

典型海域生境修复与生物资源养护 研究进展与展望*

杨红生^{1, 2, 3, 4, 5, 6} 许 帅^{1, 2, 3, 4, 5} 林承刚^{1, 2, 3, 4}
孙景春^{1, 2, 3, 4} 张立斌^{1, 2, 3, 4, 5}

(1. 中国科学院海洋研究所 海洋生态与环境科学重点实验室 青岛 266071; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋生态与环境科学功能实验室 青岛 266237; 3. 中国科学院海洋大科学研究中心 青岛 266071; 4. 中国科学院海洋牧场工程实验室 青岛 266071; 5. 中国科学院大学 北京 100049; 6. 中国科学院种子创新研究院 武汉 430072)

摘要 高强度的人类活动和剧烈的全球气候变化导致了海洋污染加剧、海洋生态系统退化和海洋生物资源衰退, 海洋生境修复和资源养护成为世界各国普遍采取的应对措施。本文从生境修复设施与技术、生物资源养护技术和监测管理等方面, 综述了典型海域生境修复与资源养护的主要研究进展, 并从生物行为控制、承载力提升、设施装备、融合发展和生态系统管理等角度展望了未来研究热点和发展模式, 以期对未来海洋生境修复和生物资源养护提供参考。

关键词 生境修复; 资源养护; 修复技术; 修复设施

中图分类号 X171; Q178.53 **doi:** 10.11693/hyh20200100031

随着人类活动和全球气候变化的不断加剧, 我国近海生境明显退化, 渔业资源严重衰退。大规模围填海工程、工农业活动产生的大量废水和污水的无序排放、超容量海水养殖活动、过度捕捞、近海油气矿产资源的开采与密集运输等是造成生境退化、资源衰退的主要原因(Turner *et al.*, 1999; Ding *et al.*, 2020)。湿地、河口、海湾等近海典型海域生态系统, 受人类活动影响较大, 加之近年来受全球变暖、海水酸化和异常极端天气频发等环境影响, 受损状况尤为严重(王鹏等, 2019)。

海湾是海洋向陆地凹入的一片三面环陆的水域, 是人类离海洋最近的海域, 具有避风和抗浪的作用, 是建设港口的优良海域。由于海湾被陆地包围, 陆地上的营养盐大量流入海湾, 使海湾中的渔业资源比其他海域更丰富, 是发展渔业和制盐业的重要场所。很多海湾地区还具有丰富的油气资源、潮汐等动力资源,

经济发展迅速, 如著名的纽约湾区、旧金山湾区、东京湾区、粤港澳大湾区都是人口密集、经济发达区域。据近几年《中国海洋生态环境状况公报》分析, 受以经济发展为主要目标的工农业活动的严重干扰, 陆源排污入海污染问题严重, 近一半海湾四季均出现劣四类水质, 生物资源衰退明显, 近 30 年来平均资源量下降了 70%以上^①。据统计, 与 20 世纪 50 年代相比, 孕育生命的海草床和珊瑚礁等海洋典型渔业生境分布面积减少 80%以上, 海洋生物赖以生存的产卵场和迁徙通道受到严重破坏, 生物多样性减少, 食物网结构简单化, 经济生物低龄化、小型化, 海底荒漠化趋势明显(Short *et al.*, 1996; Aronson *et al.*, 2003; Orth *et al.*, 2006; Waycott *et al.*, 2009; 李森等, 2010)。

海洋污染、海岸带生态系统退化、海洋生境及生物资源衰退等问题已经引起全世界的高度关注(Seaman, 2007)。对典型海域的保护修复工作已经迫

* 山东省支持青岛海洋科学与技术试点国家实验室重大科技专项, 2018SDKJ0502 号; 热带岛礁型海洋牧场发展模式创新与应用, KFJ-STZ-ZDTP-055 号; 泰山学者特聘专家计划; 中国科学院“现代海洋牧场构建原理与工程技术创新交叉团队”项目, Y82327101L 号。杨红生, 博士生导师, 研究员, E-mail: hshyang@qdio.ac.cn

收稿日期: 2020-01-20, 收修改稿日期: 2020-05-23

① 《2016 年中国海洋生态环境状况公报》、《2017 年中国海洋生态环境状况公报》和《2018 年中国海洋生态环境状况公报》

在眉睫、刻不容缓。然而,目前我国典型海域生境与资源的受损现状调查评估缺乏长期系统的定量化研究,受损生境修复缺乏与自然和谐统一的生态型修复技术和设施,生物资源养护缺乏生态系统层面的策略和实践,生境与生物资源养护效果的评估缺乏有效的标记技术和评估模型,难以满足典型海域受损生境修复和资源养护的技术需求(张立斌等, 2012)。

1 典型海域生境修复设施与关键技术

1.1 人工鱼礁修复原理和技术

人工鱼礁生态作用得以证实。人工鱼礁是人为放置在海床上的一种或多种天然或人工构造物,可以改变与海洋生物资源相关的物理、生物和社会经济过程(Seaman, 2000)。人工鱼礁具有的生态功能主要有:改善海域的生态环境,营造海洋生物的良好栖息环境,为鱼类、贝类等海洋生物等提供生长、繁殖、索饵和庇敌的场所等。人们利用人工鱼礁达到保护、增殖和提高渔获量等目的(陶峰等, 2008)。人工鱼礁是海洋牧场工程建设中的重要组成部分,根据增殖目标生物种类的不同可分为鱼礁、藻礁、参礁、鲍礁等种类,其中增殖海参、鲍、脉红螺等海珍品的礁体可统称为海珍品增殖礁,对增殖海珍品具有提供栖息空间、保护遮蔽物和供应饵料等作用(Ambrose *et al*, 1990)。人工鱼礁的建造材料以及构型设计对礁体能够充分发挥作用至关重要,因此礁体的材料、重量、尺寸、结构复杂性、表面粗糙度、布局等应根据规划要求与生物因素和水动力学特征相适应(张立斌等, 2012)。

礁体材料选择得以重视。人工鱼礁建造材料中,钢筋混凝土是最常见的一种,造价便宜而且结构稳定性高。江艳娥等(2013)比较了水泥类、油井类、舰船类等不同材料的人工鱼礁对生物的诱集效果,表明水泥材料的诱集效果比天然礁体好且成本最低。近年来,制作鱼礁的材料也发生了很大变化,出现了钢制鱼礁、玻璃钢鱼礁、塑料嵌板组合鱼礁等多种形式(于沛民等, 2006; Oyamada *et al*, 2008; 王震等, 2019)。王震等(2019)通过挂板实验,研究了普通硅酸盐水泥、添加贝壳粉硅酸盐水泥和钢板等不同礁体材料对附着生物群落结构的影响,结果表明添加贝壳粉硅酸盐水泥附着的生物种类和生物量最大,生物附着效果最好。杨红生等(2010)针对海湾生态系统软泥底质海域礁体无法稳定等问题,变废为宝,筛选出轻质牡蛎壳作为适宜造礁材料,实现了废弃贝壳的

资源化利用和有效的“碳封存”,创制了笼式和袋式牡蛎壳海珍礁,礁体自重轻、抗淤积能力强、孔隙率高,有利于微藻等多种饵料生物附着和留存。目前,人工鱼礁材料呈现以多孔的生态混凝土材料为主,多种材料并进的多元化发展趋势(徐丹等, 2020)。

