

· 港口 ·



考虑群桩影响的高桩码头冲淤数值模拟研究 ——以天津港为例*

荆一戈¹, 季则舟², 张金凤^{1,3}, 张庆河¹, 庞启秀⁴

(1. 天津大学, 水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300350;

2. 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 天津 300222;

3. 天津大学, 地震工程模拟与抗震恢复中国地震局重点实验室, 天津 300350;

4. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

摘要: 高桩码头附近的泥沙淤积问题是港口建设和维护的关键所在, 码头下方的群桩对其周围潮流和悬沙运动产生影响, 易造成泥沙淤积。桩基的精细模拟对网格尺度要求严格, 不适用于大范围水域中考虑大量群桩的模拟。采用群桩概化的方法, 改进FVCOM三维水沙模型, 对天津港泊位桩下泥沙淤积资料进行验证。在此基础上, 分别模拟考虑群桩和不考虑群桩时天津港泊位附近的潮流场、悬沙场以及冲淤演变。模拟结果表明, 改进后三维水沙模型验证结果良好; 考虑群桩影响后, 码头下方会形成较为明显的阻流区, 影响周围流场分布和流速大小; 涨急时码头前方及下方的含沙量增大为不考虑群桩时的2倍, 而落急时码头下方含沙量稍有减少, 泥沙淤积主要集中在码头前方。

关键词: 天津港; 群桩概化; FVCOM 三维模型; 高桩码头; 泥沙回淤

中图分类号: U656.1+13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)06-0044-11

Numerical simulation study on sediment transport of high-pile wharf considering influence of pile group: a case study of Tianjin Port

JING Yige¹, JI Zezhou², ZHANG Jinfeng^{1,3}, ZHANG Qinghe¹, PANG Qixiu⁴

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd., Tianjin 300222, China;

3. Key Laboratory of Earthquake Engineering Simulation and Seismic Resilience of China Earthquake Administration, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

4. Tianjin Research Institute of Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

Abstract: The sedimentation issues near high-pile wharves are critical in port construction and maintenance. The group-piles beneath the wharf affect the surrounding tidal currents and sediment suspension, leading to sediment accumulation. Detailed modeling of pile foundations requires stringent grid scales and is not suitable for large-scale simulations involving numerous pile groups. This study employs a pile group generalization method to improve the FVCOM three-dimensional water-sediment model and validate it against sedimentation data at the Tianjin Port berth piles. Based on this, simulations considering and not considering pile group are conducted to analyze tidal currents, suspended sediment, and erosion-deposition evolution near the Tianjin Port berth. The simulation results show that the improved three-dimensional water-sediment model has good verification results. Considering effects of pile group creates a distinct flow obstruction zone under the wharf, affecting the distribution and velocity of surrounding flow. During flood tide, the sediment concentration in front of and below the dock is twice that of scenarios without pile group, while sediment concentration slightly decreases during ebb tide, with sediment mainly accumulating in front of the wharf.

Keywords: Tianjin Port; pile group generalization; FVCOM; high-pile wharf; sediment back-siltation

收稿日期: 2024-08-29

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2601100)

作者简介: 荆一戈(1999—), 女, 博士研究生, 从事港口、海岸及近海工程研究。

淤泥质海岸港口细颗粒泥沙含量高,受水动力作用影响变化大,易发生侵蚀和淤涨^[1],泥沙的冲淤问题是港口建设和维护的关键。高桩码头是我国淤泥质海岸及其河口地区广泛应用的码头结构形式,其下方为透水结构,因为桩基阻力的存在以及水体漩涡的产生^[2],群桩附近水域的水动力场比较复杂,可能导致桩基附近产生泥沙的淤积^[3],从而影响船舶的进出和停泊,严重时会导致对高桩码头结构的破坏^[4]。

天津港是典型的位于淤泥质海岸的高桩码头,关于天津港港区的水沙运动已有许多研究^[5-7],但主要解决航道回淤、港岛工程等问题,而关于群桩对泥沙运动和冲淤演变的影响研究比较欠缺。群桩的阻力特性与桩距、桩数和水流雷诺数等相关。与单桩相比,桩柱间相互干扰会产生绕流现象的不对称分布^[8]。密集群桩使桩间的有效过水面积减少,从而产生阻水作用,排列方式的不同对流速、桩间漩涡的影响各有不同^[9]。直接模拟桩基附近的水流变化和泥沙输移是一种重要的研究手段^[10-12],但该方法对计算网格的精度要求高,不适用于大范围水域以及大量群桩的模拟。许多学者采用不同的概化计算方法模拟群桩的影响,应用在水动力场变化研究上^[13-14],但对泥沙输运的模拟较少。

本文在 Wu 等^[15]和薛玉娆^[16]的研究基础上,基于改进的考虑群桩阻力的 FVCOM 三维水沙模型,对天津港高桩码头桩基附近的水流、泥沙运动特性和冲淤演变规律进行研究,旨在为天津港目前的泥沙疏浚、结构维护以及未来的港区建设提供参考依据。

1 数值模型

1.1 控制方程

FVCOM 模型采用有限体积法对方程进行数值离散,并采用内外模分离的算法。其中水动力模块的控制方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial t} - fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_x - \lambda u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial t} + fu = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_y - \lambda v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3)$$

式中: u 、 v 、 w 分别为速度在笛卡尔坐标系 x 、 y 、 z 轴的分量; f 为科氏力系数; t 为时间; ρ 为密度; P 为总压力; K_m 为垂向涡黏系数,由 Mellor-Yamada 2.5 (MY-2.5) 紊流模型计算; F_x 和 F_y 分别为 x 和 y 方向上的动量扩散项; λ 为群桩阻力的概化系数。

为了考虑群桩对水动力场的影响,参考 Wu 等的方法,在式(2)、(3)右边引入刚性圆桩引起的二次阻力项, λ 的取值参考王智辉物模试验结果,并将其理论扩展到三维模型中,假设桩基影响的阻流系数在垂向各处相同,如下式所示计算:

$$\lambda = \frac{1}{2} C_D \frac{S_p}{S_v} \quad (4)$$

$$C_D = NK_L K_B C_{D0} \quad (5)$$

式中: C_D 为群桩的阻力系数; S_p 为桩的纵向迎流面积; S_v 为群桩概化区域总面积; N 为群桩区域内总桩数; C_{D0} 为单桩阻力系数,根据 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》^[17],圆桩取值为 0.73; K_L 、 K_B 分别为纵向、横向影响系数。

