我国海岸侵蚀防护的问题与启示

戚洪帅[1,2]，潘艺滢[1]，蔡锋[1,2]，刘建辉[1,2]

（1. 自然资源部第三海洋研究所　厦门　361005；2. 自然资源部海洋生态保护与修复重点实验室　厦门　361005）

摘要：全球气候加速变化引发的海岸侵蚀加剧已成为沿海各国共同面临的严峻问题。我国海岸线漫长曲折，类型多样，且人类开发强度大，气候变化诱发的海岸动力强化效应更为显著，海岸侵蚀防护面临前所未有的挑战。文章基于气候加速变化背景下的全球和我国海岸侵蚀态势，分析我国海岸侵蚀防护中存在的问题，梳理国内外海岸防护理念，提出适合我国的和谐海岸构建建议。具体建议包括以下三个方面：一是加强系统性监测与前瞻性风险评估；二是开展地貌与生态相融合的修复与技术创新；三是注重海岸侵蚀防护中的生态保护和可持续发展的协同。

关键词：海岸侵蚀；气候变化；人类活动；海岸防护；和谐海岸

中图分类号：P737.1；TV861　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1005-9857（2025）12-0003-10

Issues and Insights of Coastal Erosion Protection in China

QI Hongshuai[1,2]，PAN Yiying[1]，CAI Feng[1,2]，LIU Jianhui[1,2]

（1. Third Institute of Oceanography，MNR，Xiamen 361005，China；
2. Key Laboratory of Marine Ecological Conservation and Restoration，MNR，Xiamen 361005，China）

Abstract：Accelerated global climate change is exacerbating coastal erosion，posing serious challenges for coastal countries worldwide．China，with its long and irregular coastline，strong human activities，and intensified coastal dynamics due to climate change，is facing unprecedented coastal protection challenges．Based on the global and domestic coastal erosion situation under the background of accelerating climate change，this article analyzes the existing issues in coastal protection of China，summarizes coastal protection concepts from both domestic and international perspectives，and proposes recommendations for establishing harmonious coasts in China．Recommendations include strengthening systematic monitoring and forward-looking risk assessment，carrying out restoration and technological innovation that integrates geomorphology and ecology and paying attention to the synergy between ecological protection and sustainable development in coastal erosion prevention.

Keywords：Coastal erosion，Climate change，Human activity，Coastal protection，Harmonious coast

收稿日期：2025-06-18；**修订日期：**2025-12-18

基金项目：国家重点研发计划重点专项项目（2022YFC3106100）.

作者简介：戚洪帅，研究员，博士，研究方向为海滩过程、海岸动力地貌、海滩养护和海洋生态修复

通信作者：蔡锋，研究员，博士，研究方向为海岸与海底动力地貌过程、海滩过程与保护修复、海洋生态修复

0 引言

全球气候已进入“沸腾时代”[1]，在此背景下，海岸侵蚀成为沿海国家共同面临的严峻问题。受气候变化加速和高强度人类活动的双重影响，我国海岸侵蚀风险日趋增大[2-5]，国土资源面临损失，严重削弱了海岸带的经济价值以及减灾和生态功能，对我国海岸安全和发展造成了直接威胁。海岸带是海洋生态文明建设和海洋强国战略的主战场。应对海岸侵蚀、提升海岸韧性是推动我国海岸带高质量发展的关键举措。联合国“海洋十年”提出了“韧性海岸”计划[6]，我国《国家适应气候变化战略2035》[7]也明确提出了提升生态系统韧性、适应气候变化的行动要求。随着生态文明建设的持续深入，基于生态系统考虑，协同提升海岸防护能力和生态功能，增强海岸韧性成为海岸管理与保护的主要方向。为此，本文紧扣我国海岸侵蚀问题，在梳理我国海岸侵蚀基本态势的基础上，分析我国在海岸侵蚀方面所面临的问题，总结海岸保护和韧性提升方面的趋势，提出应对海岸侵蚀的建议，以期为我国海岸侵蚀防灾减灾和海岸保护管理提供思路，支持海岸带高质量可持续发展。

1 海岸侵蚀灾害的基本态势

自工业革命以来，全球气温逐年攀升，2023 年 7 月，全球平均大气表面温度达 16.95℃，成为有记录以来的最热月份，联合国宣布“全球沸腾时代已经到来”[1]。全球气候加速变化引发了一系列显著的海岸环境响应，包括海平面持续上升[8]、局地海浪增强[9-10]、极端风暴事件加剧[11]、河流输沙异常变化[12]等。1970 年以来，全球海平面上升速率显著加快，尤其 2006 年以来，上升速率达 3.7 mm/a，约为 1970 年以前的 2.8 倍，至 21 世纪末，海平面将上升 0.63 ～ 1.01 m[7]。环境恶化对全球海岸带的稳定性构成重大威胁。据统计，全球约 24%的砂质海岸已显现出较大程度侵蚀[13]；全球范围内的盐沼湿地海岸呈普遍退缩状态，局部地区盐沼蚀退速率高达 4 m/a[14]。全球尺度的预测结果显示，至 21 世纪末，全球近一半的砂质海岸地貌将会随着气候变化引起的海平面上升而被蚀退甚至消失[15]。因此，在全球气候加速变化的时代背景下，海岸侵蚀已成为全球沿海国家共同面临的严峻问题。