礁体结构效应得以评价。人工鱼礁投放后,会产生一定的经济效益和生态效益,其中鱼礁的结构起到了至关重要的作用,但目前人工鱼礁的结构设计尚无明确的原理和依据。张立斌等(2009)针对部分离岸岛屿浪高流急、初级生产力低等特点,基于刺参、鱼类等海洋牧场主要经济生物的行为学参数,研制了多层组合式海珍礁,阶梯型层板设计实现了礁体受光面的最大化,各层板均可附着大型藻类,促进了初级生产力和供饵力的大幅提升,礁体层板结构的异质空间扩展了刺参及趋礁性鱼类的栖息场所。礁体投放后,海湾型海洋牧场礁体附着藻类增加至 23 种,生物量达 $166\text{g}/\text{m}^2$,供饵力提高 30 倍,栖息空间增加 20 倍,刺参亩产量可达 300kg,礁体内部游泳动物生物量达 $69.42\text{g}/\text{m}^3$,投入产出比为 1:20—1:30;岛礁型海洋牧场刺参亩产量由 75kg 提升至 210kg,单礁聚集鱼类 6 尾以上,龙须菜产量 1.2 吨/亩。盛晚霞等(2016)设计了一种以海藻鱼礁、变流鱼礁和保育鱼礁为主要结构组成的复合浮鱼礁,其中海藻鱼礁具有为鱼类提供食物及产卵地的功能;变流鱼礁能够将富含浮游生物和温度较高的上层水送入下层,具有加快上、下层海水交换效率的功能;保育鱼礁具有为鱼类提供较多躲藏空间的功能。姜昭阳等(2019)从流场效应、生物效应、遮蔽效应的角度阐述人工鱼礁结构设计的基本原理,举例说明了相关的依据和方法,并总结分析了适合不同海域类型的人工鱼礁区建设模式及其未来发展建议,为人工鱼礁的结构设计和海洋牧场规划提供参考。王云龙等(2019)在象山港海洋牧场对人工鱼礁进行了设计和布局,设计出了 2 种适宜兼具促进海藻生长和浮式鱼礁功能的海藻床;设计出的 3 层圆形框架结构的立体增殖鱼礁型海藻床在满足海藻生长需要的同时,也可为中上层小型鱼类或幼鱼提供摄食、栖息和避害的场所。同时,人工鱼礁具有的生态效应如何、不同人工鱼礁的增殖效果如何等相关研究也在同步进行(宓慧菁等, 2015; 吴伟等, 2016)。

礁体设计基础研究亟待加强。相对于开发利用人工鱼礁较早的日本、美国和韩国等发达国家,我国开展人工鱼礁研究相对较晚,虽取得一定的成绩,但多

借鉴或照搬国外经验, 未考虑我国近海生境资源现状与国外的差异性, 研究水平主要停留在对表面现象的描述上, 仍然缺乏足够的理论基础和必要的定量研究, 特别是在人工鱼礁结构的设计与优化中仍存在很多问题, 因此应加强人工鱼礁基础研究的力度, 开展适合我国国情的人工鱼礁建设模式研究(姜昭阳等, 2019)。

1.2 牡蛎礁修复原理和技术

牡蛎礁生态系统修复十分迫切。牡蛎礁是一种生物礁系统, 由大量鲜活牡蛎在水底硬质表面聚集和固着生长所形成, 是广泛分布于温带河口和滨海区的重要生境基础, 具有净化水体、维持生物多样性、防止岸线侵蚀等多种重要生态功能(Dame *et al.*, 1989, 1993; Ulanowicz *et al.*, 1992)。近一个世纪以来, 由于对牡蛎资源的过度捕捞、环境污染和病害频发, 世界许多河口区牡蛎礁生境遭受严重破坏甚至丧失, 对河口和滨海区生态系统造成了严重的影响, 如改变了生态系统的结构与功能, 加剧富营养化及有毒有害赤潮的发生, 严重威胁着重要渔业资源的维持和补充(Rothschild *et al.*, 1994)。为修复相应地区的牡蛎礁生境及其重要生态功能, 人们开发出了由自然牡蛎和人工构造物组成的人工牡蛎礁这一修复技术。

国外牡蛎礁保护与修复效果显著。国际上, 许多国家开展牡蛎礁修复工作较早, 美国早在 20 世纪 50 年代就在大西洋沿岸及墨西哥湾开展了一系列牡蛎礁修复项目, 并取得了不错的效果。如在美国东海岸的切萨皮克湾, 通过建立大量的人工牡蛎礁, 2010 年的牡蛎数量比 1994 年多了近 20 倍, 并对人工牡蛎礁修复成本进行了估算(Lipcius *et al.*, 2018)。Rutledge 等(2018)根据牡蛎的生活史, 建议在缺乏附着基底的环境下, 对牡蛎礁修复项目选址时应根据当地的生物和非生物环境, 选择合适的材料设计构建附着礁体进行修复。美国(北卡罗来纳州和弗吉尼亚州)和智利设立了天然牡蛎礁保护区, 取得了显著成效, 证明保护区建设是保护天然牡蛎礁的有力手段(Beck *et al.*, 2011)。

国内牡蛎礁修复得以高度重视。我国开展牡蛎礁修复工作相对较晚, 但也取得较好进展。全为民等(2006)于 2000 年和 2004 年在长江口南北导堤及其附近水域进行了巨牡蛎的增殖放流, 构造了面积约 75km² 人工牡蛎礁体, 节约了牡蛎礁修复的成本。全为民等(2017)在江苏省蛎蚜山收集熊本牡蛎壳, 经冲洗、消毒和装袋后, 制成了长约 50cm、直径约 25cm、网

目约 2.5cm 的圆柱形牡蛎壳礁袋, 将其紧密排列在潮间带上, 并组成了单层礁体(SLR)和多层礁体(MLR)这两种礁体类型, 总面积高达 2335m²。Yang 等(2019)立足祥云湾海洋牧场, 利用挂板实验、潜水采样和布设地笼网, 研究了人工牡蛎礁的群落特征和生态效应, 研究结果证明了人工牡蛎礁能够增加海洋初级生产潜力, 具备资源养护作用(Yang *et al.*, 2019)。

1.3 海草床生境修复原理及技术

海草床生态系统现状令人堪忧。海草是能完全适应海洋生活的单子叶高等植物, 多生长于潮间带至潮下带浅海区域, 在全球沿海生态系统中发挥着重要的作用。海草床是国际社会公认的重要近海渔业生境, 具有重要的生态功能, 如渔业生物及珍稀物种的栖息地和食物来源功能、水质净化和营养循环功能、护堤减灾功能和气候调节功能等(Short *et al.*, 1996, 2011)。工业革命以来, 在近海人类活动的频繁干扰(如港口建设、海洋污染)等人为因素及全球变化、自然灾害等自然因素共同作用下, 全世界的海草资源大面积衰退, 据估计, 截止到 2009 年, 全球约三分之一的海草床已消失, 消失面积多于 100000km² (Short *et al.*, 1996, 2011; Waycott *et al.*, 2009)。

海草床修复受到国际高度关注。美国、澳大利亚、墨西哥等发达国家早在 20 世纪 80 年代就开展了相关研究工作, 取得了一些成效, 其中最常用的修复方法是移植法。美国学者 Thorhaug (1987)在佛罗里达 Biscayne 湾大规模成功进行了移植鳗草的实验; Park 等(2007)利用订书针法、框架法、贝壳法移植鳗草根状茎用以修复海草床, 并比较了三种方法的优缺点。澳大利亚开展的海草床移植实验主要应用草块法(van Keulen *et al.*, 2003), Paling 等(2001a, 2001b)先后介绍了移植海草的机器 ECOSUB1 和 ECOSUB2, 将海草移植推向了机械化。此外美国学者 Orth 等(2009)研究出一种播种机, 可将鳗草的种子均匀的播撒在底质 1—2cm 深处, 但是运用此方法种子的发芽率并没有得到明显的提高。

我国海草床修复尚处于起步阶段。张沛东等(2013)对海草植株移植法的类别作了进一步系统划分, 并对每种移植方法的操作过程及其优缺点进行了综述, 还对各移植方法的移植种类、地点、效果及使用年代进行了比较, 进一步探讨了海草移植法中存在的一些问题(如主要环境因子对移植效果的影响), 并对今后的研究方向进行了展望; Zhang 等(2015a)还开发出一种有效的播种海草种子的方法, 适合大规

