



天港码头遗留群桩水沙动力数值模拟研究

赵丽萍¹, 史占红², 周 煜³, 郭 涛¹

(1. 华设设计集团股份有限公司, 江苏南京 210014; 2. 水利部南京水利水文自动化研究所, 江苏南京 210012;
3. 南京市水利规划设计院股份有限公司, 江苏南京 210014)

摘要: 针对长江福姜沙水道因深水航道工程引发的区域滩槽格局与水沙条件变化, 及其对既有水工建筑物河床稳定性的影响, 以靖江市天港码头遗留桩基为对象, 构建利港—天生港河段二维潮流泥沙数学模型, 预测该河床的冲淤变化趋势。研究表明: 1) 平常水沙年, 码头所在浅滩区域及其上下游 200 m 范围内淤积为主, 上游侧呈冲刷态势, 下游侧浅滩区微淤, 离岸约 300 m 处有条状淤积带; 2) 丰水年水沙条件下, 码头所在近岸区浅滩冲刷范围及幅度比平常水沙年大, 但码头前沿 100 m 范围内仍主要呈淤积态势。研究涉及的建模技术可为类似码头遗留群桩数值模拟提供参考, 研究成果可为类似码头的改扩建工程桩群处理方案提供科学支撑。

关键词: 遗留群桩; 数值模拟; 水沙动力; 冲淤预测

中图分类号: U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)12-0088-09

Numerical simulation on hydro-sediment dynamic of residual pile groups at Tian Gang Wharf

ZHAO Liping¹, SHI Zhanhong², ZHOU Yu³, GUO Tao¹

(1. China Design Group, Nanjing 210014, China;
2. Nanjing Research Institute of Hydrology and Water Conservation Automation, Ministry of Water Resources, Nanjing 210012, China;
3. Nanjing Water Planning and Designing Institute Co., Ltd., Nanjing 210014, China)

Abstract: Regarding the potential threats to the stability of riverbeds of existing hydraulic structures caused by changes in the regional topography and sediment conditions in the Fujiangsha Waterway of the Yangtze River due to the deepwater channel project, especially local scouring risks from historical pile foundations. This study focuses on the residual pile groups at Tian Gang Wharf. A two-dimensional hydro-sediment model for the Ligang – Tianshenggang river reach is developed to predict the trend of riverbed erosion and deposition. The research results show that: 1) In normal sediment-water years, sedimentation dominates in the shoal area near the wharf and within 200 m upstream and downstream, the upstream side experiences erosion, the downstream shoal area shows slight sedimentation, and a strip-shaped sedimentation zone appears about 300 m offshore. 2) In high-flow years, scouring in the nearshore shoal area is more extensive than in normal hydro-sediment years, but sedimentation still primarily occurs within 100 m of the wharf front. The modeling technique involved in this study can provide references for numerical simulations of residual pile groups at similar wharves, and the research results can provide scientific support for pile groups treatment plan in renovation and expansion projects of similar wharves.

Keywords: residual pile groups; numerical simulation; hydro-sediment dynamics; erosion and deposition prediction

福姜沙水道作为长江口潮汐动力-径流输运耦合作用的关键过渡带, 其滩槽动力地貌系统具有显

著的双向非对称特征, 加之长南京以下 12.5 m 深水航道二期工程的实施, 区域滩槽格局和水沙

条件发生显著变化, 滩槽地形持续动态调整, 对该河段内既有水工建筑物的河床稳定性构成潜在威胁, 尤以遗留桩基结构引发的局部冲刷风险最为突出。

近年来, 作为长江南京以下 12.5 m 深水航道关键整治区域, 福姜沙水道滩槽演变机制研究已形成多学科融合的研究范式^[1-4]。特别在桩群-水流-泥沙多相耦合研究领域, 刘贵阳等^[5]采用两相流模型 SedFOAM 模拟 2×2 群桩冲刷, 揭示桩群纵向冲刷的时空异质性特征, 上游桩冲刷深度更大且达到平衡时间较晚, 下游桩受上游尾涡影响显著; 黄本胜等^[6]通过三维 $k-\varepsilon$ 紊流模型与物理实验的交叉验证, 表明桩群对过水断面产生“束窄”效应, 导致桩群外流速增大, 内部存在低速区。然而, 既有研究多聚焦新建桩基的瞬态冲刷过程, 对历

史遗留桩基在滩槽动态调整中的长期稳定性演化机制仍缺乏系统性认知。本文研究以天港码头遗留桩基(1990 年建设, 2020 年上部结构拆除, 与滩面平齐)为研究对象, 构建利港—天生港河段二维潮流泥沙数学模型, 预测码头前沿地形冲淤变化趋势, 并关注水下桩基露滩的可能性, 为天港码头后续桩群处理方案提供科学支撑。

1 工程河段概况

福姜沙水道位于长江下游澄通河段, 是长江南京至太仓河段唯一的三槽通航水道。福姜沙水道于 2015 年 6 月—2018 年 4 月开展了深水航道二期工程建设, 在福中、福北水道实施了多处整治工程, 见图 1, 使河道边界条件有所变化, 从而对河道的冲淤环境产生影响。

