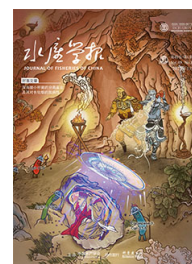


DOI: 10.11964/jfc.20240114312

· 综述 ·

海洋牧场人工鱼礁生境营造的生态学理论框架探索



袁华荣^{1,2}, 章守宇^{1*}, 林 军¹, 冯 雪², 汪振华¹, 佟 飞²,
王 凯¹, 陈钰祥², 陈丕茂^{2*}

1. 上海海洋大学海洋科学与生态环境学院, 上海 201306; 2. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业农村部海洋牧场重点实验室, 广东 广州 510300

摘要: 海洋牧场建设作为国家推动“蓝色粮仓”和修复近海渔业资源的关键举措之一, 近年来在我国持续蓬勃发展。然而在快速发展的同时也面临着目标不够明确、生境功能与规模不清晰、生境系统不完善等诸多问题和挑战, 尤其是理论基础薄弱。人工鱼礁生境营造作为我国海洋牧场建设的重要基础和前提, 对于维持目标物种的生长、繁殖等具有重要意义。然而, 目前我国海洋牧场人工鱼礁生境营造主要考虑地质结构等物理适宜性因素, 强调工程可操作性, 却忽视了目标生物的生态适应性, 导致生态功能性不足。在人工鱼礁生境营造过程中, 目标种定位、构筑物结构和功能、尺度和规模等方面均存在一定盲目性。为解决这一问题, 亟需构建海洋牧场人工鱼礁生境营造的理论框架。本文对国内外海洋牧场的发展历程进行了简要回顾和总结, 对我国海洋牧场人工鱼礁生境的物理和生物环境进行了论述。整创了我国海洋牧场人工鱼礁生境营造的基本结构, 在此基础上, 探讨了我国海洋牧场人工鱼礁生境营造的生态学理论基础, 构建了以目标物种为核心的理论框架, 强调了生境结构与功能的符合性、尺度与效应的一致性, 以期为我国海洋牧场人工鱼礁生境的生态可持续提供理论参考。

关键词: 海洋牧场; 人工鱼礁生境; 目标物种驱动; 结构与功能; 规模与效应; 理论框架

近年来, 海洋牧场发展迅猛, 已经成为我国养护渔业资源、修复海洋生态环境、实现渔业转型升级和多产业融合发展的战略突破口、新典范^[1-2], 以及推动海洋渔业转型升级的战略方向^[3]。海洋牧场核心属性是一种可持续的渔业模式, 建设目标是通过构建适宜的人工生境^[4]和渔业增殖, 实现近海渔业资源增殖养护、生态系统健康稳定, 也已成为渔业碳汇的重要途径^[5]。在适宜开发与利用的前提下, 海洋牧场有望为人类提供安全、优质且充足的海洋动植物蛋白^[6]。当前以及未来一段时期被认为是我国海洋牧场发展至关重要的阶段。因此, 科学系统地推动海洋牧场的规范化建设, 不仅是养护增殖渔业资源的关键所在, 更是推动我国海洋渔业高质量可持续发展的战略基石。

第一作者: 袁华荣, 从事海洋牧场与渔业资源保护利用研究, E-mail: yhr@scsfri.ac.cn



通信作者: 章守宇, 二级教授, 博导, 从事近海栖息地生态修复、海洋牧场建设和渔业资源增殖养护研究, E-mail: syzhang@shou.edu.cn;



陈丕茂, 从事海洋牧场资源养护研究, E-mail: chenpm@scsfri.ac.cn

资助项目: 国家重点研发计划(2019YFD0901303); 中国水产科学研究院基本科研业务费专项(2023TD06, 2021SD02); 广东省重点领域研发计划(2020B1111030002)

收稿日期: 2024-01-05

修回日期: 2024-04-29

文章编号:

1000-0615(2025)01-019501-24

中图分类号: S 953

文献标志码: A

作者声明本文无利益冲突

©《水产学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)
Copyright © Editorial Office of Journal of Fisheries of China (CC BY-NC-ND 4.0)



海洋牧场人工鱼礁生境的营造或修复旨在为海洋牧场目标物种提供生长、繁殖、索饵和避敌的场所。通过增殖放流和音响驯化等技术手段,人为诱导目标物种在海洋牧场人工鱼礁生境中定居,以实现对该海域目标物种资源的保护、增殖,同时促进海洋生态环境的改善^[7]。因此,海洋牧场人工鱼礁生境被认为是海洋牧场建设的重要基础。目前,我国海洋牧场人工鱼礁生境的主要营造方式包括底置鱼礁^[8]、浮式鱼礁^[9]、海藻场、海草床和养殖筏架等^[10]。

海洋牧场人工鱼礁生境的营造,包括底层生境和中上层生境营造,投放底置鱼礁使局部海底环境发生改变,建设浮式鱼礁和表层设施会使海域水体空间环境发生变化,对海域原有的水动力、生物群落、生境格局产生扰动^[11]。人工鱼礁等水中构筑物引发的流场变化改变了营养盐等物质的分布格局,进而对原有的生境格局及生态功能产生影响。因此,如何因地制宜、因势利导地进行人工鱼礁生境营造,以改善目标物种生境条件,成为亟需解决的问题。

然而,当前对海洋牧场人工鱼礁生境营造的评价主要集中于建设后的渔业资源增殖效果和水环境效应等方面,较少关注营造前以目标物种为中心进行的本底资源环境评估、生境改良或营造方法设计及生态连续性保障等内容的评估。目前,我国对于海洋牧场人工鱼礁生境营造前的适宜性评价主要从地质学角度出发^[12-14],缺乏目标物种在其生命周期各阶段对生境需求的全面评估,对“生物-非生物”相互作用的整体考虑不足,相关理论体系不够健全。为此,本文旨在提出并深入探讨海洋牧场人工鱼礁生境营造的生态学理论框架,以期为我国海洋牧场人工鱼礁生境营造提供系统性理论参考。

1 海洋牧场人工生境概念内涵

海洋牧场人工生境概念的内涵追求体现其生成和发展的初衷及本质,而这与海洋牧场的演进历程密切相连。在这一背景下,概念的形成旨在准确捕捉海洋牧场人工生境的本质特征,深入剖析其建设初衷,以期为理论和实践提供深刻而全面的指导。

1.1 人工生境概念内涵

生境作为生态学和生物学理论探讨和实践

应用的基本单元,贯穿人工生境研究始终。1917年,美国学者 Grinnell 首次提出“生境”一词,其定义是生物出现的环境空间范围,一般指生物居住的地方,或是生物生活的生态地理环境^[15]。1980年,Ables等^[16]将能为特定种的野生动物提供生活必需条件的空间单位定义为野生动物生境。1982年,Lincoln等^[17]将生境定义为某种生物所占据的地点、站点以及独特的地方环境。1984年,Whittow^[18]认为生境是指有着独特生物或物理特征的某种生物生存的场所。1994年,Caughley等^[19]将生境定义为决定一个种群的出现、生存和繁殖所需的资源和环境条件的总和。1996年,Dennis等^[20]将生境定义为包含了一系列生物资源、消耗品和使用价值的区域,以维持某种生物的生存。1999年,Calow^[21]将生境定义为某个种类通常生活的场所,一般用各种物理因子来加以描述,如地形、底质等。2008年,Haslett^[22]将生境定义为一定的地理范围内对物种的生长和繁殖起关键作用的生物和非生物因子的统称。2009年,Odum等^[23]认为生境是指生物的个体、种群或群落生活地域的环境,包括必需的生存条件和其他对生物起作用的生态因素,又称为栖息地。从生境概念发展历程来看,其关注点为两个方面:生物体、与之有关的环境因素。总体上,生境可概括为生物体的居所和驻留地。

随着人类工业革命的到来和工业化的进程,人类对海洋生物天然居所的干扰程度逐渐超过了生境的承受阈值,从而不再适合原居生物的生存^[24],生境的破坏导致渔业群落结构的弱化和渔业资源的衰退,这种情况在人类活动频繁的近海海域尤其明显。在海洋开发与保护并重的时代,人们逐渐意识到受损海域生境的修复和生物多样性的维持需要综合考虑生境中关键生物群在其生命周期不同阶段对生境场所功能和环境条件的需求。为实现生境的有效修复,有必要综合考虑小尺度海域人工和天然生境的协同作用,这意味着必须在整体考虑的框架下营造、集成和维持具有多样功能的生境。因此,笔者在参考文献、中国水生生物资源养护政策、国家级海洋牧场示范区建设的基础上,结合多年实践,将海洋牧场人工生境定义为在海洋牧场海域,基于海洋生态学理论,由人工建造和

调控运行的, 能充分利用海洋自然生产力且满足目标生物种群在不同生命周期阶段对生境的差异化需求, 并实现目标物种可持续增殖和渔业资源可持续开发的生物栖息地。上述海洋牧场人工生境的定义明确了其理论基础(海洋生态学理论)、空间特性(海洋牧场海域)、建设方式(人工建造和调控运行)、功能属性(能充分利用海洋自然生产力且满足目标生物种群在不同生命周期阶段对生境的差异化需求)、实现目标(目标物种可持续增殖和渔业资源可持续开发)及其核心属性(生物栖息地)。一方面, 在海洋牧场这个小尺度的海域生态系统中存在着生物群落之间、生物群落与非生物环境之间复杂且密切的物质流、能量流和信息流的相互作用, 在海洋牧场人工生境营造中, 需充分考虑“生物=环境”之间的作用关系, 以确保生态系统的健康发展。另一方面, 在海洋牧场人工生境中, 原有海域自然生境条件与人工引入的构筑物逐渐融合, 形成了互利共生、多级利用的系统结构。这种融合过程使得海洋牧场人工生境具备了物理结构复杂和生物区系多样的栖息环境, 为其生态系统的稳定与可持续提供了坚实的基础。

1.2 海洋牧场人工鱼礁生境发展历程

海洋牧场人工鱼礁生境的发展是一个渐进的过程, 旨在促进渔业资源的增殖和可持续利用。其出现是随着渔业增殖发展到一定阶段的必然结果。通过对海洋牧场人工鱼礁生境发展历史脉络和资料的梳理分析, 将其发展历程概括为萌芽阶段(1860—1970年)、探索实验阶段

(1971—1988年)、技术创新阶段(1989—2016年)和可持续探索阶段(2017—至今)(图1)。

在萌芽阶段, 为应对渔业增殖的迫切需求, 海洋牧场人工鱼礁生境的概念应运而生。当人们意识到栖息地生境的改善对渔业增殖的重要性后, 开始探索栖息地的改善方法并在实践中得以应用, 研究者和从业者通过实验, 探索最适合目标物种增殖的人工鱼礁生境的类型和营造方法, 并积累了宝贵的经验。技术创新阶段注重在海洋牧场人工鱼礁生境营造过程中引入先进技术和方法, 以提高增殖渔业产出生态效益, 海洋牧场人工鱼礁生境营造技术的逐渐成熟, 为海洋牧场的可持续发展奠定了基础。可持续探索阶段强调在不断创新中实现渔业资源的高效利用和可持续增殖, 此时人工鱼礁生境的设计和管理将逐渐趋于成熟, 关注点逐渐转向如何在长期运营中最大程度地维持生态平衡和资源可持续产出。

萌芽阶段 在全球范围内, 人类最初对渔业资源的开发主要集中在近岸捕捞, 因捕捞的规模和技术水平有限, 未对渔业资源量产生不利影响。然而, 自18世纪60年代第一次工业革命以来, 工业技术水平的持续进步显著提高了捕捞渔船的效率和产量。伴随着工业革命的深入发展, 导致海洋渔业资源逐渐衰退。为了应对工业发展和捕捞强度增加导致的海洋渔业资源的衰退, 人类开始实施渔业增殖活动。1860—1880年, 日本、美国等国家开展了鲑鱼增殖, 随后逐渐在全世界范围内展开^[25]; 1884年起, 人类开始实施“海鱼孵化运动”^[26]; 1900

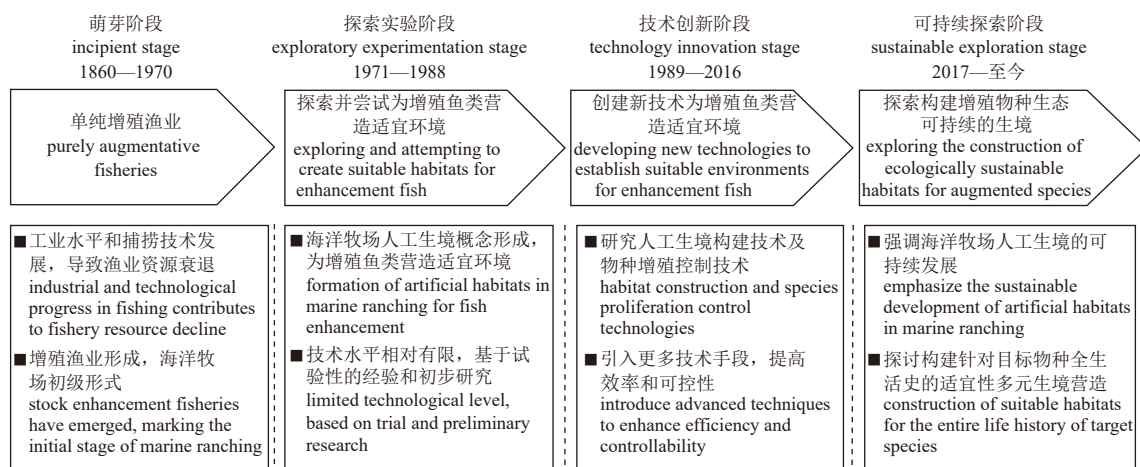


图1 海洋牧场人工鱼礁生境发展阶段示意图

Fig. 1 The schematic diagram of developmental stages in artificial reef habitat of marine ranching

年前后, 美国、英国、挪威等国家开始实施了海洋经济鱼类增殖放流^[27]。二战结束后, 原用于军事上的声呐等应用到渔业捕捞, 在大大提高捕捞效率和产量的同时对资源也产生了严重影响。1955 年前后, 日本濑户内海等近海的渔业捕捞产量减少, 为缓解因资源衰退导致

的影响, 日本于 1963 年提出了栽培渔业^[28], 此时日本从原始狩猎式渔业向增殖渔业转变。此阶段是海洋牧场初步形成阶段, 主要形式为增殖放流(图 2)。目前挪威、英国等欧洲国家的海洋牧场仍然以增殖放流为主要形式^[29]。

