



· 综述 ·

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

张秀梅^{1*}, 纪棋严², 胡成业¹, 徐焕志², 王一航¹, 杨晓龙¹, 郭浩宇¹

(1. 浙江海洋大学水产学院, 浙江 舟山 316022;

2. 浙江海洋大学海洋科学与技术学院, 浙江 舟山 316022)

摘要: 海洋牧场建设是实现我国近海渔业资源恢复、生态系统和谐发展及蓝碳增汇的重要途径。近年来,在快速发展的同时也面临着诸多问题与挑战,极大制约了产业的健康发展。在海洋牧场建设过程中,关于生境营造和资源增殖的基础理论薄弱,对其生态系统稳定性与抗干扰能力认识不清,尤其对小尺度海洋牧场生态系统的结构及其功能实现过程,以及生态承载力知之甚少。亟需针对其人工鱼礁等生境营造的环境效应和增殖放流的资源补充效应开展理论印证和定量研究,以充分认识这些人为扰动的双重性。本文查阅了相关文献90余篇,简要回顾了国内外关于人工鱼礁生境营造的水动力环境特征、生源要素迁移过程、生物群落构建机制和局地生态系统稳定性评价等方面的研究进展。强调了小尺度海洋牧场生态系统结构的复杂性与动态性,重点关注了鱼礁群布局对牧场海域水动力环境、沉积物和生源要素演变的影响,以及在增殖放流等人为扰动下生物群落的物种共存机制。围绕海洋牧场生态系统稳定性与抗干扰能力等关键问题,从水动力驱动、生源要素表征、生物群落重建及生态系统健康等4个方面探讨了目前研究的不足与发展方向,以为海洋牧场人工鱼礁、海藻床等生境营造以及资源修复模式优化提供参考。

关键词: 海洋牧场; 生境营造; 增殖放流; 环境效应; 生态承载力

中图分类号: S 953.2

文献标志码: A

海洋牧场 (marine ranching) 是基于生态系统原理,在特定海域通过人工鱼礁、增殖放流等措施,构建或修复海洋生物繁殖、生长、索饵或避敌所需的场所,以增殖养护渔业资源,改善海域生态环境,实现渔业资源可持续利用的渔业模式^[1],这是实现我国近海渔业资源恢复、生态系统和谐发展及拓展潜在“蓝碳增汇”的重要途径。因此,科学推进现代海洋牧场建设,规范有序发展海水增养殖业,已成为养护渔业资源,保障水产品安全有效供给,促进现代渔业转型升级,推

动海洋渔业高质量发展的基石。截至目前,全国已建成国家级和省级投礁型海洋牧场300多个,其中国家级海洋牧场示范区169个,投放鱼礁超过5000万空m³,用海面积超过3000km²,取得了良好的生态、经济和社会效益。在海洋牧场建设过程中,人工鱼礁等生物栖息地营造、渔业资源增殖放流等为资源养护和水产品产出发挥了重要作用,也被认为是改善海域生态环境和实现生物资源可持续利用的关键途径。然而,海洋牧场人工鱼礁投放和增殖放流会给生态系统带来一系

收稿日期: 2023-08-09 修回日期: 2023-10-06

资助项目: 浙江省重点研发计划项目(2021C02047); 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项(2019YFD0901303)

通信作者: 张秀梅(照片), 从事鱼类行为及增殖生态学研究, E-mail: xiumei1227@163.com



列物理、化学和生物干扰, 这些人为干扰产生的效应和表现形式多样, 能否成为人们期待的增益性干扰, 不适宜的生境营造或过度的人工增殖放流是否会降低生态承载力、造成生境退化、改变生物群落组成和碳循环格局等都成为研究人员关注的科学问题, 目前许多研究仍停留在现象的描述上, 尚缺乏相关基础理论和技术标准, 导致人们对海洋牧场生态系统结构及其功能实现过程与机理认识不清, 难以科学评估其资源与环境效应。

海洋牧场生境营造, 首先需要综合考虑渔业结构、生物资源、底质类型、海浪海流、生源要素分配等多种因素, 如果缺乏科学论证和合理选址, 将会导致鱼礁被沉积物掩埋, 或礁体发生漂移。其次, 鱼礁投放后水动力的改变是影响沉积物-水界面物质交换通量的重要因素, 底层水和沉积物中的生物分解作用会影响沉积物的生物化学环境, 促进沉积物需氧量增加和氮磷释放, 从而对沉积物上覆水营养盐水平和通量产生影响。因此, 定量分析人工鱼礁在牧场海域中形成上升流与背涡流的规模和强度及其对局部海域流场的影响, 系统研究沉积物-水界面生源要素释放与沉积过程, 解析生境营造后沉积物氮、磷等生源要素向水体输运等关键过程演变, 对于阐明生境营造的初级生产力促进机制等意义重大。

同时, 海洋牧场生境营造引发的环境物理和环境化学效应对原有生境格局、生物群落乃至生态系统产生多大程度的影响, 生境多样性增加与生物群落多样性的互作机制如何, 人工鱼礁的扰动直接或间接为引入种创造了良好的栖息环境, 对土著种是否产生不利影响? 尤其在大规模引入增殖放流物种时, 是否影响牧场栖息地承载力或食物资源供给, 是否造成食物资源供给总量的竞争, 给其他物种带来明显的资源胁迫等等? 由于鱼类等赖以生存、栖息、繁殖的海洋牧场生境具有极强的连通性和流动性, 水文、化学、生物等生态因子复杂多变^[2], 亦使得渔业种群或群落对上述人为干扰的响应更加难以预测, 相关研究进展较陆地生态系统相差甚远。

鉴于此, 本文针对海洋牧场生境营造的环境效应和增殖放流的资源补充效应研究开展综述分析, 以便充分认识这些人为干扰的双重性。总结当前海洋牧场生境营造的环境物理、环境化学和环境生物效应的研究现状, 从生态系统视角提出现有研究的局限性和未来应立项研究的关键科学

问题, 以为海洋牧场适宜生境构建和资源科学增殖提供参考, 亦为推动“蓝碳渔业”研究的理论、方法和观点创新, 构建符合新时代特征的我国“蓝碳渔业”理论和话语体系奠定基础。

1 人工鱼礁生境营造的水动力环境特征

人工鱼礁投放会直接或间接影响海洋牧场的水动力环境、营养盐的运输和扩散、悬浮颗粒物沉积和沉积物再悬浮过程等, 进而影响水体和底质环境。目前, 人工鱼礁流场效应研究, 主要是利用理论分析、现场调查、模型试验(包括风洞、水槽模拟试验, PIV 模型试验等)和微小尺度计算流体数值模拟等手段, 分析不同结构类型鱼礁的流场效应^[3-6], 以及不同水动力环境下鱼礁的受力情况等^[7-10]。

人工鱼礁在开放海域投放后会产生一系列流场效应, 在潮流的作用下, 礁体的迎流面会产生一定程度的上升流, 而在礁体的背流面则产生背涡流^[11]。人工鱼礁引发的周边海域水动力特征的改变也会影响悬沙输运及海底泥沙沉积冲淤。人工鱼礁后部的背涡流会在鱼礁背面产生负压区, 导致海底泥沙及大量悬沙在该区域停滞, 而涡旋的延伸则对海底产生扰动, 促进泥沙与底质沉积物的再悬浮, 与周围水体进行物质的交换和输运(图 1)。

目前关于人工鱼礁引发的流场改变对悬沙输运影响的研究, 主要在实验水槽中加入泥沙利用人工鱼礁流场效应模拟实现^[13-15]。这些实验条件与海洋牧场中实际的悬沙运动特征和输运规律仍有较大差距, 研究结果尚不能全面反映人工鱼礁

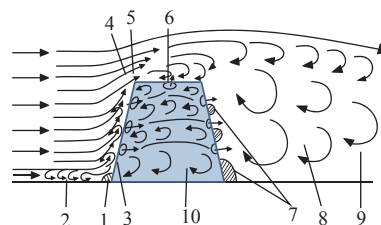


图 1 梯形人工鱼礁形成的流态图^[12]

1. 死水区, 2. 回流区, 3. 轻微涡流区, 4. 气流加速区, 5. 气流分离点, 6. 鱼礁顶部气流上升区, 7. 死水区, 8. 涡流区, 9. 涡流, 10. 鱼礁体内缓流区

