

海岸带侵蚀岸段湿地恢复设计及运行成效分析 ——以杭州湾北岸奉贤段为例

The Schemes of Coastal Wetland Restoration in Eroded Area and Its Operation Effect after Implementation —Taking the Fengxian Section of the North Bank of Hangzhou Bay as an Example

戴雅奇 陆金忠 陈雪初*
DAI Yaqi LU Jinzhong CEHN Xuechu*

基金项目:
国家重点研发计划“长三角退化河口湿地生境修复与植被快速恢复技术”(编号: 2017YFC0506002)
上海市海洋局科技项目“上海典型受损岸段生态整治修复关键技术集成研发”(编号: 沪海科2018-03)

文章编号: 1000-0283 (2021) 08-0020-05
DOI: 10.12193/j.laing.2021.08.0020.004
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2021-06-21
修回日期: 2021-07-12

戴雅奇
1978年生/男/上海人/硕士/上海市
水利工程设计研究院有限公司工程师/
研究方向为生态修复、水环境综合治理
(上海 200061)

陆金忠
1997年生/男/浙江杭州人/华东师范
大学生态与环境科学学院硕士在读/研
究方向为受损湿地恢复(上海 200241)

陈雪初
1980年生/男/浙江温州人/博士/华东
师范大学教授/研究方向为受损湿地恢
复与水域生态学研究(上海 200241)

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: xcchen@des.ecnu.edu.cn

摘要

海岸带受自然侵蚀和人类活动影响, 面临生态功能退化、水质恶化等问题, 亟待实施以生态系统结构和功能恢复为目标的生态整治修复。在杭州湾北岸侵蚀岸段堤外进行生态恢复设计与实践, 构建以“生态沉淀—强化净化—生态恢复—清水涵养”为核心的复合生态净化技术体系, 在生态前置库采用扦插抛种结合方式引种耐盐沉水植物和构建近自然生态浮岛, 表面流湿地种植芦苇并在底层布置改性填料, 在清水涵养塘堆垒人工岛并投加水生动物和布设自然能造流系统, 同时利用岸滩湿地富余空间构建太阳能供电系统, 形成内循环流动, 以此快速改善水质; 在湿地植物生长期, 通过对涵管阀门的人工控制, 使得湿地处于稳定低水位, 促进种苗发育生长, 当湿地植被逐渐生长并适应环境之后, 打开阀门再次引入潮汐, 以促进盐沼结构和功能的发育, 并进一步发挥生态系统服务功能。长期运行表明, 该技术能够有效促进盐沼生长, 使植被抗自然灾害能力增强, 并进一步改善水质, 且具有抑制藻类水华的能力。研究及后续的鸚鵡洲生态湿地实践显示, 针对侵蚀岸段采取人工干预与自然演替相结合的复合技术可实现盐沼植物快速恢复, 并为底栖动物、幼鱼及虾蟹等提供良好的生境, 是较为可行的快速恢复受损岸段, 改善近岸水域水质的工程手段。

关键词

侵蚀岸段; 生态恢复; 水位调控; 植被

Abstract

Affected by natural erosion and human activities, the coastal zone is facing problems such as degradation of ecological function and deterioration of water quality. It is urgent to implement ecological remediation and restoration aimed at the restoration of ecosystem structure and function. The ecological restoration design and practice is carried out outside the embankment of the eroded section on the North Bank of Hangzhou Bay, and a composite ecological purification technology system with "ecological sedimentation - enhanced purification - Ecological Restoration - clean water conservation" as the core is constructed. The salt tolerant submerged plants are introduced by cutting and seed throwing in the ecological front bank and a near natural ecological floating island is constructed, Reed is planted in the surface flow wetland and modified filler is arranged at the bottom. Artificial islands are built in the clear water conservation pond, aquatic animals are added and natural energy flow generation system is arranged. At the same time, solar power supply system is constructed by using the surplus space of beach wetland to form internal circulation flow, so as to quickly improve water quality; During the growth period of wetland plants, the culvert valve is manually controlled to keep the wetland at a stable low water level and promote the development and growth of seedlings. When the wetland vegetation gradually grows and adapts to the environment, open the valve to introduce the tide again, so as to promote the development of salt marsh structure and function and further give play to the ecosystem service function. The long-term operation shows that the technology can effectively promote the growth of salt marsh, enhance the ability of vegetation to resist natural disasters, further improve water quality, and inhibit algal bloom. The research and subsequent practice of yingwuzhou ecological wetland show that the combined technology of artificial intervention and natural succession for the eroded bank section can realize the rapid recovery of salt marsh plants and provide a good habitat for benthos, juvenile fish, shrimp and crab. It is a more feasible engineering means to quickly recover the damaged bank section and improve the water quality of nearshore waters.