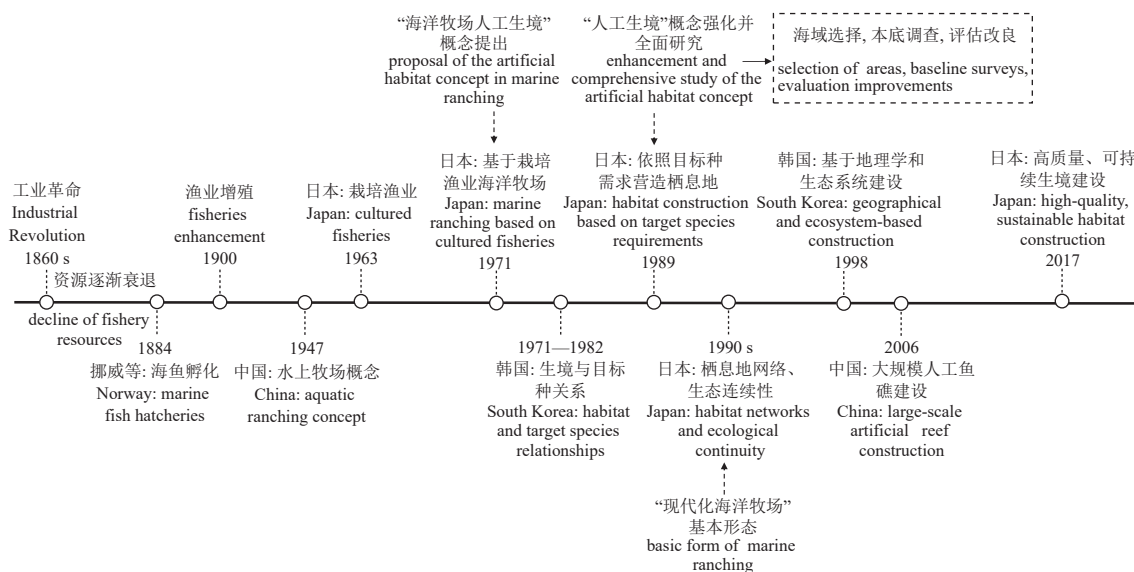


图 2 海洋牧场人工鱼礁生境发展历程示意图

Fig. 2 Conceptual diagram of the developmental process of artificial habitats in marine ranching

探索实验阶段 海洋牧场的出现旨在促进渔业资源的增殖, 而海洋牧场人工鱼礁生境的构建则是为了满足增殖渔业发展的需求, 是一种针对栖息地的改善或有目的的建设。其核心目标在于推动渔业资源的增殖并确保其可持续性。针对海洋牧场栖息地的建设和研究主要集中在东亚和东南亚国家。

①日本是首个将人工生境纳入海洋牧场建设的国家^[30]。1971 年, 基于其栽培渔业的基础, 日本提出了海洋牧场的概念和系统。1978—1987 年, 日本在其列岛沿海兴建了长达 5 000 km 的人工鱼礁带, 逐步将整个沿海地区纳入“海洋牧场”体系中^[31], 然而, 在此阶段, 日本尚未关注海洋牧场人工鱼礁生境构建与增殖目标种关系。与此同时, 我国从 1979 年在广西白龙珍珠湾开始了人工鱼礁集鱼实验^[32], 1983 年由冯顺楼^[33]提出建设人工鱼礁, 并于 1989 年提出将人工鱼礁作为海洋牧场建设的基础^[34]。

②韩国是首个意识到增殖目标种与人工生境之间关系的重要性, 并开展有关技术研究的国家。自 1971 年, 韩国开始研究适宜鱼类聚集

的人工鱼礁结构和材料、探讨人工鱼礁对周围海洋生态系统的影响等并在沿海投放人工鱼礁, 1982 年曾推进沿岸牧场化工作。

技术创新阶段 而后意识到增殖目标种与人工生境之间关系的重要性并全面开展技术研究的国家是日本。1989 年, 日本提出“运用水产工程技术满足增殖资源的生物学需求”, 通过引入人工鱼礁等措施促进海域鱼类种群的增殖, 20 世纪 90 年代后提出营造栖息地网络以保障海洋牧场区的生态连续性, 这一时期呈现出明显的工程体系特征, 构筑了现代海洋牧场的基本形态。对世界沿海各国, 特别是对中国、韩国等邻近国家产生了较大影响。韩国于 1994—1995 年组织沿岸渔场牧场化综合开发计划, 1994—1996 年进行了海洋牧场建设的可行性研究。1998 年, 韩国首先提出了基于海洋地理学和生态系统的海洋牧场, 标志着一个适用于不同海域特征的技术体系和管理体系开始形成, 依据不同鱼种栖息需求开发相适宜的人工鱼礁^[35]。

针对海洋牧场人工鱼礁生境的研究涵盖选址、本底调查、适宜性评估与营造技术等多个

方面^[36]。在选址阶段, 研究侧重于所选海域是否具备为目标种提供适宜环境或关键生命周期等潜在条件, 并考察是否具有改善的可能性。随后, 进行水文学、水质学、环境生物学以及底质环境等多方位本底调查并评估海域是否满足目标种所需环境。基于现场环境特点决定改良方法, 营造适宜栖息地, 并通过食物网链优化调控和行为驯化等技术诱导目标种进入营造的适宜区^[37], 以实现目标物种资源增殖的目的。

可持续探索阶段 2017年日本制订了《海洋科技研发计划》, 提出高质量建设海洋牧场和可持续发展渔业^[38], 日本海洋牧场建设开始向深远海拓展^[39], 开展了基于营造上升流以提高海域生产力为目的的海底山脉的生态学研究^[40-41], 同时开展了深度超过100 m水深海域的以诱集和增殖中上层鱼类及洄游性鱼类为主的大型、超大型鱼礁的研发^[42]。韩国海洋牧场建设计划30年内实行“三步走”战略, 即“示范区建设-建设权和经营权下放-全海岸海洋牧场化”, 全面推进韩国海洋牧场建设^[43], 计划到2030年共建设350 km²的海藻场。截止2024年11月, 我国已建成国家级海洋牧场示范区189个, 合计用海面积2652.93 km²。随着海洋牧场人工鱼礁生境的规模扩大和产业需求, 人工鱼礁的功能也已逐渐从鱼类增殖向兼具资源养护、生境修复和可持续产出复合功能转变, 因此如何保

持其生态可持续性是很重要的研究课题, 通过研究人工鱼礁生境营造对目标物种资源的增殖效果, 以及增殖是否可持续, 探究对资源环境的长期潜在影响, 并探讨构建针对目标物种的全生活史的适宜性多元生境。

2 海洋牧场人工鱼礁生境物理和生物环境变化

我国海洋牧场人工生境营造主要方式为人工鱼礁(集鱼礁、产卵礁、藻礁、浮鱼礁、珊瑚礁、牡蛎礁等)、海藻场等^[44], 通过人工鱼礁营造和改善生境条件、助力渔业资源增殖养护的技术路径可归纳为以下三种模式: 底质重构模式-海珍品增殖、生境补强模式-岩礁鱼类增殖、流场营造模式-中上层和底层鱼类增殖(图3~图5)。

底质重构模式-海珍品增殖: 以海珍品为目标物种, 通过投石造礁、构建海藻场等改善底栖环境, 创造适宜海珍品栖息的底栖场所, 并最终实现海珍品底播增殖的目标。在条件适宜的情况下, 可兼顾进行钢筋混凝土结构人工鱼礁的投放。

生境补强模式-岩礁鱼类增殖: 以岩礁性鱼类为目标物种, 基于其栖息地现状, 采取相应的改造措施, 具体而言, 通过在岛礁边缘投放并建造藻礁、藻场等岩相生境补强措施, 以延

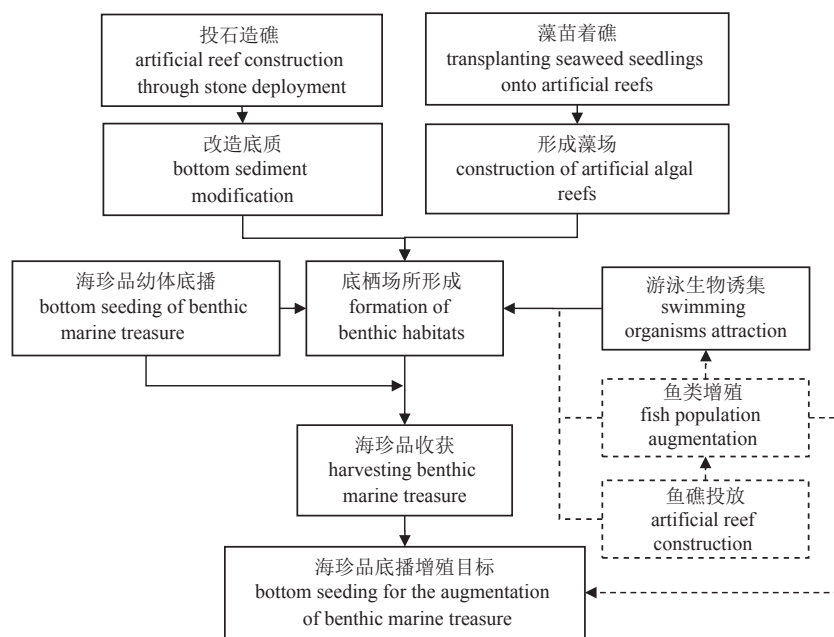


图3 底质重构模式-海珍品增殖

Fig. 3 Bottom material reconstruction mode-marine treasure proliferation

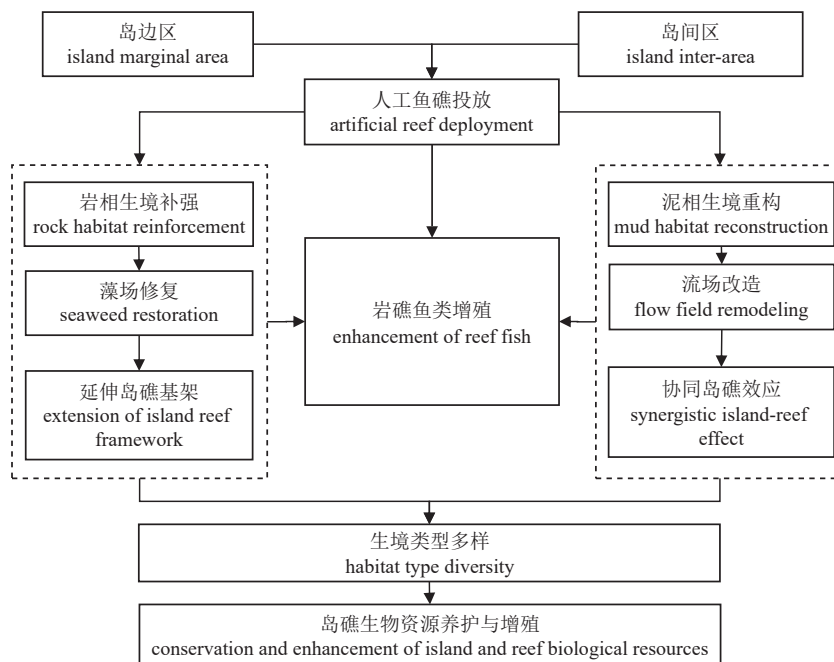


图 4 生境补强模式-岩礁鱼类增殖

Fig. 4 Habitat reinforcement model-reef fish enhancement

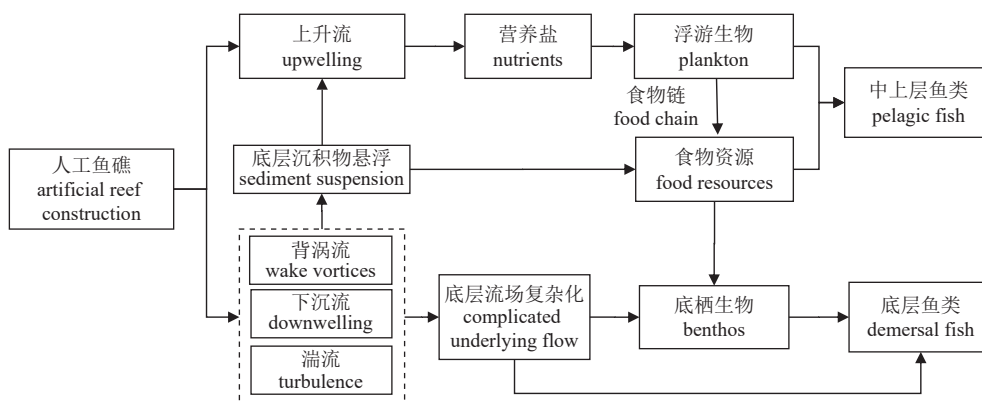


图 5 流场营造模式-中上层和底层鱼类增殖模式

Fig. 5 Current creation mode-pelagic and demersal fish enhancement mode

伸岛礁边缘基架；对岛礁之间的泥地等底质进行生境重构，通过人工鱼礁建设，形成适宜多物种共存的流场，促使岛礁之间形成生态连通、岛礁协调效应，为恋礁性和趋礁性鱼类提供适宜的栖息地，实现岩礁性鱼类的增殖，同时可形成类型多样的生境，进而实现岛礁生物资源养护与增殖。

流场营造模式-中上层和底层鱼类增殖：以中上层和底层鱼类为目标物种，基于目标鱼类的生态习性和行为特征，通过投放人工鱼礁营造强度适宜的上升流、背涡流、下沉流和湍流等，改变的流场有助于底部沉积物的再悬浮，

在上升流的作用下，将底层营养盐输送至中上层，促进浮游生物丰度和生物量增加，通过食物链的传递机制促进中上层鱼类的增殖；底层流的改变可以增加底栖生态系统的复杂性，为底栖生物如软体动物、甲壳类和底栖鱼类提供更多的栖息地。这种环境变化有利于底栖生物的捕食、繁殖和避难，同时可提供更多的食物来源给底栖滤食者，进而促进底层鱼类的增殖。

