



三维潮流模型在营口 LNG 码头取排水工程中的应用*

何 军^{1,2}, 武 政¹

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 北京水规院京华工程管理有限公司, 北京 100007)

摘要: 鉴于液化天然气(LNG)码头在运营过程中需要消耗大量海水作为冷源, 取排水工程的建设显得尤为重要。取排水活动不可避免地对工程邻近水域的流场产生影响, 因此, 对工程附近潮流场进行系统分析是十分必要的。以营口 LNG 码头工程为例, 利用开源水动力数值模型 FVCOM, 模拟并对比分析营口 LNG 码头取排水工程实施前后港区内的潮流场水动力特性, 重点探讨了取排水口建设对附近三维流场的影响。模拟结果表明: 工程实施后取排水口附近潮流场的表层及底层流速幅值均有轻微变化, 但表层最大流速变化量不超过 0.05 m/s。通过对港区内典型测点处的表层横流流速进行分析, 发现各特征点位的横流流速差最大不超过 0.016 m/s。综上, 取排水工程的实施对研究区域内潮流场水动力特性的影响范围十分有限, 特别是对整体潮流场的分布规律未产生显著改变。研究成果可为同类型港口工程的设计与评估提供参考。

关键词: LNG 码头; 取排水工程; 水动力特性; 横流

中图分类号: U651.1; U652.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)07-0093-12

Application of three-dimensional tidal current model in water intake and drainage project of Yingkou LNG terminal

HE Jun^{1,2}, WU Zheng¹

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2. PDI Jinghua Engineering Management Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Given that liquefied natural gas (LNG) terminals require large quantities of seawater as a cold source during operation, the construction of water intake and drainage projects is particularly important. Water intake and drainage activities inevitably have an impact on the flow field of the adjacent water areas of the project. Therefore, it is necessary to conduct a systematic analysis of the tidal current field near the project. This study takes the Yingkou LNG terminal project as an example and utilizes the open-source hydrodynamic numerical model FVCOM to simulate and compare the hydrodynamic characteristics of the tidal current field within the port area before and after the implementation of the water intake and discharge project of Yingkou LNG terminal. The focus is on investigating the impact of water intake and drainage outlet construction on the nearby three-dimensional flow field. The simulation results indicate that after the project implementation, there are slight changes in the surface and bottom flow velocity amplitudes of the tidal field near the water intake and drainage outlet, but the maximum change in surface flow velocity does not exceed 0.05 m/s. By analyzing the surface cross-flow velocities at typical measurement points within the port area, it is found that the maximum difference in cross-flow velocity among the characteristic points does not exceed 0.016 m/s. In summary, the implementation of water intake and drainage engineering has a very limited impact on the hydrodynamic characteristics of the tidal field in the study area, especially on the overall distribution pattern of the tidal field, which has not undergone significant changes. The research results can provide reference for the design and evaluation of similar engineering in ports.

Keywords: LNG terminal; water intake and drainage project; hydrodynamic characteristics; cross-flow

收稿日期: 2024-10-15

*基金项目: 中交集团重大科技项目(2023-ZJKJ-13)

作者简介: 何军(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事工程项目管理与技术咨询工作。

随着全球能源结构的低碳化转型,液化天然气(liquefied natural gas,LNG)作为清洁能源的重要性日益凸显。我国沿海地区凭借地理优势,已成为 LNG 接收站建设的重点区域^[1]。然而,LNG 项目在运营过程中需要大量海水作为冷源,其循环冷却水排放(冷排水)可能对邻近海域的水动力环境与生态系统产生深远影响^[2]。姚珊珊等^[3]采用二维潮流和温度扩散数学模型,模拟舟山 LNG 码头冷排放后的温度扩散,统计不同温降的扩散面积,并评估对周围保护区的影响。张焯等^[4]采用二维潮流和泥沙数学模型,通过多重嵌套的方法模拟龙口南山 LNG 码头取排水工程实施后的潮流运动和泥沙冲淤情况;研究结果表明工程实施后,取水口附近的最大冲刷深度为 0.07 m,而排水口附近的最大冲刷深度为 1.07 m,且影响范围局限于排水口周围 300 m 以内。柏育材等^[5]通过实验室毒理实验模拟 LNG 工程冷排水中余氯排放的影响,并结合余氯扩散场数值模型,分析余氯对海洋鱼类毒理效应的影响;研究发现:当余氯浓度较高时,仔鱼会出现死亡现象,而幼鱼的死亡率则受到余氯影响较小。尽管现有研究多聚焦于温排水或冷排水的温度扩散效应,但工程实施对局部水动力条件的改变同样是评估环境影响、优化工程设计的关键基础。

营口 LNG 码头作为我国北方重要的能源交通枢纽,其取排水工程的设计需兼顾工程安全与生态保护需求。魏秀兰^[6]利用 MIKE21 等模型对类似工程的温排水扩散规律进行了探讨,但对三维水动力场的精细化模拟仍存在不足,尤其是工程对垂向流速结构、自由液面高程的影响尚未明晰。

此外,现有研究多采用结构化网格模型,难以精确刻画复杂岸线边界条件下的流场细节。FVCOM 模型(finite volume community ocean model)使用有限体积法、三维 Navier-Stokes 方程,综合了有限差分与有限元的优点,确保每个控制体单元以及整个计算域的质量和体积守恒,广泛应用于河口和海洋交汇以及海湾地区的水动力模拟研究^[7-12]。本研究以开源程序 FVCOM 为核心工具,聚焦水动力场的多维响应,旨在为后续温度扩散研究及工程优化提供数据支撑。

1 工程概况

营口 LNG 码头位于营口港仙人岛港区港池内(图 1)。仙人岛港区坐落于辽东半岛西岸,鲅鱼圈港区以南,北距鲅鱼圈约 14 km,距营口市约 70 km。工程附近水深条件较好,0、2 m 等深线贴岸展布,5 m 等深线距岸 2~5 km,10 m 等深线距岸 10~13 km。工程附近水下地形变化趋势,自近岸至辽东湾中部倾斜,水深由 0 m 增至 20 m 以上。当前,仙人岛至望海寨河沿岸基本为人工岸线,区域内分布有仙人岛港区、鲅鱼圈港区及鞍钢生产基地等。仙人岛港区和鲅鱼圈港区均为环抱式港池,入口水深为 6~7 m。该工程的主要建设目标是设立取水口和排水口,以确保为储罐冷却、气化器运行及消防系统提供充足的水源,从而保障低温液态天然气的储存安全与高效气化。此外,工程还通过有序排放工艺冷却废水、雨水及处理后的生产废水,维持厂区水量平衡,防范内涝风险,并保障厂区整体运行的稳定性。

