

DOI: 10.20103/j.stxb.202306141270

李楠楠, 毕远新, 翁歆之, 侯弘毅, 程岩雄, 范瑞良, 陈渊戈, 欧阳珑玲, 全为民. 临海东矾海域人工鱼礁大型底栖动物群落的早期发育. 生态学报, 2024, 44(7): 3098-3105.

Li N N, Bi Y X, Weng X Z, Hou H Y, Cheng Y X, Fan R L, Chen Y G, Ouyang L L, Quan W M. Early development of epibenthic macrofauna communities on the Dongji artificial reefs, Linhai, Zhejiang Province. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(7): 3098-3105.

临海东矾海域人工鱼礁大型底栖动物群落的早期发育

李楠楠¹, 毕远新², 翁歆之³, 侯弘毅⁴, 程岩雄³, 范瑞良¹, 陈渊戈¹, 欧阳珑玲¹, 全为民^{1,*}

1 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090

2 浙江省海洋水产研究所, 舟山 316021

3 台州市水产技术推广总站, 台州 318000

4 临海市港航口岸和渔业管理局, 临海 317000

摘要:为养护渔业资源和修复受损海岸带生态系统, 人工鱼礁通常被投放至沿岸海域的海底, 为海洋生物提供新的栖息地。于 2022 年 5 月(投放后 10 个月)和 10 月(投放后 15 个月)调查了临海东矾人工鱼礁大型底栖动物群落, 分析了不同礁龄间大型底栖动物种类组成、密度、生物量和群落结构的差异。两次调查共记录到 5 类 17 种大型底栖动物, 优势种为猫爪牡蛎 *Talonostrea talonata* 和侧花海葵 *Anthopleura* sp.。礁体投放 10 个月后大型底栖动物群落的平均密度和平均生物量分别为 (3519±289) 个/m² 和 (3657±273) g/m², 15 个月后平均密度和平均生物量分别为 (10056±1858) 个/m² 和 (8300±2045) g/m², 15 个月的密度和生物量均显著高于 10 个月的 ($P>0.05$)。不同礁龄间大型底栖动物群落结构具有显著性差异 (Globe $R=0.573$, $P=0.029$), 导致群落结构差异的物种主要是曲膝藪枝螅 *Obelia geniculata*、侧花海葵、褐蚶 *Didimarcia tenebricum*、丽核螺 *Tritonoharpa leali*、双纹须蚶 *Barbatia bistrigata* 和疣荔枝螺 *Thais clavigera*。礁体投放 10 个月后和 15 个月后人工鱼礁附着猫爪牡蛎的平均密度分别为 (2075±37) 个/m² 和 (2194±397) 个/m², 不同礁龄间没有显著性差异 ($P>0.05$)。发现临海东矾人工鱼礁表面分布有低物种丰度和高密度的大型底栖动物群落, 并发育成为以猫爪牡蛎为造礁种的人工牡蛎礁。

关键词:海洋牧场; 牡蛎礁; 双壳贝类; 猫爪牡蛎; 饵料; 演替

Early development of epibenthic macrofauna communities on the Dongji artificial reefs, Linhai, Zhejiang Province

LI Nannan¹, BI Yuanxin², WENG Xinzhi³, HOU Hongyi⁴, CHENG Yanxiong³, FAN Ruiliang¹, CHEN Yuange¹, OUYANG Longling¹, QUAN Weimin^{1,*}

1 East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China

2 Zhejiang Marine Fisheries Research Institute, Zhoushan 316021, China

3 Taizhou Aquatic Technology Promotion Station, Taizhou 318000, China

4 Linhai Port and Fisheries Management Bureau, Linhai 317000, China

Abstract: As efforts to recover fishery resources and restore the damaged coastal ecosystems, artificial reefs (ARs) were often anchored on the seafloor in coastal zones to provide new habitats for marine organisms. The aim of this study was to describe the species compositions, densities, biomass, and structure of epibenthic macrofauna communities on the Dongji artificial reefs, Linhai, Zhejiang province. Seventeen species of epibenthic macrofauna belonged to five taxa were recorded

基金项目: 台州市科技计划项目 (22hya01)

