

# 韧性海岸带生态屏障体系构建、工程难点及对策

徐淑升<sup>1,2</sup>, 叶属峰<sup>3\*</sup>, 秦松<sup>4</sup>, 孙庆杨<sup>1</sup>

(1. 自然资源部南海发展研究院 / 自然资源部南海遥感测绘协同应用技术创新中心, 广州 510300; 2. 英国普利茅斯大学地球与环境学院, 普利茅斯 PL48AA; 3. 自然资源部东海发展研究中心 / 自然资源部东海标准计量中心, 上海 200136; 4. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东烟台 264003)

**摘要:** 海岸带是陆地与海洋的交界区, 面临着因气候变化带来的海平面上升、风暴潮加剧等威胁; 提升海岸带生态屏障防护能力已成为全球海岸带治理与生态安全构建的共同趋势。本文从原始自然状态、农业、工业到生态文明等不同文明发展海岸带生态屏障的演变入手, 回顾了国内外关于海岸带韧性、受损机制与恢复的认识过程, 揭示了未来海岸防护工程向韧性提升方向发展的趋势; 基于此, 构建了韧性海岸带生态屏障体系, 涵盖概念与理论基础, 结构、功能与类型, 工程技术标准框架以及工程实施保障; 探讨韧性海岸带生态屏障工程难点, 提出了优化海岸带空间配置、应用智能终端设备构建感知网络、实现以海岸带韧性提升和生态产品价值实现为核心的完整闭环等对策。最后, 本文还展望了海岸带防护工程的未来发展趋势, 包括从单一防护要素到陆海统筹的系统防护、从静态评估到动态响应、从工程韧性到自然-社会复合系统韧性转变, 更好推动海岸带防灾减灾, 实现生态保护修复与海洋经济协同发展。

**关键词:** 气候变化; 韧性; 海岸带; 生态屏障; 工程框架设计

**中图分类号:** X324; F062.4 **文献标识码:** A

## System Establishment, Engineering Difficulties, and Countermeasures for Resilient Coastal Ecological Barrier

Xu Shusheng<sup>1,2</sup>, Ye Shufeng<sup>3\*</sup>, Qin Song<sup>4</sup>, Sun Qingyang<sup>1</sup>

(1. South China Sea Development Research Institute, Technology Innovation Center for South China Sea Remote Sensing, Surveying and Mapping Collaborative Application, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510300, China; 2. School of Geography, Earth and Environmental Sciences, University of Plymouth, Plymouth PL48AA, UK; 3. East China Sea Development Research Institute, East China Sea Standard and Metrology Center, Ministry of Natural Resources, Shanghai 200136, China; 4. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, China)

**Abstract:** Coastal zone is transitional area between land and sea. Under the impacts of climate change, coastal zone is threatened by stressors such as sea-level rise, intensified storm surges. It is a common trend in global coastal governance and ecological security to protect the coastal zone by ecological barriers. This paper illustrates the evolution of coastal ecological barriers from pristine natural

**收稿日期:** 2025-09-29; **修回日期:** 2025-11-28

**通讯作者:** \*叶属峰, 自然资源部东海发展研究中心 / 自然资源部东海标准计量中心正高级工程师, 研究方向为海洋生态修复;

E-mail: ysf@ecs.mnr.gov.cn

**资助项目:** 国家重点研发计划项目(2024YFC3109000); 2023年度自然资源科技战略研究项目(2023-ZL-81); 中国国家留学基金委员会资助项目(202404180010)

**本刊网址:** sscae.engineering.org.cn

state, agricultural civilization, industrial civilization to ecological civilization. It reviews the evolution of understanding of resilience, damage process, and restoration domestically and internationally, elucidates the trend of future coastal protection engineering which is moving toward resilience enhancement. Then the concept of Resilient Coastal Ecological Barrier Engineering (RCEBs) is proposed, it covers conceptual and theoretical foundations, structures, functions and classification, as well as the framework of engineering technical standards and implementation guarantees. The paper discusses the challenges in RCEBs, and gives the suggestions, such as optimizing the spatial allocation of coastal zones, building a perception network with intelligent terminal devices, and forming a full closed loop centered on improving coastal resilience and realizing the value of ecological products. Finally, this paper prospects the future development directions of coastal protection projects: shifting from single protective elements to integrated land-sea systematic protection, from static assessment to dynamic response, and from resilience built by engineering to the resilience built by natural-social systems. These efforts will further facilitate disaster prevention and mitigation in coastal zones, and coordinate ecological protection with economic development.

**Keywords:** climate change; resilience; coastal zone; ecological barrier; engineering framework design

### 一、前言

气候变化对全球生态系统和人类社会经济发展产生了深远影响。海岸带是陆地与海洋的交界区,面临着因气候变化带来的海平面上升、风暴潮加剧等威胁。为应对这一威胁,通常在海岸带建造更多、更大硬质海堤,但这种硬质结构不具备吸收缓冲的能力且维护成本高。海岸带生态系统(CE)可以在海岸带构建吸收缓冲能力的屏障,具有抗干扰以及在破坏后可以恢复到原有状态或自行发展出适应新环境的韧性,成为顺应与适应气候变化影响的重要对策<sup>[1]</sup>,被视为海岸防护的新手段。

当前,提升海岸带生态屏障防护能力已成为全球海岸带治理与生态安全构建的共同趋势。联合国发起的“海洋科学促进可持续发展十年计划(2021—2030年)”“生态系统恢复十年(2021—2030年)”目标与海岸带生态系统韧性紧密关联;欧洲海洋委员会积极研究和利用生态系统韧性来应对气候变化;欧盟发布的《海洋空间规划指令》要求,所有成员国在2025年前划定30%的海洋生态修复优先区,将恢复海岸带韧性指标纳入海岸带空间规划<sup>[2-5]</sup>。我国对海岸带生态屏障的关注度持续提升<sup>[6,7]</sup>,随着《中华人民共和国国家安全法》《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》等将海洋生态安全纳入国家安全体系,海岸带生态屏障成为国家生态安全战略格局的重要一环。但是,如何发挥好海岸带生态屏障的功能,相关建设的理论体系与工程设计框架研究仍略显薄弱<sup>[8]</sup>。例如,在规划层面,《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年)》提出的3个生态屏障均位于陆地,即青藏高原生态屏障、黄土高原生态屏障、川滇生态屏障;在制度层面,

我国海岸带生态屏障建设面临治理碎片化、协同机制缺失等问题亟待解决;在技术层面,存在生态修复短板、海岸灾害关联防控不足等难题。

本文在回顾海岸带受损、韧性与恢复发展历程的基础上,结合基于自然解决方案(NbS)与工程解决方案(EbS),构建韧性海岸带生态屏障(RCEBs)工程体系,提出RCEBs工程设计框架,并展望未来发展,为提升海岸带防灾减灾韧性,推动海岸带生态系统保护修复与发展研究提供理论指导和决策参考。

