秦皇岛浅水湾海滩综合防护模式应用研究*

刘建涛[1,2]，朱　磊[1,2]，王　琰[1,2]，刘会欣[1,2]
（1. 河北省地质矿产勘查开发局第八地质大队，河北 秦皇岛 066000；
2. 海洋岸线生态修复与智慧海洋监测河北省工程研究中心，河北 秦皇岛 066000）

摘要：为了缓解人工岛背景下浅水湾海滩沙滩的侵蚀问题，充分利用现有人工岛遮蔽效果，在人工岛后方波影区南侧提出了两种模型：模型 1 采用“滩肩补沙+突堤+水下沙坝+离岸潜堤+沙堤”，模型 2 采用“滩肩补沙+突堤+人工沙坝”。采用 Mepbay、XBeach 以及 Genesis 数值模拟软件，对两种模型开展沙滩形态设计、稳定性评价以及演变预测研究，综合考虑防护长度、次生侵蚀热点等因素，选取模型 1 作为最优基础方案。研究发现，由于绕射波浪影响，存在次生侵蚀热点问题，需将模型 1 中突堤改变为近平行于岸的离岸潜堤，提出了“滩肩补沙+水下沙坝+离岸潜堤+沙堤”的优化模型。物理模型试验结果显示，优化模型相较于模型 1，岸滩侵蚀速率由 5 a 内 30 m 降至 1 a 内近乎为 0 m。研究提出的模型可为同类滨海区域的沙滩修复工程提供参考。

关键词：秦皇岛浅水湾；海滩；沙滩侵蚀；生态修复；侵蚀热点；综合防护模式
中图分类号：U656. 3　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)07-0034-10

Application research on comprehensive protection mode for Qianshuiwan Beach in Qinhuangdao

LIU Jiantao[1,2], ZHU Lei[1,2], WANG Yan[1,2], LIU Huixin[1,2]
(1. The Eighth Geological Brigade, Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration, Qinhuangdao 066000, China;
2. Marine Ecological Restoration and Smart Ocean Monitoring Engineering Research Center of Hebei Province, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: To mitigate the erosion of Qianshuiwan Beach affected by artificial islands and make full use of the existing shielding effect of artificial islands, two models are proposed on the southern side of the wave shadow zone behind the artificial islands. Model 1 adopts “beach shoulder sand replenishment + jetty + underwater sand bar+offshore submerged dike + sand dike”, Model 2 adopts “berm nourishment + jetty + artificial sand bars”. Numerical simulation software including Mepbay, XBeach and GENESIS are used to carry out beach profile design, stability assessment and morphological evolution prediction for the two models. Considering factors such as the protection length and secondary erosion hotspots, Model 1 is selected as the optimal basic scheme. The research finds that due to the influence of diffracted waves, there exists a problem of secondary erosion hotspots. It is necessary to change the jetty in Model 1 to an offshore submerged dike nearly parallel to the shore, and an optimized model of “beach shoulder sand replenishment + underwater sand bar + offshore submerged dike + sand dike” is proposed. The physical model test results indicate that compared with Model 1, the beach erosion rate of the optimized model decreases from 30 m over 5 years to nearly 0 m within one year. The proposed model can serve as a reference for beach restoration projects in similar coastal areas.

Keywords: Qinhuangdao Qianshuiwan; beach; beach erosion; ecological restoration; erosion hotspot; comprehensive beach protection

收稿日期：2025-12-30　　**录用日期：**2026-01-09
***基金项目：**河北省地质矿产勘查开发局科研项目(13000025P00329410356X)
作者简介：刘建涛(1987—)，男，硕士，高级工程师，研究方向为海洋地质调查及海洋生态修复。

水运工程

海滩是重要的生态系统，不仅是生物的栖息地，也是人类休闲娱乐的场所，同时还肩负了抵御风暴潮的重任[1-3]。然而，在全球变暖、海平面上升的背景下，受人为活动影响，海岸侵蚀已成为世界性问题，我国近一半的砂质岸线正遭受侵蚀。为减缓海岸侵蚀，20 世纪，我国主要以建设硬式构筑物来应对，现阶段，我国已建成约 1 万 km 长的海堤[4]，这些海堤在防灾减灾、保护人民生命财产安全方面起到了极其重要的作用。然而，海堤建设伴随着许多新的生态环境问题，例如滨海湿地的丧失、红树林栖息地的干扰和破坏、潮间带生态功能的丧失以及堤前严重下蚀及相邻海岸侵蚀的加剧等[5-12]。

20 世纪 20 年代开始，众多学者经过不断探索，发现抛沙可以减缓海滩侵蚀。20 世纪中期，欧美等发达国家已开展了大量的海滩养护技术的研究和实践，并形成较为完善的理论和技术[13-14]。我国海滩养护起步较晚，最早开始于 1990 年香港的浅水湾浴场[15]，2007 年后开始逐渐兴起，并提出了强潮海岸、强侵蚀海岸、淤泥质海岸等多种动力条件下的海滩修复理论和理念[16]。沙滩养护实践中，除补沙外，往往需要人工沙坝、离岸潜堤、突堤等其他防护措施配合[17-18]，既能达到较好的防护效果，又能在一定程度上提升区域生态效益的合理的防护措施组合，是工程方案成功与否的关键。本文以秦皇岛湾浅水湾沙滩作为研究区域，针对沙滩侵蚀问题，提出人工岛背景下不同的防护方案模型，并通过数值模拟、物理试验方法分析方案模型的可行性，得到优化模型，以期为区域沙滩修复提供借鉴参考。

