

犀丽湾海滩演化分析及修复方案比选研究

宋伟龙¹, 孙永根^{1,2}, 张志卫^{1,2}, 陈超豪³

(1.自然资源部第一海洋研究所 海岸带科学与海洋发展战略研究中心, 山东 青岛 266061; 2.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; 3.钦州市海洋环境监测预报中心, 广西 钦州 535000)

摘要:为提升犀丽湾海滩的稳定性、优化其亲海空间, 本文基于犀丽湾海滩不同年份的水深测量数据及历史资料, 分析了犀丽湾海滩的冲淤演变特征, 并采用 MIKE21 软件的 Litline 模块探究了不同修复方案的海滩演变趋势。结果表明, 犀丽湾海滩存在明显的东侧侵蚀和西侧淤积现象, 东侧侵蚀热点区的海滩滩肩下蚀幅度超过 2.6 m, 其他岸段基本处于冲淤平衡状态, 仅局部偶见小范围侵蚀。此外, 水下岸坡总体呈“东侧侵蚀、中部淤积和西侧稳定”的特征, 局部区域伴有大幅度下蚀; 各海滩养护方案的岸线模拟结果对比显示, 渐进式人工补沙与拦沙堤相结合的生态修复方案在防治犀丽湾海滩侵蚀和泥沙流失上具有突出效果, 有助于优化海滩稳定性和海岸景观, 并进一步提升犀丽湾海滩的防灾减灾能力、生态环境质量和亲海空间品质。

关键词:海岸侵蚀; 数值模拟; 海滩养护; 犀丽湾

中图分类号: P748; X32

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2025)02-0276-08

Evolutionary analysis and comparison of restoration scheme for Xili bay beach

SONG Weilong¹, SUN Yonggen^{1,2}, ZHANG Zhiwei^{1,2}, CHEN Chaohao³

(1. Research Center of Coastal Science and Marine Planning, First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China; 2. Key Laboratory of Coastal Science and Integrated Management, MNR, Qingdao 266061, China; 3. Qinzhou Marine Environment Monitoring and Forecasting Center, Qinzhou 535000, China)

Abstract: Based on bathymetric data and historical information in different years, this paper analyzed Xili bay beach's erosion and deposition evolution characteristics and explored beach evolution trends after implementing different restoration schemes by Litline module in MIKE21, aiming to enhance its coastal stability and optimize its sea-friendly space. The research results show Xili bay beach exhibits significant erosion on the east-side and deposition on the west-side, the down-cutting amplitude in the beach berm exceeds 2.6 m at east-side erosion hotspots, while the rest of the shoreline basically maintains an equilibrium between erosion and deposition, with only occasional small-scale local erosion. Furthermore, it is east-side erosion, west-side stabilization, central-side siltation, and concomitant substantial local erosions that are the overall underwater slope morphology characteristic in Xili bay beach. The comparison of shoreline simulation results for various beach nourishment schemes indicates the outstanding effectiveness in combating beach erosion and sediment loss in Xili Bbay Bbeach, by utilizing an ecological restoration scheme combined with progressive

收稿日期: 2024-03-27, 修订日期: 2024-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42376228)

作者简介: 宋伟龙(2000—), 男, 山东日照人, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋资源环境演变与海岸带韧性研究, E-mail: songwl@fio.org.cn

通信作者: 陈超豪(1990—), 广西钦州人, 学士, 工程师, 主要研究方向为海岸生态修复工程, E-mail: 437727095@qq.com

beach nourishment and groin, which contributes to optimizing beach stability and coastal landscape, and further elevating disaster prevention and mitigation capabilities, ecological environment quality, and sea-friendly space quality in Xili bay beach.

Key words: coastal erosion; numerical simulation; beach nourishment; Xili bay

海滩作为重要的滨海资源,不仅是抵御风暴、波浪的第一道防线,还能提供城市发展、集水净化、碳储存、生态栖息、渔业养殖、港口航运、休闲旅游、教育和科研等多重服务和功能^[1-2],对于保障海洋经济发展、推动人海和谐具有重要意义。然而,海岸侵蚀现已成为砂质海岸亟须解决的生态环境问题之一,造成海岸带自然资源、滨海财产、基础设施、沿海景观、生物多样性和沿海栖息地的破坏,对砂质海岸的生态环境和经济发展产生深远的负面影响^[3-5]。目前,全球约7%的沙滩遭受严重侵蚀,24%的沙滩侵蚀速度超过0.5 m/a^[6],我国约有50%的砂质海岸正处于侵蚀状态^[7]。随着海平面上升、极端事件频发以及人类活动加剧等环境压力增大,海滩的侵蚀后退和环境破碎化问题不断加剧,对海滩整治修复提出了更高的要求和挑战。目前,基于自然、生态系统的环境友好型保护与修复措施已成为海岸修复的主流,海岸防护正由传统的“硬”防护向以生态修复、生物防护为主的“软”防护转变^[8-9]。其中,海滩养护因在维持生态平衡、海滩美学和栖息地功能等方面具有突出优势^[10],逐渐成为海滩适应性保护与管理的首要措施。自20世纪90年代以来,我国发展并形成了多种适应性海滩养护技术和方案^[11-14],取得了理想的养护效果。为了验证海滩养护方案的合理性和可行性,XBeach、LITPACK和GENESIS等岸滩演化模型已被广泛应用于海滩养护方案的验证和比选^[15-18],现已成为设计和优化海滩养护方案的重要辅助工具。为进一步提升犀丽湾海滩的防灾减灾能力和生态功能,本研究基于犀丽湾海滩的水深测量数据,分析了犀丽湾海滩的冲淤现状和演化趋势,并针对其未来演化趋势设计了可行的海滩养护方案。在此基础上,利用MIKE21软件的Litline模块搭建岸线演变模型对各海滩修复方案进行比选分析,以优化犀丽湾海滩的整治修复方案。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