Key words

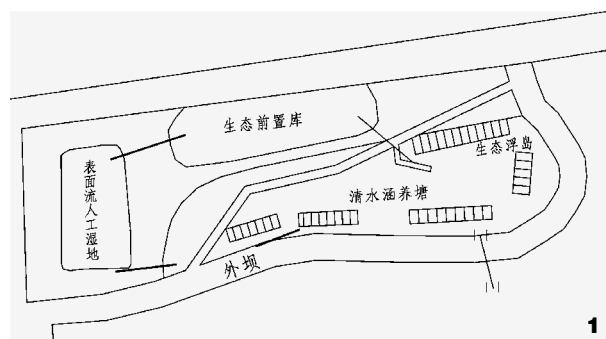
eroded bank section; ecological restoration; water control; vegetation

海岸带是陆地海洋相互作用的地带, 且是中国社会经济发展的重要区域。近年来由于自然侵蚀^[1]、气候变化、城市扩张以及人口增长^[2], 海岸带资源受到了严重的破坏, 面临滨海湿地面积大幅减少、生态功能退化、渔业资源下降、水体环境质量恶化等问题, 亟需对海岸带实施以生态系统结构和功能恢复为目标的生态整治修复^[3]。在我国, 最先提出的海岸带整治修复主要针对受自然侵蚀或者过度开发利用而受损的岸段, 通过空间整理、淤积防护、侵蚀防护、沙滩养护等工程措施修复海岸带空间形态和自然景观, 提升防灾能力。2010年以来, 我国日益重视海岸带生态保护, 在开发利用海洋空间的同时, 海岸带生态整治修复成为工作重点, 主要针对受损、退化、服务下降的海岸带区域, 采取适当人工干预措施保护岸线免受侵蚀并维持空间形态稳定, 在此基础上利用生态工程技术手段修复滨海生态系统景观, 保护生态系统结构与功能的完整性并促进自然演替, 进而发挥生态系统服务^[4]。

本研究所区域杭州湾北岸奉贤段(N 30° 49' 42", E 121° 34' 15"), 受科氏力影响, 是典型侵蚀岸段, 局部受损严重区域植被消失, 盐沼转变为光滩。根据前期现场水质监测结果, 部分点位TN(总氮)、NH₃-N(氨氮)和Chl-a(叶绿素a)含量高, 水质远低于四类海水标准, 且富营养化趋势明显。为此, 在国家海洋局海域使用金返还项目资金支持下, 启动了“杭州湾北岸整治修复奉贤岸段示范项目”, 拟在现有保滩工程的基础上, 结合碧海金沙东库区实际情况, 营造复合型湿地, 进一步提升近岸水域水质, 发挥生态功能, 为海岸带生态整治修复提供实践经验。具体工程目标为通过工程措施快速恢复本地盐沼湿地植被, 并修复水质达到三类海水标准。

1 国内外研究及实践现状

传统的海岸带防护工程以满足防灾减灾需求为目标, 大多采用混凝土构件或抛石等水工结构建设, 较少考虑对海岸带生态环境保护, 造成不同程度的破坏^[5]。在我国, 应对海岸侵蚀主要采取结构性措施包括硬质结构和软防护结构两种^[6], 其中硬质结构对近岸生态的破坏作用较为明显。荷兰等国为增加岸段的韧性与生态功能, 充分利用湿地, 结合水闸、防护结构等设施, 融合水利工程和生态工程实现保护目标^[7]; 比利时Schelde河口建设低于风暴潮水位的外堤, 依靠滞洪区营造出湿地生境^[8]; 美国旧金山湾索诺玛海湾湿地修复项目、纽约Jamaica湾修复项目等在潮间带结合基底修复恢复盐沼湿地, 不但可防



