

建闸河口整治工程与河床演变特征

匡翠萍¹, 梁慧迪¹, 李 建², 左丽明³

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 国家海洋局秦皇岛海洋环境监测中心站, 河北 秦皇岛 066002;
3. 河北省地矿局水文工程地质勘察院, 河北 石家庄 050021)

摘要: 建闸河口整治工程引起的河床演变调整十分复杂. 基于验证好的潮流、泥沙输运及河床演变模型分析了双龙河口整治一期工程和二期工程后水动力和河床演变的响应特征. 结果表明, 闸下河道水动力变化和河道冲淤分布与局部浚深拓宽及纳潮量增加有密切联系. 若仅对河道上段局部河道进行整治, 浚深拓宽段的涨落潮不对称现象加剧, 局部产生回流区. 若以固定坡降对整条河道进行整治, 则涨落潮流速显著增加且不对称性减小, 纳潮量增加在工程初期会引起口门段冲刷, 而局部拓宽段会因流速相对减小而产生淤积, 特别是在回流区淤积严重. 因此为延长工程寿命, 尚需辅以定期开闸放水 and 局部清淤等措施.

关键词: 双龙河口; 挡潮闸; 整治工程; 河床演变

中图分类号: TV148

文献标志码: A

the upper estuary has intensified the asymmetry of flood-ebb current velocity and even induces recirculating flow. While fully regulation over the estuary with a fixed slope will increase tidal current velocity significantly and relieve the asymmetry of flood-ebb current velocity as well. Though increased tidal influx at the estuary acts a positive factor washing out the sediment in lower channel, sediment deposition occurs in widened section of the estuary due to the decreasing tidal current velocity, especially in recirculating flow region. Therefore, for enhancing the function of regulation project, releasing water from upper barriers and dredging regularly are also needed.

Key words: Shuanglong Estuary; tidal barrage; regulation project; morphological evolution

Study on Effect of Regulation Engineering Project on Morphological Evolution Downstream of Tidal Barrage

KUANG Cuiping¹, LIANG Huidi¹, LI Jian², ZUO Liming³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Marine Environment Monitoring Central Station of Qinhuangdao, SOA, Qinhuangdao 066002, China; 3. Hydrogeology and Engineering Geology Survey Institute, Geology and Mineral Exploration Bureau of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Morphological evolution downstream of tidal barrage is sensitive to regulation engineering project. A set of methodology integrating verified tidal current model, sediment transport model and morphological evolution model was set up to quantify the influences of different stages of regulation engineering project in the Shuanglong Estuary on currents and morphological evolution. Results indicate that the changes of currents and morphological evolution are closely associated with partially deepened-widened channel and increased tidal influx. In general, increased wetted area in

从 20 世纪 50 年代起我国沿海河口修建了大量挡潮闸以挡潮御卤、排洪蓄淡^[1]. 由于河口建闸后潮波变形加剧, 河道内涨落潮过程的明显不对称形成了河道涨潮大于落潮的不平衡输沙, 长时期关闭闸门使得闸下河道发生持续性淤积^[2-4], 严重影响河道防洪安全, 降低其通航能力, 限制河口资源开发和利用. 近年来, 随着我国经济的持续发展, 淤积型河口与港口、航道的开发之间的矛盾渐显, 因此实现河口、港口和水运航道一体发展的理想格局是河口建设发展的主要方向.

在现阶段, 河口航道建设及维护主要依靠修筑导堤、岸线整治和机械清淤等工程措施. 此类工程措施可通过改变河口地形打破原有水动力和输沙规律, 改变河道冲淤特性^[5-6]. 一般而言, 河道边滩的宽度为过流断面的 50% 时, 可维持河道涨落潮相对平衡, 一旦大量潮间带被浚深会使涨潮流增强, 海相细颗粒泥沙将造成河道回淤^[7]. Winterwerp 等^[8]通过

收稿日期: 2016-04-30

基金项目: 中央分成海域使用金项目 (THY-2011)

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

通讯作者: 梁慧迪 (1991—), 女, 博士生, 主要研究方向为海岸工程. E-mail: lianghuidi_tju@163.com

对欧洲河道内潮差分析发现,20世纪许多河道内的潮差在人类工程影响下呈现增大的态势,同时指出潮差增加与水深增加、河道长度变短及边滩面积减小有关。Maren等^[9]通过数值模拟的方法研究了河道疏浚和港口建设对Ems河口泥沙输运的影响,发现河道浚深是迫使泥沙向河口输运的主要因素。此外,不同的工程方案(如挖槽深度、宽度、长度)也使回淤率存在较大差异。刘杰等^[10]利用长江口深水航道回淤资料研究了北槽航道回淤时空变化特征及其对河槽地形的影响,发现北槽主槽地形冲淤调整引起的高差变化,是航道回淤重心年际间上提的主要原因。李大鸣等^[11]通过建立泥质河口二维水沙数学模型对宽浅型和深窄型两类局部清淤方案效果进行了分析,发现清淤宽度越小、深度越大,回淤率越高;清淤长度越长,回淤率越小。在相同的清淤条件下,宽浅型清淤方案与窄深型清淤方案相比,具有回淤量小、回淤率低的特点。综上可以看出,河道的冲淤特征与工程建设方案密切相关。然而,对于原本潮波反射剧烈、涨落潮不平衡的建闸河口,地形和岸线的改变引起的河道冲淤响应更为复杂和剧烈^[12-15],因此,建闸河口整治工程对河床演变的影响需要进一步研究。

双龙河口位于河北省北部沿海,在嘴东工业园区与曹妃甸工业区交界处,是该海域重要的入海航道。双龙河口建闸后,河床10年淤高2~4 m,河道束窄变浅,严重降低了原有的河道通航能力,行洪能力降为原来的32%^[16]。随着曹妃甸围海造陆工程和嘴东工业园区的发展,双龙河口战略位置日益凸显。为改善河口的水动力环境,提升河道通航等级,自2011年开展双龙河口整治工程。本文以双龙河口整治工

程为例,利用数值模拟手段对一期、二期整治工程后挡潮闸下河道水动力调整及工程后河床演变进行计算分析,揭示建闸河口在整治工程影响下的演变规律,提出建闸河口整治及维护建议。