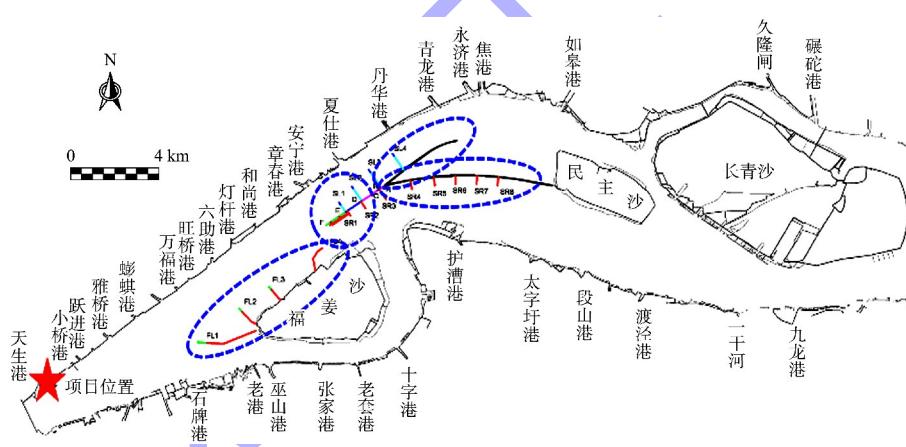


图 1 整治工程位置
Fig. 1 Location of renovation project

2 工程河段河势演变特点

2.1 工程河段及码头前沿平面冲淤变化

深水航道二期工程实施以来, 工程河段地形冲淤变化较大的区域主要集中于江阴进口段、福左水道、双涧沙头部、福北水道部分区段与福姜沙左缘, 福南水道整体保持稳定、冲淤变化相对较小。

工程河段在 2015 年 8 月—2016 年 8 月(长江南京以下 12.5 m 水深航道二期工程初通前)河势演变特征主要表现为: 十圩港—天生港中间深槽呈冲刷态势, 形成显著冲刷带, 见图 2a), 最大冲

深可达 15 m; 十圩港—天生港边滩呈现微淤态势, 淤积强度约 1 m。天港码头前沿所在浅滩区域除局部呈微冲态势外, 整体呈淤积态势, 淤积幅度为 0.5~0.8 m; 码头前沿 350~700 m 深水区冲刷明显。

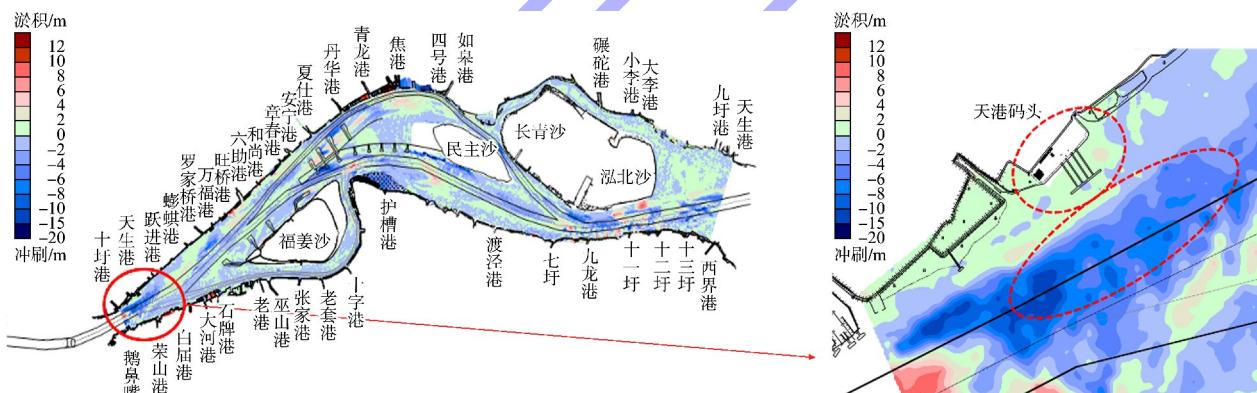
工程河段在 2016 年 8 月—2017 年 8 月(长江南京以下 12.5 m 水深航道二期工程初通)河势演变特征主要表现为: 十圩港—天生港段总体呈现淤积态势, 见图 2b), 淤积强度约 1~7 m; 天生港—蟛蜞港中间深槽北侧呈冲刷态势, 最大冲深

可达 10 m, 两侧边滩及深槽南侧均呈冲淤交替态势, 冲淤强度均在 2 m 左右。天港码头前沿所在浅滩主要呈现微冲态势, 冲刷强度为 0.6~0.8 m; 码头前沿区域 180 m 宽度范围呈淤积态势, 淤强约 0.6~1.5 m; 码头前沿区域 410~700 m 范围呈冲刷态势。

