

2022年海岸带生态修复科技热点回眸

杨波^{1,2}, 孙晓峰³, 刘昱², 张磊⁴, 韩祯², 郭世麒², 李小艳⁵, 付辉², 刘妍²

1. 天津理工大学海洋能源与智能建设研究院, 天津 300384
2. 艾奕康(天津)工程咨询有限公司, 天津 300074
3. 中新天津生态城管理委员会, 天津 300467
4. 北京正和恒基滨水生态环境治理股份有限公司, 北京 100084
5. 中国建筑设计研究院有限公司, 北京 100044

摘要 结合中国海岸带生态保护与修复的进展、难点和问题,以及海岸带生态修复科技的国际经验,从海岸带生态修复体系建设和国土空间规划传导、陆海统筹修复和技术系统研究、海岸带蓝碳生态系统研究、海岸带生态修复效果评估机制等方面,回顾了近年来中国海岸带生态修复的科技热点和重要进展;归纳了不同海岸类型的海岸带生态修复,主要典型海岸生境类型的生态修复,海岸带生态修复工程的科学技术应用进展等;提出了海岸带生态修复从项目到场景营造、从技术向多元综合解决方案,以及在建设低碳城市、提高城市韧性、营造城市风貌和海洋文化传承等领域的巨大潜力。

关键词 海岸带;生态修复;陆海统筹;国土空间规划

海岸带作为海洋与陆地相互作用、衔接、过渡的地带,自然资源丰富,人类活动频繁,生态环境脆弱。国际上,海岸带生态修复的研究与实践已有较长的历史,自21世纪以来,随着海洋生态系统的不断退化以及气候变化、自然灾害频发的多重威胁,海岸带生态系统的保护和修复得到了更多的关注。

中国海岸拥有大陆岸线约1.8万km,海岛1000余个,地形地貌和岛屿类型复杂多样,海岸带漫长

广阔,既为经济和社会发展提供了生物资源和生态系统服务,又容易受到人类活动和自然灾害的影响^[1]。例如一些重要海湾、河口受到了过度开发和粗放开发的破坏和污染,自然岸线减少,红树林、海草床和珊瑚礁等典型生态系统受威胁,滨海湿地退化,海岸形态因人工过度干预发生突变等,从而威胁到海洋生态环境和海洋经济的可持续性。海岸带生态修复是重要的环境保护救济及生态补偿对策,不

收稿日期:2022-12-26;修回日期:2022-12-30

基金项目:国家自然科学基金委国际(地区)合作与交流项目(52061160366)

作者简介:杨波,教授级高级工程师,研究方向为生态修复、城市规划、景观设计、海岸工程,电子信箱:bob.yang@aecom.com

引用格式:杨波,孙晓峰,刘昱,等. 2022年海岸带生态修复科技热点回眸[J]. 科技导报, 2023, 41(1): 249-260; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.

2023.01.019

仅可以恢复受损的生态系统,更重要的是促进人与海洋的和谐发展,推动海洋经济高质量、可持续发展,是海洋生态文明建设的重要途径之一。近年来中国政府从立法、规范、规划、标准、资金等多个层面展开系列行动促进海岸带及海洋生态修复,海岸带生态修复科技发展迅速,原创技术和整合、移植创新积极,生态修复对象逐渐多元、尺度不断增大,技术路线和方法愈益综合。

1 海岸带生态修复及中国海岸生态的压力和痛点

1.1 海岸带生态修复的定义和演变

国际海岸带生态修复的研究与实践至今已有较长的历史。尤其自 21 世纪以后,随着海洋生态系统的退化以及气候变化、自然灾害频发的多重威胁,各国政府、科研团队以及公益组织开始更多关注海岸带保护,海岸带生态修复得以迅速发展,修复对象逐渐多元化,已涵盖了牡蛎礁、盐沼、红树林、珊瑚礁、海草床、海藻场等多种典型生境。在空间尺度上,海岸带生态修复大体经历了两个阶段:一是 20 世纪 90 年代中期以前,主要以单一生境、物种或局部小尺度的修复为主;二是 20 世纪 90 年代中期以后,统筹规划海岸带生态修复的重要性开始逐渐得到重视,大尺度的生态修复规划日益增多,以美国、欧洲等为主的区域性或大尺度的海岸带生态修复大量出现,比如美国切萨皮克湾的牡蛎礁修复^[2],美国弗吉尼亚东岸的海草床修复^[3],荷兰瓦登海的大规模海草床修复^[4]。目前,国际上对于海岸带生态修复尚缺少统一的定义,从广义上讲,海岸带生态系统遭到退化、损害和破坏后,通过人类干预措施协助重建或促进生态系统恢复的行为,可以统称为海岸带生态修复。

1.2 国际海岸带生态修复的科技热点

随着联合国陆续发布生态修复十年计划(UN Decade on Ecosystem Restoration)^[5]和可持续发展目标(Sustainable Development Goals, SDGs)^[6],国际上对于海岸带生态修复的技术、成果、生态价值提出了更高的要求,海岸带的生态系统修复逐渐步入

新的阶段和热点方向。

1) 关注海岸带生态修复对气候变化的应对能力。气候变化导致的海平面上升、海岸侵蚀、洪涝、风暴潮等自然灾害正在对沿海环境带来极大的破坏。海岸带作为人口最为密集、活动最频繁的区域,面临着来自人类与自然的双重影响^[7],红树林、盐沼、海草、牡蛎礁、珊瑚等自然生态系统的沿海防护作用更加受到重视。

2) 大规模、长周期的海岸带生态系统修复。受限于发展时间较短、技术标准未完善以及社会支持度不高等原因,成功的大规模的海岸带生态修复项目较少。随着越来越多的小型生态修复项目的经验积累和新科技的涌现,海岸带生态修复正朝着大规模、长周期的方向发展。目前针对红树林、盐沼和海草床等生态系统,人类已经具备修复超过 1000 hm²的修复经验和技術能力^[8]。海岸带生态修复的长期效应同样不容忽视,现有经验表明 6 大主要海岸带生态系统在修复完成后能够长期存续,创造持续超过 10 年的生态和社会经济效益。

3) 逐步重视海岸带生态修复的社会、经济因素。在过往的经验中,研究者通常注重强调海岸带生态修复的自然生态价值,而忽视了对更广泛的社会、经济效益的分析评估。随着《联合国生态修复十年计划》中将生态修复作为满足全球经济社会发展目标的主要自然手段,将社会效益体现出来将是未来生态修复科技的趋势^[9]。