模的保护和修复海草床。针对我国温带海域海草床退化严重、修复技术薄弱的难题, Zhang 等(2020)在国内首次查明了温带海域海草床分布现状与退化机制, 揭示了优势海草种子库特征、种群补充机制和遗传多样性(Xu *et al.*, 2018), 阐明了海草床与关键环境因子互作机制及其对氮营养盐富集的早期响应和指示作用, 量化了海草床的生态功能。Xu 等(2016)创建了海草种子保存技术和种子库, 突破了海草种子高效萌发技术, 萌发率达 38% (国外<15%)(Gu *et al.*, 2018a, 2018b; Xu *et al.*, 2019b; Yue *et al.*, 2019a, 2019b); 周毅等发明了平铺地毯式海草种子播种技术, 幼苗成活率由不足 1%提高到 21%; 发明了 5 种海草植株移植技术(框架法、枚订法、麻绳夹苗法、根部绑石法和泥筒法), 成活率达 80%以上(国外<50%), 潮下带海草移植效率提高 80%以上, 移植后植株密度达 388 株/ m^2 (刘鹏等, 2013; Zhou *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2019)。

海草床生态系统修复技术得以建立。海草床的衰退引起了世界范围内的高度关注, 目前开展海草床修复方法的研究工作主要的方法有生境修复法、移植法和种子法(Calumpong *et al.*, 2001; 李森等, 2010)。生境修复法的实质是海草床自然恢复, 此方法投入少、代价低, 但周期长。移植法是目前成功率较高的海草床修复方法, 指在适宜海草生长的海域直接移植海草幼苗或者成熟的植株, 通常是将单个或多个海草茎枝与固定物(枚订、石块、框架等)一起移植到新生境中, 甚至直接移植海草草皮, 使其在新的生境中生存、繁殖下去, 最终建立新的海草床的方法; 根据海草移植方式和数量不同, 移植法分为草块法和根状茎法。草皮法需要较大的海草资源量, 同时对原来海草床的影响较大; 移植根状茎法需要较少的海草资源量, 移植成功率较高, 是一种有效且合理的海草床修复方法, 可分为枚订法、插管法、框架移植法等。种子法顾名思义是指利用海草有性生殖的种子来恢复和重建海草床, 海草种子体积小、易运输, 利用种子法修复海草床对原海草场造成危害较小还可以提高海草床的遗传多样性, 因此逐步发展成为海草场生态修复的新手段, 但如何有效地收集和保存种子, 找到有效的播种方式以及适宜的播种时间, 是利用种子法修复海草床的难点(周毅等, 2020)。

海草床保护与修复工程亟待加强。进一步明确海草床的重要生态作用及面临的威胁, 研发海草床修复工程技术, 开展适合我国国情与海域特点的海草床生态系统自然保护区建设, 提出控制陆源污染、降

低捕捞强度等措施和对策, 有助于保护和修复我国的海草床(王亚民等, 2010; 吴沅珈等, 2018)。

1.4 海藻床生境修复原理及技术

海藻床生态系统退化严重。海藻床是由生长在冷温带大陆架区硬质底质上的大型底栖海藻和其他海洋生物类群(如浮游生物、游泳动物和底栖动物)共同构成的一种近岸海洋生态系统, 在近岸海域发挥重要的生态功能(何培民等, 2015)。然而在全球气候变化、海洋酸化等自然因素和人为干扰等多种外界因素的影响下, 世界上许多区域的海藻场都呈现出退化趋势, 美国、欧洲和日本等地均有关于海藻场大面积消失的报道, 多个国家相继开展了海藻场生态系统修复研究与生态工程应用(章守宇等, 2018)。

海藻床生境修复藻种选择至关重要。王云龙等(2019)以象山港海藻本底调查为基础, 在象山港海洋牧场人工藻场构建过程中, 对 15 种海藻完成了室内培养研究, 筛选出坛紫菜(*Porphyra haitanensis*)、龙须菜(*Gracilariopsis lemaneiformis*)、海带(*Laminaria japonica*)、羊栖菜(*Sargassum fusiforme*)、鼠尾藻(*S. thunbergii*)等适宜目标建场海藻。大型藻类修复环境效果和碳汇功能十分明显, 但其生物消长季节性强, 难以实现周年修复。岳维忠等(2004)利用底栖生物对底泥的扰动作用, 将营养盐释放到海水, 并以马尾藻、石莼等大型藻类吸收释放营养盐以净化水质, 设计了对大亚湾养殖水域底栖生物+藻类立体修复体系, 取得了不错的效果。毛玉泽等(2005)查明了大型藻类龙须菜和海带对海区营养盐的吸收效率, 评估了其富营养化海区的生态修复潜力; 阐明了温带海藻床关键种龙须菜和海带等对富营养化海区的生态修复功能, 创建了不同耐温藻类周年轮作修复模式, 低水温季节(2—15℃)栽培海带等褐藻, 高水温季节(15—27℃)栽培龙须菜等红藻; 在荣成湾示范区龙须菜和海带亩产 3.56 吨和 2.20 吨, 年产 12 万吨, 碳吸收量相当于造林 7.2 万公顷, 为近 10 万吨刺参、皱纹盘鲍提供优质饵料, 实现大型藻类对海区营养盐周年利用和水质环境持续改善。

海藻床生态系统亟待实施工程化修复。章守宇等(2007)提出海藻床生态工程的概念, 即在沿岸海域, 通过人工或半人工的方式修复或重建正在衰退或已经消失的原天然海藻场, 或营造新的海藻场, 从而在相对短的时期内形成具有一定规模、较为完善的生态体系, 并能够独立发挥生态功能的综合工艺工程; 并提出海藻场生态工程可大致分为重建型、修复型与营

造型 3 种类型。海藻场生态工程的实施步骤一般包括: 现场调查与评估、物种选择、基底整备、培育、移植与播种和养护。人工藻礁是人工鱼礁的一种, 是海藻场生态工程的核心设施, 目前人们在藻礁的建设材料和外形设计方面研究较多。

1.5 珊瑚礁修复原理及技术

珊瑚礁生态系统修复迫在眉睫。珊瑚礁是生物多样性极高的重要生境但却极其脆弱, 由于人为因素和全球气候变化的影响, 全球珊瑚礁生态系统退化严重, 至少 20% 的珊瑚礁已发生了退化或消失, 珊瑚白化等珊瑚病害频发, 预计到 2030 年, 全球约 70% 的珊瑚礁将会白化(Aronson *et al.*, 2003; Maynard *et al.*, 2016)。珊瑚礁生态修复成活率低是国际公认的技术难题, 修复珊瑚礁生态系统已成为全球性要解决的难题。针对不同受损程度的珊瑚礁生态系统, 其神态修复策略可分为自然修复、生物修复和生态重构三种。珊瑚移植法是指将整个珊瑚、珊瑚断片或幼虫移植到目标区域, 修复受损珊瑚礁生态系统的方法, 具有高效和成本低的优点, 是修复珊瑚礁的主要手段(龙丽娟等, 2019)。

国外珊瑚礁生态系统修复初见成效。国外发达国家珊瑚礁生态系统修复工作起步较早, Richmond 等(1990)早在 1990 年首次在印度洋-太平洋沿海以及红海海域开展大规模的珊瑚礁生态修复研究。Kaly (1995)在大堡礁通过测试多种珊瑚移植方法, 证明了规模化移植珊瑚断枝恢复珊瑚礁生态系统的可行性。Rinkevich 等(2005)总结澳大利亚、日本和美国等多个国家的珊瑚礁修复工作, 得出人们主动的对珊瑚礁生态系统生物多样性的保护措施和适当的人为干预有利于加速珊瑚礁的生态恢复过程。Blakeway 等(2013)通过投放人工礁体和移植珊瑚两种方法, 对澳大利亚帕克角(Parker Point)海区进行珊瑚修复研究, 结果表明人工礁体是珊瑚固着生长的适宜基质, 有利于珊瑚的快速覆盖。Martinez 等(2019)研究表明移植珊瑚的种类、大小以及移植方案、环境等均会影响其存活率。Hein 等(2017)总结了 80 多篇珊瑚礁生态系统修复的相关文献, 提出应长期监测评估修复后珊瑚礁生态系统的建议。

国内珊瑚礁生态系统修复取得新进展。我国高度重视珊瑚礁修复, 修复原理和技术取得一定进展(龙丽娟等, 2019)。黄晖、王爱民等研究团队在珊瑚礁修复方面做了大量的工作: 查明了珊瑚繁殖与幼体发育过程, 发明了一种珊瑚受精卵附着前的培育方法

