



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

冯 哲, 邵铁政, 李元青, 周 剑

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 受近年日益加剧的人为活动和频发的极端天气影响, 全球范围内的砂质海岸正面临严重的侵蚀退化, 如何有效解决生境退化问题、提升海岸带韧性、实现生态环境改善和自然灾害治理的复合功能是诸多地区密切关注的重要议题。随着以往海岸整治方式负面作用日益显著以及传统硬质工程的政策限制, 探索基于海岸资源可持续管理的自然解决方案(NBS)应运而生。鉴于此, 本文以海口西海岸侵蚀明显的 4 段砂质海岸为例, 通过数值模拟技术, 运用 NBS 策略, 探析夷直型和岬湾型沙滩的仿自然设计形式, 营造潜礁岬头和人工沙丘, 构建柔性沙滩和硬质护岸相结合的综合防护体系, 结合区域海滩沉积物管理的创新思路, 提出循环补沙+周期性养护的沙滩管理模式, 以促进受损海岸生态环境的自然恢复。

关键词: NBS; 海滩修复工程; 沉积物管理

中图分类号: U 614

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)S1-0013-08

Innovative application of nature-based solution(NBS) in restoration project on the west coast of Haikou

FENG Zhe, SHAO Tie-zheng, LI Yuan-qing, ZHOU Jian

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Affected by increasing human activities and frequent extreme weather events in recent years, sandy coasts around the world are facing severe erosion and degradation. Effectively solving the problem of habitat degradation, improving the resilience of coastal zones, and fulfilling the dual functions of ecological environment improvement and natural disaster management are important issues that many regions pay close attention to. The increasingly evident negative effects of previous coastal remediation methods and the policy restrictions on traditional hard engineering give rise to the exploration of nature-based solutions(NBS) featuring sustainable management of coastal resources. In response, this paper takes four stretches of sandy coasts with obvious erosion and degradation on the west coast of Haikou in China as an example. Resorting to the numerical simulation technology and the NBS policy, the paper explores the bionic design forms of straight and cape-shaped beaches and builds submerged reef and cape head sections and artificial dunes to construct a comprehensive protection system that combines flexible beaches with hard revetments. Innovative ideas for regional beach sediment management are drawn on to propose a beach management model of cyclic sand supplementation & periodic maintenance to promote the natural recovery of the ecological environments on damaged coasts.

Keywords: nature-based solution; beach restoration project; sediment management

面对日益紧迫的海岸带防灾减灾形势, 试图降低海岸带气候变化风险意义重大, 传统海岸带

防护设施中的海堤、海墙、防波堤等硬质工程或灰色基础设施被广泛应用, 但其维护成本高且难

收稿日期: 2021-12-23

作者简介: 冯哲(1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事海岸动力地貌及生态修复研究工作。

以更新，可能对生态环境造成二次伤害^[1]。加之 2019 年后国内用海政策收紧，政府和民众对近岸建设工程负面影响的敏感度上升，海岸工程仿自然设计的重要性日益被大众所认可。与此同时，基于自然的解决方案^[2] (nature-based solutions, 简称 NBS) 被主要应用于建设可持续城镇、修复生态系统、减缓气候变化，成为一种利用自然面对可持续发展挑战的概念和方法。

发达国家从 20 世纪初开始相关研究和实践，荷兰通过采用“沙引擎”的软防护手段促进海滩泥沙的自然供给^[3]，将现有堤坝转变为仿岩石海岸的生态强化堤坝^[4]，强调利用自然力量防控海洋灾害；日本将原有堤坝和消波堤的线型防护方式与前海设施和沙滩相结合，构建多层面状防护，保证海岸线防护可持续发展^[5]；美国强调海岸防护项目的生态和社会双重弹性设计，生态弹性上构建牡蛎礁/植被礁+海草床+沙丘系统+防护林带+湿地/滩涂+堤防多层次的防御体系^[6]，社会弹性上建立多个防护堤构成的多层次防御体系，并注重社会项目(海洋保护、景观生态和人文关怀)的展开，是 NBS 的应用典范。

NBS 在国内海岸修复工程的实践较少，主要关注极端天气下海岸适应性的景观设计方案，如林婉婷^[7]以温州龙湾区海岸带为例，探讨了应对

风暴潮的海岸带弹性景观基础设施设计策略；陈琳^[8]对石狮市海岸带生态景观规划整治的研究，提出以沙丘植被修复、人工湿地营造、礁石长廊和沙滩环境整治等内容为主的修复模式；徐文婵^[9]对深圳宝安西海岸的风暴潮适应性景观设计，建立了“人工防线+自然防线”的多层次综合防护网络和可达空间。本研究以 2020 年 7 月新发布的 NBS 全球标准^[10]为依托，通过将数值模拟技术和 NBS 理念相结合，对比分析人工岛建设背景下工程前后海滩变化特征，提出仿自然设计的修复策略和海岸沉积物管理策略，是 NBS 全球准则在国内海滩修复中的一次重要尝试，以期为基于自然解决方案在我国砂质海岸修复领域的推广和应用提供一定的经验借鉴。

