

海坛湾龙凤头海滩养护工程方案

匡翠萍¹, 单云驰¹, 顾杰², 刘建辉^{3,4}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306;
3. 国家海洋局第三海洋研究所, 福建 厦门 361005; 4. 国家海洋局海岛研究中心, 福建 平潭 350400)

摘要: 福建海坛湾龙凤头海滩宽阔, 沙粒细小, 20 世纪末, 由于人工海堤等的修建, 导致海滩侵蚀严重, 干滩宽度迅速缩小. 如何保护沙滩, 防止进一步退化变得尤为重要. 为解决海滩侵蚀问题, 2011 年开展了海坛湾沙滩养护一期试验工程, 滩肩补沙后海滩侵蚀仍很严重, 4 个月后岸线平均后退 11 m, 最大后退量 31 m. 为解决此问题, 提出采取滩肩补沙和实体工程结合的海滩养护方案. 运用 Generalized Model of Simulating Shoreline Change (GENESIS) 建立了龙凤头海滩岸线演变模型, 并通过海滩养护一期工程实测资料进行模型率定和验证, 模拟值和实测值验证良好. 采用验证后的模型, 分别模拟了不同新工程方案对岸线演变的影响, 并比较分析了方案实施后岸线的演变. 结果表明, 龙凤头海滩北侧和南侧各增加一个近岸防波堤对研究岸段起到保护作用最为明显, 但岸线仍会受到一定程度的侵蚀, 可以结合工程后期季节性补沙措施进行防护.

关键词: GENESIS 模型; 数值模拟; 人工养滩; 海坛湾龙凤头海滩; 岸线演变

中图分类号: TV148⁺.5

文献标志码: A

was put into effect to solve beach erosion in 2011. After the nourishment project, the shoreline still retreated seriously, with an average erosion of 11m and the maximum of 31m in 4 months. In order to solve this problem, beach nourishment and some other engineering schemes are put forward. The evolution model of Longfengtou Beach based on Generalized Model of Simulating Shoreline Change (GENESIS) model is established and verified well with the measured shoreline changes of the nourishment project in Phase One. With this verified model, the shoreline changes with different new engineering schemes are predicted, compared and analyzed. The results indicate that both the north and the south nearshore breakwaters protect the beach, but the coastline still suffers a certain degree of erosion and the schemes should be combined with seasonal beach nourishment to keep the shoreline after the project.

Key words: Generalized Model of Simulating Shoreline Change (GENESIS); numerical model; beach nourishment; Longfengtou Beach of Haitan Bay; shoreline change

Beach Nourishment in Longfengtou Beach of Haitan Bay

KUANG Cui ping¹, SHAN Yun chi¹, GU Jie², LIU Jian hui^{3,4}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China; 4. Island Research Center, State Oceanic Administration, Pingtan 350400, China)

Abstract: The Longfengtou Beach of Haitan Bay in Fujian Province of China had wide beach and fine sand. Since the end of last century, due to the construction of artificial seawalls, the beach has been eroded seriously, and the dry beach width got shorter. How to prevent the beach from erosion becomes very important. The nourishment trail project in Phase One

福建省平潭县的东部海域有大小海滩 215 处, 其中具有海滨浴场的优质海滩多处, 以海坛湾为代表, 对发展旅游起到了很大作用. 海坛湾连绵 9.5 km, 沙粒细小, 晶莹洁白, 符合旅游度假用海滨沙滩要求^[1]. 然而, 近几年海滩受侵蚀严重, 为了满足平潭实验区开发海滩旅游资源的要求, 需要实施海滩修复工程.

历史上曾使用硬式工程(如丁坝、导堤等)对岸滩进行养护, 由于硬式工程改变了自然的水沙动力特征, 其不合理的建造更会使岸滩侵蚀加重, 同时海滩水域的观赏性也受到影响. 随着人工养滩工程逐渐兴起, Dean^[2]总结出: 人工养滩是环境友好, 需优先考虑的保护方式. 根据 Valverde 等的研究, 人工养滩最早兴起于美国, 美国 1922 年开始人工养滩,

