



枸杞岛筏式贻贝养殖海域鱼类群聚特征

高炜程¹, 汪振华^{1,2*}, 章守宇^{1,2*}, 林 军^{1,2},
谭益国¹, 李训猛^{1,2}, 陈健渠¹

(1. 上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学, 海洋牧场工程技术研究中心, 上海 201306)

摘要: 为探究筏式贻贝养殖生境鱼类资源养护功能, 于2020年9—12月对枸杞岛筏式贻贝养殖生境(分表层区和底层区)及周边岩礁生境的鱼类进行了多网目组合刺网采样。应用相对重要性指数IRI、多样性指数并结合等级聚类、非度量多维标度排序(nMDS)分析鱼类组成和群落结构。结果显示, 在2种生境中共采集鱼类55种, 隶属于10目34科47属, 其中贻贝养殖生境采集到37种(底层和表层分别为29和20种); 岩礁生境共采集到40种。在鱼类组成上, 中国花鲈和鲢是贻贝养殖生境表层区的典型优势种, 而黄姑鱼和褐菖鲉是贻贝养殖生境底层区的典型优势种; 褐菖鲉同时也是岩礁生境的典型优势种。多样性分析表明, 贻贝养殖生境的总体鱼类多样性要高于岩礁生境, 但尚不显著。多元分析显示, 各月份2种生境中的鱼类群落格局均可分为3种类型, 虽与养殖表层区、养殖底层区和岩礁区并非严格一致, 但各群落间差异依然显著。研究表明, 大规模筏式养殖设施的存在吸引了众多中上层鱼类及底层鱼类, 也为岩礁生境优势鱼类提供了额外的栖息环境, 发挥了近似于浮鱼礁系统的资源养护作用。研究结果可为岛礁海域海洋牧场目标种的选择和人工生境构建模式的应用提供重要参考。

关键词: 鱼类; 群聚; 贻贝养殖; 浮鱼礁; 海洋牧场; 目标种; 枸杞岛

中图分类号: S 932.4

文献标志码: A

我国在岛礁、内湾、河口和近岸海域设置了大量的海水养殖人工设施, 其中以吊养为主的筏式养殖更为突出。在一些筏式养殖和海洋牧场用海容易产生冲突的区域, 科学设计具有互融性的多工程嵌套和融合发展模式^[1], 是当前亟待解决的现实问题。解析这些问题的重要科学基础依赖于全面深入地探索规模化筏式养殖背景下局部生境的生态学副效应, 其中渔业资源的响应模式是非常重要的科学问题。东海区的海洋牧场以资源

养护型为主, 这和海区强大的渔业资源产出能力有关, 但在已经公布的136个国家级海洋牧场中, 东海区仅有12个, 占比不到9%。因此创新海洋牧场发展思路, 探寻适合东海区的发展模式, 极有必要将具备强大空间资源基础的筏式养殖生境的功能作为重要参考^[2], 并融合休闲渔业进行产业化设计^[1]。在这样的背景下, 对筏式养殖生境的鱼类组成及其群聚特征的研究, 更有助于科学选择东海区海洋牧场目标种, 更合理地设计出浮—

收稿日期: 2021-11-09 修回日期: 2022-01-14

资助项目: 国家重点研发计划(2019YFD0901303, 2018YFD0900905); 上海海洋大学科技发展专项(A2-2006-20-200212)

第一作者: 高炜程(照片), 从事近海栖息地生态和海洋牧场研究, E-mail: gaoweicheng97@163.com

通信作者: 汪振华, 从事海洋牧场和海洋生态系统研究, E-mail: zh_wang@shou.edu.cn;

章守宇, 从事近海栖息地生态修复和渔业资源增殖养护研究, E-mail: syzhang@shou.edu.cn



沉鱼礁优化组合下的人工鱼礁系统。

筏式养殖是一种通过筏架来吊养重要经济贝藻类等水产品的养殖方式^[3]。筏式贻贝养殖设施在表层由浮绳、浮球和系挂于浮绳上的贻贝串等结构组成, 底层设置起连接和固定作用的绳索和锚桩^[4]。这些人工构造物的投放在不同程度上增加了海洋表底层水体的空间异质性^[5], 影响水流特征^[6-7]的同时还可对某些鱼类种群起到一定的养护作用^[8-9]。国内外学者对筏式养殖区域生物的研究以海藻^[10-11]、浮游动植物^[12-15]、底栖生物^[16-18]等低营养层级生态效应为主, 少数高营养层级研究, 如鱼类研究则主要集中在单一物种的利用规律^[19]及聚集效应^[20]和不同水体鱼类组成^[5, 21]以及鱼类组成差异^[4]。但现有研究在局地尺度围绕筏式养殖与天然岩礁生境影响鱼类群聚方式和强度的探讨较为缺乏。此外, 关于如何利用筏式养殖生境中的鱼类组成信息有效确定海洋牧场中潜在的增殖和养护目标种等方面的研究依然空白。

基于此, 本研究以枸杞岛筏式养殖生境为对象, 在离岸方向设置4个样带, 选择邻近的4个

岩礁生境站点为对照, 以表底层两个结构体系中的鱼类组成与岩礁生境的差异为切入点, 采用逐月采样的方式(9—12月)进行筏式养殖生境鱼类群聚特征的探讨。分层可以更好地把岩礁生境鱼类群聚向筏式生境传递的方式、强度和特点等显现出来, 从而揭示贻贝养殖活动对沿岸局部鱼类组成的潜在影响。在此基础上, 为岛礁海域海洋牧场养护目标种的选择和增殖策略的制订提供参考^[1], 并进一步为在海洋牧场规划中拓展浮筏养殖和底层设施融合布局新模式奠定基础^[22]。

1 材料与方法

1.1 研究区域与站点选择

研究区域位于浙江省嵊泗县枸杞岛西北部的筏式贻贝养殖水域(图1)。按离岸距离由南向北设置4个样带(每2个样带的间距约500~1 000 m), 每条样带上东西方向各选择2个点(在100 m的范围内随机选择位置, L), 同步在周边岩礁区域设置4个对照站位(R), 共计12个站点。

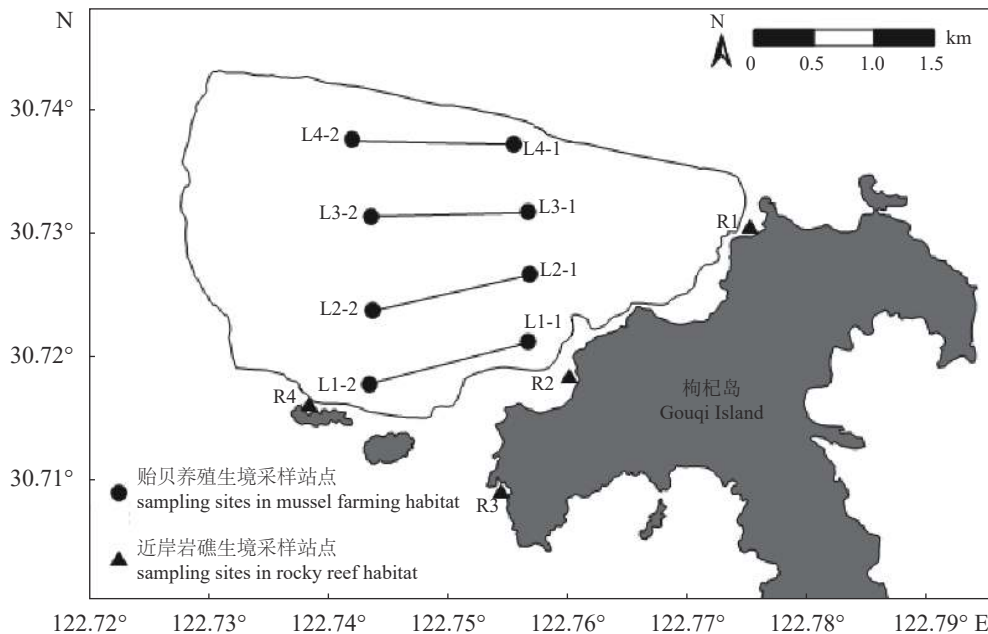


图1 筏式养殖区及对照区鱼类样本采集站位分布

Fig. 1 Distribution of fish sampling sites in raft culture area and control area

1.2 采样方法与样品处理

采用多网目组合三重刺网进行鱼类采集。每一组刺网由横向缩节长度皆为15 m, 网目大小分别为26、43和60 mm的3片网衣随机连接而成, 每片网衣的缩节高度皆为1.8 m, 总长度45 m。

于2020年休渔期结束后的9—12月进行逐月调查。采集中上层鱼类时, 将组装好的刺网平行设置于贻贝养殖筏的间隙, 两端分别系于浮球上, 并且每隔3 m左右在浮子网上系一个直径8 cm的白色塑料浮球以增强中段网衣的浮力。而底层鱼类的

采集则是直接在一组网的两端系上沉石, 设置于养殖筏架的底部水体, 通常设置在浮网的底部。岩礁生境因其水深限制, 仅平行于岸线设置底层网一组。选择小潮期间进行采样, 平均每组刺网的设置时间为 24 h 左右。每月均在贻贝养殖生境的 8 个站点放置表层和底层组合刺网各 1 组, 共 16 组, 在 4 个岩礁生境只放置底层组合刺网 1 组, 共 4 组, 共计 20 组。