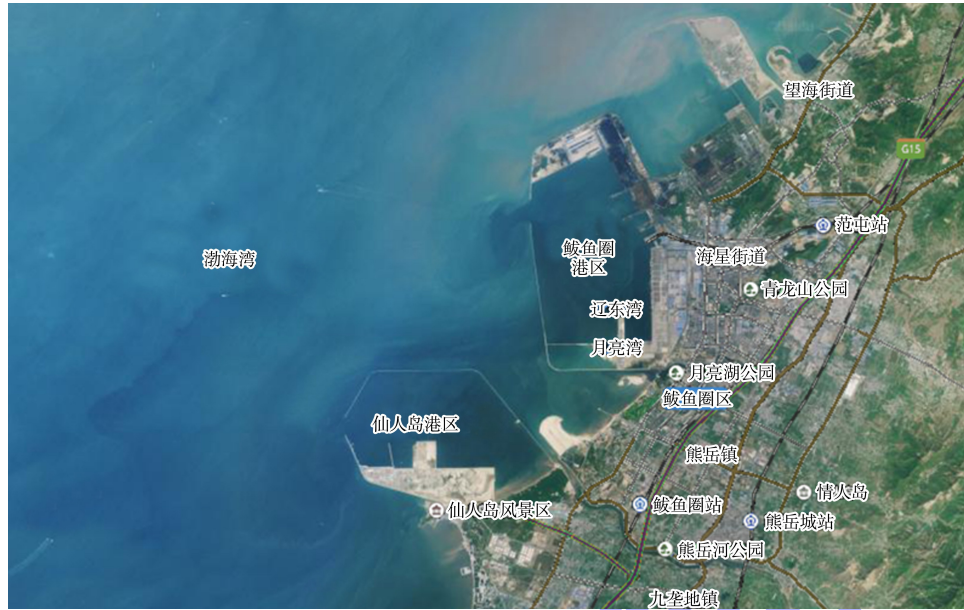


图 1 仙人岛港区港池分布

Fig. 1 Distribution of dock basins in Xianrendao Port area

2 数学模型及其验证

2.1 模型介绍

本文采用 FVCOM 无结构网格有限体积近海数值模式。在水平方向上 FVCOM 使用无结构三角形网格系统, 在垂直方向上使用 σ 坐标变换, 模型采用有限体积法, 通过对无结构三角形控制体通量的积分求解控制方程, 并采用二维外模与三维内模模态分离技术节省计算时间。该模式能够准确拟合复杂岸线, 并能对局部区域进行加密, 确保质量、动量、盐度和热量的守恒性^[11-12]。

2.2 控制方程组

连续性方程:

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

动量方程:

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

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

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad (4)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_s \quad (5)$$

$$\rho = \rho(T, S) \quad (6)$$

式中: x 、 y 、 z 对应笛卡尔直角坐标系中的东、北和垂向坐标; u 、 v 、 w 分别为东、北及垂向上的速度分量; S 、 ρ 、 P 分别为盐度、密度、压力; f 为科氏力参数; g 为重力加速度; K_m 为垂向湍黏性系数; K_h 为热力垂向湍摩擦系数; F_u 、 F_v 为动量在东、北方向上的分量; F_θ 、 F_s 分别为温度、盐度扩散项; T 为温度, 取恒定值。

2.3 模型建立

本文建立了适用于仙人港海域的潮流水动力模型。为拟合复杂岸线和航道、堤线等细致建筑物边界, 对计算域采用无结构三角形网格进行离散。相应的计算网格见图 2, 本模型中计算网格共含 79 370 个网格节点, 152 110 个网格单元, 最小网格分辨率约为 1 m。在计算中, 竖直方向上共设置 10 层 σ 网格层以满足数值计算的要求, 本模型共计使用 152 万计算网格单元。三维模型底床糙率通过曼宁系数进行控制, 曼宁系数取值 0.3~0.5。水平紊动黏性系数 C_s 采用 Smagorinsky 公式

计算,取 0.2~0.3。水平扩散系数主要与水流流速和紊动等相关,采用涡黏比例公式计算,比例因子取 1。

工程以黄海平均海面为标准基面,根据实测数据将黄海基面以下 2.145 m 定义为验潮基面。LNG 取水口底高程为-7.595 m、高度 3.5 m,对应上顶高程为-4.095 m;排水口底高程为-5.560 m,高度 2.5 m,上顶高程为-3.060 m。计算从“冷态”启动开始,即在模型的初始时刻,计算区域内的水体处于静止状态,计算域内所有网格点的水

位和流速均设为零。研究选用 2023 年 7 月 25 日—8 月 12 日期间大连(老虎滩)和烟台 2 个观测站的实测潮位数据,作为驱动研究区域计算的依据。在三维数值模型构建过程中,通过在取排水口位置处精准设置源与汇模块,实现对该区域取水、排水动态过程的精细化模拟。源汇项的流量数据根据取、排水口不同工况计算确定,本次潮流数值模拟取排水量按照终期最大取水量 3.80 万 m³/h 以及最大排水量 4.60 万 m³/h 进行计算。

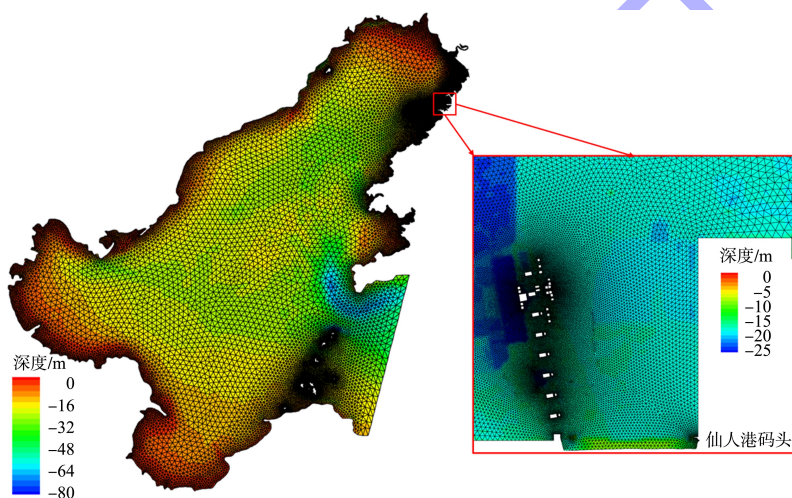


图 2 模型计算范围

Fig. 2 Model calculation range

2.4 模型验证

本文采用菊花岛、营口、鲅鱼圈和团山角等 4 个验潮站于 2023 年 7 月 27 日—8 月 10 日的潮位实测资料,验证数值计算模式的水位计算可靠性。流速和流向验证则采用 2023 年 7 月 27 日—8 月 10 日在埡北及渤海航线测站的 312 h 的流速和流向实测资料,潮位见表 1。潮流流速和流向选取测点为埡北及渤海航线测站,其经纬度分别为 (118.5W,38.5N) 和(118.55W,38.5167N)。

不同潮位站点处的潮位 ζ 变化对比见图 3,由图可知,研究构建的潮流数值计算模型能够准确地计算不同位置的潮位变化过程。埡北及渤海航线 2 个测站处表层流速和流向的对比见图 4,结果表明,2 个测站的表层流速和流向的模拟结果与实

测数据相符良好。图 3、4 的计算结果表明:潮位、潮流流速和潮流流向的时程变化与实测数据的吻合度较高。由此可见,研究构建的施工区域潮流计算模型能够较为准确地反映整个计算区域的潮流演化规律,为分析取水和排水工程实施前后的潮流演化特征提供了重要基础。