1　研究区域概述

研究区位于浅水湾区域，岸线长约 8 km，见图 1。在浅水湾东侧近岸有两座人工岛(海螺岛和莲花岛)，随着浅水湾区域水动力环境和海床冲淤状况的改变，岸滩侵淤变化较为复杂。在入海河流携带泥沙减少的大背景影响下，80 年代以来岸滩总体以侵蚀为主，2012 年后由于人为干预，以金屋浴场为界，可分为两个明显不同的侵淤单元。

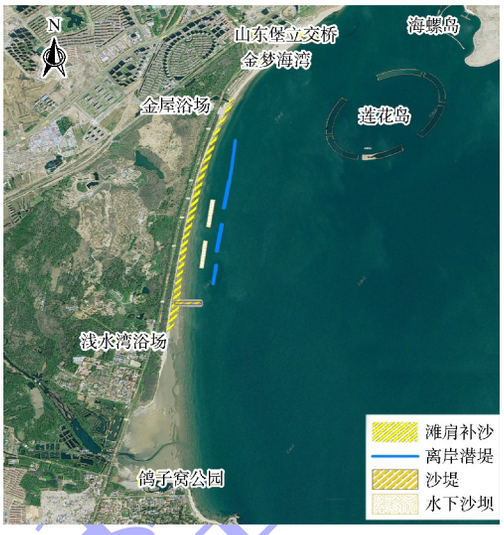


图 1　工程位置

Fig. 1　Project location

一是汤河口码头至金屋浴场岸段。该岸段是区内侵淤变化幅度较大的岸段之一，属于以中细砂为主的砂质岬湾型海岸，2000—2010 年平均蚀退速率为−1. 64 m/a；2012 年实施海岸线生态修复工程，对沙滩进行修复治理，通过补沙使金梦海湾沙滩快速增宽约 50 m，2013 年海滩整治修复工程后一年，海螺岛开始建设，2014 年海螺岛外围岛体建设成形，莲花岛开始建设，该期间金梦海湾东部、中部滩肩略有蚀退，西部呈侵蚀状态，2015 年海螺岛岛体建设基本成形，莲花岛外侧沉箱基本成型，受人为活动影响，金梦海湾沙滩西部、中部淤积，东部蚀退，2013—2016 年呈现淤积趋势，向海淤进平均速率约为 3. 15 m/a。

二是浅水湾海滩岸段，为本文的研究区域，范围从金屋浴场至浅水湾浴场。该岸段呈侵蚀状态，2010—2017 年，平均侵蚀速率为－2. 5 m/a，至 2017 年，金屋浴场至浅水湾岸滩已经侵蚀至后缘覆植沙丘，部分岸段的木栈道已经破坏，严重威胁到防护林后方的滨海公路。

2　研究模型建立

研究区域海滩属于旅游海滩，其海岸防护方

案应当推崇自然手法，增加沙滩承载力。根据当地水文及地质条件进行设计，综合考虑整体防护原则以及生态规划理念，宜采用综合型海滩防护方案，该方案推崇以人工养滩为主，辅以人工沙坝、生态型潜堤，后缘构建覆植沙丘，多道屏障保护沙滩的海滩养护模式，见图 2。该方案充分利用已有码头、人工岛以及新建的生态型潜堤，以静态平衡岬湾理论为依据，营造平衡岬湾的平面形态[19-22]。

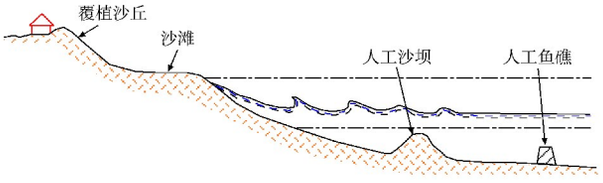


图 2　海滩整治修复模式

Fig. 2　Beach regulation and restoration mode

通过对浅水湾近岸海域人工构筑物分析，建立两种设计模型，见表 1 和图 3。模型 1 采取滩肩补沙，沙滩向海延伸 20~60 m，修建人工沙丘 3.5 km，突堤 450 m，移走金梦海湾原 3 座潜堤中南侧的两座，在金屋至浅水湾近岸海域新建 3 座 1 200 m 潜堤，吹填两座 800 m 沙坝和 300 m 长沙堤。模型 2 采取滩肩补沙，沙滩向海延伸 20~60 m，修建人工沙丘 3.5 km，突堤 450 m，移走金梦海湾原 3 座潜堤中南侧的 2 座，吹填 1 座 1 500 m 沙坝和 300 m 长沙堤。