所得样品皆于当天冷冻保存, 并于 2 周内完成所有个体的生物学实验。参考《长江口鱼类》^[23] 进行鱼类鉴定, 依据《中国海洋及河口鱼类系统检索》^[24] 完善种类分类信息。对每一尾鱼的体长(全长或叉长, 精确至 0.01 cm)和体重(精确至 0.01 g)进行逐一测量, 解剖观察和判断鱼的性别、性腺成熟度和胃饱满度, 并分类称重胃含物。完成部分样品的耳石和肌肉等组织样品的采集。以上操作皆按照《海洋调查规范》(GB/T 12763.6—2007)^[25] 进行。实验过程中操作人员严格遵守本实验室实验动物福利伦理规范。

1.3 数据整理及分析

鱼类的生态类型以《中国海洋鱼类》^[26] 为参考, 结合汪振华等^[27] 在该海域的研究结果, 根据鱼类的适温性和喜好活动水层对枸杞岛筏式养殖海域鱼类进行生态类群划分, 分为暖水种、暖温带、中上层、近底层和底层鱼类。

采用相对重要性指数 IRI (the index of relative importance)^[28] 来确定鱼类优势种:

$$IRI = (N + W) \times F \times 10^4 \quad (1)$$

式中, N 、 W 和 F 分别表示某一种类的数量百分比、重量百分比和出现频率。定义 $IRI \geq 1000$ 的物种为优势种, $100 \leq IRI < 1000$ 的物种为常见种, $10 \leq IRI < 100$ 的物种为一般种, $IRI < 10$ 的物种为少见种。为方便比较, 将各网次的数量和重量换算成 24 h 的对应丰度(尾/d, 下同)。

采用 Shannon-Wiener 种类多样性指数 (H')^[29]、Pielou 均匀度指数 (J')^[30]、Margalef 种类丰富度指数 (D')^[31] 以及 Jaccard 相似性系数 (I')^[32] 对鱼类的多样性特征进行分析。

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i \quad (2)$$

$$J' = H' / \ln S \quad (3)$$

$$D' = (S - 1) / \ln N \quad (4)$$

$$I' = c / (a + b - c) \quad (5)$$

式 (2)~(5) 中, P_i 为第 i 种鱼类的个体数占总个体数的比例, S 为总种类数, N 为鱼类总尾数, a 为生境 A 的种类数, b 为生境 B 的种类数, c 为生境 A、B 中的共有种数。根据相似性系数原理, I' 为 0~0.25 时为极不相似, I' 为 0.25~0.50 时为中等不相似, I' 为 0.50~0.75 时为中等相似, I' 为 0.75~1.00 时为极相似。

采用等级聚类 (CLUSTER) 分析和 nMDS 排序分析鱼类群落组成的格局^[8], 进行相似性分析, 原始丰度数据皆作 4 次方根转换处理。分析时, 计算任意站位间的 Bray-Curtis 相似性系数 (BC), 形成相对丰度矩阵, 进行聚类和排序分析。

$$BC = 100 \times \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^S |X_{ij} - X_{im}|}{\sum_{i=1}^S |X_{ij} + X_{im}|} \right] \quad (6)$$

式 (6) 中, S 为种类数, X_{ij} 和 X_{im} 分别为第 i 种类在第 j 个站点和第 m 个站点中的数量。CLUSTER 分析时将出现率小于 5% 的种类剔除; NMDS 二维结果图的可用性用胁迫系数 (Stress) 来衡量, Stress < 0.2 时, 表示其图形有一定解释意义。用 ANOSIM 检验分析不同月份群落间差异性 ($R > 0$ 时表明组间有差异, $P < 0.005$ 时表明差异极显著)。采用相似性百分比 (SIMPER) 分析组内相似性和组间差异性及其典型种和分歧种的贡献率。用单因素方差分析对不同生境的种类组成和物种多样性各指数进行差异检验, 显著性水平为 $\alpha = 0.05$ 。

上述统计和分析方法均在 Primer Premier 5.0 和 SPSS 16 软件中实现, 相对丰度图用 Origin 2018 软件绘制。

2 结果

2.1 鱼类种类组成

结果共采集鱼类 55 种, 隶属 10 目 34 科 47 属。其中贻贝养殖生境 (MF) 共采集到 9 目 24 科 33 属 37 种, 近岸岩礁生境 (RR) 共采集到 8 目 29 科 36 属 40 种, 分别占总种类数的 67.27% 和 72.73%。贻贝养殖生境和近岸岩礁生境共有种为 22 种, 其中筏式养殖生境表层 (MS) 和底层 (MB) 与近岸岩礁生境共有种均为 16 种。从种类区系来看, 近岸岩礁生境比筏式养殖生境略显丰富。种类数最多的为 10 月的 36 种, 最低的为 12 月的 23 种。目级分类阶元下, 鲈形目 (Perciformes) 为 30 种, 占鱼类总种类数的 54.55%; 其次为鲱形

目 (Clupeiformes) 8 种, 占总种类数的 14.55%。每月在岩礁生境均出现的种类是为褐菖鲉 (*Sebastes marmoratus*)、赤鼻棱鲉 (*Thryssa kammalensis*)、花尾鹰鲷 (*Goniistius zonatus*) 和斑头六线鱼 (*Hexagrammos agrammus*) 共 4 种; 每月在筏式养殖生境表层区出现的为赤鼻棱鲉、鲮 (*Mugil cephalus*)、中国花鲈 (*Lateolabrax maculatus*) 和褐菖鲉 4 种; 每月在筏式养殖生境底层区出现的为黄姑鱼 (*Nibea albiflora*) 和褐菖鲉 2 种。

不同生态类型鱼类组成上 (表 1), 研究期间采集到暖水种、暖温种、中上层、近底层和底层鱼类分别为 24、31、11、29 和 15 种。其中, 筏架表层除 12 月外, 其他月份暖温种皆多于暖水种; 底层区除 10 月外, 其他月份的暖温种亦多于暖水种; 而近岸岩礁生境中各月份的暖水种皆多于暖温种。总体上, 中上层鱼类种类数在筏架表层水域要高于筏架底层和岩礁生境; 底层和近底层鱼类则相反。

表 1 不同月份各生态类型鱼类的采集种类数

Tab. 1 Numbers of fish species of specific ecological types during four months

尾

生态类型 ecological type	2020-09			2020-10			2020-11			2020-12			总计 total
	MS	MB	RR	MS	MB	RR	MS	MB	RR	MS	MB	RR	
暖温种 warm temperature fishes	8	11	7	8	10	11	6	6	8	3	7	5	24
暖水种 warm water fishes	6	5	8	4	10	15	4	4	10	5	3	8	31
中上层鱼类 pelagic fishes	6	7	3	7	5	4	6	2	4	4	1	4	11
近底层鱼类 near-ground fishes	5	7	9	3	10	16	2	5	8	2	3	5	29
底层鱼类 ground fishes	3	2	3	2	5	6	2	3	6	2	6	4	15
总计 total	14	16	15	12	20	26	16	10	18	8	10	13	55

注: MS. 贻贝养殖生境表层区; MB. 贻贝养殖生境底层区; RR. 岩礁生境, 下同。

Notes: MS. mussel farming surface area; MB. mussel farming bottom area; RR. rocky reef habitat, the same below.

2.2 优势种组成

研究区域的贻贝养殖生境底层区采集到的优势种有赤鼻棱鲉、黄姑鱼、褐菖鲉、皮氏叫姑鱼 (*Johnius belangerii*)、鲮 (*Miichthys miiuy*) 和中国花鲈等, 其中褐菖鲉和黄姑鱼是典型优势种 (表 2), 其他鱼类的优势度并不持续。表层区采集到的优势种有蓝圆鲈 (*Decapterus maruadsi*)、赤鼻棱鲉、竹筴鱼 (*Trachurus japonicus*)、中国花鲈、斑头六线鱼和鲮等, 其中中国花鲈和鲮是典型优势种, 其他鱼类的优势度更显季节性。对照区岩礁生境中采集到的优势鱼类有细刺鱼 (*Microcanthus strigatus*)、赤鼻棱鲉、丝背细鳞鲷 (*Stephanolepis cirrhifer*)、褐菖鲉、花尾鹰鲷、斑头六线鱼和鲮 (*Girella punctata*), 除了褐菖鲉、赤鼻棱鲉和丝背细鳞鲷的优势度突出外, 其他种类更显季节变动性。其中赤鼻棱鲉在 9—10 月成为 2 种生境中皆大量出现的优势鱼类 (表 2)。从优势种的组成和季节变动上可以看出, 贻贝养殖区的表底层和岩礁生境的优势种组成皆有明显差异, 表层的优势鱼类中鲮科 (Engraulidae) 和鲈科 (Carangidae) 鱼类是季节性的绝对优势种, 鲮和中国花鲈是典型的持续性优势种, 底层恋礁鱼类斑头六线鱼也在繁殖

期利用筏架上层设施, 而贻贝养殖生境底层区已经成为黄姑鱼和褐菖鲉的重要生境 (表 2), 相对岩礁生境皆有较大差异。

2.3 典型优势种的相对丰度变化

基于鱼类的生态地位及其经济价值, 结合优势度分析结果 (表 2), 确定褐菖鲉、黄姑鱼、鲮和中国花鲈这 4 种鱼类为研究区域的典型优势种。上述鱼类在各月份相对丰度的变化情况显示, 褐菖鲉在各月份每种生境中皆有出现, MB 平均相对丰度逐月递增; RR 平均相对丰度 10 月 > 9 月 > 12 月 > 11 月; MS 平均相对丰度 9 月 > 10 月 > 12 月 > 11 月 (图 2)。中国花鲈的平均相对丰度最大值出现在 12 月的 MS, 除 9 月外, 其他月份 RR 的平均相对丰度均低于 MB 与 MS, 且大部分出现在 MS。黄姑鱼只在 MB 中出现, 平均相对丰度 10 月 > 11 月 > 12 月 > 9 月。鲮仅出现在 MB 和 MS 中, 其中 MB 仅 9 月有采获鲮样本, 但各月都在 MS 出现, 且平均相对丰度逐月递增 (12 月 > 11 月 > 10 月 > 9 月)。