### 二、海岸带受损、韧性认识与恢复的历程回顾

#### (一)对海岸带防护受损过程的认识

人类对海岸带防护受损过程的认识经历了漫长的时间<sup>[9]</sup>。本文以红树林为例,阐述不同时期对海岸带防护受损过程的认识(见图1)。在原始自然状态,海岸带基本未受人类活动干扰,仅受气候、地形地貌、水文等自然条件的影响,具有完整的海岸带防护功能。进入农业文明时代,人类砍伐了部分红树林,开发了狭长的海岸带平原,使红树林失去部分海岸防护功能,为此,人类开始筑堤以保护农田和乡村,但规模不大。进入工业文明时代,人类对海岸带的开发进一步加剧,海岸带地区人口聚集,防护需求增加,海洋灾害威胁变大,防护强度提升,红树林却继续减少,防护能力下降。为此,人类建设了更多、更大规模的硬质海岸防护设施(HCD),但维护成本加速攀升,不可持续性逐渐暴露。需要指出的是,2004年是一个重要时间节点,当年的印度洋海啸使人类对海岸带韧性受损的认识有了很大提高。在这场海啸中,泰国拉廊府的红树林破坏区海浪穿透深度达1.5 km,而保存完好的红



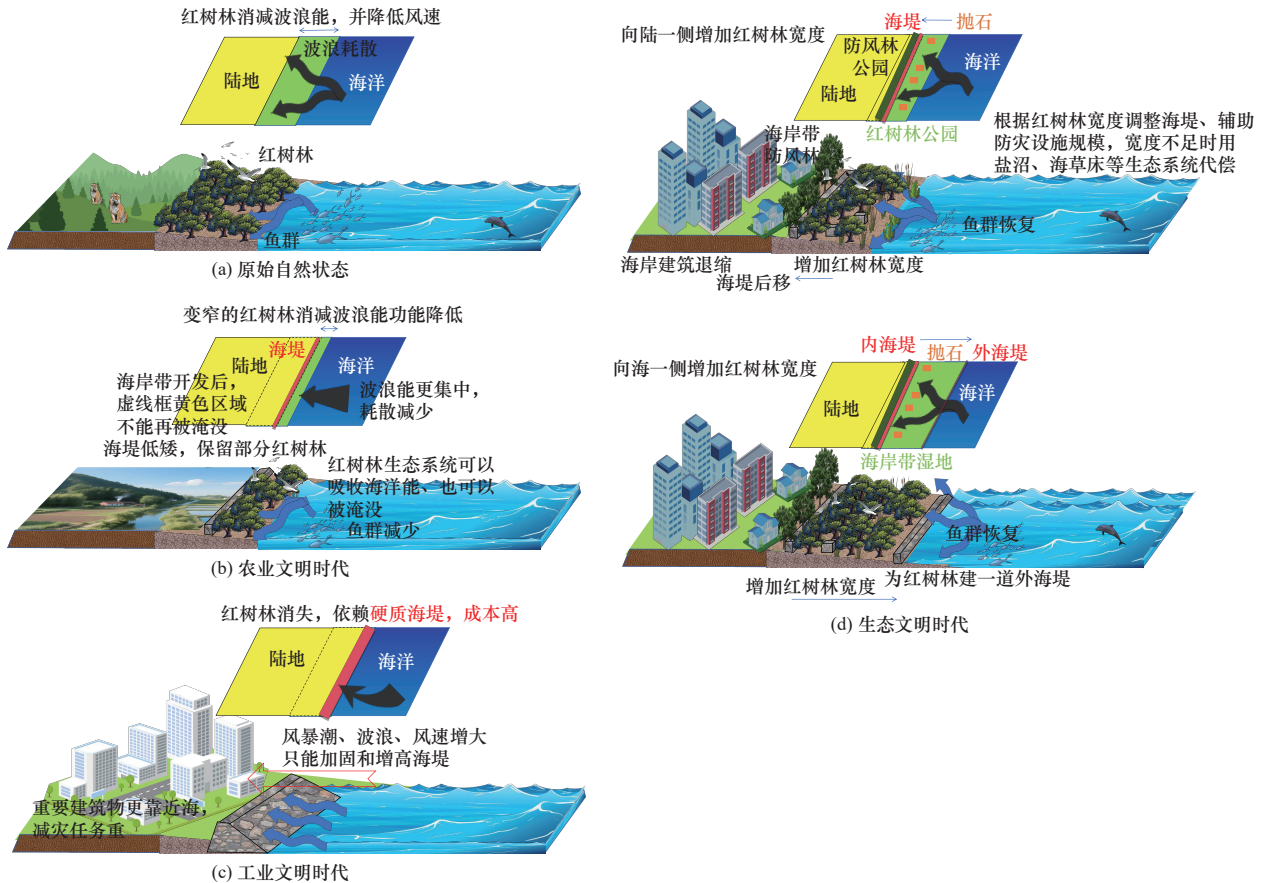


图1 不同文明发展阶段的海岸带生态系统(以红树林生态系统为例)

树林带海浪侵入仅为 50 m<sup>[9]</sup>。此后, 红树林对海岸的防护功能越来越受到关注<sup>[10,11]</sup>。研究发现, 红树林发达的根系深入土壤后, 不仅能稳固自身, 还能在海浪冲击时通过弯曲、摆动分散能量, 减轻破坏, 即使红树林部分根系受损, 也能借助自然恢复能力重生, 其复杂的支柱根系可以有效耗散水流动能, 并能够沉积固定泥沙, 枝干还具有防风作用。红树林的宽度、树高及健康情况等因素会影响防护效果。进入生态文明时代, 红树林的生态功能更加受到重视, 一些国家实施严格的保护管控, 同步推进生态修复工程<sup>[12]</sup>。依据不同的环境、社会、经济条件, 可以实施差异化防护策略: 一是向陆域方向增加红树林宽度, 通过退塘还海、建筑物清退等措施, 在历史红树林分布区、已转为养殖塘或建筑物的退化地段重建红树林; 二是向海域方向拓展, 在外海适宜水文与地质条件区, 采用疏浚吹填等技术, 营造适宜生境以种植红树, 实现生态文明时代红树林海岸防护能力的提升。

## (二) 对海岸带韧性的认识

“韧性”一词最早起源于拉丁语, 区别于传统研究对海洋致灾因子和承灾体的静态分析, 强调生态系统应具备扰动吸收、自恢复和自适应调节能力。目前, 韧性已在工程实践中广泛应用, 呈现多维化融合发展的趋势<sup>[12,13]</sup>。

工程领域对海岸带韧性的认识过程体现了从 EbS 到 NbS 理念的转变。自然的海岸带生态系统看似“简单而脆弱”, 实则比 HCD 更复杂。长期来看, HCD 难以通过自然灾害对工程质量、成本进行检验, 人类开始正视“简单而脆弱”的生态系统韧性<sup>[13]</sup>。其发展历程可划分为 3 个阶段: 1990—2004 年为反思阶段, 学者们对传统硬质防灾工程的局限性进行反思, 开始关注自然生态系统的灾害响应特征; 2005—2015 年为综合预防阶段, 研究视角拓展至社会维度, 一些国家从经济社会、环境资源与空间规划等层面着手评估海岸带地区的抗灾能力; 2016 年至今为多维知识融合阶段, 随着实时数据获取能力

