

陆凡, 沈良朵, 高郁, 等. 舟山绿色石化三维潮流特性数值研究[J]. 海洋学报, 2022, 44(5): 134–147, doi:10.12284/hyxb2022079  
Lu Fan, Shen Liangduo, Gao Yu, et al. Numerical study on three-dimensional tidal current characteristics of Zhoushan Green Petrochemical Company[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(5): 134–147, doi:10.12284/hyxb2022079

# 舟山绿色石化三维潮流特性数值研究

陆凡<sup>1</sup>, 沈良朵<sup>1\*</sup>, 高郁<sup>1</sup>, 王晋宝<sup>1</sup>

(1. 浙江海洋大学 船舶与海运学院, 浙江 舟山 316021)

**摘要:** 本文基于 MIKE3 平台建立宁波、舟山及其附近海域三维水动力模型, 通过与实测数据进行潮流验证的基础上, 对比了三维模型与二维模型的区别, 并主要对舟山绿色石化三期围垦工程实施前后周边潮流场的变化影响进行了预测分析。结果表明: (1) 同样的初始条件下, 二维模型和三维模型的潮位和潮流验证结果都是良好的, 而在某些情况下二维数值结果更接近于实测值; (2) 三维垂向上的流速分布呈现出随水深增加而减小的趋势, 总体上潮流拟合效果较好, 其中  $0.6H$  水深以下的流速相对误差结果在  $10\% \sim 15\%$  之间, 考虑模型可能受未考虑风场和波浪影响的缘故, 局部测站表层计算流速较实测值稍大; 而垂向上的流向分布近乎一致; (3) 围垦工程前后并未对工程周边潮流场有明显影响, 仅在大鱼山岛东北侧、东南侧和西北角受“截弯取直”和小岛屿间水道围堵的影响, 有局部潮流形态的改变。整体上看, 以顺应岸线方向上的围垦工程布置方案会对局部近岸潮流产生影响, 对外海大范围潮流场的影响几乎不计。

**关键词:** 围垦; 潮流; 数值模拟; MIKE3; MIKE21

中图分类号: P731.2 文献标志码: A 文章编号: 0253-4193(2022)05-0134-14

## 1 引言

在经济全球化快速发展的大背景下, 世界各国对海洋资源的开发利用越来越重视。特别地, 我国大部分沿海城市在港口码头、物流集散中心和绿色石化基地的建设投入逐步加大<sup>[1]</sup>。然而, 部分以围填海方案来获取工业用地的建设方式由于缺少科学的指导依据, 对周边海域的生态环境、水动力条件和泥沙冲淤造成了不良影响<sup>[2]</sup>。基于此, 目前通过采用数值模拟分析法以水工建筑物对周边海洋环境的影响范围为目标进行科学预测, 能够合理有效地解决如何绿色开发海洋资源的问题。

围填海工程前能够科学地模拟出建设海域相关的潮流运动形态差异和泥沙冲淤的显著地区, 对工程实

施有着积极的推动作用。因此, 一些国内外专家学者借助数值模拟进行了相关研究。任一晗等<sup>[3]</sup>基于 FVCOM 三维水动力数值模型, 选取 1984 年、2010 年、2019 年 3 个代表年份, 探讨围垦工程影响下舟山群岛海域潮流结构与潮能分布的时空变化状况; Safavi 等<sup>[4]</sup>采用 MIKE3 平台构建了乌鲁米耶湖的三维数值模型, 研究了受湖中堤道分隔影响湖中南北部水中盐度的变化情况; 窦明等<sup>[5]</sup>利用 FVCOM 三维海洋数值模型, 模拟嵊泗大洋山围垦工程建设填海前后的流场及泥沙运动, 对该工程附近海域潮流及各层泥沙分布变化进行了探讨; 刘嘉星和刘长根<sup>[6]</sup>利用验证后的三维潮流数学模型 ROMS 探讨了天津港附近海域的潮流特征、潮流的分层特点和围海造地引起的潮流场变化情况; 刘金鹏等<sup>[7]</sup>以龙口市人工岛为例, 利用验

收稿日期: 2021-08-15; 修订日期: 2021-12-17。

基金项目: 省属高校基本科研业务项目(2021JZ008); 国家自然科学基金(51709235); 舟山市科技局一般项目(2019C21026)。

作者简介: 陆凡(1997—), 男, 江苏省扬州市人, 主要从事近岸水动力研究。E-mail: Lufanaaa0904@163.com

\* 通信作者: 沈良朵, 男, 硕士, 博士, 主要研究近岸水动力和物质输移扩散。E-mail: slduo@163.com

证合理的潮流场和波浪场数学模型,模拟分析了在极限风况条件下人工岛群周围海域水环境的变化特征及人工岛岸线的波高特征值的变化规律。Zamani 和 Koch<sup>[8]</sup>以伊朗西南部 Maroon 水库为研究对象,通过与实测数据进行比较的基础上,对这两种三维水动力模型的适用性进行了对比研究;Soltani等<sup>[9]</sup>通过 Mike21, 2011 Version 模型,模拟了海岸带的波浪和水流,以确定奈班德海湾地区的泥沙输移速率和方向;Elshemy等<sup>[10]</sup>使用 MIKE21 建模系统开发了曼扎拉湖的水动力模型和水质模型,研究了未来气候变化对湖泊水动力和水质特征的影响。

虽然前人对围垦工程的数值模拟研究已经取得不错的结果,但大多数都是以 FVCOM 三维模型或者 MIKE 二维水动力模型对相关海域的水动力和温盐变化进行了细致研究,而采用 MIKE3 和 MIKE21 这两种水动力模型对国内近海岸岛屿围垦工程的对比性研究较少。基于此,本文以舟山绿色石化基地三期围填海工程为研究对象,基于 MIKE3 平台构建了工程前后三维水动力数学模型,并考虑到 MIKE21 中的二维模型也可以分析水平方向上的潮流运动情况,故对两种模型进行了潮位验证结果精度的比较分析。但结合到舟山群岛海域水道纵横、地形结构复杂的特性,水平方向上的二维研究无法呈现出三维模型展现出的流场空间结构变化,因此在三维模型下分析了采用“裁弯取直”和水道封堵方案下对潮流场特征的影响,并从表层、中间层和底层分别对工程前后的流速流向影响进行三维垂向剖析研究。

## 2 工程概况

本工程位于舟山群岛和岱山以西的大、小鱼山岛海域,北濒岱衢洋、南接灰鳖洋,周边岛屿岸线曲折,港湾众多。水下地形南北深、东西浅,海底高程基本在 $-65\sim-1$  m,水下地形起伏明显<sup>[11]</sup>。三期围填海工程地处于 $121^{\circ}55'11''\sim 121^{\circ}59'37''$ E之间,其用海面积约为 $18.41\text{ km}^2$ ,成陆面积为 $17.09\text{ km}^2$ 。工程涉及海域潮流运动以往复流为主,而且基本为平行岸线方向的往复流。涨潮流主要为来自东海的前进波经由舟山群岛之间的狭道进入杭州湾,其中岱山海域的涨潮流主流较为平顺,整体上呈现由东南流向西北方向。落潮流则为杭州湾的落潮水流经舟山群岛之间的狭道流入外海,落潮流基本与涨潮流一致,岱山周边落潮流整体较为平顺。海区内泥沙主要来源于长江口以及杭州湾外泄泥沙随浙东沿岸流的输移扩散,含沙量总体较大。

## 3 三维水动力模型

### 3.1 控制方程

三维模型使用的是分层网格,即在水平域中使用非结构网格,而在垂直域中使用结构化网格。垂直网格是分为 sigma 坐标或组合的 sigma/z 级坐标。本文采用的是考虑了自由曲面的 sigma 坐标。使用 sigma 坐标最重要的优势是它们能够准确地表示水深测量,并在海床附近提供一定的分辨率<sup>[12]</sup>。采用单元中心的有限体积方法进行了原始方程的空间离散化,方程式如下:

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left( \frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S, \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left( \frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S, \quad (3)$$

式中, $t$ 为时间; $x$ 、 $y$ 、 $z$ 为笛卡尔坐标; $\eta$ 为表面高度; $d$ 为静止水深; $h=\eta+d$ 为总水深; $u$ 、 $v$ 、 $w$ 为 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的速度分量; $f=2\Omega\sin\varphi$ , $\sin\varphi$ 为科里力参数( $\Omega$ 为角转速, $\varphi$ 为地理纬度); $g$ 为重力加速度; $\rho$ 为水密度; $s_{xx}$ 、 $s_{yy}$ 、 $s_{yx}$ 、 $s_{xy}$ 为辐射应力张量的分量; $v_t$ 为垂直湍流(或涡流)黏度; $p_a$ 为大气压力; $\rho_0$ 为水的参考密度; $S$ 为由于点源引起的排放量大小; $u_s$ 和 $v_s$ 为水被排放到环境水中的速度; $F_u$ 和 $F_v$ 分别为 $x$ 和 $y$ 方向上的水平应力分项。

