

文章编号: 1674-5566(2025)04-0812-09

DOI: 10.12024/jsou.20240404479

上海海岸带生态修复现状、管理及未来趋势

张春松^{1,2}, 戴雅奇^{1,2}, 叶 骥^{1,2}, 印 越^{1,2}

(1. 上海市水利工程设计研究院有限公司, 上海 200061; 2. 上海滩涂海岸工程技术研究中心, 上海 200061)

摘要: 受人类活动和气候变化等自然因素影响, 上海海岸带部分生态系统面临着生境退化、生态系统结构和功能受损等问题, 亟需开展生态修复。在双碳目标的大背景下, 如何指导海岸带的生态保护与修复, 发挥海岸带生态系统的碳汇价值, 成为上海现阶段面临的重大课题。本研究从上海海岸带资源、海岸带开发利用情况和海岸带生态现状等角度, 提炼了上海海岸带的主要特征, 并基于上海海岸带理化和区位条件, 梳理了上海海岸带经济发展与生态保护的矛盾、水沙条件改变和外来入侵物种扩散等自然和人为因素导致的生态修复治理难点。研究建议上海海岸带生态修复应从管理角度探索绿色多元发展模式, 从修复技术应用角度开展生态系统集成的增汇海岸带建设, 从生态修复效果跟踪角度形成长周期、多维度的生态修复效果评估体系, 以期为上海海岸带生态修复与高质量发展提供参考和借鉴。

关键词: 海岸带; 生态修复; 碳汇; 效果评估; 管理

中图分类号: X 37 文献标志码: A

海岸带是陆地与海洋的交界地带, 得天独厚的地理环境使其汇聚了大量的人口和产业资源, 但是随之带来的土地开发利用与环境污染严重影响了海岸带生态系统健康^[1], 造成了风暴潮影响加剧、水环境持续恶化、生物多样性显著下降等负面影响。近些年来, 在拓展海洋开发利用空间的同时, 海岸带生态整治修复与环境保护已经成为了该区域的研究热点^[2-5], 2000年后, 上海先后实施了上海崇明东滩鸟类国家级自然保护区互花米草(*Spartina alterniflora*)生态控制与鸟类栖息地优化工程、上海临港滨海海洋生态保护修复项目、上海奉贤滨海海洋生态保护修复项目等一系列的大型海岸带综合保护提升工程^[6], 生态修复措施包括互花米草治理、盐沼生态修复、海洋生物保护与修复等。

2020年9月, 我国明确提出2030年“碳达峰”与2060年“碳中和”的目标, 海洋作为地球上最大的活跃碳库, 具有巨大的生态系统碳汇潜力^[7], 而以盐沼湿地、红树林、海草床等为代表的海岸带生态系统是最高效的海洋碳汇^[8-10], 因此对海岸带碳汇的挖掘是上海甚至我国顺利实现双碳目标的重要抓手。研究海岸带的生态保护修复与

海岸带增汇已经成为上海等沿海城市的迫切需求, 基于此, 本研究针对海岸带特征, 分析上海海岸带生态修复治理的难点, 并探究其在双碳背景下开展海洋生态修复保护工作的机遇, 挖掘海岸带生态保护与区域绿色高质量发展、海岸带韧性空间提升、碳汇规模扩大之间的协同增效模式, 以期为上海海岸带的生态保护与多元价值挖掘提供参考与建议。

1 上海海岸带特征

1.1 地处河口与湾区地带, 生态单元多样化, 蓝碳资源丰富

上海地处杭州湾和长江口交界处, 海岸带非常广袤, 上海市大陆海岸线全长218.22 km, 其中杭州湾北岸大陆海岸线长89.38 km, 长江口南岸大陆海岸线长128.84 km, 另有崇明、横沙、长兴、大小金山等岛屿沿江沿海岸线460 km^[11]。同时, 上海海岸带生态单元类型丰富, 主要包括海湾、河口、岛屿、沙洲、浅滩、湿地等。杭州湾北岸海湾同时受到钱塘江径流、长江径流及东海潮流浪涌的影响^[12], 咸淡水交汇和大量营养物质的输

收稿日期: 2024-04-07 修回日期: 2024-09-24

基金项目: 上海市科学技术委员会河口湿地碳汇提升技术应用示范项目(22dz1209605)

作者简介: 张春松(1994—), 男, 工程师, 研究方向为海洋生态修复。E-mail: 1187996160@qq.com

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydxxb.com>

入,使得杭州湾北岸浮游生物量和多样性水平较高^[13-14],成为凤鲚(*Coilia mystus*)、棘头梅童鱼(*Collichthys lucidus*)等鱼类的索饵和产卵场^[15],仔稚鱼密度在夏季可以达到0.67 ind./m³左右^[12]。此外黄浦江、大治河、金汇港等各级河道入海,造就了上海海岸带多样化的河口资源,底栖生物与鸟类资源丰富。长江入海口为上海带来了典型的河口海岸带生境,形成了众多的沙洲、浅滩,携带来的大量泥沙淤积造就了大量滩涂,进而发展成为九段沙、南汇东滩、崇明东滩等盐沼湿地,根据《上海近海海域碳汇调查(2022)》估算结果,上海市盐沼湿地碳储量约221万t C、总碳汇量约15万t C/a,碳汇效率和碳汇规模非常可观。

