

金塘岛北部海域地形变化对 水动力环境的影响

苏 毓¹, 纪棋严^{1*}, 左军成², 蔡云霞², 孙永钊¹, 彭腾腾¹, 张 洁¹

(1. 浙江海洋大学 海洋科学与技术学院, 浙江 舟山 316022;

2. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306)

摘 要: 浙江舟山金塘岛北部围填海工程使其周边海域的地形产生了较大的变化。本文利用数值模拟方法研究了该围填海工程引起的地形变化对金塘岛周边海域的潮流、余流以及泥沙冲淤的影响。研究表明: 地形变化对沥港水道影响较大, 水道北部入口位置向北移, 入口处流速明显增大, 涨急流速由 0.50 m/s 增强为 0.92 m/s, 增强了 84%, 落急流速由 0.30 m/s 增强为 0.53 m/s, 增强了 77%, 余流流速由 0.05 m/s 增强为 0.12 m/s, 增强了 140%; 沥港水道中部转角处落急流速减弱; 围填海工程新生成的岬角处流速变化也较大, 2 个岬角凹处形成旋转流场, 涨急流速由 0.46 m/s 减弱至 0.14 m/s, 减弱了 70%, 落急流速由 0.61 m/s 减弱至 0.17 m/s, 减弱了 72%, 余流流速由 0.55 m/s 减弱至 0.04 m/s, 减弱了 93%。金塘岛北部海域泥沙淤积分布与余流变化大小分布一致, 表明两者密切相关且均受地形变化影响显著。

关键词: 金塘; 地形变化; SCHISM (Semi-implicit Cross-scale Hydrosceince Integrated System Model); 潮流; 余流; 冲淤
中图分类号: P731.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-6647(2022)03-0536-15

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20210508001

引用格式: 苏毓, 纪棋严, 左军成, 等. 金塘岛北部海域地形变化对水动力环境的影响[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(3): 536-550. SU Y, JI Q Y, ZUO J C, et al. The influence of topography change on hydrodynamic environment in the northern of Jintang Island sea area[J]. Advances in Marine Science, 2022, 40(3): 536-550.

金塘岛是舟山群岛的第四大岛, 东临舟山本岛, 北接杭州湾, 西侧和南侧通过金塘水道分别与宁波的镇海、北仑相接。金塘岛岸线长且顺直、周边海域水深变化不大、有众多岛屿作为天然屏障, 通航条件非常优越^[1]。金塘岛西南侧是金塘水道, 该水道狭窄, 水深条件优良, 是大型船舶进出宁波—舟山港的重要通道^[2]; 东侧为西堠门水道, 呈狭长形状且宽窄不一, 水深呈中间深两侧浅分布。除这两大水道外, 金塘岛和大鹏山之间还有一条较小的沥港水道。这些水道不仅是重要航道, 也是连接杭州湾与外海的潮汐通道, 水道内的潮流较强, 具有丰富的潮流能资源。此外, 金塘岛也是大陆和舟山连岛工程的第一站。独特的地理位置和区域优势, 使得金塘岛及其周边海域在航运、交通、海洋能源开发以及当地经济发展方面起着重要的作用, 故对该海域水动力环境现状及演变规律的监测、模拟和分析具有重要的应用价值。

围填海是当前我国海岸开发利用的主要形式^[3], 它能带来巨大的经济效益, 但对海洋环境与生态的负面影响也不可忽视。围填海工程会改变海域原有的自然属性使其岸线结构发生变化, 影响海域潮波反射的位置和方向, 导致潮流的流速、流向及潮汐振幅、迟角产生变化^[4]。围填海工程引起的潮流各项要素的变化也会导致泥沙运动变化, 造成海床泥沙淤积且不易扩散, 继而造成航道堵塞, 影响航运^[5]。围填海工程对潮致余流也有影响, 而潮余流的变化会影响海域的泥沙冲淤, 围填海工程对工程区临近海域的潮余流影

收稿日期: 2021-05-08

资助项目: 浙江省基础公益研究计划——浙江近海高分辨率浪-潮-流耦合数值预报系统 (LGF22D060001); 国家重点研发计划课题——全球高分辨率潮汐潮流数值模式研制 (2016YFC1401406)

作者简介: 苏 毓 (1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事海洋数值模拟与数据分析方面研究. E-mail: suyu0926@foxmail.com

* 通信作者: 纪棋严 (1986—), 男, 副教授, 博士, 主要从事海洋数值预报和资料同化方面研究. E-mail: jiqiyan@zjou.edu.cn

(李 燕 编辑)