2.1 人工鱼礁生境物理环境变化

人工鱼礁一般为透水的人工构筑物，其投放后对局部海流会引起一定程度的阻碍，进而导致礁区周边流场发生显著变化，形成新的流

场分布(图 6, 图中红点表示营养盐), 随着礁区周边水动力物理环境发生变化, 生物环境也将经历一系列变化^[45], 流场效应的强弱决定了海域营养盐和初级生产力水平。海流流经人工鱼礁礁体, 在礁体的迎流面和上部形成上升流, 与此同时, 在礁体背面形成背涡流, 从而形成缓流区和滞留区^[46]。肖荣等^[47]研究表明, 人工鱼礁迎流面上升流最大高度为礁高的 2.27~3.73 倍, 上升流最大速度与来流速度之比为 0.40~0.72, 上升流平均速度与来流速度之比为 0.10~0.17, 上升流促进了海域表、底层之间的水体交换^[48], 将海底相对丰富的营养盐和相对低温的海水带至中上层, 补充了中上层水体的营养盐, 加快了营养物质的循环, 提高了海域初级生产力, 提升了海域浮游生物等鱼类的饵料生物丰度^[49]。海流流动特性的变化, 将影响礁体周围及其内部的沉积物、泥沙分布^[50], 缓流区背涡流流速较缓的特点为岩礁性鱼类提供了繁殖休憩的场所, 有利于渔业生物的聚集^[51]。

人工鱼礁投放后除了流向、流速等物理流场因素发生变化, 还会使其周围的光(礁体产生的阴影)、声(流场变化产生的振动等)、味(礁体材料物质释放)等非生物环境因素发生变化^[52]。礁体材料经过长时间的水中浸泡会释放出水溶性的物质, 夹杂礁区渔业生物的代谢物, 在水流作用下进行扩散, 改变了海域原有的味觉环境。人工鱼礁区水动力变化, 使得底床沉积物

中细粒径泥沙颗粒在水流作用下被冲刷、搬运, 从而导致人工鱼礁礁体附近的底质沉积物大多是粗粒径泥沙^[53-54]。

国内学者对已建人工鱼礁区的水动力等物理环境进行了跟踪监测, 莱州湾人工鱼礁区底层流速较表层减小了约 30%^[55]。大连大长山岛海域人工鱼礁区海流流速变化最大可达 0.23 m/s^[56]。南黄海人工鱼礁区水域流速减幅在 0.01~0.07 m/s, 影响范围边界距礁群 11.4~15.1 km, 鱼礁群内部流速减弱, 冲刷坑范围约为礁体范围的 2 倍^[57]。惠州东山海人工鱼礁区整体余流呈减小趋势, 迎流面有明显上升流, 最大可达 1.2 cm/s, 礁区后部则出现下降流^[58]。千里岩岛西部人工鱼礁区产生的阻流效果可达 0.4 m/s, 礁区内部余流流速减少均值在 0.01 m/s, 工程区域外周边海域余流流速整体增大, 最大增值大于 0.1 m/s^[59]。南麂列岛人工鱼礁区礁体对海流阻力与流速呈幂函数关系, 在流速 $v = 0.35$ m/s 时的阻力差比值最低^[60]。

浮式鱼礁是继底置人工鱼礁后出现的一种放置在水体表面并浮在水面上的人工构筑物结构, 旨在提供鱼类栖息、繁衍和觅食的场所, 主要用于养护增殖中上层鱼类或底栖鱼类的鱼卵仔鱼^[61]。与底置人工鱼礁主要产生流场效应的特征不同, 浮式鱼礁对水域环境的影响主要体现在阴影效应方面, 浮式鱼礁结构对光线产生遮蔽, 从而在礁区形成阴影区, 阴影区的范围和形状与水体透明度、礁区布局、礁体规格

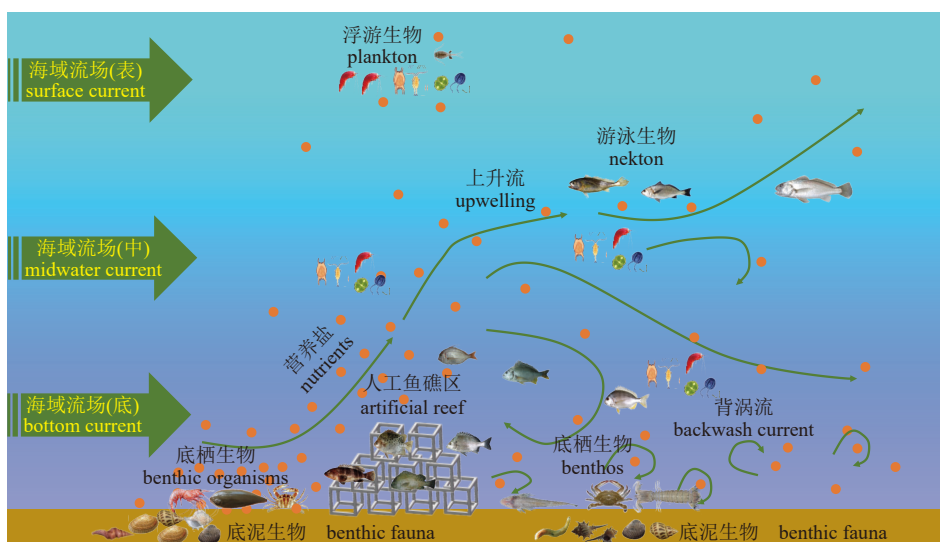


图 6 人工鱼礁区流场变化示意图

Fig. 6 Structure diagram of current changes in artificial reef areas

呈正比。目前我国对浮式鱼礁研究主要聚焦于礁体的功能性, 主要为浮鱼礁的整体设计和结构优化, 浮鱼礁建设对流场影响的有关研究较少, 王江涛^[62]研究表明, 柔性浮鱼礁可以为鱼类提供食物、增加阴影面积、提供栖息场所。张丽珍等^[63]提出浮式鱼礁在设计时需注重其为水生生物提供阴影等功效。

2.2 人工鱼礁生境生物资源变化

人工鱼礁营造引发的海域理化环境变化将对生物群落结构、生物量和多样性等产生影响(图7)。流场环境的改变带动海底营养盐向中上层输送, 提高了海域初级生产力, 增加了浮游生物和小型鱼类的饵料生物量^[64], 这促使物质和能量沿食物链循环传递, 进而增加了礁区渔业资源密度^[65]。国内学者的跟踪监测显示, 不同鱼礁区的浮游生物变动表现出区域差异, 其中獐子岛近岸人工鱼礁区的浮游幼虫种类数增加了12.5%, 礁区浮游动物呈现出资源增殖和结构优化的趋势^[66-67]。在大亚湾人工鱼礁区, 浮游动物的栖息密度与叶绿素 *a* 呈正相关^[68], 浮游植物和浮游动物数量有显著提升^[69], 群落结构由单优势种逐渐过渡到多优势种^[70]。

底栖动物因其迁移能力较弱、生命周期长且群落结构复杂, 在人工鱼礁区变化中发挥重要指示作用^[71-72]。在不同地区的研究中, 底栖

动物群落功能多样性、生物量、丰富度和均匀度均呈现出比鱼礁区相对较高的水平。例如, 芙蓉岛海域的鱼礁区底栖生物多样性随着礁龄呈递增趋势^[73-74]。在莱州湾金城人工鱼礁区, 底栖动物生物量增量达55%^[75]。在象山港人工鱼礁区, 底栖动物资源密度是整个港区平均值的3.5倍, 多样性指数和丰富度指数高于全港区^[76], 而杨梅坑人工鱼礁区的底栖生物种类数在建礁前增加了70%, 优势种由1种转变为3种^[77]。

人工鱼礁礁体表面为附着生物提供了附着基, 也为鱼类产卵提供了场所。附着生物的丰富度和多样性越高, 吸引的生物数量和种类也越丰富^[78]。鱼礁的透空性和阴影效应为鱼类的避敌、集群和栖息提供了空间, 导致鱼礁区内生物多样性显著高于周边海域。研究表明, 人工鱼礁对游泳生物资源密度有正促进效应^[79], 这一效应在一些地区的周边海域达到了4 km^[80]。人工鱼礁区渔业资源丰度在不同地区呈现出不同的变化趋势, 包括资源增加、种类丰富度提高以及鱼类代替甲壳类成为优势种等^[81-84]。

我国对浮式人工鱼礁的渔业资源增殖效果研究有限, 仅2005年陈丕茂^[85]对中山海域浮式人工鱼礁的增殖效果进行了初步探讨, 研究发现, 浮式鱼礁表面附着了丰富的藻类等附着生物, 吸引了幼鱼和幼虾的集聚, 使得浮式鱼礁

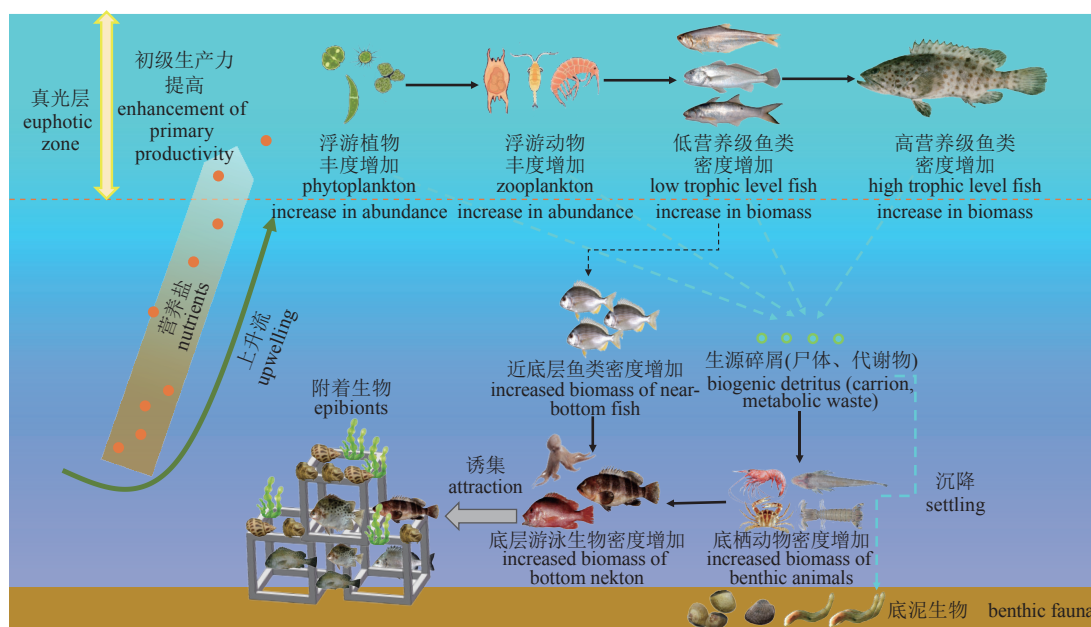


图7 人工鱼礁区生物增殖效应变化过程示意图

Fig. 7 Structure diagram of the variations in biological enhancement effects in artificial reef areas

区的幼鱼和幼虾的种类比例明显高于对比区。这表明浮式人工鱼礁可能对渔业资源的繁殖和聚集产生积极影响。然而, 由于相关研究仍较为有限, 深入系统的研究仍待开展, 以全面了解浮式人工鱼礁在我国海洋牧场人工生境营造中的实际效果及潜在影响。

3 海洋牧场人工鱼礁生境营造生态学理论框架

海洋牧场作为一种基于生态系统的可持续发展渔业模式, 其核心目标在于实现渔业的稳定和可持续发展。因此, 在海洋牧场人工鱼礁生境营造中应以增殖对象(即目标物种)为中心, 专注于为其提供或改善所需的非生物条件(如流场、营养盐和底质)及生物条件(如饵料、协同物种等), 以满足其生命周期各阶段的生态需求。

为了构建海洋牧场人工鱼礁生境的生态学理论框架, 笔者提出3个步骤: 首先, 搭建海洋牧场人工鱼礁生境的基本结构, 确保其符合目标物种的生态需求; 其次, 明确需遵循的理论基础, 包括生态学、海洋学和渔业科学等领域的理论原则; 最后, 构建以实现资源增殖养护功能为目标的理论框架, 以确保人工鱼礁生

境在长期运营中能够维持稳定的生态平衡。

3.1 海洋牧场人工鱼礁生境基本结构

海洋牧场人工鱼礁生境的设计必须具备多项功能, 以满足目标物种在生命周期各个阶段的生物学需求。其核心在于围绕海洋牧场的目标物种, 营造出适宜其生存、生长和繁殖等阶段的场所。在此基础上, 必须明确人工鱼礁生境的功能和规模, 并实施相应的建设。新建的人工鱼礁生境应当弥补一些天然生境所不具备的生态功能, 以发挥功能补强和相互促进的效果。因此, 笔者认为海洋牧场人工鱼礁生境的基础单元包括3个要素: 目标物种、功能和规模。在营造过程中, 应注重这些要素的协同作用, 确保人工鱼礁生境能够为目标物种提供理想的生态环境(图8)。

目标物种在海洋牧场生态系统中扮演关键生态功能的角色, 并具备可持续产出渔业经济价值的功能, 通过食物网连接各营养级生物类群。海洋牧场人工鱼礁生境的营造旨在满足目标物种在不同生命阶段对“生物-非生物”环境的特定需求。

在海洋生态系统中, 各生物种群经过长期竞争、适应和演化等生态过程, 形成了各自的

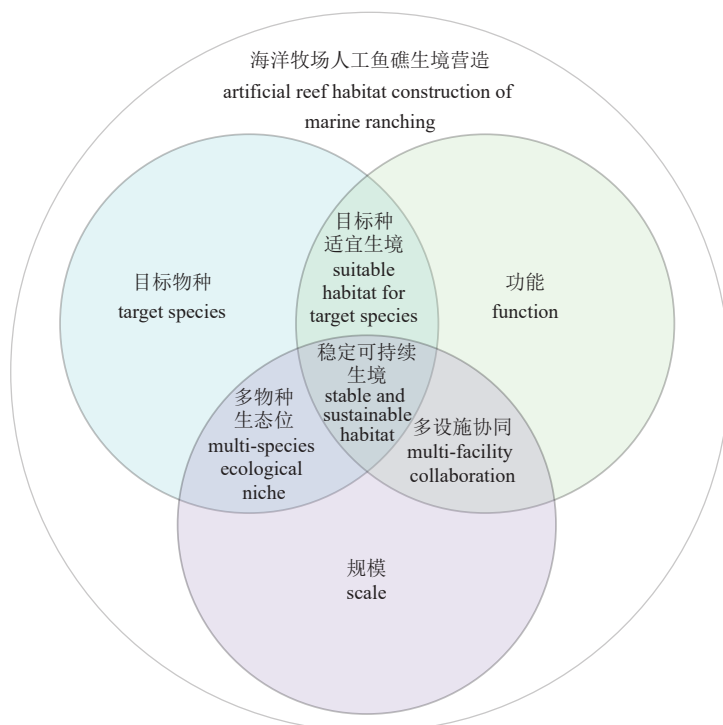


图8 海洋牧场人工鱼礁生境营造基本单元理念图

Fig. 8 Conceptual diagram of fundamental units of artificial reef habitat construction in marine ranching