1. 复合湿地分区平面图

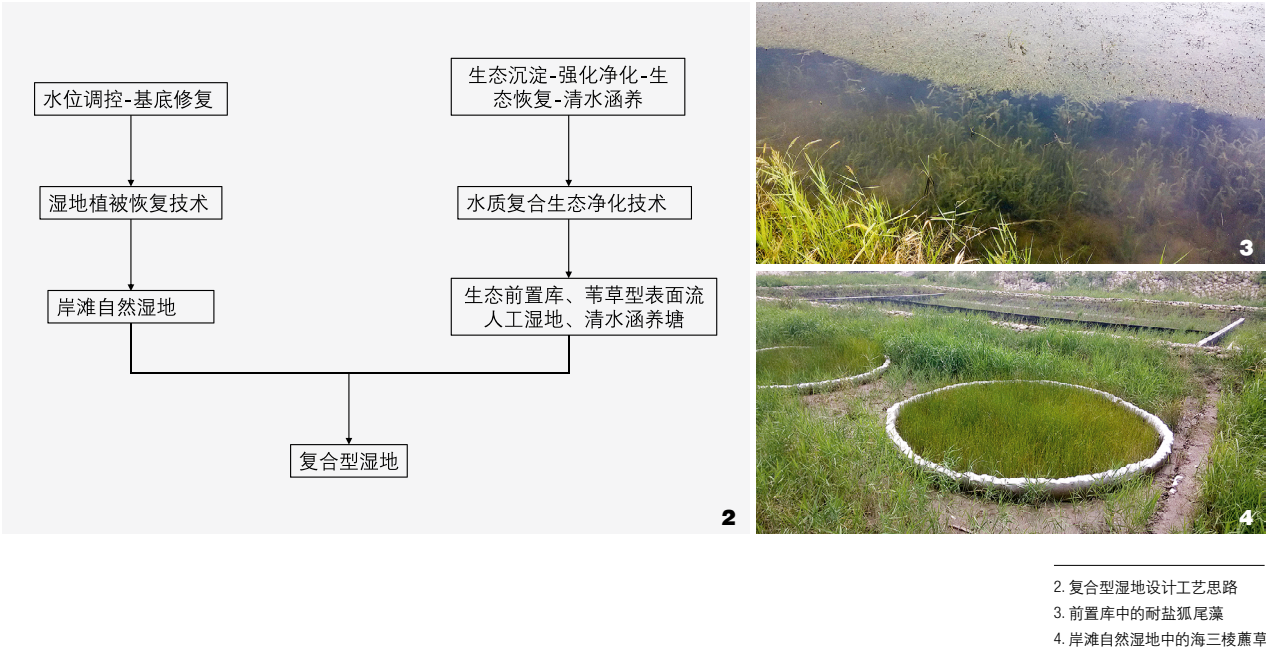
护海岸侵蚀, 而且可形成可供居民感受自然的空间^[9]。近年来, 活生命海岸(living shorelines)技术逐渐受到重视, 主要在盐沼外缘构建牡蛎礁、岩床等生态工程设施, 提升基底稳定性, 以应对海平面上升和极端天气增加带来的风险, 局部高风险区域则通过构建由障壁岛、牡蛎礁、盐沼组合而成的复合系统, 削减风浪对岸线的侵蚀作用并发挥生态功能^[9]。

2 杭州湾北岸奉贤段湿地恢复设计与实施效果

2.1 总体布置与工艺设计思路

针对工程区自然湿地退化, 来水悬浮物质含量较高, 氮磷污染严重的特点, 以恢复湿地植被、形成自然景观、获取优质海水为目标, 通过水位调控、基底修复等方法, 达到在岸滩区恢复本地湿地植物的目的。主要通过构筑生态坝, 阻止海浪的直接冲刷, 起到相对独立封闭的目的, 生态坝与海塘主堤、库区隔堤之间形成一块约6 000 m²的复合型湿地区, 共有三个核心生态功能区(图1)。

湿地内部利用太阳能水泵形成内循环, 采取以“生态沉淀—强化净化—生态恢复—清水涵养”为核心的多级生态净化设计理念, 构建以“生态前置库工程—苇草型表面流人工湿地水质强化净化工程—清水涵养区水质生态修复工程”为核心的复合生态净化技术体系(图2)。其中, 生态前置库通过种植沉水植物和构建近自然生态浮岛来吸收水中氮、磷等营养物质, 并在植物根部吸附悬浮物质。表面流湿地来水为生态前置库出水, 底部布置改性填料, 通过植物、微生物、基质的复合作用对生态前置库出水进行深度净化, 去除氨氮、无机磷、有害藻类等, 在清水涵养塘处调控水位, 种植沉水植物,