1.1.1 地理位置

犀丽湾位于广西壮族自治区钦州市钦南区的犀牛脚,区位条件优越,东毗三娘湾景区,西邻钦州保税港片区,北承犀牛脚镇区,南接钦州湾。犀丽湾作为滨海休闲娱乐的重要空间载体,拥有长达2.8 km的天然岬湾弧形海滩,海滩呈东西走向,后滨有成片的木麻黄防风林。犀丽湾作为广西四星级乡村旅游区,满足了公众近海、亲海、观海、品海的需求,现已成为广西钦州的核心旅游热点之一。然而,近年来犀丽湾海滩的侵蚀后退不断加剧,引起了海滩宽度缩减、滩面泥沙粗化和防护林根系出露等问题,严重损害了犀丽湾的生态功能和景观质量。

1.1.2 地形地貌

地形地貌格局可调整海滩形态演化过程中的水动力特征与泥沙连通性,从而改变海岸动力过程和泥沙搬运路径。研究区东侧,存在垂直于海滩的直立式护岸,研究区西侧则发育有高程为2.5~3.5 m的天然礁石,在礁石和急水山岛之间形成了一条连通犀丽湾与鹿耳环江的水道。此外,2010年三墩公路建成后将原本开放式的海域圈挡并划分为狭长的半封闭式海湾,使三墩公路与急水山岛之间的海域成为鹿耳环江潮水涨落的主要通道。

1.1.3 波浪

波浪是砂质海岸形成发育过程中的关键动力因素,可影响岸滩的冲淤变化。2010—2011年三墩波浪观测站的 $H_{1/10}$ (十分之一大波波高)波浪玫瑰图(图1)显示,三墩站常浪向为N,频率为16.54%,次浪向为S,频率为15.45%;强浪向为SE、SSE, $H_{1/10}$ 最大值为2.4 m;次强浪向为ESE, $H_{1/10}$ 最大值为2.0 m。鹿耳环江南向开口的狭长型海湾形态决定了该区域受外海南向波浪的影响较大,而其他浪向的波浪影响甚微。钦

州湾南向为主(S~SSW)的波浪进入鹿耳环江后,经水下地形的折射作用,使传播至犀丽湾海滩的浪向基本垂直于中部岸段,与两侧岸段稍呈一定夹角。

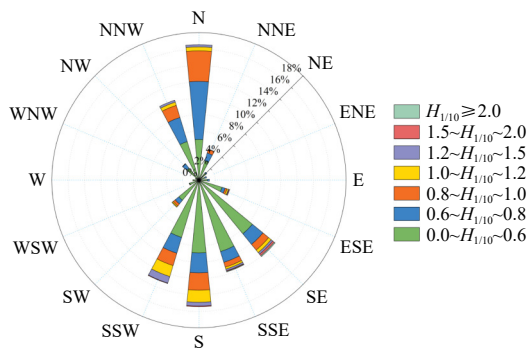


图1 三墩站 $H_{1/10}$ 波浪玫瑰图(2010.06—2011.05)

Fig. 1 Wave rose of $H_{1/10}$ at Sandun station(2010.06—2011.05)

1.1.4 潮流

钦州湾潮流性质属不规则全日潮,潮流运动形式为往复流,流向总体与岸线和深槽的走向一致,基本沿岸流动^[19]。根据龙门站 1966—2002 年的观测统计资料,海区历年最高高潮位为 3.96 m,最低低潮位为-2.55 m,多年平均潮差为 2.46 m。三墩公路建成后的水动力研究表明,鹿耳环江在大潮期间的潮差达 3.5 m,具有全日潮特征,而小潮期间潮差为 0.7 m,表现为半日潮特征^[20]。进入研究区的涨潮流以东南向为主,受海湾的整体形态影响,急水山岛两侧水道的潮通量增大、流速较快,余流的流向以偏北、偏东和偏西为主,驱动潮流携带泥沙向鹿耳环江湾内运动^[19]。

