

大都市海岸带生态整治修复技术研究进展与展望

陈雪初^{1,2}, 戴禹杭^{1,3}, 孙彦伟^{2,4}, 何小燕⁵, 李 蕙³

(1.华东师范大学 生态与环境科学学院 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241; 2.自然资源部大都市区国土空间生态修复工程技术创新中心, 上海 200062; 3.中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120; 4.上海市建设用地和土地整理事务中心, 上海 200003; 5.上海海洋管理事务中心, 上海 200050)

摘要:受人类活动和自然灾害影响,大都市区海岸带生态环境遭到破坏,丧失了原有的生态服务功能。如何修复海岸带并发挥其支持作用成为沿海城市面临的重大问题与机遇。本文综述了近年来国内外以硬质岸线生态化、基底修复和海滩养护、水文调控、植被恢复以及牡蛎礁为代表的海岸带生态整治修复技术,并分析海岸带生态整治修复技术的发展趋势,认为需要充分考虑技术对海岸带特殊条件的适应性,注重研发人工干预与自然演替相结合的复合技术体系,相关技术还应当支持大都市海岸带生态系统功能和结构的提升以及景观尺度的复合生态系统的构建,进而能够提升海岸带生态环境质量,为市民提供亲近海洋、感受海洋的美丽海岸带。

关键词:海岸带; 生态整治修复; 都市区; 滨海生态空间

中图分类号:X171.4

文献标识码:A

文章编号:1007-6336(2021)03-0477-08

Research progress and prospect of eco-realignment and restoration technologies for metropolitan coastal zone

CHEN Xue-chu^{1,2}, DAI Yu-hang^{1,3}, SUN Yan-wei^{2,4}, HE Xiao-yan⁵, LI Hui³

(1.School of Ecological and Environmental Sciences, Shanghai Key Laboratory for Urban Ecology and Sustainability, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2.Technology Innovation Center for Land Spatial Eco-restoration in Metropolitan Area, Ministry of Natural Resources, Shanghai 200062, China; 3.Shanghai Water Way Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China; 4.Shanghai Land Consolidation and Rehabilitation Center, Shanghai 200003, China; 5.Shanghai Administration Center for Ocean Affairs, Shanghai 200050, China)

Abstract: Coastal regions as well as its ecosystem service now are under threaten by the combination effects of improper human activities and serious natural disasters. Restoring the damaged areas together with its services is both an opportunity and a challenge for coastal cities. Here, we summarized the representative coastal eco-realignment and restoration technologies including shorelines planting, sediment amendment and beach nourishment, hydrological control, marsh transplantation, and oyster reef construction. Moreover, we prospected the trends of coastal eco-realignment and restoration technologies, and suggested that studies should focuses on developing technologies that combining both human intervention and natural succession, in order to adapt to the harsh conditions at the coast. These technologies should also help to improve the function and structure of coastal ecosystems and to further form the landscape-scale composite ecosystems, which in turn

收稿日期:2020-04-20, 修订日期:2020-08-03

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0506002);上海市科委社发项目(19DZ1203400);上海市海洋局科技项目(沪海科 2021-04);上海市海洋局科技项目(沪海科 2019-06)

作者简介:陈雪初(1980—),男,浙江温州人,教授,主要研究方向为修复生态学, E-mail: xcchen@des.ecnu.edu.cn

improved the coastal environment and provided citizens with a beautiful habitat that could touch and explore the ocean.

Key words: coastal zone; eco-realignment and restoration; metropolis; coastal ecological space

为免受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^[1]。最近十余年来, 海岸带生态整治修复被许多沿海城市重视, 然而从国内外海岸带生态整治修复技术及工程的发展现状来看, 虽然已有不少成功案例可供学习与借鉴, 但由于涉及生态学、环境学和海岸工程学等诸多学科的交叉问题, 该领域尚未形成较为完备的技术体系。本文针对海岸带生态环境问题, 梳理了相关技术及其工程应用, 并对未来海岸带生态整治修复的发展方向提出建议, 以期为之后的技术研发和政府决策提供一定的参考。

