

海岸侵蚀与防护技术研究进展

王庆, 朱君, 战超

(鲁东大学海岸研究所, 山东烟台 264025)

摘要: 全球海岸侵蚀分布广泛, 给沿岸人民生活带来巨大损失。论文基于前人相关研究及作者在山东半岛、黄河三角洲的相关研究成果, 对近年来海岸侵蚀时空变化规律及防护技术研究进行分析。结果表明, 首先, 海岸侵蚀是海岸动力地貌的适应性调整和再平衡过程, 具有显著的空间差异性和时间非线性特征。其次, 海岸侵蚀的影响因素具有显著的多样性, 侵蚀机理具有显著的区域性。最后, 海岸侵蚀防护与修复应关注效果的可持续性, 应该在深入研究、阐明区域海岸动力地貌演变趋势的基础上, 研发和应用“软式”海岸防护技术与新型海岸防护结构。

关键词: 海岸侵蚀; 人类活动; 防护技术; 沉积物粗化

中图分类号: P737.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-3682(2022)04-0301-12

doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20220730002

引用格式: 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 Q, ZHU J, ZHAN C. Research progress of coastal erosion and protection technology[J]. Coastal Engineering, 2022, 41(4): 301-312.

海岸侵蚀是指由自然、人为因素作用引起的岸线位置向陆后退, 或滩面下蚀、变窄变陡的地质灾害现象^[1]。从海岸动力地貌学的观点看, 海岸侵蚀是海岸在海洋动力作用或泥沙盈亏状态显著变化条件下发生的灾害性地貌调整过程, 当某一段海岸的物质损失量大于物质补给量时, 则海岸发生侵蚀^[2]。中国现代海岸侵蚀自 20 世纪 50 年代末期开始渐显, 至 70 年代末期呈加剧状态, 从 80 年代开始逐渐受到重视^[3-4]。当前, 我国仍是世界上海岸侵蚀较为严重的国家之一^[5]。

我国海岸侵蚀在空间上分布广泛, 北至辽宁, 南至海南, 不管是大陆海岸还是离岸海岛海岸, 不论是夷直海岸还是岬湾海岸, 皆有程度不同的侵蚀灾害^[6-7]。同时, 我国海岸侵蚀在各种类型海岸中皆有发生, 既有自然海岸也有人工海岸, 既有砂质海岸和粉砂淤泥质海岸, 也有基岩海岸和珊瑚礁海岸^[8]。海岸侵蚀的发生给沿岸人民的生命财产、生产生活、海岸工程建设等带来巨大损失^[9], 亦由单纯的自然现象演变发展为环境综合灾害事件^[10]。

鉴于海岸侵蚀分布的广泛性及其带来的巨大危害, 国内外学者针对海岸侵蚀规律、侵蚀机理以及防护修复技术开展了大量研究^[11-12]。本文基于近年来前人及作者的相关研究工作、研究成果和海岸保护修复实践及其经验教训, 从海岸侵蚀时空演变过程、海岸侵蚀影响因素与机理、海岸侵蚀防护与修复等三个方面进行了总结分析, 指出了未来海岸侵蚀研究与防护修复技术的发展动态, 希望能对我国今后海岸侵蚀研究和修复研发工作提供借鉴作用。

1 海岸侵蚀时空演变过程

1.1 海岸侵蚀是动力地貌调整的灾害性表征

海岸冲淤是当前海岸在外部海洋动力和泥沙补给条件下, 从一种动力-沉积-地貌平衡状态向另一种平衡

收稿日期: 2022-07-30

资助项目: 国家自然科学基金项目——人工修复海滩滩肩高程对海滩风暴稳定性的影响机制研究(42006176)和最近 40 年来风暴潮对黄河清水沟河口沙嘴地貌演变影响研究(41901006); 山东高校青创科技团队项目——黄河三角洲风暴潮地貌与沉积环境(2020KJH002); NSFC 山东联合基金项目——最近五十年来黄河三角洲潮间滩涂动力地貌演变研究(U1706220)

作者简介: 王庆(1968—), 男, 教授, 博士, 主要从事河口海岸工程地貌方面研究. E-mail: schingwang@126.com

(王燕 编辑)

状态发展的自然现象^[13-14]。当某段海岸沉积物收支处于净亏损状态时,海岸发生侵蚀;反之,则发生淤积。近年来,在人类活动、全球海面上升和气候变化的多重压力影响和驱动下,原有的海岸动力地貌平衡状态发生改变,导致部分岸段海岸处于侵蚀状态。本质上,海岸发生侵蚀是对变化的海岸动力和泥沙补给条件的响应,是一种动力地貌再平衡或调整的过程,当海岸侵蚀发展一定阶段后,海岸侵蚀会逐渐减小并趋于新的平衡。

以莱州湾和天鹅湖沙坝为例(图1)说明海岸侵蚀的时空变化规律。自20世纪50年代以来,莱州湾东部沿岸山地河流中上游修建了近百座水库及拦水塘坝,水库塘坝的修建使得河流入海泥沙量锐减。海岸在泥沙来源锐减的情况下由淤积或冲淤平衡转为强烈侵蚀,从50年代末、60年代初开始出现了严重的侵蚀后退现象。根据模拟预测,至90年代初海岸侵蚀应该逐渐减弱并趋于达到新的平衡状态^[15]。但1994年以后,由于当地渔民开始利用海岸潮上带沙地进行工厂化水产养殖,养殖池的修建再次打破了海岸即将达到的平衡状态,使得海岸侵蚀在原有基础上继续加剧,开始了新一轮的海岸地貌冲淤动态调整^[16]。