采用 SWAN 进行波浪场的计算与 FVCOM 水动力模型进行双向耦合。SWAN 能够完成海洋、河口不同计算尺度下风浪、涌浪、混合浪的模拟^[18]。

悬移质泥沙运动采用三维对流扩散方程:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial (uc)}{\partial x} + \frac{\partial (vc)}{\partial y} + \frac{\partial [(w-w_s)c]}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{h,s} \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (6)$$

式中: c 为泥沙浓度; $K_{h,s}$ 为垂向扩散系数; A_h 为水平扩散系数; w_s 为泥沙沉速。

地形演变控制方程可以表示为:

$$(1-p_{or}) \frac{\partial z_b}{\partial t} + f_{mor} \left(\frac{\partial q_{b,slope,x}}{\partial x} + \frac{\partial q_{b,slope,y}}{\partial y} + E - D \right) = 0 \quad (7)$$

式中： z_b 为床面高程； p_{or} 为床面孔隙率； f_{mor} 为地形加速因子，在每一个计算时间步乘以推移质输沙率和悬移质冲刷淤积通量； $q_{b,slope,x}$ 和 $q_{b,slope,y}$ 分别为 x 、 y 方向的推移质输沙率。

1.2 模型设置

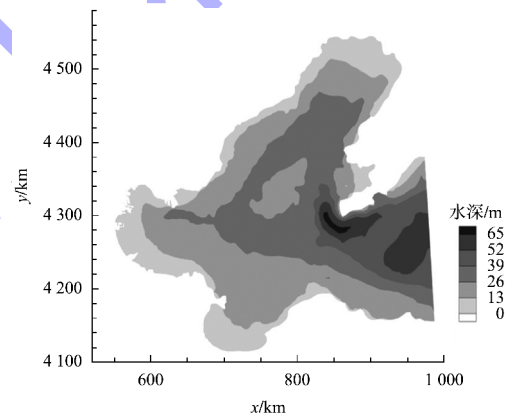
本文以天津港北疆港区 25#、26# 泊位为例 (图 1)，探究考虑群桩的泊位附近水动力环境和泥沙回淤规律。近年来，天津港外来泥沙几乎可以忽略不计，滩面泥沙粗化，港区内的水体含沙量逐年下降且总体较低。天津港港区内平均含沙量为 0.1 kg/m^3 ，春季涨潮段内平均含沙量为 0.07 kg/m^3 ，略大于落潮段，其他季节涨落潮含沙量基本持平。1995—2000 年河口大量清淤后，闸下河道未见累积性淤积，由于围海造陆等人为工程的开展，泥沙运行规律和淤积发生变化，泥沙淤积减少。高桩梁板结构是天津港码头的基本结构形式，桩基间距 7 m，群桩后方接岸，25#、26# 泊位多年平均淤积厚度超过 3 m，集中在靠泊处桩前及桩下，最大可达 5 m，接岸处岸坡几乎不淤积。在天津港北疆港池泥沙现场采样分析，平均中值粒径为 $15 \mu\text{m}$ ，黏土含量约占 38%。进行泥沙运动模拟时泥沙粒径取 $15 \mu\text{m}$ ，属于细颗粒泥沙，因此模拟中仅考虑悬移质。



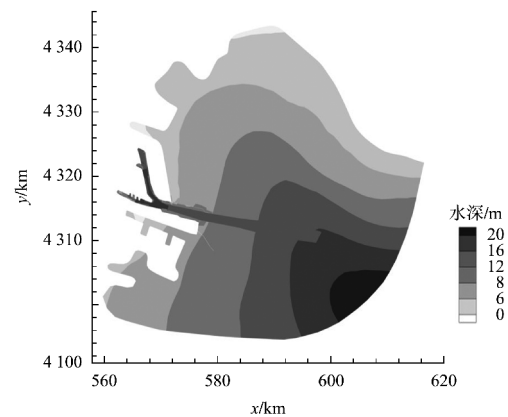
图 1 天津港研究位置

Fig. 1 Research location in Tianjin Port

模型采用大小网格嵌套的方式，大模型包括整个渤海，网格尺度为 3 500~4 000 m；小模型包括天津港附近海域，对 25#、26# 泊位高桩区域进行网格加密，最小网格尺度为 5 m，小于桩基间距，以保证群桩区域的计算精度。大小地形如图 2 所示。群桩概化面积为 $404 \text{ m} \times 45 \text{ m}$ ，根据文献中桩距与桩径比值 B/d 和影响系数的关系曲线，横向、纵向影响系数分别取为： $K_B = 1.3$ ， $K_L = 0.85$ ，由式(4)得 λ 取为 0.02，模型垂向分为 10 层，对研究区域的群桩进行概化计算，见图 3。床面粗糙度按照 Van Rijn 的方法取 3 倍的 $d_{90}^{[19]}$ 。模型以 ERA5 风场作为波浪驱动条件，大模型的开边界水位数据来自于 Mike21 全球潮汐预报系统，在大模型的近海潮位验证良好的前提下，小模型的开边界水位数据从大模型的计算结果中提取。



a) 大地形



b) 小地形

图 2 大地形和小地形

Fig. 2 Large geometry and small geometry

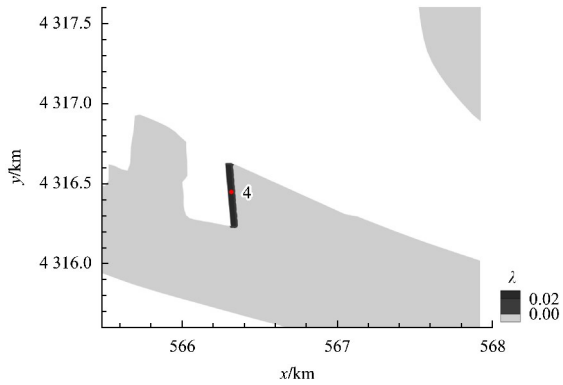


图 3 群桩概化计算区域

Fig. 3 Calculation area of pile group generalization

1.3 潮位潮流验证

2021 年 8 月在天津港东突堤附近 3 个测站进行了大潮期间的水文观测, 包括潮位、潮流、悬沙浓度, 测站位置见图 4, 在群桩区域设置模拟测站 4, 如图 3 所示。

