

海床演变对山海关旅游海滩生态修复工程的响应特征

匡翠萍¹, 董博灵¹, 谢华浪², 刘建涛³

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611; 3. 河北省地矿局第八地质大队, 河北 秦皇岛 066001)

摘要: 针对海滩侵蚀问题展开了包括滩肩补沙和离岸潜堤在内的海滩修复工程. 为评估工程效果, 采用 Delft3D 软件建立了山海关海域的泥沙输运和海床演变模型, 使用 2015 年至 2016 年的实测资料验证模型. 基于验证后的数学模型对工程海域泥沙输运与海床演变变化特征进行分析. 结果表明: 工程引起了近岸区域泥沙浓度的减小, 减小幅度随离岸距离的增大而减小. 工程建设前工程海域的侵蚀较为严重, 工程的建设大大减小了近岸海域的冲刷深度, 有效地保护了工程岸段海滩. 工程后冲淤变化幅度第 1 年最大, 然后逐年减少.

关键词: 生态修复工程; 泥沙输运; 海床冲淤演变; 数值模拟

中图分类号: P731.2

文献标志码: A

Effects of Ecological Restoration Project on Seabed Evolution at Shanhaiguan Tourism Beach

KUANG Cuiping¹, DONG Boling¹, XIE Hualang², LIU Jiantao³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. The Pearl River Hydraulic Research Institute, Guangzhou 510611, China; 3. No. 8 Geological Brigade of Hebei Geology Prospecting Bureau, Qinhuangdao 066001, China)

Abstract: Aimed at protecting beach from erosion, a restoration project was developed covering beach nourishment and offshore breakwater. For assessment of the project, a model of sediment transport and bed evolution at Shanhaiguan Coast was established based on Delft3D and validated with field measurements from 2015 to 2016. Then, the model was used to investigate the influence of the restoration project on sediment transport and bed evolution. The results indicate that there is a lower sediment concentration after the restoration project is completed and the reduction of sediment concentration decreases with the increase in offshore

distance. There is severe erosion before the restoration project starts and little erosion after the restoration project is completed. Hence, it is proved that the restoration project achieves the goal of beach restoration by reduction of erosion. The change of erosion and deposition after the project is the maximum in the first year, and then decreases year by year.

Key words: ecological restoration project; sediment transport; bed evolution; numerical simulation

滨海沙滩是位于海岸带的一种松散沉积体^[1], 是不稳定的海水运动对陆地作用的结果. 滨海沙滩凭借独特的景观成为滨海城市旅游业发展的重要驱动力^[2]. 然而, 由于受海平面上升^[3]、风暴潮频发^[4]以及来沙减少^[5]等因素的影响, 近年来海滩侵蚀不断加剧, 海滩面积不断缩小, 这严重威胁到滨海城市旅游业的发展. 泥沙收支不平衡是引发海滩侵蚀的直接原因^[6]. 引起海滩侵蚀的根本原因可以归结为两大类: 一是全球气候变化^[7], 二是人类活动^[8]. 全球气候变化引发全球海平面上升和气候异常. Deconto 等^[9]认为, 如果 CO₂ 排放量没有削减, 海平面上升速度将继续增加. 气候异常导致风暴潮的发生强度和发生频率均有所增加^[10]. 作为全球少数几个同时遭受台风风暴潮和温带风暴潮的国家之一^[11], 我国的海滩面临更严峻的挑战. 人类活动包括在上游修建水坝减少河流入海泥沙^[12]、大规模高强度的采沙活动^[13]、修筑不合理的海岸建筑物破坏了原有的水动力平衡^[14]等, 另外滨海旅游业的发展使得旅游海滩承受的压力越来越大^[15]. 针对这一问题, 在过去的数十年间提出了许多修复和保护海滩的措施, 其中, 国内外学者认为合理设计的人工养滩有利于海滩的稳定^[16-18]. 潘毅等^[19]针对秦皇岛北戴

收稿日期: 2018-05-24

基金项目: 国家自然科学基金(41776098); 中央分成海域使用金项目(20160898)

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

河西海滩进行的滩肩补沙辅以硬体工程海滩修复措施,模拟预测了工程后的岸线演变. Kuang 等^[20]在秦皇岛北戴河东海滩采用近岸抛沙养滩,离岸设置潜堤,取得了良好的海滩修复成果. 鉴于以上工程实践经验,为了遏制山海关旅游海滩侵蚀、改善旅游环境、保护旅游资源,开展了山海关旅游海滩生态修复工程.

