海洋学报
Haiyang Xuebao
ISSN 0253-4193
CN 11-2055/P

人工生境和自然生境生物群落的连通性初探

陈涛，李征，路吉坤，伏光辉，张硕，高世科

Preliminary study on connectivity of organism communities in artificial and natural habitats

Chen Tao, Li Zheng, Lu Jikun, Fu Guanghui, Zhang Shuo, Gao Shike

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12284/hyxb2025024

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

河北省祥云湾人工鱼礁区网采浮游植物群落结构的时空变化特征及其与关键环境因子的关系
Temporal and spatial variation characteristics of net-collected phytoplankton community structure and its relationship with key environmental factors in the artificial reef area of Xiangyun Bay, Hebei Province
海洋学报. 2024, 46(9): 52-63 https://doi.org/10.12284/hyxb2024110

人工鱼礁建设对大型底栖动物群落的影响
Effects of artificial reef construction on macrobenthos communities: A case study of four artificial reefs in the Yellow Sea and Bohai Sea
海洋学报. 2024, 46(7): 51-61 https://doi.org/10.12284/hyxb2024084

三沙湾大黄鱼野生和养殖群体的幽门盲囊微生物群落结构比较分析
Comparison of the pyloric caecum microbiota community structure between the wild and farmed *Larimichthys crocea* in Sansha Bay
海洋学报. 2024, 46(1): 77-87 https://doi.org/10.12284/hyxb2024012

海州湾秋季鱼类β多样性组分分析及其与环境因子的关系
β diversity and its components of the fish community in the Haizhou Bay during autumn and the relationships with environmental factors
海洋学报. 2022, 44(2): 46-56 https://doi.org/10.12284/hyxb2022048

平潭岛东北部近岸海域大型污损生物群落结构特征
Community structure of macro-fouling organisms in the northeastern waters of the Pingtan Island, East China Sea
海洋学报. 2020, 42(6): 70-82 https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-4193.2020.06.009

日照岚山港北作业区邻近海域春、秋季浮游动物群落结构研究
Study on the community structure of zooplankton in the sea area near the north operation area in the Lanshan Port of Rizhao Port in spring and autumn
海洋学报. 2022, 44(1): 79-88 https://doi.org/10.12284/hyxb2022022

关注微信公众号，获得更多资讯信息

第 47 卷　第 1 期　　海　洋　学　报　　Vol. 47　No. 1
2025 年 1 月　　Haiyang Xuebao　　January 2025

陈涛, 李征, 路吉坤, 等. 人工生境和自然生境生物群落的连通性初探[J]. 海洋学报, 2025, 47(1): 91–103, doi:10.12284/hyxb2025024
Chen Tao, Li Zheng, Lu Jikun, et al. Preliminary study on connectivity of organism communities in artificial and natural habitats[J]. Haiyang Xuebao, 2025, 47(1): 91–103, doi:10.12284/hyxb2025024

人工生境和自然生境生物群落的连通性初探

陈涛[1]，李征[1]，路吉坤[2]，伏光辉[2]，张硕[1,3*]，高世科[1,4*]

(1. 上海海洋大学 海洋生物资源与管理学院, 上海 201306; 2. 连云港市海洋与渔业发展促进中心, 江苏 连云港 222002; 3. 长江口水生生物资源监测与保护联合实验室, 上海 201306; 4. 自然资源部海洋生态保护与修复重点实验室/福建省海洋生态保护与修复重点实验室, 福建 厦门 361005)

摘要: 为了深入了解近岸海域不同生境间的群落格局及其相互联系, 有必要探究影响人工生境和自然生境物种分布与生态连通性的潜在因素。本研究对江苏海州湾 4 种典型生境——人工鱼礁区（ARA）、紫菜养殖区（NCA）、牡蛎礁区（OCA）、天然海区（NA）的鱼类和无脊椎动物群落开展综合调查。结果显示, 4 种生境的物种丰度存在显著差异（$P<0.05$）, 其中有一些重要物种能够同时存在于多种生境, 也有些特有物种仅存在于一种生境。ARA 中的口虾蛄（*Oratosquilla oratoria*）生物量远高于其他生境, 矛尾虾虎鱼（*Chaeturichthys stigmatias*）体长在 ARA、NCA 和 OCA 均显著大于 NA 的（$P<0.05$）, 这一差异与饵料生物分布密切相关。不同生活习性的鱼类体长分布差异表明, 物种洄游行为在生物分布和生境连通中发挥重要作用。洄游性鱼类小黄鱼（*Larimichthys polyactis*）和青鳞小沙丁鱼（*Sardinella zunasi*）在人工生境内的体长显著大于自然生境的（$P<0.05$）。定栖性鱼类如矛尾虾虎鱼体长在 OCA 显著大于 ARA 和 NCA 的（$P<0.05$）, 而焦氏舌鳎（*Cynoglossus joyneri*）体长在 NCA 显著大于 ARA 和 OCA 的（$P<0.05$）。本研究表明: 人工生境通过提升生境复杂性, 形成有利于海洋生物资源恢复和个体发育的环境条件。饵料生物分布和物种洄游特性与不同生境间的连通性具有潜在的联系。

关键词: 海州湾; 人工鱼礁区; 牡蛎礁区; 紫菜养殖区; 天然海区; 生物群落

中图分类号: Q958　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 0253-4193(2025)01-0091-13

1　引言

在过去的几十年间, 中国沿海地区的海洋生态系统因全球变化、过度开发、陆源污染等多重因素的综合作用, 导致生境面临逐渐退化的危机, 并引发了广泛关注[1–2]。为了缓解生态压力, 人工鱼礁、牡蛎礁、养殖区等人工生境的构建逐渐成为改善渔业生物多样性、丰富渔业资源、提高海洋生态环境质量的有效手段[3–6]。

鱼类通过个体迁徙和日常捕食来交换生物量和能量, 从而连接不同生境。许多沿海海洋鱼类在其生命周期的不同阶段倾向于利用不同类型的生境[7]。鱼礁能吸引鱼类和大型无脊椎动物在此觅食、生长和繁殖, 从而逐渐形成独特的鱼礁生态系统, 其渔获量可提升 10～100 倍, 甚至更多, 显著促进渔业资源增殖[8]。牡蛎礁作为一种特殊的海洋生境, 不仅能够净化水

收稿日期: 2024-05-30; **修订日期:** 2024-12-18。

基金项目: 2022 年度江苏省对市县农业生态保护与资源利用专项—海州湾国家级海洋牧场示范区年度监测及栖息地连通性专题研究项目（XSDCG20230027）; 中国博士后科学基金第 74 批面上资助项目（E-6005-00-0042-39）; 国家资助博士后研究人员计划（GZC20231539）; 自然资源部海洋生态保护与修复重点实验室/福建省海洋生态保护与修复重点实验室开放基金课题（EPR2024007）。

作者简介: 陈涛（1999—）, 男, 浙江省台州市人, 主要研究方向为近海生态环境修复。E-mail: taochen0210@163.com

*** 通信作者:** 张硕, 教授, 主要研究方向为近海生态环境修复。E-mail: s-zhang@shou.edu.cn; 高世科, 博士后, 主要研究方向为近海生态连通性。E-mail: Gshike@163.com

体、提供栖息地，还能增加生物固碳能力[9]。随着牡蛎密度的增加，礁体结构变得更加复杂，进一步加强了对周围生境的影响，特别是在群落的聚集和维持方面[10]。紫菜筏式养殖同样提供了重要的生态系统服务，如生物附着、营养盐循环，甚至海洋固碳[11]，这种紫菜筏式人工生境能容纳多种物种，为鱼类和无脊椎动物提供丰富的食物来源，从而支持生物多样性[12]。

目前，人工生境规划、设计和运行的生态学理论已在沿海地区得到广泛应用，对海域生态系统和环境质量的提升做出了显著贡献[13–16]。人工生境中投放的人造物会直接或间接影响周边环境的水动力、营养盐和沉积物的扩散过程，进而影响投放区及周边的水体和底质环境，以及调节生物的栖息状态和多样性[17–19]，这些过程可能会影响邻近生境的群落结构和生态模式[20–21]。人工生境对邻近生境海洋生态系统和群落结构的具体影响模式，以及人工生境中物种的发育过程及生境利用模式是一个待解决的问题。为了提高人工生境生态评估的准确性和空间规划的合理性，探索人工生境与邻近生境的互通模式变得至关重要[22–23]。