1 海岸带生态环境问题与整治修复概况

海岸带处在城市空间与海洋的过渡带, 为城市发展提供了生物资源和生态系统服务, 另一方面海岸带又是最易受到人类活动影响和自然灾害干扰的区域之一。尤其在沿海大都市, 城市发展面临着空间资源的瓶颈问题, 海岸带往往成为其拓展空间资源的后备用地。从 20 世纪开始, 为了解决土地短缺问题, 许多沿海地区将盐沼、红树林等海岸带生态系统排干和填埋, 转变为工业用地、农田、海水养殖以及娱乐空间, 导致生态系统功能丧失和环境容量降低^[2]。同时, 大量氮、磷营养元素通过工农业废水、城市雨水径流和海水养殖废水输送到城市附近海域, 导致水体富营养化, 增加赤潮发生的风险^[3]。此外, 为防护岸线和减缓岸线侵蚀, 沿海城市在海岸带修建了大量围堤、防波堤等硬质人工设施, 使得岸线高度人工化^[4]。与自然岸线的形态不同, 人工岸线结构相对单一, 不仅破坏了原有的自然景观, 而且对海洋生态环境造成了一定的影响。

随着海岸带自然资源的价值得到重视, 许多沿海城市从 20 世纪开始采取削减污染源、减少渔业捕捞和保护滨海湿地等措施以减少城市发

展带来的负面影响。进入 21 世纪, 在拓展海洋开发利用空间的同时, 海岸带生态整治修复成为热点。2006 年, 纽约利用基底修复和植被恢复技术在 Jamaica 湾修复了 27.3 ha 盐沼湿地^[5]。同年启动的旧金山南湾盐池恢复工程将约 6110 ha 工业盐池逐步恢复成湿地和候鸟栖息地^[6]。从 2010 年开始, 上海等城市先后投入 92.9 亿元海域使用金返还资金, 开展多项海域海岸带整治修复项目, 修复了 5876 ha 海岸带生态系统^[7]。2016 年起, 厦门、青岛等 28 个城市先后开展“蓝色海湾”整治行动, 推进滨海湿地生态修复工程, 恢复滨海湿地生态功能, 同时推进“南红北柳”“生态岛礁”等重点海洋修复工程^[8]。

2 海岸带生态整治修复技术及应用进展

2.1 对海岸带生态整治修复的认识

在我国, 最先提出的海岸带整治修复主要针对由于风暴潮等自然灾害侵蚀或者人类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。最近 20 年来, 海岸带特有的盐沼湿地、海草床、红树林等生态系统得到了世界各国的普遍重视, 海岸带不再是人类可以恣意向海洋索取的开发利用区域, 而被重新定义为应该得到人类尊重的自然生态空间, 人类可以获取的是生态系统服务而不应当是土地价值。因此, 基于生态系统的海岸带生态恢复 (coastal restoration) 逐渐主流化, 主要通过退堤还海、引入潮汐等措施恢复海岸带生态系统结构与功能。与此同时, 荷兰、英国等欧洲国家进一步提出了“主动重构 (managed realignment)”的观点, 以更加积极地应对海岸带受损退化问题, 即在优化调整海岸带空间开发利用格局的基础上, 综合考虑不同修复措施的功能以及彼此之间的协同作用, 结合工程设施和生态系统增强海岸保护, 使海岸带更好地适应气候变化问题, 同时为人类提供可持续的服务功

能^[9-10]。纵观我国各地近年来开展的典型的“海岸带生态整治修复”工程,大都是在传统“海岸带整治修复”的基础上,同步考虑“海岸带生态恢复”问题,期望实现岸线修复与生态系统恢复的双重目标,但在“主动重构”方面开展的工作还相对较少。

总结近20年来国内外海岸带生态整治修复研究和实践成果,我们认为海岸带生态整治修复可以定义为:针对受损、退化、服务下降的海岸带区域,采取适当的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。需要注意的是,就大都市海岸带而言,往往处于城市开发区域与邻近海域之间的生态交错带,海岸带生态整治修复不仅仅要关注海岸带岸线安全保障和生态质量提升,还要为城市滨海空间可持续利用和当地城市社会经济发展提供基础支撑。围绕上述海岸带生态整治修复目标,在实际项目实施中往往采取特定工程技术措施促成特定生态结构与功能的恢复乃至滨海生态系统景观的形成。以图1为例,海岸带生态整治修复涉及了海堤以内的陆域过渡带、海堤以上区域和海堤以外潮间带,按实施区域和技术类型差异,现有技术可划分为硬质岸线生态化技术、堤外基底修复和海滩养护技术、堤内水文调控技术、潮间带植被恢复技术、低潮滩牡蛎礁保育技术等。