a) 模型1

b) 模型2

图 3　模型方案

Fig. 3　Model schemes

表 1　模型概况

Tab. 1　Model overview

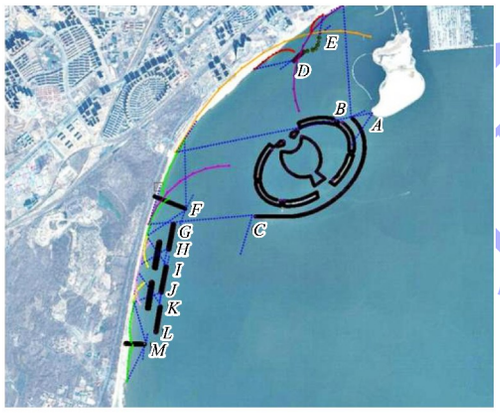
模型	滩肩补沙/m	人工沙丘/km	突堤/m	移走潜堤/座	新建潜堤/m	沙坝/m	沙堤/m
1	20~60	3.5	450	2	1 200	800	300
2	20~60	3.5	450	2	-	1 500	300

3　模型比选研究

3.1　沙滩形态设计分析

模型 1 将金梦海湾至浅水湾塑造为两个岬湾，并充分利用北部莲花岛和南部潜堤的消浪促淤作用，进行综合防护，从而营造了多个波浪绕射点。利用 Mepbay 可视化软件[23]，根据平衡岬湾波浪折射规律，调整潜堤位置，模拟结果见图 4。单从海螺岛西南绕射点 *A* 来看，其营造的波影区(即遮蔽岸段)中段 1 km 模拟岸段位于目前实际岸线的向岸侧，说明该区域目前未达到平衡状态，仍存在较长期的侵蚀问题。但由于莲花岛的存在，其东南侧防浪堤的两个绕射点 *B*、*C*，在波能辐聚、辐散效应下，于向岸侧形成两个波影区。其曲线显示，遮蔽岸段内存在较强烈的向海淤积趋势，而绕射点 *A* 形成的侵蚀区正位于该淤积岸段，因此，在海螺岛和莲花岛共同作用下，能够在很大程度上促进该段岸线的稳定。同时，将金梦海湾

海域中的 3 座潜堤移动两座，并将最北侧潜堤向西南延伸 200 m，可使目前湾内水动力有一定加强，在一定程度上促进湾内的水体交换，提升区域生态状况。另外，将遗留潜堤规模增加将明显扩大原单个潜堤的防护岸段，有效改善因水动力改变而引发的部分岸段的侵蚀问题。突堤的存在塑造了绕射点 *F*，由于波浪绕射形成的波影区塑造的平衡岸线位于实际岸线的向海侧，说明突堤建设后，该区将形成明显的淤积效应，有效改善目前的侵蚀现状。同时，南侧 3 个潜堤的构建与近岸沙坝的沙源补给共同发挥作用，综合防护南侧岸段，有效促进海滩淤长。最南侧沙堤既能通过塑造绕射点 *M* 形成两个波影区，促进淤积，形成弧形岸段，又可以在南、东南向强浪条件下，向北侧岸段提供可观的沙源。



a) 模型1

b) 模型2

图 4　平衡岸线模拟结果

Fig. 4　Balanced shoreline simulation results

模型 2 在模型 1 的基础上，将突堤南侧的硬式防护全部取消，将分段式沙坝扩建为大型连续性沙坝。模拟结果显示，南侧硬式防护取消之后，对海螺岛、莲花岛等北部构筑物对于岸滩的防护作用并无太大影响，它们塑造的波影区依然可以有效促进突堤北侧岸段的淤积。南侧大型连续性沙坝的构建可以在 E、SE 向波浪条件下向陆提供充足的沙源，避免侵蚀现象加剧，同时可以对 *F* 绕射点南部波影区内弧形海滩的塑造有较大的促进作用。然而若无离岸潜堤，波能将直接作用在沙坝上，使得沙坝形态发生改变，寿命将大大降低。

