应对气候变化的侵蚀海岸管理与防护技术探讨

许国辉[1,2,3], 刘海波[1,2], 陶 威[1,2], 齐浩森[1,2]

（1. 中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100;
2. 中国海洋大学 山东省海洋环境地质工程重点实验室, 山东 青岛 266100;
3. 自然资源部 海岸带科学与综合管理重点实验室, 山东 青岛, 266061）

摘 要: 全球气候变化导致了海平面上升与登陆台风强度增加, 加之我国河流流域实施环保措施引发河流入海泥沙量的减少, 使得我国海岸侵蚀灾害加剧。因此, 按照以往防护标准营造的海堤等海岸防护工程已经面临严峻的考验, 导致沿海地区自然环境、社会、经济面临重灾的风险加大。本文分析了全球气候变暖背景下引发我国海岸侵蚀的主要原因和发展态势, 提出了应对海岸侵蚀管理措施的建议; 基于海岸防护现状, 结合未来面临海平面变化与海岸水动力环境、泥沙的变化趋势, 探讨了值得关注研发的永久性与应急性新型海岸工程防护技术, 为我国海岸管理部门及海岸工程研究机构提供参考。

关键词: 全球气候变化; 海平面上升; 海岸侵蚀; 海岸管理; 海岸防护

中图分类号: P737.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-3682(2022)04-0428-13

doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20220524001

引用格式: 许国辉, 刘海波, 陶威, 等. 应对气候变化的侵蚀海岸管理与防护技术探讨[J]. 海岸工程, 2022, 41(4): 428-440. XU G H, LIU H B, TAO W, et al. Discussion on management and protection techniques for coastal erosion in response to climate change[J]. Coastal Engineering, 2022, 41(4): 428-440.

气候变化给经济社会带来的系统性影响是当今人类社会面临的严峻挑战, 是国际社会普遍关心的重大全球性问题。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)最新报告《2022 气候变化: 减缓气候变化》[1], 给出的全球气温将超过 1.5 ℃ 阈值的警告, 预示着气候变化产生的影响将会愈加强烈。作为全球气候变化的响应之一, 海岸侵蚀问题对我国沿海地区经济社会发展将产生深远的影响。海岸是陆地国土的前沿, 海岸侵蚀是海平面上升和极端海洋天气事件, 以及入海泥沙减少等原因所产生的第一自然反应, 继之的链式反应包含: 海水入侵、土壤盐碱化、洪水、土地淹没等, 沿海生物栖息地减缩、生物多样性和生态系统功能降低等。我国拥有 18 000 km 的大陆岸线和 14 000 km 的岛屿岸线, 海岸的侵蚀及淹没将对社会政治、经济等造成不可估量的负面影响。因应气候变化趋势, 将侵蚀海岸的管理与防护技术研究提升到发展战略层面, 建立合理的管理策略、研发节约有效的防护技术, 是当前和未来应重点关注的课题。

1 全球气候变化与流域环境治理对我国海岸侵蚀的影响

海岸带是陆海相互作用的地带, 对各种自然过程和人类活动等引起的环境扰动敏感。全球气候变化导致海平面上升、登陆台风加剧, 加之因流域生态环境治理导致入海河流泥沙减少, 这些自然变化和人类活动等各方面因素的影响, 使得我国沿海地区面临不断加剧的海岸侵蚀风险。

收稿日期: 2022-05-20

资助项目: 国家自然科学基金项目——风暴浪作用下海底高浓度含沙层形成过程的观测研究(41976049)

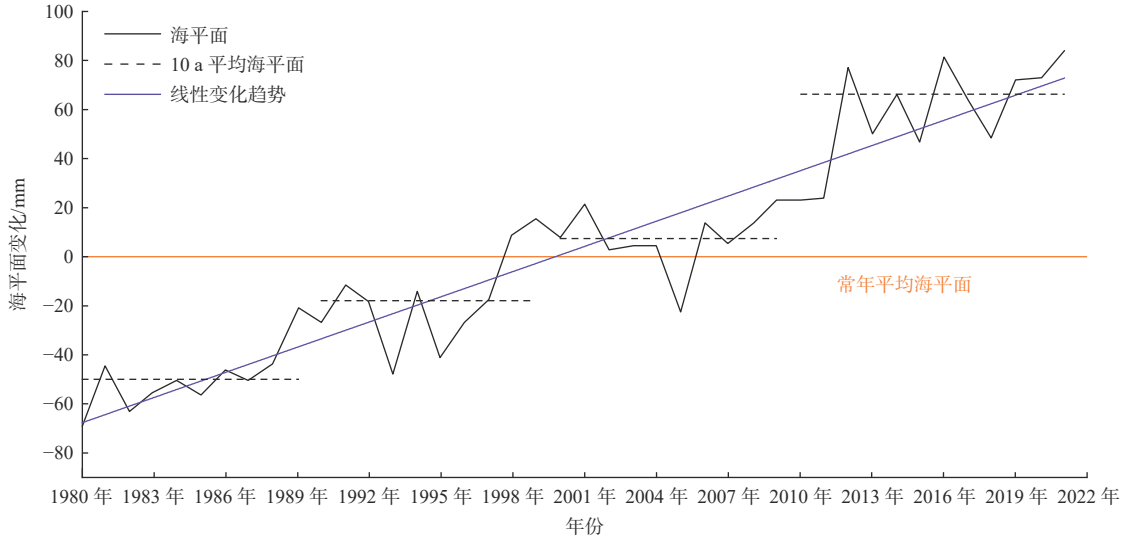
作者简介: 许国辉 (1972—), 男, 教授, 博士, 主要从事海洋工程地质方面研究. E-mail: xuguohui@ouc.edu.cn

（王佳实 编辑）

1.1　海平面上升的影响

自工业革命以来, 由于人类活动导致的全球性升温正在加速冰盖和冰川的融化。利用卫星和潮汐仪所记录潮位数据统计分析表明, 1900—2015 年全球平均海平面上升的平均速率为(1.6±0.4) mm/a, 其中, 1993—2015 年, 全球平均海平面上升速率从(2.1±0.1) mm/a 增加到(3.4±0.3) mm/a[2]。根据目前卫星数据的推测, 截至 2100 年, 海平面上升速率将达到 12.5 mm/a[3-4]。如果人类将碳排放量降低并且将气温保持在比工业化之前的温度高 2 ℃, 至本世纪末, 海平面将会上升 0.4~1.0 m [5-6]。

我国沿海海平面变化总体呈波动上升趋势。据 2021 年中国海平面公报, 1980—2021 年中国沿海海平面上升速率为 3.4 mm/a(图 1)[7]。海平面上升, 潮汐作用的范围伴随上升, 平均高潮水位的上升速度往往大于海平面上升的速度, 这导致潮汐作用的影响会扩展到海滩原先不易被侵蚀的更高部分, 抬升海岸侵蚀基面[8], 加上岸边或堤坝外水深增加影响下的波浪与潮汐、潮流增强影响, 会导致海岸侵蚀程度的增加。上升的海平面减小了河流入海的水力坡降, 抬高高潮水位, 潮流顶托作用增强, 使河流产生溯源堆积, 从而减少河流入海泥沙量, 导致在河口海岸和三角洲区域发生海岸线侵蚀后退。