收稿日期: 2023-06-14; 网络出版日期: 2024-01-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: quanweim@163.com

from the Dongji ARs in May (10 months post-deployment) and October (15 months post-deployment), 2022. The oyster *Talonostrea talonata* and the anemone *Anthopleura* sp. dominated the epibenthic macrofauna communities on the ARs. Among the seventeen species of epibenthic macrofauna recorded in this study, twelve were lithofacies species, while the other 5 species (such as *Marphysa sanguinea*, *Perinereis nuntia*, *Tritonoharpa leali*, *Hemicentrotus pulcherrimus*, and *Ophiura kinbergi*) also preferred to inhabit natural rock reefs and oyster reefs. The study showed that Dongji ARs enriched the local soft-bottom biological community and improved habitat heterogeneity and biodiversity. The average densities and biomass ((10056±1858) ind./m² and (8300±2045) g/m²) of the epibenthic macrofauna communities were significantly greater in 15 months than in 10 months ((3519±289) ind./m² and (3657±273) g/m²). The similarity analysis suggested that the epibenthic macrofauna communities on the ARs varied significantly with the submersion time (10 months vs 15 months) (Globe $R=0.573$, $P=0.029$), which resulted from *Obelia geniculata*, *Anthopleura* sp., *Didimarcia tenebricum*, *Tritonoharpa leali*, *Barbatia bistrigata*, and *Thais clavigera*. The study concluded that the Dongji ARs supported the low species diversity and high densities of epibenthic macrofauna communities, and developed as the artificial oyster reefs through the reef-building oyster *Talonostrea talonata*.

Key Words: marine ranching; oyster reef; bivalves; *Talonostrea talonata*; prey; succession

海洋牧场是指基于海洋生态系统原理,在特定海域通过人工鱼礁、增殖放流等措施,构建或修复海洋生物繁殖、生长、索饵或避敌所需的场所,增殖养护渔业资源,改善海域生态环境,实现渔业资源可持续利用的渔业模式^[1]。据联合国粮农组织(FAO)统计,目前已有 64 个沿海国家发展了海洋牧场^[2]。我国于 2017 年发布了《国家级海洋牧场示范区建设规划(2017—2025 年)》,截至 2023 年农业农村部已创建命名 169 个国家级海洋牧场示范区。

人工鱼礁是用于修复和优化海域生态环境、建设海洋生物生息场的人工设施,是海洋牧场栖息生境营造的重要手段之一^[3]。投放的人工鱼礁会在礁区产生流场效应、庇护效应和饵料效应等^[4-6]。表面大型底栖动物(epibenthic macrofauna)是人工鱼礁饵料效应的重要载体,可为海洋牧场资源养护对象提供丰富的饵料生物,其种类组成、密度、生物量和群落结构直接影响着人工鱼礁的生态功能^[7-9]。尽管我国沿海人工鱼礁建设范围和投放规模不断扩大,然而人工鱼礁大型底栖动物群落的研究还相对缺乏,研究区域主要集中于大亚湾^[10]、珠江口^[11]、莱州湾^[12-13]、青岛石雀滩^[14]、天津大神堂^[15]等少数海域,制约着我国海洋牧场建设的综合效益评估。

临海市东矾海域已被列入《国家级海洋牧场示范区建设规划(2017—2025 年)》和《台州市海洋牧场建设规划(2021—2030 年)》。为满足国家级海洋牧场示范区的申报条件,临海市投资 900 多万元实施了海洋牧场人工鱼礁建设项目,2021 年 7 月投放了 600 个礁体建成 4 个礁区,共计 1.562 万空 m³。为评估投放人工鱼礁的生态效益,本研究于 2022 年 5 月和 10 月调查了人工鱼礁表面大型底栖动物群落,基于调查结果分析了大型底栖动物的种类组成、密度、生物量和群落结构。本研究的目标是揭示人工鱼礁表生大型底栖动物群落的早期发育与演替动态,具体回答以下科学问题:(1)在早期发育阶段,有哪些附着生物补充至人工鱼礁表面?(2)相对于投放海域的软相泥质生境,人工鱼礁表生大型底栖动物群落是否能提供更高密度和生物量的底栖饵料生物?(3)人工鱼礁表生大型底栖动物群落的优势种是什么?研究结果可为后期海洋牧场建设提供基础数据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 人工鱼礁布设

研究区域位于浙江省临海市东矾岛东南侧的人工鱼礁区(图 1)。其中 A 礁区面积约为 3351m²、有 323 个人工鱼礁礁体、约 6541.2 空 m³;B 礁区面积约为 1527m²、有 118 个人工鱼礁礁体、约 3817.5 空 m³;C 礁区面

积约为 786m²、有 75 个人工鱼礁礁体、约 1415.6 空 m³;D 礁区面积约为 616m²、有 62 个人工鱼礁礁体、约 1478.2 空 m³(图 1)。人工鱼礁礁体为钢筋混凝土框架式构件礁,外形为 3m 长×3m 宽×3m 高的正方体,棱柱宽 0.20m。构件礁采用矩阵式排列,设计纵横间距均为 3m。研究海域平均水深为 14m、海水盐度介于 24—28,海水温度介于 5—33℃。