3.2　沙滩稳定性评价及演变预测

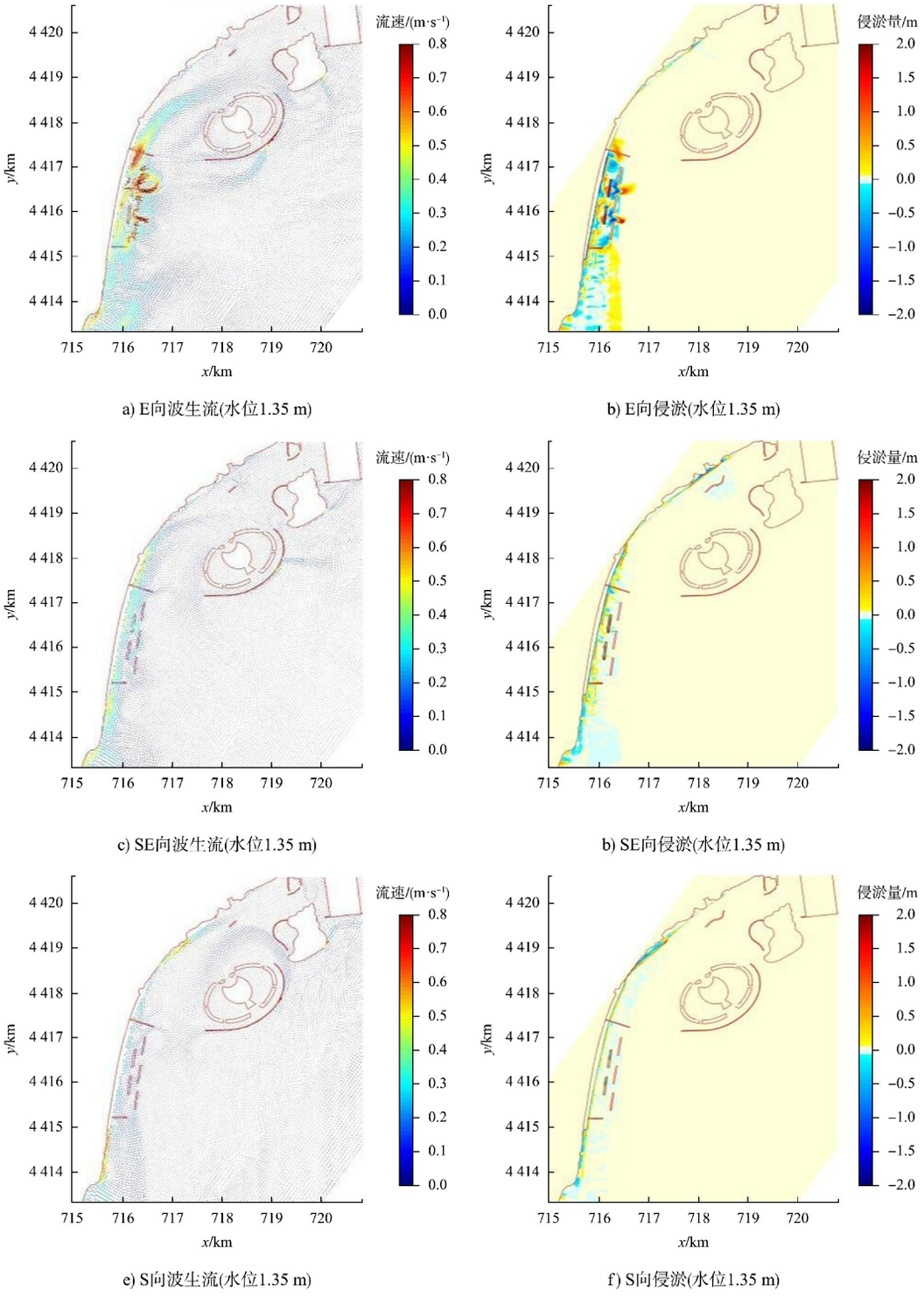
3.2.1　沙滩稳定性评价

XBeach 模拟结果见图 5、6。模型 1 在高水位（1.35 m）条件下，波浪方向为东向时，3 座潜堤之间形成环流，在最北侧潜堤处沿岸波生流分为两个方向，即 NE、SW 向。

向 NE 向传播的波生流在突堤附近增大，由于模拟条件为高水位，突堤堤顶高程为−1.0 m，在高水位作用下突堤阻挡沿岸波生流的作用减弱，波生流越过北侧突堤后继续向北传播，流速有所减小；根据 E 向侵淤图，大部分人工养滩区域在该方向波浪作用下能保持良好的状态，在与波浪交汇的岸线区域发生侵蚀，在突堤北侧呈淤积趋势，南侧呈现侵蚀趋势，沙坝在该条件下主要发生向岸输移，部分泥沙在波生流作用下通过潜堤间向海输移，南侧沙堤在波浪作用下，堤根部发生淤积，堤头区域发生侵蚀。

波浪方向为 SE 向时，工程区域波生流流向整体呈 NE 向，在越过突堤后，沿岸流速有所增大；根据 SE 向侵淤图，人工养滩后滩面在 SE 向浪作用下整体状态良好，虽然岸线与海水交汇的区域有所侵蚀，但泥沙在近岸区堆积，不发生离岸输移，沙坝的泥沙在波浪作用下逐渐向陆输移，沙堤附近呈略微淤积趋势。波浪方向为 S 向时，由

于南侧金山嘴的阻碍，到达工程区域的波生流流向复杂，但流速较小；根据 S 向侵淤图，在 S 向波浪作用下，突堤呈北侧淤积南侧侵蚀趋势，量值较小，沙坝形态比较稳定，泥沙在周边堆积，工程区域整体变化较小。