1.2 数据与方法

1.2.1 研究数据

本研究根据 2013 年、2022 年通过单波束测深仪所测的水深数据,采用克里金插值法生成两期犀丽湾 DEM 数据,并在典型岸段选取 3 条长约 1 km 的代表性水下剖面(剖面 A、剖面 B 和剖面 C),绘制水下地形剖面图。水深测量的深度误差限值为 ± 0.2 m,插值的标准均方根误差为 1.004。此外,本研究在 2015 年、2021 年对犀丽湾海滩开展了实地测量,在典型位置布设了 4 条垂直于岸线的监测剖面(图 2),自潮上带稳定基点向海延伸,自西向东分别为 x11、x12、x13、

x14。海滩测量采用 CORS 系统的 GNSS RTK,按 5 m 进行等间距测量,并在地形突变处加密测量,测量精度为厘米级,平面坐标采用 CGCS2000 坐标系,高程采用 1985 国家高程基准。

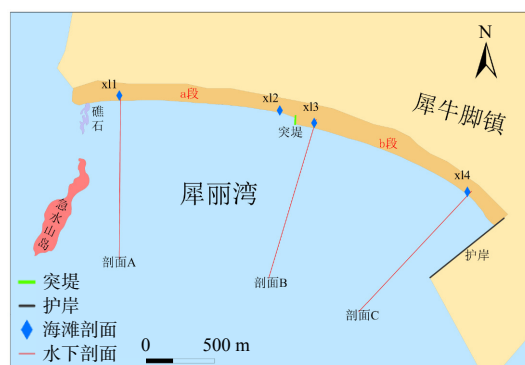


图2 犀丽湾海滩典型剖面位置

Fig. 2 Typical profile locations of Xili bay beach

1.2.2 模型配置

本研究利用 MIKE21 软件的 Litline 模块搭建模型,水深地形数据采用 2022 年实测资料,以滩肩线为初始计算岸线,波浪数据源自三墩站统计资料,浪向设置为 S~SSW,海滩泥沙粒径为 0.5 mm,应用岸线演变控制方程[公式(1)]计算犀丽湾的岸线演变趋势。此外,对研究区的岸线和构筑物进行了概化处理,以礁石概化为海堤,以现状岸堤概化为突堤,以急水山岛和潜堤概化为离岸堤,概化后计算的岸线演变趋势与自然演变趋势基本一致,但局部区域的冲淤幅度稍有偏差。

$$\frac{\partial y_c(x)}{\partial t} = -\frac{1}{h_{act}(x)} \cdot \frac{\partial Q(x)}{\partial x} + \frac{Q_{sou}(x)}{h_{act}(x)\Delta x} \quad (1)$$

式中: $y_c(x)$ 为岸线至基线的距离 (m); $h_{act}(x)$ 为海滩剖面的有效高程 (m); $Q(x)$ 为沿岸输沙率 (m^3/s); x 为岸线相对基线的位置 (m); Δx 为岸线离散步长 (m); $Q_{sou}(x)$ 为源/汇项 (m^3/s)。

1.2.3 模型验证

本研究以 2013 年的犀丽湾岸线为初始岸线,模拟计算犀丽湾 10 年后的岸线形态,并以 2022 年的实际岸线为参照进行对比验证。岸线演变模拟结果(图 3)表明:模拟得到的整体岸线演变趋势与实测岸线的拟合程度较好,即 MIKE21 软件的 Litline 模块可较为合理地模拟犀丽湾海滩的岸线演变趋势。

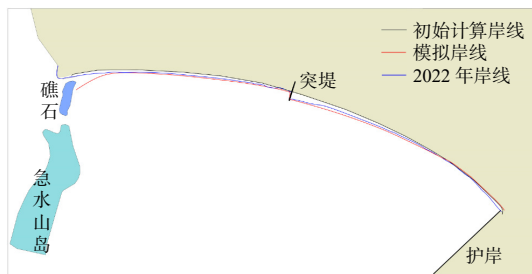


图3 犀丽湾海滩岸线演变模型验证

Fig. 3 Verification of shoreline evolution model for Xili bay beach

2 结果与讨论

2.1 海滩演变特征

2.1.1 犀丽湾海滩剖面变化

犀丽湾海滩中部存在垂直于岸线的突堤, 其两侧的海滩宽度和冲淤状态具有明显差异, 东侧向海淤积, 西侧向陆蚀退, 海滩宽度呈东宽西窄。本研究以突堤为界, 将犀丽湾海滩分为 a、b 两个地貌单元, 并分别在 a、b 段两侧设置 x11、x12、x13 和 x14 四个监测剖面 (图 2), 2015—2021 年犀丽湾海滩监测剖面变化如图 4 所示。