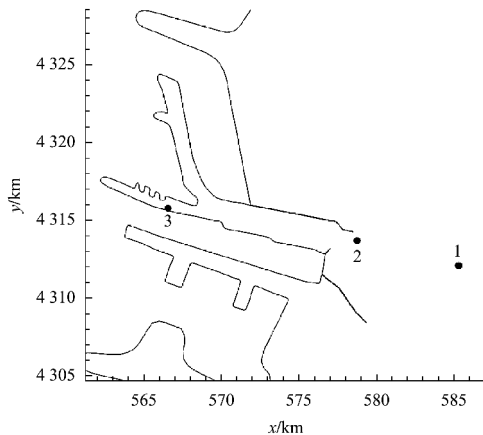
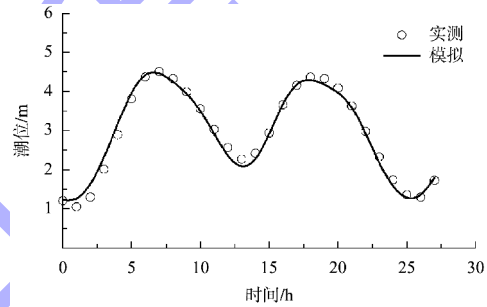


图 4 测站位置

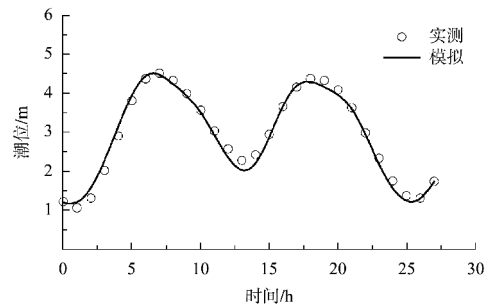
Fig. 4 Station position

图 5 为测站 1、2 的潮位验证结果, 时间从 2021-08-23T09:00:00 至 2021-08-24T12:00:00, 与实测潮位相比, 模拟结果基本吻合。近海测站的垂向平均最大流速为 0.7 m/s, 平均流速为 0.29 m/s, 流向为 207°, 涨落急时流速最大相差 0.39 m/s; 港区内测站的垂向平均最大流速为 0.16 m/s, 平均流速为 0.1 m/s, 流向为 186°, 涨落急时流速最大相差 0.02 m/s。模拟近海垂向平均最大流速为 0.77 m/s, 平均流速为 0.35 m/s, 流向为 204°, 涨

落急时流速最大相差 0.36 m/s; 模拟港区内垂向平均最大流速为 0.14 m/s, 平均流速为 0.07 m/s, 流向为 183°, 涨落急时流速最大相差 0.06 m/s, 模拟值与实测值相近。图 6、7 为测站 2、3 的潮流流速流向分层验证结果。由图可知, 测站 2 的验证结果良好, 测站 3 的模拟流速与实测流速相比略小, 可能原因是天津港口门处防波堤掩护效果好, 测站位置深入港区且靠近陆界, 模拟结果受地形和边界影响较大。图 8 为群桩区域测点模拟流速历时, 桩下垂向平均流速为 0.000 2 ~ 0.012 0 m/s, 流速整体较小, 主要原因是港区内水动力较弱以及群桩的阻流作用。



