthic species composition in the reef, adjacent, and control areas

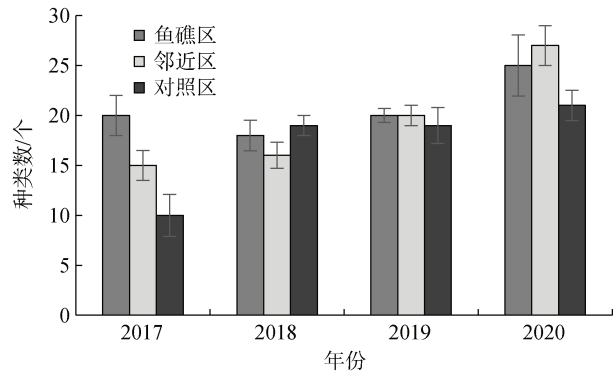


图 3 大型底栖生物种类数的年际变化
Fig. 3 Interannual variation in the number of macrobenthic species

表 1 大型底栖动物优势种及其优势度

Tab. 1 Dominant macrobenthic species and their dominance

年份	优势种	调查区域		
		鱼礁区	邻近区	对照区
2017 年	长叶索沙蚕 <i>Lumbrineris longiforlia</i>	0.08	0.33	0.06
	尖叶长手沙蚕 <i>Magelona cincta</i>	0.02	-	-
	中蚓虫 <i>Mediomastus californiensis</i>	0.06	-	0.03
	寡鳃齿吻沙蚕 <i>Micronephthys oligobranchia</i>	0.09	0.02	0.09
	深沟毛虫 <i>Sigambra bassi</i>	0.10	0.07	0.36
	独指虫 <i>Aricidea fragilis</i>	0.04	-	-
	鳞腹钩虫 <i>Scolelepis squamata</i>	-	0.10	-
	蛇尾(幼体) <i>Ophiuroidea</i>	-	-	0.03

续表

年份	优势种	调查区域		
		鱼礁区	邻近区	对照区
2018 年	独指虫 <i>Aricidea fragilis</i>	0.02	0.02	-
	渤海格鳞虫 <i>Gattyana pohailnsis</i>	0.05	-	-
	长吻沙蚕 <i>Glycera chirori</i>	0.02	-	-
	寡节甘吻沙蚕 <i>Glycinder bonhourei</i>	0.02	-	-
	长叶索沙蚕 <i>Lumbrineris longifolia</i>	0.30	0.13	0.08
	寡鳃齿吻沙蚕 <i>Micronephthys oligobranchia</i>	0.02	0.10	0.07
	深钩毛虫 <i>Sigambra bassi</i>	0.05	0.30	0.26
	东方缝栖蛤 <i>Hiatella arctica</i>	0.07	-	-
	滩拟猛钩虾 <i>Harpiniopsis vadicalus</i>	0.02	-	-
	蛇尾(幼体) <i>Ophiuroidea</i>	0.04	-	-
	尖叶长手沙蚕 <i>Magelona cincta</i>	-	0.06	0.04
	不倒翁虫 <i>Sternaspis scutata</i>	-	0.02	-
	中蚓虫 <i>Mediomastus californiensis</i>	-	-	0.04
	2019 年	独指虫 <i>Aricidea fragilis</i>	0.06	0.03
长叶索沙蚕 <i>Lumbrineris longifolia</i>		0.04	-	-
中蚓虫 <i>Mediomastus californiensis</i>		0.15	0.03	0.07
寡鳃齿吻沙蚕 <i>Micronephthys oligobranchia</i>		0.10	-	0.12
尖锥虫 <i>Scoloplos armiger</i>		0.02	-	-
深钩毛虫 <i>Sigambra bassi</i>		0.18	0.11	0.11
稚齿虫 <i>Prionospio sp.</i>		0.03	-	-
长吻沙蚕 <i>Glycera chirori</i>		-	0.05	-
西方似蛭虫 <i>Amaeana occidentalis</i>		-	0.05	-
不倒翁虫 <i>Sternaspis scutata</i>		-	-	0.03
2020 年	中蚓虫 <i>Mediomastus californiensis</i>	0.06	-	0.09
	长牡蛎 <i>Magallana gigas</i>	0.02	-	-
	东方缝栖蛤 <i>Hiatella arctica</i>	0.03	-	-
	独指虫 <i>Aricidea fragilis</i>	-	0.05	-
	长叶索沙蚕 <i>Lumbrineris longifolia</i>	-	0.03	-
	寡鳃齿吻沙蚕 <i>Micronephthys oligobranchia</i>	-	0.03	-
	深钩毛虫 <i>Sigambra bassi</i>	-	0.12	-
	多丝独毛虫 <i>Aphelochaeta multifilis</i>	-	0.02	0.03
	稚齿虫 <i>Prionospio sp.</i>	-	-	0.08

注: -表示优势度小于 0.02 的值

2.2 丰度和生物量

大型底栖动物年均丰度总体呈现逐年增长趋势(图 4), 投礁后第 1 年 289.31 ind./m², 投礁后第 2 年 351.55 ind./m², 投礁后第 3 年 696.16 ind./m², 投礁后第 4 年 764.14 ind./m², 且不同年份间差异极显著($P < 0.01$)。连续 4 年丰度贡献率最大的是多毛类, 占群落比例分

别为 81.68%、87.96%、82.24%、62.46%。在投礁后第 4 年(2020 年), 软体动物和甲壳类在丰度中的占比上升, 占群落比例分别为 22.58%和 6.30%, 年平均丰度达到 170.49 ind./m²和 47.55 ind./m²。3 个区域中, 鱼礁区 626.25 ind./m², 邻近区 518.59 ind./m², 对照区 431.03 ind./m², 依次递减, 不同区域间无显著差异($P = 0.239$)。

大型底栖动物年均生物量投礁后第3年和第4年有显著性增长(图4), 投礁后第3年 5.55 g/m^2 , 投礁后第4年 4.38 g/m^2 , 投礁后第2年 2.64 g/m^2 , 投礁后第1年 2.11 g/m^2 , 依次递减, 且不同年份间差异极显著 ($P < 0.01$)。生物量最大的贡献类群为多毛类, 占群落比例分别为 80.37%、90.65%、84.72%、55.74%。在投礁后第4年(2020年), 软体动物和甲壳类在生物量中的占比上升, 占群落比例分别为 20.75%和 18.53%, 年平均生物量达到 0.91 g/m^2 和 0.81 g/m^2 。3个区域中, 鱼礁区 4.33 g/m^2 , 邻近区 3.81 g/m^2 , 对照区 2.87 g/m^2 , 依次递减, 不同区域间无显著差异 ($P = 0.251$)。