1.2 样品采集与分析

2022 年 5 月(投放后 10 个月)和 10 月(投放后 15 个月)对东矾人工鱼礁区进行潜水调查,每个礁区设 1 个调查站位(图 1),每个站位从礁体外侧垂直立柱(距离礁顶约 0.5m 处)中设置 1 个 25cm×25cm 样方,刮取样方内人工鱼礁表面所有生物,装入 0.5mm 孔径的筛绢网袋中,在调查船上将各站位的生物样品用 75% 乙醇固定保存,带回实验室进行挑拣、分类鉴定、计数和称重(鲜重,精确至 0.001g)。基于外壳形态初步判断生物样品中的牡蛎为同一物种,从所有牡蛎样品中随机选择 30 个个体,用数字游标卡尺测量其壳高(SH,精确至 1mm)后采集其贝壳肌组织,运用分子生物学方法鉴定其种类^[16]。

1.3 数据统计

人工鱼礁表面大型底栖动物的密度(个/m²)和生物量(g/m²)分别表示为单位礁体表面积内(1m²)动物的数量和鲜重。密度和生物量数据经 $\log(x+1)$ 转换后运用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验不同礁龄间大型底栖动物密度或生物量的差异。运用多变量统计分析(PRIMER 软件包,版本 5.0)比较不同礁龄间大型底栖动物的群落结构;首先基于密度对数转换或物种存在/缺失数据计算底栖动物群落的排名相似性矩阵,据此产生非度量多维标度排序(MDS),并运用相似性分析(ANOSIM)检验不同礁龄间底栖动物群落结构的差异。相似性分析(SIMPER)用来检验不同礁龄间底栖动物群落的非相似性,识别对非相似性贡献大的物种(累计贡献大于 60%)。

2 结果

2.1 种类组成

两次采样在人工鱼礁表面共记录到 5 类 17 种大型底栖动物(表 1);其中,软体动物 6 种、节肢动物 4 种、环节动物 3 种、棘皮动物和刺胞动物各 2 种。礁体投放 10 个月后人工鱼礁表面记录到 13 种底栖动物,15 个月记录到 11 种(表 1)。底栖动物群落的优势种为猫爪牡蛎 *Talonostrea talonata* 和侧花海葵 *Anthopleura* sp. (表 1)。

2.2 密度和生物量

礁体投放 10 个月后人工鱼礁表面大型底栖动物群落的总密度介于 2750—4075 个/m²,平均值为(3519±289)个/m²;总生物量介于 3215—4454g/m²,平均值为(3657±273)g/m²。15 个月后大型底栖动物群落的总密度介于 7200—15050 个/m²,平均值为(10056±1858)个/m²(图 2);总生物量介于 4379—13245g/m²,平均值为(8300±2045)g/m²(图 2)。15 个月后的总密度和总生物量均显著高于 10 个月后的(图 2, $P < 0.05$)。

2.3 群落结构

MDS 图显示两个礁龄间大型底栖动物群落明显分隔(图 3);相似性分析表明:不同礁龄间大型底栖动物群落结构具有显著性差异(Globe $R = 0.573$, $P = 0.029$),导致群落结构差异的物种主要有曲膝蕨枝螅 *Obelia geniculata*(贡献率=16.30%)、侧花海葵(贡献率=15.21%)、褐蚶 *Didimarcia tenebricum*(贡献率=8.59%)、丽核

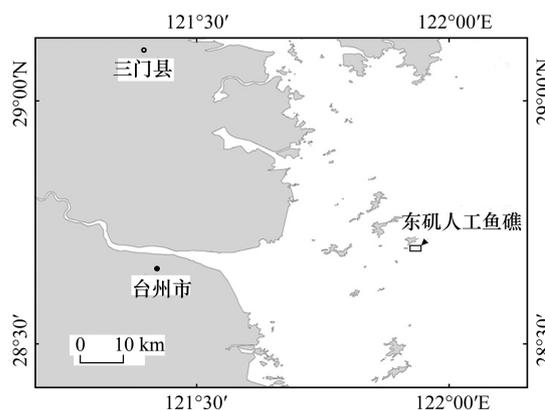


图 1 临海东矾海域人工鱼礁的位置

Fig.1 Location of the Dongji artificial reefs, Linhai, Zhejiang Province

螺 *Tritonoharpa leali* (贡献率 = 7.65%)、双纹须蚶 *Barbatia bistrigata* (贡献率 = 6.35%) 和疣荔枝螺 *Thais clavigera* (贡献率 = 6.00%)。

表 1 临海东矾人工鱼礁大型底栖动物群落的种类名录、数量(N)、相对丰度(N%)和出现频率(F%)

Table 1 Species list, abundances (N), relative abundance (N%) and frequency (F%) of epibenthic macrofauna communities on the Dongji artificial reefs, Linhai, Zhejiang Province