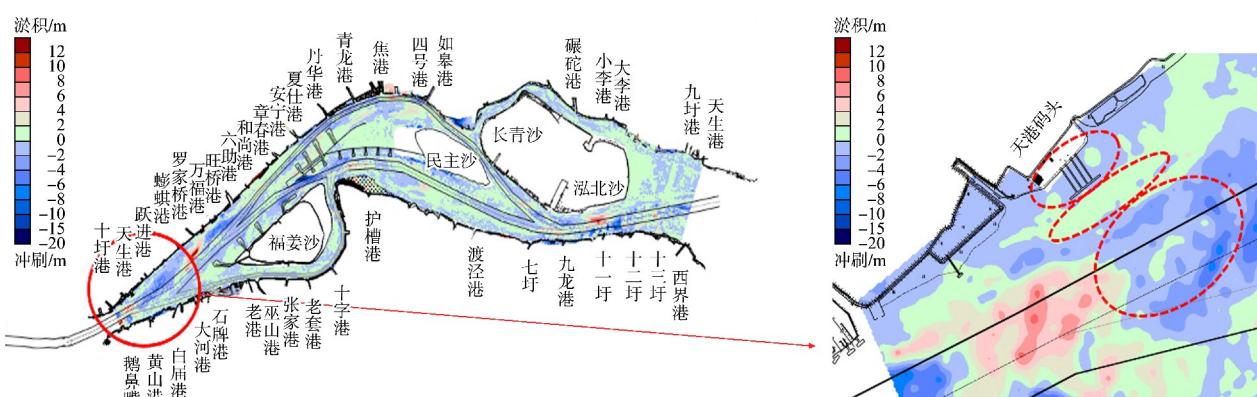
工程河段在 2017 年 8 月—2018 年 8 月(长江南京以下 12.5 m 深水航道二期工程初通)河势演变特征主要表现为: 十圩港—跃进港中间水道总体呈冲刷态势, 见 2c), 最大冲深可达 10 m; 中间水道北侧有明显淤积带, 淤积强度约为 0.5~5.0 m; 水道深槽南侧总体呈现微淤态势, 淤积强度约 0.5~3.0 m。天港码头桩基所在浅滩主要呈现淤积态势, 淤积幅度在 0.01~0.15 m; 码头前沿 250 m 宽度范围内微冲, 冲刷幅度 0.4~0.8 m; 码头前沿 250~470 m 范围淤积较为明显, 淤积强度最大可达 4.0 m。

工程河段在 2018 年 8 月—2019 年 2 月(长江南京以下 12.5 m 深水航道二期工程整治建筑物完成)河势演变特征主要表现为: 总体呈现冲淤交替分布, 局部区域冲淤强度较大, 见图 2d), 大部分区域冲淤强度在-2~2 m 之间。天港码头周边浅滩呈微冲微淤、冲淤交替态势, 其中桩基平台及码头前沿 220 m 范围内主要呈微冲态势, 冲深幅度约 0.3~0.5 m; 码头前沿 320 m 范围区域呈条状淤积态势, 淤积幅度 0.5~0.8 m。

工程河段在 2019 年 2 月—2021 年 1 月(长江南京以下 12.5 m 深水航道二期工程整治建筑物完成后)河势演变特征主要表现为: 十圩港至蟛蜞港整体呈淤积态势, 局部有较为明显的冲刷带, 见图 2e)。天港码头周边区域主要呈现淤积态势, 淤积宽度范围由陆域至码头前沿约 160 m, 淤积强度 0.5~1.5 m; 码头前沿 160~470 m 范围区域呈条状冲刷态势, 局部最大冲深可达 6 m。