1.2 海岸带开发较早,利用率高

上海市海岸带具有悠久的开发历史,素有“千年塘外”之称,建国后上海的海岸线利用规模不断扩大,是我国的主要重开发岸线分布区域之一^[16-17]。同期,上海海岸带可以大致划分为耕地、林地、草地、城乡建设用地、港口码头用地、交通用地、海水、河流、水库坑塘和沿海滩涂等10个土地利用类型^[18]。随着经济的持续高速发展,上海海岸带营建了大量的高规格交通堤,以满足海洋气候灾害防御和海岸带联通与交通运输及休闲观光的需求。长时间跨度和高密度的海岸带空间利用,不可避免地导致对海岸带原有生态单元的侵占,产生了一定的生态影响。

1.3 海岸带外来入侵物种扩散,乡土群落退化

根据《互花米草防治专项行动计划(2022—2025年)》,上海的互花米草群落分布规模达到1.2万hm²,其扩散面积仅次于江苏和浙江。上海的互花米草群落主要分布在九段沙湿地、崇明北沿和南汇东滩,其他区域如杭州湾北岸沿线也均有大面积分布,已经成为上海盐沼群落的优势种。以上海奉贤岸段为例,2022年互花米草纯种分布共计96.648 hm²,与芦苇形成交错带共计0.499 hm²,互花米草占盐沼植物群落面积比例达到80%。互花米草大量扩散导致海三棱藨草(*Scirpus mariqueter*)、芦苇(*Phragmites australis*)、盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)等乡土植物

群落大面积退化,进而引发底栖动物与鸟类种群规模的下降,严重威胁了上海海岸带的生态环境质量。

2 上海海岸带生态修复治理难点

2.1 海岸带保护与经济发展需求的矛盾

近年来,随着沿海地区工业化和城镇化进程的不断推进,海岸带地区发展和保护的冲突日益显著^[17],大量建设用地的增加为上海带来了可观的经济收益^[18],但是挤占滩涂资源,破坏滩涂的湿地形态,导致潮滩失去对潮能的存储与耗散作用,也造成了海岸带的结构与功能受损^[19-20],从而引发一定的生态问题。如图1所示,在中国知网检索“海岸带保护”与“海岸带经济”两个词条,发现2012年之前,海岸带经济与海岸带保护的研究文献数量基本相当,但是自2012年之后,海岸带保护的关注度明显高于海岸带经济发展。虽然海岸带生态保护修复已经受到越来越广泛的重视,但是目前上海开展海洋生态保护修复项目势必会使海岸带土地资源的开发利用受阻,甚至会直接导致已有用海项目的迁移,将会带来经济发展的阵痛;同时,大型海洋生态保护修复项目耗资巨大,也为政府财政带来了压力。

2.2 水沙条件发生变化,岸线波动剧烈

上海位于长江入海口,长江来水携带着丰富的泥沙在河口扩散入海后,部分泥沙堆积在长江口门附近,据统计,1940—2014年,上海由于淤积增加的陆地面积达到442.90 km²^[17,21]。但是据大通站输沙观测资料统计,自2003年三峡大坝蓄水以来,长江口输沙量减少严重,2003、2004年年输沙量分别为 2.06×10^8 、 1.17×10^8 t,至2011年年输沙量仅为 0.718×10^8 t^[22]。同时,由于海岸带促淤工程的影响,杭州湾北岸部分岸线沿岸海域潮流动力进一步加强,已经呈现强冲刷态势,如图2所示,南门港到中港段的0 m等深线逐年逼岸,提前滩涂资源接近完全丧失,生态空间受损严重^[23]。水沙条件的改变使得上海海岸带生态修复面临着严峻的生态护滩需求,极大地增加了提前生态修复的成本与风险。

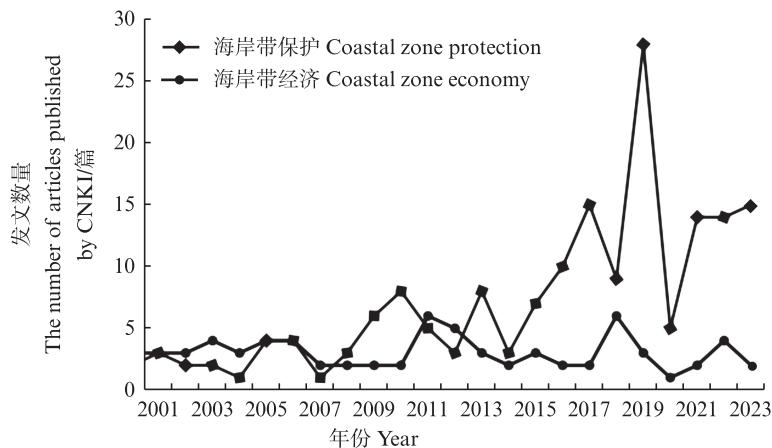


图1 20多年来中国知网收录的“海岸带保护”与“海岸带经济”研究论文数量

Fig. 1 The number of research papers on "Coastal Zone Protection" and "Coastal Zone Economy" included in CNKI in the past two decades