1 工程概况

山海关区隶属于河北省秦皇岛市,位于华北与东北的交界处. 凭借长达 14 km 的海岸线,山海关成为闻名中外的滨海旅游城市. 然而由于来沙减少,海域部分岸段滩肩已不复存在,若海滩继续保持侵蚀后退的趋势,沙丘海岸将侵蚀殆尽,滨海旅游产业将受到严重威胁. 据此,开展了山海关旅游海滩生态修复工程. 海滩修复工程如图 1 所示,工程区域所在位置见图 2. 由图可知,工程区域位于石河入海口西侧,整个海域分布有石河南岛、白鹭岛及其连岛路、乐岛等多个岛屿,区域地形较为复杂. 工程于 2016 年 10 月开始,2016 年 12 月结束,其中,近岸采取滩肩补沙,补沙岸线总长度为 2 km,修复后滩肩高程达到 1.6 m,沙滩宽度在原有基础上增加 30~50 m. 参考美国养滩手册和以往该区域的工程经验可知,人工补沙中值粒径一般为原海滩沙的 1.0~1.5 倍,工程区域海滩沙中值粒径平均值为 0.46 mm,故补沙中值粒径为 0.46~0.69 mm. 低水位以上的滩面设计坡度为 1:10,低水位以下的坡度为 1:100;离岸辅以潜堤减小动力侵蚀作用,两座离岸潜堤分别距岸 240 m 和 350 m,两座潜堤总长 300 m,宽均为 8.4 m,堤顶高程为 -1.0 m. 为减小潜堤对海域生态环境的负面影响,选用人工鱼礁块体作为潜堤材质. 鱼礁规格为长 2.8 m、宽 2.8 m、高 2.0 m,立柱 25 cm,圆孔直径 30 cm,潜堤顶面为透空结构.



图 1 海滩生态修复工程布置图

Fig.1 Layout of beach nourishment

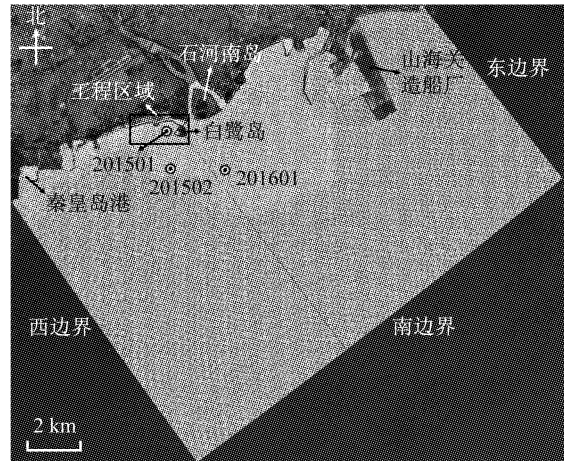


图 2 山海关模型网格和测点位置

Fig.2 Meshes of Shanhaiguan model and positions of measuring points

工程的建设必然会引起海域泥沙输运和海床冲淤演变的变化,预测工程建设前后泥沙输运和海床冲淤演变的变化特征对于评价工程效果具有重要的意义和价值. 为此,采用 Delft3D 软件建立山海关海域泥沙输运和海床冲淤演变模型,对比分析山海关旅游海滩生态修复工程建设前后的泥沙输运和海床演变响应的变化特征.

2 模型建立

2.1 模型方程

Delft3D 是由荷兰 Delft 水力学研究所开发的一套数值模拟软件包,主要应用于河流、河口、海岸等自由地表水环境地区的二维和三维水流、泥沙、环境等方面的模拟和研究. 由于研究区域的水深小于 6 m,其垂向尺度远小于平面尺度,本研究采用二维数学模型.

Delft3D 泥沙输运基本方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u\rho}{\partial x} + \frac{\partial v\rho}{\partial y} = F_s + \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_{s,x} \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_{s,y} \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) \quad (1)$$

式中: ρ 为含沙量; u 、 v 分别为 x 、 y 方向的流速; $\epsilon_{s,x}$ 、 $\epsilon_{s,y}$ 分别为 x 、 y 方向泥沙扩散系数; F_s 为泥沙净通量. F_s 可通过 Partheniades-Krone 方程计算

$$F_s = E - D \quad (2)$$

$$E = MS(\tau_{cw}, \tau_{cr,e}) \quad (3)$$

$$D = \omega_s \rho_b S(\tau_{cw}, \tau_{cr,d}) \quad (4)$$

$$\rho_b = c \left\{ z = \frac{\Delta z_b}{2}, t \right\} \quad (5)$$

$$S(\tau_{cw}, \tau_{cr,e}) = \begin{cases} \frac{\tau_{cw}}{\tau_{cr,e}} - 1, & \tau_{cw} > \tau_{cr,e} \\ 0, & \tau_{cw} < \tau_{cr,e} \end{cases} \quad (6)$$

$$S(\tau_{cw}, \tau_{cr,d}) = \begin{cases} 1 - \frac{\tau_{cw}}{\tau_{cr,d}}, & \tau_{cw} < \tau_{cr,d} \\ 0, & \tau_{cw} > \tau_{cr,d} \end{cases} \quad (7)$$