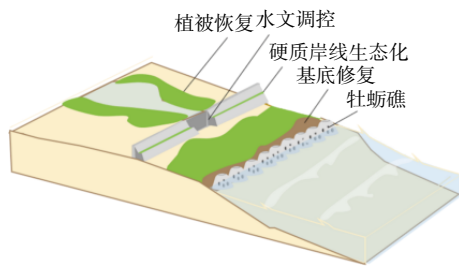


图1 海岸带生态整治修复技术

Fig. 1 Coastal eco-realignment and restoration technologies

2.2 硬质岸线生态化技术

从法律、经济和环境方面考虑,海岸带无法舍弃硬质设施建设,国内外普遍在硬质设施基础上调整结构和增加生态措施。由于担心大型的

生态工程会影响安全性和美观价值,有研究认为可以在小尺度范围内增加设施表面的复杂性,为海藻等小型生物提供额外的空间^[11-12]。西雅图市在海堤改造计划中引入了不同朝向的鳍状、阶梯状和扁平状的鹅卵石海堤表面;加拿大温哥华会议中心设计的混凝土台阶构成的海堤阶梯(seawall stairs)在水平方向有效地增加了浅水栖息地面积^[13]。Waltham和Sheaves^[14]在汤斯维尔的海堤外放置不同角度朝向的花盆充当人工潮池;Chapman和Blockley^[15]在悉尼港修建海堤时通过减少砌块和封口的方式形成人工潮池,调查发现人工潮池中物种多样性高于附近的天然潮池。严飞和董学刚^[16]结合上海吴淞炮台湾湿地条件在海堤迎水坡处抛填溪坑石,增加潮间带异质性,并种植抗风树种提升生态景观价值。

2.3 堤外基底修复和海滩养护技术

泥沙来量下降和风浪侵蚀会导致海岸带损失大量湿地和海滩的基底,影响植物和底栖生物存活,并丧失生态系统功能。基底修复和海滩养护常常是修复侵蚀海岸带的关键步骤之一。欧美国家常用海洋工程产生的疏浚泥作为修复湿地基底的材料^[5]。旧金山湾索诺玛海湾湿地修复项目利用奥克兰港口疏浚工程产生的 $2.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 疏浚泥,修复了138 ha滨海湿地^[17]。路易斯安那州将密西西比河的疏浚泥通过管道吹填至巴拉塔里亚湾东北部,创建了29 ha的盐沼^[18]。目前国内主要将疏浚泥用于修复湖滨带湿地,而滨海湿地仍处于理论阶段^[19]。孙芹芹等^[20]认为,将安海湾产生的疏浚底泥回填至周围的红树林会带来巨大的生态效益。

海滩养护利用机械或水力手段将泥沙抛填至受损海滩的特定位置,根据泥沙抛填位置的不同,分为剖面补沙、沙丘补沙、滩肩补沙和近岸补沙^[21]。厦门香山至长尾礁沙滩修复工程考虑到修复区域较强的水动力条件,选用滩肩补沙的方法抛沙约 $7.4 \times 10^5 \text{ m}^3$,修复了约1.5 km海滩^[22]。秦皇岛金梦海湾海滩养护工程采用滩肩补沙与近岸补沙相结合的方式,修复了长约3.39 km海岸线^[23]。西班牙贝尼多姆基于海滩平衡剖面的理论对波尼恩特海滩补沙 $3 \times 10^5 \text{ m}^3$,根据监测,工程完成10年后,海滩仍处于静态平衡^[24]。荷

兰 Sand Moto 海滩养护工程在海滩剖面上堆积 $2.15 \times 10^7 \text{ m}^3$ 泥沙, 形成钩状沙洲和潟湖, 并使得补沙周期从传统工程的 5 年提升至 20 年以上^[25]。