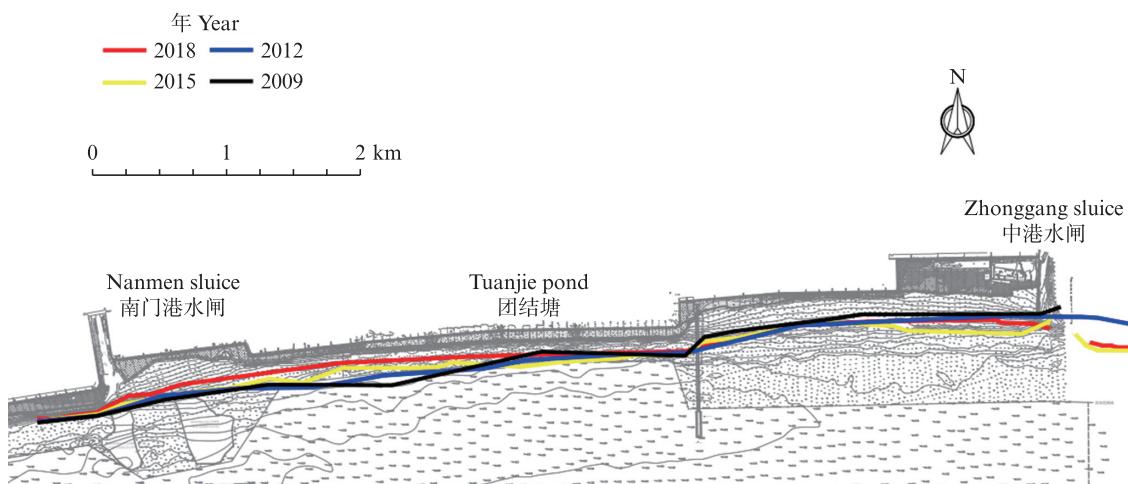


图2 杭州湾北岸南门港到中港段0 m等深线变化情况

Fig. 2 Changes in the 0 m isobath of Nanmen Port-Zhonggang section on the north shore of Hangzhou Bay

此外,自20世纪60年代起,上海境内的海岸线一直处于高不稳定层级,同时由于周期性围填海活动的进行,上海海岸带岸线的不稳定性处于周期性波动状态^[24];岸线的高强度波动以及较高的不稳定性使得海岸带生态系统的结构难以稳定,无法发挥高效的生态系统服务功能,生态修复工程实施后,也很难保证生态系统的持续稳定。

2.3 外来入侵物种的扩散与复发,碳汇生态系统结构和功能受损

互花米草等外来物种对上海海岸带生态修复的负面影响机制主要包括两方面:一是通过复发和二次入侵形成持续干扰,二是破坏盐沼沉积物的原有结构。首先,外来物种防治后,理论上通过乡土植物群落修复可以占据互花米草的生态位,

增加其二次入侵的难度。但是互花米草可以通过其发达的根系进行无性繁殖,同时由于种子数量较多,其有性繁殖能力也很强,因此恢复后的盐沼湿地植物群落极易受到互花米草复发和二次入侵的影响,增加了海岸带生态修复的治理和监控成本。其次,针对互花米草治理的物理、化学等方法均会对沉积物结构或生物群落产生影响,无形中增加了生态修复项目的治理周期。

3 上海海岸带修复的未来趋势及管理策略

3.1 从管理角度探索海岸带绿色多元发展

近几十年,随着我国经济的不断高速发展,海岸带的经济区位优势不断扩大,随之带来的是人口的大量聚集和港口、码头、道路、住宅的高强度开发,在享受海岸带地区便捷的同时不可避免

对海岸带生态环境产生冲击,造成海岸带生态系统的急剧退化,产生一系列的环境、生态、水安全等问题。因此,建议上海海岸带坚持绿色发展模式,从管理角度优化海岸带产业布局,清退违规用海项目,切实保护好崇明岛周缘和杭州湾北岸