相比于全球海岸侵蚀的总体态势，我国海岸侵蚀的范围更广、强度更高，原因和机制更为复杂。全球气候变化引起的海岸动力强化效应在我国沿海地区更为显著，1993—2022 年我国沿海海平面平均上升速率达 4.0 mm/a，高于同时段全球平均水平[16]；改革开放以来高强度的人类开发活动，如河流建坝、近岸采砂、围填海、硬质护岸建设等，导致我国海岸带发育的物源愈发匮乏，到 2014 年我国人工岸线占比已超过 60％，形成一道由钢筋混凝土构成的“新万里长城”[17]，海岸丧失了向陆迁移的自然调整空间。在全球气候加速变化和高强度人类活动的双重压力下，全国范围的海岸侵蚀日趋加剧。据统计，我国大陆侵蚀岸线总长度超过 3 255.3 km，其中砂质海岸侵蚀长度超过 2 463.4 km，约占我国砂质岸线总长度的 49.5％，粉砂淤泥质海岸线侵蚀长度为 791.9 km[18]。研究表明，约 80％的大陆海岸侵蚀脆弱性处于中高等级，数十年持续的大规模填海工程、无序近岸采砂和不合理沿岸工程建设等高强度人类活动形成的大量历史欠账，已转变成我国海岸侵蚀的主控因素[2]。叠加全球气候变化的累积效应，海岸侵蚀防护正在遭受前所未有的挑战。

从时间尺度来看，海岸侵蚀有短周期显性侵蚀和长周期隐性侵蚀两类[19-20]。前者通常为海岸平衡被人为打破或风暴潮等强动力事件造成的岸线快速退缩和地貌剧烈响应[2,21]，时间尺度为事件性或小时至周，影响范围通常是局部区域，也可能对上下游海岸产生影响。后者通常为长期海平面上升与沉积物补给减少导致岸线长期而缓慢地后退[2,5,15,22]，时间尺度为数十年至上百年，发展缓慢而持续，累积效应明显，影响范围通常是区域甚至全球尺度，对其的防护需要有长期的适应性和持续性对策。海岸侵蚀的表现形式具有多样性，常见的海岸侵蚀表现形式为岸线后退、滩面下蚀、地貌退化和滩面沉积物粗化等[4,18,23-24]。

全球气候变化的累积效应并非单一因子的线性叠加，而是通过海平面上升、极端气候事件频发、海洋酸化和河流输沙量减少等多维度机制与高强度

人类活动叠加，形成“压力叠加—系统脆弱性升高—灾害放大”的恶性循环。极端气候事件与港口、海堤等沿岸工程协同放大风暴潮的破坏力，还有可能延误风暴后海岸的恢复[25-26]；河流输沙量减少、人类采砂与沿岸工程截断沉积物补给，导致海岸系统丧失自然修复能力，进一步加剧侵蚀风险[25,27-29]；海洋酸化削弱珊瑚礁和贝类的钙化能力[30]，导致天然防波堤功能衰退，进一步降低了海岸稳定性；海平面上升与近岸采砂、围填海、河流筑坝等人类活动共同导致沿海环境退化，海岸线后退速率倍增，海岸脆弱性升高[25,27,31]，这些非线性叠加效应显著放大了海岸侵蚀的复杂性与治理难度，亟须统筹陆海治理，推广基于自然的解决方案（NbS）并强化气候适应能力。

海岸侵蚀灾害对经济社会的影响广泛且深远，主要表现为显性的经济损失、生态环境破坏以及隐性的社会稳定性威胁。海岸侵蚀直接造成沿海土地流失和基础设施破坏，其侵蚀过程也会使船舶更难到达港口，从而扰乱港口航运，极大地影响受侵蚀严重地区的贸易活动，这些影响均会带来显著的经济损失[32-34]。侵蚀过程会破坏海洋生物的栖息环境，加剧海水倒灌和土壤盐碱化，对农业生产和生态平衡产生负面影响[35]。海岸侵蚀还会对沿海居民的生命财产安全构成威胁，可能导致人口迁移，进而影响社会心理和稳定性[36-37]。为应对这一问题，通常需要采取海堤构筑等工程手段，这种方法虽能形成短期防护屏障，但需长期维护，随着海洋动力条件持续增强，这类应对模式正遭遇边际效益递减的现实困境。从长期来看，随着海平面上升和气候变化的加剧，海岸侵蚀的影响将进一步扩大，对沿海地区的可持续发展构成更大威胁。因此，沿海地区必须采取综合性措施，以减轻其带来的多方面损失。

2　我国海岸侵蚀防护的问题分析

我国海岸防灾减灾历史悠久、经验丰富，建立了较为完整的海岸灾害防护体系，防护理念也不断革新，防护维度和可持续性不断提升，为我国海岸安全和发展提供了保障。近 40 年来，我国海岸带地区高速发展，海岸侵蚀日趋明显且频发，虽然这种现象逐渐得到重视，但当前在应对海岸侵蚀方面仍存在诸多问题。

2.1　海岸防护方式仍以硬式结构为主

我国为防潮御浪建设了大量的海岸防护工程，修建海堤长达 14 500 km。硬式海岸工程成为我国海岸防护的主要形式，根据《全国海堤建设方案》的要求，我国持续推进新增或提标海堤建设，打造海岸的硬式防护体系[38]。然而，随着全球气候变化和人类活动的加剧，以海堤为主的硬式防护的影响逐渐凸显（表 1）：一是海堤作为固定海岸构筑物，无法自我适应全球气候变化导致的极端事件和长期累积效应[39]，需要不断提标加固；二是海堤隔离了海陆物质和能量交换，使堤前水动力增强，导致相邻岸滩的侵蚀加剧，“护岸不护滩”的情况也逐渐凸显，岸滩下蚀成为我国海岸侵蚀的重要表现特征[40]；三是海堤割裂了海岸生态系统，在多个尺度上改变了滨海湿地生态系统的生态过程[41]，导致海岸生态系统受损，影响海岸生态安全和国家碳排放战略的实现；四是海堤通常会导致海岸的可达性降低，海岸亲水空间减少，开发活动和经济活力受限。综上所述，目前亟须改变以硬式结构为主的海岸防护策略，以增强海岸韧性。

