

DOI: 10.12131/20240171

文章编号: 2095-0780-(2024)05-0001-13

·综述·

海洋牧场建设效益评价研究进展与展望

袁华荣^{1,2}, 章守宇¹, 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, 广州 510300

摘要: 建设海洋牧场是中国海洋渔业转型升级的关键策略, 旨在通过人工干预的方式促进海洋渔业资源增殖和生态环境修复。人工鱼礁和增殖放流是海洋牧场建设的重要手段, 人工鱼礁通过改善海域生态环境为鱼类提供适宜的栖息地, 增殖放流则直接补充特定的海洋生物种群。文章综述了海洋牧场的发展历程、建设现状及效益评价方法, 分析了人工鱼礁的水下物理状态、流场效应、规模效应及其渔业增殖效应, 强调了科学布设的重要性; 总结了增殖放流标记回捕、统计量分析和模型分析等效应评估方法。尽管中国在这些领域已经取得了显著进展, 但仍面临人工鱼礁建设规模与生态效益的关系不明确、增殖放流效果评价的准确度有待提升以及缺乏成熟的定量评估模型等挑战。此外, 还提出了未来的研究方向及建议, 包括完善评价指标体系、强化技术创新、构建定量评估模型以及加强政策和管理指导等, 以期推动海洋牧场科研和实践的发展, 实现海洋渔业资源的可持续利用和海洋生态平衡。

关键词: 海洋牧场; 人工鱼礁; 增殖放流; 效果评估; 生态动态平衡; 可持续发展

中图分类号: S 953.2

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research progress and prospects on benefit assessment of marine ranching

YUAN Huarong^{1,2}, ZHANG Shouyu¹, CHEN Pimao²

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

2. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science/Key Laboratory of Marine Ranching, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510300, China

Abstract: Marine ranching is a key strategy for the transformation and upgrading of China's marine fisheries, aiming at promoting the proliferation of marine fisheries resources and ecological environment restoration through artificial intervention. Artificial reefs and stock enhancement are important ways for the construction of marine ranching. Artificial reefs enhance marine habitats, thereby providing niches conducive to the habitation of fish species, while stock enhancement initiatives serve to directly supplement populations of specific marine species. This paper reviews the developmental trajectory, current construction status and benefit evaluation methodologies of marine ranching. It provides an analysis of the underwater physical conditions, hydrodynamic effects, scale effects, and fisheries propagation effects associated with artificial reefs, emphasizing on the importance of their scientific deployment. The paper also summarizes methods for assessing the efficacy of stock enhancement, encompassing mark-recapture techniques, statistical analyses and model-based assessments. Although China has made signifi-

收稿日期: 2024-06-07; 修回日期: 2024-09-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0901303); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助(2023TD06); 中国水产科学研究院南海水产研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助(2021SD02); 广东省重点领域研发计划项目(2020B1111030002)

作者简介: 袁华荣(1987—), 男, 特聘副研究员, 博士研究生, 研究方向为海洋牧场与渔业资源保护利用。E-mail: yhr@scsfri.ac.cn

通信作者: 章守宇(1961—), 男, 教授, 博士, 研究方向为海洋牧场人工栖息地生态修复。E-mail: syzhang@shou.edu.cn

陈丕茂(1969—), 男, 研究员, 研究方向为海洋牧场资源养护。E-mail: chenpm@scsfri.ac.cn

cant progress in these areas, challenges persist, such as the unclear relationship between the scale of artificial reef construction and ecological benefits, the necessity for enhanced precision in evaluating the outcomes of stock enhancement, and the absence of sophisticated quantitative assessment models. Thus, the paper proposes future research directions and recommendations, including the enhancement of evaluative indicator systems, the intensification of technological innovation, the development of robust quantitative assessment models, and the strengthening of policy and managerial guidance, so as to promote the progression of marine ranching research and practice, thereby realize the sustainable utilization of marine fishery resources and the achievement of marine ecological balance.

Keywords: Marine ranching; Artificial reefs; Stock enhancement; Performance evaluation; Ecological dynamic balance; Sustainable development

海洋牧场已成为中国养护渔业资源、修复海洋生态、推动渔业转型升级及促进多产业融合的渔业新模式^[1-3]。当前和未来,中国都将处于海洋牧场建设和发展的关键时期^[4]。在《海洋科学百科全书》中,海洋牧场(Marine ranching)被描述为一种旨在增殖渔业资源的概念,其主要操作是投放人工鱼礁和增殖放流^[5-6]。即在适宜的海域,通过适度的人工干预来改善海洋生态环境,满足目标物种的某个或整个生命阶段的需求,促进渔业资源增殖,实现海域生态系统动态平衡和渔业可持续发展。海洋牧场的核心目标是渔业增殖,本质是一种可持续的渔业模式(SC/T 9111—2017《海洋牧场分类》),基本方式是营造适宜的人工生境和增殖放流等,而其发展理念是生态系统平衡^[7]。

中国海洋牧场建设主要涉及人工生境营造、增殖放流等措施^[8]。人工生境的营造方式主要有人工鱼礁^[9]、浮式鱼礁^[10]、海藻场、海草床和养殖筏架等^[11];增殖放流是实现海洋牧场增殖渔业的重要手段,通过人工方式,向海洋中释放水生经济生物的幼体或成体,快速补充特定海洋生物种群的数量^[12]。人工鱼礁和增殖放流是海洋牧场建设的关键环节,在海洋牧场生态系统构建和渔业资源养护增殖中发挥着决定性作用^[13-14],对其建设效果进行评价,对于指导海洋牧场的科学建设、实现海洋渔业资源的可持续利用、维持海洋牧场生态系统的平衡和提升经济效益具有重要意义。

尽管中国在海洋牧场人工鱼礁和增殖放流效果评价的技术方法研究上取得了一些重要突破,但仍面临着挑战和制约^[15],如人工鱼礁的建设规模与生态效益之间的定量关系尚未明确,增殖放流效果评价的准确度有待提升,以及缺乏成熟的海洋牧场定量评估模型等。针对这些问题,本文概述了海洋牧场的发展历程,分析了人工鱼礁和增殖放流效果评估的研究进展,总结了在评估这些建设效果中遇到的问题及其成因,并对未来的发展方向进行了展望,旨在推动海洋牧场科研和实践的发展,实现海洋渔业资源的可持续利用和海洋生态的平衡。

1 海洋牧场发展历程

海洋牧场起源于增殖渔业,因此国际上对其的定义主要围绕渔业增殖的概念展开^[16]。目前,欧美等国家的海洋牧场建设和研究主要集中在增殖放流上^[17],而东南亚等国家则更偏向人工生境营造。海洋牧场的发展是一个持续进化的过程,随着科技进步和对海洋生态系统理解的深入,其建设和管理方法正在不断地演进和完善。

1.1 海洋牧场起源

工业革命期间的技术进步极大地增强了渔船的捕捞能力,但随之而来的是海洋渔业资源的衰退。为应对这一问题,1860—1880年,日本、美国等国开展了鲑鱼增殖,之后增殖放流活动逐渐在全球范围内推广^[18];自1884年起,挪威等西方国家实施以渔业增殖为核心的“海鱼孵化运动(Sea ranching)”^[19];20世纪初,海洋经济鱼类增殖放流(Ocean ranching)得以实施^[20]。二战后,军用声呐技术的应用显著提高了渔船的捕捞效率,也导致了渔业资源的过度开发。1963年,为了应对近海渔业资源的衰退,日本提出了栽培渔业的概念^[21],并针对其国内重要的渔业资源,如真鲷(*Pagrus major*)和三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)等,启动种群增殖计划^[22]。1971年,日本在栽培渔业的基础上,提出了海洋牧场的概念并强调了生境系统重要性,成为首个将人工生境纳入海洋牧场建设的国家^[23](图1)。

1.2 海洋牧场建设

日本于1978—1987年在其沿海建设了长达5 000 km的人工鱼礁带^[24]。韩国自1971年起开始人工鱼礁研究,并在沿海地区进行建设。中国从20世纪70年代起开始进行近海增殖放流^[25],1979年在广西白龙珍珠湾开展人工鱼礁实验^[26];1983年冯顺楼^[27]提出建设人工鱼礁的建议并于1989年被采纳,成为我国海洋牧场建设的重要基础^[28]。20世纪90年代,日本和韩国分别提出栖息地网络和基于海洋地理学、生态系统的海洋牧场概念,并根据不同鱼类的栖息需求开发了相适宜的人工鱼礁^[29]。中国从2001年起