表 1 潮位监测站位布设

Tab. 1 Layout of tidal level monitoring stations

站位	经度 W	纬度 N
菊花岛	120.833 3	40.483
鲅鱼圈	122.083 3	40.300
营口	122.150 0	40.633
团山角	120.466 7	40.233

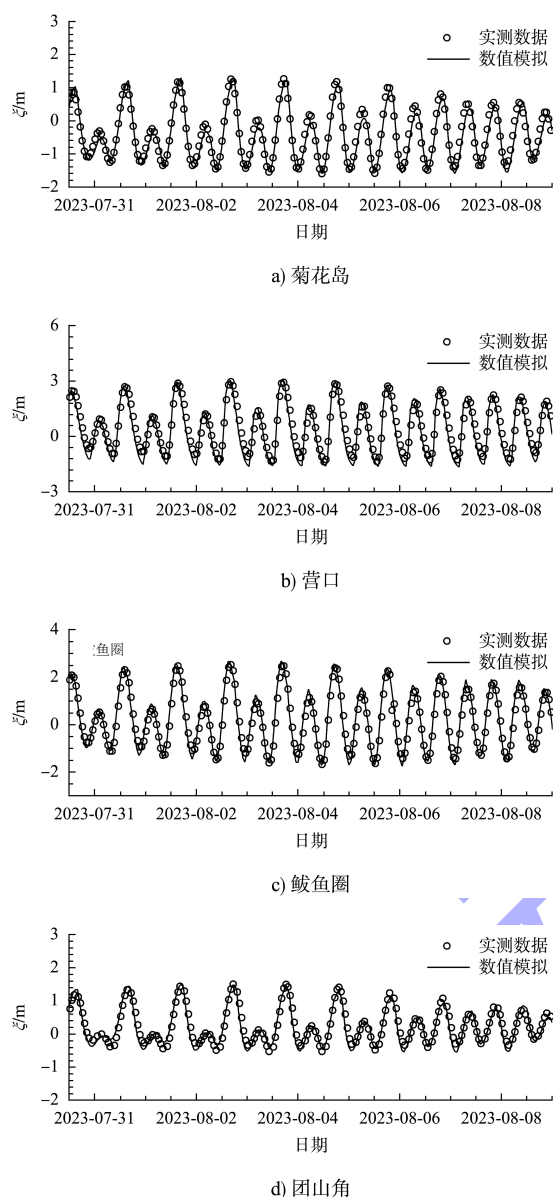


图3 各测点实测数据与数值模拟潮位对比

Fig. 3 Comparison of measured data and numerical simulation of tidal levels at each measurement point

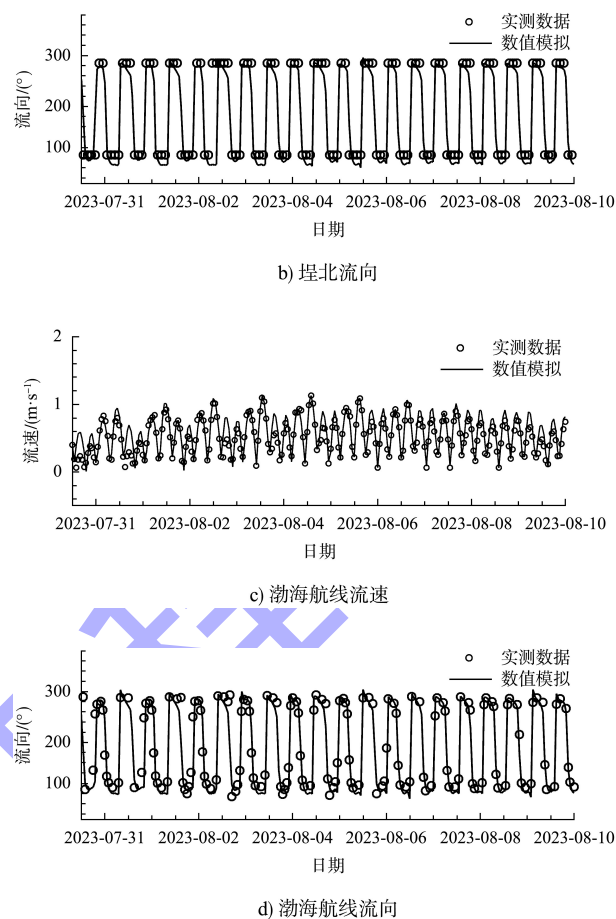
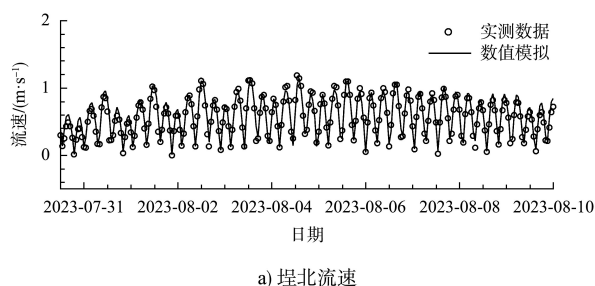


图4 各测点处实测数据与数值模拟潮流流速与流向对比

Fig. 4 Comparison of measured data and numerical simulation of tidal current velocity and direction at each measurement point

为了进一步验证数值计算模式在施工区域(仙人港区)周边的计算可靠性,依据2020年3月27—28日(大潮)在工程海域3个的大潮水文同步实测数据,验证研究区域(仙人港区)周边的模型计算可靠性,实测站点分布见图5,其中 T_1 代表潮位测点, S_1 、 S_2 及 S_3 为潮流测点。验证结果见图6、7,整体上潮位以及潮流的模拟结果与实测数据吻合程度较好,说明此三维潮流水动力数值模型可较好地描述仙人港区及其周边海域潮流场的运动规律。



图 5 2020 年春季大潮潮流测站位置

Fig. 5 Location of tidal current measurement station for spring tide in 2020

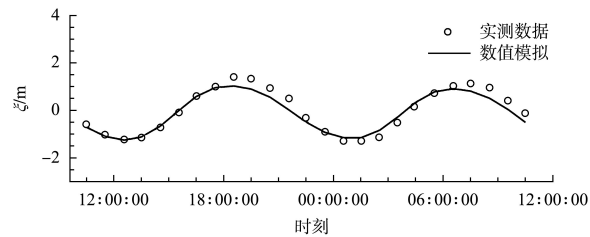
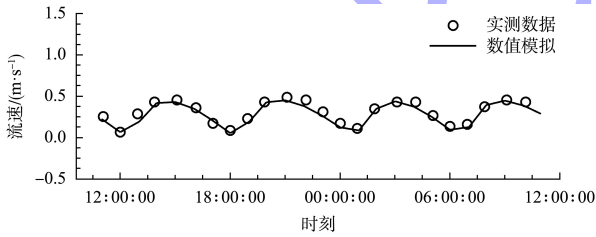
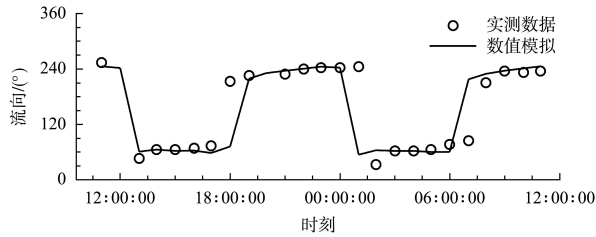