表 1　常见硬式构筑物的正面作用和负面影响

Table 1　Positive and negative effects of common hard structures

结构物名称	位置及型式	正面作用	负面影响
硬式护岸、海堤等	岸线位置，沿岸而建	抵御海浪和潮水（尤其是风暴浪潮）侵袭，保护海岸后方陆域安全	堤脚易受浪潮淘刷，堤前海滩下蚀严重，岸线固化导致海岸地貌无法通过动态迁移适应气候变化
离岸堤、潜堤等	离岸位置，结构物走向与主波向垂直或相交	抵御外海波浪入侵，促使波浪在离岸位置破碎，对堤后港池、海湾或岸滩形成有效庇护	导致沿岸波能分布不均，堤两侧未防护岸段波能集中、侵蚀加剧
突堤、丁坝等	与岸相接，结构物走向与岸垂直或斜交	有效拦截上游岸段沿岸输沙，降低上游泥沙流失率和海岸侵蚀强度	造成沿岸输沙失衡，加剧下游岸段泥沙流失与海岸侵蚀

2.2 生态修复甚少考虑海岸减灾

在习近平生态文明思想的指引下，我国海洋生态修复工作持续推进，自 2010 年以来，中央投入海洋生态修复资金超过 270 亿元，全国累计实施了 58 个“蓝色海湾”整治项目、24 个海岸带保护修复工程、61 个渤海综合治理攻坚战生态修复项目等一系列重大项目，初步遏制了海岸典型生态系统退化趋势，区域海洋生态环境明显改善[42]。总体来看，我国海洋生态修复的主要工作仍处于“扭亏”阶段，修复工程依然存在对象单一、多目标考虑不足、时空不衔接等问题，需要“整体保护、系统修复、综合治理”，实现海洋生态系统功能的“盈余”。虽然我国开展了一系列海岸带生态修复工程，但多数聚焦生态指标恢复（如植被覆盖、湿地面积扩大、生物多样性提升），对防护设计、侵蚀缓解和沉积物管理等方面关注不够。当前，基于自然的海洋灾害防护策略已成为全球共识。2018 年 10 月，习近平总书记在中央财经委员会第三次会议上的讲话对通过生态修复提升海洋防灾减灾能力提出了具体要求。面对海岸侵蚀灾害，如何实现生态保护和防灾减灾协同增效，成为应对海岸自然灾害的关键环节。当前亟须形成以自然为本、整体系统的海岸防灾减灾新理念和新路径。

2.3 以被动式防御应对海岸侵蚀

针对海岸侵蚀灾害，我国目前仍以被动式防御为主，大多数防护工作是在海岸侵蚀发生后开展的，以硬式结构“打补丁”为主要方式，属于“亡羊补牢”式的被动防护策略，缺少“治未病”式的应对策略，迫切需要主动监测，加强风险预警，注重沉积物管理与系统性防护。例如，在山东东营黄河口和江苏盐城等地的粉砂淤泥质侵蚀海岸大规模修建海堤，防止岸线蚀退，保护土地资源，往往哪里受到侵蚀就在哪里建设。我国近半数的砂质海岸遭受海岸侵蚀，甚至海滩被侵蚀殆尽。福建崇武半月湾自 2006 年起受到强烈侵蚀，岸线蚀退 30 余米，为此修建海堤抵御海岸侵蚀，但海滩侵蚀态势仍未得到有效遏制[43]；平潭大澳湾和湄洲岛黄金沙滩也仅在侵蚀岸段筑起海堤防护，然而海岸侵蚀范围持续扩大[44-45]。海岸侵蚀作为一种多发、易发、分布广的灾害，需要采用更为主动的防护对策：针对人为因素导致的显性海岸侵蚀，应积极采取海滩修复、生物礁修复、湿地保滩促淤等主动防护方式进行修复，构建稳定的海岸地貌和生态系统；针对日益加剧的气候变化引发的隐性长期海岸侵蚀，则应通过沉积物管理与基于生态系统的适应性管理等策略，提升海岸的自我调节和长期稳定能力。

2.4 海岸保护和开发利用不协调

海岸带是我国经济发展的关键区域，必须坚定不移地走高质量发展之路。近几十年，随着沿海地区社会与经济的快速发展，海岸带一直处于高强度的开发利用中，但海岸开发利用布局不尽合理，存在海岸线利用无序和围填海等历史遗留问题。系统映射研究显示，目前对基于自然的解决方案（NbS）在生态与物理指标方面已有较多研究，而在经济与社会指标方面仍有较大证据缺口[46-47]。如我国累计围填海面积高达 14 500 km^2[48]，建成大型人工岛超过 30 个[40]，反映出我国海岸带开发模式、强度和空间结构与保护管理尚存诸多不协调之处。因此，亟待从全局层面进一步统筹开发和保护的关系，海岸保护需要以海岸带经济社会发展为目的，而海岸带开发利用要支撑海岸保护的持续推进，必须兼顾保护和发展。未来应进一步强化以系统为基础的保护与管理理念，综合考虑海岸地貌系统和生态系统之间的平衡与稳定，改变过去地貌系统与生态系统融合度低的开发与保护方式，实现标本兼治、陆海统筹的治理格局。