种名 Species name	10 个月 10 months			15 个月 15 months		
	N	N	F	N	N	F
猫爪牡蛎 <i>Talonostrea talonata</i>	332	58.97	100	351	39.35	100
双纹须蚶 <i>Barbatia bistrigata</i>	7	1.24	50	8	0.90	100
褐蚶 <i>Didimarcia tenebricum</i>	16	2.84	50			
带偏顶蛤 <i>Modiolus comptus</i>	5	0.89	75			
丽核螺 <i>Tritonoharpa leali</i>	23	4.09	75	24	2.69	100
疣荔枝螺 <i>Thais clavigera</i>				9	1.01	75
多齿围沙蚕 <i>Perinereis nuntia</i>	6	1.07	50	1	0.11	25
内刺盘管虫 <i>Hydroides ezoensis</i>	1	0.18	25			
岩虫 <i>Marphysa sanguinea</i>	4	0.71	50			
日本岩瓷蟹 <i>Petrolisthes japonicus</i>	1	0.18	25	5	0.56	75
四齿矶蟹 <i>Pugettia quadridens</i>				3	0.34	50
特异大权蟹 <i>Macromedaeus distinguendus</i>				3	0.34	50
光辉圆扇蟹 <i>Sphaerozium nitidus</i>				1	0.11	25
马粪海胆 <i>Hemicentrotus pulcherrimus</i>	1	0.18	25			
金氏真蛇尾 <i>Ophiura kinbergi</i>	6	1.07	50	1	0.11	25
侧花海葵 <i>Anthopleura</i> sp.	130	23.09	75	486	54.48	100
曲膝荔枝螅 <i>Obelia geniculata</i>	31	5.51	75			
合计 Total	563			892		

N:物种数量 Abundances; N%:相对丰度 Relative abundance; F%:出现频率 Frequency

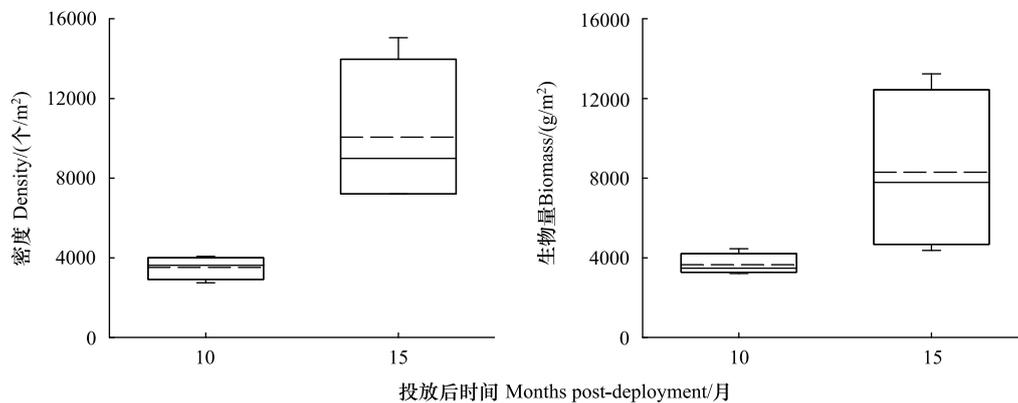


图 2 临海东矾人工鱼礁大型底栖动物群落总密度和总生物量的箱式图

Fig.2 Box plots in the total densities and biomass of epibenthic macrofauna communities on the Dongji artificial reefs, Linhai, Zhejiang Province

实线和中断线分别表示平均值和中值

2.4 猫爪牡蛎种群

礁体投放 10 个月后人工鱼礁附着猫爪牡蛎密度介于 2000—2175 个/m², 平均值为 (2075±37) 个/m²; 生物量介于 3056—4304g/m², 平均值为 (3500±275) g/m² (图 4)。15 个月后猫爪牡蛎密度介于 1650—3350 个/m², 平均值为 (2194±397) 个/m²; 生物量介于 3036—5293g/m², 平均值为 (4120±466) g/m² (图 4)。两个礁龄