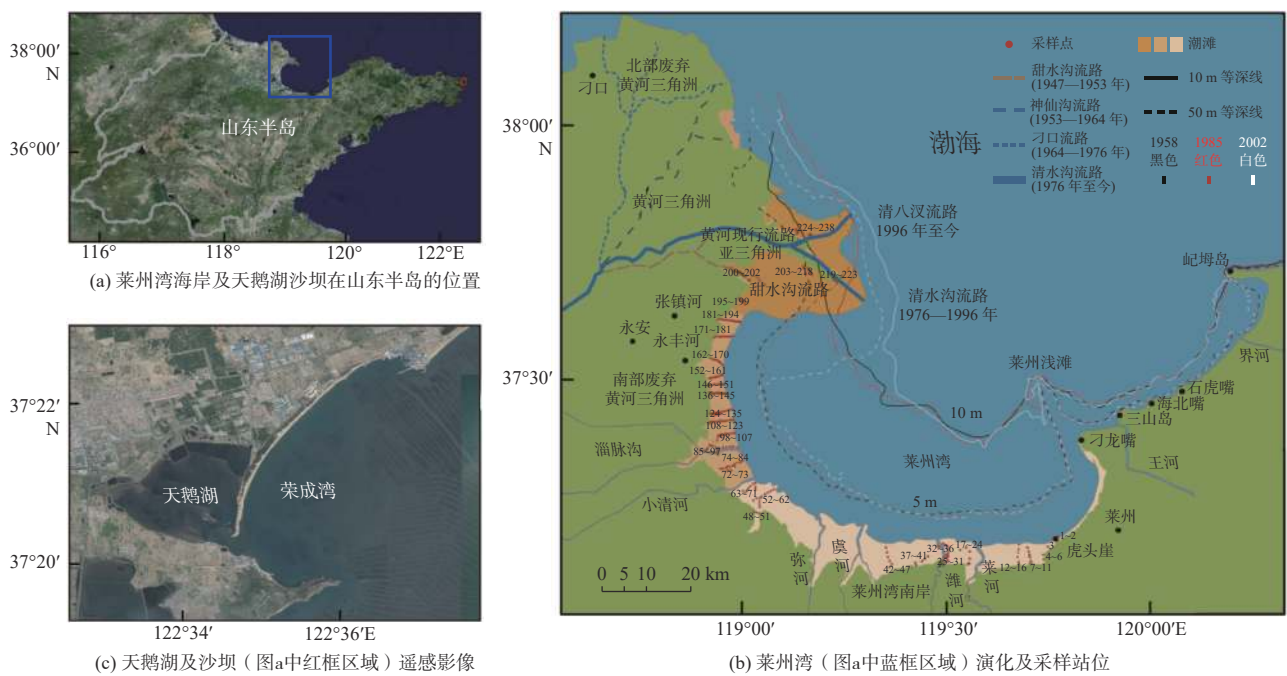


图1 莱州湾海岸及天鹅湖沙坝地理位置

Fig. 1 Geographical map of Laizhou Bay and Swan Lake sand barrier

1.2 海岸侵蚀的空间差异性

我国海岸侵蚀在空间上分布广泛,影响因素多样,但是同一致蚀因素在不同海域导致的海岸侵蚀表现形式不同,有的岸段表现为岸线的快速后退,有的岸段表现为滩面的强烈下蚀,而有的岸段仅表现为滩面沉积物的粗化。因此,海岸侵蚀的最终表现形式,需结合岸段的海岸动力、沉积和地貌特征等具体问题进行分析。例如,同样是入海河流泥沙减少的海岸地貌响应,在莱州湾东岸以岸线蚀退为主^[15],而在莱州湾西岸却主要表现为潮滩表层沉积物的粗化^[17]。

另一方面,海岸侵蚀的空间差异性还表现在,相邻岸段的海岸侵蚀可能具有截然不同的侵蚀机理及影响因素。同样以莱州湾东岸为例,在1958年至1984年虽然沿岸纵向泥沙流尾间的刁龙嘴沙嘴岸段仍处于淤进状态,但泥沙流输沙量显著减小,导致刁龙嘴岸外的松散岬角连接型沙洲——莱州浅滩发生了局部侵蚀,其与刁龙嘴之间出现了贯通的潮流槽^[18-19];在1984年至1998年间刁龙嘴至界口岸段的地貌冲淤动态演变均

表现为侵蚀后退(表 1), 但是界河口附近岸段的侵蚀主要为界河河流来沙减少所致^[15], 而其余岸段的侵蚀后退则主要为潮上带工厂化水产养殖所致^[20]。

表 1 莱州湾东岸不同年段岸线蚀退淤进变化

Table 1 Changes of coastline erosion and siltation in different years on the east coast of Laizhou Bay

年 份	刁龙嘴—三山岛 侵蚀淤进量/(m·a ⁻¹)	三山岛—海北嘴 侵蚀淤进量/(m·a ⁻¹)	海北嘴—石虎嘴 侵蚀淤进量/(m·a ⁻¹)	石虎嘴—界河口 侵蚀淤进量/(m·a ⁻¹)
1959—1969 年	+2.81	+4.68	+9.93	-3.22
1969—1984 年	+0.15	-2.07	+0.86	+1.23
1984—1998 年	-0.09	-1.88	-2.42	-5.04
1998—2006 年	+5.37	+2.75	+1.37	+3.66
2006—2013 年	+0.93	-0.88	-2.16	-1.30

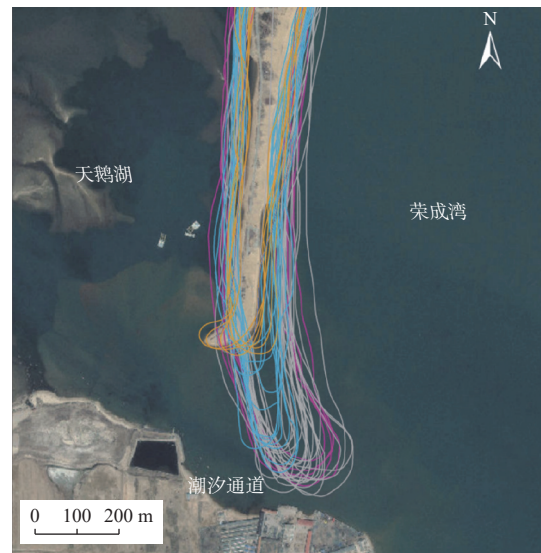
注: +表示淤进, -表示蚀退。

1.3 海岸侵蚀的时间非线性

海岸侵蚀不仅在空间分布上差异巨大, 在时间分布上也具有明显的差异, 即海岸侵蚀具有显著的时间非线性特征。研究表明, 自 20 世纪 60 年代开始显著减小的河流入海沙量^[21]、自 20 世纪 70 至 90 年代出现的大面积近岸取沙^[22]、自 21 世纪初开始的大规模围填海工程^[23]、加之最近数十年来波动上升的平均海平面^[24]和各地不同时期修建的海岸工程构筑物^[25]及其海岸冲淤效应的叠加耦合, 导致海岸侵蚀过程具有明显的非线性特征。

海岸侵蚀的时间非线性特征主要有 2 种表现形式: 一种是蚀淤性质或侵蚀速率的非线性; 另一种是侵蚀方向的非线性。以莱州湾东岸为例, 1959 年至 2013 年间的侵蚀岸线长度所占比例波动起伏, 部分岸段侵蚀淤积状态多次转换, 如石虎嘴至界河口岸段经历了 3 次侵蚀和 2 次淤积的转变(表 1)。除此之外, 侵蚀岸段的侵蚀后退速率同样变化较大, 如石虎嘴至界河口岸段的最大蚀退速率为 5.04 m/a, 而最小蚀退速率却仅为 1.30 m/a。