3 海岸防护理念革新与发展

随着人类对自然认识水平的不断提升，海岸防护理念不断革新，从试图改造自然到尊重自然，再到适应自然、融入自然。近年来，基于自然、与自然和谐共生的海岸防护与生态保护修复理念在国际上形成主流范式。相关修复技术、对象逐渐多元化，其内容、尺度和范围都不断拓展。

传统的海岸保护策略大多试图与自然力对抗，以克服环境压力，实现保护目标。但长期实践表明，这种抗争模式往往导致生态连接被切断、沉积

系统被破坏，岸线稳定性反而下降，最终效益有限。若能根据各类海岸生态系统的特点，利用自然的特性和复杂的系统过程，开发遵循自然规律的保护行动与动态方案，可以有效地保护海岸。这种“基于自然的解决方案（NbS）”能极大地促进海岸带修复管理[47,49]。例如，盐沼、红树林和海草床修复构建的“绿色海岸”显著加强了海岸防护效果，提升了海岸带的生态效益（图 1）[50]。2008 年，在国际自然保护联盟（IUCN）、美国大自然保护协会（TNC）等非政府组织的推动下，《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）第 14 次缔约方会议提出了“基于生态系统的适应性 EBA”[51]，提出了保护和恢复生态系统服务的战略、政策和措施，以减少气候变化带来的影响。目前，欧洲、北美、非洲和东南亚等多个地区已陆续展开 EBA 治理实践[51]。欧盟委员会在 2013 年发布的《欧盟适应气候变化战略》中，多次强调 EBA 具有成本高效和多重效益等特点，并采用 EBA 来建设绿色基础设施[52]。近年来，“活力海岸（living shoreline）”“绿色海岸（green shores）”等保护理念在国际上日益受到重视，并逐渐取代硬式护岸，成为海岸防护的主要手段[53-56]。其兼具海岸防护、生态服务和滨海旅游等多重功能，且具有较高的海岸韧性，可防潮御浪，改善水动力环境及水体水质，为动植物提供广阔的海岸生境，也为公众营造良好的滨海旅游休闲空间，同时可助力海洋蓝色碳汇[57-60]。活力海岸可通过植被的向陆 / 向海迁移或近岸泥沙输运、岸滩地貌动态调整，更好地适应全球气候变化引起的海平面上升和风暴浪潮加剧的影响。总体来看，当今世界上最新的海岸防护理念更强调生态系统服务、沉积物动态与系统韧性，并将生态系统功能纳入防护设计。将生态与地貌相结合，将生态提升与防护工程相融合，兼顾保护与可持续发展是未来趋势。

我国海洋生态保护修复历经 40 年探索，其发展历程可概括为立法奠基—专项试点—系统治理—陆海统筹四个递进阶段。《中华人民共和国海洋环境保护法》《中华人民共和国海域使用管理法》[61] 和《中华人民共和国海岛保护法》[62] 等法律法规共同构建起生态环境保护与资源管理双轨制立法体系。

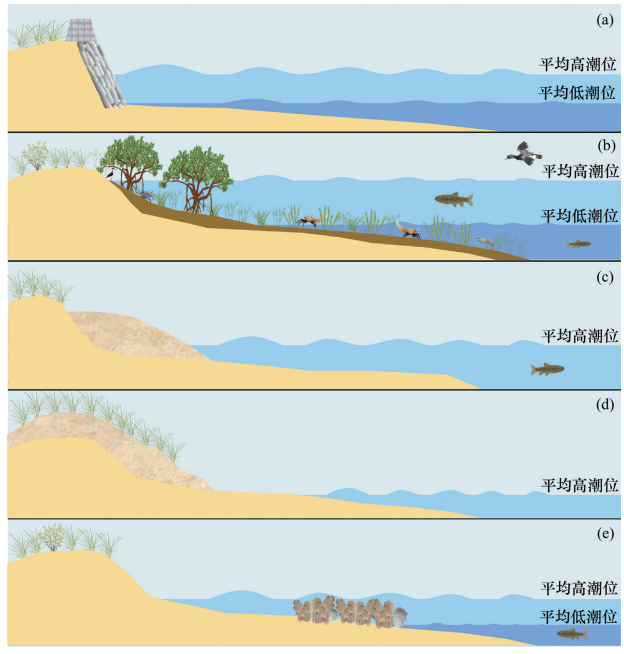

图 1　海岸生态防护模式

Fig.1　Coastal ecological protection model

注：（a）硬式防护海岸；（b）湿地修复；（c）海滩养护；（d）沙丘修复；（e）生物礁修复。

近 20 年来，生态修复进入快车道，中央通过分成海域使用金、设立海岛保护专项资金支持海岸带整治[63]，通过“蓝色海湾”整治、渤海综合治理等重大工程推动规模化修复。修复理念实现了从“单一工程”到“全域生态系统管理”的质的飞跃[64]，标志着我国海洋生态保护已从末端治理迈向源头防控与价值再生的新阶段[65-66]。

我国海岸防护历史悠久，不少千年海塘仍在发挥防护作用。但与世界上海岸防护的先进理念相比，我国的海岸防护理念相对滞后。20 世纪 80 年代前，我国海岸防护以防御性硬式工程为主。改革开放后，我国沿海地区高速发展，海岸开发利用以经济发展为重心，大量建设港口和围填海工程，导致我国海陆格局和泥沙平衡发生快速变化，红树林等重要生态系统遭受破坏，给海岸带来空前压力，海岸防护也逐渐开始采用柔性措施。进入 21 世纪，随着国际海岸防护理念的迅速革新，我国海岸防护快速跟进，兼顾生态和防护的海岸侵蚀防护理念得到重视，防护技术也得到了快速发展。2007 年，厦