响较大,对离工程区较远的其他海域影响较小^[6]。除围填海工程之外,人工岬湾的建造也会改变近岸波浪场,继而影响沿岸泥沙输运,对岸滩稳定有重要影响^[7]。

金塘岛周边海域的泥沙冲淤特征受自然环境变化和人类活动共同影响,但后者的影响要大于前者^[8]。研究表明,人类活动已经对金塘岛周边海域泥沙冲淤、生态环境等产生了一些影响。韩海骞等^[9]利用水槽模型对金塘大桥桥墩附近的海床冲刷做了模拟研究,发现在受工程影响的局部冲刷最大可达 14.4 m,明显大于自然冲刷幅度的平均值 1.1 m,为金塘大桥的工程建设、运行的安全性及经济性提供了技术支撑。邵卓等^[10]以金塘岛为研究对象,基于岸线开发类型、岸线开发生态环境影响分析、岸线开发饱和程度和岸线生态敏感性及其生态效应相关性的综合评价指数,计算出金塘岛北部及大鹏山岛的岸线开发生态压力指数可达 1.16,远大于金塘岛西南部 0.15。戴路等^[11]研究了金塘大桥的 350 个桥墩及其建设的非通航孔拦阻设置对金塘水道内泥沙分布影响。何微等^[8]利用 GIS(Geographic Information System) 技术分析了 1996—2016 年金塘岛周边海域的岸线和水下岸坡冲淤变化,发现金塘岛及附近岛屿主要受人类活动影响,在局部的围填海工程区的岸线变化较大,其 10 a 的淤积量可达 78 598.03 万 m³,10 a 的冲刷量为 45 162.82 万 m³,其净冲淤速率为 12.21 cm/a,在工程区及其附近海域普遍呈现淤积状态。人类活动引起的水动力环境的变化是金塘岛及周边海域产生泥沙冲淤、生态环境问题的重要原因,但前人的研究很少定量分析人类活动比如围填海工程对金塘岛周边海域水动力环境的影响。

为了研究金塘岛北部围填海工程引起的地形变化对其周边海域水动力环境的影响,本文利用三维海洋模型 SCHISM(Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Model) 对该海域围填海工程前后的潮汐潮流进行了模拟。在模型验证良好的基础上,分析围填海工程引起的地形变化对该海域潮汐、潮流和潮致余流的影响,以及潮流要素变化对泥沙淤积可能产生的影响,为今后该海域的维护发展和开发利用提供参考依据。

1 数据和方法

1.1 观测数据

本文收集了金塘岛北部附近海域 1 个验潮站(T01)和 5 个潮流观测站(S01、S02、S03、S04 和 S05 站)的实测数据(表 1),用于分析该海域的潮汐潮流特征,并用于验证模型模拟的潮位和潮流的准确性。为进一步分析金塘岛北部附近海域的水动力变化特征和趋势,在潮流变化较明显处选取了 4 个潮流分析特征点(A、B、C 和 D 点)(图 1)。验潮站在西堠门水道的西侧,观测时段为 2020 年 3 月 27 日 00:00 至 4 月 12 日 23:00,时间间隔为 1 h;5 个潮流观测站分布在金塘围填海区周边海域,垂向按各点水深 H 均匀分为 6 层(0 H 、0.2 H 、0.4 H 、0.6 H 、0.8 H 和 H 层),观测时段为大潮时段(2020 年 4 月 7 日 10:00 至 4 月 8 日 10:00)和小潮时段(2020 年 3 月 31 日 10:00 至 4 月 1 日 10:00),时间间隔为 1 h。

表 1 潮位站和潮流观测站位置信息

Table 1 Location information of tide gauge station and tidal current stations

类型	名称	经度	纬度
验潮站	T01 站	121°54'16"E	30°03'44"N
	S01 站	121°52'37"E	30°05'57"N
	S02 站	121°50'44"E	30°06'20"N
潮流观测站	S03 站	121°50'44"E	30°05'03"N
	S04 站	121°48'40"E	30°05'16"N
	S05 站	121°49'05"E	30°04'00"N