收稿日期: 2014-05-16

第一作者: 匡翠萍(1966—), 女, 教授, 工学博士, 主要研究方向为河口海岸工程. E-mail: cpkuang@tongji.edu.cn

通讯作者: 顾杰(1961—), 男, 教授, 工学博士, 主要研究方向为海洋环境. E-mail: jgu@shou.edu.cn

20世纪90年代进行大规模养滩工程^[3],至1999年,美国东海岸154个岸段进行了573处人工养滩^[4],为发展旅游起到了很大作用.欧洲养滩工程发展迅速,据欧盟2002年统计^[5],荷兰人工养滩35处,西班牙人工养滩400余处,意大利养滩36处,养滩工程增加了海滩游客数量,提高了旅游收入.我国的养滩工程始于1990年香港的浅水湾人工养滩工程^[6],工程采用丁坝护沙,新增海滩宽逾60m;1994年大连的星海湾人工浴场^[7],利用T形防波堤、L形防波堤及潜堤等对岸线加以固定,改善了海滩环境;2008年的秦皇岛西海滩浴场养护工程^[8]、秦皇岛中海滩养护工程^[9]均采用人工养滩及潜堤配合进行岸滩养护,效果良好;2012年的秦皇岛金梦湾海滩养滩工程^[10]采用近岸补沙和生态离岸潜堤,海滩侵蚀明显减弱;2013年的北戴河中海滩二浴场二期治理工程^[11]采用沙坝配合滩肩修复恢复和保护沙滩,有效地保护了海滩. Davis等通过研究多处养滩工程发现,影响人工养滩效果的因素有养滩位置、波能大小、输沙方向、沉积物特征、临近工程等^[12].结合国内外海滩养护案例,平潭龙凤头海滩可采取人工养滩结合其他实体工程进行岸滩修复和保护.

1 工程概述

龙凤头海滩位于福建省平潭岛东海岸,海坛湾南部岸段,北起龟模屿,南至龙王头岬角,岸线长度1.4km,见图1.20世纪末,在海滩中部修建的人工海堤,严重破坏了海滩剖面的物质、能量自然动态过程,造成海堤前海滩迅速下蚀.为了将海坛湾滨海沙滩打造为国内一流的高质量旅游、休闲娱乐海滩,开展了海坛湾滨海沙滩养护^[13].2011年7月龙凤头海滩养护一期工程(试验工程)开始施工,对龙凤头海滩进行滩肩补沙,补沙粒径 $D_{50}=0.5\text{mm}$,滩肩高度4.5m.龙凤头海滩养护一期工程于8月底竣工,使得沙滩宽度由0m扩大到20~30m.一期工程海滩实际施工岸线总长度1359m,其中最北段龟模屿附近121m长岸段干滩宽度120m,中北部干滩宽度100m为过渡段,中南部及南部岸段干滩宽度60m.从2011年9月3日—2011年12月20日,工程完工后的剖面测量结果表明海滩侵蚀严重,岸线平均后退11.1m,最大后退量达31.0m,需要启动二期工程对沙滩进行进一步的修复.

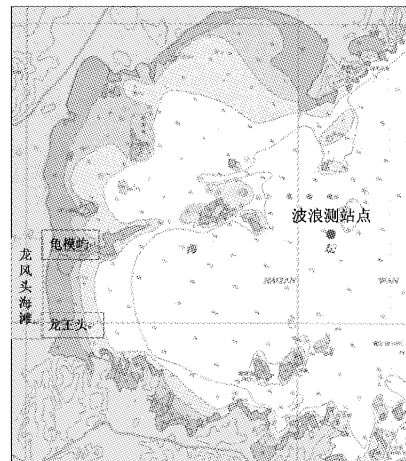
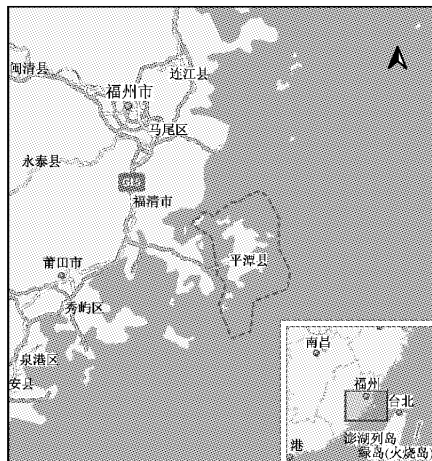


图1 龙凤头海滩位置图

Fig.1 The location of Longfengtou Beach

2 资料分析

2.1 地形资料

工程区域地形取自2011年9月龙凤头海滩实测资料.海岸线、岸滩地形测量、水深测量定位均采用RTK GPS进行平面坐标采集,误差小于5cm;岸线测量、岸滩地形测量的高程数据,均采用RTK GPS进行高程数据采集,误差小于1cm;水深测量

采用一台HD28和一台HD370回声测深仪进行数据采集,误差小于2cm.测量显示海滩已无干滩,水深在近岸区变化很快;滩面沉积物主要是中细砂、细砂.另外,海坛湾有众多礁石岛屿,对水流流向、波能的分布及岸线演变影响较大.

2.2 波浪资料

波浪资料取自海坛湾波浪观测站2011年8月—2012年7月一年的波浪资料^[13],波浪测站位置见图1,离岸5km,水深约18m.有效波高频率玫瑰

图见图 2. 全年的波向主要集中在 NE-E-ESE-SE 向, 所占频率达 99.69%, 其中以 ENE 向最多, 所占频率为 67.43%, 为常浪向; 次浪向为 E, 所占频率 20.98%. 观测期间工程海域的强浪向出现在 E 向, $H_{1/10}$ 波高最大值为 5.73 m, 出现在 201111 号“南玛都”台风期间. 其次是 ENE 向, $H_{1/10}$ 波高最大值为 5.65 m, 出现在 2011 年 12 月 9 日. 各月中的强浪向多出现在 ENE 和 E 向.