图 6 T₁ 测站处实测数据与数值模拟潮位对比

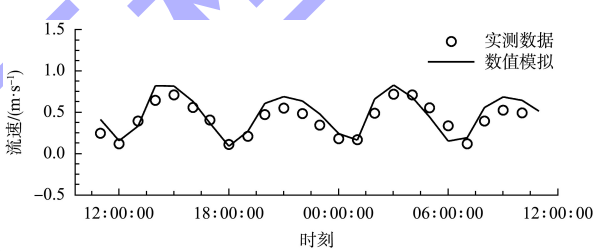
Fig. 6 Comparison of measured data and numerical simulation of tidal levels at station T₁



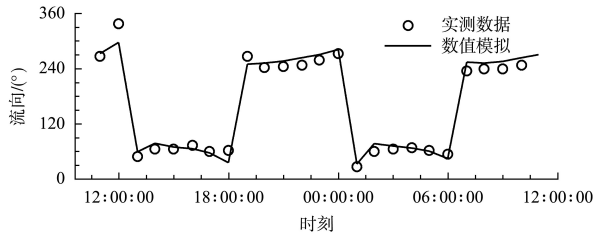
a) S₁测站流速



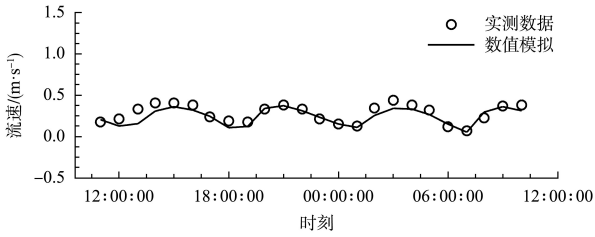
b) S₁测站流向



c) S₂测站流速



d) S₂测站流向



e) S₃测站流速

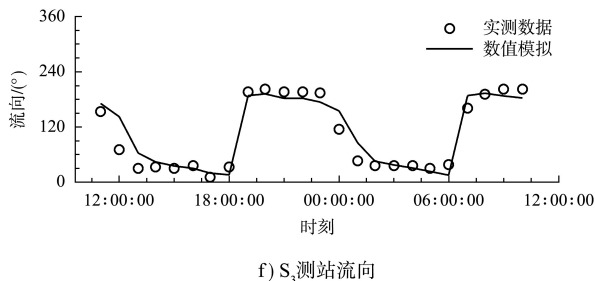
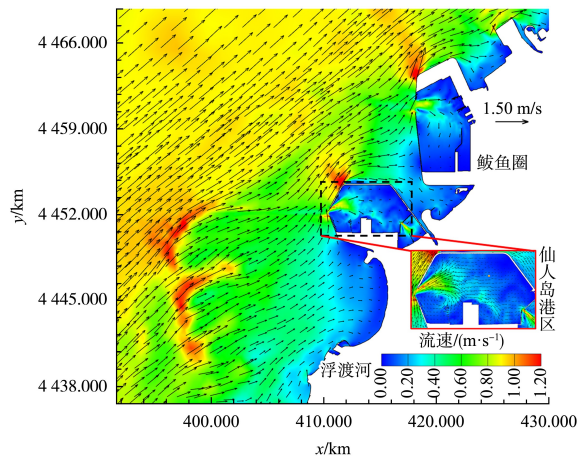


图 7 不同测站处实测数据与数值模拟流速与流向对比
Fig. 7 Comparison of measured data and numerical simulation of tidal current velocity and direction at different stations

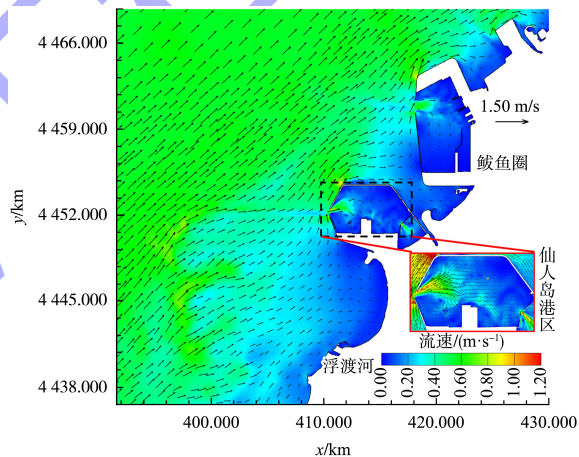
3 水动力模拟

研究以 2023 年全年大潮为代表潮型, 取排水工程实施后, 涨急与落急时刻大范围 and 局部海域的流场特征见图 8、9。该海域的潮流运动呈现典型的往复流态特征, 主流方向大致与辽东湾东侧岸线平行, 其中涨潮流偏向 NE 方向, 落潮流偏向 SW 方向。在涨潮时, 外海潮流由西南向东北流动, 至港区时, 潮流受防波堤堤线影响, 沿堤流动并分为两股: 一股通过口门进入港内, 另一股沿北侧防波堤继续向北流动。在涨急时刻, 进入港内的涨潮流在二港池内形成顺时针方向的小范围环流, 港内表层最大流速可达 0.36 m/s, 底层最大流速为 0.31 m/s。环流范围覆盖整个一港池和二港池, 约 1.5 km×1.8 km。随着落潮过程的推进, 口门环流逐渐减弱。在落急时刻, 落潮流在二港池和口门南防波堤荫蔽区分别形成 2 个小范围的逆时针环流。此时, 二港池内的表层最大流速为 0.30 m/s, 底层最大流速为 0.28 m/s, 范围约 0.8 km×0.8 km; 而口门南侧防波堤荫蔽区的表层最大流速约为 0.50 m/s, 底层流速为 0.44 m/s, 范围约 0.9 km×1.2 km。涨潮流形成的港内环流持续贯穿整个涨潮和落潮周期, 整个仙人岛港区内最大流速可达 0.80 m/s。通过对图 8、9 的表层与底层流场进行对比, 可以发现, 由于底部摩擦