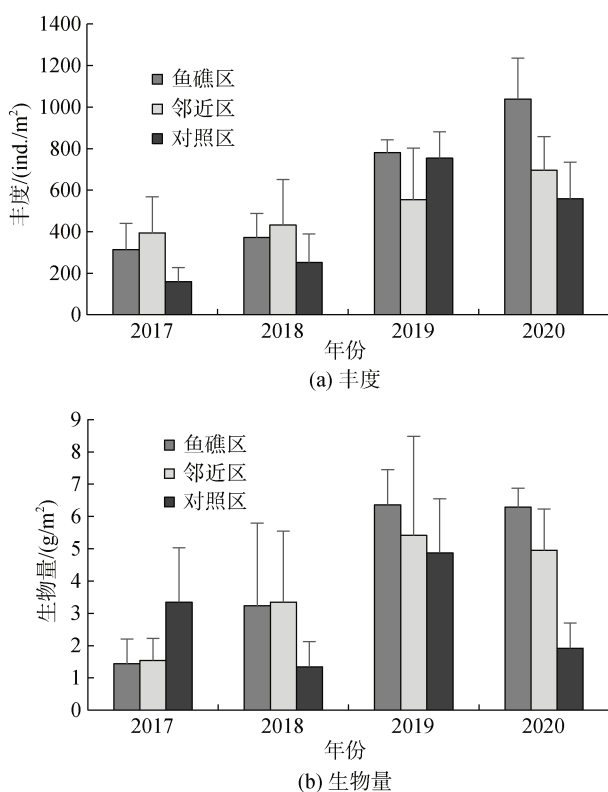


图4 大型底栖动物丰度和生物量

Fig. 4 Abundance and biomass of macrobenthos

2.3 生物多样性指数

大型底栖动物生物多样性指数变化如图5所示, 生物多样性指数在年份间变化不明显 ($P > 0.05$), Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 变化范围为 1.36~1.95, 丰富度指数 (D) 变化范围为 1.83~2.91, 均匀度指数 (J') 变化范围为 0.88~0.94。鱼礁区与邻近区的多样性指数 (H') 和丰富度指数 (D) 高于对照区, 均匀度指数 (J') 表现基本平稳, 生物多样性指数在不同区域间差异不显著 ($P > 0.05$)。

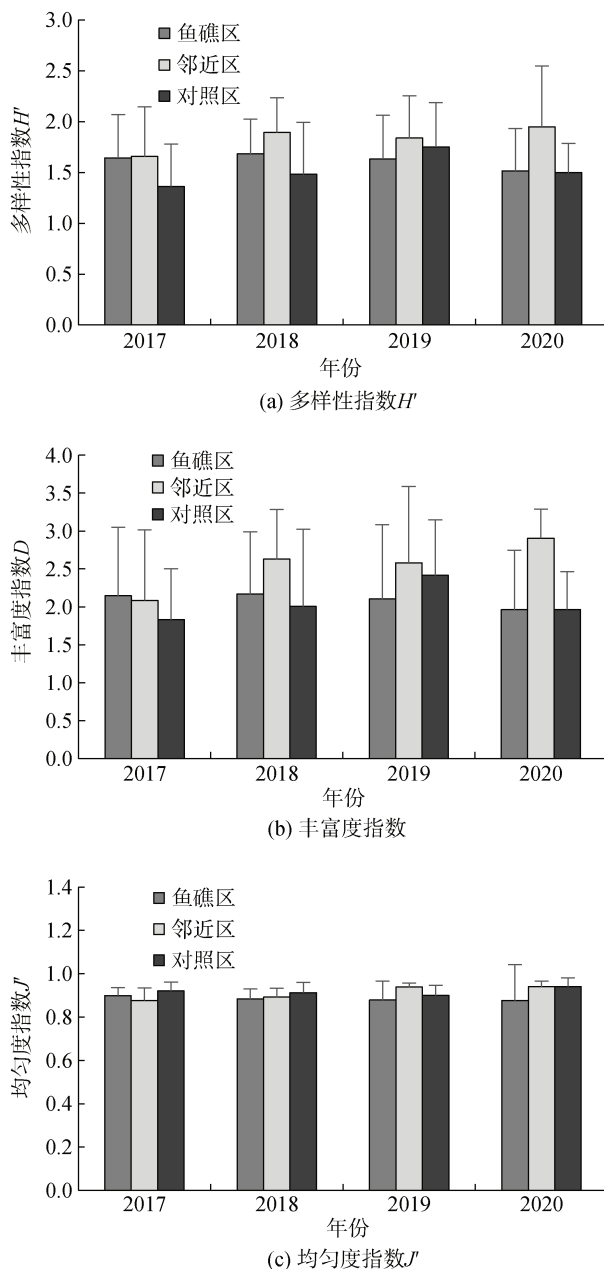


图5 大型底栖动物群落生物多样性指数

Fig. 5 Macrobenthos diversity indices

2.4 群落结构分析

群落聚类分析结果表明(图6), 调查海域不同年份间大型底栖动物群落结构变化较大, 但各区域间的调查站位比较集中, 群落组成相似度较高。同时, 双因素相似性分析结果表明(表2), 大型底栖动物群落在年份间存在显著性差异(综合检验 $R = 0.129$, $P = 0.001$), 年份间两两检验结果显示, 年际变化越大, 大型底栖动物群落差异较大。但区域间无显著性差异 ($R = 0.011$, $P = 0.309$)。