a 段海滩总体保持相对稳定, 除滩肩以上区域呈明显下蚀外, 其他区域无大幅度的冲淤变化。a 段西侧 x11 剖面总体呈弱淤积状态 [图 4(a)], 滩面略有淤高, 滩面高程增加量为 0~0.2 m, 剖面坡度呈“陡-缓-陡”的变化特征; 东侧 x12 剖面总体处于侵蚀状态 [图 4(b)], 剖面坡度相对较陡。犀丽湾海滩中部的突堤, 不仅会阻碍沿岸输沙, 还会增强波浪经其绕射作用后形成的波浪场, 导致 a 段海滩东侧发生小规模的侵蚀后退。由于 a 段海滩西侧的天然礁石具有拦沙和遮蔽作用, x11 剖面总体处于淤积状态, 但礁石阻挡泥沙沿岸流失的能力受限于天然礁石的高度, 导致在风暴潮和极端风浪期间, 高于礁石滩肩沉积物被掏蚀和搬运, 从而形成“上部侵蚀, 下部淤积”的滩肩形态。后滨的沉积物粒径相对较细, 受风暴潮和极端风浪的影响, 滩肩沉积物易被沿岸流和回流启动与搬运, 导致海滩滩肩区域被侵蚀破坏。a 段海滩的特大高潮线以上滩肩区域普遍呈下蚀状态, 且 x12 剖面的下蚀幅度最大可达到 2 m。自突堤向西, 随着波能逐渐衰减和泥沙供应增加, 海滩滩肩的侵蚀程度逐渐减小。

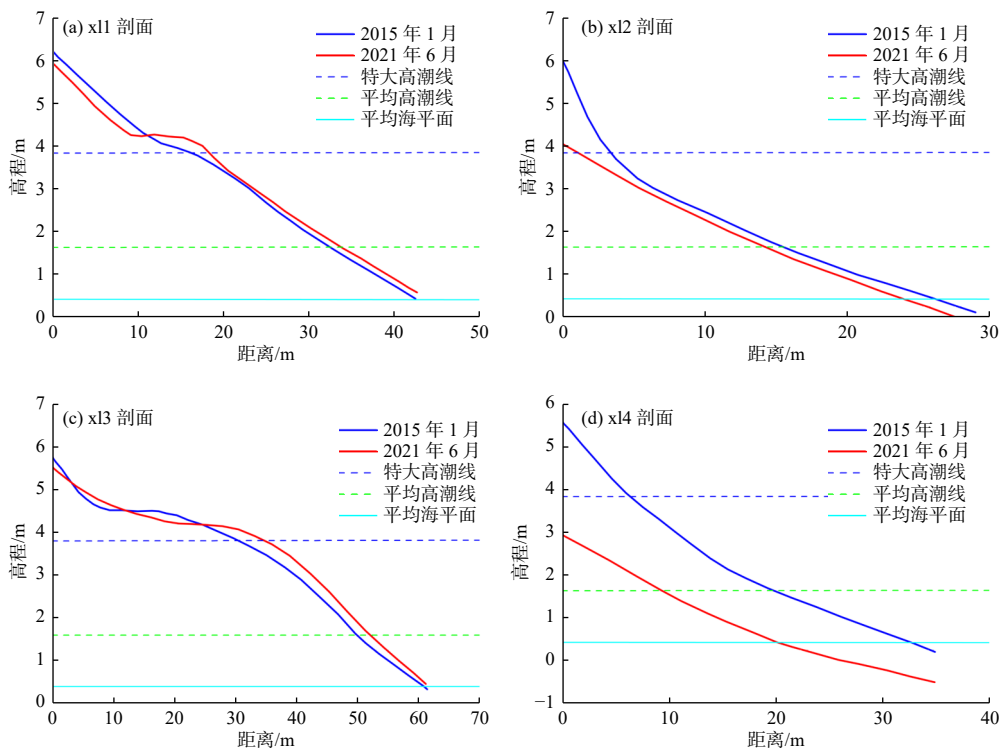


图4 2015—2021 年犀丽湾海滩剖面变化

Fig. 4 Changes in the profile of Xili bay beach from 2015 to 2021

b段海滩冲淤变化显著,海滩呈东窄西宽的形态特征。西侧 x13 剖面 [图 4(c)], 海滩总体向海淤积推进, 最大淤积幅度达 0.4 m, 剖面坡度呈“陡-缓-陡”的变化特征, 特大高潮线以上滩肩存在侵蚀与淤积交替出现的现象。东侧 x14 剖面 [图 4(d)], 海滩总体向陆侵蚀后退, 平均侵蚀幅度约为 1.2 m, 其中滩肩区域的下蚀幅度超过 2.6 m。由于 b 段海滩东侧存在垂直于岸线的人工护岸, 海滩的区域连通性降低、沉积物供应不足, 并且波浪经护岸的反射和绕射作用后增强了该区域的沿岸流和波浪场。在风暴潮增水和极端风浪期间, 水位急剧上涨、水动力增强, 导致特大高潮线以上的滩肩区域被严重掏蚀, 使该区域成为犀丽湾海滩的侵蚀热点区。自东向西至犀丽湾中部, 水动力逐渐减弱, 沿岸输送的泥沙被突堤阻挡而沉积, 使 x13 剖面周围的海滩向海淤积推进。此外, 突堤在风暴潮和极端风浪期间可拦截局部区域的泥沙, 泥沙需绕过突堤并在其两端运移, 从而在 x13 剖面的上部形成侵蚀与淤积交替出现的沉积特征。