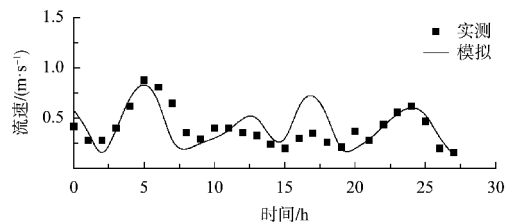
a) 测站1



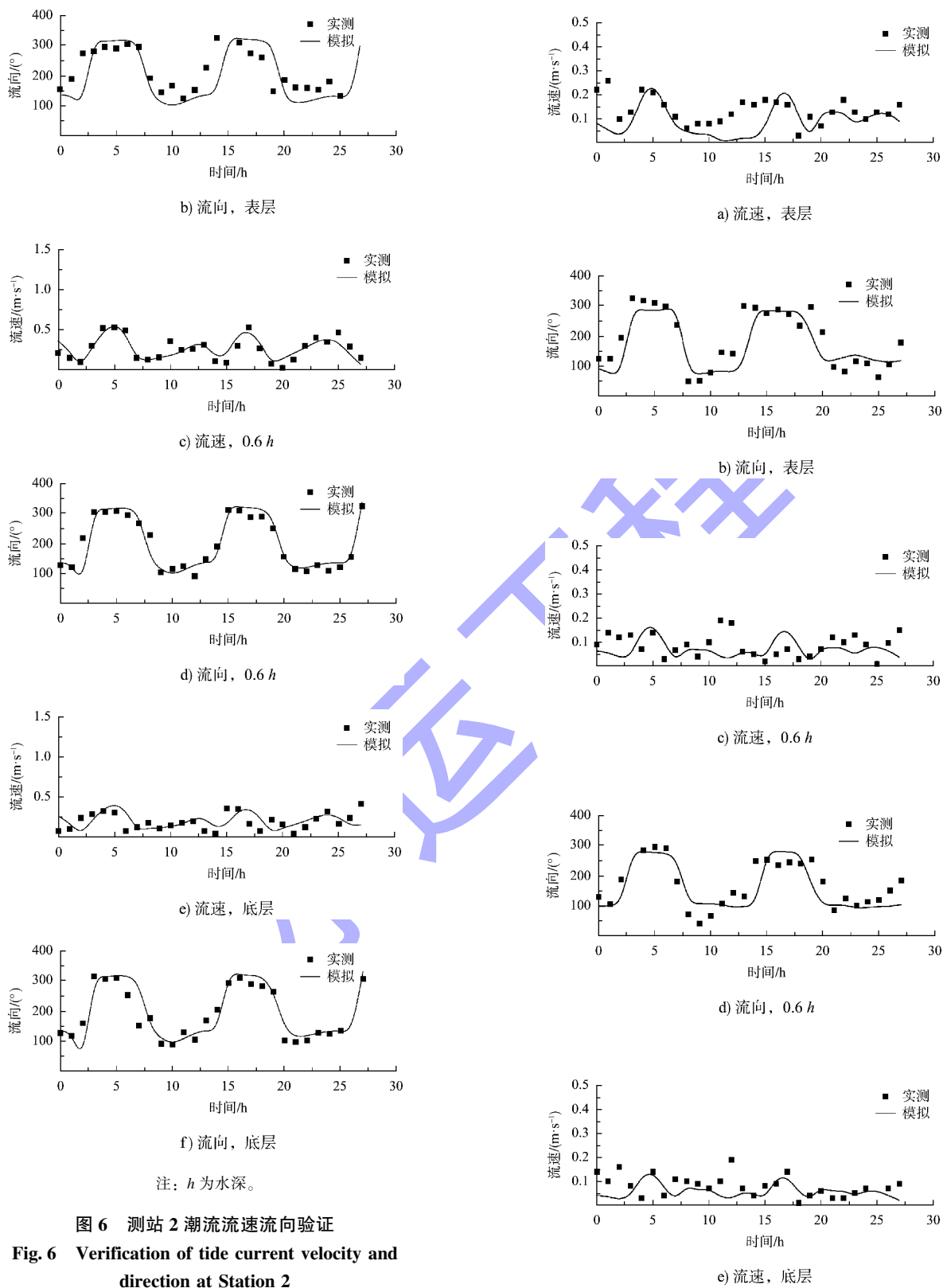
b) 测站2

图 5 潮位过程验证

Fig. 5 Verification of water level process



a) 流速, 表层



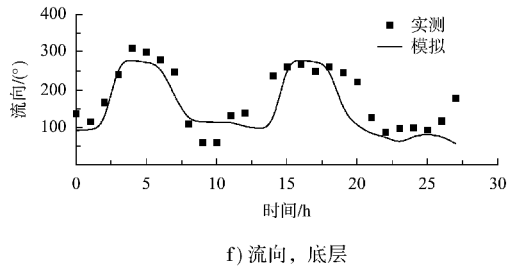


图7 测站3潮流流速流向验证

Fig. 7 Verification of tide current velocity and direction at Station 3

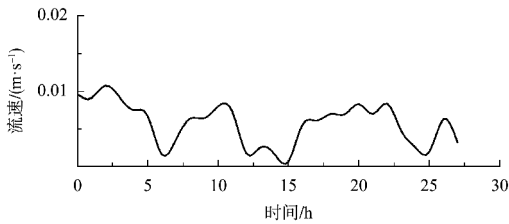
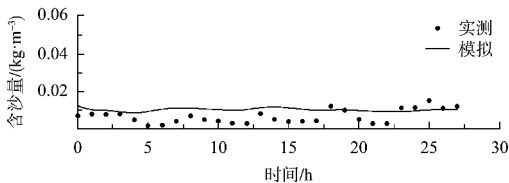


图8 测站4模拟垂向平均流速历时

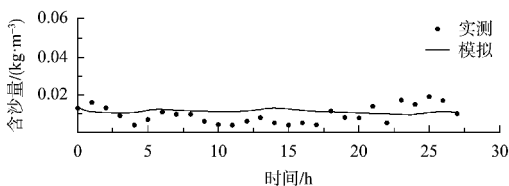
Fig. 8 Simulated vertical average velocity duration at Station 4

1.4 悬沙及冲淤验证

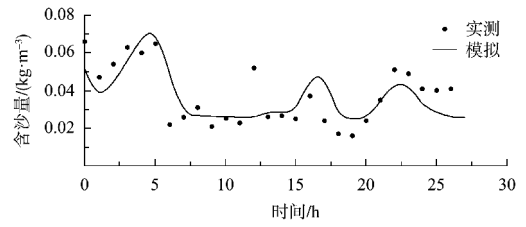
采用天津港海域从 2021-08-23T09:00:00 至 2021-08-24T12:00:00 测站 1、3 的悬沙实测数据, 对底层和表层水体中的悬沙浓度进行验证(图9)。对于分层水体, 表层水体泥沙浓度相对较低, 底层水体泥沙浓度相对较高; 对于不同测站, 外海海域悬沙浓度高于港区内, 但整体悬沙浓度较小, 最大不超过 0.1 kg/m^3 , 港区内悬沙浓度在 0.01 kg/m^3 左右。外海实测垂向平均悬浓度为 $0.008 \sim 0.022 \text{ kg/m}^3$, 港区内为 $0.008 \sim 0.016 \text{ g/m}^3$ 。测点实测值与模拟值的变化趋势和量级基本一致, 验证结果良好, 表明本文的泥沙模型能够较好地模拟实际海域泥沙的运动情况。



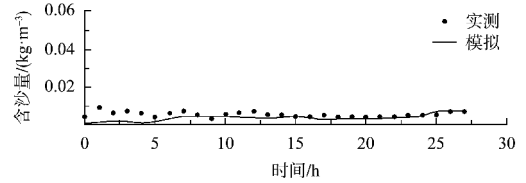
a) 测站1, 表层



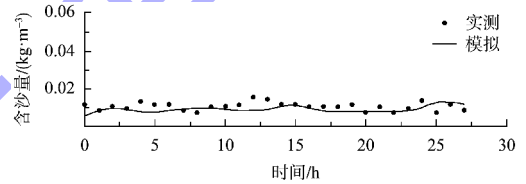
b) 测站1, 0.6 h



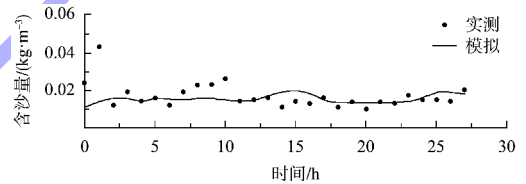
c) 测站1, 底层



d) 测站3, 表层



e) 测站3, 0.6 h



f) 测站3, 底层

图9 测站 1、3 含沙量分层验证

Fig. 9 Stratified verification of suspended sediment concentration at Station 1 and 3

采用的泥沙冲淤实测资料为 2023 年天津港 25[#]、26[#]泊位桩下沿程 18 个断面(图 10)3 a 平均淤积厚度。水动力模型计算时间为 2021 年包含大潮、中潮、小潮的一个潮汐周期, 通过加速因子计算 3 a 内的地形演变情况。图 11 为桩下淤积厚度验证情况, 相对里程为断面对于剖面起零线的相对位置, 起点为起零线最北端。研究桩下区域 3 a 内的总平均淤积厚度为 3.43 m, 沿程纵向淤积范围 2.5~5.0 m; 模拟总平均淤积厚度为 3.98 m, 沿程纵向淤积范围 2.5~5.5 m, 与实测值基本相符, 表明本文泥沙运动模型可以用于天津港冲淤计算。