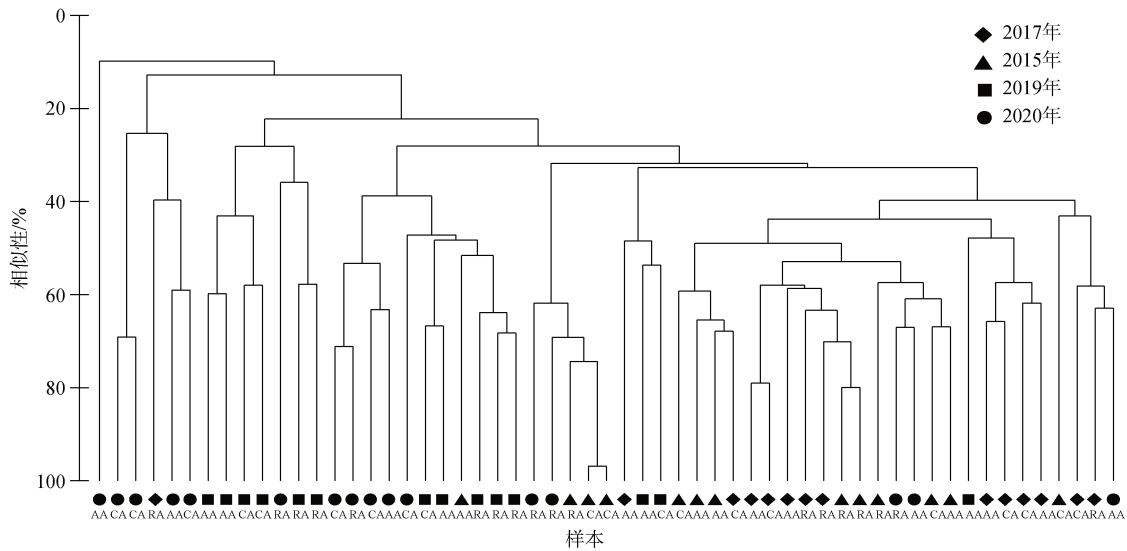


图 6 大型底栖动物群落结构聚类分析

Fig. 6 Cluster analysis of the macrobenthos community structure

注: RA: 鱼礁区, AA: 邻近区, CA: 对照区

表 2 大型底栖动物主要类群的平均丰度和平均生物量

Tab. 2 Average abundance (ind./m²) and biomass (g/m²) of the main groups of macrobenthos

类群		2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
多毛类	丰度	243.56	296.64	595.81	509.29
	生物量	1.50	2.22	4.97	2.33
软体动物	丰度	21.86	17.17	88.12	170.49
	生物量	0.18	0.10	0.53	0.91
甲壳类	丰度	17.17	9.37	15.61	47.55
	生物量	0.03	0.04	0.29	0.81
棘皮动物	丰度	15.61	14.05	24.98	27.69
	生物量	0.16	0.10	0.11	0.13

相似性百分比分析结果表明(表 3), 2017 年大型底栖生物群落的平均相似性为 30.62%, 其中, 最大贡献者为深沟毛虫(35.90%), 其次为长叶索沙蚕(24.42%); 2018 年大型底栖生物群落的平均相似性为 36.39%, 最大贡献者为深沟毛虫(41.82%), 其次为长叶索沙蚕(17.90%); 2019 年群落的平均相似性为 32.75%, 最大贡献者为深沟毛虫(25.73%), 其次为独指虫(17.77%); 2020 年群落的平均相似性为 15.00%, 最大贡献者为中蚓虫(23.35%), 其次为不倒翁虫(12.81%)。同时, 相邻年份间大型底栖动物群落差异较小, 年份差异越大, 群落非相似性越高。2017 年和 2018 年大型底栖生物群落间的平均非相似性为 67.82%, 长叶索沙蚕、寡鳃齿吻沙蚕和深沟毛虫等为造成群落间差异的主要贡献种; 2017 年与 2020 年大型底栖生物群落间的平均非相似

性为 84.83%, 深沟毛虫、长叶索沙蚕和中蚓虫等为造成群落间差异的主要贡献种(表 4)。

表 3 大型底栖动物群落的双因素相似性分析

Tab. 3 Results of two-way analysis of similarity (ANOSIM) of the macrobenthos

组别	综合检验 <i>R</i>	成对检验 <i>R</i>	<i>P</i>
区域	0.011	-	0.309
年份	0.129	-	0.001
2017 比 2018	-	0.040	0.176
2017 比 2019	-	0.169	0.002
2017 比 2020	-	0.227	0.002
2018 比 2019	-	0.072	0.059
2018 比 2020	-	0.146	0.004
2019 比 2020	-	0.85	0.029

表 4 重要物种对群落内相似性的贡献率

Tab. 4 Contribution of key species to the similarities among communities

种类	贡献率/%			
	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
深沟毛虫 <i>Sigambra bassi</i>	35.90	41.82	25.73	12.20
长叶索沙蚕 <i>Lumbrineris longifolia</i>	24.42	17.90	-	-
寡鳃齿吻沙蚕 <i>Micronephthys oligobranchia</i>	12.63	10.44	14.54	-
独指虫 <i>Aricidea fragilis</i>	-	-	17.77	-
中蚓虫 <i>Mediomastus californiensis</i>	-	-	16.24	23.25
不倒翁虫 <i>Sternaspis scutata</i>	-	-	-	12.81
稚齿虫 <i>Prionospio sp.</i>	-	-	-	10.89

注: SIMPER 分析结果仅列出贡献率大于 10%的重要物种

表 5 重要物种对群落间非相似性的贡献率

Tab. 5 Contribution of key species to the dissimilarities among communities

组别	平均非相似性/%	种类	贡献率/%
2017 比 2018	67.82	长叶索沙蚕 <i>Lumbrineris longifolia</i>	9.39
		寡鳃齿吻沙蚕 <i>Micronephthys oligobranchia</i>	8.78
		深沟毛虫 <i>Sigambra bassi</i>	8.40
		中蚓虫 <i>Mediomastus californiensis</i>	6.96
		尖叶长手沙蚕 <i>Magelona cincta</i>	6.81
2017 比 2019	72.69	中蚓虫 <i>Mediomastus californiensis</i>	9.40
		独指虫 <i>Aricidea fragilis</i>	8.59
		寡鳃齿吻沙蚕 <i>Micronephthys oligobranchia</i>	8.40
		深沟毛虫 <i>Sigambra bassi</i>	8.07
2017 比 2020	84.83	长叶索沙蚕 <i>Lumbrineris longifolia</i>	7.34
		深沟毛虫 <i>Sigambra bassi</i>	8.40
		长叶索沙蚕 <i>Lumbrineris longifolia</i>	7.83
		中蚓虫 <i>Mediomastus californiensis</i>	6.75
2018 比 2019	67.46	寡鳃齿吻沙蚕 <i>Micronephthys oligobranchia</i>	6.45
		中蚓虫 <i>Mediomastus californiensis</i>	9.66
		深沟毛虫 <i>Sigambra bassi</i>	9.04
		长叶索沙蚕 <i>Lumbrineris longifolia</i>	8.37
		寡鳃齿吻沙蚕 <i>Micronephthys oligobranchia</i>	8.33
		独指虫 <i>Aricidea fragilis</i>	8.22
2018 比 2020	80.56	尖叶长手沙蚕 <i>Magelona cincta</i>	5.94
		深沟毛虫 <i>Sigambra bassi</i>	10.96
		长叶索沙蚕 <i>Lumbrineris longifolia</i>	8.39
		中蚓虫 <i>Mediomastus californiensis</i>	6.59
		寡鳃齿吻沙蚕 <i>Micronephthys oligobranchia</i>	6.21
2019 比 2020	79.50	尖叶长手沙蚕 <i>Magelona cincta</i>	5.38
		深沟毛虫 <i>Sigambra bassi</i>	8.99
		中蚓虫 <i>Mediomastus californiensis</i>	8.85
		独指虫 <i>Aricidea fragilis</i>	7.72
		寡鳃齿吻沙蚕 <i>Micronephthys oligobranchia</i>	7.20
		稚齿虫 <i>Prionospio sp.</i>	5.12