1 河口及工程概况

双龙河(图1)属季节性河流,河长65 km,集水面积为443 km²,河道坡降(0.005%~0.02%)较平缓,底质以0.005~0.008 mm的粉砂黏土为主。河口潮流主要受渤海潮波系统控制,属不正规半日混合潮,平均潮差2.24 m。双龙河挡潮闸建于1978年,为6孔直升式闸门,闸口净宽48 m,闸门仅在汛期排洪或需排污水时提起,平时为常闭闸。建闸后,潮流成为双龙河口的控制性动力,涨潮历时缩短,落潮历时延长,涨潮流速大于落潮流速。由于当地海相来沙丰富,且涨潮输沙量大于落潮输沙量,闸下河道发生严重淤积,至1988年河床淤高2~4 m^[16],河床-0.3 m等深线宽度由90 m缩窄至30 m(图2a)。为改善河口的水动力环境和提升河道通航等级,双龙河口整治工程自2011年开始实施,主要对挡潮闸下至入海口长度为4.09 km河段进行岸线整治、河道清淤及岸坡防护。一期工程(图2b)于2013年竣工,完成闸下1.834 km范围内的整治。河道按0.05%的坡降进行清淤,河宽拓展至180 m,河口海域面积增加5.17 km²。为营造亲水、绿色友好的海岸环境,河道右岸采用沉井搭建亲水平台,地面回填至4.65 m,亲水平台与地面采用1:10缓坡相连,作为景观用地;左岸采用1:4坡度与现状地面相连,岸坡采用植草护坡形式控制滩面泥沙启动,促使泥沙就地落淤。

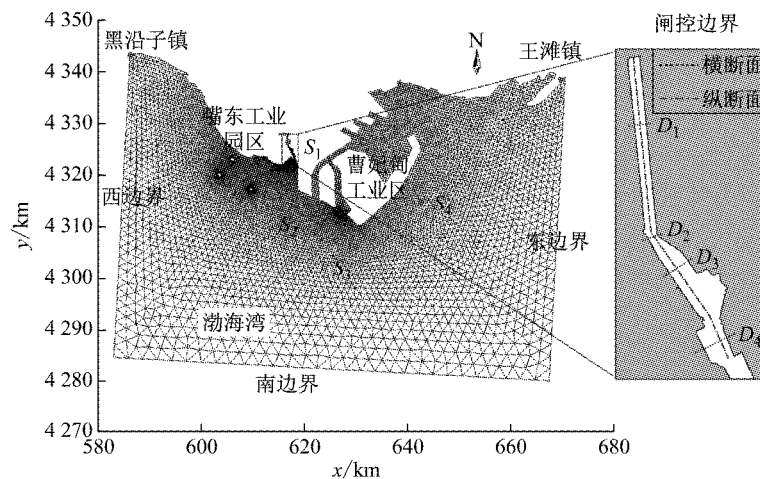


图1 双龙河口网格及测点位置、河道断面分布

Fig.1 Mesh of the Shuanglong Estuary model, observation stations and river cross-sections

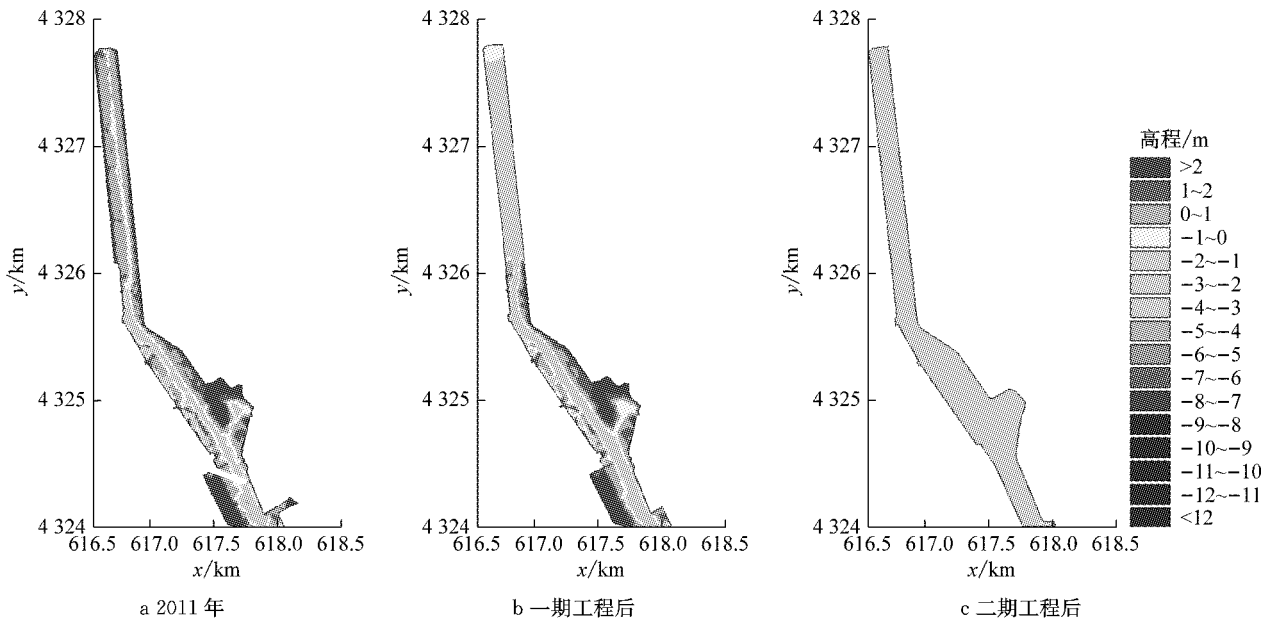


图 2 2011 年、一期工程后、二期工程后地形岸线

Fig. 2 Bathymetry and coastline of the Shuanglong Estuary in 2011, after the first-phase project and second-phase project

二期工程(图 2c)计划对一期工程下游至河口(距闸约 4.09 km)范围内河段以 0.05% 的坡降继续清淤和岸线整治。

2 数学模型的建立及验证

采用丹麦水力学研究所(DHI)研发的 MIKE 21 Flow Model 模型^[17]中的水动力模块(HD)和黏性泥沙(MT)模块建立双龙河口潮流、泥沙输运及河床演变数学模型。模型通过有限体积法进行离散,显式欧拉法求解,具备计算速度快、易收敛、计算精度高等优点^[18]。