注：数据来源于文献 [6]。

图 1　1980—2021 年中国沿海海平面变化

Fig. 1　Coastal sea level change in China, 1980—2021

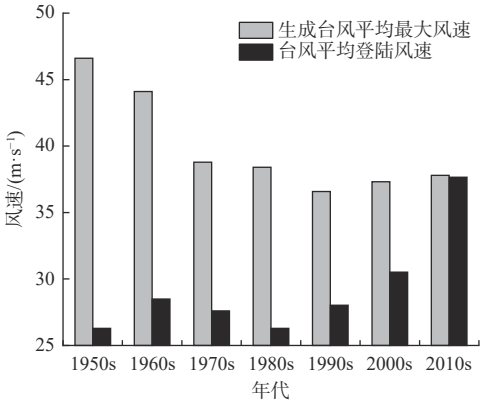
海平面上升会破坏海洋生态系统, 使得滨海湿地、红树林、海草床、珊瑚礁等退化, 失去其保护海岸的作用。海平面上升带来的潮滩淹没、盐水入侵、风暴潮灾害加剧等一系列灾害, 将进一步导致滨海湿地退化、损失, 红树林、珊瑚礁生态系统受损, 使海岸消浪能力减弱, 从而加剧海岸侵蚀。

1.2　登陆台风的影响

台风强度往往与灾害程度密切相关, 气候变暖, 引起台风强度变化。在过去的 100 a 间, 美国被飓风造成的损失中 85% 是由强飓风(最大平均风速大于 95 kn)造成的[9]。研究表明, 几乎所有的强台风都经历了一个快速增强的过程[10], 经历过快速增强的台风登陆后, 往往会造成重大的人员伤亡和财产损失。

台风强度变化受到途经环境条件的影响[11-12]。Emanuel[13] 参考卡诺热机做功过程, 探讨了海洋通过风蒸发反馈效应影响台风强度的物理过程, 提出了台风最大潜在强度(Maximum Potential Intensity, MPI)理论, 海温升高或流出层温度降低会有利于台风获得更多的感热和潜热通量, 从而提高其强度[14]。此外, 台风在经过洋

面时使海表暖水和次表层冷水混合，造成近表层海温降低，这一效应会限制台风强度的发展[15]。但是，海表暖水厚度较大时，台风对海水表层与次表层混合的海温降低效应减弱，台风强度降低效果减轻[16]。最新研究发现，升高的海面温度会减缓台风登陆后的衰减速度。根据模拟计算，登陆台风所储存的水分越多，其登陆后的衰减速度越慢，而升高的海面温度会给途经的台风提供更多的水分，从而减缓其登陆后的衰减速度[17]。由此可见，在全球温度升高的趋势下，台风登陆的强度会增强（图 2）[18]，台风对沿海或者侵入内陆的破坏作用会加大，台风灾害程度将加剧。



注：本图来源于文献 [17]。

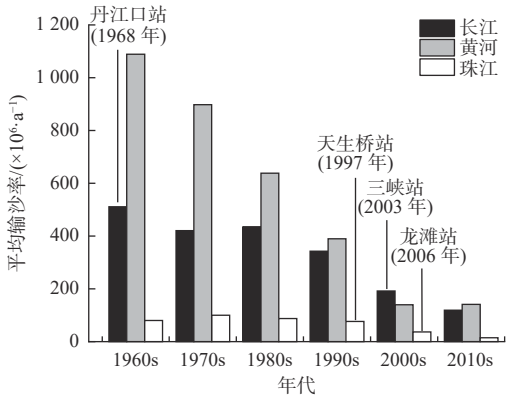
图 2 1950—2020 年西太平洋台风强度统计

Fig. 2 Typhoon intensity statistics in the western Pacific Ocean from 1950 to 2020

台风通过强风和剧烈的气压变化，使海面迅速增水，并伴随着强风和巨浪，在短时间内使海滩产生大规模的变形和泥沙再分布[19]。当风暴来临时，海滩上的沉积物被向海里输送，在近岸水面下形成沙坝，即“风暴剖面”（Storm Beach）。当风暴消退后，海面逐渐恢复平静，风浪的主导作用被涌浪取代，近岸泥沙被输送到岸边，沙坝被侵蚀并慢慢消失，原来的滩肩慢慢恢复，形成“常浪剖面”（Normal Beach）。然而，位于水面以上、在风暴潮期间发生蚀退的陡坎，却不能在风暴过后恢复，这一永久性海岸蚀退现象，在叠加上海平面上升后会更加严重。

1.3 入海河流输沙减少的影响

河流带来的大量泥沙会形成三角洲及其两侧的滨海平原，而河流输沙减少会使海岸侵蚀后退。现代黄河三角洲是 1855 年黄河改道入渤海而形成，入海泥沙约 88% 堆积在水下 8 km 宽度范围的三角洲前缘[20]，黄河在 6 100～2 000 a 前曾在江苏省北部入海，形成了许多沙洲，特别是从 1128 年夺淮入黄海以来，沿岸逐渐淤积，河口以约 54 m/a 的速度向海中延伸。自 1494 年黄河全线夺淮以来，苏北海岸线迅速东移，平均每年延伸 215 m，截至 1855 年形成了北达灌河口、南抵射阳的苏北黄河三角洲。1855 年后，黄河北归，巨量河流来沙锐减，苏北黄河三角洲岸线迅速蚀退，废黄河口附近海岸线蚀退了近 25 km[21]。



注：本图数据来源于文献 [22-29]。

图 3 长江、黄河、珠江入海输沙率

Fig. 3 The rate of sand transported into the sea by the Yangtze, Yellow and Pearl rivers

我国沿海入海河流泥沙减少的主要因素是河流上水坝的建设和流域生态的整治。我国兴建的大量水坝减少了入海河流的携沙量。根据国际大坝委员会的统计，截至 2020 年 4 月，全球现有大坝数量为 58 713 座，其中我国有 23 841 座，占 40.6%[22]。水坝的蓄水拦沙会显著降低河流输沙量（图 3）[23-30]。2013 年预测到 2030 年进入黄河的泥沙量（潼关水文站断面）将为 9×10^8~1×10^9 t/a，而潼关水文站 2001—2010 年实测年均输沙量为 3×10^8 t/a，2011—2020 年实测年均输沙量为 1.78×10^8 t/a[31]。2012 年 11 月，我国做出“大力推进生态文明建设”的战略决策，其后，江河流域治理、水土保持、生态环境修复等工程不断实施，由此进入河流的泥沙量减少，相应地，河流入海泥沙量减少。

20 世纪 50 年代开始，我国多数松散沉积物构成的海岸和珊瑚礁海岸，由以前的淤积或平衡状态转向了

侵蚀; 20 世纪的后 30 a, 海岸侵蚀现象普遍, 并呈加剧趋势[32-33]。当前我国海岸侵蚀依然是不断发展的态势。在可预见的未来, 河流入海泥沙量的减少将导致岸滩泥沙的补给量减少, 而海平面的上升与台风强度的增加将导致岸滩泥沙的损失量增加, 我国海岸的侵蚀情况将会更加严重。然而, 以我国现有的海岸管理和设施防护水平, 在海平面上升、天文大潮和风暴潮耦合叠加的极端情况下, 我国在 2050 年的海洋经济损失可能超过 3.5 万亿元, 占海洋生产总值的 9.39%[34]。应对全球气候变化, 海岸作为沿海经济的保护屏障, 需要对海岸侵蚀问题高度重视, 对侵蚀海岸实施科学有序的管理, 提供我国沿海经济社会发展的安全保障。