注: SIMPER 分析结果仅列出贡献率大于 5%的重要物种

2.5 群落结构稳定性评价

各年大型底栖动物 ABC 曲线(图 7)显示, 生物量曲线始终位于丰度曲线之上($W>0$), 说明大型底栖动物群落尚未受到干扰。 W 值逐年增加, 在投礁后第 4 年 W 值

(0.534)最高, 且投礁后第 3、4 年生物量曲线起点比投礁后第 1、2 年高, 说明大个体物种逐渐占据优势地位。总体来看, 调查海域的大型底栖动物群落结构在鱼礁建设后都处于一个相对稳定的状态, 并且稳定性不断增强。

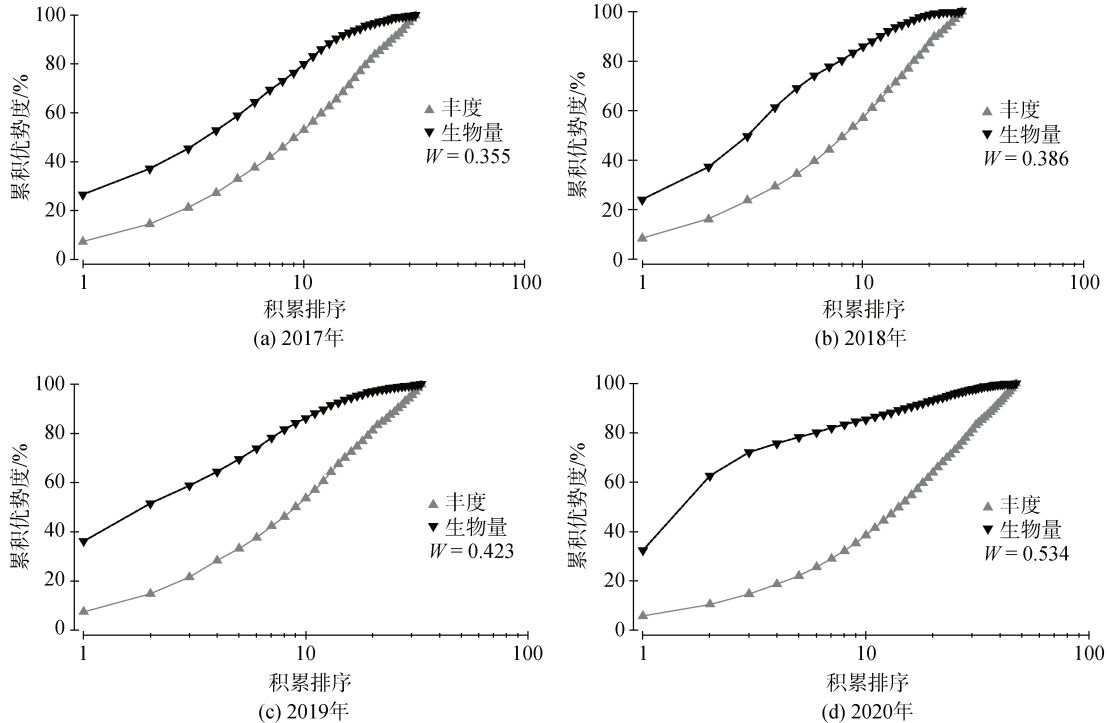


图 7 大型底栖动物的 ABC 曲线
Fig. 7 Macrobenthos ABC curves

3 讨论

3.1 大型底栖动物物种组成和优势种变化特征

大型底栖动物的种类组成、丰度和生物量是其群落结构的基本指标, 指标的变化可以反应外界扰动对群落的影响^[14]。2017—2020 年小竹山岛人工鱼礁区大型底栖动物的种类、丰度和生物量显著增加, 且甲壳类和软体动物在丰度和生物量的占比有所提升, 表明人工鱼礁投放后改善了底栖动物的栖息环境, 有利于大型底栖动物数量增长。这可能与鱼礁投入后产生的流场效应有关, 营养盐的释放促进了浮游生物等饵料生物的生长^[27], 且人工鱼礁的投放产生的辐射效应^[28-29], 会一定程度上改善邻近区的生态环境^[30]。此外, 鱼礁区的种类数也明显高于邻近区和对照区, 且甲壳类在鱼礁区的占比较大。由于人工鱼礁建设可显著提高海区的初级生产力^[8], 虽然大型底栖动物活动能力弱, 但甲壳类仍有迁移现象^[31],

因此甲壳类会被鱼礁区所“吸引”, 从而利用鱼礁区的有机物质进行更好地生长、发育、繁殖。

随着栖息环境的改善, 大型底栖动物优势物种数目发生变化。投礁后第 2、3 年比投礁后第 1 年优势种数增加, 但在投礁后第 4 年减少, 且鱼礁区各优势种的优势地位并不明显。这可能是因为软体动物以及甲壳类的个体数有了较大增长, 大型底栖动物总个体数增加, 而多毛类个体数变化幅度较小, 使其在优势种群的主导地位下降, 从而导致鱼礁区优势种数减少, 该结果表明群落内种群分布更加趋向均匀, 生态地位更加趋向平衡。王金宝等^[15]在研究长岛潮间带结果显示优势种为多毛类、甲壳类和软体动物。杨东等^[32]在烟台近海大型底栖动物调查时发现多毛类为主要优势种。刘旭东等^[33]对渤海山东近岸海域研究也发现大型底栖动物种类以多毛类和软体动物居多, 并且多毛类一般个体偏小、生活周期较短。本研究结果与以上的研究结果较一致, 尽管多毛类的优势地位基本不变, 但有向软体动物波动的趋