生态位^[86]。海洋生物会表现出迁移至能满足其生理需求场所的行为, 在人工鱼礁区, 水平方向上, 流场环境的变化会对鱼类趋礁行为和分布产生影响, 鱼类趋向分布在可为其提供更有利栖息、避敌和索饵的流场环境下^[87]。在垂直方向上, 底层、近底层和中上层鱼类存在较明显的分区, 由于人工鱼礁区上升流引起垂直方向上的营养盐分布不均, 不同物种对营养盐浓度需求各异, 这可能会促使各物种迁移到适宜的营养盐浓度区域^[88]。在针对目标物种营造海洋牧场人工鱼礁生境时, 该生境同时也必然会为其他某些物种提供适宜的场所。多物种占据各自的生态空间, 通过物质、能量和信息的交换, 实现海洋牧场物质和能量的多级利用, 以及目标物种的高效、持续产出。这一经过人工设计、规划和调控的人工鱼礁生境营造不仅增强了目标物种的生产效率, 还促进了海洋牧场生态系统功能的整体优化, 其基本结构可分为目标物种确定、规模量化和功能实现(图9)。

3.2 海洋牧场人工鱼礁生境营造理论基础

海水具有极强的流动性和连通性, 其物理、化学、生物等生态因子复杂多变, 海洋牧场人工鱼礁生境营造所引起的水体物理化学特性的变化会导致水环境中物质和营养元素分布发生

变化, 进而对生物群落产生影响。因此, 在人工鱼礁生境营造过程中, 应围绕最终实现目标, 遵循营造过程中各环节“生物-非生物”变动的理论, 通过技术手段, 调整策略和方案, 使得海洋牧场人工鱼礁生境营造最终实现资源增殖、生态平衡、渔业可持续的目的。

水动力学理论 水动力学理论在人工鱼礁生境营造中起到基础和关键的作用, 其基本观点和概念包括流体连续性、动量守恒和能量转换, 通过理解和应用这些水动力学原理, 可以优化鱼礁结构及布局, 确保其结构的稳定性, 同时促进有效的营养物质流动和生物群落的发展。海域的水动力特征尤其是由此引起的理化生物过程的耦合是海洋牧场人工鱼礁生境营造的基础。用于营造的底置人工鱼礁、浮式人工鱼礁等构筑物 and 设施、海藻场和海草床等的建设会直接或间接影响所在海域的水动力环境, 导致营养盐的输运和扩散、沉积物再悬浮等变化, 进而影响水质和底质环境^[89]。准确描述人工鱼礁生境营造区的流场效应, 量化其水文环境要素特征, 有助于为人工鱼礁生境营造中实现目标物种的协同分布提供有力支撑。

聚合种群理论 根据聚合种群理论, 生物种群在特定的环境条件下倾向于在某些区域

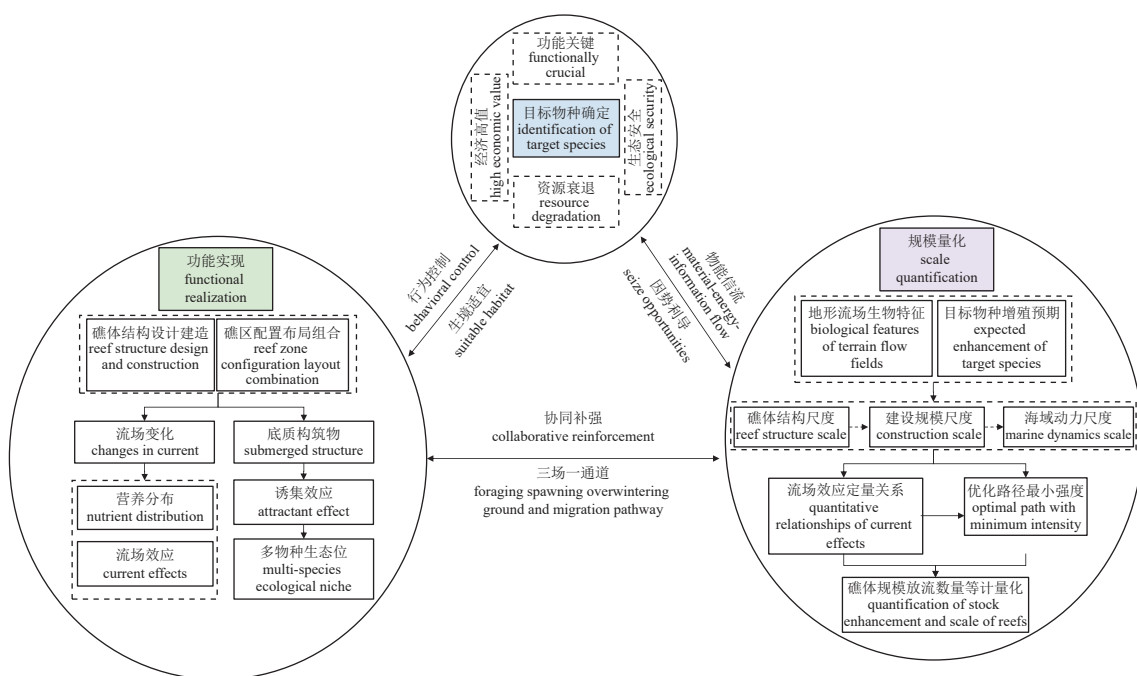


图9 海洋牧场人工鱼礁生境营造过程的结构示意图

Fig. 9 Structure diagram of the structural process of artificial reef habitat construction in marine ranching

聚集, 形成种群的空间格局。这种聚集是由于环境偏好、资源可用性或种内外相互作用等因素引起的。聚合种群理论强调了空间结构对生物群落动态的重要性, 认为通过物理结构和资源配置的优化, 可以显著影响生物种群的分布和生态行为。在海洋牧场人工鱼礁生境营造中, 该理论可以指导如何根据目标物种的生态习性设计营造不同类型的生境结构。海洋牧场人工鱼礁生境包括了底置鱼礁、浮式鱼礁、海藻场等多种生境类型, 同时海洋牧场周边可能存在岛屿等多种地貌特征, 由于海水的流动, 不同生境间相互连通, 存在种群生物体的迁移和营养物质的传输^[90]。空间在构建生态格局和塑造生态过程中具有重要的作用^[91], 海洋牧场人工鱼礁生境主要依据目标物种的生态习性进行营造, 营造过程中在水体空间中会形成具有多种流场形态、多种营养盐浓度、不同声光分布等区域, 不同习性的种群会分别聚集在适宜其生存的区域中, 形成了在空间上相对隔离但在功能上相互联系的状态。种群生物多样性、群落结构及生态系统稳定性维持对构建具有生态连通性的海洋牧场人工鱼礁生境具有十分重要的作用。

中度干扰理论 中度干扰假说认为, 在中等程度的干扰下, 物种会维持更高的生物多样性^[92], 其理论机制为在物种抗干扰和竞争能力之间有一个平衡, 当干扰的条件同时有利于竞争种和耐干扰种时, 群落丰富度达到最大; 如人工干扰强度小, 则由于优势种占据了资源和种群数量优势而排除竞争力弱的物种使得群落丰富度降低; 如干扰强度较大, 则会导致高竞争能力且抗干扰能力弱的物种数量减少或灭绝^[93]。有研究表明, 人类活动过度干扰的生境(如农田)多样性指数最低; 干扰较少的生境(如原生林)多样性指数略低^[94]; 中等频度的小尺度干扰强度下植被和草地覆盖度、净初级生产力和生物多样性数值最高^[95-96]; 大型底栖动物群落在中等干扰下表现出现最高的物种丰富度^[97-98]。人为干扰是资源环境在空间和时间上表现出异质性的主要原因^[99], 而空间异质性可增加物种多样性。在海洋牧场人工鱼礁生境中, 通过引入鱼礁、浮筏等人工构筑物及海藻场和海草床, 营造目标种适宜的局部流场、沉积环境和生源

要素, 最终形成一个具有物种共存及多样性稳定的局域群落。人为干扰下海洋牧场海域生物群落构建过程及其对人为干扰的响应规律和生物群落物种共存及多样性形成机制, 是明确海洋牧场人工生境营造强度、生物多样性维持和保护、合理开发利用的重要前提。

源汇系统理论 源汇系统理论提供了一个框架, 用于理解和分析生态系统中物质和能量的输入(源)与输出(汇)之间的动态平衡。这一理论在近海海洋碳循环研究中尤为重要, 近海区域作为一个活跃的碳库, 对大气净碳汇的贡献可达 0.2~0.4 pg C/a^[100], 同时积聚了丰富的生源、海源及陆源有机质^[101]。我国的海洋牧场建设主要集中在近岸 30 m 以浅的海域, 其人工鱼礁生境的营造不仅引起了局部海洋水动力环境的变化, 也对碳的生物地球化学循环产生了特异性影响。人工鱼礁区增殖的贝类、底栖动物、游泳生物等, 提升了生物固碳能力^[102], 海藻场和海草床建设则直接吸收了 CO₂ 和溶解的无机碳^[103], 从而实现了海洋牧场的碳汇功能。在沉积物-水界面, 营养盐的释放与沉积过程对碳循环起到了关键作用, 这一动态的物质交换提高了表层初级生产力, 但同时也可能使表层藻类和微生物的呼吸作用导致 CO₂ 重新进入大气, 从而使海洋牧场在一定条件下成为碳源。在人工鱼礁生境营造中, 遵循源汇系统理论, 从格局和过程的角度分析碳循环的动力过程的特征。通过分析源汇在空间上的平衡, 探讨有利于调控生态过程的途径和方法, 以降低局部碳源区的出现概率。

3.3 海洋牧场人工鱼礁生境营造理论框架

在构建海洋牧场人工鱼礁生境营造的理论框架时, 依据水动力学理论、聚合种群理论、中度干扰理论和源汇系统等理论, 特别是对海水流动性和连通性及其对生物群落影响的理解, 为海洋牧场的建设提供一个基础性、原理性的理论依据。其内容包含了目标物种、结构与功能、尺度与效应(图 10)。需考虑的因素涉及社会经济层、物种空间层和生态规则层(图 11), 在社会经济层面, 强调将渔业资源养护与可持续发展相协调; 在物种空间层面, 强调不同功能的生境场相互作用, 实现群落物种的共存和多样性; 在生态规则层面, 强调遵循生态

学规律和尺度效应, 以确保整体生态系统的长期健康和稳定。

该理论框架强调目标物种在人工鱼礁生境营造中的核心地位, 通过明确生境的结构、功

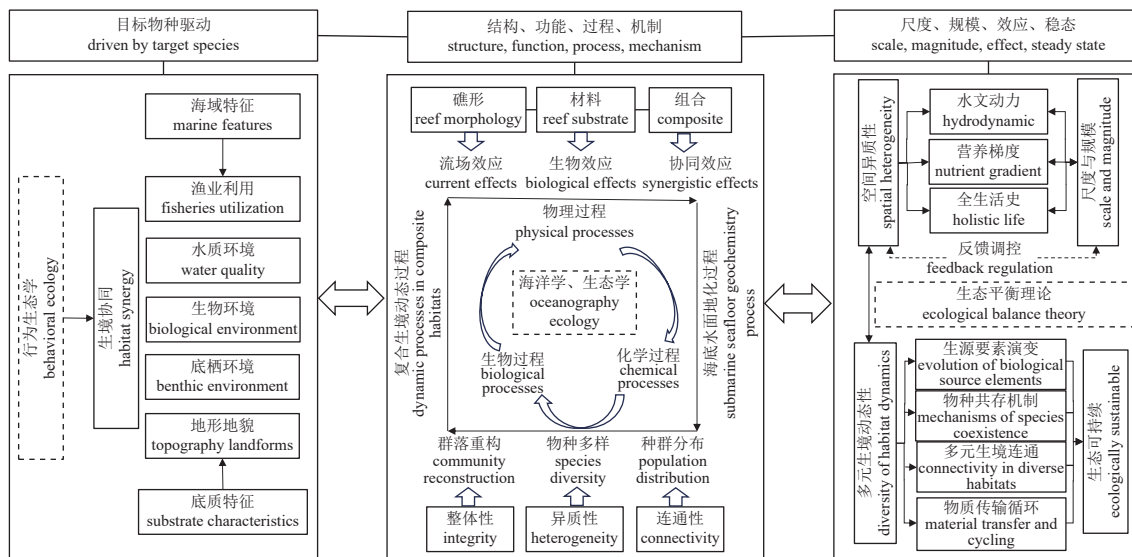


图 10 海洋牧场人工鱼礁生境营造理论框架

Fig. 10 Theoretical framework for artificial reef habitat construction of marine ranching

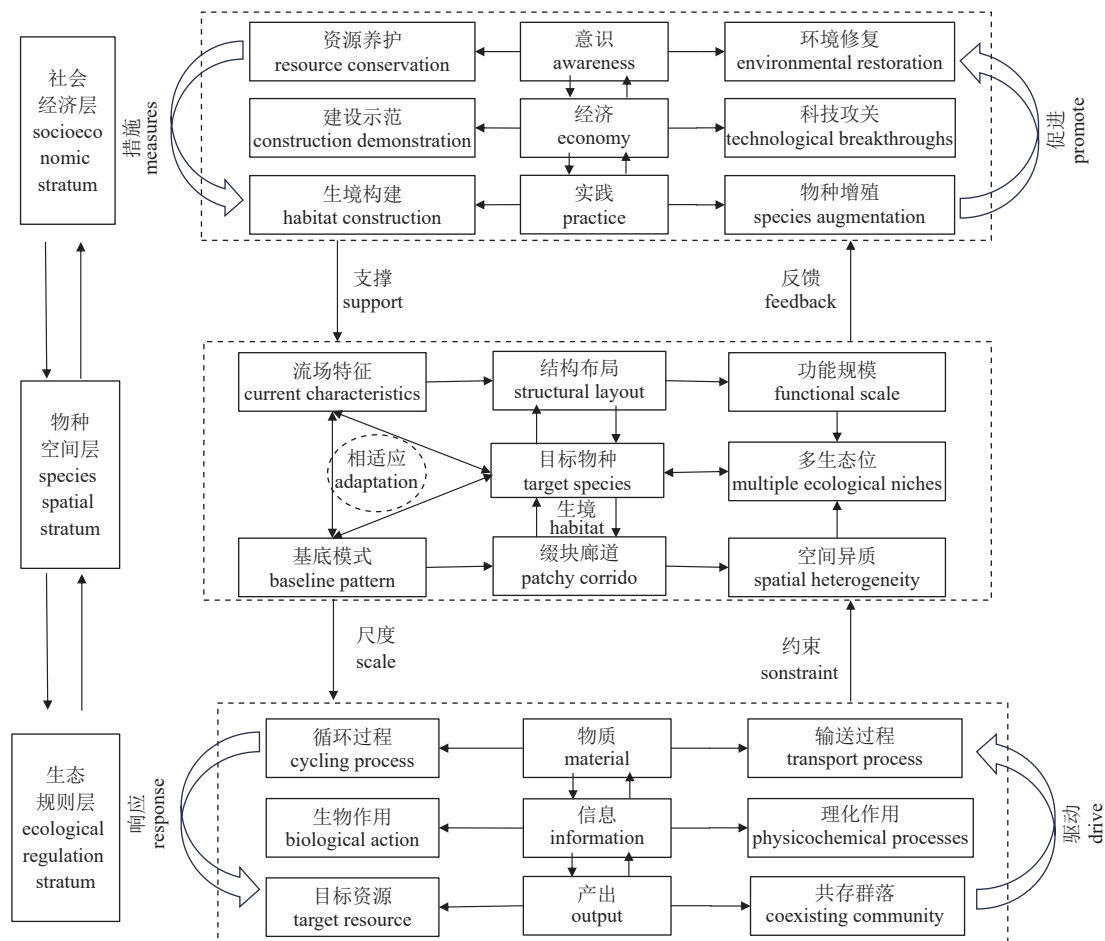


图 11 海洋牧场人工鱼礁生境营造理论框架涉及的因素

Fig. 11 Factors involved in the theoretical framework for the construction of artificial reef habitats in marine ranching