2　侵蚀海岸的应对管理

鉴于前述造成海岸侵蚀的原因很多具有不可抗拒的特点, 比如在海平面上升的情景下, 大多数地区历史上百年一遇水位将变为一年一遇, 海岸侵蚀危害将不断加剧, 既有建设的海岸防护体系将变得脆弱乃至失效。因此, 国家在战略层面上, 建立科学有效的侵蚀海岸管理制度, 应对海岸侵蚀问题, 减少对海岸经济和人员安全的损害, 迫在眉睫。

2.1　侵蚀海岸管理的计划安排

2.1.1　侵蚀海岸管理计划的阶段设置

我国海岸类型从物质组成上划分为基岩海岸、砂砾质海岸、粉砂淤泥质海岸和生物海岸, 每种类型海岸对海洋水动力变化的响应不同, 同样质地的海岸因处于不同的海洋动力环境其侵蚀进程也不同。为此, 从科学管理角度考虑, 应系统性地区分对待, 从形成整体认识、到分区、到具体管理措施, 应分阶段进行。

1)政策制定阶段: 区分不同组成类型、不同功能的海岸, 对全国侵蚀海岸提出管理实现目标, 为侵蚀海岸管理提供指导, 然后通过行政或立法手段给出管理目标实现的政策框架。

2)管理策略制定阶段: 遵循前述阶段的目标, 开展海洋水动力及海岸侵蚀规律与态势的整体性研究, 给出海岸侵蚀态势和可能侵蚀强度的区域性判断。由于海岸水动力的连通及沿岸输沙作用, 治理某一局部岸段可能对相邻海域造成不利影响, 所以此研究应覆盖整个沿海岸段。但是研究比尺可相对小些, 同时为后续详尽的侵蚀岸段管理提供普遍性的指导策略, 为海岸管理部门提供计划的组织和行政管理的建议。此阶段可遵循 7 个步骤[35]: ①问题与需求的调查; ②政策审查; ③目标和任务的制定; ④规划前的评审和初步策略报告(资源、法律/机构、社会经济、规划范围等); ⑤规划项目的组织(资金、人员、器材、设备、业务策略); ⑥主计划的实施(资料收集、分析、绘图、公众听证等); ⑦草案稿、草案修改稿、最终策略的产生。

3)管理计划制定阶段: 在管理策略确立基础上, 侵蚀海岸管理的主体计划即可详细制定, 用于指导各个具体岸段的侵蚀海岸管理的实施。

4)管理实施阶段: 在管理计划获得批准执行后, 研究分析各个具体岸段的侵蚀强度和危害性, 根据侵蚀造成危害程度和轻重缓急, 分步骤做出预算, 具体施行防护方案。

2.1.2　侵蚀海岸防护方案的制定程序

在侵蚀海岸管理实施阶段, 面临是否实施海岸防护工程的问题。海岸防护工程涉及对社会、经济和环境等方面的影响, 为获得最优的海岸防护工程方案, 需要合理的程序加以保证。为此, 侵蚀海岸防护方案的制定, 应遵循循序渐进的程序, 可划分为 4 个阶段: ①可行性研究阶段, 根据工程要求和实际情况初步提出 2～3 个合理的工程方案; ②环境影响研究阶段, 根据提出的可行性方案, 分别对工程施工期间和完工后进行环境影响评价, 如施工期间产生的污染是否会对附近海域造成影响, 施工后当地的水动力条件发生的变化, 变化后的水动力条件对当地及上下游海岸产生的影响等; ③方案比选研究及确定阶段, 根据实际需要, 开展必要的模拟调研工作, 比较不同方案的费用、施工、效果、环境影响等内容, 确定最佳方案; ④方案实施阶段, 根据多个方面的综合对比确定最佳方案进行施工。在施工过程中如遇前期尚未考虑到的情况, 需要进行及时评估并对方案进行修正。

2.2 侵蚀海岸管理的应对机制

海岸是稀缺性的公共资源，海岸带管理是事关国计民生的公共事务，因此，海岸侵蚀的管理也被纳入公共管理事务，具体应包括法律管理、行政管理和财政管理等多个方面。

2.2.1 侵蚀海岸管理的立法与执法

海岸侵蚀问题受到世界各沿海国家的普遍重视，欧美发达国家率先制定并不断更新有关海岸侵蚀的法律法规以治理海岸侵蚀灾害。我国关于侵蚀海岸管理的法律法规散见于其他与海洋相关的法律法规中，相关标准、适用范围、体制机制的专门法律法规有待制定[36-37]，仅有部分沿海省市积极制定了相关地方性法规。因此，应对海岸侵蚀灾害问题，有必要把建立和健全与海岸侵蚀相关的法律法规及其法制化提上海岸带管理日程[38]。

1)强化侵蚀海岸管理的法制化意识，统筹协调相关政策法规

侵蚀海岸问题的管理制度涉及多部门、多领域的规划和管制政策以及综合性的统筹协调机制[39]，这种跨领域、跨部门、跨区域，自上而下建立的管制政策和统筹协调机制必须通过法律来保障，使保护海岸、防范海岸侵蚀淤积灾害的管理有法可依。

2)加强海岸带立法工作，为侵蚀海岸管理提供法制基础

将涉及侵蚀海岸管理的法律文件进一步梳理、归并和修订，并进行侵蚀海岸管理的立法工作。同时明晰侵蚀海岸管理的海域范围和管理主体，健全相关标准和技术规范，尽快制订和出台《海岸侵蚀灾害管理法》，以形成有约束力的侵蚀海岸管理法律法规，为海岸有序开发和海岸侵蚀防护保驾护航。

3)鼓励和规范地方海岸带管理立法，将侵蚀海岸管理法制化

众多沿海省市积极探索海岸带管理立法工作，在一定程度上弥补了国家海岸带专门法律的缺失。在这些地方性法规和规章中，多有涉及到海岸侵蚀、海洋灾害和海洋规划等事项的条款。因此，地方政府应根据当地海岸带保护和管理的特殊需要，制定符合当地实际地方性的侵蚀海岸管理制度，使侵蚀海岸管理法制化、规范化和科学化。

4)推进侵蚀海岸管理的执法体系建设，做到有法必依、执法必严、违法必究

侵蚀海岸管理的执法，需要建立统一领导下议事协调组织，制定政策和计划，对侵蚀海岸管理涉及的相关机构和部门进行协调。同时，建立沿海地区间和部门间侵蚀海岸管理的协调机制，形成跨部门、跨系统的执法能力，以提高侵蚀海岸管理的执法效率。此外，可成立相应的联合执法指挥机构，对不同的管理机构进行法律和行动上的指导。

5)建立法律监督机制

对侵蚀海岸管理实时公开透明的运作机制，各种信息及时公之于众，使大众对侵蚀海岸造成的社会经济、国家发展的危害有清楚的认识，对侵蚀海岸管理法律心怀敬意、自觉守法、积极参与到侵蚀海岸的保护中，促进我国侵蚀海岸管理法律法规的体系化、规范化。

2.2.2 侵蚀海岸管理的行政与决策

2019 年，自然资源部编制了《海岸带保护修复工程实施方案》[40]，希望通过海岸带生态系统，实现防潮御浪、固堤护岸的效能，提升沿海地区抵御风暴潮等灾害能力，构建生态、减灾协同增效的海岸综合防护体系。实际上，我国海岸管理涉及到部门、行业、行政管辖级别等不同的单元，错综复杂。在应对海岸侵蚀这一共同的灾害问题时，应该实现统一行政与决策。

