



舟山复杂海域条件下新建码头工程水动力及泥沙冲淤变化研究*

陆 凡，沈良朵

(浙江海洋大学 船舶与海运学院，浙江 舟山 316000)

摘要：基于水动力条件在海岸带地区海工建设研究中的重要性，考虑到舟山群岛水道纵横、岛屿密集的特点，其水动力环境尤为复杂。为掌握区域工程建设对该海域的影响，结合实测资料对舟山群岛定海海域潮流场演化过程展开二维数值模拟研究。在此基础上，进一步对定海盘峙岛某码头区域进行涨潮、落潮时潮流场与冲淤分布的详细分析。结果表明，整体上看，工程后周边海域潮流流态没有较大改变，仅在码头周边1 500 m范围之内主要受码头和附近船厂方向的反向潮流影响，流向发生反方向流动；码头的阻流作用对工程较小范围内的流速变化较为明显，码头南北两侧和西蟹村岛北侧的流速分别呈现出减小和增大的趋势；受局部工程影响，整体冲淤变化区域主要集中在码头周边海域，其中淤积的海域主要集中在码头附近、造船厂东西两侧区域，冲刷的海域主要集中在盘峙岛和西蟹村岛拐角处的挑流区域。

关键词：潮流；泥沙冲淤；定海海域；数值模拟

中图分类号：P 737.13；U 652

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2022)08-0024-08

Hydrodynamics and sediment erosion and silt change of new wharf project in complex sea area of Zhoushan

LU Fan, SHEN Liang-duo

(School of Naval Architecture and Maritime, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, China)

Abstract: Based on the importance of hydrodynamic conditions in the study of marine engineering construction in coastal zone, the hydrodynamic environment of Zhoushan Islands is particularly complex due to its vertical and horizontal waterways and dense islands. In order to grasp the influence of regional engineering construction on the sea area, we carry out a two-dimensional numerical simulation study on the evolution process of tidal current field in Dinghai sea area of Zhoushan Archipelago based on the measured data. On this basis, we analyze the tidal current field during high tide and low tide and the distribution of scouring and silting in detail in a wharf area of Panzhi Island in Dinghai. The results show that on the whole, the tidal current pattern of the surrounding sea area is not changed greatly after the project. Only within 1 500 m around the wharf, it is mainly affected by the reverse tidal current of the wharf and the nearby shipyard, and the flow direction is reversed. The flow velocity in a small area of the project is changed by the flow resistance of the wharf. The flow velocity on the north and south sides of the wharf and the north side of Xixie Village Island shows a trend of decrease and increase respectively. Affected by local projects, the overall change area of scouring and silting is mainly concentrated in the

收稿日期：2021-12-27

*基金项目：浙江省属高校基本科研业务项目(2021JZ008)

作者简介：陆凡(1997—)，男，硕士研究生，研究方向为近海岸水动力学。

通讯作者：沈良朵(1982—)，男，博士，讲师，研究方向为近岸水动力和物质输运。E-mail: slduo@163.com

sea area around the wharf. Among them, the silted sea area is mainly concentrated near the wharf and on the east and west sides of the shipyard. The scour area is mainly concentrated in the catchment area at the corner of Panzhi Island and Xixie Village Island.

Keywords: trend; sediment erosion and deposition; Dinghai sea area; numerical simulation

在海岸带等地区的水动力研究过程中,潮流场的演化研究是必不可少的一个环节。特别是在沿海地区开展海洋工程建设前,研究并掌握其周围的典型潮流场特征至关重要。沿海地区近海岸侧的发展需求使海上构筑物相继出现,对其附近区域的潮流场产生一定变化,进而影响泥沙冲淤的分布情况。

国内外诸多学者通过数值模拟分析这一高效手段展开了系列研究。刘金鹏等^[1]借助 MIKE 21 软件建立龙口离岸人工岛及附近海域的水动力和波浪模型,给出高潮位条件下不同波向对应的波高值以及潮流数据;李鹏等^[2]也使用 MIKE 21 软件建立包含潮汐和泥沙单元的数值模型,用于模拟工程施工对潮流场的影响,并计算了大风浪条件下的骤淤分布规律;邵准远^[3]基于 Delft 3D 软件对长江澄通河段建立水动力模型,利用模型流场模拟结果对该河段的涨、落潮流及沙岛形成展开研究;Han 等^[4]对三维海洋潮流展开模拟研究,并验证了该方法处理该类问题的准确性;尹志清^[5]在水动力-生态耦合模型 COHERENS 的基础上,进一步完善三维水动力与悬沙耦合数值模型 COHERENS-SED,并利用该模型对某滩海陆岸井台及进海路工程建设前后的潮流场和泥沙冲淤变化特征进行模拟分析;通过建立两水平 two-level 方法, Hewageegana 等^[6]基于潮流场对泥沙输运的影响展开模拟研究。