Fig. 1 Current map of trapezium artificial reef^[12]

1. dead water zone, 2. return flow zone, 3. light vortex zone, 4. airflow acceleration zone, 5. airflow separation point, 6. updraft zone at the top of the reef, 7. dead water zone, 8. vortex zone, 9. vortex, 10. slow flow zone in the reef

流场效应对自然海域悬沙沉积及输运的影响。除了海流会直接影响泥沙冲淤和输运外, 海浪也是一个重要的影响因素。海浪不仅直接影响悬沙输运, 其波高和周期也会影响人工鱼礁的流场效应, 从而间接影响海床泥沙冲淤情况^[16]。虽然目前对近岸海域的悬沙运动已有大量研究, 但对人工鱼礁投放后海床泥沙冲淤情况的研究还较少。国家级海洋牧场示范区设立时, 要求对人工鱼礁流场及冲淤情况进行分析, 但多数报告的数值模型均建立在大网格尺度上, 无法精确展示微小尺度人工鱼礁投放后的冲淤变化。因此, 精细刻画人工鱼礁区的流场效应, 尤其是涡旋过程对海底泥沙沉积、再悬浮的直接影响以及受海浪影响后产生的间接影响, 量化比较人工鱼礁区及邻近海域水文环境要素特征, 可从另一视角为海洋牧场生源要素的时空异质性研究提供有力支撑。

另外, 牧场海域生源要素的扩散和输运过程也会受到人工鱼礁结构的影响, 以往将人工鱼礁近似概化为密闭、无透水的固体, 用减去相应礁体高度的水深来计算人工鱼礁在自然海域对周围流场和悬沙活动的影响, 但这不能准确刻画鱼礁周边的湍流特征。人工鱼礁生境营造的水动力特征是研究海洋牧场环境效应的基础, 近年来尤其重视耦合物理、化学、生物过程的海洋生境模拟^[17]。利用三维水动力模型模拟海洋的水动力环境, 在此基础上考虑更多的化学和生物过程, 能够更好地研究海洋牧场微小尺度的水动力过程和环境生态效应。人工鱼礁改变了底层结构, 使海水阻滞作用增强, 在底层诱生海流垂向剪切和湍过程^[11]。湍流混合强度的垂直分布会影响流速剖面^[18], 对海水运动速度、温盐特性及水中溶解态、颗粒态物质的分布有显著影响^[19]。湍流模型的选择是否合适, 将直接决定人工鱼礁流场效应研究的精度和真实性。目前商用软件如 FLUENT、CFX、STAR-CD 等都可用于细微尺度的流态模拟, 但不能根据模拟要求进行修改与优化。近年来, 逐步发展成熟的三维海洋数值模型, 如 FVCOM、ROMS 和 SCHISM 等, 这些三维海洋数值模型的引入, 为阐释人工鱼礁生境营造的环境效应提供了重要支撑。最近已有少数研究利用三维海洋数值模型模拟了人工鱼礁周围三维潮流场的分布以及悬沙输运特征^[20-23]。虽然相关研究仅考虑了潮汐潮流的影响, 针对人工鱼礁附近小尺度湍流对海床沉积物冲淤、再悬浮影响等研究还较少, 但

已证实了三维海洋数值模型在人工鱼礁环境物理效应研究中的可行性。

2 人为扰动下生源要素的空间异质性

人工鱼礁等生境营造会对沉积物-水界面生物地球化学过程产生影响, 扰动物质的循环、迁移和储存, 能量的产生、运输和转化^[24-26]。沉积物-水界面的营养盐交换是维持营养盐迁移循环和初级生产力的关键, 对维持水体中营养盐平衡起“缓冲”作用^[27]。人工鱼礁等人为扰动会改变海床的物理环境, 产生上升流扰动, 从而影响营养盐从沉积物到水体的输运, 颗粒物再悬浮/沉降的数量/质量亦随之发生变化, 并表现出对海床结构改变和水动力条件的高度依赖性^[28-29]。如果海床表层沉积物氧化层被扰动破坏, 会使其上覆水与中下层沉积物发生耦合, 也会影响上覆水营养盐水平和通量^[29-30]。同时, 各种人为扰动带来的环境变化导致生物种群结构和生物量也会随之变化。研究表明, 投礁时间越长, 礁区底栖动物群落具有更复杂的营养结构^[31]。尤其大型底栖动物和双壳贝类的钻穴活动会增强底层水的分子扩散, 改变沉积物生化过程, 影响沉积物-水界面营养盐释放与沉积过程^[32]。生物扰动下沉积物的生物化学环境也相应改变, 从而对沉积物上覆水营养盐水平和通量产生影响, 并表现出季节特征^[29,33-34](图 2)。

海水中生源要素的时空分布特征是物理、生物化学过程等多过程耦合的结果^[35]。自然海域营养盐的来源主要是陆源输入、海底地下水溶出、大气沉降、水团入侵以及沉积物-水界面交换^[36-37]。水动力是海洋生源要素输运、扩散和分布的主要驱动力^[38], 但也受不同海域环境特征影响。通常, 营养盐通量和转归模型被用来描述水体物理和生物化学过程。但是, 目前常用的模型多数属于大尺度、甚至是全球尺度模型, 这些大尺度模型用于小尺度边缘海尤其是海峡、海湾时, 在过程、时空分辨率方面会表现得非常差, 对人为扰动非常敏感^[39]。SCHISM(Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Mode, SCHISM)模型包含水动力模块和 CoSiNE(Carbon, Silicate, Nitrogen Ecosystem, CoSiNE)生态动力学模块^[40-41], 是一个可以模拟小尺度海区物理、生物化学等多过程耦合模型, 曾成功应用于美国 San Francisco Bay 的叶绿素、营养盐变化特征及动力学机制研究^[42], 非常适合海洋牧场水下布设极小尺度海洋工程构

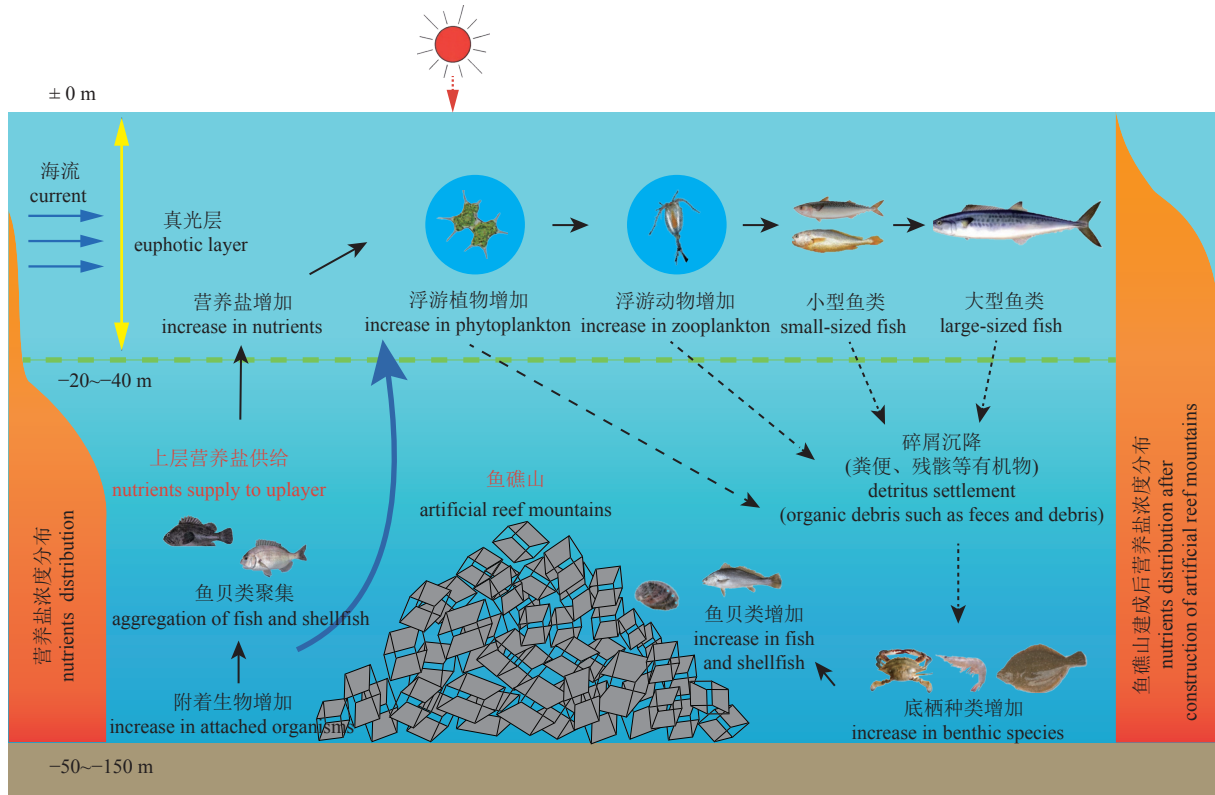


图 2 人工鱼礁区生源要素的输运和利用模式

由 https://www.maff.go.jp/pr/aff/2008/spe1_04.html 改编。

Fig. 2 Transport and utilization model of biogenic elements in artificial reef area

Adapted from https://www.maff.go.jp/pr/aff/2008/spe1_04.html.