2.4 堤内水文调控技术

水文调控技术应用于恢复水文交换被破坏而退化的湿地和构建新湿地。以加拿大芬迪湾^[26] 和美国特拉华湾^[27] 为代表的湿地恢复工程根据水动力条件和模型计算结果, 通过破坏围堤等水文限制设施, 恢复原有湿地的自然潮汐交换, 同时修复主次级潮沟, 增加水文流通性, 经过自然演替最终达到修复目标。面对海平面上升和风暴潮等问题, 部分地区在原有堤防基础上建设水文调控系统, 控制进、出水量, 形成人工潮汐以恢复湿地。英国埃文河口依托河口和湿地的水位差来实现闸门自动开关, 但由于降雨和堵塞问题, 湿地长期处在淹水状态^[28]。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^[29]。上海鸚鵡洲湿地通过调节液压坝的高低以形成人工潮汐(图 2), 促进芦苇等盐沼植物的生长^[30]。此外, 崇明东滩鸟类自然保护区为保护鸟类栖息地, 通过水文调控技术实现了对互花米草的生态治理^[31]。保护区利用围堤和涵闸维持治理区域的水位, 淹死刈割后残根, 近期针对围堤带来的生态问题, 正在研究利用涵闸调控潮汐来水以进一步提升生态功能。

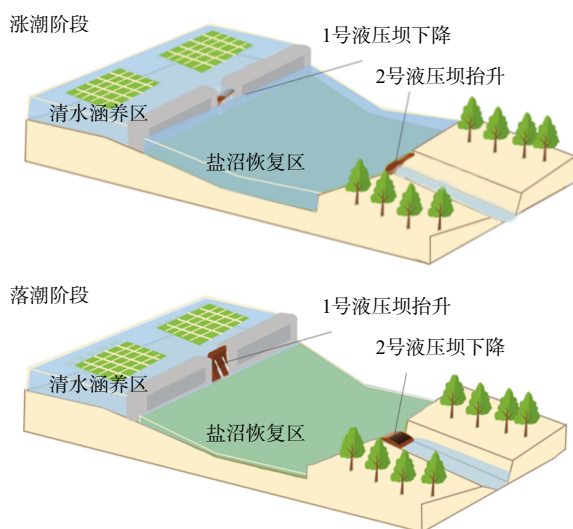


图 2 鸚鵡洲湿地人工潮汐技术原理

Fig. 2 Technical principles of artificial tide in Yingwuzhou wetland

2.5 潮间带植被恢复技术

潮间带植被恢复通常分为两种方式: 一种是针对修复区域内的现有植被斑块, 营造有利环境, 通过自然恢复形成丛群; 另一种是人工播撒种子和移植其他繁殖体(幼苗、根茎), 优化群落结构^[32]。播撒种子的成本相对低廉, 但成活率较低。胡忠健等^[33] 在上海崇明东滩移植了海三棱藨草球茎, 其出苗率和密度远优于播撒种子。Zhou 等^[34] 在盐城生物圈保护区将培养基和植物转移至可降解废纸杯中, 再移植到土壤中, 避免了根系遭到破坏。移植密度和布局在植被恢复过程中尤为关键。Silliman 等^[35] 通过在墨西哥湾等地的试验发现, 植物密集种植的方式会产生积极的种间相互作用并提高植物存活率。Duggan-Edwards 等^[36] 认为在有一定的保护下, 中等密度移植植被的恢复效果优于高密度。创造良好的保育条件有利于植被的快速恢复。隋皓辰等^[37] 使用保水材料制作的固态碱蓬种子产品, 增强了碱蓬种子抵抗水动力干扰的潜力。Ken 和 Lin^[38] 在佛罗里达利用竹管和 PVC 管消除波浪对红树苗的影响, 其中, PVC 管保育效果更好。

2.6 低潮滩牡蛎礁保育技术

布设于低潮滩的牡蛎礁是欧美国家海岸带保护的重要组成部分^[39]。除了直接利用混凝土制成的礁体, 部分地区也会将收集来的牡蛎装入网袋, 利用网袋构建礁体。成熟牡蛎产生的牡蛎幼虫到达牡蛎礁后, 会永久性地粘合在礁体上, 实现牡蛎礁的不断扩张。在礁体上, 牡蛎可以大幅度地减少浮游植物和颗粒状有机碳的沉积, 起到净化水质的作用^[40]。牡蛎礁的构造会增加潮间带的空间异质性, 并聚集大量的浮游生物, 促进以浮游生物为食的鱼类和大型底栖无脊椎动物生长, 提升海岸带的生态多样性^[41]。东海水产所在长江口南北导堤附近水域进行巨牡蛎的增殖放流, 促进了周围底栖动物的物种、密度和生物量增长^[42]。Scyphers 等^[43] 在亚拉巴马州投放的牡蛎礁则实现了蓝蟹、比目鱼等经济物种的增殖。将牡蛎礁布设于中、低潮滩外缘, 可以充当生物防波堤, 并能够伴随海平面上升生长, 实现弹性保护海岸带生态系统的目的^[44]。Piazza