针对舟山群岛海域范围内水道交错,受岛屿坐落密集的影响,其水动力环境复杂,且对工程建设前后的水动力及泥沙冲淤研究较少,故本文采用 MIKE 21 建立舟山群岛附近海域二维水动力模型,通过与实测资料拟合,验证模型的适用性。

基于此,进一步对舟山定海盘峙某码头区域进行涨、落潮流场分析,并结合半理论半经验公式对工程建设后该区域泥沙冲淤分布进行预测,可为工程安全性问题提供科学指导。

1 区域概况

本工程位于舟山群岛盘峙岛以西的定海海域,码头中心位置为 N29°59'26", E122°03'57"。码头自北往南布置,由 20.6 m×8 m(长×宽)的栈桥、23 m×12 m(长×宽)的通车平台、桥台墩、2 个门架墩、1 个钢吊桥、1 座人行钢过桥及靠泊平台构成,占用岸线 116 m。工程位置见图 1。



图 1 工程位置

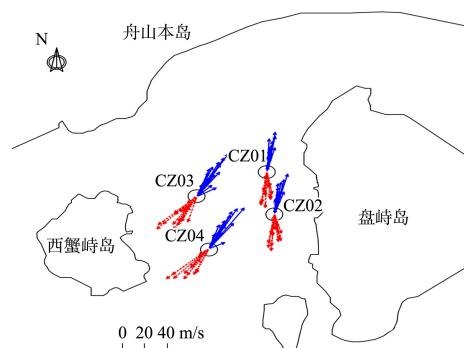
1.1 潮汐特征

根据大鱼山短期潮位站实测资料,以主要全日分潮流 K_1 和 O_1 的椭圆长半轴之和与主要半日分潮流 M_2 椭圆长半轴之比,计算得到潮型系数 $F=1.6$ ($0.5 < F < 2$),故该工程海域属于不规则半日潮区,且潮汐的日不等现象比较明显。大潮期实测最高潮位 1.24 m,最低潮位 -1.33 m,最大潮差 2.57 m,最小潮差 2.39 m。小潮期实测最高潮位 0.87 m,最低潮位 -1.22 m,最大潮差 2.09 m,最小潮差 1.68 m。大潮期间,涨潮历时 354 min,落潮历时 364~367 min;小潮期间,涨

潮历时 362~366 min, 落潮历时 355 min。

1.2 潮流特征

CZ01~CZ04 共 4 个水文测验点的大潮和小潮平均流速、流向矢量图见图 1, 实测最大流速及流向见表 1。可以看出, 该海域涨潮时主要受东海前进波影响, 并受舟山群岛狭道效应进入杭州湾。潮流呈现出往复流特征, 其中 CZ01 和 CZ02 测站受南侧岛屿岸线的阻挡, 流速值略小于 CZ03 和 CZ04 测站。落潮情况与涨潮基本一致。



注: 虚线为涨潮, 实线为落潮。

图 2 大潮平均流速和流向矢量

表 1 实测最大流速及流向

潮位	测站	涨潮		落潮		平均流速/(m·s⁻¹)
		流速/(m·s⁻¹)	流向/(°)	流速/(m·s⁻¹)	流向/(°)	
大潮	CZ01	1.03	188	1.17	9	1.10
	CZ02	0.98	184	1.15	7	1.07
	CZ03	1.24	233	1.41	26	1.33
	CZ04	1.21	219	1.42	35	1.32
小潮	CZ01	0.87	177	0.94	6	0.91
	CZ02	0.85	184	0.88	2	0.87
	CZ03	1.00	228	1.14	21	1.07
	CZ04	1.07	226	1.12	31	1.10

1.3 悬沙特征

全水域平均含沙量为 0.60 kg/m^3 , 大、小潮期间平均含沙量分别为 0.64 、 0.55 kg/m^3 ; CZ01~CZ04 测站大潮平均含沙量分别为 0.63 、 0.60 、 0.67 、 0.67 kg/m^3 , 小潮平均含沙量分别为 0.56 、 0.51 、 0.57 、 0.57 kg/m^3 。由此可见, CZ03 和 CZ04 测站的含沙量略大于 CZ01 和 CZ02, 考虑该海域平均含沙量可能受到了潮流运动的影响, 潮流作用越强, 底沙越可能悬浮。

1.4 底质分布

根据 2021 年 3 月水文测验悬沙、底质粒度分析结果及底质粒级统计, 全水域平均含沙量为 0.60 kg/m^3 , 悬沙中值粒径在 $6.31\sim8.14 \mu\text{m}$, 平均值为 $7.17 \mu\text{m}$ 。其中, 泥沙以粒径 $1\sim50 \mu\text{m}$ 的粉砂颗粒(约占 60%)和小于 $1 \mu\text{m}$ 的黏土颗粒(约占 40%)为主, 形成了舟山地区大量粉砂质淤泥滩涂。