件情形下的生态动力学模型构建。另外，大涡模拟法 (large-eddy simulation, LES) 也是一种先进的数学模型，能对水体污染物运动的时均特性及微观特性进行精细模拟。Morton^[43] 利用大涡模拟法成功模拟了水体污染物团的运动，张昌兵等^[44] 建立了基于弱可压缩水流基础上的水质大涡模拟数学模型，证实了大涡模拟方法是模拟天然河流水质十分有效的工具。因而，在构建并优化的海洋米级尺度构筑物 (人工鱼礁等) 识别大涡模拟模型、SCHISM 水动力学模型和 CoSiNE 生态动力学模型的基础上，分析流场变化对水体主要生源要素空间异质性影响，阐明水体生源要素多界面过程及过程耦合的时空演变规律，是评价生境营造对海洋牧场局地尺度初级生产力作用机理的关键环节。

同时，海洋牧场生境营造对海洋动力过程的变化会导致碳生物地球化学循环的特异性。全球海洋为碳汇区，但不同海域的碳汇各具区域特征，如中国南海是碳汇区，东海、黄海则具有显著的源汇季节特征，即冬、春、夏季表现为碳汇，而

秋季表现为碳源^[45-46]。边缘海表层 pCO₂ 的季节变化主要受水团混合和净初级生产力等因素的调节^[46]。各种物理和生物地球化学过程，以及碳和其他生源要素的通量具有高度时空变化特征，通过评估溶解无机碳相对于营养盐的消耗量，可以确定边缘海系统是碳源还是碳汇^[46]。富营养化和氮磷比的改变，以及水文条件的改变都会影响水体的碳汇和源。海藻床可吸收二氧化碳、海草床可直接吸收溶解无机碳增加海洋蓝碳^[47]。但是，海洋牧场特定生境营造后流场变化和净初级生产力提升等多过程耦合对碳汇的影响，及其中的关键性决定因素等都尚待探讨或验证。

3 人为扰动下生物群落构建机制

我国海洋牧场区多处于近岸水域，这里也是巨大的碎屑库和碳库，它为丰富的鱼、虾、蟹、贝类资源提供了食物基础。而生境营造导致的局部流场变化和沉积物-水界面生源要素的空间异质性，将使生物群落结构也随之改变。因此，开展群落构建机制研究是解释海洋牧场生境营造驱动

物种共存及多样性成因的基础。一般认为, 群落构建 (community assembly) 是指物种从一个区域物种库内通过扩散定殖, 并受扩散限制、环境过滤

和物种间相互作用等一系列生物和非生物作用的影响, 而最终形成一个局域群落 (local community) 的过程^[48](图 3)。

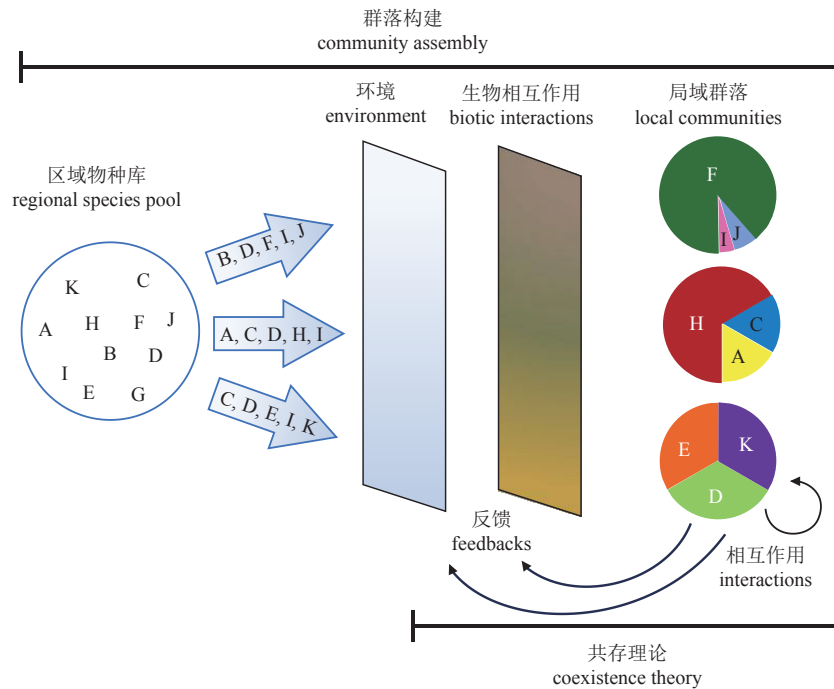


图 3 大范围时空尺度上生物群落的构建过程^[48]

Fig. 3 Community assembly is influenced by processes operating at a wide range of spatiotemporal scales^[48]

Diamond^[49] 通过对新几内亚附近岛屿上鸟类分布格局研究指出, 可能存在一个统一的法则在约束群落中物种的组成, 首次提出了群落构建规则 (community assembly rule) 的概念, 归纳总结了群落内物种共存的一系列规则, 即戴蒙德法则 (Diamond's rule)。随后, 生态学家们对群落中共存物种的检验及群落形成机制展开研究, 并提出了各种解释群落构建机制的理论。例如, Diamond^[49] 提出生态位理论强调确定性因素是主导过程, 认为群落构建是由区域物种库中的物种经过环境过滤和生物间作用后进入局域群落的过程。然而, 传统生态位理论在解释热带雨林群落构建成因时遇到了挑战。为此, Hubbell^[50] 提出的中性理论 (neutral theory), 解释了热带雨林物种共存及群落维持机制, 认为随机性过程如扩散、扩散限制等过程影响群落构建。随着研究不断深入, 相关学者提出了高维生态位假说、生态位差异以及相对适合度差异等理论^[51-52]。上述理论的提出和在诸如陆地微生物群落^[53]、河流鱼类群落^[54] 及大型底栖动物群落^[55] 中的成功应用, 极大加深了对人为扰动下群落构建过程的理解和认识, 为解析

海洋牧场生境营造后生物群落物种共存及多样性形成机制提供了理论支撑。

近年来, 随着分子生物学技术的应用与发展, 从进化关系角度解析群落共存物种的亲缘关系, 将短期局部过程和长期进化尺度上的过程联系在一起, 在阐明群落构建机制中发挥了重要作用^[56-58]。物种间的谱系进化关系反映物种间的亲缘关系, 相关研究认为亲缘关系越近的物种, 其拥有的功能性状越相似, 生态位重叠度越高^[59-60], 即性状具有强烈的谱系信号。在群落构建过程中, 当环境过滤作用主导了群落的构建过程, 那么亲缘物种的生境喜好相似性将导致谱系结构聚集; 竞争及其它种间相互作用可能会阻止近缘物种的共存, 导致谱系结构发散^[61]。值得注意的是, 相关研究表明群落谱系结构还会受到研究尺度、生态特征以及环境变量等影响, 不能仅凭谱系结构来判断群落构建机制^[62]。因此, 在探讨群落构建成因时需要利用功能性状进行佐证分析, 以期更精准地阐明物种共存及多样性形成机制。功能性状 (functional trait) 是指能够影响物种适应性的内在特征, 某些性状与人为扰动密切相关, 因此功能