### 3.2 模型建立

#### 3.2.1 计算区域及网格

考虑到工程区域附近涨落潮的流路经杭州湾和部分东海海域,因此所选取区域范围远大于三期工程计算区域,北界至 $32^{\circ}\text{N}$ 左右,南界至 $28.5^{\circ}\text{N}$ ,东到 $125^{\circ}\text{E}$ 附近,潮流界顶点江阴作为长江上游边界,澈浦潮位站附近作为杭州湾上游边界,计算区域位于 $120^{\circ}\sim 126^{\circ}\text{E}$ 之间。三维模型采用 sigma 网格,垂向均匀分 10 层,工程附近海域网格进行加密,网格最小尺度为 18 m,工程外海区域,网格距为 8 000 m,不同尺度网格之间通过设置实现平滑过渡,共计 52 007 个节点,99 195 个单元。对于二维模型,共计 41 041 个节点,78 473 个单元。模型计算区域及水深如图 1 所示。

#### 3.2.2 模型参数设置

模型计算时间步长设置根据克朗数 CFL 条件进行动态调整,在确保模型计算稳定进行下,平均时间

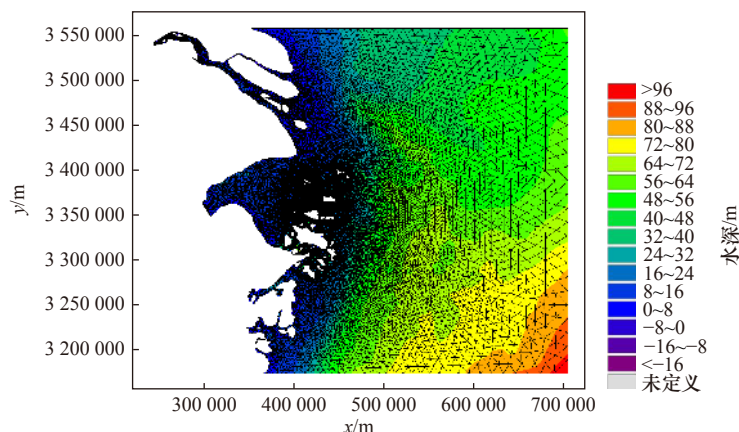


图1 模型区域和水深

Fig. 1 Computational domain and water depth

步长为 2 s, 最短时间步长为 0.01 s。干湿水深判别设置为干水深 0.005 m, 淹没水深 0.05 m, 湿水深 0.1 m。这有利于保护模型稳定运行。水平涡黏系数经率定取 0.28, 垂直涡黏系数使用对数公式确定。通过粗糙高度来表征底床糙率, 率定后取 0.003 m。边界采用水位控制, 即用潮位预报的方法得到开边界条件。外海开边界潮位根据由 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  $OO_1$ ) 的调和常数, 以开边界潮位预报公式计算得到:

$$\zeta = A_0 + \sum_{i=1}^{16} H_i F_i \cos[\sigma_i t - (v_0 + u)_i + g_i], \quad (4)$$

式中,  $A_0$  为平均海面;  $F_i$  和  $(v_0 + u)_i$  为天文要素;  $H_i$  和  $g_i$  为

调和常数。在闭边界取流速的法向导数为 0, 在潮滩区采用漫滩边界处理。

#### 4 模型验证

由于本工程周边缺少实测数据, 故本次模型验证采用了距鱼山岛较近的小洋山海域, 由中交第三航务工程勘察设计院有限公司在水文测验期间的潮流实测数据。其中, 分大中小潮对临时测站 T1 和 T6 进行潮位验证(大潮测流时间为 2015 年 5 月 4 日至 5 日; 中潮测流时间为 2015 年 5 月 7 日至 8 日; 小潮测流时间为 2015 年 5 月 12 日至 13 日); 同样地, 对定点测站 N1、N14 以及走航测站 WP05 流速流向数据进行潮流分层验证, 各测站位置见图 2。

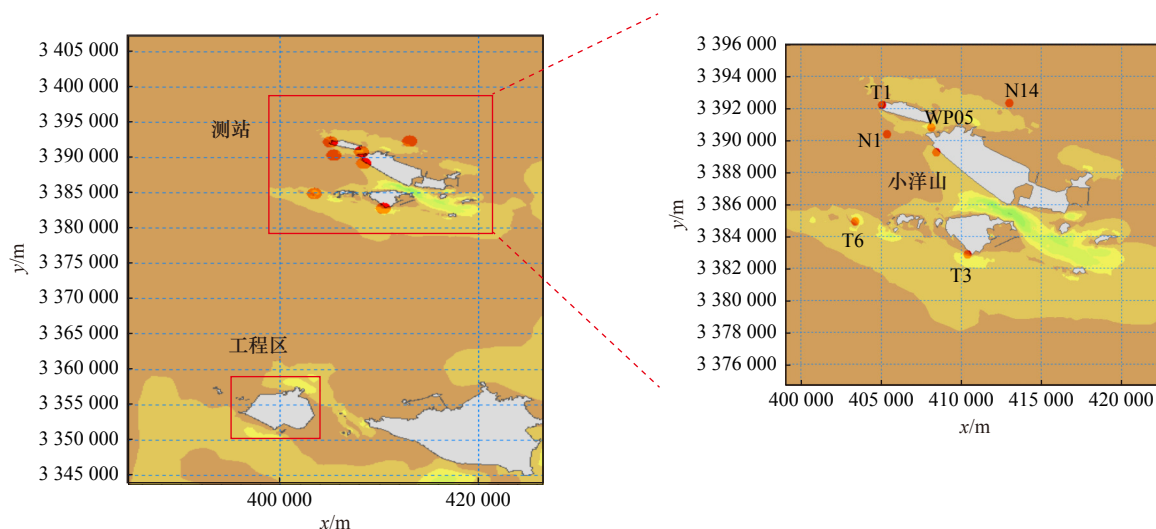


图2 验证点位置

Fig. 2 Verification point location

采用 MIKE3 的水动力模型计算数据与实测数据进行验证, 潮位验证结果如图 3 所示。图中显示, 从整体上看 T1 测站和 T6 测站潮位拟合较好, 其中小潮

阶段拟合效果最好, 相对误差结果在  $\pm 10\%$  左右, 个别高潮位处相对误差稍大。总体来看, 三维模型模拟的潮位验证是符合要求的。

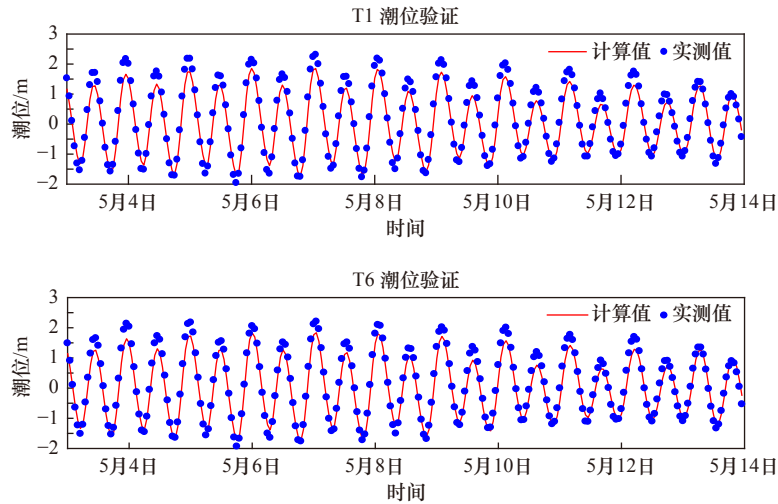


图3 潮位验证

Fig. 3 Tide level verification

对潮流测站 N1、N14 和 WP05 分为表层(第 10 层)、中层(第 5 层)和底层(第 1 层)进行流速流向验证。在分层验证下,可以清楚看到表层小潮阶段的流速拟合结果是相对较大的,其他各层拟合结果都是极好的。表层模拟结果如图 4 所示,各测站仅在高潮位由于流量加大的影响导致流速拟合结果有 0.5 m/s 左右的误差,其他时间段拟合相对误差控制在 8% 左右,表层流向模拟结果令人满意。中间层模拟结果如图 5 所示,各测站除高潮位处流速存在 0.15~0.3 m/s 的误差,其余各时间点相对误差在 10% 以内,流向拟合结果较满意。底层模拟结果如图 6 所示,大潮和中潮阶段的模拟流速仅在 N1 测站的高潮位时有 0.35 m/s 的误差,其余拟合较好,小潮阶段除在个别时间点有 0.45 m/s 的误差外,其余各点存在 0.15~0.25 m/s 的误差范围;底层流向模拟结果较好,流向相对误差在 7% 以内,极个别点处由于测量过程存在失误而出现的误差,不予考虑。

对模型验证结果有更加科学性的认识,此处通过 Willmott<sup>[13]</sup> 所提出的 skill 方程进行评估,表达式如下:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}, \quad (5)$$

式中,  $P_i$  是模拟值;  $O_i$  是实测值;  $\bar{O}$  是实测平均值。通过  $d$  值判断模型效率,  $d > 0.65$  时,模型效率极好;  $0.5 < d \leq 0.65$ , 表示模型效率非常好;  $0.2 < d \leq 0.5$ , 表示模型效率好;  $d \leq 0.2$ , 表示模型效率差。

结果表明, N1 和 WP05 测站各层的大中小潮期间流速  $d$  值在 0.80~0.97 之间,流向  $d$  值区间为 0.73~0.99, 其模型效率都是极好的。限于篇幅,仅具体列出了