2 二维水动力模型

2.1 控制方程

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

$$\frac{\partial(d\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(d\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(d\bar{v}\bar{u})}{\partial y} = f\bar{v}d - gd\frac{\partial\eta}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x}(dp_a) - \frac{gd^2\partial\rho}{2\rho_0\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(dT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x}(dT_{xy}) + dp_s S \quad (2)$$

$$\frac{\partial d\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial(d\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(d\bar{v}^2)}{\partial y} = -f\bar{u}d - gd\frac{\partial\eta}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y}(dp_a) - \frac{gd^2\partial\rho}{2\rho_0\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(dT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(dT_{yy}) + dq_s S \quad (3)$$

式中: t 为时间; η 为水面高程; d 为静水深; \bar{u} 、 \bar{v} 分别为 x 、 y 方向上的流速分量的垂向平均值; p_a 为当地大气压; ρ 为水的密度; ρ_0 为参考水密

度; $f = 2\Omega \sin\varphi$ 为柯氏力 (φ 为地理纬度, Ω 为自转角速率, 取 $0.729 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) ; s_{xx} 、 s_{xy} 、 s_{yx} 、 s_{yy} 为波辐射应力分量; T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yx} 、 T_{yy} 为水平黏滞应力项; S 为源汇项; p_s 、 q_s 为源汇项中的水流流速; τ_{sx} 、 τ_{sy} 为表层应力项; τ_{bx} 、 τ_{by} 为底层应力项。

2.2 边界条件

初始条件为:

$$\begin{cases} \zeta(x, y, t) |_{t=0} = \zeta_0 \\ u(x, y, t) |_{t=0} = v(x, y, t) |_{t=0} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: ζ 为潮位; ζ_0 为初始潮位; u 、 v 分别为 x 、 y 方向的流速分量。

边界条件为: 模型开边界用水位控制, 即用式(5)进行潮位预报得到开边界条件。其中, 外海开边界潮位由 16 个主要分潮 (M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 、 Q_1 、 MU_2 、 NU_2 、 T_2 、 L_2 、 $2N_2$ 、 J_1 、 M_1 和 OO_1) 调和常数推算得到。

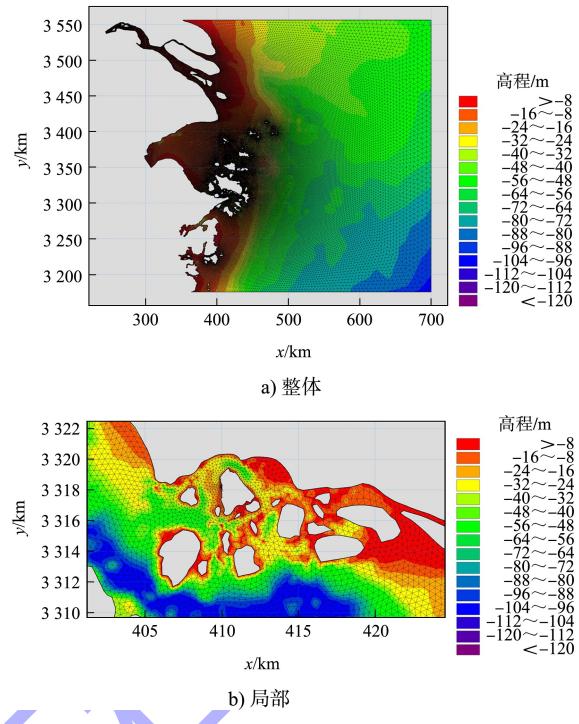
$$\zeta = A_0 + \sum_{i=1}^{16} H_i F_i \cos[\sigma_i t - (v_0 + u)_i + g_i] \quad (5)$$

式中: A_0 为平均海面高程; σ_i 为第 i 个分潮圆频率; F_i 、 $(v_0 + u)_i$ 为天文要素; H_i 、 g_i 为调和常数。

闭边界上取流速的法向导数为零, 潮滩区采用漫滩边界处理。

2.3 计算区域及网格

工程所在的舟山海域水系交错复杂, 故将网格区域延伸北至 32°N 左右, 南至 28.5°N , 东边界设置在 125°E 附近。模型内含的长江水域上游边界设在江阴处, 同样附近的杭州湾上游边界设在澉浦潮位站。整体模型计算区域在 $120^\circ\text{E} \sim 126^\circ\text{E}$, 选择 UTM(通用横墨卡托格网系统) 投影坐标系为 WGS_1984_UTm_Zone_51N。网格划分采取非结构三角网格, 在远海区域和工程区, 分别设置最大网格尺度 5 000 m 和最小网格距 20 m, 通过模型平滑迭代过渡, 既可满足岸线和水下地形精细化需求, 同时使计算时间合理化。整体共计 41 041 个节点、78 473 个单元, 计算区域网格见图 3。