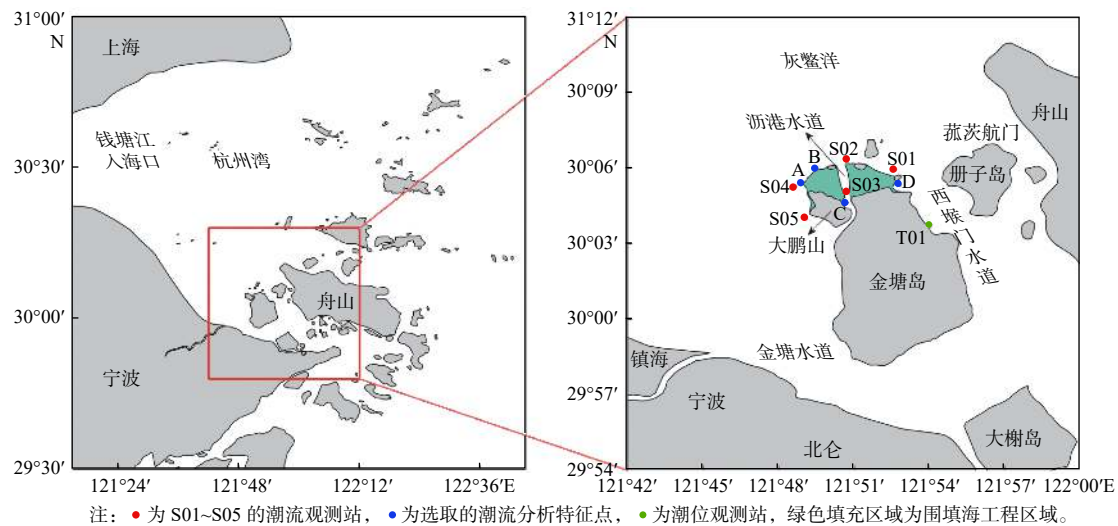


图 1 研究区域和观测站位

Fig. 1 Study area and observation stations

1.2 模型简介

本文使用 SCHISM (Semi-implicit Cross-scale Hydrosceince Integrated System Model) 模型模拟该海域工程前后的潮汐潮流, 用于研究围填海工程引起的水动力环境的影响。SCHISM 是一个基于非结构化网格的开源社区支持的模型系统, 旨在无缝模拟跨溪-湖泊-河流-河口-大陆架-海洋尺度的三维斜压环流。该模型采用高效且准确的半隐式有限元/有限体积方法和欧拉-拉格朗日算法来求解纳维-斯托克斯方程(流体静力学形式), 以模拟各种物理和生态过程。该模型混合使用高阶与低阶数值算法, 能够有效求得稳定准确的计算结果。SCHISM 模型具有模拟海洋环流、海啸危害、波浪相互作用、风暴潮、沉积物运输、生态、生物地球化学、水质和溢油的模块。

SCHISM 模型是基于原始 SELFIE 模型 (Semi-implicit Eulerian-Lagrangian Finite-Element model) 的衍生发展的模型^[12-13]。和 SELFIE 相比, 该模型具有以下特点: 水平方向可以采用非结构的三角形和四边形混合网格, 一方面可以拟合复杂岸线, 另一方面可以加密重点海域, 平衡分辨率与计算量之间的矛盾, 对低质量的网格包容性强; 垂直方向可以采用混合 SZ 坐标系或者 LSC² (Localized Sigma Coordinates with Shaved Cells) 坐标系, 有利于处理复杂地形变化, 不需要对海底地形进行平滑; 采用半隐式算法求解, 无 CFL (Courant-Friedrichs-Lewy condition) 稳定性约束, 可以提高数值效率。基本动力方程和连续方程如下:

动量方程:

$$\frac{Du}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial u}{\partial z} \right) - g \nabla \eta + f, \quad (1)$$

$$f = f(v, -u) - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \nabla \rho d\xi - \frac{\nabla P_A}{\rho_0} + \alpha g \nabla \psi + F_m + F_{other}, \quad (2)$$

式中: $\mathbf{u}$ 为水平速度; t 为时间; x 为水平方向距离; ν 为垂直涡动黏性系数; z 为垂直方向距离; g 为重力加速度; $\nabla = (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y})$ 为梯度算子; f 为动量的其他强迫项 (斜压梯度、水平黏性、科氏力、地球潮汐势、大气压力和辐射应力等); u 和 v 分别为水平速度 $\mathbf{u}$ 在东西和南北方向的分量; ξ 为水深变化高度; η 为自由表面高度; ψ 为引潮势; F_m 为水平黏度; F_{other} 为辐射应力。

2D、3D 深度积分形式的连续方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \int_{-h}^{\eta} \mathbf{u} dz = 0, \quad (4)$$

式中: w 为垂向速度; h 为垂直方向水深。

模型在垂向上可以采用 SZ 坐标。 S 到 Z 的坐标转化公式:

$$\begin{cases} z = \eta(1 + \sigma) + h_c \sigma + (\tilde{h} - h_c) C(\sigma) & (-1 \leq \sigma \leq 0) \\ C(\sigma) = (1 - \theta_b) \frac{\sinh(\theta_f \sigma)}{\sinh \theta_f} + \theta_b \frac{\tanh \left[\theta_f \left(\sigma + \frac{1}{2} \right) - \tanh \left(\frac{\theta_f}{2} \right) \right]}{2 \tanh \left(\frac{\theta_f}{2} \right)} & (0 \leq \theta_b \leq 1, 0 \leq \theta_f \leq 20) \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $\tilde{h} = \min(h, h_s)$; h_c 、 θ_b 和 θ_f 均为常数, 其中 h_c 决定了底层或表层的厚度, θ_b 和 θ_f 用来控制海底和海面附近的垂直分辨率, 随着 θ_f 趋向于 0, S 坐标向 σ 坐标转化。

1.3 模型设置

本文重点关注区域为金塘岛北部围填海周边海域, 为了较好地模拟该海域的潮汐潮流特征, 模拟区域范围设置为 $(120^{\circ}06' \sim 125^{\circ}18'E, 28^{\circ}27' \sim 32^{\circ}48'N)$, 包括舟山群岛、杭州湾、长江口以及部分东海海域, 如图 2 所示。采用非结构三角形网格剖分计算域, 对重点关注的工程区附近海域进行网格加密, 非重点关

