

DOI: 10.20103/j.stxb.202403250607

贾胜华,熊李虎,林良羽,廖一波,郑重莺,毛健,叶文建,柴雪良.贝类增殖放流对潮间带大型底栖动物群落的影响——以坎门湾为例.生态学报, 2025, 45(4): 1711-1722.

Jia S H, Xiong L H, Lin L Y, Liao Y B, Zheng C Y, Mao J, Ye W J, Chai X L. The influences of shellfish releasing on the macrobenthic community in intertidal zone: A case study in Kanmen Bay, China. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(4): 1711-1722.

## 贝类增殖放流对潮间带大型底栖动物群落的影响 ——以坎门湾为例

贾胜华<sup>1,2</sup>, 熊李虎<sup>1,2,\*</sup>, 林良羽<sup>1,2</sup>, 廖一波<sup>2,3</sup>, 郑重莺<sup>1,2</sup>, 毛健<sup>1,2</sup>, 叶文建<sup>1,2</sup>, 柴雪良<sup>1,2</sup>

1 浙江省海洋科学院, 杭州 310012

2 自然资源部海洋空间资源管理技术重点实验室, 杭州 310012

3 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012

**摘要:** 为了解贝类增殖放流对潮间带大型底栖动物群落的影响, 于 2022 年 5 月(春季)和 10 月(秋季)对台州市玉环县坎门湾区域贝类增殖区和对照区潮间带大型底栖动物群落开展了现场调查和研究。两次调查共采集到大型底栖动物 6 门 7 纲 55 科 89 种, 增殖区记录到的物种数(62 种)高于对照区(59 种), 全区、增殖区和对照区大型底栖动物均为软体动物种类占比最高, 分别占相应区域物种数的 46.07%、51.61% 和 49.15%。春季, 增殖区和对照区大型底栖动物优势种分别为 9 种和 4 种, 共有优势种是微角齿口螺 *Odostomia subangulata* 和纹藤壶 *Amphibalanus amphitrite*; 秋季, 分别为 4 种和 5 种, 共有优势种是缢拟沼螺 *Assiminea latericea* 和日本大眼蟹 *Macrophthalmus (Mareotis) japonicus*。不管是春季还是秋季, 大型底栖动物平均栖息密度、生物量、Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )、Margalef 丰富度指数( $D$ )均表现为增殖区>对照区, 而 Pielou 均匀度指数( $J'$ )表现为对照区>增殖区。双因素方差分析表明, 增殖区和对照区之间大型底栖动物生物量差异显著, 而种类数、栖息密度在春季和秋季之间差异显著, 其余参数在区域间及季节间差异均不显著。聚类分析表明, 春季增殖区和对照区的大型底栖动物群落相似度较高, 可分为增殖区(T1 和 T2 断面)和对照区(T3 和 T4 断面)2 组; 秋季相似度较低, 可分为增殖区 T1 断面、增殖区 T2 断面和对照区 T3 和 T4 断面 3 组。结合增殖放流前以及周边调查数据, 贝类增殖放流两年后, 大型底栖动物群落物种数、平均栖息密度、生物量、Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )和 Margalef 丰富度指数( $D$ )均有提高, 但效果不明显, 研究区域大型底栖动物恢复效果并不理想。

**关键词:** 大型底栖动物; 群落结构; 生物多样性; 贝类增殖放流; 坎门

## The influences of shellfish releasing on the macrobenthic community in intertidal zone: A case study in Kanmen Bay, China

JIA Shenghua<sup>1,2</sup>, XIONG Lihu<sup>1,2,\*</sup>, LIN Liangyu<sup>1,2</sup>, LIAO Yibo<sup>2,3</sup>, ZHENG Chongying<sup>1,2</sup>, MAO Jian<sup>1,2</sup>, YE Wenjian<sup>1,2</sup>, CHAI Xueliang<sup>1,2</sup>

1 Marine Academy of Zhejiang Province, Hangzhou 310012, China

2 Key Laboratory of Ocean Space Resource Management Technology, Ministry of Natural Resources of the People's of China, Hangzhou 310012, China

3 Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

**Abstract:** To better understand the influences of shellfish release on the macrobenthic community in intertidal zone, we sampled biological materials in the tidal zone of Kanmen Bay. Two sampling special schemes were used, i.e., shellfish

基金项目: 浙江省自然资源厅自然资源科技项目(2024ZJHY007, 2021-49)

收稿日期: 2024-03-25; 网络出版日期: 2024-11-06

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lihuxiong@126.com

releasing area and the control area sampled in May 2022 and October 2022. The macrobenthic communities were analyzed in the two areas. In total, 89 taxa of macrobenthos were identified across all areas, among which 62 and 59 taxa were recorded in shellfish releasing area and in the control area, respectively. Mollusca were the dominant macrobenthos in the whole area, shellfish releasing area and the control area, accounting for 46.07%, 51.61% and 49.15% respectively. In spring, there were nine dominant species in shellfish releasing area, and four in the control area. *Odostomia subangulata* and *Amphibalanus amphitrite* were common dominant species. In autumn, there were four dominant species in shellfish releasing area, and five in the control area. *Assimineia latericea* and *Macrophthalmus (Mareotis) japonicus* were common dominant species. The average abundance, biomass, Shannon-Wiener diversity index, and Margalef richness index were ranked as shellfish releasing area > control area despite whether it was in spring or in fall, while the Pielou's evenness index was higher in control area than in shellfish releasing area. Results of two-way ANOVA showed that the biomass of the macrobenthos was significantly different between the shellfish releasing area and the control area, the number of species, density were significantly different between spring and autumn, and other parameters were not significantly different between regions and seasons. All the macrobenthos were divided into two groups—T1 and T2 sections in shellfish releasing area, T3 and T4 sections in control area in spring, three groups—T1 sections in shellfish releasing area, T2 sections shellfish releasing area, T3 and T4 sections in control area in autumn. Combined with pre-release and surrounding survey data, though the species, average abundance, average biomass, Shannon-Wiener index ( $H'$ ), and Margalef's species richness index ( $D$ ) increase after two years of shellfish releasing, the recovery of macrobenthos in the study area was not satisfactory.

**Key Words:** macrobenthos; community structure; diversity; shellfish releasing; Kanmen

2018 年以来, 国家加强滨海湿地保护, 严格管控围填海活动<sup>[1]</sup>, 并对沿海省份围填海区块进行了大规模生态评估, 对围填海区块周边滩涂湿地开展了大量的生态修复实践<sup>[2]</sup>。增殖放流是修复区域生物群落和生物资源的重要措施之一, 能直接弥补海洋生物资源受到的影响和损失, 目前应用广泛<sup>[3]</sup>。贝类增殖放流能增加放流区域的生物种类, 改变物种优势度, 增加生物量和生物多样性。通过增殖放流能改变大型底栖生物群落结构, 增加群落稳定性。由于贝类可过滤水体悬浮物, 减少水体中颗粒有机物(如藻类和有机碎屑)含量, 从而间接控制氮磷营养盐浓度, 耦合底栖-中上层环境, 并将水体中的营养盐转移到底栖群落<sup>[4-5]</sup>, 从而改善水质。目前, 关于贝类增殖放流对潮下带浮游植物<sup>[6-7]</sup>、潮下带大型底栖动物群落的影响<sup>[8-9]</sup>等研究较多, 但对潮间带大型底栖动物群落的影响研究报道较少。