3 模型验证

本模型选择 2015 年 5 月中交第三航务工程勘察设计院有限公司水文测验期间的监测数据进行拟合验证。其中对定海、镇海和嵊山长期潮位站进行全潮潮位验证; 对定点测站 N1、N8 和 N14 测流点的垂线平均流速流向数据分大小潮分别验证(大潮测流时间为 2015-05-04—2015-05-05; 小潮测流时间为 2015-05-12—2015-05-13)。各测站位置见图 4。

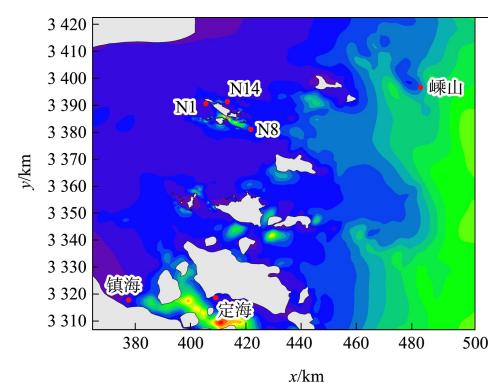
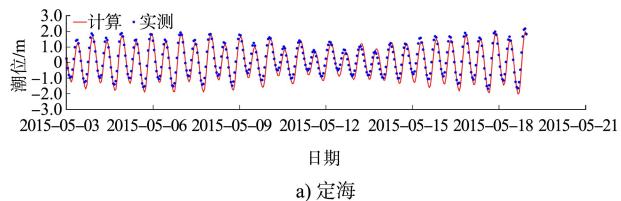
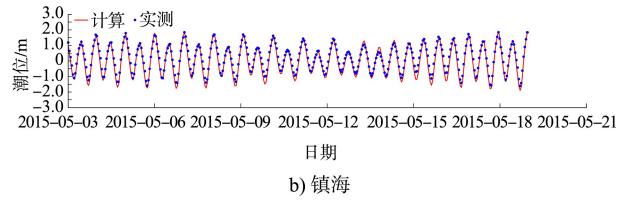


图 4 验证点位置

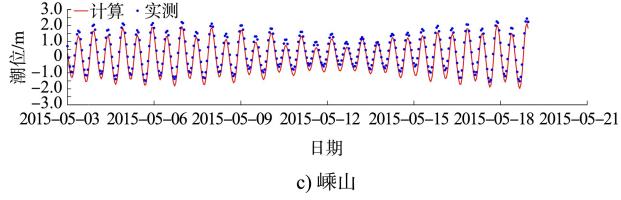
潮位验证如图 5 所示, 总体上看出 3 个潮流测站潮位吻合较好, 趋势和数值大小都近乎一致。其中, 镇海站验证效果最好, 相对误差在 $\pm 10\%$ 以内; 对于定海和嵊山这两个测站在最低潮处相对拟合误差稍大, 但均满足相关规范^[7]。



a) 定海



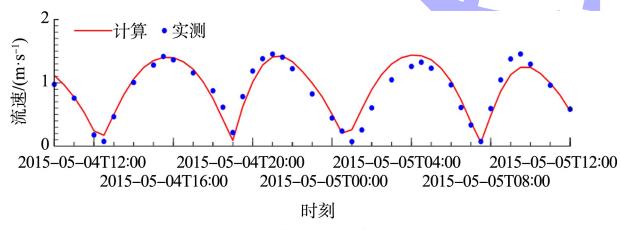
b) 镇海



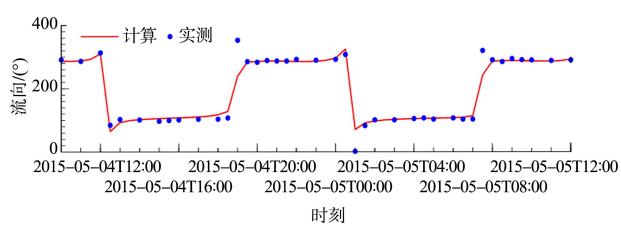
c) 嵊山

图 5 潮位验证

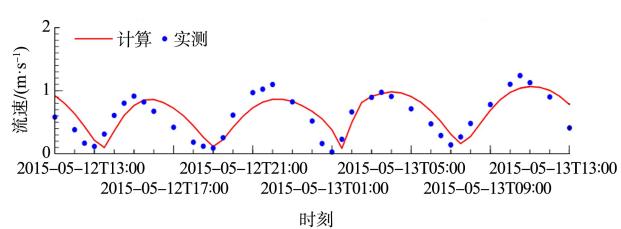
N1、N8 和 N14 潮流测站计算值与实测值的拟合结果见图 6~8。可以看出，各测站在大潮阶段的流速吻合度较高，而小潮阶段短时间内会出现误差在 0.15~0.30 m/s 的情况，但依然在误差允许范围之内。相比之下，各测站流向拟合较好，并在涨落急时段，计算域内潮流可见明显的往复流特征。