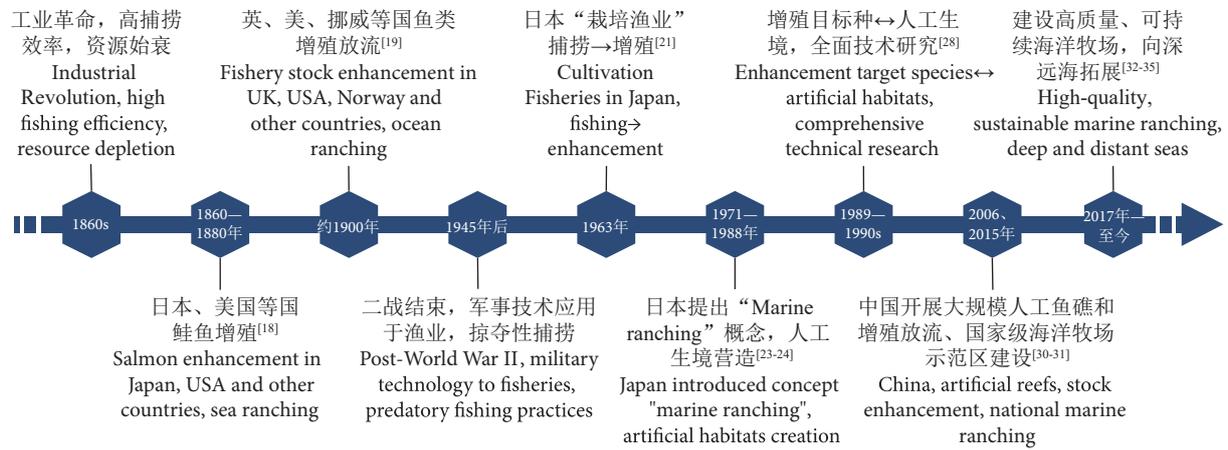


图1 海洋牧场发展历程

Fig. 1 Evolution of marine ranching

开始了大规模的人工鱼礁建设, 特别是在 2006 年《中国水生生物资源养护行动纲要》颁布实施后, 全国沿海城市积极开展人工鱼礁建设和增殖放流工作^[30]; 2015 年, 中国启动国家级海洋牧场示范区的创建工作^[31]。截至 2024 年 7 月, 国家级海洋牧场示范区 189 个, 总用海面积达到 2 652.93 km²。

1.3 海洋牧场发展

2017 年, 日本制定了《海洋科技研发计划》, 提出了海洋牧场建设的可持续性目标并向深远海拓展的战略^[32-33]; 基于海底山脉的生态学研究成果^[34-35], 日本研发了适用于水深超过 100 m 海域的大型和超大型人工鱼礁, 以诱集和增殖中上层鱼类和洄游性鱼类^[36]。韩国的海洋牧场发展遵循了为期 30 年的“三步走”战略, 逐步推进海洋牧场建设, 包括示范区建设、权利下放以及全海岸线的海洋牧场化^[37]。随着海洋牧场的发展, 其功能已逐渐从单纯的鱼类增殖转变为包含资源保护、生态修复和持续产出的多功能体系, 而对增殖放流策略优化^[38]和效果评估^[39]的研究工作仍在持续进行。

2 人工鱼礁效应评价

在国外, 人工鱼礁通常不被视为海洋牧场建设的基础, 而是作为一种补充手段来修复和改善生物栖息地。相较而言, 中国的海洋牧场建设则以人工鱼礁为基础。经过 40 多年的发展, 中国沿海人工鱼礁建设基本形成了 2 种模式: 一种是以山东、河北和辽宁等省为代表的“人工鱼礁+藻类礁+贝类+海胆”的生产型模式, 生产以海胆、鲍鱼、贝类、海参等为主的高经济价值海产品^[40]; 另一种是以广东、浙江、福建等省为代表的“生态型鱼礁+海藻场(海草床)+近岸岛礁”的公益性模式, 旨在养护和增殖渔业资源、修复海洋生态环境。人工鱼礁的流场效应、增殖效

应等, 一般通过单位鱼礁、鱼礁群等不同规模的形式实现; 在实际应用中, 人工鱼礁的分布状态, 包括其数量、形态和空间排列, 对达成预期的生态效应至关重要。通过科学合理的布设策略, 人工鱼礁能为鱼类等生物提供适宜的栖息场所, 促进其繁殖和生长, 实现渔业资源的养护和可持续利用^[41-42]。目前对人工鱼礁建设效果的评价主要集中在流场效应、规模效益和增殖效应等方面^[43-44]。人工鱼礁的水下物理状态决定了礁区的高度、布局和规模, 进而产生相应的流场效应, 最终决定了礁区的增殖效应(图 2)。

2.1 人工鱼礁水下物理状态评价

人工鱼礁的水下物理状态参数, 如地形、高度、位置和分布密度等, 对其生态效应产生直接影响^[45-46]。因此, 精确地控制这些参数对于海洋牧场的生境修复和资源养护至关重要。

最初, 人工鱼礁水下物理状态评估主要依赖于潜水直接观测和录像。这种方法虽然能够获取鱼礁的物理稳定性指标, 但由于潜水的范围、时间有限以及水下能见度不佳, 导致调查效率不高且效果不理想^[47], 因此在判定人工鱼礁投放后的物理状态上存在一定的局限性。目前, 声学技术已广泛应用于人工鱼礁水下物理状态的研究, 该技术能对礁区地形起伏度、礁体分布格局、礁体覆淤程度等关键物理稳定性指标进行勘测, 如通过侧扫声纳系统、多波束测深系统、双频声学识别声纳等先进设备(图 3), 可实现对礁区水下地形地貌的精确测量, 从而获取人工鱼礁的空间分布特征^[48-49]。

在实证研究中, 郭栋等^[50]使用双频识别声纳 Aris-1800 对辽宁省丹东东港大鹿岛海域内的人工鱼礁进行调查, 分别采用走航式和定点式观测方法对“M”型人工鱼礁进行多角度连续观测。沈天跃等^[51]利用 C3D 侧扫声纳系

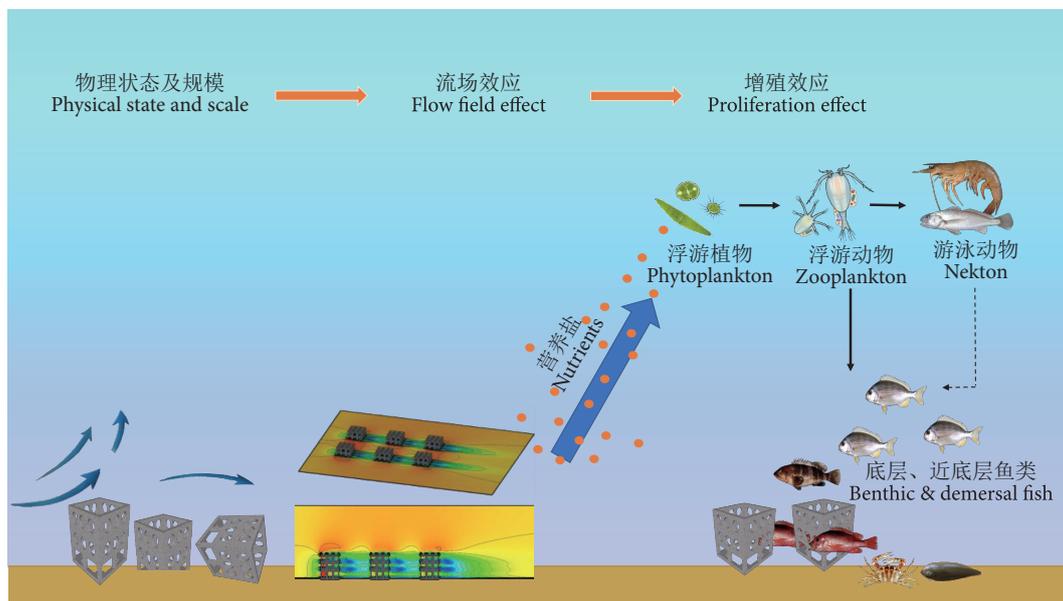


图2 人工鱼礁水下物理状态及规模、流场、增殖效应关系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of relationship among underwater physical state, scale, flow field and proliferation effects of artificial reefs



图3 人工鱼礁水下物理状态潜水录像观测和声学观测示意图

Fig. 3 Schematic diagram of underwater physical state observation of artificial reefs via underwater video and acoustic monitoring