a) 2015年8月—2016年8月



b) 2016年8月—2017年8月

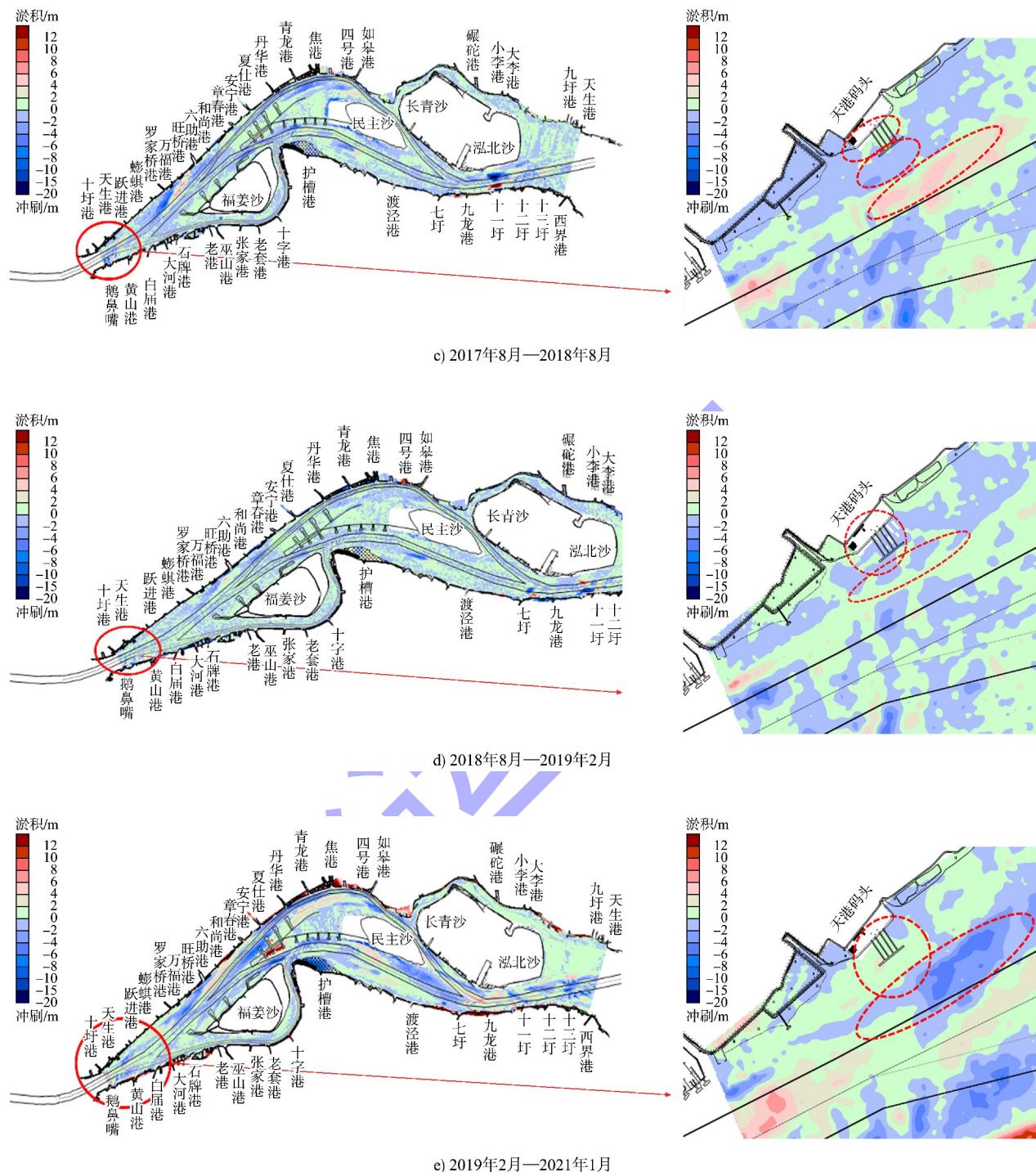


图 2 工程河段及天港码头前沿平面冲淤变化

Fig. 2 Planar changes in erosion and deposition in project reach and front of Tian Gang Wharf

2.2 码头前沿断面冲淤变化

在码头区域及其上下游 500 m 范围内选取 6 个断面, 见图 3, 每个断面宽约 400 m。对 2015—2021 年码头周边浅滩区域断面冲淤特征进

行分析, 逐年演变趋势见图 4。结果表明: 码头所在浅滩区域及其上游浅滩主要呈现淤积态势, 年均淤积幅度约 0.5 m; 码头下游浅滩主要呈现冲淤交替、微冲为主的态势。

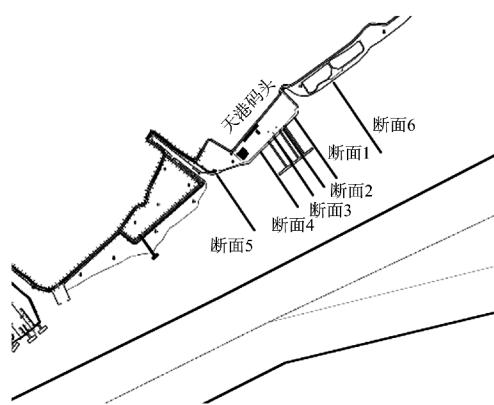


图 3 断面位置
Fig. 3 Cross-section position

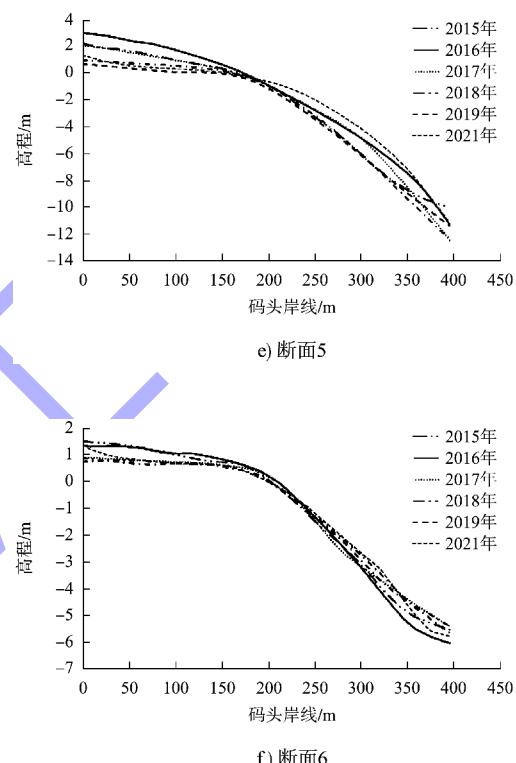
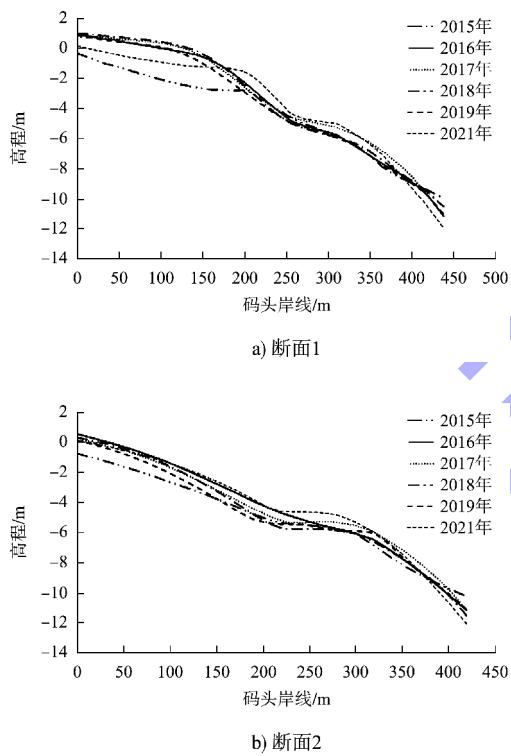
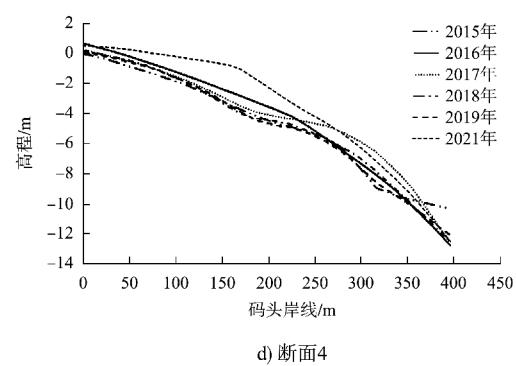