2.4 鱼类物种多样性

贻贝养殖生境中 9、11 和 12 月的平均鱼类多

表 2 不同月份研究区域的优势鱼类组成及其相对重要性指数 (IRI)

Tab. 2 Monthly composition of dominant fishes in sampling area and their values of relative importance index

月份 month	MB		MS		RR	
	优势种 dominant	IRI	优势种 dominant	IRI	优势种 dominant	IRI
2020-09	赤鼻棱鲷	2 163	蓝圆鲈	6 449	细刺鱼	6 255
			赤鼻棱鲷	3 063	赤鼻棱鲷	4 675
			竹筴鱼	2 580	丝背细鳞鲷	2 681
2020-10	黄姑鱼	5 503	赤鼻棱鲷	6 508	褐菖鲉	4 670
			褐菖鲉	2 970	中国花鲈	1 562
			皮氏叫姑鱼	1 115	丝背细鳞鲷	1 994
2020-11	褐菖鲉	3 863	竹筴鱼	2 628	赤鼻棱鲷	1 921
			黄姑鱼	2 446	斑头六线鱼	2 659
			鲹	1 294	鲹	1 770
2020-12	褐菖鲉	7 060	花尾鹰鲷	1 506	褐菖鲉	5 653
			中国花鲈	1 659	褐菖鲉	5 253
			黄姑鱼	1 014	斑头六线鱼	5 253
					鲷	1 151

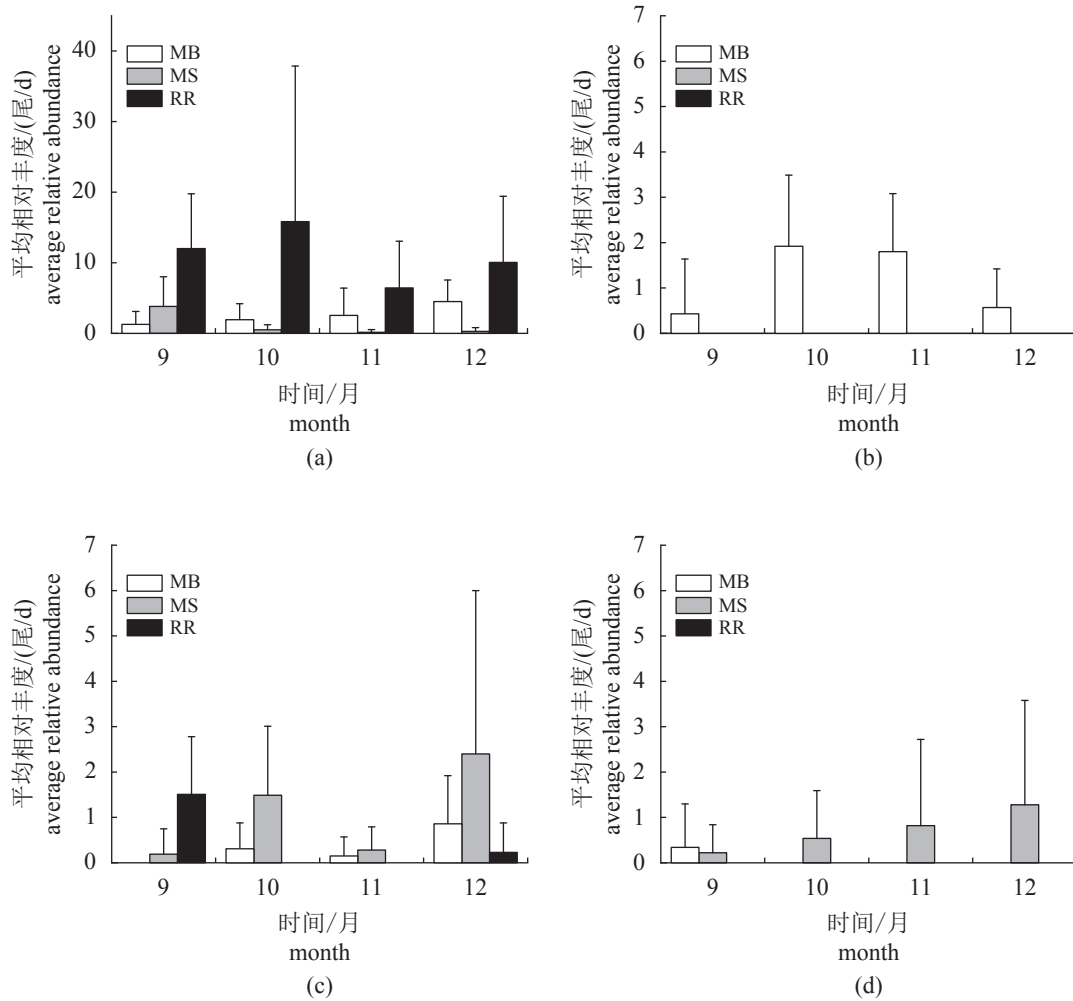


图 2 主要物种在不同生境中的平均相对丰度月度变化

(a) 褐菖鲉, (b) 黄姑鱼, (c) 中国花鲈, (d) 鲹。

Fig. 2 Monthly variation of average relative abundance of economic fish species in MF and RR habitats

(a) *S. marmoratus*, (b) *N. albiflora*, (c) *L. maculatus*, (d) *M. cephalus*.

样性指数皆高于近岸岩礁生境(表3), 但差异尚不显著(9月: $F=0.698$, $P=0.595$; 11月: $F=0.232$, $P=0.837$; 12月: $F=2.189$, $P=0.939$); 10月低于岩礁生境, 亦不显著($F=2.578$, $P=0.684$)。鱼类丰富度指数在9月和10月的贻贝养殖生境要高于岩礁生境, 但差异亦非显著(9月: $F=0.034$, $P=0.679$; 10月: $F=0.035$, $P=0.359$); 11月和12月, 贻贝养殖生境中的平均丰富度低于岩礁生境, 亦

不显著(11月 $F=0.013$, $P=0.382$; 12月 $F=0.797$, $P=0.571$)。均匀度指数在9、10、11月中的贻贝养殖生境要高于岩礁生境, 但差异皆不显著(9月: $F=5.397$, $P=0.213$; 10月: $F=0.349$, $P=0.863$; 11月: $F=0.094$, $P=0.105$); 12月低于岩礁生境, 亦不显著($F=1.759$, $P=0.809$)。总体上, 筏式养殖区表底层综合后的鱼类多样性优于近岸岩礁生境, 但差异尚不显著。

表3 贻贝养殖生境及岩礁生境鱼类多样性指数、丰富度、均匀度

Tab. 3 Shannon-Wiener index, species richness and Pielou evenness of fish community in mussel farming and rocky reef habitats

月份 month	多样性指数(H') Shannon-Wiener index		种类丰富度指数(D) species richness		均匀度指数(J') Pielou evenness	
	MF	RR	MF	RR	MF	RR
2020-09	1.46±0.42	1.21±0.36	1.45±0.59	1.61±0.59	0.79±0.11	0.62±0.21
2020-10	1.65±0.43	1.76±0.21	2.14±0.56	2.49±0.52	0.80±0.16	0.78±0.12
2020-11	1.63±0.31	1.58±0.46	2.11±0.49	1.82±0.50	0.91±0.07	0.82±0.09
2020-12	1.36±0.29	1.35±0.14	1.66±0.37	1.53±0.31	0.81±0.12	0.82±0.07

注: MF. 贻贝养殖生境。
Notes: MF. mussel farming habitat.

从种类组成的相似性系数 I 来看, I_{MS-RR} 在9—12月分别为 0.38、0.19、0.17、0.23; I_{MB-RR} 在9—12月分别为 0.24、0.35、0.12、0.28; I_{MS-MB} 在9—12月分别为 0.43、0.28、0.18、0.20。9月和11月的贻贝养殖生境底层和近岸岩礁生境的相似性系数要高于贻贝养殖生境表层和近岸岩礁生境的相似性系数, 10月和12月则相反。各生境组合的相似性系数均小于 0.5, 其中9月贻贝养殖生境表层区与岩礁生境之间、10月和12月的贻贝养殖生境底层区与岩礁生境之间为中等不相似水平, 其余组合均为极不相似水平。可见贻贝养殖生境的表底层鱼类组成无论内部比较还是与近岸岩礁生境比较, 皆有较大差异, 这正是生境结构迥异和栖息地功能差异的具体体现。

2.5 鱼类群聚特征

CLUSTER 和 nMDS 结果显示, 2 种生境鱼类群落结构皆可分为 3 种类型(图3, 图4)。ANOSIM 分析表明, 3 种群落组成间的差异均极为显著(Global $R_{Sep}=0.733$, $P<0.0001$; Global $R_{Oct}=0.502$, $P<0.0001$; Global $R_{Nov}=0.735$, $P<0.0001$; Global $R_{Dec}=0.817$, $P<0.0001$)。不同月份之间, 鱼类群落格局皆有不同程度的差异, 但并非一致。SIMPER 分析表明, 各组群典型种的生态类型也有差异, 9月群落 I 和群落 II 贡献度 >5% (只考虑贡献