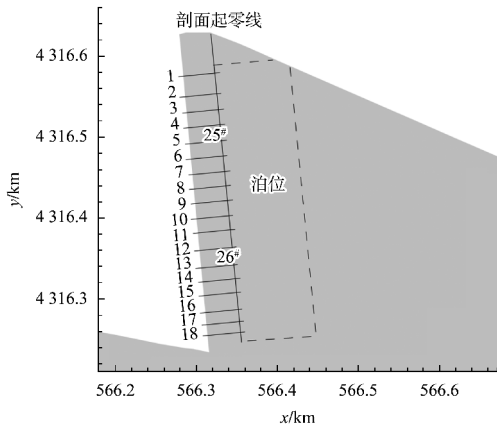


图 10 桩下验证断面

Fig. 10 Validation sections under piles

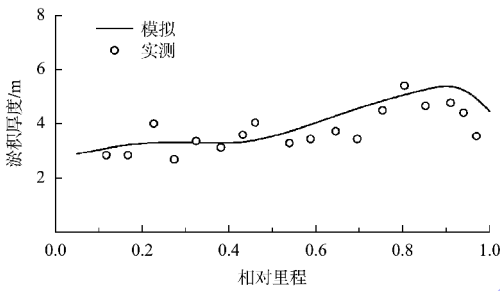


图 11 桩下断面平均淤积验证

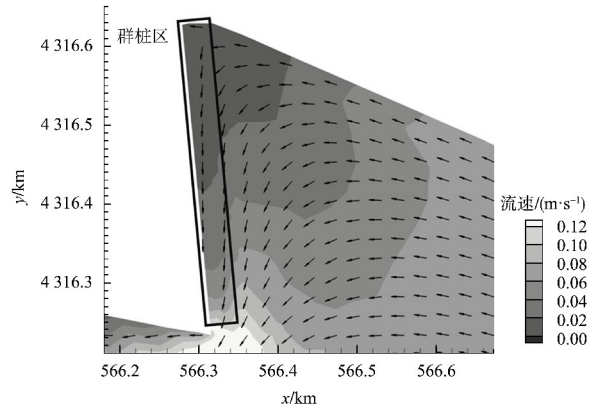
Fig. 11 Verification of average siltation of sections under piles

2 考虑群桩的桩基附近回淤计算

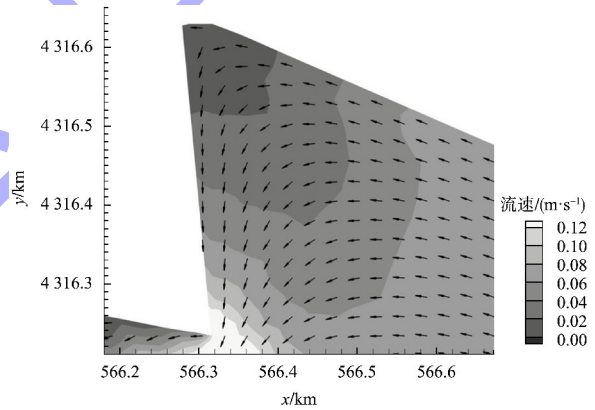
根据模型验证的边界条件与计算参数，水动力边界同样为 2021 年包含大潮、中潮、小潮的一个潮汐周期，设置加速因子计算 3 a 内的地形演变情况，分别采用考虑群桩概化方法和不考虑群桩的三维水沙模型，进行天津港 25[#]、26[#]泊位附近的 3 a 回淤计算，探究群桩对泊位附近水动力场及泥沙运动的影响。

图 12 为考虑群桩前后涨急、落急时刻潮流场的对比。涨急时刻潮流从东南方向流向泊位，靠近陆界处方向变为沿边界自北向南。泊位附近整体流速较小，为 0.02 m/s 左右，26[#]泊位转角处流速相对较大，超过 0.12 m/s，容易造成冲刷。考虑群桩影响后，桩下流速明显减小，大约为不考虑群桩时的 1/2。王春华^[20]进行不同排列方式的群桩阻力试验，结果表明群桩区域流速较其他区域

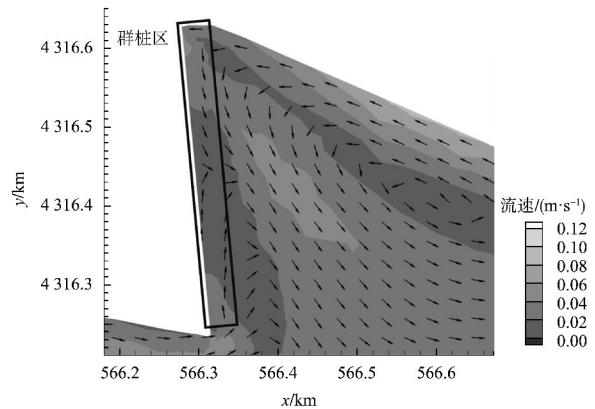
衰减约 20%~60%。薛玉尧对大榭港码头群桩进行概化模拟，得到与本文相似的结果，与实测数据更好吻合。唐士芳考虑桩阻力进行码头二维潮流数值模拟，有桩时群桩区流速约为无桩时的 0.2~0.9，且与水槽试验结果一致。前人研究证明，本文的模拟结果是合理的。