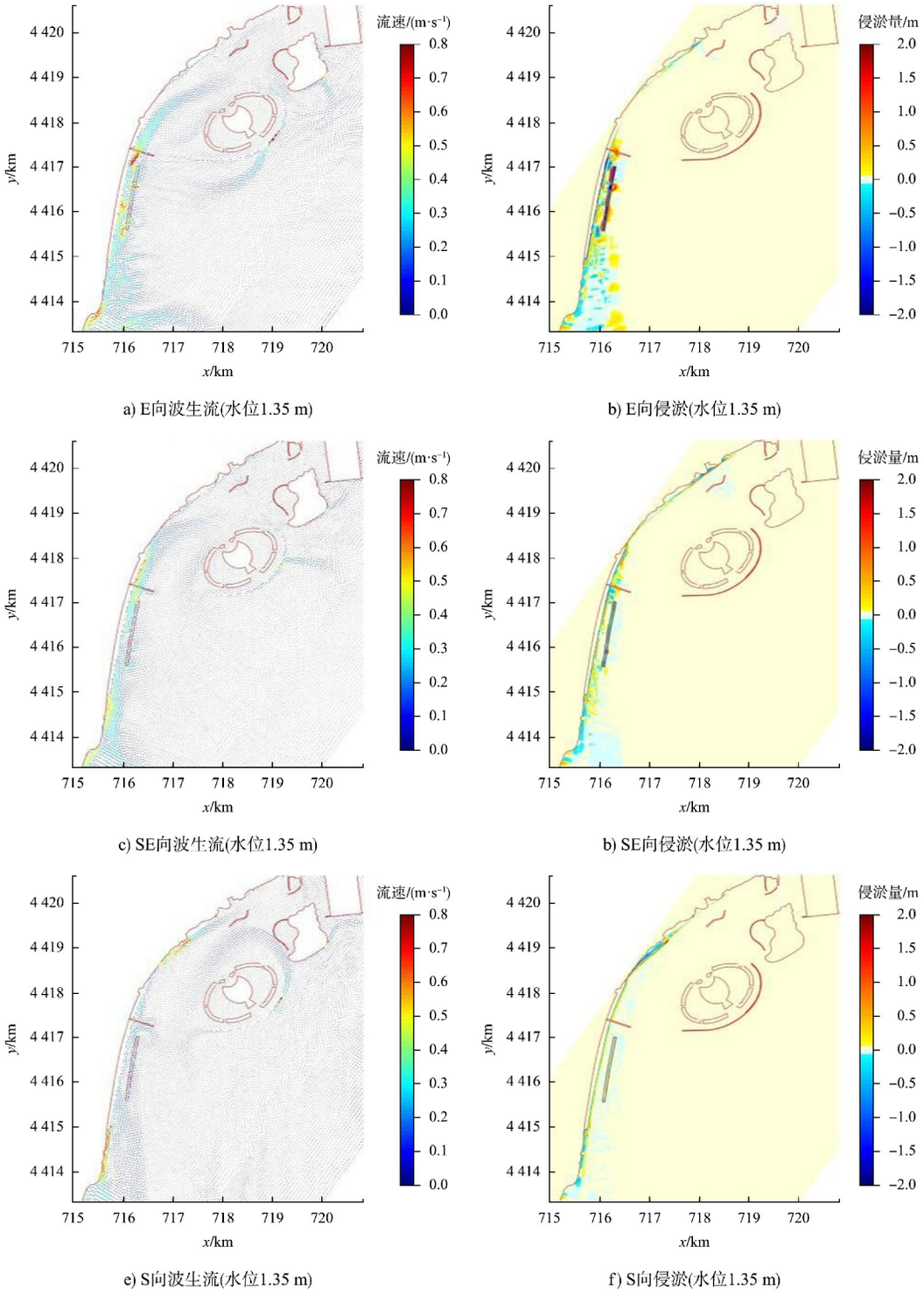
a) E向波生流(水位1.35 m)　　b) E向侵淤(水位1.35 m)

c) SE向波生流(水位1.35 m)　　b) SE向侵淤(水位1.35 m)

e) S向波生流(水位1.35 m)　　f) S向侵淤(水位1.35 m)

图 5　模型 1 模拟结果

Fig. 5　Simulation results of Model 1



a) E向波生流(水位1.35 m)　　b) E向侵淤(水位1.35 m)

c) SE向波生流(水位1.35 m)　　b) SE向侵淤(水位1.35 m)

e) S向波生流(水位1.35 m)　　f) S向侵淤(水位1.35 m)