度 >5% 的物种, 下同) 的典型种中, 中上层鱼类贡献度分别为 82.85% 和 99.99%; 群落 III 以趋礁型的近底层鱼类丝背细鳞鲷、细刺鱼和恋礁型鱼类褐菖鲈为典型种(总贡献度为 83.44%) (表4)。10月和11月的群落 I 均为 1 个站点, 不同的是, 10月群落 I 为由竹筴鱼占优势的表层鱼类群落, 群落 II、III 的主要组间分歧种为竹筴鱼, 贡献度分别为 23.28% 和 23.87%; 11月群落 I 为由丝背细鳞鲷和细刺鱼占优势的岩礁鱼类群落, 群落 II、III 的主要组间分歧种分别为褐菖鲈和丝背细鳞鲷, 贡献度为 20.96% 和 19.87% (表5)。2 个月的群落 II 均为复合群落, 但存在明显差异, 10月岩礁站点和贻贝养殖区表层站点为一群组, 11月岩礁站点和贻贝养殖生境底层站点为一群组, 差异原因可能是 10月黄姑鱼和皮氏叫姑鱼(贡献率共达到 64.47%) 仅在贻贝养殖生境底层采集到, 其中黄姑鱼底层出现率为 100%, 且在岩礁生境占据优势地位的底层鱼类褐菖鲈和斑头六线鱼以及近底层鱼类中国花鲈阶段性出现在 10月贻贝养殖生境的表层; 11月随着水温下降, 大量中上层鱼类季节性洄游到外海, 土著种褐菖鲈成为岩礁生境和贻贝养殖生境底层组群的主导种, 贡献度为 69.9%, 12月复合群落 II 与 11月结构相似, 其中褐菖鲈贡献度达到 69.35% (表4)。

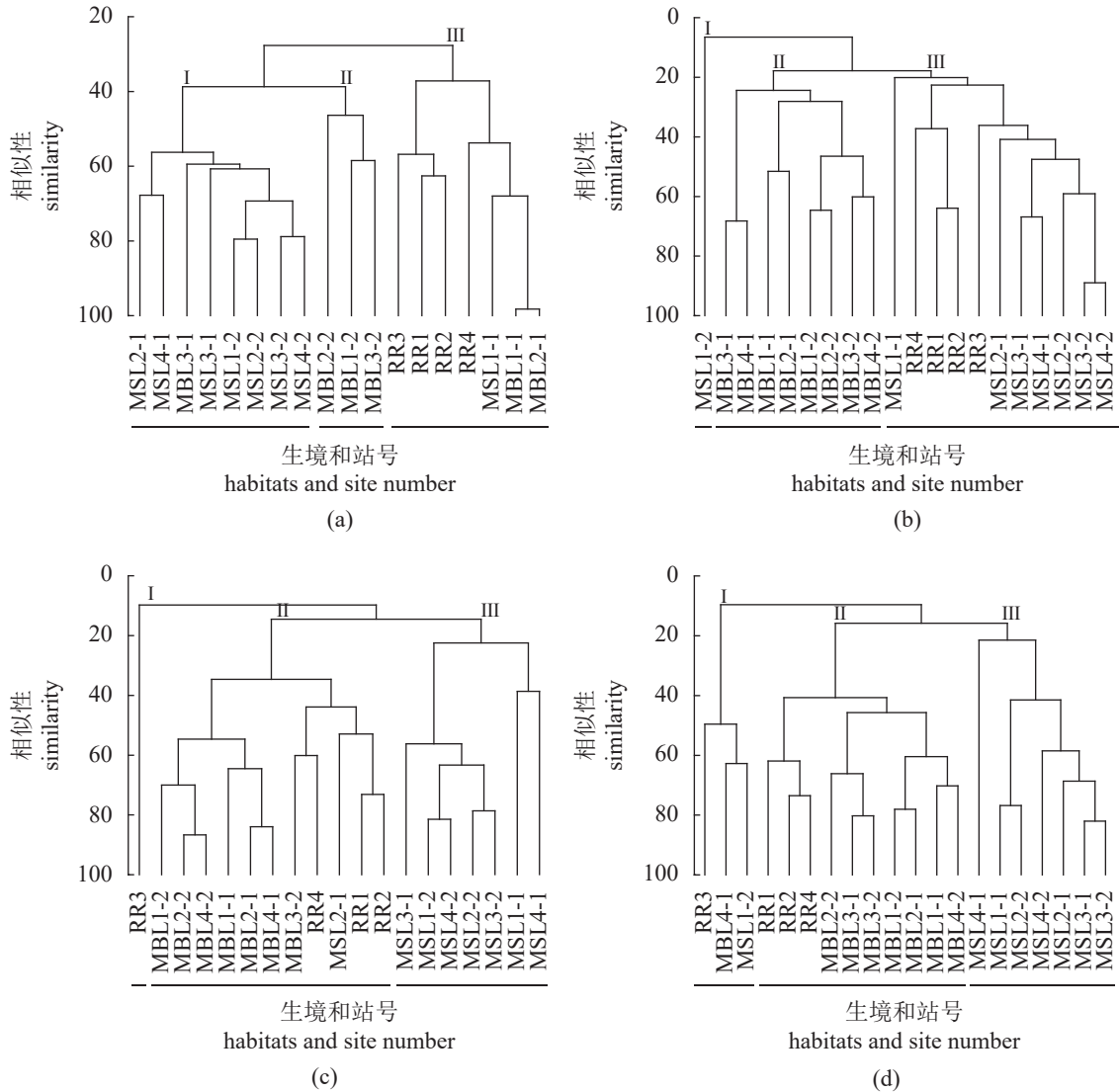


图3 筏式养殖海域两种生境不同月份鱼类群落聚类图

(a) 9月, (b) 10月, (c) 11月, (d) 12月, 下同。MBL1-1. 贻贝养殖生境底层区 L1-1 站点, MSL1-1. 贻贝养殖生境表层区 L1-1 站点, RR1. 岩礁生境 R1 站点, 其他站点同。

Fig. 3 Clustering of fish communities based on abundance matrix in mussel farming and rocky reef habitats

(a) September, (b) October, (c) November, (d) December, the same below. MBL1-1. L1-1 at bottom level of mussel farming habitat, MSL1-1. L1-1 at surface level of mussel farming habitat, RR1. R1 in reef habitat, the same as other farming habitats.

3 讨论

3.1 从种类组成看东海北部海域海洋牧场的潜在目标种

本研究发现, 贻贝养殖生境对中上层鲑鳕鱼类和鳀科鱼类的诱集效应大于岩礁生境。这与贻贝养殖区的特殊生境结构下形成的庇护功能和饵料场功能紧密相关^[9]。刘书荣等^[33]和崔潇^[34]研究发现, 贻贝养殖筏架上存在大量的附着海藻, 且这些海藻上附着着数量庞大的端足目 (Amphipod) 饵料生物钩虾亚目 (Gammaridea) 和麦秆虫科

(Caprellidae), 大型海藻与表层筏架设施共同形成了能为附着和游泳生物提供阶段性或永久性栖息地和庇护所^[5, 35]。而鱼类往往选择在幼体阶段大量聚集在贻贝养殖区, 在摄食小型饵料生物 (浮游生物和附着生物等) 的同时, 也成为其他捕食者 [中国花鲈和日本鲭 (*Scomber japonicus*) 等] 的优良饵料, 因此提供了养护高营养级目标鱼类的基本条件^[36], 从而为海洋牧场目标种的形成打下重要饵料基础。

另一方面, 从不同水层的优势鱼类组成来看, 贻贝养殖生境的养护对象更为多样化, 从而发挥

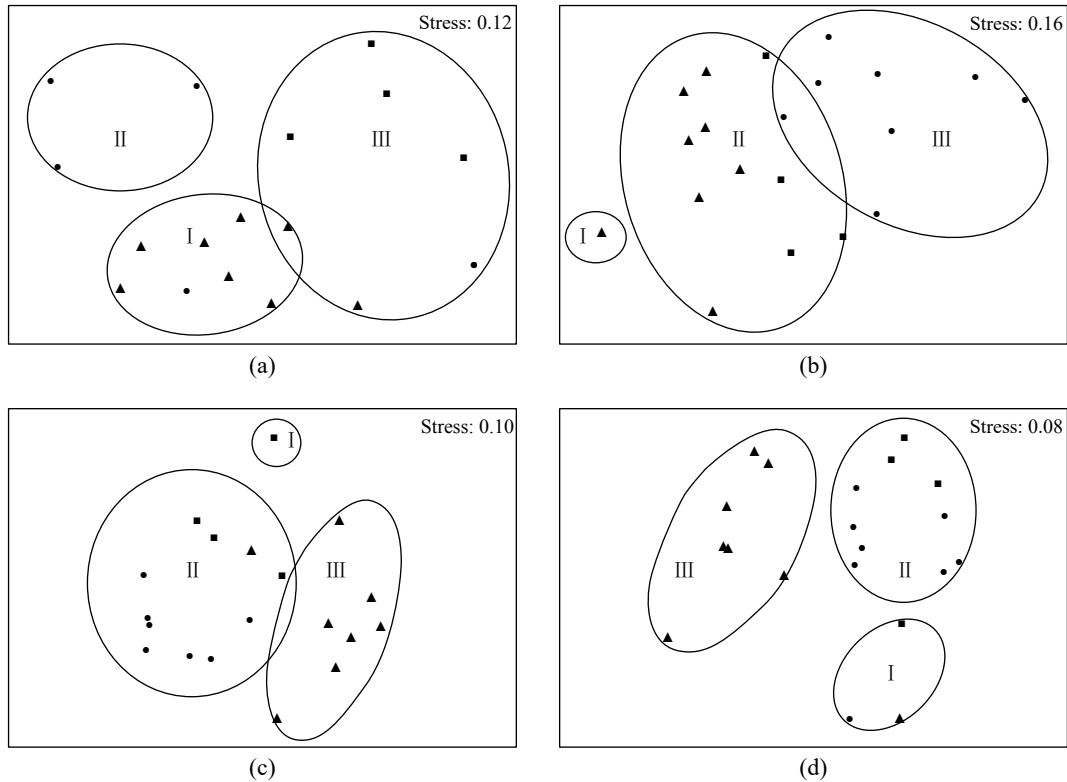


图4 筏式养殖海域不同月份鱼类群落 nMDS 排序图

▲. 贻贝养殖生境表层区站点, ●. 贻贝养殖生境底层区站点, ■. 岩礁生境站点。

Fig. 4 Analysis of nMDS on fish community in mussel farming and rocky reef habitat

▲. site of surface level of mussel farming habitat, ●. site of mussel farming habitat bottom level, ■. site of reef habitats.