及培育装置, 珊瑚受精卵成活率提高 10 倍以上(张浴阳等, 2012); 研发了钻孔移植技术与浮床苗圃培育技术, 使珊瑚移植效率提高 70% (高永利等, 2013); 发明了特制珊瑚移植钉, 增强了珊瑚的固定效果, 可抵御 10 级台风的侵袭, 有效降低珊瑚脱落率 33% (张浴阳等, 2013, 2019); 研制了浮床型珊瑚培育苗圃, 弥补了树状珊瑚苗圃只能培育分枝状珊瑚的缺陷; 利用底质网片固定法稳固珊瑚碎屑率达到 92.3%, 明显好于周边对照区域, 仅 60%—70% 的碎屑稳固率, 减轻了珊瑚礁底质上的珊瑚骨骼断枝和碎屑在海浪影响下对现存珊瑚的碰撞与对珊瑚幼体的覆盖(黄洁英等, 2012); 发明了底质稳固技术与珊瑚礁三维结构修复技术, 增大了珊瑚礁生物的栖息空间, 促进了退化珊瑚礁的修复过程(梁宇娴等, 2020)。珊瑚礁修复示范结果表明: 结合造礁石珊瑚人工培育与放流技术, 珊瑚礁上的珊瑚幼体补充数量从 1.6 ind./m² 提高到 18.4 ind./m², 修复区珊瑚覆盖率从修复前的 5.93% 增加至 11.2%。利用天然珊瑚岛礁, 建设保护型海洋牧场, 限制非法拖网作业对珊瑚礁盘的破坏; 珊瑚分布区域增加了 20% 以上, 人工鱼礁上也形成了健康的珊瑚群落; 礁区鱼类资源量增加 50% 以上, 其中优势鱼类种群局部密度达 0.2 ind./m³, 珊瑚礁盘区域野生鱼类种类达 8 种(高永利等, 2013; 黄晖等, 2020)。

2 典型海域生物资源养护

2.1 关键种苗扩繁技术

种质种苗是实现高效资源增殖的基础。苗种的数量与质量从根本上决定了资源养护的效果。关键生物种苗扩繁和人工放流是实现生物资源养护的必要环节。“十一五”以来, 农业部启动了“国家水产遗传育种中心”建设计划, 已经立项的水产遗传育种中心建设项目有 25 个。涉及水产种类 23 种, 包括冷水性鱼类、长江流域鱼类、鲫鱼、鲃鲮类、罗非鱼、斑点叉尾鲴、鲢鱼、中国对虾、南美白对虾、罗氏沼虾、斑节对虾、海产贝类等(王清印, 2013)。

苗种培育技术取得了长足的进步。我国虹鳟鱼(王强等, 2017)、南美白对虾(郭闯等, 2017)、罗非鱼(飞羽, 2014)、鲃鲮类(杨正勇等, 2012)和贝类(薛锋等, 2012)等苗种培育技术均取得了较高的成功率和较好的工厂化应用。虽关键种扩繁大多实现了规模化, 但工厂化人工繁育的苗种觅食和躲避敌害的能力差, 难以适应放流海域的环境需求。作者研究团队建立了刺参生态苗培育新技术并颁布省级技术规范, 实现

了刺参苗种立体化培育,平均成活率由低于 30%提高到 52.5%,培育密度达常规技术的 3—4 倍,单位面积产量提升 2—3 倍;突破了脉红螺亲螺性腺促熟、幼虫培育、附着变态和苗种规模化中间培育等关键技术,构建了脉红螺高效苗种繁育技术体系,幼虫变态率提高 60 倍;突破了栉江珧亲贝性腺提前促熟技术和苗种繁育技术瓶颈,首次解决了幼虫漂浮粘连的难题,培育密度提高 2—3 倍;牛超等(2017)大幅提高了金乌贼产卵率、受精卵孵化率和苗种成活率,解决了繁育规模化问题,受精卵孵化率达 95%以上;中国海洋大学遗传育种团队首次建立了完善的长蛸立体式苗种培育新技术,研制的蛸巢产卵护卵新装置,长蛸幼体孵化率提高 1.5 倍(钱耀森等, 2013; 薄其康等, 2014)。喻子牛(2020)突破砗磲幼虫虫黄藻植入难点和变态率极低的瓶颈问题,率先在海南成功研发了砗磲规模化人工繁育和中培技术,并进行了放流增殖试验,取得了良好的效果。

2.2 生物承载力评估技术

承载力评估是开展资源养护最重要的基础数据,有效评估资源养护目标海域的生物承载力,是从全局角度统筹规划目标海域建设的需要,是实现可持续发展的保障。基于生物承载力选择合适的生物增殖种类、确定合理的生物资源投放流量与投放规模,进而达到精准增殖生物资源的效果;另外,依据生物承载力可确定最大可持续采捕量,可以用以指导目标海域开展可持续捕捞活动,实现对渔业资源的可持续利用,达到区域建设经济效益和生态效益最大化的效果。但现有海洋生物资源养护缺乏生物承载力评估环节,修复种类和数量缺乏科学依据,使生物资源养护具有一定盲目性。

生态系统承载力评估方法和模型多样。不同类型的生态系统限制生物承载力的因子不同,因此评估生物承载力的使用的方法和模型也会有所不同。其中, Ecopath with Ecosim (EwE)模型将多个领域的知识(如热力学、营养级描述、信息理论和网络分析等)运用到对生态系统的研究中,是对水域生态系统的生物承载力及相关生物可持续产出能力进行研究的有力工具,已被广泛地运用到对海洋、湖泊、海湾等水域生态系统的研究中(Polovina, 1984a, 1984b)。其中, Ecopath 模型是一种基于生态系统层面描述食物网关系的静态模型,涵盖了生态系统中所有营养级,用以解析、评价、预测生态系统中各过程及其相互作用,广泛应用于不同生态系统中不同营养级的经济生物的生态容纳量评

估(Kluger *et al.*, 2016); Ecosim 模型是一种基于生态系统层面描述食物网关系的动态模型,其计算方式是基于前述 Ecopath 型中参数而得到的结果,能通过调整各功能组捕食效率来调节各功能组生物量变化趋势,能精确判定该生态系统是“自上而下”还是“自下而上”的生态机制(Christensen *et al.*, 2005)。

典型海洋牧场的承载力得以评估。吴忠鑫等(2013)基于线性食物网模型,对俚岛人工鱼礁区生态系统特征和能量流动规律进行了系统的分析,估算了俚岛人工鱼礁区生态系统内刺参和皱纹盘鲍的生态容纳量。许祯行等(2016)基于 Ecopath 模型,构建了獐子岛人工鱼礁区生态系统能量流动结构和功能变化,结果表明,獐子岛人工鱼礁区海域生态系统处于尚未稳定的成熟期。杨红生(2018)应用水域生态系统 EwE 模型,分别构建了藻礁型海洋牧场——祥云湾海洋牧场和蛸礁型海洋牧场——莱州湾海洋牧场的生态系统物质流动模型,并利用该模型评估了海洋牧场中重要经济生物的生物承载力,系统说明两种海洋牧场生态系统成熟状态如祥云湾海洋牧场生态系统既有不成熟生态系统的一面,如食物网结构简单等,同时也具有一定的成熟生态系统特征,如总初级生产量和总呼吸量比值接近 1 等。生态容量评估评估结果表明:唐山祥云湾日本蟳生态容量为 3.90t/km²、刺参 330.00t/km²、脉红螺 77.00t/km²,莱州湾中国对虾 0.60t/km²,三疣梭子蟹 1.11t/km²,荣成湾人工鱼礁区刺参 309.40t/km²,海州湾前三岛海域许氏平鲷 0.17t/km²。针对海湾群落稳定性较差、顶级捕食者缺失等问题,作者所在团队综合分析不同海湾生物资源种群组成和营养结构,筛选生态关键种和重要经济种,确定棘皮动物(刺参)、底栖滤食性贝类(栉江珧)、甲壳类(中国对虾、三疣梭子蟹)、头足类(长蛸、金乌贼)、鱼类(许氏平鲷、褐牙鲆)等为修复关键种类,组建了沉积食性动物、杂食性动物、动物食性动物等 3 个动物功能群,为莱州湾、荣成湾、海州湾牧场资源的科学修复提供了依据,实现了生产型增殖放流向生态型资源养护的跨越。