1.3 海洋环境生态的压力和痛点是中国海岸带生态修复的客观需求

海洋生态环境的破坏源自人类对海洋生态施加的各种压力,海岸带污染物排放和垃圾倾倒是海洋生态环境破坏的首要原因。同时,海洋生物多样性损害亦为海洋生态环境受损的重要表征之一;围填海活动一度成为沿海土地供应的重要方式,它在带来巨大经济效益的同时,也对海岸带生态环境造成严重影响。以滨海湿地为代表,海岸湿地在环境净化、防止海水侵蚀和河流洪涝、为生物提供栖息地、维持生物多样性和提供能源储存场所等方面发挥着不可或缺的作用^[10],但人类的开发活动导致湿地面积萎缩,生境丧失、斑块化、破碎化,水动力条

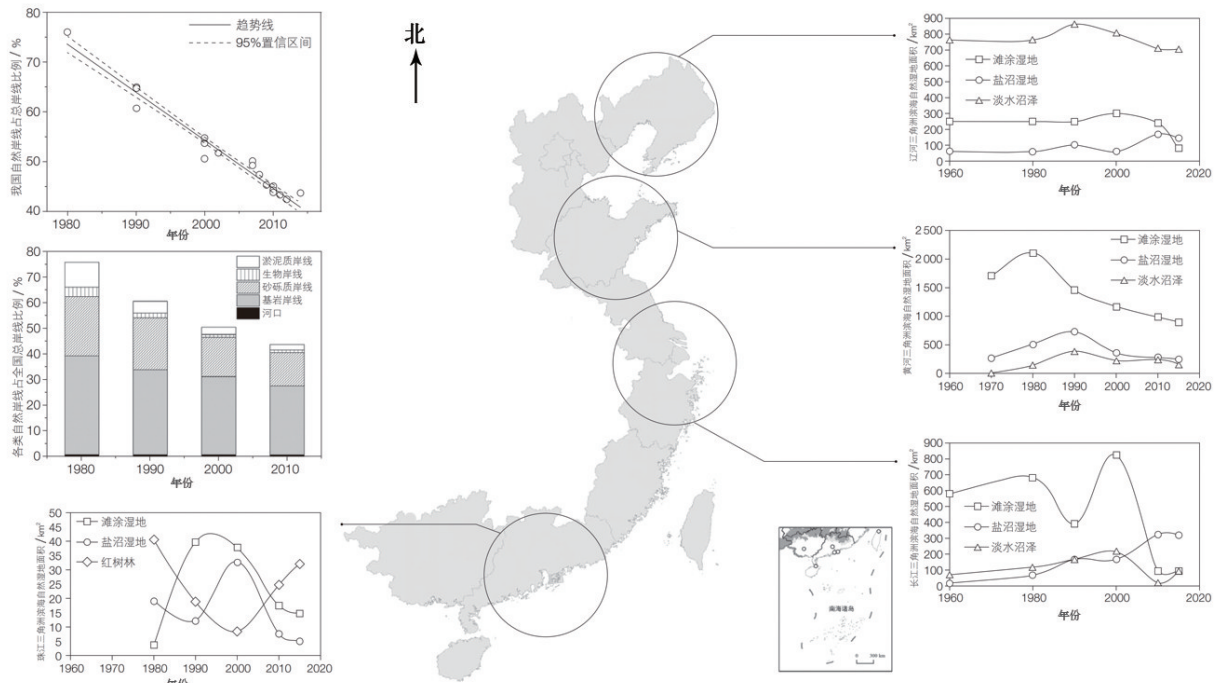


图1 我国自然岸线长度的变化情况以及四大三角洲自然湿地面积变化^[1]

件紊乱和生物多样性严重减少等一系列问题。近40年来,中国大规模围填海造地活动使滨海滩涂面积累积损失约 $2.19 \times 10^4 \text{ km}^2$,相当于中国滨海湿地总面积的50%^[1](图1)。对于海岸带环境生态压力和痛点的调查研究和分析诊断为海岸带生态修复探索方向和目标。

2 中国海岸带生态修复的科技热点和进展

中国政府从立法、规范、规划、标准、资金4个层面促进海洋生态修复,技术指导规范体系的建设为开展海岸带生态修复提供指导、规范和技术支撑。中国的海岸带生态修复有着特殊的国情和环境,并且作为新兴行业,涉及面广且多行业交叉,从科研、技术研发到工程应用尚处于积极探索阶段,与生态建设和城市规划建设、海岸基础设施互相促进或制约,存在着众多需要进一步探索的课题。

2.1 海岸带生态修复技术体系建设和国土空间规划传导

2019年起,国家相关部委陆续编制发布了《海

岸带生态减灾修复技术导则》《海岸带生态系统现状调查与评估技术导则》^[12]等一系列海岸带区域生态调查、评估、修复导则指南;2020年以来在规划和技术体系建设和工程实施层面持续发力。标准层面,自然资源部主管部门组织编制了21项海岸带保护修复工程技术标准,包括红树林、盐沼、珊瑚礁、海草床、牡蛎礁、砂质海岸等典型生态系统现状调查和评估技术方法10项,海堤生态化、围填海工程生态海堤建设、典型生态系统修复技术方法10项,监管监测技术方法1项^[13]。沿海省市也根据海岸保护与利用特点制定地方标准,以保护省内典型海岸生境资源,为海岸线的评估提供引导和规范等^[14-18]。

近年来,国家加大投入力度支持海洋生态修复,每年支持15~16个海洋生态修复项目,修复需求带动科技进步,推动了海洋生态修复研究、应用技术和工程技术的发展。重点领域鼓励基础性研究,例如自然资源部海洋生态保护与修复重点实验室/福建省海洋生态保护与修复重点实验室^[19]和自然资源部热带海洋生态系统与生物资源重点实验室^[20],2023年都将设立开放基金资助相关研究。

2022年自然资源部发布了《海岸带规划编制技术指南》(征求意见稿)^[21],规定了省级海岸带规划编制的总体要求、基础分析、战略和目标、规划分区、资源分类管控、生态环境保护修复、高质量发展引导以及保障机制等重点内容,为国土空间规划在海岸带的规划传导提供了技术指导。

2.2 中国海岸带生态修复科技重点关注方向

随着国内对海岸带生态修复科技的发展,以2022年为节点回顾,研究热点主要有以下3个方面。

1) 完善海岸带生态修复效果评估机制。国际海岸带生态修复实践证明,对于生态修复的长期监控和完善修复效果评估机制是取得成功的关键要素之一。海岸带生态系统生物多样性高,生物与环境的交互复杂,涉及的评价指标较多。因此如何针对修复的生态系统选择评估指标、建立指标体系,是建立有效评估机制的难点^[22]。此外,在以往的研究中,评估数据来源大多为文献资料,缺乏实测数据。随着近年来中国海岸带生态修复项目的不断增加,也包括技术装备的进步,数据来源较丰富,研究者可对修复对象可进行长期监测^[23-25]。海岸带生态修复是一个长期的过程,在今后的研究中对修复对象开展中长期的评估研究也将是重点。