1 项目概况

海口西海岸东起秀英港西侧的废弃海军码头，西至天尾角，岸线长度约 12 km，现状岸线多为砂质海岸，是海口市客流量最大的旅游度假区，涉及假日海滩岸段、五源河口以东岸段、会展中心岸段和长滨北五路岸段共计 4.6 km 的侵蚀岸段，如图 1 所示。研究区常浪和强浪向均为 NE 向，是影响本研究区海滩泥沙运移与岸线演变趋势的主要动力因素。

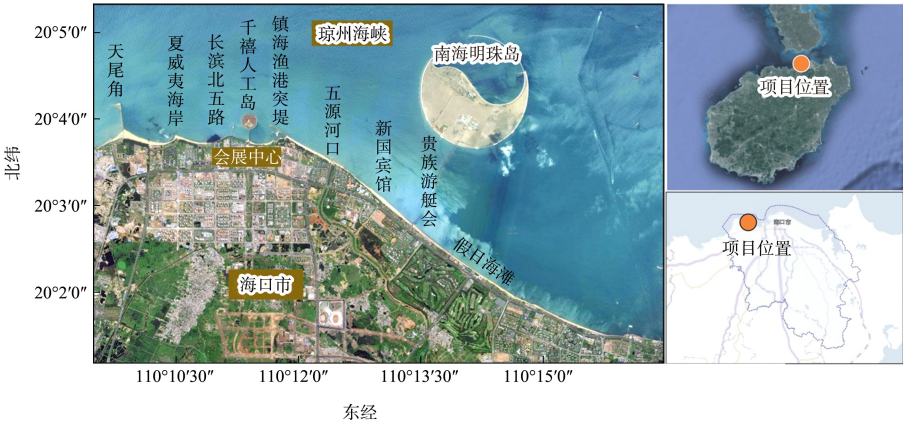


图 1 海口西海岸项目位置

2 基于 NBS 的海滩修复策略

2.1 NBS 符合性分析

通过滩肩补沙、生态潜礁和人工沙丘建设恢

复沙滩系统的完整性和功能性，是为应对气候变化和人工岛建设导致海岸侵蚀问题的一次自然适应，提出的海滩沉积物管理模式是基于生态系统

的规划管理,符合 NBS 项目五大实施方向中要求的基础建设类方法。

2.2 实施尺度确定

为获取项目实施重点区域,获取岸线时空变化特征,选取海口西海岸海滩 2011 年 2 月和 2019 年 7 月实测岸线,采用美国地质调查局(United States Geological Survey,USGS)开发的数字岸线分析系统(Digital Shoreline Analysis System,DSAS)^[11]进行分析,DSAS 模块分析借助 ArcGIS10.1 平台,分为 5 个步骤:1)海岸线提取;2)基线创建:采用最接近于海岸线的相同弯曲形状的缓冲区法;3)横截面生成:设定横截面长度为 12 km、间距为 10 m,经过多次平滑拟合和调整后,横截面从基线正交投射于不同年份的海岸线,在西海岸海滩生成 1 201 条剖面;4)计算基线与岸线间距离;5)计算海岸线变化速率:分别选取相邻岸线,利用不同统计模型[EPR、最小平方中值(LMS)、净海岸线移动(NSM)]自动计算海岸线变化率。

本文选择 EPR 模型和 LMS 模型计算岸线的总体变化速率,其中,EPR 算法通过将海岸线移动距离除以最旧和最近海岸线之间经过的时间,变化率以 m/a 的负值和正值表示,负值表示侵蚀,正值表示增长。其计算公式如下:

$$E_{i,j}=d_j-d_i\Delta Y_{j,A}\tag{1}$$

式中: $E_{i,j}$ 为从基线延伸的某条切线 H 在相邻年份

间岸线终点的变化速率; d_j 为第 j 期海岸线沿切线 H 到基线的距离; d_i 为第 A 期海岸线沿切线 H 到基线的距离; $\Delta Y_{j,A}$ 为第 j 期与第 A 期海岸线年份数的差值。

LMS 在普通最小二乘回归和加权最小二乘回归中,最佳拟合线被放置在各点之间,使平方残差之和最小。在线性回归方法中,用样本数据来计算平均偏移量,并通过将该值最小化来确定直线的方程,从而使输入点尽可能接近回归线。在最小二乘法中,用平方残差的中值代替均值来确定直线的最佳拟合方程^[12]。