统结合 ArcGIS 数据矢量化功能,对东海区某人工鱼礁区单体鱼礁的水下空间位置进行了定量研究,并运用空间聚类分析方法,对投放后的鱼礁进行了划分和归类。李东等^[52]利用多波束测深声纳系统,获取礁区高精度数字高程模型(Digital elevation model, DEM),并结合地理信息系统(Geographic information system, GIS)的空间分析方法,对山东省某人工鱼礁区的礁体分布、高度、投礁空方量及礁区复杂地形特征进行了定量分析。Brown 和 Collier^[53]采用高频侧扫声纳研究了苏格兰西海岸人工鱼礁底质特征、栖息地特征与声学散射等的关联。佟飞等^[54]利用侧扫声纳评估了北部湾人工鱼礁区礁体鱼礁的沉降与布局等。

人工鱼礁在水下的物理状态与其抗冲击力、抗漂移、

抗翻转等物理稳定性密切相关。王素琴^[55]从理论上分析了正方六面体鱼礁的稳定性,包括其在水流作用下的抗漂移、抗翻转以及着地冲击力。钟术求等^[56]研究了钢制四方台型礁体的稳定性,确定了水阻力系数和最大静摩擦系数。刘德辅等^[57]对特殊环境下的人工鱼礁进行风险分析,计算了鱼礁的失效概率,为评估其长期稳定性提供了重要数据。Sherman 等^[58]对美国佛罗里达州人工鱼礁的冲刷和下陷进行了研究,指出鱼礁的形状通过影响水流特性进而决定其冲刷程度,底层流的扰动是导致鱼礁不稳定和下陷的重要因素。Kim 等^[59]通过水槽试验,揭示了人工鱼礁的冲刷形态、最大冲刷深度、嵌入体积、底接触面积与 KC 数(Keulegan-Carpenter number)和礁体形状之间的关系。林军和章守宇^[60]提出礁区底质条件是鱼礁稳定性的决定因素之一,主要与底质的粒径、成分和密度有关,也与礁体材料、投放方式有关。

2.2 人工鱼礁流场效应评价

人工鱼礁流场效应是通过礁体对水流的物理干扰而产生的,进而引发海域生态的变化。迎流面水流加速,形成上升流;背流面水流减缓,导致紊流产生(图4)。当人工鱼礁沿水流的主方向布置合理时,能够显著增强垂直水流运动,促进表底层水体交换^[61-62]。因此,人工鱼礁建设需考虑整个礁区的流场强度和位置^[63],合理营造与充分利用上升流是实现高效建设的基本理念。

人工鱼礁流场效应的研究可分为以下3个阶段。

1) 早期基础分类阶段。该阶段主要进行人工鱼礁流场的基础分类与流态研究。黑木敏郎等^[64]将人工鱼礁流场划

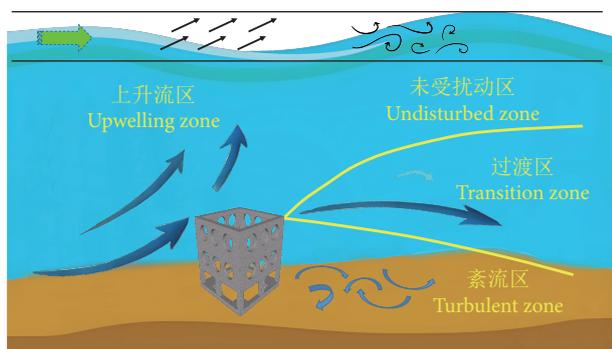


图4 投放人工鱼礁引起的流场变化示意图

Fig. 4 Schematic illustration of flow field changes induced by deployment of artificial reefs

分为 3 种主要流态: a 级流 (自然流态)、b 级流 (上升流和侧流)、c 级流 (流速趋近于零或存在反向涡流的区域)。

2) 结构形状优化与数值模拟阶段。20 世纪 80 年代至 21 世纪初, 研究重点转向了人工鱼礁的开口比和结构形状优化。影山芳郎^[65]首次提出开口比的概念, 佐藤修和影山芳郎^[66]通过水槽模型试验, 影山芳郎等^[67]通过风洞试验, 对不同形状的人工鱼礁的流场效应进行了详细分析。刘同渝^[68]研究探讨了人工鱼礁对流场的影响。进入 21 世纪, 张硕等^[69-70]和刘洪生等^[71]进一步探讨了不同形状和结构的流场效应。

20 世纪 90 年代, 开始采用数值模拟技术研究人工鱼礁的流场效应。Fujihara 等^[72]首次将数值计算方法应用于人工鱼礁流场效应研究, 揭示了人工鱼礁引发的上升流区域及其周围流场的分布特征。虞聪达等^[73]和李珺等^[74]通过数值模拟和实验验证了大涡模拟数值计算方法在准确反映鱼礁周围流场变化方面的有效性。

3) 多因素综合分析评估阶段。21 世纪的研究更加注重多重因素的综合影响和评估指标的分析。姜昭阳^[75]应用数值模拟与粒子图像测速 (Particle image velocimetry, PIV) 技术对人工鱼礁的流场效应进行了分析。付东伟^[76]通过 PIV 和水槽试验相结合的方法, 研究了不同开口比对人工鱼礁流场效应的影响。Kim 等^[77]采用数值计算人工鱼礁的尾流区域, 并引入了尾流区效率指数、平静指数和稳定性指数作为评估尾流区域效应的指标。郭禹等^[78]以上升流强度、范围和中心位置作为上升流作用能力的评价因子, 构建了以上升流效应为目标的单位人工鱼礁最优建设模式方法流程。

2.3 人工鱼礁规模效应评价

人工鱼礁的建设规模是影响其流场效应的关键因素。目前的研究多以投礁量 [通常用空方量 (m^3) 表示] 作为衡量鱼礁规模的指标, 只有当投礁量达到一定规模时, 才能实现预期的生态效应目标^[79]。最小有效单位鱼礁规模是指能

够产生显著生态影响的最小体积, 这一规模会根据不同的影响因素和需求有所变化。日本认为一个单位鱼礁的有效空间体积至少为 400 m^3 , 该指标的确定受到当地海域条件和渔业资源现状的影响, 主要基于现场调查和经济效益的考量^[80]。然而, 由于捕捞方式和强度不同、海域环境条件变化以及海域特征的多样性, 人工鱼礁的最小有效单位体积需要适时调整, 以确保其在不同的海洋环境中均能实现预期的生态和经济效益。

中国人工鱼礁建设的主要目的是增殖渔业资源、修复生态环境^[81]。鉴于中国近岸水体环境的复杂性和流场环境的多样性, 人工鱼礁的设计和必须综合考虑海域的物理条件、生态环境和渔业资源等多个关键因素^[82]。郭禹^[83]提出, 以流场流速差异为依据, 将单位人工鱼礁堆的最小有效体积确定为 700 m^3 , 这为礁体设计提供了一定参考。

在水深较大的海域, 采用“人工鱼礁山”的投放方式更为适宜。人工鱼礁山的规模不仅体现在投放量上, 也体现在其高度上。比如, 以底栖生物为增殖对象, 若不考虑生态效应的要求, 人工鱼礁山的垂直堆叠不需超过 2 层; 相反, 以水平扩展的形式布设人工鱼礁, 可为底栖生物提供更广阔的栖息地^[84]。对于触礁型鱼类和感礁型鱼类, 单位鱼礁分散布设的有效范围约为其覆盖面积的 20 倍, 高度不超过 5 m, 以确保鱼类能够充分利用鱼礁结构进行栖息和觅食; 而对于洄游性鱼类, 单位鱼礁高度通常要求不小于水深的 $1/10$ ^[85], 以提供必要的导航和栖息条件。

2.4 人工鱼礁渔业增殖效应评价

人工鱼礁区流场效应增加了浮游生物和小型鱼类的饵料生物量^[86], 促使物质和能量沿食物链循环传递, 进而增加礁区的渔业资源密度^[87]。礁体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, 使得鱼礁区内生物多样性显著高于周边海域^[88]。研究表明, 人工鱼礁区浮游生物的种类、丰度和生物多样性均高于对比区^[89-91], 呈现出资源增殖和结构优化的趋势^[92], 群落结构由单优势种逐渐过渡到多优势种^[93]。

底栖动物因迁移能力较弱、生命周期长且群落结构复杂, 在人工鱼礁区的变化中发挥重要指示作用^[94]。在不同地区的研究中, 与对比区相比, 鱼礁区的底栖动物群落功能多样性、生物量、丰富度和均匀度均呈相对较高的水平^[95-97], 鱼礁区底栖生物多样性随着礁龄的增加呈递增趋势。

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^[98]。研究表明, 人工鱼礁对游泳生物

资源密度有正促进效应^[99], 该效应的有效距离可达礁体单体的50倍^[100]。人工鱼礁区的渔业资源丰度在不同地区呈现出不同的变化, 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^[101-102]。