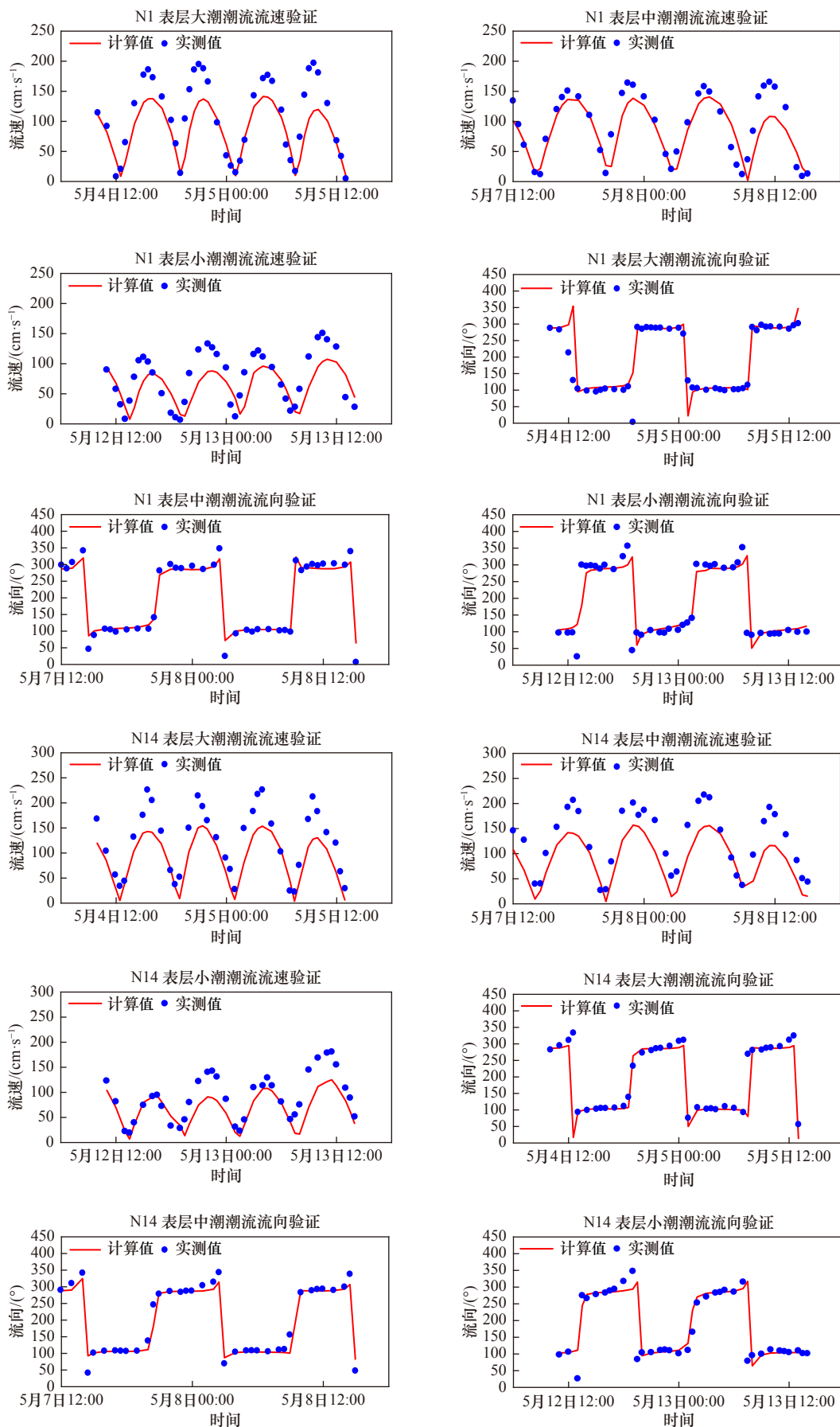
N14 测点各层的模型效率值,具体见表 1。

## 5 三维结果分析

### 5.1 MIKE3 与 MIKE21 对比分析

对 MIKE3 与 MIKE21 两种拟合效果进行对比分析,分别将这两种水动力模型的计算数据与实测数据进行验证,潮位对比验证结果如图 7 所示,由图可知:两种模型的潮位计算值与实测值的吻合度较高,特别是在小潮期间,其最大误差仅有 0.15 m 左右。大潮和中潮期间,三维数值结果与实测值在个别高潮处有 0.5 m 左右的误差,总体上看,在将二维模型中的初始条件同样地设置于三维模型的情况下,二维数值结果更接近于实测值。

考虑到理论方面上 MIKE3 中间层的潮流模拟结果与 MIKE21 的平均流速流向的结果相似,故在此处进行了流速流向的对比验证。中间层模拟结果对比如图 8 所示,图中各测站流向验证结果良好。本文选择的水深 0.6H 的实测数据与垂向平均流速基本保持一致,在大潮和中潮阶段两种模型拟合结果较好,最大相对误差在 20% 左右,相较而言,小潮阶段的高潮位处误差稍大,相对误差在 25% 左右,其余各时间点两者模拟结果均良好。通过这 4 组数据的对比发现:二维模型的大部分计算值更加接近于实测值,尤其是在涨急时刻,原因可能是二维模型是取值于垂向水深平均的流速进行模拟,而本文三维模型未考虑风场应力的影响,表层流速计算误差会对三维流速计算结果有影响。总体上看,三维模型中间层的模拟结果与二维计算结果是最接近的,且中间层拟合效果最为出色,模拟精度基本满足《海岸与河口潮流泥沙数值模