能和配置, 实现人工鱼礁生境生态系统的连通性、协同性和可持续性, 该理论框架为人工鱼礁生境的生态可持续性提供了理论基础。

目标物种适宜 依据聚合种群理论, 优化生境以满足特定物种的行为和生态习性, 确保在其生命周期各阶段均能得到支持。这包括对流场效应和礁体等物理结构的细致设计, 以增强生境中的生物多样性和生产力。海洋牧场人工鱼礁生境构建的核心目标是增殖目标物种和养护渔业资源。因此, 人工鱼礁生境的结构、功能和尺度必须充分考虑目标物种的行为和生态习性。在构建海洋牧场人工生境的理论框架中, 目标物种被视为驱动力。

目标物种是海洋牧场渔业产出的重要生物群体, 其可持续的产出也是人工鱼礁生境生态系统安全、稳定、持续、高产的主要体现。在人工鱼礁生境营造前, 应深入研究目标物种生态习性, 以满足其不同生命阶段对环境的需求。如以 I 型鱼类为目标物种的海洋牧场生境营造应尽可能增大礁体中空结构和表面积, 以提供更多的空间和接触表面积; 对于 II 型和 III 型

鱼类, 应加强礁区流场效应和上升流的设计(图 12)。此外, 为满足目标种幼体或卵的特殊需求, 应强化表层的上升流流场, 并在表层建设浮式鱼礁或海藻场, 以提供鱼卵附着和仔稚鱼栖息场所。人工鱼礁生境营造策略以满足目标物种的生态需求为原则, 从而提高产出效益和生态可持续性。

格局过程协同 海洋牧场人工鱼礁生境格局是指海域空间格局, 是人工鱼礁生境空间异性的具体表现, 同时也是各种生态过程在不同尺度上相互作用的结果。该格局对生态过程产生影响, 反过来也受生态过程的制约, 形成一个复杂而相互关联的系统。依据中度干扰理论, 设计人工干扰程度适度的生境, 以维持或增强生物多样性, 解析人工干扰和生物响应的机制, 有助于营造生态系统动态平衡的人工鱼礁生境, 其在空间格局中促进物质循环、能量流动和生物间的相互作用。海洋牧场人工鱼礁生境营造过程注重动态特征, 主要涵盖物质循环、能量流动、“生物-非生物”相互作用、生物体的传播、种群动态、群落演替等生态过程。

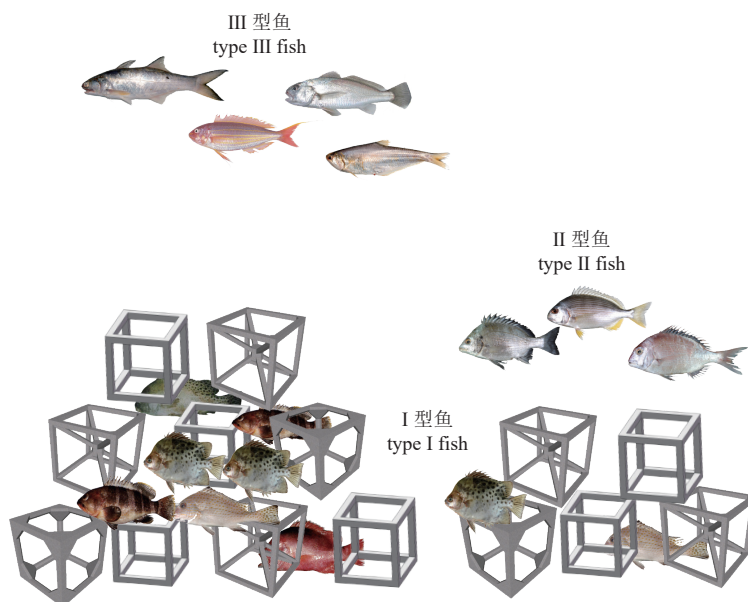


图 12 不同类型鱼类与人工鱼礁位置关系示意图

I 型鱼为恋礁性鱼类, 身体的某部位或大部分需接触鱼礁的贴礁种类; II 型鱼为趋礁性鱼类, 身体不接触鱼礁但在鱼礁周围游泳和海底栖息的趋礁种类; III 型鱼为洄游性鱼类, 在礁体表面以外的中上层空间活动, 且通常对礁体并不作出明显反应的洄游种类^[104]。

Fig. 12 Schematic diagram of the relationship between different types of fish and the location of artificial reefs

Type I species are categorized as reef-affiliated fish, which necessitate physical contact with the reef structure for a majority or specific parts of their bodies. Type II species are identified as reef-proximate fish, characterized by their presence in the vicinity of the reef without direct contact, typically engaging in swimming and benthic habitation around the reef. Type III species are defined as pelagic migratory fish that inhabit the pelagic zones above the reef and exhibit minimal to no direct interaction with the reef structure^[104].

这些过程的相互作用在格局上产生变化, 而格局的变化又反馈到各个过程中, 形成了一个相互依存的动态系统。

在围绕海洋牧场目标物种的行为和生态习性进行人工鱼礁生境营造时, 构筑物的结构和配置应主要考虑目标种的生活史需求。在营造前, 需要全面考虑水文动力、渔业结构、资源环境、底质地形、生源要素等因素。不同类型的生境构建, 如底置鱼礁、浮式鱼礁、海藻场、海草床等, 会引发一系列流场效应, 包括上升流、背涡流和湍流等^[105]。构筑物引发的水动力特征的变化将影响沉积泥沙、营养盐等物质的运输, 促进海底-水界面物质的交换和输运^[106]。

物质、能量以及环境的变化, 导致海域生物种群结构和生物量也会随之变化^[107], 人工鱼礁生境营造吸引了周边物种的扩散和进入, 在经历环境筛选、种群竞争等过程后, 形成一个新的局部生物群落, 这个局部生物群落应能实现海洋牧场人工鱼礁生境营造的预期目标和目标物种增殖。为了更好地理解这一过程, 需要深入了解人工干扰如何驱动物种的共存和多样性形成。因此, 必须掌握人工鱼礁生境营造海

域生物群落物种共存和多样性形成机制, 以及群落重构机制。基于这些机制和过程, 量化海洋牧场人工鱼礁生境构筑物的结构、功能和组合, 以实现预期的生境营造目标, 包括增殖物种的种类、数量和生态位等。

异质性连通性 海洋牧场作为小尺度生态系统, 其结构呈现复杂性和动态性, 其人工生境类型包括底置鱼礁、浮式鱼礁、海藻场和底播区等。不同海域的底质类型不同, 包括岩礁质、砂质、淤泥质和泥沙质等, 海域类型也相当多样, 涵盖了近岸海域、海湾海域、岛礁海域和开放海域等(图 13)。

应用水动力学理论, 通过分析和设计各种人工鱼礁结构, 调控流场流速、流向、强度等, 优化人工鱼礁生境内各群落的物质和能量流动, 以此增强生境的异质性和功能连通性, 从而有助于在地理和生态功能上实现生境的多样化, 提高生境的整体生态效能和稳定性。人工鱼礁生境的异质性具有多重生态学意义, 包括多物种共存、提升群落生产力和生物量、维持群落物种动态和生物多样性以及增加生态稳定性等。海洋牧场人工鱼礁生境的空间异质性主要表现

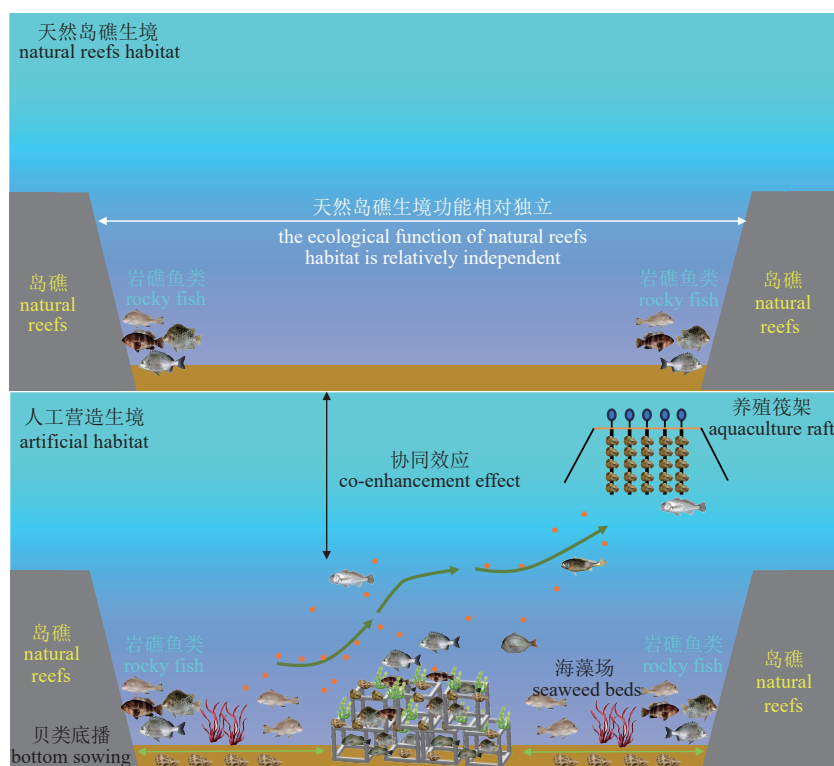


图 13 岛礁人工生境异质性和连通性示意图

Fig. 13 Diagram of heterogeneity and connectivity of artificial habitats in island reef-based marine ranching

在空间组成(各功能系统类型、种类、数量和面积比例)、空间结构(各功能系统空间分布、斑块大小、形状、连接度等)和空间相关(各功能系统的空间关联程度、空间梯度)等方面。研究表明,人工鱼礁的规模、礁龄和结构复杂程度均对生物群落结构产生影响^[108];贝-藻筏式养殖(浮式鱼礁)能显著改变大型底栖生物群落^[109-110],并诱集幼鱼^[111],而海藻场则对渔业生物的特定生长期具有重要过渡作用,尤其是对幼鱼的影响显著^[112];浮式鱼礁与底置鱼礁的协同联动效果良好,可以扩大鱼群的活动空间,提高对海洋资源的综合利用效率^[63]。因此,能为养护和增殖海洋牧场目标物种而发挥作用的专用或兼用设施可被视为海洋牧场人工生境的一种。基于目标物种的生态习性,结合底质类型和海域类型,遵循物质、能量流通途径和协同机制,进行生境的重构、补强或修复,是实现海洋牧场人工鱼礁生境优化的关键步骤,旨在提高人工鱼礁生境的适宜性,促进目标物种的繁衍和生态系统的可持续发展。

海水环境与陆地生境相比,缺乏清晰的边界和可辨识的地貌特征,展现出其固有的高度连通性。因海水连通性和流动性,其水文物理特征、化学物质分布以及生物群落组成均展现出显著的时空变化特征^[113],从而表现了海洋水体的功能多样性。在这个连通的环境中,渔业

生物的关键生态过程,如生存、栖息、生长和繁殖,不具备割裂条件,应按照一个整体的过程考虑(图 14)。渔业生物,尤其是鱼类,在其不同发育阶段对水温、水压、饵料生物、栖息空间等生活环境有着不同的需求。在海洋牧场人工鱼礁生境营造中,通过充分利用海域各功能区,确保目标物种在各个生命阶段都能够顺利完成其生活过程。梁振林等^[114]提出了“鱼类全生活史型海洋牧场”的理念,该理念旨在依据目标物种生命各阶段习性构建海洋牧场人工鱼礁生境,使目标物种能够在其中完成其全部或大部分生活史,包括胚胎期、仔鱼期、稚鱼期、幼鱼期、成鱼期、衰老期。

维持异质性和连通性是人工鱼礁生境稳定性的重要策略,其营造应从水文连通性、生态连通性和功能连通性的角度出发。具体而言,水文连通性是人工鱼礁生境构建的基础,而空间异质性则是水文连通性的具体表现形式;各异质性的生境区块共同组成了具备完整功能的人工鱼礁生境;健康的人工鱼礁生境应该具有在功能上的整体性和连续性,而生态连通则是海洋牧场人工鱼礁生境的最终形式。