3 增殖放流效应评估

海洋牧场建设的核心是渔业资源的增殖, 这一观点在《海洋科学百科全书》对“海洋牧场”的定义中得到了充分体现, 其概念与资源增殖几乎相等。增殖放流是增殖海洋牧场生物资源的重要手段之一。

国外学者 Cowx^[103] 将增殖放流的动机分为生态修复放流、资源量增加放流和生态结构优化放流3种类型。中国的海洋牧场增殖放流主要是为了增加渔业资源量。增殖放流效果评估是增殖放流实践中的关键环节, 已开展的效果评估通常关注放流后鱼类的回捕率和跟踪调查。目前, 主要的评估方法有标记回捕评估法、效果统计量评估法和模型评估法。

3.1 标记回捕评估法

标志回捕是增殖放流效果评估的基础方法, 通过对放流个体进行标记, 在增殖放流后的跟踪监测中分析标志个体在渔获物中所占比例, 从而计算重捕率并评估增殖放流的效果。传统的标志方法有挂牌、切鳍、金属线码等物理标记方法和染色标记、耳石元素标志等化学标记方法^[104]。随着技术的发展, 标记方法日益多样化, 包括微型编码标记、寄生虫标记^[105]、微卫星DNA标记^[106]等新型标记方法正逐渐兴起。

Kitada^[107] 指出大多数增殖放流物种的回捕率介于5%~15%, 鱼类和甲壳类的回捕率偏低而贝类的相对偏高。马晓林等^[108] 在浙江沿岸3个水域分别采用金属线码标记、荧光色素可见式标记和挂牌标记等方法对大黄鱼 (*Larimichthys crocea*) 进行标志放流回捕率研究; 祝超文等^[109] 使用锶 (Sr) 元素耳石指纹标记技术, 对大黄鱼增殖放流效果进行评估; 张秋宏等^[110] 通过茜素络合物 (Alizarin complexone, ALC)、Sr、剪鳍对刀鲚 (*Coilia nasus*) 幼鱼开展标记放流实验; 李影等^[111] 利用金属编码标签对许氏平鲈 (*Sebastes schlegelii*) 放流苗种进行了标记放流效果评估。近年来, 微卫星DNA标记等新型技术被广泛应用于增殖放流个体识别、遗传多样性与适应性评估, 如刘胜男等^[112] 利用微卫星标记评估了北部湾长毛对虾 (*Penaeus penicillatus*) 的增殖放流效果; Gonzalez等^[113] 使用微卫星标记技术评估了日本广岛湾内的黑鲷 (*Acanthopagrus schlegelii*) 增殖放流效果。标志回捕法也被用于增殖放流群体生长、死亡和繁殖等生活

史信息的研究。Hervas等^[114] 研究了加利福尼亚海鲈 (*Atractoscion nobilis*) 放流后的生长、存活和分布, 估算了放流群体的生活史参数。

传统的标记回捕法因其操作简便、成本低廉且易于识别被广泛采用, 但存在标记物脱落或褪色的风险, 且可能对标记生物产生潜在的负面影响。相较之下, 新型标记方法能够提供更详尽的生物信息, 且对生物体的影响更小, 在科学研究和资源管理中展现出更大的应用潜力。

3.2 效果统计量评估法

陈丕茂^[115] 于2006年提出了“放流效果统计量评估法”。该方法通过分析已有的或估算的生物学参数来预测适宜的海区增殖放流数量。它基于放流物种的生长方程, 通过比较放流苗种和自然海域苗种在体长、体质量等形态特征上的差异, 利用时间序列数据的定量分析来识别渔获物中的放流种苗, 并统计其回捕数量。该评估过程涉及一系列的数据分析, 包括标志放流回捕资料、放流前后的本底调查、跟踪调查资料 (如市场调查、渔民座谈、渔业资源调查等)、渔捞日志登记以及渔业生产统计资料等。通过这些数据, 可计算出放流物种的捕捞死亡系数, 并据此估算放流群体的残存量、回捕量、回捕率和回捕效益等关键指标, 从而对生产性或研究性放流后的增殖放流效果进行综合评估。在广东沿海水域的增殖放流实践中, Chen等^[116] 利用该方法评估了渔业资源的增殖放流效果, 证实了其在资源管理中的有效性和适用性。然而, 该方法也存在一定的局限性, 主要体现在对高质量数据的依赖, 以及对放流苗种与自然苗种形态差异的准确识别上。

3.3 模型评估法

随着模型技术的不断进步, 模型已成为增殖放流效果评估的重要工具。根据其发展和应用, 主要可分为单位补充量渔获量模型、种群动态模型和生态容量模型3大类。

1) 单位补充量渔获量模型。作为渔业资源评估的经典模型, 其结构简单、数据易于获取, 即使在数据有限的情况下也显示出较好的适用性。该模型依赖于生长、死亡和体长-体质量关系等基本生物学数据, 无需额外的补充量数据, 即可有效评估渔业资源状态^[117]。在增殖放流效果评估中, 模型通过估算“单位放流量的渔获量” (Yield per release, Y/R), 进而分析单位放流成本的渔获量^[118]。Heasman^[119] 利用该模型深入研究了澳大利亚黑唇鲍 (*Haliotis rubra*) 的放流策略, 比较了不同幼体规格的放流效果; 吴晓睿等^[120] 基于该模型的体长频率分布, 探究了中国毛虾 (*Acetes chinensis*) 的生长、死亡参数及资源量估算。

2) 种群动态模型。近年来, 种群动态模型在增殖放流效果评估中的应用发展迅速, 为定量评估提供了新方

法^[121]。该模型通常依赖于关键生活史参数, 如种群增长、迁移、死亡和繁殖等, 通过模拟种群在不同环境条件下的长期变化, 预测放流个体对自然种群结构和数量的影响。Rogers 等^[122]构建了基于年龄的动态模型, 通过 Beverton-Holt 关系式分析了虫纹麦鳕鲈 (*Maccullochella peelii*) 幼体成活率与种群总体密度之间的依赖性和增殖策略。Sharma 等^[123]开发了一种多生活阶段的种群动态模型, 模拟了银大麻哈鱼 (*Oncorhynchus kisutch*) 种群如何受到栖息环境变化和增殖放流的影响。此外, 基于种群动态评估模型改进的 EnhanceFish 模型, 综合考虑了增殖放流中的生态、经济和社会因素。Camp 等^[124]、Garlock 等^[125]、Namara 等^[126]利用该模型分别研究了眼斑拟石首鱼 (*Sciaenops ocellatus*)、大口黑鲈 (*Micropterus floridanus*) 和北美牙鲆 (*Paralichthys californicus*) 增殖放流的社会、经济效益及资源保护效果。中国利用 EnhanceFish 模型进行增殖放流效果评估的研究较少, 仅冯瑞玉等^[127]利用该模型从生态容量、种群结构、经济效益等方面对南朗水域黄鳍棘鲷 (*A. latus*) 的增殖放流效果进行了评估。

3) 生态容量模型。综合分析和评估增殖放流在生态系统层面的影响及效果是一项复杂的任务, 它涵盖了种间关系、营养级联效应、物质循环和能量流动等多个方面^[128]。目前, 基于生态系统的增殖放流评估主要集中在增殖容量的评估上, 其中 Ecopath 模型是使用最广泛的方法。近年来, 中国在多个海洋生态系统, 包括大亚湾^[129]、珠江口^[130]、海州湾^[131]、三沙湾^[132]、中街山列岛^[133]、桑沟湾^[134]、长山列岛^[135]等, 都运用了 Ecopath 模型来确定鱼类、虾类、蟹类、头足类和贝类等增殖放流物种的生态容量。Taylor 等^[136]构建了一个基于质量平衡原理的广义捕食效应模型, 用于评估增殖容量和放流的合理密度。

4 海洋牧场综合效益评估

在进行海洋牧场综合效益评价研究时, 通常采用逐层分解的方法构建评价指标体系, 即在分析上一层级指标的基础上, 进一步细化出下一层级的指标。多数学者在建立评价指标体系时, 会依据生态效益、经济效益和社会效益等方面来设计^[137-138], 并细化每个部分的指标内容(表 1)。

海洋牧场生态效益评估通过综合运用卫星遥感、现场调查和生物资源调查等方法, 研究海洋牧场建设对渔获物、生物多样性和底栖动物生物量的影响, 揭示海洋牧场在提升生物总量和多样性方面的积极作用^[139-141]。多位学者应用 Ecopath 模型对不同海洋牧场区域的生态结构与功能进行了评估, 分析了生物群落结构和能量流动过程^[142-145], 这有助于理解海洋牧场对生态系统服务和能量循环的影