海岸带滨海湿地、岛屿、沙洲、滩涂、河口、港湾等生态系统。如图3所示,在坚持生态保护优先的基础上探索生态保护海岸带观光、文化内核挖掘、碳汇交易等绿色多元发展模式。

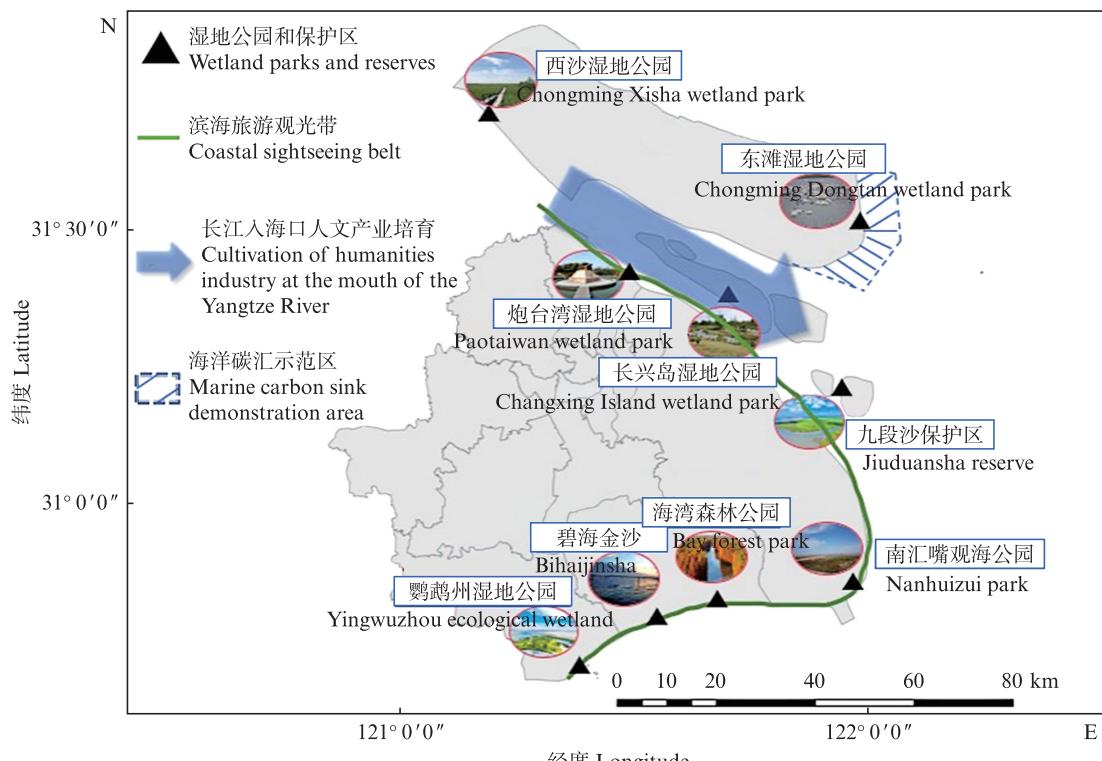


图3 海岸带绿色多元发展模式构想

Fig. 3 Concept of green and diversified development model in coastal zone

3.1.1 以湿地公园和保护区为节点,串联上海海岸带整体形成滨海旅游观光带

上海拥有广袤的滩涂资源,以此为基础建立了东滩湿地公园、海湾森林公园、九段沙等湿地公园和保护区,同时高规格沿海交通堤几乎全线贯通,具备沿线打造滨海旅游观光带的条件。参考厦门筼筜湖环湖观光带的构建模式,上海可以结合海岸带的盐沼湿地等自然生态系统修复和沿海防护林带建设,提高盐沼湿地群落多样性,增加防护林带彩叶树种规模,综合提升海岸带沿线景观整体质量和景观斑块,打造一个范围更大的蓝绿融合的海湾滨海风貌观光带。

3.1.2 挖掘海岸带的历史文化资源,进行长江入海口人文产业培育

上海地处长江入海口,晋朝时期因渔民创造捕鱼工具“扈”以及江河入海处称为“渎”而得名为“沪”,其文化渊源可以追溯至春秋时期。在中

华文明发展进程中,积淀了以自强不息、厚德载物、和谐共生为内核的文化价值系统,构筑了长江文化的精神之魂,这与上海融合东西方近代精华形成的海派文化在内核上是互通的。因此,建议上海充分开发和利用自己丰富的文化资源,在管理角度上注重发掘长江文化产业、红色文化产业、科技文化产业、金融文化产业、历史文化产业等,形成文化产业价值链。

3.1.3 打造海洋碳汇示范区,助力蓝色碳汇交易

自然资源部发布的《海洋碳汇核算方法》行业标准显示,海洋碳汇指“红树林、盐沼、海草床、浮游植物、大型藻类、贝类等从空气或海水中吸收并储存大气中的二氧化碳的过程、活动和机制”。2023年,宁波西沪港首次以拍卖形式完成了海洋碳汇交易,交易内容包含大型海藻碳汇、牡蛎碳汇等。近年来,上海十分注重海洋生态系统保护修复,先后实施了崇明东滩、上海临港、上

海奉贤等大型海洋生态保护修复项目,有序恢复了盐沼湿地、牡蛎礁等生态资源,建议可以依托相关项目划定海洋增汇示范区,跟踪监测不同生态修复措施的固碳效果,通过人工干预实现高固碳效率,丰富海洋碳汇主体,增强碳的内部转化、迁移、埋藏。同时,可以依托海洋生物保护区、保护红线、海上风电基座等,探索养殖坛紫菜、海带等大型藻类实现增汇,并探索丰富海洋碳汇交易的类型、模式和机制。

3.2 建设复合生态系统集成的韧性增汇海岸带

海岸带作为一个整体,各个单元之间通过横向和纵向的物质、能量传输而相互影响,仅仅针对海岸带的某一部分进行生态修复可能会造成生态修复效果不理想或不可持续的现象。因此,本研

究认为应该推进海岸带生态综合治理,拓展海岸带生态系统的宽度,增强海岸带整体韧性,提升海岸带的生态系统多样性和碳固定与封存能力。尤其是在水沙变化明显、岸线波动剧烈的岸段,基于生态系统保护与修复、海岸带抵御风暴潮等自然灾害的能力、海岸带碳汇功能提升等角度,需要综合考虑不同修复措施的功能、不同生态系统的生态位、不同生态系统的串联与协同增效,使海岸带作为一个整体,更好地发挥其生态服务价值。基于上海海岸带的理化特征,如图4所示,本研究认为复合生态系统集成的韧性海岸带可以包括潮下带人工鱼礁群落的构建、潮间带牡蛎礁等贝礁群的构建、盐沼湿地的结构优化、海堤的生态化改造和堤内空间的调整与优化。