的提高,开始基于地理信息系统(GIS)、人工智能(AI)和评估模型,利用多维知识融合分析海岸带的韧性情况。

我国对海岸带韧性的认识也历经3个阶段,即工程防御、脆弱性认知、韧性治理与可持续发展阶段,从以工程防御为主,聚焦台风、风暴潮和河口洪水增水等自然灾害,强调通过海堤、防波堤等硬质工程设施来抵御灾害冲击<sup>[14]</sup>;到认识到硬质工程脆弱性,开始重视管理和生态保护,强化对沿海人为开发活动的管控<sup>[15-18]</sup>;再到生态产品价值实现等多目标驱动、海生物爆发等新型生态灾害防控,逐步走向韧性治理与可持续发展。然而,当前国内外对如何提高海岸带韧性从抽象理论具体落实到工程实践领域,路径仍不够清晰。

### (三) 对海岸带韧性恢复过程的认识

目前尚未发现专门以提升海岸带韧性为目标的工程报道,但已开展海岸带生态修复工程,并发挥了恢复海岸带韧性功能的作用。海岸带生态修复工程主要包括自然恢复与人工修复两类技术途径。对于受损不严重的海岸带,可以采取自然恢复,如我国广西地区沿海人工养殖塘的红树林自然恢复、菲律宾被台风损坏后红树林的自然恢复。海岸带自然恢复具有成本低的优点<sup>[19]</sup>,但恢复时间较长。在生态脆弱区或受损严重区,海岸带韧性的恢复需要开展人工修复,通过人为干预打破退化稳态,促使其向健康稳态演替。“十四五”时期,我国投入近100亿元支持了4批63个海洋生态保护修复工程,开展海岸线、滨海湿地、种植红树林等的整治修复<sup>[20]</sup>;在地方层面也开展了修复,如我国台湾省通过拆除海堤工程,促进潮间带洪泛区恢复生态系统,满足了保护生态系统和降低洪水风险两方面的需求<sup>[21]</sup>。越南通过人工修复潮沟系统,增强水流交换,使红树种子着床萌发<sup>[22]</sup>。美国切萨皮克湾牡蛎礁重建项目减缓了海岸侵蚀,提升了局部生物多样性,同时显著改善了水体过滤能力<sup>[23]</sup>。人工修复的海岸带生态工程恢复时间短,但成本较高,完工后仍需长期维护。

## 三、韧性海岸带生态屏障体系构建

RCEBs体系包括基本概念、理论支撑、核心特

征、技术标准、保障措施等部分。在界定RCEBs概念的基础上,阐释理论基础,为体系构建提供科学依据,进而剖析类型、结构及其对应的功能,随后提出相应技术与标准框架以及工程实施保障措施,为工程的深入研究和试点推进提供支撑。

### (一) 基本概念

RCEBs指由自然或自然-人工复合系统构成的、具备韧性功能的海岸带生态屏障。RCEBs工程是以海岸防护为主要目标的综合工程,使海岸防护兼具海岸带生态系统的韧性和HCD的刚性,能够吸收、可削弱灾害扰动,并通过自我修复维持长期防护能力,工程兼具空间覆盖广、使用年限长、运维成本低和综合效益多的特点。

### (二) 理论基础

RCEBs工程的理论基础包括前文所述的生态系统韧性论、NbS、景观(海景)生态学、生态系统稳态转换(RS)理论等<sup>[24,25]</sup>。

NbS强调综合目标和效益,如保障人类福祉、提供防灾减灾、生物多样性保护及可持续发展等。基于红树林保护修复的RCEBs工程作为NbS的典型实践,不仅可以实现固土消浪、降低岸线侵蚀、降低海岸防护工程的维护成本、提高生态连通性等,还可以为物种提供迁徙通道与觅食栖息地,促进濒危物种种群数量增多;此外,通过生态旅游、碳汇交易等生态产品价值实现机制,还能将生态系统的调节服务转化为经济收益。

景观(海景)生态学理论可以为空间规划提供科学依据<sup>[26]</sup>,通过开展近海海域海岛、潮间带、“农林湿”复合空间、城市化空间规划,实现生态系统功能。在近海海域海岛空间,构建海洋气象观测网络,提升防灾预警能力;在潮间带空间,根据潮位变化梯度,依次种植不同植物,增强固碳能力、促进潮滩淤长,缓解岸线侵蚀;在“农林湿”复合空间与城市化空间,实现生态连通,发挥湿地减少地表径流和分解污染物的功能,降低城市内涝风险,提升近岸海域水质,同时,在城市化空间,通过验收红线,控制建设用地的横向扩张。

RS理论认为,生态系统并非随干扰梯度渐进演变,而是存在多稳态(健康稳态、多稳态区、退化稳态)与阈值效应,当自然或人为干扰强度突破



临界阈值时,会发生非线性突变,从原稳态转换至另一种差异显著的稳态,且转换后难以恢复。例如,在海草床修复时,先通过足够强度的工程措施突破干扰阈值,然后无需人工干预,可利用其正反馈机制推动生态系统恢复健康稳态。

### (三) 结构、功能与类型

从山顶到海洋,海岸带面临能量和物质的双重压力,陆地-海岸带生态系统屏障如图2所示。在陆地方面,高山重力势能驱动水沙向海岸带输移;在海洋方面,潮汐能与风能驱动增水及风暴潮向岸侵袭。两者夹击,使狭长的海岸带面临洪水泛滥、泥沙淤积、海岸侵蚀、风暴潮灾害风险叠加等多重压力。在自然状态下,压力能被吸收和利用,如砂石可以吸收能量,转化为更细小的石、粉、砂,进一步形成砂质岸滩;红树林固定泥沙,减少侵蚀。需要指出的是,狭长的海岸带要满足不断增加的经济发展、居住、交通、教育、旅游需求,空间供需关系紧张,留给海岸防护的空间不多。因此,RCEBs工程需要把多种功能“打包压缩”在有限的空间内,包括防护(如缓冲波浪能、削减潮位、减少侵蚀、减弱海风、减少盐雾)、生态调节(如提供生产氧气、生物栖息地、提升生物多样性、固碳、净化水质)、社会服务(如维护生物多样性、保障人居安全)、经济发展(如生态旅游、可持续渔业)功能。

自然海岸带空间结构本为陆海交互的混合空间,人类活动通过HCD等工程将其割裂为独立的陆地与海域空间,破坏了原有陆海混合空间结构,进而导致海岸带韧性功能受损。理想状态下的RCEBs工程通过恢复陆海混合空间结构,恢复其韧性功能;但在已开发为城镇空间的海岸带地区,已较难完全恢

复为原有的陆海混合空间,为此,本文提出可建设海岸生态防护应对空间,以代替原有的陆海混合空间。需要指出的是,海岸生态防护应对空间需具备一定的宽度、面积、结构以实现其韧性功能。以红树林为例,红树林带越宽,防灾减灾能力越强,数百米宽的红树林可使海啸造成的洪涝深度降低5%~30%,同时还可以降低洪水流速、增水高度和淹没范围等。在面对海风和盐雾时,红树林在弱风( $<5\text{ m/s}$ )、强风( $>15\text{ m/s}$ )下可分别降低风速85%、50%以上<sup>[27-29]</sup>,并相应地减轻盐雾对海岸带建筑和设施的侵蚀。