2.1 基本控制方程

2.1.1 潮流模型

潮流模型建立在 Navier-Stokes 方程的基础上。在笛卡尔坐标系下,通过对三维水平动量方程和连续方程沿水深积分得到如下二维浅水方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} = f_v h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} = -f_u h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) \quad (3)$$

式中: t 为时间; x, y 为笛卡尔坐标下纵横坐标; h 为总水深, $h = \eta + d$, η 为水位, d 为静止水深; u, v 分别为 x, y 方向的水深平均流速; f 为科氏力系数; ρ 为水的密度; τ_{sx}, τ_{sy} 分别为 x, y 方向上的表面风应力; τ_{bx}, τ_{by} 分别为 x, y 方向的底床切应力, $\tau_{bx} = \rho g \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{M^2 h^{\frac{1}{3}}} u$, $\tau_{by} = \rho g \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{M^2 h^{\frac{1}{3}}} v$; M 为曼宁数; 侧应力 T_{ij} 包括黏性摩擦和紊动摩擦等, 通过水深平均流速沿梯度方向的变化计算如下:

$$\begin{cases} T_{xx} = 2A \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ T_{xy} = A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ T_{yy} = 2A \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{cases} \quad (4)$$

亚网格尺度涡流黏度 A 由 Samagorinsky 公式(5)确定:

$$A = c_s^2 l^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (5)$$

式中: c_s 为常数, 在本文中取 0.28; l 为特征长度; 变形率 S_{ij} 根据下式计算:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

2.1.2 泥沙输运模型

双龙河口泥沙运动以悬移质为主, 因此采用如下考虑淤积和侵蚀的对流扩散方程描述泥沙输运:

$$\frac{\partial hc}{\partial t} + \frac{\partial huc}{\partial x} + \frac{\partial hvc}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (h\epsilon_x \frac{\partial c}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\epsilon_y \frac{\partial c}{\partial y}) +$$

$$Q_L C_L - S \quad (7)$$

$$S = \begin{cases} \omega_s c_b \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}}\right) & \tau_b < \tau_{cd}, \text{河床淤积} \\ 0 & \tau_{cd} \leq \tau_b \leq \tau_{ce}, \text{河床不冲不淤} \\ -E \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1\right)^n & \tau_b > \tau_{ce}, \text{河床冲刷} \end{cases} \quad (8)$$

式中: c 为沿水深平均含沙量; ϵ_x, ϵ_y 分别为 x, y 向的泥沙扩散系数; S 为淤积/冲刷项; Q_L 为水平方向单位面积的源流量; C_L 为源的含沙量; ω_s 为泥沙沉速; c_b 为近底含沙量; τ_b 为底床切应力; τ_{cd} 为临界淤积切应力; τ_{ce} 为临界侵蚀切应力; E 为侵蚀系数; n 为侵蚀指数。

2.1.3 河床演变模型

河床演变方程为

$$\rho'_s \frac{\partial \eta_s}{\partial t} = S \quad (9)$$

式中: ρ'_s 为悬沙干密度; η_s 为悬沙造成的河床淤积厚度, 正值表示淤积, 负值表示冲刷。

2.2 计算范围及网格

为了保证计算的准确性及连续性, 且计算边界不受曹妃甸围海造陆工程的影响, 模型计算范围自双龙河口挡潮闸向海延伸 40 km, 包括整个双龙河口及曹妃甸在内的 4 500 km² 海域(图 1)。模型采用非结构网格对计算区域进行渐变剖分, 网格结点总数为 15 337 个, 网格单元总数为 28 473 个, 河道横截面方向网格数约为 20 个, 最高分辨率在闸下工程区域, 为 10 m, 至外海网格逐渐扩至 2 800 m。

2.3 边界条件、初始条件及参数选取

2.3.1 边界条件和初始条件

模型开边界包括东、西、南外海开边界和闸控边界。东、西外海开边界的走向基本与主流方向垂直, 从而增强模型的稳定性。潮流模型外海开边界条件为渤海潮流模型^[19](边界为大连至烟台)提供的潮位过程, 由于挡潮闸常年关闭, 闸控边界流量取零。东、西、南外海开边界悬沙浓度根据渤海多年平均含沙量分布进行线性插值给定, 分别为 0.005~0.010 kg·m⁻³, 0.010~0.020 kg·m⁻³, 0.005~0.010 kg·m⁻³。潮位初始条件取开始时刻的边界潮位平均值, 初始流速为零, 初始含沙量为 0.01 kg·m⁻³。

2.3.2 关键参数选取

随着潮位涨落变化, 部分区域露滩, 模型通过干湿网格法界定动边界, 干水深 h_{dry} 、淹没水深 h_{flood} 和湿水深 h_{wet} 分别取 0.005 m, 0.05 m 和 0.1 m, M 根据底部泥沙粒径和水深分布取值 27~97 m^{1/3}·s⁻¹, Samagorinsky 模型中常数 c_s 取 0.28, 以此来计算涡

黏性系数。 ω_s 参照泥沙粒径分布取平均值 0.000 5 m·s⁻¹; 临界侵蚀切应力 τ_{ce} 根据唐存本公式^[20]估算后经率定调整取 0.51~1.00 N·m⁻², τ_{cd} 取 0.22~0.44 N·m⁻²; E 取 1.5×10⁻⁵ kg·m⁻²·s⁻¹; n 取 1; 床面糙率 k_n 取 0.001 m; 床层泥沙干密度 ρ'_s 取具有代表性的恒定值 811 kg·m⁻³。对河床冲淤模型进行技术约减, 模型采用取值为 12 的地形演变加速系数, 外海开边界条件为典型中潮差潮位过程, 经计算 1 个月后即得全年的冲淤演变。

2.4 模型验证

采用 2012 年 12 月 18 至 19 日 S_1 和 S_2 点(图 1)流速和流向过程以及 S_2 点实测潮位对潮流模型进行验证, 从图 3 的验证结果可见, S_2 点的模拟潮位过程与实测潮位过程一致。同时, 涨潮过程显示双龙河口海域属于不正规半日潮, 涨潮历时约 5 h, 落潮历时约 7 h。 S_1 和 S_2 点的模拟流速、流向过程与实测值在相位和数值上都基本吻合。 2 个点的潮流过程显示, 潮流由外海传入闸下河道发生较大变形, 具有涨潮历时缩短、落潮历时增长的涨落潮不对称特点。