并投加贝类滤食水中藻类。

2.2 分区设计

(1) 生态前置库。生态前置库为不规则狭长形，面积约为520 m²，平均水深为1.5 m，停留时间为12 h。水体表面设置80 m²的近自然浮岛，并悬挂弹性填料。前置库底泥表层覆盖种植土层，采取扦插和抛种相结合的方式引种川蔓藻和狐尾藻等耐盐沉水植物（图3），在初始低水位条件下抛投碎石，碎石层厚度10 cm，有利于沉水植物能够快速稳定生长。前置库植被恢复后，在自然沉降、填料吸附和植物根系的综合作用下，可去除来自水中的悬浮物和营养物质。

(2) 表面流湿地。表面流湿地占地面积480 m²，平均水深20 cm，平均停留时间为4.8 h，来水为前置库出水，并均匀进入表面流湿地。基底以上覆盖40 cm改性种植土层，种植土层以上覆盖30 cm改性填料层。芦苇是能快速生长的本地物种，并且地上部分具有较高的氮储存能力，因此挺水植物以芦苇为主，植被初植密度达到20株/m²以上。将种苗直接移植在基质中，种植后控制湿地水位在填料层以上5~10 cm。出水水位控制在3.5 m，并通过PVC管道进入清水涵养塘。

(3) 岸滩自然湿地。岸滩自然湿地面积为2 500 m²，采用营养基质对自然湿地表层20 cm土壤进行改良，同时投加微生

物菌剂。高程较低部分种植400 m²的海三棱藨草（图4），其间镶嵌种植100 m²海三棱藨草；高程较高位置种植1 900 m²的芦苇，镶嵌种植灯心草100 m²、糙叶苔草100 m²。为防止水流侵蚀，采用松木桩对种植区域基质进行围护，为植物生长创造更好的基质条件。利用岸滩自然湿地构建了太阳能供电系统，为内循环水泵和自然能造流系统提供电力。

(4) 清水涵养区。清水涵养区（图5）面积2 500 m²，底标高1.5 m，平均停留时间为120 h。清水涵养区和外坝水体之间设置涵闸，水位可以通过涵闸调控。利用原位土方堆垒一座200 m²的人工岛，布设三处面积共360 m²的近自然浮岛，其上种植芦苇等盐生植物；投加水生动物螺、贝类、鱼类等共100 kg，抑制水体中藻类增殖；布置两套自然能造流系统，使清水涵养区水流充分均匀，使水体更好地复氧，促进水中微生物、水生动、植物的生物活性，降低各类污染物的浓度，使水体达到再利用的标准。栈桥蜿蜒贯穿涵养区，可以使人们近距离感受湿地景观，发挥生态服务功能。

2.3 实施效果

2014年8月份建成后初期循环运行，运行水量500 m³/d，按运行顺序依次分为清水涵养塘、生态前置库和表面流湿地，出水返回清水涵养塘。湿地水源来自于外坝水体，利用清水涵养

塘闸门进行水位调控。2014年8月—2015年7月,在湿地植物生长期调控水位维持3.0~3.2 m,为种苗提供适宜的非淹水生境,使其快速生长;2015年7月以后,湿地植被成熟,开启清水涵养塘闸门,引入自然潮汐,形成潮汐水位变化,达到在岸滩区恢复本地湿地植物、促进湿地生态系统结构和功能发育的目的。

总体而言,截至2014年7月中旬,对于湿地恢复区内2013年已试种芦苇的区域(约占恢复区总面积70%),植物生长良好,盖度达到80%(图6)。从9月份以来的植物生长情况来看,恢复区整体盖度已接近80%,新种区域海三棱藨草、糙叶苔草、藨草生长情况良好,部分区域盖度也达到70%以上(图7)。在湿地恢复期间,还遭遇了两次极端恶劣天气侵害,潮水翻越外坝,整个复合型湿地持续淹没达10 h以上,水深超过1 m,并且在此期间,海流在风浪作用下还具有较大的扰动。事后对现场勘察发现,湿地植被和基底没有大规模破坏迹象,仅有个别边坡被侵蚀。结果表明湿地植被恢复后,具有很强的抗自然灾害的能力。