式(2)~(7)中: E 为冲刷通量; D 为淤积通量; M 为冲刷系数; ω_s 为泥沙沉降速度; ρ_b 为近底层平均泥沙浓度; Δz_b 为近底层泥沙厚度; $\tau_{cr,e}$ 为冲刷临界切应力; $\tau_{cr,d}$ 为沉积临界切应力; τ_{cw} 为床面切应力。

Delft3D 海床冲淤演变通过计算床面泥沙的交换得到床面高程的变化,可以表示为

$$(1 - \epsilon_{por}) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial s_x}{\partial x} + \frac{\partial s_y}{\partial y} = D - E \quad (8)$$

式中: s_x 、 s_y 分别为 x 、 y 方向输沙分量; z_b 为底床高程; ϵ_{por} 为底床孔隙率,一般取 0.4。

2.2 模型参数

山海关泥沙输运与海床冲淤演变模型(如图 2 所示)的边界由 3 条海域开边界(东边界、南边界及西边界)和 1 条陆域闭边界(秦皇岛港至山海关造船厂北侧)组成,水动力边界条件由已经建立和验证的秦皇岛波流耦合模型提供。根据相关工程研究经验^[21],泥沙边界条件给定为 $0 \sim 0.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。临界冲刷切应力取值范围为 $0.05 \sim 0.10 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$;临界淤积切应力取 $4/9$ 的临界冲刷切应力。初始水位为平均海平面,初始含沙量为 $0.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。两座离岸潜堤在数学模型中均概化为长 150 m、宽 8.4 m、距水面 1 m 的矩形建筑物,给定潜堤顶面的摩阻系数为 0.5,破波系数 α 为 3、 β 为 0.8。

3 模型验证

模型验证采用实际潮流和波浪耦合的动力条件。其中,入射波浪条件采用波浪测站得到的波浪特征值,并考虑实际风场的作用。

3.1 泥沙输运模型验证

2015 年 9 月 24 日至 25 日以及 2016 年 10 月 15 日至 16 日,河北省地矿局第八地质大队于山海关海域测量得到含沙量数据。3 个测站 201501、201502、201601 分布如图 2 所示。根据已有的含沙量实测数据验证泥沙输运模型,验证结果见图 3。由于泥沙测量时段风平浪静,近岸潮流较弱,泥沙浓度极低,海床泥沙处于临界起动状态,很难精确模拟,但模拟泥沙浓度的量级与变化趋势与实测基本一致。

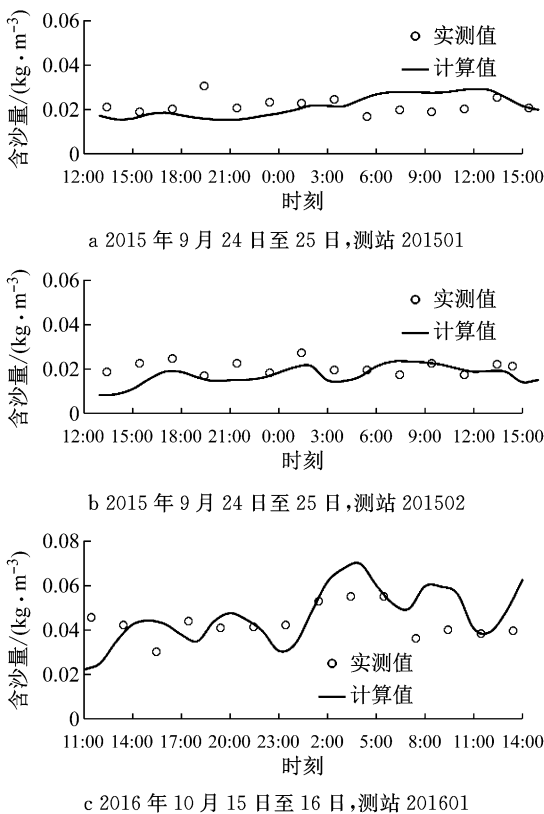


图 3 泥沙输运模型验证

Fig.3 Validation of sediment transport model

3.2 海床冲淤演变模型验证

2015 年 12 月和 2016 年 9 月,河北省地矿局第八地质大队于山海关海域测量得到两次高密度水下地形数据(测量点间距小于 3 m)。根据两次的测量结果,得到 2015 年 12 月至 2016 年 9 月的海床冲淤分布,作为海床冲淤演变模型的验证资料。海床冲淤演变的验证结果见图 4。由图 4 可见,模拟和实测得到的冲淤分布规律一致。

3.3 模型效率评价

采用含沙量均值的相对误差评价泥沙输运模型,结果见表 1。

表 1 模型效率评价

Tab.1 Evaluation of model efficiency		
评价内容	测站和验证点位置	相对误差/%
含沙量	201501	0.7
	201502	14.5
	201601	8.3
海床冲淤	A	12.1
	B	2.6
	C	0.1
	D	0.1
	E	0.3
	F	7.4
	G	1.3
	H	5.3
	I	13.5