泥沙输运模型验证采用 2012 年 10 月 15 至 16 日曹妃甸海域 S_3 和 S_4 点垂向平均悬沙浓度。对 2010 年 9 月及 2011 年 9 月实测地形数据进行差值计算, 得到闸下 3.5 km 河道深泓线一年的沿程冲淤变化, 以此用作河床冲淤模型验证。图 4、图 5 分别为 S_3 和 S_4 点悬沙浓度验证过程和河床冲淤验证, 结果显示计算悬沙浓度与实测过程基本一致, 河床纵剖面年厚度变化与实测值吻合较好, 表明数学模型选取的泥沙计算参数较合理, 能反映双龙河口泥沙输运过程和河床演变规律。

进一步使用 Willmott^[21] 所提出的统计学方法对模型进行评价, 计算所得的潮流模型、泥沙输运及河床冲淤模型效率系数分别为 0.70~0.96(极好)、0.50~0.57(非常好)、0.90(极好), 整体而言模型计算误差在可接受范围内, 可用于建闸河口整治工程与河床演变特征研究。

3 结果分析

双龙河口挡潮闸闸下引河从长度上属短引河, 潮流为其控制性动力。在整治工程前, 河道滩槽分明, 平面形态不但受主槽落潮流控制, 也受滩面归槽水影响。整治工程后, 工程河段水流不受滩面的束缚, 河道水流和冲淤发生改变。为探究整治工程对闸下水动力调整和河床演变的影响, 运用已经验证的

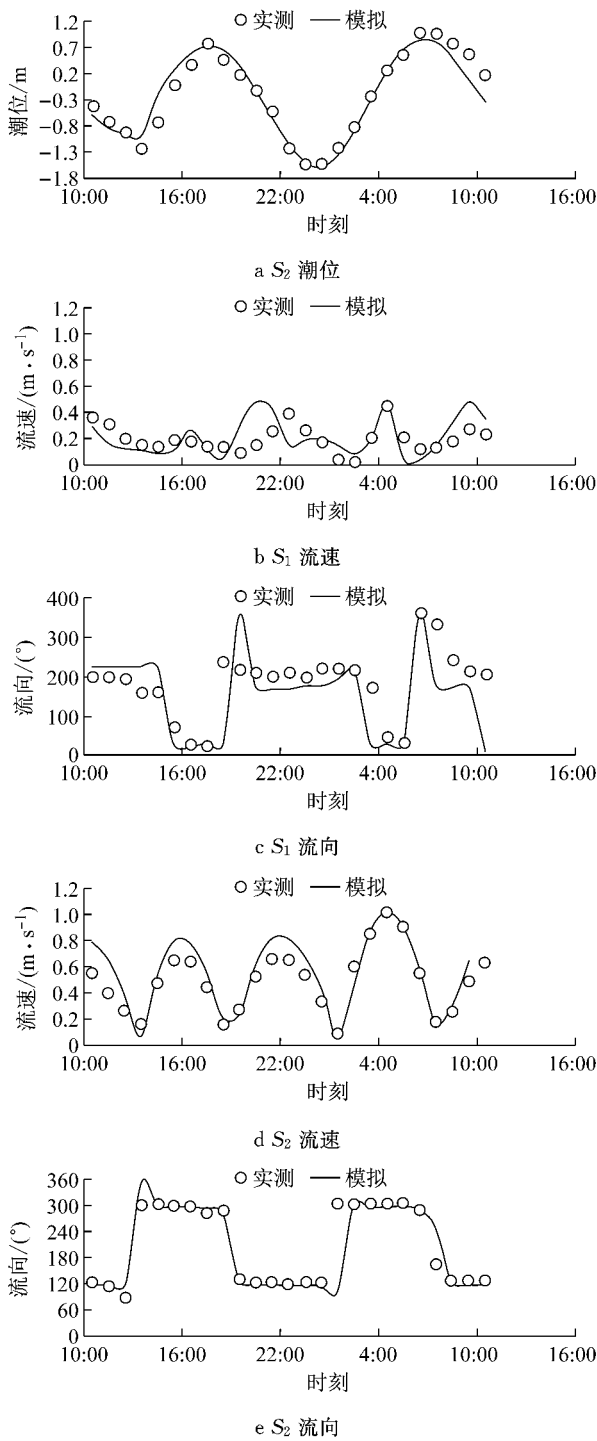


图 3 潮位、流速及流向过程验证
 Fig.3 Verification of tidal level, flow velocity magnitude and direction

合理的数学模型计算分析整治工程前后闸下河道的潮流变化和河床演变特征。工程后岸线采用一期、二期工程后形成的新岸线,修改工程河段地形以反映河道清淤效果,工程后河道横截面方向网格数略有调整,约为 15 个,其他计算参数与模型验证时相同。