性状反映出物种的环境适应性并影响个体在群落中的表现^[63-65]。海洋牧场通过人工鱼礁等生境营造对生物产生诱集效应, 物种从近海区域物种库(区域群落)进入海洋牧场新生境(局地群落)的迁移过程, 会受到环境和种间相互作用的共同影响。当环境过滤在群落构建中起主要作用, 那么被环境筛选存活下来的物种应该具有某些相似的功能性状, 因为这些性状保证了物种能够不被环境所淘汰^[66]。基于生物性状分析海草床生境大型底栖动物功能性状对沉积物重金属污染的响应, 发现在污染严重的区域功能性状以地下碎屑食者、二阶机会种和管栖者为主, 以适应不利的底栖环境^[65]。大型底栖动物群落通过提高群落中耐受种或机会种的比例, 以及调整群落的功能性状组合模式等来响应不同梯度的人类活动压力^[67]。

此外, 海洋牧场的大规模增殖放流, 亦可能对物种的功能性状和群落演替方向产生显著影响。在过去几十年里, 为了恢复受损渔业资源, 世界各地利用人工繁育苗种开展增殖放流以补充或增加野生种群的数量。迄今, 尽管有许多无脊椎动物和鱼类增殖放流的案例, 但其增殖放流效果往往受制于捕食压力、年度种群自然补充和放流海域环境承载力等时空波动的限制^[68]。事实上, 增殖放流也存在诸多潜在生态风险, 同一物种的大规模增殖放流会因种群数量的突变影响生态平衡, 并对野生种群的摄食行为和繁殖模式以及食物网结构产生潜在影响。目前, 有关人工繁殖群体对野生种群的遗传风险、对野生种群生态位的挤占, 以及导致野生种群结构的改变等已引起人们的广泛关注^[69]。渔业生物群落是海洋牧场的关键生物类群, 其群落结构的改变会引起牧场食物网能量流动和物质循环的变动, 进而影响牧场生态系统稳定性。研究表明, 生境营造能够提高底栖生物群落多样性, 如牡蛎礁的营造能够提高底栖生物的丰度和多样性, 改善底栖生境的健康状态^[70]。人工鱼礁和天然礁盘对生物均具有明显的聚集效应, 人工鱼礁的规模、礁龄和结构复杂程度等都会影响生物群落结构^[71]。同时, 生境营造、增殖放流等人为扰动也可能改变生物多样性的形成机制。相关研究证实, 人为扰动影响微生物、鱼类、溪流大型底栖动物、紫海胆等群落构建过程, 具体表现为改变生物的生态位宽度, 并产生更强的环境过滤作用^[53-55,72]。生境营造和增殖放流是海洋牧场建设的基础, 人工鱼礁、藻礁及海草床等生

境的构建能有效调节水流速度和沉积速率, 优化底栖生物对食物和空间资源的利用^[73], 促进多种物种的同域共存。增殖放流通过物种间复杂的营养交互作用对牧场生态系统食物网结构具有重要调控作用^[74], 但上述人为扰动在不同强度和时间尺度上如何影响局地尺度牧场海域生物群落的重建, 仍有待于进一步研究验证。

4 人为扰动下海洋牧场生态质量状况评价

海洋牧场生境营造引起的流场变化、沉积物再悬浮及重金属污染物重新释放、物质输运改变等一系列环境扰动亦将影响牧场生境格局及生态功能^[22,75-77]。目前, 国内外学者对海洋牧场生态质量的研究多集中在单一要素分析^[77], 缺乏生态完整性评价, 主要着力于对生物学质量要素的探索与应用, 对构成生态完整性的要素组成等理解尚浅。通常认为, 底栖生物能够反映海洋生态系统生态质量状况, 相关学者针对底栖生物质量评价方法进行了广泛研究, 主要指标有 AZTI 海洋生物指数 (AZTI marine biotic index, AMBI)^[78]、多变量 AZTI 海洋生物指数 (multivariate-AMBI, M-AMBI)^[79]、Bentix 指数^[80] 以及底栖多毛类、端足类机会种指数^[81] 等。上述指数均是针对某一特定水体类型构建, 并不能完全适用于海洋牧场底栖生境评价, 因此有必要对上述评价指标的适用性及其稳健性进行分析。同时, 基于物种水平或者其他单一要素的评价方法并不能全面客观反映海洋牧场复合生境的生态质量状况。生态状况综合评价方法 (ecological quality status, EcoQS) 是基于生物学质量要素、物理化学质量要素和水文形态学质量要素对近岸海域生态状况进行评价的方法, 以欧盟“水管理框架”为代表已广泛应用于地中海沿岸海域生态状况评价^[82], 但关于海洋牧场生态质量状况综合评价研究总体匮乏。Polovina^[83] 提出了生态通道模型 (Ecopath), 用来评估稳定状态水域生态系统组成 (生物种类或种类组) 的生物量和食物消耗, 经过与 Ulanowicz^[84] 的能量分析生态学理论结合, 逐步发展成为一种生态系统营养动力学分析方法。近年来, 伴随增殖放流活动和人工鱼礁等生境营造规模的扩大, 基于 Ecopath 模型评价人工鱼礁生态系统结构, 估算礁区生态容纳量, 已成为海洋牧场生态系统稳定性评价的重要手段,

也是基于生态系统水平制定渔业管理策略的基础依据^[85]。

海洋牧场所营造的复合生境具有动态性和空间异质性特点, 包括了人工鱼礁、藻礁、养殖筏架等多种生境类型。不同生境间生物体的迁移和营养物质的传输, 促进了物质与能量传输流动过程的耦合连通, 即为海洋牧场复合生境的生态连

通性^[86-87]。研究表明, 不同生境间的连通性对维持生物多样性、群落结构及生态系统稳定性等具有十分重要的作用^[87]。譬如牧场水域藻类浮筏养殖抑制了牧食食物链, 而利于底栖动物群落增殖, 这主要归结于水体连通性有助于藻类碎屑为底栖动物提供了能量支持^[88](图 4)。

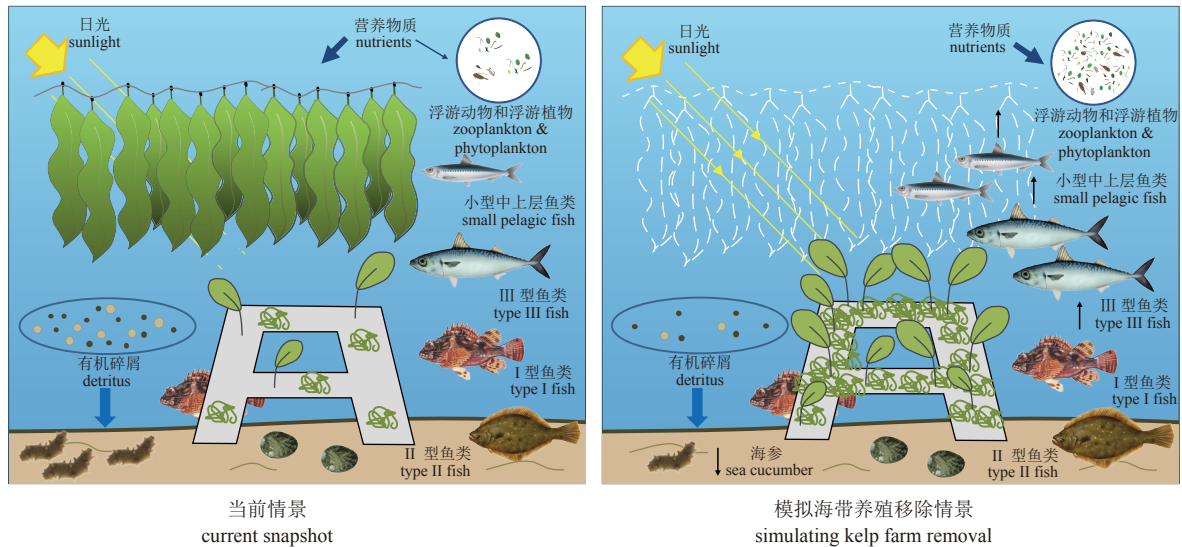


图 4 人工鱼礁生态系统海带养殖和渔业生物间的能量流动^[88]

Fig. 4 Trophic flows between kelp culture and fishery organisms in artificial reef ecosystem^[88]