门成功实施我国首个大型沙滩修复工程——观音山沙滩修复工程[67]，随后编制了《中国海滩养护技术手册》[68]和行业标准，在全国范围内推广应用，海滩养护技术已成为我国砂质海岸侵蚀防护的重要支撑，从并跑到领跑，引领了国际强潮沙滩侵蚀机理与防护技术的创新发展。修复技术经历了从人工造礁、改造种植等强力干预到基于自然的解决方案（NbS）的转型，生态化防护技术也逐渐得到重视，海堤生态化和生态海堤建设已成为我国海岸带保护修复和防灾减灾的重要方向。该类技术通过充分发挥生态系统的功能，有效提高了海岸韧性，构建了海岸带应对气候变化的安全屏障[69-73]。

目前，国际主流海岸防护理念是以海岸生态系统保护与修复为主，并辅以必要的工程技术形成混合修复模式，倡导海岸生态韧性提升，但较少考虑滨海社会经济状况和人类活动的双向作用。近年来，我国也逐渐开展了许多海滩、珊瑚礁、红树林与盐沼等典型海岸生态系统的修复工作，但一些技术并不完全适应我国海岸自然、社会经济发展的需求，无法应对我国海岸线漫长曲折、类型多样、环境复杂的特点，难以解决大规模围填海、岸线固化与海洋工程建设等人类活动引起的严重海岸侵蚀、生态系统受损等问题。当前，修复技术仍难以满足海岸韧性提升需求，不同类型的生态修复工程存在时空不协调、技术不匹配等问题。总体来看，我国海岸防护理念已发生根本转变，人与自然和谐、保护与发展并重成为主流方向，但当前国际经验难以适用于我国高强度开发的海岸，国内实践仍需协同开发与保护。引领海岸防护技术发展，构建和谐海岸，实现海岸带高质量发展，是我国海岸保护领域的方向。

4 海岸韧性提升方面的启示

未来，我国沿海地区仍将是经济和社会发展的核心区域，海岸防护工作仍是重中之重。为此，需要在兼顾灾害防控和生态修复的同时，协调环境保护和经济发展的关系。应对全球气候变化和高强度人类活动，提升海岸韧性，构建兼具“防护能力、生态活力和经济活力”的复合活力海岸，将是我国海岸可持续发展的方向。基于此，本文提出以下3点启示。

（1）加强系统性监测与前瞻性风险评估。针对我国多发、广布、类型多样的海岸侵蚀，建立全国统一的多源数据监测与动态评估体系，对侵蚀动态及生态系统状态进行持续监测，准确把握我国海岸侵蚀的整体态势及其控制因素的转变，实现海岸侵蚀灾害的“压力—状态—响应”动态管理。在此基础上，应从社会—生态系统视角构建海岸侵蚀风险区划，强化海岸侵蚀灾害风险的前瞻性评估，加强对气候变化和人类活动共同驱动下的海岸演化趋势的预测与预警。

（2）开展地貌与生态相融合的修复与技术创新。基于我国海岸自然和开发利用特征，充分分析我国海岸的复杂性和独特性，从海岸地貌单元的完整性和生态系统的连通性角度出发，开展海岸侵蚀防护、生态功能提升与开发利用协同增效的地貌—生态相融合的海岸修复，构建泥质和砂质海岸保护修复的适用且可推广的技术体系，提出适用于我国海岸侵蚀防护的海岸韧性综合解决方案。

（3）注重海岸侵蚀防护中的生态保护和可持续发展的协同。立足于我国海岸带高强度开发现状和持续开发需求，协同海岸生态保护和开发利用，实现海岸带生态系统的正向演进，促进我国海岸带的绿色利用，同步提升海岸减灾防护能力、海岸生态系统活力和海岸经济开发能力，打造融合海岸安全、生态和经济和谐发展的“中国模式”，构建和谐海岸，实现海岸带高质量发展。

参考文献（References）：

[1] United Nations. Hottest July ever signals ‘era of global boiling has arrived’ says UN chief[EB/OL]. [2025-05-15]. https://news.un.org/en/story/2023/07/1139162.

[2] CAI F, CAO C, QI H S, et al. Rapid migration of mainland China’s coastal erosion vulnerability due to anthropogenic changes[J].

Journal of Environmental Management，2022，319(115632)：1-15.

[3] ZHU Q G，XING F，WANG Y P，et al. Hidden delta degradation due to fluvial sediment decline and intensified marine storms[J]. Science Advances，2024，10(18)：eadk1698.

[4] 王庆，朱君，战超. 海岸侵蚀与防护技术研究进展[J]. 海岸工程，2022，41(4)：301-312.
WANG Qing，ZHU Jun，ZHAN Chao. Research progress of coastal erosion and protection technology[J]. Coastal Engineering，2022，41(4)：301-312.

[5] GAO W，DU J，GAO S，et al. Shoreline change due to global climate change and human activity at the Shandong Peninsula from 2007 to 2020[J]. Frontiers in Marine Science，2023，9：1123067.

[6] UNESCO. Enhancing coastal resilience during the UN ocean decade[EB/OL]. [2025-05-15]. https://oceandecade.org/news/enhancing-coastal-resilience-during-the-un-ocean-decade/.

[7] 生态环境部，国家发展和改革委员会，科学技术部，等. 国家适应气候变化战略 2035[R]. 2022.
Ministry of Ecology and Environment，National Development and Reform Commission，Ministry of Science and Technology，et al. National strategy on adaptation to climate change to 2035[R]. 2022.