a) 涨急有桩



b) 涨急无桩



c) 落急有桩

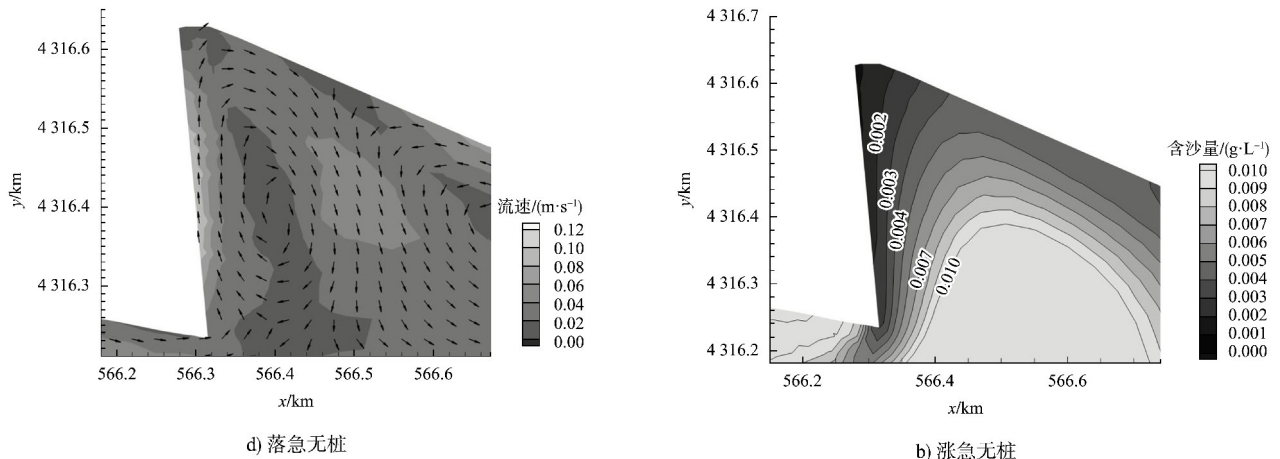


图 12 涨落急时刻流场

Fig. 12 Tide current field at rising and falling times

落急时刻潮流整体自岸界流向航道, 不考虑群桩时在泊位附近形成顺时针的涡流, 由于陆边界处存在缓坡地形, 桩下沿边界形成流速较大的区域, 最大为 0.1 m/s, 但桩前流速较小; 考虑群桩时, 桩下大面积区域的流速明显减小, 约为 0.01 m/s。由此可见, 考虑群桩影响后, 桩下会形成较为明显的阻流区, 影响桩下及附近的流速大小和流场分布。

图 13 为涨急时刻、落急时刻的含沙量场。由图可知, 群桩附近越靠近陆边界悬沙浓度约小, 总体不超过 0.01 g/L; 涨急时刻, 考虑群桩和不考虑群桩的悬沙分布趋势基本一致, 但不考虑群桩时桩下悬沙浓度更大, 相差 0.001 ~ 0.002 g/L; 落急时刻, 考虑群桩时较不考虑群桩时泊位附近的悬沙浓度更大, 而靠近陆边界的桩下区域悬沙浓度较小(参考流速场), 基本符合流速大的地方悬沙浓度大的规律。

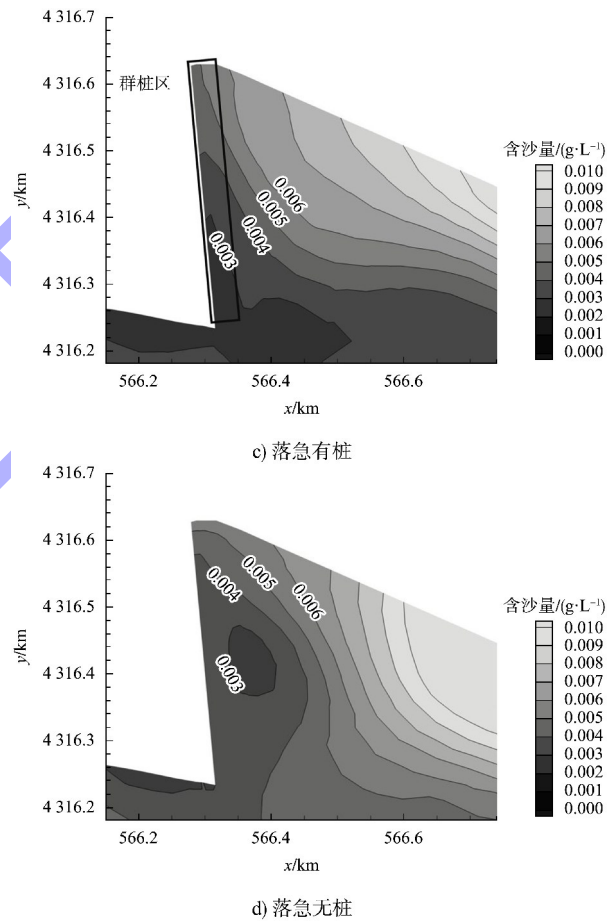


图 13 涨落急时刻含沙量场

Fig. 13 Sediment concentration fields at rising and falling times

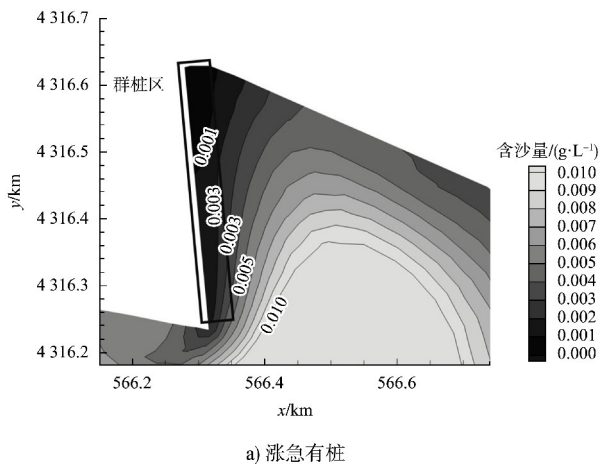


图 14 为 3 a 内考虑群桩和不考虑群桩的淤积厚度比较。由图可知, 不考虑群桩时, 桩下的淤积强度为 1.3 ~ 1.6 m/a, 整体高于船舶靠泊处(码头前方); 与 25# 泊位相比, 26# 泊位无论是桩下还是船舶靠泊处的淤积强度都更大, 是因为涨

潮时岸边潮流流向为自北向南，导致泥沙主要淤积在 26# 泊位附近；考虑群桩时，存在同样的淤积规律，但 25# 泊位桩下淤积强度与不考虑群桩时相比更小，约为 1 m/a，26# 泊位处的泥沙淤积位置不同，考虑群桩后桩下形成阻流区导致悬沙浓度减小，泥沙主要集中在船舶靠泊处淤积，桩下淤积强度反而减小。沿岸取船舶靠泊处的剖面 A，比较考虑群桩前后的淤积厚度，如图 15 所示，考虑群桩后，3 a 内 25# 泊位船舶靠泊处的桩前淤积厚度在 4 m 左右，26# 泊位的桩前淤积厚度在 5 m 左右，比不考虑群桩时平均大 10%。