综上所述, 犀丽湾海滩演变特征较为明显, a、b 两段海滩均存在不同程度的“东侧侵蚀后退, 西侧淤积推进”现象; 海滩的特大高潮线以上滩肩区域普遍发生下蚀, 并且海滩中部的突堤和西侧的天然礁石在阻挡泥沙流失方面发挥了重要作用。

2.1.2 犀丽湾水下剖面变化

水下岸坡与滩面是相互关联、相互作用的地貌单元, 两者的发育与泥沙的横、纵向运移密切相关, 水下岸坡的形态变化可反映海滩的稳定性和水动力特点, 有助于全面了解海滩的冲淤状态和演变趋势。通过对比分析 2013—2022 年犀丽湾海滩的水下剖面(图 5)可知, 海滩东侧侵蚀作用明显, 中部以淤积作用为主, 而西侧除存在局部小范围侵蚀外, 总体呈冲淤平衡状态。剖面 A 的局部区域冲淤波动较大 [图 5(a)], 海滩滩肩处淤积幅度超过 2 m, 而在距起点 240 ~ 400 m 和 800 m 以外的水下岸坡呈大幅度下蚀, 最大侵蚀幅度超过 1 m; 剖面 B 总体处于淤积状态 [图 5(b)], 仅在距起点 820 m 以外的水下岸坡处存在下蚀现象; 剖面 C 总体处于侵蚀状态

[图 5(c)], 主要发生于海滩前滨和距起点 600 ~ 950 m 的水下岸坡区域, 下蚀幅度为 0.2 ~ 0.7 m。

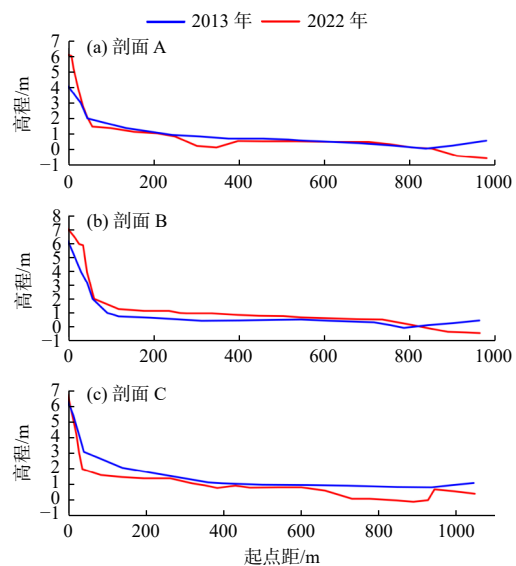


图 5 2013—2022 年犀丽湾海滩水下剖面变化

Fig. 5 Changes in the underwater profile of Xili bay beach from 2013 to 2022

在水动力、沉积物以及沿岸结构等因素的共同作用下, 海滩滩面和水下岸坡均呈明显的冲淤变化。在研究区东侧, 由于区域连通性和波浪场的变化, 海水的冲刷作用增强并携带泥沙沿岸流动, 导致滩面和水下岸坡发生大幅度的冲蚀。随着海水和泥沙自东向西移动, 波浪波能和潮流流速逐渐下降, 海滩由侵蚀状态转为淤积状态, 并在研究区中部形成淤积区。潮汐涨落时, 流经礁石和急水山岛之间水道的水流速较快, 导致海底泥沙被启动和搬运, 在水道区域(剖面 A 水下岸坡 240 ~ 400 m 处)形成冲刷区, 落潮时, 自西向东的海水沿水道将泥沙搬运至海滩中部并发生沉积。此外, 急水山岛和三墩公路之间的狭窄水道是外海与鹿耳环江海水交换的主要通道, 在涨、落潮时海水流速较快, 导致水道区域(水下岸坡 800 ~ 1000 m 处)被冲刷。总体而言, 犀丽湾水下剖面冲淤变化明显, 东侧呈侵蚀状态, 中间呈淤积状态, 西侧呈冲淤平衡状态, 且三个剖面均存在局部小范围的侵蚀现象。

2.2 海滩修复方案模拟比选

2.2.1 海滩修复方案

犀丽湾海滩呈东部侵蚀、西部淤积的演变特

征,并存在自东向西的沿岸输沙。为维系海滩稳定性、拓展海滩亲海空间、提升海滩防灾减灾能力,亟须对犀丽湾海滩进行海滩养护。根据以往海滩养护经验^[11,21-22],为限制养护期间的沉积物流失、提升海滩养护效果并降低工程投入和后期管理成本,在对侵蚀退化的海滩进行人工补沙时,常辅以拦沙堤、丁坝和潜堤等硬质防护工程。本研究根据犀丽湾海滩的岸线形态、演变特征以及影响因素,遵循“自然修复为主、人工修复为辅”的原则,提出了干滩补沙、修筑拦沙