1)建立侵蚀海岸管理跨部门联席会议机制

目前对海岸带管理实行的是分行业、分部门、分行政等级的管理模式，行业间矛盾重重，部门利益冲突加剧[41]，造成陆海二元分割、行政部门分割和行政辖区分割等根深蒂固的问题。侵蚀海岸管理需由层级更高的政府统一实施，建立包括管理体制、组织架构、法规程序和资金安排等方面的制度、办法，协调各部门之间以及上级与地方管理机构之间的管理工作[42]。应探索建立侵蚀海岸管理跨部门联席会议制度，设立侵蚀海

岸管理议事协调机构, 加强对海岸带事务的统一协调和管理。

2)建立侵蚀海岸管理的跨区域协调机制

打破行政区划“壁垒”, 加强区域合作, 通过建立跨行政区的区域性侵蚀海岸管理协调机构, 协调区域内各行政单元侵蚀海岸管理和海洋灾害应对等问题。加强与邻近沿海地区的协调, 建立政府部门间的协调机制, 构建侵蚀海岸管理的区域间协调与事务会商制度, 综合协调区域间侵蚀海岸管理的各种工作。

3)强化责任分工, 建立侵蚀海岸管理的“湾长制”

强化侵蚀海岸管理的责任管理和执法监督, 建立考核问责机制, 将侵蚀海岸管理的“湾长制”纳入党政领导干部考核体系。

4)加强科学决策, 设立侵蚀海岸管理决策咨询机制

在各行政层级行政机构上建立专门的侵蚀海岸管理决策咨询委员会, 由领导小组、专家组和协调管理办公室构成, 促进侵蚀海岸管理的科学决策。由海洋科学、海岸工程、法律和经济等专业的专家等组成侵蚀海岸决策咨询专家组, 聚焦侵蚀海岸管理的全过程专业技术问题, 负责提供政策建议并进行相关政策评价。政府针对侵蚀海岸的政策、决策、工程建设项目等, 要广泛征集环保社团和环保专家的意见, 并给予及时反馈。有必要借鉴美国《加州海岸法》的决策机制, 通过一个多方利益相关者的研讨会, 与各类实体和机构签署协议, 有助于为侵蚀海岸管理决策提供总体指导和参照[43]。

2.2.3　侵蚀海岸管理的财政与补贴

目前侵蚀海岸管理的资金管理机制匮乏, 主要依赖财政资金的支持, 社会资金投入较少, 尚未建立长效稳定的侵蚀海岸管理资金募集与投入机制。

1)健全侵蚀海岸管理的资金投入机制, 充分调动公共财政力量

为保障侵蚀海岸管理的资金供给, 拓宽资金渠道, 建立多元投入机制, 包括专项经费划拨、经济补贴和补偿资金等拨付, 为侵蚀海岸管理提供资金保障。在发挥公共财政引导作用的同时, 应充分利用市场机制, 创新投资形式, 创造企业、社会和个人参与的机会, 拓宽投资渠道, 形成侵蚀海岸管理的充足资金来源, 建立多元化投入、市场化运作的投融资机制和长效稳定的侵蚀海岸管理资金投入机制。鼓励探索建立海岸侵蚀修复基金制度, 或者通过发行侵蚀海岸管理债券的方式筹集海岸防护资金, 也可通过转移支付的手段, 宏观调控各个部门的海岸带管理开发资金, 实现侵蚀海岸管理效率的提高。

2)设立或增加海岸整治的专项经费, 确保有关整治项目的实施

2010 年以来, 我国利用海域使用金返还资金支持开展海域海岸带整治修复工作[44], 在原生海岸地貌景观恢复、堤坝拆除与清淤、海岸景观优化与美化、海岸侵蚀防护等方面实施了十多项海域海岸带整治修复项目。《青岛市海岸带保护与利用管理条例》[45] 提出建立海岸带整治修复资金投入机制, 并鼓励和引导社会资本参与海岸带整治修复; 海岸带保护与利用所需经费纳入同级财政预算。

2.3　侵蚀海岸管理的信息方法

我国海岸类型多样、海岸侵蚀危害严重, 迫切需要建立海岸侵蚀基础信息系统、提高海岸侵蚀监测技术能力、完善海岸侵蚀监测评价体系, 为海岸侵蚀科学管理提供决策基础。具体而言, 海岸侵蚀信息管理主要环节包括: 通过长期动态监测, 从海岸侵蚀的数据收集、交换到数据利用, 建立侵蚀海岸管理信息系统。对海岸侵蚀区域进行长期连续现场观测, 建立海岸侵蚀灾害基础信息数据库[46], 再利用 3S, 即地理信息系统(Geographic Information System, GIS)、全球定位系统 (Global Positioning System, GPS)、遥感(RemoteSensing, RS), 以及数学建模等先进技术手段对海岸侵蚀进行综合评价, 剖析海岸侵蚀的动态过程与作用机制, 并提出侵蚀海岸管理措施和建议, 为我国海岸侵蚀灾害防护和管理提供新的思路、方法和政策设计。

2.3.1　海岸侵蚀数据库建设

侵蚀海岸管理的基础工作是海岸侵蚀数据的获取、分析和模拟, 应加强海岸侵蚀淤积基础调查研究, 建

立统一、规范、便于共享的海岸侵蚀数据标准；优化海岸侵蚀数据采集方法，建立海岸侵蚀信息数据库；融入人工智能技术，优化侵蚀海岸管理信息系统，实施智慧化管理；基于互联网+、大数据、物联网和遥感技术，整合与挖掘海岸带综合地质数据资源，建设海岸带地质大数据信息服务平台，开发海岸带环境地质可视化、监测预警分析功能[47]，实现海岸带的监测信息管理与监测预警系统的共享访问。

2.3.2 海岸侵蚀的技术监测

海岸侵蚀监测对于海岸带社会经济发展与生态环境保护有着重要意义，可为海岸系统演变提供重要的观测信息，是海岸侵蚀研究和管理不可或缺的第一手资料[48]。伴随着信息时代的到来，传统的海洋监测信息系统已不能满足当前海岸带环境保护的需要，建立新形势下的海岸带环境监测系统迫在眉睫。海岸侵蚀监测的手段和方法已从最初的定性静态描述、量化方法引入和多学科研究方法介入等，演变成目前的遥感技术、地理信息计划和全球定位系统等 3S 技术的广泛嫁接和应用[49]，基于高新技术手段的现场观测、采集高精度的数据已成为发达国家和地区开展海岸侵蚀监测的重要组成部分[50]。我国沿海 50 余个海洋站利用全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）开展的连续观测，部分岸段使用船载海陆一体化三维地形测量技术用于海岸带地区水上岸堤护坡和防潮坝位移监测[51]，航测遥感监测海岸侵蚀，无人机、无人船和水下机器人等应用到海岸侵蚀的辅助性动态监测活动中[52]，可使海岸侵蚀监测的技术精度、覆盖广度不断提高，且减少人力、降低成本。

2.3.3 海岸侵蚀监测的体系化建设

海岸侵蚀具有长期性、突发性、局部性等特点，为把握海岸侵蚀的规律和量级，需要建立海岸侵蚀监测体系：①建立海岸侵蚀常态化调查和监测制度[53]，为侵蚀海岸管理提供长期、有效的基础数据支撑，建立国家、省、市、县四级海域使用动态监视监测体系，形成业务化运行机制；②加强海岸侵蚀监测预报、预警和评估体系建设；③建立完善的海岸侵蚀动态监测网络体系，运用等多种监测手段，在重点岸段设置动态变化监测断面，进行长时间尺度的周期性监测，及时掌握海岸侵蚀灾害的发展变化以及与海岸侵蚀密切相关的人类活动和自然环境变化情况，强化海平面上升和台风风暴潮侵蚀海岸的预警预报服务。