表1 海洋牧场综合效益评价指标体系

Table 1 Comprehensive benefit evaluation index system for marine ranching

目标层 Target	一级指标层 Primary indicator	二级指标层 Secondary indicator
	生态效益 Ecological benefits	渔业资源增殖量 Fishery stock enhancement
		海洋环境质量改善 Marine environmental quality improvement
		生物多样性 Biodiversity
		幼鱼保护效益 Juvenile fish protection benefits
		生境建设面积 Habitat construction area
		生物固碳量 Biological carbon sequestration
		渔业生物群落结构稳定性 Stability of fishery community structure
		生态系统服务 Ecosystem services
		增养殖产量(收入) Aquaculture production (Revenue)
		休闲渔业产值 Recreational fisheries value
海洋牧场综合效益 Comprehensive benefits of marine ranching	经济效益 Economic Benefits	捕捞收入 Fishing revenue
		产品销售收入 Product sales revenue
		人文收入 Cultural revenue
		就业岗位增加量 Increase in employment opportunities
		渔民人均可支配收入增加量 Increase in per capita disposable income of fishermen
		相关产业发展促进度 Promotion degree of related industry development
		专利技术产出数 Number of patented technologies produced
		技术成果转化数 Number of technological achievements transformed
		渔业产业结构调整 Adjustment of fishery industry structure
		海洋保护意识增强 Enhancement of marine conservation awareness

响。在生态调控方面, 一些学者采用定性网络模型(QNM)和其他模拟方法, 研究了增殖目标种、移除捕食者和海藻场修复等生态调控对海洋牧场群落功能的影响, 以及这些策略与生物功能群变化之间的潜在关系^[146]。

目前, 海洋牧场综合效益评价多采用层次分析法(AHP)^[147]、模糊综合评价法^[148]、能值分析法^[149]、熵值法^[150]、

数据包络分析法 (DEA)^[151] 和调研分析法^[152] 等, 结合现场调查数据等对海洋牧场的生态效益、经济效益和社会效益进行综合评估, 为进一步构建海洋牧综合效益评估模型提供了基础积累。

5 存在问题

5.1 人工鱼礁建设效果评估存在的问题及其原因

人工鱼礁的设置可能会导致海底环境发生显著变化。例如, 将泥质的开放海域改造为岩石型生境, 这一过程可被视为生境重建, 这类人工干预可能会对原有海域的生态结构、生物群落和生态系统功能造成显著干扰。尽管人工鱼礁建设为引入种提供了适宜的栖息地^[153], 但也可能对本地种造成不利影响^[154], 在这种物种的动态增减之间, 需要对海洋牧场建设带来的综合效益进行全面评估; 人工鱼礁的建设可能对鱼类洄游、索饵等原有的生态廊道造成不利影响^[155-156]; 人工鱼礁可能会引起水流变化和物质运输等环境干扰, 对现有生态结构 (例如增加栖息地的分割) 及其生态功能产生影响^[157], 也可能加剧沿海地区已有的生态问题; 快速推广大面积人工鱼礁建设可能会对原有海域的生态和环境造成潜在的不利影响^[158]。这些观点体现了学术界对海洋牧场人工鱼礁建设的双面性看法, 即海洋牧场在带来利益的同时也可能引发一些问题。

人工鱼礁建设面临的主要挑战是在人工生境营造方面, 由于缺少对人工鱼礁结构、规模和布局进行定量化的技术, 限制了对人工鱼礁对生态系统影响的准确理解和评估。

1) 评价指标体系不完善。现有的评价指标通常集中于单一的方面, 如渔业资源量, 而忽略了生态系统的整体性和复杂性^[159]。人工鱼礁效益评价应充分考虑其对生物多样性、生态位、食物网结构等方面的综合影响^[160]。比如, 人工鱼礁可能促进某些种群的增长, 但同时也可能导致其他种群的减少或食物网结构的改变^[161]。尽管对人工鱼礁的生态效益已有大量研究, 但评估标准仍不统一, 且缺乏多维度的综合评价方法。

评价指标体系不完善的主要原因是缺乏系统性和标准化的评价标准。一是研究方法的局限性, 完善的评价指标涉及生态学、渔业资源学、环境科学等多个学科的知识, 技术难度大且成本较高。二是数据获取难度大, 获取生态系统整体性和复杂性数据需要长期和系统的监测, 这对人力、财力和物力均有较高要求。

2) 定量评价不足。目前, 关于人工鱼礁建设效益的定量评价研究相对较少。在流场效应评价方面, 对微小尺度人工鱼礁的流场效应研究还较少, 尚不能精细刻画微小尺

度流场效应和量化评估^[162]。此外, 流场效应与规模效应之间的关系量化研究也不足, 难以定量描述不同规模人工鱼礁产生的流场效应, 以及对鱼类栖息、繁殖、觅食等行为的影响。人工鱼礁增殖效应是通过物种在礁区的迁入和迁出来实现的, 形成一个新的相对稳定的群落^[163]。目前对于礁区生物群落结构的重建机制, 以及生物利用礁区的不同功能区形成多物种共存的机制尚不清楚, 缺乏系统的种群动态评估模型。

定量评价不足的主要原因在于基础研究不足、技术手段的限制、多学科融合不充分、标准化体系缺乏、资金和资源的限制以及政策和管理支持不足等。

5.2 增殖放流效果评价存在的问题及其原因

大规模的海洋牧场增殖放流活动, 可能会显著改变物种的功能特性和群落的演替趋势。然而, 目前的增殖放流实践尚未能稳定地恢复渔业资源和形成持续的补充群体, 例如, 实施了 100 多年的挪威鲑鱼增殖放流和 50 多年的日本栽培渔业, 均已暂停或调整了内容。如今增殖放流主要追求的是“一代回收型”效果, 即增殖放流当年就能看到资源量的增加^[18]。对增殖放流效果的评价主要存在以下 2 个方面的问题。

1) 苗种追踪与产出归属辨识精度差。增殖放流到海洋牧场的苗种, 其生存和生长受到捕食压力、疾病、水质条件、食物资源等多种因素的综合影响^[164]。目前, 由于放流群体追踪技术不足, 对增殖放流苗种在海域中的动态变化和生存过程尚不明确, 难以区分放流生物与自然繁殖群体的产出, 因此, 最终跟踪监测到的资源增加可能并不完全是由增殖放流所致, 也可能来源于自然种群的补充, 其他未被监测到的生物过程, 或是与增殖放流活动无关的环境因素。

2) 量化评价不足。增殖放流的综合效益包括生态效益、经济效益和社会效益^[166]。现有的评价方法缺乏一个全面涵盖生态、经济、社会等的综合评价模型, 难以对增殖放流效果进行全面和系统的量化评估。现有评估模型在参数设定和预测精度上也存在不足, 难以提供可靠的评估结果。增殖放流种群与自然海域种群间的交互作用和生态平衡研究不足, 影响了模型的科学性和准确性。此外, 长期的生态监测和数据积累的不足, 无法为模型提供足够的历史数据和参数支持。

5.3 海洋牧场综合效益评估存在的问题及其原因

海洋牧场建设效果评价体系应涵盖了生物承载力、生态系统健康状态与动态平衡、可持续产量的最大化以及增殖资源的潜力, 还应能预测生物资源的变化趋势和海洋牧场的发展前景^[165]。当前, 海洋牧场综合效益评估仍面临着

评估方法的适用性、准确性及量化程度不足等问题。其原因在于评估指标体系缺乏统一标准, 数据收集与处理方法存在局限性, 特别是在长期监测和高分辨率空间数据获取方面; 评估模型和工具的开发也相对滞后, 未能有效模拟复杂海洋生态系统的动态变化, 进而限制了海洋牧场综合效益评估的准确度。

6 发展展望

笔者认为, 评价人工鱼礁和增殖放流效果的关键在于构建量化的评价方法, 科学评估并优化人工生境营造的结构和规模, 以及量化增殖放流的介入强度和掌握群体动态特征。海洋牧场的效益评估应综合考虑人为干预和产出的平衡, 确保生态系统的健康。为此, 研究应从理论机制和评价技术等方面入手。