[8] IPCC. Climate change 2021：the physical science basis. contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge：Cambridge University Press，2021.

[9] HEMER M A，FAN Y，MORI N，et al. Projected changes in wave climate from a multi-model ensemble[J]. Nature Climate Change，2013，3(5)：471-476.

[10] YOUNG I R，RIBAL A. Multiplatform evaluation of global trends in wind speed and wave height[J]. Science，2019，364(6440)：548-552.

[11] WEBSTER P J，HOLLAND G J，CURRY J A，et al. Changes in tropical cyclone number，duration，and intensity in a warming environment[J]. Science，2005，309(5742)：1844-1846.

[12] RANASINGHE R. Assessing climate change impacts on open sandy coasts：a review[J]. Earth-Science Reviews，2016，160：320-332.

[13] LUIJENDIJK A，HAGENAARS G，RANASINGHE R，et al. The state of the world's beaches[J]. Scientific Reports，2018，8(1)：6641.

[14] LEONARDI N，CARNACINA I，DONATELLI C，et al. Dynamic interactions between coastal storms and salt marshes：a review[J]. Geomorphology，2018，301：92-107.

[15] VOUSDOUKAS M I，RANASINGHE R，MENTASCHI L，et al. Sandy coastlines under threat of erosion[J]. Nature Climate Change，2020，10：260-263.

[16] 自然资源部. 2022 年中国海平面公报[R]. 2023.
Ministry of Natural Resources. China sea level bulletin of 2022[R]. 2023.

[17] MA Z J，MELVILLE D S，LIU J G，et al. Rethinking China's new great wall[J]. Science，2014，346(6212)：912-914.

[18] 蔡锋. 中国海岸侵蚀脆弱性评估及示范应用[M]. 北京：海洋出版社，2019.
CAI Feng. Vulnerability assessment and demonstration of coastal erosion in China[M]. Beijing：China Ocean Press，2019.

[19] 蔡锋，苏贤泽，刘建辉，等. 全球气候变化背景下我国海岸侵蚀问题及防范对策[J]. 自然科学进展，2008(10)：1093-1103.
CAI Feng，SU Xianze，LIU Jianhui，et al. China's coastal erosion issues and preventive measures in the context of global climate change[J]. Progress in Natural Science，2008(10)：1093-1103.

[20] 邵超，任海波，唐迎迎，等. 珊瑚礁海岸侵蚀的影响因素与响应特征分析[J]. 海洋科学前沿，2022，9(1)：1-5.
SHAO Chao，REN Haibo，TANG Yingying，et al. Analysis of influencing factors and response characteristics of coral reef coastal erosion[J]. Frontiers of Marine Science，2022，9(1)：1-5.

[21] HARLEY M D，TURNER I L，KINSELA M A，et al. Extreme coastal erosion enhanced by anomalous extratropical storm wave direction[J]. Scientific Reports，2017，7：6033.

[22] BOZZEDA F，ORTEGA L，COSTA L L，et al. Global patterns in sandy beach erosion：unraveling the roles of anthropogenic，climatic and morphodynamic factors[J]. Frontiers in Marine Science，2023，10：1270490.

[23] 高抒，贾建军，于谦. 海岸冲淤动态的理论分析：物质收支、剖面形态、岸线进退[J]. 海洋地质与第四纪地质，2023，43(2)：1-17.
GAO Shu，JIA Jianjun，YU Qian. Theoretical framework for coastal accretion-erosion analysis：material budgeting，profile

morphology，shoreline change[J]. Marine Geology & Quaternary Geology，2023，43(2)：1-17.

[24] 高伟，李萍，高珊，等. 台风“利奇马”对山东省海阳市海滩演化过程的影响[J]. 海洋学报，2020，42(11)：88-99.
GAO Wei，LI Ping，GAO Shan，et al. Response process of the Haiyang beach evolution to Typhoon Lekima in Shandong Province[J]. Haiyang Xuebao，2020，42(11)：88-99.

[25] MENTASCHI L，VOUSDOUKAS M I，PEKEL J F，et al. Global long-term observations of coastal erosion and accretion[J]. Scientific Reports，2018，8(1)：12876.

[26] PILKEY O H，WRIGHT L W. Seawalls versus beaches[J]. Journal of Coastal Research，1988，4：41-64.

[27] THORNTON E B，SALLENGER A，SESTO J C，et al. Sand mining impacts on long-term dune erosion in southern monterey bay[J]. Marine Geology，2006，229(1/2)：45-58.

[28] HAPKE C J，KRATZMANN M G，HIMMELSTOSS E A. Geomorphic and human influence on large-scale coastal change[J]. Geomorphology，2013，199：160-170.

[29] ANGAMUTHU B，DARBY S E，NICHOLLS R J. Impacts of natural and human drivers on the multi-decadal morphological evolution of tidally-influenced deltas[J]. Proceedings of the Royal Society A：Mathematical，Physical and Engineering Sciences，2018，474(2219)：20180396.

[30] HALL-SPENCER J M，HARVEY B P. Ocean acidification impacts on coastal ecosystem services due to habitat degradation[J]. Emerging Topics in Life Sciences，2019，3(2)：197-206.

[31] SYVITSKI J P M，et al. Sinking deltas due to human activities[J]. Nature Geoscience，2009，2(10)：681-686.

[32] World Bank Group. Disappearing coasts in the Maghreb：coastal erosion and its costs[R/OL]. [2025-05-15]. https://www.worldbank.org/en/country/morocco/publication/disappearing-coasts-in-the-maghreb-coastal-erosion-and-its-costs.