2014—2017年复合型湿地连续运行,在此过程中开展持续监测,通过对湿地各单元进出水水质监测并进一步测算发现,湿地的DIN(溶解态无机氮)去除能力平均值为 $0.19 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, DIP(溶解态无机磷)为 $0.039 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,其中生态前置库对DIN的平均去除率为81.8%。与外部海域相比较,经复合型湿地处理,DIN均值由劣四类降至二类以上,DIP由三类降至二类以上^[10]。另一方面,在湿地运行后,水体中的藻类群落结构也发生了显著变化。占据浮游植物密度68.1%的旋链角毛藻消失,微小原甲藻则占据优势。运行期间,外坝水体爆发水华,但湿地内部并未出现水华现象,这与湿地的藻类结构改变密切相关,也从侧面展现出复合型湿地具有抵御水华的能力。

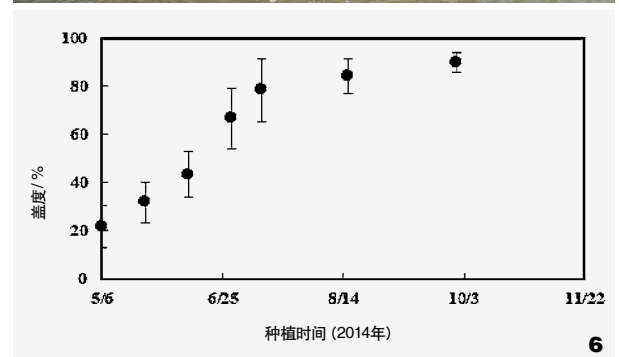
3 海岸带侵蚀岸段湿地恢复策略建议

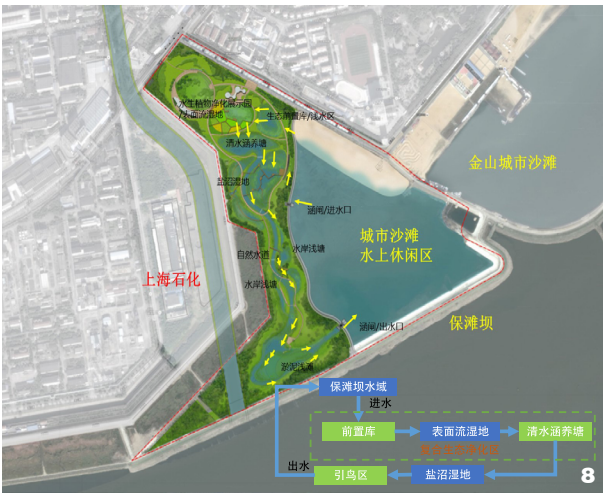
为避免风暴潮和洪灾的影响,各大沿海城市都积极整治修复岸线,并兴建了大规模的堤防工程。然而,所形成的沿海“新长城”不具备生态服务功能,对当地生物多样性造成了不同程度的影响^[10]。为了应对人类活动和自然压力带来的挑战,应当反思以往由钢筋混凝土构建的硬质边界存在的生态问题,考虑是否可以重塑人与自然之间的边界,即通过精心设计的工程措施,再加上生态系统的自组织,使之成为同时具有抵抗力和弹性的活生命系统。

基于上述理念和奉贤岸段示范工程取得的实践经验,以华

东师范大学为技术支撑,在2015年度中央海域与海岛保护资金的支持下,进一步实施了“金山城市沙滩西侧综合整治及修复工程”。在金山滨海景观区构建总面积约 23.2 hm^2 的滨海生态空间—鸚鵡洲生态湿地^[11](图8)。该项目主要采取以“工程保滩、基底修复、本地植物引种、潮汐水力调控”为核心的潮滩湿地生态恢复技术,重构与恢复海岸带潮滩盐沼湿地景观;同时基于“生态沉淀—强化净化—清水涵养”为核心的技术理念,构建生态净化单元修复水质;并导入空间规划设计技术,促进恢复湿地与人工湿地的紧密融合,构建形成“生态保护—水质修复—景观游憩”为一体的城市滨海生态空间。该项目