按照主体生态系统类型,RCEBs可以分为红树林型、盐沼型、海草床型、珊瑚礁型、牡蛎礁型、砂质岸滩型、泥质岸滩型、基岩海岸型、综合型等(见表1)。基于海岸带生态系统结构与功能差异,选择不同主体生态系统类型,对韧性目标提升有重要作用。具体来看,红树林型适配热带亚热带浅水海岸,功能侧重台风防御与水质净化;基岩海岸型适用于其自然分布区,功能以海浪侵蚀防控为主。RCEBs工程遵循海岸带生态系统的天然分布格局、类型特征与主导功能,消除对应的胁迫因素,而非脱离自然本底盲目实施工程,避免出现不顺应自然规律、不针对核心问题的投资建设。

### (四) 工程技术标准框架

参照国家生态屏障区生态系统评估指标体系,本文提出了RCEBs工程需突破的技术与标准框架,包括RCEBs适用的灾害风险、CE/HCD值、轻量防护应急措施、“成本-收益”评估标准等量化指标。

灾害风险用于判断“灾害-承灾体”耦合损失的可能。为适配不同岸段,可以将RCEBs适用的海岸防护压力等级分为三级。综合考量区域人口集聚程度、经济发展水平、战略重要性、已有的海岸防护能力、HCD维护成本和未来资金缺口、历史海洋灾害频次、灾害损失程度、未来海洋灾害情景预测多维度因素,采用1、2、3级划分方式,对应高、中、低三级防护压力。①1级区是海洋灾害极端危害性、短期突发性或承载体应对风险需求较高(如人口密度大的区域、核设施区域)的岸段,需将潜在的重大损失风险纳入优先考量。此区域的工程措施需以保障区域安全性和稳定性为核心,重视对极端事件的抵御能力以及对关键基础设施的保护。②2级区是海洋灾害具有一定危害性、影响范围相对可控



图2 陆地-海岸带生态系统屏障示意图

表1 按照主体生态系统类型划分的RCEBs

类型	主要分布与特征	海岸防护及其他功能	胁迫因素
红树林型	分布在热带、亚热带潮间带，由耐盐常绿乔木/灌木组成	消浪促淤、固碳、净化水质、重要生物栖息地等	海岸开发、环境污染、基质、海洋水动力（波浪、海流）、台风、风暴潮、海平面上升、外来物种入侵、病虫害
盐沼型	分布在温带及部分热带潮间带，以耐盐草本植物为主	消浪促淤、固碳、净化水质、重要生物栖息地等	海岸开发、环境污染、基质、海洋水动力（波浪、海流）、台风、风暴潮、海平面上升、外来物种入侵
海草床型	分布在浅海海底，由高等植物（海草）构成的水下草甸	稳固海底底质、缓冲波浪能量、净化水质、重要生物栖息地等	海岸开发、环境污染、基质、海洋水动力（波浪、海流）、台风、风暴潮、海平面上升、拖网渔业、船锚破坏
珊瑚礁型	分布在热带清洁、温暖的浅海，由珊瑚虫骨骼堆积而成	天然防波堤，生物多样性高，支撑渔业和旅游业等	海岸开发、环境污染、人工采集、非法渔业、海水升温、海洋酸化、台风、风暴潮、病虫害
牡蛎礁型	分布在温带和热带河口、海湾，由聚集的活牡蛎及空壳构成	衰减波浪能量，净化水体（滤食）等	海岸开发、环境污染、基质、海洋水动力（波浪、海流）、台风、风暴潮、海平面上升、过度捕捞、病虫害
砂质岸滩型	分布在波浪作用较强的岬湾海岸、沙坝潟湖，由砂粒堆积而成	通过泥沙运动和滩面摩擦消耗波浪能量，为人类提供休闲空间等	海岸开发、砂源供给不足（如上游建坝）、海洋水动力（波浪、海流）、台风、风暴潮、海平面上升、海岸侵蚀
泥质岸滩型	分布在大河入海口、平原海岸与封闭/半封闭港湾，底质为细颗粒淤泥	消耗波浪能量，支撑生物群落、污染物降解	海岸开发、环境污染、海洋水动力（波浪、海流）、台风、风暴潮、海平面上升、海岸侵蚀、海洋水动力（波浪、海流）、台风、风暴潮、海平面上升、海岸侵蚀
基岩海岸型	分布在地、丘陵直接临海的区域，由岩石构成	天然的坚固屏障，为附着潮间带生物提供基底	海平面上升、海岸侵蚀
综合型	分布在热带、亚热带潮差较大的河口湾，两种及以上生态系统共存，如红树林-盐沼-海草床	兼具两种及以上生态系统功能	兼具两种及以上生态系统的胁迫因素

或载体应对风险需求中等的岸段。此区域需要在风险防控与生态保护之间寻求平衡。③3级区是海洋灾害危害性较低、灾害发生频率低、载体应对风险较低的岸段，需重点提升岸线自我调节能力，减少人工工程对海洋生态系统的扰动。

CE/HCD是衡量韧性的参数，为新建和改建海岸防护提供技术标准。CE/HCD高则韧性高，反之则低甚至为0。1~3级区的CE/HCD值逐渐上升，其中，1级区的CE/HCD值最小，通常以大型HCD为主，需考虑增加CE与减少HCD维护成本的数值关系；2级区的CE/HCD值中等；3级区以CE为主，CE/HCD值最大。

轻量防护设施是基于灾害评估的配套应急措施，如采用混凝土块体、生物礁体等低生态影响结构，依据灾害风险监测体系给出的预测，提前布置到载体岸段。

“成本-收益”评估是为节约资金投入和海岸带空间，对受损生态系统的恢复工程划分阶段，以

控制成本。利用生态系统存在多稳态、系统会发生从量变到质变的突变、稳态转换具有突然性和滞后的特点，评估工程可节省的HCD维护成本。例如，有学者评估指出，全球范围内若合理利用红树林海岸防护，可直接减少约3200亿元的工程投资<sup>[30]</sup>。

### （五）工程实施保障

从我国现有的HCD和CE相结合的工程实践来看，部分项目已在一定程度上融入了RCEBs的设计思路，但在实施保障方面仍有不足。以广西防城港海岸带保护修复项目为例，工程构建了“红树林+海堤+滨海植被”的复合生态系统，通过在堤外种植红树林稳固堤岸、减缓海岸侵蚀，不仅成功抵御了十余次台风侵袭，还显著提升了区域生物多样性，带动了渔业可持续发展，形成了优质滨海生态景观，成为城市生态旅游名片，实现了生态、防灾、经济与社会效益的多赢。但受制于投资规模大、建设周期长、收益路径不清晰等问题，以往此