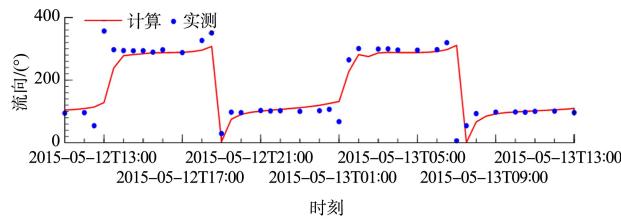
a) 大潮, 流速



b) 大潮, 流向

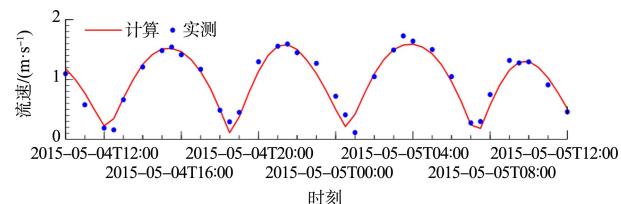


c) 小潮, 流速

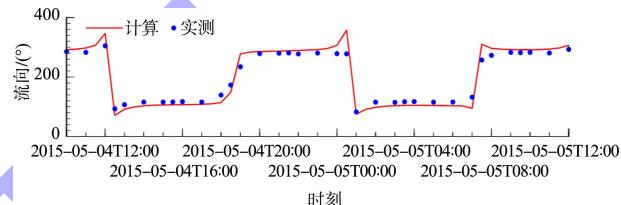


d) 小潮, 流向

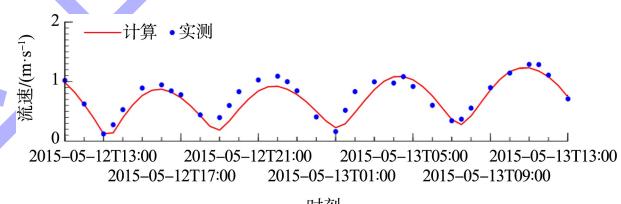
图 6 N1 流速流向验证



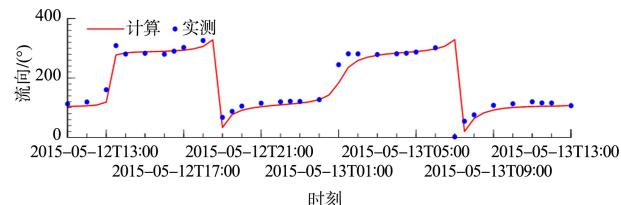
a) 大潮, 流速



b) 大潮, 流向

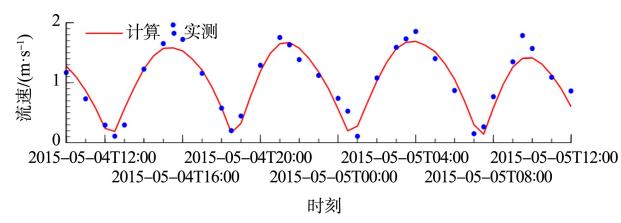


c) 小潮, 流速

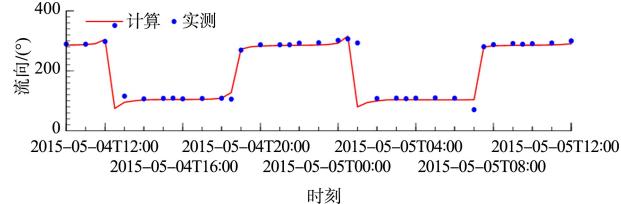


d) 小潮, 流向

图 7 N8 流速流向验证



a) 大潮, 流速



b) 大潮, 流向

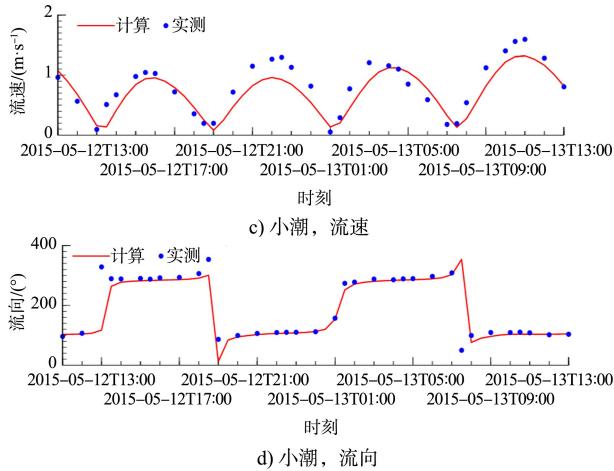


图8 N14 流速和流向验证

4 潮流场分析

4.1 工程前潮流特征

为更好地指导定海盘峙某码头建设,在模型验证精度较高的基础上,进一步对大范围内以及工程周边海域的大潮阶段潮流场进行数值模拟预测分析。

大范围内的大潮流场见图9。由图9a)可知,大潮涨急时刻东海的前进波涌入舟山群岛海域,穿过多条狭道进入杭州湾。整体上看,定海海域涨潮流主流沿螺头水道较为平顺,整体呈现由东南流向西北。同样地,图9b)中落潮流主要流态情况与涨潮流相似。