在理论机制方面, 应深入探讨人工鱼礁和增殖放流对海洋生态系统功能和响应机制的影响, 包括食物网结构、能量流动、物种多样性和遗传多样性的长期变化。同时, 应关注海洋牧场物种融入自然种群的过程机制, 以及这些过程如何受到环境因素和人类活动的共同作用, 进而解析海洋牧场人工介入对渔业生物群落结构和生态系统功能的影响。在评价技术方面, 研究应致力于开发评估工具, 量化人工鱼礁效应与规模之间的关系, 这可通过综合运用海洋物理、数学和生物模型, 以及现场监测数据来实现。此外, 创新追踪技术, 如遗传标记、电子标签和环境 DNA 技术, 对于追踪增殖放流苗种的移动路径和生存状况至关重要。为全面监测和评估海洋牧场生态系统的整体健康状况, 需从生物多样性、营养循环、能量流动和生态服务等多维度进行评估。此外, 定量评估模型的构建也必不可少, 它能够模拟海洋牧场主要介入措施对生态系统的影响及其随时间的变化, 优化管理策略, 确保介入措施与产出效果的协调。

综上, 通过构建精确和全面的定量评估模型, 量化人工鱼礁和增殖放流对海洋生态系统服务、生物多样性和渔业资源的具体贡献, 模拟不同管理策略下的生态系统响应, 可为海洋牧场生态系统的管理提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 宋昱瑾, 田涛, 杨军, 等. 海洋牧场背景下的休闲渔业旅游发展模式研究[J]. 海洋开发与管理, 2022, 39(1): 110-116.
- [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.
- [3] 周卫国, 丁德文, 索安宇, 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.
- [4] 杨红生. 我国蓝色粮仓科技创新的发展思路与实施途径[J]. 水产学报, 2019, 43(1): 97-104.
- [5] SALVANES A G V. Ocean ranching[M]//Encyclopedia of ocean sciences. 2nd ed. Singapore: Elsevier Pte Ltd., 2016: 146-155.
- [6] SEAMAN W, LINDBERG W J. Artificial reefs[M]//Encyclopedia of ocean sciences. 2nd ed. Singapore: Elsevier Pte Ltd., 2016: 226-233.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 李木子, 曾雅, 任同军. 中国渔业增殖放流问题及对策研究[J]. 中国水产, 2021(9): 42-45.
- [13] 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.
- [14] 林承刚, 杨红生, 陈鹰, 等. 现代化海洋牧场建设与发展: 第230期双清论坛学术综述[J]. 中国科学基金, 2021, 35(1): 143-152.
- [15] 陈坤, 张秀梅, 刘锡胤, 等. 中国海洋牧场发展史概述及发展方向初探[J]. 渔业信息与战略, 2020, 35(1): 12-21.
- [16] YU J K, ZHANG L L. Evolution of marine ranching policies in China: review, performance and prospects[J]. Sci Total Environ, 2020, 737: 139782.
- [17] 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): 97-106.
- [18] 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.
- [19] LEBER K M, KITADA S, BLANKENSHIP H L, et al. Stock enhancement and sea ranching: developments, pitfalls and opportunities[M]. 2nd ed. New York: Wiley Blackwell, 2004: 1-48.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] HAMASAKI K, KITADA S. A review of Kuruma prawn *Penaeus japonicus* stock enhancement in Japan[J]. Fish Res, 2006, 80(1): 80-90.
- [23] 冯雪, 范江涛, 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.
- [24] 刘同渝. 国内外人工鱼礁建设状况[J]. 渔业现代化, 2003, 30(2): 36-37.
- [25] 尹增强, 章守宇. 对我国渔业资源增殖放流问题的思考[J]. 中国水产, 2008(3): 9-11.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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(5/6): 3.
- [29] 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.
- [30] 程家骅, 姜亚洲. 海洋生物资源增殖放流回顾与展望[J]. 中国水产科学, 2010, 17(3): 610-617.
- [31] 张锋, 李苗, 陈圣灿, 等. 国家级海洋牧场示范区创建成效明显[J]. 中国水产, 2022(9): 27-29.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] NAGAMATSU T, SHIMA N, テツオ ナガマツ, et al. Experimental study on artificial upwelling device combined V-shaped structure with flexible underwater curtain[J]. Mem Facult Fish Kagoshima Univ, 2008(55): 27-35.
- [35] NAKAYAMA A, YAGI H, FUJII Y, et al. Evaluation of effect of artificial upwelling producing structure on lower-trophic production using simulation[J]. J Jap Soc Civil Engin, Ser. B2 (Coastal Engineering), 2010, 66(1): 1131-1135.
- [36] 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.
- [37] 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]. J Environ Biol, 2013, 34: 197-204.
- [38] 水柏年. 海洋渔业资源增殖放流反思及优化探讨[J]. 大连海洋大学学报, 2023, 38(5): 737-743.
- [39] 王孟佳, 徐开达, 王好学, 等. 浙江近海甲壳类资源增殖放流现状研究[J]. 海洋开发与管理, 2024, 41(1): 136-144.
- [40] 阙华勇, 陈勇, 张秀梅, 等. 现代海洋牧场建设的现状与发展对策[J]. 中国工程科学, 2016, 18(3): 79-84.
- [41] SEAMAN W. Artificial habitats and the restoration of degraded marine ecosystems and fisheries[J]. Hydrobiologia, 2007, 580(1): 143-155.
- [42] 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.
- [43] 张灿影, 孙景春, 鲁景亮, 等. 国际人工鱼礁研究现状与态势分析[J]. 广西科学, 2021, 28(1): 1-10.
- [44] 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.
- [45] SCHYGULLA C, PEINE F. Nienhagen reef: abiotic boundary conditions at a large brackish water artificial reef in the Baltic Sea[J]. J Coastal Res, 2013, 29(2): 478-486.
- [46] JIANG Z Y, LIANG Z L, ZHU L X, et al. Numerical simulation of effect of guide plate on flow field of artificial reef[J]. Ocean Engin, 2016, 116: 236-241.
- [47] 沈蔚, 章守宇, 李勇攀, 等. C3D 测深侧扫声呐系统在人工鱼礁建设中的应用[J]. 上海海洋大学学报, 2013, 22(3): 404-409.
- [48] 刘永虎, 刘敏, 田涛, 等. 侧扫声呐系统在石料人工鱼礁堆体体积估算中的应用[J]. 水产学报, 2017, 41(7): 1158-1167.
- [49] YOON H S, KIM D, NA W B. Estimation of effective usable and burial volumes of artificial reefs and the prediction of cost-effective management[J]. Ocean Coastal Manag, 2016, 120: 135-147.
- [50] 郭栋, 董婧, 付杰, 等. 基于双频识别声呐的东港大鹿岛人工鱼礁调查研究[J]. 海洋湖沼通报, 2018(2): 41-48.
- [51] 沈天跃, 章守宇, 沈蔚, 等. 现场海域人工鱼礁分布状态聚类分析[J]. 水产学报, 2015, 39(9): 1350-1358.
- [52] 李东, 唐诚, 邹涛, 等. 基于多波束声呐的人工鱼礁区地形特征分析[J]. 海洋科学, 2017, 41(5): 127-133.
- [53] BROWN C J, COLLIER J S. Mapping benthic habitat in regions of gradational substrata: an automated approach utilising geophysical, geological, and biological relationships[J]. Estuar Coast Shelf Sci, 2008, 78(1): 203-214.
- [54] 佟飞, 唐振朝, 贾晓平, 等. 基于侧扫声呐方法的框架式人工鱼礁测量[J]. 南方水产科学, 2018, 14(1): 99-104.
- [55] 王素琴. 人工鱼礁的受力分析与设计要点[J]. 大连水产学院学报, 1987(1): 55-62.
- [56] 钟木求, 孙满昌, 章守宇, 等. 钢制四方台型人工鱼礁礁体设计及稳定性研究[J]. 海洋渔业, 2006, 28(3): 234-240.
- [57] 刘德辅, 刘伟伟, 庞亮. 人工鱼礁工程的风险评估[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2007, 37(2): 317-322.
- [58] SHERMAN R L, GILLIAM D S, SPIELER R E. Artificial reef design: void space, complexity, and attractants[J]. ICES J Mar Sci, 2002, 59: 196-200.
- [59] KIM J Q, MIZUTANI N, JINNO N, et al. Experimental study on characteristics of local scour and embedment of fish reef by wave action[J]. Proc Civil Engin Ocean, 1996, 12: 243-247.
- [60] 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.
- [61] 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.
- [62] 公丕海, 郑延璇, 李娇, 等. 塔型桁架人工鱼礁流场效应及稳定性[J]. 中国水产科学, 2019, 26(5): 1021-1028.
- [63] KIM D, WOO J, YOON H S, et al. Wake lengths and structural responses of Korean general artificial reefs[J]. Ocean Engin, 2014, 92: 83-91.
- [64] 黑木敏郎, 佐藤修, 尾崎晃. 魚礁構造の物理学的研究 I[R]. 札幌: 北海道水産部研究報告書, 1964: 1-19.
- [65] 影山芳郎. 水槽実験による多立方体魚礁モデル周りの可視化[J]. 水産土木, 1980, 17(1): 1-10.
- [66] 佐藤修, 影山芳郎. 人工魚礁. 京[J]. 恒星社厚生閣, 1984, 17: 38-42.
- [67] 影山芳郎, 大阪英雄, 山田英己. 人工礁周流況[J]. 水産土木, 1986, 23(2): 1-8.
- [68] 刘同渝. 人工鱼礁的流态效应[J]. 江西水产科技, 2003(6): 43-44.