图 6　模型 2 模拟结果

Fig. 6　Simulation results of Model 2

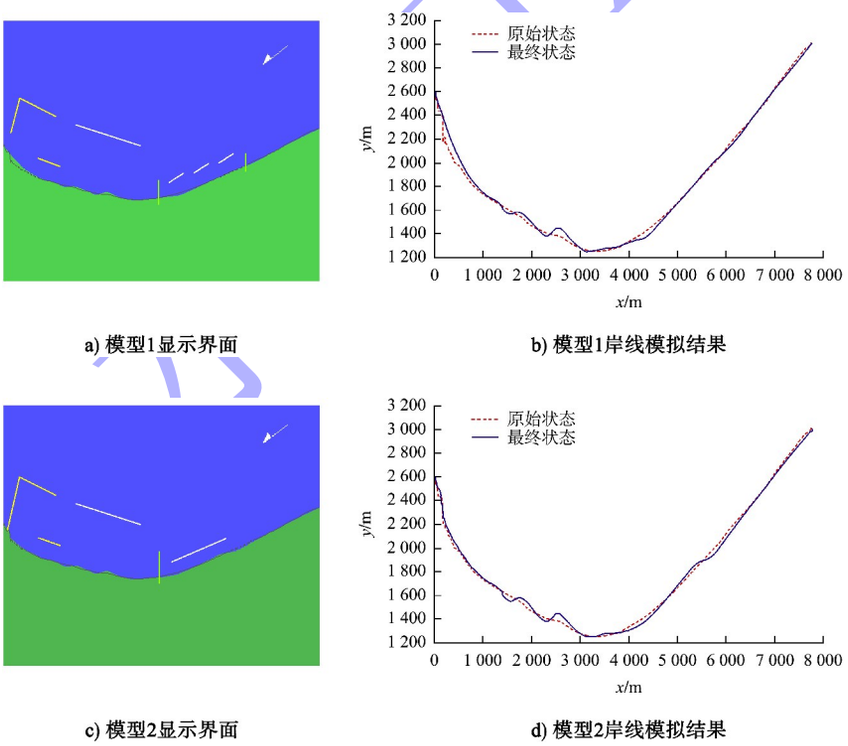
模型 2 在高水位(1. 35 m)条件下，波浪方向为 E 向时，沙坝附近波生流比较混乱，沙坝区域的波生流流向大致呈 SW 向，波生流在沙坝与突堤之间形成环流，流速较大，另一部分波生流越过突堤向 NE 向传播。根据 E 向侵淤图，沙坝在波浪作用下整体向四周扩散，两侧向岸输移，中间向海输移。波浪方向为 SE 向时，波生流整体流向为 NE 向，在越过突堤后流速有所增加；根据

SE 向侵淤图，沙坝整体向四周扩散，部分泥沙向陆输移。波浪方向为 S 向时，波生流在沙坝北段形成环流，一部分波生流向 SW 向沿岸传播，一部分波生流越过突堤向 NE 向传播；根据 S 向侵淤图，工程区域沙坝侵蚀量较小，侵蚀的泥沙在沙坝边堆积，并没有向外输移，岸线与海水交汇的区域有少量泥沙向海输移，堆积在离岸较近的区域。

3.2.2　沙滩演变预测分析

模拟岸滩演变的数学模型主要包括一线模型、二线模型以及多线模型[24-27]。一线模型是较成熟及简单的模型，利用 Genesis 一线模型，模拟研究方案的岸线演变，分析其对岸线的影响，岸线变迁的模拟结果见图 7。在 2015 年波浪状况下，通过模拟海岸线与初始海岸线对比和侵淤量图，可得模型 1 工况下，研究区突堤西侧对应岸段存在较明显的侵蚀热点(4 500 m 处)，5 a 模拟过程结束后，侵蚀量最大处可达近 30 m，侵蚀岸段的长度约 1 000 m；研究岸段其他区域则未出现明显的侵蚀趋势。总体来看，在模型 1 工况下，工程措施能够对大部分岸段起到防护作用，在一定程度上减缓了侵蚀的趋势。

模型 2 工况下，研究区域沙坝的两侧对应岸段存在较明显的侵蚀趋势，5 a 模拟过程结束后，侵蚀量最大处可达 30 m 左右，侵蚀岸段长度约 1 200 m，存在两处侵蚀热点(4 200 m 处和 6 000 m 处)；而沙坝波影区(沙坝后方)海滩处于淤积状态，淤积量最大处可达 43 m 左右，淤积区长度约 1 000 m。总体来看，在模型 2 条件下，人工沙坝能够起到一定的防护作用，但同样也造成了沙坝两侧对应海滩的侵蚀。



a) 模型1显示界面　　b) 模型1岸线模拟结果

c) 模型2显示界面　　d) 模型2岸线模拟结果

图 7　岸线变迁模拟结果

Fig. 7　Simulation results of shoreline evolution

3.3　模型方案比选与优化

3.3.1　模型方案比选

针对秦皇岛浅水湾岸段沙滩侵蚀问题，从投资估算、抗侵蚀能力、施工可行性以及施工周期 4 个方面对比分析两个模型，见表 2。模型 1 相较于模型 2，受侵蚀岸段减少近 200 m，次生侵蚀热点少 1 个，经综合对比，模型 1 为秦皇岛浅水湾海滩修复的最优模型。

表 2　模型对比

Tab. 2　Model comparison

模型	工程方案	投资估算/万元	抗侵蚀能力	次生侵蚀热点/个	施工可行性	施工周期/a
模型 1	滩肩补沙+突堤+水下沙坝+离岸潜堤+沙堤	8 500	受侵蚀岸段 1 000 m	1	相邻海域已完成类似工程,可行性高	0.5
模型 2	滩肩补沙+突堤+人工沙坝	7 600	受侵蚀岸段 1 200 m	2	相邻海域已完成类似工程,可行性高	0.5
单项比较结论	–	模型 2 优	模型 1 优	模型 1 优	–	–

3.3.2　模型方案优化及验证

针对秦皇岛金梦海湾至浅水湾浴场岸段沙滩侵蚀问题，提出综合型海滩防护方案，采用人工养滩为主，人工沙坝、生态型潜堤为辅，并于岸线后缘营建覆植沙丘，构筑多道防护屏障的海滩养护模式。根据模拟结果，模型 1、2 均可对岸滩起到一定的保护作用，但仍存在侵蚀热点区域，5 a 岸线蚀退距离近 30 m，主要集中于突堤西侧。突堤的建设较大程度改变了局部水动力条件，对两侧沙滩形成遮蔽掩护，虽然设计上预留了潮汐通道并降低堤顶高程，但仍存在阻断沙滩上下游物质能量交换的风险，造成新的侵蚀热点的出现，使得突堤西侧持续侵蚀。针对此问题，对模型 1 进行设计优化，将突堤改变为近平行于岸的离岸潜堤，并与原有潜堤相连，平面布置见图 1。