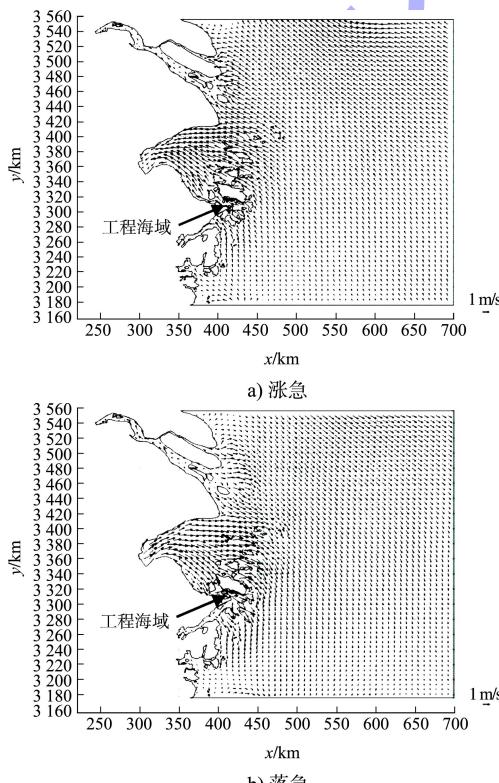


图9 大潮流场(大范围)

工程所在海域受舟山群岛内部岛屿错落、水道纵横的影响,水动力情况较为复杂。工程局部流场见图10。由图10a)可看出,盘峙岛东侧的涨潮流绕过盘峙岛堤头后受西蟹村岛阻碍一分为二,其中一部分直接过西蟹村岛北部汇入螺头水道,另一部分则经过工程区盘峙岛和蟹村岛之间的海域再并入螺头水道。大猫岛东南侧受东南侧岸线影响基本垂直于涨潮流向,整体处于涨潮流的迎流面,涨潮流在东南侧分为两股,分别沿大猫岛东南侧岸线向南北方向流去,因此大猫岛东南侧海域涨潮流流速相对较弱。大猫岛西北侧处于涨潮流的背流面,因此西北侧涨潮动力较弱,且小岛屿众多,水道纵横交错,涨潮流流向不一致,涨潮流态较为复杂。落潮流如图10b)所示,杭州湾的落潮流经舟山群岛之间的狭道流入外海,落潮流基本与涨潮流反向一致。

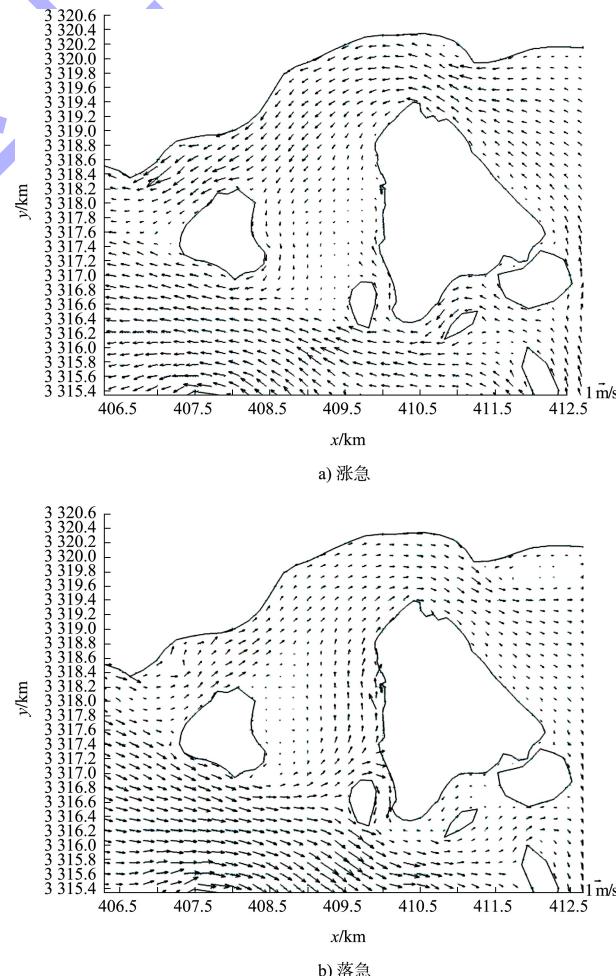


图10 工程局部流场

4.2 工程区域建设后潮流特征

通过前面对大范围流场的分析可知, 工程后盘峙岛某码头附近涨落潮情形较为复杂, 该地方典型时刻的流场特征见图 11。由图 11a) 可清晰看出, 涨潮流速靠近西蟹村岛较大, 靠近盘峙岛一侧稍小; 沿盘峙岛岸线方向传播的涨潮流开始和主涨潮流流向一致, 总体为东北至西南方向, 后受码头的阻碍以及从船厂方向涌入的反方向涨潮流的影响, 流速减小且流向不久后发生质的改变, 朝反方向流动, 这使得码头附近的涨潮历时较短(相对主涨潮流向)。由图 11b) 可看出, 工程区落潮流基本与涨潮流反向一致, 与涨潮流不同的是此时码头附近的落潮流没有反向落潮流的影响, 主落潮流方向一直为从西南至东北方向。