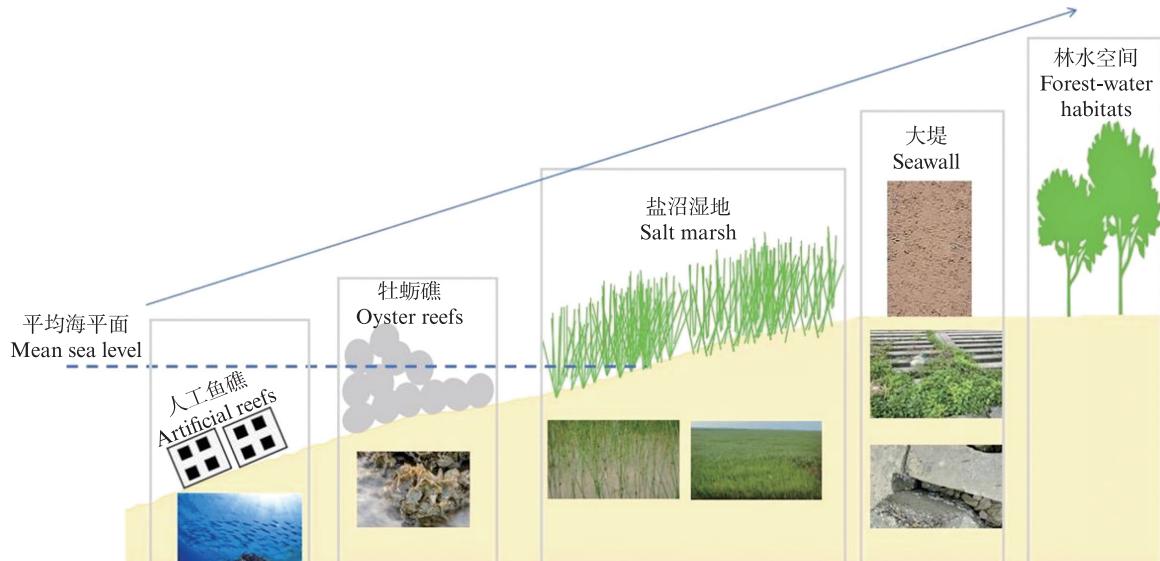


图4 复合生态系统集成的韧性海岸带示意图

Fig. 4 Schematic diagram of resilient coastal zone with integrated composite ecosystems

3.2.1 潮下带人工鱼礁群构建

海岸带的开发利用活动在带来显著经济效益的同时,也会对海洋资源尤其是鱼类资源产生较大影响,出现鱼、虾、贝的资源量减少等现象^[24],造成海洋生态系统受损。人工鱼礁可以为鱼类提供索饵、躲避天敌、繁殖等场所,是恢复渔业资源量的有效手段,同时人工鱼礁群通过不同构型和排布方式的搭配,具有显著的消波作用^[25-28];此外,人工鱼礁促进了鱼类种群的规模扩大,同时鱼礁区的鱼类粪便会进入海洋沉积物中被包覆、埋藏,以及鱼礁会为贝类提供附着空间,这些都会显著增加鱼礁区的海洋碳汇规模。

3.2.2 牡蛎礁群落恢复与构建

上海金山区、奉贤区和浦东新区沿岸均有天然牡蛎种群分布,但是由于潮水侵蚀等自然原因和海岸带开发利用等人为原因,部分区域潮间带萎缩,牡蛎仅能在管桩坝和消浪坝沿线狭长的区域分布,种群规模急剧退化。牡蛎礁具有明显的消浪作用,是天然的护岸生态系统,同时也可以截留退潮时海水中的悬浮物,在侵蚀海岸带可以有效保护滩涂基底;此外,牡蛎礁上附着的贝类、藻类等是有效的近海碳汇之一^[29-32]。因此,上海杭州湾北岸的侵蚀性岸段可以通过提供牡蛎附着基,人工恢复牡蛎礁群落,提升海岸带韧性,保

护滩涂基底,丰富海岸带生物多样性并提升海岸带碳库规模。

3.2.3 盐沼湿地的结构优化

上海盐沼湿地面临着严重的外来物种入侵,互花米草占据了大量的中高滩生境,造成芦苇、碱蓬等乡土盐沼植物的退化,湿地的结构受损,底栖、鸟类等生物的栖息空间萎缩。因此需要结合《上海市互花米草防治专项行动实施方案(2023—2025年)》,通过清除互花米草、加拿大一枝黄花等,恢复芦苇、菰、盐地碱蓬、海三棱藨草、光滩等乡土生境,在稳步提升上海盐沼湿地植被多样性和碳汇功能的基础上,恢复底栖、鸟类等种群数量和规模。