2) 基于陆海统筹的整体性修复研究和技术。海岸带作为海洋与陆地相互作用、衔接、过渡的地带,陆海统筹的整体修复是必然的选择,生态修复措施应遵循陆海生态系统的耦合机制。基于陆海统筹的理念将流域作为修复治理的基本单元,从生态系统整体性出发提出修复策略^[26];在陆海统筹视角下构建“本底评估-风险诊断-格局构建-分区修复”的技术框架^[27];基于海洋修复的现状和政策,陆海协同将海岸带生态修复与近岸土壤整治修复协同治理^[28]也受到关注。

3) 海岸带蓝碳生态系统的研究。海岸带蓝碳生态系统因为其应对气候变化的重要作用,在中国日益受到关注,包括生态系统碳储量估算、固碳机制以及碳汇的应用—中国沿海省份的蓝碳核算体系^[29],海岸带蓝碳碳汇能力和通过生态修复工程可以增加的年碳汇量^[30],湿地蓝碳的变化趋势^[31]等。

金融机制探索借鉴国际蓝碳金融模式,建立蓝碳交易中心^[32]探索蓝碳交易试点,助力“双碳”目标的实现。

2.3 典型海岸生境类型的生态修复

海岸带生态修复的对象包括红树林、盐沼、珊瑚礁、海草床和牡蛎礁等典型生态系统,这5类生态系统的修复是近年修复科技关注的热点。但是典型生态系统修复研究向技术的转化,修复技术向工程技术体系和专有设备的研发转化还有较大潜力空间。

1) 红树林。中国近年已经成为全球少有的红树林面积净增长的国家^[33]。随着修复项目和种类的增加,修复范围的扩展,环境的多样性,以及对红树林修复技术研究的深入,近年来在红树林的选址、选种以及生态系统内生物耦合机制等科研方向取得进展,例如建立红树林综合气象条件适宜度评估模型^[34],对红树林应对气候变化和修复提供科学决策参考;对中国沿海常用修复树种的耐盐耐淹程度研究^[35],为红树林的生态修复提供选址、选种的科学依据;对不同修复年限的红树林生态系统的研究沉积物中的氮硫变化重塑固氮微生物的群落结构^[36],可以指示红树林的生态修复进程或效果。国家自然资源部和国家林草局于2021年发布了《红树林生态修复手册》针对我国退化红树林和红树林迹地的生态修复,规定了红树林生态修复的原则、技术流程、工作内容,以及生态本底调查、退化诊断、修复目标与修复方式确定、修复措施选择、跟踪监测、效果评估和适应性管理等工作对应的技术要求和方法^[37]。

2) 盐沼。随着海岸建设活动的增加和活跃,使盐沼资源加速衰竭,中国沿海在过去60年已有约60%的盐沼湿地面积萎缩,滨海盐沼湿地的生态修复的研究主要集中在退化机制研究、修复技术探索以及入侵物种整治等方面:包括盐沼土壤理化条件的研究分析^[38];不同区域典型盐沼植物如芦苇、海三棱藨草以及互花米草等的环境适应性^[39],以了解盐沼植被的退化原因并为修复提供理论依据;探索“水文-土壤-生物”的联合修复模式提高修复植被面积和效率^[40]。

3) 珊瑚礁。珊瑚礁的修复成本高、成活率低,是国际上公认的技术难题。目前珊瑚礁生态修复技术主要分为生物修复和生境修复两大类。过去10年间中国在珊瑚礁繁殖培育与栖息地营造等修复技术上取得一定进展^[41]。2022年3月,自然资源部发布了国家标准《海洋生态修复技术指南 第2部分:珊瑚礁生态修复》(GB/T 41339.2—2022)^[42],对珊瑚礁生态系统修复的工作流程、工作内容和方法技术提出更详细的规定。

4) 海草床。海草床的生态系统修复研究工作在20世纪末开始系统展开,目前国内大规模的成功海草床修复项目鲜见报道,种子法、移植法和生境修复法是海草床修复的主要方法。中国第一个海草床修复项目始于2007年山东威海,移植了10000株大叶藻来修复3.4 hm²的海草床。对鳗草海草床的修复实验研究,总结了直插移栽法适用的海岸条件,表明移植法在外海海草床修复的不适宜性^[43];利用构件进行植株的移植试验,过程复杂成本高,难以推广^[44]。目前国内对于大规模海草床修复的技术方法仍有待进一步探索,当前重点应放在加强对海草床生境保护研究,避免海草床继续退化的保障等方面,同时非“迹地”应谨慎采用海草床作为生态修复对象单纯满足“生态化”。

5) 牡蛎礁。牡蛎礁除了广为人知的经济价值外,还具有重要的生态效益,例如水体过滤,脱氮作用等,扮演着海岸“生态工程师”的角色。目前国内的研究重点在于量化牡蛎礁的生态效益,加强对牡蛎礁生态系统功能的认知。牡蛎礁不仅可以成为大气碳汇,还可以提升盐沼植被、海藻、海洋动物等生物的碳汇功能^[45],并促进鱼类、甲壳类动物产量增加^[46];牡蛎礁保护区在修复前后的海域海水水质变化趋势,有助于探讨牡蛎礁生态系统对于水质的净化作用^[47]。在中国,牡蛎礁修复在大规模工程实施上仍处于摸索阶段,大自然保护协会(TNC)与东海所合作在浙江三门县进行了牡蛎礁修复试点研究,长期监测牡蛎礁的生长状况,量化研究牡蛎礁所发挥的牡蛎种苗供给、水体净化和生物多样性提升的生态效益,尽管规模不大,但从本底调查、礁体设计与构建到持续监测,探索了一套适应性的修复

过程,为中国其他地区开展牡蛎礁修复工作提供了参考。

必须注意到,牡蛎礁天然的结构特点使它与生态海堤的结合具有优势,可以应用于生态海岸线,通过增加摩擦力,消减波浪作用以及促进底质淤积等方式改变水动力条件^[48]。对美国东海岸多处牡蛎礁护岸的消浪效果的研究,发现牡蛎礁的波浪消减率最高可达68%^[49],在中国部分地区牡蛎礁(蚝壳)被用作海岸构筑型式有长期的应用历史。

2.4 针对海岸类型的海岸生态修复

海岸结合自然及开发利用程度可分为自然岸线和人工岸线,其中自然岸线可根据物质组成进一步分为基岩岸线、砂质岸线、淤泥质岸线、生物岸线及河口岸线^[50]。

1) 基岩岸线。基岩岸线生态修复的方向多以基岩山体物理修复和保护为主,基岩与海洋生物之间的关系,潮间带区域的基岩微潮汐池的生态价值也亟待进一步研究和发现其效能。梁书秀等对于不同类型基岩海岸结构的波浪、水质和生物进行了调查、采样和跟踪^[51],进行了海岸结构的潮间带附着生物群落特征的差异性的试验^[52],为基岩海岸生态设计提供了数据支持。