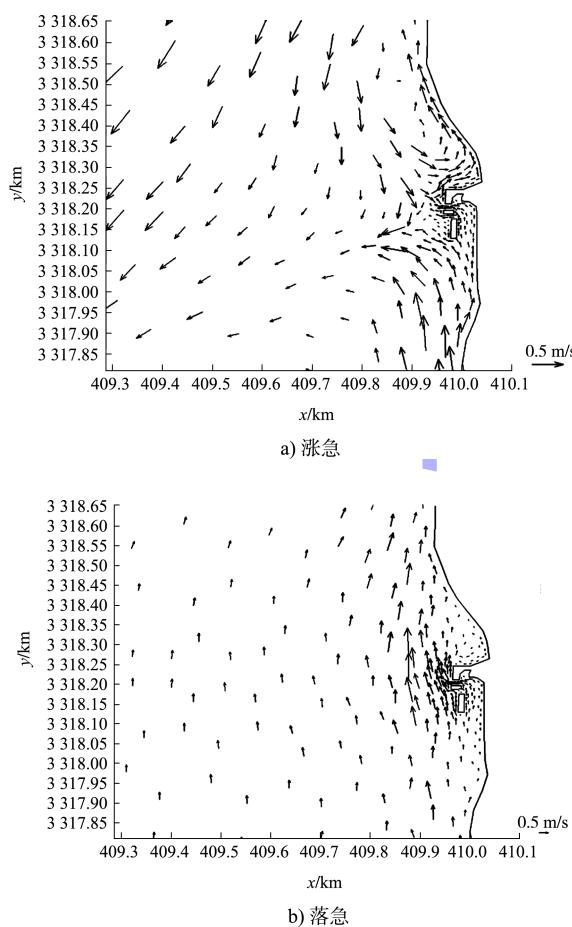


图 11 码头附近落急流场

5 工程后冲淤变化分析

水流挟带泥沙输移引起床面冲淤变化是一个

复杂的物理过程, 鉴于泥沙输移的复杂性和目前泥沙输移基本理论的不成熟, 决定了研究床面冲淤计算方法的多样性, 本文采用床面冲淤计算模型进行评价。根据泥沙运动理论中的输沙平衡原理, 若只考虑潮流的挟沙能力 S^* , 则有:

$$S^* = k \cdot \frac{v^2}{gH} \quad (6)$$

式中: H 为实际水深; v 为流速; k 为挟沙系数(0.5~0.6)。泥沙沉降过程将会出现在实际悬浮浓度大于 S^* 时。工程前泥沙处在冲淤平衡状态下, 而由于工程实施后会让局部流速衰减, 以至挟沙能力减弱而发生沉降。故以此采用宋立松^[8]在研究钱塘江时的半经验半理论回淤强度公式进行估算:

$$\Delta H = h_1 - h_2 = \frac{\alpha \omega}{\rho'_s} (S^* - S') \Delta t = \frac{\alpha \omega s \Delta t}{\rho'_s} \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \frac{h_1}{h_2} \right] \quad (7)$$

式中: v_1 、 v_2 分别为工程前、后的流速; h_1 、 h_2 分别为工程前、后的水深; Δt 为计算时间; S' 为实际悬浮浓度; s 为工程区域沿垂线平均含沙量; α 为悬沙沉降概率, 其值在 0~1 之间变化, 考虑计算上的简化, 取 0.2~0.3; ω 为沉降速度, 取 0.5 mm/s^[9]; ρ'_s 为淤积物干密度, 其值为 $1750 d_{50}^{0.183}$, d_{50} 为中值粒径按 6 μm 取值, 则 ρ'_s 为 686.2 kg/m^3 。

工程后首年冲淤变化如图 12a) 所示, 从大范围的首年冲淤变化情况看, 工程影响的冲淤变化区域主要集中在码头周边海域, 与流速变化的趋势基本保持一致。工程后, 淤积的海域主要集中在码头周边和船厂东西两侧, 首年淤积厚度在 0.5~1.0 m; 与岸线连接的码头部分形成的断流区淤积较大; 流速增大的区域稍有冲刷, 冲刷深度 0.1~0.2 m。工程海域达到冲淤平衡状态后, 最终冲淤预测结果如图 12b) 所示。可以看出达到平衡所用的时间基本在 6~7 a, 冲淤变化情况分布趋势与首年冲淤情况基本一致。最终淤积的范围也主要集中在盘峙岛南北两侧之间的海域, 码头区域最终淤积在 3 m 左右, 最终冲刷深度在 1 m 左右, 发生在盘峙南侧和西蟹村岛北侧区域。