[33] U.S. Army corps of engineers. economic implications of shoreline change[R/OL]. [2025-05-15]. https://www.iwr.usace.army.mil/Missions/Coasts/National-Shoreline-Management/NSMS-Economic-Implications-of-Shoreline-Change/.

[34] United Nations Conference on Trade and Development. Climate change impacts on seaports：a growing threat to sustainable trade and development[R/OL]. [2025-05-15]. https://unctad.org/news/climate-change-impacts-seaports-growing-threat-sustainable-trade-and-development.

[35] MONDAL P，WALTER M，MILLER J，et al. The spread and cost of saltwater intrusion in the US Mid-Atlantic[J]. Nature Sustainability，2023，6：1352-1362.

[36] KANJIR U，BON N G. Spatial changes and population movements on the Albanian coastline[J]. ISPRS International Archives of the Photogrammetry，Remote Sensing and Spatial Information Sciences，2016，XLI-B8：1141-1146.

[37] ZSAMBOKY M，Fernández-Bilbao A，Smith D，et al. Impacts of climate change on disadvantaged UK coastal communities[R]. London：Joseph Rowntree Foundation，2011.

[38] 国家发展和改革委员会，水利部. 全国海堤建设方案[Z]. 2017.
National Development and Reform Commission，Ministry of Water Resources. National seawall construction plan[Z]. 2017.

[39] MASE H，TAMADA T，YASUDA T，et al. Analysis of climate change effects on seawall reliability[J]. Coastal Engineering Journal，2015，57(3)：1550010.

[40] 黎奕宏. 我国三类典型海岸工程对相邻海滩的影响研究[D]. 厦门：自然资源部第三海洋研究所，2018.
LI Yihong. Study on the influence of three types of typical coastal engineering to the adjacent beach in China[D]. Xiamen：Third Institute of Oceanography，Ministry of Natural Resources，2018.

[41] BULLERI F，CHAPMAN M G. The introduction of coastal infrastructure as a driver of change in marine environments[J]. Journal of Applied Ecology，2010，47：26-35.

[42] 中国新闻网. 修复海洋生态 擦亮蔚蓝底色[EB/OL]. [2025-05-15]. https://www.chinanews.com.cn/gn/2023/09-26/10084416.shtml.
China News. Restore the marine ecology and polish the blue background[EB/OL]. [2025-05-15]. https://www.chinanews.com.cn/gn/2023/09-26/10084416.shtml.

[43] 刘建辉，蔡锋，郑吉祥，等. 福建崇武半月湾渔港防波堤建成后下游海滩地形变化及养护对策研究[J]. 海洋工程，2013，31(6)：110-117.
LIU Jianhui，CAI Feng，ZHENG Jixiang，et al. Study on the effects of harbor breakwater on beach in Banyue Bay of Fujian Province and the nourishment countermeasure[J]. The Ocean Engineering，2013，31(6)：110-117.

[44] 雷刚，郑吉祥，何岩雨，等. 平潭综合实验区君山片区海洋生态保护修复项目：裕藩湾大澳湾海岸带保护修复工程波浪数模研究报告[R]. 厦门：自然资源部第三海洋研究所，2021.
LEI Gang，ZHENG Jixiang，HE Yanyu，et al. Marine ecological protection and restoration project of Junshan District，Pingtan Comprehensive Experimental Zone：wave simulation for coastal protection and restoration projects in Yufan Bay and Da'ao Bay[R]. Xiamen：Third Institute of Oceanography，Ministry of Natural Resources，2021.

[45] 曹超，戚洪帅，何岩雨，等. 莆田市湄洲岛海洋生态保护修复项目：黄金沙滩生态修复专题初步设计报告[R]. 厦门：自然资源部第三海洋研究所，2023.
CAO Chao，QI Hongshuai，HE Yanyu，et al. Marine ecological protection and restoration project of Meizhou Island，Putian City：preliminary design on ecological restoration of golden beach[R]. Xiamen：Third Institute of Oceanography，Ministry of Natural Resources，2023.

[46] PAXTON A B，RILEY T N，STEENROD C L，et al. Evidence on the performance of nature-based solutions for coastal protection：implications for researchers，practitioners，and managers from a systematic map[R]. NOAA Technical Memorandum NOS NCCOS 342. Washington：U.S. Department of Commerce，National Oceanic and Atmospheric Administration，2024.

[47] MORRIS R L，POMEROY A W，BOXSHALL A，et al. A blueprint for overcoming barriers to the use of nature-based coastal protection in Australia[J]. Frontiers in Environmental Science，2024，12：1435833.

[48] 韦佳培，张俊飚. 填海造地的生态之痛[J]. 生态经济，2022，38(3)：5-8.
WEI Jiapei，ZHANG Junbiao. The ecological pain of reclamation[J]. Ecological Economy，2022，38(3)：5-8.

[49] EISENBERG B，POLCHER V. Nature based solutions-technical handbook[R]. Stuttgart：University of Stuttgart，2019.

[50] MORRIS R L，KONLECHNER T M，GHISALBERTI M，et al. From grey to green：efficacy of eco-engineering solutions for nature-based coastal defence[J]. Global Change Biology，2018，24：1827-1842.

[51] UN Environment Programme. Ecosystem-based adaptation[EB/OL]. [2025-05-15]. https://www.unep.org/topics/climate-action/adaptation/ecosystem-based-adaptation/.

[52] European Union. EU strategy on adaptation to climate change[Z]. 2013.