图 4 天港码头前沿断面 1~6 逐年演变趋势
Fig. 4 Evolution trend of cross-section 1~6 at Tian Gang Wharf over the years

3 数学模型的建立与验证

3.1 模型建立

3.1.1 二维水流运动控制方程

基于三维不可压缩雷诺平均 Navier-Stokes 浅水方程建立水动力模型, 对连续方程和动量方程在 $h=\eta+d$ 范围内进行积分后可得到下列二维深度平均浅水方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} = hS \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}u)}{\partial y} &= f\bar{v}h - gh \frac{\partial\eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial\rho}{\partial x} + \\ \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_s S \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}v)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}^2)}{\partial y} &= -f\bar{u}h - gh \frac{\partial\eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial\rho}{\partial y} + \\ \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S \end{aligned} \quad (3)$$

式中: t 为时间; η 为潮面高程; d 为静水深度; $h=\eta+d$ 为总水深; \bar{u} 、 \bar{v} 分别为平均深度沿 x 、 y 方向的速度分量, 可按 $h\bar{u}=\int_{-d}^{\eta} u dz$, $h\bar{v}=\int_{-d}^{\eta} v dz$ 计算; S 为源汇项; f 为科氏力系数 ($f=2\Omega\sin\varphi$, Ω 为地球自转角速度, φ 为地理纬度); g 为重力加速度; p_a 为当地大气压; ρ_0 为基准水密度; ρ 为水密度; s_{xx} 、 s_{xy} 、 s_{yx} 、 s_{yy} 为辐射应力张量分量; u_s 、 v_s 分别为源项排水量沿 x 、 y 向速度分量; T_{ij} 为水质点侧向应力, 包括黏滞摩擦力、紊流摩擦力、对流力等, 在模型中采用涡旋黏滞系数, 根据垂向平均流速梯度场对上述几种力进行总和估计, 可按式(4)计算; τ_{sx} 、 τ_{sy} 分别为水面风摩阻沿 x 、 y 方向分量; τ_{bx} 、 τ_{by} 分别为水底摩阻沿 x 、 y 方向分量, 可按式(5)确定。

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

$$\begin{cases} \boldsymbol{\tau}_b = (\tau_{bx}, \tau_{by}) \\ \frac{\boldsymbol{\tau}_b}{\rho_0} = c_f \mathbf{u}_b |\mathbf{u}_b| \\ c_f = g / (Mh^{1/6})^2 \\ M = 25.4/k_s^{1/6} \end{cases} \quad (5)$$

式中: A 为水平涡动黏滞力系数; k_s 为糙率高度; c_f 为拖曳力; M 为曼宁系数。

3.1.2 二维泥沙输运控制方程

1) 悬沙不平衡输运方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hC_k)}{\partial t} + \frac{\partial(uhC_k)}{\partial x} + \frac{\partial(vhC_k)}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_s h \frac{\partial C_k}{\partial x} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_s h \frac{\partial C_k}{\partial y} \right) + E_{bk} - D_{bk} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: C_k 为泥沙浓度; ε_s 为泥沙扩散系数; h 为水深; E_{bk} 、 D_{bk} 为床沙与悬沙交界面处的泥沙侵蚀、淤积通量, 引入冲淤平衡时的挟沙能力 C_{*k} , $E_{bk} - D_{bk} = \alpha \omega_{sk} (C_{*k} - C_k)$, ω_{sk} 为泥沙沉速, α 为垂线恢复饱和系数, 取值范围为 0.25~1.0, 强冲刷时 $\alpha=1$, 强淤积时 $\alpha=0.25$; 下标 k 表示非均匀沙分组情况。

2) 推移质不平衡输运方程:

$$\frac{\partial(\delta\bar{c}_{bk})}{\partial t} + \frac{\partial q_{b_{kx}}}{\partial x} + \frac{\partial q_{b_{ky}}}{\partial y} + \frac{1}{L_b} (q_{bk} - q_{b_{*k}}) = 0 \quad (7)$$

式中: δ 为床沙层厚度, 一般 $\delta=2d$, d 为泥沙粒径; \bar{c}_{bk} 为床沙层泥沙平均浓度; $q_{b_{kx}}$ 、 $q_{b_{ky}}$ 分别为 x 、 y 方向的推移质输沙率, q_{bk} 为总输沙率, $q_{b_{*k}}$ 为推移质输沙能力; L_b 为推移质自适应长度。

3.1.3 河床变形方程

1) 由悬移质冲淤引起的河床变形:

$$(1-p') \frac{\partial z_{bk}}{\partial t} = \alpha \omega_{sk} (C_k - C_{*k}) \quad (8)$$

式中: p' 为孔隙率; z_{bk} 为第 k 组粒径悬移质泥沙引起的冲淤厚度。

2) 由推移质冲淤引起的河床变形

$$(1-p') \frac{\partial z_{bk}}{\partial t} = \frac{1}{L_b} (q_{bk} - q_{b_{*k}}) \quad (9)$$