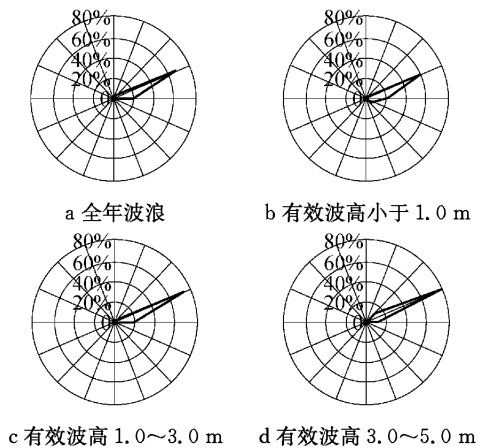


图 2 波浪频率玫瑰图

Fig. 2 Rose diagrams of wave direction frequency

3 模型介绍

GENESIS (Generalized Model for Simulating Shoreline Change) 是用来模拟工程作用对长期岸线变化影响的模型^[14]. 计算岸线长度范围 1~100 km, 计算时间跨度范围 1~100 个月. 由 Veri-Tech 公司将其整合入 CEDAS 系统内推广, 结合其他辅助性模块——WWWL Editor (Wave, Wind & Water Level Editor), SPECGEN (Spectral Generation), STWAVE (Steady-state Spectral Wave) 等, 形成了一套完整的人性化的海岸演变模拟程序, 并被广泛应用于岸线模拟及预测^[15-17]. 近年来应用于国内岸线模拟与预测, 如台湾安平人工海滩^[18]、北戴河西海滩^[19].

岸线演变控制方程为

$$\left(\frac{dy}{dt}\right) + \left(\frac{1}{D_B + D_C}\right)\left(\frac{\partial Q}{\partial x} - q\right) = 0 \quad (1)$$

式中: 以 y 轴代表离岸方向(垂直于海岸线); x 轴代表沿岸线方向; D_B 表示海水所能到达的最大高程(滩肩高度); D_C 表示存在沿岸输沙的最大深度(封闭水深); Q 表示沿岸输砂率; q 表示横向输砂率.

其中沿岸输砂率为

$$Q = (H^2 C_g)_b \left[a_1 \sin 2\theta_b \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) \right]_b \quad (2)$$

式中: H 表示有效波高; C_g 表示波群速度; 下标 b 表示波浪破碎时的参数; θ_b 表示破波角; 量纲为一的参数 a_1 和 a_2 定义如下:

$$a_1 = \frac{K_1}{16 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1-p) (1.416)^{5/2}} \quad (3)$$

$$a_2 = \frac{K_2}{8 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1-p) \tan \beta (1.416)^{7/2}} \quad (4)$$

式中: ρ_s 表示砂的密度; ρ 表示海水的密度; p 表示砂的孔隙率; $\tan \beta$ 表示海滩平均坡度; 1.416 为有效波高与均方根波高之间的转化系数; K_1, K_2 为可调节的两个经验参数, 可根据海岸输沙状况校正.

4 模型建立与验证

国家海洋局第三海洋研究所分 2 个阶段对该沙滩修复工程海滩演变进行了监测, 第 1 阶段为 2011 年 9 月 4 日—2011 年 12 月 20 日. 由于监测区域海滩广场于 2012 年 6 月进行建设施工, 并于 7 月举办沙雕节, 海滩岸线发生改变. 使用 10 个监测剖面对海滩变化进行第 2 阶段监测, 第 2 阶段为 2012 年 8 月 13 日—2012 年 10 月 11 日. 本文通过对这两个监测阶段进行模拟, 与实测数据比较, 选择相应数学模型参数, 对数学模型进行验证, 并为后续工程模拟提供科学依据.

4.1 模型的建立

模型采用的是矩形网格, 如图 3 所示, 图中白色点为岸线点, 左侧为陆地, 右侧为海洋, 沿岸纵向为模型 x 轴, 横向为模型 y 轴. 模拟区域计算网格的 y 轴方向为大致垂直于岸线方向, 与正北方向夹角为 90° , 长度为 2 340 m, 陆侧边界为岸滩向岸延伸 300 m 左右, 海侧边界为 15 m 水深处, 取在龟模屿海向边界; x 轴为大致平行于岸线方向, 长度为 3 700 m, 北侧边界为蛇屿位置, 南侧边界至南侧岬角, 使模拟区域形成岬湾海域. 在 x, y 方向网格间距均为 20 m. 滩肩高度取设计滩肩高度 $D_B = 4.5$ m, 封闭水深计算公式如下:

$$D_C = 2\bar{H} + 11\sigma_H \quad (5)$$

式中: \bar{H} 为平均波高; σ_H 为波高标准差^[20]; 计算得 $D_C = 12.5$ m. 经验参数 $K_1 = 0.58, K_2 = 0.46$, 中值粒径根据补沙粒径取 $D_{50} = 0.5$ mm, 时间步长与测波站实测时间间隔一致取 $\Delta t = 1$ h.