等^[45]在路易斯安娜州发现,有小型牡蛎裙礁保护的盐沼的侵蚀速率放缓。

3 海岸带生态整治修复技术趋势展望

3.1 集成研发人工干预与自然演替相结合的复合技术体系

从近年来海岸带生态整治修复技术的应用实践情况来看,单一的人工或自然修复技术都有其特定的优、劣势,而研发人工干预与自然演替相结合的复合技术体系是极为重要的趋势。从生态学的角度来看,生态恢复应当是自然生态系统消除干扰之后的次生演替过程,就海岸带而言,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。在此基础上,海岸带生态整治修复技术应给自然演替过程预留空间,提供基于自然的解决方案(nature-based solution),即依靠生态系统自设计、自组织,逐渐形成生物多样性较高、生态系统结构与功能完整、能量冗余很少、物质循环通畅高效的海岸带生态系统^[46]。欧美国家新兴的活生命海岸(living shorelines)利用牡蛎礁、岩床等设施来保护、恢复、增强和创建盐沼等滨海生态系统,保护岸线免受侵蚀,风浪较大的地区可以加入障壁岛,形成“障壁岛—牡蛎礁—盐沼”体系(图3)来削减风浪对岸线的影响^[47]。在杭州湾北岸奉贤岸段整治修复项目中,陈雪初等^[48]结合碧海金沙保滩工程在大堤外侧恢复复合湿地,通过修复基底并利用内部土方平衡构建标高相对较高的盐沼湿地和相对较低的浅塘,并在浅

塘外侧设置生态堤减少波浪侵蚀,在生态堤下部设置涵管连通浅塘和外侧海域,形成“大型复合生态斑块(large composite patch)” ;在湿地植物生长期,调控低水位,为种苗提供适宜的非淹水生境,使其快速生长;待湿地植被成熟后,引入自然潮汐,利用潮汐水位变化促进湿地生态系统结构和功能的发育。复合技术将水工结构与生态修复措施相结合,适用于不能仅靠自然作用达成修复目标的受损岸段,同时也体现了“基于自然的解决方案”的重要理念,能够为当地提供关键的生态系统服务功能。但它的缺点在于不能完全等同于自然岸线,人工要素仍会对生物多样性造成一定影响。

3.2 注意适应海岸带特殊条件

研发海岸带生态整治修复新技术应注重适应海岸带特殊条件。海岸带面临台风、风暴潮等极端天气影响,局部区域如位于杭州湾的上海和位于渤海湾的天津,由于地理位置和地形原因,均是风暴潮频发地带。海岸带生态整治修复技术应在海岸带的区位特点、基底质量、水文情况、冲淤状况、气候条件的复合特征基础上,针对海岸带特殊条件以及极端天气,集成多种方法,降低施工难度和提高海岸带抗风险能力。有研究认为,滨海湿地能够减少风暴潮等极端天气对海岸带的破坏^[49-50]。如在艾琳飓风期间,风暴摧毁北卡罗莱纳州部分人工驳岸和盐沼植被。但相对于人工驳岸,有岩床和无岩床保护的盐沼均减少了岸线基底的损失,并且湿地植被在飓风过后很快恢复到原先的水平^[51]。由于盐沼湿地高程增加速率应至少等于海平面上升速率,地势相对低洼的海岸带区域需要判断沉积物供应条件,决定是否恢复和创建盐沼等自然生态系统^[52]。

3.3 更加注重提升海岸带生态系统功能和结构

海岸带生态整治修复技术的另外一个值得关注的趋势是更加注重提升海岸带生态系统功能和结构。海岸带生态系统处于海洋与城市陆地交汇区域,在潮汐水文条件作用下,演化形成了盐沼湿地、光滩、近岸低潮海域等生态系统空间序列以及多样性极高的滨海生物群落。海岸带生态整治修复技术应当坚持海洋特色和生态