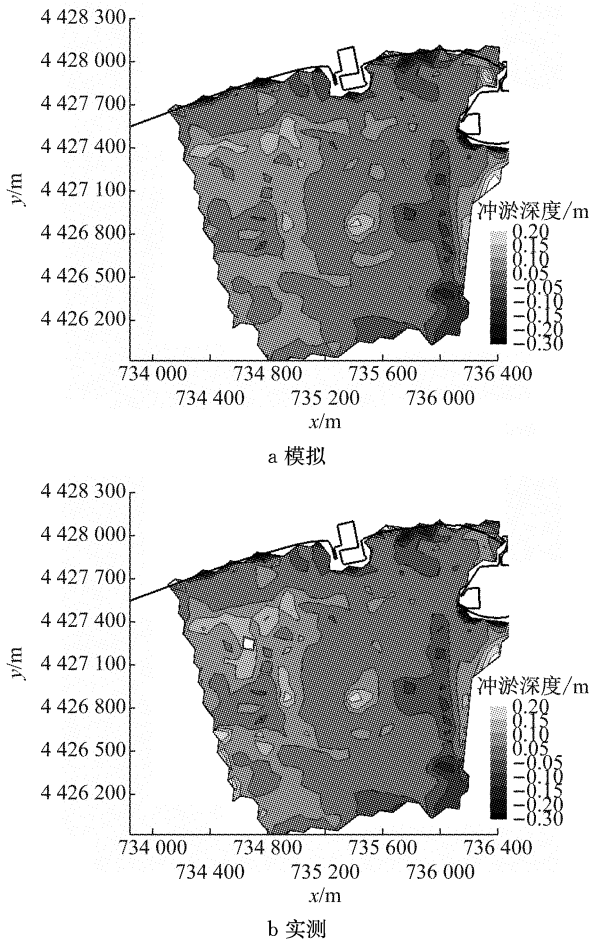


图4 海床冲淤演变模型验证
Fig.4 Validation of seabed evolution model

为了定量评价海床冲淤演变模型,在图4的基础上,选取图中冲淤变化较大的点作为验证分析点,验证分析点的位置如图5所示,海床冲淤演变的相对误差见表1。

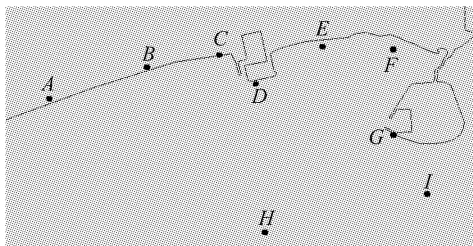


图5 海床冲淤验证点位置
Fig.5 Validation points of seabed evolution

由表1可得,泥沙输运模型和海床冲淤演变模型的相对误差均在15%以内,可以认为模型模拟值与实测值较吻合。该模型用于模拟实际的泥沙输运与海床冲淤演变具有一定的可靠性。

4 计算结果分析

将验证后的模型用于对比分析山海关旅游海滩

修复工程建设前后的泥沙输运与海床演变,预测和评价工程效果。泥沙输运和海床冲淤演变模型均采用实际潮流和波浪耦合的动力条件。其中,入射波浪条件采用波浪测站得到的波浪特征值,并考虑实际风场的作用。

4.1 泥沙输运

图6为工程前后夏季大潮与常浪耦合下的涨潮时均含沙量分布场。从整体上看,石河南岛近岸海域含沙量较大,距岸1 km范围内形成三角状相对高浓度泥沙区,含沙量最高达 $0.08 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。这是由于该区域波向线集中,波能辐聚,而且该区域水深较浅,波浪在该区域集中破碎。其他海域,泥沙浓度与等深线基本保持平行,近岸泥沙浓度较大,外海泥沙浓度较小。

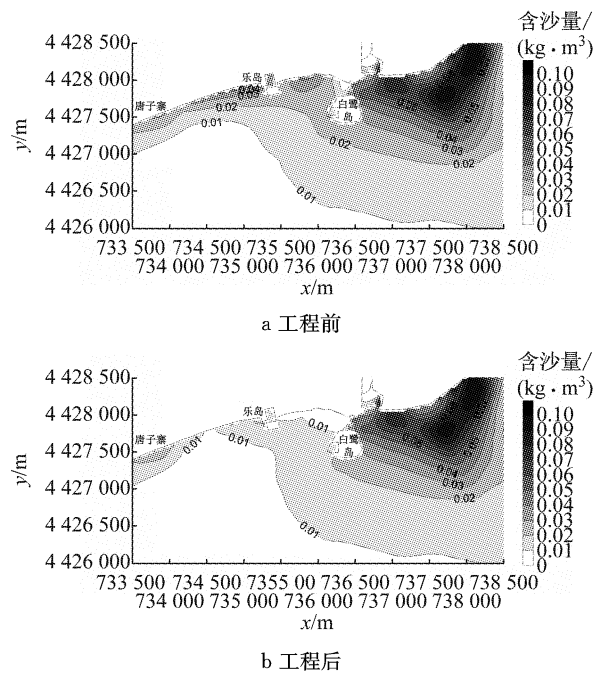


图6 工程前后夏季大潮与常浪耦合下的涨潮时均含沙量分布场

Fig.6 Distribution of average sediment concentration during a flood period under the condition of spring tide and normal wave before and after the restoration project