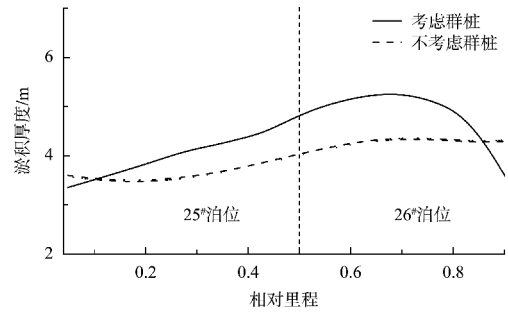
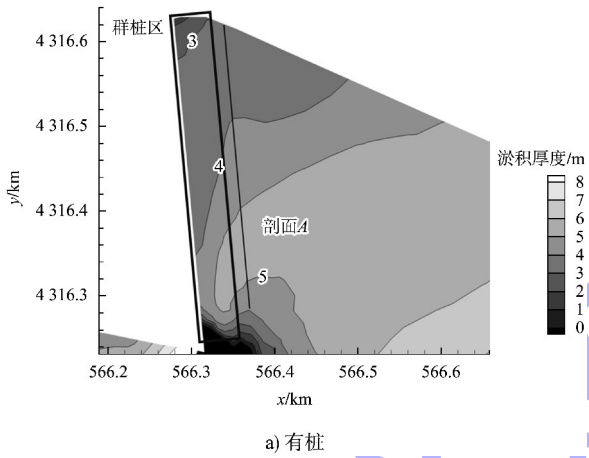


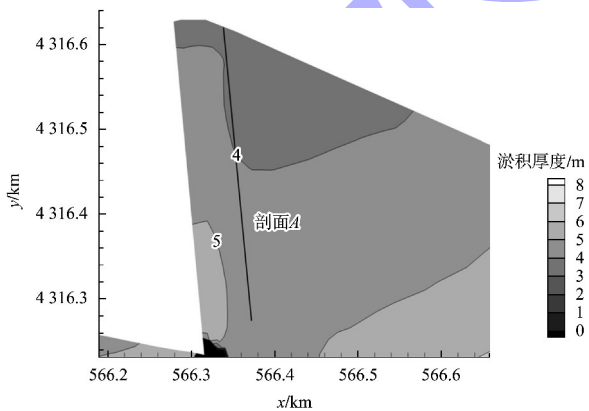
图 15 剖面 A 淤积厚度

Fig. 15 Deposition thickness of Profile A

综上所述，考虑群桩后，岸边泊位桩下淤积强度变小，而桩前靠泊处淤积强度变大、水深变浅，因此船舶停靠吃水和泊位定期疏浚应参考群桩的影响。大树码头同样为淤泥质海岸处的高桩码头，根据文献[16]对大树港考虑群桩后的年淤积模拟结果，由于群桩的阻流作用，码头前方、下方、后方均产生大量泥沙淤积，尤其是涨潮迎流后方的泊位码头淤积最为严重，与本文 26# 泊位模拟结果相似；与天津港码头不同的是，大树码头的其他泊位码头下方淤积厚度最大，后方最小，但整体比较平均。大树码头通过栈桥连接海岸，存在后方水域，而天津港码头后方直接连接陆岸，且两者地理位置不同，因此水动力环境条件存在差异，造成其泥沙回淤规律并不完全一致。



a) 有桩



b) 无桩

图 14 3 a 内淤积厚度分布

Fig. 14 Distribution of sediment deposition thickness in three years

3 结论

1) 考虑群桩影响后，桩下会形成较为明显的阻流区，影响桩下及附近的流速大小和流场分布；涨急时刻，考虑群桩和不考虑群桩的悬沙分布趋势基本一致，但不考虑群桩时桩下悬沙浓度更大；落急时刻，考虑群桩时较不考虑群桩时泊位附近的悬沙浓度更大，而靠近陆边界的桩下区域悬沙浓度较小。

2) 考虑群桩时，泊位处的泥沙淤积位置不同，泊位桩下淤积强度与不考虑群桩时相比更小，泥沙淤积主要集中在船舶靠泊处；3 a 内桩前船舶

靠泊处淤积厚度在4~5 m,比不考虑群桩时平均大10%;考虑群桩后,桩前靠泊处淤积强度变大,水深变浅,船舶停靠吃水和泊位定期疏浚应该参考群桩的影响。

参考文献:

- [1] 刘红,马兴华,张华,等.淤泥质和粉沙质海岸分类标准研究[J].水运工程,2016(8):1-6.
LIU H, MA X H, ZHANG H, et al. Classification criteria of muddy and silty coasts [J]. Port & waterway engineering, 2016(8): 1-6.
- [2] 唐士芳.桩和桩群的水流阻力及其在潮流数值模拟中的应用[D].大连:大连理工大学,2002.
TANG S F. Flow friction of pile and pile group and its application on the tidal numerical modelling[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2002.
- [3] 张金善,刘卫平,戴贤凯.外高桥顺岸桩基码头泥沙回淤及分析[J].水利水运工程学报,2004(3):53-57.
ZHANG J S, LIU W P, DAI X K. Analyses on sediment deposition along pile wharf of Waigaoqiao Port[J]. Hydro-science and engineering, 2004(3): 53-57.
- [4] 张栋,张龙,刘欣昕,等.后方土体淤积下高桩码头桩基变形规律分析[J].水资源与水工程学报,2022,33(1):159-163,170.
ZHANG D, ZHANG L, LIU X X, et al. Deformation response of a high piled wharf foundation in the process of slope siltation [J]. Journal of water resources and water engineering, 2022, 33(1): 159-163, 170.
- [5] 孙连成,张娜,庞启秀,等.天津港深水化及二港岛建设水沙环境研究[J].水运工程,2014(7):23-27.
SUN L C, ZHANG N, PANG Q X, et al. On hydrodynamic and sediment environment of constructing deepwater port and second artificial island in Tianjin port [J]. Port & waterway engineering, 2014(7): 23-27.
- [6] 张志国,王兴博,陈纯,等.天津南港工业区通海航道泥沙水力特性试验研究[J].水道港口,2016,37(2):142-146.
ZHANG Z G, WANG X B, CHEN C, et al. Experimental study of sediment hydraulic characteristics on Tianjin Nangang seaward channel [J]. Journal of waterway and harbor, 2016, 37(2): 142-146.
- [7] 张娜,赵雪夫,李孟国.天津浮式LNG码头建设水动力泥沙问题研究[J].水运工程,2014(10):13-17.
ZHANG N, ZHAO X F, LI M G. On hydrodynamics and sediment for construction of floating LNG terminal in Tianjin [J]. Port & waterway engineering, 2014 (10): 13-17.
- [8] 唐士芳,李蓓.桩群阻力影响下的潮流数值模拟研究[J].中国港湾建设,2001,21(5):25-29.
TANG S F, LI B. Study on numerical simulation of tidal flow influenced by pile group resistance[J]. China harbour engineering, 2001, 21(5): 25-29.
- [9] 李光炽,周晶晏,张贵寿.高桩码头对河道流场影响的数值模拟[J].河海大学学报(自然科学版),2004,32(2):216-220.
LI G Z, ZHOU J Y, ZHANG G S. Numerical simulation of river flow patterns affected by standing pile wharf [J]. Journal of hehai university (natural sciences), 2004, 32(2): 216-220.
- [10] CHEN L, TU J Y, YEOH G H. Numerical simulation of turbulent wake flows behind two side-by-side cylinders[J]. Journal of fluids and structures, 2003, 18(3/4): 387-403.
- [11] BEHESHTI A A, ATAIE-ASHTIANI B, DASHTPEYMA H. Numerical simulations of turbulent flow around side-by-side circular piles with different spacing ratios [J]. International journal of river basin management, 2017, 15(2): 227-238.
- [12] 吴志超,骆文波.基于CFD的海洋平台桩基冲刷的数值模拟研究[J].现代信息科技,2024,8(2):119-123.
WU Z C, LUO W B. Research on pile foundation scouring of offshore platform based on CFD numerical simulation [J]. Modern information technology, 2024, 8(2): 119-123.
- [13] 王鑫,林鹏,陈晓路,等.如东海上风力机组基础冲刷机理数值模拟研究[J].太阳能学报,2021,42(12):239-244.
WANG X, LIN P, CHEN X L, et al. Numerical simulation on scour mechanism of Rudong offshore turbine foundation [J]. Acta energiae solaris sinica, 2021, 42(12): 239-244.
- [14] 王智辉.水流数值模拟中群桩阻力系数研究[D].南京:河海大学,2005.
WANG Z H. Research of the resistance coefficient of pile groups in the current numerical simulation[D]. Nanjing: Hohai University, 2005.