本研究采用多个生境生物群落组间比较的方法，以江苏海州湾为案例，重点研究了 3 种人工生境（人工鱼礁、牡蛎礁、紫菜养殖区）及邻近海域的生物群落结构。其目的是：（1）基于物种丰度，比较和分析这些生境之间生物群落的差异性和相似性；（2）根据物种在各生境之间的体长分布，探讨生境之间是否存在潜在联系。研究旨在为深入理解人工生境的生态效益提供重要借鉴，进一步为中国近岸海域海洋保护区的空间规划和政策制定提供更合理的科学依据。

2 材料和方法

2.1 研究区域

海州湾是一个位于黄海中南部的开阔海湾，面积约为 877 km^2，岸线长 86.81 km，宽 42 km。它地处南北气候过渡带，是黄海海域重要的产卵场、育幼场和索饵场，渔业资源丰富[24]。海州湾海岸主要类型是粉砂淤泥质，其次是基岩质海岸和沙质海岸[25]，气候和水文受大陆影响较大，大部分渔区受沿岸流控制[26]，潮汐属规则半日潮，潮流以旋转流为主，流速为 0.4～0.65 m/s，流向为东北至西南，潮差在 2.69～5.05 m 之间[27]。自 20 世纪 80 年代以来，由于大量的人类活动，海州湾的生态环境和渔业资源受到了一定程度的负面影响，生境出现破碎，生态系统结构遭到破坏[28–29]。当地政府从 2008 年开始发展以人工鱼礁建设为主的海洋牧场，致力于恢复生态和保护生物资源[25, 30]。

2.2 生境类型

海州湾人工鱼礁区（artificial reef area, ARA）投放了一系列人工礁，是海洋保护区重点建设区域[31]；紫菜养殖区（nori culture area, NCA）利用筏式紫菜养殖和贝类的混养模式能够降低海水中氮磷含量，降低赤潮影响[32]；牡蛎礁区（oyster culture area, OCA）的牡蛎礁具有净化水体、提供栖息地、增加生物固碳等重要生态功能，还可以增强生境内部及附近水体和沉积物之间的能量耦合关系，驱动底栖碎屑食物链[33]；天然海区（natural area, NA）拥有相对自然的水质环境，生物多样性丰富，生态链复杂。站点设计参考了 4 个生境的功能与特点（表 1），并结合卫星图像共设置了 16 个采样点（图 1）。

表 1 生境类型及组成特点

Table 1 Habitat types and composition characteristics

生境类型	组成特点
紫菜养殖区	主要使用浮筏装置养殖紫菜
人工鱼礁区	由一系列人工鱼礁(如混凝土立方礁、十字形礁、塔形礁)组成的人工鱼礁区
天然海区	未受明显人为干扰的自然海域
牡蛎礁区	由活体牡蛎、死亡牡蛎的壳及其他礁区生物共同堆积组成的聚集体组成的生态修复区

2.3 样品采集

2023 年春（4 月）、夏（8 月）、秋（10 月）3 季在海州湾人工鱼礁区及其邻近生境选取相同的 12 个站点进行渔业资源和栖息环境综合调查。鱼类和无脊椎动物的采样由单船单囊底拖网（15 m × 4 m × 8 m，网目尺寸：20 mm）完成。渔业资源调查在每个站点进行了约 30 min，船速为 2.4 kn，以尽可能保持各站位拖网拖曳距离相对一致。在 ARA 的底部存在大量礁石，NCA 海表覆盖了大量浮筏，故只能在这些生境周围采样。在对鱼类、蟹类、虾类或其他类群进行粗略

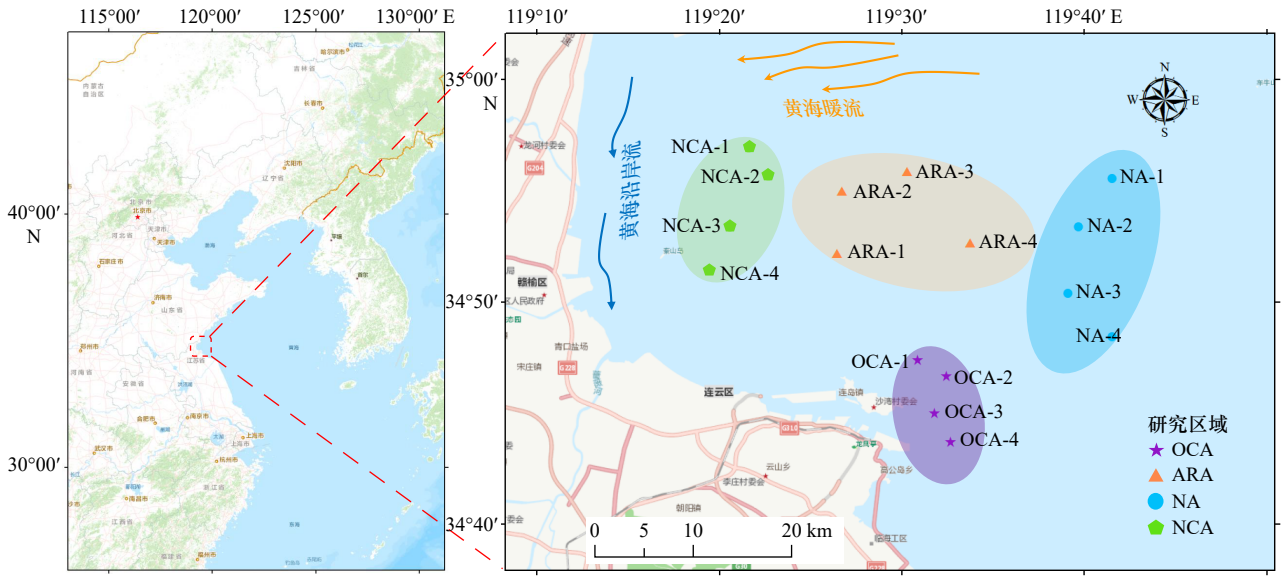

图 1　江苏省海州湾研究区域和采样点

Fig. 1　Study area and sampling point of Haizhou Bay, Jiangsu Province

ARA、NCA、OCA 和 NA 分别代表人工鱼礁区、紫菜养殖区、牡蛎礁区和天然海区

ARA, NCA, OCA and NA represent artificial reef area, nori culture area, oyster culture area and natural area, respectively

鉴定后，将样本装入 100 cm × 150 cm 的 PVC 袋中，用新鲜冰块保存。样品的采集、处理和分析按照《海洋调查规范 第 6 部分：海洋生物调查》(GB/T 12763.6−2007)的有关规定进行。岸上实验室记录了所有样品的基本生物指标(每个样品体质量精确到 0.1 g，体长精确到 0.1 cm)和编号。所有鱼种均已鉴定至最低分类级别(http://www.fishbase.org)。

2.4　不同生境的物种群落分析

计算每种生境的物种丰度及多样性指数，以评估不同生境类型与物种数量之间的联系。

2.4.1　物种优势度及多样性

采用 Pinkas 相对重要性指数(Index of Relative Importance, IRI)分析物种优势度[34]，IRI 的计算式如下：

$$\mathrm{IRI} = (N + W) \times F \times 10^4,$$

式中：N 表示某一物种尾数占所有物种总尾数的百分比，W 表示某一物种体质量占所有物种质量的百分比，F 表示某一物种在调查中出现的站位数占总站位数的百分比。定义 IRI≥1 000，为优势种；1 000 > IRI ≥ 100，为重要种；100 > IRI ≥ 10，为常见种[35]。采用 Shannon 多样性指数(H')[36]、Pielou 均匀度指数(J)[37] 和 Margalef 丰富度(D)[38] 分析物种多样性，计算式如下：

$$H' = -\sum_{i=1}^{S} p_i \ln p_i ,$$

$$J = H' / \ln S ,$$

$$D = (S - 1) / \ln N ,$$

式中：S 为采集样本种类总数，N 为样本总个体数，p_i 为第 i 种物种个体数与总个体数的比值。

2.4.2　群落差异性和相似性

以生境为固定因子，计算不同生境间物种丰度的分布。不同生境间物种丰度的差异采用基于布雷−柯蒂斯距离的置换多元方差分析(PERMANOVA)进行分析，采用 PERMANOVA t 统计量进行事后配对比较，显著性水平为 $P \leqslant 0.05$。然后使用非度量多维尺度分析(NMDS)，将 4 个生境的物种丰度数据可视化，非度量多维排序图的分析结果可以依据胁强系数来衡量[39]。为了评估不同生境间物种丰度的相似性，在 X 轴上对样本进行聚类，在 Y 轴上对布雷−柯蒂斯相似性进行聚类[40]，从而绘制出一张热图。