由图6a可知,工程前唐子寨至白鹭岛之间海域,距岸200 m范围内含沙量均大于 $0.02 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。由于白鹭岛的掩护作用,乐岛至白鹭岛岸段海域的泥沙浓度小于唐子寨至乐岛岸段海域的泥沙浓度。由图6b可知,工程后唐子寨至白鹭岛之间海域,距岸200 m范围内含沙量均小于 $0.02 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。由于养滩工程后滩面高于海平面,唐子寨至白鹭岛之间的部分海域泥沙浓度为零。

图 7 为工程前后夏季大潮与常浪耦合下的涨潮时均含沙量差值场。由于工程后近岸补沙使得滩肩高程增大,加之近岸高程的改变引起波浪破碎带位置的改变,近岸沙滩受到的侵蚀作用大幅减小,不再为周围海域提供泥沙,故工程引起了近岸区域泥沙浓度的减小,减大幅度随离岸距离的增大而增大。其中,乐岛至白鹭岛岸段由于处在人工岛和离岸潜堤的掩护区内,近岸泥沙浓度减小幅度较大,含沙量减小大于 $0.030 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。唐子寨至乐岛岸段由于缺乏人工岛和离岸潜堤的掩护,近岸泥沙浓度减小幅度小于乐岛至白鹭岛岸段,含沙量最大约减小 $0.025 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

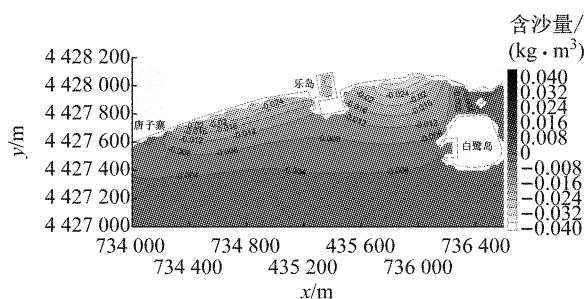


图 7 工程前后夏季大潮与常浪耦合下的涨潮时均含沙量差值场(工程后减工程前)

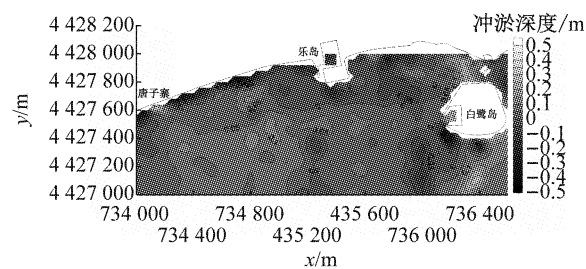
Fig. 7 Distribution of average sediment concentration change during a flood period caused by the restoration project under the condition of spring tide and normal wave

4.2 海床演变

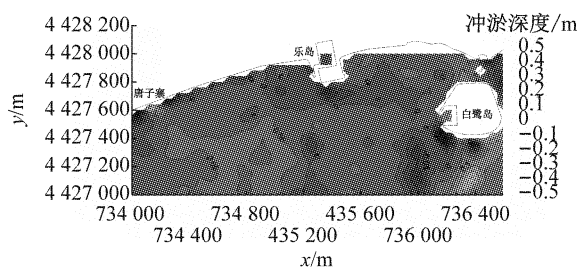
图 8 为工程前后海床 1 年、2 年、5 年、10 年冲淤变化。图中正值表示淤积,负值表示冲刷。由图 8 可知,由于工程建设仅在近岸海域引起一定的冲淤演

变变化,工程前后工程海域远海区域均处于整体轻微淤积、局部存在冲刷的状态。工程前,唐子寨至乐岛岸段由于缺乏掩护,近岸海域冲刷较为严重,前方 100 m 范围内普遍处于冲刷状态,1 年的冲刷深度为 $0.05 \sim 0.30 \text{ m}$,2 年的冲刷深度为 $0.07 \sim 0.40 \text{ m}$,5 年的冲刷深度为 $0.10 \sim 0.60 \text{ m}$,10 年的冲刷深度为 $0.20 \sim 0.80 \text{ m}$ 。乐岛至白鹭岛岸段由于白鹭岛的掩护作用,处于部分区域冲刷、部分区域淤积的冲淤平衡状态,1 年的冲刷深度和淤积厚度均为 $0.05 \sim 0.15 \text{ m}$,2 年的冲刷深度和淤积厚度均为 $0.07 \sim 0.20 \text{ m}$,5 年的冲刷深度和淤积厚度均为 $0.10 \sim 0.30 \text{ m}$,10 年的冲刷深度和淤积厚度均为 $0.20 \sim 0.40 \text{ m}$ 。也就是工程后第 1 年的冲淤变化最大,然后逐年减少。工程后,唐子寨至乐岛岸段由于近岸高程增大,波浪破碎带迁移,近岸海域冲刷几乎为零;乐岛至白鹭岛岸段由于白鹭岛和离岸潜堤的双重掩护作用,处于冲淤变化基本为零的冲淤平衡状态。