2) 砂质岸线。砂质岸线修复方向集中在沙滩修复的动力机制、配合结构和稳定性维护,潮上带沙滩防风林和潮下带沙滩关联生态体系的保护修复,砂质海岸的生物多样性恢复是修复的重要目标^[53]。沙滩和不同粒径的海滩结构修复维护,从机理上与港口海岸工程建设防冲淤技术异曲同工、相向而行,关注热点近年更趋于工程应用端,已形成相对完整的设计建造体系^[54-55]。

3) 淤泥质岸线。淤泥质岸线主要由淤泥、粉砂、粘土等细颗粒物组成,岸线平直潮滩发育,潮间带广阔,因而其海岸生态修复集中于潮间带滩涂湿地的恢复和潮上带湿地的植物修复。“退养还滩”和“退塘还湿”是修复的重要空间对象,同时湿地和湿地植物是以典型生境修复为基础的综合应用。如不同类型海岸植物的配置模式^[56];利用卫星遥感图对湿地退化现状分析,总结湿地退化原因,为湿地修复及高效管理提供依据^[57-58]。大型河口岸线

与淤泥质海岸相似但生态作用更突出,生态修复受上游来水和营养或污染的影响显著,更需要关注陆海统筹的生态修复。

数值模拟在海岸带生态修复中用于对修复方案的规划、设计提供指导,以及对修复工程的效果进行评估。海岸生态修复工程对目标水域的水动力、水质的影响,泥沙冲淤情况以及滨海植被如盐沼、红树林对波浪的消减效应可以通过数值模拟得到更直观的体现。通过水动力及其携带要素和污染物扩散模拟分析不同修复方式对水体交换的改善效果差异^[69],对水动力和氨氮等时空分布特征的影响^[60],为生态修复方案提供技术支持。环境动力条件与生态要素演变的协同和耦合,尚待更有效的模型技术探索。

2.5 生态海堤和人工海岸生态化技术

海堤生态化建设是在维持和提升海堤防潮御灾能力、关注恢复海堤生态功能,通过优化堤身结构,营造岸滩、堤身及堤后生态空间,使用生态建筑材料,对海堤进行维修、加固、提升等活动。2022年6月自然资源部海洋减灾中心发布了《海堤生态化建设技术指南》(征求意见稿),规定了海堤生态化建设范围与原则、建设内容、方案设计、施工与管护、跟踪监测与效果评估等^[61]。

生态海堤的基础类型是在维持海堤防灾防侵蚀等功能基础上,增设生态结构^[62],提高基础设施的生态性,生态结构还提供了海岸保护服务,在防灾减灾方面比传统海堤更具有成长性,生态海堤建设聚焦于堤前及堤后栖息地的改造、堤身结构型式优化、堤身材料的生态改良、具备条件时的堤身绿化等^[63];生态海堤更进一步优化是基于生态一体化,更强调堤前及堤后陆域栖息地的生态连续、堤身型式与材料生态性的统筹,系统提升总体的工程和生态效率;更进一步,生态海岸是以全断面自然的材料和自适应演进的结构,与海岸韧性空间动态适应,这类生态结构通常对于环境空间条件有着更高的追求,对于生物多样性有更高的相容性。美国国家海洋和大气管理局(NOAA)自2015年推出“Living Shorelines”导则,对于“有生命力”的生态海岸和生态海堤规划设计、建设和与社区的互动,产

生了积极的引领作用^[64]。此外海岸带生态修复与海岸韧性和景观结合,适应极端天气的宽幅变动荷载和冲击影响,并为城市提供滨海绿色开放空间^[65-66]。杨波等^[67]在中新天津生态城北堤采用了新老海堤联合断面,通过5层结构的组合,完成了复合型生态海堤兼容生态景观廊道的设计并通过物理模型验证,目前正在建设施工当中。

3D打印技术在生态海堤建设中具有良好的应用预期,在马来西亚槟城Chee等^[68]采用3D打印建造多种物理结构复杂的混凝土砖块,以丰富大型底栖动物的物种和群落类型。国内除见于河湖水利工程的局部辅助结构外,在海岸结构中尚未见3D打印在主体结构应用的报道,其中蕴藏着很多工程技术创新机会。

生态海堤在国内的实践有广州市大角山海滨公园^[69]、宁德市三屿工业区海堤^[70]、上海市金山区杭州湾北岸分级斜坡式生态海堤结构^[71]等,近年呈现众多创新探索。在中国香港东涌,AECOM香港公司针对不同岸段物理和环境生态特点,将人工岸线建设与生态修复结合,构筑了基岩斜坡海岸,直立护岸,红树林海岸三位一体的高密度城市的生态防护海岸,提出了人工潮汐池、微孔陶盘生态附着面等工程方法,为人工海岸的生态化建设提供了重要实践参考^[72]。

在港口海岸工程领域,中交第一航务工程勘察设计院有限公司吴波等对海岸防护工程生态化建设、港口工程生态化建设、人工沙滩生态化建设及其监测评估进行了系统的集成研究,并于2022年9月正式形成国家基金报告《人工岸线生态化建设技术手册》^[73]。

3 海岸带生态修复工程和新技术应用

海岸带生态修复的工程实践从典型生态类型修复技术的工艺,综合性修复技术集成,专用设备及其标准化都还落后于生态修复的工程需要,主要工程实现基本依靠传统的海岸工程的转移借鉴和内陆河湖滨水地区生态修复技术的移植,主体沿用人工水陆作业的传统方式,当然这也意味着行业创

新机会,专业化、集成化、标准化具有很大的潜力空间。

3.1 基于自然的解决方案在海岸生态修复的应用

世界自然保护联盟(IUCN)于2016年发布了“基于自然解决方案(NbS)”框架^[74]。主要涵盖“生态系统保护”“生态系统管理”“生态系统修复”“解决具体问题”“基础设施建设”5大范畴,与中国传统文化对于生态系统的认识互相印证支持^[75]。NbS理念与海岸带的生态背景、动力条件、演化机制具有很好的契合,对海岸带生态修复技术探索具有重要指导意义。海岸带生态修复的NbS策略包括:因势利导使用海岸环境动力条件,使用自然和具有更强生态相容性的材料,引导激发海岸生态环境恢复的能力等方面。2021年自然资源部发布的《基于自然的解决方案全球标准中文版及中国实践典型案例发布》,“广西北海陆海统筹生态修复”和“深圳湾红树林湿地修复”对于基于自然的解决方案在海岸带的生态修复应用具有很好的借鉴和推广价值。中新天津生态城结合海岸生态修复建造了一个由河口湿地、生态化海堤和后方湿地组成的联合系统,并与海绵城市体系结合,提升了海岸的防御能力以及城市防内涝的能力,该项目入选自然资源部海洋减灾中心“海岸带保护修复典型案例”^[76]。NbS从框架性理念到技术、设计、工程的落实是海岸生态修复的热点也是科技创新的源泉。