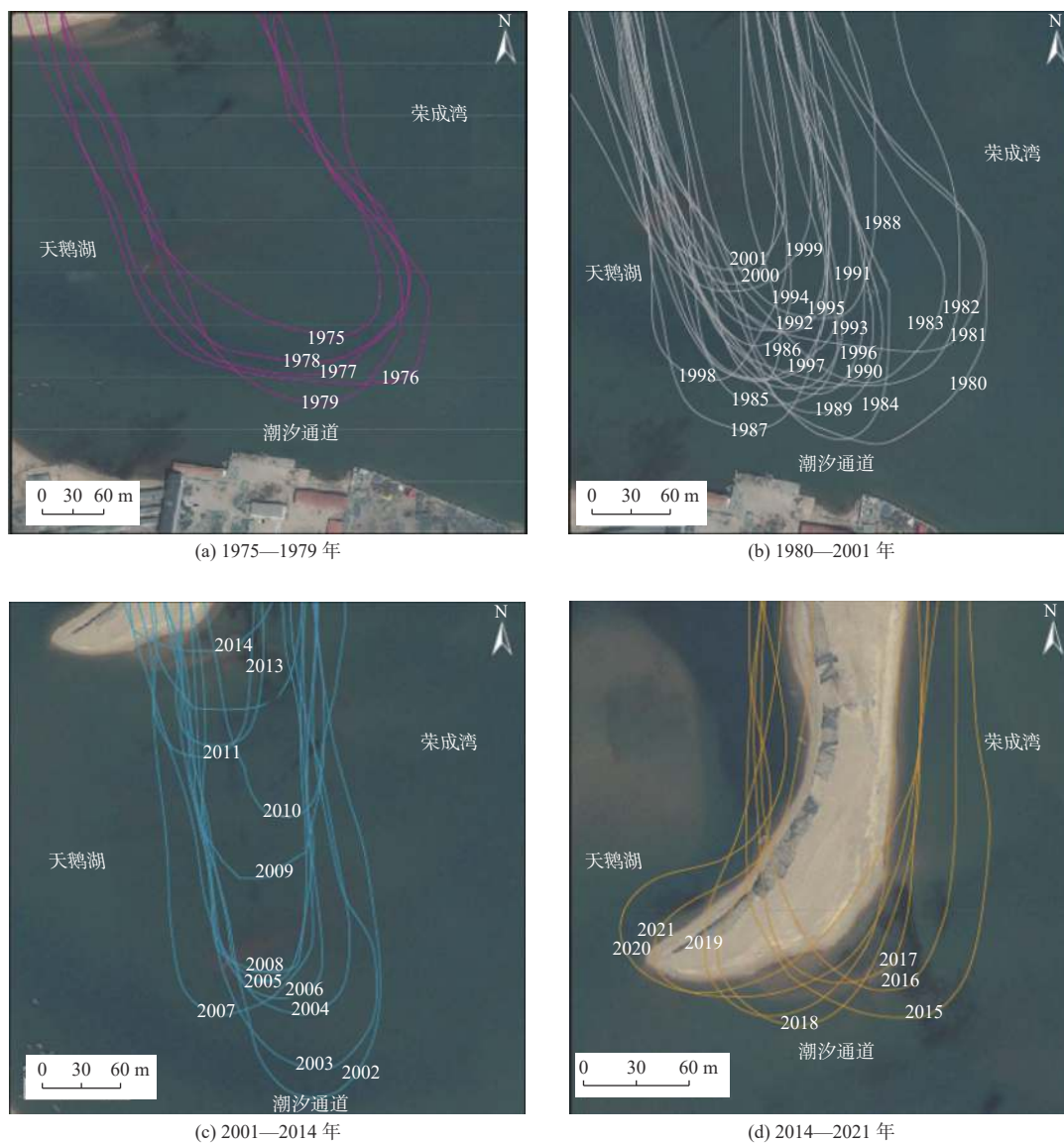
山东半岛最东端的荣成市天鹅湖沙坝侵蚀(图 1c)同样具有显著的时间非线性特征, 但其主要表现在沙坝地貌体的侵蚀岸段(图 2)。具体来看, 自 1975 年至 1979 年, 坝尾处于冲淤稳定的自然状态(图 3a); 1979 年天鹅湖潮汐通道内建闸后, 自 1981 年至 2001 年坝体发生侵蚀变窄(图 3b); 2002 年至 2014 年伴随着坝体进一步蚀退变窄, 沙坝长度快速萎缩(图 3c); 2015 年后沙坝坝体进一步变窄, 尾端内弯, 但其长度变化不大(图 3d)^[26]。综合分析表明, 1975 年至 2021 年间, 天鹅湖沙坝坝尾地貌冲淤演化总体上呈现先侵蚀变窄、后蚀退变短的显著特点, 即沙坝侵蚀方向在时间过程上具有明显的非线性特征。



— 1975—1979 年 — 1980—2001 年
— 2001—2014 年 — 2014—2021 年

注: 本图来源于任宗海等^[26]。

图 2 1975 年至 2021 年荣成天鹅湖沙坝坝尾形状演化
Fig. 2 The overall geomorphological evolution of the sand barrier tail of Swan Lake in Rongcheng from 1975 to 2021



注：本图来源于任宗海等^[26]。

图3 荣成天鹅湖沙坝坝尾地貌变化的局部放大图

Fig. 3 Local zoomed view of the topographical evolution of the sand barrier tail of Swan Lake in Rongcheng

2 海岸侵蚀影响因素与机理

2.1 海岸侵蚀因素的多样性

海岸泥沙亏损和海岸动力强化是导致海岸侵蚀的直接因素,而引起泥沙亏损和动力增强的影响因素又有显著的多样性,概括起来包括自然因素和人为因素^[2]。其中,导致海岸侵蚀的自然因素主要为全球变化引起的相对海平面上升和风暴潮加剧。在全球气候变暖背景下,中国沿海海平面变化总体呈波动上升的趋势^[27],近40年来中国沿海海平面上升速率为3.4 mm/a,高于同时段全球相对海平面上升的平均水平^[28]。根据布容法则(Brunn rule),随着相对海平面上升,海岸将发生显著的侵蚀后退^[11, 29]。另一方面,随着全球风暴潮

等极端水文事件的日趋频繁^[30],我国沿岸风暴潮灾害发生次数、造成的经济损失亦呈显著上升趋势^[31]。研究表明,风暴潮所引发的极端水动力过程是造成砂质海岸侵蚀的重要因素^[32]。目前,国内外学者已从风暴群^[33]、风暴路径^[34]、风暴强度和移动速度^[35]、岸滩走向^[36]、岸滩高度^[37]、后滨沙丘供应^[38]以及沉积物粒径^[39]等多个维度开展了细致研究,揭示了风暴潮对海岸侵蚀的作用机制。

影响海岸侵蚀的人为因素主要为近岸采砂、河流来沙减少,以及不合理海岸工程的建设。自20世纪80年代以来,随着沿海地区建筑业发展暨河沙匮乏,近岸建筑取沙现象越来越普遍^[40]。研究表明,在一个海岸系统内,不管是直接在后滨沙丘、海滩、临近岸段,亦或是在闭合深度以浅海底采砂,一处的采砂通常会导整个岸段的侵蚀^[41]。在20世纪50年代以后的近半个世纪内,全国各地在各入海河流中上游修建了大量水库、塘坝,仅山东半岛地区就有上千座之多^[2]。水库塘坝的拦截效应使得河流入海泥沙量发生锐减,造成了河口及附近砂质岸段的侵蚀后退和沉积物粒度的粗化^[17, 21, 42]。

另一方面,不合理海岸构筑物建设同样会加剧海岸侵蚀。例如,部分防波堤^[25]、拦沙堤^[43]、硬式护岸工程^[44]、围填海^[45]、潮上带土地利用^[16]、取排水口管道及端部防护设施^[46]等,在建设过程中由于缺乏关于海岸动力地貌系统及地貌冲淤动态演变的充分论证,在其建成后不仅深刻改变了自然岸线的走向,而且还严重改变了当地的海岸水文动力环境,打破了原有的海岸泥沙平衡状态,从而造成所在岸段及邻近岸段的严重侵蚀。

显然,影响海岸侵蚀的原因很多,每个岸段的侵蚀机理也都有所不同。准确掌握各岸段的侵蚀原因和机制是开展海岸侵蚀防护与修复的前提。

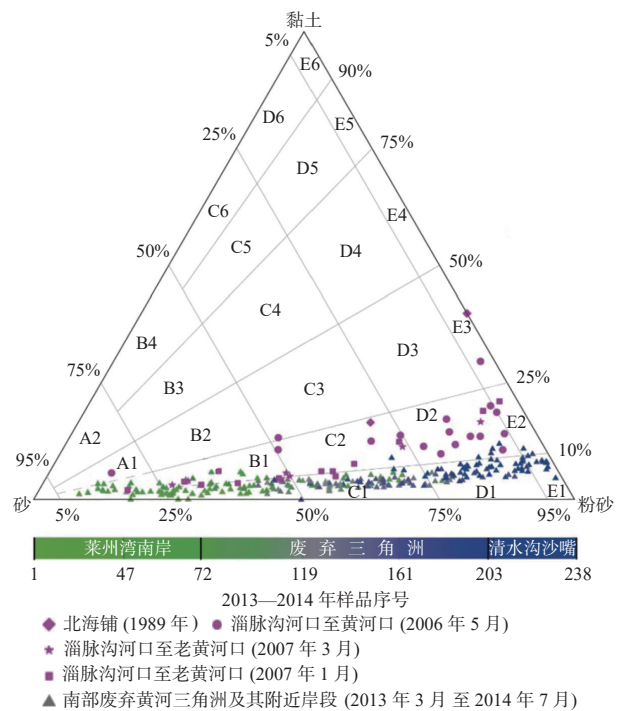
2.2 海岸侵蚀机理的区域性

2.2.1 粉砂淤泥质潮滩粗化

海岸侵蚀因海岸类型、演化阶段而有不同的表现形式,除了表现为岸滩地貌形态变化外,还表现为沉积特征的改变。研究表明,莱州湾为现代黄河三角洲与胶东半岛之间的弱潮海湾,西岸清水沟沙嘴自1976年形成后的20年间不断向东南方向延伸,岸线、5 m等深线均向海大幅迁移^[12]。自1996年黄河改道北侧清八汊向东北方向入海后,被废弃的清水沟沙嘴侵蚀后退显著,但其南侧的废弃黄河三角洲岸线、5 m等深线仍保持基本稳定(图1b)。