2.4.3　基于个体大小的物种−生境关联

共有 1 282 个物种被用来描述其在不同生境中的体长分布。选择了最具代表性的 11 种物种：焦氏舌鳎(*Cynoglossus joyneri*, n = 141)、矛尾虾虎鱼(*Chaeturichthys stigmatias*, n = 197)、红狼牙虾虎鱼(*Odontamblyopus rubicundus*, n = 52)、小黄鱼(*Larimichthys polyactis*, n = 160)、赤鼻棱鳀(*Thryssa kammalensis*, n = 94)、青鳞小沙丁鱼(*Sardinella zunasi*, n = 55)、口虾蛄(*Oratosquilla oratoria*, n = 184)、鲜明鼓虾(*Alpheus distinguendus*, n = 78)、日本蟳(*Charybdis japonica*, n = 132)、火枪乌贼(*Loligo beka*, n = 88)、皮氏叫姑鱼(*Johnius belangerii*, n = 101)，根据其体长大小验证物种与生境的关联性。使用各生境类型的体长频率数据绘制方框图，并使用广义线性模型(GLM)检验不

同生境之间的体长差异。

2.5 数据分析工具

调查站位图由 ArcGIS(v.10.3)绘制。PERMANOVA 和 PERMDISP 分析以及 NMDS 和聚类热图的可视化均在 R 软件(版本 4.0.3)中使用 R 软件包“vegan”进行，GLM 使用 R 软件包“mgcv”进行。

3 结果

3.1 物种群落特征

在 4 种生境中，共采集到 14 760 个样本，涵盖 42 科 66 种(图 2)。海州湾人工鱼礁区及其邻近生境的优势种包括矛尾虾虎鱼、赤鼻棱鳀、小黄鱼，其中矛尾虾虎鱼是该海域的绝对优势种，其 IRI 值远高于其他种类(表 2)。*D* 计算结果显示，ARA-4 和 NCA-1 站位物种丰富度处于较高水平。*H′*体现各站位的物种多样性情况，计算结果显示，ARA 的 *H′*均值为 2.03 ± 0.40, NCA 的 *H′*均值为 1.60 ± 0.48, OCA 的 *H′*均值为 1.79 ± 0.10, NA 的 *H′*均值为 1.43 ± 0.70。*J* 计算结果显示，NA-4 和 NCA-2 等 13 个站位的均匀度指数均大于或等于 0.5，而 NCA-4 和 NA-1 等 3 个站位的均匀度指数仅为 0.29～0.44(表 3)，表明许多站位的渔获物多由几个优势种组成，其他物种占比较低。

在 ARA，虾虎鱼科是最主要的科，占 11.3%，以矛尾虾虎鱼为代表；其次是石首鱼科和对虾科，分别占 7.5% 和 5.7%，以皮氏叫姑鱼和中国对虾(*Fenneropenaeus chinensis*)为代表。在 NCA，虾虎鱼科(占 11.8%)和石首鱼科(占 8.8%)占据主导地位，代表种分别是矛尾虾虎鱼和小黄鱼。在 OCA，虾虎鱼科、石首鱼科和对虾科分别占 14.3%、11.9% 和 7.1%，代表种分别为红狼牙虾虎鱼、白姑鱼和周氏新对虾(*Metapenaeus joyneri*)。NA 则以石首鱼科(14.6%)、虾虎鱼科(12.2%)和对虾科(7.3%)为主，代表种分别为小黄鱼、矛尾虾虎鱼和周氏新对虾。在个体数量上，虾蛄科在 ARA 和 NCA 中占主导地位，分别占总量的 26.3% 和 27.0%。ARA 中的虾虎鱼科和梭子蟹科分别占 11.1% 和 13.2%；NCA 中鲱科和梭子蟹科分别占 12.9% 和 12.7%；OCA 主要由梭子蟹科占据，约占 25.4%；而 NA 的主要优势科为鳀科，占总量的 32.6%(图 3)。

3.2 不同生境的物种组合与利用

在 4 种生境中，大多数物种广泛分布，其中 14 个科在所有生境内都有分布，尤其是口虾蛄、矛尾虾虎鱼和火枪乌贼数量最多。然而，也有 17 个科的 19 种物种仅在单一生境中出现。例如，方氏云鳚(*Pholis fangi*)、角木叶鲽(*Pleuronichthys cornutus*)等 9 种仅在 ARA 分布；高眼鲽(*Cleisthenes herzensteini*)和鲻(*Liza haematocheila*)仅分布在 NCA；纹缟虾虎鱼、细纹狮子鱼(*Liparis tanakae*)则是 OCA 的特有种；而刀鲚(*Coilia nasus*)、鲩(*Miichthys miiuy*)等 7 种则仅在 NA 中发现。

4 种生境的物种总丰度差异显著(PERMANOVA; $P = 0.016$, $n = 16$)(图 4)。后验分析表明，NA 与 ARA 的物种丰度存在显著差异($P < 0.05$)(表 4)。基于 NMDS 结果，4 种生境中记录到的鱼获样本组成呈现明显的区域特点，没有重叠。而 OCA 与 NA 的鱼获样本组成虽不重叠，但分布形态相交，显示这两种生境间存在潜在的物种组成联系(图 4)。

聚类结果发现有两组共 37 个物种(图 5Ⅳ和图 5Ⅵ)与 ARA 密切相关，属于多个不同的科，包括焦氏舌鳎、扁玉螺(*Glossaulax didyma*)、曼氏无针乌贼(*Sepiella maindroni*)等。与 OCA 关联密切的有 9 种(图 5Ⅳ)，而与 NA 密切相关的主要有两组，分别为 6 种(图 5Ⅱ)和 5 种(图 5Ⅲ)。只有 5 个物种与 NCA 有密切关联，而星康吉鳗(*Conge myriaster*)是 NCA 比较独特的物种。

即使在同一科中，不同物种也呈现出不同程度的

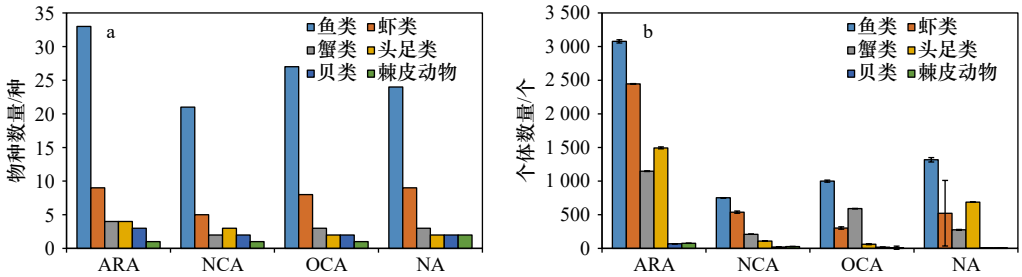

图 2 4 种生境中鱼类、虾类、蟹类、头足类、贝类和棘皮类的种类数量(a)与个体数量(b)

Fig. 2 Number of species (a) and individuals (b) of fish, shrimp, crab, cephalopod, shellfish and echinoderm in the four habitats

误差条表示每组中单个数字的标准误差。下同

Error bars indicate the standard error of individual numbers in each group. Same below

表 2　4 种生境中鱼类优势种和重要种的相对重要性指数

Table 2　Relative importance indices of dominant and important species of fish in four habitats

物种种类	拉丁名	IRI值
矛尾虾虎鱼	*Chaeturichthys stigmatias*	3 191.24
赤鼻棱鳀	*Thryssa kammalensis*	2 270.09
小黄鱼	*Larimichthys polyactis*	1 216.64
斑鰶	*Konosirus punctatus*	889.74
焦氏舌鳎	*Cynoglossus joyneri*	840.05
青鳞小沙丁鱼	*Sardinella zunasi*	606.95
皮氏叫姑鱼	*Johnius belangerii*	552.97
黄鲫	*Setipinna tenuifilis*	487.22
红狼牙虾虎鱼	*Odontamblyopus rubicundus*	455.66
香斜棘鳚	*Repomucenus olidus*	307.18
白姑鱼	*Pennahia argentata*	284.60
条鳎	*Equulites rivulatus*	260.91
银鲳	*Pampus argenteus*	214.79
半滑舌鳎	*Cynoglossus semilaevis*	213.04
鲬	*Platycephalus indicus*	169.42
中华栉孔虾虎鱼	*Ctenotrypauchen chinensis*	165.96

表 3　4 种生境的鱼类生物多样性

Table 3　Fish biodiversity in four habitats

站点	*H'*值	*J*值	*D*值
ARA-1	1.99	0.64	3.19
ARA-2	1.52	0.56	2.11
ARA-3	1.97	0.63	3.23
ARA-4	2.64	0.80	3.88
NCA-1	2.36	0.83	3.29
NCA-2	1.56	0.87	0.95
NCA-3	1.41	0.73	1.12
NCA-4	1.06	0.44	1.86
OCA-1	1.63	0.71	1.88
OCA-2	1.80	0.68	2.15
OCA-3	1.87	0.71	2.35
OCA-4	1.87	0.68	2.82
NA-1	0.69	0.29	1.51
NA-2	0.91	0.40	1.53
NA-3	1.63	0.71	1.93
NA-4	2.49	0.92	2.89