3.2 海岸工程在海岸带生态修复中的移植和创新

海岸生态修复不能与海岸工程建设完全独立,在硬质设施基础上增加生态措施,工程型海岸生态化技术应运而生,目前海岸生态修复工程的主流工艺沿用了海岸工程成熟的工艺技术装备,虽然其施工过程的生态性有待进一步提升。考虑到安全性和景观性,可在设施表面小范围地增加其生物相容性,如复杂性或孔隙率等,为小型海洋生物如海藻等提供额外生存空间^[77-78]。由混凝土台阶构成的海堤阶梯(seawall stairs)可在水平方向上有效增大浅水域晒地面积^[79],以不同方式在海岸工程设施形成人工潮汐池等^[80-82],有研究发现人工潮汐池中物种多样性高于附近的天然潮汐池。

基底修复和海滩养护解决由泥沙来量下降和

风浪侵蚀而导致海岸带湿地和海滩基底损失,常是修复侵蚀海岸带的关键步骤之一,目前较为常见的是将海洋工程中产生的疏浚泥沙作为修复的基底材料,疏浚工程的挖掘过程和底泥回填既蕴含生态效益也产生很大生态影响^[83]。

3.3 生态工法从河湖走向海岸

生态工法结合水利工程与生态学、植物学,采用植物结合人工措施创造临时结构,利用植物根系和土壤固持作用成为永久结构,通过植物缓冲截流能力对边坡进行稳定加固,提高抗冲能力,帮助水质净化,营造生物栖境,因此,生态工法也被称为有生命的结构。早期中国的海岸生态修复以预制驳岸为主要构造辅以生态修饰,近年来则根据岸线形态的不同而细化产生不同形式的驳岸,同时根据动力条件、地形地貌、目标物种等,运用不同生态工法进行修复工程建设,从海岸工程+生态工法,进化为海岸工程融合生态工法。正和恒基在广州市南沙区灵山岛尖外江岸线通过枝桩沉床、土工格式等生态工法,实现了感潮河口的堤岸复苏^[84]。莆田市蓝色海湾整治项目通过数值模拟匹配生态工法,实现了生态工法在滨海潟湖的应用,构建了以鹭类为目标物种的生态滨水空间^[85]。温州市海岸带修复工程中利用合金笼牡蛎礁体进行海堤修复^[86]。

3.4 装配式海岸生态模块及其组装技术

生态工法在海岸的主要的挑战在于强海岸动力尤其是台风寒潮等影响,而装配式海岸生态模块及组装技术有望避免这一缺点。传统海岸种植在海岸动力作用如潮汐、波浪,流速强烈的地区实现难度大,现场施工难以达到稳定的环境要求,幼株成活率低,施工安全性差。杨波、张磊等根据对珠江口海岸环境条件和红树林修复中存在的问题,在国内首次提出了“预装配植物生态模块及组装技术”^[87],这一模块化工艺和技术流程将装配式建筑的理念移植到海岸带生态修复。“预装配植物生态模块”选择受掩护的水域、港湾,在相似的水温、盐度等满足植物生长条件的“工厂化水域”进行预制、培育。待植物生长根系和土壤固结具备抗环境冲击能力后,运至场地进行组装,必要时也可辅以消浪阻流结构。这一工艺有效扩大了红树等湿地植

物人工种植和修复的应用范围,具有良好的经济性和高效率,可以有效保障安全施工,目前正在东莞滨海新城进行现场试验。类似的研究还有张泽华^[88]利用模块化的方式种植水草,保证了移动过程中植物根系的低损伤,从而更加有效的发挥沉水植物对于水体富营养化的净化效果。

3.5 水文调控技术修复退化湿地

水文调控技术主要用于恢复因水文交换被破坏而退化的湿地,或构建新的湿地生态系统。依托自然水位差或在原有海堤基础上增设水文调控系统,形成人工潮汐以恢复湿地及其生态功能。比利时 Schelde 河口建设低于风暴潮水位的外堤,依靠这一落差形成的滞洪区营造出湿地生境^[89]。上海鸚鵡洲湿地通过调节液压坝的高低以形成人工潮汐,可促进芦苇等盐沼植物的生长^[90]。天津马棚口海洋生态修复项目通过“退养还滩”打通潮汐通道,使堵塞的近岸潮滩潮汐通畅复活,借助水文调控完成对于退化湿地的再生和修复^[91]。

4 海岸带:生态修复促进人海和谐、塑造低碳海岸

面向海洋背靠腹地,海岸带空间的特质使它成为低碳的源、汇积聚带,扩增了绿色开放空间,陆海生态衔接的过渡带,生物多样性丰富的重要区域,人类与海洋相处的缓冲带。海岸带生态从修复到场景营造,塑造低碳海岸,海岸带生态修复从技术向多元合作、人海和谐的综合解决方案发展。

1) 海岸带生态修复提升海岸韧性。韧性概念改变了单纯依赖海堤保护防潮安全的状况,让防潮安全从单一工程性防护理念提升到社会、工程和管理等多维度综合防护。城市防灾管理思维从“抵御海洋灾害”逐渐转变为“在海洋灾害中实现自身安全”,以韧性城市适应气候变化并与城市空间紧密融合^[92];海岸带生态修复有更多的机会结合地形地貌和用地布局,构造多维度的韧性防灾体系,提高城市韧性^[93]。

2) 海岸生态修复塑造城市风貌。滨海景观带是滨海城市景观及风貌展示的重要载体和海洋特

色文化带。通过生态修复创新海岸生态景观,实现对环境的修复以及生态型自然景观的塑造,是城市与海洋文化融合的展示带和优质开放空间,是凸显滨海城市风貌的特色区域。近年“退港还城”在产业转型的同时为传统的滨海港口城市发展带来了新的活力和生机^[94]。

3) 海岸带生态修复为海洋经济转型发展提供了更广泛的价值载体和生态资源。海洋产业不再单纯局限于海上和沿海地区,而是由海及陆,不断延伸、扩展和辐射到区域经济、社会、政治、文化和生态等方面,海岸带空间是海洋经济关联产业的重要载体和辐射中心带,其生态修复的价值转换影响不言而喻。