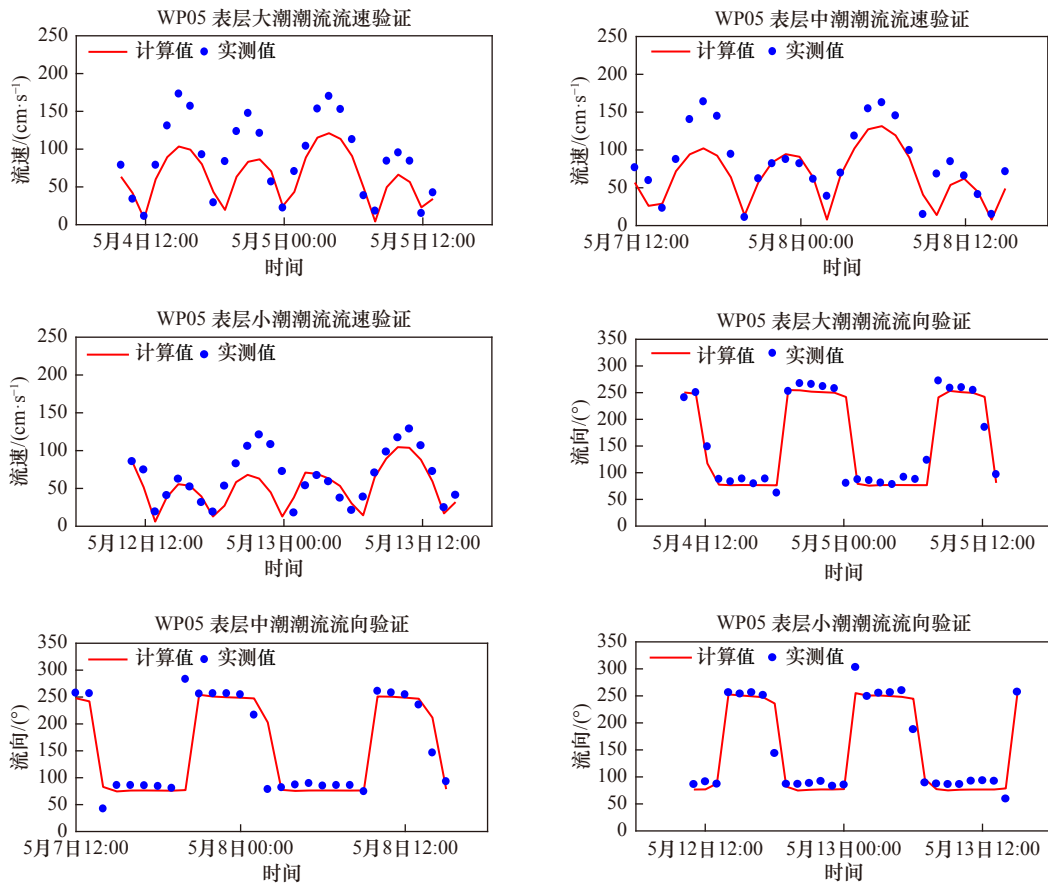


图4 表层流速流向验证

Fig. 4 Verification of flow velocity and direction in the surface layer

拟技规程》的要求,模型可用于工程后的预测各项工作<sup>[14-15]</sup>。

## 5.2 工程前后潮流场分析

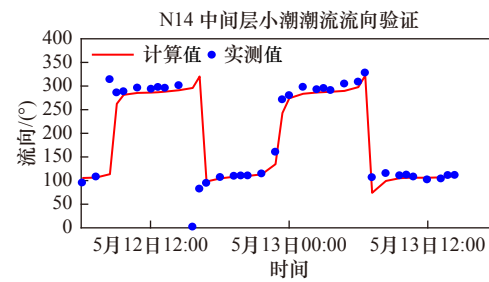
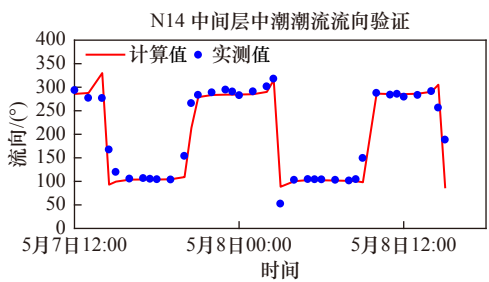
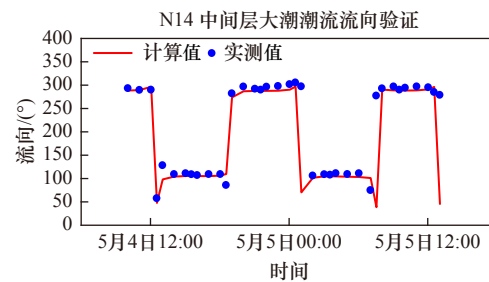
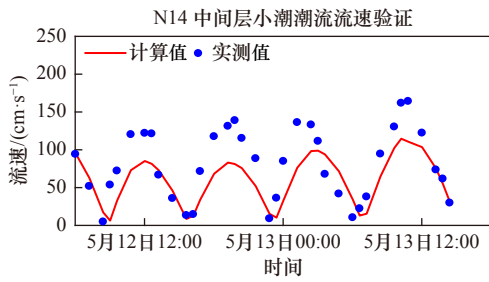
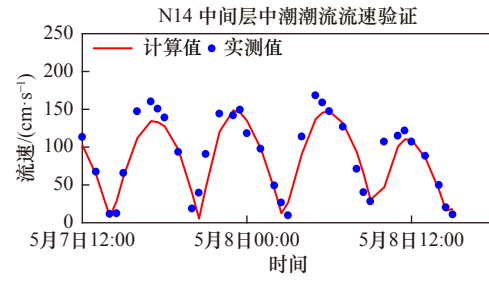
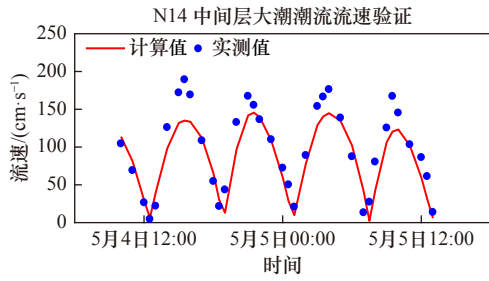
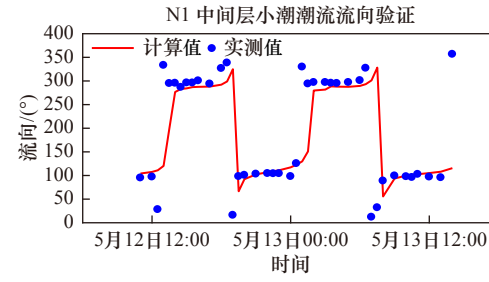
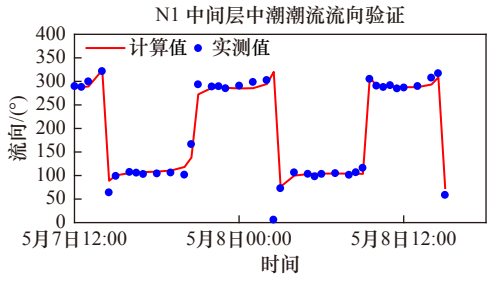
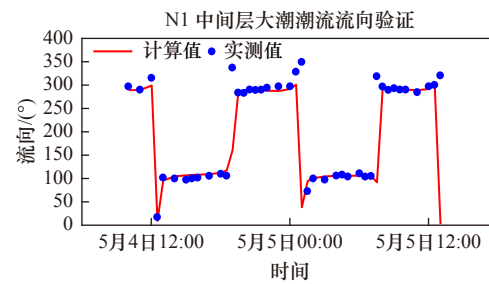
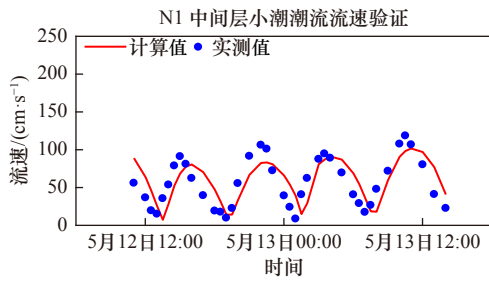
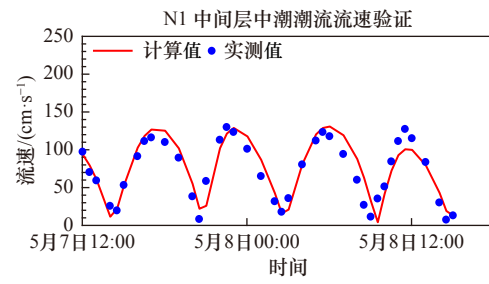
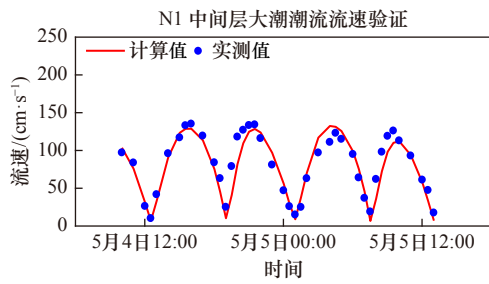
从计算的潮流场分析得出,涨急时刻外海潮汐沿东南向西北方向前进。在大鱼山的东南侧受岛屿阻挡,潮流分成两股,分别沿着大鱼山岛东南侧向南北流入杭州湾。大鱼山岛区域涨潮时刻受峡道效应,南岸流速大于北岸,落潮时刻则北岸较大,工程南北两端的码头岸线对涨落潮流起到了挑流的作用,而且两侧都为深槽,因此涨落潮流速相对较大,但整体还较为平整。其中,涨潮时平均流向为 $230^{\circ}\sim 300^{\circ}$ ,落潮时平均流向为 $70^{\circ}\sim 110^{\circ}$ ,涨落潮平均流向约为 $180^{\circ}$ ,基本符合往复流性质。

考虑到围垦工程所处的大小鱼山岛周边范围内岛屿错落,水道纵横,潮流运动情况复杂,故对工程前后计算域内大潮涨落时刻的表层流场变化进行具体的对比分析,同时给出了工程后流速的等值线图以更直观看出流速大小变化,如图9所示。整体上看,此围填海工程前后对工程周边海域的潮流运动没有较大影响,是明显的往复流形式。在大潮流急阶段,由于受围垦工程“截弯取直”方法的影响,处于工程东北

侧的岸线外伸,东北侧岸线存在一个向内的 $45^{\circ}$ 转角,受岸线角度和洋流反射作用,较于工程前平行于岸线的潮流运动方向,此处产生一个直径约为700 m的逆时针旋涡;鱼山岛的西北侧和东南侧受围填影响,潮流运动遇到外扩海岸线,此处潮流运动方向变化呈现出 $30^{\circ}$ 转角;大范围流场前后变化不大。大潮落急阶段,工程西北角处的一处小岛屿围填时与主岛进行了连接处理,将此处原先经狭道效应的高速流与经岸线折射过来的洋流形成的旋转流影响削弱,故旋转流转变成了与岸线弯口一致的运动形式;鱼山岛东北侧、南侧以及西侧落潮流受外延海岸线的挑流作用,工程后流场运动均出现 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 的转角变化,这表明处于迎流面的岸线变化对流场的改变起主导作用。

## 5.3 垂直流场分析

为更立体的表现出工程区域的流速流向情况,本节同时选取了N1、N14和WP05这3个典型的测站数据进行垂直结构的分析。由图10分析得:N1测站的流速在垂直方向上的实测值和涨落急阶段的计算值各自都较接近,并在中间层附近的水深 $0.6H$ 处仅有4.6%左右的相对误差,计算与实测的最大误差出现在表层附近,相对误差在 $-25\%$ 左右,涨落急各分