2.3 生物功能群资源养护技术

遗传资源管理方法得以建立。传统生物资源养护主要以单一物种的增殖放流为主,而增殖种类和数量的配比缺乏科学选择和估算,易造成群落结构失衡。国外有研究指出,过多增殖放流个体与野生个体之间的杂交会对野生种群产生遗传风险,甚至导致自然种群的灭绝,并提出可靠的遗传资源管理方法,

包括六个步骤: (1) 评估种群修复的成本和收益; (2) 设定目标和遗传基准; (3) 使用适当的亲鱼种群并驯化; (4) 设计释放策略, 以最大程度地发挥补充作用的效果; (5) 跟踪释放后的个体; (6) 最小化对野生种群的遗传影响(Grant *et al.*, 2017; Kitada, 2018)。

生物承载力评估结果亟待应用。Zhang 等(2015b)根据海洋牧场结构特征和生物承载力评估结果, 综合分析了不同类型海洋牧场生物资源种群组成和营养结构, 筛选和确定了生物修复关键种, 在掌握关键种食性特点、分布水层等生态位特征基础上, 建立了海湾型海洋牧场(如莱州湾、祥云湾海洋牧场)的“海藻—鲍鱼—刺参”和“海藻—扇贝—刺参”两种功能群构建模式, “海藻—鲍鱼—刺参”模式, 适宜配比为 20:1:2, 礁区底栖藻类等天然饵料供给能力提高 30 倍; “海藻—扇贝—刺参”模式, 适宜配比为 20:10:1, 形成了明显的局部海藻床, 刺参密度提高 8—16 倍, 扇贝成活率提高了 22%。建立了岛礁型海洋牧场(如海州湾海洋牧场)“海藻—鱼—刺参”功能群构建模式, 适宜配比为 20:1:1, 龙须菜藻体月增重 15 倍以上, 藻类碎屑为刺参提供了优质天然饵料, 提升了牧场区生态系统物质和能量的传递效率及系统稳定性, 有效提升了生物资源养护效果(Ru *et al.*, 2017, 2019)。

3 典型海域生境修复和资源养护的监测管理

3.1 标记和遥测技术

生物标记技术得以开发。由于缺乏有效的生物标记及遥测技术, 生物修复效果评价仍以潜水观察为主, 缺乏客观性、准确性。对增殖生物进行有效的长期标记、观测和追踪, 可以高效、准确的评价其增殖放流效果和渔业资源现状。

许强等(2013)建立了刺参石灰环嵌套标记法, 郝振林等(2008)建立了金乌贼荧光-茜素络合物标记法, 突破了刺参和金乌贼长期标记的技术难题, 刺参 3 个月标签保留率达 93.3%, 金乌贼标记保持 270 天以上; Lv 等(2011)优化了许氏平鲉 VIE 荧光标记法和褐牙鲈 T 型标挂牌标记法, 许氏平鲉和褐牙鲈标记保存率均达 95%以上, 有效提升了回捕率计算的准确性。王云龙等借鉴国内外增殖苗种标记技术领域的先进经验, 经探索与实践证明体长频率分步法、分子标记、体外挂牌标记分别可作为象山港海洋牧场区日本对虾、中国明对虾和黄姑鱼增殖苗种的标记判别方法, 并成功应用耳石元素指纹标记技术对池塘养殖阶段

的黑鲷和大黄鱼进行标记(王云龙等, 2019)。

未接触式遥测技术得以完善。Liu 等(2015)还开发了湿重视频测量技术、VPS (水下定位系统)生物遥测技术和双目立体视频测量技术, 有效解决了刺参、鱼类在海区生活状态下活体质量难以准确测量的难题, 视频测量技术实现刺参湿重的非接触式快速准确测定(预测模型相关系数 R^2 高达 0.92); 还将鱼类 VPS 生物遥测与生物标记技术相结合, 实现了鱼类游泳瞬时速度的测定和游泳轨迹的追踪, 接收器最大跟踪距离 500m, 三维定位精度 1m; 鱼类双目立体视频测量技术水下测量精度达 1.2cm, 误差仅为 5%。

3.2 声学监测技术

声学探测已成为运用最广泛的手段。利用多种声学设备, 如单波束声呐、多波束声呐和鱼探仪等, 对生境修复区的植物、地形和鱼类的状况进行分析, 建立相应的技术体系, 为高效监测、评价、管理生境修复区的生物资源提供技术支持。

郭禹等(2020)使用 BioSonics DT-X 科学回声探测仪辅以拖网采样对马鞍列岛海域渔业资源时空分布特征及其与环境间关系进行了评估。Xu 等(2019a)利用单波束声呐探测技术对威海天鹅湖鳗草海草床的时空分布特征进行研究, 并通过这一技术在祥云湾附近海域发现了目前国内发现目前中国面积最大的鳗草海草床, 海草床面积高达 29.17km², 极大丰富了中国海草数据库, 为周边海洋牧场的构建打下良好的基础(周毅等, 2019)。同时利用声呐探测技术协助对人工鱼礁进行识别探测调查研究也在同步发展(逯金明, 2018; 雷利元等, 2019; 沈蔚等, 2019)。

3.3 监测管理平台

我国近海环境复杂多变, 高温、低氧、台风等极端环境对海洋牧场生物安全影响巨大, 而海区远离陆地且难以布设环境监测装备, 无法实现环境及生物数据及时获取, 不利于日常管理及维护。

王志滨等(2017)提出了一套完整的海洋牧场岸基有线监测系统, 同时还设计了一套终端监控软件安装在监测控制中心, 实现远程控制指令能够在岸基系统与海底观测系统之间依次下达, 满足了对水下人工渔礁周围环境视频监控的需求。邢旭峰等(2017)以自制浮标平台为载体, 采用海洋环境因子及水下影像采集和传输技术, 研发了海水养殖环境信息综合监测系统, 实现了海洋牧场水环境因子和水下养殖生物的实时监测。作者所在团队研制了全向型水下摄像机、水下无线网络摄像装置、水下监控机器人、

基于物联网的水下环境远程监控系统等海洋牧场监测装备,建立了基于浮标、船载传感器系统、无人机、遥感技术的生态环境监测平台,研发了水下智能识别系统和专家决策系统,实现了环境参数、资源状况全天候监测和实时传输,为实现资源和环境“可视、可测、可报”提供了装备支撑。准确预警预报了莱州湾海洋牧场夏季高温低氧、海州湾海洋牧场浒苔过境等多次风险灾害(杨红生, 2017)。

3.4 综合管理模式

在综合管理模式方面,相关研究团队构建了“互联网+海洋牧场”技术体系,实现了智能化、精细化和综合化管理模式。创建了“科研院所+企业+合作社+渔户”相结合的泽潭组织模式,在北方建立了“生境优化+资源增殖+精深加工”的三产贯通发展模式,在南方建立了“生境优化+资源增殖+生态旅游”的渔旅融合发展模式,实现牧场企业发展和渔民收入的同步提升、海域生态和产出效益的同步改善,带动渔民就业促进了休闲垂钓、渔业体验、潜水观光等旅游产业发展(杨红生, 2017)。

4 展望

4.1 生物行为控制技术

应进一步突破对典型海域生态系统的生态关键种与优势经济种的行为控制技术,如利用部分鱼类具有趋光性、趋化性或趋声性的习性,进行生物驯化,不但使得放养的鱼苗不会从海洋牧场流失,还能吸引野生的鱼类进入生态系统,实现对重要增殖放流经济物种的优质安全生产与高效管理。