作为滩涂湿地生态系统的重要组成部分, 大型底栖动物连接初级生产者和顶级捕食者<sup>[10]</sup>, 是物质循环和能量流动的重要一环<sup>[11]</sup>, 对于生态系统的结构和功能维系具有重要作用<sup>[12]</sup>。大型底栖动物活动能力较弱、活动范围较固定、生命周期长、对环境变化敏感, 其群落特征变化能反映所处环境的长期变化<sup>[13-16]</sup>。深入了解贝类增殖放流对潮间带大型底栖动物群落的影响, 能为滩涂湿地生态修复以及修复效果评估等提供科学依据。2020 年 3 月份, 在浙江省台州市玉环县坎门湾滩涂湿地区域开展了贝类增殖放流, 以期修复区域潮间带生态系统, 增殖放流活动共计投放青蛤 *Cyclina sinensis* 苗种 253.5 kg、泥蚶 *Tegillarca granosa* 苗种 1035 kg、彩虹明樱蛤 *Moerella iridescens* 苗种 269 kg。在贝类增殖放流后的 2022 年 5 月和 10 月, 对坎门湾贝类增殖放流区域(以下称增殖区)及对照区滩涂进行了两个航次(春季和秋季)潮间带大型底栖动物定量及定性调查, 对比分析了两个区域潮间带大型底栖动物群落结构异同, 并结合区域历史调查数据, 以期探讨贝类增殖放流对潮间带大型底栖动物群落的影响, 为滩涂湿地生态系统保护和修复提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

坎门湾位于浙江省台州市玉环县, 湾内滩涂资源丰富, 主要为泥滩, 底质类型主要为粘土质粉砂。靠海侧

有防波堤阻隔,仅有 260 m 口子与外界进行水交换(图 1),研究区域内水文动力弱,两区域的水动力及水质环境条件差异不明显。该区域属亚热带季风气候,兼有明显的海洋性气候,多年平均气温 16.9 °C,平均雨日 158 d,平均降水量 1421 mm,全年风向以 N 向最多。

## 1.2 调查断面布设

贝类增殖放流位于坎门湾环岛南路外侧滩涂(图 1)。结合历史调查断面,在坎门湾内增殖区及其邻近对照区域(也在坎门湾内)各布设了两条断面,即增殖区的 T1 断面和 T2 断面,对照区的 T3 断面和 T4 断面,断面分布见图 1。T1 断面和 T2 断面相距约 700 m, T2 断面和 T3 断面相距约 900 m, T3 断面和 T4 断面相距约 500 m。每条断面分别在高潮带、中潮带和低潮带各布设 1 个、3 个和 1 个调查站点,断面长度约 900 m,每条断面第 1 个调查站点位于海堤下方抛石处,第 2 个调查站点位于海堤下边缘与泥面交界位置,第 3—5 个调查站点均位于泥滩。一般第 1 个和第 2 个调查站点相距较近,第 2 到第 5 个调查站点依次相距约 300 m。

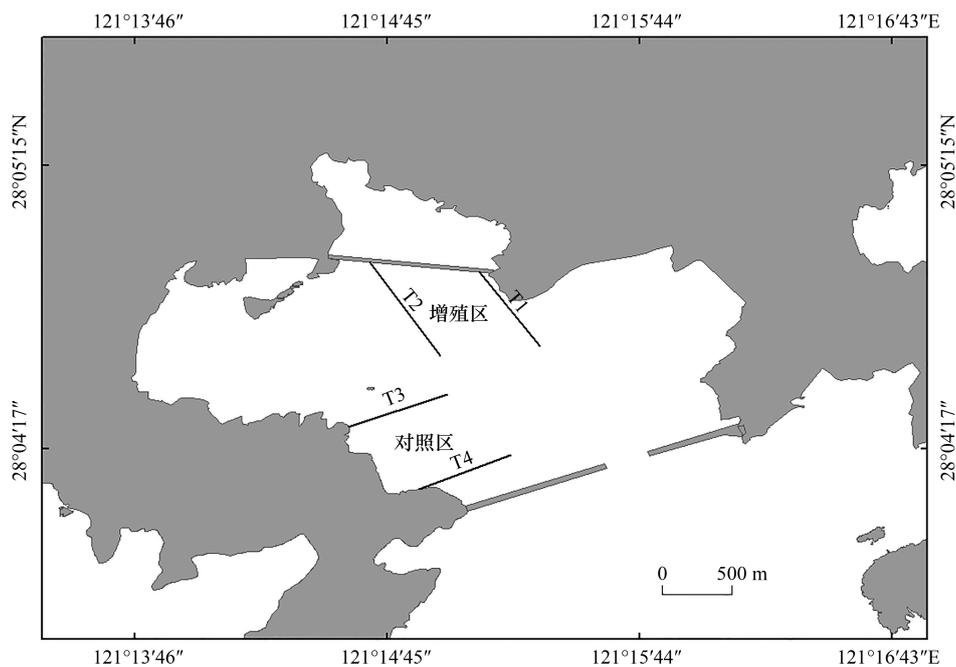


图 1 坎门湾滩涂贝类增殖区与对照区大型底栖动物调查断面布设

Fig.1 Sampling sites of macrobenthos in shellfish releasing and the control area in the tidal zone of Kanmen Bay

## 1.3 调查时间和调查方法

现场调查分别于增殖放流后第 26 个月(2022 年 5 月,春季)和第 31 个月(2022 年 10 月,秋季)开展,对增殖区和对照区大型底栖动物进行了定量及定性采样。

现场采样和样品分析参照《海洋调查规范》第 6 部分:海洋生物调查(GB/T 12763.6—2007)。用 25 cm×25 cm 正方形取样框,每个站点采集 4 个样方,先拾取框内滩面上的底栖动物,再挖至 30 cm 深的底泥,根据底栖动物穴居特点,适当加大采样深度,经孔径 0.5 mm 筛网分选出底内生物。同时,在各调查站点周围采集定性标本。将筛网截留的生物体和残渣装入 500 mL 样品瓶,现场用体积分数 5% 的中性甲醛溶液固定,带回实验室,再次用 0.5 mm 筛网分选。在解剖镜(莱卡 M205C)和显微镜(莱卡 DM2500)下进行挑选、鉴定和计数。分类鉴定参考《中国海洋生物名录》<sup>[17]</sup>、《中国近海多毛环节动物》<sup>[18]</sup>、《浙江动物志》<sup>[19]</sup>和《中国海产双壳类图志》<sup>[20]</sup>等,将样品尽量鉴定到种或属,统计不同物种的个体数,用吸水纸吸干表面水分,再用 0.001 g 电子天平(JA5003)称物种湿重。

## 1.4 数据处理

将测量得到的个体数与物种湿重按照采样面积换算为栖息密度(个/m<sup>2</sup>)和生物量(g/m<sup>2</sup>)。采用

Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ )、Margalef 丰富度指数 ( $D$ ) 和 Pielou 均匀度指数 ( $J'$ ) 分析大型底栖动物群落特征, 计算公式分别为:

$$H' = - \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i, D = (S - 1) / \ln N, J' = H' / \ln S$$