堤和潜堤等可行的修复方案,通过人工干预提升海滩稳定性和生态环境质量。

目前,犀丽湾海滩的自然供沙不足,为快速增加滩肩宽度并拓宽休闲空间,需进行干滩补沙。本研究基于海滩东窄西宽和西向沿岸输沙的特点,设计了自西向东 50~80 m 不等宽的渐进式补沙方案。同时,为减缓海岸侵蚀和泥沙流失,分别制定了在西侧天然礁石处修建拦沙堤和在滩东新建离岸潜堤的海滩养护方案。设计方案见表 1。

表 1 犀丽湾海滩修复比选方案
Tab.1 Comparison of restoration schemes for Xili bay beach

方案	补沙方式	补沙宽度	辅助工程	施工坡度
F0	干滩补沙	整体宽度 50 m	无	1:15
F1	干滩补沙	a 段平均宽度 50 m; b 段自西向东 50~80 m	无	1:20
F2	干滩补沙	a 段平均宽度 50 m; b 段自西向东 50~80 m	拦沙堤	1:20
F3	干滩补沙	a 段平均宽度 50 m; b 段自西向东 50~80 m	潜堤	1:20

2.2.2 海滩养护方案岸线演变模拟

为评估各修复方案的海滩养护效果,本研究根据犀丽湾海滩的演变机制和地貌特征,分别模拟了 F0~F3 海滩养护方案实施 1 年、3 年、5 年和 10 年后的岸线形态变化。该项目亦对海湾开展了大范围的泥沙冲淤模拟,而模拟结果表明除近岸工程区域变化较大外,大范围的海湾冲淤变化较小,受限于篇幅并未将其纳入。岸线模拟结果可合理地展现各方案实施后犀丽湾海滩的冲淤变化,为后续工程实施提供科学的数据支撑,各方案模拟结果如下:

方案 F0,未改变研究区的水动力条件,输沙方向为自东向西。海滩的冲淤幅度以滩肩线为起算位置,岸线演变计算结果[图 6(a)]表明,方案 F0 实施后,东侧海滩持续缩窄,中部和西侧礁石处的海滩则不断向海推进。补沙 5 年后,东侧海滩最大侵蚀幅度约为 47 m,而西侧海滩的最大淤积幅度约为 28 m;补沙 10 年后,东侧退缩至海滩修复边缘的海滩长达 360 m,西侧天然礁石处海滩的最大淤积幅度约为 40 m。总体而言,该方案在短时间内快速增加了海滩宽度,优化了岸线形态和海滩景观,但海滩宽度难以长久维持,养护周期过短。

方案 F1, a 段补沙宽度为 50 m, b 段自西向东以 50~80 m 渐进式增加补沙宽度,水动力条件亦未发生改变。岸线演变计算结果[图 6(b)]表明,方案 F1 实施后,海滩总体冲淤状态与方案 F0 一致,不同之处在于东侧海滩的蚀退幅度得到一定控制,且中部和西侧的海滩淤积幅度显著增加。补沙 3 年后,东侧海滩最大侵蚀幅度约为 25 m,而西侧礁石处海滩的最大淤积幅度约为 20 m;补沙 10 年后,西侧礁石处海滩的最大淤积幅度为 41 m,东侧海滩侵蚀至修复边缘处的岸滩长度约为 250 m。相较于方案 F0,该方案使东侧侵蚀至修复边缘处的海滩长度缩减了 110 m。总体而言,采用渐进式补沙的方案 F1 在缓解东侧海滩侵蚀后退方面具有显著效果,有助于维持犀丽湾海滩的稳定性和缓冲空间、延长海滩的养护周期并降低后期养护成本。

方案 F2,采用 50~80 m 渐进式干滩补沙,并依托西侧天然礁石建造长 150 m 的拦沙堤,该方案将改变研究区西侧礁石周围的水动力条件和泥沙搬运路径。岸线演变计算结果[图 6(c)]表明,中部和东侧海滩的岸线演变趋势与方案 F1 一致,但拦沙堤堤根处的海滩宽度显著增