区域生态平衡 海洋的生态平衡是一种动态平衡,具有自我调节功能,在平衡的生态系统内,物质输入输出基本保持平衡状态,具有复杂的食物链关系和营养层级,生物和非生

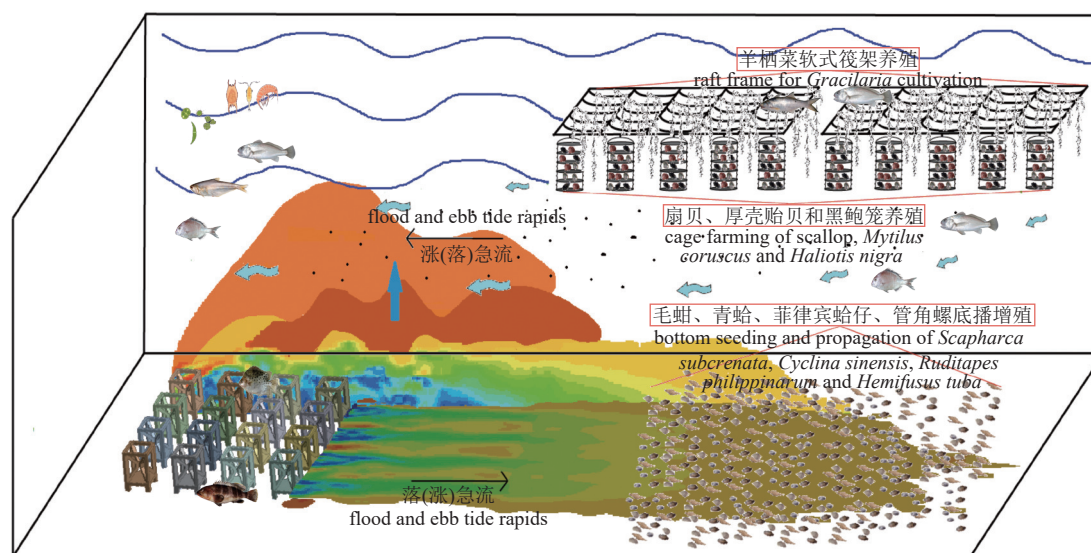


图 14 海洋牧场人工鱼礁生境营造多物种共存和多设施协同示意图

Fig. 14 Diagram of multi-species coexistence and multi-facility coordination for artificial reef habitat construction in marine ranching

物在结构和数量上基本保持稳定, 可抵抗一定程度的外来干扰^[15]。生态可持续是海洋牧场人工生境营造的最终目标, 即达到生态平衡状态, 这种平衡体现在物种数量和群落结构的动态稳定、生产力和抗干扰力的可持续方面, 依赖于系统内稳定的食物网和营养层级来维持物质循环和能量流动。

海洋牧场人工生境营造是围绕目标物种展开的, 应用源汇系统理论, 确保人工鱼礁生境中物质和能量输入输出的平衡, 支持一个可持续发展的生态系统, 其中包括复杂的食物网和生物群落结构的动态稳定, 因此, 人工鱼礁生境中各生态功能区应能满足目标物种不同生命阶段的需求, 同时还需要考虑与目标物种存在直接或间接生态关系、占据不同生态位的物种对生境的需求, 以提高生境的多样性, 丰富食物网, 增强鱼礁生境抵抗外界干扰的能力。通过充分利用空间效应, 构建多物种共存的群落, 可以避免大规模的单一物种增殖而诱发的病害和系统的脆弱, 以获得可持续的渔业产出。

为了维持海洋牧场人工鱼礁生境的生态平衡, 需要精确评估目标物种在不同生命阶段对物质、能量、环境的需求, 准确测算不同生态位之间的能量传递路径和通量。此外, 还需精细刻画各种构筑物流场效应和生源要素的空间分布特征, 分析不同生境斑块相对于目标物种的作用, 定量评估目标物种生存斑块与周边斑块之间的空间关系。

4 结语

人工鱼礁生境营造是海洋牧场建设的重要基础, 通过引入水动力学理论、聚合种群理论、中度干扰理论和源汇系统理论, 构建人工鱼礁生境营造的理论框架, 论述了如何通过科学的方法解决人工鱼礁生境营造过程中的关键问题, 即目标种的定位、构筑物的结构和功能以及尺度和规模的选择等方面的盲目性。具体内容可概括为目标种定位、生境结构和功能、生境尺度和规模三个方面。①目标种的定位, 聚合种群理论强调了根据特定环境条件优化生物种群聚集的重要性。通过研究目标物种的生态习性和环境偏好, 人工鱼礁生境的设计可以精确地适应这些生物的特定需求。例如, 通过选择适

合特定鱼类生活史阶段的地点(如产卵、育幼和成长地)来营造生境, 从而减少对目标物种定位的盲目性; ②生境结构和功能, 应用水动力学理论优化鱼礁的结构布局以适应水流动力特性, 如通过调整人工鱼礁等构筑物的形状、大小和布局来调控流场, 从而改善营养物质的流动和分布, 以增加生境的生物多样性和提高生境的生态效能和稳定性。③生境尺度和规模, 源汇系统理论提供了一个参考, 用于分析和优化人工鱼礁生境中物质和能量的输入与输出。在人工鱼礁生境营造中, 考虑整个生境的尺度和生境斑块间的功能连通性, 可以有效地调控生态过程, 确保生境生态系统功能的整体性和稳定性。通过科学的方法来设定生境的尺寸和规模, 避免了过去可能存在的盲目性。

海洋牧场人工鱼礁生境营造理论框架不仅解决了在人工生境营造过程中关于目标种定位、构筑物设计以及尺度选择的盲目性问题, 而且可提升生境营造的科学性和有效性, 使生境更能满足生物多样性保护和渔业资源增殖。

随着研究的深入和实践的不断验证, 将进一步推动海洋牧场人工鱼礁生境营造的生态学理论的完善, 为我国海洋牧场建设提供更为有效的理论依据, 促进海洋牧场的生态稳定和渔业可持续发展。

参考文献 (References):

- [1] 王栋梁, 余景, 陈丕茂. 海洋牧场建设技术研究进展 [J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(6): 7-11.
Wang D L, Yu J, Chen P M. Progress of technologies in marine ranching construction[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, 48(6): 7-11 (in Chinese).
- [2] 王宁, 田涛, 尹增强, 等. 景观视角下的海洋牧场多产业融合发展模式浅析 [J]. *海洋开发与管理*, 2021, 38(12): 26-31.
Wang N, Tian T, Yin Z Q, et al. The multi industry integration development mode of marine ranch from the perspective of landscape[J]. *Ocean Development and Management*, 2021, 38(12): 26-31 (in Chinese).
- [3] 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).
- [4] 中华人民共和国农业部. 海洋牧场分类: SC/T 9111-2017[S].

- 北京: 中国农业出版社, 2017.
- The Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Classification of marine ranching: SC/T 9111-2017[S]. Beijing: China Standards Press, 2017 (in Chinese).
- [5] 陈勇. 中国现代化海洋牧场研究与建设 [J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(2): 147-154.
- Chen Y. Research and construction of modern marine ranching in China: a review[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2020, 35(2): 147-154 (in Chinese).
- [6] 胡扬杰, 梁君, 徐汉祥, 等. 浙江省生态养护型海洋牧场建设现状、问题与未来 [J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2022, 41(5): 373-381.
- Hu Y J, Liang J, Xu H X, *et al.* Construction status, problems and future prospects of marine ranching in ecological conservation type in Zhejiang province[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science Edition), 2022, 41(5): 373-381 (in Chinese).
- [7] 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).
- [8] 袁华荣, 陈丕茂. 广东省海洋牧场发展现状、问题与对策 [J]. 广东农业科学, 2022, 49(7): 141-154.
- Yuan H R, Chen P M. Development status, problems and countermeasures of marine ranching in Guangdong province[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2022, 49(7): 141-154 (in Chinese).
- [9] 冯博轩, 许强, 孙春阳, 等. 浮鱼礁发展现状及其在南海海洋牧场中的应用展望 [J]. 渔业现代化, 2023, 50(3): 1-10.
- Feng B X, Xu Q, Sun C Y, *et al.* Development status of floating reef and its application prospect in marine ranching in the South China Sea[J]. *Fishery Modernization*, 2023, 50(3): 1-10 (in Chinese).
- [10] 章守宇, 刘书荣, 周曦杰, 等. 大型海藻生境的生态功能及其在海洋牧场应用中的探讨 [J]. 水产学报, 2019, 43(9): 2004-2014.
- Zhang S Y, Liu S R, Zhou X J, *et al.* Ecological function of seaweed-formed habitat and discussion of its application to sea ranching[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(9): 2004-2014 (in Chinese).
- [11] 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).
- [12] 谢笑艳, 陈丕茂, 佟飞, 等. 珠海外伶仃岛海域海洋牧场选址探讨 [J]. 南方水产科学, 2022, 18(5): 18-29.
- Xie X Y, Chen P M, Tong F, *et al.* Site selection of marine ranching in Wailingding Island sea area of Zhuhai[J]. *South China Fisheries Science*, 2022, 18(5): 18-29 (in Chinese).
- [13] 佟飞, 秦传新, 余景, 等. 粤东柘林湾溜牛人工鱼礁建设选址生态基础评价 [J]. 南方水产科学, 2016, 12(6): 25-32.
- Tong F, Qin C X, Yu J, *et al.* Ecological basis assessment of artificial reef site selection in Liuniu coastal waters of Zhelin Bay, Eastern Guangdong[J]. *South China Fisheries Science*, 2016, 12(6): 25-32 (in Chinese).
- [14] 耿文倩, 王庆, 战超, 等. 海洋牧场选址适宜性评估——以烟台北部海域为例 [J]. 海洋环境科学, 2023, 42(2): 302-308, 314.
- Geng W Q, Wang Q, Zhan C, *et al.* Suitability assessment of marine ranching site selection—a case study of Yantai northern sea area[J]. *Marine Environmental Science*, 2023, 42(2): 302-308, 314 (in Chinese).
- [15] 赵博轩, 李淑杰, 马剑, 等. 基于 INVEST 模型的吉林省生境质量评价 [J]. 东北师大学报(自然科学版), 2022, 54(2): 132-141.
- Zhao B X, Li S J, Ma J, *et al.* Evaluation of habitat quality in Jilin Province based on InVEST model[J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2022, 54(2): 132-141 (in Chinese).
- [16] Ables J R, McCommas D W Jr, Jones S L, *et al.* Effect of cotton plant size, host egg location, and location of parasite release on parasitism by *Trichogramma pretiosum*[J]. *Southwestern Entomologist*, 1980, 54: 261-264.
- [17] Lincoln D E, Newton T S, Ehrlich P R, *et al.* Coevolution of the checkerspot butterfly *Euphydryas chalcedona* and its larval food plant *Diplacus aurantiacus*: larval response to protein and leaf resin[J]. *Oecologia*, 1982, 52(2): 216-223.
- [18] Whittow J B. The penguin dictionary of physical geography[M]. London: Penguin, 1984.
- [19] Caughley G, Sinclair A R E. Wildlife ecology and management[M]. Boston: Blackwell Scientific Publications, 1994.
- [20] Dennis R L H, Shreeve T G. Butterflies on British and Irish Offshore Islands: ecology and biogeography[M]. Wallingford, Oxfordshire: GEM Publishing Company, 1996.
- [21] Calow P P. Blackwell's concise encyclopedia of environmental management[M]. Oxford: Blackwell Science, 1999.
- [22] Haslett S K. Coastal systems[M]. 2nd ed. London: Routledge, 2008.

- [23] Odum E P, Barrett G W. 生态学基础 [M]. 陆健健, 王伟, 王天慧, 等, 译. 北京: 高等教育出版社, 2009: 1-281.
Odum E P, Barrett G W. Fundamentals of ecology[M]. Lu J J, Wang W, Wang T H, *et al.* trans. Beijing: Higher Education Press, 2009: 1-281 (in Chinese).
- [24] 李延峰, 宋秀贤, 吴在兴, 等. 人类活动对海洋生态系统影响的空间量化评价——以莱州湾海域为例 [J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(1): 133-139.
Li Y F, Song X X, Wu Z X, *et al.* An integrated methodology for quantitative assessment on impact of human activities on marine ecosystems: a case study in Laizhou bay, China[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2015, 46(1): 133-139 (in Chinese).
- [25] 唐启升. 渔业资源增殖、海洋牧场、增殖渔业及其发展定位 [J]. 中国水产, 2019(5): 28-29.
Tang Q S. Fishery resource enhancement, marine ranching, proliferation fisheries and their development positioning[J]. China Fisheries, 2019(5): 28-29 (in Chinese).
- [26] Leber K M, Kitada S, Blankenship H L, *et al.* Stock enhancement and sea ranching: developments, pitfalls and opportunities[M]. 2nd ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2004: 1-244.
- [27] 徐恭昭. 海洋鱼类资源增殖研究的几个问题 [J]. 海洋科学, 1979(2): 1-6.
Xu G Z. Several issues on the enhancement of marine fish resources[J]. Marine Sciences, 1979(2): 1-6 (in Chinese).
- [28] 赵荣兴, 邱卫华. 日本栽培渔业的进展 [J]. 现代渔业信息, 2010, 25(9): 23-25.
Zhao R X, Qiu W H. Progress on cultivating fishery in Japan[J]. Modern Fisheries Information, 2010, 25(9): 23-25 (in Chinese).
- [29] 茹小尚, 邓贝妮, 冯其明, 等. 中外海洋牧场建设之比较 [J]. 水产学报, 2023, 47(11): 119508.
Ru X S, Deng B N, Feng Q M, *et al.* Comparison of marine ranching constructions between China and foreign countries[J]. Journal of Fisheries of China, 2023, 47(11): 119508 (in Chinese).
- [30] 冯雪, 范江海, 孙晓, 等. 珠海外伶仃人工鱼礁对鱼类资源养护效果初步评估 [J]. 南方农业学报, 2021, 52(12): 3228-3236.
Feng X, Fan J T, Sun X, *et al.* The stock enhancement effect evaluation of artificial reef in Wailingding, Zhuhai[J]. Journal of Southern Agriculture, 2021, 52(12): 3228-3236 (in Chinese).
- [31] 刘同渝. 国内外人工鱼礁建设状况 [J]. 渔业现代化, 2003(2): 36-37.
Liu T Y. Status of artificial reef construction worldwide and in China[J]. Fishery Modernization, 2003(2): 36-37 (in Chinese).
- [32] 陈丕茂, 舒黎明, 袁华荣, 等. 国内外海洋牧场发展历程与定义分类概述 [J]. 水产学报, 2019, 43(9): 1851-1869.
Chen P M, Shu L M, Yuan H R, *et al.* Review on development, definition and classification of marine ranching in domestic and overseas[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(9): 1851-1869 (in Chinese).
- [33] 冯顺楼. 开创海洋渔业新局面的一个重要措施——从我国海洋渔业潜在危机看“人工鱼礁”建设的必要性 [J]. 福建水产, 1983(4): 20-23.
Feng S L. An important measure to create a new situation in marine fisheries: the necessity of constructing "Artificial Reefs" from the potential crisis of China's marine fisheries[J]. Journal of Fujian Fisheries, 1983(4): 20-23 (in Chinese).
- [34] 冯顺楼. 发展人工鱼礁开辟海洋牧场是振兴我国海洋渔业的必然趋势 [J]. 现代渔业信息, 1989, 4(5): 3.
Feng S L. Developing artificial reef and opening sea ranching are an inexorable trend to vigorously develop marine fisheries in China[J]. Journal of Modern Fisheries Information, 1989, 4(5): 3 (in Chinese).
- [35] 李苗, 罗刚. 韩国海洋牧场建设经验与借鉴 [J]. 中国水产, 2020(3): 26-28.
Li M, Luo G. Experience and reference of South Korea's marine ranch construction[J]. China Fisheries, 2020(3): 26-28 (in Chinese).
- [36] Koike S, Otake S. The effect to the flow around the artificial reef in the different arrangement in situ[J]. Fisheries Engineering, 2017, 53(3): 139-147 (in Japanese).
- [37] Itosu C, Nakamura M, Chiba Y, *et al.* The use of a water mass curtain to control fish behavior for marine ranching[J]. Ocean Engineering, 1998, 25(4-5): 345-358.
- [38] 牛艺博, 董利苹, 王金平, 等. 国际海洋牧场技术发展态势及其启示 [J]. 世界科技研究与发展, 2020, 42(2): 160-171.
Niu Y B, Dong L P, Wang J P, *et al.* Patent situation analysis on marine ranching technology using bibliometrics methods and its enlightenment[J]. World Sci-Tech R & D, 2020, 42(2): 160-171 (in Chinese).
- [39] 丁德文, 索安宁. 现代海洋牧场建设的人工生态系统理论思考 [J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(9): 1335-1346.
Ding D W, Suo A N. Theoretical thinking of artificial ecosystem for modern marine ranching[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(9): 1335-1346 (in Chinese).
- [40] Nagamatsu T, Shima N. Experimental study on artificial upwelling device combined V-shaped structure with flexible underwater curtain[J]. Memoirs of Faculty of Fisheries, Kagoshima University, 2006, 55: 27-35.
- [41] Nakayama A, Yagi H, Fujii Y, *et al.* Evaluation of effect of artificial upwelling producing structure on lower-trophic pro-