式中,  $P_i$  为第  $i$  种的个数与该样品总个数的比例,  $S$  为样品中的总种类数,  $N$  为样品中所有种类的总个体数。

采用物种优势度指数 ( $Y$ ) 确定大型底栖动物的优势种:  $Y = P_i \times f_i$ , 式中,  $P_i$  为第  $i$  种的个体数占物种总个体数的比例,  $f_i$  为该种在各站位出现的频率。当  $Y > 0.02$  时, 确定该物种为优势种<sup>[21]</sup>。

采用 SPSS 19.0 统计软件分析数据, 对大型底栖动物群落参数进行以季节和研究区域为因子的双因素方差分析。双因素方差分析前, 检验数据的正态性 (Kolmogorov-Smirnov test) 和方差同质性 (Bartlett test)。描述性统计值用平均值  $\pm$  标准误差表示, 显著水平设置为  $\alpha = 0.05$ <sup>[22]</sup>。应用 PRIMER 6.0 软件对栖息密度数据进行平方根转换, 以 Bray-Curtis 相似性系数为基础进行等级聚类 (CLUSTER) 和非度量多维尺度排序 (non-metric multidimensional scaling, NMDS) 分析<sup>[23-24]</sup>。

## 2 研究结果

### 2.1 种类组成和优势种

两季调查, 全区共采到大型底栖动物 6 门 7 纲 55 科 89 种, 具体种类见表 1。其中, 环节动物 21 种, 占 23.60%; 软体动物 41 种, 占 46.07%; 节肢动物 21 种, 占 23.60%; 脊索动物 4 种, 星虫动物 1 种和纽形动物各 1 种, 共占 6.74%。可见区域软体动物种类最多, 其次是环节动物和节肢动物, 三者是坎门湾滩涂潮间带大型底栖动物群落的主要类群。

表 1 研究区域大型底栖动物名录

Table 1 List of macroinvertebrates collected in the study area

门 Phylum	纲 Class	科 Family	种 Species	增殖区 Shellfish releasing area	对照区 The control area
环节动物 Annelida	多毛纲	不倒翁虫科	不倒翁虫 <i>Sternaspis scutata</i>		√
		齿吻沙蚕科	多鳃卷吻齿沙蚕 <i>Nephtys polybranchia</i>		√
			寡鳃卷吻齿沙蚕 <i>Nephtys oligobranchia</i>	√	√
			双鳃内卷齿蚕 <i>Aglaophamus dibranchis</i>	√	√
		单指虫科	双形拟单指虫 <i>Cossurella dimorpha</i>		√
		海稚虫科	矮小稚齿虫 <i>Prionospio (Apoprionospio) pygmaea</i>		√
			昆士兰稚齿虫 <i>Prionospio (Prionospio) queenslandica</i>		√
		角吻沙蚕科	寡节甘吻沙蚕 <i>Glycinde gurjanvae</i>		√
		欧努菲虫科	智利巢沙蚕 <i>Diopatra chilensis</i>		√
		沙蚕科	日本刺沙蚕 <i>Neanthes japonica</i>	√	
			双齿围沙蚕 <i>Perinereis aibuhitensis</i>	√	√
		双栉虫科	副栉虫 <i>Paramphicteis angustifolia</i>	√	
		丝鳃虫科	刚鳃虫 <i>Chaetozone setosa</i>		√
		索沙蚕科	异足索沙蚕 <i>Lumbrineris heteropoda</i>		√
			长叶索沙蚕 <i>Lumbrineris longifolia</i>	√	
		吻沙蚕科	白色吻沙蚕 <i>Glycera alba</i>		√
			长吻沙蚕 <i>Glycera chirori</i>	√	√
		小头虫科	异蚓虫 <i>Heteromastus filiformis</i>	√	
		长手沙蚕科	日本长手沙蚕 <i>Magelona japonica</i>	√	
		竹节虫科	曲强真节虫 <i>Euclymene lombricoides</i>	√	

续表

门 Phylum	纲 Class	科 Family	种 Species	增殖区 Shellfish releasing area	对照区 The control area		
软体动物 Mollusca	双壳纲	锥头虫科	长锥虫 <i>Haploscoloplos elongatus</i>	√			
		蚶科	橄榄蚶 <i>Estellarca olivacea</i>	√	√		
			泥蚶 <i>Tegillarca granosa</i>	√			
		篮蛤科	光滑篮蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>	√			
		帘蛤科	青蛤 <i>Cyclina sinensis</i>	√			
		牡蛎科	密鳞牡蛎 <i>Ostrea denselamellosa</i>			√	
			团聚牡蛎 <i>Saccostrea glomerata</i>	√	√		
			长牡蛎 <i>Crassostrea gigas</i>	√	√		
			双带蛤科	脆壳理蛤 <i>Theora fragilis</i>		√	
			吻状蛤科	薄云母蛤 <i>Yoldia similis</i>	√	√	
			鸭嘴蛤科	渤海鸭嘴蛤 <i>Laternula (Exolaternula) marilina</i>			√
				剖刀鸭嘴蛤 <i>Laternula boschasina</i>	√		
			贻贝科	凸壳肌蛤 <i>Musculista senhousia</i>	√	√	
			樱蛤科	彩虹明樱蛤 <i>Moerella iridescens</i>	√	√	
			腹足纲	阿地螺科	泥螺 <i>Bullacta exarata</i>		√
	滨螺科	粗糙滨螺 <i>Littorina articulata</i>		√			
		短滨螺 <i>Littorina balteata</i>		√	√		
		粒结节滨螺 <i>Nodilittorina radiata</i>			√		
		小结节滨螺 <i>Echinolittorina radiata</i>		√	√		
		中间拟滨螺 <i>Littorinopsis intermedia</i>		√	√		
		帽贝科		嫁蟻 <i>Cellana toreuma</i>	√		
		骨螺科		疣荔枝螺 <i>Thais clavigera</i>		√	
		光螺科		马丽瓷光螺 <i>Eulima maria</i>	√		
				马氏光螺 <i>Melamella marlinii</i>	√		
		汇螺科		珠带拟蟹守螺 <i>Cerithidea cingulata</i>	√	√	
	马蹄螺科	单齿螺 <i>Monodonta labio</i>		√	√		
	拟捻螺科	纵肋饰孔螺 <i>Decorifera mutusimana</i>		√	√		
	拟沼螺科	绯拟沼螺 <i>Assiminea latericea</i>		√	√		
	三叉螺科	圆筒原盒螺 <i>Eocylichna braunsi</i>		√	√		
	狭口螺科	光滑狭口螺 <i>Stenothyra glabar</i>		√	√		
	小塔螺科	微角齿口螺 <i>Odostomia subangulata</i>		√	√		
	蜒螺科	齿纹蜒螺 <i>Nerita (Ritena) yoldii</i>		√	√		
	玉螺科	斑玉螺 <i>Natica tigrina</i>			√		
扁玉螺 <i>Neverita didyma</i>				√			
褐玉螺 <i>Natica spadicea</i>		√					
拟紫口隐玉螺 <i>Cryptonatica andoi</i>		√					
微黄镰玉螺 <i>Lunatica gilva</i>				√			
织纹螺科		半褶织纹螺 <i>Nassarius semiplicatus</i>	√				
		红带织纹螺 <i>Nassarius (Zeuxis) succinctus</i>	√				
		西格织纹螺 <i>Nassarius (Zeuxis) siquijorensis</i>	√	√			
	秀丽织纹螺 <i>Nassarius (Reticunassa) festivus</i>	√	√				
	纵肋织纹螺 <i>Nassarius (varicinassa) variciferus</i>	√	√				
节肢动物 Arthropoda	甲壳纲	玻璃虾科	细螯虾 <i>Leptochela gracilis</i>		√		
		瓷蟹科	绒毛细足蟹 <i>Raphidopus ciliatus</i>	√			
		对虾科	长缝拟对虾 <i>Parapenaeus fissurus</i>	√	√		