类工程大多依赖财政资金，社会资本参与度不高，进而制约了整体资金的可持续供给能力<sup>[31]</sup>。

RCEBs工程涉及陆海统筹、生态修复与海岸防护多重目标，具有跨区域、跨领域、跨部门的特性，需构建协同高效的工作体系，对工程实施统一规划、统一推进，建立自然资源、水利、生态环境、文旅、农业等多部门联动的协调机制，在空间管控、海堤建设运维、生态保护、产业布局等方面形成合力，实现财政支持资金统筹、政策落地、信息共享、技术研发协同攻关、施工步调有序等多方面的有序衔接。

在政策保障方面，为工程的CE与HCD部分各自预留合理空间，实施海岸带空间精细化管理，严控开发建设强度。RCEBs工程作为安全防护工程，其用海需求应予以保障，在用途管制方面需明确界定为生态防护与修复用海，保障工程实施。

在资金保障方面，在保障工程基础建设的同时，加大对生态旅游、滨海文艺体育活动、生态渔业的扶持力度；积极拓宽投融资渠道，鼓励和引导社会资本参与工程建设与运营，同时建立以财政资金为引导、社会资本共同参与的多元化投入机制。

在技术保障方面，依托智能化、数字化技术手段，深入研究技术标准体系，推动海洋监测感知、智能海岸防护装备等的研发与应用，以技术创新提升工程建设质量、运维效率与生态效益，为工程全生命周期实施提供坚实的技术支撑。

#### 四、韧性海岸带生态屏障工程难点及对策

RCEBs工程围绕提高海岸带防灾减灾韧性、提高生态系统服务功能、促进生态产品价值实现等现实需要，涵盖宏观与微观尺度，前者以国际、省际等大区域的生态安全格局为核心，重视区域联动，岸线长度可达50~100 km；后者则聚焦维护某段海岸带的安全，岸线长度达1~50 km<sup>[27-31]</sup>。为便于厘清RCEBs的工程难点，并提出相应的措施与对策，本文探讨微观尺度下的海洋灾害防护。

##### (一) 人工-自然复合生态屏障的压力平衡

RCEBs工程是人工-自然复合的工程，其压力平衡不仅是工程力学的计算，还需要平衡海岸带防护安全需求压力( $S$ )与海洋灾害应对压力( $D$ )。 $S$ 是需

求侧压力，是为满足人类社会安全需求而对防护工程提出的指标要求，随人口集聚、经济发展、生态保护要求的提升而不断提高。其难点在于安全需求压力与灾害应对压力都在变化，要在动态中寻找平衡。

在当前技术条件下， $S$ 与 $D$ 的量化取值仍存在较大难度<sup>[32]</sup>，但可采用如下思路加以解决。如图3所示，图3(a)是一种稳定状态，CE有能力实现自然状态下的平衡，此时若不额外增加人类活动引发的安全需求压力 $S$ ，即可维持在无极端灾害下的平衡；在图3(b)中，CE消失或功能降低，依靠HCD实现短期平衡，但是HCD防护能力随时间下降，而 $S$ 持续上升，导致这种短期平衡不仅代价高昂，且属于不稳定状态。图3(c)和图3(d)中都有RCEBs工程，是为解决图3(b)中的不稳定状态而设计的，使其向图3(a)中的稳定状态移动。两者的不同点在于，图3(c)是“节流”，通过将海岸带人为活动区向内陆退缩，减少 $S$ ，节约空间以增加CE；而图3(d)是“开源”，在原HCD外，通过地形改造以增加空间，从而增加CE，使 $S$ 和 $D$ 趋向于平衡。对于采用图3(c)还是图3(d)的路径，可通过“岸段分类-需求分析-可行性分析”进行判断。

根据前文的1~3级防护区域，可以制定不同的 $S$ 与 $D$ 平衡策略。在1级区，增/扩建HCD时需考虑增加韧性功能。在改建海堤时，应先计算每降低1个海堤防护堤标需要增加的红树林高度、宽度等指标；当红树林指标达不到要求时，要计算其他工

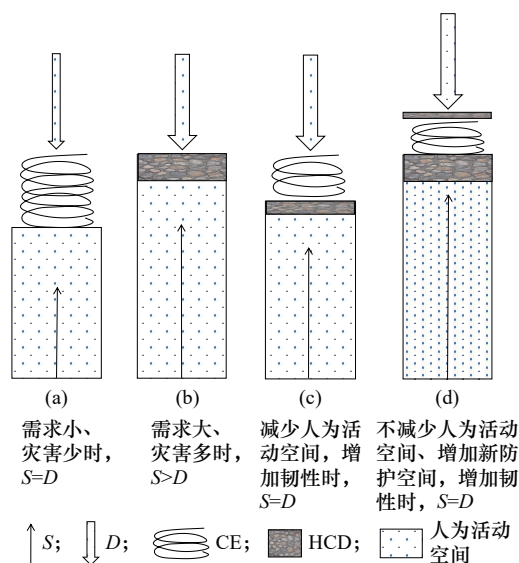


图3 海岸带人工-自然复合生态屏障工程措施图

程措施的替代量。其他工程措施可以根据当地环境情况，开展“潜堤+珊瑚礁”“抛石+盐沼”“滩涂+海草床”等，提升海岸带的韧性与可靠性。在2级区，不再增/扩建HCD，可以通过增加“抛石护岸+CE”来增加防护能力。在3级区，如基岩海岸、稳定砂质岸段、较宽的红树林岸段等，重点保护现有CE，确需开发的，开发者要承担恢复韧性海岸防护能力的成本。

空间资源作为关键的自然资源，政府可通过管控手段，提升海岸带韧性，以平衡 $S$ 与 $D$ 。一是向陆划定海岸带韧性控制线，禁止或限制线内新建/扩建建筑物，确需新建的工程，应同步预留韧性恢复成本。加强与其他管控空间红线的协同衔接，如在防洪治导线约束的区域，严禁向海侧拓展工程，应转向内陆侧并通过土地整治实施工程。二是可向海开辟新空间的区域，给予工程用海政策支持。例如，允许在现有海堤外侧约500 m范围（结合实际地形灵活调整）布设小海堤、潜堤、牡蛎礁或珊瑚礁等防护设施，以方便开展微地形改造、种植红树林、盐沼等，兼顾韧性提升与生态修复。

## （二）提升海岸生态防护应对空间

海岸带空间资源稀缺，防护空间的拓展与预留受地形、权属、环境等条件约束，而CE如果发挥海岸防护功能，必须有足够的应对空间。因此，难点在于在狭窄的海岸带开展RCEBs工程措施，并实现韧性功能。

优化空间配置是上述难点的应对之策。以红树林为例，增加的应对空间如果选择向陆一侧，可以采用退塘还林、破堤还海等方法，其优点是在原为天然红树林后被改为人工养殖塘的地区恢复植被，成功率高；缺点是人工养殖塘的清退成本高。如果选择向海一侧，方法有填高地形、改变水动力、起垄造林等，但向海一侧在施工时受潮汐影响大，有效作业时间短，机械、材料、人工成本高，垄体易被波浪和潮流淘蚀，导致造林面积达不到海岸防护应对空间的要求。为此，可通过在距离现有海堤外一定距离处，为红树林再建一个堤坝（如牡蛎礁、珊瑚礁、人工鱼礁、潜堤），在两堤之间进行微地形改造、改善水动力后种植红树林，留足海岸防护应对空间。对既有老旧建筑与海堤开展系统性安全再评估，将防护成本高、综合效益低的予以淘汰退