2.3.4 对海岸侵蚀进行科学评价

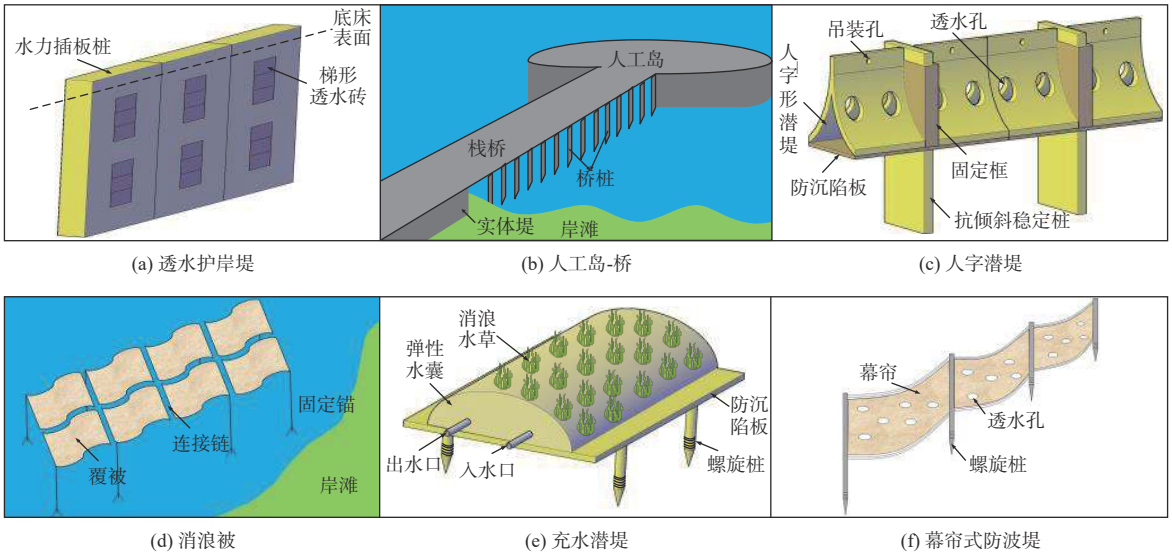
海岸侵蚀的防护，需要根据侵蚀与灾害程度，轻重缓急和经济能力来安排防护任务，因此需要对海岸侵蚀开展评价。评价内容主要包括海岸侵蚀脆弱性、海岸侵蚀风险和海岸侵蚀灾害损失等。在评价中注意评价因子选取和方法运用的适宜性、科学性的研究。

3 新型海岸防护工程技术探讨

我国沿海地区 11 个省份，集中了全国 70% 的大中城市，用 13% 的国土面积滋养了全国 43% 的人口，创造了 53% 的国民生产总值，吸引了 45% 的全社会固定资产投资[54]。对于古时候的人们来说，要适应海面上升，并没有什么难度，他们只要朝陆地方向更高一些的地方迁移就可以了。不过现代社会不一样，事情变得没有那么简单[55]。由于沿海地区很多经济发展设施可能已经处于海岸侵蚀岸段，若采用向陆地退缩方式可能造成不可承受的经济损失。因此，在科学认识海岸侵蚀规律基础上，开展人工防护工程，保护不能退缩的岸段，或者向海增加岸滩宽度，抵御海平面上升和风暴潮侵袭，是对海岸侵蚀实施有效管理必不可少的一环。

既有的传统海岸防护工程主要有海堤、护岸、潜堤、丁坝等，工程建造技术因具体工程项目不同而各有差异，但总体技术形式多用土石堆砌和砌块护面，或者钢筋混凝土制作的沉箱、桩基、半圆筒等，形成硬质长期防护工程[56]。传统形式海岸工程结构物建设，面临巨大的土方、石料、钢筋、水泥和砂石料的用量，不仅工程造价高昂，也因为采石、钢筋和水泥的大量使用会破坏环境、影响生态。防护工程若布置不合理，其拆除也会因工程量巨大而产生很高的费用。在海岸侵蚀加剧的情势下，海岸防护工程若以传统形式建造，必然会

产生难以承担的社会经济负担，因此需要研发更加经济、环保的新型海岸工程防护技术。以下探讨 6 种值得关注的新型海岸防护工程技术（图 4）。



(a) 透水护岸堤　(b) 人工岛-桥　(c) 人字潜堤

(d) 消浪被　(e) 充水潜堤　(f) 幕帘式防波堤

图 4　新型海岸防护工程技术型式

Fig. 4　New type of coastal protection engineering technology

3.1　永久性工程

1）透水水力插板桩堤护岸技术

水力插板桩堤是胜利油田何富荣教授级高级工程师发明的一种新型桩堤建造技术[57-59]。该技术将质量易控的预制砼板，以水力冲沉技术深插入地层，并将各个桩板间固化连接，形成整体连续的根基深固的桩堤。将该技术应用于护岸时，桩堤地下部分若为砼板实体，会阻断陆域地下水向海洋的输送，造成负面的环境影响，可加以改进，将桩堤地下部分设计为透水形式。将每个砼板地下部分中间设置水平截面的梯形空洞，并用与该空洞相匹配的透水阻土砖充填，实现桩堤透过地下水的功能（图 4a）。

2）双岛桥岬控工程技术

自然界中 2 个基岩岬角控制的海湾，因在基岩岬角的波能辐聚作用和在海湾岸线的波能辐散作用，使得海湾处不至于产生过大的增水现象和强烈的波浪作用，以坚硬的基岩岬角对波浪的破碎，有效地保护了海湾地区。模仿自然海岸的这一特点，海岸防护工程采用了岬控工程这一型式。但以往建设中形成的是不透水的人工岬角，使得掩蔽的海湾区域中水体流动性差，造成水体环境质量恶化。参考青岛栈桥的建造型式，针对缺少岬角掩护的平直海岸，利用 2 个相邻设置的人工岛-桥建设岬角，可避免发生湾内水质恶化的发生。人工岛-桥岬控工程技术，主要是在近于垂直于岸线方向布置延伸向海的栈桥。栈桥自陆至低潮位采用实体堤坝，继续向海则采用透水桥桩，一般将栈桥头部的人工岛延伸至海底泥沙起动线以下（图 4b）。人工岛外缘墙体和桥桩等，在地层适合施工情况下，可以考虑使用水力插板桩，减少工程费用。

3）人字形人工鱼礁潜堤工程技术

潜堤是护岸工程与促淤工程中常用的水下建筑物，不影响海岸美观，可保持海岸生态环境。当波浪经过潜堤时，会发生反射，部分波能被反射波带入海洋，部分波能在潜堤附近耗损，从而降低水流挟沙能力，使泥沙会部分沉积下来，促使滩面淤高而保护海滩。人工鱼礁是在海中设置人工构造物来改善海洋环境，营造动、植物良好栖息生活环境，为鱼类等游动生物提供繁殖、生长发育、索饵等场所，达到保护、增殖和提高渔获量的目的。将潜堤的海岸防护优势和人工鱼礁的生态优势相结合，可以考虑研发一种人字形人工鱼礁潜堤技