势。人工鱼礁的投入不仅为底栖生物提供了良好的栖息避敌场所,其作为一种附着基还为长牡蛎等营固着生活的生物提供良好的附着条件^[34]。此外,研究表明鱼礁投放后受海流变化影响,鱼礁根部流速较快区域的细沙土被移出,但在流速减弱处沉积形成较细的沉积物颗粒^[2],这种底质更适宜软体动物的埋栖生活。

3.2 大型底栖动物群落结构的变化

海洋牧场建设和大型底栖动物自身的生活史会影响大型底栖动物的群落结构^[14]。通过群落结构可以反映鱼礁建设对海洋生态系统的影响^[35],连续监测大型底栖动物群落结构可以更好地反应研究区域底栖生境的变化^[36]。根据 2017—2020 年小竹山岛人工鱼礁区大型底栖动物群落的聚类分析显示,群落结构的年份差异比区域差异明显,鱼礁区、邻近区和对照区大型底栖动物群落结构差异性小,各区域内大型底栖动物群落结构的相似性较低。影响大型底栖动物群落结构原因复杂,由于海域环境复杂,海流、底质类型和沉积环境等都会影响底栖动物的群落分布格局^[37-38]。陈晨等^[17]对象山港海洋牧场调查结果显示,示范区、邻近区和全港区的大型底栖动物群落区域间无显著性差异,与本研究结果相似。象山港是一个半封闭的港湾,受投礁影响,其原有的底栖生态环境发生改变,各站点栖息着不同结构的大型底栖动物群落,导致各站点之间群落的相似性低;小竹山岛人工鱼礁区位于渤海海峡中南部,该海域位处黄渤海交界处,受海流影响明显,导致水体交换较快,沉积环境复杂^[19],各区域内底质类型差异较大^[39],因此形成了较复杂的大型底栖动物群落结构。

ANOSIM 和 SIMPER 结果表明,随着礁体投放时间的增加,大型底栖动物的群落结构和物种组成发生了较大的年际变化,投礁后第 1、2 年(2017 年、2018 年)与投礁后第 3、4 年(2019 年、2020 年)大型底栖动物群落结构组成发生较大变化,且 2020 年群落的平均相似性最低。该变化反映出随着鱼礁投入时间的增加,周围海域的生境逐年发生改变。混合底质类型使该海域的空间异质程度不断增加,从而为大型底栖动物提供更多的生存发展空间,其群落结构也更为复杂化^[40]。另外,各年份大型底栖动物群落的主要贡献种随年份有明显变化,群落内贡献率较大的物种从深沟毛虫、长叶索沙蚕和寡鳃齿吻沙蚕

过渡为独指虫、中蚓虫和不倒翁虫。其中,深沟毛虫(*Sigambra bassi*)为常见耐受种,其对各类环境的适宜能力比较强^[41],在各年份均占据一定的贡献率,但随着时间推移,深沟毛虫的贡献率逐渐降低。而独指虫(*Aricidea fragilis*)为敏感种,受扰动反应敏感,对栖息环境的水质、底质等环境要求较高,在投礁后期独指虫的贡献率上升,表明人工鱼礁对周围的生态环境产生了积极的影响,海域环境质量得到改善,使得大型底栖动物群落结构发生变化。

3.3 大型底栖动物群落稳定性分析

Warwick^[26]提出运用丰度/生物量曲线来分析大型底栖动物群落的受环境扰动的状况。本研究中,丰度和生物量曲线没有明显交叉的情况,说明在鱼礁投入后并没有对底栖生境造成过度的干扰。同时,随着人工鱼礁投放时间的推移,*W* 值逐渐增加,表明大个体物种在生物量中占据优势。在投礁后第 4 年(2020 年),长牡蛎(*Magallana gigas*)(17.92 g/m²)和细螯虾(*Leptochela gracilis*)(7.56 g/m²)的生物量出现增长,大个体物种如东方缝线蛤(*Hiattella arctica*)和长牡蛎(*Magallana gigas*)开始作为优势种出现,多毛类数量占生物数量比例有所下降,这反映出大型底栖动物群落逐步趋于稳定,也显示出鱼礁对底栖生态环境的改善是一个长期的过程。孙习武等^[16]在调查海州湾人工鱼礁时发现,随着人工鱼礁的投放,大型底栖动物群落经历了扰动后逐渐恢复稳定,且大型底栖动物资源相较于投放前有所增加。此外,本研究调查发现生物多样性指数在年际间无明显波动变化以及规律性,也证实该区域大型底栖动物群落相对平稳^[42]。但与邻近海域的多样性相比,本调查海域多样性指数和丰富度指数较低。李乃成等^[20]对庙岛群岛南部海域调查结果显示各站位大型底栖动物多样性指数在 2.21 到 4.47 之间;赵荣荣等^[30]对 2013—2015 年长岛挡浪岛人工鱼礁区调查中,该区域底栖动物的多样性指数介于 1.50~2.50 之间,而小竹山岛海域在投礁后第 4 年(2020 年)多样性指数最高,范围仅在 1.50~1.95 之间。多样性指数的高低取决于物种的丰富和均匀程度^[43-44],大型底栖动物群落的物种组成与底质沉积环境密切相关^[45]。研究表明,泥沙等粒径较小的粉砂底质更适合软体动物、棘皮动物的生长^[46-47]。本文研究海域泥沙底质较少,多为粗石沙砾底质,沉积物粒径大,因此多毛类种类数多。甲壳类和软体动物丰度和生物量虽有增长,但

总体增长幅度较小,而多毛类生长周期相对较短,小个体多毛类如深沟毛虫、长叶索沙蚕个体数量仍然占据主导,因此造成群落种类组成相对单一,使该区域多样性较低。

总体来看,2017—2020年,小竹山岛人工鱼礁区大型底栖动物种类数、丰度和生物量逐年增加,且鱼礁区比邻近区和对照区的增加更显著。鱼礁的投入有利于群落结构的稳定,表明人工鱼礁的投放起到了较好的生境修复效果。但人工鱼礁投放对海洋生态环境和生态系统的影响是长时间尺度的,建议对小竹山岛人工鱼礁区大型底栖动物的群落结构进行更大范围、更长时间的跟踪调查,并结合浮游动物、浮游植物和渔业资源的研究,从而更全面的评价人工鱼礁区海域的生境状况。