相较于陆地生态连通性研究, 近海海洋生态连通性研究起步较晚, 始于 20 世纪 90 年代中期。目前, 国内有关海洋牧场复合生境生态连通性的研究极少, 仅见针对褐菖鲉(*Sebastes marmoratus*) 不同生长阶段生境利用规律的探索^[89]。而对复合生境营造、增殖放流群体扩散迁移, 以及由此引发的营养物质传输对海洋牧场生态系统结构与功能的影响等尚未系统阐明, 因而难以从生态连通性角度为海洋牧场复合生境布局优化提供科学参考。所以, 借鉴国内外相对成熟的评价体系、方法和标准, 建立适合小尺度海洋牧场生态质量状况综合评价方法, 并构建相应的监测和管理体系已成为海洋牧场健康发展的迫切需要。

5 存在的问题及建议

5.1 水动力驱动

人工鱼礁在开放海域投放后会产生一系列流场效应, 流场效应的强弱决定了局部海域营养盐和初级生产力水平, 进而影响人工鱼礁的生物诱集和增殖功能。目前国内外对人工鱼礁的流场效

应及水动力特征分析已开展了不少研究, 但相关研究大多停留在对现象的定性描述或者在理想试验条件下的一些限定结论上, 很难定量分析人工鱼礁在自然海域中产生的上升流和背涡流的规模与强度及其对局部海域流场的影响程度, 对人工鱼礁投放后引起的物理环境变化也缺乏系统探讨。

受潮汐、波浪、风、温盐等各种因素的共同影响, 自然海域的物理环境比实验条件下更为复杂, 这都增加了人工鱼礁流场效应的复杂性。人工鱼礁除了自身的流场效应会改变海域局部流场外, 礁体也会使底层海水阻滞作用增强, 对海域底层流速影响显著。通常海洋牧场生境营造过程中会选用多个人工鱼礁组合, 它们产生的流场变化和阻滞作用会在自然海域产生不可忽视的累积效应。因此, 构建精细化、高精度的三维海洋数值模型, 对海洋牧场所在海域的潮汐潮流、温盐、波浪、悬沙等水文环境要素实现精确模拟, 定量分析人工鱼礁流场效应的特征和强度, 人工鱼礁组合投放对周边海域水动力特征的影响等, 是构建环境友好型海洋牧场亟待解决的重要命题。

5.2 生源要素表征

生源要素在海水中的时空分布是物理、化学和生物等多过程相互耦合的结果。人工鱼礁等生境营造后, 流场变化会对海底沉积物-水界面生物地球化学过程产生何种影响? 营养盐从底层沉积物到水体的输运以及悬浮/沉降/再悬浮颗粒物的数量/质量会随之发生什么变化? 流场变化和净初级生产力等多过程耦合将如何影响碳汇? 关于沉积物-水界面物质传输的研究, 主要集中在重金属、放射性元素、营养元素及有机污染物在水体沉积物环境中, 沉积物-水界面间的迁移转化等各种动力学过程的研究^[90]。尽管人们对人工鱼礁、海水养殖等相关的物理、化学过程进行了一些探讨, 但是关于沉积物-水界面营养盐释放与沉积过程的研究, 大多停留在通过分子扩散进行的营养盐“静态”交换通量和交换速率上^[91-92], 尚缺乏生境营造对海洋动力过程人为扰动前提下的“动态”交换关键过程或驱动因子演变的研究。因此, 开展海洋牧场生境营造等人为扰动下的沉积物-水界面生源要素释放与沉积过程研究, 解析生境营造前后沉积物生源要素向水体输运的关键过程和驱动因子的变化, 阐明生源要素的“源和汇”意义重大。

我国海洋牧多建于近岸-6 m~30 m的浅水区, 由于近岸海流较为复杂, 时间上的平均流速或空间上的平均流速并不能代表整个流场, 甚至可能与真实流场相差很大^[93], 因此生源要素的输运、悬浮颗粒物的沉降等过程需要在高分辨率的动态流场中考虑。对海洋牧场碳沉降的探索必须将整个生态系统纳入动态过程。数值模拟则提供了一种高效的方法, 再现了生物代谢率及在水动力作用下运动的实时过程, 因此常被应用于模拟增殖过程与环境间的相互作用^[94]。未来结合海洋牧场特定生境营造后的流场效应, 探讨水体及沉积物环境碳沉积及再悬浮过程, 对沉积物-水界面碳体系的生物地球化学行为进行表征, 揭示生境营造对牧场水域碳汇时空异质性的影响, 可为海洋牧场生境营造模式的优化设计, 降低局部碳源区的出现概率等提供参考依据。

5.3 生物群落重建

海洋牧场生态系统是多种时空尺度动力过程并存, 与自然生境无明确边界又连通一体的半人工局地生态系统。迄今尚未完全厘清生物群落构建中确定性过程和随机性过程在群落物种共存中

的调控作用, 难以科学地认识和评估人工生境营造及资源增殖放流扰动下, 人工鱼礁区底栖生物、岩礁性鱼类等定居性生物的群落构建机制。尽管一些物种的增殖放流策略已得到充分研究, 但大规模增殖放流对群落结构和种群动态等的干扰效应仍然被忽视。对于不同规模海洋牧场生态系统所能接受的干扰尺度更是模糊, 缺少有针对性的研究。利用功能性状研究生境营造、增殖放流等人为扰动下生物群落物种共存及多样性形成机制仍属空白。

今后应重点关注在环境异质性及空间异质性的耦合作用下, 在放流群体与野生群体的种间营养交互作用驱动下, 人工鱼礁区底栖生物和岩礁性鱼类的群落构建机制及其对多重压力的响应, 揭示环境过滤和扩散限制作用对生物多样性维持机制的影响, 科学评估牧场水域生境质量及资源补充潜力, 可为海洋牧场生态系统健康管理提供理论支撑。

5.4 生态系统健康

Rapport^[95]提出, 生态系统健康是指一个生态系统所具有的稳定性和可持续性, 即在时间上具有维持其组织结构、自我调节和对胁迫的恢复能力。为此, 笔者认为, 健康的海洋牧场生态系统, 可理解为受自然或人为活动扰动后能保持稳定的功能和结构, 其物质循环和能量流动不被破坏, 整体功能复杂多样, 水产品可持续产出。Costanza等^[96]认为, 如果一个生态系统是稳定的和持续的, 那这个生态系统就是健康的。影响海洋牧场的生态系统稳定性的因素较多, 评价的指标体系不仅要能反映水文、水质和生物要素, 还要考虑生境营造、增殖放流等人为干预的影响, 即需要融合海洋牧场生境营造及增殖放流引发的环境物理效应、环境化学效应和环境生物效应开展综合评价研究。其中, 沉积环境作为海洋牧场环境演变的信息载体, 涵盖了重要的环境物理、化学和生物信息, 在海洋牧场生态系统服务功能中发挥重要作用。海洋牧场生境营造引起的流场、物质输运等环境扰动直接改变了底质类型和沉积物粒径, 进而影响生源要素的时空演变规律和迁移转化过程。同时, 底栖生物作为沉积环境中的关键生物类群, 是海洋生态系统健康的重要指示生物。物理、化学环境的变化深刻影响底栖生物群落的构建过程。另外, 随着增殖放流群体的导入,

将共同引起牧场食物网能量流动和物质循环的变动, 最终影响牧场生态系统稳定性。因此, 聚焦底栖生态过程和增殖放流群体营养交互作用这两个有限目标, 综合运用生物个体、种群、群落和生态系统相关信息, 阐明牧场生态系统对人为扰动的反馈过程以及生态阈值, 是进行海洋牧场生态系统稳定性评价的比较全面的方法, 也是很有趣的研究方向。人工鱼礁区定居性海洋生物状况是海洋牧场健康状态的一种相对综合的表达, 可反映人为扰动胁迫和自然生态演替的累积效应, 研究结果可为海洋牧场食物网结构和不同营养级能量流动解析, 以及生态承载力评价提供理论支撑。