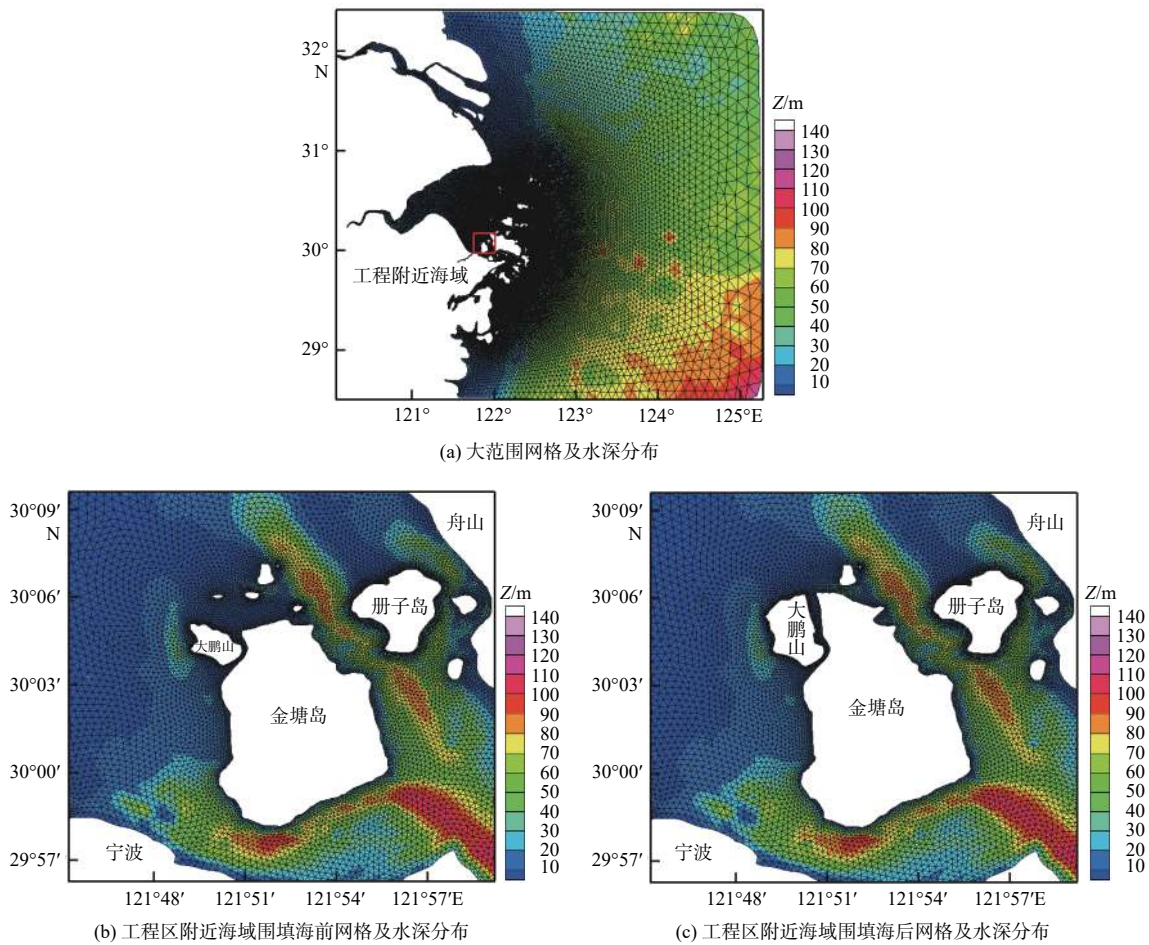


图 2 模式网格和水深分布

Fig. 2 Bathymetry and grid of the numerical model

注区域进行稀疏处理, 三角形网格最小边长约为 10 m, 最大边长约为 10 000 m。根据围填海工程前后的岸线差异, 分别构建工程前后的两套网格(图 2), 这两套网格对应的岸线只在围填海工程区域有差别。两套网格均使用了 11 个分潮(M_2 、 S_2 、 K_2 、 N_2 、 O_2 、 K_1 、 P_1 、 Q_1 、 M_f 、 M_4 、 MS_4)作为模型的潮汐驱动条件, 这个 11 个分潮调和常数(振幅、迟角)由水平分辨率为 $1/16^\circ$ 的 FES_2014 模式结果插值得到^[14]。垂向采用 S 坐标, 分为 21 层。模式采用冷启动, 模拟时间自 2020 年 3 月 25 日 00:00 起至 4 月 25 日 23:00, 模拟时长为 1 个月, 模式结果 1 h 输出一次。

2 结果分析

2.1 观测结果分析

2.1.1 潮汐特征

对工程区内潮位站 15 d 潮位数据进行调和分析, 得到了 17 个分潮的调和常数。采用分潮振幅的比值 $(H_{K_1} + H_{O_1})/H_{M_2}$ 来确定潮汐类型^[15], 计算得到分潮振幅的比值为 0.45, 由此可判定本海区的潮汐类型为正规半日潮。

2.1.2 潮流特征

根据 5 个潮流观测站数据, 对各站大、小潮期间垂向平均涨、落潮的最大流速、平均流速和流向等潮流特征进行统计分析(表 2)。为便于与金塘岛周边大面积海域的流场作对比分析, 本文以大面积海域内潮波的传播方向来判定涨落潮方向。涨潮时, 潮波大致呈 SE—NW 方向传播, 指向杭州湾; 落潮时, 潮波大致呈 NW—SE 方向传播, 远离杭州湾。

表 2 各观测站大、小潮期间最大潮流和平均潮流的统计特征
Table 2 Statistics of the maximum and mean tidal currents during spring and neap tides at each station