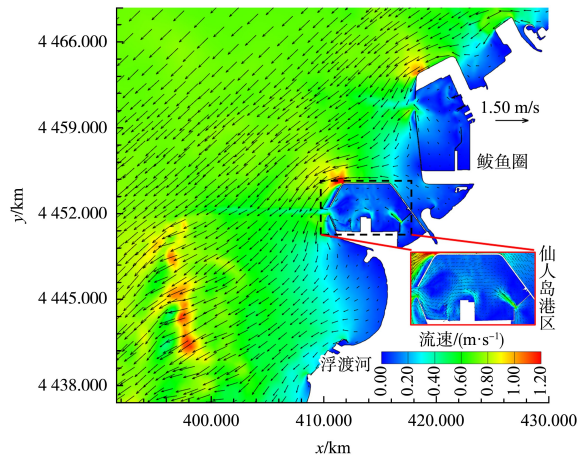
力和黏滞效应的影响, 底层流场的整体流速相对较低, 但其变化趋势与表层流场一致。



a) 涨急时表层流场



b) 涨急时底层流场



c) 落急时表层流场

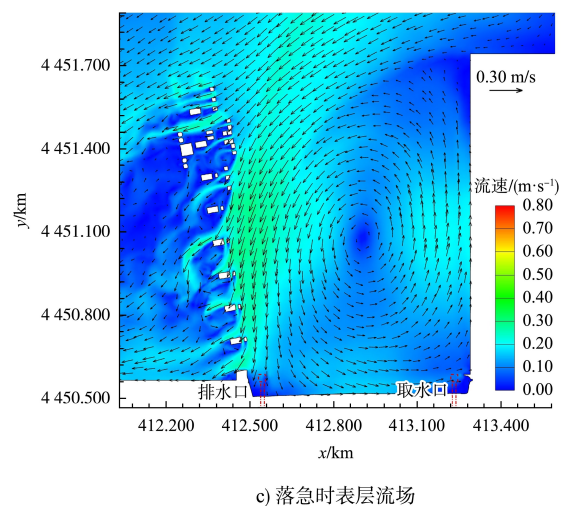
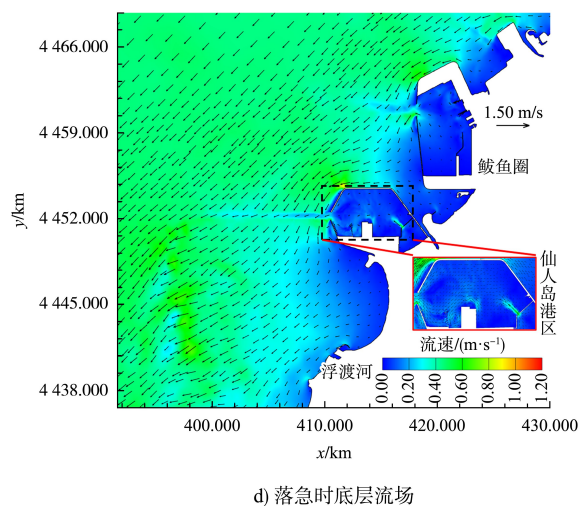


图 8 工程后潮流场取排水口附近大范围流场对比
Fig. 8 Comparison of large-scale flow fields near water intake and drainage outlets after the project

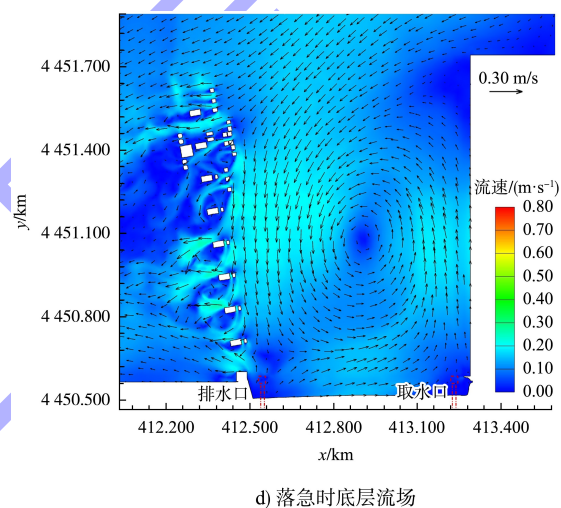
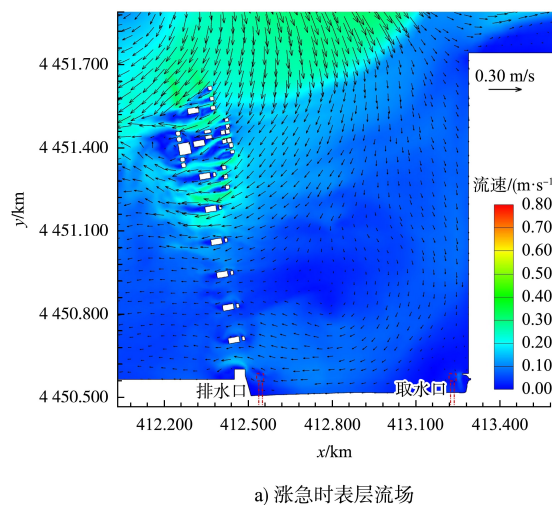
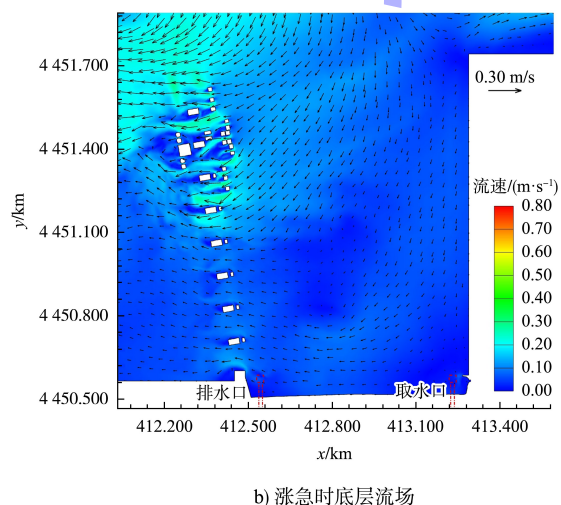


图 9 工程后潮流场取排水口附近局部流场对比
Fig. 9 Comparison of local flow field near water intake and drainage outlets after the project



总体而言,近岸潮流运动主要受岸线及地形变化的影响,表现为岬角及防波堤堤头处的挑流现象,岬角间湾内水域为弱流区,而岬角背流侧则出现局部回流。流速分布上,潮流在外海及岬角水域较强,而在近岸及湾内水域较弱。此外,仙人岛环抱式防波堤西北角的挑流作用显著,流速较高,大潮期间的表层平均流速可达到 0.80 m/s 以上;防波堤口门处的表层与底层平均流速为 0.20~0.80 m/s;无论是表层流速还是底层流速,港内的平均流速均普遍低于 0.30 m/s。

为了深入分析取排水工程对周边海域流场的影响,图10为取排水工程实施前后,局部海域在大潮期间最大流速及其方向差值的对比。排水口位于二港池西侧的彩虹桥墩附近,受桥墩间水流进出影响,该区域背景流速较大,表层最大流速变化为 -0.047 m/s 。取水口位于二港池东北角,该区域背景流速较小,表层最大流速变化为 0.04 m/s 。由于彩虹桥墩及岸线的存在,取排水口对最大流向差也产生了一定的影响。