6 结语

通过生境营造和增殖放流有效提高初级生产力、促进生物多样性增加, 进而实现渔业产量提升和资源恢复之目的, 是基于生态系统的海洋牧场建设与管理的重要环节。围绕海洋牧场生境营造的环境物理、环境化学和环境生物效应, 以及大规模增殖放流的生态影响等基础理论开展系统研究, 解析人为扰动下海洋牧场水动力环境变化、生源要素迁移规律和生物群落结构特征, 从生物和非生物两个方面揭示生境营造和增殖放流的生态效应及其潜在风险, 综合评价海洋牧场生态系统稳定性及其对人为扰动的响应, 对生境营造模式和增殖放流策略优化意义重大。相信随着研究的不断深入, 将进一步推动海洋牧场生态学理论的完善, 最终实现海洋牧场生态系统健康和渔业的可持续发展。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 中华人民共和国农业部. SC/T 9111-2017 海洋牧场分类[S]. 2017.
The Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. SC/T 9111-2017 Classification of marine ranching[S]. 2017 (in Chinese).
- [2] 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).
- [3] 崔勇, 关长涛, 万荣, 等. 人工鱼礁流场效应的数值模拟与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(23): 7393-7396.
Cui Y, Guan C T, Wan R, *et al.* Research and numerical simulation on features of flow field around artificial reefs[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(23): 7393-7396 (in Chinese).
- [4] 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.
Li J, Lin J, Zhang S Y. The numerical experiment on the permeability of a cubic artificial reef and the effect on the flow field around the reef[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2010, 19(6): 836-840 (in Chinese).
- [5] 刘彦, 关长涛, 赵云鹏, 等. 水流作用下星体型人工鱼礁二维流场PIV试验研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2010, 25(6): 777-783.
Liu Y, Guan C T, Zhao Y P, *et al.* Experimental study on two-dimensional flow field of the star artificial reef in the water stream with PIV[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2010, 25(6): 777-783 (in Chinese).
- [6] 郑延璇. 人工鱼礁流场效应与物理稳定性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
Zheng Y X. Flow field effect and physical stability of artificial reefs[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014 (in Chinese).
- [7] Miao Z Q, Xie Y H. Effects of water-depth on hydrodynamic force of artificial reef[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2007, 19(3): 372-377.
- [8] Jiang Z Y, Liang Z L, Tang Y L, *et al.* Numerical simulation and experimental study of the hydrodynamics of a modeled reef located within a current[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2010, 28(2): 267-273.
- [9] Jiang Z Y, Liang Z L, Liu Y, *et al.* Particle image velocimetry and numerical simulations of the hydrodynamic characteristics of an artificial reef[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2013, 31(5): 949-956.
- [10] 赵云鹏, 王晓鹏, 董国海. 波浪作用下三角型人工鱼礁水动力特性数值模拟与实验验证[J]. 海洋工程, 2015, 33(6): 52-61.
Zhao Y P, Wang X P, Dong G H. Numerical simulation

- and experimental validation of hydrodynamic characteristics of submerged artificial reef in waves[J]. *The Ocean Engineering*, 2015, 33(6): 52-61 (in Chinese).
- [11] Baine M. Artificial reefs: A review of their design, application, management and performance[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2001, 44(3-4): 241-259.
- [12] 杨吝, 刘同渝, 黄汝堪. 中国人工鱼礁的理论与实践[M]. 广州: 广东科技出版社, 2005: 69-70.
- Yang L, Liu T Y, Huang R K. The theory and practice of artificial reefs in China[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 2005: 69-70 (in Chinese).
- [13] 张芝永, 拾兵. 泥沙局部冲淤二维数值模拟仿真[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2013, 34(2): 145-150.
- Zhang Z Y, Shi B. Two-dimensional numerical simulation on local mud & sand erosion and deposition[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2013, 34(2): 145-150 (in Chinese).
- [14] Ahmad N, Bihs H, Kamath A, *et al.* Three-dimensional CFD modeling of wave scour around side-by-side and triangular arrangement of piles with REEF3D[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 116: 683-690.
- [15] 车海鸥, 王凯, 张景新. 带自由表面水流与离散颗粒耦合模型研究[J]. *计算力学学报*, 2016, 33(5): 747-752.
- Che H O, Wang K, Zhang J X. Study of numerical model coupling of hydrodynamic CFD-DEM simulation[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2016, 33(5): 747-752 (in Chinese).
- [16] 李欣雨. 人工鱼礁在波浪作用下的流场效应及其局部冲刷数值模拟 [D]. 天津: 天津大学, 2016.
- Li X Y. Numerical simulation on wave-affected flow field and local scour of artificial reefs[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016 (in Chinese).
- [17] 商少凌, 柴扉, 洪华生. 海洋生物地球化学模式研究进展[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(4): 621-629.
- Shang S L, Chai F, Hong H S. An overview of marine biogeochemical modeling[J]. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(4): 621-629 (in Chinese).
- [18] 魏皓, 冯士筭, 武建平, 等. 齐次湍流动能输运方程封闭模型在浅海动力学中的应用[J]. *青岛海洋大学学报*, 2001, 31(6): 821-827.
- Wei H, Feng S Z, Wu J P, *et al.* Application of homogeneous K-equation turbulent closure model in the coastal sea[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2001, 31(6): 821-827 (in Chinese).
- [19] 魏皓, 武建平, 张平. 海洋湍流模式应用研究[J]. *青岛海洋大学学报*, 2001, 31(1): 7-13.
- Wei H, Wu J P, Zhang P. Review on turbulence closure models in ocean hydrodynamics[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2001, 31(1): 7-13 (in Chinese).
- [20] 刘彦. 人工鱼礁水动力特性数值与实验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- Liu Y. Numerical simulations and laboratory experiments of hydrodynamics for artificial reefs[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014 (in Chinese).
- [21] 吴星辰. 人工鱼礁区泥沙运输的数值模拟研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
- Wu X C. Numerical modelling of sediment transport in an artificial reef area[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019 (in Chinese).
- [22] 林军, 吴星辰, 杨伟. 潮流作用下人工鱼礁山海域泥沙运输的数值模拟研究[J]. *水产学报*, 2020, 44(12): 2087-2099.
- Lin J, Wu X C, Yang W. Numerical modelling of sediment transport in artificial seamount by the action of tidal current[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2020, 44(12): 2087-2099 (in Chinese).
- [23] 杨伟, 林军, 唐建江, 等. 规模化透水性人工鱼礁阻流效应的数值模拟[J]. *水产学报*, 2022, 46(12): 2366-2382.
- Yang W, Lin J, Tang J J, *et al.* Numerical simulation of the flow retarding effect of large-scale permeable artificial reefs[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(12): 2366-2382 (in Chinese).
- [24] De Vittor C, Relitti F, Kralj M, *et al.* Oxygen, carbon, and nutrient exchanges at the sediment-water interface in the Mar Piccolo of Taranto (Ionian Sea, southern Italy)[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(13): 12566-12581.
- [25] 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).
- [26] Mu D, Yuan D K, Feng H, *et al.* Nutrient fluxes across sediment-water interface in Bohai Bay Coastal Zone, 中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