2013年3月至2014年7月,鲁东大学在黄河三角洲南部废弃三角洲、现行亚三角洲和莱州湾南岸采集了238个站位的表层潮滩沉积物样品(样品采集站位见图1b),分析结果显示,南部废弃三角洲潮滩表层沉积物的泥含量和黏土/泥比与现行亚三角洲、莱州湾南岸相比,皆存在明显不同。通过与前人不同时期采集的39个样品分析结果^[17]对比分析发现,南部废弃黄河三角洲潮滩具有明显的粗化现象(图4),其潮滩粗化时间始于20世纪90年代,在2007年至2013年间又进一步发生了从黏性砂向非黏性砂的转变。

研究表明,黄河三角洲南部废弃三角洲潮滩粗化除了与海岸水动力条件的变化有关外^[47],还与黄河、



注: 本图来源于王庆等^[17]。

图4 南部废弃三角洲及其附近岸段潮滩砂、粉砂、黏土的体积分数

Fig. 4 Ternary-based diagram with sand/silt/clay ratios illustrating textural trends observed in the inter-tidal flats of the southern abandoned Yellow River sub-delta and its adjacent zones

弥河等河流入海泥沙显著减少有关^[17],即:在黄河等河流入海泥沙发生显著减少后,居于潮间带的粉砂淤泥质潮滩与莱州湾西南部潮下带水下岸坡之间的泥沙输运状态发生了显著变化,导致粉砂淤泥质潮滩原有的细颗粒泥沙大量流失,而来自潮下带水下岸坡的部分粗颗粒泥沙进入潮间带,最终使得南部废弃三角洲表层潮滩沉积物的黏土含量显著减少、粗颗粒的砂粒组分增加,从而表现为潮滩表层沉积物粒度的显著粗化^[12]。

2.2.2 潮上带利用与砂岸蚀退

人类活动对砂岸冲淤动态的影响,不仅来自岸线向海侧,还来自岸线陆侧的土地利用。莱州湾东部海岸为典型的砂质海岸,在20世纪90年代以前的早期自然状态下风成沙丘/沙地广泛分布,局部潮上带沙丘宽度达数百米、长度达数千米(图5a)^[20]。从1985年开始,当地渔民开始破坏潮上带沙地开展工厂化水产养殖,随后养殖池逐渐增多、向海横向推进、向两侧纵向扩展,直至形成平行于岸线、宽达数百米、基本连续分布的水产养殖设施带(图5b)。

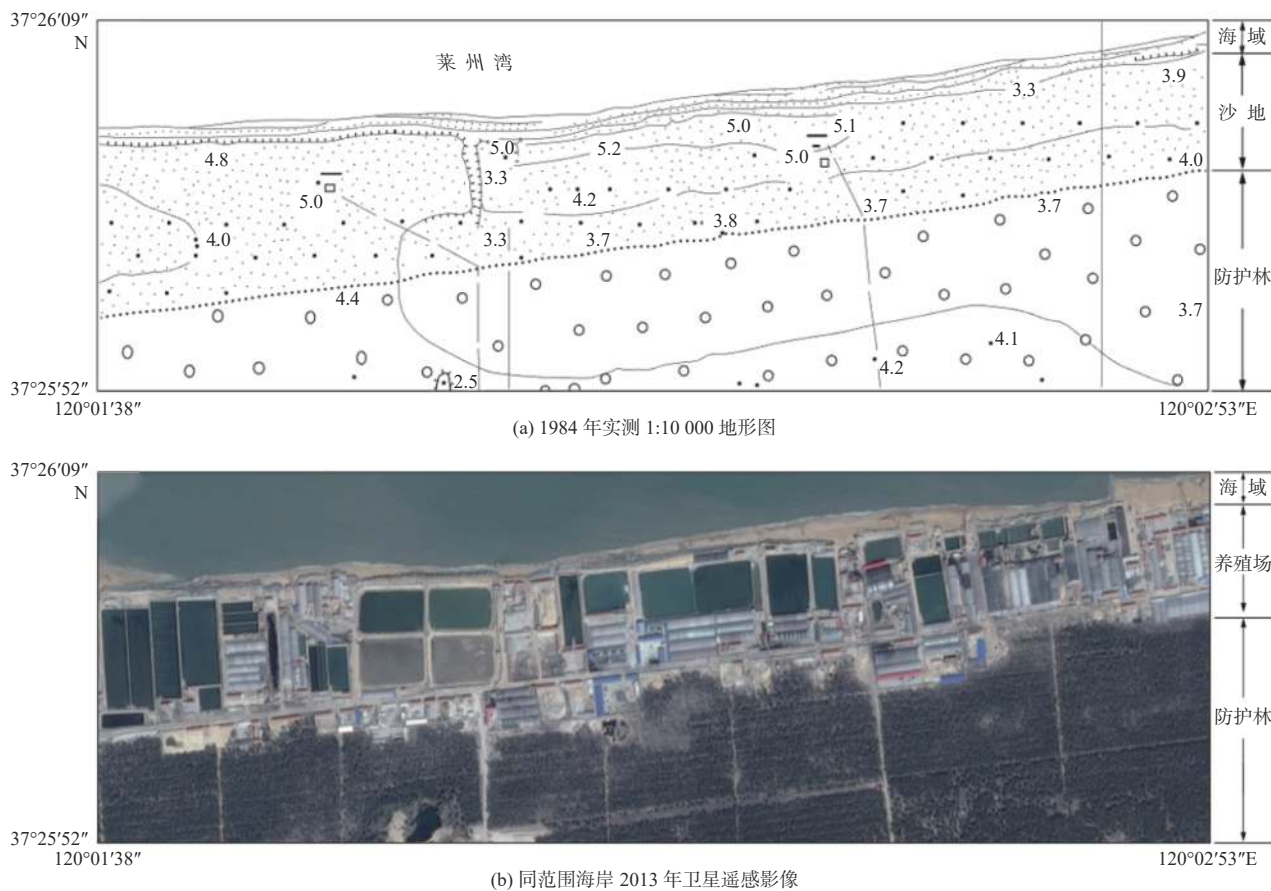
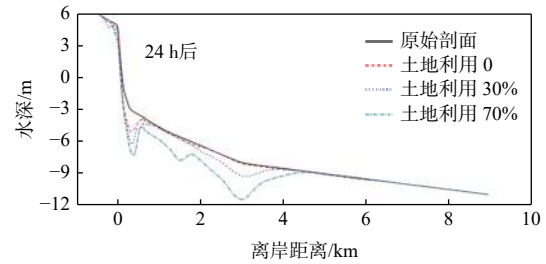


图 5 莱州湾东岸局部岸段潮上带土地利用变化

Fig. 5 The land-use change in the supratidal zone along the eastern coast of Laizhou Bay

潮上带养殖池修建, 不仅直接侵占了原为砂质海岸系统重要组成部分的后滨沙地, 而且养殖池外侧围堰普遍高于当地的高潮位, 从而深刻改变了风暴潮作用时的水动力边界条件, 导致风暴潮作用过程中水下岸坡-海滩-潮上带方向的能量分布发生变化^[20]。研究发现, 莱州湾东部潮上带养殖设施带的存在, 使得风暴潮期间岸线附近的波高和流速都明显增大^[48], 针对海滩地貌演化的数值模拟进一步表明, 随着养殖设施连续岸段长度比例的增加, 海滩滩面及水下岸坡的侵蚀将逐渐增加(图 6)。因此, 潮上带工厂化水产养殖成为 20 世纪 90 年代以来莱州湾东岸砂质海岸侵蚀不仅未减弱、反而进一步加剧的最主要原因^[48]。