续表

门 Phylum	纲 Class	科 Family	种 Species	增殖区 Shellfish releasing area	对照区 The control area
		方蟹科	红螯相手蟹 <i>Sesame haematocheir</i>	√	
			伍氏厚蟹 <i>Helice (Helicana)</i>	√	
			长足长方蟹 <i>Metaplax longipes</i>	√	√
			褶痕相手蟹 <i>Sesarma (Parasesarma) plicatum</i>	√	
			字纹弓蟹 <i>Varuna litterata</i>		√
		鼓虾科	日本鼓虾 <i>Alpheus japonicus</i>	√	√
		螺赢蜚科	薄片螺赢蜚 <i>Corophium lamellatum</i>	√	
		活额寄居蟹科	下齿细螯寄居蟹 <i>Clibanarius infraspinus</i>	√	√
		沙蟹科	淡水泥蟹 <i>Ilyoplax tansuiensis</i>		√
			弧边招潮 <i>Uca arcuata</i>	√	
			日本大眼蟹 <i>Macrophthalmus (Mareotis) japonicus</i>	√	√
			锯眼泥蟹 <i>Ilyoplax serrata</i>		√
		藤壶科	纹藤壶 <i>Amphibalanus amphitrite</i>	√	√
		玉蟹科	隆线拳蟹 <i>Philyra carinata</i>		√
		长臂虾科	葛氏长臂虾 <i>Palaemon gravieri</i>	√	
			脊尾白虾 <i>Exopalaemon carinicauda</i>	√	
			锯齿长臂虾 <i>Palaemon serrifer</i>		√
		长脚蟹科	裸盲蟹 <i>Typhlocarcinus nudus</i>		√
脊索动物 Chordata	硬骨鱼纲	鰕虎鱼科	斑尾刺鰕虎鱼 <i>Acanthogobius ommaturus</i>	√	√
			矛尾鰕虎鱼 <i>Chaeturichthys stigmatias</i>	√	
		弹涂鱼科	大鳍弹涂鱼 <i>Periophthalmus magnuspinnatus</i>		√
			弹涂鱼 <i>Periophthalmus cantonensis</i>	√	
星虫动物 Sipuncula	方格星虫纲	方格星虫科	裸体方格星虫 <i>Sipunculus nudus</i>	√	
纽形动物 Nemertean	无针纲	细首科	纽虫一种 <i>Nemertea</i> sp.	√	√
合计 Total				62	59

分区域看,增殖区和对照区分别记录大型底栖动物 62 种和 59 种。两个区域均以软体动物种类占比最高,分别占 51.61%、49.15%。增殖区软体动物和节肢动物种数比对照区略多,对照区环节动物种数略多,增殖区出现的剖刀鸭嘴蛤 *Laternula boschasina*、青蛤 *Cyclina sinensis*、光滑河蓝蛤 *Potamocorbula laevis*、泥蚶 *Tegillarca granosa*、脊尾白虾 *Exopalaemon carinicauda*、绒毛细足蟹 *Raphidopus ciliatus* 等未在对照区采到。双因素方差分析表明,大型底栖动物种类数在春季和秋季差异极显著 ( $F_{1,36} = 7.760, P = 0.008 < 0.01$ ),而在增殖区和对照区之间差异不显著 ( $F_{1,36} = 2.250, P = 0.142$ ),季节与区域间交互效应不显著 ( $F_{1,36} = 0.413, P = 0.524$ )。

大型底栖动物优势种及优势度见表 2。春季,增殖区和对照区大型底栖动物优势种分别有 9 种和 4 种,其中共有优势种是微角齿口螺 *Odostomia subangulata* 和纹藤壶 *Amphibalanus amphitrite*,增殖区其他优势种包括寡鳃卷吻齿沙蚕 *Nephtys oligobranchia*、光滑狭口螺 *Stenothyra glabar*、绯拟沼螺 *Assimineia latericea*、中间拟滨螺 *Littorinopsis intermedia*、短滨螺 *Littorina balteata*、微角齿口螺 *Odostomia subangulata*、日本大眼蟹 *Macrophthalmus (Mareotis) japonicus* 和长足长方蟹 *Metaplax longipes* 等,对照区包括不倒翁虫 *Sternaspis scutata* 和纵肋饰孔螺 *Decorifera mutusimana*;秋季,增殖区和对照区优势种分别有 4 种和 5 种,共有优势种是绯拟沼螺 *Assimineia latericea* 和日本大眼蟹 *Macrophthalmus (Mareotis) japonicus*,增殖区其他优势种包括齿纹蜆螺 *Nerita (Ritena) yoldii* 和长足长方蟹 *Metaplax longipes*,对照区包括中间拟滨螺 *Littorinopsis intermedia*、短滨螺 *Littorina balteata* 和西格织纹螺 *Nassarius (Zeuxis) siquijorensis*。增殖区和对照区均以软体动物和甲壳动物占优势,春

季增殖区优势种类多于对照区,秋季对照区优势种类多于增殖区。

表 2 区域大型底栖动物优势种及优势度

Table 2 Dominant species of macrobenthos community

物种 Species	春季 Spring		秋季 Autumn	
	增殖区	对照区	增殖区	对照区
	Releasing area	Control area	Releasing area	Control area
环节动物 Annelida				
不倒翁虫 <i>Sternaspis scutata</i>		0.03		
寡鳃卷吻齿沙蚕 <i>Nephtys oligobranchia</i>	0.04			
软体动物 Mollusca				
齿纹蜒螺 <i>Nerita (Ritena) yoldii</i>			0.03	
光滑狭口螺 <i>Stenothyra glabar</i>	0.30			
绯拟沼螺 <i>Assiminea latericea</i>	0.10		0.03	0.05
中间拟滨螺 <i>Littorinopsis intermedia</i>	0.06			0.14
短滨螺 <i>Littorina balteata</i>	0.04			0.07
微角齿口螺 <i>Odostomia subangulata</i>	0.03	0.04		
纵肋饰孔螺 <i>Decorifera mutusimana</i>		0.12		
西格织纹螺 <i>Nassarius (Zeuxis) siquijorensis</i>				0.03
甲壳动物 Crustacea				
日本大眼蟹 <i>Macrophthalmus (Mareotis) japonicus</i>	0.06		0.04	0.03
纹藤壶 <i>Amphibalanus amphitrite</i>	0.05	0.05		
长足长方蟹 <i>Metaplax longipes</i>	0.04		0.06	