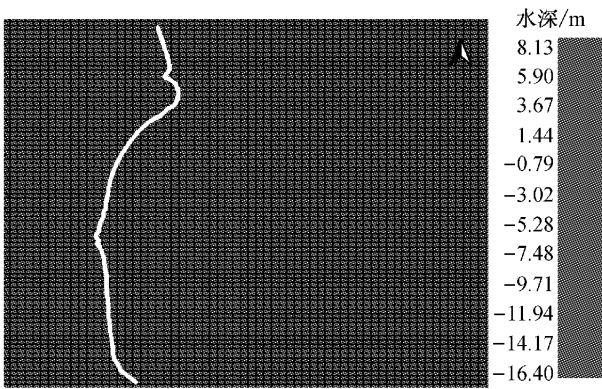


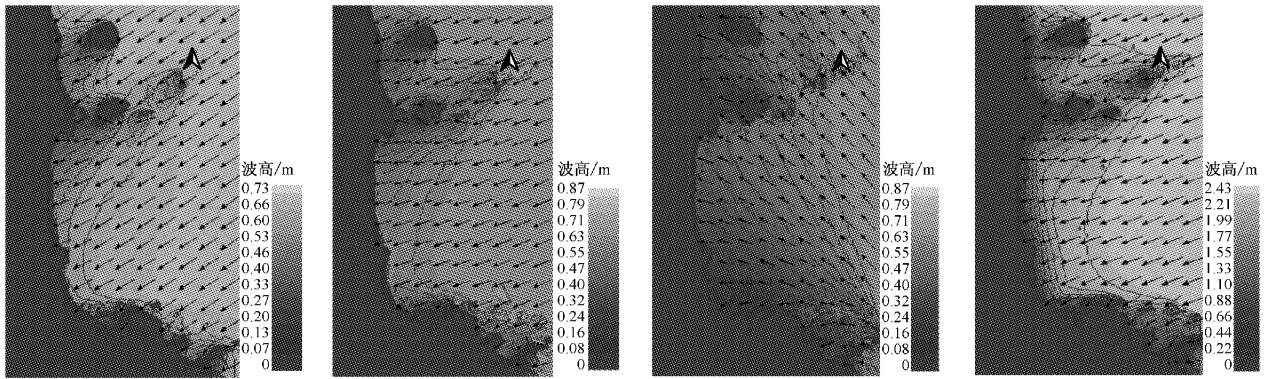
图 3 模型网格分布

Fig.3 Distribution of model grid

使用 STWAVE 模拟波浪场,图 4 给出了几个典型入射波浪作用下工程海域的波浪场模拟结果.

4.2 模型的率定和验证

使用一期工程第 1 监测阶段(2011 年 9 月 4 日—2011 年 12 月 20 日)、第 2 监测阶段(2012 年 8 月 13 日—2012 年 10 月 11 日)的龙凤头海滩实测岸线资料对 GENESIS 模型进行验证.从图 5 模拟结果可以看出:模拟得到的岸线的发展趋势与实测岸线都是一致的.模拟和实测岸线在第 1 阶段都表现为侵蚀,侵蚀量模拟值和实测值能够较好地拟合,局部区域存在偏差,如 200~400 m 处偏差较大,最大在 10 m 左右.由于广场建设和沙雕节的举办,海滩重



事件 1:波高 0.65, 周期 2.63,波向 52.5°

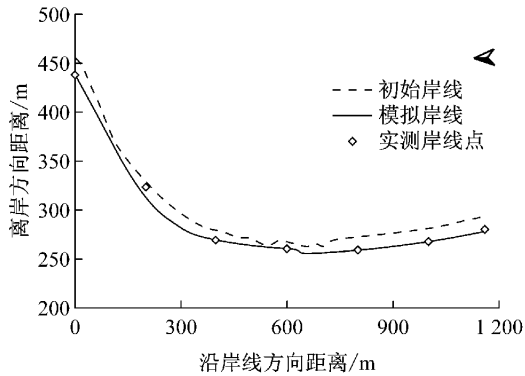
事件 10:波高 0.65, 周期 4.16,波向 67.5°

事件 15:波高 0.65, 周期 4.16,波向 142.5°

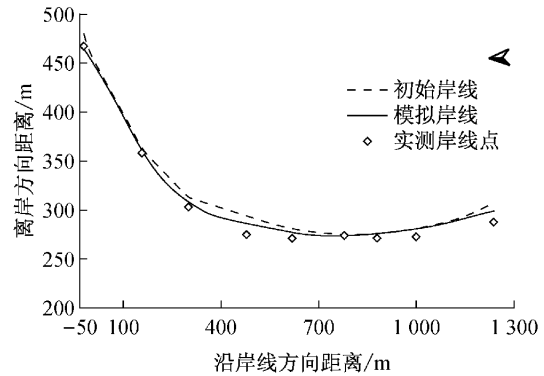
事件 52:波高 2.37, 周期 4.16,波向 67.5°

图 4 典型波浪场模拟

Fig.4 Typical wave field simulation



a 龙凤头海滩 2011 年 9 月 4 日—2011 年 12 月 20 日岸线演变



b 龙凤头海滩 2012 年 8 月 13 日—2012 年 10 月 11 日岸线演变

图 5 岸线演变验证

Fig.5 Comparison of computed and measured shoreline changes

新进行补沙,并进行了第 2 阶段的测量.第 2 阶段采用 10 个测点进行测量,最北侧测点超出原横坐标范围,为-20 m.模拟与实测岸线在第 2 阶段均表现为侵蚀为主,侵蚀量实测值和模拟能较好拟合,局部区域存在偏差,如 450 m 处,偏差为 8 m.