计算得到的西海岸海滩岸线变化速率误差范围为 $\pm 0.18\text{ m/a}$,岸线变化范围在 $-9.18\sim 12.36\text{ m/a}$ 之间,发生侵蚀的岸段主要位于长滨北五路—会展中心岸段、五源河口以东岸段、假日海滩岸段;发生淤积的岸段主要位于天尾角以东岸段、南海明珠人工岛波影区岸段、假日海滩—秀英港之间岸段(图 2)^[13]。根据我国砂质海岸侵蚀强度分级标准,共计有 4.6 km 属于严重侵蚀-强侵蚀-侵蚀岸段,侵蚀最严重的位置位于会展中心最西端岸段,而淤积最严重的位置位于天尾角以东岸段。

因此,在充分考虑 12 km 大范围砂质岸线的精细化变化情况基础上,确定 4.6 km 海滩生态脆弱带和敏感区作为 NBS 的实施重点。

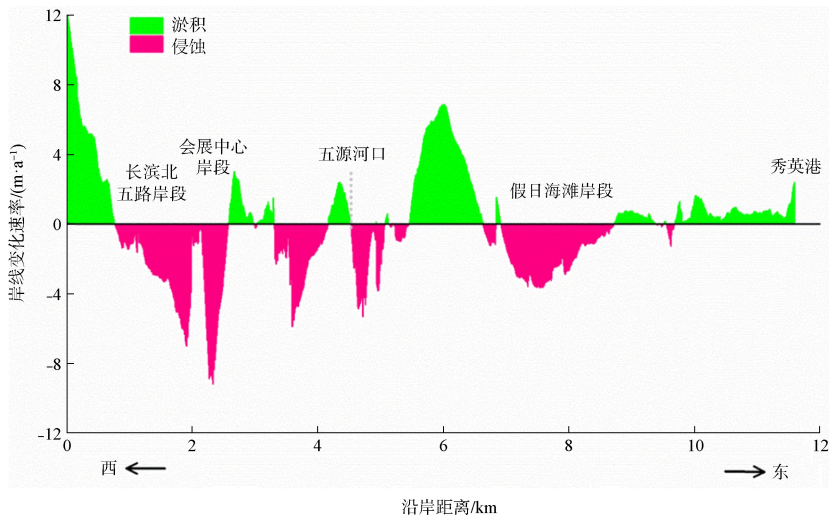


图 2 2011—2019 年间海滩岸线变化速率

2.3 关键目标确定

以 4.6 km 范围内四段沙滩为例，诊断识别现存问题，其中，长滨北五路段海滩西宽东窄，东侧排海箱涵已破损，沙滩侵蚀殆尽并导致后方道

路坍塌；会展中心段直立挡墙占用滩面，无沙滩，紧邻镇海渔港防波堤现存少量沙滩，受千禧人工岛建设影响，波影区形成沙体凸角，两侧面临侵蚀，尤其是海岸凸角以西，沙滩侵蚀殆尽(图 3)。

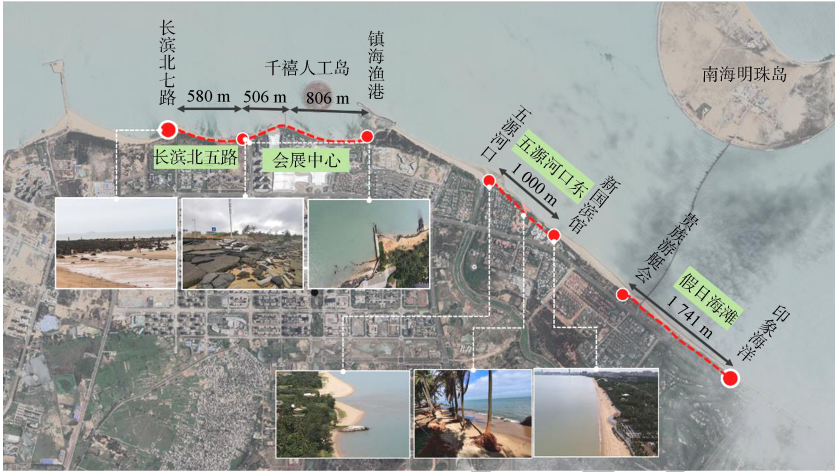


图 3 项目区海滩现状

五源河口东侧岸段东起新国宾馆海岸，西至五源河口东侧废弃码头，废弃平台以东黄金海岸花园侧侵蚀，平台西侧河口有淤积；假日海滩岸段东起观海台，西至南海明珠人工岛施工栈桥东的贵族游艇会处，整体蚀退明显。这缘于南海明珠人工岛建设导致岛屿背后形成波影区，产生从五源河口东侧和假日海滩向中心的沿岸输沙；同时，由于南渡江入海泥沙量的减少和台风等极端