- China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 114(2): 705-714.
- [27] Boynton W R, Ceballos M A C, Bailey E M, *et al.* Oxygen and nutrient exchanges at the sediment-water interface: A global synthesis and critique of estuarine and coastal data[J]. *Estuaries and Coasts*, 2018, 41(2): 301-333.
- [28] Falcão M, Santos M N, Drago T, *et al.* Effect of artificial reefs (southern Portugal) on sediment-water transport of nutrients: Importance of the hydrodynamic regime[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, 83(4): 451-459.
- [29] Qin C, Chen P, Zhang A, *et al.* Impacts of marine ranching construction on sediment pore water characteristic and nutrient flux across the sediment-water interface in a subtropical marine ranching (Zhelin Bay, China)[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2018, 16(1): 163-179.
- [30] Warnken K W, Gill G A, Dellapenna T M, *et al.* The effects of shrimp trawling on sediment oxygen consumption and the fluxes of trace metals and nutrients from estuarine sediments[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 57(1-2): 25-42.
- [31] 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).
- [32] 陈振楼, 刘杰, 许世远, 等. 大型底栖动物对长江口潮滩沉积物-水界面无机氮交换的影响[J]. *环境科学*, 2005, 26(6): 43-50.
- Chen Z L, Liu J, Xu S Y, *et al.* Impact of macrofaunal activities on the DIN exchange at the sediment-water interface along the tidal flat of Yangtze River estuary[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(6): 43-50 (in Chinese).
- [33] 王云祥, 李正, 秦传新, 等. 不同季节江蓠脱落物对大型海藻场上覆水的影响[J]. *南方水产科学*, 2016, 12(2): 13-20.
- Wang Y X, Li Z, Qin C X, *et al.* Effect of *Gracilaria confervoides* after falling off on overlying water of seaweed field in different seasons[J]. *South China Fisheries Science*, 2016, 12(2): 13-20 (in Chinese).
- [34] 高天赐, 高学鲁, 邢前国, 等. 秋季牟平海洋牧场及其邻近海域沉积物-水界面营养盐交换通量[J]. *海洋环境科学*, 2020, 39(3): 387-392.
- Gao T C, Gao X L, Xing Q G, *et al.* Exchange fluxes of nutrients across sediment-water interface in the Muping Marine Ranch and its adjacent waters in autumn[J]. *Marine Environmental Science*, 2020, 39(3): 387-392 (in Chinese).
- [35] Skákala J, Bruggeman J, Brewin R J W, *et al.* Improved representation of underwater light field and its impact on ecosystem dynamics: A study in the North Sea[J]. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 2020, 125(7): e2020JC016122.
- [36] Zhang P, Su Y, Liang S K, *et al.* Assessment of long-term water quality variation affected by high-intensity land-based inputs and land reclamation in Jiaozhou Bay, China[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 75: 210-219.
- [37] Gao Y, Wang L F, Guo X H, *et al.* Atmospheric wet and dry deposition of dissolved inorganic nitrogen to the South China Sea[J]. *Science China Earth Sciences*, 2020, 63(9): 1339-1352.
- [38] Salazar A M, Olson S L, Komacek T D, *et al.* The effect of substellar continent size on ocean dynamics of proxima centauri b[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2020, 896(1): L16.
- [39] Bonan G B, Doney S C. Climate, ecosystems, and planetary futures: The challenge to predict life in earth system models[J]. *Science*, 2018, 359(6375): eaam8328.
- [40] Chai F, Jiang M S, Chao Y, *et al.* Modeling responses of diatom productivity and biogenic silica export to iron enrichment in the equatorial Pacific Ocean[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21(3): GB3S90.
- [41] Zhang Y L, Ye F, Stanev E V, *et al.* Seamless cross-scale modeling with SCHISM[J]. *Ocean Modelling*, 2016, 102: 64-81.
- [42] Wang J N, Zhang Z L. Phytoplankton, dissolved oxygen and nutrient patterns along a eutrophic river-estuary continuum: Observation and modeling[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 261: 110233.
- [43] Morton B R, Nguyen K C, Cresswell R W. Similarity and self-similarity in the motion of thermals and puffs[M]//Davies P A, Neves M J V. Recent Research Advances in the Fluid Mechanics of Turbulent Jets and

- Plumes. Dordrecht: Springer, 1994: 50-63.
- [44] 张昌兵, 熊朝坤, 桂林, 等. 水质大涡模拟数学模型研究[J]. *水科学进展*, 2004, 15(4): 431-435.
- Zhang C B, Xiong C K, Gui L, *et al.* Research on large eddy simulation for water quality[J]. *Advances in Water Science*, 2004, 15(4): 431-435 (in Chinese).
- [45] 陈鑫, 宋金明, 袁华茂, 等. 东海2012年夏季海-气界面碳交换及其区域碳汇强度变化趋势初探[J]. *海洋学报*, 2014, 36(12): 18-31.
- Chen X, Song J M, Yuan H M, *et al.* CO₂ fluxes across the air-sea interface of the East China Sea in summer 2012 and the change tendency of regional carbon sink strength[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(12): 18-31 (in Chinese).
- [46] Cao Z M, Yang W, Zhao Y Y, *et al.* Diagnosis of CO₂ dynamics and fluxes in global coastal oceans[J]. *National Science Review*, 2020, 7(4): 786-797.
- [47] 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.
- [48] Hillerislambers J, Adler P B, Harpole W S, *et al.* Rethinking community assembly through the lens of coexistence theory[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2012, 43: 227-248.
- [49] Diamond J M. Assembly of species communities[M]//Diamond J M, Cody M L. *Ecology and Evolution of Communities*. Boston: Harvard University Press, Boston, 1975: 342-344.
- [50] Hubbell S P. *The Unified Neutral Theory of Biodiversity and Biogeography*[M]. Princeton: Princeton University Press, 2001.
- [51] Chesson P. Mechanisms of maintenance of species diversity[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2000, 31: 343-366.
- [52] Clark J S. Beyond neutral science[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2009, 24(1): 8-15.
- [53] Mykrä H, Tolkkinen M, Heino J. Environmental degradation results in contrasting changes in the assembly processes of stream bacterial and fungal communities[J]. *Oikos*, 2017, 126(9): 1291-1298.
- [54] Iacarella J C, Adamczyk E, Bowen D, *et al.* Anthropogenic disturbance homogenizes seagrass fish communities[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(5): 1904-1918.
- [55] Hawkins C P, Mykrä H, Oksanen J, *et al.* Environmental disturbance can increase beta diversity of stream macroinvertebrate assemblages[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2015, 24(4): 483-494.
- [56] Webb C O. Exploring the phylogenetic structure of ecological communities: An example for rain forest trees[J]. *The American Naturalist*, 2000, 156(2): 145-155.
- [57] Swenson N G, Enquist B J, Thompson J, *et al.* The influence of spatial and size scale on phylogenetic relatedness in tropical forest communities[J]. *Ecology*, 2007, 88(7): 1770-1780.
- [58] Donoghue M J. A phylogenetic perspective on the distribution of plant diversity[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(S1): 11549-11555.
- [59] Wiens J J, Graham C H. Niche conservatism: Integrating evolution, ecology, and conservation biology[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2005, 36: 519-539.
- [60] Kozak K H, Wiens J. Does niche conservatism promote speciation? A case study in north American salamanders[J]. *Evolution*, 2006, 60(12): 2604-2621.
- [61] Cavender-Bares J, Kozak K H, Fine P V A, *et al.* The merging of community ecology and phylogenetic biology[J]. *Ecology Letters*, 2009, 12(7): 693-715.
- [62] Arnan X, Cerdá X, Retana J. Partitioning the impact of environment and spatial structure on alpha and beta components of taxonomic, functional, and phylogenetic diversity in European ants[J]. *PeerJ*, 2015, 3: e1241.
- [63] Kraft N J B, Valencia R, Ackerly D D. Functional traits and niche-based tree community assembly in an Amazonian forest[J]. *Science*, 2008, 322(5901): 580-582.
- [64] Kenny A J, Jenkins C, Wood D, *et al.* Assessing cumulative human activities, pressures, and impacts on North Sea benthic habitats using a biological traits approach[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2018, 75(3): 1080-1092.
- [65] Hu C Y, Dong J Y, Gao L J, *et al.* Macrobenthos functional trait responses to heavy metal pollution gradients in a temperate lagoon[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 253: 1107-1116.
- [66] 赵郁豪. 千岛湖片段化生境中蚂蚁群落的构建机制[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- Zhao Y H. The mechanism of ant community assembly in fragmented habitats of the Thousand Island Lake[D]. 中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