模拟结果与实测岸线能够较好地符合,证明了

GENESIS 模型可以较合理地模拟出该区域的岸线变化,并为二期养护工程提供了设计参数的参考.

4.3 波向敏感性测试

由测波站测得海坛湾全年波浪分析常浪向为 ENE 向,强浪向为 E 向,但考虑到由于季节变化,波浪方向会发生改变,如秋季 ESE 向波浪增多,加之

台风可能对研究区波向产生短时间的很大影响,所以本文对波向敏感性进行测试分析。

模拟时间均为2011年9—12月,分别将原波向改为全部来自北偏东70°、北偏东60°和南偏东70°,波高周期不改变。模拟岸线变化对比如图6。由图6可见波浪向北偏转角度越大,距岸线北端0~100 m处岸线侵蚀会减少甚至淤积,而100~1 200 m岸段岸线则侵蚀增加。而当波向转为南偏东时,岸线整体侵蚀大幅减少,甚至有一定程度的淤积,尤其是100~800 m岸段。

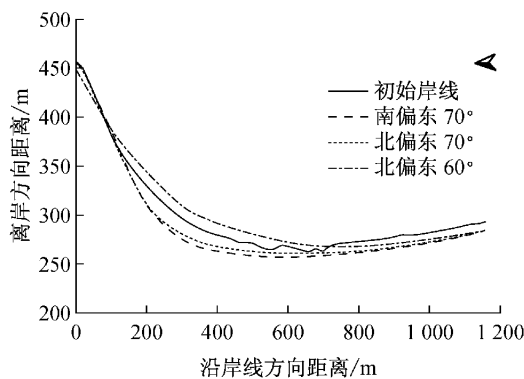


图6 波向敏感度测试

Fig.6 Sensitivity test of wave direction

由此可知:波向的改变对研究区域岸线演变影响很大。所以季节的变化、台风的作用对于岸线演变有很大影响。

5 方案比较

为了解海滩变化特性,对4种典型设计方案进行比较分析,为后续工程提供科学支撑。方案1:只进行滩肩补沙。滩肩补沙从龟模屿至龙王头,全长1 359 m,南部补沙宽度60 m,北部龟模屿附近补沙宽度120 m,外侧滩肩高度4.5 m,潮间带海滩施工坡度1:8,补沙粒径0.4~0.6 mm。使用与模型率定相同的模型参数,并输入2011年8月—2012年7月的波浪实测资料,模拟方案1下1年、3年及5年后的岸线演变。方案1岸线演变模拟结果如图7a所示,可见只进行滩肩补沙,岸线受侵蚀较严重,1年后岸线最大蚀退45 m,3年后补沙已基本不存在。

在方案1基础上增加不同的防波堤组合形成方案2—4。方案2:采用滩肩补沙、防波堤1和防波堤3进行组合;方案3:采用滩肩补沙、防波堤2和防波堤3进行组合;方案4:采用滩肩补沙、防波堤1、防波堤2、防波堤3进行组合。防波堤的参数设置见表1,防

波堤为透水防波堤,透水系数的经典方程^[21]为

$$K_T = 0.46 - 0.3R/H \quad (6)$$

式中: K_T 为透水系数; R 为建筑物静水面上的高度; H 为有效波浪波高,计算得透水系数为0.2。各方案示意图及所得岸线演变结果如图7所示。可见:方案2—4均对岸线起到保护作用,防波堤3主要保护了龙王头附近的岸线,影响范围为800~1 200 m岸段,防波堤1、防波堤2主要保护了龟模屿附近的岸线,影响范围为0~300 m岸段。

表1 防波堤布置

Tab.1 Arrangement of breakwaters

防波堤	起点位置		尺寸/m			方向/(°)
	沿岸距离/m	离岸距离/m	长度	顶宽	高度	
1	80	620	260	4	4	150
2	80	300	260	4	4	150
3	1 100	190	110	4	4	200

图8显示了4个方案1年、3年及5年岸线演变相对于原始岸线的侵淤量,可见,方案2在0~400 m岸段对岸滩的保护作用不如方案3、方案4,但在400~1 200 m岸段则优于其他方案。这主要是由于较之方案3,方案2中防波堤1的布置远离海岸,对岸线的影响也相对较小。防波堤3的布置与方案3相同,在南侧形成人工岬头,促进泥沙的淤积,由于沿岸输沙自北向南,北侧侵蚀较多,则相应南侧淤积会增加。1年后,0~300 m岸段内最大淤积量为4.3 m,800~1 200 m岸段内最大淤积量为34.5 m。3年后,岸线侵蚀增加,但变化率小于1年的变化率,这说明岸线变化减缓,渐趋于稳定。5年后,岸线侵蚀进一步增加,变化趋势与1—3年相似。