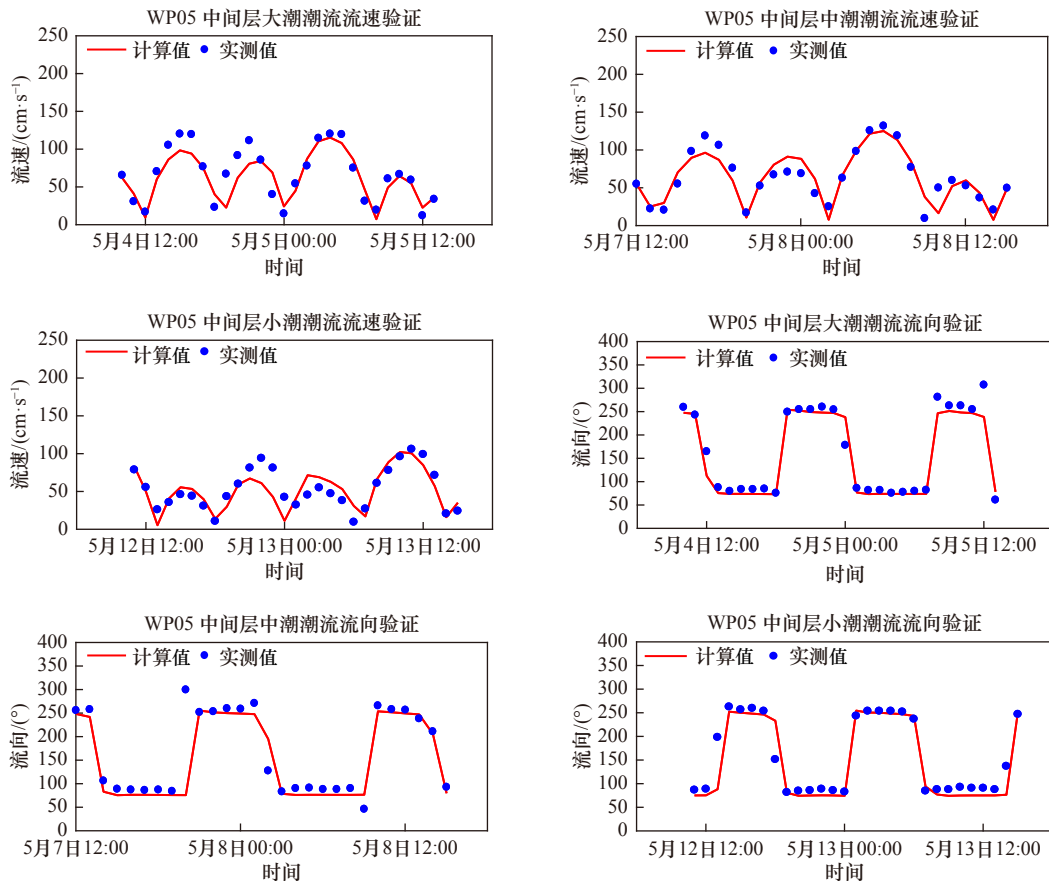


图5 中间层流速流向验证

Fig. 5 Verification of flow velocity and direction in the middle layer

层流速较为一致,整体上都呈现出流速随水深增加而减小,且幅度较大,可能是受到底部海床的摩阻力较大的影响;对于各分层流向趋于一致,且与实测数据拟合较好。N14测站处涨落急时刻的流速计算值与实测值最大误差出现在表层,其相对误差为 $-28.01\%$ ,同时此测站的涨急流速计算值大于落急时刻计算值,这可能是由于此处网格布置较疏的影响,加上缺少风场实测资料,未考虑风场的原因所导致。WP05测站可能处在洋山港与壳子山之间的狭窄水道里,由宽阔海域进入该水道,过水断面突然减小,故同样是在表层处的流速与实测数据有 $-30\%$ 的相对误差,而 $0.6H$ 以下水深的计算流速与实测值的误差范围为 $13\sim 22\text{ cm/s}$ ,且涨急时刻流速小于落急流速,同样地各分层的流向是近乎一致的。通过对垂直流场的分析,可以清楚地得到流速与水深呈负相关,流向受水深影响近乎不计。而针对表层拟合较大问题,初步考虑是受到了风场和波浪对潮流的驱动作用。王世澎等<sup>[16]</sup>在二维情况下波浪对潮流场的数值分析中指出,对于流速过程,波浪在没有破碎的情况下对流速过程的影响比对潮位过程的影响大。考虑到围填海工程后,周围海域受局部挑流作用,加之波浪辐射应力影响,波浪

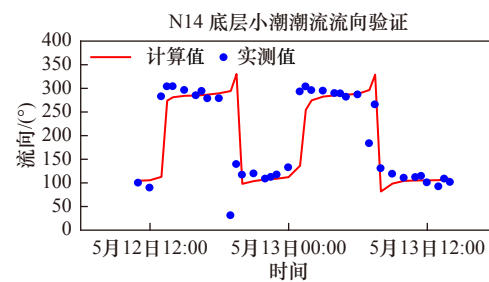
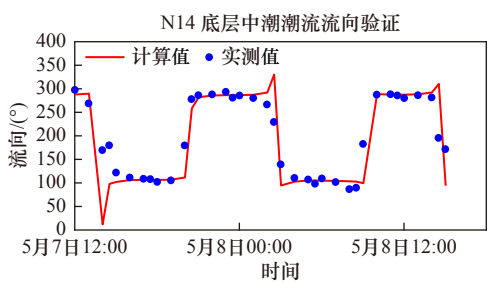
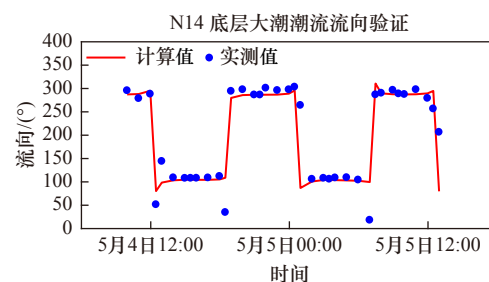
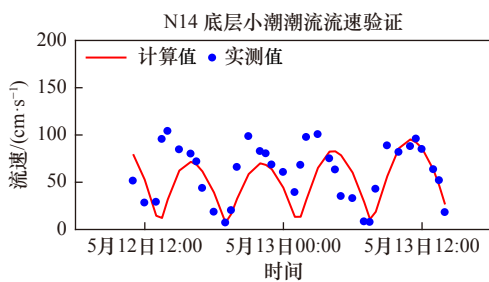
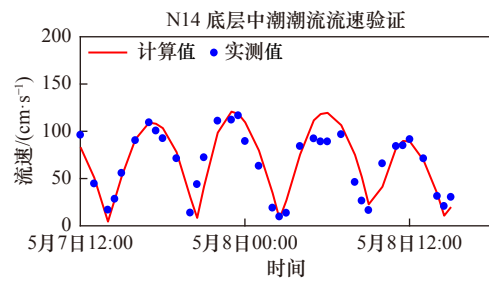
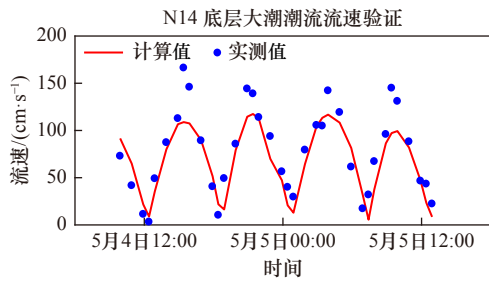
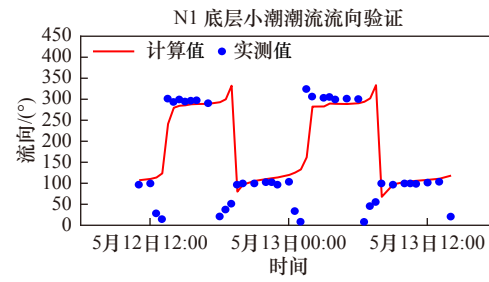
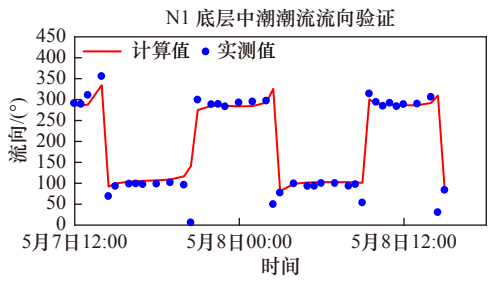
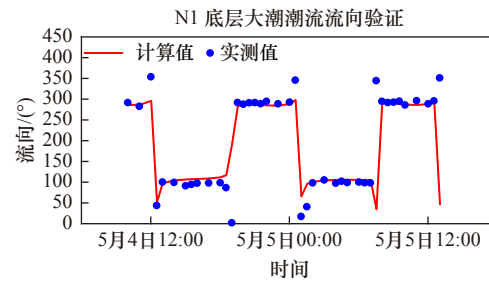
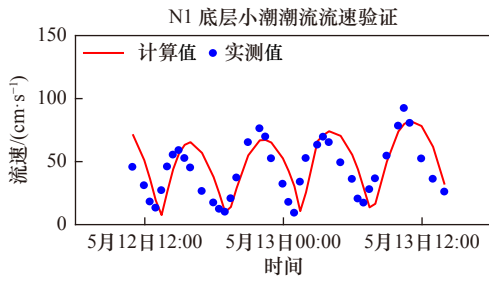
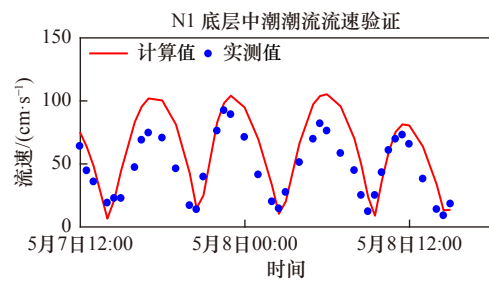
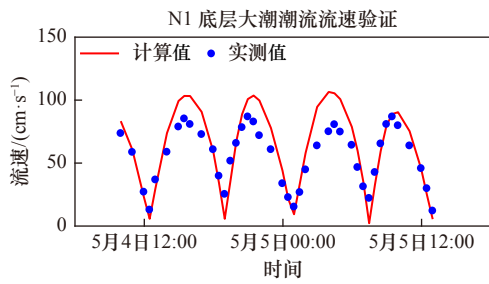
会在近岸破碎产生沿岸流叠加到原有潮流场上,对表层流速影响较大。针对此问题,将会在以后的研究中通过波浪耦合进行率定工作。

## 6 小结

本文以舟山绿色石化三期工程为背景,采用MIKE3建立宁波舟山及其周边附近海域三维水动力模型。通过与实测数据进行潮流验证,对比了二维模型与三维模型验证结果的区别,并主要对围垦工程前后的水动力变化情况进行了详细分析。最终得到如下几点结论:

(1)以MIKE21 FM的模型参数设置于MIKE3中,二维潮位验证效果更好一点,但两种模型的验证都是符合要求的;两种模型流速拟合的最小相对误差都控制在 $10\%$ 左右,通过4组数据的对比,更直观地验证了二维数模数据是取值于垂向平均流速的理论结果,而三维中间层的模拟结果与二维计算结果则是非常接近。

(2)围垦工程前后并未大面积改变大鱼山岛附近的潮流运动,仅在工程东北侧、东南侧和西北角由于围垦工程将小岛屿之间的水道连接起来,并在“截弯取直”的围垦方案影响下,使得局部区域潮流流态发



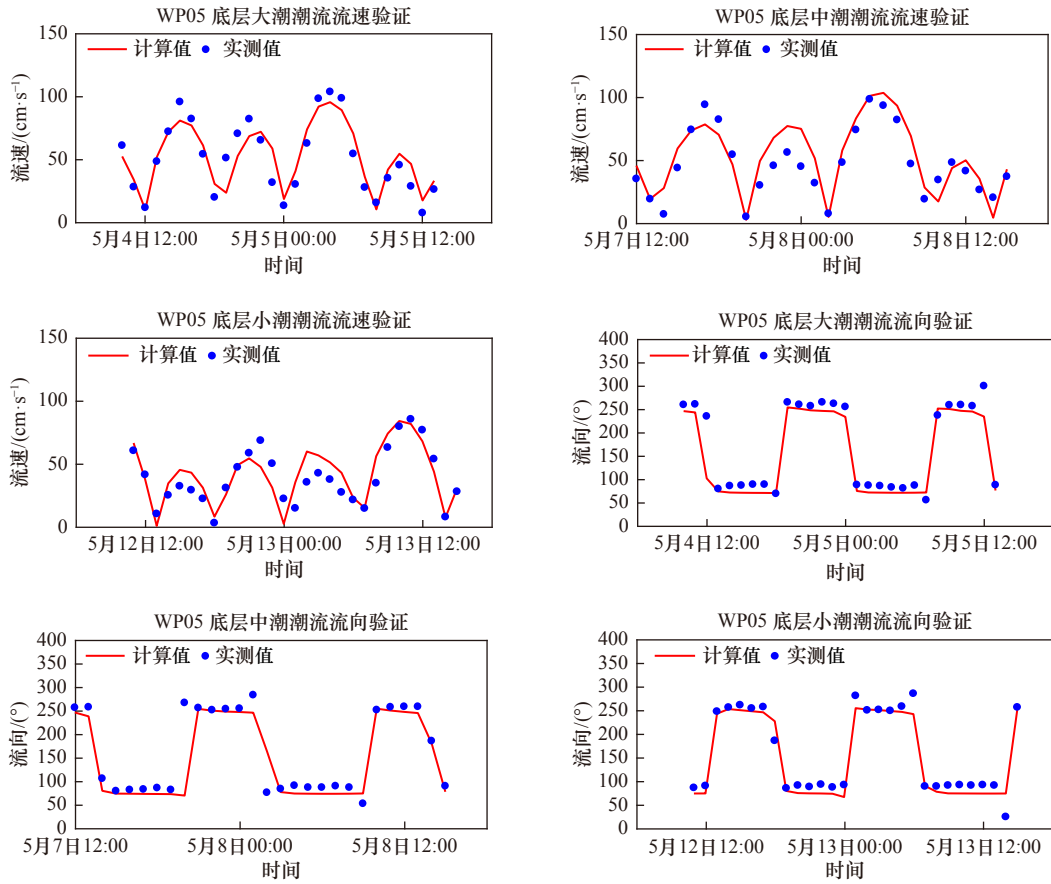


图6 底层流速流向验证

Fig. 6 Verification of flow velocity and direction in the bottom layer

表1 模型效率系数

Table 1 The index of agreement

	流速/(cm·s <sup>-1</sup> )			流向/(°)		
	大潮	中潮	小潮	大潮	中潮	小潮
N14测站表层	0.87	0.85	0.85	0.90	0.99	0.90
N14测站中间层	0.95	0.96	0.83	0.88	0.97	0.86
N14测站底层	0.93	0.95	0.70	0.95	0.93	0.85

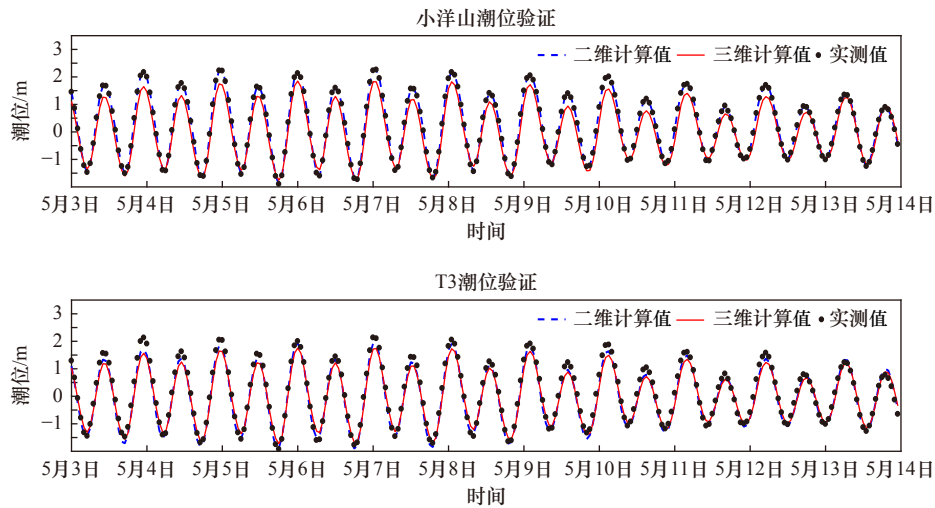
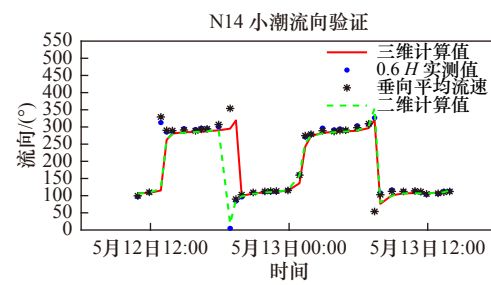
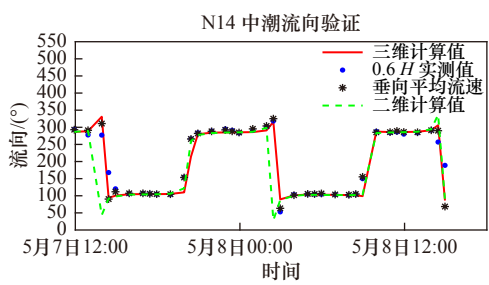
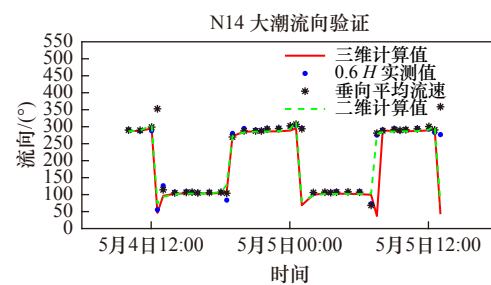
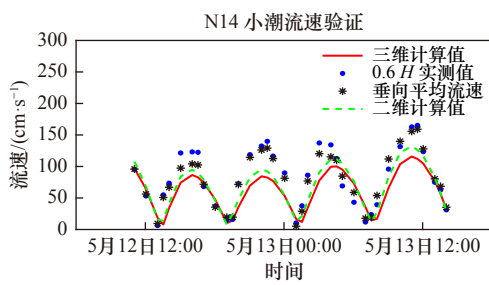
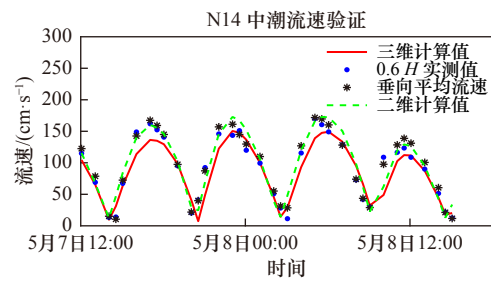
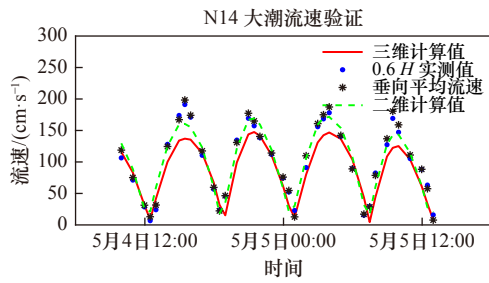
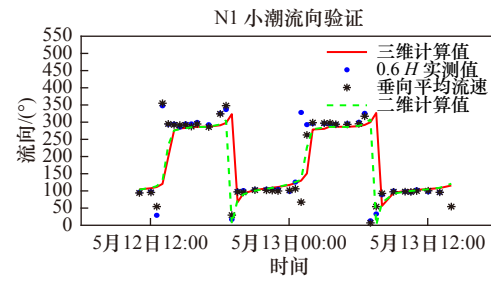
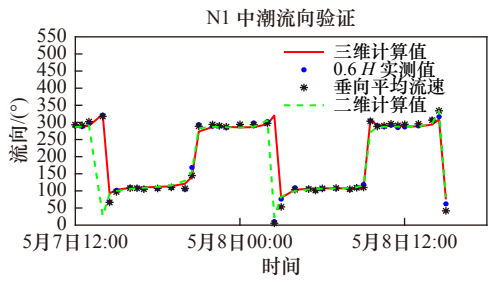
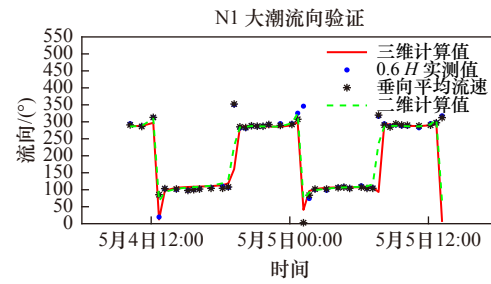
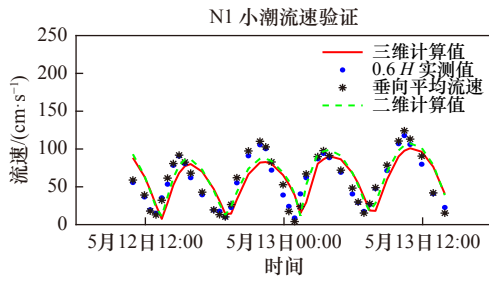
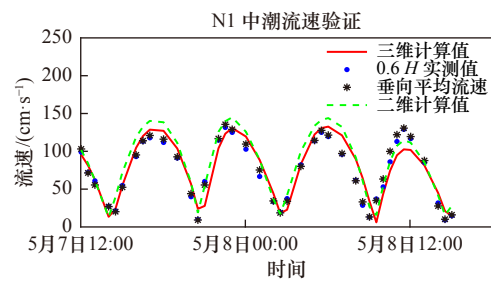
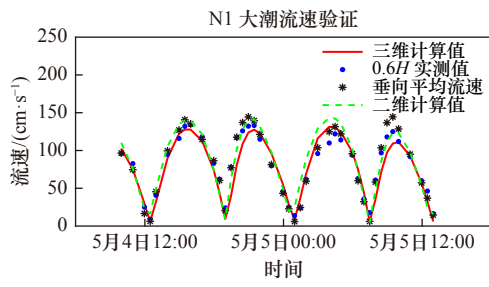