## 2.2 栖息密度与生物量

大型底栖动物栖息密度与生物量见表 3。两次调查,坎门湾滩涂大型底栖动物平均栖息密度和生物量分别为  $(319 \pm 63.32)$  个/ $m^2$  和  $(46.24 \pm 13.33)$  g/ $m^2$ 。其中,增殖区分别为  $(397 \pm 106.75)$  个/ $m^2$  和  $(69.49 \pm 24.11)$  g/ $m^2$ ;对照区分别为  $(232 \pm 58.60)$  个/ $m^2$  和  $(20.41 \pm 4.55)$  g/ $m^2$ 。由表 3 可看出,春季、秋季及春秋两季增殖区大型底栖动物栖息密度和生物量均高于对照区。双因素方差分析表明,大型底栖动物栖息密度在春季和秋季之间差异极显著 ( $F_{1,36} = 20.348, P < 0.01$ ),区域间差异不显著 ( $F_{1,36} = 3.795, P = 0.059$ ),季节与区域间交互效应不显著 ( $F_{1,36} = 2.719, P = 0.108$ );生物量在春季和秋季之间差异不显著 ( $F_{1,36} = 2.588, P = 0.116$ ),区域之间差异显著 ( $F_{1,36} = 4.750, P = 0.036 < 0.05$ ),季节与区域间交互效应不显著 ( $F_{1,36} = 2.854, P = 0.100$ )。调查记录到的增殖放流种类栖息密度与生物量见表 4,放流种类彩虹明樱蛤 *Moerella iridescens* 在增殖区和对照区均有出现,而青蛤 *Cyclina sinensis*、泥蚶 *Tegillarca granosa* 仅在增殖区采集到。

表 3 不同生境的大型底栖动物栖息密度与生物量

Table 3 Density and biomass of macrobenthos in different habitats

调查时间 Survey time	研究区域 Study area	环节动物 Annelids		软体动物 Mollusks		甲壳动物 Crustaceans		其它类 Others		总计 Total	
		密度	生物量								
		Density/ (个/ $m^2$ )	Biomass/ (g/ $m^2$ )								
春季 Spring	增殖区	36±16.73	0.58±0.29	490±164.99	54.08±41.24	166±63.36	51.85±24.35	1±0.61	1.64±1.5	693±167.31	108.16±44.82
	对照区	58±44.11	1.18±0.47	188±64.96	6.2±1.39	99±60.08	8.92±5.13	2±1.22	1.13±1.07	347±89.27	17.43±4.97
	全区	47±23.1	0.88±0.28	339±92.97	30.14±20.82	133±43.19	30.39±13.07	1±0.67	1.39±0.9	520±100.48	62.8±24.29
秋季 Autumn	增殖区	4±2.38	0.13±0.08	52±14.9	16.3±7.17	41±15.63	11.63±4.51	2±1.07	2.75±1.68	100±23.89	30.81±10.61
	对照区	1±0.65	0.03±0.02	73±26.64	11.96±5.27	15±5.17	12.15±4.37	0±0	0.00±0	89±26.07	24.15±8.37
	全区	3±1.37	0.09±0.04	62±14.19	14.37±4.52	30±9.31	11.86±3.08	1±0.65	1.53±0.97	95±17.15	27.85±6.82
春秋两季 Spring and autumn	增殖区	20±8.99	0.36±0.16	271±94.97	35.19±20.83	104±34.86	31.74±12.91	2±0.61	2.2±1.1	397±106.75	69.49±24.11
	对照区	32±24.88	0.67±0.29	137±39.55	8.76±2.48	62±34.2	10.35±3.38	1±0.69	0.63±0.6	232±58.60	20.41±4.55
	全区	26±12.55	0.5±0.16	208±53.84	22.67±11.1	84±24.39	21.61±7.11	1±0.46	1.45±0.65	319±63.32	46.24±13.33

表 4 不同生境的放流种类栖息密度与生物量

Table 4 Abundance and biomass of breed and release species in different habitats

放流物种 Releasing species	增殖区 Releasing area		对照区 Control area		全区 Total	
	密度 Density/ (个/m <sup>2</sup> )	生物量 Biomass/ (g/m <sup>2</sup> )	密度 Density/ (个/m <sup>2</sup> )	生物量 Biomass/ (g/m <sup>2</sup> )	密度 Density/ (个/m <sup>2</sup> )	生物量 Biomass/ (g/m <sup>2</sup> )
彩虹明樱蛤 <i>Moerella iridescens</i>	1.00	0.09	2.00	0.08	1.51	0.09
青蛤 <i>Cyclina sinensis</i>	0.20	0.01	0.00	0.00	0.10	0.00
泥蚶 <i>Tegillarca granosa</i>	4.20	0.44	0.00	0.00	2.11	0.24

### 2.3 生物多样性指数

大型底栖动物的多样性指数见表 5。两次调查,增殖区大型底栖动物 Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )、Margalef 丰富度指数( $D$ )和 Pielou 均匀度指数( $J'$ )分别为  $1.31\pm 0.11$ 、 $1.23\pm 0.13$  和  $0.71\pm 0.03$ ,对照区分别为  $1.08\pm 0.14$ 、 $0.91\pm 0.16$  和  $0.74\pm 0.04$ 。可以看出,除 Pielou 均匀度指数( $J'$ )增殖区略低于对照区,Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )和 Margalef 丰富度指数( $D$ )均表现为增殖区高于对照区。双因素方差分析表明:大型底栖动物 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数在不同季节和不同区域间差异均不显著( $P>0.05$ ),季节与区域间交互效应也不显著( $P>0.05$ )。

表 5 大型底栖动物的多样性指数

Table 5 Diversity indices of macrobenthic communities

研究区域 Study area	多样性指数( $H'$ ) Shannon-Wiener index	丰富度指数( $D$ ) Margalef index	均匀度指数( $J'$ ) Pielou index
增殖区 Releasing area	$1.31\pm 0.11$	$1.23\pm 0.13$	$0.71\pm 0.03$
对照区 Control area	$1.08\pm 0.14$	$0.91\pm 0.16$	$0.74\pm 0.04$
全区 Total	$1.25\pm 0.09$	$1.20\pm 0.11$	$0.69\pm 0.03$

### 2.4 群落聚类与多维尺度排序分析(MDS)

聚类分析结果表明(图 2 和图 3),春季各断面的相似程度比秋季要高,按照相似度大于 39%可聚为 5 组。其中,春季 2 组,分别为增殖区 T1 和 T2 断面(以光滑狭口螺-纹藤壶——排拟沼螺为优势种类的群落 I)、对照区 T3 和 T4 断面(以纹藤壶-纵肋饰孔螺-微角齿口螺为优势种类的群落 II);秋季 3 组,分别为增殖区 T1 断面(以长足长方蟹-纵肋织纹螺-葛氏长臂虾为优势种类的群落 III)、增殖区 T2 断面(以齿纹蛭螺—珠带拟蟹守螺-日本大眼蟹为优势种类的群落 IV)、对照区 T3 和 T4 断面(以中间拟滨螺-短滨螺-排拟沼螺为优势种类的群落 V)。根据 Clake 等<sup>[26]</sup>认为,当 stress(胁强系数) $<0.05$  为吻合极好;stress $<0.1$  为吻合较好;stress $<0.2$  为吻合一般;stress $>0.3$  为吻合较差。本次调查结果的胁强系数为 0.05,吻合较好。非度量多维标度排序分析(MDS)也表明各断面群落结构也分为 5 类,与聚类分析结果一致。