注: 本图来源于李雪艳等^[16]。

图 6 不同土地利用情景下风暴作用 24 h 后的海滩剖面形态演化

Fig. 6 Morphological evolution of beach profiles after 24 hours of storm action under different land use scenarios

3 海岸侵蚀防护与修复

海岸侵蚀防护由来已久, 传统的海岸防护多采用混凝土构件或抛石建设形成护岸、防波堤及拦沙堤等工程措施。但是, 这些“硬式”防护措施在满足防灾减灾、保护岸线稳定需求的同时, 往往也对近岸海洋生态环境造成了破坏。近年来, 随着基于自然解决方案的海岸防护手段和理念日趋普及^[49], 以海滩修复、生物防护为主的“软式”防护逐渐兴起^[50], 一大批生态的新型海岸防护结构逐渐出现^[51], 这些为海岸侵蚀防护与修复效果的可持续提供了技术支撑。

3.1 “软式”海岸防护技术

在各类型海岸侵蚀防护技术中, 海滩养护是公认的砂质海岸可持续保护的 best 手段, 在全球得到了广泛应用, 目前已推广应用到软岩质海岸、珊瑚礁海岸甚至是粉砂淤泥质海岸的保护及修复实践中^[52]。据不完全统计, 截至 2020 年 12 月, 我国已完成或正在进行的海滩养护修复工程共有 113 项, 分布于全国 38 个城市沿岸, 养护修复的砂质岸线总长度超过 117 km, 总填砂量约为 $2.6 \times 10^7 \text{ m}^3$ ^[52]。我国海滩养护技术的发展经历了“吸收—改进—提升”的过程, 2015 年《中国海滩养护技术手册》的出版和 2018 年行业标准《海滩养护与修复技术指南》的颁布, 标志着我国海滩养护技术走向成熟。在海滩养护技术应用实践中, 我国学者创新性地提出了强潮海滩剖面演化数值模拟^[53]、强侵蚀海岸复合式海滩修复^[54]、淤泥质海岸提能降淤^[55]、海滩养护附属工程生态设计^[56]等一大批关键创新技术, 并在国内多处海岸保护修复中得以推广应用, 取得了显著的效果^{①②}。

近年来, 我国学者逐渐认识到了生物海岸的重要性, 逐步从毁林毁礁式生态破坏型开发和生物海岸土地功能转换式开发转变为“以生态保护优先、生态资源即经济价值”为理念的开发利用模式^[57]。自 1975 年香港米埔红树林湿地被认定为自然保护区开始, 至 2005 年全国一共成立了 42 个红树林自然保护区^[58]。目前, 全国红树林、珊瑚礁、盐沼湿地和柁柳群落等滨海湿地自然保护区仍在不断增加, 这些保护区的建立为生物岸线保护及修复做出了重要贡献。除此之外, 一些学者积极开展了生物海岸的修复技术探索, 并在红树林修复^[59]、珊瑚礁修复^[60]、盐沼湿地修复^[61]中得以实践。

3.2 新型海岸防护结构

海岸防护除了由传统的“硬式”防护向以海滩修复、生物防护为主的“软式”防护转变之外, “硬式”结构也

①鲁东大学. 威海石岛湾砂质岸滩演变与预测数值模拟研究. 2022.

②自然资源部第三海洋研究所. 海口市西海岸沙滩修复方案专题论证报告. 2020.

逐渐向“软式”结构转变,“硬式”结构和“软式”结构有融合兼容的发展趋势。特别是,生态海堤^[62]、透水消浪的新型防波堤^[63]、人工鱼礁式潜堤^[64]、可调节拦沙量的新型拦沙堤^[65]等使“硬式”防护结构越来越生态。以新型防波堤为例,为了最大限度地透水消浪,国内外学者针对不同的防波堤结构及型式做了大量细致的创新性研究。例如,桩基透空式防波堤^[66]、梳式防波堤^[67]、浮式防波堤^[68]、板式防波堤^[51]等新型防护结构先后被提出。另一方面,不同的防波堤结构又出现了不同的具体布置型式。例如,板式防波堤结构又有单层和双层、板式和弧板式、上弧板式和下弧板式、加挡板和不加挡板的不同组合^[51, 69-71]。新型海岸防护结构为海洋生态保护修复提供了新思路。

3.3 海岸防护修复效果的长期性

如前所述,海岸侵蚀的表现形式多样、影响因素和机理复杂。因海岸工程构筑物设计寿命、海域权属等时间大致为 50 a 左右,人类社会的可持续发展迫切需要能适应数十年尺度的修复效果。显然,为了实现海岸侵蚀防护与修复效果的可持续性,除了优先选用“软式”海岸防护技术和新型生态的海岸防护结构外,还要把握区域海岸过去的长周期演化规律,以及修复海岸的未来长周期演化趋势。也就是说,海岸防护修复方案设计只有建立在准确把握过去长周期地貌演化规律的基础之上,才能正确掌握侵蚀发生的根本原因、内在机理和未来数十年变化趋势,才能在此基础上设计出科学合理、经得起考验的蚀退海岸防护和修复方案。因此,侵蚀海岸防护和修复既重视过程,亦重视效果,即补的沙应留得住,种的树要养得活。要想实现这个目标,需要掌握修复海岸的未来长周期演化趋势,并根据未来演化趋势调整防护和修复方案。

当然,防护修复效果的长期性并不等于效果终身有效,鉴于极端海洋灾害的难以预测,修复海岸在极短时间内可能会有超出正常范围的响应。针对这种情况,在制定保护和修复方案的同时,应制定相应的应急预案。

4 结 语

近年来,在海岸侵蚀防护修复研究和海洋生态文明建设的实践中,我国持续加强围填海管控,严守海洋生态保护红线^[72],积极推进实施了“南红北柳”“蓝色海湾”“海岸带保护修复”等多项海岸带生态修复重点项目^[73],取得了初步的效果,海岸侵蚀状况有所改善,海洋生态环境有所提升,海岸侵蚀防护方面取得了一些关键技术突破。但是,同时也应看到与新时代生态文明建设要求相比仍有显著的差距,主要体现在缺少统一的海岸侵蚀与保护修复管理数据库,缺乏海岸侵蚀防护的核心理论技术创新,海岸侵蚀调查监控、风险评价、技术方法、效果评估等的标准体系尚不完善^[74],人工智能^[75]、机器学习^[76]、数据孪生^[77]等新技术在海岸侵蚀防护修复中的应用还需进一步加强。随着我国对海岸生态保护的重视,随着海洋修复理念和修复技术的提升,随着海洋生态保护修复标准体系的完善,人类活动对海岸动力地貌冲淤演变的积极影响将越来越多、负面影响将越来越少,侵蚀海岸的活力程度会越来越高,海岸带必将成为高质量发展的经济高地、安全高地和生态高地。

参考文献 (References):

- [1] 全国海洋标准化技术委员会(SAC/TC 283). 海洋学术语 海洋地质学: GB/T 18190—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. National Technical Committee on Ocean Standardization (SAC/TC 283). Oceanological terminology-marine geology: GB/T 18190—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [2] 夏东兴, 王文海, 武桂秋, 等. 中国海岸侵蚀述要[J]. 地理学报, 1993, 48(5): 468-476. XIA D X, WANG W H, WU G Q, et al. Coastal erosion in China[J]. Acta Geographica Sinica, 1993, 48(5): 468-476.
- [3] 庄振业, 陈卫民, 许卫东, 等. 山东半岛若干平直砂岸近期强烈蚀退及其后果[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 1989, 19(1): 90-98. ZHUANG Z Y, CHEN W M, XU W D, et al. Retrogression of straight sandy beaches in the Shandong Peninsula and its results[J]. Journal of