4.2 生物承载力提升技术

应进一步研发新型生态礁体材料、设计、制造、组合与布局技术,“因湾制宜”“因种而异”,重点突破大型人工鱼礁结构的设计与制造等关键技术;制定和优化海藻场/海草床的修复与移植步骤规范,深入研究大型藻类和海草在特定环境条件下的生长机制、与周围环境及生物间的互作机制,系统研发新型修复设施装备与技术等,从而有效控制海洋生境碎片化,提升受损生态系统的生物承载力;另外,针对中国不同典型海域的生境特征,应分别进一步优化各海域生态系统食物网结构,并建立生物承载力评估技术体系,为相关海域生物资源的可持续开发、管理和利用提供有效的技术方案。

4.3 机械化、自动化装备与技术

针对滩涂、浅海环境特点,根据资源养护生物习

性及结构特征,开发养护生物的水下识别、精准计量设备及计算模型,研发对养护经济物种新型自动化、机械化投苗、管理、采捕设施,完善经济物种全过程的管理技术、机械化捕捞技术,提高采捕效率,降低劳动强度,节省人力,减少采捕过程对生态系统生境及经济物种的损伤。

4.4 融合发展模式的构建

应充分利用海上风能、波浪能、太阳能、潮汐能等清洁能源,集约高效利用海域空间资源,建立人工鱼礁与海上风电结合、监测管理平台与海上波浪能、太阳能结合等融合发展技术体系,研发新型增殖型风电基础装备及监测管理平台,构建“蓝色粮仓+蓝色能源”的发展新模式,保障平台能源供给的同时,兼顾清洁能源产出与渔业资源持续发展。应“因海而异”拓展发展方向,创建多元融合发展模式。如构建“三产融合”发展模式,融合分别以农牧渔业、精深加工业和文化旅游业为主为代表的第一、二和三产业,提高生态服务价值同时还有利于生态环境的维持和改善;如构建“渔旅融合”发展模式,在特定海域适度开展景观型人工鱼礁布放,适度发展游钓渔业、潜水观光等旅游产业;如构建路基(肥料供给)、滩涂(苗种培育)、浅海(肥料支持)、离岸深水智慧渔场(食物生产)四场“联动模式”,通过四个区域物质和能量的流动,功能互补,从而整体提高生态环境效益(杨红生等, 2019; 唐启升, 2019)。

4.5 基于生态系统的管理

揭示典型海域生境修复与资源养护原理,建立基于生态系统的生境修复与资源养护管理体系。建立健全相关法律法规,规范化进行修复、养护、捕捞等操作过程,并加强对海洋生态文明理念及相关法律法规的宣传力度,以保证海域生境修复和资源养护工作的顺利推动。

参 考 文 献

- 于沛民, 张秀梅, 2006. 日本美国人工鱼礁建设对我国的启示. 渔业现代化, (2): 6—7, 20
- 飞羽, 2014. 海水养殖罗非鱼鱼苗培育技术. 中国渔业报, 2014-04-21(B03)
- 王强, 潘元潮, 陆波等, 2017. 斑点鲢鲢培育技术. 养殖与饲料, (10): 41—42
- 王鹏, 张连杰, 闫吉顺等, 2019. 辽宁省海洋生态修复现状、存在的问题及对策建议. 海洋开发与管理, 36(7): 49—52
- 王震, 公丕海, 关长涛等, 2019. 青岛石雀滩海域人工鱼礁材料对附着生物群落结构的影响. 渔业科学进展, 40(4): 163—171

- 王云龙, 李圣法, 姜亚洲等, 2019. 象山港海洋牧场建设与生物资源的增殖养护技术. 水产学报, 43(9): 1972—1980
- 王亚民, 郭冬青, 2010. 我国海草场保护与恢复对策建议. 中国水产, (10): 24—25
- 王志滨, 李培良, 顾艳镇, 2017. 海洋牧场生态环境在线观测平台的研发与应用. 气象水文海洋仪器, 34(1): 13—17
- 王清印, 2013. 我国水产种业现状及发展愿景. 当代水产, 38(11): 50—52
- 牛超, 杨超杰, 黄玉喜等, 2017. 金乌贼新型产卵附着基的实验研究. 中国水产科学, 24(6): 1234—1244
- 毛玉泽, 杨红生, 王如才, 2005. 大型藻类在综合海水养殖系统中的生物修复作用. 中国水产科学, 12(2): 225—231
- 龙丽娟, 杨芳芳, 韦章良, 2019. 珊瑚礁生态系统修复研究进展. 热带海洋学报, 38(6): 1—8
- 邢旭峰, 王刚, 李明智等, 2017. 海洋牧场环境信息综合监测系统的设计与实现. 大连海洋大学学报, 32(1): 105—110
- 全为民, 冯美, 周振兴等, 2017. 江苏海门蛎岬山牡蛎礁恢复工程的生态评估. 生态学报, 37(5): 1709—1718
- 全为民, 沈新强, 罗民波等, 2006. 河口地区牡蛎礁的生态功能及恢复措施. 生态学杂志, 25(10): 1234—1239
- 刘鹏, 周毅, 刘炳舰等, 2013. 大叶藻海草床的生态恢复: 根茎棉线绑石移植法及其效果. 海洋科学, 37(10): 1—8
- 江艳娥, 陈丕茂, 林昭进等, 2013. 不同材料人工鱼礁生物诱集效果的比较. 应用海洋学学报, 32(3): 418—424
- 许强, 孙璐, 张立斌等, 2013-06-12. 一种适用于刺参的体外长效标记方法: 中国, CN103141418A
- 许祯行, 陈勇, 田涛等, 2016. 基于Ecopath模型的獐子岛人工鱼礁海域生态系统结构和功能变化. 大连海洋大学学报, 31(1): 85—94
- 李森, 范航清, 邱广龙等, 2010. 海草床恢复研究进展. 生态学报, 30(9): 2443—2453
- 杨正勇, 郭鸿鹄, 张钰研, 2012. 鲆鲽类苗种技术创新与推广对策——基于生产者技术需求调研的思考. 渔业信息与战略, 27(3): 183—188
- 杨红生, 2017. 海洋牧场构建原理与实践. 北京: 科学出版社, 195—355.
- 杨红生, 2018. 海洋牧场监测与生物承载力评估. 北京: 科学出版社, 135—234
- 杨红生, 张立斌, 张涛等, 2010-01-20. 一种以牡蛎壳为材料的刺参增殖海珍礁及其增殖方法. CN101627734A
- 杨红生, 章守宇, 张秀梅等, 2019. 中国现代化海洋牧场建设的战略思考. 水产学报, 43(4): 1255—1262
- 吴伟, 姜少杰, 袁俊等, 2016. 带叶轮的人工鱼礁流场效应的数值模拟研究. 科技创新与应用, (32): 16—18
- 吴沅珈, 张宏科, 2018. 广西合浦海草床变化情况及保护对策. 中国科技信息, (22): 68—69
- 吴忠鑫, 张秀梅, 张磊等, 2013. 基于线性食物网模型估算荣成俚岛人工鱼礁区刺参和皱纹盘鲍的生态容纳量. 中国水产科学, 20(2): 327—337
- 何培民, 刘媛媛, 张建伟等, 2015. 大型海藻碳汇效应研究进展. 中国水产科学, 22(3): 588—595
- 沈蔚, 马建国, 张进等, 2019. 基于侧扫声纳的人工鱼礁自动识别方法研究. 海洋测绘, 39(6): 34—37, 42
- 张立斌, 许强, 杨红生等, 2009-06-03. 一种适用于浅海近岸海域的多层板式立体海珍礁. CN101444195A
- 张立斌, 杨红生, 2012. 海洋生境修复和生物资源养护原理与技术研究进展及展望. 生命科学, 24(9): 1062—1069
- 张沛东, 曾星, 孙燕等, 2013. 海草植株移植方法的研究进展. 海洋科学, 37(5): 100—107
- 张浴阳, 黄晖, 黄洁英等, 2013. 西沙群岛珊瑚幼体培育实验. 海洋开发与管理, 30(S1): 78—82
- 张浴阳, 黄晖, 雷新明等, 2019-03-08. 珊瑚用η形钉及其应用. CN109441928A
- 张浴阳, 黄洁英, 杨剑辉等, 2012-06-13. 一种珊瑚受精卵附着前的培育方法及培育装置. CN102487898A
- 岳维忠, 黄小平, 黄良民等, 2004. 大型藻类净化养殖水体的初步研究. 海洋环境科学, 23(1): 13—15, 40
- 周毅, 许帅, 徐少春等, 2019. 中国温带海域新发现较大面积(大于0.5 km²)海草床: II 声呐探测技术在渤海唐山沿海海域发现中国面积最大的鳗草海草床. 海洋科学, 43(8): 50—55
- 周毅, 徐少春, 张晓梅等, 2020. 海洋牧场海草床生境构建技术. 科技促进发展, 16(2): 200—205
- 宓慧菁, 王晓宇, 王麒麟等, 2015. 不同人工鱼礁模型对许氏平鲈的诱集效应. 科技创新导报, 12(2): 38—39, 41
- 郝振林, 张秀梅, 张沛东等, 2008. 金乌贼荧光标志方法的研究. 水产学报, 32(4): 577—583
- 姜昭阳, 郭战胜, 朱立新等, 2019. 人工鱼礁结构设计原理与研究进展. 水产学报, 43(9): 1881—1889
- 钱耀森, 郑小东, 刘畅等, 2013. 人工条件下长蛸(*Octopus minor*)繁殖习性 & 胚胎发育研究. 海洋与湖沼, 44(1): 165—170
- 徐丹, 徐文祥, 刘红飞等, 2020. 生态混凝土鱼礁的应用及发展趋势. 山西建筑, 46(8): 90—91
- 高永利, 黄晖, 练健生等, 2013. 大亚湾造礁石珊瑚移植迁入地的选择及移植存活率监测. 应用海洋学学报, 32(2): 243—249
- 郭闯, 张敏, 盖建军等, 2017. 土池温室大棚淡化培育南美白对虾苗种技术实践. 科学养鱼, (2): 11—12
- 郭禹, 章守宇, 程晓鹏等, 2020. 马鞍列岛海域渔业资源声学评估. 水产学报, 44(7): 1—12
- 唐启升, 2019. 渔业资源增殖、海洋牧场、增殖渔业及其发展定位. 中国水产, (5): 28—29
- 陶峰, 贾晓平, 陈丕茂等, 2008. 人工鱼礁礁体设计的研究进展. 南方水产, 4(3): 64—69
- 黄晖, 张浴阳, 刘骋跃, 2020. 热带岛礁型海洋牧场中珊瑚礁生境与资源的修复. 科技促进发展, (129): 225—230
- 黄洁英, 黄晖, 张浴阳等, 2012-07-25. 一种适合长期应用于珊瑚礁区的水下标签以及标识方法. CN102610162A
- 盛晚霞, 张丽珍, 王江涛等, 2016. 生态型人工鱼礁的设计. 科技创新与应用, (32): 95—97
- 章守宇, 孙宏超, 2007. 海藻场生态系统及其工程学研究进展. 应用生态学报, 18(7): 1647—1653
- 章守宇, 向晨, 周曦杰等, 2018. 枸杞岛海藻场6种大型海藻光合荧光特性比较. 应用生态学报, 29(10): 3441—3448
- 梁宇娴, 俞晓磊, 郭亚娟等, 2020. 3种传统方法对不同珊瑚表面积测量的适用性及其校准方法——以3D扫描技术为基准. 热带海洋学报, 39(1): 85—93
- 逯金明, 2018. 基于多波束和侧扫声纳的人工鱼礁区对比分析.