## 3 讨论

### 3.1 贝类增殖放流对潮间带大型底栖动物群落的影响

贝类增殖放流通过大量补充区域常见或优势贝类个体,提高大型底栖动物数量、多样性及群落稳定性,推动底栖贝类资源的恢复,从而有助于潮间带生态系统结构重建和功能维持。与对照区相比,增殖区大型底栖动物物种数、平均栖息密度、平均生物量、Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )和 Margalef 丰富度指数( $D$ )均较高,且部分物种只在增殖区记录到,可能在一定程度上表面坎门湾贝类增殖放流有一定的效果,虽然效果并不显著。2017 年春季,在本研究的对照区两条潮间带大型底栖动物调查断面记录潮间带大型底栖动物 13 种,其中环节动物 6 种、占 46.2%,软体动物 5 种、占 38.5%,甲壳类 2 种、占 15.4%,Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )、Margalef 丰富度指数( $D$ )和 Pielou 均匀度指数( $J'$ )平均值分别为 0.95、1.28 和 0.87。本研究的春季调

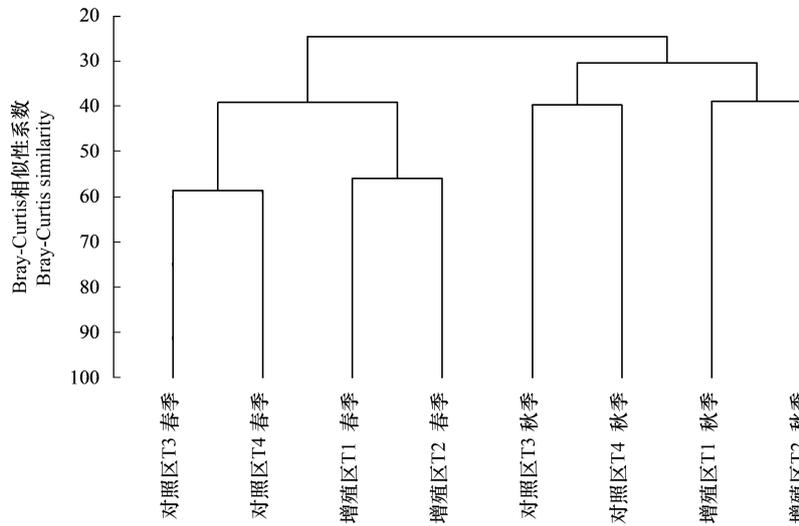


图2 大型底栖动物群落等级聚类图

Fig.2 The dendrogram for cluster of macrozoobenthic communities

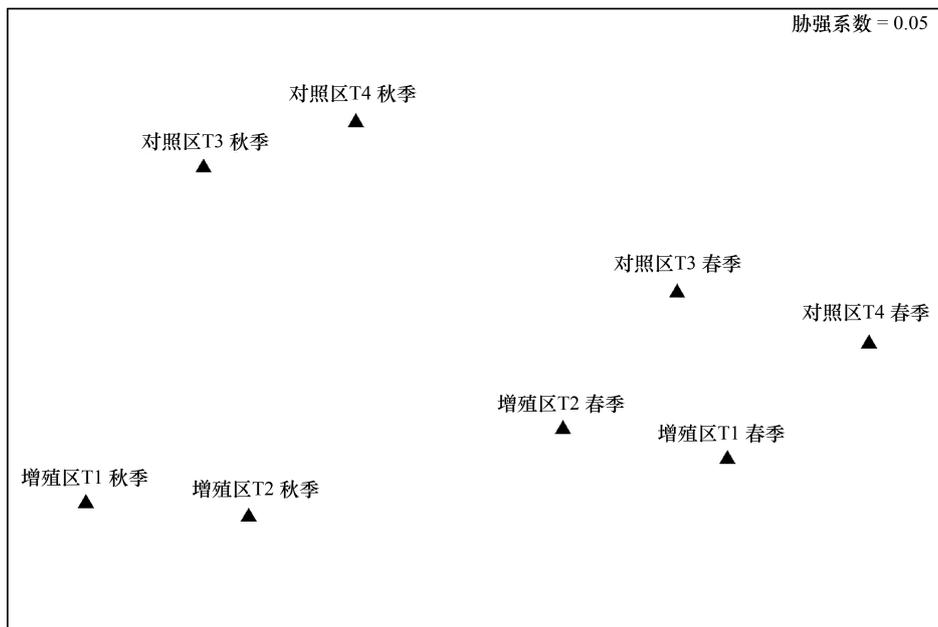


图3 大型底栖动物多维尺度排序分析

Fig.3 The MDS analysis of macrozoobenthic communities

查,对照区共记录潮间带大型底栖动物 44 种,其中环节动物 14 种、占 31.82%,软体动物 22 种、占 50.0%,甲壳类 6 种、占 13.64%、其它类 2 种、占 4.55%,Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ )、Margalef 丰富度指数 ( $D$ ) 和 Pielou 均匀度指数 ( $J'$ ) 平均值分别为 1.17、1.23 和 0.58。可以看出,贝类增殖放流后,对照区潮间带大型底栖动物种数增加了约 2.4 倍,种类组成仍以软体动物和环节动物为主,但软体动物增加了 3 倍多,Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ ) 上升。从坎门湾贝类增殖放流前后仅有少量调查数据比较来看,贝类增殖放流对坎门湾滩涂的大型底栖动物群落结构产生了一定影响。在欧洲瓦登海引进物种的群落和营养效应研究表明,物种引入会导致物种多样性变化,也会影响物种相互作用和食物网结构,并增强引入区域的生态功能<sup>[25]</sup>。Qin

等研究了紫海胆增殖放流对底栖食物网的影响,发现幼年紫海胆的释放导致紫海胆摄食习性的变化,并对增殖区域大型底栖动物食物网结构产生了一定影响<sup>[26]</sup>。坎门湾贝类增殖放流是否也会产生生态功能层面的影响,有待进一步研究。此外,本次调查在增殖区出现较多的纹藤壶,主要出现在高潮区堤坝与泥滩交界处的抛石护岸上。

贝类增殖放流在提高大型底栖动物群落栖息密度和生物量的同时,由于单一或者少数物种个体数量的大量释放,也可能降低种群的复杂性,导致均匀度、丰富度出现下降<sup>[27]</sup>。本研究结果表明,增殖区大型底栖动物 Pielou 均匀度指数( $J'$ ) 低于对照区,对照区大型底栖动物 Margalef 丰富度指数( $D$ ) 和 Pielou 均匀度指数( $J'$ ) 也低于 2017 年历史调查数据。这与张天文等<sup>[9]</sup> 对东营河口浅海贝类国家级海洋特别保护区大型底栖动物的群落结构研究结果一致。

本研究收集了研究区域周边的乐清湾区域以及玉环漩门湾公园区域大型底栖动物相关的调查和研究记录<sup>[28-29]</sup>(表 6),与乐清湾区域以及玉环漩门湾公园相比,本研究区域大型底栖动物种类数、栖息密度及生物量处于中等水平。全区、增殖区、对照区大型底栖动物种类数均低于乐清湾潮间带,但高于玉环漩门湾公园滩涂;大型底栖动物栖息密度均低于乐清湾潮间带和玉环漩门湾公园自然滩涂,但高于玉环漩门湾公园互花米草滩涂;大型底栖动物生物量增殖区高于乐清湾潮间带,全区和对照区均低于乐清湾潮间带,但高于玉环漩门湾公园自然滩涂。

表 6 本研究区域与周边区域大型底栖动物群落参数比较

Table 6 Comparing the community characteristics of macrobenthos between the study area with surrounding area