- [69] 张硕, 孙满昌, 陈勇. 不同高度混凝土模型礁上升流特性的定量研究[J]. 大连水产学院学报, 2008, 23(5): 353-358.
- [70] 张硕, 孙满昌, 陈勇. 不同高度混凝土模型礁背涡流特性的定量研究[J]. 大连水产学院学报, 2008, 23(4): 278-282.
- [71] 刘洪生, 马翔, 章守宇. 人工鱼礁流场效应的模型实验[J]. 水产学报, 2009, 33(2): 229-236.
- [72] FUJIHARA M, KAWACHI T, OOHASHI G. Physical-biological coupled modelling for artificially generated upwelling[J]. Trans Jap Soc Irrig Drain Rural Engin, 2011, 65: 399-409.
- [73] 虞聪达, 俞存根, 严世强. 人工船礁铺设模式优选方法研究[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(4): 299-305.
- [74] 李珺, 林军, 章守宇. 方形人工鱼礁通透性及其对礁体周围流场影响的数值实验[J]. 上海海洋大学学报, 2010, 19(6): 836-840.
- [75] 姜昭阳. 人工鱼礁水动力学与数值模拟研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009: 1-12.
- [76] 付东伟. 人工鱼礁流场效应的 PIV 试验研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2013: 11-48.
- [77] KIM D, WOO J, YOON H S. Efficiency, tranquillity and stability indices to evaluate performance in the artificial reef wake region[J]. Ocean Engin, 2016, 122(1): 253-261.
- [78] 郭禹, 章守宇, 林军. 基于上升流效应的单位鱼礁建设模式研究[J]. 南方水产科学, 2020, 16(5): 71-79.
- [79] CHARBONNEL E, CARNUS F, RUITTON S, et al. Artificial reefs in marseille: from complex natural habitats to concepts of efficient artificial reef design[J]. Braz J Oceanogr, 2011, 59: 81-82.
- [80] 吉牟田长生, 吕晓明. 鱼礁规模与投放条件[J]. 国外水产, 1985, 2(1): 37-41.
- [81] 隋吉盛, 郑中强, 常宗瑜, 等. 框架型人工鱼礁布放过程的动力学分析[J]. 渔业现代化, 2016, 43(3): 74-79.
- [82] 张永波, 王继业, 辛峻峰. 人工鱼礁工程技术进展研究[J]. 渔业现代化, 2016, 43(6): 70-75.
- [83] 郭禹. 基于流场仿真实验的人工鱼礁规模效应研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020: 5-7.
- [84] LI D, TANG C, XIA C L, et al. Acoustic mapping and classification of benthic habitat using unsupervised learn in artificial reef water[J]. Estuar Coast Shelf Sci, 2017, 185: 11-21.
- [85] 李豹德. 从日本人工鱼礁建设探讨我国鱼礁建设的方向[J]. 海洋渔业, 1985(6): 248-253.
- [86] NUNN A D, TEWSON L H, COWX I G. The foraging ecology of larval and juvenile fishes[J]. Rev Fish Biol Fish, 2012, 22(2): 377-408.
- [87] LIMA J S, ZALMON I R, LOVE M. Overview and trends of ecological and socioeconomic research on artificial reefs[J]. Mar Environ Res, 2019, 145: 81-96.
- [88] 唐衍力, 林嘉政, 王欣, 等. 许氏平鲉幼鱼对人工鱼礁模型不同阴影情况的行为响应[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2024, 54(1): 26-34.
- [89] 张智鹏, 陈璐, 刘洪军, 等. 人工鱼礁建设对海洋浮游植物群落变化的影响[J]. 海洋通报, 2020, 39(5): 617-626.
- [90] ZHANG X, XU X F, FANG E J, et al. The characteristic of phytoplankton community and its variation at artificial reef area of the coastal sea of Tianjin[J]. Mar Sci Bull, 2019, 21(1): 40-55.
- [91] 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.
- [92] 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.
- [93] 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.
- [94] 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]. Ecol Indic, 2019, 101: 512-521.
- [95] 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.
- [96] 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): 099305.
- [97] 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.
- [98] 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.
- [99] YUAN H R, CHEN P M, LI X G. Taxonomic diversity and eco-exergy changes in fishery resources associated with artificial reefs over 14 years in Daya Bay, China[J]. Front Mar Sci, 2022, 9: 1054933.
- [100] 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.
- [101] 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.
- [102] 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.
- [103] COWX I G. Stocking strategies[J]. Fish Manag Ecol, 1994, 1(1): 15-30.
- [104] 杨祖长, 胡望娇, 冯广朋, 等. 基于浸泡法的胭脂鱼 (*Myxocyprinus asiaticus*) 耳石镭标记技术[J]. 中国渔业质量与标准, 2024, 14(2): 22-27.
- [105] 吕少梁, 王学锋, 李纯厚. 鱼类标志放流步骤的优选及其在黄鳍棘鲷中的应用[J]. 水产学报, 2019, 43(3): 584-592.
- [106] 廖中华, 陈学艳, 郝永峰, 等. 标志技术在渔业增殖放流效果评估中的应用[J]. 现代畜牧科技, 2024(2): 112-114.
- [107] KITADA S. Economic, ecological and genetic impacts of marine stock enhancement and sea ranching: a systematic review[J]. Fish Fish, 2018, 19(3): 511-532.
- [108] 马晓林, 周永东, 徐开达, 等. 浙江沿岸大黄鱼标志放流及回捕率调查研究[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2016, 35(1):