出，为工程建设释放空间。此外，要提高已有生态应对空间的质量，提高防护能力，如增强生态连通性，将原本分散的红树林保护区、未列入保护区的天然湿地、内陆防风林、近海生态公园、珊瑚礁、海草床、盐沼、砂质岸滩、泥质岸滩、滩涂湿地等（见图4），作为一个整体来增强防护功能。

## （三）加强感知能力

受环境数据获取能力、数据协同等技术限制，目前还难以感知海岸带韧性，不能有效支撑精细化防控海洋灾害，为此，应加强感知终端设备的智能化建设、构建感知网络。以砂质岸滩类型的RCEBs工程为例（见图5），通过智能感知技术，感知自然状态海砂增（图中红色字）减（图中绿色字）<sup>[33]</sup>的数据，包括岸滩面积（水上和水下部分）的变化；感知人为干扰状态下的补砂量需求<sup>[34]</sup>，若图中岸滩被人工建筑占用，会导致防护能力降低，因此要计算在气候变化、海平面上升、河流输砂减少、人工挖砂、海岸工程阻断输砂路径等情况下，满足防护能力的补砂数量；为解决砂源问题，又需感知外区域调砂或人工制砂量，这需要监测沉积物粒度、海浪冲击力、潮位变化、调砂成本、制砂成本和需求等。数据获得需要提高感知设备精度，建立“空天地海”智能感知网络。例如，运用卫星观测大尺度水文气象变化，使用无人机定时定点监测沙滩变化，使用无人水下设备（AUV）与浮标、波浪能平台监测海浪能和海底粗砂运动，使用陆地大数据中心分析多维参数，包括水文、气象、地质、生态、社会、经济参数，计算补砂量、时间、地点、频率、工程成本和收益，结合AI分析这些数据变化的意义，通过第五代移动通信或卫星网络发布预报

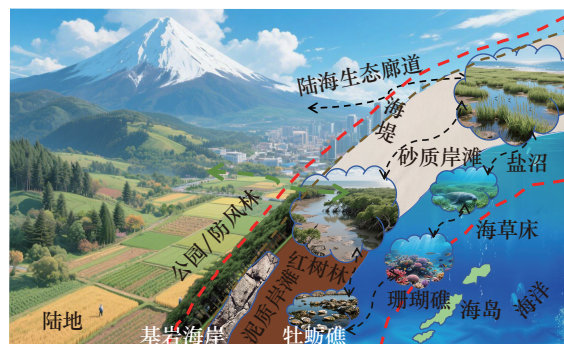


图4 海岸生态防护应对空间（红色虚线内）

产品，指导海岸防护长期和短期的应对措施。

**(四) 社会经济协调保障**

当前生态产品（碳汇、滨海景观、渔业增值）定价机制不完善、交易渠道不畅通，难以通过市场化方式回笼建设与运维资金；此外，地方财政投入有限，社会资本参与缺乏明确的收益路径<sup>[35,36]</sup>，工程涉及的利益主体多元、跨部门协调机制不畅，使得资金闭环成为难点问题。进一步加强社会经济方面的协调保障成为工程落地与长效运维的难点之一。

为此，应聚焦海岸带韧性提升和生态产品价值实现，依托工程改善的潮上带、潮下带空间资源及海岸景观，发展生态旅游，结合生物多样性提升、发展生态渔业；聚焦工程所需红树林、珊瑚礁苗圃、制砂、人工鱼礁生产、海洋能发电、AI和海洋感知设备生产等领域，拉动相关产业内需，培育新质生产力，吸引社会资本。通过产业发展带动财政收入增长，再将财政资金反哺于潮上带、潮下带的工程建设运维，形成“生态赋能产业-产业吸引投资-投资培育新质生产力-财政增收-反哺工程”的完整闭环（见图6）。

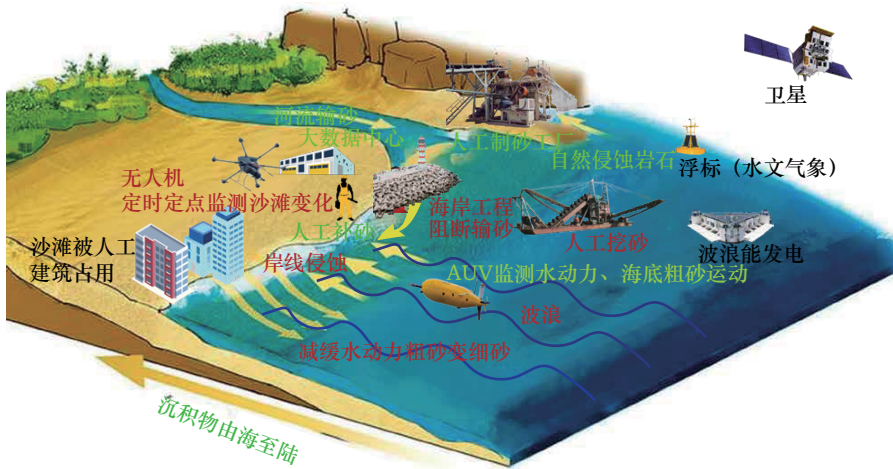


图5 砂质岸滩智能感知生态屏障工程设计示意图

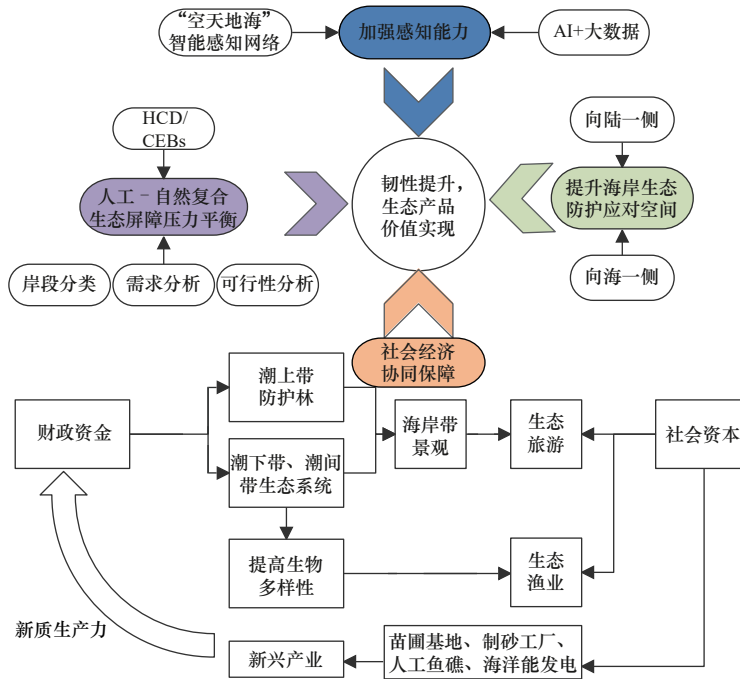


图6 RCEBs建设的知识框架与工程措施图



## 五、发展展望

本研究通过梳理海岸防护历史演进，结合新时期海岸带防灾减灾、生态保护修复与海洋经济协同发展的国家战略需求，揭示未来海岸带防护工程的发展趋势，即从传统单一硬防护模式向韧性提升的综合防护体系转型。本研究虽已初步构建了理论框架与技术思路，探讨了当前RCEBs工程难点和初步对策，但仍停留在局部地区工程防御的层面，在迈向更宏观的海岸带韧性提升方面，仍面临诸多科学瓶颈与技术挑战。为此，未来研究需在以下4个维度实现突破。