参考文献:

- [1] FABI G, LUCCARINI F, PAMFILI M, et al. Effects of an artificial reef on the surrounding soft-bottom community (central Adriatic Sea)[J]. *ICES Journal of Marine Science/Journal du Conseil*, 2002, 59(59): S343-S349.
- [2] 陈勇, 于长清, 张国胜, 等. 人工鱼礁的环境功能与集鱼效果[J]. *大连水产学院学报*, 2002, 17(1): 64-69.
CHEN Yong, YU Changqing, ZHANG Guosheng, et al. The environmental function and fish gather effect of artificial reef[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2002, 17(1): 64-69.
- [3] 方光杰, 孙利元, 唐衍力, 等. 基于刺网和地笼渔获物的人工鱼礁区资源丰度比较研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(S1): 23-33.
FANG Guangjie, SUN Liyuan, TANG Yanli, et al. A comparative study on fishery resource of artificial reefs based on gillnet and cage catches[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2018, 48(S1): 23-33.
- [4] 公丕海, 郑延璇, 李娇, 等. 塔型桁架人工鱼礁流场效应及稳定性[J]. *中国水产科学*, 2019, 26(5): 1021-1028.
GONG Pihai, ZHENG Yanxuan, LI Jiao, et al. Flow field effect and stability of the equilateral tower-type truss artificial reef[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2019, 26(5): 1021-1028.
- [5] 林军, 章守宇. 人工鱼礁物理稳定性及其生态效应的研究进展[J]. *海洋渔业*, 2006, 28(3): 257-262.
LIN Jun, ZHANG Shoujun. Research advances on physical stability and ecological effects of artificial reef[J]. *Marine Fisheries*, 2006, 28(3): 257-262.
- [6] 斯广杰, 陈丕茂, 陈勇, 等. 海洋底栖生物生态学的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(19): 9026-9029.
SI Guangjie, CHEN Pimao, CHEN Yong, et al. Research progress of marine benthos ecology[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(19): 9026-9029.
- [7] ZALMON I R, SA F S D, NETO E J D, et al. Impacts of artificial reef spatial configuration on infaunal community structure — Southeastern Brazil[J]. *Journal of Experimental Marine Biology & Ecology*, 2014, 454(5): 9-17.
- [8] 李娇, 关长涛, 公丕海, 等. 人工鱼礁生态系统碳汇机理及潜能分析[J]. *渔业科学进展*, 2013, 34(1): 65-69.
LI Jiao, GUAN Changtao, GONG Pihai, et al. Carbon sequestration mechanism and potential analysis of artificial reef ecosystem[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2013, 34(1): 65-69.
- [9] 蔡立哲. 海洋底栖生物生态学和生物多样性研究进展[J]. *厦门大学学报*, 2006, 45(S2): 83-89.
CAI Lizhe. Progress on marine benthos ecology and biodiversity[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2006, 45(S2): 83-89.
- [10] 赵永松, 单秀娟, 杨涛, 等. 庙岛群岛毗邻海域秋冬季底栖食物网潜在碳来源贡献及对碳汇渔业的思考[J]. *渔业科学进展*, 2022, 43(5): 132-141.
ZHAO Yongsong, SHAN Xiujian, YANG Tao, et al. Contributions of carbon sources to food webs adjacent to the Miaodao Archipelago and their implications for carbon sink fisheries[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2022, 43(5): 132-141.
- [11] 张均龙, 史本泽, 赵峰, 等. 中国海洋底栖生物学发展回顾与展望[J]. *海洋科学集刊*, 2016, 51: 194-204.
ZHANG Junlong, SHI Benze, ZHAO Feng, et al. Progress and prospect in marine benthology in China[J]. *Studia Marina Sinica*, 2016, 51: 194-204.
- [12] NICOLETTI L, MARZIALETTI S, PAGANELLI D, et al. Long-term changes in a benthic assemblage associated with artificial reefs[J]. *Hydrobiologia*, 2007, 580(1): 233-240.
- [13] 李宝泉, 姜少玉, 吕卷章, 等. 黄河三角洲潮间带及近岸浅海大型底栖动物物种组成及长周期变化[J]. *生物多样性*, 2020, 28(12): 1511-1522.
LI Baoquan, JIANG Shaoyu, LV Juanchang, et al. Species composition and long-term variation of macrobenthos in intertidal zone and offshore areas of the Yellow River Delta[J]. *Biodiversity Science*, 2020, 28(12): 1511-1522.
- [14] 纪莹璐, 张乃星, 王岚, 等. 小麦岛邻近海域秋季大型底栖动物生态特征[J]. *水产科学*, 2022, 41(3): 388-397.
JI Yinglu, ZHANG Naixing, WANG Lan, et al. Ecological characteristics of macrobenthos near Mai Island during autumn[J]. *Fisheries Science*, 2022, 41(3): 388-397.