术(图 4c)。人字形堤身迎浪面的弧线使水流上涌冲击顶部过流的水体,产生强烈水体紊动而消浪,人字形堤身内部空间可以为鱼类提供栖息场所。

3.2 应急性工程

台风风暴潮的增水、大浪是海岸侵蚀和损毁的重要水动力,若以完全防止台风侵袭来进行海岸防护工程设计,耗资巨大。因台风作用时间相对于 1 a 而言仅是短期作用,借鉴河流汛期防洪的一些准备措施,可以考虑设置应急性的临时海岸防护措施,来消减台风在海岸的增水和大浪。以下探讨的应急性海岸消波设施,可以便利地临时布置在沿岸,并在台风结束后,方便地回收再利用。

1)海岸消浪被

在海岸观察到,厚厚的大片浒苔聚集在岸边时具有很好的消浪效果,由此可以考虑设计临时性的海岸消浪被。海岸消浪被类似于野外帐篷中用的充气垫子。在台风来临前,将多个海岸消浪被连接起来,沿着台风可能侵袭的海岸布设在海面上,其宽度设置为接近 1 个波长,利用海底锚固定,防止漂走(图 4d)。海岸消浪被使用的制作材料密度大于海水,因充气可漂浮在海面上,由于其大面积覆盖于海面,可以压制水深变浅导致的波高增大和增水效应。

2)充水潜堤

将类似于水龙带的材料制作成半圆,与相对硬质的平面材料衔接,制作成半圆形的水囊。水囊半圆形部分表面设计轻质的仿生草辅助消浪,底部平面部分两侧设计延伸出来的用于固定于海底的襟翼。在未冲水的情况下,将平时卷起来的水囊展开平铺到沿岸海底,将头部带有螺旋板的钢管旋入地层中,形成固定桩,将水囊的襟翼固定在钢管桩上。利用高压水泵向水囊中充水,水囊在海底形成半圆形的潜堤(图 4e)。

3)幕帘式防波堤

幕帘式防波堤类似于常见的悬挂条幅,自海底到海面以上,布设在沿岸。幕帘使用的材料应具有较好的强度,再配置 2～3 道绳缆,提高抗拉性能。将头部带有螺旋板的钢管桩旋入地层,形成具有一定间隔的固定桩,将幕帘式防波堤张拉平直,固定在钢管桩上(图 4f)。张拉紧的幕帘虽然具有一定柔性、可以被波浪推动,但是能够阻挡波浪水质点的自由运动,起到消减波浪的作用。

4 结 语

在全球气候变化导致海平面上升、登陆台风强度增加和我国海岸河流入海泥沙减少的趋势下,我国沿海地区的海岸侵蚀不可避免,由此造成沿海地区经济社会发展的障碍性影响。为此,政府层面在应对海岸侵蚀的管理方面需要做出统筹安排,尽快建立合理的制度和程序,以便形成系统性的应对措施,避免或减少灾害损失。科技人员应积极研发新型海岸防护技术,在实现对海岸侵蚀具有充分有效的防护功能的同时,减少海岸防护工程的建设成本,最大限度地保护环境。

参考文献 (References):

[1] IPCC WGIII, Sixth Assessment Report. Climate change 2022: mitigation of climate change[R/OL](2022-04) [2022-05-20]. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/.

[2] DANGENDORF S, MARCOS M, PPELMANN G, et al. Reassessment of 20th century global mean sea level rise[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, 114(23): 5946-5951.

[3] NEREM R S, CHAMBERS D P, CHOE C, et al. Estimating mean sea level change from the TOPEX and JASON altimeter missions[J]. Marine Geodesy, 2010, 33(1): 435-446.

[4] MILLER K, SCHMELZ J, BROWNING J, et al. Ancient sea level as key to the future[J]. Oceanography, 2020, 33(2): 32-41.

[5] RASMUSSEN D J, BITTERMANN K, BUCHANAN M K, et al. Extreme sea level implications of 1.5 °C, 2.0 °C, and 2.5 °C temperature sta-

bilization targets in the 21st and 22nd century[J]. Environmental Research Letters, 2018, 13: 034040.

[6] BAMBER J L, OPPENHEIMER M, KOPP R E, et al. Ice sheet contributions to future sea-level rise from structured expert judgment[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2019, 116(23): 201817205.

[7] 自然资源部海洋预警监测司. 2021年中国海平面公报[R/OL]. (2022-04-08)[2022-05-20]. http://gi.mnr.gov.cn/202205/t20220507_2735509.html. Marine Division of Early Warning Monitoring, MNR. China Sea level bulletin in 2021[R/OL]. (2022-04-08)[2022-06-29]. http://gi.mnr.gov.cn/202205/t20220507_2735509.html.

[8] 季子修. 中国海岸侵蚀特点及侵蚀加剧原因分析[J]. 自然灾害学报, 1996(2): 69-79. JI Z X. The characteristics of coastal erosion and cause of erosion[J]. Journal of Natural Disasters, 1996(2): 69-79.

[9] PIELKE J R A, GRATZ J, LANDSEA C W, et al. Normalized hurricane damage in the United States: 1900 normalized hurricane damage in the United States: 1900—2005[J]. Natural Hazards Review, 2008, 9(1): 29-42.

[10] LEE C Y, TIPPETT M K, SOBEL A H, et al. Rapid intensification and the bimodal distribution of tropical cyclone intensity[J]. Nature Communications, 2016, 7(1): 10625.

[11] EMANUEL K A. Will global warming make hurricane forecasting more difficult?[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017, 98(3): 495-501.

[12] WANG Y, RAO Y, TAN Z M, et al. A statistical analysis of the effects of vertical wind shear on tropical cyclone intensity change over the western North Pacific[J]. Monthly Weather Review, 2015, 143(9): 3434-3453.

[13] EMANUEL K A. The maximum intensity of hurricanes[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1988, 45(7): 1143-1155.

[14] EMANUEL K A, SOLOMON S, FOLINI S D, et al. Influence of tropical tropopause layer cooling on Atlantic hurricane activity[J]. Journal of Climate, 2013, 26(7): 2288-2301.

[15] SHAY L K, GONI G, GONIAND J, et al. Effects of a warm ocean feature on Hurricane Opal[J]. Monthly Weather Review, 2000, 128(5): 1366-1383.

[16] CHAN J C L, DUAN Y, SHAY K. Tropical cyclone intensity change from a simple ocean-atmosphere coupled model[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2001, 58(2): 154-172.

[17] LI L, CHAKRABORTY P. Slower decay of landfalling hurricanes in a warming world[J]. Nature, 2020, 587(7833): 230-234.

[18] 康斌. 我国台风灾害统计分析[J]. 中国防汛抗旱, 2016, 26(2): 36-40. KANG B. Statistical analysis of typhoon disasters in China[J]. China Flood Control and Drought Relief, 2016, 26(2): 36-40.

[19] COCO G, SENECHAL N, REJAS A, et al. Beach response to a sequence of extreme storms[J]. Geomorphology, 2013, 204(1): 493-501.

[20] 李广雪, 岳淑红, 赵东波, 等. 黄河口快速沉积及其动力过程[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(3): 29-36. LI G X, YUE S H, ZHAO D B, et al. Rapid deposition and dynamic processes in the modern Yellow River mouth[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2004, 24(3): 29-36.

[21] 张忍顺. 苏北黄河三角洲及滨海平原的成陆过程[J]. 地理学报, 1984, 39(2): 173-183. ZHANG R S. Land-forming history of the Yellow River delta and coastal plain of North Jiangsu[J]. Journal of Geography, 1984, 39(2): 173-183.