- Hangzhou: Zhejiang University, 2020 (in Chinese).
- [67] Dong J Y, Zhao L L, Sun X, *et al.* Response of macrobenthic communities to heavy metal pollution in Laoshan Bay, China: A trait-based method[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 167: 112292.
- [68] Kitada S. Economic, ecological and genetic impacts of marine stock enhancement and sea ranching: A systematic review[J]. *Fish and Fisheries*, 2018, 19(3): 511-532.
- [69] Laikre L, Schwartz M K, Waples R S, *et al.* Compromising genetic diversity in the wild: Unmonitored large-scale release of plants and animals[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2010, 25(9): 520-529.
- [70] Liu Z Q, Yu P, Chen M H, *et al.* Macrobenthic community characteristics and ecological health of a constructed intertidal oyster reef in the Yangtze Estuary, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 135: 95-104.
- [71] Wu Z X, Tweedley J R, Lonergan 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.
- [72] Qin C X, Chen P M, Sarà G, *et al.* Ecological implications of purple sea urchin (*Heliocidaris crassispina*, Agassiz, 1864) enhancement on the coastal benthic food web: Evidence from stable isotope analysis[J]. *Marine Environmental Research*, 2020, 158: 104957.
- [73] Ambo-Rappe R. Developing a methodology of bioindication of human-induced effects using seagrass morphological variation in Spermonde Archipelago, South Sulawesi, Indonesia[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 86(1-2): 298-303.
- [74] 杨超杰, 吴忠鑫, 刘鸿雁, 等. 基于Ecopath模型估算莱州湾朱旺人工鱼礁区日本蟳、脉红螺捕捞策略和刺参增殖生态容量[J]. *中国海洋大学学报*, 2016, 46(11): 168-177.
- Yang C J, Wu Z X, Liu H Y, *et al.* The fishing strategy of *Charybdis japonica* and *Rapana venosa* and the carrying capacity of *Apostichopus japonicus* in Zhuwang, Laizhou artificial reef ecosystem based on Ecopath model[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2016, 46(11): 168-177 (in Chinese).
- [75] 王丕波, 宋金明, 郭占勇, 等. 海洋表层沉积物再悬浮的诱因及其对生源要素循环的影响[J]. *海洋科学*, 2005, 29(10): 77-80.
- Wang P B, Song J M, Guo Z Y, *et al.* The inducements of resuspension of sea surface sediment and their effects on recycle of biogenic elements[J]. *Marine Sciences*, 2005, 29(10): 77-80 (in Chinese).
- [76] Hu C Y, Yang X L, Dong J Y, *et al.* Heavy metal concentrations and chemical fractions in sediment from Swan Lagoon, China: Their relation to the physiochemical properties of sediment[J]. *Chemosphere*, 2018, 209: 848-856.
- [77] 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).
- [78] Borja A, Franco J, Pérez V. A marine biotic index to establish the ecological quality of soft-bottom benthos within European estuarine and coastal environments[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 40(12): 1100-1114.
- [79] Muxika I, Borja Á, Bald J. Using historical data, expert judgement and multivariate analysis in assessing reference conditions and benthic ecological status, according to the European Water Framework Directive[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, 55(1-6): 16-29.
- [80] Simboura N, Zenetos A. Benthic indicators to use in ecological quality classification of Mediterranean soft bottom marine ecosystems, including a new biotic index[J]. *Mediterranean Marine Science*, 2002, 3(2): 77-111.
- [81] Dauvin J C, Ruellet T. Polychaete/amphipod ratio revisited[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, 55(1-6): 215-224.
- [82] Borja Á, Rodríguez J G. Problems associated with the 'one-out, all-out' principle, when using multiple ecosystem components in assessing the ecological status of marine waters[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 60(8): 1143-1146.
- [83] Polovina J J. Model of a coral reef ecosystem I: The ECOPATH model and its application to French Frigate Shoals[J]. *Coral Reefs*, 1984, 3(1): 1-11.
- [84] Ulanowicz R E. Growth and Development: Ecosystems Phenomenology[M]. New York: Springer-Verlag, 1986.
- [85] 吴忠鑫. 山东俚岛人工鱼礁区生态效果初步评价 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.

- Wu Z X. The preliminary assessment of ecological effect of Lidao artificial reef zone, Shandong province[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015 (in Chinese).
- [86] 杨红生. 海洋牧场构建原理与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- Yang H S. Construction Principle and Practice of Marine Ranching[M]. Beijing: Science Press, 2017 (in Chinese).
- [87] 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*, 2015, 35(21): 6923-6933 (in Chinese).
- [88] Wu Z X, Zhang X M, Lozano-Montes H M, *et al.* Trophic flows, kelp culture and fisheries in the marine ecosystem of an artificial reef zone in the Yellow Sea[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, 182: 86-97.
- [89] 汪振华, 钟佳明, 章守宇, 等. 褐菖鲉幼鱼对贻贝养殖生境的利用规律初探[J]. 水产学报, 2019, 43(9): 1900-1913.
- Wang Z H, Zhong J M, Zhang S Y, *et al.* Habitat use of juvenile rockfish (*Sebastes marmoratus*) in mussel farming waters: A preliminary study[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(9): 1900-1913 (in Chinese).
- [90] 李铁, 叶常明, 雷志芳. 沉积物与水间相互作用的研究进展[J]. 环境科学进展, 1998, 6(5): 29-39.
- Li T, Ye C M, Lei Z F. Advances of interactions between sediments and water[J]. *Advances in Environmental Science*, 1998, 6(5): 29-39 (in Chinese).
- [91] 孙珊, 刘素美, 任景玲, 等. 桑沟湾养殖海域营养盐和沉积物-水界面扩散通量研究[J]. 海洋学报, 2010, 32(6): 108-117.
- Sun S, Liu S M, Ren J L, *et al.* Distribution features of nutrients and flux across the sediment-water interface in the Sanggou Bay[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32(6): 108-117 (in Chinese).
- [92] 卢璐. 海州湾人工鱼礁海域环境质量分析 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2010.
- Lu L. The chemical environment analysis of artificial reef area in Haizhou Bay[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2010 (in Chinese).
- [93] Weise A M, Cromey C J, Callier M D, *et al.* Shellfish-DEPOMOD: Modelling the biodeposition from suspended shellfish aquaculture and assessing benthic effects[J]. *Aquaculture*, 2009, 288(3-4): 239-253.
- [94] Reid G K, Lefebvre S, Filgueira R, *et al.* Performance measures and models for open-water integrated multi-trophic aquaculture[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2020, 12(1): 47-75.
- [95] Rapport D J. What constitutes ecosystem health?[J]. *Perspectives in Biology and Medicine*, 1989, 33(1): 120-132.
- [96] Costanza R, Norton B G, Haskell B D. Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management[M]. Washington: Island Press, 1992.

Ecosystem stability of marine ranching and its response to disturbance: research status, issues, and suggestions

ZHANG Xiumei ^{1*}, JI Qiyang ², HU Chengye ¹, XU Huanzhi ²,
WANG Yihang ¹, YANG Xiaolong ¹, GUO Haoyu ¹

(1. Fisheries College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;

2. Marine Science and Technology College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

Abstract: Marine ranching is a fishing model based on the principle of ecosystem. It constructs or repairs habitats for marine organisms to reproduce, grow, feed or keep safe in specific sea areas through constructing artificial reefs and stock enhancement, proliferates and maintains fishery resources, improves the marine ecological environment, and achieves sustainable utilization of fishery resources. In recent years, while the marine ranching is developing rapidly, it is also facing many challenges, which greatly restricts its healthy development. In the process of constructing marine ranching, construction of habitat like artificial reefs, as well as stock enhancement, has played important roles in resource conservation and aquatic product output. They are also considered key to improve the marine ecological environment and achieve sustainable utilization of biological resources. However, the placement of artificial reefs and stock enhancement in marine ranching can bring a series of physical, chemical, and biological disturbances to the ecosystem. The effects and manifestations of these artificial disturbances are diverse, and will they become the expected gain interference? Will inappropriate habitat construction or excessive stock enhancement reduce ecological carrying capacity, cause habitat degradation, and alter the composition of communities and carbon cycling patterns? The current basic theories on habitat construction and stock enhancement are weak, and the stability and anti-interference ability of ecosystems are unclear. Especially, little is known about the structure and functional implementation process of small-scale marine ranching ecosystems, as well as their ecological carrying capacity. Therefore, it is urgent to carry out theoretical verification and quantitative research on the environmental effects of artificial reefs and other habitats, as well as the resource replenishment effects of stock enhancement, in order to fully understand the duality of these artificial disturbances. This article digs into over 90 relevant papers and briefly reviews the domestic and international advances on the effects of constructing artificial reef habitats in aspects of hydrodynamic characteristics, migration of biogenic elements, mechanism of community assembly, and ecosystem stability assessment. Emphasis was placed on the complexity and dynamics of the small-scale marine ranching ecosystem structure, with focus on how the layout of artificial reefs affects the evolution of the hydrodynamic environment, sediment, and biogenic elements in the ranching areas, as well as the mechanisms of species coexistence under artificial disturbances such as stock enhancement. Focusing on key issues such as the stability and anti-interference ability of marine ranching ecosystems, this article explores the shortcomings and development directions of current researches from four aspects: hydrodynamic driving conditions, biogenic elements characterization, community assembly, and ecosystem health assessment. This provides a reference basis for the construction of artificial reefs, seaweed beds, and other ecological habitats in marine ranching, as well as the optimization of resource restoration models.

Key words: marine ranching; community assembly; stock enhancement; environmental effect; ecological carrying capacity

Corresponding author: ZHANG Xiumei. E-mail: xiumei1227@163.com

Funding projects: The Key Research and Development Projects of Zhejiang Province (2021C02047); National Key Research and Development Program of China (2019YFD0901303)