[15] WU Y S, HANNAH C G, O'FLAHERTY-SPROUL M, et al. Representing kelp forests in a tidal circulation model[J]. *Journal of marine systems*, 2017, 169: 73-86.

[16] 薛玉娆, 张金凤, 张庆河, 等. 高桩码头桩群对水动力参数影响的数值模拟[J]. *水利水运工程学报*, 2024(5): 95-102.

XUE Y R, ZHANG J F, ZHANG Q H, et al. Numerical simulation of the impact of pile groups of high-pile wharves on hydrodynamic parameters[J]. *Hydro-science and engineering*, 2024(5): 95-102.

[17] 港口工程荷载规范: JTS 144-1—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.

Load code for harbour engineering: JTS 144-1—2010[S]. Beijing: China Communications Press, 2011.

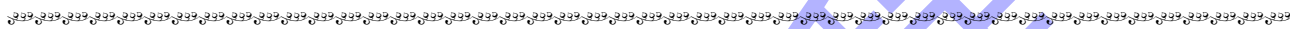
[18] BOOIJ N, RIS R C, HOLTTHUIJSEN L H. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation [J]. *Journal of geophysical research: oceans*, 1999, 104(C4): 7649-7666.

[19] VAN RIJN L C. Sediment transport, part III: bed forms and alluvial roughness [J]. *Journal of hydraulic engineering*, 1984, 110(12): 1733-1754.

[20] 王春华. 高桩码头桩群对流场及底床影响试验研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2010.

WANG C H. Impact of high-pile wharf on flow field and topography [D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2010.

(本文编辑 王传瑜)



(上接第 12 页)

[2] BENJAMIN T B. Gravity currents and related phenomena[J]. *Journal of fluid mechanics*, 1968, 31: 209-248.

[3] Permanent International Association of Navigation Congresses. WG198: Saltwater intrusion mitigation in inland waterways [R]. Brussels: Permanent International Association of Navigation Congresses, 2021: 35-58.

[4] SHER D, WOODS A W. Gravity currents: entrainment, stratification and self-similarity [J]. *Journal of fluid mechanics*, 2015, 784: 130-162.

[5] ROTTMAN J W, SIMPSON J E. Gravity currents produced by instantaneous releases of a heavy fluid in a rectangular channel [J]. *Journal of fluid mechanics*, 1983, 135: 95-110.

[6] SAVENIJE H H G. Salinity and tides in alluvial estuaries[M]. Amsterdam: Elsevier, 2005.

[7] MORE R V, ARDEKANI A M. Motion in stratified fluids[J]. *Annual review of fluid mechanics*, 2023, 55: 157-192.

[8] MUKHERJEE P, BALASUBRAMANIAN S. Energetics and mixing efficiency of lock-exchange gravity currents using simultaneous velocity and density fields[J]. *Physical review fluids*, 2020, 5(6): 063802.

[9] ZHONG Q, HUSSAIN F, FERNANDO H J S. Quantification of turbulent mixing in colliding gravity currents [J]. *Journal of fluid mechanics*, 2018, 851: 125-147.

[10] YIN X L, HE Y, LU C, et al. Experimental study on front spreading of lock-exchange gravity current with long lock length [J]. *Journal of engineering mechanics*, 2020, 146(1): 04019113.

[11] XU K Q, LIAO J H, YANG S F, et al. Impact of ship motion-induced single disturbance on gravity currents using particle image velocimetry and planar laser-induced fluorescence techniques [J]. *Physics of fluids*, 2025, 37(1): 015184.

[12] WU P. Pinglu Canal: a new waterway to sea in western China [C]//Proceedings of the 35th PIANC World Congress. Cape Town: [s. n.], 2024: 1552-1557.

[13] 吕小龙, 吴澎, 刘晓玲. 平陆运河航道等级论证[J]. *水运工程*, 2021(10): 266-270.

LYU X L, WU P, LIU X L. Demonstration on waterway classification of Pinglu Canal [J]. *Port & waterway engineering*, 2021(10): 266-270.

[14] 穆森, 吕小龙. 平陆运河船闸通过能力研究[J]. *水运工程*, 2021(3): 145-150.

MU S, LYU X L. Lock Capacity of Pinglu Canal[J]. *Port & waterway engineering*, 2021(3): 145-150.

[15] 张朋. 径流和潮汐作用下的河口盐水入侵机理实验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.

ZHANG P. Experimental study on the mechanism of saltwater intrusion in estuary with runoff and tide [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.

(本文编辑 王传瑜)