模型采用非结构化三角形网格, 在岸边界和工程结构物附近采用非等距三角形网格进行单元划分, 数值方法采用有限体积法, 采用非结构化三角形网格将计算区域划分为不同的计算单元, 然后对各计算单元积分, 求解出节点处未知量的

离散方程, 最后通过给定的初始条件和边界条件进行计算, 采用干湿网格判别法处理因潮位变化导致的边界移动问题。

3.2 模型参数选取

二维潮流泥沙数学模型上游边界为利港断面, 下游边界为天生港断面, 全长约 62 km。模型计算域空间步长 30~120 m, 其中, 工程区域进行了局部网格加密, 网格最小间距为 30 m。

3.2.1 水动力模型参数

1) 糙率系数: 糙率系数综合反映了计算河段的阻力, 天然河流阻力可由沙粒阻力、沙波阻力、河岸及滩面阻力、河流形态阻力等组成。模型糙率采用曼宁系数 M , 取值范围为 $32\sim60\text{ m}^{1/3}/\text{s}$ 。

2) 水流紊动黏性系数: 紊动黏性系数采用 Smagorinsky 公式, 取 0.28。

3) 计算时间步长: 计算时间步长取值为 30 s。

4) 整治建筑物设置: 福姜沙水道整治建筑物包含潜堤、丁坝。水平尺度上的结构物相较于模型计算用的网格尺度小很多, 因此采用亚网格技

术进行处理。

3.2.2 泥沙模型参数设置

1) 底质粒径: 计算中设置 6 组代表性底质, 其粒径分别为 0.03、0.06、0.12、0.16、0.18 和 0.22 mm, 并根据实测资料及河段底沙分布特征给出不同区域的级配组成。

2) 孔隙率: 不同区域给出不同的空隙率, 河段范围内取 0.4~0.7。

3.3 模型验证

模型以利港—天生港河段为计算区域, 码头前沿水域为中点研究区域, 以 2021 年 1 月(枯季)和 2018 年 8 月(洪季)实测地形数据作为计算地形, 对大潮潮位、流速、流向、含沙量等要素进行率定和验证。然后采用 2018 年 5 月—2019 年 4 月的地形变化实测资料对工程河段冲淤变化进行验证分析。结果表明, 水动力误差基本控制在 10% 以内, 满足规范的要求, 见图 6; 计算和实测含沙量过程较为吻合, 见图 6, 建立的数学模型基本可以反映工程河段水体含沙量大小和泥沙的输运过程。

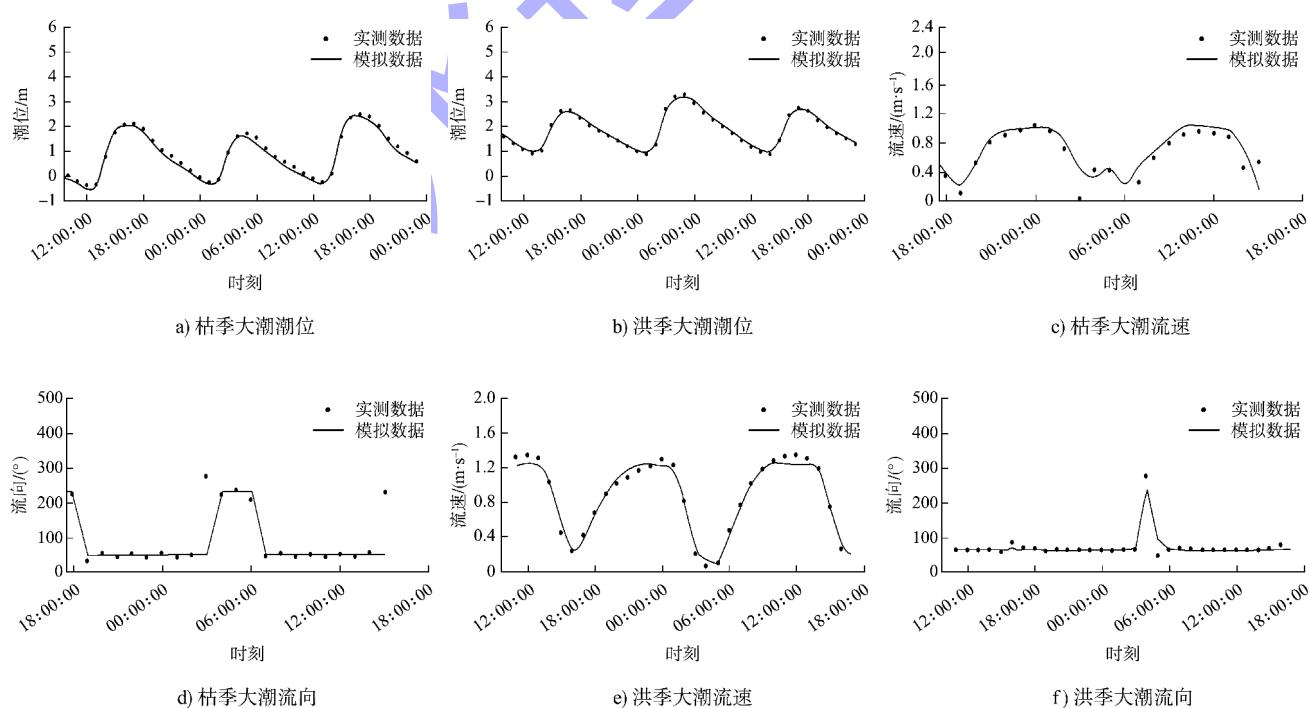


图 5 工程河段水动力验证(枯季、洪季)