- Ocean University Qingdao (Natural Science Edition), 1989, 19(1): 90-98.
- [4] 庄振业, 林振宏, 李从先, 等. 山东半岛西北部的全新世古海岸线[J]. 山东海洋学院学报, 1983, 13(3): 25-29. ZHUANG Z Y, LIN Z H, LI C X, et al. Holocene palaeocoastal line along the coastal zone of Northwestern Shandong Peninsula[J]. Journal of Shandong College of Oceanology, 1983, 13(3): 25-29.
- [5] 陈吉余. 中国海岸侵蚀概要[M]. 北京: 海洋出版社, 2010. CHEN J Y. Summary of coastal erosion in China[M]. Beijing: China Ocean Press, 2010.
- [6] 刘宗宇, 杨丽中, 乔守文, 等. 山东省滨海沙滩现状调查[J]. 海洋科学, 2020, 44(9): 121-129. LIU Z Y, YANG L Z, QIAO S W, et al. Investigation of coastal beaches in Shandong Province[J]. Marine Sciences, 2020, 44(9): 121-129.
- [7] 文世勇, 王紫竹, 王涛, 等. 基于遥感技术的海南省海岸侵蚀现状与趋势评估[J]. 灾害学, 2020, 35(1): 138-143. WEN S Y, WANG Z Z, WANG T, et al. Status and trend assessment of coastal erosion at Hainan Province based on remote sensing technology[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(1): 138-143.
- [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, 1966, 5(2): 69-79. JI Z X. The characteristics of coastal erosion and cause of erosion[J]. Journal of Natural Disasters, 1966, 5(2): 69-79.
- [9] 李平, 丰爱平, 孙惠凤, 等. 海岸侵蚀灾害调查和评价研究进展与展望[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(4): 55-63. LI P, FENG A P, SUN H F, et al. Research progress and prospect of coastal erosion investigation and evaluation[J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(4): 55-63.
- [10] ZHU Z T, CAI F, CHEN S L, et al. Coastal vulnerability to erosion using a multi-criteria index: a case study of the xiamen coast[J]. *Sustainability*, 2018, 11(1): 93.
- [11] BRUUN P M. The bruun rule of erosion by sea-level rise: a discussion on large-scale two and three-dimensional usages[J]. Journal of Coastal Research, 1988, 4(4): 627-648.
- [12] 王庆, 王小鲁, 李雪艳, 等. 黄河三角洲南部废弃三角洲潮间滩涂表层沉积粒度特征及其粗化现象[J]. 第四纪研究, 2017, 37(2): 353-367. WANG Q, WANG X L, LI X Y, et al. Grain size characteristics and coarsening phenomenon of inter-tidal flat surficial sediment along the abandoned Southern Yellow River sub-delta[J]. Quaternary Sciences, 2017, 37(2): 353-367.
- [13] LIU G, CAI F, QI H S, et al. A summary of beach nourishment in China: the past decade of practices[J]. Shore and Beach, 2020, 88(3): 65-73.
- [14] 戴志军, 李春初. 华南弧形海岸动力地貌过程[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2008. DAI Z J, LI C C. Dynamic geomorphic process of arcuate coast in South China[M]. Shanghai: East China Normal University Press, 2008.
- [15] 战超, 于君宝, 王庆, 等. 近60年莱州湾东部砂质海岸地貌的时空动态[J]. 海洋学报, 2017, 39(9): 90-100. ZHAN C, YU J B, WANG Q, et al. Spatial and temporal dynamics of sandy coastal geomorphology in the east of Laizhou Bay over recent 60 years[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(9): 90-100.
- [16] 李雪艳, 王庆, 王红艳, 等. 莱州湾东部潮上带土地利用对海岸侵蚀的影响[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(6): 1347-1357. LI X Y, WANG Q, WANG H Y, et al. Impact of supratidal land use on coastal erosion along the eastern coast of Laizhou Bay in recent 20 years: a numerical simulation[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2015, 46(6): 1347-1357.
- [17] ZENG L, ZHAN C, WANG Q, et al. Sediment coarsening in tidal flats and stable coastline of the abandoned Southern Yellow River sub-delta in response to fluvial sediment flux decrease during the past decades[J]. Frontiers in Marine Science, 2021, 8: 761368-1-761368-11.
- [18] 王庆, 杨华, 仲少云, 等. 山东莱州浅滩的沉积动态与地貌演变[J]. 地理学报, 2003, 58(5): 749-756. WANG Q, YANG H, ZHONG S Y, et al. Sedimentary dynamics and geomorphic evolution of the Laizhou Shoal[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(5): 749-756.
- [19] WANG Q, ZHANG M M, ZHONG S Y, et al. Dynamic sedimentation and geomorphologic evolution of the Laizhou Shoal, Bohai Sea, Northern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 36(2/3): 196-208.
- [20] 仲少云, 王庆, 战超, 等. 最近50年来莱州湾东部典型砂岸潮上带土地利用变化研究[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(2): 410-419. ZHONG S Y, WANG Q, ZHAN C, et al. Changes in land-use of the supratidal zone of typical sandy coast along eastern Laizhou Bay in recent 50 year[J]. Oceanologia Et Limnologia Sincia, 2015, 46(2): 410-419.
- [21] YANG H F, YANG S L, XU K H, et al. Human impacts on sediment in the yangtze river: a review and new perspectives[J]. *Global and Planetary Change*, 2018, 162: 8-17.
- [22] 庄振业, 印萍, 吴建政, 等. 鲁南沙质海岸的侵蚀量及其影响因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(3): 16-21. ZHUANG Z Y, YIN P, WU J Z, et al. Coastal erosion and its influence on southern Shandong sandy coast[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2000, 20(3): 16-21.
- [23] 高志强, 刘向阳, 宁吉才, 等. 基于遥感的近30 a中国海岸线和围填海面积变化及成因分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(12): 140-147. GAO Z Q, LIU X Y, NING J C, et al. Analysis on changes in coastline and reclamation area and its causes based on 30-year satellite data in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(12): 140-147.
- [24] 自然资源部. 2021年中国海平面公报[EB/OL]. (2022-04-08)[2022-07-30]. http://gi.mnr.gov.cn/202205/t20220507_2735509.html 2022.