3.2.4 海堤生态化改造

上海处于台风登陆的高发地区,为了应对风暴潮等自然灾害,上海海岸带修筑了较大规模的堤防工程,但是传统硬质化结构的海堤难以提供有效的生态和碳汇价值。建议通过开槽、打孔、表面糙化、叠石等方式,在不影响海堤安全结构的前提下,增加海堤结构的空间异质性,多种微生境可以有效提升海堤空间的生物多样性^[33];同时,增强海岸带活力与辐射范围,通过海堤覆绿,提升海堤硬质结构的表面绿化率,不仅可以截留水流、提供生境,还具有一定的海岸带碳汇服务价值。

3.2.5 堤内生境的调整与优化

堤内生境是对堤外生态系统的补充,是海岸带空间的重要组成部分,具有生物多样性维持、生态产品供给、景观空间补充、防灾减灾、碳汇提供等多种生态系统服务价值。上海海岸带的堤后空间主要生境类型为随塘河流、防护林带和农田等,但是部分区域的随塘河流由于人工扰动、农田排水以及盐度等因素的影响,生态现状较差;部分防护林也出现树木生长不佳、树种单一、枯死木增加以及林带宽度下降等现象。因此,为了提升海岸带最后一条防线的防灾减灾和生态服务价值,建议对低效防护林带进行改造,恢复防护林带宽度,同时进行不同树种的搭配,丰富防护林带的垂直空间,也可适当补充符合区域生态位的彩叶树种,增强其碳汇服务功能和景观价值。此外,可以结合海岸带区域特征,营造半咸水林水复合湿地,提升区域内防洪除涝减灾能力、水资源统筹调配能力和水生态环境保护能

力,促进了海岸带堤内空间的整体改善提升和环境韧性。

3.3 完善生态修复工程的长效跟踪和实施效果评估体系

海岸带生态修复项目一般具有投资规模大、紧迫性强、实施周期长、修复窗口期短等特征,因此如何保证项目施工期间生态修复措施的合理布置、准确施工以及准确把握修复后的生态效果实现尤为重要,基于此,本研究提出了针对修复项目施工期的跟踪反馈机制和修复项目完成后的效果评估要素。

3.3.1 生态修复项目施工期跟踪分析

目前上海乃至全国尚未出台有关海洋生态修复项目施工期间的跟踪分析机制,因此在此类项目施工进程中极易出现施工偏差,以互花米草控制和盐沼植被群落修复为例,生态修复措施的参数如果落实不到位,很容易产生互花米草的二次复发和盐沼植物的存活率低等问题,造成互花米草的反复治理和乡土植物的频繁补种,不仅增加了投资成本,还造成了施工的严重滞后以及生态修复效果见效缓慢等问题。因此,本研究建议加紧出台海岸带生态修复项目施工期跟踪分析工作机制,形成技术方案反复论证——施工过程长期跟踪——技术实施细则分析论证——现场问题及时反馈——设计参数优化调整等跟踪分析反馈机制,及时纠错,保障生态修复项目的顺利实施。

3.3.2 生态修复项目实施后效果评估

目前生态修复项目的验收主要侧重于工程绩效指标的完成情况,而忽略了生态系统结构和功能的恢复情况,导致我们对于生态修复项目的生态服务价值认知不够全面。因此,本研究建议针对上海海岸带生态修复项目形成长效的实施效果监测与评估体系,包含盐沼植被、生物群落、环境要素、固碳增汇等在内的多元指标,形成海岸带生态系统的数据库,用于评估不同生态修复技术的实施效果、生态系统的碳汇能力提升、海岸带综合生态服务价值的变化等,为政策制定、生态修复技术集成创新等提供支撑。

4 结论

上海海岸带生态系统资源禀赋较好,碳汇资源丰富,但是过去数十年的高强度开发利用导致

其生态系统结构与功能受损。本研究分析了上海海岸带自然、人为等因素的修复治理难点,在此基础上提出了:(1)在管理角度探索海岸带多元绿色发展模式,依靠湿地公园与保护区,串联形成滨海旅游观光带,发掘长江入海口人文产业培育价值,打造海洋碳汇示范区;(2)在生态修复技术上,将海岸带视为一个有机整体,推动堤内空间改造与提升、生态化海堤建设、盐沼修复与提升、生物礁营造等韧性增汇海岸带建设;(3)海岸带生态修复的全过程与多要素的跟踪、监测、分析、评估建议,助力海岸带生态保护修复项目的高质量实施。

由于海岸带生态系统的脆弱性和重要性,本研究仅提出了海岸带的管理与修复技术趋势,具体的管理策略需要充分论证分析,技术实施细节需要根据生态本底特征因地制宜。值得注意的是,随着我国双碳目标的提出,海岸带生态空间所提供的蓝碳价值已经受到越来越多的关注,实现碳汇增长与海岸带生态保护及低碳产业发展的协同增效是上海顺利实现碳中和,提高新质生产力的有效途径。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