3.1 潮流响应分析

地形岸线变化直接改变河道水流流态,图 6 为 3

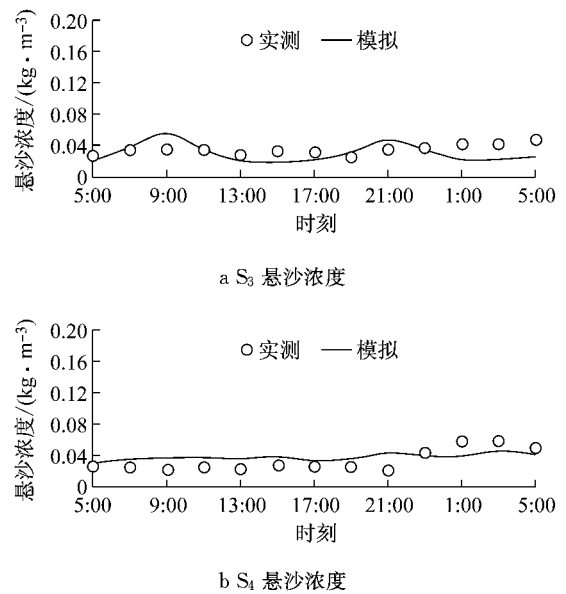


图 4 悬沙浓度验证

Fig.4 Verification of suspended sediment concentration

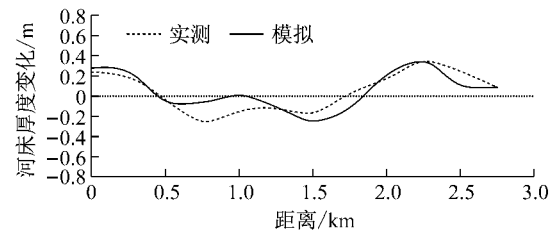


图 5 河床年冲淤验证

Fig.5 Verification of morphological evolution in one year

种工况下双龙河口典型时刻流场。2011 年工程前水流主要流经河道主槽,总体表现为顺岸往复流,涨潮流向西北,落潮流向东南,主槽涨急流速大于落急流速。一期工程后,未整治河段流态并未发生较大改变,主流向仍保持与主槽走向一致,而工程河段由于断面单一、规整,涨急和落急时刻水流变得比较平顺。涨急时刻,潮流从外海进入河道,由于整治工程河道纳潮量增加,水流以较大流速从下段河道主槽流向上段宽阔工程河道,在地形突然陡降展宽的区域,水流呈喷射状涌入整治河段并在河道右岸产生逆时针回流。之后主流继续向闸下推进,虽然流态平顺,但流速因边滩大量清除、过水断面增加,流速发生大幅度降低。落急时刻,工程河段较弱的水流经河槽汇水进入下游河段,汇水段主槽形成高流速区。河道弯段凸岸有浅滩分布,主流在凹岸一侧更为集中,水流经弯段转向后,受河槽束水作用主槽流速增大,断面流态紊乱。二期工程后,虽涨急流速仍大于落潮流速,但河道流态十分规整,从河口至闸下自然过渡。

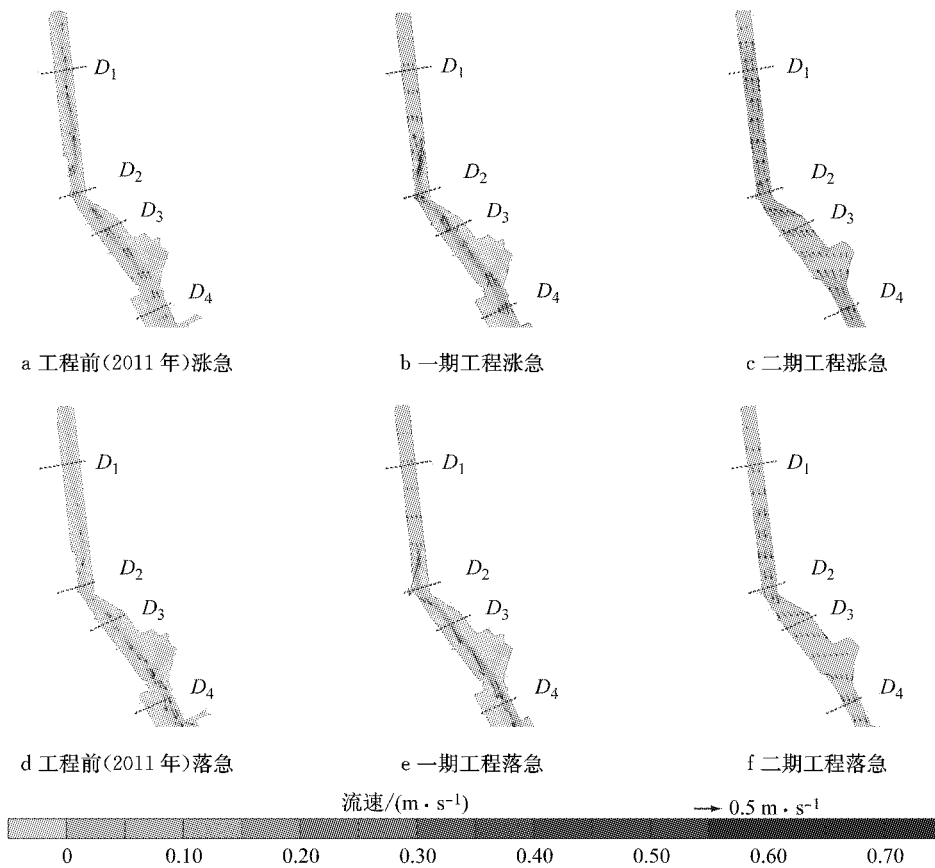


图 6 3 种工况下涨急和落急时刻的流场分布

Fig.6 Maximum flood and ebb current fields in three engineering scenarios

潮流涨落潮过程中的时均流速是衡量潮流强度的重要特征,也是影响泥沙输运的主要因素,它是潮差、潮周期和下垫面条件的综合反映.表 1 和表 2 分别显示了工程前后河道各断面的特征流速及其变化率,表中 V 和 V_{max} 分别为平均流速和最大流速, V_1 和 V_2 分别为涨潮和落潮平均流速, α 为涨潮与落潮平均流速的比值, P_1 和 P_2 分别为一期工程和二期工程后(与工程前相比)各特征流速的变化率.结合图 6 可以看出:一期工程后,受河道浚深拓宽影响,

工程河段内的 D_1 断面平均流速减小 60.0%,但因工程河段地形平整、水深增加,潮波传播过程中耗能减小,造成断面涨落潮平均流速比由 3.90 增至 5.00.工程下游河段断面平均流速增长 46.7%~76.1%,断面涨落潮平均流速比由一期工程前的 1.26~5.70 减至 0.87~3.01.这是受纳潮量增加和边滩综合影响导致的非工程河段涨落潮流速不对称程度减缓.二期工程后,整个河口地形按固定坡降均匀变化,河口纳潮量得到显著增加,在地形变化和纳