天气频发，加之近岸采砂形成水下沙坑，导致海滩沙源供给不足，海岸侵蚀加剧。

综上，根据海岸侵蚀原因和实施尺度，确定 3 个修复单元，将受防波堤和箱涵等人工构筑物影响下的长滨北五路和会展中心段分别作为岬湾型海岸和高能凸角海岸修复段，将受人工岛影响下的五源河口东和假日海滩段作为夷直型海岸修复段，并制定相应的修复目标，见表 1。

表 1 NBS 修复目标

海岸类型	问题诊断	修复目标
岬湾型海岸	具一定遮蔽条件,独立海滩单元	恢复海滩完整性 减少泥沙输出 陆域安全防护
高能凸角海岸	动力作用强,沙滩稳定性差	提高海滩修复稳定性
夷直型海岸	人工岛影响下明显的双向输沙,陆域缺少有效海岸防护	促进海滩自然恢复 塑造多样海滩生境 构建多重防护体系

2.4 仿自然设计策略

2.4.1 岬湾弧形沙滩修复模式

长滨北五路段受限于岬湾体系不完善，并未形成独立的岬湾平衡状态，沿岸自东向西输沙速率较大，导致海滩东段侵蚀明显，因此，减少海

滩东段泥沙流失是方案设计的关键。

首先，基于 GENSIS 模型进行方案比选，见图 4。方案 1(滩肩补沙+箱涵改造)无硬式辅助措施，东段海滩持续侵蚀，侵蚀岸段长 800 m，10 a 剩余滩肩 5~50 m，并威胁后方道路；方案 2(滩肩

补沙+水下潜堤+箱涵改造+后方护岸)虽降低了潜堤后方海滩侵蚀速率,但同时加剧了相邻海岸侵蚀,侵蚀段长约 800 m,潜堤作用有限;方案 3 (滩肩补沙+拦砂堤+箱涵改造+后方护岸)仍呈现东段淤积,西侧侵蚀的趋势,但侵蚀岸段长度降低至约 400 m,因此,优选方案 3 作为推荐方案。

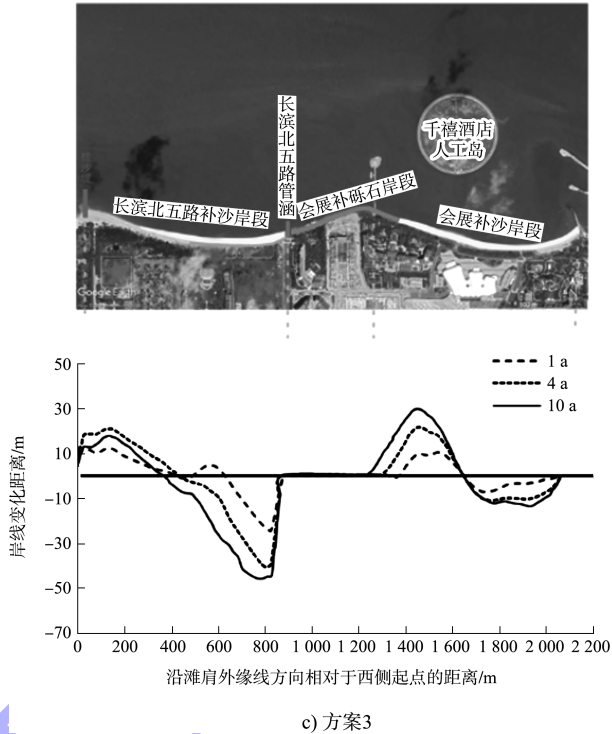
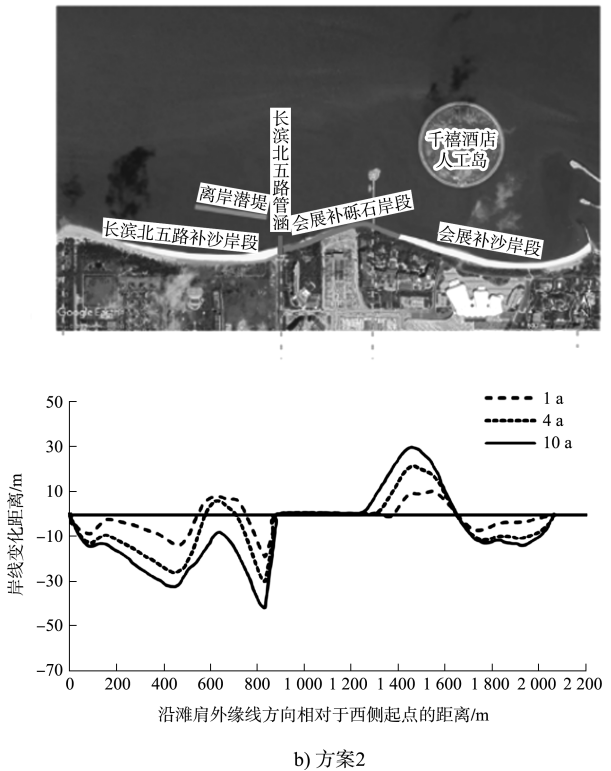
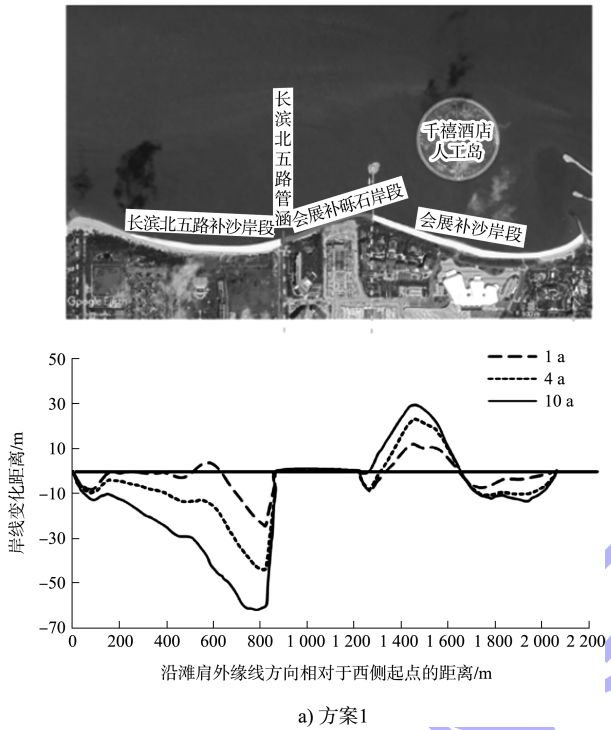