4) 海岸带生态修复将从单一修复技术向多元统筹的综合解决方案发展。一是自然恢复为主、人工修复为辅的原则,实现海岸带生境-植被-底栖生物全链条修复与恢复,充分发挥其碳汇价值;二是生态减灾,协同增效,因地制宜综合应用典型类型和不同岸线类型的修复技术,保护修复“高-中-低”层次生境,发挥生态减灾协同增效功能;三是陆海统筹,内外联动,构建海岸带生态廊道创造人海和谐的海岸带空间;四是开展生态环境跟踪监测,综合评估修复效果,为海岸带管理及可持续发展提供科学支撑;五是以海岸带生态修复为抓手,利用海岸空间和适当的科普设施建设,培养海洋意识,积极推进海洋生态文明建设。

参考文献(References)

- [1] 陈雪初,戴禹杭,孙彦伟,等.大都市海岸带生态整治修复技术研究进展与展望[J].海洋环境科学,2021,40(3):477-484.
- [2] Bruce D G, Cornwell J C, Harris L, et al. A Synopsis of Research on the Ecosystem Services Provided by Large-Scale Oyster Restoration in the Chesapeake Bay[R]. Maryland: NOAA Chesapeake Bay Office, 2021.
- [3] Orth R J, Lefcheck J S, McGlathery K S, et al. Restoration of seagrass habitat leads to rapid recovery of coastal ecosystem services[J]. Science Advances, 2020, 6(41): eabc6434.
- [4] Floor J R, van Koppen C S A K, van Tatenhove J P M.

- Science, uncertainty and changing storylines in nature restoration: The case of seagrass restoration in the Dutch Wadden Sea[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2018, 157: 227–236.
- [5] Waltham N J, Elliott M, Lee S Y, et al. UN decade on ecosystem restoration 2021—2030: What chance for success in restoring coastal ecosystems[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 7: 71.
- [6] Sustainable development goals[R]. *Tracking SDG: The Energy Progress Report*, 2019.
- [7] Temmerman S, Meire P, Bouma T J, et al. Ecosystem-based coastal defence in the face of global change[J]. *Nature*, 2013, 504(7478): 79–83.
- [8] Saunders M I, Doropoulos C, Bayraktarov E, et al. Bright spots in coastal marine ecosystem restoration[J]. *Current Biology*, 2020, 30(24): 1500–1510.
- [9] Shepard C, Dumesnil M, Carlton S. Half moon reef: Measuring the recreational fishing benefits of a restored oyster habitat[R]. Texas: The Nature Conservancy, 2016.
- [10] 孙丽, 刘洪滨, 杨义菊, 等. 中外围填海管理的比较研究[J]. *中国海洋大学学报(社会科学版)*, 2010(5): 40–46.
- [11] 崔保山, 谢焱, 王青, 等. 大规模围填海对滨海湿地的影响与对策[J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32(4): 418–425.
- [12] 关于发布《海岸带生态系统现状调查与评估技术导则》系列团体标准、《海岸带生态减灾修复技术导则》系列团体标准和《围填海工程海堤生态化建设标准》英文版的公告[EB/OL]. [2021–12–23]. <http://www.caoe.org.cn/nr/cont.aspx?itemid=209&id=3299>.
- [13] 罗明, 杨崇曜, 孙雨芹. 我国海岸带生态保护修复实践的NbS路径[J]. *中国土地*, 2022(3): 4–7.
- [14] 海岸线质量评价技术规范: DB37/T 4492—2022[S]. 山东: 山东省市场监督管理局, 2022.
- [15] 福建省人民政府关于印发福建省“十四五”生态省建设专项规划的通知[EB/OL]. [2022–12–21]. https://fujian.gov.cn/zwgk/zxwj/szfwj/202204/t20220427_5900528.htm.
- [16] 福建省人民政府办公厅关于印发福建省“十四五”海洋强省建设专项规划的通知[EB/OL]. [2021–11–15]. http://www.fujian.gov.cn/zwgk/ghjh/ghxx/202111/t20211124_5780320.htm.
- [17] 《广州市海洋生态环境保护“十四五”规划(征求意见稿)》[EB/OL]. [2022–12–23]. https://img8.21food.cn/img/law/2022/7/18/119017c41cb9e_a9f0.pdf.
- [18] 深圳市规划和自然资源局关于印发《深圳市沙滩资源保护管理办法》的通知[EB/OL]. [2022–12–17]. http://www.sz.gov.cn/zfgb/2022/gb1226/content/post_9528016.html.
- [19] 自然资源部海洋生态保护与修复重点实验室/福建省海洋生态保护与修复重点实验室2023年度开放基金课题申请指南[EB/OL]. [2022–11–29]. <https://www.163.com/dy/article/HNBKJJEAO511KMS0.html>.
- [20] 自然资源部热带海洋生态系统与生物资源重点实验室2021年度开放基金申请指南[EB/OL]. [2022–11–11]. <https://www.163.com/dy/article/GOG843QA0511KMS0.html>.
- [21] 关于《海岸带规划编制技术指南》行业标准征求意见稿材料报送审查的函[EB/OL]. [2022–12–03]. <http://www.nrsis.org.cn/seekPublicAdvice/pagePublishAdviceStdList/10001046>.
- [22] 吴霖, 欧阳玉蓉, 吴耀建, 等. 典型海洋生态系统生态修复成效评估研究进展与展望[J]. *海洋通报*, 2021, 40(6): 601–608+682.
- [23] 吴威, 李彩霞, 陈雪初. 基于生态系统服务的海岸带生态修复工程成效评估——以鸚鵡洲湿地为例[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2020(3): 98–108.
- [24] 吴素文. 海岸带生态系统服务价值评估计算模型及应用研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2022.
- [25] 吴一凡, 艾瑶, 郑忠禄, 等. 厦门四个红树林湿地修复工程成效评估[J/OL]. [2022–12–05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.q.20221018.1753.018.html>
- [26] 叶有华, 林珊玉, 何玉琳, 等. 粤港澳大湾区海岸带生态系统修复框架[J]. *生态学报*, 2021, 41(23): 9186–9195.
- [27] 鲍维科, 林倩. 陆海统筹视角下海岸带生态修复分区研究——以象山港流域为例[J]. *海洋开发与管理*, 2022, 39(4): 3–10.
- [28] 黄铀佳, 李擎萍, 陈绵润. 陆海统筹背景下海洋生态修复与土壤整治修复协同治理机制研究[J]. *海洋开发与管理*, 2022, 39(5): 74–82.
- [29] 向爱, 揣小伟, 李家胜. 中国沿海省份蓝碳现状与能力评估[J]. *资源科学*, 2022, 44(6): 1138–1154.
- [30] 叶林安, 张海波, 孔定江, 等. 宁波市海岸带蓝碳固碳能力估算研究[J]. *环境科学与管理*, 2022, 47(5): 27–31.
- [31] 王珊珊, 徐明伟, 韩宇, 等. 杭州湾南岸滩涂湿地多年蓝碳分析及情景预测[J]. *中国环境科学*, 2022(9): 4380–4388.
- [32] 李政, 严欣恬, 李杨帆, 等. 构建粤港澳大湾区特色蓝碳交易市场探析[J]. *特区实践与理论*, 2022(5): 56–60.
- [33] 罗明, 杨崇曜, 孙雨芹. 我国海岸带生态保护修复实践的NbS路径[J]. *中国土地*, 2022(3): 4–7.
- [34] 陈燕丽, 张悦, 钱拴, 等. 红树林生长气象条件适宜度