### （一）从单一防护要素到陆海统筹的系统防护

本研究聚焦于单一灾害（如海洋风暴潮）的局部防护，尚未扩展至“陆域山川—海岸带城镇—潮间带—近海”的连续性、整体性生态屏障。未来需构建陆海统筹的系统性防护生态屏障结构模型，揭示不同致灾单元（如强降雨、洪水、泥石流、干旱、咸潮、台风）的叠加效应，以及如何在陆海生态屏障功能互补机制下，实现能量衰减、灾损降低。重点研究方向有：① 陆地和海岸带生态屏障的作用机制及防护增益；② 陆源营养盐输入与近海生态系统稳定的阈值关系；③ 陆海灾害耦合叠加情况下海岸带现有防护屏障阈值。

### （二）从静态评估到动态响应的韧性刻画

本文多基于平均波高、植被覆盖度等静态指标开展研究，难以反映极端灾害下的非线性响应与灾后韧性恢复过程。未来需刻画韧性的动态变化过程，构建“压力—状态—响应”的动态评估框架。相关核心科学问题包括：① 不同强度风暴潮（重现期10年、50年、100年）的生态屏障瞬时损伤、短期恢复与长期演替规律；② 植被生长演化与工程结构稳定性的耦合机制；③ 在长时间尺度下，生态屏障韧性的变化与预警方法（如风暴潮、海平面上升、陆源污染）。

### （三）从工程韧性到自然—社会复合系统韧性

本研究侧重于RCEBs工程的防护效能，对“自然—社会”复合系统韧性关注不足。未来应将RCEBs工程置于该复合系统下，探究以下前沿方

向：① 工程的防护效能如何转化为可量化的风险降低效益（如避免的经济损失、减少的受灾人口）；② 不同利益相关者（政府、社区、企业）在工程建设与维护中的成本分担与收益共享机制；③ 基于生态产品价值的工程多目标优化方法，实现防灾安全、生态服务、文化价值与社会公平的多维平衡。

#### 利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

**Received date:** September 29, 2025; **Revised date:** November 28, 2025

**Corresponding author:** Ye Shufeng is a professor-level senior engineer from East China Sea Development Research Institute, East China Sea Standard and Metrology Center, Ministry of Natural Resources. His major research field is marine ecological restoration. E-mail: ysf@ecs.mnr.gov.cn

**Funding project:** National Key R&D Program of China (2024YFC3109000); 2023 Natural Resources Science and Technology Strategy Research Program (2023-ZL-81); Project of China Scholarship Council (202404180010)

#### 参考文献

- [1] 谭显春, 张倩倩, 曾桢, 等. 典型发达国家适应气候变化资金机制及对中国的启示 [J]. 中国环境管理, 2023, 15(1): 64–73.  
Tan X C, Zhang Q Q, Zeng A, et al. Financial mechanism of adaptation to climate change in typical developed countries and its enlightenment to China [J]. Environmental Conformity Assessment, 2023, 15(1): 64–73.
- [2] Visbeck M. Ocean science research is key for a sustainable future [J]. Nature Communications, 2018, 9: 690.
- [3] Jouffray J B, Blasiak R, Norström A V, et al. The blue acceleration: The trajectory of human expansion into the ocean [J]. One Earth, 2020, 2(1): 43–54.
- [4] 段克, 刘峥延, 梁生康, 等. 海洋生态保护修复: 国际议程与中国行动 [J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(2): 277–287.  
Duan K, Liu Z Y, Liang S K, et al. Marine ecological protection and restoration: International agendas and China action [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(2): 277–287.
- [5] 徐耀阳, 李刚, 崔胜辉, 等. 韧性科学的回顾与展望: 从生态理论到城市实践 [J]. 生态学报, 2018, 38(15): 5297–5304.  
Xu Y Y, Li G, Cui S H, et al. Retrospect and prospect of resilience science: From ecological theory to urban practice [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(15): 5297–5304.
- [6] 黄秀蓉, 姜爱华, 斜晓东. 海岸带生态屏障建设: 整体性治理及其推进路径 [J]. 中国科学院院刊, 2025, 40(12): 2151–2161.  
Huang X R, Jiang A H, Dou X D. Coastal zone ecological barrier construction: Holistic governance and its promotion path [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2025, 40(12): 2151–2161.
- [7] 郭兴杰, 王寒梅, 詹龙喜. 海岸带地区典型地质灾害链研究进展与展望 [J]. 中国工程科学, 2025, 27(3): 272–286.  
Guo X J, Wang H M, Zhan L X. Typical geological hazard chain in coastal areas: Progress and prospects [J]. Strategic Study of CAE, 2025, 27(3): 272–286.