生境分区(图 5)。以石首鱼科为例, 皮氏叫姑鱼和小黄鱼与 ARA 最相关, 白姑鱼和黄姑鱼(*Nibea albiflora*)主要与 OCA 相关, 而鮸和棘头梅童鱼(*Collichthys lucidus*)则最常见于 NA。

3.3　物种体长分布特征

体长分析结果显示(图 6), 小黄鱼和青鳞小沙丁鱼这两种洄游性鱼类, 在 ARA、NCA 和 OCA 这 3 种人工生境内的体长均无显著差异($P > 0.05$), 但都显著大于 NA 的($P < 0.05$)。定栖性鱼类矛尾虾虎鱼体长在 OCA 显著大于 ARA 和 NCA($P < 0.05$), 焦氏舌鳎体长在 NCA 显著大于 ARA 和 OCA 的($P < 0.05$)。赤鼻棱鳀体长在 NCA 显著大于 ARA 和 NA 的($P < 0.05$); 皮氏叫姑鱼体长在 ARA、NCA 和 OCA 均显著大于 NA 的($P < 0.05$), 在 NCA 显著大于 ARA 的($P < 0.05$); 红狼牙虾虎鱼体长在 OCA 显著大于 ARA、NCA 和 NA 的($P < 0.05$); 火枪乌贼体长在 ARA 和 NCA 均显著大于 NA 的($P < 0.05$); 日本蟳体长在 ARA 显著大于 NCA 和 NA 的($P < 0.05$), 在 OCA 显著大于 NCA 的($P < 0.05$); 鲜明鼓虾体长在 ARA、NCA 和 OCA 均显著大于 NA 的($P < 0.05$)。在 NA 内, 除了红狼牙虾虎鱼和日本蟳这两种物种的体长大于 NCA 的, 其余物种的体长均低于各人工生境。

4　讨论

生境的复杂性和相互关联性对依赖于其生境的

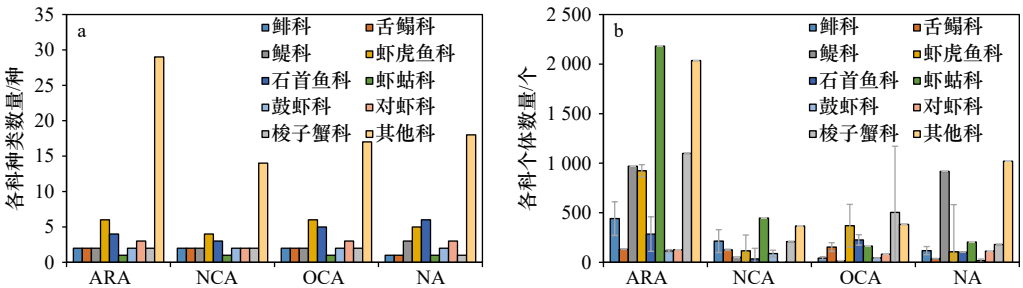

图 3　4 种生境中不同科的种类数量(a)与个体数量(b)

Fig. 3　Number of species (a) and individuals (b) of different families in four habitats

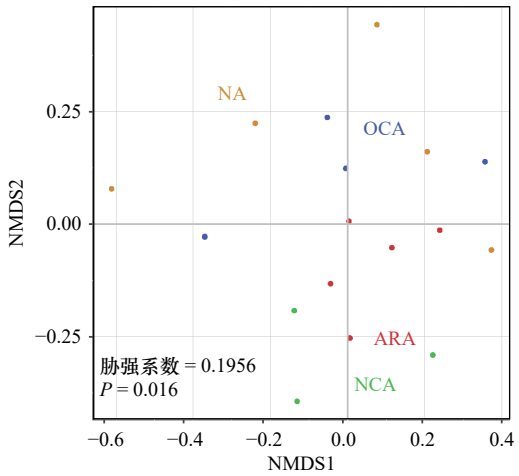

图 4 海州湾不同生境类型生物群落组成的非度量多维尺度(NMDS)的可视化结果

Fig. 4 Visualisation results of the non-metric multidimensional scaling (NMDS) of biotope composition of different habitat types in Hai Zhou Bay

胁强系数(0.1956 < 0.2)表明了排序模型的合理性。不同颜色的点代表不同的生境类型,每个点代表一个采样点

The coefficient of coercion (0.1956 < 0.2) indicates the reasonableness of the ordination model. Different coloured dots represent different habitat types and each dot represents a sampling point

表 4 PERMANOVA 组间比较结果

Table 4 PERMANOVA intergroup comparison results

	自由度	平方和	均方	*F*值	变异解释率 (R^2)	*P*值 (>*F*)
ARA/NCA	1	0.462	0.462	1.569	20.73%	0.095
ARA/OCA	1	0.366	0.366	1.148	14.08%	0.285
ARA/NA	1	0.523	0.523	1.495	15.74%	0.016
NCA/OCA	1	0.542	0.542	1.578	23.99%	0.108
NCA/NA	1	0.597	0.597	1.570	20.74%	0.055
OCA/NA	1	0.331	0.331	0.841	10.73%	0.718

生物来说至关重要,这一概念的发展势头日益强劲[41]。通过评估不同生境类型之间的物种差异,发现自然生境与人工生境拥有相同的重要物种,这表明自然生境与人工生境之间存在一定程度的连通性。这种连通性可能导致物种在邻近的生境之间移动,从而形成物种重叠现象。聚类分析进一步揭示了多数物种利用多个生境,表明生物对于不同生境之间的交替利用具有一定的灵活性。值得注意的是,少数属于定居种群的物种可能在个体层面上而非物种层面上对生境具有特异性。类似的现象在其他地区也得到了观察和确认,例如在瑞典温带水域,存在着多种沿岸生境中物种重叠的情况[42–44]。这些发现为深入理解生物与其生境之间的复杂关系提供了重要的参考和启示。

4.1 各生境间的群落特征

NCA 人工筏式养殖大量的紫菜等大型藻类,高频的人为干扰对该区域捕捞的物种种类和丰度可能产生了不利影响[45]。紫菜筏式养殖对潮流流速的影响在一定程度上能够使得生境内部和附近一定范围包括向陆侧近岸及上下游水域的泥沙和局地再悬浮的泥沙发生充分的垂向混合,促进碎屑和浮游生物的流动[46],这种环境变化与斑鰶、鲚和香斜棘鳚(*Repomucenus olidus*)等以浮游生物和有机碎屑为主要饵料的鱼类在 NCA 的高关联度相关。OCA 以其人工牡蛎礁为特色。牡蛎礁的复杂结构和生物功能显著促进了生态系统过程,如有机物循环和能量耦合,为多种鱼类提供了理想的栖息地,使得 OCA 的物种种类较为丰富[47]。而 NA 由于较少的人类活动干扰[48],物种数量高于 NCA 和 OCA。在 ARA,人工鱼礁的建设提供了多样化的生态位,为海洋生物提供了繁殖、觅食和庇护的空间,促进了渔业资源的恢复和养护[49–52]。本研究结果进一步证实了人工鱼礁在渔业资源养护中的积极作用。

虽然多数物种同时分布于多个生境,但生境间的群落结构却表现出显著差异。这种差异一方面源于各生境的功能特点各不相同,同时也受人为设计干扰程度的影响;另一方面,各生境都拥有特有物种,NCA 和 OCA 各有 2 种特有物种,NA 有 6 种,而 ARA 则有 9 种。这些特有物种的存在使得各生境群落之间的异质性更加显著,其中 ARA 的特有物种数量最多,进一步说明人工鱼礁这类复杂生境结构有利于提高生境生物多样性。ARA 内复杂结构的人工构造物的持续干预加剧了 ARA 与 NA 之间的差异。本研究的物种丰度分析显示,ARA 与邻近的 NCA 和 OCA 之间物种丰度差异并不显著,说明人工鱼礁的建设能够有效提高邻近生境的物种丰度,这与之前相关研究的结论一致[3–4, 53–54]。由于 ARA 具有丰富的特有物种和显著的生态位多样性,它在维持生物多样性方面发挥着至关重要的作用。ARA 提高了礁区生物多样性,而且对周边生境的生物丰度和多样性产生了积极影响。值得注意的是,NA 与 ARA 和 NCA 的物种丰度存在差异,而与 OCA 之间不存在明显差异,其原因尚需对 NA 和 OCA 的物种分布进行进一步调查研究。