[22] 陈秀秀, 叶盛, 潘海龙, 等. 水库运行对河流水文情势影响分析——以龙羊峡、小浪底水库为例[J]. 中国农村水利水电, 2022(10): 96-104. CHEN X X, YE S, PAN H L, et al. Impacts of reservoir operation on river hydrological regime: case study of Longyangxia and Xiaolangdi reservoirs[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(10): 96-104.

[23] 田清. 近60年来气候变化和人类活动对黄河、长江、珠江水沙通量影响的研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2016. TIAN Q. Impacts of climate change and human activity on the water and sediment flux of the Yellow. Yangtze and Pearl River basins over the past 60 years[D]. Shanghai: East China Normal University, 2016.

[24] 中华人民共和国水利部. 2014年中国河流泥沙公报[EB/OL]. (2014-12-31)[2022-05-20]. http://xxzx.mwr.gov.cn/xxgk/gbjb/zghlnsgb/201711/t20171122_1014984.html. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Bulletin on river sediment of China in 2014[EB/OL]. (2014-12-31)[2022-05-20]. http://xxzx.mwr.gov.cn/xxgk/gbjb/zghlnsgb/201711/t20171122_1014984.html.

[25] 中华人民共和国水利部. 2015年中国河流泥沙公报[EB/OL]. (2015-12-31)[2022-05-20]. http://xxzx.mwr.gov.cn/xxgk/gbjb/zghlnsgb/201711/t20171122_1014985.html. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Bulletin on river sediment of China in 2015[EB/OL]. (2015-12-31)[2022-05-20]. http://xxzx.mwr.gov.cn/xxgk/gbjb/zghlnsgb/201711/t20171122_1014985.html.

[26] 中华人民共和国水利部. 2016年中国河流泥沙公报[EB/OL]. (2017-09-08)[2022-05-20]. http://xxzx.mwr.gov.cn/xxgk/gbjb/zghlnsgb/201711/t20171122_1014986.html. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Bulletin on river sediment of China in 2016[EB/OL]. (2017-09-08)[2022-05-20]. http://xxzx.mwr.gov.cn/xxgk/gbjb/zghlnsgb/201711/t20171122_1014986.html.

[27] 中华人民共和国水利部. 2017年中国河流泥沙公报[EB/OL]. (2018-09-28)[2022-05-20]. http://xxzx.mwr.gov.cn/xxgk/gbjb/zghlnsgb/201809/t20180928_1048836.html. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Bulletin on river sediment of China in 2017[EB/OL]. (2018-09-28)[2022-05-20]. http://xxzx.mwr.gov.cn/xxgk/gbjb/zghlnsgb/201809/t20180928_1048836.html.

[28] 中华人民共和国水利部. 2018年中国河流泥沙公报[EB/OL]. (2019-06-18)[2022-05-20]. http://xxzx.mwr.gov.cn/xxgk/gbjb/zghlnsgb/201912/t20191231_1384652.html. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Bulletin on river sediment of China in 2018[EB/OL]. (2019-06-18)[2022-05-20]. http://xxzx.mwr.gov.cn/xxgk/gbjb/zghlnsgb/201912/t20191231_1384652.html.

[29] 中华人民共和国水利部. 2019年中国河流泥沙公报[EB/OL]. (2020-07-24)[2022-05-20]. http://xxzx.mwr.gov.cn/xxgk/gbjb/zghlnsgb/202007/t20200724_1420203.html. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Bulletin on river sediment of China in 2019[EB/OL]. (2020-07-24)[2022-05-20]. http://xxzx.mwr.gov.cn/xxgk/gbjb/zghlnsgb/202007/t20200724_1420203.html.

[30] 中华人民共和国水利部. 2020年中国河流泥沙公报[EB/OL]. (2021-07-04)[2022-05-20]. http://xxzx.mwr.gov.cn/xxgk/gbjb/zghlnsgb/202109/t20210915_1543982.html. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Bulletin on river sediment of China in 2020[EB/OL]. (2021-07-04)[2022-05-20]. http://xxzx.mwr.gov.cn/xxgk/gbjb/zghlnsgb/202109/t20210915_1543982.html.

[31] 胡春宏, 张双虎, 张晓明. 新形势下黄河水沙调控策略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(1): 122-130. HU C H, ZHANG S H, ZHANG X M. Research on water and sediment regulation of the Yellow River under new situation[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(1): 122-130.

[32] 夏东兴, 王文海, 武桂秋, 等. 中国海岸侵蚀述要[J]. 地理学报, 1993(5): 468-476. XIA D X, WANG W H, WU G Q, et al. Coastal Erosion in China[J]. Journal of Geography, 1993(5): 468-476.

[33] 李培英, 杜军, 刘乐军, 等. 中国海岸带灾害地质特征及评价[M]. 北京: 海洋出版社, 2007: 105-109. LI P Y, DU J, LIU L J, et al. Geological characteristics and evaluation of Chinese coastal hazards[M]. Beijing: Ocean Press, 2007: 105-109.

[34] 张平, 孔昊, 王代锋, 等. 海平面上升叠加风暴潮对2050年中国海洋经济的影响研究[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(1): 129-135. ZHANG P, KONG H, WANG D F, et al. The impact of sea-level rise superimposed storm surges on China's ocean economy in 2050[J]. Marine Environmental Science, 2017, 36(1): 129-135.

[35] 克拉克·约翰R. 海岸带管理手册[M]. 吴克勤, 杨德全, 盖明举, 译. 北京: 海洋出版社, 2000. CLARK J R. Coastal zone management handbook[M]. WU K Q, YANG D Q, GAI M J, trans. Beijing: Ocean Press, 2000.

[36] 黄荣华, 裴兆斌. 海岸带生态环境保护的法律问题研究[J]. 海洋开发与管理, 2020(10): 46-51. HUANG R H, FEI Z B. The legal issues of marine ecological environment protection in coastal zone[J]. Ocean Development and Management, 2020(10): 46-51.

[37] 黄惠冰, 胡业翠, 张宇龙, 等. 澳大利亚海岸带综合管理及其对中国的借鉴[J]. 海洋开发与管理, 2021(1): 28-35. HUANG H B, HU Y C, ZHANG Y L, et al. Integrated coastal zone management in Australia and its reference to China[J]. Marine Development and Management, 2021(1): 28-35.

[38] 林峰竹, 王慧, 张建立, 等. 中国沿海海岸侵蚀与海平面上升探析[J]. 海洋开发与管理, 2015(6): 16-21. LIN F Z, WANG H, ZHANG J L, et al. Exploration of coastal erosion and sea level rise in China[J]. Marine Development and Management, 2015(6): 16-21.

[39] 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(2): 8-11. LIU D H, GUAN S, XING W X. Integrated coastal zone management based on land and sea integration: from planning to legislation[J]. China Land, 2019(2): 8-11.

[40] 中华人民共和国自然资源部. 关于组织申报中央财政支持海洋生态保护修复项目的通知[EB/OL]. (2020-04-09)[2022-05-20]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-04/09/content_5500468.htm. Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Notice on the organization of the declaration of the central financial support for marine ecological protection and restoration projects[EB/OL]. (2020-04-09)[2022-05-20]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-04/09/content_5500468.htm.

[41] 杨琳. 基于海陆统筹的海岸线管理研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2014. YANG L. Study on shoreline management based on land/sea integration[D]. Xiamen: Xiamen University, 2014.