图7 潮位对比

Fig. 7 Tide level comparison



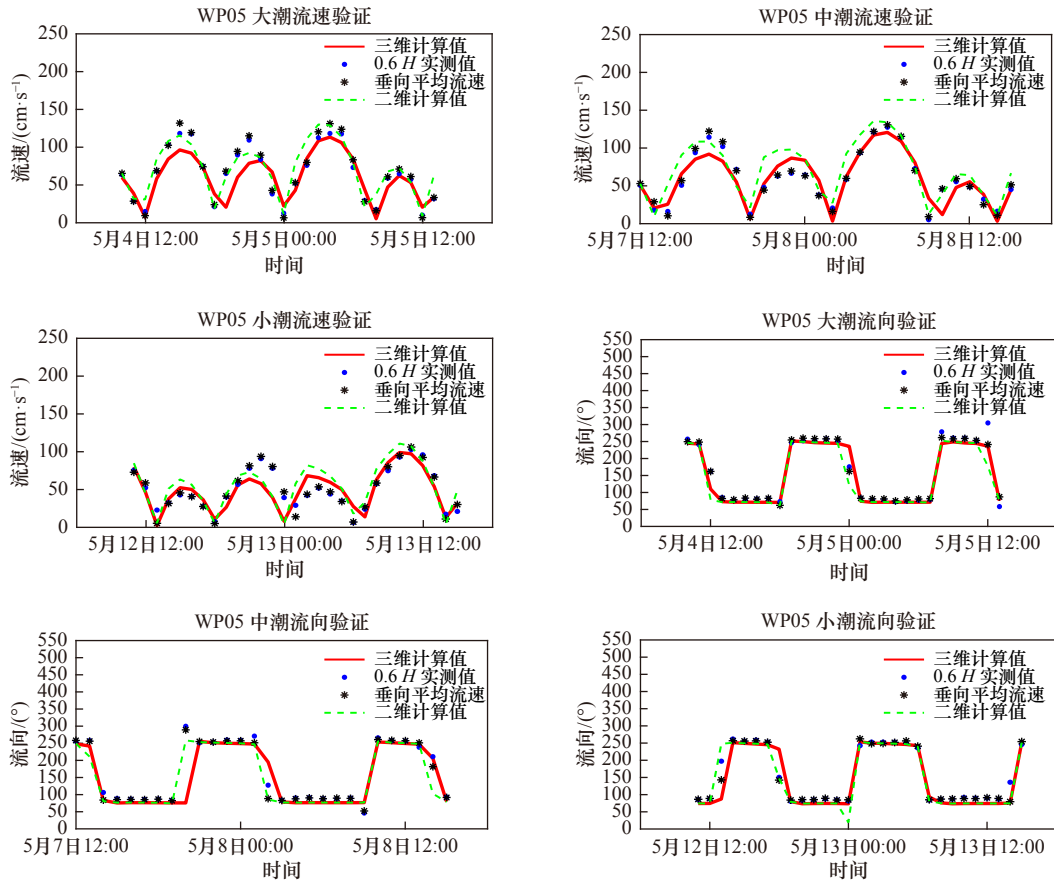


图8 中间层流速流向对比验证

Fig. 8 Comparative verification of velocity and direction in the middle layer

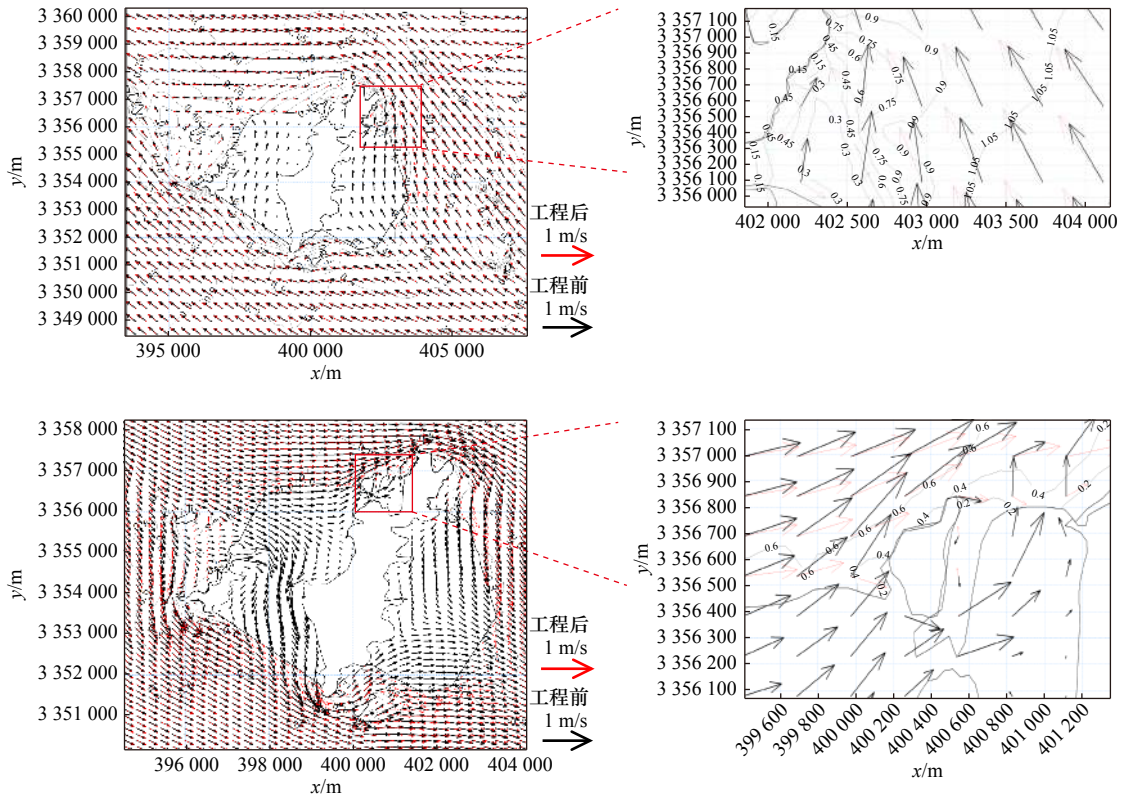


图9 表层潮流场对比(上:涨急下:落急)

Fig. 9 The comparison of tidal current field on the surface layer (up: rising; down: falling)