- Ministry of Natural Resources. China sea level bullet in 2021[EB/OL]. (2022-04-08)[2022-07-30]. http://gi.mnr.gov.cn/202205/t20220507_2735509.html 2022.
- [25] 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 J H, CAI F, ZHENG J X, 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.
- [26] 任宗海, 余建奎, 战超, 等. 荣成湾典型沙坝-潟湖海岸地貌演变研究[J]. 海洋通报, 2022. REN Z H, YU J K, ZHAN C, et al. Study on coastal geomorphic evolution of typical sandbar lagoon in Rongcheng Bay[J]. Marine Bulletin, 2022.
- [27] 郑楷源, 高超, 郑铣鑫, 等. 中国沿海地区相对海平面上升研究进展[J]. 宁波大学学报(理工版), 2022, 35(2): 113-120. ZHENG K Y, GAO C, ZHENG X X, et al. Research progresses in relative sea-level rise in China's coastal regions[J]. Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition), 2022, 35(2): 113-120.
- [28] 相文玺, 王慧, 李文善, 等. 2021年中国沿海海平面变化及影响状况[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(4): 516-522. XIANG W X, WANG H, LI W S, et al. Coastal sea level change and impacts in China: the state of 2021[J]. Climate Change Research, 2022, 18(4): 516-522.
- [29] BRUUN P. Sea-level rise as a cause of shore erosion[J]. *Journal of the Waterways and Harbors Division*, 1962, 88(1): 117-130.
- [30] PURVIS M J, BATES P D, HAYES C M. A probabilistic methodology to estimate future coastal flood risk due to sea level rise[J]. *Coastal Engineering*, 2008, 55(12): 1062-1073.
- [31] 王毅, 张晓美, 周宁芳, 等. 1990—2019年全球气象水文灾害演变特征[J]. 大气科学学报, 2021, 44(4): 496-506. WANG Y, ZHANG X M, ZHOU N F, et al. Evolution characteristics of global meteorological and hydrological disasters from 1990 to 2019[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021, 44(4): 496-506.
- [32] QI H S, CAI F, LEI G, et al. The response of three main beach types to tropical storms in South China[J]. *Marine Geology*, 2010, 275(1/4): 244-254.
- [33] SPLINTER K D, CARLEY J T, GOLSHANI A, et al. A relationship to describe the cumulative impact of storm clusters on beach erosion[J]. *Coastal Engineering*, 2014, 83: 49-55.
- [34] 高钦钦, 朱建荣, 端义宏, 等. 对称和非对称台风对东海南海风暴潮影响比较[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2012(6): 63-78. GAO Q Q, ZHU J R, DUAN Y H, et al. Impacts of symmetrical and unsymmetrical typhoons on the storm surge simulation in the East China and the South China Seas[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2012(6): 63-78.
- [35] WU G, SHI F, KIRBY J T, et al. Modeling wave effects on storm surge and coastal inundation[J]. *Coastal Engineering*, 2018, 140: 371-382.
- [36] LOUREIRO C, FERREIRA Ó, COOPER J A G. Extreme erosion on high-energy embayed beaches: influence of megarrips and storm grouping[J]. *Geomorphology*, 2012, 139-140: 155-171.
- [37] ZHU J, SHI F Y, CAI F, et al. Influences of beach berm height on beach response to storms: a numerical study[J]. *Applied Ocean Research*, 2022, 121: 103090-1-103090-13.
- [38] CASTELLE B, MARIEU V, BUJAN S, et al. Impact of the winter 2013–2014 series of severe western europe storms on a double-barred sandy coast: beach and dune erosion and megacusp embayments[J]. *Geomorphology*, 2015, 238: 135-148.
- [39] SCOTT T, MASSELINK G, O'HARE T, et al. The extreme 2013/2014 winter storms: beach recovery along the southwest coast of england[J]. *Marine Geology*, 2016, 382: 224-241.
- [40] 孙杰, 詹文欢, 姚衍桃, 等. 广东省海岸侵蚀现状及影响因素分析[J]. 海洋学报, 2015, 37(7): 142-152. SUN J, ZHAN W H, YAO Y T, et al. Current situation and influence factors of coastal erosion in Guangdong[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(7): 142-152.
- [41] 蔡锋. 中国海滩资源概述[M]. 北京: 海洋出版社, 2019. CAI F. Brief introduction of Chinese beach resources[M]. Beijing: China Ocean Press, 2019.
- [42] 张林. 苏北废黄河三角洲海岸冲淤演变及其控制因素[D]. 上海: 华东师范大学, 2016. ZHANG L. The coastal erosion-deposition evolution and controlling factors of the abandoned Yellow River delta in northern Jiangsu Province[D]. Shanghai: East China Normal University, 2016.
- [43] KESHTPOOR M, PULEO J A, GEBERT J, et al. Beach response to a fixed sand bypassing system[J]. *Coastal Engineering*, 2013, 73: 28-42.
- [44] KRAUS N C. The effects of seawalls on the beach: an extended literature review[J]. Journal of coastal Research, 1988: 1-28.
- [45] 曹惠美, 蔡锋, 苏贤泽, 等. 海滩养护和修复工程的动态平衡滨线设计研究——以浙江省苍南县炎亭湾海滩修复工程设计为例[J]. 应用海洋学报, 2018, 37(2): 185-193. CAO H M, CAI F, SU X Z, et al. Study on the plan of dynamic equilibrium shoreline for beach nourishment and restoration: taking the plan of the beach nourishment in Yanting Bay, Cangnan County, Zhejiang Province as an example[J]. Journal of Applied Oceanography, 2018, 37(2): 185-193.
- [46] ZHU J, CAI F, SHI F Y, et al. Beach response to breakwater layouts of drainage pipe outlets during beach nourishment[J]. Estuarine, Coastal Shelf Science, 2019, 228(15): 106354-1-106354-13.