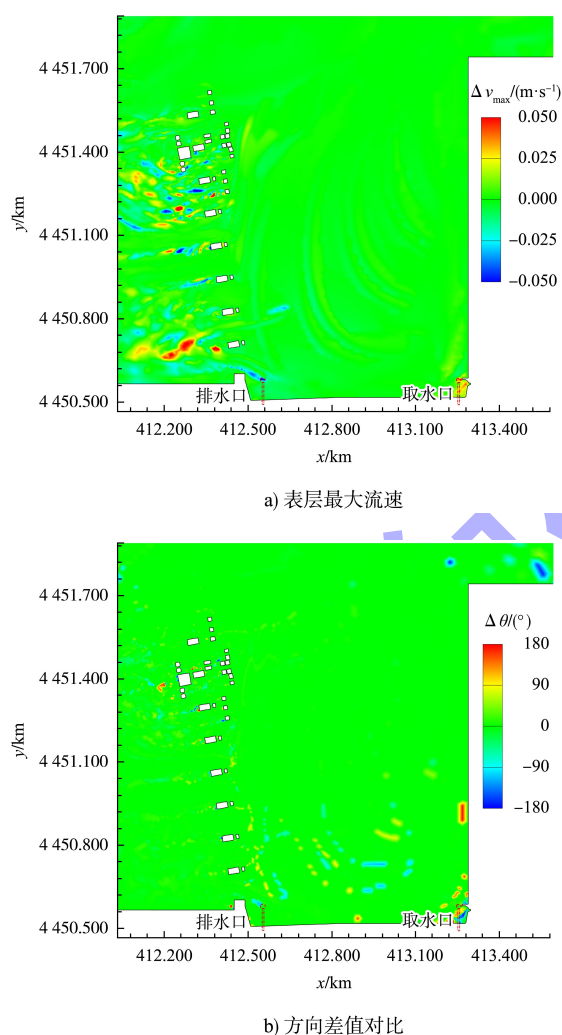


图10 取排水口工程前后潮流场表层最大流速及方向差值对比

Fig. 10 Comparison of maximum current velocity and direction difference on surface before and after implementation of water intake and drainage outlets project

由图11可知,取排水口设置对周围局部流场的影响。取水口和排水口的取水量分别为 $3.8\text{ 万 m}^3/\text{h}$

(约 $10.55\text{ m}^3/\text{s}$)和排水量 $4.6\text{ 万 m}^3/\text{h}$ (约 $12.77\text{ m}^3/\text{s}$)。从图中可以看出,排水口附近的影响范围较为局限,仅在NW方向产生轻微的流速变化,且影响区域较小;而取水口附近由于靠近岸线,且受到岸线反射的影响较大,导致取水流对周围流速产生明显变化,流速方向偏向SE。总体来看,取排水工程实施前后对二港池区域最大流速的影响较为有限,流速变化范围约为 $\pm 0.05\text{ m/s}$,对整体流场的影响不显著。由此可见,尽管局部流场发生了轻微变化,但整体潮流特征保持稳定,未对工程区内潮流运动产生显著干扰。

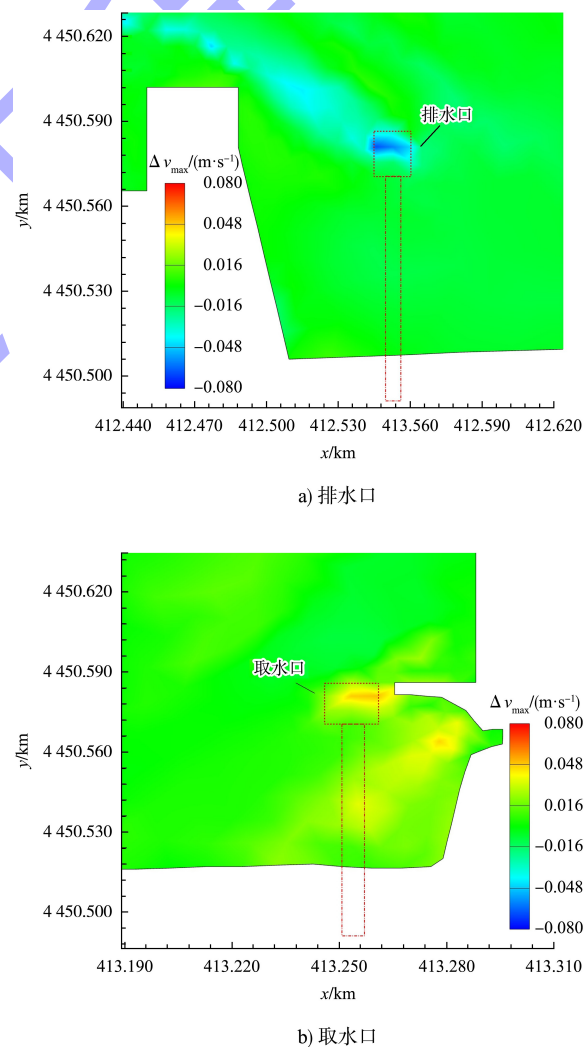


图11 排水口工程前后局部潮流场表层最大流速差值对比
Fig. 11 Comparison of maximum flow velocity difference on surface of local tidal flow field before and after implementation of water intake and drainage outlets project

4 横流分析

根据 JTS 165—2013《海港总平面设计规范》^[15] 的相关要求, 船舶在作业过程中, 尤其是在各阶段所受横流影响方面, 需满足一定的规范标准。其中, 码头前沿的横流对船舶靠泊与停稳的安全性具有关键影响。过大的横流不仅会增加靠离泊作业的难度, 还可能对船体姿态控制及缆绳受力造成不利影响。因此, 采用统计分析方法对码头前沿区域的表层流速的横流特性进行系统评估, 并为后续港口水域通航安全分析提供参考依据。具体分析方法是: 通过提取垂直于码头前沿线的表层流速的流速分量, 将其按照流向划分为拢流(流向陆域)与开流(流向外海)两类。在后续统计处理中, 拢流以负值表示, 开流以正值表示, 从而实现对横流方向性与强度的统一描述。本研究重点选取二港池 6 个典型泊位作为代表样本, 其中泊位 $P_1 \sim P_4$ 布设于 2#原油码头前沿, 泊位 P_5 和 P_6 则位于 LNG 码头区域, 具体测点布设位置见图 12。