图 4 长滨北五路—会展中心岸段不同方案岸线变化情况

同时,充分考虑沙滩长度、宽度、坡度以及粒径条件,以低影响、轻干扰为 NBS 设计准则,基于现存岬头的自然掩护作用,实施岬湾系统重构、局部定点补沙、关键点特殊防护的修复策略,对推荐方案进行优化,见图 5。

- 1) 岬湾重构。摒弃硬质拦砂堤,利用现有礁盘适当外扩,构建西侧仿自然潜礁岬头,平均高程位于低潮线附近,从海向陆依次为岬头段30.7 m,潜礁段 28.9 m,天然礁盘加宽段 34.7 m,与天然礁盘融为一体,礁石质量符合设计要求,以保障其稳定性;同时,根据海滩设计宽度,东侧利用已有排水箱涵进行适当接长改造,将端头改造为利于生物附着的仿自然礁石形态,形成东侧人工岬头,整体上构建岬湾海岸。
- 2) 定点补沙。通过 Mepbay 岬湾模型,该段海滩西侧近 500 m 范围易侵蚀,且无上游来沙,可作为滩肩补沙区。
- 3) 特殊防护。为应对极端天气造成海滩泥沙快速流失,在滩肩外缘线 0.5 m 处设防护冲柔性砂管作为防护措施,并在道路塌方的敏感岸段建设斜坡式生态护岸,以防护陆域安全。