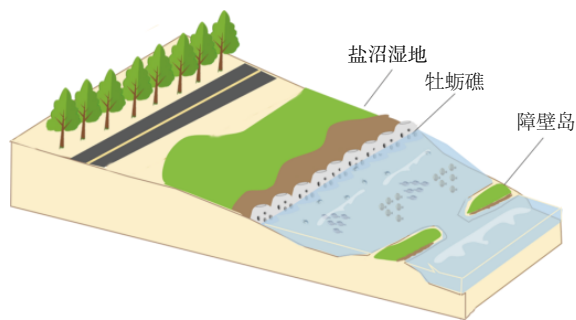


图3 活生命岸线

Fig. 3 Living shoreline

属性,注重保护海岸带生态系统结构与功能的完整性,修复与维持独特的水文条件和基底特征,复壮与保育滨海建群种和关键种,诱导形成相互连接的食物网络,并进一步促进营养物质的内生循环与能量流动。完整的海岸带生态系统具有极高的生态价值,可为当地提供抗风消浪、渔业资源、清洁水质、大气调节等服务功能。以上海鸢鹉洲湿地生态修复项目为例,项目主要采取工程保滩、基底修复、植被恢复以及潮汐调控技术重构与恢复海岸带盐沼湿地生态系统。恢复后的湿地通过植物、微生物、基质的复合作用有效地去除水中氮、磷营养元素和悬浮物,同时利用水文调控技术促进植物对 CO_2 的吸收和减少 CH_4 的排放,发挥了“蓝碳”作用^[53-54]。

3.4 支持景观尺度的复合生态系统构建

长期以来,以海洋部门为主导的海岸带整治修复大多聚焦以海堤为核心的海岸线区域,而值得注意的是,海岸带还包含了海堤、海堤以外潮间带生态系统和海堤以内人类活动空间。随着沿海地区城市化进一步加快,向海发展需求强烈,与之对应的是,海岸线的景观品质和生态效益较低。尤其在许多大都市区域,如何结合海岸带的开发利用营造高品质滨海生态空间已逐渐成为迫切需求。海岸带生态整治修复应当权衡好生态系统服务与空间价值,根据岸线特点和当地需求,依托大都市自身空间规划,抓住国家大力推进陆海统筹战略的契机^[55],在景观尺度上构建具有鲜明海洋特色的空间结构,促进海岸带生态系统服务的价值化和本土化。因此,今后海岸带生态整治修复技术应吸取国外滨海大都市海岸带开发利用经验,突破线状治理的旧有模式,为进一步形成带状、块状滨海生态空间提供支撑。针对上述需求,海岸带生态整治修复技术体系还应当在尊重海洋规律的大前提下融入空间规划技术、景观设计技术,适当考虑加入“设计的生态学”元素^[56],营造可供公众亲身体验的近自然的滨海生态景观,构建由滨海复合生态斑块、滨海生态廊道、滨海生态空间单元等构成的滨海生态空间,形成“点-线-面”的复合格局,提升都市区滨海岸线的生态环境质量,为市民提供亲近海洋、感受海洋的美丽海岸带。

参考文献:

- [1] MA Z J, MELVILLE D S, LIU J G, et al. Rethinking China's new great wall[J]. *Science*, 2014, 346(6212): 912-914.
- [2] BI X L, LIU F Q, PAN X B. Coastal projects in China: from reclamation to restoration[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(9): 4691-4692.
- [3] LIU D Y, KEESING J K, HE P M, et al. The world's largest macroalgal bloom in the Yellow Sea, China: Formation and implications[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2013, 129: 2-10.
- [4] 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] 陈雪初, 高如峰, 黄晓琛, 等. 欧美国家盐沼湿地生态恢复的基本观点、技术手段与工程实践进展[J]. *海洋环境科学*, 2016, 35(3): 467-472.
- [6] 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]. New York: Springer, 2010: 115-147.
- [7] LIU Z Z, CUI B S, HE Q. Shifting paradigms in coastal restoration: six decades' lessons from China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 566/567: 205-214.
- [8] 张明慧, 孙昭晨, 梁书秀, 等. 海岸整治修复国内外研究进展与展望[J]. *海洋环境科学*, 2017, 36(4): 635-640.
- [9] FRENCH P W. Managed realignment-the developing story of a comparatively new approach to soft engineering[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, 67(3): 409-423.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] DYSON K, YOCOM K. Ecological design for urban waterfronts[J]. *Urban Ecosystems*, 2015, 18(1): 189-208.
- [14] 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.
- [15] CHAPMAN M G, BLOCKLEY D J. Engineering novel habitats on urban infrastructure to increase intertidal biodiversity[J]. *Oecologia*, 2009, 161(3): 625-635.