4.2 各生境间的个体体长分布特征

本研究中发现,矛尾虾虎鱼体长在 ARA、NCA 和 OCA 均显著大于 NA 的,这可能与虾虎鱼科的摄食有关,虾虎鱼科多处于狭食性与广食性之间的中间

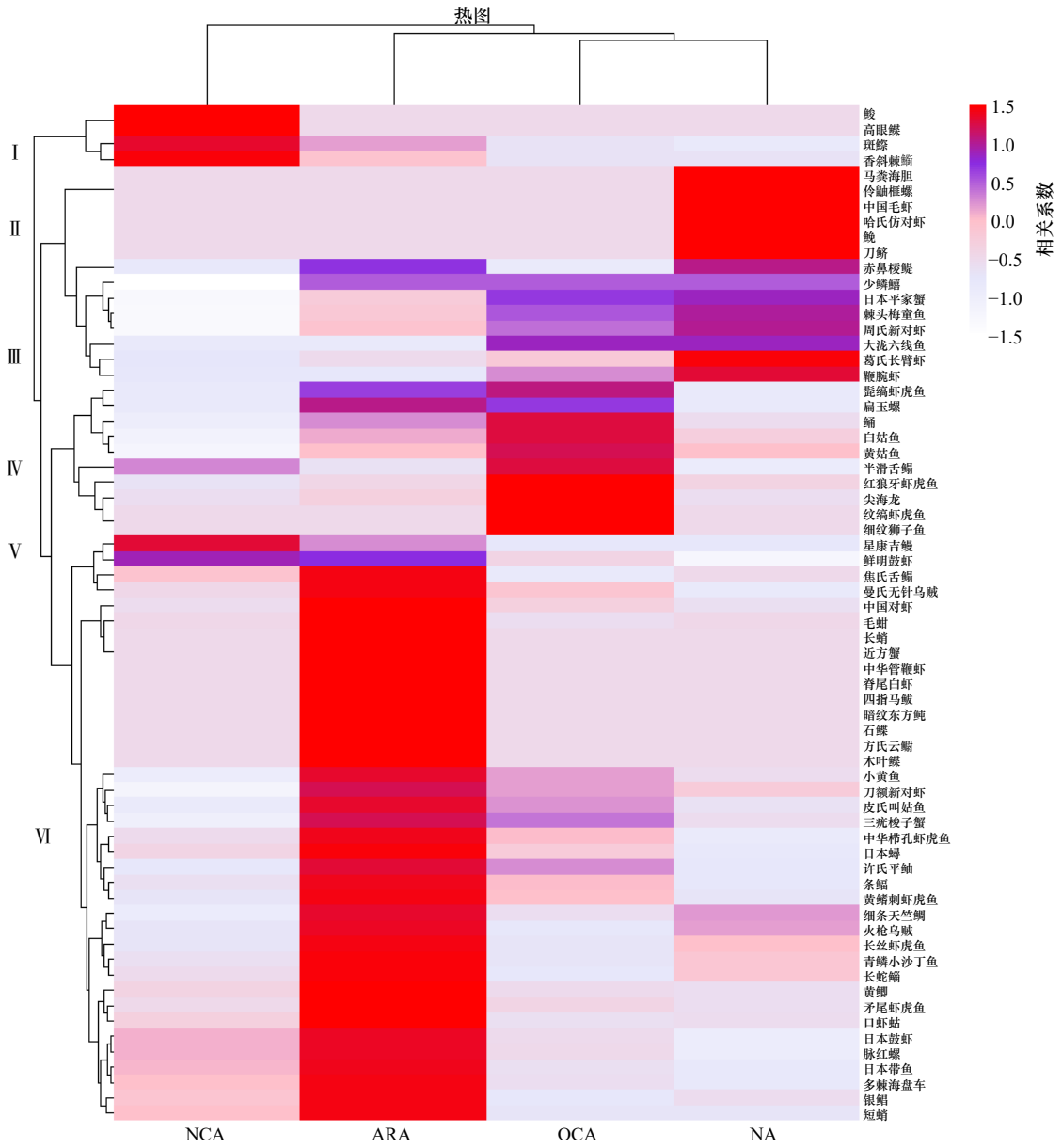

图 5　物种在 4 种生境类型中的聚类热图

Fig. 5　Heat map of species clustering in four habitat types

显示了 66 个(左侧聚类)物种及其生境关联, 从红色(强相关)到白色(弱相关)的颜色梯度表示物种与生境关联的强度

The figure shows 66 (clustered on the left) species and their habitat associations, with a colour gradient from red (strongly associated) to white (weakly associated) indicating the strength of the species' association with the habitat

型底栖生物食性鱼类, 虾类与端足类是其重要的饵料生物类群[55]。人工生境的虾类生物量丰富, 这使得大体长的虾虎鱼科物种更容易在此聚集, 从而导致人工生境与自然生境之间体长的显著差异。据有关研究报道, 底栖生活的日本蟳及日本鼓虾(*Alpheus japonicus*)是黄海海域口虾蛄的重要饵料生物[56]。本研究中观察到 ARA 内口虾蛄和日本蟳及日本鼓虾的生物量远高于其他生境, 进一步印证了这一结果。口虾蛄季节性迁移距离不大, 喜栖息于砂质底质中, 其空间变化与水温、盐度、叶绿素 *a* 等海洋环境因子相关[57], 其喜岩礁生境栖息的生活习性的偏好以及环境因素的影响或许可以解释口虾蛄的资源量相对集中于人工生境的情况, 但是还需要有更多的实证研究。在某种程度上栖息地范围和饵料生物目标是重叠的[58], 人工生境内充足的饵料生物提高了人工生境的吸引力, 在一定程度上也促进了自然生境向邻近人工生境的物种迁徙。