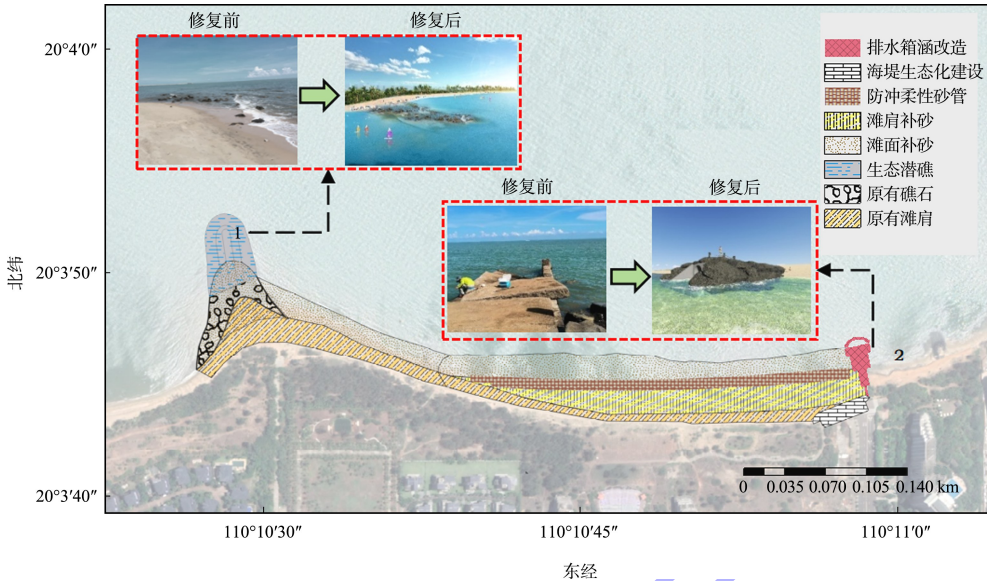
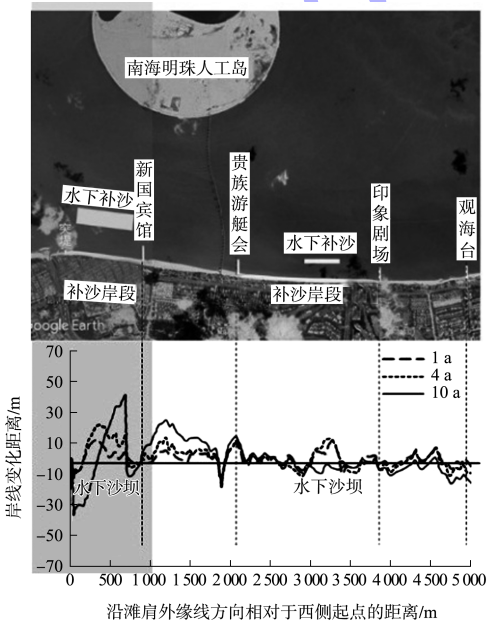


图 5 长滨北五路段平面布置

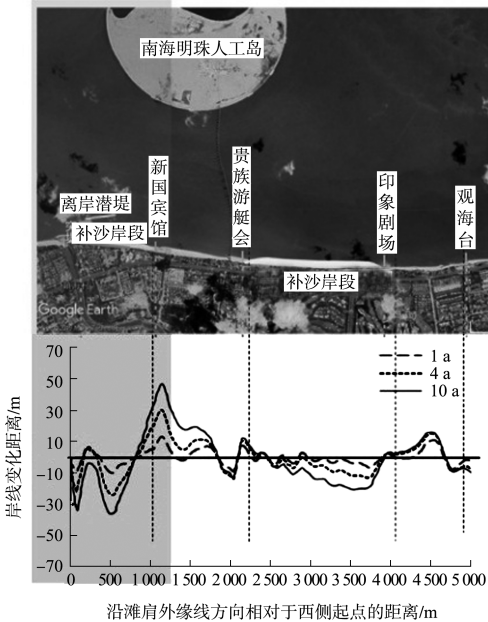
2.4.2 夷直型沙滩修复模式

五源河口至假日海滩段为连续完整的夷直型岸线，在人工岛影响下两侧具有较大的输沙量，属于背景输沙率较大的平直岸线，不允许建设传统的丁坝，为保障沙滩及其后方陆域安全，选择 3 个方案进行比选（见图 6），方案 1（滩肩补砂+水下补砂）和方案 2（滩肩补砂+潜堤）虽均对后方滩

肩起到一定的防护作用，但也造成侵蚀岸线东移，在补沙量相同条件下，10 a 剩余滩肩宽度 25 ~ 80 m，且极端天气下岸滩防护作用有限；方案 3 将所有沙量用于滩肩补砂，虽河口南侧受直接侵蚀流失较大，但相较方案 1 和 2，保留滩肩宽度基本相近，且周边影响较小，结合后方海堤生态化建设能够很好地保障陆域安全，因此，选择方案 3 作为优化方案。



a) 方案1



b) 方案2

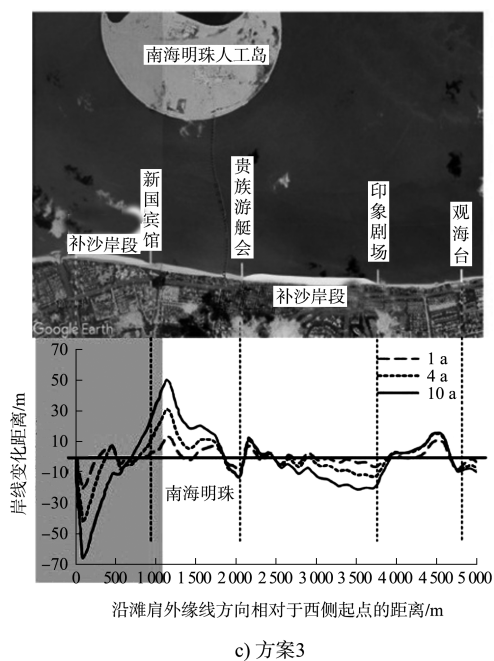


图 6 五源河口至假日海海岸段不同方案岸线变化情况

为了恢复沙滩韧性, 构建多重防护体系, 实现河口沙源供给, 采用来沙疏通、上游补沙、重点防护、储备沙源和下游返沙(养护方法)的修复策略。构建滩肩补沙+废弃平台拆除+海堤生态化建设+人工沙丘的组合方式。