Fig. 5 Hydrodynamic verification in project reach (dry season and flood season)

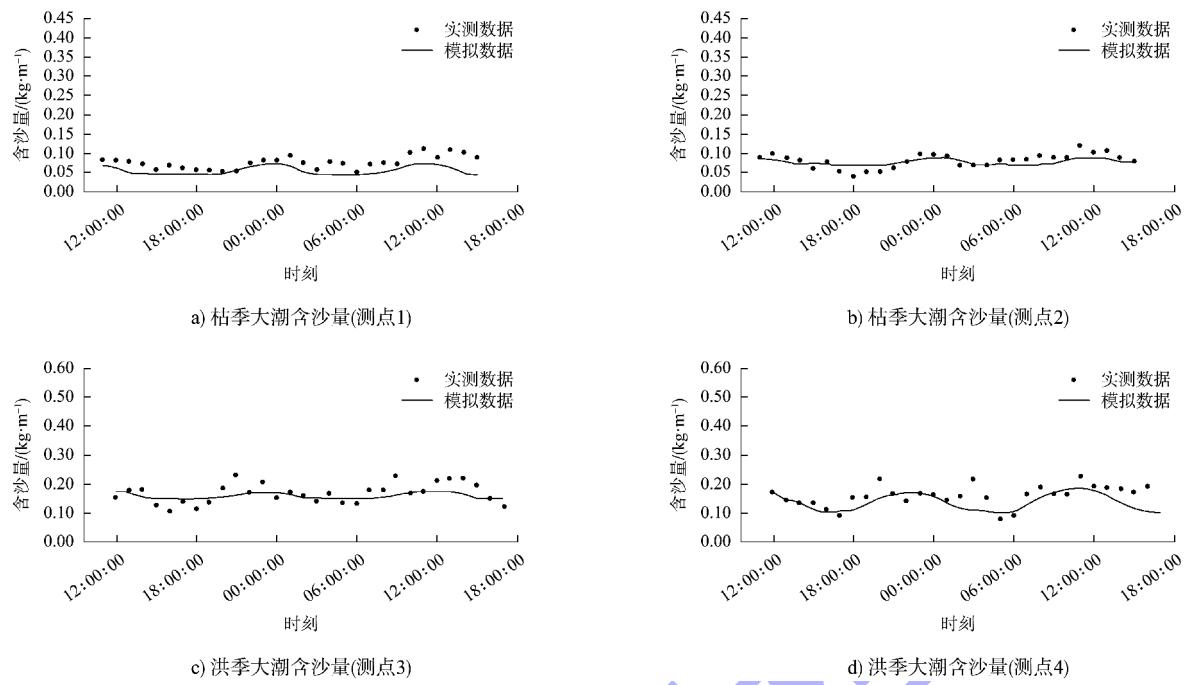


图 6 工程河段含沙量验证 (枯季、洪季)

Fig. 6 Sediment concentration verification in project reach (dry season and flood season)

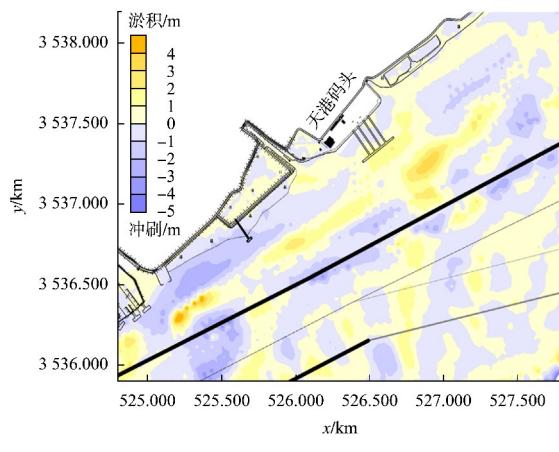
4 码头前沿冲淤预测

4.1 地形及水文条件

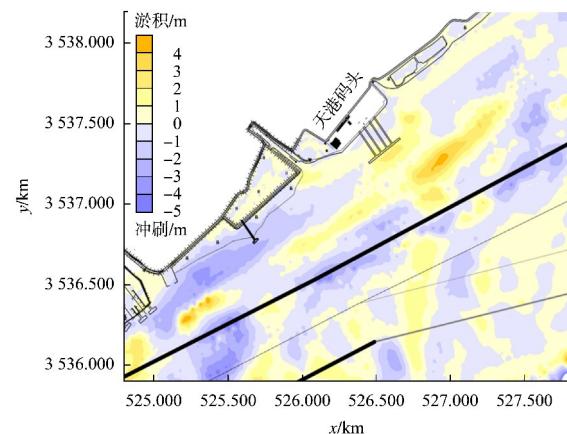
采用天港码头前沿 2021 年 1 月的地形实测资料作为计算地形, 河床的冲淤预测考虑洪季及枯季两种水沙条件。

水文条件分平常水沙年和丰水年。其中, 选用 2014 年 8 月—2015 年 8 月实际水沙过程作为平常水沙年计算边界条件; 采用 2016 年实际水沙过程作为丰水年计算边界条件。