- [8] 傅伯杰, 王晓峰, 冯晓明, 等. 国家生态屏障区生态系统评估 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.  
Fu B J, Wang X F, Feng X M, et al. National ecological barrier zones: Ecosystem assessment [M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [9] Danielsen F, Sørensen M K, Olwig M F, et al. The Asian tsunami: A protective role for coastal vegetation [J]. *Science*, 2005, 310(5748): 643.
- [10] Xu X C, Fu D J, Su F Z, et al. Global distribution and decline of mangrove coastal protection extends far beyond area loss [J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 10267.
- [11] 潘德炉, 张偲, 秦大河, 等. 我国海岸带蓝碳生态系统结构现状与保护优化策略研究 [J]. *中国工程科学*, 2024, 26(6): 233–245.  
Pan D L, Zhang S, Qin D H, et al. Current structural status and optimized protection strategies for coastal blue-carbon ecosystems in China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2024, 26(6): 233–245.
- [12] Xu S S, Xie J Q, Chen M R. Integrated management improves emerging coastal industries and ecological restoration with the participation of social capital [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 9: 1015262.
- [13] 李睿倩, 徐成磊, 李永富, 等. 国外海岸带韧性研究进展及其对中国的启示 [J]. *资源科学*, 2022, 44(2): 232–246.  
Li R Q, Xu C L, Li Y F, et al. Progress of international research on coastal resilience and implications for China [J]. *Resources Science*, 2022, 44(2): 232–246.
- [14] 杨桂山, 施雅风. 中国海岸地带面临的重大环境变化与灾害及其防御对策 [J]. *自然灾害学报*, 1999, 8(2): 13–20.  
Yang G S, Shi Y F. Major environmental changes and hazards and strategy of damage-mitigation in coastal area of China [J]. *Journal of Natural Disasters*, 1999, 8(2): 13–20.
- [15] 李博, 韩增林, 孙才志, 等. 环渤海地区人海资源环境系统脆弱性的时空分析 [J]. *资源科学*, 2012, 34(11): 2214–2221.  
Li B, Han Z L, Sun C Z, et al. Spatial and temporal vulnerability analysis of the human-sea resource environment of the Bohai rim region [J]. *Resources Science*, 2012, 34(11): 2214–2221.
- [16] 刘小喜, 陈沈良, 蒋超, 等. 苏北废黄河三角洲海岸侵蚀脆弱性评估 [J]. *地理学报*, 2014, 69(5): 607–618.  
Liu X X, Chen S L, Jiang C, et al. Vulnerability assessment of coastal erosion along the abandoned Yellow River Delta of northern Jiangsu, China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(5): 607–618.
- [17] 李汉光, 徐万平, 付建明, 等. 滨海核电冷源取水口海生物拦截体系的改进设计 [J]. *科技与创新*, 2022 (19): 164–168.  
Li H G, Xu W P, Fu J M, et al. Improved design of marine biological interception system for cold source intake of coastal nuclear power plant [J]. *Science and Technology & Innovation*, 2022 (19): 164–168.
- [18] 杨清伟, 蓝崇钰, 辛琨. 广东—海南海岸带生态系统服务价值评估 [J]. *海洋环境科学*, 2003, 22(4): 25–29.  
Yang Q W, Lan C Y, Xin K. Evaluation on the value of the ecosystem services of the coastal zone in Guangdong and Hainan [J]. *Marine Environmental Science*, 2003, 22(4): 25–29.
- [19] Salmo S G III. Assessment of typhoon impacts and post-typhoon recovery in Philippine mangroves: Lessons and challenges for adaptive management [M]//Sidik F, Friess D A. Dynamic sedimentary environments of mangrove coasts. Amsterdam: Elsevier, 2021: 539–562.
- [20] 徐淑升, 杨云锋, 孙庆杨, 等. 基于自然的解决方案理念低成本大规模开展海洋生态修复项目研究 [J]. *生态学报*, 2025, 45(19): 9556–9564.  
Xu S S, Yang Y F, Sun Q Y, et al. Research of low-cost and large-scale marine ecological restoration projects based on the concept of Nature-based solutions (NbS) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(19): 9556–9564.
- [21] Shih S S, Huang Z Z, Hsu Y W. Nature-based solutions on floodplain restoration with coupled propagule dispersal simulation and stepping-stone approach to predict mangrove encroachment in an estuary [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 851: 158097.
- [22] Mciór A L, Möller I, Spencer T, et al. Reduction of wind and swell waves by mangroves [R]. Cambridge: The Nature Conservancy, 2012.
- [23] Hai N T, Dell B, Phuong V T, et al. Towards a more robust approach for the restoration of mangroves in Vietnam [J]. *Annals of Forest Science*, 2020, 77(1): 18.
- [24] Fu B J, Liu Y X, Zhao W W, et al. The emerging “pattern–process–service–sustainability” paradigm in landscape ecology [J]. *Landscape Ecology*, 2025, 40(3): 54.
- [25] 陈萍, 信忠保, 周金星, 等. 生态系统稳定性概念、评估方法及影响因素 [J]. *生态学报*, 2025, 45(14): 6647–6662.  
Chen P, Xin Z B, Zhou J X, et al. The concept, assessment methods, and influencing factors of ecosystem stability [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(14): 6647–6662.
- [26] 陈雪初, 孙彦伟, 温泉, 等. 陆海统筹生态保护修复的生态学基础、难点问题与对策建议 [J]. *应用海洋学学报*, 2025, 44(1): 21–28.  
Chen X C, Sun Y W, Wen Q, et al. Ecological basis, difficulties and countermeasures for integrated land–sea ecological protection and restoration [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2025, 44(1): 21–28.
- [27] Krauss K W, Doyle T W, Doyle T J, et al. Water level observations in mangrove swamps during two hurricanes in Florida [J]. *Wetlands*, 2009, 29(1): 142–149.
- [28] Zhang K Q, Liu H Q, Li Y P, et al. The role of mangroves in attenuating storm surges [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2012, 102: 11–23.
- [29] Chen X P, Yin Z Q, Li Z B, et al. Overview on mangrove forest disaster prevention and mitigation functions [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2024, 23(1): 1–12.
- [30] Xu X, Fu D, Su F, et al. Global distribution and decline of mangrove coastal protection extends far beyond area loss [J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 10267.
- [31] 广西壮族自治区海洋局. 广西防城港西湾红沙环生态海堤入选全球八大海岸带生态减灾协同增效国际案例 [EB/OL]. (2023-09-25)[2025-08-30]. <http://hyj.gxzf.gov.cn/gzdt/zhyw/t17384846.shtml>.  
Guangxi Zhuang Autonomous Region Oceanic Bureau. The ecological seawall at Hongshahuan in Xiwan, Fangchenggang, Guangxi selected as one of the world’s top eight international cases of synergistic ecological disaster reduction in coastal zones [EB/OL]. (2023-09-25)[2025-08-30]. <http://hyj.gxzf.gov.cn/gzdt/zhyw/t17384846.shtml>.

- [32] 范航清, 何斌源, 王欣, 等. 生态海堤理念与实践 [J]. 广西科学, 2017, 24(5): 427–434, 440.  
Fan H Q, He B Y, Wang X, et al. The conception and practices of ecological sea dyke [J]. Guangxi Sciences, 2017, 24(5): 427–434, 440.
- [33] 戚洪帅, 曾舒婷, 陈敏, 等. 海滩养护对海滩生态系统的多尺度影响述评 [J]. 海洋学报, 2024, 46(1): 12–26.  
Qi H S, Zeng S T, Chen M, et al. Multi-scale impacts on beach ecosystem of beach nourishment: A review [J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(1): 12–26.
- [34] 刘建辉, 陈旭, 蔡锋, 等. 海滩养护影响下的海岸风沙作用研究进展 [J]. 应用海洋学学报, 2023, 42(1): 145–155.  
Liu J H, Chen X, Cai F, et al. Advance in the researches of coastal aeolian sand effect influenced by beach nourishment [J]. Journal of Applied Oceanography, 2023, 42(1): 145–155.
- [35] 刘奕, 张辉, 王晶鑫, 等. 我国城市安全韧性发展现状与技术发展方向展望 [J]. 中国工程科学, 2025, 27(4): 13–27.  
Liu Y, Zhang H, Wang J X, et al. Development status and technological prospects of urban safety resilience in China [J]. Strategic Study of CAE, 2025, 27(4): 13–27.
- [36] 王凯歌, 郑慧慧, 徐艳, 等. 社会–生态系统结构研究进展与网络化探索 [J]. 地理科学进展, 2022, 41(12): 2383–2395.  
Wang K G, Zheng H H, Xu Y, et al. Research progress of social–ecological system structure and networking exploration [J]. Progress in Geography, 2022, 41(12): 2383–2395.