1)来沙疏通。现存废弃码头平台阻挡由五源河口向东侧的沿岸输沙, 影响滩面景观和完整性, 通过合理拆除 82.4 m²废弃平台, 促进五源河口向南输沙。

2)上游补沙。采用滩肩补沙促进沙滩直接恢复, 平均滩肩宽 100 m, 滩肩高程 3.0~3.5 m, 滩肩宽度预留一定侵蚀余量, 保证沙滩快速调整后不少于 40~50 m 的干滩宽度。

3)沙源储备。为应对极端天气造成的沙滩消耗和陆域威胁, 借鉴周边沙丘地貌, 在滩肩后方构建连续覆植沙丘, 高程约 4.5 m, 种植马鞍藤等当地草本植被, 沙丘后方与生态海堤自然过渡, 实现减灾固沙和沙源储备的功能复合。

4)重点防护。五源河口东段沙滩后方为喜来登酒店和海岸黄金花园住宅区等敏感场所, 设计采用底线思维, 通过将斜坡式生态海堤硬质防护与海滩等软式防护相结合, 确保人居安全, 建设

生态护岸长 642 m, 并充分利用栅栏板结构中的纳泥空间, 为植被提供生长环境。

5)下游返沙。在极端天气时, 储备沙源消耗殆尽、沙滩功能丧失情况下, 设计中强调海滩周期性养护模式, 建立下游清淤泥沙及时向上游补给的常态沙滩适应性管理模式, 尤其在五源河口至假日海滩侵蚀岸段。南海明珠人工岛形成两侧往中间的泥沙运移特征, 以 5 a 作为养护周期, 通过在人工岛后方波影区取沙, 对海岸泥沙源-汇关系进行再分配, 将中间区域作为补沙的“源”, 两侧岸段作为泥沙的“汇”, 进行区域沉积物管理, 实现全岸段循环补沙(图 7)^[14]。

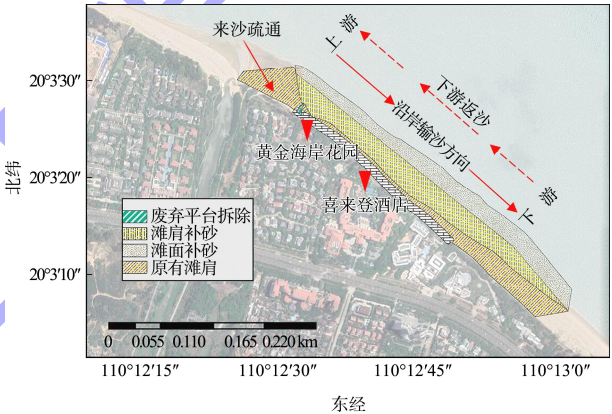


图 7 夷直型海滩(五源河口段)平面布置

2.4.3 强侵蚀岸段修复模式

会展中心段的海岸凸角区域是波能辐聚岸段, 位于千禧人工岛西侧, 长约 396 m, 现残存抛石和石块等基质, 天然沙滩赋存条件不佳。工程采用高消能和强渗透卵石分层设计, 结合天然卵石滩的发育规律进行平面布置。

1)卵石滩仿自然设计。滩肩处平均粒径为 5~8 cm, 滩面上部 8~12 cm, 滩面下部 12~16 cm, 防止在沿岸发生漂砾现象, 整体呈平行海岸条带状分布, 以减少卵石滩分选时间, 促进自然恢复, 海滩剖面采用非等厚的仿自然剖面形态(图 8), 平面布置与周边沙滩进行自然过渡和混合(图 9)。