- [1] 崔子奥,高郭平,陈洁.上海海岸带演变及生态系统服务价值变化[J].上海海洋大学学报,2024,33(2):409-423.
- CUI Z A, GAO G P, CHEN J. Coastal zone evolution and ecosystem service value change in Shanghai [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2024, 33 (2) : 409-423.
- [2] YANG H L, TANG J W, ZHANG C S, et al. Enhanced carbon uptake and reduced methane emissions in a newly restored wetland [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2020, 125(1): e2019jg005222.
- CHEN X C, DAI Y H, SUN Y W, et al. Research progress and prospect of eco-realignment and restoration technologies for metropolitan coastal zone [J]. Marine Environmental Science, 2021, 40(3): 477-484.
- [3] 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.
- BULLERI F, CHAPMAN M G. The introduction of coastal infrastructure as a driver of change in marine environments[J]. Journal of Applied Ecology, 2010, 47 (1): 26-35.
- [5] GRENIER J L, DAVIS J A. Water quality in South San Francisco Bay, California: current condition and potential issues for the South Bay Salt Pond Restoration Project [M]//WHITACRE D M. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Volume 206. New York: Springer, 2010: 115-147.
- [6] 张妙,巢移,皇甫荣荣.上海滨海海岸带生态修复方案与实施路径探讨[J].中国水运,2024(3): 64-66.
- ZHANG M, CHAO Y, HUANGPU R R. Discussion on the ecological restoration plan and implementation path of the coastal zone in Shanghai [J]. China Water Transport, 2024(3): 64-66.
- [7] WANG F M, SANDERS C J, SANTOS I R, et al. Global blue carbon accumulation in tidal wetlands increases with climate change [J]. National Science Review, 2021, 8(9): nwaa296.
- [8] 白雁,陈一宁.认知区域海洋碳汇,服务地方蓝碳发展[J].海洋学研究,2023,41(1): 2.
- BAI Y, CHEN Y N. Recognize regional marine carbon sinks and serve local blue carbon development [J]. Journal of Marine Sciences, 2023, 41(1): 2.
- [9] 韩广轩,宋维民,李远,等.海岸带蓝碳增汇:理念、技术与未来建议[J].中国科学院院刊,2023,38(3):492-503.
- HAN G X, SONG W M, LI Y, et al. Enhancement of coastal blue carbon: concepts, techniques, and future suggestions [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(3): 492-503.
- [10] 唐剑武,叶属峰,陈雪初,等.海岸带蓝碳的科学概念、研究方法以及在生态恢复中的应用[J].中国科学:地球科学,2018,48(6): 661-670.
- TANG J W, YE S F, CHEN X C, et al. Coastal blue carbon: concept, study method, and the application to ecological restoration[J]. Science China Earth Sciences, 2018, 61(6): 637-646.
- [11] 郭祉宾,钟俊生,洪波,等.杭州湾北岸水域仔稚鱼的多样性和聚类分析[J].中国水产科学,2021,28(11):1477-1488.
- GUO Z B, ZHONG J S, HONG B, et al. Diversity and cluster analysis of fish larvae and juvenile on the northern of Hangzhou Bay [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2021, 28(11): 1477-1488.
- [12] 贾海波,邵君波,曹柳燕.杭州湾海域生态环境的变化及其发展趋势分析[J].环境污染与防治,2014,36(3): 14-19, 25.
- JIA H B, SHAO J B, CAO L Y. Analysis of the changes and development trend of ecological environment in Hangzhou Bay [J]. Environmental Pollution & Control, 2014, 36(3): 14-19, 25.
- [13] 贾海波,唐静亮,胡颖琰.1992—2012杭州湾海域生物多样性的变化趋势及原因分析[J].海洋学报,2014,36