除此之外, 从不同生活习性的物种体长分布结果中或许可以找到物种−生境之间的关联点。比如, 火枪乌贼在 3 种人工生境的体长均大于 NA。火枪乌贼

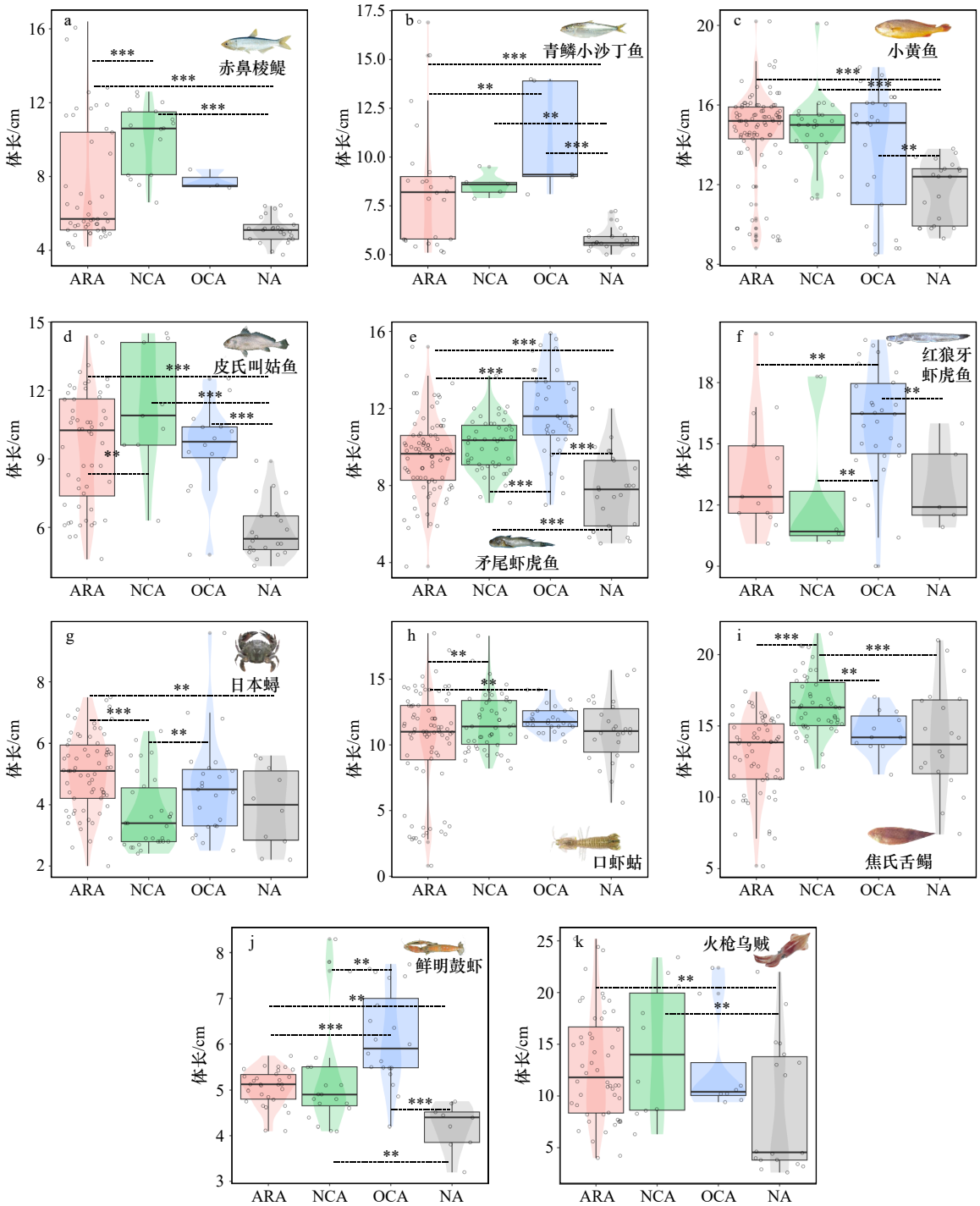

图 6 海州湾多生境关联的 11 种丰度较大物种的不同体长分布

Fig. 6 Distribution of different body lengths of 11 species with high abundance in multi-habitat associations in Haizhou Bay

方框的上限和下限分别表示第一和第三分位数，框的内线表示数据分布的平均值。a. 赤鼻棱鳀，b. 青鳞小沙丁鱼，c. 小黄鱼，d. 皮氏叫姑鱼，e. 矛尾虾虎鱼，f. 红狼牙虾虎鱼，g. 日本蟳，h. 口虾蛄，i. 焦氏舌鳎，j. 鲜明鼓虾，k. 火枪乌贼。

*、**表示存在显著差异，***表示存在极显著差异

The upper and lower limits of the boxes represent the first and third quartiles, respectively, and the inner line of the box represents the mean of the data distribution. a. *Thryssa kammalensis*, b. *Sardinella zunasi*, c. *Larimichthys polyactis*, d. *Johnius belangerii*, e. *Chaeturichthys stigmatias*, f. *Odontamblyopus rubicundus*, g. *Charybdis japonica*, h. *Oratosquilla oratoria*, i. *Cynoglossus joyneri*, j. *Alpheus distinguendus*, and k. *Loligo beka*.

* and ** indicate significant differences, and *** indicates highly significant differences

具有明显的洄游特性，繁殖季节从外海迁移到近海生殖，幼体在近岸海域生长发育，这些新生群体再洄游到外海区域，其洄游特性造成了近岸人工生境和NA体长分布的显著差异[59]。另外，作为暖水性洄游

性鱼类的小黄鱼和青鳞小沙丁鱼受黄海暖流和南海暖流等海流的影响进行季节性长距离洄游[60–61], 在3种人工生境内的体长均无显著差异, 但都显著大于NA的。而定栖性鱼类矛尾虾虎鱼和焦氏舌鳎游泳能力较弱, 仅作短距离的移动, 其空间分布主要受水深、温度、盐度等海洋环境因子和饵料生物的影响[62–64], 矛尾虾虎鱼体长在OCA显著大于ARA和NCA的, 焦氏舌鳎体长在NCA显著大于ARA和OCA的。两类不同习性物种的体长分布差异可能说明物种洄游特性是连接人工生境与自然生境的重要因素。

此外, 本研究中发现OCA的样本个体总数远低于NA的, 但重要物种的体长分布均大于NA的, 这造成了两种不同类型生境的物种丰度差异不显著。OCA作为天然牡蛎礁与人工牡蛎礁混合海域, 不仅通过增加牡蛎幼虫的固着基质促进了自然牡蛎礁的修复, 而且作为海洋保护区的重要手段, 拥有与ARA类似的功能, 可为多种鱼类、虾类等提供觅食和避敌的场所, 具备渔业资源养护的生态功能, 往往具有较高的生物多样性和复杂的食物网结构[33, 65]。在之前的研究中有结果表明牡蛎礁区生境的鱼群种类和生物量均高于对照区, 牡蛎礁具备吸引鱼类聚集的生态作用, 且投放礁体时间越长, 其饵料效应和提供栖息地的生态功能越强[66]。因此, 牡蛎礁生境对毗邻的自然生境的吸引力较高, 导致OCA与NA之间的关联性较强。

最后, 本研究的方法论存在改进空间。比如采集装置, 尤其是对于大型底栖生物的采集。由于人工鱼礁和牡蛎礁区底部结构复杂, 需要结合更有效的采集方式进行补充采样, 比如潜水或浮潜采集方式等。此外, 还可以依靠一些耳石微量元素[67]或环境DNA (eDNA)技术[68]等生物化学手段, 来深入探索生境之间的生物群落结构。

5　结论

本研究综合分析了海州湾人工生境和自然生境群落物种多样性特征。结果表明, 各生境之间存在一定的物种组成重叠, 既有一些重要物种能够同时存在于多种生境, 也有些特有物种仅存于一种生境内。生物资源丰度较高的生境能有效促进邻近生境物种多样性的提高, 从而进一步加强生境之间的联系。人工生境内丰富的饵料生物增加了其对物种的吸引力, 并促进了自然生境物种的迁徙。洄游性鱼类的体长分布差异表明物种的洄游特性与不同生境间物种分布和生境连通存在潜在联系。

参考文献:

[1] Reis-Filho J A, Schmid K, Harvey E S, et al. Coastal fish assemblages reflect marine habitat connectivity and ontogenetic shifts in an estuary-bay-continental shelf gradient[J]. Marine Environmental Research, 2019, 148: 57−66.

[2] Xu Peng, Jiao Mengyu, Li Hanying, et al. Effects of artificial reef and fishing moratorium on trophic structure of biological community in the Pearl River Estuary marine ranch based on stable isotopes[J]. Marine Environmental Research, 2023, 190: 106066.

[3] Komyakova V, Chamberlain D, Jones G P, et al. Assessing the performance of artificial reefs as substitute habitat for temperate reef fishes: implications for reef design and placement[J]. Science of the Total Environment, 2019, 668: 139−152.

[4] McLean M, Roseman E F, Pritt J J, et al. Artificial reefs and reef restoration in the Laurentian Great Lakes[J]. Journal of Great Lakes Research, 2015, 41(1): 1−8.

[5] Richardson M A, Zhang Ya, Connolly R M, et al. Some like it hot: the ecology, ecosystem benefits and restoration potential of oyster reefs in tropical waters[J]. Frontiers in Marine Science, 2022, 9: 873768.

[6] Sanz-Lazaro C, Sanchez-Jerez P. Regional integrated multi-trophic aquaculture (RIMTA): spatially separated, ecologically linked[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 271: 110921.

[7] Gillanders B M, Able K W, Brown J A, et al. Evidence of connectivity between juvenile and adult habitats for mobile marine fauna: an important component of nurseries[J]. Marine Ecology Progress Series, 2003, 247: 281−295.

[8] 杨红生. 我国海洋牧场建设回顾与展望[J]. 水产学报, 2016, 40(7): 1133−1140.
Yang Hongsheng. Construction of marine ranching in China: reviews and prospects[J]. Journal of Fisheries of China, 2016, 40(7): 1133−1140.

[9] Gutiérrez J L, Jones C G, Strayer D L, et al. Mollusks as ecosystem engineers: the role of shell production in aquatic habitats[J]. Oikos, 2003, 101(1): 79−90.

[10] Quan Weimin, Fan Ruiliang, Wang Yunlong, et al. Long-term oyster recruitment and growth are not influenced by substrate type in China: implications for sustainable oyster reef restoration[J]. Journal of Shellfish Research, 2017, 36(1): 79−86.

[11] Vásquez J A, Zuñiga S, Tala F, et al. Economic valuation of kelp forests in northern Chile: values of goods and services of the ecosystem[J]. Journal of Applied Phycology, 2014, 26(2): 1081−1088.

[12] 孙梦雨, 汪振华, 林军, 等. 大规模筏式养殖生境中端足类群聚特征和时空差异[J]. 上海海洋大学学报, 2024, 33(3): 702−714.
Sun Mengyu, Wang Zhenhua, Lin Jun, et al. Assemblage structure and spatial-temporal variation of amphipods in large-scale raft culture

habitats[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2024, 33(3): 702−714.

[13] Whitmarsh D, Santos M N, Ramos J, et al. Marine habitat modification through artificial reefs off the Algarve (southern Portugal): an economic analysis of the fisheries and the prospects for management[J]. Ocean & Coastal Management, 2008, 51(6): 463−468.