- [15] 王金宝, 李新正, 王洪法, 等. 山东长岛潮间带大型底栖动物生态特征研究[J]. 海洋科学, 2018, 42(10): 41-52. WANG Jinbao, LI Xinzheng, WANG Hongfa, et al. Macrobenthic ecology in the intertidal zones of Changdao Islands in Shandong Province[J]. Marine Sciences, 2018, 42(10): 41-52.
- [16] 孙习武, 孙满昌, 张硕, 等. 海州湾人工鱼礁二期工程海域大型底栖生物初步研究[J]. 生物学杂志, 2011, 28(1): 57-61. SUN Xiwu, SUN Manchang, ZHANG Shuo, et al. Preliminary study on macrobenthos in the second phase artificial reef construction area of Haizhou Bay[J]. Journal of Biology, 2011, 28(1): 57-61.
- [17] 陈晨, 焦海峰, 王一农, 等. 象山港海洋牧场示范区大型底栖生物的时空变化[J]. 海洋与湖沼, 2016, 47(1): 130-139. CHEN Chen, JIAO Haifeng, WANG Yinong, et al. Temporal and spatial changes of macrobenthos in marine pasture demonstration area in Xiangshan Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 47(1): 130-139.
- [18] 卞晓东, 万瑞景, 金显仕, 等. 近 30 年渤海鱼类种群早期补充群体群聚特性和结构更替[J]. 渔业科学进展, 2018, 39(2): 1-15. BIAN Xiaodong, WAN Ruijing, JIN Xianshi, et al. Ichthyoplankton succession and assemblage structure in the Bohai Sea during the past 30 years since the 1980s[J]. Progress in Fishery Sciences, 2018, 39(2): 1-15.
- [19] 徐兆东, 石洪华, 李乃成, 等. 庙岛群岛南部海域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 环境科学研究, 2015, 28(5): 704-712. XU Zhaodong, SHI Honghua, LI Naicheng, et al. Macrobenthic community structure and its relationship with environmental factors in the Southern Waters of the Miaodao Archipelago[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(5): 704-712.
- [20] 李乃成, 刘晓收, 徐兆东, 等. 庙岛群岛南部海域大型底栖动物多样性[J]. 生物多样性, 2015, 23(1): 41-49. LI Naicheng, LIU Xiaoshou, XU Zhaodong, et al. Biodiversity of macrofauna in the southern waters of Miaodao Archipelago[J]. Biodiversity Science, 2015, 23(1): 41-49.
- [21] ZALMON I R, BOINA C D, ALMEIDA T C M. Artificial reef influence on the surrounding infauna—north coast of Rio de Janeiro State, Brazil[J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 2012, 92(6): 1289-1299.
- [22] REEDS K A, SMITH J A, SUTHERS I M, et al. An ecological halo surrounding a large offshore artificial reef: Sediments, infauna, and fish foraging[J]. Marine Environmental Research, 2018, 141(10): 30-38.
- [23] 国家质量监督检验检疫局. GB/T12763-2007 海洋调查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007. General administration of quality supervision, inspection and quarantine. GB/T12763.9-2007 Marine Investigation Criterion[S]. Beijing: China Standard Press, 2007.
- [24] 徐兆礼, 陈亚瞿. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲈鲆渔场的关系[J]. 生态学杂志, 1989, 8(4): 13-15. XU Zhaoli, CHEN Yaqu. Aggregated intensity of dominant species of zooplankton in autumn in the East China Sea and Yellow Sea[J]. Chinese Journal of Ecology, 1989, 8(4): 13-15.
- [25] CLARKE K R, WARWICK R M. Change in the marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation, 2nd Edition[M]. Bournemouth: Bournemouth Press Limited, 2001: 1-148.
- [26] WARWICK R M. A new method for detecting pollution effects on marine macrobenthic communities[J]. Marine Biology, 1986, 92(4): 557-562.
- [27] 陈传曦, 张建柏, 王新萌, 等. 渤海莱州湾芙蓉岛人工鱼礁区浮游动物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 中国水产科学, 2021, 28(3): 299-313. CHEN Chuanxi, ZHANG Jianbai, WANG Xinmeng, et al. Zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in an artificial reef near Furong Island, Laizhou Bay, Bohai Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2021, 28(3): 299-313.
- [28] 任彬彬, 袁伟, 孙坚强, 等. 莱州湾金城海域鱼礁投放后大型底栖动物群落变化[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1863-1870. REN Binbin, YUAN Wei, SUN Jianqiang, et al. Impact of artificial reef on community of macrobenthos in Jincheng area of Laizhou Bay, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(6): 1863-1870.
- [29] WANG X, SUN P, TANG Y, et al. Distribution characteristics of fat greenling (*Hexagrammos otakii*) inhabiting artificial reefs around Qiansandao Island, Haizhou Bay, China[J]. Journal of Ocean University of China, 2019, 18(5): 1227-1234.
- [30] 赵荣荣, 公丕海, 张艳, 等. 长岛挡浪岛人工鱼礁区生态系统健康评价[J]. 渔业科学进展, 2019, 40(6): 9-17. ZHAO Rongrong, GONG Pihai, ZHANG Yan, et al. Ecosystem health assessment of artificial reef area in Long Island[J]. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(6): 9-17.
- [31] 韩洁, 张志南, 于子山. 渤海中、南部大型底栖动物物种多样性的研究[J]. 生物多样性, 2003, 11(1): 20-27. HAN Jie, ZHANG Zhishang, YU Zishan. Macrobenthic species diversity in southern and central Bohai Sea, China[J]. Biodiversity Science, 2003, 11(1): 20-27.