- (12): 111-118.
- JIA H B, TANG J L, HU H Y. The variation tendency of biodiversity and cause analysis in Hangzhou Bay from 1992 to 2012[J]. *Haiyang Xuebao*, 2014, 36(12): 111-118.
- [14] 王森,洪波,张玉平,等.夏、冬季杭州湾北部游泳动物群落结构[J].*广东海洋大学学报*,2015,35(3):56-62.
- WANG M, HONG B, ZHANG Y P, et al. Community structure of nekton in northern Hangzhou Bay in summer and winter[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2015, 35(3): 56-62.
- [15] 许宁.中国大陆海岸线及海岸工程时空变化研究[D].烟台:中国科学院烟台海岸带研究所,2016.
- XU N. Research on spatial and temporal variation of China mainland coastline and coastal engineering [D]. Yantai: Yantai Institute of Coastal Zone Research, CAS, 2016.
- [16] 崔丽娟,李伟,窦志国,等.近30年中国滨海滩涂湿地变化及其驱动力[J].*生态学报*,2022,42(18):7297-7307.
- CUI L J, LI W, DOU Z G, et al. Changes and driving forces of the tidal flat wetlands in coastal China during the past 30 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(18): 7297-7307.
- [17] 孙品.近30年上海海岸带土地利用变化分析与建模预测[D].上海:中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所),2017.
- SUN P. Land use change analysis and modeling prediction in Shanghai coastal zone in recent 30 years [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [18] 汤立群,卢单,赵慧明,等.河口滩涂围垦对水动力环境影响研究综述[J].*水利水电科技进展*,2020,40(6):78-84.
- TANG L Q, LU D, ZHAO H M, et al. Review of impacts of tideland reclamation on hydrodynamic environment near estuarine area[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2020, 40(6): 78-84.
- [19] 曹沛奎,谷国传,董永发,等.杭州湾泥沙运移的基本特征[J].*华东师范大学学报(自然科学版)*,1985(3):75-84.
- CAO P K, GU G C, DONG Y F, et al. Basic characteristics of sediment transport in Hangzhou Bay[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science Edition)*, 1985(3): 75-84.
- [20] MULLER J R M, CHEN Y P, AARNINKHOF S G J, et al. Ecological impact of land reclamation on Jiangsu coast (China): a novel ecotope assessment for Tongzhou Bay [J]. *Water Science and Engineering*, 2020, 13(1): 57-64.
- [21] 刘高伟,程和琴,李九发,等.近期长江河口南汇南水域水沙变化特征[J].*海洋科学*,2015,39(10):108-115.
- LIU G W, CHENG H Q, LI J F, et al. Recent variations in tidal current and suspended sediment concentration in the Nanhui south Shoal of the Changjiang Estuary [J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(10): 108-115.
- [22] 翟法.侵蚀性海岸带生态保护修复实践[J].*水利规划与设计*,2023(11):139-145.
- ZHAI F. Practice of ecological protection and restoration in erosive coastal zones [J]. *Water Resources Planning and Design*, 2023(11): 139-145.
- [23] �毋寧.近70年中国大陆岸线变化的时空特征分析[D].烟台:中国科学院烟台海岸带研究所,2015.
- WU T. Analysis of spatio-temporal characteristics of mainland coastline changes in China in nearly 70 years [D]. Yantai: Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [24] 胡聪.围填海开发活动对海洋资源影响评价方法研究[D].青岛:中国海洋大学,2014.
- HU C. Evaluation methods of reclamation impact on marine resources [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [25] 孙明波,林军,张清雨,等.消浪导流型人工鱼礁的消波性能研究[J].*水动力学研究与进展A辑*,2023,38(4):586-598.
- SUN M B, LIN J, ZHANG Q Y, et al. Research on the wave dissipation performance of high wave-dissipating and low flow-retarding artificial reefs [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2023, 38(4): 586-598.
- [26] LI J, ZHENG Y X, GONG P H, et al. Numerical simulation and PIV experimental study of the effect of flow fields around tube artificial reefs [J]. *Ocean Engineering*, 2017, 134: 96-104.
- [27] LIU W J, LIU Y S, ZHAO X Z, et al. Numerical study of irregular wave propagation over sinusoidal bars on the reef flat [J]. *Applied Ocean Research*, 2022, 121: 103114.
- [28] KIM T, KWON Y, LEE J, et al. Wave attenuation prediction of artificial coral reef using machine-learning integrated with hydraulic experiment [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 248: 110324.
- [29] 郭莉娜,赵娟娟,程前,等.海洋牧场碳汇容量计算方法理论探讨[J].*中国渔业经济*,2023,41(1):57-63.
- GUO L N, ZHAO J J, CHENG Q, et al. Theoretical discussion on calculation method of carbon sink capacity of marine ranching [J]. *Chinese Fisheries Economics*, 2023, 41(1): 57-63.
- [30] 洪新,程建婷,李庆杰,等.滨州双层牡蛎礁消浪效果的实验研究[J].*海洋湖沼通报*,2023,45(4):106-111.
- HONG X, CHENG J T, LI Q J, et al. An experimental

- study on dissipating effect of double-layer oyster reefs in Binzhou coastal seawater [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2023, 45(4): 106-111.
- [31] RIDGE J T, RODRIGUEZ A B, FODRIE F J, et al. Maximizing oyster-reef growth supports green infrastructure with accelerating sea-level rise [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 14785.
- [32] 王桃妮, 张子莲, 全为民. 牡蛎礁生境: 海岸带可持续发展的潜在碳汇 [J]. *生态学报*, 2024, 44(7): 2706-2716.
- [33] WANG T N, ZHANG Z L, QUAN W M. Oyster reef habitat: a potential carbon sink for sustainable development of coastal zone [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(7): 2706-2716.
- 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.

Status, management and future trends of ecological restoration in the coastal zone of Shanghai

ZHANG Chunsong^{1,2}, DAI Yaqi^{1,2}, YE Qi^{1,2}, YIN Yue^{1,2}

(1.*Shanghai Water Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200061, China*; 2.*Shanghai Engineering Research Center of Coastal Zones, Shanghai 200061, China*)

Abstract: Affected by natural factors such as human activities and climate change, some ecosystems in the coastal zone of Shanghai are facing problems such as habitat degradation and damage to ecosystem structure and function, and ecological restoration is urgently needed. In the context of the dual carbon goals, how to guide the ecological protection and restoration of the coastal zone has become a major issue. Based on the physicochemical and location characteristics of the coastal zone, this study extracted the main characteristics of the coastal zone of Shanghai, and sorted out the difficulties of ecological restoration and management caused by natural and human factors such as the contradiction between economic development and ecological protection, the change of water and sediment conditions, and the spread of invasive alien species. It is suggested that the ecological restoration of the coastal zone of Shanghai should explore the green and diversified development model from the perspective of management, carry out the construction of the coastal zone with ecosystem integration from the perspective of restoration technology application, and form a long-term and multi-dimensional ecological restoration effect evaluation system from the perspective of ecological restoration effect tracking, so as to provide reference for the ecological restoration and high-quality development of the coastal zone of Shanghai.

Key words: coastal zone; ecological restoration; carbon sinks; evaluation of effectiveness; management