站 位	时 段	大潮期间实测最大流速		小潮期间实测最大流速		大潮期间平均流速		小潮期间平均流速	
		流速/(m·s ⁻¹)	流向/(°)	流速/(m·s ⁻¹)	流向/(°)	流速/(m·s ⁻¹)	流向/(°)	流速/(m·s ⁻¹)	流向/(°)
S01 站	涨潮	1.14	295	0.72	294	0.70	282	0.37	254
	落潮	1.04	115	0.85	105	0.73	111	0.49	104
S02 站	涨潮	1.12	333	1.15	306	0.58	275	0.63	296
	落潮	1.32	175	1.23	139	0.80	156	0.71	147
S03 站	涨潮	0.94	343	0.90	352	0.46	299	0.54	344
	落潮	0.99	158	0.75	163	0.61	158	0.38	162
S04 站	涨潮	2.02	357	1.16	358	1.00	342	0.59	279
	落潮	2.52	203	1.08	172	1.00	171	0.63	180
S05 站	涨潮	1.63	336	0.84	323	0.93	329	0.40	278
	落潮	2.00	152	1.00	141	1.08	151	0.60	153

大潮期间, 除 S01 站外, 其他 4 个站的最大流速和平均流速, 均表现为落潮流流速大于涨潮流流速。小潮期间, S01 站、S02 站和 S05 站的最大流速和平均流速, 表现为落潮流流速大于涨潮流流速, 但 S03 站和 S04 站的涨潮流流速大于落潮流流速。总体而言, 小潮期间各测站的最大流速要弱于大潮。S04 站在大潮期间出现最大涨潮流速和最大落潮流速, 分别为 2.02 m/s 和 2.52 m/s。

为分析各站的潮流矢量特征, 绘制了各站大、小潮期间的潮流图(图 3)。S04 站和 S05 站位于大鹏山西

侧,潮流受附近岛屿影响较小,大小潮的潮流流速均比另外3个站的大。S04站远离大鹏山岬角,受岛屿岸线影响较小,潮流流向变化较大,呈现出旋转流的特征。S05站涨潮和落潮的潮流方向大致相反,往复流的特征较为显著,大鹏山岸线对该站的潮流流向有一定影响。S03站位于沥港水道中,受该水道地形的影响,大潮和小潮的流速均较弱,呈明显的往复流特征。S01站的涨落潮潮流的方向与工程后的岸线基本平行,表明该站的潮流受到了围填海工程的影响。S02站位于金塘岛北部的岬角处,受到流经沥港水道和西垵门水道的潮流共同影响,涨落潮潮流的方向与S01站、S03站涨落潮潮流的方向都有一定的角度差。

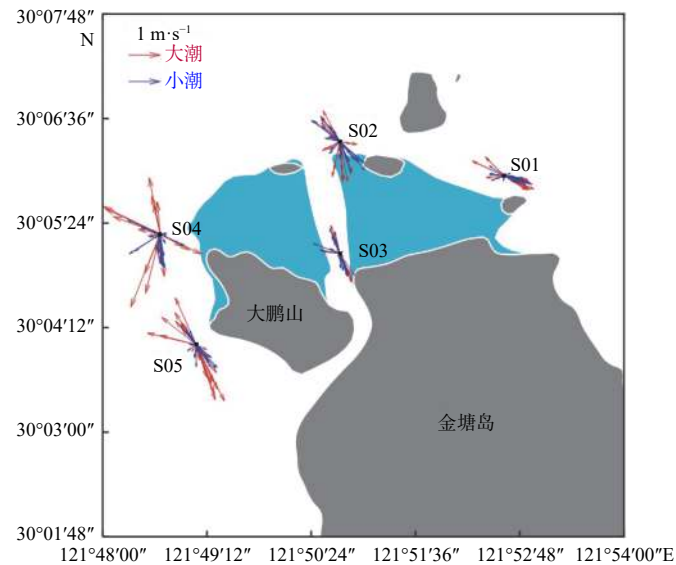


图3 各潮流观测站大、小潮期间潮流矢量图

Fig. 3 Current roses during spring and neap tides at stations S01-S05

2.2 模拟结果分析

2.2.1 模型潮位验证

图4给出了验潮站的实测潮位资料与对应时段模型模拟潮位的对比结果,可以看出大潮和小潮期间模式计算结果和实测值基本吻合。潮位的平均绝对误差在0.16 m以内,均方根误差为0.20 m。潮位误差分析结果表明,与该点的潮差相比,模型可以较好反映金塘岛北部围填海工程区海域的潮位变化特征。