- duction using simulation[J]. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, 2010, 66(1): 1131-1135.
- [42] 李永祺, 张鑫鑫. 对海洋生态学和生物海洋学的浅析 [J]. *海洋与湖沼*, 2021, 52(5): 1067-1074.
- Li Y Q, Zhang X X. Cognition on marine ecology and biological oceanography[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2021, 52(5): 1067-1074 (in Chinese).
- [43] Kim S K, Yoon S C, Youn S H, *et al.* Morphometric changes in the cultured starry flounder, *Platichthys stellatus*, in open marine ranching areas[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2013, 34(2): 197-204.
- [44] 马欢, 秦传新, 陈丕茂, 等. 柘林湾海洋牧场生态系统服务价值评估 [J]. *南方水产科学*, 2019, 15(1): 10-19.
- Ma H, Qin C X, Chen P M, *et al.* Valuation of ecosystem service of marine ranching in Zhelin Bay[J]. *South China Fisheries Science*, 2019, 15(1): 10-19 (in Chinese).
- [45] 唐衍力, 龙翔宇, 王欣欣, 等. 中国常用人工鱼礁流场效应的比较分析 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(8): 97-103.
- Tang Y L, Long X Y, Wang X X, *et al.* Comparative analysis on flow field effect of general artificial reefs in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(8): 97-103 (in Chinese).
- [46] 林军, 章守宇. 人工鱼礁物理稳定性及其生态效应的研究进展 [J]. *海洋渔业*, 2006, 28(3): 257-262.
- Lin J, Zhang S Y. Research advances on physical stability and ecological effects of artificial reef[J]. *Marine Fisheries*, 2006, 28(3): 257-262 (in Chinese).
- [47] 肖荣, 杨红. 人工鱼礁建设对福建霞浦海域营养盐运输的影响 [J]. *海洋科学*, 2016, 40(2): 94-101.
- Xiao R, Yang H. Influence of artificial reef construction on the transportation of nutrients in the off-shore area of Xiapu, Fujian[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(2): 94-101 (in Chinese).
- [48] 胡庆松, 谭赓灏, 李俊, 等. 沉降对多孔方型人工鱼礁流场效应影响的数值模拟 [J]. *上海海洋大学学报*, 2023, 32(1): 217-226.
- Hu Q S, Tan G H, Li J, *et al.* Numerical simulation of effect of settlement on flow field of porous square artificial reef[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2023, 32(1): 217-226 (in Chinese).
- [49] 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 Y H, Chen X, Meng S L, *et al.* Research progress of artificial reef construction and its mechanism[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(23): 138-144 (in Chinese).
- [50] 陈小艳, 谢琳, 王发云. 三亚湾海洋牧场人工鱼礁结构设计及稳定性分析 [J]. *海洋科学*, 2017, 41(10): 19-23.
- Chen X Y, Xie L, Wang F Y. Structure design and stability analysis of the artificial reef in marine ranching of Sanya Bay[J]. *Marine Sciences*, 2017, 41(10): 19-23 (in Chinese).
- [51] 白一冰, 张成刚, 罗小峰. 吕泗渔场人工鱼礁群流场效应及稳定性研究 [J]. *人民长江*, 2018, 49(8): 25-30.
- Bai Y B, Zhang C G, Luo X F. Research on flow field effect and stability of artificial reefs in Lusi fishing ground[J]. *Yangtze River*, 2018, 49(8): 25-30 (in Chinese).
- [52] 周艳波, 蔡文贵, 陈海刚, 等. 人工鱼礁生态诱集技术的机理及研究进展 [J]. *海洋渔业*, 2010, 32(2): 225-230.
- Zhou Y B, Cai W G, Chen H G, *et al.* The mechanism and research progress on fish attraction technique for artificial reefs[J]. *Marine Fisheries*, 2010, 32(2): 225-230 (in Chinese).
- [53] 舒安平, 王梦瑶, 秦际平, 等. 渤海湾典型人工鱼礁区域流场分布与海床泥沙起动特征 [J]. *水利学报*, 2020, 51(10): 1223-1233.
- Shu A P, Wang M Y, Qin J P, *et al.* The characteristics for flow field distribution and sediment incipient movement around the typical artificial reefs area in Bohai Bay[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(10): 1223-1233 (in Chinese).
- [54] Machado P M, De Sá F S, De Rezende C E, *et al.* Artificial reef impact on macrobenthic community on south-eastern Brazil coast[J]. *Marine Biodiversity Records*, 2013, 6: e40.
- [55] 邹涛, 张立斌, 张华, 等. 基于长期定点观测资料的莱州湾人工鱼礁建设区局地水动力特征 [J]. *海洋与湖沼*, 2018, 49(2): 280-289.
- Zou T, Zhang L B, Zhang H, *et al.* Hydrodynamic characteristics in the artificial reefing construction area in Laizhou bay: based on: a continuous long-term observation[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2018, 49(2): 280-289 (in Chinese).
- [56] 王清夷, 王煜嘉, 张明亮. 大连大长山岛海域人工鱼礁投放对水动力影响的三维数值模拟 [J]. *渔业研究*, 2022, 44(5): 415-425.
- Wang Q Y, Wang Y J, Zhang M L. Three-dimensional numerical modeling of the effects of artificial reef placement on hydrodynamics in the coastal waters of Dachangshan Island, Dalian City[J]. *Journal of Fisheries Research*, 2022, 44(5): 415-425 (in Chinese).
- [57] 刘针, 程永舟, 路川藤, 等. 南黄海人工鱼礁群局部冲刷对海域水动力的响应研究 [J]. *水道港口*, 2021, 42(5): 588-595.
- Liu Z, Cheng Y Z, Lu C T, *et al.* Response of local scour of artificial reefs to hydrodynamic forces in the southern Huanghai Sea[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2021, 42(5): 588-595 (in Chinese).
- [58] 陈钰祥, 黎小国, 佟飞, 等. 广东惠州东山海人工鱼礁对附近海域潮汐动力影响研究 [J]. *南方水产科学*, 2018, 14(6): 17-

26.
Chen Y X, Li X G, Tong F, *et al.* Impact of Dongshanhai artificial reef on hydrodynamics in nearby sea area in Huizhou, Guangdong Province[J]. *South China Fisheries Science*, 2018, 14(6): 17-26 (in Chinese).
- [59] 崔恩苹, 张永强, 祝琳, 等. 千里岩岛西部人工鱼礁建设对周边海域水动力影响的数值模拟 [J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(2): 10-20.
Cui E P, Zhang Y Q, Zhu L, *et al.* Numerical simulation of the influence of artificial reefs on marine hydrodynamics to the west of Qianliyan island[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2021, 37(2): 10-20 (in Chinese).
- [60] 叶功照, 王莹, 陈舜, 等. 南麂列岛海域两种框型人工鱼礁水动力性能试验 [J]. 渔业现代化, 2021, 48(1): 25-32.
Ye G Z, Wang Y, Chen S, *et al.* Experimental study on hydrodynamic performance of two frame-type artificial reefs in Nanji Islands waters[J]. *Fishery Modernization*, 2021, 48(1): 25-32 (in Chinese).
- [61] 张健, 潘昀, 冯德军, 等. 框架式浮鱼礁波浪水动力特性数值模拟研究 [J]. 渔业现代化, 2018, 45(2): 42-49.
Zhang J, Pan Y, Feng D J, *et al.* Study on numerical simulation of hydrodynamic property of frame-type floating reefs under wave action[J]. *Fishery Modernization*, 2018, 45(2): 42-49 (in Chinese).
- [62] 王江涛. 柔性浮鱼礁设计及水动力学特性分析 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
Wang J T. The design of flexible floating reef and its hydrodynamic characteristics analysis[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016 (in Chinese).
- [63] 张丽珍, 王江涛, 胡庆松, 等. 近海中层柔性浮鱼礁设计与应用 [J]. 上海海洋大学学报, 2016, 25(4): 613-619.
Zhang L Z, Wang J T, Hu Q S, *et al.* Design and application of offshore middle-upper-layer flexible floating reefs[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2016, 25(4): 613-619 (in Chinese).
- [64] Nunn A D, Tewson L H, Cowx I G. The foraging ecology of larval and juvenile fishes[J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2012, 22(2): 377-408.
- [65] Lima J S, Zalmon I R, Love M. Overview and trends of ecological and socioeconomic research on artificial reefs[J]. *Marine Environmental Research*, 2019, 145: 81-96.
- [66] 张皓宇, 刘汉超, 刘永虎, 等. 獐子岛近岸人工鱼礁区浮游动物群落结构特征 [J]. 水产科学, 2016, 35(5): 473-479.
Zhang H Y, Liu H C, Liu Y H, *et al.* Distribution characteristics of zooplankton community in artificial reef area in Zhangzi Island[J]. *Fisheries Science*, 2016, 35(5): 473-479 (in Chinese).
- [67] 陈涛, 王云龙, 廖勇. 象山港人工鱼礁区浮游动物种类组成及群落结构特征 [J]. 海洋科学, 2014, 38(7): 41-46.
Chen T, Wang Y L, Liao Y. The species composition and community structure of zooplankton in Xiangshan Bay[J]. *Marine Sciences*, 2014, 38(7): 41-46 (in Chinese).
- [68] 王亮根, 李亚芳, 杜飞雁, 等. 大亚湾人工鱼礁区和岛礁区浮游动物群落特征及对仔稚鱼的影响 [J]. 南方水产科学, 2018, 14(2): 41-50.
Wang L G, Li Y F, Du F Y, *et al.* Zooplankton community characteristics and impact on ichthyoplankton in artificial reefs and island reefs of Daya Bay[J]. *South China Fisheries Science*, 2018, 14(2): 41-50 (in Chinese).
- [69] Yu J, Chen P M, Tang D L, *et al.* Ecological effects of artificial reefs in Daya Bay of China observed from satellite and in situ measurements[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 55(9): 2315-2324.
- [70] 廖秀丽, 陈丕茂, 马胜伟, 等. 大亚湾杨梅坑海域投礁前后浮游植物群落结构及其与环境因子的关系 [J]. 南方水产科学, 2013, 9(5): 109-119.
Liao X L, Chen P M, Ma S W, *et al.* Community structure of phytoplankton and its relationship with environmental factors before and after construction of artificial reefs in Yangmeikeng, Daya Bay[J]. *South China Fisheries Science*, 2013, 9(5): 109-119 (in Chinese).
- [71] Chen Q, Yuan H R, Chen P M. Integrated response in taxonomic diversity and eco-exergy of macrobenthic faunal community to artificial reef construction in Daya Bay, China[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 101: 512-521.
- [72] Wong M C, Dowd M. Patterns in taxonomic and functional diversity of macrobenthic invertebrates across seagrass habitats: a case study in Atlantic Canada[J]. *Estuaries and Coasts*, 2015, 38(6): 2323-2336.
- [73] 詹启鹏, 董建宇, 孙昕, 等. 芙蓉岛海域人工鱼礁投放对大型底栖动物群落结构和功能性状的影响 [J]. 应用生态学报, 2023, 34(3): 796-804.
Zhan Q P, Dong J Y, Sun X, *et al.* Impacts of artificial reef on community structure and functional traits of macrobenthos near Furong Island, Shandong, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(3): 796-804 (in Chinese).
- [74] 张镇, 董建宇, 孙昕, 等. 莱州湾芙蓉岛人工鱼礁区大型底栖动物的营养结构特征 [J]. 水产学报, 2023, 47(9): 60-73.
Zhang Z, Dong J Y, Sun X, *et al.* Trophic structure of macrobenthos in artificial reef area of Furong Island, Laizhou Bay[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, 47(9): 60-73 (in Chinese).
- [75] 任彬彬, 袁伟, 孙坚强, 等. 莱州湾金城海域鱼礁投放后大型底栖动物群落变化 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1863-