出全水层的渔业资源立体养护效果。研究发现, 表层的鳙、中层的中国花鲈、近底层的黄姑鱼和底层的恋礁鱼类褐菖鲉等共同成为贻贝养殖生境的优势鱼类。有研究表明, 黄姑鱼、鳙和中国花鲈等是珠江口海域海洋牧场的关键功能种^[36], 而这些物种在东海岛礁海域的资源调查中亦十分常见且具资源优势^[32, 37-38], 因此这些鱼类亦可能成为东海北部区域最适宜的海洋牧场目标种。筏式贻贝养殖生境作为一种典型人工生境, 不仅表层的主体结构对水体空间异质性和流速产生影响^[6], 养殖区底层的大量物理结构(绳索和锚块)的引入也改变了生物的栖息地特征, 影响着底栖生物群落^[39-40], 且贻贝养殖生境对一些具有岩礁特征的小型底层鱼类具有养护作用^[5], 这些人工构件的引入在养殖区形成了与天然岩礁生境截然不同的生境结构, 发挥了全水层的协同影响力。钟佳明^[41]发现, 褐菖鲉在幼鱼时期会阶段性利用筏架生境, 到一定阶段便补充到近岸的岩礁生境局域种群。王凯等^[42]通过对马鞭列岛海洋牧场区人工鱼礁等处的褐菖鲉进行摄食习性的研究, 发现海洋牧场

建设后褐菖鲉的饵料生物多样性增加, 所以褐菖鲉可成为东海北部海底融合式海洋牧场最重要的目标种之一。黄姑鱼在本研究中仅出现在贻贝养殖生境底层区, 但是王凯等^[43]通过研究该海域岩礁生境的6种鱼类食物竞争关系, 发现黄姑鱼是引起该生境中主要鱼类食物竞争的关键鱼种。汪振华等^[44]对该海域岩礁生境进行的月度调查发现, 贻贝养殖区周边的岩礁生境发挥着黑鲷(*Acanthopagrus schlegelii*)及黄姑鱼等鱼类的育幼所功能, 本研究调查期间并未在岩礁生境采集到上述鱼类, 但在贻贝养殖生境采集到较多黄姑鱼样本(体长范围174~325 mm, 大部分为幼体), 可见该生境已经发挥了针对黄姑鱼种群的育幼所和育肥所功能。研究期间观察发现, 贻贝养殖区存在频繁的钓捕、地笼和浮刺网等个体渔业活动, 其钓捕主要渔获物为黄姑鱼和中国花鲈, 浮刺网主要捕捞对象为鳙。本研究中国花鲈在贻贝养殖区表层出现率(43.75%)要明显高于贻贝养殖区底层(15.63%)和岩礁生境(31.25%)。趋礁性鱼类中国花鲈更频繁地出现在贻贝养殖生境的表层水体,

表 4 贻贝养殖生境和岩礁生境中鱼类群落组内主要贡献种及贡献率

Tab. 4 Major contributing species and contribution rates within fish community groups in mussel culture and rocky reef habitats

月份 month	群落 I community I			群落 II community II			群落 III community III		
	种类 species	贡献率/% contribution	Av. Sim/%	种类 species	贡献率/% contribution	Av. Sim/%	种类 species	贡献率/% contribution	Av. Sim/%
2020-09	赤鼻棱鯧	36.55	61.38	赤鼻棱鯧	67.47	50.41	丝背细鳞鲷	37.63	48.46
	蓝圆鲹	33.89		青鳞小沙丁鱼	18.64		褐菖鲉	36.82	
	竹筴鱼	12.41		镰鲷	13.88		细刺鱼	8.99	
	褐菖鲉	11.47					日本鲷	7.10	
2020-10	—	—	—	黄姑鱼	44.38	33.86	赤鼻棱鯧	41.39	32.62
				皮氏叫姑鱼	20.09		褐菖鲉	15.96	
				褐菖鲉	6.06		中国花鲈	13.45	
				赤鼻棱鯧	11.47		丝背细鳞鲷	10.26	
2020-11	—	—	—	褐菖鲉	69.90	44.97	斑头六线鱼	8.06	
				黄姑鱼	12.87		竹筴鱼	35.90	42.93
				赤鼻棱鯧	8.08		斑头六线鱼	31.44	
							赤鼻棱鯧	18.75	
2020-12	黄鲫	100	53.96	褐菖鲉	69.35	48.96	蓝圆鲹	7.52	
				中国花鲈	10.43		中国花鲈	57.69	44.38
				斑头六线鱼	9.89		日本鲷	22.86	
							鳊	16.67	

注：“—”表示该群落内站点数少于2，无平均相似性及贡献种；Av. Sim 为 average similarity，平均相似性。

Notes: “—” means than 2 samples in group. Therefore, there is no average similarity and contribution species; “Av. Sim” means average similarity.

表明贻贝养殖生境结构功能(即栖息地功能)对其起到较强的增殖养护作用,故该种类可以成为浮鱼礁系统的重要增殖目标种。此外,贻贝养殖表层区亦频繁采集到鲷,该鱼生长速率快,是我国沿海主要的渔业对象^[45]。海域养殖活动未形成一定规模时,近岸区域以捕捞鲷为主的浮刺网作业仅在冬春季少数月份出现^[4]。如今进入10月就出现以鲷为对象的浮刺网和钓捕作业,其强度随着海水能见度的下降而增加,因此鲷可以成为浮鱼礁系统构建的又一潜在目标种。

为了更有效地发挥对潜在目标种的养护作用,海洋牧场设计过程中还需要结合目标鱼类的生活习性进行环境丰容分析和生境结构的差异化设计。

3.2 从鱼类多样性和相似性看生境结构差异

本研究显示,贻贝养殖生境的鱼类多样性总体优于岩礁生境,但差异不显著。可见贻贝养殖生境对局部海域鱼类多样性具有一定的维持和提升作用,这一方面与贻贝养殖区复杂的表底层栖息结构有关(空间异质性高),另一方面与其饵料条件有关^[9]。韩旭东等^[46]在该研究区域的岛礁海域生境和开阔水域鱼类群落格局差异对比发现,

岛礁海域生境类型复杂(包括有大规模贻贝养殖活动),空间异质性高,鱼类幼体比例高且岩礁性鱼类种类多,生态功能侧重于育幼场,开阔水域的成鱼比例较大,更侧重于成鱼栖息。贻贝养殖区附着海藻的发生量极高^[11],且这些海藻上附生了数量庞大的端足目饵料生物^[34]。结合本研究前期对鱼类胃含物的分析发现,贻贝养殖区渔获胃含物种类占比中,端足目的食物占比明显高于其他种类,而岩礁生境鱼类胃含物分析中此现象不常见。

贻贝养殖区内部及其与岩礁生境间的种类组成相似性皆处于较低水平,即中等不相似或极不相似。可见无论贻贝养殖生境的表底层还是它们与岩礁生境之间,在吸引并形成的鱼类群聚方面都有较大差异。一方面,由于研究区域同期的温度、盐度、溶解氧等环境因子非常接近,这显然与3种环境中的栖息地结构和水动力环境等有着更大的关系^[47]。筏式贻贝养殖生境表层铺设规模庞大的浮球和浮绳,贻贝串系挂在浮绳上,位于水面以下3~5 m处^[3]。这些浮式结构吸引了中上层鱼类,也为幼鱼提供了栖息庇护所^[48],例如在新西兰的贻贝养殖场经常发现中上层鱼类黄尾鲷(*Seriola lalandi*)活跃在贻贝养殖结构周围^[35]。Plew

表 5 贻贝养殖生境和岩礁生境中鱼类群落组间主要分歧种及贡献率

Tab. 5 Main divergent species and their contribution percentage for fish communities in mussel farming and rock reef habitats