[53] BILKOVIC D M，MITCHELL M，LA PEYRE M，et al. Living shorelines：the science and management of nature-based coastal protection[M]. Boca Raton：CRC Press，2017.

[54] POLK M A，EULIE D O. Effectiveness of living shorelines as an erosion control method in north Carolina[J]. Estuaries and Coasts，2018，41(8)：2212-2222.

[55] Stewardship Centre for British Columbia. Green shores for shoreline development：credits and ratings guide[Z]. 2020.

[56] FELTMATE B，HENSTRA D，THISTLETHWAITE J，et al. Rising seas and shifting sands：combining natural and grey infrastructure to protect Canada's coastal communities[R]. Waterloo：Intact Centre on Climate Adaptation，University of Waterloo，2021.

[57] SILLIMAN B R，HE Q，ANGELINI C，et al. Field experiments and meta-analysis reveal wetland vegetation as a crucial element in the coastal protection paradigm[J]. Current Biology，2019，29(11)：1800-1806.

[58] LEE S D. Coastal ecology：living shorelines reduce coastal erosion[J]. Current Biology，2019，29(11)：411-413.

[59] SMITH C S，RUDD M E，GITTMAN R K，et al. Coming to terms with living shorelines：a scoping review of novel restoration strategies for shoreline protection[J]. Frontiers in Marine Science，2020，7：434.

[60] National Oceanic and Atmospheric Administration. What is a living shoreline?[EB/OL]. [2025-05-15]. https://oceanservice.noaa.gov/facts/living-shoreline.html.

[61] 全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国海域使用管理法[Z]. 北京：法律出版社，2001.
Standing Committee of the National People's Congress. Law of the People's Republic of China on the administration of sea area use[Z]. Beijing：Law Press China，2001.

[62] 全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国海岛保护法[Z]. 北京：中国法制出版社，2010.
Standing Committee of the National People's Congress. Law of the People's Republic of China on the protection of sea islands[Z]. Beijing：China Legal Publishing House，2010.

[63] 张志卫，刘志军，刘建辉. 我国海洋生态保护修复的关键问题和攻坚方向[J]. 海洋开发与管理，2018，35(10)：26-30.
ZHANG Zhiwei，LIU Zhijun，LIU Jianhui. Key issues future direction of marine ecosystem protection and restoration in China[J].

Ocean Development and Management，2018，35(10)：26-30.

[64] 全国人民代表大会常务委员会．中华人民共和国海洋环境保护法[Z]．北京：法律出版社，2023.
Standing Committee of the National People's Congress．Law of the People's Republic of China on marine environmental protection [Z]．Beijing：Law Press China，2023.

[65] 自然资源部，生态环境部，国家林业和草原局，等．自然资源部 生态环境部 国家林业和草原局关于加强生态保护红线管理的通知（试行）[S/OL]．[2025-05-15]．https://gi.mnr.gov.cn/202208/t20220819_2756940.html.
Ministry of Natural Resources，Ministry of Ecology and Environment，National Forestry and Grassland Administration，et al．Notice of the Ministry of Natural Resources，the Ministry of Ecology and Environment and the National Forestry and Grassland Administration．Notice on strengthening the management of ecological conservation red lines (Trial)[S/OL]．[2025-05-15]．https://gi.mnr.gov.cn/202208/t20220819_2756940.html.

[66] 中华人民共和国国务院．生态保护补偿条例[Z]．北京：中国法制出版社，2024.
State Council of the People's Republic of China．Regulations on compensation for ecological protection[Z]．Beijing：China Legal Publishing House，2024.

[67] 戚洪帅，刘根，蔡锋，等．海滩修复养护技术发展趋势与前景[J]．应用海洋学学报，2021，40(1)：111-125.
QI Hongshuai，LIU Gen，CAI Feng，et al．Development trend and prospect of beach nourishment technology[J]．Journal of Applied Oceanography，2021，40(1)：111-125.

[68] 蔡锋．中国海滩养护技术手册[M]．北京：海洋出版社，2015.
CAI Feng．Chinese beach nourishment manual[M]．Beijing：China Ocean Press，2015.

[69] 徐伟，陈淳，刘建辉，等．海堤生态化建设适宜性评价研究及应用[J]．应用海洋学学报，2021，40(4)：659-668.
XU Wei，CHEN Chun，LIU Jianhui，et al．Study and application of the assessment on ecological seawall construction suitability[J]．Journal of Applied Oceanography，2021，40(4)：659-668.

[70] XU Y，CAI Y P，SUN T，et al．Ecological preservation based multi-objective optimization of coastal seawall engineering structures[J]．Journal of Cleaner Production，2021，296：126515.

[71] 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.
FAN Hangqing，HE Binyuan，WANG Xin，et al．The conception and practices of ecological sea dyke[J]．Guangxi Sciences，2017，24(5)：427-434.

[72] 李丽凤，刘文爱，蔡双娇，等．广西北海滨海国家湿地公园生态海堤建设模式研究[J]．湿地科学，2019，17(3)：277-285.
LI Lifeng，LIU Wenai，CAI Shuangjiao，et al．Models of ecological seawall construction in Beihai coastal national wetland park in Guangxi[J]．Wetland Science，2019，17(3)：277-285.

[73] 自然资源部．海洋生态修复技术指南（试行）[S/OL]．[2025-05-15]．https://gi.mnr.gov.cn/202107/t20210713_2662767.html.
Ministry of Natural Resources．Technical guidelines on marine ecological restoration (for Trial Implementation)[S/OL]．[2025-05-15]．https://gi.mnr.gov.cn/202107/t20210713_2662767.html.