方案3在0~300 m岸段对岸滩的保护效果最优,其余岸段变化与方案2、方案4相差较小。这主要是由于较之方案2,方案3中防波堤2的布置距海岸较近,对岸线的影响也较大。1年后,0~300 m岸段内最大淤积量为38.5 m,800~1 200 m岸段内最大淤积量为29.7 m。3年后,0~300 m岸段仍继续淤积,其余岸段侵蚀增加,5年后,岸线变化进一步增大,岸线变化趋势与1—3年相似,0~200 m仍呈现淤积趋势,而1 150 m处已基本侵蚀到原始岸线位置。这说明防波堤2能有效保护0~300 m岸段,并实现海滩宽度的增加。

方案4采用防波堤1和防波堤2共同作用保护北侧岸段,保护效果介于方案2和方案3之间,这说明多个防波堤的作用效果并不是简单的单个防波堤作用效果的叠加,而受其相互作用的影响。防波堤1和防波堤作用效果不如单独设置近岸防波堤2,这主

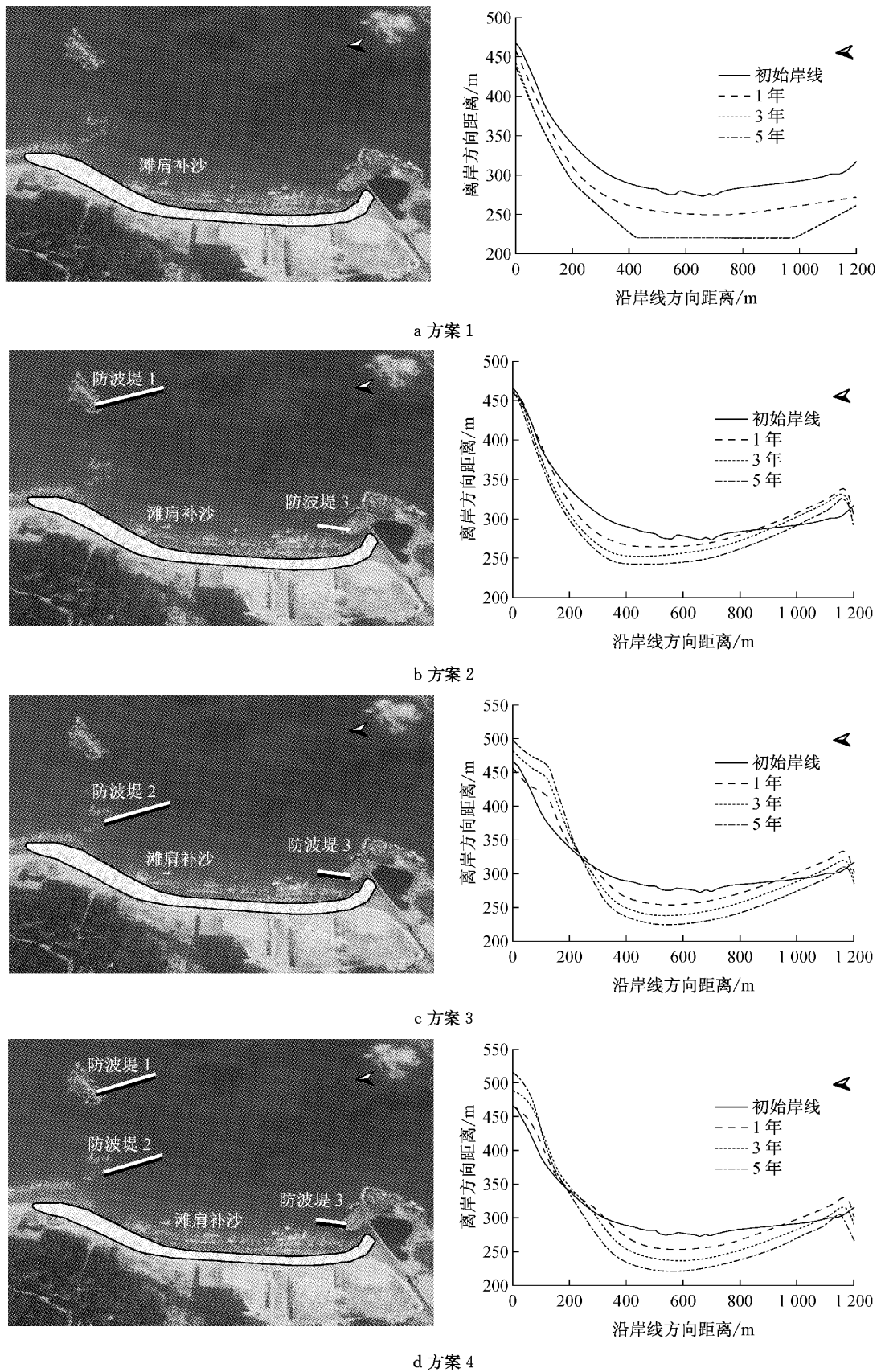


图 7 各方案岸线变化量预测

Fig.7 Predicted shoreline changes of different schemes

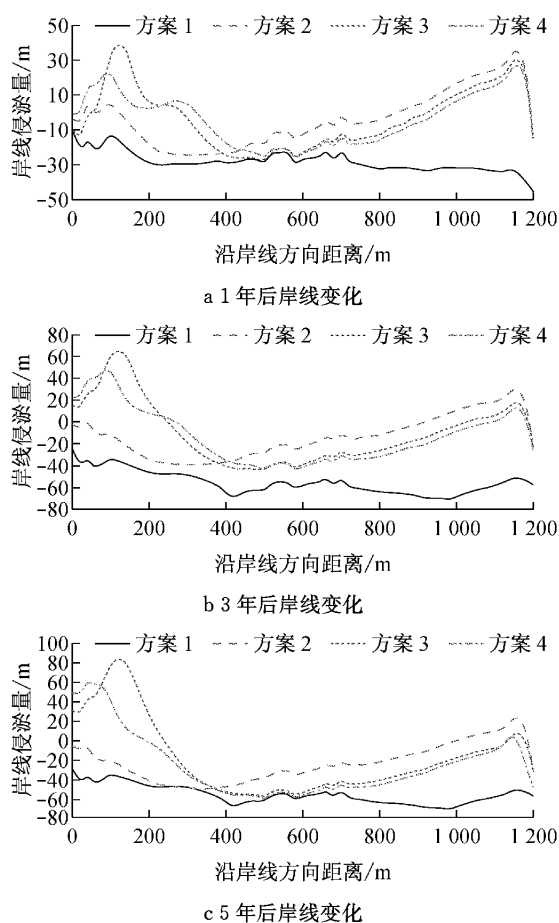


图 8 各方案侵蚀量变化

Fig. 8 Shoreline changes in positions, relative to initial shoreline

要是因为防波堤 1 改变了波向,使其发生反射并绕过防波堤 1,造成防波堤 2 消浪作用减弱,但总体作用好于防波堤 1 单独作用. 1 年后,0~300 m 岸段内最大淤积量为 21.8 m,800~1 200 m 岸段内最大淤积量为 26.7 m. 3 年后,0~300 m 岸段淤积增加,其余岸段侵蚀增加. 5 年后,岸线变化进一步增大,岸线变化趋势与 1—3 年相似,0~100 m 处仍呈现淤积趋势.