参数 Parameter	全区 Total	增殖区 Releasing area	对照区 Control area	乐清湾潮间带 <sup>[28]</sup> The intertidal zone in Yueqing Bay	玉环漩门湾公园滩涂 <sup>[29]</sup> The tidal flat wetland in Xuanmen Bay National Wetland Park	玉环漩门湾公园自然滩涂 <sup>[29]</sup> The natural tidal flats in Xuanmen Bay National Wetland Park	玉环漩门湾公园互花米草滩涂 <sup>[29]</sup> The <i>Spartina alterniflora</i> tidal flats in Xuanmen Bay National Wetland Park
种类数(种) Number of species(species)	89	62	59	113	40	30	31
栖息密度 Density/(个/m <sup>2</sup> )	319	397	232	871	—	1052.8	222.6
生物量 Biomass/(g/m <sup>2</sup> )	46.24	69.49	20.41	60.55	—	19.19	39.23

从增殖区、对照区及全区大型底栖动物的生物多样性整体情况看,该区域贝类增殖放流工程实施两年后,大型底栖动物 Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ ) 和 Margalef 丰富度指数( $D$ ) 并不高。参考 Chainho 等<sup>[30]</sup> 提出的大型底栖动物群落  $H'$  和  $D$  的 5 个等级:Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ ) >4.0 判定为高、3.0—4.0 为好、2.0—3.0 为中、1.0—2.0 为低、0.0—1.0 为差;Margalef 丰富度指数( $D$ ) >4.0 判定为高或好、2.5—4.0 为中、<2.5 为低或差,增殖区、对照区及全区大型底栖动物 Shannon-Wiener 多样性指数均处于低, Margalef 丰富度指数均处于差。日常管理对潮间带贝类增殖放流效果具有重要影响,疏于管理可能会导致放流种类生物量和丰度在放流升高后出现大幅度降低<sup>[31]</sup>。本研究中,放流种类彩虹明樱蛤 *Moerella iridescens*、青蛤 *Cyclina sinensis*、泥蚶 *Tegillarca granosa* 栖息密度与生物量并不是很高,也未形成一定的种群优势。原因可能是这些种类同时也是浙江沿海经常被采捕的种类,增殖放流的效果因为大量的人为采捕而受到影响。在两次调查期间均有观测到当地渔民在采挖和捕捞贝类。在长江口北支的研究表明,增殖放流的缢蛏、彩虹明樱蛤和泥螺等贝类中仅有泥螺在增殖放流区域成为优势种<sup>[8]</sup>,这与本次研究的情形类似,增殖放流种类未必能发展成放流区域的优势种。

除了增殖放流的管护和人为影响,增殖放流区域水体环境变化也有可能影响大型底栖动物群落<sup>[32-34]</sup>。2023 年 5 月在本研究区域进行的海水水质监测表明,活性磷酸盐(0.022 mg/L)符合第二类海水水质标准(以《海水水质标准》(GB 3097—1997)作为评价标准),无机氮(0.434 mg/L)达到四类标准,说明区域海水水体偏向于富营养化。杨颖等<sup>[35]</sup>对长江口大型底栖动物群落结构研究表明,活性磷酸盐、无机氮等是影响大型底栖

动物群落的重要因子,与大型底栖动物生物量呈负相关关系。本研究所处区域,海域水体的营养盐含量偏高,也有可能对区域贝类增殖放流效果产生负面影响。另一方面,贝类增殖放流也会对所处环境产生影响,表现为贝类增殖放流的生态功能。贝类主要以浮游植物、有机碎屑、微生物等悬浮颗粒物为食物来源,贝类增殖有利于提高初级生产的可持续利用<sup>[36]</sup>;贝类也可清除水体中有机污染物、重金属,对所处环境起到修复与调控的作用<sup>[37]</sup>;滤食性的双壳贝类在生长过程中会不断地从海水中滤除悬浮物和浮游植物,从而起到改善水质的效果<sup>[38]</sup>。

### 3.2 坎门湾贝类增殖放流活动的评价及建议

本研究表明贝类增殖放流对区域潮间带大型底栖动物群落有一定的影响,对于区域大型底栖动物群落栖息密度、生物量、多样性等均有提升作用,虽然效果不显著。通过本研究,结合文献资料以及贝类生活史特征等,本研究梳理通过贝类增殖放流开展生态修复的建议如下:

(1)选择合适的增殖区域、种类、规格及时间。增殖区域宜选择有该贝类分布记录的潮间带区域,且潮流畅通,饵料生物丰富,远离排污口等。放流贝类应为本地常见种、优势种。同时,要确定最适苗种投放规格、选择好投放时间。苗种规格是影响增殖效果的重要因素,通常投放规格较大的苗种可提高苗种存活率<sup>[39]</sup>,但由于大规格苗种的生产成本较高,因此,应通过试验确定最适苗种投放规格。本次增殖区域位于坎门湾环岛南路外侧滩涂,该区域水深较浅,放流的青蛤 *Cyclina sinensis*、泥蚶 *Tegillarca granosa* 和彩虹明樱蛤 *Moerella iridescens* 为本地常见、优种的贝类种类,放流时间选择在春季,春季气温较高,水温回升快,贝类正处于繁殖阶段,适宜开展放流活动。

(2)贝类增殖放流需要结合保护和管护措施开展。滩涂区域易受人类活动的影响,如对潮间带经济物种采捕,会影响大型底栖动物栖息密度和生物量,甚至导致某些物种的消失,同时也可能对非需种类的生存生境以及区域生态环境造成破坏。贝类增殖放流实施后,尤其是经济种类的增殖放流,会引起区域该物种个体数量在短时间内大幅度上升,可能吸引当地渔民报复性采捕,所以增殖放流后应在一段时间内采取禁止采捕的措施,为大型底栖动物群落发展提供相对稳定的栖息和生长环境,以改善和修复潮间带生态系统。本研究中,研究区域开展的增殖放流活动,增殖区域、种类、规格及时间均适宜,但放流后,潮间带大型底栖动物恢复效果并不理想,原因可能主要是未采取有效的保护措施,如禁止采挖等。在一些保护区,比如东营河口浅海贝类国家级海洋特别保护区开展的增殖放流研究表明,增殖放流活动极大的提升了保护区贝类优势度、丰度和生物量<sup>[9]</sup>。在一定程度上表明配合恰当的保护措施,贝类增殖放流效果会较好。