- 24-29.
- [109] 祝超文, 张虎, 黄成恺, 等. 江苏近岸海域大黄鱼标记放流及效果评估[J]. 水产养殖, 2023, 44(6): 1-9.
- [110] 张秋宏, 蒋日进, 刘明智, 等. 3种标记方法对刀鲚幼鱼生长影响初探[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2022, 41(5): 423-428.
- [111] 李影, 徐永江, 崔爱君, 等. 金属编码标签对许氏平鲉放流苗种的标记效果[J]. 渔业科学进展, 2023, 44(2): 40-49.
- [112] 刘胜男, 孙典荣, 刘岩, 等. 使用微卫星标记评估北部湾长毛对虾增殖放流效果[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(S02): 37-45.
- [113] GONZALEZ E B, NAGASAWA K, UMINO T. Stock enhancement program for black sea bream (*Acanthopagrus schlegelii*) in Hiroshima Bay: monitoring the genetic effects[J]. Aquaculture, 2008, 276(1/2/3/4): 36-43.
- [114] HERVAS S, LORENZEN K, SHANE M A, et al. Quantitative assessment of a white seabass (*Atractoscion nobilis*) stock enhancement program in California: post-release dispersal, growth and survival[J]. Fish Res, 2010, 105(3): 237-243.
- [115] 陈丕茂. 渔业资源增殖放流效果评估方法的研究[J]. 南方水产, 2006, 2(1): 1-4.
- [116] CHEN P M, QIN C X, YU J, et al. Evaluation of the effect of stock enhancement in the coastal waters of Guangdong, China[J]. Fish Manag Ecol, 2015, 22(2): 172-180.
- [117] KATSUKAWA T. Evaluation of current and alternative fisheries management scenarios based on spawning-perrecruit (SPR), revenue-per-recruit (RPR), and yield-perrecruit (YPR) diagrams[J]. ICES J Mar Sci, 2005, 62(5): 841-846.
- [118] MUNRO J L, BELL J D. Enhancement of marine fisheries resources[J]. Rev Fish Sci, 1997, 5(2): 185-222.
- [119] HEASMAN M P. In pursuit of cost-effective fisheries enhancement of new south wales blacklip abalone, *Haliotis rubra* (Leach) fishery[J]. J Shellfish Res, 2006, 25(1): 211-224.
- [120] 吴晓睿, 宋大德, 熊瑛, 等. 海州湾中国毛虾 (*Acetes chinensis*) 种群生物学特征和资源开发状态研究[J]. 海洋与湖沼, 2023, 54(2): 573-582.
- [121] LORENZEN K, AGNALT A L, LEE BLANKENSHIP H, et al. Evolving context and maturing science: aquaculture-based enhancement and restoration enter the marine fisheries management toolbox[J]. Rev Fish Sci, 2013, 21(3/4): 213-221.
- [122] ROGERS M W, ALLEN M S, BROWN P, et al. A simulation model to explore the relative value of stock enhancement versus harvest regulations for fishery sustainability[J]. Ecol Model, 2010, 221(6): 919-926.
- [123] SHARMA R, COOPER A B, HILBORN R. A quantitative framework for the analysis of habitat and hatchery practices on Pacific salmon[J]. Ecol Model, 2005, 183(2/3): 231-250.
- [124] CAMP E V, LORENZEN K, AHRENS R N M, et al. Potentials and limitations of stock enhancement in marine recreational fisheries systems: an integrative review of florida's red drum enhancement[J]. Rev Fish Sci, 2013, 21(1/2/3/4): 388-402.
- [125] GARLOCK T M, CAMP E V, LORENZEN K. Efficacy of large-mouth bass stock enhancement in achieving fishery management objectives in Florida[J]. Fish Res, 2019, 213: 180-189.
- [126] NAMARA R M, CAMP E, SHANE M, et al. Optimizing marine stock enhancement through modeling: a sex-specific application with California halibut *Paralichthys californicus*[J]. Fish Res, 2022, 252: 106341.
- [127] 冯瑞玉, 郭禹, 李金明, 等. 基于 EnhanceFish 模型的鱼类增殖放流策略研究: 以中山市南朗水域黄鳍棘鲷增殖放流为例[J]. 渔业科学进展, 2023, 44(5): 1-10.
- [128] 张崇良, 徐宾铎, 薛莹, 等. 渔业资源增殖评估研究进展与展望[J]. 水产学报, 2022, 46(8): 1509-1524.
- [129] 黄梦仪, 徐姗姗, 刘永, 等. 基于 Ecopath 模型的大亚湾黑鲷生态容量评估[J]. 中国水产科学, 2019, 26(1): 1-13.
- [130] 刘岩, 吴忠鑫, 杨长平, 等. 基于 Ecopath 模型的珠江口 6 种增殖放流种类生态容纳量估算[J]. 南方水产科学, 2019, 15(4): 19-28.
- [131] 林群, 袁伟, 马玉洁, 等. 基于 Ecopath 模型的海州湾三疣梭子蟹增殖生态容量研究[J]. 水生态学杂志, 2022, 43(6): 131-138.
- [132] 杨彬彬. 基于 Ecopath 模型的三沙湾能量流动分析及大黄鱼试验性增殖放流[D]. 厦门: 厦门大学, 2017: 17-43.
- [133] 石雯静, 张漫瑶, 赵晟. 基于 Ecopath 模型的中街山列岛海域曼氏无针乌贼生态容量的评估[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2024, 43(1): 51-62.
- [134] GAO Y P, FANG J G, LIN F, et al. Simulation of oyster ecological carrying capacity in Sanggou Bay in the ecosystem context[J]. Aquac Int, 2020, 28(5): 2059-2079.
- [135] 徐晓卉, 尹洁, 刘淑德, 等. 基于 Ecopath 模型的长山列岛邻近海域褐牙鲆增殖生态容量研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2024, 54(2): 63-72.
- [136] TAYLOR M D, BRENNAN N P, LORENZEN K, et al. Generalized predatory impact model: a numerical approach for assessing trophic limits to hatchery releases and controlling related ecological risks[J]. Rev Fish Sci, 2013, 21(3/4): 341-353.
- [137] 袁俊楠. 海洋牧场综合化发展评价指标体系构建与实证研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2023: 15-30.
- [138] 田晓轩. 唐山曹妃甸海洋牧场综合效益评价研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015: 29-36.
- [139] 王言丰, 胡启伟, 余景, 等. 粤东柘林湾海洋牧场渔业资源增殖效果评估[J]. 南方水产科学, 2019, 15(2): 12-19.
- [140] 崔晨, 张云岭, 张秀文, 等. 唐山祥云湾海洋牧场渔业资源增殖效果评估[J]. 河北渔业, 2021(1): 25-31.
- [141] 王琼, 党晨阳, 葛春盈, 等. 基于层次分析法的浙江海域生态系统综合评估研究[J]. 浙江工商职业技术学院学报, 2021, 20(3): 6-12.
- [142] 李欣宇, 云岭, 齐遵利, 等. 基于 Ecopath 模型的祥云湾海洋牧场生态系统结构和能量流动分析[J]. 大连海洋大学学报, 2023, 38(2): 311-322.
- [143] 吴忠鑫, 张秀梅, 张磊, 等. 基于 Ecopath 模型的荣成俚岛人工

- 鱼礁区生态系统结构和功能评价[J]. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2878-2886.
- [144] 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.
- [145] 张紫轩. 人工鱼礁生态效应评价及增殖放流物种生态容量评估: 以莱州湾芙蓉岛人工鱼礁区为例[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021: 27-43.
- [146] 孙国庆, 张合焯, 董世淇, 等. 基于定性网络模型评价生态调控情景对海洋牧场生态系统的影响: 以獐子岛海洋牧场为例[J]. 生态学报, 2024, 44(13): 5761-5772.
- [147] 赵新生, 孙伟富, 任广波, 等. 海州湾海洋牧场生态健康评价[J]. 激光生物学报, 2014, 23(6): 626-632.
- [148] 刘林忻, 刘津, 田景璐, 等. 基于模糊综合评价法的海洋牧场综合效益测算[J]. 河北渔业, 2020(6): 14-54, 60.
- [149] 马欢. 柘林湾海洋牧场生态系统综合效益评估[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018: 29-50.
- [150] 袁俊南, 贺义雄. 海洋牧场综合化发展评价指标体系构建与实证研究[J]. 海洋开发与管理, 2022, 39(12): 93-97.
- [151] 岳奇, 鄂俊, 杜新远, 等. 我国北方典型海洋牧场综合效率评估初探[J]. 海洋湖沼通报, 2020(6): 142-149.
- [152] 李慕菡, 徐宏, 郭永军. 天津大神堂海洋牧场综合效益研究[J]. 中国渔业经济, 2021, 39(1): 68-73.
- [153] WAHL M. Marine hard bottom communities: patterns, dynamics, diversity, and change[M]. New York: Springer, 2009: 269-280.
- [154] KING R S, DELUCA W V, WHIGHAM D F, et al. Threshold effects of coastal urbanization on *Phragmites australis* (common reed) abundance and foliar nitrogen in Chesapeake Bay[J]. *Estuar Coasts*, 2007, 30(3): 469-481.
- [155] WOOTTON J T. Effects of disturbance on species diversity: a multitrophic perspective[J]. *Am Nat*, 1998, 152(6): 803-825.
- [156] CHESSON P. Mechanisms of maintenance of species diversity[J]. *Annu Rev Ecol System*, 2000, 31: 343-366.
- [157] RUIZ G M, CARLTON J T, GROSHOLZ E D, et al. Global invasions of marine and estuarine habitats by nonindigenous species: mechanisms, extent, and consequences[J]. *Integr Comp Biol*, 1997, 37(6): 621-632.
- [158] WAHL M. Marine hard bottom communities: patterns, dynamics, diversity, and change[M]. New York: Springer, 2009: 257-268.
- [159] 李东, 侯西勇, 唐诚, 等. 人工鱼礁研究现状及未来展望[J]. 海洋科学, 2019, 43(4): 81-87.
- [160] 宋旻鹏. 中国北黄海海域不同礁型人工鱼礁区生态效果评价研究: 以威海小石岛人工鱼礁区为例[D]. 济南: 山东大学, 2023: 12-59.
- [161] 张博伦, 郭彪, 于莹, 等. 基于稳定同位素技术的天津大神堂海域人工鱼礁区食物网结构研究[J]. 渔业科学进展, 2019, 40(6): 25-35.
- [162] 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): 107-121.
- [163] HILLERISLAMBERS J, ADLER P B, HARPOLE W S, et al. Re-thinking community assembly through the lens of coexistence theory[J]. *Annual Rev Ecol Evol S*, 2012, 43: 227-248.
- [164] 江兴龙, 王玮, 林国清, 等. 影响渔业资源增殖放流效果的主要因素探讨[J]. 渔业现代化, 2015, 42(4): 62-67.
- [165] 张涛, 奉杰, 宋浩. 海洋牧场生物资源养护原理与技术[J]. 科技促进发展, 2020, 16(2): 206-212.