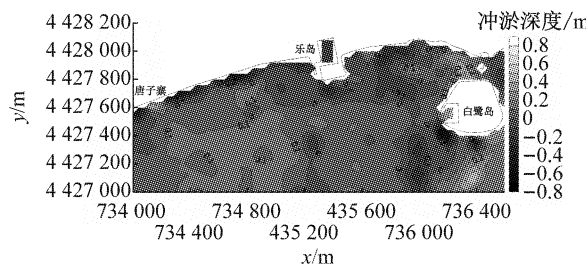
图 9 为工程前后海床 1 年、2 年、5 年、10 年冲淤变化的差值场。由图 9 可知,工程的建设大大减小了近岸海域的冲刷深度。唐子寨至乐岛岸段的减小幅度较大,离岸 100 m 内 1 年的冲刷深度减小幅度为 $0.02 \sim 0.20 \text{ m}$,2 年的减小幅度为 $0.03 \sim 0.30 \text{ m}$,5 年的减小幅度为 $0.05 \sim 0.40 \text{ m}$,10 年的减小幅度为 $0.07 \sim 0.50 \text{ m}$ 。乐岛至白鹭岛岸段的减小幅度小于唐子寨至乐岛岸段,1 年总体的减小幅度为 $0.04 \sim 0.16 \text{ m}$,2 年的减小幅度为 $0.06 \sim 0.25 \text{ m}$,5 年的减小幅度为 $0.08 \sim 0.30 \text{ m}$,10 年的减小幅度为 $0.10 \sim 0.40 \text{ m}$ 。也就是工程后第 1 年的冲淤变化幅度最大,然后逐年减少。



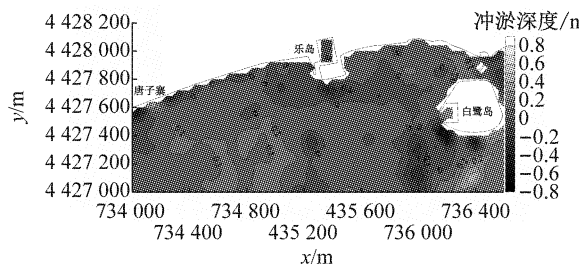
a 工程前(1 年)



b 工程后(1 年)



c 工程前(2 年)



d 工程后(2 年)

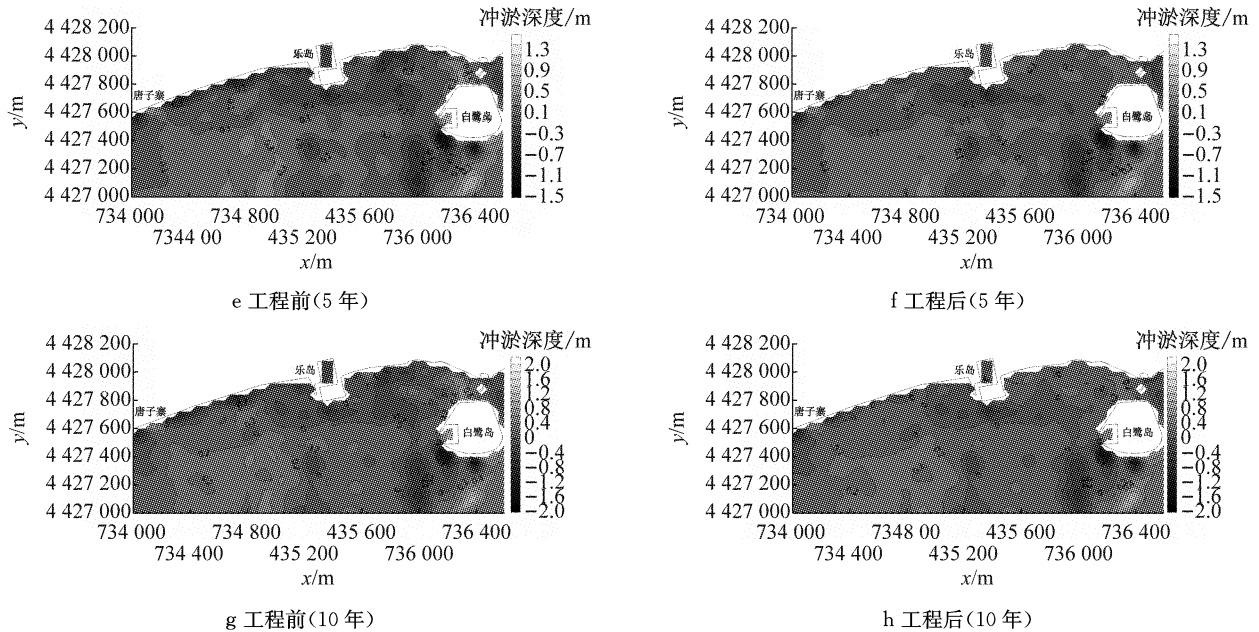


图8 工程前后海床1年、2年、5年、10年冲淤变化

Fig.8 Seabed evolution before and after the restoration project in 1, 2, 5, and 10 years