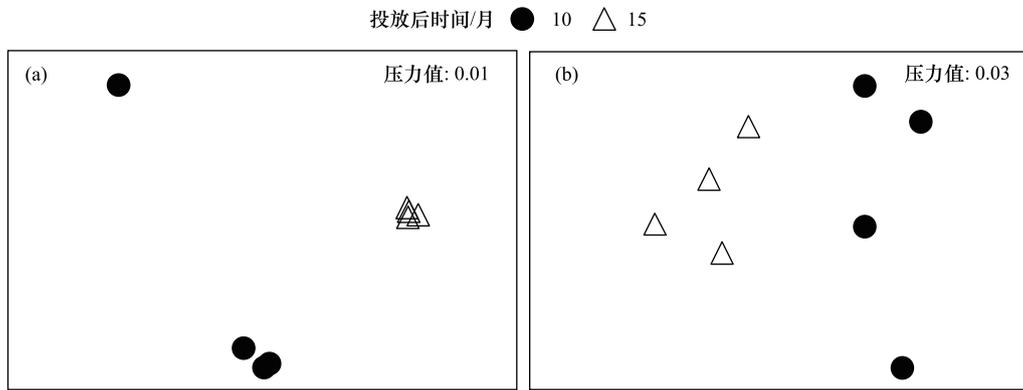


图3 临海东矾人工鱼礁大型底栖动物群落的非度量多维标度排序(NMDS)图

Fig.3 Non multi-dimensional scaling plots of epibenthic macrofauna communities on the Dongji artificial reefs, Linhai, Zhejiang Province

(a) 基于密度数据 $\log(x+1)$ 转换后的非相似性分析 Dissimilarity based on the log-transformed density data, (b) 基于物种存在/缺失转换后的非相似性分析 Dissimilarity based on the species presence/absence data

间猫爪牡蛎的密度和生物量均没有显著性差异(图4, $P>0.05$)。

礁体投放10个月后猫爪牡蛎SH介于15—31mm,平均值为24mm;15个月后猫爪牡蛎SH介于20—35mm,平均值为27mm(图5)。15个月后的平均SH显著高于10个月后的(图5, $P<0.05$)。

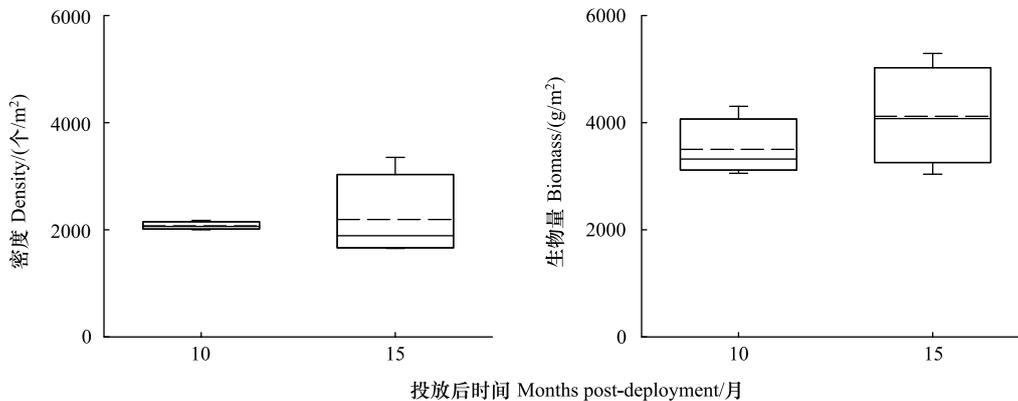


图4 临海东矾人工鱼礁附着猫爪牡蛎总密度和总生物量的箱式图

Fig.4 Box plots in total densities and biomass of sessile oyster *Talonostrea talonata* on the Dongji artificial reefs, Linhai, Zhejiang Province

实线和中断线分别表示平均值和中值

3 讨论

底栖动物次级生产力是支持食物链中较高营养级物种的能量基础,包括商业上重要的物种。然而,过去研究更多关注人工鱼礁对鱼类生产的支持和贡献,而很少研究人工鱼礁表面大型底栖动物群落^[17]。已有研究表明,人工鱼礁表面大型底栖动物群落通常以自然环境中缺乏的岩相(hard-substrate)物种为主,常见类群包括多毛类、腹足类、双壳类、十足类、端足类、等足类、苔鲜虫、柳珊瑚和海鞘^[18-19]。根据栖息方式,这些动物可划分为附着性(sessile)动物(如牡蛎、藤壶、苔鲜虫)和移动性(motile)动物(沙蚕、蟹类),附着性动物是定殖于礁体表面且不能移动的类群,而移动性动物是定居于礁体表面、可缓慢移动的类群;附着动物是人工鱼礁的先锋性种类,在其定殖后移动性动物才来此定居^[20]。然而,国内文献常将这两个类群统称为附着生物^[21-23],有待商榷。本研究中记录到的17种礁体动物中12种为岩相性种类,其他5种(岩虫、双齿围沙蚕、