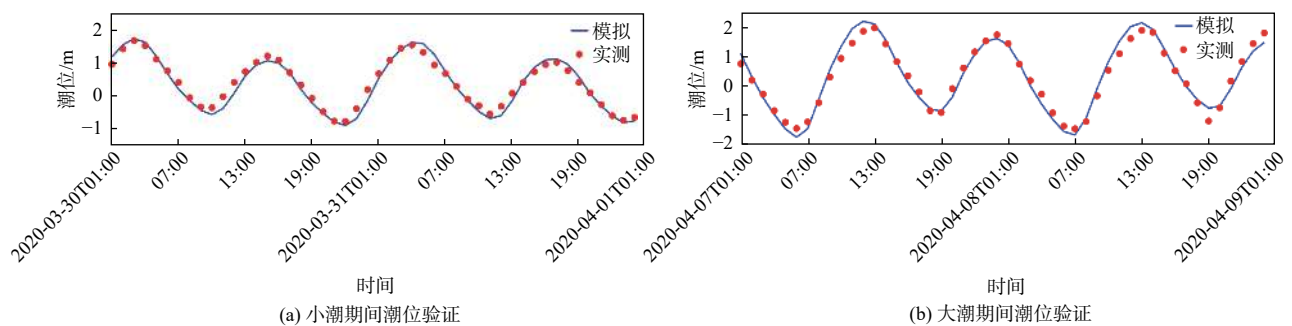


图4 大、小潮期间模拟与实测潮位对比

Fig. 4 Comparison of tidal elevation between observation and simulation during spring and neap tides

2.2.2 模型潮流验证

图 5 和图 6 给出了 5 个潮流站的实测潮流资料与对应时段模型模拟潮流的过程曲线, 由于篇幅限制, 本文只给出了 0.2H 层的大、小潮潮流验证结果, 表 3 给出了流速、流向的误差统计特征。流向的平均绝对误差的平均值约为 17.46° , 均方根误差的平均值为 30.50° 。流速平均绝对误差的平均值为 0.17 m/s , 均方根误差的平均值为 0.22 m/s 。其中, S03 站流向的均方根误差最大, 模拟效果相对较差, 该站位于沥港水道中央, 水道狭窄, 潮流观测数据受来往船只影响较大, 存在不规则波动变化, 而模型模拟的潮流较为规律, 因此与实测相比有一定差异。总体来看, 除了流速的拟合效果稍有差异, 模型模拟的水位和流向均拟合较好, 表明模型较为准确地模拟了该海域的流场。

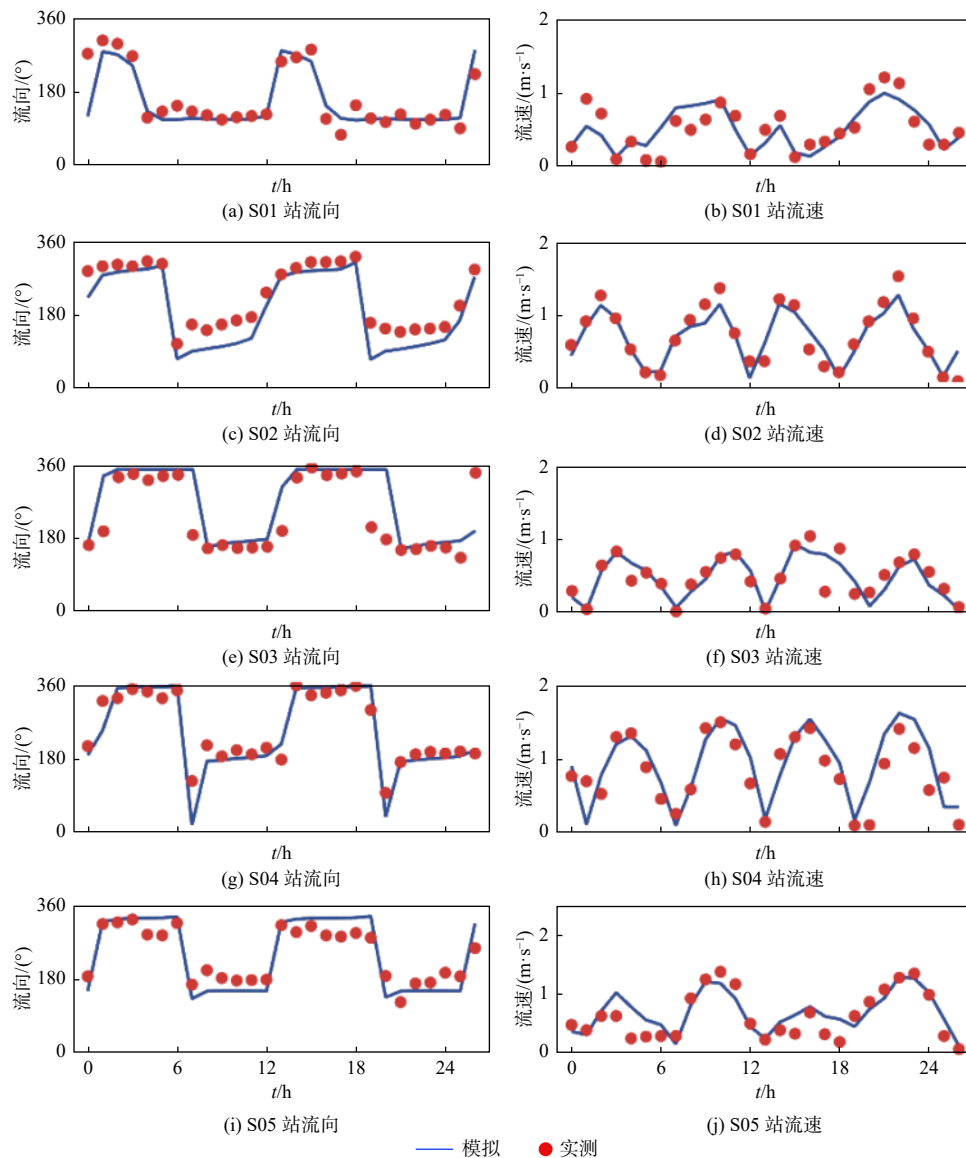


图 5 各潮流观测站 0.2H 层在小潮期间模拟结果与实测数据对比

Fig. 5 Comparison of tidal currents between observation and simulation at 0.2H layer of all the stations during neap tide