月份 month	群落 I, II community I, II			群落 I, III community I, III			群落 II, III community II, III		
	种类 species	贡献率/% contribution	Av. Diss/%	种类 species	贡献率/% contribution	Av. Diss/%	种类 species	贡献率/% contribution	Av. Diss/%
2020-09	蓝圆鲹	22.06	61.28	丝背细鳞鲷	14.80	68.18	丝背细鳞鲷	14.98	83.34
	青鳞小沙丁鱼	13.82		蓝圆鲹	14.42		赤鼻棱鯷	14.92	
	褐菖鲉	11.60		赤鼻棱鯷	13.76		青鳞小沙丁鱼	10.51	
	镰鲳	10.77		细刺鱼	8.77		褐菖鲉	10.38	
	竹筴鱼	10.30		竹筴鱼	8.65		细刺鱼	8.32	
	鲹	6.56		日本鲭	7.69		镰鲳	7.99	
	日本鲭	5.01		褐菖鲉	7.32		日本鲭	7.15	
2020-10	竹筴鱼	23.28	94.03	竹筴鱼	23.87	93.13	黄姑鱼	12.49	82.22
	黄姑鱼	16.75		赤鼻棱鯷	17.35		赤鼻棱鯷	10.61	
	皮氏叫姑鱼	10.45		中国花鲈	9.26		皮氏叫姑鱼	8.19	
	褐菖鲉	9.34		褐菖鲉	8.93		褐菖鲉	7.99	
	赤鼻棱鯷	6.12		丝背细鳞鲷	8.42		中国花鲈	6.35	
	宽体舌鲷	5.76		斑头六线鱼	6.37		丝背细鳞鲷	6.31	
	六指马鲛	5.67							
2020-11	褐菖鲉	20.96	87.18	丝背细鳞鲷	19.87	95.07	褐菖鲉	20.79	85.51
	丝背细鳞鲷	18.86		褐牙鲷	14.35		竹筴鱼	13.51	
	细刺鱼	14.67		细刺鱼	14.35		斑头六线鱼	12.59	
	褐牙鲷	14.64		竹筴鱼	13.56		赤鼻棱鯷	9.58	
	黄姑鱼	9.23		斑头六线鱼	12.48		黄姑鱼	9.16	
	赤鼻棱鯷	6.83		赤鼻棱鯷	9.38		蓝圆鲹	6.74	
				蓝圆鲹	6.27		鲷	6.73	
2020-12	黄鲫	25.71	85.26	黄鲫	28.64	97.80	褐菖鲉	22.89	84.19
	褐菖鲉	19.70		中国花鲈	20.64		中国花鲈	13.66	
	中国花鲈	9.41		日本鲷	13.92		日本鲷	12.96	
	斑头六线鱼	9.06		鲷	10.95		鲷	10.39	
	龙头鱼	8.09		龙头鱼	9.00		斑头六线鱼	8.75	
	大黄鱼	7.03		褐菖鲉	6.84		短吻红舌鲷	6.25	
	短吻红舌鲷	6.51		大黄鱼	5.12		赤鼻棱鯷	5.27	
	黄姑鱼	5.12							

注: Av. Diss 表示平均差异性。

Notes: "Av. Diss" means average dissimilarity.

等^[7]研究发现, 新西兰贻贝养殖场的海流速度降低 36%~63%。Lin 等^[6]也在本研究区域发现贻贝养殖场表层的海流速度要比贻贝养殖场外降低了 70%, 底层降低了 45%。贻贝养殖生境表层浮筏式结构在海洋上层具有阻流效应, 水流减缓也可能是一部分鱼类被这种特殊流场环境所吸引过去的原因。另一方面, 枸杞岛贻贝养殖区底层存在多种底质类型, 包括软泥、礁石和因倒排而沉底

的锚绳和贝壳等, 对某些底栖生物而言, 在养殖场内部和下方的环境可能比其他天然生境更具吸引力^[35], 从贻贝养殖场自然沉降的碎屑或在收获期间脱落的贻贝会成为底栖生物的饵料, 鱼类、甲壳类和腹足类等生物与附近其他生境相比有更高的出现率^[49-50], Gibbs^[35] 在新西兰发现底栖拟鲈属鱼类 (*Parapercis colias*) 与贻贝养殖活动之间可能存在相互作用。Colla 等^[20] 也发现, 意大利一种

地中海石首科鱼类 (*Sciaena umbra*) 的数量在贻贝养殖区内部要大于同海域贻贝场外, 且贻贝场内不同底质类型之间的差异也很明显, 硬相底质 (人工构造物) 要比软相底质的数量多。因此贻贝养殖区的特殊生境结构对不同生态类型的鱼类皆有一定的养护作用。这些人工构件的引入使之在整个水层上对鱼类产生影响。此外, 研究表明水深亦会影响鱼类的分布, 进而影响鱼类群落结构的差异^[51], 但本研究区域尺度较小, 水深的差异可能并非主导因素^[44], 考虑到样本梯度性不够, 将来的研究中将通过设置更大的水深梯度探讨鱼类多样性和水深因子的关系。

综上所述, 不同栖息地结构的差异决定了贻贝养殖表底层和岩礁生境在养护和维持鱼类多样性的功能上无法简单地相互替代, 但有可能存在功能增益和互补作用, 该作用为东海海域海洋牧场修复补强、高效拓展岩相生境的生态功能提供了新思路^[52]。

3.3 从群落组成差异看生境的互补功能

各时间研究区域的鱼类群落皆可划分为 3 种类型, 并取决于不同生态类型的优势鱼类对贻贝养殖表底层区和岩礁区的选择利用方式和强度。一些月份近岸侧表底层的鱼类群落差异并没有外侧明显, 显示出更强的趋同性, 这一方面应是岩礁生境鱼类群落的自然延伸, 另一方面也与贻贝养殖表底层功能的融合有关。Morrisey 等^[5]通过调查, 发现新西兰贻贝养殖区内鱼类群落是由当地周边栖息地特有的物种主导的, 周边生境中的优势物种或多或少地出现在贻贝养殖生境中。贻贝养殖海域所塑造出来的生物物理环境通过增加不同水体中的空间异质性, 使鱼类组成和分布发生一定的变化^[4]。本研究显示, 贻贝养殖海域及其周边近岸岩礁区域鱼类的群落结构月度变化显著。各组群的典型种亦为各月份中不同生境中的优势种群, 因此群落结构的差异主要由各群组种类组成不同及主要优势种数量的相对变化造成的^[53]。但通过各月份的组间相异性分析发现, 无论在贻贝养殖生境的表层区、底层区还是岩礁生境, 皆不受某一两种鱼类所主导。整体而言, 筏式养殖海域鱼类群落特征的月度变化由 9 月的 MS、MB 和 RR 等差异相对显著的群落结构特征到 10 月 RR 和 MS 群落结构趋同特征再转变到 11 和 12 月 RR 和 MB 群落结构的趋同特征。可见不

同月份中贻贝养殖表底层功能以及周边岩礁生境在鱼类群落特征中都已经展现出了一定的功能互融性。

恋礁鱼类斑头六线鱼和褐菖鲉成为贻贝养殖生境的常见种乃至优势种。这显然是其适宜栖息地的拓展, 但这种拓展行为是其特殊生活史的需要还是偶然行为, 依然需要深入研究。钟佳明^[41]通过对岩礁生境和贻贝养殖生境中褐菖鲉的耳石纹路以及体长等生物学信息大致确定褐菖鲉幼鱼阶段在贻贝养殖生境栖息时间为 4—7 月, 且推测一部分幼鱼早期生活在贻贝养殖生境中, 到一定阶段回到岩礁生境。从调查所得的鱼类生物学信息可以看出, 斑头六线鱼存在相当数量的繁殖个体 (平均性腺等级 3.36) 集中选择贻贝养殖表层设施的行为, 而褐菖鲉利用表层设施的绝大部分为幼鱼或尚未完成首次产卵的个体, 可见生态类型相似的鱼类在利用贻贝养殖生境时所选择的生活史阶段有明显的差异, 因此在选择增殖目标种时更应注重各生境对不同鱼类生活史阶段的养护效果, 从而更精准地为资源增殖和养护服务^[54]。

自然环境下岩礁生境的面积有限, 对恋礁鱼类而言, 任何能起到躲避或者获取充足饵料的环境都可能激发其主动选择的行为^[55], 因此使鱼类特定生活史阶段的生理需求得到满足的任何措施都可以起到种群的增殖养护作用, 而贻贝养殖生境恰恰具备这些功能, 这对设计海洋牧场人工生境, 更好地发挥其资源增殖和养护功效具有直接的指导意义^[54]。

4 结论和展望

基于以上结果, 可得出以下结论: ① 贻贝养殖生境可为多种鱼类提供阶段性或永久性的索饵、栖息和庇护场所, 其中褐菖鲉、黄姑鱼、鲷和中国花鲈可以成为东海北部区域表底融合布局式海洋牧场中较为适宜的潜在目标种; ② 贻贝养殖生境与近岸岩礁生境间存在明显的栖息地功能互补和增益, 发挥立体增殖东海近岸常见经济鱼类资源和协同养护不同生活史阶段土著鱼类的生态作用。本研究的区域有限, 无法覆盖洄游性目标种的全生活史空间, 而小尺度的环境数据不足以解释鱼类利用该生境的驱动机制, 故后续的研究将一方面围绕目标种的生活史需求, 扩大研究的空间尺度, 另一方面着重进行微生境的结构及其功

能研究, 通过动态食物关系的构建, 深入揭示浮式鱼礁系统的栖息地功能和资源养护机制。

在水体交换能力差且养殖密度过高的区域, 局部流速的降低会造成海底沉积物的不断累积, 有机物的大量分解使得耗氧增加, 形成底层低氧甚至缺氧区, 致使底层鱼类等无法正常栖息而迁移乃至死亡, 因此浮式鱼礁系统应该选择在水体交换能力较好的开阔水域构建, 不宜选择内湾、泻湖等区域。

本研究得到了当地渔民卓小平的大力支持, 上海海洋大学程晓鹏、张健和宋全健在样品采集过程中予以了积极协助, 邹沁东、陈怡卉、陈丽丽、林沅、朱林青、边文华、孙明波和周怡等在室内实验环节做了大量工作, 在此一并致谢!