表 1 3 种工况下河道各断面特征流速

Tab.1 The tidal current velocity in different cross-sections in three engineering scenarios

| 断面 | 工况 | $V/(m \cdot s^{-1})$ | $V_{max}/(m \cdot s^{-1})$ | $V_1/(m \cdot s^{-1})$ | $V_2/(m \cdot s^{-1})$ | α |
|-------|------------|----------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|----------|
| D_1 | 工程前(2011年) | 0.095 | 0.317 | 0.163 | 0.041 | 3.90 |
| | 一期工程后 | 0.038 | 0.102 | 0.070 | 0.014 | 5.00 |
| | 二期工程后 | 0.167 | 0.418 | 0.193 | 0.152 | 1.27 |
| D_2 | 工程前(2011年) | 0.071 | 0.259 | 0.136 | 0.024 | 5.70 |
| | 一期工程后 | 0.125 | 0.296 | 0.208 | 0.069 | 3.01 |
| | 二期工程后 | 0.260 | 0.567 | 0.308 | 0.231 | 1.33 |
| D_3 | 工程前(2011年) | 0.135 | 0.314 | 0.181 | 0.099 | 1.82 |
| | 一期工程后 | 0.198 | 0.393 | 0.265 | 0.153 | 1.73 |
| | 二期工程后 | 0.131 | 0.273 | 0.150 | 0.120 | 1.25 |
| D_4 | 工程前(2011年) | 0.159 | 0.415 | 0.184 | 0.146 | 1.26 |
| | 一期工程后 | 0.266 | 0.572 | 0.243 | 0.280 | 0.87 |
| | 二期工程后 | 0.233 | 0.462 | 0.249 | 0.221 | 1.13 |

表 2 工程后特征流速变化率

Tab.2 The change ratios of tidal current velocity after two engineering scenarios

| 断面 | $P_1/\%$ | | | $P_2/\%$ | | |
|-------|----------|-------|-------|----------|-------|-------|
| | V | V_1 | V_2 | V | V_1 | V_2 |
| D_1 | -60.0 | -57.1 | -65.9 | 75.8 | 18.4 | 270.7 |
| D_2 | 76.1 | 52.9 | 187.5 | 266.2 | 126.5 | 862.5 |
| D_3 | 46.7 | 46.4 | 54.5 | -3.0 | -17.1 | 21.2 |
| D_4 | 67.3 | 32.1 | 91.8 | 46.5 | 35.3 | 51.4 |

潮量增加的双重作用下,河道除拓宽段(D_3 断面)外平均流速均有较大的提升,特别落潮流速增长幅度较大,使得涨落潮流速差距明显减小,涨落潮平均流速比值维持在 1.13~1.27. 其中位于河道弯段的 D_2 断面落潮流速较工程前可增加 862.5%,涨落潮平均流速比值由工程前的 5.70 降至 1.33,流速增加及涨落潮流速不对称性锐减可有效降低该段淤积强度,有利于维持通航水深. 综合以上分析,一期工程造成工程段涨落潮流速不对称性加剧,易导致该段输沙不平衡增强,而二期工程后河道纳潮量显著增加,涨落潮流速不对称性减小,输沙不平衡程度减小.

3.2 河床冲淤演变趋势

3 种工况下河道各段河床比降和断面变化较大,潮流受地形控导作用,挟沙能力在不同工况及同工况不同河段间存在差异,冲淤结果不一(图 7). 工程前,河口段受外海潮流动力影响和主槽束水作用,较强的潮流冲刷河槽. 而在局部河道断面增大的河道弯段,由于断面涨落潮流速小于其上、下游河段,潮流挟沙能力显著降低,泥沙纷纷落淤,呈现出大面积淤积态势. 海相泥沙可被涨潮流带至闸下,但落潮时流速极小且历时较长,致使淤积主要发生在主槽内,闸趾处最大淤积厚度为 0.65 m. 一期工程后,由于上段河道浚深拓宽,纳潮量增大,受主槽束缚的下游水流冲刷能力和挟沙能力增强,继续冲刷下游滩槽型河段,而上段河道断面浚深拓宽后断面流速减小,挟沙能力骤减,涨潮时大量泥沙淤积在此且微弱的落潮流不能将泥沙带出工程段,造成工程段回淤强烈,年淤积厚度为 0.10~0.65 m. 整个河口工程河段与非工程河段出现相反的冲淤态势,全河冲淤相抵后净淤积量为 $3.4 \times 10^3 \text{ m}^3$. 二期工程后,口门段仍为强动力区,潮流冲刷河床(最大年冲刷厚度 0.6 m),泥沙随涨潮流进入拓宽段,但该段断面流速减小,挟沙能力降低,部分泥沙在拓宽段落淤. 潮流绕过弯段时,受凸岸挑流作用,局部流速增大,冲刷凸岸,冲刷的泥沙被潮流带至闸下,且相对较小的落潮流不能将落淤的泥沙再次扬起带出河道,导致闸趾处淤积厚度达 0.6 m. 虽然二期工程后,下段河道疏

浚,输水输沙量增加,年河道淤积总量为 $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3$,但由于河床坡降均匀一致,水深增加,冲淤分布较均匀.

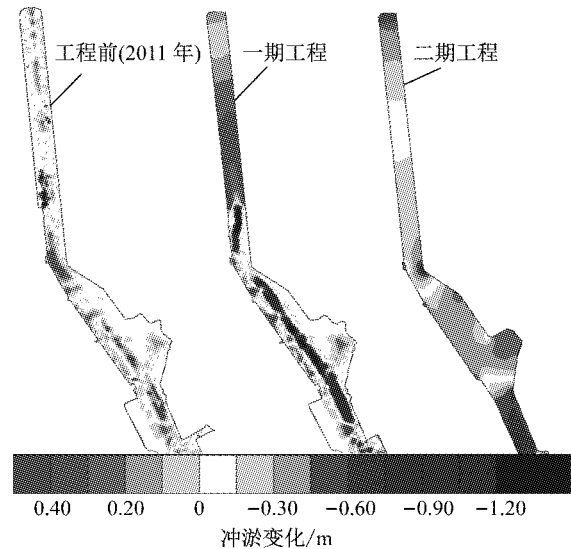


图 7 3 种工况下河床年冲淤分布

Fig. 7 One year riverbed erosion and sediment deposition in the channel in three engineering scenarios

3.3 开闸放水冲淤效果

对于建闸河口,河道淤积是其必然结果,为了维护整治河道的通航能力,通常采用开闸放水的方式进行主动冲刷,因此开闸放水的冲刷效果也是评价工程优劣的标准. 考虑到双龙河口的泄流能力,分别以 40%,20%和 10% 3 种不同频率丰水年设计流量 $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $173 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $271 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 为特征流量,对一期工程、二期工程后每年放水 7d 的年河床冲淤演变进行模拟. 从图 8、图 9、图 10 可以看出,随着上游开闸流量的增大,河道年淤积面积和淤积厚度逐渐减小,但沿程冲刷趋势 2 种工况存在明显差异. 一期工程后,由于下游河道并未整治,过流断面相对较小,使得整治河段被冲起的泥沙并不能被带出河道,工程段放水冲淤效果不明显. 在 $271 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的流量下闸趾处的冲刷厚度仅为 0.30 m,而对于 0.40~1.45 km 的严重淤积河段,最大冲刷厚度不超过 0.12 m,因此工程段仍需采用疏浚措施对其清淤. 在未整治的河口段,水流主要集中在深泓处,流速较大且集中,开闸放水后,深泓处流速增大较快,造成该河段冲刷严重. 二期工程后,开闸放水冲刷效果在近闸段(距闸趾 0~700 m)冲刷程度最大,而在拓宽段(距闸趾 2 500~3 300 m)冲刷效果最差. 在 $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 流量下闸趾处和拓宽段仍存在淤积,但