- [32] 杨东, 周政权, 张建设, 等. 烟台牟平海洋牧场夏季大型底栖动物群落特征[J]. 海洋科学, 2017, 41(5): 134-143.
YANG Dong, ZHOU Zhengquan, ZHANG Jianshe, et al. Characteristics of macrobenthic communities at the Muping marine ranch of Yantai in summer[J]. Marine Sciences, 2017, 41(5): 134-143.
- [33] 刘旭东, 汪进生, 孙立娥, 等. 渤海山东近岸海域大型底栖动物的群落结构及多样性分析[J]. 海洋环境科学, 2021, 40(6): 929-936.
LIU Xudong, WANG Jinsheng, SUN Lie, et al. Community structure and diversity of macrozoobenthos at Bohai Sea off Shandong[J]. Marine Environmental Science, 2021, 40(6): 929-936.
- [34] 詹启鹏, 孙昕, 董建宇, 等. 莱州芙蓉岛海域人工鱼礁附着生物的群落结构和功能性状[J]. 中国水产科学, 2022, 29(5): 704-719.
ZHAN Qipeng, SUN Xin, DONG Jianyu, SUN Lie, et al. Community structure and functional traits of attached organisms on an artificial reef near Furong Island, Laizhou Bay[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2022, 29(5): 704-719.
- [35] 杨梅, 李新正, 徐勇, 等. 胶州湾潮下带大型底栖动物群落的季节变化[J]. 生物多样性, 2016, 24(7): 820-830.
YANG Mei, LI Xinzheng, XU Yong, et al. Seasonal variations in macrobenthic communities in the subtidal zones of Jiaozhou Bay[J]. Biodiversity Science, 2016, 24(7): 820-830.
- [36] 丁敬坤, 薛素燕, 李加琦, 等. 基于大型底栖动物的桑沟湾不同养殖区底栖生境健康评价[J]. 中国水产科学, 2020, 27(12): 1393-1401.
DING Jinkun, XUE Suyan, LI Jiaqi, et al. Health assessment of large-scale aquaculture on benthic habitats in Sanggou Bay[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(12): 1393-1401.
- [37] 李帅, 吕腾腾, 韩庆功, 等. 2010年5月与2013年6月黄、渤海大型底栖动物群落组成和结构的比较研究[J]. 海洋学研究, 2017, 35(1): 86-94.
LI Shuai, LV Tengting, HAN Qinggong, et al. Comparison of composition and structure of macrobenthic communities in the Yellow Sea and the Bohai Sea in May 2010 and June 2013[J]. Journal of Marine Sciences, 2017, 35(1): 86-94.
- [38] 王瑜, 刘录三, 刘存歧, 等. 渤海湾近岸海域春季大型底栖动物群落特征[J]. 环境科学研究, 2010, 23(4): 430-436.
WANG Yu, LIU Lusan, LIU Cunqi, et al. Community structure characteristics of macrobenthos in the coastal seawaters of Bohai Bay in spring[J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(4): 430-436.
- [39] YU H, FANG G, ROSE K A, et al. Examining epibenthic assemblages associated with artificial reefs using a species archetype approach[J]. Marine and Coastal Fisheries, 2022, 14(3): e10206.
- [40] 丁敬坤, 李加琦, 薛素燕, 等. 莱州湾小清河口近岸海域底栖生境健康评价[J]. 生态学报, 2021, 41(12): 4806-4817.
DING Jingkun, LI Jiaqi, XUE Suyan, et al. Health assessment for benthic habitats of macrobenthos in the sea area adjacent to the Xiaoqing River estuary, Laizhou Bay[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(12): 4806-4817.
- [41] 徐兆礼, 蒋玫, 白雪梅, 等. 长江口底栖动物生态研究[J]. 中国水产科学, 1999, 6(5): 59-62.
XU Zhaoli, JANG Mei, BAI Xuemei, et al. An ecological study on benthos in the Changjiang Estuary[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 1999, 6(5): 59-62.
- [42] 李宝泉, 李新正, 王洪法, 等. 胶州湾大型底栖软体动物物种多样性研究[J]. 生物多样性, 2006, 14(2): 136-144.
LI Baoquan, LI Xinzheng, WANG Hongfa, et al. Species diversity of macrobenthic mollusk fauna in Jiaozhou Bay, Shandong[J]. Biodiversity Science, 2006, 14(2): 136-144.
- [43] 吴金浩, 宋广军, 韩家波, 等. 渤海老铁山海域沉积物粒度分布及其对大型底栖生物群落的影响[J]. 水产科学, 2019, 38(5): 624-635.
WU Jinhao, SONG Guangjun, HAN Jiabo, et al. Granularity distribution of sediments and effect on macrobenthos community in Laotie Mountain area of Bohai Sea[J]. Fisheries Science, 2019, 38(5): 624-635.
- [44] WANG Z, WANG H, FAN S, et al. Community structure and diversity of macrobenthos in Jiaozhou Bay[J]. Marine Pollution Bulletin, 2021, 171, 112781.
- [45] 周然, 覃雪波, 彭士涛, 等. 渤海湾大型底栖动物调查及与环境因子的相关性[J]. 生态学报, 2014, 34(1): 50-58.
ZHOU Ran, QIN Xuebo, PENG Shitao, et al. Macroinvertebrate investigation and their relation to environmental factors in Bohai Bay[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(1): 50-58.
- [46] 马文刚, 夏景全, 魏一凡, 等. 三亚蜈支洲岛海洋牧场近岛区底表大型底栖动物群落结构及评价[J]. 热带海洋学报, 2022, 41(3): 135-146.
MA Wengang, XIA Jingquan, WEI Yifan, et al. Community structure evaluation of epifaunal macrozoobenthos in the near-island waters of marine ranching in Wuzhizhou Island, Sanya[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2022, 41(3): 135-146.
- [47] 纪莹璐, 王尽文, 张乃星, 等. 日照市近海大型底栖动物群落结构和生物多样性[J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(1): 119-130.

Preliminary study on the community structure of macrobenthos in the artificial reef area of Xiaozhushan Island

SUN Xue-ting¹, YU Hao-lin², TANG Yan-li¹, YU Meng-jie¹, ZHAO Wei¹,
SHENG Hua-xiang¹

(1. College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266003, China)

Received: Aug. 29, 2022

Key words: Xiaozhushan Island; Artificial reef; Macrobenthos; Community structure

Abstract: To investigate the variation of the macrobenthos community structure following the placement of artificial reefs in Xiaozhushan Island, eight voyages of macrobenthos surveys were conducted from 2017 to 2020 in the reef, adjacent, and control areas to Xiaozhushan Island. The species composition, dominant species, abundance, biomass, and biodiversity on Xiaozhushan Island were investigated. The interannual variation in the macrobenthic community structure was compared between the years. The abundance/biomass curves were used to explore the stability of the macrobenthic communities. The results showed that 72 macrobenthic species were identified, including 45 species of Polychaeta, 16 species of Crustacea, 8 species of Mollusca, and 3 species of Echinodermata. Simultaneously, the number of species increased by 15 during the fourth year (2020) compared with the first year (2017) after casting the reefs. Additionally, more species were detected in the reef area than in the adjacent and control areas. There were interannual fluctuations in the composition of dominant species, but Polychaeta was the dominant group. The biomass and abundance of macrobenthos increased annually and were significantly different over the four years. However, no significant difference was detected between the areas. The annual average biomass increased from 2.11 g/m² to 4.38 g/m², and the annual average abundance increased from 289.31 ind./m² to 764.14 ind./m². The Shannon–Wiener diversity index, the Margalef richness index, and the Pielou evenness index of macrobenthos did not differ significantly among the years or the areas. The CLUSTER results showed that the similarity of the macrobenthic community structure was low over the years, and the distribution pattern of the macrobenthic community varied between the years. The two-factor similarity analysis indicated significant differences in the macrobenthic community structure in the surveyed sea area among the years ($P < 0.01$) but no significant differences among the areas ($P > 0.05$). The results of the similarity percentage analysis showed that *Sigambra bassi*, *Lumbrineris longiforlia*, *Mediomastus californiensis*, and *Nephtys oligobranchia* were the key species that added to the differences in the community during the surveys. The abundance/biomass curves indicated that no disturbance to the macrobenthic community occurred during the investigation period, and the macrobenthic communities stabilized with increased reef casting time.

(本文编辑: 杨 悦)