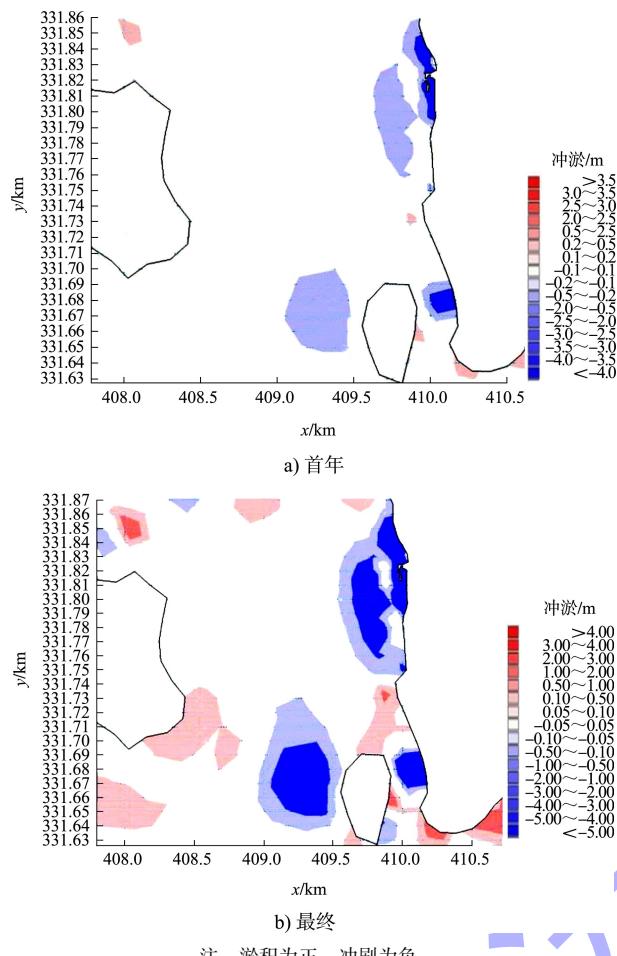


图 12 工程后冲淤变化趋势

6 结论

1) 工程后涨落潮流流路均较为清晰, 整体上没有改变工程周边海域的潮流流态, 仅在码头周边 1 500 m 范围之内海域受流速矢量的影响。流速矢量变化较大的区域主要集中在码头区域、盘峙岛和西蟹村岛堤头区域和造船厂东西两侧区域。

2) 工程后受到码头的阻流作用, 码头南北两侧流速呈减小趋势, 使得直接通过西蟹村岛北侧的涨落潮流量有所增大, 从而流速稍增大。

3) 受局部工程影响, 整体冲淤变化区域主要集中在码头周边海域。同时受流速影响较大, 冲刷多发生在流速增大的区域, 而淤积较为严重的水域处流速减小。淤积的海域主要集中在码头附近、造船厂东西两侧区域; 冲刷的海域主要集中在盘峙岛和西蟹村岛拐角处的挑流区域。

参考文献:

- [1] 刘金鹏,拾兵,吴殿春.龙口市人工岛周边海域波浪场和水动力场的数值模拟[J].海洋湖沼通报,2021(1):1-10.
- [2] 李鹏,赵鹏,程瑾,等.东营港广利港区航道工程潮流场及泥沙骤淤数值模拟[J].水运工程,2018(S1):86-92.
- [3] 邵淮远.长江澄通河段二维水动力数值模拟研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2013,35(1):22-25.
- [4] HAN L, YUAN Y L. An ocean circulation model based on Eulerian forward-backward difference scheme and three-dimensional primitive equations and its application in regional simulations [J]. Journal of hydrodynamics, 2014, 26(1): 37-49.
- [5] 尹志清.滩海构筑物与海洋环境相互作用的数值模拟分析[J].油气田地面工程,2016,35(12):7-10.
- [6] HEWAGEEGANA V H, CANESTRELLI A. Numerical modeling of the influence of tides on cross-shore sediment dynamics of dissipative beaches under moderate wave conditions [J]. Continental shelf research, 2021, 218(3): 104381.
- [7] 交通运输部天津水运工程科学研究所.海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程: JTS/T 231-2—2010[S].北京:人民交通出版社,2010.
- [8] 宋立松.钱塘江河口围垦回淤过程预测探讨[J].泥沙研究,1999(3):76-81.
- [9] 王义刚,林祥,吴中.河口边滩围垦后淤积计算方法研究[J].海洋工程,2000(3):67-70.

(本文编辑 王璁)

著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费,所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。