- 评估方法研究——以广西北海沙生红树林为例[J]. 广西林业科学, 2022, 51(1): 53-61.
- [35] 江鎰倩, 李瑞利, 沈小雪, 等. 红树植物耐盐-耐淹性的荟萃分析及其应用对策[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2022, 58(4): 687-699.
- [36] Huang X, Feng J, Dong J, et al. *Spartina alterniflora* invasion and mangrove restoration alter diversity and composition of sediment diazotrophic community[J]. *Applied Soil Ecology*, 2022, 177: 104519.
- [37] 自然资源部办公厅 国家林业和草原局办公室关于印发《红树林生态修复手册》的通知[EB/OL]. [2021-11-27]. http://www.forestry.gov.cn/html/main/main_5461/20211027145728649868711/file/202110271501347123-82817.pdf
- [38] 唐敏, 陶韦, 刘长发, 等. 典型滨海翅碱蓬盐沼湿地土壤理化特征研究[J]. 水生态学杂志, 2022, 43(3): 70-76.
- [39] 李诗华. 长江口典型盐沼植被的环境适应性与生物地貌过程建模[D]. 上海: 华东师范大学, 2022.
- [40] 张明亮. 滨海盐沼湿地退化机制及生态修复技术研究进展[J]. 大连海洋大学学报, 2022, 37(4): 539-549.
- [41] 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.
- [42] 海洋生态修复技术指南 第2部分: 珊瑚礁生态修复: GB/T 41339.2—2022[S]. 北京: 自然资源部(海洋), 2022.
- [43] 于蕴泽, 刘辉. 鳗草海草床生态修复方案研究[C]//中国环境科学学会 2021 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会场论文集(四). 北京: 《工业建筑》杂志社有限公司, 2021: 173-176.
- [44] 程冉, 侯鑫, 王欢, 等. 红纤维虾形草移植植株存活、生长和生理对不同水动力条件的响应[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(2): 21-31.
- [45] 奉杰, 张涛, 马培振, 等. 牡蛎礁碳源-汇功能研究进展与展望[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(5): 115-125.
- [46] Baggett L P, Powers S P, Brumbaugh R D, et al. Guidelines for evaluating performance of oyster habitat restoration[J]. *Restoration Ecology*, 2015, 23(6): 737-745.
- [47] 徐冠球, 谭晓璇, 屠建波, 等. 天津大神堂牡蛎礁保护区海域海水水质变化趋势分析与评价[J]. 海洋环境科学, 2022, 41(4): 554-562.
- [48] Temmerman S, Meire P, Bouma T J, et al. Ecosystem-based coastal defence in the face of global change[J]. *Nature*, 2013, 504(7478): 79-83.
- [49] Morris R L, La Peyre M K, Webb B M, et al. Large-scale variation in wave attenuation of oyster reef living shorelines and the influence of inundation duration[J]. *Ecological Applications*, 2021, 31(6): e02382.
- [50] 杨波. 海岸空间: 规划·修复·景观设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- [51] Hou W, Liang S, Ma Q, et al. Ecological characteristics of a typical coastal artificial shoreline considering the key drivers involved[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2022, 277: 108069.
- [52] 李志明, 周连伟, 梁书秀, 等. 凌水湾不同海岸结构潮间带附着生物群落特征差异性影响分析[J]. 海洋环境科学, 2022, 41(3): 444-451.
- [53] 张洁, 陈国光, 王尚晓, 等. 福建省沿海砂质岸线防护林分布特征及生态修复探讨[J]. 华东地质, 2022, 43(1): 72-78.
- [54] 周剑, 李培良, 谭凤, 等. 土福湾赤岭岸线沙滩修复技术探讨[J]. 水运工程, 2022(S1): 1-7.
- [55] 苏丛明. 韧性理念下适应灾害的滨海景观设计——以福建省石狮市红塔湾海岸公园为例[J]. 城市建筑空间, 2022, 29(9): 124-126.
- [56] 张有珠. 海岸带生态修复中的植物选择与配置——以蓝色海湾整治行动项目湄洲湾北岸段为例[J]. 绿色科技, 2022, 24(17): 27-31.
- [57] 林世伟. 上海市潮滩湿地退化评估及生态修复优先区识别[D]. 上海: 华东师范大学, 2021.
- [58] 林伟波, 李兰满, 陈鹏. 盐城沿海湿地退化原因及生态恢复措施研究[J]. 江苏科技信息, 2021, 38(35): 67-70+80.
- [59] 王平, 孙家文, 董祥科, 等. 生态修复后普兰店湾水体交换数值研究[J]. 海洋环境科学, 2021, 40(6): 937-946.
- [60] 王丹, 匡翠萍, 宫立新, 等. 生态修复工程对七里海潟湖氨氮时空分布特征的影响[C]//第二十届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下). 南京: 河海大学出版社, 2022: 276-283
- [61] 关于海洋行业标准《海堤生态化建设技术指南》(征求意见稿)征求意见的函[EB/OL]. [2022-06-29]. <http://www.nrsis.org.cn/seekPublicAdvice/pagePublishAdviceStdList/10001171>.
- [62] 易雨君, 刘奇, 王雪原, 等. 生态海岸防护工程研究进展与展望[J]. 海洋与湖沼, 2022, 53(4): 806-812.
- [63] Suedel B C, Calabria J, Bilskie M V, et al. Engineering coastal structures to centrally embrace biodiversity[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 323: 116138.
- [64] Hatuka T, Zur H, Mendoza J A. The urban digital life-