- 1870.
- Ren B B, Yuan W, Sun J Q, *et al.* Impact of artificial reef on community of macrobenthos in Jincheng area of Laizhou Bay, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(6): 1863-1870 (in Chinese).
- [76] 廖一波, 曾江宁, 寿鹿, 等. 象山港人工鱼礁投放对大型底栖动物群落结构的影响 [J]. *海洋与湖沼*, 2014, 45(3): 487-495.
- Liao Y B, Zeng J N, Shou L, *et al.* Impact of artificial reef on macrobenthic community structure in Xiangshan Bay[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2014, 45(3): 487-495 (in Chinese).
- [77] 斯广杰, 陈丕茂, 杜飞雁, 等. 深圳杨梅坑人工鱼礁区投礁前后大型底栖动物种类组成的变化 [J]. *大连海洋大学学报*, 2010, 25(3): 243-247.
- Si G J, Chen P M, Du F Y, *et al.* Change in species composition of macrobenthic fauna before and after administration of artificial reefs in Yangmeikeng in Shenzhen[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2010, 25(3): 243-247 (in Chinese).
- [78] 刘鸿雁, 杨超杰, 张沛东, 等. 基于 Ecopath 模型的崂山湾人工鱼礁区生态系统结构和功能研究 [J]. *生态学报*, 2019, 39(11): 3926-3936.
- Liu H Y, Yang C J, Zhang P D, *et al.* An Ecopath evaluation of system structure and function for the Laoshan Bay artificial reef zone ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(11): 3926-3936 (in Chinese).
- [79] Yuan H R, Chen P M, Li X G. Taxonomic diversity and exergy changes in fishery resources associated with artificial reefs over 14 years in Daya Bay, China[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 1054933.
- [80] 王新萌, 唐衍力, 孙晓梅, 等. 威海小石岛人工鱼礁海域渔获物群落结构特征及其与环境因子相关性 [J]. *海洋科学*, 2016, 40(11): 34-43.
- Wang X M, Tang Y L, Sun X M, *et al.* Catch community structure characteristics and their relationships with environmental factors in the Xiao Shidao artificial-reef sea area of Weihai[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(11): 34-43 (in Chinese).
- [81] 董天威, 黄六一, 唐衍力, 等. 日照前三岛人工鱼礁对渔业资源影响的初步评价 [J]. *中国海洋大学学报 (自然科学版)*, 2015, 45(8): 38-45.
- Dong T W, Huang L Y, Tang Y L, *et al.* Preliminary evaluation of artificial reef around Rizhao Qiansan island on the enhancement of fishery resources[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2015, 45(8): 38-45 (in Chinese).
- [82] 曾雷, 唐振朝, 贾晓平, 等. 人工鱼礁对防城港海域小型岩礁性鱼类诱集效果研究 [J]. *中国水产科学*, 2019, 26(4): 783-795.
- Zeng L, Tang Z Z, Jia X P, *et al.* Study on the trapping effect of artificial reefs on small reef fishes in Fangchenggang Gulf[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2019, 26(4): 783-795 (in Chinese).
- [83] 王宏, 陈丕茂, 章守宇, 等. 人工鱼礁对渔业资源增殖的影响 [J]. *广东农业科学*, 2009(8): 18-21.
- Wang H, Chen P M, Zhang S Y, *et al.* Effect on fishery resources multiplication of artificial reefs[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2009(8): 18-21 (in Chinese).
- [84] 王文杰. 广东沿海五座人工鱼礁区建设效果评价 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
- Wang W J. Evaluation of effect of five artificial reefs area in coastal area of Guangdong[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018 (in Chinese).
- [85] 陈丕茂. 中山海域浮式试验鱼礁效果研究 [J]. *湛江海洋大学学报*, 2005, 25(3): 85-89.
- Chen P M. A study on the effect of floating test fish reef in Zhongshan sea area[J]. *Journal of Zhanjiang Ocean University*, 2005, 25(3): 85-89 (in Chinese).
- [86] 丁德文, 索安宁. 关于海洋人工生态系统理论范式的思考 [J]. *海洋环境科学*, 2021, 40(5): 653-658.
- Ding D W, Suo A N. On the theoretical paradigm of marine artificial ecosystem[J]. *Marine Environmental Science*, 2021, 40(5): 653-658 (in Chinese).
- [87] 席杨, 田涛, 杨军, 等. 许氏平鲉幼鱼在不同流场环境下的趋礁行为研究 [J]. *大连海洋大学学报*, 2020, 35(3): 399-406.
- Xi Y, Tian T, Yang J, *et al.* Reef approaching behavior of juvenile *Sebastes schlegeli* under different flow fields[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2020, 35(3): 399-406 (in Chinese).
- [88] 薛宇, 于浩林, 周广军, 等. 小竹山岛海洋牧场区营养盐分布特征及增殖养殖适宜性探究 [J]. *渔业科学进展*, 2023, 44(1): 1-12.
- Xue Y, Yu H L, Zhou G J, *et al.* Distribution characteristics of nutrients and suitability for aquaculture in marine ranching of Xiaozhushan Island, Bohai Sea[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2023, 44(1): 1-12 (in Chinese).
- [89] 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 X M, Ji Q Y, Hu C Y, *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 (in Chinese).
- [90] 杜建国, 叶观琼, 周秋麟, 等. 近海海洋生态连通性研究进展 [J]. *生态学报*, 2015, 35(21): 6923-6933.
- Du J G, Ye G Q, Zhou Q L, *et al.* Progress and prospects of coastal ecological connectivity studies[J]. *Acta Ecologica Sinica*

- ica, 2015, 35(21): 6923-6933 (in Chinese).
- [91] Morris D W. Earth's peeling veneer of life[J]. *Nature*, 1995, 373(6509): 25.
- [92] 刘艳红, 赵惠勋. 干扰与物种多样性维持理论研究进展 [J]. *北京林业大学学报*, 2000, 22(4): 101-105.
- Liu Y H, Zhao H X. Advances in theory of disturbance and species diversity preservation[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2000, 22(4): 101-105 (in Chinese).
- [93] 文陇英, 李仲芳. 干扰对物种多样性维持机制的影响 [J]. *西北师范大学学报 (自然科学版)*, 2006, 42(4): 87-91.
- Wen L Y, Li Z F. The effects of disturbance on maintaining mechanism of species diversity[J]. *Journal of Northwest Normal University (Natural Science Edition)*, 2006, 42(4): 87-91 (in Chinese).
- [94] 肖治术, 王玉山, 张知彬, 等. 都江堰地区小型哺乳动物群落与生境类型关系的初步研究 [J]. *生物多样性*, 2002, 10(2): 163-169.
- Xiao Z S, Wang Y S, Zhang Z B, *et al.* Preliminary studies on the relationships between communities of small mammals and habitat types in Dujiangyan Region, Sichuan[J]. *Biodiversity Science*, 2002, 10(2): 163-169 (in Chinese).
- [95] 孙玉真, 王志泰, 包玉, 等. 城市遗存山体植被群落特征对不同的人为干扰方式及强度的响应 [J]. *生态学报*, 2023, 43(11): 4632-4650.
- Sun Y Z, Wang Z T, Bao Y, *et al.* Response of plant community characteristics of urban remnant mountains to different ways and intensity of artificial disturbance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(11): 4632-4650 (in Chinese).
- [96] 罗天相, 刘莎. 中度放牧干扰对草地生物多样性影响的思考 [J]. *安徽农业科学*, 2007, 35(21): 6567-6568,6612.
- Luo T X, Liu S. Influence of the intermediate grazing disturbance on the biodiversity of grassland ecosystem[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(21): 6567-6568,6612 (in Chinese).
- [97] 田爽, 刘钢. 辽河流域大型底栖动物群落调查检验中度干扰假说 [J]. *江西水产科技*, 2022(1): 48-50.
- Tian S, Liu G. Investigation and testing of the moderate disturbance hypothesis on the community of macrobenthic animals in the Liaohe River Basin[J]. *Jiangxi Fishery Science and Technology*, 2022(1): 48-50 (in Chinese).
- [98] 秦珊, 崔建升, 剧泽佳, 等. 人为干扰条件下白洋淀底栖动物群落变化及其主要环境影响因子分析 [J]. *环境科学学报*, 2021, 41(3): 1123-1133.
- Qin S, Cui J S, Ju Z J, *et al.* Changes of benthic invertebrate community in the Baiyangdian Lake and analysis of main environmental factors under the condition of human disturbance[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(3): 1123-1133 (in Chinese).
- [99] Connell J H. Diversity in tropical rain forests and coral reefs[J]. *Science*, 1978, 199(4335): 1302-1310.
- [100] Bauer J E, Cai W J, Raymond P A, *et al.* The changing carbon cycle of the coastal ocean[J]. *Nature*, 2013, 504(7478): 61-70.
- [101] Li W, Gao K S. A marine secondary producer respire and feeds more in a high CO₂ ocean[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(4): 699-703.
- [102] 杨涛, 张秀梅, 赵强, 等. 烟台市碳汇型海洋牧场发展现状与策略 [J]. *安徽农业科学*, 2023, 51(12): 223-225.
- Yang T, Zhang X M, Zhao Q, *et al.* Development status and strategy of carbon sink marine ranching in Yantai[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2023, 51(12): 223-225 (in Chinese).
- [103] Sondak C F A, Chung I K. Potential blue carbon from coastal ecosystems in the Republic of Korea[J]. *Ocean Science Journal*, 2015, 50(1): 1-8.
- [104] Nakamura M. Evolution of artificial fishing reef concepts in Japan[J]. *Bulletin of Marine Science*, 1985, 37(1): 271-278.
- [105] Baine M. Artificial reefs: a review of their design, application, management and performance[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2001, 44(3-4): 241-259.
- [106] 胡博, 谭丽菊, 王江涛. 昌黎近岸海域扇贝养殖区沉积物-水界面溶解无机氮磷及尿素扩散通量研究 [J]. *海洋环境科学*, 2017, 36(6): 864-870.
- Hu B, Tan L J, Wang J T. Study on the diffusion fluxes of dissolved inorganic nitrogen phosphorus and urea across sediment-water interface in scallop culture area of Changli coastal waters[J]. *Marine Environmental Science*, 2017, 36(6): 864-870 (in Chinese).
- [107] 刘瑜, 罗帅, 张鹏, 等. 青海湖流域原生动动物群落结构及影响因素研究 [J]. *水生态学杂志*, 2023, 44(4): 1-9.
- Liu Y, Luo S, Zhang P, *et al.* Protozoan community structure and influencing factors in the Qinghai Lake Basin[J]. *Journal of Hydroecology*, 2023, 44(4): 1-9 (in Chinese).
- [108] Wu Z X, Tweedley J R, Loneragan N R, *et al.* Artificial reefs can mimic natural habitats for fish and macroinvertebrates in temperate coastal waters of the Yellow Sea[J]. *Ecological Engineering*, 2019, 139: 105579.
- [109] 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).
- [110] 杨艳云, 张继红, 吴文广, 等. 桑沟湾不同养殖区大型底栖动

- 物的群落结构特征 [J]. 水产学报, 2018, 42(6): 922-931.
- Yang Y Y, Zhang J H, Wu W G, *et al.* Macrobenthic community characteristics of different culture areas in Sanggou Bay[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, 42(6): 922-931 (in Chinese).
- [111] 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).
- [112] 章守宇, 汪振华, 林军, 等. 枸杞岛海藻场夏、秋季的渔业资源变化 [J]. *海洋水产研究*, 2007, 28(1): 45-52.
- Zhang S Y, Wang Z H, Lin J, *et al.* Variation of fisheries resources in summer and autumn in seaweed beds of Gouqi Island[J]. *Marine Fisheries Research*, 2007, 28(1): 45-52 (in Chinese).
- [113] 杨红生, 许帅, 林承刚, 等. 典型海域生境修复与生物资源养护研究进展与展望 [J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(4): 809-820.
- Yang H S, Xu S, Lin C G, *et al.* Research progress and prospects of restoration and resource conservation in typical sea areas[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(4): 809-820 (in Chinese).
- [114] 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).
- [115] 张耀辉. 生物多样性及生态平衡原理的探讨 [J]. *农业环境保护*, 1998, 17(5): 235-236.
- Zhang Y H. Study on the biological diversity and the principle of the equilibrium of ecosystem[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1998, 17(5): 235-236 (in Chinese).

Exploration of ecological theoretical framework for the creation of artificial reef habitat in marine ranching

YUAN Huarong^{1,2}, ZHANG Shouyu^{1*}, LIN Jun¹, FENG Xue², WANG Zhenhua¹,
TONG Fei², WANG Kai¹, CHEN Yuxiang², CHEN Pimao^{2*}

1. College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. Key Laboratory of Marine Ranching, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, China, Guangzhou 510300, China

Abstract: Marine ranching in China has been a pivotal strategy for developing the "blue granary" and restoring depleted nearshore fishery resources. The industry has seen significant growth, yet it is not without its challenges, such as unclear goals, ill-defined habitat functions and scales, and an incomplete understanding of the habitat systems, particularly due to a weak theoretical foundation. The construction of artificial reefs, a critical component of marine ranching, is essential for sustaining the growth and reproduction of target species. However, current practices in China have predominantly focused on physical suitability and engineering feasibility, often overlooking the ecological adaptability of target organisms, leading to insufficient ecological functionality. The purpose of this study is to address the ecological insufficiency in the construction of artificial reefs within China's marine ranching by establishing a theoretical framework that emphasizes the ecological adaptability of target species. This framework aims to guide the construction of artificial reefs that are not only physically suitable but also ecologically functional. The study reviews the development history of marine ranching both domestically and internationally, and discusses the physical and biological environments of artificial reefs in China's marine ranching. It innovates the basic structure of artificial reef habitats in China's marine ranching and explores the ecological theory underlying their construction. The research has developed a theoretical framework centered on target species, emphasizing the conformity of habitat structure and function, as well as the consistency between scale and effect. This framework provides a reference for the ecological sustainability of artificial reef habitats in China's marine ranching. The study concludes that a theoretical framework focusing on target species is essential for the ecological sustainability of artificial reef habitats in marine ranching. It is significant as it provides a scientific basis for improving the ecological functionality of artificial reefs, which is crucial for the long-term success of marine ranching initiatives. The recommendations include integrating ecological adaptability into the design and construction of artificial reefs, ensuring that habitat structures and functions align with the needs of target species, and maintaining a balance between scale and ecological effects. This approach is expected to enhance the ecological sustainability of China's marine ranching, contributing to the conservation and restoration of nearshore fishery resources. Furthermore, the study suggests that the future of marine ranching should be guided by technological innovation and ecological sustainability, leading to more efficient use of ocean resources while safeguarding marine ecosystems. The integration of digital monitoring tools and the development of advanced environmental monitoring and early warning systems are highlighted as key areas for future development.

Key words: marine ranching; artificial reef habitat; target species drivers; structure and function; scale and effect; theoretical framework

Corresponding authors: ZHANG Shouyu. E-mail: syzhang@shou.edu.cn;
CHEN Pimao. E-mail: chenpm@scsfri.ac.cn

Funding projects: National Key Research and Development Program of China (2019YFD0901303); Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS (2023TD06, 2021SD02); Guangdong Key Areas R & D Program Projects (2020B1111030002)