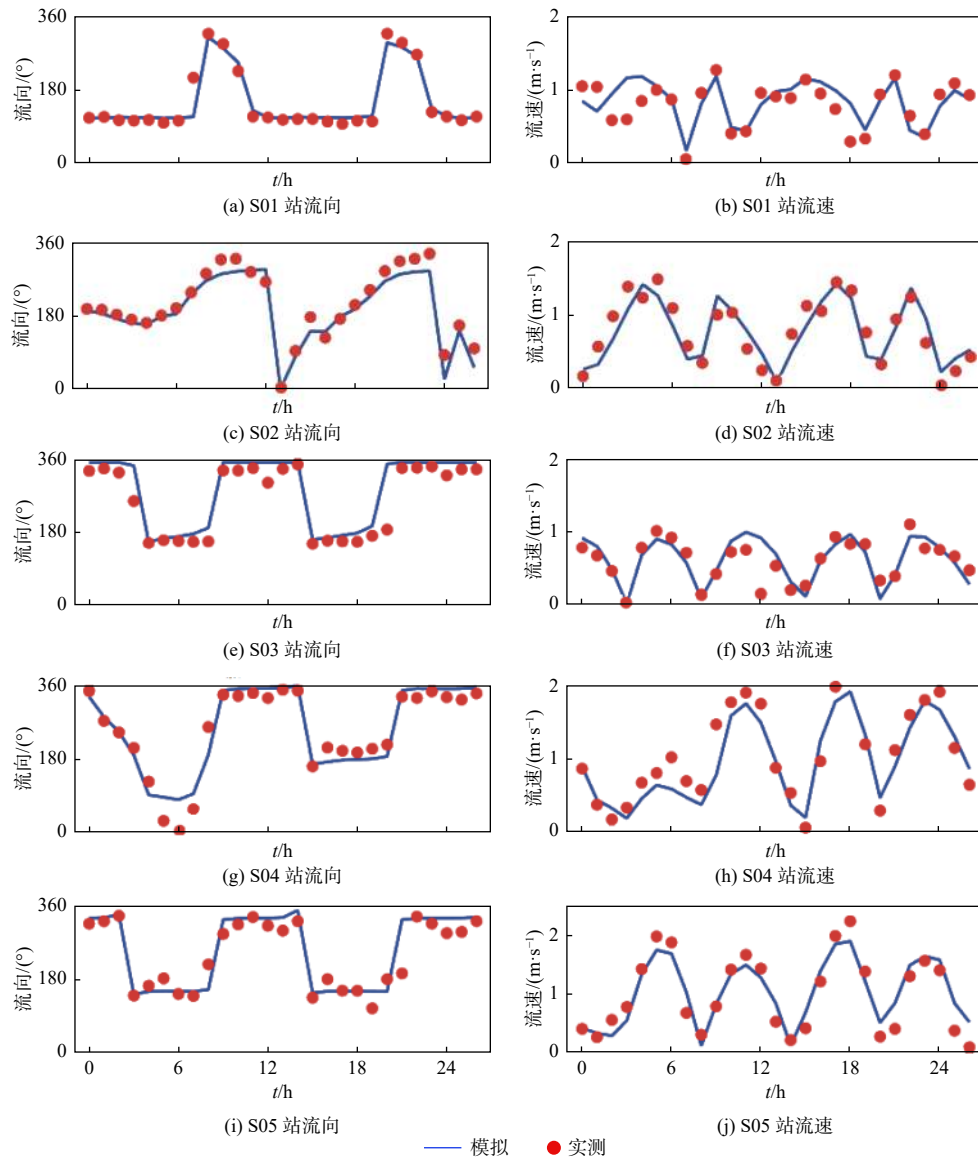


图 6 各潮流观测站 0.2H 层大潮期间模拟结果与实测数据对比

Fig. 6 Comparison of tidal currents between observation and simulation at 0.2H layer of all the stations during spring tide

表 3 大、小潮期间 0.2H 层模式潮流结果与实测数据误差分析

Table 3 Error analysis of tidal current between observation and simulation during the spring and neap tides at 0.2H layer of all the stations

站 位	要 素	平均绝对误差	均方根误差	站 位	要 素	平均绝对误差	均方根误差
T01 站	潮位/m	0.16	0.20	S04 站	流速/(m·s ⁻¹)	0.18	0.25
S01 站	流速/(m·s ⁻¹)	0.17	0.22		流向/(°)	11.48	21.17
	流向/(°)	22.22	30.18	S05 站	流速/(m·s ⁻¹)	0.21	0.24
S02 站	流速/(m·s ⁻¹)	0.18	0.20		流向/(°)	21.20	35.27
	流向/(°)	15.02	24.88	S01~S05 站平均	流速/(m·s ⁻¹)	0.17	0.22
S03 站	流速/(m·s ⁻¹)	0.14	0.20		流向/(°)	17.46	30.50
	流向/(°)	17.40	40.99				