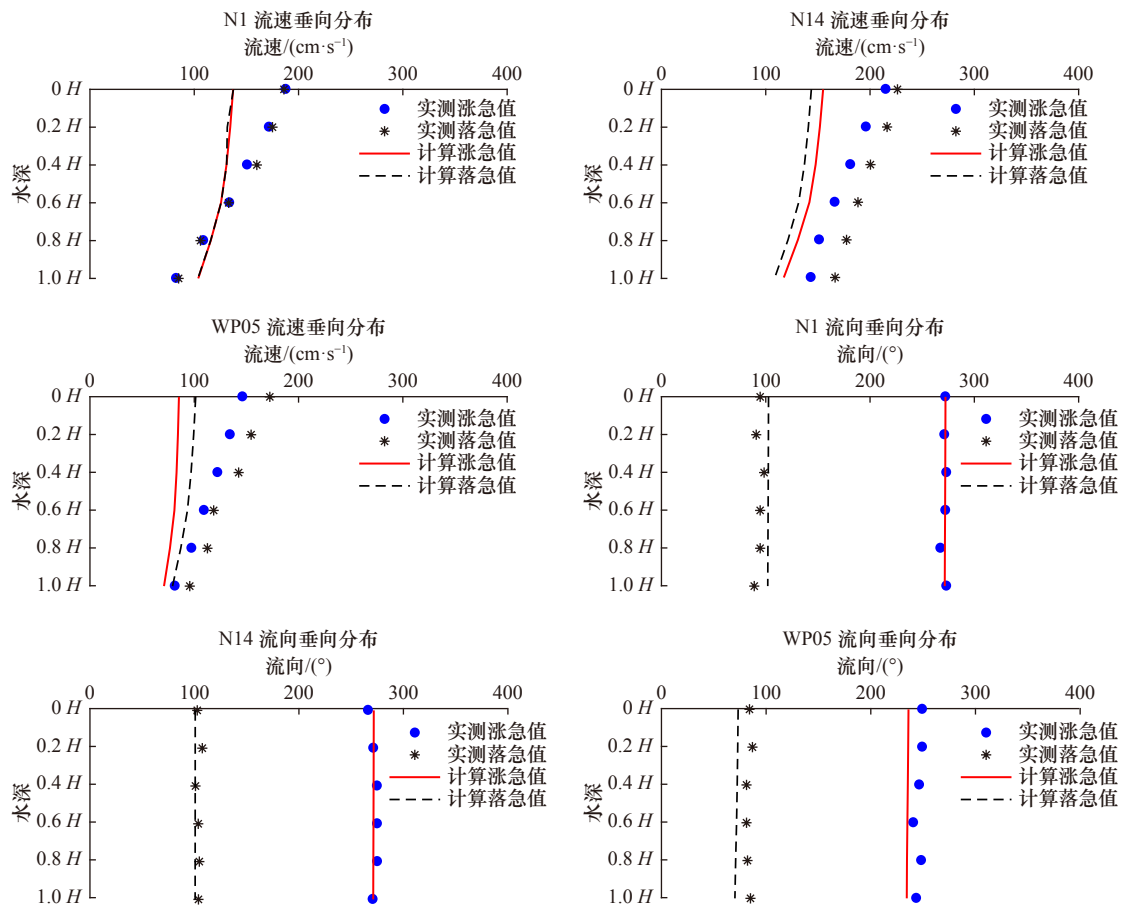


图 10 测站垂向流速流向分布

Fig. 10 Flow velocity and direction in vertical direction

生改变。

(3) 以 MIKE3 对工程附近垂向分布上的流速流向进行了分层结构分析, 整体上流速都呈现出随水深

的增加而减小, 可能由于未考虑风场和波浪场的影响, 导致部分测站表层计算数据与实测数据误差稍大, 对于流向各层十分一致。

#### 参考文献:

- [1] 胡雪晴. 海洋工程对水文动力环境影响分析[J]. 中阿科技论坛, 2020(5): 63–64.  
Hu Xueqing. Analysis of impact of marine engineering on hydrodynamic environment[J]. China-Arab States Science and Technology Forum, 2020(5): 63–64.
- [2] 吴仁豪, 童元正, 张旭锋, 等. 舟山凉潭岛填海工程对水动力及海床演变影响的模拟预测分析[J]. 热带海洋学报, 2011, 30(4): 24–30.  
Wu Renhao, Tong Yuanzheng, Zhang Xufeng, et al. Prediction of the effect of reclamation near Liangtan Island in Zhoushan water area[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2011, 30(4): 24–30.
- [3] 任一晗, 叶涛焱, 杨铭哲, 等. 围垦对舟山群岛海域潮流结构及潮能分布影响研究[J]. 海洋工程, 2021, 39(2): 80–89.  
Ren Yihan, Ye Taoyan, Yang Mingzhe, et al. Impacts of reclamations on tidal flow structure and tidal energy in the Zhoushan Archipelago sea area[J]. The Ocean Engineering, 2021, 39(2): 80–89.
- [4] Safavi S, Saghafian B, Hosseini S A. Characterizing flow pattern and salinity using the 3D MIKE 3 model: Urmia Lake case study[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(3): 115–126.
- [5] 窦明, 左军成, 陈美香, 等. 大洋山围垦工程对邻近海域环境的影响[J]. 海洋环境科学, 2018, 37(3): 409–417, 447.  
Dou Ming, Zuo Juncheng, Chen Meixiang, et al. The influence of Dayangshan reclamation project on the environment of adjacent sea area[J]. Marine Environmental Science, 2018, 37(3): 409–417, 447.
- [6] 刘嘉星, 刘长根. 围海造地对天津港附近海域三维潮流场影响的数值模拟研究[J]. 海洋湖沼通报, 2017(4): 79–85.  
Liu Jiaxing, Liu Changgen. Numerical simulation of the impact of reclamation project on the 3D tidal current field near Tianjin Port[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2017(4): 79–85.
- [7] 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.  
Liu Jinpeng, Shi Bing, Wu Dianchun. Numerical simulation of wave field and hydrodynamic field around the artificial island in

- Longkou[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2021(1): 1–10.
- [8] Zamani B, Koch M. Comparison between two hydrodynamic models in simulating physical processes of a reservoir with complex morphology: maroon reservoir[J]. *Water*, 2020, 12(3): 814–837.
- [9] Soltani S, Askar M B, Bahrami H, et al. Evaluation of sediment transport in the naiband gulf area using Mike21[J]. *Open Journal of Geology*, 2017, 7(2): 182–192.
- [10] Elshemy M, Khadr M, Atta Y, et al. Hydrodynamic and water quality modeling of Lake Manzala (Egypt) under data scarcity[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(19): 1329.
- [11] 孙平锋, 刘阳, 徐锐. 舟山绿色石化基地围垦平面布置方案[J]. *水运工程*, 2021(5): 65–70.  
Sun Pingfeng, Liu Yang, Xu Kun. Layout scheme for reclamation of green petrochemical base in Zhoushan[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2021(5): 65–70.
- [12] 熊伟, 刘必劲, 孙昭晨, 等. 宁波舟山近海三维潮汐潮流数值模拟[J]. *水道港口*, 2011, 32(6): 399–407.  
Xiong Wei, Liu Bijin, Sun Zhaochen, et al. 3D numerical simulation of tide and tidal currents in sea adjacent to Ningbo and Zhoushan[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2011, 32(6): 399–407.
- [13] Willmott C J. On the validation of models[J]. *Physical Geography*, 1981, 2(2): 184–194.
- [14] 安永宁, 吴建政, 朱龙海, 等. 龙口湾冲淤特性对人工岛群建设的响应[J]. *海洋地质动态*, 2010, 26(10): 24–30.  
An Yongning, Wu Jianzheng, Zhu Longhai, et al. Response of erosion-deposition pattern to artificial islands construction in Longkou Bay[J]. *Marine Geology Letters*, 2010, 26(10): 24–30.
- [15] 李逸聪, 王义刚, 黄惠明. 湾口围填海对钦州湾水动力环境的影响[J]. *水运工程*, 2017(3): 44–50.  
Li Yicong, Wang Yigang, Huang Huiming. Impacts of bay mouth reclamation on hydrodynamic environment of Qinzhou Bay[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2017(3): 44–50.
- [16] 王世澎, 梁书秀, 孙昭晨. 二维情况下波浪对潮流场作用的数值分析[J]. *海洋学报*, 2007, 29(2): 173–178.  
Wang Shipeng, Liang Shuxiu, Sun Zhaochen. The numerical analysis of wave effects on a tidal current in two dimensions[J]. *Haiyang Xuebao*, 2007, 29(2): 173–178.

## Numerical study on three-dimensional tidal current characteristics of Zhoushan Green Petrochemical Company

Lu Fan<sup>1</sup>, Shen Liangduo<sup>1</sup>, Gao Yu<sup>1</sup>, Wang Jinbao<sup>1</sup>

(1. School of Naval Architecture and Maritime, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316021, China)

**Abstract:** In this paper, MIKE3 is used to establish a three-dimensional hydrodynamic model of Zhoushan and Ningbo. Based on the tidal current verification with the measured data, the difference between the three-dimensional model and the two-dimensional model is compared. Also, the influence of the change of the tidal current field around the Zhoushan Green Petrochemical Phase III reclamation project before and after the implementation is mainly predicted and analyzed. The results show that: (1) Under the same initial conditions, the tidal level and tidal current validation results of two-dimensional model and three-dimensional model are good, and the two-dimensional results are closer to the measured values in some cases. (2) The three-dimensional vertical velocity distribution shows a decreasing trend with the increase of water depth. In general, the tidal current fitting is good, and the relative error of velocity below  $0.6H$  water depth is between 10% and 15%. Considering that the model may not consider the influence of wind field and wave, the calculated surface velocity of local stations is slightly larger than the measured value; the vertical distribution of flow direction is nearly consistent. (3) Before and after the reclamation project, there was no obvious influence on the tidal current field around the project. Only in the northeast, southeast and northwest corner of Dayushan Island, affected by the “bend improvement” and the channel closure between small islands, there is a change in the local tidal current form. On the whole, the layout of reclamation projects conforming to the shoreline will have an effect on the local coastal tidal current, and almost no effect on the large scale tidal current field in the far sea.

**Key words:** reclamation; tidal current; numerical simulation; MIKE3; MIKE21