随流量增至 $173 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 和增至 $271 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,除拓宽段仍存在少量淤积外,其余河段均呈冲刷态势。

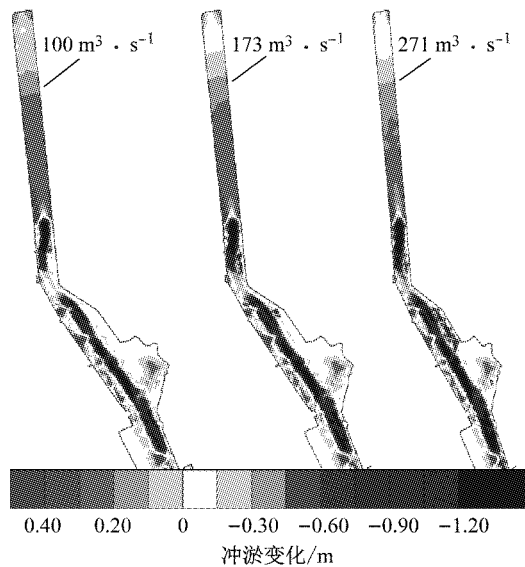


图 8 一期工程后特征流量开闸放水情况下双龙河口年冲淤分布

Fig. 8 One year riverbed erosion and sediment deposition in the estuary with three designed discharges after the first-phase project

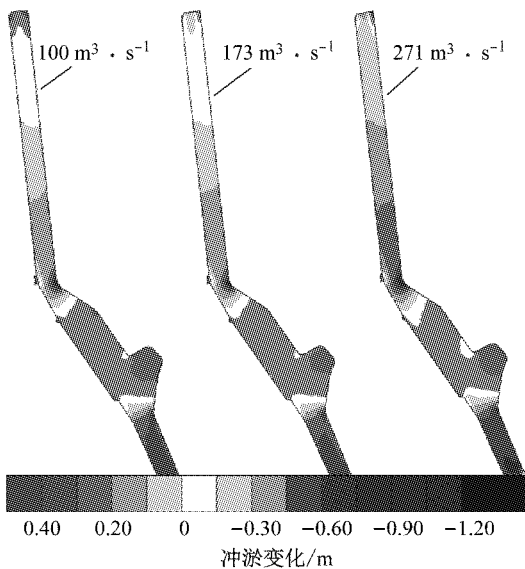


图 9 二期工程后特征流量开闸放水情况下双龙河口年冲淤分布

Fig. 9 One year riverbed erosion and sediment deposition in the estuary with three designed discharges after the second-phase project

从模拟结果可见,闸下河道整治后的冲淤分布与纳潮量增加、局部浚深拓宽密切联系。河道整治导致的纳潮量增加在工程初期会引起中下段的冲刷,而局部河段的拓宽和浚深会使该段产生淤积。一期

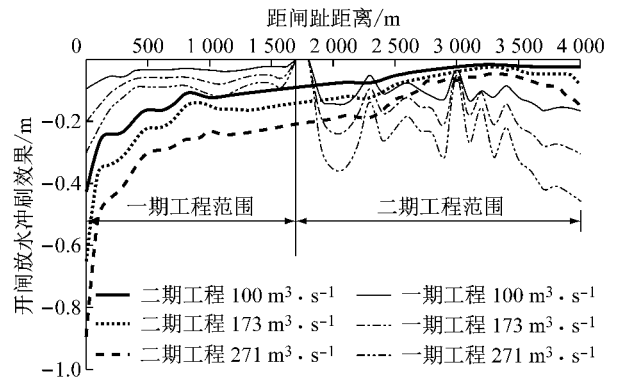


图 10 不同流量下开闸放水冲刷效果沿程变化

Fig. 10 Scouring effect along the channel with three designed discharges in two project scenarios

工程段和二期工程的拓宽段都相对宽阔,产生了淤积且开闸放水减淤效果不明显。水流进入拓宽河道时,过水断面扩大,导致河道流速减小,挟沙能力降低而使泥沙纷纷落淤。若遇坡降不均或水深突然增加(如一期工程),在河道突然展宽区域很可能形成由水流横向流速梯度引起的回流(如图 6b),并造成主流流速不对称性加剧,泥沙在回流区与主流交界带严重淤积。虽然在无径流的建闸河口河道淤积不可避免,但为延长工程寿命,在闸下整治时应尽量对整条河道进行整治并使河床坡降均匀一致,避免河道突然展宽。不宜采用河道局部浚深拓宽的整治方案,避免加重水流流速不对称性和回流发生。同时可辅以定期开闸放水和局部清淤等措施维护河道生态环境。

4 结论

基于 MIKE 21 建立和验证的双龙河口潮流、泥沙运输及河床演变模型,通过对双龙河口整治一期工程和二期工程后的水动力和河床演变进行模拟分析,得到以下结论:

(1) 建闸河口水动力主要受地形的控导作用和纳潮量改变的影响。河道局部整治(一期工程)增加纳潮量并改善非工程段涨落潮不平衡状况;而工程段由于浚深拓宽,涨落潮不对称加剧,局部产生回流区。全河口整治(二期工程)后,河道坡降均匀,纳潮量显著增加,涨落潮流速增加且不对称性减小。

(2) 工程后,水动力改变使河道内冲淤趋势发生调整。上段河道局部整治时,工程段因浚深拓宽流速大大降低,发生强烈淤积,非工程河段因水流冲刷能力增强而发生冲刷。下段河道疏浚后,口门段增大的流速冲刷河床并将泥沙送至上段河道,使拓宽段