- [16] 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(S1):7-10.
- [17] MARCUS L. Restoring tidal wetlands at Sonoma Baylands, San Francisco Bay, California[J]. Ecological Engineering, 2000, 15(3/4): 373-383.
- [18] WOOD S E, WHITE J R, ARMBRUSTER C K. Microbial processes linked to soil organic matter in a restored and natural coastal wetland in Barataria Bay, Louisiana[J]. Ecological Engineering, 2017, 106: 507-514.
- [19] 黄华梅,高杨,王银霞,等.疏浚泥用于滨海湿地生态工程现状及在我国应用潜力[J].生态学报,2012,32(8):2571-2580.
- [20] 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.
- [21] BOARD M. Beach nourishment and protection[M]. Washington DC: National Academies Press, 1995.
- [22] 王广禄,蔡锋,曹惠美,等.厦门香山至长尾礁沙滩修复实践及理论探讨[J].海洋工程,2009,27(3):66-75.
- [23] 谢亚琼,刘松涛,刘冀闽,等.秦皇岛金梦海湾海滩生态修复设计[J].海洋地质前沿,2013,29(2):79-86.
- [24] GONZÁLEZ M, MEDINA R, LOSADA M. On the design of beach nourishment projects using static equilibrium concepts: application to the Spanish coast[J]. Coastal Engineering, 2010, 57(2): 227-240.
- [25] 刘大为,王铭晗,宫晓健,等.荷兰人工育滩工程Sand Motor的经验与启示[J].海洋开发与管理,2017,34(6):61-65.
- [26] VAN PROOSDIJ D, LUNDHOLM J, NEATT N, et al. Ecological re-engineering of a freshwater impoundment for salt marsh restoration in a hypertidal system[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(10): 1314-1332.
- [27] WEISHAR L L, TEAL J M, HINKLE R. Designing large-scale wetland restoration for Delaware Bay[J]. Ecological Engineering, 2005, 25(3): 231-239.
- [28] MASSELINK G, HANLEY M E, HALWYN A C, et al. Evaluation of salt marsh restoration by means of self-regulating tidal gate – Avon estuary, South Devon, UK[J]. Ecological Engineering, 2017, 106: 174-190.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 汤臣栋.上海崇明东滩互花米草生态控制与鸟类栖息地优化工程[J].湿地科学与管理,2016,12(3):4-8.
- [32] WARREN R S, FELL P E, ROZSA R, et al. Salt marsh restoration in Connecticut: 20 years of science and management[J]. Restoration Ecology, 2002, 10(3): 497-513.
- [33] 胡忠健,马强,曹浩冰,等.长江口滨海湿地原生海三棱藨草种群恢复的实验研究[J].生态科学,2016,35(5):1-7.
- [34] ZHOU C F, QIN P, XIE M. Vegetating coastal areas of east China: species selection, seedling cloning and transplantation[J]. Ecological Engineering, 2003, 20(4): 275-286.
- [35] SILLIMAN B R, SCHRACK E, HE Q, et al. Facilitation shifts paradigms and can amplify coastal restoration efforts[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(46): 14295-14300.
- [36] DUGGAN-EDWARDS M F, PAGÈS J F, JENKINS S R, et al. External conditions drive optimal planting configurations for salt marsh restoration[J]. Journal of Applied Ecology, 2020, 57(3): 619-629.
- [37] 隋皓辰,马旭,闫家国,等.滨海湿地盐沼植被修复中的种子产品制作过程及其有效性[J].自然资源学报,2019,34(12):2601-2614.
- [38] KENT C P S. A comparison of Riley encased methodology and traditional techniques for planting red mangroves (*Rhizophora mangle*)[J]. Mangroves and Salt Marshes, 1999, 3(4): 215-225.
- [39] MORRIS R L, BILKOVIC D M, BOSWELL M K, et al. The application of oyster reefs in shoreline protection: are we over-engineering for an ecosystem engineer?[J]. Journal of Applied Ecology, 2019, 56(7): 1703-1711.
- [40] BORSJE B W, VAN WESENBEECK B K, DEKKER F, et al. How ecological engineering can serve in coastal protection[J]. Ecological Engineering, 2011, 37(2): 113-122.
- [41] LV W W, HUANG Y H, LIU Z Q, et al. Application of macrobenthic diversity to estimate ecological health of artificial oyster reef in Yangtze Estuary, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 103(1/2): 137-143.