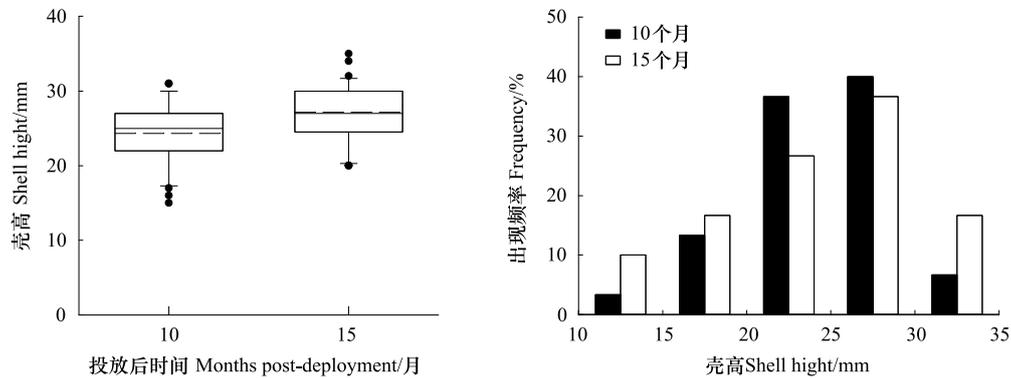


图5 临海东矾人工鱼礁附着猫爪牡蛎的壳高和频率分布

Fig.5 Shell height and size-frequency distribution of sessile oyster *Talonostrea talonata* on the Dongji artificial reefs, Linhai, Zhejiang Province

实线和中断线分别表示平均值和中值

丽核螺、马粪海胆、金氏真蛇尾)也偏好栖息于天然岩礁和牡蛎礁等岩相环境中^[24-25],研究表明临海东矾人工鱼礁丰富了当地的软相(soft-bottom)生物群落,提高了生境异质性和生物多样性。

人工鱼礁表面动物群落的生物多样性取决于环境因子和礁体结构,如礁体的结构复杂性和材质、海域深度以及与天然礁体的距离^[26-27]。本研究发现,临海东矾人工鱼礁大型底栖动物的物种多样性低于珠江口竹洲人工鱼礁(12个月后36种)^[11]、大亚湾人工鱼礁(24个月后79种)^[10]、莱州芙蓉岛人工鱼礁(17个月后94种)^[13]、青岛石雀滩人工鱼礁(20个月后69种)^[14]、葡萄牙阿尔加维人工鱼礁(6个月后91种)^[20]和意大利古里亚海洛阿诺人工鱼礁(12个月后57种)^[28],原因可能是临海东矾海域水深达到14m、水体混浊、距离海岸较远等因素有关,有研究发现人工鱼礁表面生物多样性与水深呈负相关性^[29-30]。

人工鱼礁表面大型底栖动物的密度通常比天然软相海底高出1—2个数量级^[30]。本研究中,礁体投放15个月后人工鱼礁表面大型底栖动物群落的平均密度和平均生物量分别为(10056±1858)个/m²和(8300±2045)g/m²,高于珠江口竹洲人工鱼礁(12个月后2648个/m²和4462g/m²)^[11]、莱州芙蓉岛人工鱼礁(1龄礁区:2387个/m²和711g/m²;4—5龄礁区:5521个/m²和1437g/m²)^[13],低于葡萄牙阿尔加维人工鱼礁(6个月后:(23585±8148)个/m²)^[19]。与人工鱼礁海域软相海底大型底栖动物的同期调查结果(平均密度:41个/m²,平均生物量:1.33g/m²,未发表数据)相比,大型底栖动物群落的总密度和总生物量分别增长了约240倍和6240倍。研究结果表明投放的人工鱼礁可显著增加海域饵料生物的丰度,为海洋牧场资源养护对象提供了丰富的食物,提升了人工鱼礁生境质量和生态系统功能。

附着生物是第一批定殖到人工鱼礁硬质表面的生物,其高密度聚集生长可增加人工鱼礁生境复杂性,为移动性动物(如节肢动物、环节动物)提供避难和摄食场所^[31-32]。因此,人工鱼礁礁龄越长,其附着生物群落的发育将提供更好的栖息地质量、并将拥有更丰富的移动性动物,促进人工鱼礁生态系统的成熟^[33]。尽管本研究仅调查了人工鱼礁投放后短期(15个月)内大型底栖动物群落,但也发现大型底栖动物群落总密度和总生物量随着礁体发育呈显著增长、群落结构也发生显著改变。另外,在17种礁体动物中仅6种为附着性动物,其它11种为移动性动物;礁体投放10个月后礁体表面定居有6种附着性动物和7种移动性动物、15个月后则为3种附着性动物和8种移动性动物,显示随着礁体发育附着性动物的占比在下降、而移动性动物的占比却增加,研究表明随着礁龄的增长,临海东矾人工鱼礁吸引越来越多的移动性动物在此栖息,且其生境功能也在逐步上升。