- 山东工业技术, (5): 183
- 喻子牛, 2020. 砗磲人工繁育、资源恢复与南海岛礁生态牧场建设. 科技促进发展, (129): 231—236
- 雷利元, 尤广然, 赵东洋等, 2019. 侧扫声呐系统和网络 RTK 技术在人工鱼礁探测中的应用. 测绘与空间地理信息, 42(5): 35—37
- 薛 锋, 倪建忠, 杨正兵, 2012. 杂色蛤滩涂苗种中间培育技术. 科学养鱼, (6): 45—46
- 薄其康, 郑小东, 王培亮等, 2014. 长蛸(*Octopus minor*)初孵幼体培育与生长研究. 海洋与湖沼, 45(3): 583—588
- Ambrose R F, Anderson T W, 1990. Influence of an artificial reef on the surrounding infaunal community. Marine Biology, 107(1): 41—52
- Aronson R B, Bruno J F, Precht W F *et al*, 2003. Causes of coral reef degradation. Science, 302(5650): 1502—1504
- Beck M W, Brumbaugh R D, Airoidi L *et al*, 2001. Oyster reefs at risk and recommendations for conservation, restoration, and management. BioScience, 61(2): 107—116
- Blakeway D, Byers M, Stoddart J *et al*, 2013. Coral colonisation of an artificial reef in a turbid nearshore environment, Dampier Harbour, Western Australia. PLoS One, 8(9): e75281
- Calumpong H P, Fonseca M S, 2001. Seagrass transplantation and other seagrass restoration methods. In: Short F T, Coles R G eds. Global Seagrass Research Methods. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 425—443
- Christensen V, Walters C J, Pauly D, 2005. Ecopath with Ecosim: A User's Guide (Version 5.1). Vancouver: Fisheries Centre, University of British Columbia
- Dame R, Libes S, 1993. Oyster reefs and nutrient retention in tidal creeks. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 171(2): 251—258
- Dame R F, Spurrier J D, Wolaver T G, 1989. Carbon, nitrogen and phosphorus processing by an oyster reef. Marine Ecology Progress Series, 54: 249—256
- Ding X S, Shan X J, Chen Y L *et al*, 2020. Variations in fish habitat fragmentation caused by marine reclamation activities in the Bohai coastal region, China. Ocean & Coastal Management, 184: 105038
- Grant W S, Jasper J, Bekkevold D *et al*, 2017. Responsible genetic approach to stock restoration, sea ranching and stock enhancement of marine fishes and invertebrates. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 27(3): 615—649
- Gu R T, Zhou Y, Song X Y *et al*, 2018a. Tolerance of *Ruppia sinensis* seeds to desiccation, low temperature, and high salinity with special reference to long-term seed storage. Frontiers in Plant Science, 9: 221
- Gu R T, Zhou Y, Song X Y *et al*, 2018b. Effects of temperature and salinity on *Ruppia sinensis* seed germination, seedling establishment, and seedling growth. Marine Pollution Bulletin, 134: 177—185
- Hein M Y, Willis B L, Beeden R *et al*, 2017. The need for broader ecological and socioeconomic tools to evaluate the effectiveness of coral restoration programs. Restoration Ecology, 25(6): 873—883
- Kaly U L, 1995. Experimental test of the effects of methods of attachment and handling on the rapid transplantation of corals. Tech Rep1, Townsville, Australia: CRC Reef Research Centre
- Kitada S, 2018. Economic, ecological and genetic impacts of marine stock enhancement and sea ranching: A systematic review. Fish and Fisheries, 19(3): 511—532
- Kluger L C, Taylor M H, Mendo J *et al*, 2016. Carrying capacity simulations as a tool for ecosystem-based management of a scallop aquaculture system. Ecological Modelling, 331: 44—55
- Lipcius R N, Burke R P, 2018. Successful recruitment, survival and long-term persistence of eastern oyster and hooked mussel on a subtidal, artificial restoration reef system in Chesapeake Bay. PLoS One, 13(10): e0204329
- Liu H, Xu Q, Liu S L *et al*, 2015. Evaluation of body weight of sea cucumber *Apostichopus japonicus* by computer vision. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 33(1): 114—120
- Liu X J, Zhou Y, Liu B J *et al*, 2019. Temporal dynamics of the natural and trimmed angiosperm *Zostera marina* L. (Potamogetonales: Zosteraceae), and an effective technique for transplantation of long shoots in a temperate tidal zone (northern China). Wetlands, 39(5): 1043—1056
- Lv H J, Zhang X M, Zhang P D *et al*, 2011. The implement of plastic oval tags for mark-recapture in juvenile Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*) on the northeast coast of Shandong Province, China. African Journal of Biotechnology, 10(61): 13263—13277
- Martinez A, Crook E D, Barshis D J *et al*, 2019. Species-specific calcification response of Caribbean corals after 2-year transplantation to a low aragonite saturation submarine spring. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 286(1905): 20190572
- Maynard J, Van Hooidonk R, Harvell C D *et al*, 2016. Improving marine disease surveillance through sea temperature monitoring, outlooks and projections. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 371(1689): 20150208
- Orth R J, Carruthers T J B, Dennison W C *et al*, 2006. A global crisis for seagrass ecosystems. BioScience, 56(12): 987—996
- Orth R J, Marion S R, Granger S *et al*, 2009. Evaluation of a mechanical seed planter for transplanting *Zostera marina* (eelgrass) seeds. Aquatic Botany, 90(2): 204—208
- Oyamada K, Tsukidate M, Watanabe K *et al*, 2008. A field test of porous carbonated blocks used as artificial reef in seaweed beds of *Ecklonia cava*. Journal of Applied Phycology, 20(5): 863—868
- Paling E I, van Keulen M, Wheeler K *et al*, 2001a. Mechanical seagrass transplantation in Western Australia. Ecological Engineering, 16(3): 331—339
- Paling E I, van Keulen M, Wheeler K D *et al*, 2001b. Improving mechanical seagrass transplantation. Ecological Engineering, 18(1): 107—113
- Park J I, Lee K S, 2007. Site-specific success of three transplanting methods and the effect of planting time on the