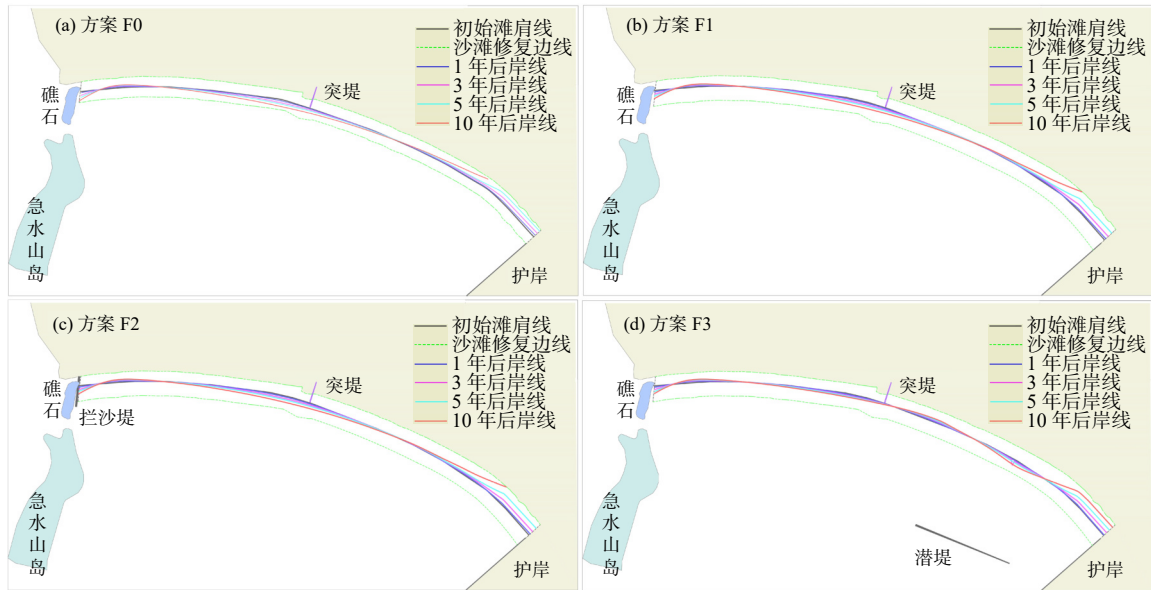


图6 犀丽湾海滩修复后岸线演变趋势

Fig. 6 Evolutions of shoreline after the restoration of Xili bay beach

加。补沙1年、3年和5年后的最大淤积幅度分别为10 m、22 m和32 m,补沙10年后,西侧海滩的最大淤积幅度约为44 m,相较于方案F1,海滩宽度增加3 m。总体而言,拦沙堤的拦沙作用显著,可有效阻挡沿岸流驱动的泥沙向研究区外流失,并且在风暴潮和极端风浪期间,拦沙堤可限制海滩滩肩以上泥沙的流失,有利于维系海滩稳定性和景观质量,该方案可缓解泥沙流失、拓展海滩空间、延长海滩养护周期,满足犀丽湾海滩修复的需求。

方案F3,采用50~80 m渐进式干滩补沙,并在东侧海滩离岸500 m处新建长500 m、高2 m的潜堤,潜堤建成后可改变研究区的水动力条件并调整东侧岸段的冲淤状态。岸线演变计算结果[图6(d)]显示,东侧海滩的侵蚀程度得到一定缓解,但由于潜堤两侧岸段的水动力较强,堤后波影区水动力较弱,泥沙自潜堤两侧向潜堤后方输送,呈现“堤后淤积,两侧侵蚀”的岸线形态。修复1年后,东侧海滩的最大侵蚀幅度约为5 m,潜堤西侧海滩的最大侵蚀幅度约为5 m;修复10年后,东侧海滩的最大侵蚀幅度约为61 m,而潜堤西侧海滩的最大侵蚀幅度高达19 m。此外,在自然状态下,除东侧海滩发生严重蚀退外,海滩总体处于冲淤平衡状态,虽然潜堤可有效降低东侧海滩的波浪强度和侵蚀强度,

但潜堤西侧的海滩将成为新的侵蚀区。因此,该方案新建潜堤不但会增加海滩养护的施工难度和成本,而且会造成相邻区域的侵蚀破坏,故整体养护效果相对有限。

2.2.3 犀丽湾海滩修复方案比选分析

通过对F0~F3方案岸线演变结果的分析,渐进式补沙比均匀式补沙更有利于缓解东侧海滩的侵蚀后退,有助于提升海滩养护效果、延长海滩养护周期并降低后期维护成本。依托天然礁石建造的拦沙堤具有良好的拦沙和遮蔽作用,可有效控制海滩的泥沙流失,并促进西侧海滩向海淤积推进,海滩养护效果显著。虽然潜堤可在一定程度上减弱研究区东侧的波浪作用强度,缓解东侧海滩的侵蚀强度,但亦会导致潜堤西侧的海滩向陆侵蚀后退,实际养护效果并不理想。相较于离岸潜堤,近岸拦沙堤的工程投资、施工难度和后期维护费用更低,有利于降低海滩养护的生命周期成本。此外,除犀丽湾西侧靠近主水道区域的潮流流速较快外,研究区的潮流场整体较弱,故潜堤对潮流的阻挡作用有限,并且潜堤会在低潮时露出水面,将严重影响犀丽湾的生态连通性和海滩景观。总体而言,从海滩稳定性、自然环境、经济和沿海景观角度出发,犀丽湾海滩宜采用渐进式人工补沙与西侧拦沙堤相结合的生态修复方案(方案F2)。

3 结论

(1)犀丽湾的海滩形态呈东窄西宽,侵蚀强度呈东强西弱,自然供沙不足且存在自西向东的沿岸输沙。东侧海滩向陆侵蚀后退,而中部突堤和西侧礁石处的海滩向海淤积加宽,其他岸段则保持冲淤平衡。受风暴潮和极端风浪的影响,特大高潮线以上的海滩滩肩区域发生显著下蚀,其中东侧侵蚀热点区的滩肩下蚀幅度达2.6 m。砂质海岸的地貌形态可改变海岸动力特征和沿岸输沙过程,从而引起海滩的冲淤变化。