- style: An analytical framework for placing digital practices in a spatial context and for developing applicable policy[J]. *Cities*, 2021, 111: 102978.
- [65] 张杨, 黄发明, 林燕鸿, 等. 基于陆海统筹理念的围填海生态修复规划研究——以福建可门工业园区为例[J]. *海洋湖沼通报*, 2021, 43(1): 56-62.
- [66] 陈绵润, 王金华, 章柳立, 等. 粤港澳大湾区围填海工程生态保护修复对策研究[J]. *海洋开发与管理*, 2022, 39(7): 3-13.
- [67] 杨波, 常勤, 富楷, 等. 中新天津生态城临海新城北堤生态廊道工程方案设计[R]. 天津: AECOM, 2022.
- [68] Chee S Y, Yee J C, Cheah C B, et al. Habitat complexity affects the structure but not the diversity of sessile communities on tropical coastal infrastructure[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2021, 9: 673227.
- [69] 彭智, 陈勇. 基于NbS的防洪潮绿色柔性安全屏障研究[J]. *水利规划与设计*, 2022, doi: 10.3969/j.issn.1672-2469.2022.11.015.
- [70] 欧阳玉蓉, 蔡灵, 李青生, 等. 大型围填海工程海洋生态修复实践与探索[J]. *海洋开发与管理*, 2021, 38(9): 74-79.
- [71] 田鹏, 隋伟涛, 孙鹏, 等. 生态海堤在杭州湾海岸防护中的应用[J]. *中国港湾建设*, 2020, 40(10): 40-44.
- [72] 香港东涌东生态海岸线景观设计 | AECOM[EB/OL]. [2022-12-15]. <http://landscape.cn/landscape/12219.html>.
- [73] 吴波, 梁书秀, 孙家文, 等. 人工岸线生态化建设技术手册[R]. 天津: 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 2022.
- [74] Cohen-Shacham E, Walters G, Janzen C, et al. Nature based solutions to address global societal challenges[M]. Gland: The International Union for Conservation of Nature (IUCN), 2016.
- [75] 薛皓, 肖春蕾, 郭艺璇. 基于自然的解决方案对中国生态保护修复工作的启示[J]. *中国地质调查*, 2021, 8(6): 96-104.
- [76] 杨波, 杨建, 李彦军, 等. 中新天津生态城南堤滨海步道公园及滨海湿地修复[R]. 天津: 艾奕康(天津)工程咨询有限公司, 2021.
- [77] Browne M A, Chapman M G. Ecologically informed engineering reduces loss of intertidal biodiversity on artificial shorelines[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(19): 8204-8207.
- [78] Strain E M A, Morris R L, Coleman R A, et al. Increasing microhabitat complexity on seawalls can reduce fish predation on native oysters[J]. *Ecological Engineering*, 2018, 120: 637-644.
- [79] Dyson K, Yocom K. Ecological design for urban waterfronts[J]. *Urban Ecosystems*, 2015, 18(1): 189-208.
- [80] Waltham N J, Sheaves M. Eco-engineering rock pools to a seawall in a tropical estuary: Microhabitat features and fine sediment accumulation[J]. *Ecological Engineering*, 2018, 120: 631-636.
- [81] Chapman M G, Blockley D J. Engineering novel habitats on urban infrastructure to increase intertidal biodiversity[J]. *Oecologia*, 2009, 161(3): 625-635.
- [82] 严飞, 董学刚. 长江口炮台湾湿地公园生态景观型海堤设计[J]. *人民长江*, 2012, 43(增刊1): 7-10.
- [83] 孙芹芹, 杨顺良, 赵东波, 等. 不同疏浚方案下的安海湾整治修复效益评估[J]. *应用海洋学学报*, 2015, 34(2): 241-246.
- [84] 李阳, 李小艳, 李冰心. 广州市南沙区灵山岛尖外江岸线生态提升规划设计[J]. *广东园林*, 2021, 43(4): 85-89.
- [85] 张磊, 王刚. 莆田市蓝色海湾整治行动项目设计方案[R]. 北京: 正和恒基, 2020.
- [86] 韩宇, 曾剑, 叶建军, 等. 生态海堤的基本理念及其在温州市方案中的设计应用[J]. *浙江水利科技*, 2022, 50(2): 18-22.
- [87] 杨波, 张磊, 杨春梅, 等. 东莞滨海湾新区龙苗段硬质海堤生态提升实施方案[R]. 北京: 正和恒基, 2022.
- [88] 张泽华. 模块化苦草和伊乐藻种植对水体净化效果的初步研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
- [89] Jacobs S, Beauchard O, Struyf E, et al. Restoration of tidal freshwater vegetation using controlled reduced tide (CRT) along the Schelde Estuary (Belgium) [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, 85(3): 368-376.
- [90] 陈雪初, 戴雅奇, 黄超杰, 等. 上海鸚鵡洲湿地水质复合生态净化系统设计[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(20): 66-69.
- [91] 杨波, 付辉, 刘昱, 等. 天津市滨海新区(马棚口北部)海洋生态保护修复项目实施方案[R]. 天津: 艾奕康(天津)工程咨询有限公司, 2022.
- [92] 冯文心. 韧性城市下应对海平面上升影响的策略研究[J]. *城市建筑*, 2022, 19(20): 20-23.
- [93] 张孝奎, 魏樊, 冯立超, 等. 国土空间规划视角下滨海城市韧性防潮体系构建研究——以福州滨海新城核心区为例[J/OL]. [2022-12-10]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1097.P.20220830.1139.004.html>.
- [94] 我国首例退港还海实践为城市系上生态“绿丝带”[EB/OL]. [2021-12-23]. http://www.xinhuanet.com/politics/2020-12/14/c_1126858624.htm.

Summary of hot spots in the coastal ecological restoration technology in 2022

YANG Bo^{1,2}, SUN Xiaofeng³, LIU Yu², ZHANG Lei⁴, HAN Zhen², GUO Shiqi², LI Xiaoyan⁵, FU Hui², LIU Yan²

1. Institute of Ocean Energy and Intelligent Construction, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China
2. AECOM (Tianjin) Engineering Consultants Co., Ltd., Tianjin 300074, China
3. China-Singapore Tianjin Eco-City Administrative Committee, Tianjin 300467, China
4. Beijing ZEHO Waterfront Ecological Environment Treatment Corp, Beijing 100084, China
5. China Architecture Design & Research Group, Beijing 100044, China

Abstract This article combines the pressure and pain points of China's coastal zone ecology, the progress of protection and restoration, and the international experience of coastal zone ecological restoration technology. In terms of coastal zone ecological restoration system development, territorial spatial planning, restoration under land-sea coordination and technology system research, blue carbon ecosystem research, and the evaluation mechanism of coastal zone ecological restoration effects, it summarizes and reviews the scientific and technological hotspots and important progress of China's coastal zone ecological restoration in recent years. It also summarizes in the main aspects of coastal ecological restoration for different types of coasts; ecological restoration of main typical coastal habitat types; scientific and technological application progress of coastal ecological restoration engineering. It proposes that coastal zone ecological restoration develops from projects to scene creation, and from technology to multiple comprehensive solutions. It has many synergy opportunities and great potential in related fields such as building low-carbon cities, improving urban resilience, creating urban landscapes, and inheriting marine culture. Coastal zone ecological protection and restoration technology and engineering will receive more attention, wider support, and more focus.

Keywords coastal zone; ecological restoration; land-sea coordination; territory spatial planning ●



(责任编辑 卫夏雯)