- establishment of *Zostera marina* transplants. Marine Pollution Bulletin, 54(8): 1238—1248
- Polovina J J, 1984a. Model of a coral reef ecosystem I. The ECOPATH model and its application to French Frigate Shoals. Coral Reefs, 3(1): 1—11
- Polovina J J, 1984b. An overview of the ECOPATH model. Fishbyte, 2(2): 5—7
- Richmond R H, Hunter C L, 1990. Reproduction and recruitment of corals: comparisons among the Caribbean, the Tropical Pacific, and the Red Sea. Marine Ecology Progress Series, 60: 185—203
- Rinkevich B, 2005. Conservation of coral reefs through active restoration measures: recent approaches and last decade progress. Environmental Science & Technology, 39(12): 4333—4342
- Rothschild B J, Ault J S, Goulletquer P *et al*, 1994. Decline of the Chesapeake Bay oyster population: A century of habitat destruction and overfishing. Marine Ecology Progress Series, 111: 29—39
- Rutledge K M, Alphin T, Posey M, 2018. Fish Utilization of Created vs. Natural Oyster Reefs (*Crassostrea virginica*). Estuaries and Coasts, 41(8): 2426—2432
- Ru X S, Zhang L B, Li X N *et al*, 2019. Development strategies for the sea cucumber industry in China. Journal of Oceanology and Limnology, 37(1): 300—312
- Ru X S, Zhang L B, Liu S L *et al*, 2017. Reproduction affects locomotor behaviour and muscle physiology in the sea cucumber, *Apostichopus japonicus*. Animal Behaviour, 133: 223—228
- Seaman W, 2000. Artificial Reef Evaluation: with Application to Natural Marine Habitats. Boca Raton: CRC Press, 5—6
- Seaman W, 2007. Artificial habitats and the restoration of degraded marine ecosystems and fisheries. Hydrobiologia, 580(1): 143—155
- Short F T, Polidoro B, Livingstone S R *et al*, 2011. Extinction risk assessment of the world's seagrass species. Biological Conservation, 144(7): 1961—1971
- Short F T, Wyllie-Echeverria S, 1996. Natural and human—induced disturbance of seagrasses. Environmental Conservation, 23(1): 17—27
- Thorhaug A, 1987. Large-scale seagrass restoration in a damaged estuary. Marine Pollution Bulletin, 18(8): 442—446
- Turner S J, Thrush S F, Hewitt J E *et al*, 1999. Fishing impacts and the degradation or loss of habitat structure. Fisheries Management and Ecology, 6(5): 401—420
- Ulanowicz R E, Tuttle J H, 1992. The trophic consequences of oyster stock rehabilitation in Chesapeake Bay. Estuaries, 15(3): 298—306
- van Keulen M, Paling E I, Walker C J, 2003. Effect of planting unit size and sediment stabilization on seagrass transplants in Western Australia. Restoration Ecology, 11(1): 50—55
- Waycott M, Duarte C M, Carruthers T J B *et al*, 2009. Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 106(30): 12377—12381
- Xu S C, Wang P M, Zhou Y *et al*, 2018. New insights into different reproductive effort and sexual recruitment contribution between two geographic *Zostera marina* L. populations in temperate China. Frontiers in Plant Science, 9: 15
- Xu S, Xu S C, Zhou Y *et al*, 2019a. Single beam sonar reveals the distribution of the eelgrass *Zostera marina* L. and threats from the green tide algae *Chaetomorpha linum* K. in Swan—Lake lagoon (China). Marine Pollution Bulletin, 145: 611—623
- Xu S C, Zhou Y, Wang P M *et al*, 2016. Salinity and temperature significantly influence seed germination, seedling establishment, and seedling growth of eelgrass *Zostera marina* L. PeerJ, 4: e2697
- Xu S C, Zhou Y, Xu S *et al*, 2019b. Seed selection and storage with nano—silver and copper as potential antibacterial agents for the seagrass *Zostera marina*: implications for habitat restoration. Scientific Reports, 9: 20249
- Yang X Y, Lin C G, Song X Y *et al*, 2019. Effects of artificial reefs on the meiofaunal community and benthic environment — A case study in Bohai Sea, China. Marine Pollution Bulletin, 140: 179—187
- Yue S D, Zhang Y, Zhou Y *et al*, 2019a. Optimal long—term seed storage conditions for the endangered seagrass *Zostera japonica*: implications for habitat conservation and restoration. Plant Methods, 15: 158
- Yue S D, Zhou Y, Zhang Y *et al*, 2019b. Effects of salinity and temperature on seed germination and seedling establishment in the endangered seagrass *Zostera japonica* Asch. & Graebn. in northern China. Marine Pollution Bulletin, 146: 848—856
- Zhang P D, Fang C, Liu J *et al*, 2015a. An effective seed protection method for planting *Zostera marina* (eelgrass) seeds: Implications for their large—scale restoration. Marine Pollution Bulletin, 95(1): 89—99
- Zhang L B, Zhang T, Xu Q Z *et al*, 2015b. An artificial oyster - shell reef for the culture and stock enhancement of sea cucumber, *Apostichopus japonicus*, in shallow seawater. Aquaculture Research, 46(9): 2260—2269
- Zhang X M, Zhou Y, Xu S C *et al*, 2020. Differences in reproductive effort and sexual recruitment of the seagrass *Zostera japonica* between two geographic populations in northern China. Marine Ecology Progress Series, 638: 65—81
- Zhou Y, Liu P, Liu B J *et al*, 2014. Restoring eelgrass (*Zostera marina* L.) habitats using a simple and effective transplanting technique. PLoS One, 9(4): e92982

RESEARCH PROGRESS AND PROSPECTS OF RESTORATION AND RESOURCE CONSERVATION IN TYPICAL SEA AREAS

YANG Hong-Sheng^{1, 2, 3, 4, 5, 6}, XU Shuai^{1, 2, 3, 4, 5}, LIN Cheng-Gang^{1, 2, 3, 4},
SUN Jing-Chun^{1, 2, 3, 4}, ZHANG Li-Bin^{1, 2, 3, 4, 5}

(1. CAS Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 3. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 4. CAS Engineering Laboratory for Marine Ranching, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 6. The Innovation of Seed Design, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China)

Abstract Marine pollution, marine habitat and biological resource degradation caused by human activities and global changes have attracted worldwide attention. In this article focuses on the key principles, major facilities, and essential technologies of typical marine habitat restoration and resource conservation, and summarizes the main research progress in typical marine habitat restoration and resource conservation at home and abroad in recent years. This article also looks forward to future research hotspots and development models in the field, and provide references to marine habitat restoration and biological resource conservation in China.

Key words habitat restoration; resource conservation; restoration facilities; restoration techniques