- [47] 李蒙蒙, 王庆, 张安定, 等. 最近50年来莱州湾西—南部潮流动力演变的数值模拟研究[J]. 海洋学报, 2014, 36(5): 68-76. LI M M, WANG Q, ZHANG A D, et al. Study on the evolution of the tidal morphodynamic processes in south-western Laizhou Bay based on numerical simulation in the past 50 years[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(5): 68-76.
- [48] WANG Q, ZHONG S Y, LI X Y, et al. Supratidal land use change and its morphodynamic effects along the eastern coast of Laizhou Bay during the recent 50 years[J]. Journal of Coastal Research, 2016, 74: 83-94.
- [49] PONTEE N, NARAYAN S, BECK M W, et al. Nature-based solutions: lessons from around the world[J]. Maritime Engineering, 2016, 169(1): 29-36.
- [50] 钟超, 石洪源, 隋意, 等. 我国海岸侵蚀的成因和防护措施研究[J]. 海洋开发与管理, 2021, 38(6): 42-45. ZHONG C, SHI H Y, SUI Y, et al. The causes and protective measures of coastal erosion in China[J]. Ocean Development and Management, 2021, 38(6): 42-45.
- [51] 李雪艳, 王庆, 朱小松, 等. 不同板式透空堤消浪性能的数值研究[J]. 船舶力学, 2019, 23(10): 1198-1209. LI X Y, WANG Q, ZHU X S, et al. Numerical study on the wave attenuation performance of the different plate type open breakwaters[J]. Journal of Ship Mechanics, 2019, 23(10): 1198-1209.
- [52] 朱君, 蔡锋, 刘建辉, 等. 海滩养护修复过程中拦沙堤的应用[J]. 海洋工程, 2021, 39(6): 1-13. ZHU J, CAI F, LIU J H, et al. Application of groin system in beach nourishment[J]. The Ocean Engineering, 2021, 39(6): 1-13.
- [53] SHI F, CAI F, KIRBY J T, et al. Morphological modeling of a nourished bayside beach with a low tide terrace[J]. Coastal Engineering, 2013, 78: 23-34.
- [54] 朱君, 蔡锋, 戚洪帅, 等. 侵蚀海岸平面复合式海滩修复方法: 中国, ZL201911023838.1[P]. 2021-04-20. ZHU J, CAI F, QI H S, et al. Restoration method of flat composite beach on eroded coast: China, ZL201911023838.1[P]. 2021-04-20.
- [55] 温昌麒, 朱君, 蔡锋, 等. 海滩修复工程影响下的低能海岸波浪能量时空分布特征研究[J]. 海洋与湖沼, 2021, 52(1): 75-85. WEN C Q, ZHU J, CAI F, et al. Spatial and temporal distribution of wave energy on low energy coasts under the effect of beach restoration project[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2021, 51(1): 75-85.
- [56] 杨燕雄, 张甲波, 刘松涛. 秦皇岛海滩养护工程的实践与方法[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(3): 1-15. YANG Y X, ZHANG J B, LIU S T, et al. What we have learnt from the beach nourishment project in Qinhuangdao[J]. Marine Geology Frontiers, 2014, 30(3): 1-15.
- [57] 张小霞, 陈新平, 米硕, 等. 我国生物海岸修复现状及展望[J]. 海洋通报, 2020, 39(1): 1-11. ZHANG X X, CHEN X P, MI S, et al. Rehabilitation of biological coasts of China[J]. Marine Science Bulletin, 2020, 39(1): 1-11.
- [58] 杨盛昌, 陆文勋, 邹祯, 等. 中国红树林湿地: 分布、种类组成及其保护[J]. 亚热带植物科学, 2017, 46(4): 301-310. YANG S C, LU W X, ZOU Z, et al. Mangrove wetlands: distribution, species composition and protection in China[J]. Subtropical Plant Science, 2017, 46(4): 301-310.
- [59] 许方宏, 吴晓东, 陈粤超, 等. 雷州半岛前沿恶劣潮间滩涂红树林造林树种的选择[J]. 防护林科技, 2013, 117(6): 7-9. XU F H, WU X D, CHEN Y C, et al. Tree species selection for mangrove afforestation on the frontier harsh intertidal mudflats in Leizhou Peninsula[J]. Protection Forest Science and Technology, 2013, 117(6): 7-9.
- [60] 黄晖, 尤丰, 练健生, 等. 海南岛西北部海域珊瑚礁造礁石珊瑚种类组成与分布[J]. 海洋科学, 2012, 36(9): 64-74. HUANG H, YOU F, LIAN J S, et al. Composition and distribution of scleractinian coral in the northwest of Hainan Island[J]. Marine Sciences, 2012, 36(9): 64-74.
- [61] 于文胜, 王远飞, 梁玉, 等. 黄河三角洲湿地植被演替规律及生态修复效果研究[J]. 山东林业科技, 2011, 41(2): 31-34. YU W S, WANG Y F, LIANG Y, et al. Study on vegetation succession and ecological restoration effect of wetland in Yellow River Delta[J]. Shandong Forestry Science and Technology, 2011, 41(2): 31-34.
- [62] 徐伟, 陶爱峰, 刘建辉, 等. 国际海岸带生态防护对我国生态海堤建设的启示[J]. 海洋开发与管理, 2019, 36(10): 12-15. XU W, TAO A F, LIU J H, et al. The enlightenment of international coastal zone ecological protection for China's ecological sea dike construction[J]. Marine Development and Management, 2019, 36(10): 12-15.
- [63] LI X Y, LI Q, WANG Q, et al. Numerical and experimental investigation on the hydrodynamic characteristics of an arc-shaped plate-type breakwater under the action of long-period waves[J]. Ocean Engineering, 2020, 219: 108198.
- [64] 刘彦. 人工鱼礁水动力特性数值与实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014. LIU Y. Numerical simulations and laboratory experiments of hydrodynamics for artificial reefs[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [65] 朱君, 王庆, 战超, 等. 可调节拦沙量的开孔拦沙堤形态布设方法、布设系统及应用: 中国, CN202111333632.6[P]. 2022-02-15. ZHU J, WANG Q, ZHAN C, et al. Configuration layout method, layout system and application of opening sand-retaining embankment with adjustable sediment-retaining capacity: China, CN202111333632.6[P]. 2022-02-15.
- [66] 王强, 刘睿, 梁丙臣. 倾斜挡浪板式桩基透空型防波堤的消浪性能研究[J]. 海岸工程, 2022, 41(2): 95-104. WANG Q, LIU R, LIANG B C. Experimental study on wave-dissipating performance of pile-supported breakwater with perforated inclined wave screen[J]. Coastal Engineering, 2022, 41(2): 95-104.
- [67] 丁洁, 王浩宇, 王杰群, 等. 梳式防波堤研究综述[J]. 珠江水运, 2021(10): 29-30. DING J, WANG H Y, WANG J Q, et al. A review of comb-type breakwater research[J]. Pearl River Water Transport, 2021(10): 29-30.
- [68] 栾爱妮, 陈汉宝. 浮式防波堤研究进展[J]. 水运工程, 2021(3): 64-69. LUAN Y N, CHEN H B. Research progress of floating breakwater[J].

- Port & Waterway Engineering, 2021(3): 64-69.
- [69] 肖宇, 陈杰, 高清洋, 等. 挡板式防波堤影响下的沙质岸滩剖面变化实验[J]. 交通科学与工程, 2016, 32(1): 72-76. XIAO Y, CHEN J, GAO Q Y, et al. Experiment of sandy beach profile changes under the effect of the baffle breakwater[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2016, 32(1): 72-76.
- [70] 王丽雪, 李雪艳, 王庆, 等. 双弧板式透空堤消浪特性物理模型试验[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2020, 59(4): 534-539. WANG L X, LI X Y, WANG Q, et al. Physical model test on wave dissipation characteristics of double arc-plate permeable breakwater[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2020, 59(4): 534-539.
- [71] LI X Y, WANG L X, WANG Q, et al. A comparative study of the hydrodynamic characteristics of permeable twin-flat-plate and twin-arc-plate breakwaters based on physical modeling[J]. Ocean Engineering, 2021, 219: 108-270.
- [72] 王厚军, 丁宁, 岳奇, 等. 陆海统筹背景下海域综合管理探析[J]. 海洋开发与管理, 2021, 38(1): 3-7. WANG H J, DING N, YUE Q, et al. Analysis on the comprehensive management of sea areas under the background of land-sea coordination[J]. Marine Development and Management, 2021, 38(1): 3-7.
- [73] 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 Z W, LIU Z J, LIU J H. Key issues and future direction of marine ecosystem protection and restoration in China[J]. Marine Development and Management, 2018, 35(10): 26-30.
- [74] 戚洪帅, 蔡锋, 刘建辉, 等. 我国海洋生态修复技术标准现状及体系建设的思考[J]. 应用海洋学学报, 2022, 41(2): 201-208. QI H S, CAI F, LIU J H, et al. Status of the marine ecological restoration standards with systematics construction considerations[J]. Journal of Applied Oceanography, 2022, 41(2): 201-208.
- [75] 时连强, 郭俊丽, 刘海江, 等. Argus系统在我国海滩研究中的应用进展与展望[J]. 地球科学进展, 2019, 34(5): 552-560. SHI L Q, GUO J L, LIU H J, et al. Application progress and prospect of Argus system in beach research in China[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(5): 552-560.
- [76] 姚伟. 基于机器学习的南海北部风暴增水预报研究[D]. 北京: 国家海洋环境预报中心, 2021. YAO W. Research on forecasting storm surge in the northern South China Sea based on machine learning[D]. Beijing: National Marine Environment Prediction Center, 2021.
- [77] 杨一帆, 邹军, 石明明, 等. 数字孪生技术的研究现状分析[J]. 应用技术学报, 2022, 22(2): 176-188. YANG Y F, ZOU J, SHI M M, et al. Analysis of the research status of digital twin technology[J]. Journal of Technology, 2022, 22(2): 176-188.

Research Progress of Coastal Erosion and Protection Technology

WANG Qing, ZHU Jun, ZHAN Chao

(Coastal Research Institute, Ludong University, Yantai 264025, China)

Abstract: The global coastal erosion is widely distributed, bringing huge losses to the production and life of coastal people. Based on the previous researches and the author's research results in Shandong Peninsula and Yellow River Delta, the paper analyzes the temporal and spatial variation of coastal erosion and protection technology in recent years. The results show that, firstly, coastal erosion is an adaptive adjustment and rebalancing process of coastal morphodynamics, with significant spatial differences and temporal nonlinearity. Secondly, the influencing factors of coastal erosion are significantly diverse, and the erosion mechanism is significantly regional. Finally, coastal erosion protection and restoration should focus on the sustainability of the effect. On the basis of in-depth research and elucidation of the evolution trend of regional coastal morphodynamics, "soft" coastal protection technology and new coastal protection structures should be developed and applied.

Key words: coast erosion; human activity; protection technology; sediment coarsening

Received: July 30, 2022