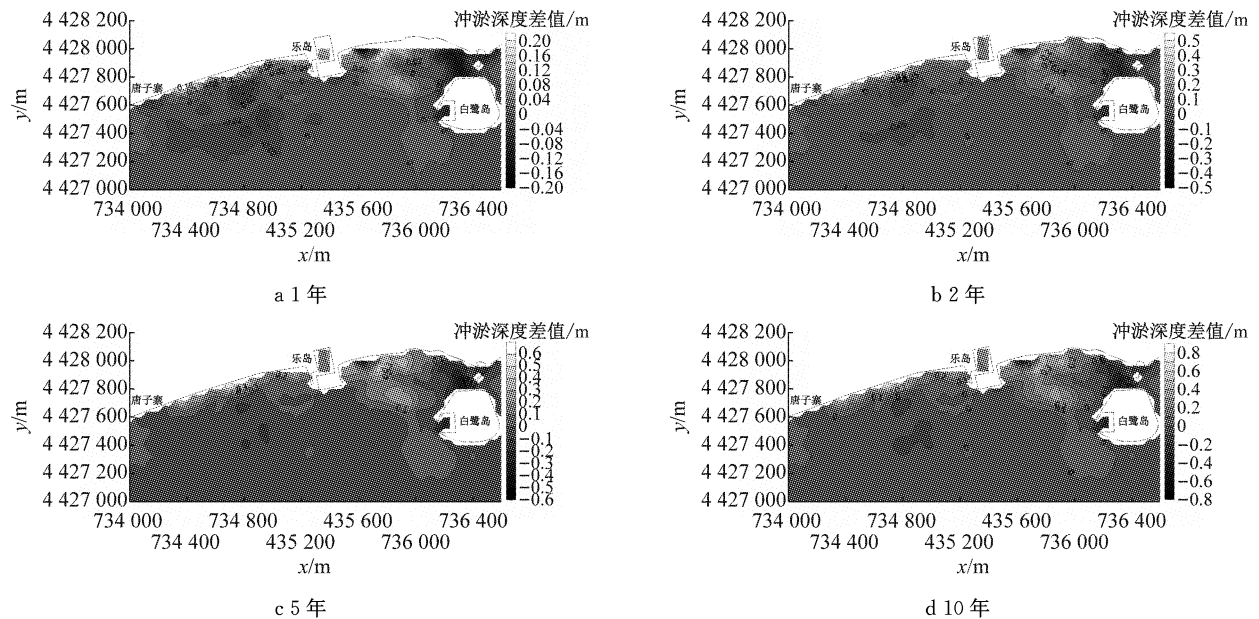


图9 工程前后海床1年、2年、5年、10年冲淤变化差值场(工程后减工程前)

Fig.9 Distribution of the change of seabed evolution caused by the restoration project in 1, 2, 5, and 10 years

5 结论

基于 Delft3D 建立了山海关泥沙输运与海床演变模型,并通过泥沙浓度和海床冲淤演变实测资料与模型计算值的对比,论证了模型的可靠性,基于该模型对比分析了工程前后的山海关海域泥沙输运和海床冲淤演变的变化特征,得到以下结论:

(1) 工程引起了近岸区域泥沙浓度的减小,减小幅度随离岸距离的增大而增大.乐岛至白鹰岛岸

段悬沙浓度减小幅度较大,含沙量减小幅度大于 $0.03 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;唐子寨至乐岛岸段岸含沙量减小幅度小于乐岛至白鹰岛岸段,最大减小幅度约为 $0.025 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

(2) 工程建设前工程海域的侵蚀较为严重.唐子寨至乐岛岸段前方 100 m 范围内普遍处于冲刷状态;乐岛至白鹰岛岸段处于部分区域冲刷、部分区域淤积的冲淤平衡状态.工程建设后,唐子寨至白鹰岛的近岸海域冲刷几乎为零,工程的建设大大减小了近岸海域的冲刷深度.唐子寨至乐岛岸段和乐岛至

白鹭岛岸段的近岸海域冲淤变化幅度第 1 年最大, 然后逐年减少。

(3) 工程建设有效地保护了工程掩护区内的海滩, 减小了海滩的侵蚀, 取得了一定的工程效果。

参考文献:

- [1] 杨继超, 李广雪, 宫立新, 等. 山东威海滨海沙滩侵蚀现状和原因分析[J]. 中国海洋大学学报, 2012, 42(12): 97.
YANG Jichao, LI Guangxue, GONG Lixin, *et al.* Status and causes of beach erosion in Weihai, Shandong Province[J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(12): 97.
- [2] HEGGIE T W. Sand hazards on tourist beach[J]. Travel Medicine & Infectious Disease, 2013, 11: 123.
- [3] ERLANDSON J M. As the world warms: rising seas, coastal archaeology, and the erosion of maritime history[J]. Journal of Coastal Conservation, 2010, 16(2): 137.
- [4] KARUNARATHNA H, PENDER D, RANASINGHE R, *et al.* The effects of storm clustering on beach profile variability [J]. Marine Geology, 2014, 348: 103.
- [5] 李兵, 蔡锋, 曹立华, 等. 福建砂质海岸侵蚀原因和防护对策研究[J]. 台湾海峡, 2009, 28(2): 156.
LI Bing, CAI Feng, CAO Lihua, *et al.* Causes of beach erosion in Fujian and preventions[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2009, 28(2): 156.
- [6] 喻国华, 施世宽. 江苏省吕四岸滩侵蚀分析及整治措施[J]. 海洋工程, 1985, 3(3): 32.
YU Guohua, SHI Shikuan. Erosion analysis and regulation measures for the beach in Lvsu, Jiangsu province[J]. The Ocean Engineering, 1985, 3(3): 26.
- [7] MEE L. Between the devil and the deep blue sea: the coastal zone in an era of globalisation[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2012, 96(1): 1.
- [8] RIJN L C V. Coastal erosion and control[J]. Ocean & Coastal Management, 2011, 54(12): 867.
- [9] DECONTO R M, POLLARD D. Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise [J]. Nature, 2016, 531(7596): 591.
- [10] 孙志林, 卢美, 聂会, 等. 气候变化对浙江沿海风暴潮的影响[J]. 浙江大学学报(理学版), 2014, 41(1): 90.
SUN Zhilin, LU Mei, NIE Hui, *et al.* Impacts of climatological change on storm surge in Zhejiang coastal water[J]. Journal of Zhejiang University(Science Edition), 2014, 41(1): 90.
- [11] 杨桂山. 中国沿海风暴潮灾害的历史变化及未来趋势[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(3): 23.
YANG Guishan. Historical change and future trends of storm surge disaster in China's coastal area[J]. Journal of Natural Disasters, 2000, 9(3): 23.
- [12] 戴仕宝. 中国流域自然作用和人类活动对(河流)入海泥沙的影响——以长江为重点[D]. 上海: 华东师范大学, 2006.
DAI Shibao. Impacts of natural processes and human activities on the river sediment flux into sea and its environmental significance, China: with the emphasis on Yangtze River[D]. Shanghai: East China Normal University, 2006.
- [13] 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.
- [14] 任杰, 曾学智, 贾良文. 东江下游河段溯源侵蚀特征与机理[J]. 水科学进展, 2010, 21(1): 84.
REN Jie, ZENG Xuezhi, JIA Liangwen. Mechanism study of retrogressive erosion in the lower reach of Dongjiang River [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(1): 84.
- [15] CHIVA L, PAGÁN J I, LÓPEZ I, *et al.* The effects of sediment used in beach nourishment: study case el portet de moraira beach[J]. Science of The Total Environment, 2018, 628/629(1): 64.
- [16] LEONARD L A, DIXON K L, PILKEY O H. A comparison of beach replenishment on the U. S. Atlantic, Pacific and Gulf coasts[J]. Journal of Coastal Research, 1990, 6(6): 127.
- [17] 吴建, 拾兵. 近岸补沙养护海滩研究综述[J]. 海洋科学, 2011, 35(8): 108.
WU Jian, SHI Bing. A review of the shoreface nourishment for beach protection[J]. Marine Science, 2011, 35(8): 108.
- [18] ARAGONÉS L, SERRA J C, VILLACAMPA Y, *et al.* New methodology for describing the equilibrium beach profile applied to the Valencia's beaches[J]. Geomorphology, 2016, 259: 1.
- [19] 潘毅, 匡翠萍, 杨燕雄, 等. 北戴河西海岸养护工程方案研究[J]. 水运工程, 2008(7): 23.
PAN Yi, KUANG Cuiping, YANG Yanxiong, *et al.* Study on beach nourishment scheme of west beach in Beidaihe[J]. Port & Waterway Engineering, 2008(7): 23.
- [20] KUANG C P, HE L L, GU J, *et al.* Effects of submerged breakwater on hydrodynamics and shoreline change of the east beach of Beidaihe, Bohai Bay, China[J]. Journal of Coastal Research, 2014, 30(3): 598.
- [21] 匡翠萍, 戚健文, 蒋铭韬, 等. 泥沙输运与海床演变对曹妃甸港口工程的响应特征[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(12): 1840.
KUANG Cuiping, QI Jianwen, JIANG Mingtao, *et al.* Responses of sediment transport and bed evolution to Caofeidian harbour project[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(12): 1840.