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 杨红生, 霍达, 许强. 现代海洋牧场建设之我见[J]. *海洋与湖沼*, 2016, 47(6): 1069-1074.
Yang H S, Huo D, Xu Q. Views on modern marine ranching[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2016, 47(6): 1069-1074 (in Chinese).
- [2] 章守宇, 周曦杰, 王凯, 等. 蓝色增长背景下的海洋生物生态城市化设想与海洋牧场建设关键技术研究综述[J]. *水产学报*, 2019, 43(1): 81-96.
Zhang S Y, Zhou X J, Wang K, et al. Review of marine livestock ecological urbanization hypothesis and marine ranching construction key-technology against blue growth background[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(1): 81-96 (in Chinese).
- [3] 丁刚, 吴海一, 郭萍萍, 等. 我国海上筏式养殖模式的演变与发展趋势[J]. *中国渔业经济*, 2013, 31(1): 164-169.
Ding G, Wu H Y, Guo P P, et al. Evolution and development trend of marine raft cultivation model in China[J]. *Chinese Fisheries Economics*, 2013, 31(1): 164-169 (in Chinese).
- [4] 汪振华, 梁金玲, 章守宇. 贻贝养殖海域表底层的鱼类组成比较[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(3): 753-759.
Wang Z H, Liang J L, Zhang S Y. Comparison of pelagic and benthic fish assemblages in mussel farming habitat[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(3): 753-759 (in Chinese).
- [5] Morrisey D J, Cole R G, Davey N K, et al. Abundance and diversity of fish on mussel farms in New Zealand[J]. *Aquaculture*, 2006, 252(2-4): 277-288.
- [6] Lin J, Li C Y, Zhang S Y. Hydrodynamic effect of a large offshore mussel suspended aquaculture farm[J]. *Aquaculture*, 2016, 451: 147-155.
- [7] Plew D R, Stevens C L, Spigel R H, et al. Hydrodynamic implications of large offshore mussel farms[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2005, 30(1): 95-108.
- [8] 汪振华, 王凯, 赵静, 等. 贻贝养殖区底层鱼类群落结构特征分析[J]. *海洋科学*, 2015, 39(6): 21-31.
Wang Z H, Wang K, Zhao J, et al. Study of benthic fish community structure in mussel farming habitat of Ma'an Archipelago[J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(6): 21-31 (in Chinese).
- [9] Shumway S E, Davis C, Downey R, et al. Guest editorial shellfish aquaculture — in praise of sustainable economies and environments[J]. *World Aquaculture*, 2003, 34(4): 15-18.
- [10] 刘媛媛. 枸杞岛贻贝养殖区生态效应及修复策略研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
Liu Y Y. Study on the ecological effect and ecological restoration strategies of *Mytilus edulis* filter-feeding in Gouqi Island[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016 (in Chinese).
- [11] 章守宇, 崔潇, 汪振华, 等. 枸杞岛贻贝养殖筏架附着海藻的群落结构[J]. *水产学报*, 2021, 45(5): 726-739.
Zhang S Y, Cui X, Wang Z H, et al. Community structure of epiphytic macroalgae on mussel culture rafts in Gouqi Island[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021, 45(5): 726-739 (in Chinese).
- [12] Ogilvie S C, Ross A H, Schiel D R. Phytoplankton biomass associated with mussel farms in Beatrix Bay, New Zealand[J]. *Aquaculture*, 2000, 181(1-2): 71-80.
- [13] Trottet A, Roy S, Taminieux E, et al. Impact of suspended mussels (*Mytilus edulis* L.) on plankton communities in a Magdalen Islands lagoon (Québec, Canada): a mesocosm approach[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2008, 365(2): 103-115.

- [14] Lam-Hoai T, Rougier C, Lasserre G. Tintinnids and rotifers in a northern Mediterranean coastal lagoon. Structural diversity and function through biomass estimations[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1997, 152(1-3): 13-25.
- [15] Lam-Hoai T, Rougier C. Zooplankton assemblages and biomass during a 4-period survey in a northern Mediterranean coastal lagoon[J]. *Water Research*, 2001, 35(1): 271-283.
- [16] Christensen P B, Glud R N, Dalsgaard T, *et al.* Impacts of longline mussel farming on oxygen and nitrogen dynamics and biological communities of coastal sediments[J]. *Aquaculture*, 2003, 218(1-4): 567-588.
- [17] da Costa K G, Nalesso R C. Effects of mussel farming on macrobenthic community structure in Southeastern Brazil[J]. *Aquaculture*, 2006, 258(1-4): 655-663.
- [18] Wilding T A, Nickell T D. Changes in benthos associated with mussel (*Mytilus edulis* L.) farms on the west-coast of Scotland[J]. *PLoS One*, 2013, 8(7): e68313.
- [19] 汪振华, 钟佳明, 章守宇, 等. 褐菖鲉幼鱼对贻贝养殖生境的利用规律初探[J]. *水产学报*, 2019, 43(9): 1900-1913.
- Wang Z H, Zhong J M, Zhang S Y, *et al.* Habitat use of juvenile rockfish (*Sebastes marmoratus*) in mussel farming waters: a preliminary study[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(9): 1900-1913 (in Chinese).
- [20] Colla S, Pranovi F, Fiorin R, *et al.* Using passive acoustics to assess habitat selection by the brown meagre *Sciaenops ocellatus* in a northern Adriatic Sea mussel farm[J]. *Journal of Fish Biology*, 2018, 92(5): 1627-1634.
- [21] Clynick B G, McKindsey C W, Archambault P. Distribution and productivity of fish and macroinvertebrates in mussel aquaculture sites in the Magdalen islands (Québec, Canada)[J]. *Aquaculture*, 2008, 283(1-4): 203-210.
- [22] 江涛, 朱焯, 崔铭超, 等. 海上养殖设施与人工鱼礁融合布局流场分析[J]. *渔业现代化*, 2019, 46(1): 27-34.
- Jiang T, Zhu Y, Cui M C, *et al.* Flow field analysis on fusion layout of marine culture facilities and artificial reef[J]. *Fishery Modernization*, 2019, 46(1): 27-34 (in Chinese).
- [23] 庄平, 王幼槐, 李圣法, 等. 长江口鱼类 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2006.
- Zhuang P, Wang Y H, Li S F, *et al.* Fishes of the Yangtze estuary[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2006 (in Chinese).
- [24] 伍汉霖, 钟俊生. 中国海洋及河口鱼类系统检索 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- Wu H L, Zhong J S. Key to marine and estuarial fishes of China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2021 (in Chinese).
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋调查规范 第 6 部分, 海洋生物调查: GB/T 12763.6-2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 89-97.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. Specifications for oceanographic survey—Part 6, Marine biological survey: GB/T 12763.6-2007 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 89-97 (in Chinese).
- [26] 陈大刚, 张美昭. 中国海洋鱼类 [M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2015.
- Chen D G, Zhang M Z. Marine fishes of China[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2015 (in Chinese).
- [27] 汪振华, 章守宇, 陈清满, 等. 马鞍列岛岩礁生境鱼类群落生态学. I. 种类组成和多样性[J]. *生物多样性*, 2012, 20(1): 41-50.
- Wang Z H, Zhang S Y, Chen Q M, *et al.* Fish community ecology in rocky reef habitat of Ma'an Archipelago. I. Species composition and diversity[J]. *Biodiversity Science*, 2012, 20(1): 41-50 (in Chinese).
- [28] Holbrook S J, Schmitt R J. Resource overlap, prey dynamics, and the strength of competition[J]. *Ecology*, 1989, 70(6): 1943-1953.
- [29] Wilhm J L. Use of biomass units in Shannon's formula[J]. *Ecology*, 1968, 49(1): 153-156.
- [30] Pielou E C. Species-diversity and pattern-diversity in the study of ecological succession[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1966, 10(2): 370-383.
- [31] Margalef R. Perspectives in ecological theory[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1968: 111.
- [32] 汪振华, 章守宇, 王凯. 三横山鱼礁生境鱼类和大型无