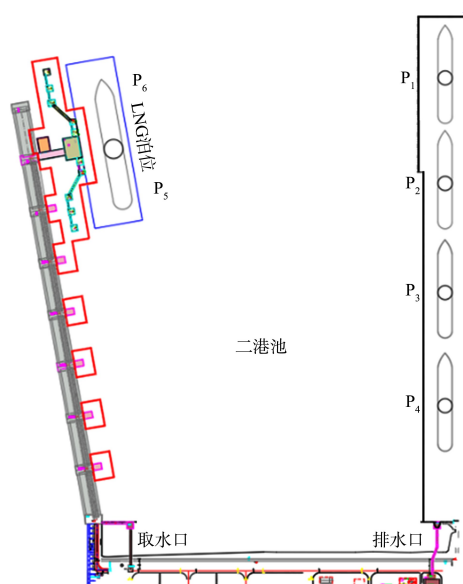
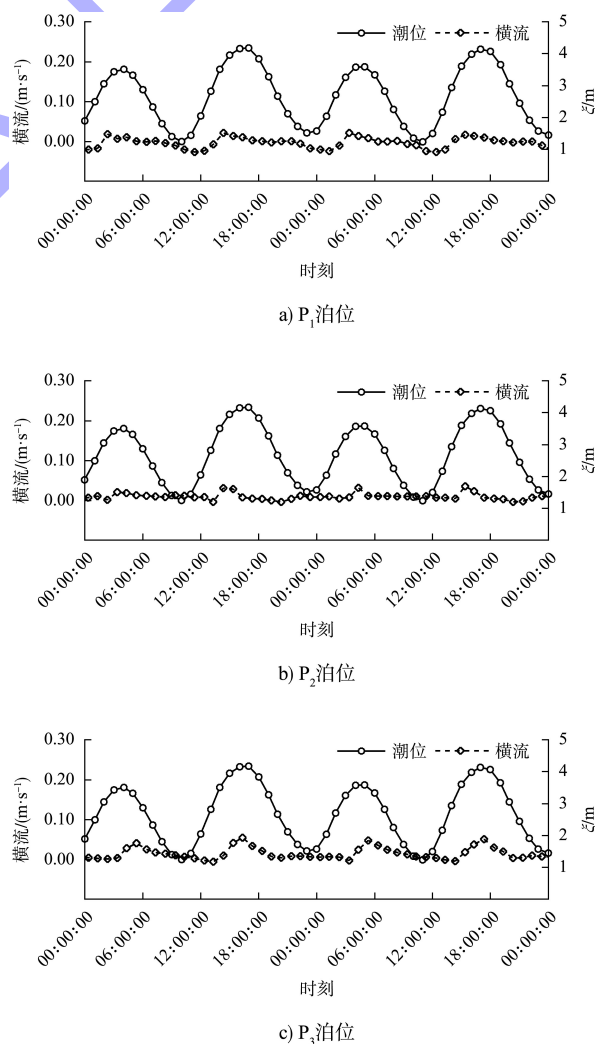


图 12 横流测点布置

Fig. 12 Layout of cross-flow measurement points

根据对垂直分量横流计算的统计结果分析, 见图 13、14。在工程实施前的近期规划工况下, 码头前沿区域的最大横流速出现在 P_6 泊位, 数值

为 0.216 m/s, 计算得到其对应流向为 234.069° , 与码头前沿等时线所形成的夹角为 64.069° 。由于 2#原油码头地处口门环流区东侧, 其前沿水流在整个涨落潮过程中普遍呈 SW 方向偏移, 导致横流以拢流形式占主导。工程实施后, P_6 泊位的最大横流速变化极小, 约为 0.215 8 m/s, 对应流向为 234.858° , 横流仍表现为拢流, 最大流向与码头前沿等时线夹角为 64.858° , 相较工程前仅略有调整。进一步对其他泊位的横流变化比较发现, 工程前后最大横流速的差异均未超过 0.016 m/s, 变化幅度极小, 对船体在靠泊过程中稳定性的影响可忽略不计。与此同时, 对工程实施前后所有特征测点横流速的统计结果表明, 最大横流流速均未超过 0.30 m/s, 说明码头前沿区域整体横流强度处于较低水平, 水动力条件较为平稳。



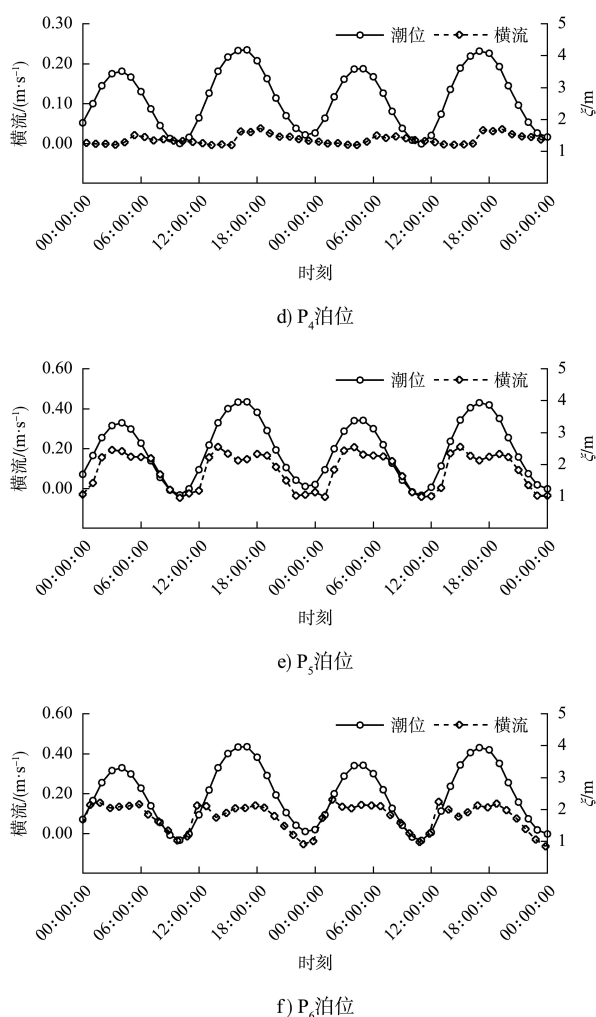


图 13 取排水工程前沿泊位特征点横流历时曲线

Fig. 13 Duration curves of cross-flow along characteristic points of berth before water intake and drainage project

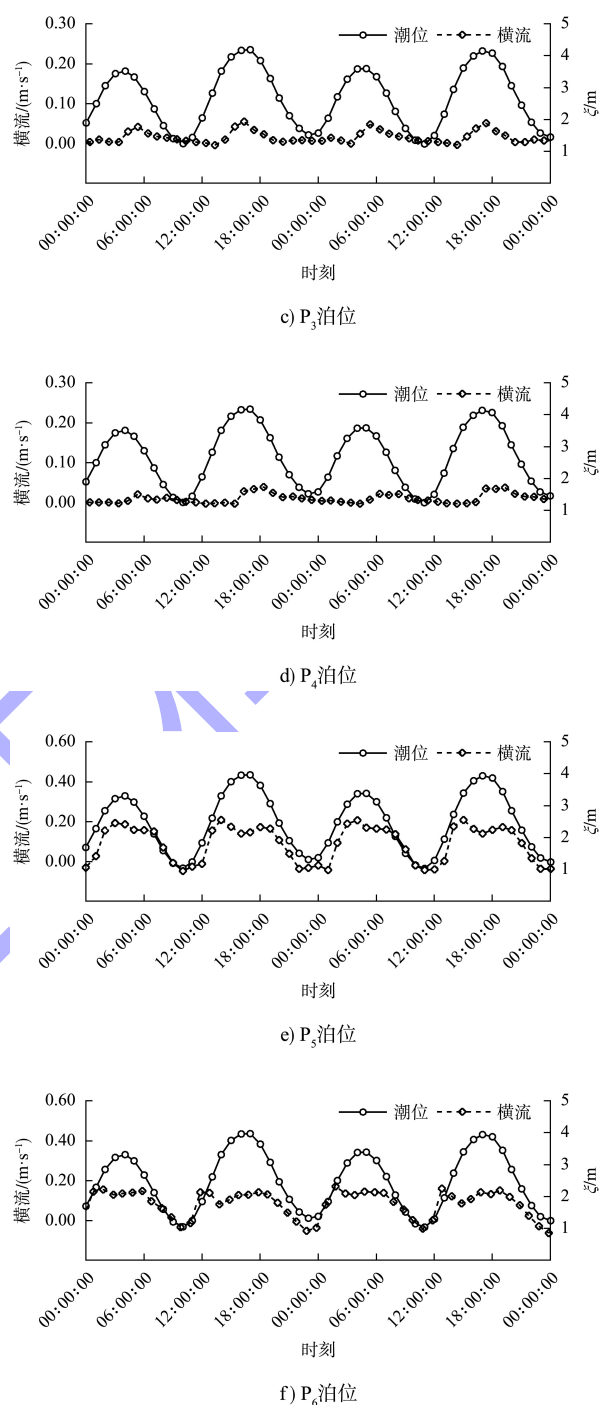
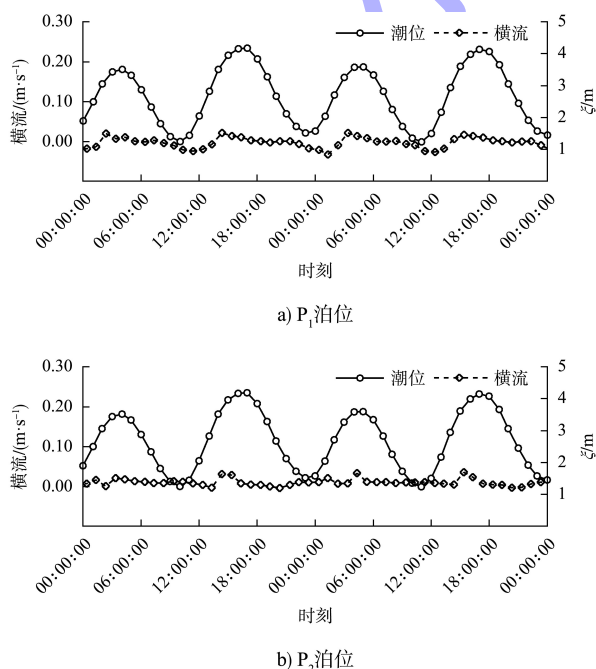