[14] Walker S J, Schlacher T A. Limited habitat and conservation value of a young artificial reef[J]. Biodiversity and Conservation, 2014, 23(2): 433−447.

[15] Tessier A, Francour P, Charbonnel E, et al. Assessment of French artificial reefs: due to limitations of research, trends may be misleading[J]. Hydrobiologia, 2015, 753(1): 1−29.

[16] Folpp H R, Schilling H T, Clark G F, et al. Artificial reefs increase fish abundance in habitat-limited estuaries[J]. Journal of Applied Ecology, 2020, 57(9): 1752−1761.

[17] Clark S, Edwards A J. An evaluation of artificial reef structures as tools for marine habitat rehabilitation in the Maldives[J]. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 1999, 9(1): 5−21.

[18] Sherman R L, Gilliam D S, Spieler R E. Artificial reef design: void space, complexity, and attractants[J]. ICES Journal of Marine Science, 2002, 59(S1): S196−S200.

[19] 张秀梅, 纪棋严, 胡成业, 等. 海洋牧场生态系统稳定性及其对干扰的响应——研究现状、问题及建议[J]. 水产学报, 2023, 47(11): 119509.
Zhang Xiumei, Ji Qiyan, Hu Chengye, et al. Ecosystem stability of marine ranching and its response to disturbance: research status, issues, and suggestions[J]. Journal of Fisheries of China, 2023, 47(11): 119509.

[20] Keller K, Smith J A, Lowry M B, et al. Multispecies presence and connectivity around a designed artificial reef[J]. Marine and Freshwater Research, 2017, 68(8): 1489−1500.

[21] 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: 30−38.

[22] Olds A D, Connolly R M, Pitt K A, et al. Quantifying the conservation value of seascape connectivity: a global synthesis[J]. Global Ecology and Biogeography, 2016, 25(1): 3−15.

[23] Liao Jinbao, Bearup D, Blasius B. Food web persistence in fragmented landscapes[J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2017, 284(1859): 20170350.

[24] 唐峰华, 沈新强, 王云龙. 海州湾附近海域渔业资源的动态分析[J]. 水产科学, 2011, 30(6): 335−341.
Tang Fenghua, Shen Xinqiang, Wang Yunlong. Dynamics of fisheries resources near Haizhou Bay waters[J]. Fisheries Science, 2011, 30(6): 335−341.

[25] 罗文强, 赵刚, 张彦彦, 等. 海州湾海洋牧场人工鱼礁区建设前后海洋环境变化分析[J]. 海洋湖沼通报, 2021(1): 33−40.
Luo Wenqiang, Zhao Gang, Zhang Yanyan, et al. A comparative analysis on marine environments of an artificial reef area in marine pasture, Haizhou Bay, before and after construction[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2021(1): 33−40.

[26] Luo Feng, Li Ruijie. 3D water environment simulation for north Jiangsu offshore sea based on EFDC[J]. Journal of Water Resource and Protection, 2009, 1(1): 41−47.

[27] 谢飞, 逄勇, 宋志尧. 海州湾海域三维潮流数值模拟[J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2007, 35(6): 718−721.
Xie Fei, Pang Yong, Song Zhiyao. Three-dimensional numerical simulation of tidal current in offshore area of Haizhou Bay[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, 35(6): 718−721.

[28] 章守宇, 张焕君, 焦俊鹏, 等. 海州湾人工鱼礁海域生态环境的变化[J]. 水产学报, 2006, 30(4): 475−480.
Zhang Shouyu, Zhang Huanjun, Jiao Junpeng, et al. Change of ecological environment of artificial reef waters in Haizhou Bay[J]. Journal of Fisheries of China, 2006, 30(4): 475−480.

[29] 张秀英, 钟太洋, 黄贤金, 等. 海州湾生态系统服务价值评估[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 640−649.
Zhang Xiuying, Zhong Taiyang, Huang Xianjin, et al. Values of marine ecosystem services in Haizhou Bay[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 640−649.

[30] 吴立珍, 吴卫强, 陆伟, 等. 海州湾生态环境修复的探索实践与展望——江苏省海洋牧场示范区建设[J]. 中国水产, 2012(6): 35−37.
Wu Lizhen, Wu Weiqiang, Lu Wei, et al. Exploration, practice, and prospects of ecological environment restoration in Haizhou Bay: construction of the marine ranching demonstration zone in Jiangsu Province[J]. China Fisheries, 2012(6): 35−37.

[31] 高宇航, 陈曦, 孟顺龙, 等. 人工鱼礁建设研究进展及其作用机理[J]. 中国农学通报, 2023, 39(23): 138−144.
Gao Yuhang, Chen Xi, Meng Shunlong, et al. Research progress of artificial reef construction and its mechanism[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(23): 138−144.

[32] 闫令东. 筏式养殖夹苗密度对海带生长的影响——以荣成爱莲湾海带养殖为例[D]. 烟台: 烟台大学, 2021.
Yan Lingdong. Effects of clamping density on the growth of *Saccharina japonica* in raft culture: a case study in Ailian Bay[D]. Yantai: Yantai University, 2021.

[33] 杨心愿. 祥云湾海洋牧场人工牡蛎礁群落特征及其生态效应[D]. 青岛: 中国科学院大学 (中国科学院海洋研究所), 2019.
Yang Xinyuan. The community characteristics and ecological functions of artificial oyster reef at Xiangyun Bay marine ranching[D]. Qingdao: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), 2019.

[34] Pinkas L, Oliphant M S, Iverson I L K. Food habits of albacore, bluefin tuna, and bonito in California waters[J]. Fishery Bulletin, 1971,