- 脊椎动物群落特征[J]. 生态学报, 2010, 30(8): 2026-2035.
- Wang Z H, Zhang S Y, Wang K. Fish and macroinvertebrates community structure in artificial habitat around Sanheng Isle, Shengsi, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(8): 2026-2035 (in Chinese).
- [33] 刘书荣, 周曦杰, 章守宇, 等. 贻贝筏式养殖区附生大型海藻与两种附着端足目的关系[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(9): 2737-2744.
- Liu S R, Zhou X J, Zhang S Y, *et al.* Relationship between epiphytic seaweeds and two seaweed-associated amphipods in mussel raft culture area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(9): 2737-2744 (in Chinese).
- [34] 崔潇. 两类端足目生物对浮筏海藻的选择性研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.
- Cui X. Choices of floating raft macroalgae by two amphipods species[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020 (in Chinese).
- [35] Gibbs M T. Interactions between bivalve shellfish farms and fishery resources[J]. *Aquaculture*, 2004, 240(1-4): 267-296.
- [36] 周卫国, 丁德文, 索安宁, 等. 珠江口海洋牧场渔业资源关键功能群的遴选方法[J]. *水产学报*, 2021, 45(3): 433-443.
- Zhou W G, Ding D W, Suo A N, *et al.* Key functional groups selection in marine ranching fishery resources from the Pearl River estuary[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021, 45(3): 433-443 (in Chinese).
- [37] 梁君, 王伟定, 虞宝存, 等. 中街山列岛海洋保护区岛礁生境鱼类资源及群落多样性季节变化[J]. *海洋与湖沼*, 2014, 45(5): 979-989.
- Liang J, Wang W D, Yu B C, *et al.* Seasonal variations of fish resources and community diversity of reef habitat in marine protected area of Zhongjieshan Islands[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2014, 45(5): 979-989 (in Chinese).
- [38] 汪洋, 吴常文. 中街山列岛岩礁海域鱼类群落多样性研究 [J]. *海洋与湖沼*, 2015, 46(4): 776-785.
- Wang Y, Wu C W. Fish community diversities in reef waters of Zhongjieshan Islands[D]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2015, 46(4): 776-785 (in Chinese).
- [39] Drouin A, Archambault P, Clynick B, *et al.* Influence of mussel aquaculture on the distribution of vagile benthic macrofauna in îles de la Madeleine, eastern Canada[J]. *Aquaculture Environment Interactions*, 2015, 6(2): 175-183.
- [40] McKindsey C W, Archambault P, Callier M D, *et al.* Influence of suspended and off-bottom mussel culture on the sea bottom and benthic habitats: a review[J]. *Canadian Journal of Zoology*, 2011, 89(7): 622-646.
- [41] 钟佳明. 贻贝养殖生境特征及其对褐菖鲉幼鱼生长的影响 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
- Zhong J M. The characteristics of mussel farming habitat and its effect on the growth of juvenile *Sebastes marmoratus*[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019 (in Chinese).
- [42] 王凯, 李朝文, 汪振华, 等. 马鞍列岛海洋牧场褐菖鲉的摄食习性[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(7): 2321-2326.
- Wang K, Li C W, Wang Z H, *et al.* Feeding habits of the marbled rockfish *Sebastes marmoratus* in the marine ranching off Ma'an Archipelago, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(7): 2321-2326 (in Chinese).
- [43] 王凯, 章守宇, 汪振华, 等. 枸杞岛岩礁生境主要鱼类的食物组成及食物竞争[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(2): 536-544.
- Wang K, Zhang S Y, Wang Z H, *et al.* Dietary composition and food competition of six main fish species in rocky reef habitat off Gouqi Island[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(2): 536-544 (in Chinese).
- [44] 汪振华, 赵静, 王凯, 等. 马鞍列岛岩礁生境鱼类群落结构时空格局[J]. *生态学报*, 2013, 33(19): 6218-6226.
- Wang Z H, Zhao J, Wang K, *et al.* Fish community ecology in rocky reef habitat of Ma'an Archipelago II. Spatio-temporal patterns of community structure[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(19): 6218-6226 (in Chinese).
- [45] 夏蓉. 鲷形目鱼类的分子系统发育关系和历史生物地理学研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2014.
- Xia R. Studies on molecular phylogeny and historical biogeography of mugilid fishes (Teleostei: Mugiliformes)[D]. Shanghai: Fudan University, 2014 (in Chinese).
- [46] 韩旭东, 章守宇, 汪振华, 等. 马鞍列岛及其东部海域

- 鱼类群落格局与环境因子之间的关系[J]. 水产学报, 2019, 43(6): 1483-1497.
- Han X D, Zhang S Y, Wang Z H, *et al.* Fish community structure and its relationship with environmental factors in the Ma'an Archipelago and its eastern waters[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(6): 1483-1497 (in Chinese).
- [47] 汪振华, 王凯, 赵静, 等. 枸杞岛潮下带沙地生境鱼类群落结构和季节变化[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(5): 1332-1342.
- Wang Z H, Wang K, Zhao J, *et al.* Fish community structure and its seasonal change in subtidal sandy beach habitat off southern Gouqi Island[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(5): 1332-1342 (in Chinese).
- [48] Somerfield P J, Supaporn Y, Aryuthaka C. The effects of green mussel *Perna viridis* (L.) (Mollusca: Mytilidae) culture on nematode community structure in the Gulf of Thailand[J]. *The Raffles Bulletin of Zoology*, 2000, 48(2): 263-272.
- [49] Suplicy F M. A review of the multiple benefits of mussel farming[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2020, 12(1): 204-223.
- [50] Callier M D, Byron C J, Bengtson D A, *et al.* Attraction and repulsion of mobile wild organisms to finfish and shellfish aquaculture: a review[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2018, 10(4): 924-949.
- [51] 于南京. 舟山群岛近岸海域鱼类群落结构及生物多样性的年际变化 [D]. 杭州: 浙江海洋大学, 2021.
- Yu N J. The structure and structure of fish communities in the coastal waters of Zhoushan Islands inter-annual changes in biodiversity[D]. Hangzhou: Zhejiang Ocean University, 2021 (in Chinese).
- [52] 杨红生, 章守宇, 张秀梅, 等. 中国现代化海洋牧场建设的战略思考[J]. 水产学报, 2019, 43(4): 1255-1262.
- Yang H S, Zhang S Y, Zhang X M, *et al.* Strategic thinking on the construction of modern marine ranching in China[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(4): 1255-1262 (in Chinese).
- [53] 王小林, 徐宾铎, 纪毓鹏, 等. 海州湾及邻近海域冬季鱼类群落结构及其与环境因子的关系[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(6): 1707-1714.
- Wang X L, Xu B D, Ji Y P, *et al.* Fish community structure and its relationships with environmental factors in Haizhou Bay and adjacent waters of East China in winter[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(6): 1707-1714 (in Chinese).
- [54] 梁振林, 郭战胜, 姜昭阳, 等. “鱼类全生活史”型海洋牧场构建理念与技术[J]. 水产学报, 2020, 44(7): 1211-1222.
- Liang Z L, Guo Z S, Jiang Z Y, *et al.* Construction concept and technology of the marine ranching mode of the whole life history of fishes[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2020, 44(7): 1211-1222 (in Chinese).
- [55] 殷名称. 鱼类生态学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- Yin M C. Fish ecology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995 (in Chinese).

Characteristics of fish assemblage in a mussel farming area in Gouqi Island waters

GAO Weicheng¹, WANG Zhenhua^{1,2*}, ZHANG Shouyu^{1,2*}, LIN Jun^{1,2},
TAN Yiguo¹, LI Xunmeng^{1,2}, CHEN Jianqu¹

(1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Engineering Technology Research Center of Marine Ranching, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The rapid development of marine aquaculture in China, especially that of raft shellfish culture, not only contributes directly to China's economic benefits, but also facilitates fishery resources conservation to a certain extent. Large-scale raft culture, in a sense, has played a role of artificial floating reefs, providing temporary or permanent feeding or sheltering habitats for fish, which coincides with the core idea of marine ranch development based on floating reef systems. Fish assemblages and their community characteristics in raft mussel farming habitats play key roles in understanding functions of floating artificial reef system in marine ranching area. Hence, fish composition and community structure in surface and bottom levels of a mussel farming habitat in Gouqi Island waters and an adjacent rocky reef habitat were analyzed based on data collected by multi-mesh trammel nets from September to December 2020. Index of relative importance (IRI), species diversity indices and non-metric multidimensional scaling (nMDS) analysis were used. A total of 55 fish species belonging to 47 genera in 34 families of 10 orders were collected from two habitats. Among which, 37 species were collected from mussel farming habitat, including 29 species from bottom level and 20 species from surface level; 40 species were collected from rocky habitat. In terms of dominant species composition, *Lateolabrax maculatus* and *Mugil cephalus* were the typical dominant species in the surface level of mussel farming habitat, while *Nibea albiflora* and *Sebastes marmoratus* were the typical dominant species in the bottom level of mussel farming habitat. *S. marmoratus* was also a typical dominant species in the reef habitat. The similarity analysis showed that the similarity in species composition between the surface and bottom level of mussel farming habitat and the reef habitat was below a moderate level of dissimilarity. Diversity analysis showed that the overall diversity of mussel farming habitat was higher than that of rocky reef habitat, but not significantly ($P>0.05$). The multivariate analysis indicated that fish community could be grouped into three types in the two habitats, though it was not strictly consistent with the surface area, bottom area and reef area. Results of ANOSIM suggest that there was significant difference among grouped communities ($P<0.05$). Our study suggests the following: ① the presence of large-scale raft culture facilities in rocky island waters attract many pelagic and demersal fishes, providing additional habitat for dominant rocky fishes, among which *S. marmoratus*, *N. albiflora*, *M. cephalus* and *L. maculatus* could be suitable target species in the marine ranching programs of northern East China Sea; ② mussel farming habitat and nearshore rocky reef habitat have obvious complementary and gain of habitat functions, which play essential roles on protection of common commercial fish populations in the East China Sea and comprehensive conservation of local fish in different life stages. It is hoped that this study may contribute to technology as well as target fish selection in marine ranching programs and the application of artificial habitat construction model carried out in island waters.

Key words: fish; assemblage; mussel farming; floating artificial reef; marine ranching; target species; Gouqi Island

Corresponding authors: WANG Zhenhua. E-mail: zh_wang@shou.edu.cn;

ZHANG Shouyu. E-mail: syzhang@shou.edu.cn

Funding projects: National Key R & D Program of China (2019YFD0901303, 2018YFD0900905); Special Fund for Science and Technology Development of Shanghai Ocean University (A2-2006-20-200212)