5. 清水涵养区
6. 植被盖度变化图
7. 2014年9月2日湿地现场图





8. 鸚鵡洲湿地生态单元示意图

于2017年底开始免费向市民开放，已成为当地市民感受湿地、亲近海洋的好去处。从鸚鵡洲生态湿地4年多的运行情况来看，通过湿地不同单元的协同净化作用可以实现对来水中污染物的有效去除，DIN和DIP去除率均达到50%以上，SS（悬浮固体）的平均去除率为60%^[12]；湿地整体表现为碳汇，其平均增温潜势（GWP）达到-17.6 umol·m⁻²·s⁻¹^[13]。此外，园内观测并记录到近70种野生鸟类，吸引到国家一级保护动物黄胸鹀，国家二级保护动物震旦鸦雀、鸳鸯、红隼、燕隼、鸮等。

以杭州湾北岸为例，长期的基底侵蚀和外源污染造成了海岸带湿地等生态系统的退化消失。针对上述外部干扰问题，必须通过人工干预的方法才能确保在较短时间恢复岸线植被，为生态系统恢复创造条件。在人工干预实施整治修复的基础上，应为自然演替过程预留空间，提供基于自然的解决方案（nature-based solution）。针对侵蚀岸段生态整治修复问题，杭州湾北岸奉贤岸段整治修复项目取得了构建“大型复合生态斑块”（large composite patch）的重要经验，即在外侧设置生态堤减少波浪侵蚀，结合基底修复和地形塑造形成高位盐沼湿地和低位浅塘，并在生态堤下部设置涵管连通浅塘和外侧海域；在湿地植物生长期，通过对涵管阀门的人工控制，使得湿地处于稳定低水位，促进种苗发育生长；当湿地植被逐渐生长并适应环境之后，打开涵管阀门，再次引入潮汐，这样就能促进盐沼湿地结构和功能的发育，并进一步发挥生态系统服务功能。

4 结语

针对杭州湾北岸侵蚀岸段的实践显示，构建复合湿地是较为可行的快速恢复受损岸段，改善近岸水域水质的工程手段。采取人工干预与自然演替相结合的方式，构建“大型复合生态斑块”，可实现盐沼植物快速恢复，植被覆盖度在一年内达到70%以上。连续监测结果显示，氮、磷指标较开放水域提升一个级别以上，系统还可以抑制藻类增殖避免水华发生，从而为底栖动物、幼鱼及虾蟹、鸟类等提供良好生境。LA

参考文献

- [1] 董健, 曾献奎, 吴吉春. 不同类型海岸带海水入侵数值模拟研究进展[J]. 高校地质学报, 2018, 24(03): 442-449.
- [2] 刘大海, 管松, 邢文秀. 基于陆海统筹的海岸带综合管理: 从规划到立法[J]. 中国土地, 2019(02): 8-11.
- [3] 骆永明. 中国海岸带可持续发展中的生态环境问题与海岸科学发展[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(10): 1133-1142.
- [4] 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(03): 477-484.
- [5] 徐伟, 陶爱峰, 刘建辉, 等. 国际海岸带生态防护对我国生态海堤建设的启示[J]. 海洋开发与管理, 2019, 36(10): 12-15.
- [6] 钟超, 石洪源, 隋意, 等. 我国海岸侵蚀的成因和防护措施研究[J]. 海洋开发与管理, 2021, 38(06): 42-45.
- [7] 陈宗周, 周永青. 美国海岸侵蚀防护措施[J]. 海洋地质动态, 1994(12): 13-14.
- [8] JACOBS S, BEAUCHARD O, STRUYF E, et al. Restoration of Tidal Freshwater Vegetation Using Controlled Reduced Tide (CRT) along the Schelde Estuary[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2009, 85(3): 368-376.
- [9] O'DONNELL J E D. Living Shorelines: A Review of Literature Relevant to New England Coasts[J]. Journal of Coastal Research, 2017, 33(2): 435-451.
- [10] MA Z, MELVILLE D S, LIU J, et al. Rethinking China's New Great Wall[J]. Science, 2014(11): 346.
- [11] 陈雪初, 高婷婷. 上海鸚鵡洲滨海盐沼湿地的恢复经验与展望[J]. 园林, 2018(07): 48-52.
- [12] 张春松, 杨华蕾, 由文辉, 等. 新恢复湿地对近岸水域水质的净化效果研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(03): 65-68.
- [13] YANG H, TANG J, ZHANG C, et al. Enhanced Carbon Uptake and Reduced Methane Emissions in a Newly Restored Wetland[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2020(1): 125.