152: 1−105.
[35] 余宏昌, 毕宝帅, 唐文乔, 等. 上海苏州河治理中鱼类多样性及群落结构变化[J]. 生物多样性, 2021, 29(1): 32−42.
Yu Hongchang, Bi Baoshuai, Tang Wenqiao, et al. Changes in fish diversity and assemblage during comprehensive restoration of the Suzhou River in Shanghai[J]. Biodiversity Science, 2021, 29(1): 32−42.
[36] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. The Bell System Technical Journal, 1948, 27(3): 379−423.
[37] Pielou E C. An Introduction to Mathematical Ecology[M]. New York: Wiley-Interscience, 1969.
[38] Margalef R. Information theory in ecology[J]. General Systems, 1958, 3: 36−71.
[39] 黄欣. 南流江河口红树林潮沟鱼类群落时空分布格局及其与环境因子的关系[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2020.
Huang Xin. Temporal and spatial distribution patterns of fish assemblages from mangrove creek in the Nanliujiang River Estuary and its relationship with environmental factors[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2020.
[40] Clarke K R, Gorley R N. Getting started with PRIMER v7[J]. PRIMER-e: plymouth, plymouth marine laboratory, 2015, 20(1).
[41] Heck Jr K L, Hays G, Orth R J. Critical evaluation of the nursery role hypothesis for Seagrass meadows[J]. Marine Ecology Progress Series, 2003, 253: 123−136.
[42] Unsworth R K F, Garrard S L, De León P S, et al. Structuring of Indo-Pacific fish assemblages along the mangrove–seagrass continuum[J]. Aquatic Biology, 2009, 5(1): 85−95.
[43] Berkström C, Lindborg R, Thyresson M, et al. Assessing connectivity in a tropical embayment: fish migrations and seascape ecology[J]. Biological Conservation, 2013, 166: 43−53.
[44] Pihl L, Wennhage H. Structure and diversity of fish assemblages on rocky and soft bottom shores on the Swedish west coast[J]. Journal of Fish Biology, 2002, 61(sA): 148−166.
[45] 符小明, 唐建业, 吴卫强, 等. 海州湾生态修复效果评价[J]. 大连海洋大学学报, 2017, 32(1): 93−98.
Fu Xiaoming, Tang Jianye, Wu Weiqiang, et al. Evaluation of ecological restoration performance in Haizhou Bay, Lianyungang[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2017, 32(1): 93−98.
[46] 张泽华. 浅海筏式海带养殖活动对水动力及沉积环境影响研究[D]. 青岛: 中国科学院大学 (中国科学院海洋研究所), 2016.
Zhang Zehua. Effects of suspended kelp *Laminaria japonica* cultivation on hydrodynamic conditions and sedimentary environments[D]. Qingdao: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), 2016.
[47] 侯润. 祥云湾海洋牧场牡蛎礁构建效果评估[D]. 保定: 河北农业大学, 2022.
Hou Run. Effect evaluation of oyster reef construction in Xiangyun Bay Marine ranching[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2022.
[48] 董双林, 董云伟, 黄六一, 等. 迈向远海的中国水产养殖: 机遇、挑战和发展策略[J]. 水产学报, 2023, 47(3): 1−11.
Dong Shuanglin, Dong Yunwei, Huang Liuyi, et al. Toward offshore aquaculture in China: opportunities, challenges and development strategies[J]. Journal of Fisheries of China, 2023, 47(3): 1−11.
[49] Abecasis D, Bentes L, Lino P G, et al. Residency, movements and habitat use of adult white seabream (*Diplodus sargus*) between natural and artificial reefs[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2013, 118: 80−85.
[50] Bohnsack J A. Are high densities of fishes at artificial reefs the result of habitat limitation or behavioral preference?[J]. Bulletin of Marine Science, 1989, 44(2): 631−645.
[51] 汪振华, 章守宇, 王凯, 等. 三横山人工鱼礁区鱼类和大型无脊椎动物诱集效果初探[J]. 水产学报, 2010, 34(5): 751−759.
Wang Zhenhua, Zhang Shouyu, Wang Kai, et al. A preliminary study on fish and macroinvertebrate enhancement in artificial reef area around Sanheng Isle, Shengsi, China[J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(5): 751−759.
[52] 张荣良. 烟台近岸人工鱼礁与自然岩礁食物网结构与功能对比研究[D]. 中国科学院大学 (中国科学院烟台海岸带研究所), 2021.
Zhang Rongliang. The comparative study of the food web structure and function between the artificial and natural reefs in the nearshore of Yantai[D]. Yantai: Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, 2021.
[53] Ammar M S A. Coral reef restoration and artificial reef management, future and economic[J]. The Open Environmental Engineering Journal, 2009, 2(1): 37−49.
[54] Lowry M B, Glasby T M, Boys C A, et al. Response of fish communities to the deployment of estuarine artificial reefs for fisheries enhancement[J]. Fisheries Management and Ecology, 2014, 21(1): 42−56.
[55] 徐俊伟, 张波, 张崇良, 等. 基于线性混合模型研究海州湾六丝钝尾虾虎鱼摄食生态[J]. 应用生态学报, 2022, 33(9): 2563−2571.
Xu Junwei, Zhang Bo, Zhang Chongliang, et al. Feeding ecology of *Amblychaeturichthys hexanema* in Haizhou Bay based on linear mixed model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(9): 2563−2571.
[56] 秦玉雪, 陈雷, 尹增强, 等. 基于碳、氮稳定同位素的黄海北部口虾蛄食性分析[J]. 水产学杂志, 2023, 36(1): 59−64.
Qin Yuxue, Chen Lei, Yin Zengqiang, et al. Feeding habits of mantis shrimp *Oratosqilla oratoria* in northern Yellow Sea based on carbon and nitrogen stable isotope analysis[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2023, 36(1): 59−64.
[57] 许莉莉, 薛莹, 焦燕, 等. 海州湾及邻近海域口虾蛄群体结构及资源分布特征[J]. 中国海洋大学学报, 2017, 47(4): 28−36.
Xu Lili, Xue Ying, Jiao Yan, et al. Population structure and spatial distribution of *Oratosquilla oratoria* in Haizhou Bay and adjacent waters[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(4): 28−36.
[58] Baeck G W, Park J M, Hashimoto H. Feeding ecology of three tonguefishes, genus Cynoglossus (Cynoglossidae) in the Seto Inland Sea,

Japan[J]. Animal Cells and Systems, 2011, 15(4): 325−336.
[59] 王斌, 孙鹏, 叶振江, 等. 山东近海枪乌贼类资源丰度的时空变动及其与环境因子的关系[J]. 中国海洋大学学报, 2020, 50(6): 50−60.
Wang Bin, Sun Peng, Ye Zhenjiang, et al. Spatial-temporal variations of Loligo squids abundances in Shandong coastal waters and associating environmental factors[J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(6): 50−60.
[60] 林龙山, 程家骅, 姜亚洲, 等. 黄海南部和东海小黄鱼 (*Larimichthys polyactis*) 产卵场分布及其环境特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3485−3494.
Lin Longshan, Cheng Jiahua, Jiang Yazhou, et al. Spatial distribution and environmental characteristics of the spawning grounds of small yellow croaker in the southern Yellow Sea and the East China Sea[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3485−3494.
[61] 杨天燕. 青鳞小沙丁鱼 (*Sardinella zunasi*) 种群形态学和遗传学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
Yang Tianyan. Study on morphological and genetic comparison of *Sardinella zunasi* populations[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.
[62] 刘潇, 张崇良, 任一平, 等. 黄河口及邻近水域矛尾虾虎鱼资源丰度的时空分布[J]. 中国水产科学, 2015, 22(4): 791−798.
Liu Xiao, Zhang Chongliang, Ren Yiping, et al. Spatiotemporal variation in the distribution and abundance of *Chaeturichthys stigmatias* in the Yellow River estuary and adjacent waters[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(4): 791−798.
[63] Minami T. The early life history of a tongue fish, *Cynoglossus joyneri*[J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1983, 49(5): 719−724.
[64] 张云雷, 薛莹, 于华明, 等. 海州湾春季皮氏叫姑鱼栖息地适宜性研究[J]. 海洋学报, 2018, 40(6): 83−91.
Zhang Yunlei, Xue Ying, Yu Huaming, et al. Study on the habitat suitability of *Johnius belangerii* during spring in the Haizhou Bay, China[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(6): 83−91.
[65] Shervette V R, Gelwick F. Habitat-specific growth in juvenile pinfish[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2007, 136(2): 445−451.
[66] Arve J. Preliminary report on attracting fish by oyster-shell plantings in Chincoteague Bay, Maryland[J]. Chesapeake Science, 1960, 1(1): 58−65.
[67] Maciel T R, Avigliano E, De Carvalho B M, et al. Population structure and habitat connectivity of *Genidens genidens* (Siluriformes) in tropical and subtropical coasts from Southwestern Atlantic[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2020, 242: 106839.
[68] Yamanaka H, Minamoto T. The use of environmental DNA of fishes as an efficient method of determining habitat connectivity[J]. Ecological Indicators, 2016, 62: 147−153.

Preliminary study on connectivity of organism communities in artificial and natural habitats

Chen Tao[1], Li Zheng[1], Lu Jikun[2], Fu Guanghui[2], Zhang Shuo[1,3], Gao Shike[1,4]

(1. *College of Marine Living Resource Sciences and Management*, *Shanghai Ocean University*, *Shanghai* 201306, *China*; 2. *Marine and Fishery Development Promotion Center*, *Lianyungang* 222002, *China*; 3. *Joint Laboratory for Monitoring and Conservation of Aquatic Living Resources in the Yangtze River Estuary*, *Shanghai* 201306, *China*; 4. *Key Laboratory of Marine Ecological Conservation and Restoration*, *Ministry of Natural Resources/Fujian Provincial Key Laboratory of Marine Ecological Conservation and Restoration*, *Xiamen* 361005, *China*)

Abstract: To better understand the community patterns and their interconnections between different habitats in coastal areas, it is essential to explore the potential factors influencing species distribution and ecological connectivity between artificial and natural habitats. This study conducted a comprehensive survey of fish and invertebrate communities across four typical habitats in Haizhou Bay, Jiangsu Province: artificial reef area (ARA), nori culture area (NCA), oyster culture area (OCA), and natural area (NA). The results showed significant differences in species abundance among the four habitats ($P < 0.05$), with some important species occurring across multiple habitats, and some endemic species restricted to a single habitat. The biomass of *Oratosquilla oratoria* in ARA was significantly higher compared to other habitats, and the body length of *Chaeturichthys stigmatias* in ARA, NCA, and OCA was significantly greater than in NA ($P < 0.05$), which was strongly associated with the distribution of prey organisms. Differences in body length distributions of fish with different life habits indicate that species migration behavior plays an important role in species distribution and habitat connectivity. Migratory fish species, such as *Lar-*

imichthys polyactis and *Sardinella zunasi*, exhibited significantly greater body lengths in artificial habitats compared to natural habitats ($P < 0.05$). Resident fish species, such as *Chaeturichthys stigmatias*, exhibited significantly larger body lengths in OCA compared to ARA and NCA ($P < 0.05$), while *Cynoglossus joyneri* exhibited a significantly greater body length in NCA than in ARA and OCA ($P < 0.05$). This study demonstrates that artificial habitats, by enhancing habitat complexity, provide favorable environmental conditions for the restoration of marine biological resources and the development of individuals. The distribution of prey organisms and species migration characteristics are likely associated with connectivity between different habitats.

Key words: Haizhou Bay; artificial reef area; oyster culture area; nori culture area; natural area; organism community