各方案岸线平均变化量见表 2. 可见,从平均变化量看,方案 2—4 均对岸线起到了良好的保护作用,方案 3 略优于方案 2、方案 4.

表 2 不同方案的岸线平均变化量

方案	1	2	3	4	
岸线平均变化量/m	1 年	-28.1	-3.8	-3.1	-3.8
	3 年	-54.9	-13.1	-9.6	-12.4
	5 年	-55.3	-22.8	-17.2	-24.6

注:“—”表示侵蚀.

如果只进行滩肩补沙只能短暂维持海滩宽度的增加,人工建筑物的修建能一定程度上防止海滩快

速冲刷,相比其他方案,方案 3 起到的作用最为明显,另外,考虑现实工程的工程量和施工难度,方案 3 工程量与方案 2 相同,少于方案 4,并且离岸较近,利于施工,可以作为初步的设计方案. 但不论哪个方案岸线总会有所侵蚀,所以还要在适当的时候结合滩肩补沙以维持海滩长期保持一定的宽度.

6 结语

本文通过 GENESIS 模型建立了海坛湾龙凤头海滩的数值模型,并使用海滩养护一期得到的实测数据进行了模型的率定和验证,模拟结果和实测结果拟合良好. 在此模型基础上分别模拟海滩养护二期工程的 4 种不同方案,并分别预测了其 1 年、3 年及 5 年后岸线的变化. 分析比较可得:只进行滩肩补沙能够短期增加海滩宽度,但 3 年后补沙宽度冲蚀殆尽,结合防波堤工程,养滩效果明显改善. 防波堤 2 能有效减少北侧岸段的侵蚀,甚至形成长期的淤积趋势,其保护效果优于防波堤 1,也优于防波堤 1 和防波堤 2 共同作用. 防波堤 3 对南部岸段保护效果较好,但长期情况下仍会受到侵蚀. 相比可见,无论短期还是长期,方案 3 对于整个岸线的保护效果最为明显. 各海滩养护方案下海滩仍有受侵蚀处,所以还要结合滩肩补沙对岸滩进行养护.