4.2 地形冲淤预测



a) 平常水沙年



b) 丰水年

图 7 天港码头前沿地形冲淤变化

Fig. 7 Erosion and deposition changes of front terrain at Tian Gang wharf

平常水沙年条件下, 码头所在浅滩区域及其上下游 200 m 范围内呈现冲淤交替、以淤积为主的态势, 见图 7a), 淤积幅度约为 0.3~1.5 m/a; 码头浅滩区域上游侧呈冲刷态势, 距工程区域约 500 m 范围内冲刷强度约为 0.1~0.6 m/a; 码头浅滩区域下游侧浅滩区微淤; 离岸 300 m 处有条状淤积带, 淤积强度约为 0.3~2.0 m/a。

丰水年水沙条件下, 近岸区浅滩冲刷范围及幅度比平常水沙年大, 但码头前沿 100 m 范围内仍呈淤积态势, 见图 7b)。

5 结论

1) 从 2015—2022 年码头前沿局部河床演变特征来看, 码头前沿浅滩区域整体相对稳定、总体呈现微淤趋势; 码头所在浅滩区域及其上游浅滩年均淤积幅度约 0.5 m, 码头下游浅滩主要呈现冲淤交替、微冲为主的态势。

2) 从平常水沙年河床冲淤预测来看, 码头所在浅滩区域及其上下游 200 m 范围内呈现冲淤交替、淤积为主的态势, 淤积幅度约为 0.3~1.5 m/a; 码头浅滩区域上游侧呈冲刷态势, 距工程区域约 500 m 范围内冲刷强度约为 0.1~0.6 m/a; 原码头浅滩区域下游侧浅滩区微淤; 离岸约 300 m 处有条状淤积带, 淤积强度约为 0.3~3.5 m/a。

3) 丰水年水沙条件下, 码头所在近岸区浅滩冲刷范围及幅度比平常水沙年大, 但码头前沿 100 m 范围内仍主要呈淤积态势。

参考文献:

- [1] 付桂. 长江南京以下 12.5 m 深水航道治理工程福姜沙水道整治工程效果对比分析[J]. 水运工程, 2021(1): 104-110.
FU G. Comparative analysis on the effect of Fujiangsha waterway regulation project of 12.5 m deepwater channel project in the Yangtze River below Nanjing [J]. Port & waterway engineering, 2021(1): 104-110.
- [2] 王建军, 杨云平, 申霞, 等. 长江下游福姜沙河段边心滩演变及对航槽冲淤影响研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(4): 751-762.
WANG J J, YANG Y P, SHEN X, et al. Study on the deformation of the point/channel bar of the variable section of the tidal current limit of Yangtze River and its influence on the scouring and silting of dredged channel [J]. Journal of basic science and engineering, 2020, 28(4): 751-762.
- [3] 沈淇, 王巍, 顾峰峰. 长江下游江阴-福姜沙弯曲与分汊过渡河段边滩演变研究[J]. 泥沙研究, 2020, 45(2): 23-30.
SHEN Q, WANG W, GU F F. Fluvial processes of the point bar at the transition area between meander Jiangying reach and bifurcated Fujiang shoal reach [J]. Journal of sediment research, 2020, 45(2): 23-30.
- [4] 刘高峰, 王统泽. 福姜沙河段输沙、边滩输移特征和动力机制研究[J]. 水运工程, 2020(11): 94-99.
LIU G F, WANG T Z. Characteristic and dynamic mechanism of sediment and beach transport in Fujiangsha reach [J]. Port & waterway engineering, 2020(11): 94-99.
- [5] 刘贵阳, 刘强, 张小刚, 等. 群桩布置床面泥沙冲淤过程数值模拟研究[C]//中国水力发电工程学会水工水力学专委会, 国际水利与环境工程学会中国分会, 中国水力学会水力学专委会. 水力学与水利信息学进展 2024—水利信息学. 北京: 中国水力发电工程学会, 2024: 32-42.
LIU G Y, LIU Q, ZHANG X G, et al. Numerical simulation study on silt and silt process on bed surface of pile layout [C]//CSHE, IAHR, IAHE. Progress in Hydraulics and Hydraulic Informatics 2024-Hydraulic Informatics. Beijing: CSHE, 2024: 32-42.
- [6] 黄本胜, 程香菊, 袁丽蓉, 等. 码头桩群对河道行洪与流场影响的三维数值模拟[J]. 水动力学研究与进展 A辑, 2010, 25(1): 99-105.
HUANG B S, CHENG X J, YUAN L R, et al. Three dimensional numerical simulation of the effect of piled wharf on the flood passage ability of river and its flow field wharf [J]. Chinese journal of hydrodynamics, 2010, 25(1): 99-105.
- [7] 陈界仁, 余雯. 码头桩群对八卦洲汊道分流比的影响研究[J]. 水运工程, 2012(3): 104-107.
CHEN J R, YU W. Influence of pile group on division ratio of Baguazhou branch [J]. Port & waterway engineering, 2012(3): 104-107.
- [8] GUO L, VAN DER WEGEN M, ROELVINK J A, et al. The role of river flow and tidal asymmetry on 1-D estuarine morphodynamics [J]. Journal of geophysical research: earth surface, 2014, 119(11): 2315-2334.
- [9] CHEN Y P, LI J X, WU Z G, et al. Dynamic analysis of riverbed evolution: Chengtong Reach of Yangtze Estuary[J]. Journal of coastal research, 2016, 75(S1): 203-207.
- [10] HU Y, CAO M X, MA A X, et al. An analysis of the periodic evolution of the Jingjiang sandbank in the tidal reach of the Yangtze River[J]. Water, 2020, 12(6): 1652.

(本文编辑 赵娟)