和闸趾处发生淤积。

(3) 开闸放水冲刷效果随工程方案和流量不同存在差异。上段河道局部整治时,由于其下游过流断面相对较小,使得被冲起的大部分泥沙不能被带出河道,整治段放水冲刷效果并不明显。全河整治后,冲刷范围随开闸放水流量增大而不断下移,但高效冲刷范围主要集中在距闸趾 0~700 m 处。

(4) 整治工程中相对宽阔的河段易产生淤积且开闸放水冲刷效果较弱。因此,在闸下整治时应尽量对整条河道进行整治并使河床坡降均匀一致,避免河道突然展宽,不宜采用河道局部挖深拓宽,以免加重水流流速不对称性和造成回流,同时可辅以定期开闸放水和局部清淤等措施维护河道水深。

参考文献:

- [1] 黄建维,张金善. 我国河口挡潮闸下淤积综合治理技术[J]. 泥沙研究, 2004(3):46.
HUANG Jianwei, ZHANG Jinshan. Regulation techniques of sediment siltation downstream tidal barriers in China [J]. Journal of Sediment Research, 2004(3):46.
- [2] 金元欢,沈焕庭. 我国建闸河口冲淤特性[J]. 泥沙研究, 1991(4):59.
JIN Yuanhuan, SHEN Huanting. Characteristics of erosion and siltation downstream estuarine floodgates [J]. Journal of Sediment Research, 1991(4):59.
- [3] 徐雪松,窦希萍,陈星,等. 建闸河口闸下淤积问题研究综述[J]. 水运工程, 2012,462(1):116.
XU Xuesong, DOU Xiping, CHEN Xing, et al. Overview of siltation downstream estuarine floodgates [J]. Port & Waterway Engineering, 2012,462(1):116.
- [4] 潘存鸿,卢祥兴,韩海骞,等. 潮汐河口支流建闸闸下淤积研究[J]. 海洋工程, 2006,24(2):38.
PAN Cunhong, LU Xiangxing, HAN Haiqian, et al. Siltation features in area downstream of tributary barrage in tidal estuary [J]. The Ocean Engineering, 2006,24(2):38.
- [5] GEORGE D A, GELFENBAUM G, STEVENS A W. Modeling the hydrodynamic and morphologic response of an estuary restoration [J]. Estuaries and Coasts, 2012, 35(6):1510.
- [6] 刘杰,程海峰,赵德招. 长江口 12.5m 深水航道回淤特征 [J]. 水科学进展, 2014,25(3):358.
LIU Jie, CHENG Haifeng, ZHAO Dezhaoh. Siltation characteristics of the 12.5 m deepwater navigation channel in Yangtze estuary [J]. Advances in Water Science, 2014,25(3):358.
- [7] WINTERWERP J C, WANG Z B. Man-induced regime shifts in small estuaries—I: theory[J]. Ocean Dynamics, 2013, 63(11/12): 1279.
- [8] WINTERWERP J C, WANG Z B, VAN BRAECKEL A, et al. Man-induced regime shifts in small estuaries—II: A comparison of rivers[J]. Ocean Dynamics, 2013, 63(11/12):1293.
- [9] VAN MAREN D S, VAN KESSEL T, CRONIN K, et al. The impact of channel deepening and dredging on estuarine sediment concentration[J]. Continental Shelf Research, 2015, 95(3):1.
- [10] 刘杰,徐志杨,赵德招,等. 长江口深水航道(一、二期工程)回淤变化[J]. 泥沙研究, 2009(2):22.
LIU Jie, XU Zhiyang, ZHAO Dezhaoh, et al. Change of resiltation in the Yangtze Estuary deepwater channel during 1st and 2nd stages [J]. Journal of Sediment Research, 2009(2):22.
- [11] 李大鸣,范玉,陈海舟. 河口闸下水动力与泥沙清淤问题的研究[J]. 天津大学学报, 2005,38(9):817.
LI Daming, FAN Yu, CHEN Haizhou. Hydrodynamic force and sediment disposal down floodgate near estuary [J]. Journal of Tianjin University, 2005,38(9):817.
- [12] 张胜利. 永定新河清淤问题研究[D]. 天津:天津大学,2004.
ZHANG Shengli. The study on desilting problem of Yongdingxinhe River [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.
- [13] 董琳. 海河口清淤整治工程方案的模拟分析[D]. 天津:天津大学,2007.
DONG Lin. Research on disposing aggradations plan for Haihe River Estuary [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [14] 韩清波. 独流减河口泥沙数学模型研究及应用[D]. 天津:天津大学,2004.
HAN Qingbo. The research and application of mathematical sedimentation model for Duliujianhe River Estuary [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.
- [15] 曲红玲,窦希萍,赵晓冬,等. 不同类型建闸河口闸下淤积模拟计算[J]. 海洋工程, 2011, 29(2):59.
QU Hongling, DOU Xiping, ZHAO Xiaodong, et al. Simulation of siltation downstream of floodgate in estuaries [J]. The Ocean Engineering, 2011,29(2):59.
- [16] 袁洪峰. 滦南县水利志[M]. 唐山:河北人民出版社, 1991.
YUAN Hongfeng. Water resources yearbook [M]. Tangshan: Hebei People's Publishing House, 1991.
- [17] Danish Hydraulic Institute (DHI). MIKE21 & MIKE3 flow model hydrodynamic and transport module scientific documentation [CD]. Copenhagen: DHI Water & Environment, 2013.
- [18] 崔冬,刘新成,俞相成. 泥沙数学模型在围填海工程促淤效果预报中的适用性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015,43(1):78.
CUI Dong, LIU Xincheng, YU Xiangcheng. Applicability of sediment numerical model to prediction of effect of reclamation project on accelerating sediment deposition [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2015,43(1):78.
- [19] 匡翠萍,冒小丹,顾杰,等. 海域水动力对老虎石海滩养护响应关系分析[J]. 同济大学学报(自然科学版). 2014,42(5):681.
KUANG Cuiping, MAO Xiaodan, GU Jie, et al. Analysis of hydrodynamic response to beach nourishment at Tiger-Rock Beach [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014,42(5):681.
- [20] 唐存本. 泥沙起动规律[J]. 水利学报, 1963,1(2):1.
TANG Cunben. The law of sediment starting [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1963,1(2):1.
- [21] Willmott C J. On the validation of models [J]. Physical Geography, 1981,2(2):184.