(2)犀丽湾的水下岸坡总体呈东侧侵蚀、中部淤积和西侧稳定的空间特征。由于急水山岛南北两侧水道的海水冲刷作用较强,沿两条水道发育冲刷区,导致水下岸坡发生局部大幅度的下蚀,最大侵蚀幅度达1 m,落潮时研究区西侧的泥沙被海水卷携至研究区中部并沉积形成淤积区。海岸水动力可调整沉积物的侵蚀和搬运状态,从而驱动沉积物的再分布,是塑造海岸地貌格局的关键因素。

(3)基于对岸滩稳定性、自然环境、沿海景观和经济成本的综合分析比选,犀丽湾海滩宜采用渐进式人工补沙与拦沙堤相结合的海滩养护方案重构岬湾型海滩形态,即在以50~80 m宽度自西向东渐进式人工抛沙的同时,依托西侧天然礁石建设拦沙堤,对犀丽湾海滩进行海滩养护。渐进式人工补沙和泥沙类辅助工程的综合措施可有效减缓海岸侵蚀和泥沙流失,有助于拓展海岸空间并提升海滩的稳定性。

参考文献:

- [1] BARBIER E B, HACKER S D, KENNEDY C, et al. The value of estuarine and coastal ecosystem services[J]. *Ecological Monographs*, 2011, 81(2): 169-193.
- [2] MCLACHLAN A, DEFEO O. The ecology of sandy shores [M]. 3rd ed. London: Academic Press, 2018.
- [3] DEFEO O, MCLACHLAN A, ARMITAGE D, et al. Sandy beach social-ecological systems at risk: regime shifts, collapses, and governance challenges[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2021, 19(10): 564-573.
- [4] DRIBEK A, VOLTARE L. Contingent valuation analysis of willingness to pay for beach erosion control through the stabilization technique: A study in Djerba (Tunisia)[J]. *Marine Policy*, 2017, 86: 17-23.
- [5] STANCHEVA M, STANCHEV H, YOUNG R, et al. Coastal erosion driven Land-Sea Interactions in Maritime Spatial Planning—a case of Bulgaria[J]. *Journal of Coastal Conservation*, 2021, 25(6): 54.
- [6] LUIJENDIJK A, HAGENAARS G, RANASINGHE R, et al. The state of the world's beaches[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 6641.
- [7] 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, 32(6): 16-21.
- [8] MAIOLO M, MEL R A, SINOPOLI S. A stepwise approach to beach restoration at Calabaja beach[J]. *Water*, 2020, 12(10): 2677.
- [9] 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.
- [10] RASHIDI A H M, JAMAL M H, HASSAN M Z, et al. Coastal structures as beach erosion control and sea level rise adaptation in Malaysia: a review[J]. *Water*, 2021, 13(13): 1741.
- [11] 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): 152-165.
- [12] 冯 哲, 邵铁政, 李元青, 等. 基于自然的解决方案(NBS)在海口西海岸修复工程中的应用创新 [J]. 水运工程, 2022(增刊1): 13-20, 30.
- [13] LUO S L, CAI F, LIU H J, et al. Adaptive measures adopted for risk reduction of coastal erosion in the People's Republic of China[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2015, 103: 134-145.
- [14] 王 刚, 张甲波, 邱若峰, 等. 秦皇岛洋河-葡萄岛夷平砂质海岸人工养滩效果 [J]. 海洋地质前沿, 2018, 34(6): 28-36.
- [15] 赵恩金, 徐照妍, 潘新颖, 等. 人工沙滩与潜堤结合岸滩防护工程数值研究 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(6): 119-125.
- [16] 何岩雨, 朱 君, 戚洪帅, 等. 人工岛影响下的海滩修复对策研究——以海口西海岸为例 [J]. 应用海洋学学报, 2021, 40(1): 2-11.
- [17] 王勇智, 田梓文, 李 霞, 等. 海阳市典型砂质海岸侵蚀机制与防护对策研究 [J]. 海洋科学, 2021, 45(12): 18-30.
- [18] 伊善堂, 尹东晓, 朱龙海, 等. 招远砂质海岸岸滩演化特征 [J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(9): 47-52.
- [19] 董德信, 李谊纯, 陈宪云, 等. 海洋工程对钦州湾岸线地形及泥沙冲淤的影响 [J]. 广西科学, 2015, 22(3): 266-273.
- [20] 孙永根, 黄 沛, 张志卫, 等. 海洋开发利用对鹿耳门江海洋水动力和地形地貌的影响分析 [J]. *海岸工程*, 2023, 42(3): 263-276.
- [21] 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.
- [22] SAPONIERI A, VALENTINI N, DI RISIO M, et al. Laboratory investigation on the evolution of a sandy beach nourishment protected by a mixed soft-hard system[J]. *Water*, 2018, 10(9): 1171.

(本文编辑: 曲丽梅)