猫爪牡蛎分布于我国渤海、黄海、东海和南海沿岸,其通常与其他牡蛎共生于潮间带和潮下带海域,但数量少、为偶见种;但在上个世纪该种通过漂流或航运从亚洲扩张到南美,威胁着当地牡蛎的养殖^[34-35]。本研

究报道了临海东矾人工鱼礁表面附着有高密度的猫爪牡蛎,其平均密度达到或超过了自然或人工修复牡蛎礁中造礁牡蛎的密度^[24-25],揭示了猫爪牡蛎能在较深海区聚集生长形成牡蛎礁,表明临海东矾人工鱼礁拓展了猫爪牡蛎种群的定殖空间,增殖了猫爪牡蛎种群,已发育成为以猫爪牡蛎为建礁物种的人工牡蛎礁,持续发挥着牡蛎礁的净化水体、提供生境、维持生物多样性和固碳等生态功能^[24-25]。

4 结论和展望

本研究首次报道浙江沿海人工鱼礁表面大型底栖动物的种类组成、密度、生物量和群落结构,发现投放的人工鱼礁表面分布有低物种多样性和高密度的大型底栖动物群落,并发育成为以猫爪牡蛎为造礁物种的人工牡蛎礁生态系统,研究结果对人工鱼礁的效益评估和后期规划建设提供基础数据。同时,随着礁体发育人工鱼礁表面大型底栖动物群落的总密度和总生物量呈显著增长,其群落结构也显著变化,表明临海东矾人工鱼礁表面大型底栖动物群落还处于早期发育阶段,人工鱼礁生态系统还未进入成熟期。今后,应持续开展人工鱼礁表面大型底栖动物群落的跟踪监测,并检验礁体结构形状对表面大型底栖动物群落的影响,在较长时间尺度(>10年)上揭示人工鱼礁生物群落的演替过程和机制,从而为科学建设海洋牧场和人工鱼礁提供技术支持。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国水产行业标准. 海洋牧场分类 SC/T 9111-2017.
- [2] 杜元伟, 姜靛, 王一凡. 海洋牧场生态管理研究的现状与展望. 中国海洋大学学报: 社会科学版, 2020(3): 32-41.
- [3] 中华人民共和国水产行业标准. 人工鱼礁建设技术规范 SC/T9416-2014.
- [4] Pickering H, Whitmarsh D, Jensen A. Artificial reefs as a tool to aid rehabilitation of coastal ecosystems: investigating the potential. *Marine Pollution Bulletin*, 1999, 37(8-12): 505-514.
- [5] Baine M. Artificial reefs: a review of their design, application, management and performance. *Ocean & Coastal Management*, 2001, 44(3/4): 241-259.
- [6] 姜昭阳, 郭战胜, 朱立新, 梁振林. 人工鱼礁结构设计原理与研究进展. 水产学报, 2019, 43(9): 1881-1889.
- [7] Hatcher A M. COmparison of biomass and percentage cover of sessile epibiota on the Poole Bay Artificial Reef. *Ophelia*, 1997, 47(1): 55-62.
- [8] Toledo M I, Torres P, Díaz C, Zamora V, López J, Olivares G. Ecological succession of benthic organisms on niche-type artificial reefs. *Ecological Processes*, 2020, 9: 1-10.
- [9] Relini G. Trophic relationships between fishes and an artificial reef. *ICES Journal of Marine Science*, 2002, 59: S36-S42.
- [10] 张伟, 李纯厚, 贾晓平, 陈丕茂, 方良. 大亚湾混凝土鱼礁和铁质鱼礁附着生物群落结构的季节变化. 南方水产科学, 2015, 11(1): 9-17.
- [11] 李勇, 洪洁漳, 李辉权. 珠江口竹洲人工鱼礁与相邻天然礁附着生物群落结构研究. 南方水产科学, 2013, 9(2): 20-26.
- [12] 詹启鹏, 董建宇, 孙昕, 张宇洋, 李文涛, 张沛东, 张秀梅. 莱州湾芙蓉岛海域不同材质鱼礁生物附着效果的比较研究. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2021, 51(9): 124-134.
- [13] 詹启鹏, 孙昕, 董建宇, 张宇洋, 张秀梅. 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. 中国水产科学, 2022, 29(5): 704-719.
- [14] 王震, 公丕海, 关长涛, 李娇, 史佰佰. 青岛石雀滩海域人工鱼礁材料对附着生物群落结构的影响. 渔业科学进展, 2019, 40(4): 163-171.
- [15] 郭彪, 陈卫, 高燕, 张博伦, 王硕, 王宇, 张雪, 曾祥茜. 天津大神堂海域不同时间序列礁体附着生物群落特征变化. 渔业科学进展, 2020, 41(6): 12-18.
- [16] 全为民, 安传光, 马春艳, 黄厚见, 成伟, 王云龙, 沈新强, 陈亚瞿. 江苏小庙洪牡蛎礁大型底栖动物多样性及群落结构. 海洋与湖沼, 2012, 43(5): 992-1000.
- [17] Sally R, Porter Joanne S, Wilding Thomas A. Artificial reef design affects benthic secondary productivity and provision of functional habitat. *Ecology and Evolution*, 2020, 10(4): 2122-2130.
- [18] Blouet S, Bramanti L, Guizien K. Artificial reefs geographical location matters more than shape, age and depth for sessile invertebrate colonization in the Gulf of Lion (NorthWestern Mediterranean Sea). *Peer Community Journal*, 2022, 2: e24.
- [19] Moura A, Boaventura D, Cúrdia J, Carvalho S, da Fonseca L C, Leitão F M, Santos M N, Monteiro C C. Effect of depth and reef structure on