针对优化方案，开展了波浪泥沙动床物理模型试验，验证优化方案下的岸滩冲淤变化规律。模型试验采用正态模型，宽 43 m，长 75 m，几何比尺为 1:100，模拟范围为南北 7 km、东西 4 km，试验现场见图 8。模拟结果显示，在常海况 1 a 作用下，经过离岸潜堤的消浪影响，波浪对后方岸滩的冲刷和堆积减弱，经统计原侵蚀热点区域内冲刷厚度与模型 1 结果对比，减少约 16.3%，而岸线侵蚀速率由原来 5 a 最大 30 m 减弱为 1 a 内近乎为 0 m，说明突堤调整后，随着绕射波浪的减小，离岸潜堤对岸滩防护效果有所增强。

图 8　优化方案物理模型试验现场

Fig. 8　Physical model test site of optimized scheme

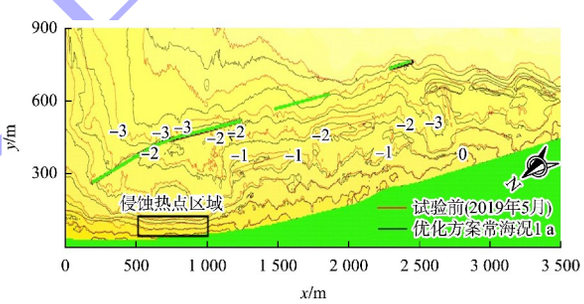


图 9　优化方案试验前后等深线变化

Fig. 9　Isobath variation before and after optimized scheme test

4　结论

1）针对人工岛背景下的浅水湾沙滩侵蚀问题，在充分利用人工岛遮蔽作用下建立修复模型，通过数值模拟和物理模型研究的方法，从沙滩形态、稳定性以及演变预测分析方面探讨了各模型的优势和不足，并提出了“滩肩补沙+水下沙坝+离岸潜堤+沙堤”的综合防护模型。

2）在入海河流携沙量骤减和人工岛遮蔽背景下，浅水湾沙滩的侵淤过程受沙滩的自适应调整与人工岛的双重影响，应加强对侵蚀热点区域的

防范，模型 1、2 虽减缓了海滩整体的侵蚀强度，但是均出现了新的侵蚀热点，分析其与绕射波浪有关。在将突堤调整为近平行于岸的离岸潜堤后，绕射波浪因素减弱，原侵蚀热点区域内冲刷厚度与之前相比减少约 16.3%，岸滩侵蚀速率由 5 a 内 30 m 减弱为 1 a 内近乎为 0 m。

3）沙滩修复设计中不仅要考虑沙滩侵蚀防护，更要考虑修复措施对区域生态环境的二次影响，尤其是突堤、离岸堤等水下构筑物对波浪和潮流的影响，应通过数值模拟（XBeach、Mepbay）与物理模型验证，优化结构布局，避免次生侵蚀。

4）浅水湾海滩岸线短期内难以达到平衡状态。人工岛后方波影区南侧海滩仍将不断蚀退，而波影区海滩仍将向海淤进，直至达到平衡稳定状态。

5）本文研究仍存在一定局限性：一是数值模拟与物理模型试验主要基于常海况与典型极端海况，未充分考虑全球气候变化背景下海平面上升、风暴潮频率增加等长期动态因素对防护效果的影响；二是研究聚焦于岸滩冲淤与形态稳定，对防护模式的生态效应（如对底栖生物等的影响）未开展系统研究。

参考文献：

[1] 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. What we have learnt from the beach nourishment project in Qinhuangdao[J]. Marine geology frontiers, 2014, 30(3): 1-15.

[2] 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 H S, LIU G, CAI F, et al. Development trend and prospect of beach nourishment technology[J]. Journal of applied oceanography, 2021, 40(1): 111-125.

[3] AMARAL A C Z, CORTE G N, FILHO J S R, et al. Brazilian sandy beaches: characteristics, ecosystem services, impacts, knowledge and priorities[J]. Brazilian journal of oceanography, 2016, 64(S2): 5-16.

[4] 王兴刚, 王振华, 黄超, 等. 海堤生态化建设研究综述[J]. 中国水运, 2024(16): 52-54, 62.
WANG X G, WANG Z H, HUANG C, et al. Review on ecological construction of seawall [J]. China water transport, 2024(16): 52-54, 62.

[5] 韩宇, 曾剑, 叶建军, 等. 生态海堤的基本理念及其在温州市方案中的设计应用[J]. 浙江水利科技, 2022, 50(2): 18-22.
HAN Y, ZENG J, YE J J, et al. Basic concept of ecological seawall and its scheme design application in Wenzhou [J]. Zhejiang hydrotechnics, 2022, 50(2): 18-22.