2)占滩建筑拆除。鉴于卵石滩后方 21 号路拟新建挡墙, 故拆除会展中心段西侧滩面现存的 160 m 直立浆砌挡墙, 恢复自然滩面完整性。

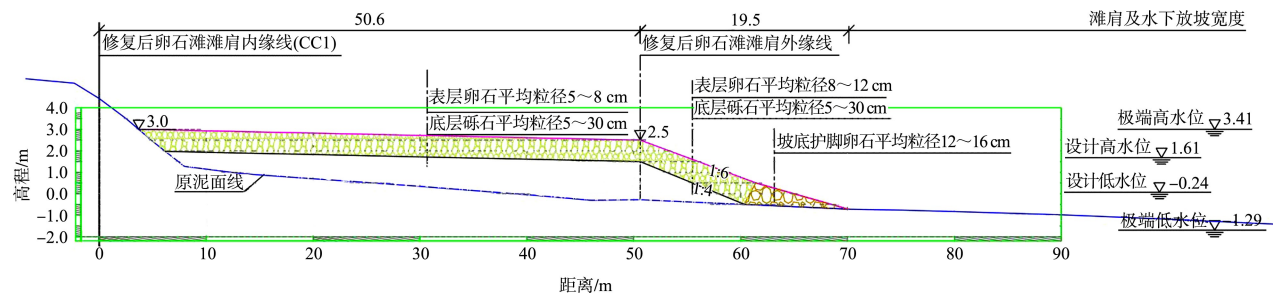


图 8 卵石滩剖面

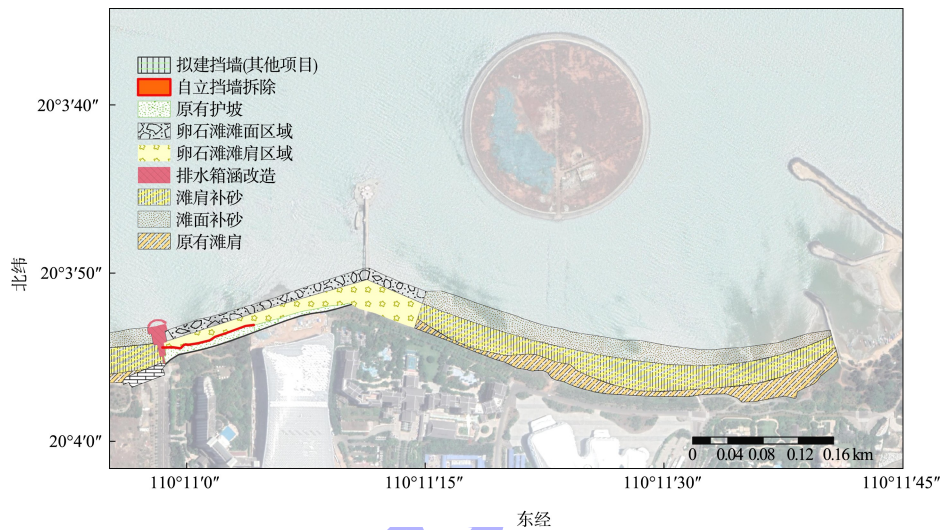


图 9 会展中心段海滩平面

3 结语

1) 海滩作为相对敏感的海岸地貌单元，极易受到气候条件变化和人为活动的影响，NBS 策略是对海滩自然禀赋条件的系统性修复，有助于维持生态系统完整性，减少人工构筑物带来的二次伤害。

2) NBS 在海滩修复应用实践的重点在于海滩地貌单元仿自然设计(如仿自然岬头和排水箱涵礁盘化改造等)和供沙条件的自然恢复(沿岸构筑物拆除)，并充分考虑修复工程生态系统的动态性与不确定性，实施循环补沙和周期养护的适应性管理措施。

3) 海滩 NBS 策略不是单纯的自然恢复，而是将自然解决方案与传统硬质工程进行有效组合，降低极端天气导致的侵蚀风险，构建多重减灾屏障，促进生态系统的连通性和完整性恢复。

参考文献：

[1] World Bank. Managing Coasts with Natural Solutions: Guidelines for Measuring and Valuing the Coastal Protection Services of Mangroves and Coral Reefs[R]. Washington DC: World Bank, 2016.

[2] 罗明, 应凌霄, 周妍. 基于自然解决方案的全球标准之准则透析与启示[J]. 中国土地, 2020(4): 9-13.

[3] STIVE M. SCHIPPER M. LUIJENDIJK A P, et al. A new alternative to saving our beaches from sea-level rise: the sand engine[J]. Journal of coastal research, 2013, 29(5): 1001-1008.

[4] DE SCHIPPER M, DE VRIES S, RUESSINK G, et al. Initial spreading of a mega feeder nourishment: observations of the sand engine pilot project[J]. Coastal engineering, 2016, 111: 23-38.

[5] 加藤広之, 林健太郎, 中村隆, 等. 東北地方太平洋沖地震津波による漁港海岸保全施設の被災要因の検討[J]. 土木学会论文集 B2(海岸工学), 2012, 68(2): I_1386-I_1390.

(下转第 30 页)