- early macrobenthic communities of the Algarve artificial reefs (southern Portugal). *Hydrobiologia*, 2007, 580(1): 173-180.
- [20] Simpson T J S, Smale D A, McDonald J I, Wernberg T. Large scale variability in the structure of sessile invertebrate assemblages in artificial habitats reveals the importance of local-scale processes. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2017, 494: 10-19.
- [21] 李真真, 公丕海, 关长涛, 李娇, 王腾腾. 不同水泥类型混凝土人工鱼礁的生物附着效果. *渔业科学进展*, 2017, 38(5): 57-63.
- [22] 黄梓荣, 梁小芸, 曾嘉. 人工鱼礁材料生物附着效果的初步研究. *南方水产*, 2006, 2(1): 34-38.
- [23] 张伟, 李纯厚, 贾晓平, 陈丕茂, 方良. 人工鱼礁附着生物影响因素研究进展. *南方水产*, 2008, 4(1): 64-68.
- [24] Quan W M, Zhu J X, Ni Y, Shi L Y, Chen Y Q. Faunal utilization of constructed intertidal oyster (*Crassostrea rivularis*) reef in the Yangtze River Estuary, China. *Ecological Engineering*, 2009, 35(10): 1466-1475.
- [25] Quan W M, Fan R L, Li N N, Sun Z Y, Jiang W, Wang T N, Shi W J, Li X Y. Seasonal and temporal changes in the Kumamoto oyster *Crassostrea sikamea* population and associated benthic macrofaunal communities at an intertidal oyster reef in China. *Journal of Shellfish Research*, 2020, 39(2): 207.
- [26] Bohnsack J A, Johnson D L, Ambrose R F. Ecology of artificial reef habitats and shes// Seaman J W, Sprague L, eds. *artificial Habitats for Marine and Freshwater Fisheries*. Academic Press, San Diego, 1991, 61-107.
- [27] Layman Craig A, Allgeier Jacob E. An ecosystem ecology perspective on artificial reef production. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57(11): 2139-2148.
- [28] Steimle F, Foster K, Kropp R, Conlin B. Benthic macrofauna productivity enhancement by an artificial reef in Delaware Bay, USA. *ICES Journal of Marine Science*, 2002, 59(suppl): S100-S105.
- [29] Relini G, Relini M, Torchia G, Tixi F, Nigri C. Coal ash tests in Loano artificial reef. In *Proceedings of the International Conference on Ecological System Enhancement Technology for Aquatic Environments "ECOSSET-95"*, Tokyo, 1995, 107-113.
- [30] Kocak F, Zamboni N. Settlement and seasonal changes of sessile macrobenthic communities on the panels in the Loano artificial reef (Ligurian Sea, NW Mediterranean). *Oebalia*, 1998, 24: 17-37.
- [31] Antoniadou C, Voultziadou E, Chintiroglou C. Seasonal patterns of colonization and early succession on sublittoral rocky cliffs. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2011, 403(1/2): 21-30.
- [32] Antoniadou C, Voultziadou E, Chintiroglou C. Benthic colonization and succession on temperate sublittoral rocky cliffs. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2010, 382(2): 145-153.
- [33] Vivier B, Dauvin J C, Navon M, Rusig A M, Mussio I, Orvain F, Boutouil M, Claquin P. Marine artificial reefs, a meta-analysis of their design, objectives and effectiveness. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 27: e01538.
- [34] 胡利莎. 中国近海缘曲牡蛎科和其他部分属种的分类及猫爪牡蛎系统地理学研究[D]. 青岛: 中国科学院大学, 2020.
- [35] Cavaleiro N P, Lazoski C, Tureck C R, Melo C M R, do Amaral V S, Lomovasky B J, Absher T M, Solé-Cava A M. *Crassostrea talonata*, a new threat to native oyster (*Bivalvia*: *Ostreidae*) culture in the Southwest Atlantic. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2019, 511: 91-99.