- [42] 全为民,沈新强,罗民波,等.河口地区牡蛎礁的生态功能及恢复措施[J].生态学杂志,2006,25(10):1234-1239.
- [43] SCYPHERS S B, POWERS S P, HECK K L, et al. Oyster reefs as natural breakwaters mitigate shoreline loss and facilitate fisheries[J]. PLoS One, 2011, 6(8): e22396.
- [44] CHOWDHURY M S N, WALLS B, SHARIFUZZAMAN S M, et al. Oyster breakwater reefs promote adjacent mudflat stability and salt marsh growth in a monsoon dominated subtropical coast[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 8549.
- [45] PIAZZA B P, BANKS P D, LA PEYRE M K. The potential for created oyster shell reefs as a sustainable shoreline protection strategy in Louisiana[J]. Restoration Ecology, 2005, 13(3): 499-506.
- [46] SCHOONEES T, GIJÓN MANCHEÑO A, SCHERES B, et al. Hard structures for coastal protection, towards greener designs[J]. Estuaries and Coasts, 2019, 42(7): 1709-1729.
- [47] 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.
- [48] CHEN X C, HUANG Y Y, YANG H L, et al. Restoring wetlands outside of the seawalls and to provide clean water habitat[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 721: 137788.
- [49] REZAIE A M, LOERZEL J, FERREIRA C M. Valuing natural habitats for enhancing coastal resilience: wetlands reduce property damage from storm surge and sea level rise[J]. *PLoS One*, 2020, 15(1): e0226275.
- [50] DAS S, VINCENT J R. Mangroves protected villages and reduced death toll during Indian super cyclone[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(18): 7357-7360.
- [51] GITTMAN R K, POPOWICH A M, BRUNO J F, et al. Marshes with and without sills protect estuarine shorelines from erosion better than bulkheads during a Category 1 hurricane[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2014, 102: 94-102.
- [52] WANG F M, LU X L, SANDERS C J, et al. Author correction: tidal wetland resilience to sea level rise increases their carbon sequestration capacity in United States[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 5733.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] 文超祥, 刘健泉. 基于陆海统筹的海岸带空间规划研究综述与展望[J]. *规划师*, 2019, 35(7): 5-11.
- [56] 俞孔坚, 凌世红, 刘向军, 等. 再生设计 秦皇岛海滨景观带生态修复工程[J]. *风景园林*, 2010, (3): 80-84.

~~~~~

(上接第 461 页)

- [8] 陈锦钟, 洪舒萍, 蔡茂荣, 等. 一起麻痹性贝类毒素引起的食源性疾病暴发事件调查[J]. *中国食品卫生杂志*, 2018, 30(4): 445-448.
- [9] 蒯圣龙, 张祥霖, 尹程, 等. 我国麻痹性贝毒素检测技术的研究进展[J]. *安徽水利水电职业技术学院学报*, 2017, 17(2): 42-45.
- [10] USLEBER E, DONALD M, STRAKA M, et al. Comparison of enzyme immunoassay and mouse bioassay for determining paralytic shellfish poisoning toxins in shellfish[J]. *Food Additives & Contaminants*, 1997, 14(2): 193-198.
- [11] KAWATSU K, HAMANO Y, SUGIYAMA A, et al. Development and application of an enzyme immunoassay based on a monoclonal antibody against gonyautoxin components of paralytic shellfish poisoning toxins[J]. *Journal of Food Protection*, 2002, 65(8): 1304-1308.
- [12] 王静, 马宁宁, 宋洋. 杂环胺人工抗原的合成以及多克隆抗体的制备[J]. *食品科学*, 2017, 38(4): 45-50.
- [13] WU W, XU D Z, YAN Y P, et al. Evaluation of dot immunogold filtration assay for anti-HAV IgM antibody[J]. *World Journal of Gastroenterology*, 1999, 5(2): 132-134.
- [14] 罗辉武, 向军俭, 唐勇, 等. 麻痹性贝类毒素 GTX2, 3 间接与直接竞争酶免疫学检测方法的比较研究[J]. *中国卫生检验杂志*, 2006, 16(6): 663-664.
- [15] 梁玉波, 刘仁沿, 许道艳, 等. 快速检测膝沟藻毒素 GTX2/3 的酶联免疫试剂盒及其制法: 中国, 102296049A[P]. 2011-12-28.