图 14 取排水工程后沿泊位特征点横流历时曲线

Fig. 14 Duration curves of cross-flow along characteristic points of berth after water intake and drainage project

综上,在取排水工程实施前后,码头前沿横流特性保持基本一致,变化幅度较小,未对原有水动力格局产生显著影响,验证了该取排水工程设计在保障作业水域通航安全性方面的科学性与可行性,为后续港区运行管理及船舶作业提供了良好的水动力环境基础。

5 结论

1) 工程海域涨、落潮流基本呈顺岸往复运动, 涨潮流偏 NE, 落潮流偏 SW。近岸潮流运动主要受岸线和地形变化影响, 表现为岬角及防波堤堤头处存在挑流, 岬角间的湾内水域则多为弱流区, 岬角背流侧水域存在局部回流。从流速分布来看, 潮流总体呈现外海及岬角水域流速较高、近岸及湾内水域流速较低的特点。

2) 取排水口工程实施后, 取排水口附近的流速变化主要局限于局部区域, 特别是在二港池的取排水口周围, 流速变化幅度未超过 ± 0.05 m/s。排水口区域由于受桥墩间水流的影响, 流速变化较小, 扰动幅度有限。总体来看, 尽管取排水口的建设对局部区域流速产生了一定的影响, 但这些变化并未显著改变整体潮流场的分布规律。

3) 取排水工程实施前后码头前沿区域的横流特性变化微弱, 最大横流速始终低于 0.30 m/s, 对船舶靠泊与停稳的影响较小, 说明工程方案在水动力调控及通航安全保障方面具有良好的适应性与工程可行性。

4) 研究为进一步优化 LNG 码头取排水系统的设计提供了理论依据, 尤其在水动力特性和生态保护的平衡方面。尽管目前的研究表明取排水口的水动力影响较小, 但仍建议在实际运营过程中加强对附近海域水质和生态环境的监测, 确保水动力变化对周围海洋生物的潜在影响最小化。

参考文献:

- [1] 杨婷, 杨彩燕. 沿海港口 LNG 码头选址要素分析[J]. 水运工程, 2024(8): 71-75.
YANG T, YANG C Y. Site selection factors for LNG terminal in coastal port[J]. Port & waterway engineering, 2024(8): 71-75.
- [2] 奚泉, 王青松. LNG 码头冷排水对取水口温降影响研究[J]. 中国水能及电气化, 2020(6): 53-58.
XI Q, WANG Q S. Study on the Influence of cold drainage from LNG terminal on the temperature drop of water intake [J]. China water power & electrification, 2020(6): 53-58.
- [3] 姚姗姗, 解鸣晓, 赵洪波. 舟山海域 LNG 码头工程冷排放数值模拟研究[J]. 水道港口, 2016, 37(3): 264-268.
YAO S S, XIE M X, ZHAO H B. Numerical study on cold water emission for LNG project in Zhoushan sea area[J]. Journal of waterway and harbor, 2016, 37(3): 264-268.
- [4] 张焯, 姚姗姗. LNG 码头取排水工程潮流泥沙数值模拟研究[J]. 中国水运, 2021(1): 151-153.
ZHANG Z, YAO S S. Numerical simulation of tidal current and sediment in LNG terminal water intake and drainage project[J]. China water transport, 2021(1): 151-153.
- [5] 柏育材, 李鸣, 徐兆礼, 等. 冷排水中余氯对鱼类毒理效应和资源损失量估算方法的研究[J]. 生态毒理学报, 2011, 6(6): 634-642.
BAI Y C, LI M, XU Z L, et al. Toxic effects of residual chlorine from cooling water on fish and evaluation method of fishery resources loss[J]. Asian journal of ecotoxicology, 2011, 6(6): 634-642.
- [6] 魏秀兰. 滨海 LNG 工程循环冷排水口方案优化研究: 以营口 LNG 项目为例[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
WEI X L. The study of cold drain of coastal LNG project cycle optimization: taking Yingkou LNG project as an example[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [7] 胡松, 陈长胜, 高郭平, 等. 全球非结构网格有限体积法海洋模式东中国海潮汐计算初步分析[J]. 上海海洋大学学报, 2012, 21(4): 621-629.
HU S, CHEN C S, GAO G P, et al. Preliminary analysis of tide simulation of the East China Sea of the Global-FVCOM model[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2012, 21(4): 621-629.
- [8] 贾晗, 王鑫珏, 冯司宇. 填海造陆围堰工程龙口水动力数值模拟[J]. 水运工程, 2024(10): 19-26.
JIA H, WANG X J, FENG S Y. Hydrodynamic numerical simulation of closure gap in reclamation cofferdam project. [J]. Port & waterway engineering, 2024 (10): 19-26.
- [9] 骆明钧, 李骏旻, 丁扬, 等. 基于 FVCOM 的夏季珠江冲淡水年际变化特征[J]. 海洋科学进展, 2024, 42(2): 221-237.
LUO M J, LI J M, DING Y, et al. Inter-annual variation characteristics of the Pearl River diluted water in summer based on FVCOM [J]. Advances in marine science, 2024, 42(2): 221-237.