### 参考文献 (References):

- [1] 李学峰,岳奇,胡恒,董月娥. 围填海活动的海洋环境与生物资源影响及对策建议. 海洋开发与管理, 2023, 40(2): 105-114.
- [2] 黄华梅,吴玲玲,苏文. 历史遗留围填海项目生态保护修复相关思考. 海洋开发与管理, 2020, 37(6): 14-19.
- [3] 李婵娟,吴耀建,李青生,方婧,郭洲华,戴娟娟. 历史遗留围填海生态保护修复工作探讨——以晋江盐场围填海项目为例. 应用海洋学报, 2022, 41(1): 60-68.
- [4] Filippini G, Dafforn K A, Bugnot A B. Shellfish as a bioremediation tool: a review and meta-analysis. Environmental Pollution, 2023, 316(Pt 2): 120614.
- [5] Christensen P B, Glud R N, Dalsgaard T, Gillespie P. Impacts of longline mussel farming on oxygen and nitrogen dynamics and biological communities of coastal sediments. Aquaculture, 2003, 218(1/2/3/4): 567-588.
- [6] 吕其明,张晶晶,高彦洁,吕振波,王田田,于君宝,王庆孝. 套尔河贝类增殖放流前后浮游植物群落结构变化. 海洋渔业, 2020, 42(1): 20-34.
- [7] 叶海新,上官欣欣,毕子昊,潘为箴,吴惠仙. 长江口北支贝类放流滩涂区潮下带水域浮游植物分析. 上海海洋大学学报, 2019, 28(5): 699-707.
- [8] 邱哲文,刘婧,赵开彬,吴惠仙,薛俊增. 长江口北支滩涂贝类放流对潮下带大型底栖动物群落的影响. 上海海洋大学学报, 2019, 28(2): 277-282.
- [9] 张天文,郭文,荆圆圆,刘恩孚,胡凡光,王树刚,刘广斌. 东营河口浅海贝类生态国家级海洋特别保护区大型底栖动物的群落结构特征. 海洋科学, 2021, 45(3): 1-13.
- [10] Kon K, Kurokura H, Tongnunui P. Influence of a microhabitat on the structuring of the benthic macrofaunal community in a mangrove forest.

- Hydrobiologia, 2011, 671(1): 205-216.
- [11] Davis C A, Smith L M. Foraging strategies and niche dynamics of coexisting shorebirds at stopover sites in the southern great Plains. *The Auk*, 2001, 118(2):484-495.
- [12] Ruehl C B, Trexler J C. Comparison of snail density, standing stock, and body size between Caribbean Karst wetlands and other freshwater ecosystems. *Hydrobiologia*, 2011, 665(1): 1-13.
- [13] Tomassetti P, Persia E, Mercatali I, Vani D, Marusso V, Porrello S. Effects of mariculture on macrobenthic assemblages in a Western Mediterranean site. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58(4):533-541.
- [14] 赵永强, 曾江宁, 高爱根, 陈全震, 廖一波, 寿鹿. 椒江口滩涂大型底栖动物群落格局与多样性. *生物多样性*, 2009, 17(3):303-309.
- [15] 李新正. 我国海洋大型底栖生物多样性研究及展望:以黄海为例. *生物多样性*, 2011, 19(6): 676-684.
- [16] 刘旭东, 于建钊, 张晓红, 崔文连, 汪进生, 孙立娥, 王艳玲, 贾胜华. 胶州湾大型底栖动物的次级生产力. *中国环境监测*, 2018, 34(6): 47-61.
- [17] 刘瑞玉. 中国海洋生物名录. 北京: 科学出版社, 2008.
- [18] 杨德渐, 孙瑞平. 中国近海多毛环节动物. 北京: 农业出版社, 1988.
- [19] 魏崇德. 浙江动物志-甲壳类. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1991.
- [20] 徐凤山, 张素萍. 中国海产双壳类图志. 北京: 科学出版社, 2008.
- [21] 寿鹿, 曾江宁, 廖一波, 赵永强, 江志兵, 陈全震, 高爱根, 杨家新. 瓯江口海域大型底栖动物分布及其与环境的关系. *应用生态学报*, 2009, 20(8): 1958-1964.
- [22] 廖一波, 曾江宁, 寿鹿, 高爱根, 江志兵, 陈全震, 严小军. 象山港人工鱼礁投放对大型底栖动物群落结构的影响. *海洋与湖沼*, 2014, 45(3): 487-495.
- [23] 周红, 张志南. 大型多元统计软件 PRIMER 的方法原理及其在底栖群落生态学中的应用. *青岛海洋大学学报: 自然科学版*, 2003, 33(1): 58-64.
- [24] Clarke K R, Warwick R M. *Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation*. 2nd ed. Plymouth, Devon, UK: PRIMER-E Ltd, 2001.
- [25] Buschbaum C, Horn S. Community and trophic effects of introduced species in the European Wadden Sea. *Treatise on Estuarine and Coastal Science (Second Edition)*. Amsterdam: Elsevier, 2024: 645-668.
- [26] Qin C X, Chen P M, Sarù G, Mo B L, Zhang A K, Li X G. Ecological implications of purple sea urchin (*Heliocidaris crassispina*, Agassiz, 1864) enhancement on the coastal benthic food web: evidence from stable isotope analysis. *Marine Environmental Research*. 2020, 158:104957.
- [27] Dolbeth M, Cusson M, Sousa R, Pardal M A. Secondary production as a tool for better understanding of aquatic ecosystems. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2012, 69(7): 1230-1253.
- [28] 彭欣, 谢起浪, 陈少波, 黄晓林, 仇建标, 仲伟, 关万春. 乐清湾潮间带大型底栖动物群落分布格局及其对人类活动的响应. *生态学报*, 2011, 31(4): 954-963.
- [29] 江旷, 鲍毅新, 李海宏, 陈小南, 施渭渭. 玉环漩门湾公园潮间带大型底栖动物对外界干扰的响应. *浙江师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 38(1): 103-108.
- [30] Chainho P, Costa J L, Chaves M L, Dauer D M, Costa M J. Influence of seasonal variability in benthic invertebrate community structure on the use of biotic indices to assess the ecological status of a Portuguese Estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, 54(10):1586-1597.
- [31] 彭欣, 吴洪喜, 高鹏程, 陈清建, 仇建标, 蔡景波, 李磊. 岩礁潮间带大型底栖生物对资源增殖保护区建立的生态响应——以台州大陈岛为例. *海洋学研究*, 2012, 30(1): 19-26.
- [32] Sahu N, Haldar S. Evaluation of benthic quality status and ecosystem functioning of soft bottom macrobenthos in the intertidal region with reference to Gulf of Khambhat, India. *Journal of Sea Research*, 2022, 189:102273.
- [33] Hu C Y, Dong J Y, Gao L J, Yang X L, Wang Z, Zhang X M. Macrobenthos functional trait responses to heavy metal pollution gradients in a temperate lagoon. *Environmental Pollution*, 2019, 253: 1107-1116.
- [34] 赵晨辉, 王永生, 贾胜华, 刘国强. 汕头东部近岸海域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系. *海洋环境科学*, 2023, 42(6): 853-863.
- [35] 杨颖, 谭赛章, 陈思思, 周红宏, 季晓, 蔡嫣然, 纪焕红, 杨幸幸, 范海梅, 邓邦平. 2011—2020 年长江口大型底栖动物群落结构变化趋势. *生态学报*, 2023, 43(14):5863-5874.
- [36] Reeders H H, Bij de Vaate A. Zebra mussels (*Dreissena polymorpha*): a new perspective for water quality management. *Hydrobiologia*, 1990, 200-201(1): 437-450.
- [37] 刘明智, 蒋日进, 陈峰, 李德伟, 印瑞, 周永东, 梁静香. 乐清湾贝类群落组成及其粒径谱结构特征. *生态学报*, 2023, 43(2):777-788.
- [38] Liao Y B, Shou L, Jiang Z B, Tang Y B, Du P, Zeng J N, Chen Q Z, Yan X J, Chen J F. Effects of fish cage culture and suspended oyster culture on macrobenthic communities in Xiangshan Bay, a semi-enclosed subtropical bay in eastern China. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 142: 475-483.
- [39] 姜亚洲, 凌建忠, 林楠, 袁兴伟, 李圣法. 象山港日本对虾增殖放流的效果评价. *生态学报*, 2012, 32(9):2651-2658.