[6] PICKART A J. Ammophila invasion ecology and dune restoration on the west coast of North America [J]. Diversity, 2021, 13(12): 629.

[7] 范航清. 广西红树林研究中心的三十年[J]. 广西科学院学报, 2021, 37(3): 156-157.
FAN H Q. Thirty years of Guangxi mangrove research center[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2021, 37(3): 156-157.

[8] 张翠萍, 贾后磊, 吴玲玲, 等. 围填海工程生态建设水平评估研究[J]. 海洋开发与管理, 2021, 38(5): 42-46.
ZHANG C P, JIA H L, WU L L, et al. Study on ecological construction level evaluation of reclamation project[J]. Ocean development and management, 2021, 38(5): 42-46.

[9] KULPA D, WROBEL M, BEDNAREK M. Type of explant affects in vitro development and multiplication success of the rare halophyte plant honckenya peploides L. ehrh[J]. Plants, 2020, 9(11): 1526.

[10] KROON A, DE SCHIPPER M A, VAN GELDER P H A J M, et al. Ranking uncertainty: Wave climate variability versus model uncertainty in probabilistic

assessment of coastline change[J]. Coastal engineering, 2020, 158: 103673.

[11] AERTS J C J H, WOUTER BOTZEN W J, EMANUEL K, et al. Evaluating flood resilience strategies for coastal megacities[J]. Science, 2014, 344(6183): 473-475.

[12] JIN D, HOAGLAND P, AU D K, et al. Shoreline change, seawalls, and coastal property values [J]. Ocean & coastal management, 2015, 114: 185-193.

[13] DEAN R G. Beach nourishment [M]. New Jersey: World Scientific, 2002.

[14] FINKL C W, WALKER H J. Beach nourishment[M]// Encyclopedia of coastal science. Cham: Springer International Publishing, 2019: 259-275.

[15] LEATHERMAN S P. Shoreline stabilization approaches in response to sea level rise: U. S. experience and implications for Pacific Island and Asian nations [J]. Water, air, and soil pollution, 1996, 92(1): 149-157.

[16] 蔡锋, 刘根. 我国海滩养护修复的发展与技术创新[J]. 应用海洋学学报, 2019, 38(4): 452-463.
CAI F, LIU G. Beach nourishment development and technological innovations in China: an overview [J]. Journal of applied oceanography, 2019, 38(4): 452-463.

[17] 杨燕雄, 邱若峰, 邹志利, 等. 北戴河海滩养护方案实验研究[J]. 水运工程, 2010(4): 18-23.
YANG Y X, QIU R F, ZOU Z L, et al. Experimental study on nourishment of Beidaihe beach [J]. Port & waterway engineering, 2010(4): 18-23.

[18] 潘毅, 匡翠萍, 杨燕雄, 等. 北戴河西海滩养护工程方案研究[J]. 水运工程, 2008(7): 23-28.
PAN Y, KUANG C P, YANG Y X, et al. Study on beach nourishment scheme of west beach in Beidaihe [J]. Port & waterway engineering, 2008(7): 23-28.

[19] HSU J R C, EVANS C. Parabolic bay shapes and applications[C]//Proceedings of the Institution of Civil Engineers. London: Institution of Civil Engineers, 1987, 87(2): 556-570.

[20] HSU J R C, UDA T, SILVESTER R. Shoreline protection methods-Japanese experience[CE]//HERBICH. Handbook of Coastal Engineering. New York: McGraw-Hill Drofessional, 2000: 961-977.

[21] SILVESTER R. Stabilization of sedimentary coastlines [J]. Nature, 1960, 188(4749): 467-469.

[22] SILVESTER R, HSU J R C. Coastal Stabilization: Innovative Concepts [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1993: 578.

[23] 张甲波, 杨燕雄, 郝文辉. 北戴河养滩工程沿岸流场模拟研究[J]. 海洋科学进展, 2009, 27(3): 324-331.
ZHANG J B, YANG Y X, HAO W H. Longshore current simulation and study for shore nourishment and protection project in Beidaihe [J]. Advances in marine science, 2009, 27(3): 324-331.

[24] CHEN S L. Numerical model for longshore sediment transport rate on sandy coasts [J]. Ocean Engineering, 1999, 17(4): 79-84.

[25] 秦崇仁, 贺江成. 一线模型在海岸演变预报中的应用[J]. 海洋学报, 1997(5): 124-132.
QIN C R, HE J C. Application of one-line model in coastal evolution prediction [J]. Acta oceanologica sinica, 1997(5): 124-132.

[26] 杨明, 秦崇仁, 刘振纹, 等. 一线模型在黄河口岸线预报中的应用[J]. 中国港湾建设, 2006, 26(1): 4-7.
YANG M, QIN C R, LIU Z W, et al. Study of one-line model for shoreline change in Yellow River Estuary[J]. China harbour engineering, 2006, 26(1): 4-7.

[27] PILKEY O H, YONG R S, BUSH D M, et al. A discussion of the generalized model for simulating shoreline change (GENESIS) [J]. Journal of coastal research, 1996, 12(4): 1044-1050.

（本文编辑　王传瑜）