[42] 赵璐, 胡业翠, 张宇龙, 等. 荷兰海岸带空间规划管理实践及启示[J]. 开发研究, 2020(1): 78-85. ZHAO L, HU Y C, ZHANG Y L, et al. Practice and enlightenment of spatial planning and management of coastal zone in the Netherlands[J]. Development Research, 2020(1): 78-85.

[43] 王慧, 姜彩云. 海岸带管理法制研究——以《加州海岸法》为视角[J]. 环境与可持续发展, 2020(4): 92-98. WANG H, JIANG C Y. Research on coastal zone management law: from the perspective of California's Coastal Act[J]. Environment and Sustainable Development, 2020(4): 92-98.

[44] 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. ZHANG M H, SUN Z C, LIANG S X, et al. Progress of coastal environment repairing and cleaning engineering research and its prospect[J]. Marine Environmental Science, 2017, 36(4): 635-640.

[45] 青岛市人民代表大会常务委员会. 青岛市海岸带保护与利用管理条例[EB/OL]. (2019-11-29)[2022-05-20]. http://rdcwh.qingdao.gov.cn/n8146584/n31031327/n31031347/n31031353/191213134508817083.html. Qingdao City People's Congress Standing Committee. Qingdao City coastal zone protection and utilization management regulations[EB/OL]. (2019-11-29)[2022-05-20]. http://rdcwh.qingdao.gov.cn/n8146584/n31031327/n31031347/n31031353/191213134508817083.html.

[46] 黎树式, 戴志军. 我国海岸侵蚀灾害的适应性管理研究[J]. 海洋开发与管理, 2014(12): 17-21. LI S S, DAI Z J. Research on adaptive management of coastal erosion hazards in China[J]. Ocean Development and Management, 2014(12): 17-21.

[47] 李磊, 刘培, 黄垒, 等. 陆海统筹的海岸带地质大数据信息服务平台建设与应用[J]. 中国矿业, 2020, 29(1): 168-174. LI L, LIU P, HUANG L,

et al. Construction and application of land-sea coordination big data information service platform of coastal geology[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(1): 168-174.

[48] 罗时龙, 蔡锋, 王厚杰. 海岸侵蚀及其管理研究的若干进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(11): 1239-1247. LUO S L, CAI F, WANG H J. Development of coastal erosion and management[J]. Advances in Earth Sciences, 2013, 28(11): 1239-1247.

[49] 丁得水, 单瑞, 梅赛, 等. 基于GNSS-RTK技术的高精度海岸侵蚀监测方法[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(9): 45-51. DING D S, DAN R, MEI S, et al. High precision coastal erosion monitoring by using gnss-rtk technology[J]. Marine Geology Frontiers, 2019, 35(9): 45-51.

[50] 陈子燊, 于吉涛, 罗智丰. 近岸过程与海岸侵蚀机制研究进展[J]. 海洋科学进展, 2010, 28(2): 250-256. CHEN Z S, YU J T, LUO Z F. Progresses on study of nearshore processes and coastal erosion mechanisms[J]. Advances in Marine Science, 2010, 28(2): 250-256.

[51] 杨朋, 田立柱, 文明征, 等. 船载海陆一体化三维地形测量技术在海岸带侵蚀淤积监测中的应用[J]. 地质调查与研究, 2020, 43(4): 348-352. YANG P, TIAN L Z, WEN M Z, et al. Application of shipborne sea-land integrated three-dimensional terrain surveying technology in monitoring of coastal zone erosion and deposition[J]. North China Geology, 2020, 43(4): 348-352.

[52] 张杰, 王进河, 崔文连, 等. 我国海岸带面临的威胁、管理实践与“十三五”科技支撑工作重点——以青岛市、东营市和连云港市为例[J]. 海洋科学, 2015, 39(2): 1-7. ZHANG J, WANG J H, CUI W L, et al. The threat, management practice and work focus of science and technology support in the China coastal zone during the13th Five-Year: examples in Qingdao, Dongying and Lianyungang[J]. Marine Science, 2015, 39(2): 1-7.

[53] 于青松, 余兴光, 阿东, 等. 我国海岸与近岸海域综合整治势在必行[J]. 海洋开发与管理, 2009, 26(11): 3-7. YU Q S, YU X G, A D, et al. The imperative of integrated coastal and near-shore sea area remediation in China[J]. Ocean Development and Management, 2009, 26(11): 3-7.

[54] 中华人民共和国国家发展改革委员会, 中华人民共和国水利部. 全国海堤建设方案: 发改农经〔2017〕1426号[R/OL]. (2017-07-27)[2022-05-20]. https://www.doc88.com/p-9913946965465.html. National Development and Reform Commission, Ministry of Water Resources of the People's Repbulic of China. National seawall construction plan: development and reform of agricultural economy〔2017〕1426 [R/OL]. (2017-07-27)[2022-05-20]. https://www.doc88.com/p-9913946965465.html.

[55] 杰夫·古德尔. 巨浪来袭: 海面上升与文明世界的重建[M]. 高抒, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 2021: 5. JEFF G. The water will come: rising seas, sinking cities, and the remaking of the civilized world[M]. GAO S, trans. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2021: 5.

[56] 严恺. 海岸工程[M]. 北京: 海洋出版社, 2002: 44-66. YAN K. Coastal engineering[M]. Beijing: Ocean Press, 2002: 44-66.

[57] 何富荣. 利用水力插板技术建设堤坝工程[J]. 港工技术, 2001, 38(2): 40-42. HE F R. Utilizing the technique of hydraulic sliding panel to build embankment[J]. Port Engineering Technology, 2001, 38(2): 40-42.

[58] XU G H, YUE Z Q, LIU D F, et al. Grouted jetted precast concrete sheet piles: method, experiments and applications[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(12): 1358-1373.

[59] 何富荣. 水力插板建设航道拦沙堤坝[J]. 港工技术, 2008(2): 21-23. HE F R. Application of hydraulic sliding panel to channel debris dam[J]. Port Engineering Technology, 2008(2): 21-23.

Discussion on Management and Protection Techniques for Coastal Erosion in Response to Climate Change

XU Guo-hui[1,2,3], LIU Hai-bo[1,2], TAO Wei[1,2], QI Hao-sen[1,2]

(1. *Key Laboratory of Marine Environment and Ecology*, *Ministry of Education*, *Ocean University of China*, Qingdao 266100, China;
2. *Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering*, *Ocean University of China*, Qingdao 266100, China;
3. *Key Laboratory of Coastal Science and Integrated Management*, *MNR*, Qingdao 266061, China)

Abstract: Coastal erosion has become an increasing problem in our country. This is one of the consequences of escalating climate change, which has led to the rise of sea levels and more frequent occurrences of damaging typhoon events. Another critical cause of the problem is a reduction in the amount of sediment transported into the sea due to environmental protection measures implemented in river areas. The engineering projects (structures) that are in place struggle to provide adequate protection against erosion as the standards set previously cannot satisfy the current demand. As a result, the potential failure of these structures in combating natural disasters poses significant risks to the socioeconomics in coastal regions. In this article, we analysed the main causes and trends in the evolution of domestic coastal erosion in the grand scheme of global warming and proposed strategies for its management. Insights were provided on the current protection techniques, possible future changes in sea level, coastal hydrodynamic environment, and sediments. Based on these factors, we critically discussed innovative techniques that offer permanent or emergency protection from coastal erosion. This article is a valuable reference for the Department of Coastal Management of China and research institutions that have a specialisation in coastal protection.

Key words: global climate change; sea level rise; coastal erosion; coastal management; coastal protection

Received: May 20, 2022