参考文献:

- [1] 林军,施文耀. 福建平潭岛旅游地质资源特征浅析[J]. 福建地质, 2000, 19(2): 111.
LIN Jun, SHI Wenyao. Discussion on the characteristics of geological tourist resources in Pingtan Island, Fujian Province [J]. Geology of Fujian, 2000, 19(2): 111.
- [2] Dean R G. Beach nourishment: benefits, theory and case examples [C]//NATO Science Series: Environmentally Friendly Coastal Protection. [S.l.]: Springer, 2005: 25-40.
- [3] 庄振业,王永红,包敏,等. 海滩养护过程和工程技术[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版, 2009, 39(5): 1019.
ZHUANG Zhenye, WANG Yonghong, BAO Min, et al. Beach nourishment process and engineering technology[J]. Periodical of Ocean University of China: Natural Science, 2009, 39(5): 1019.
- [4] Valverde H R, Trembanis A C, Pilkey O H. Summary of beach nourishment episodes on the US East Coast barrier islands[J]. Journal of Coastal Research, 1999, 15(4): 1100.
- [5] Hanson H, Brampton A, Capobianco M, et al. Beach nourishment projects, practices, and objectives—an European overview[J]. Coastal Engineering, 2002, 47(2): 81.
- [6] 庄振业,曹立华,李兵. 我国海滩养护现状[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(3): 133.

- ZHUANG Zhenye, CAO Lihua, LI Bing. An overview of beach nourishment in China [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31(3): 133.
- [7] 宋向群, 郭子坚, 陈士荫. 星海湾人工海滨浴场的规划设计研究[J]. *土木工程学报*, 2005, 38(4): 134.
SONG Xiangqun, GUO Zijian, CHEN Shiyin. The planning and design of artificial beach in the Xinghai Bay [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(4): 134.
- [8] Kuang C P, Pan Y, Zhang Y, *et al.* Performance evaluation of a beach nourishment project at West Beach in Beidaihe, China [J]. *Journal of Coastal Research*, 2011, 27(4): 769.
- [9] 贺露露. 秦皇岛中、东海滩人工养滩工程研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.
HE Lulu. Study on the beach nourishment project at Middle Beach and East Beach of Qinhuangdao [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [10] 刘修锦, 庄振业, 谢亚琼, 等. 秦皇岛金梦湾海滩侵蚀和海滩养护[J]. *海洋地质前沿*, 2014, 30(3): 71.
LIU Xiujin, ZHUANG Zhenye, XIE Yaqiong, *et al.* Beach erosion and beach nourishment of Jinmeng Bay Beach in Qinhuangdao [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2014, 30(3): 71.
- [11] 刘建涛, 刘修锦, 赵友鹏, 等. 北戴河中海滩二浴场养滩效果分析[J]. *海洋地质前沿*, 2014, 30(3): 56.
LIU Jiantao, LIU Xiujin, ZHAO Youpeng, *et al.* Two nourishment projects in Beidaihe and their implications [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2014, 30(3): 56.
- [12] Davis R A, Wang P, Silverman B R. Comparison of the performance of three adjacent and differently constructed beach nourishment projects on the gulf peninsula of Florida [J]. *Journal of Coastal Research*, 2000, 16(2): 396.
- [13] 国家海洋局第三海洋研究所, 厦门海洋工程勘察设计院. 平潭龙凤头海滩养护实验工程演变监测报告[R]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2012.
The 3rd Institute of Oceanography of the State Oceanic Administration of People's Republic of China, Ocean Engineering Survey and Design institute of Xiamen. Monitoring report of beach nourishment project in Longfengtou Beach of Pingtan [R]. Xiamen: The 3rd Institute of Oceanography—State Oceanic Administration of People's Republic of China, 2012.
- [14] Hanson H, Kraus N C. GENESIS: Generalized model for simulating shoreline change [R]. Washington D C: US Army Corps of Engineers, 1989.
- [15] Young R S, Pilkey O H, Bush D M, *et al.* A discussion of the generalized model for simulating shoreline change (GENESIS) [J]. *Journal of Coastal Research*, 1995, 11(3): 875.
- [16] Bodge K R. Discussion of "A discussion of the generalized model for simulating shoreline change (GENESIS)" [J]. *Journal of Coastal Research*, 1997, 12(3): 1044.
- [17] Ravens T M, Sitanggang K I. Numerical modeling and analysis of shoreline change on Galveston Island [J]. *Journal of Coastal Research*, 2007, 23(3): 699.
- [18] 陈建中, 吴南靖, 朱志诚. 安平港人工养滩前后之地形变化探讨[J]. *中华技术*, 2006, 1(70): 50.
CHEN Jianzhong, WU Nanjing, ZHU Zhicheng. A discussion on the profile change before and after the beach nourishment project of Anping Bay [J]. *Zhonghua Technology*, 2006, 1(70): 50.
- [19] Kuang C P, Pan Y, Zhang Y, *et al.* Shoreline change modeling on emergency beach nourishment project on west beach of Beidaihe, China [J]. *China Ocean Engineering*, 2010, 24(2): 277.
- [20] Hallermeier R J. A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate [J]. *Coastal Engineering*, 1981, 4(1): 253.
- [21] Van Der Meer J W. Data on wave transmission due to overtopping [R]. Delft: Delft University of Technology, 1990.