2.2.3 模型潮流结果分析

为详细分析此海域的水动力变化特征和趋势，根据岸线特征提取了 4 个特征点(A、B、C 和 D 点)(图 1)，特征点 A(121°48′54″E，30°05′22″N)位于大鹏山西侧的岬角附近，比 S04 站更靠近工程后的海岸，可以较好地反映流场的转向特征；特征点 B(121°49′30″E，30°06′00″N)与特征点 A 的连线平行于大鹏山北侧新增的岸线，位于工程后涨潮流汇流处，可以反映地形变化对流场的影响；特征点 C(121°50′42″E，30°04′37″N)位于沥港水道的岬湾口处，在工程后形成的新岸线和原始岸线的交界处，可以反映新增岸线对水道的影响；特征点 D(121°52′48″E，30°05′20″N)位于金塘岛北部东侧新生成的岬湾里，可以反映该区域的旋转流场变化。

围填海工程改变了金塘岛北部海域的地形特征，从表 4 中可以看出：S01 站和 S03 站工程后涨急和落急时的流速均增大，S01 站涨急流速增强 21%，落急流速增强 32%，S03 站工程后的流速变化更明显，涨急流速由 0.5 m/s 增加为 0.92 m/s，增强了 84%，落急流速由 0.3 m/s 增加为 0.53 m/s，增强了 77%；S02 站工程前后流速几乎不变；S04 和 S05 站工程前后流速变化不大，S04 站涨急流速增强 4.06%，落急流速增强 10.17%，S05 站涨落急流速减弱 5% 左右。

表 4 各特征点在不同情况下潮流流速对比
Table 4 Comparison of tidal velocity at typical locations in different scenarios

时 刻	流速参数	潮流观测站					特征点			
		S01 站	S02 站	S03 站	S04 站	S05 站	A	B	C	D
涨急时刻	工程前流速/(m·s ⁻¹)	0.28	0.64	0.5	1.73	1.59	1.41	0.46	0.34	0.46
	工程后流速/(m·s ⁻¹)	0.34	0.64	0.92	1.8	1.51	1.61	0.06	0.45	0.14
	流速变化值/(m·s ⁻¹)	0.06	0	0.42	0.07	-0.08	0.2	-0.39	0.11	-0.32
	流速变化率/%	21	0	84	4	-5	14	86	32	69
落急时刻	工程前流速/(m·s ⁻¹)	0.62	0.86	0.3	1.8	1.54	1.72	1.13	0.46	0.61
	工程后流速/(m·s ⁻¹)	0.82	0.86	0.53	1.99	1.45	2.2	1.18	0.25	0.17
	流速变化值/(m·s ⁻¹)	0.2	0	0.23	0.18	-0.09	0.48	0.05	-0.21	-0.44
	流速变化率/%	32	0	77	10	-6	28	4	-46	-72

注：正值表示流速增强，负值表示流速减弱。

A 站在 S04 站附近，A 站更靠近工程后的海岸，A 站涨急流速增强 14%，落急流速增强 28%，涨、落急流速变化比 S01 站小。B 站在 S02 与 S04 站之间，工程后 B 站涨急流速减弱 86%，落急流速增强 4%。C 站在原沥港河道中，靠近 S03 站，相较于 S03 站流速变化不大，涨急流速增强 31%，落急流速减弱 46%。西垵门水道附近的 D 站在工程后流速明显减弱，涨急流速由 0.46 m/s 减小至 0.14 m/s，减弱了 69%，落急流速由 0.61 m/s 减小至 0.17 m/s，减弱了 72%。

2.3 工程影响分析

2.3.1 潮流变化分析

金塘岛周边海域的潮汐潮流受东海潮波和舟山群岛地形的共同影响，涨潮流和落潮流的方向与岛屿间的水道密切相关。涨潮时，东南外海的潮流经过西垵门水道和金塘水道流向西北方向的灰鳖洋；落潮时，灰鳖洋的潮流经过西垵门水道和金塘水道流向东南方向的外海。为了分析金塘岛北部海域工程前后潮流场变化特征，本文对工程前后涨急时刻(图 7)、落急时刻(图 8)表层流场进行了比较分析，选取了 4 个变化特征较明显的区域：大鹏山西侧为区域 1(121°48′54.0″~121°49′26.4″E，30°04′04.8″~30°04′51.6″N)、大鹏山北侧为区域 2(121°48′54.0″~121°55′22.8″E，30°05′06.0″~30°06′36.0″N)、沥港水道为区域

3(30°04′04.8″~30°06′18.0″E, 121°50′24.0″~121°51′00.0″N)和金塘北东侧岬湾为区域4(30°04′37.2″~30°06′00.0″E, 121°52′22.8″~121°53′34.8″N)(图7c)。

1) 涨急时刻潮流变化

围填海工程前, 涨急时刻大鹏山北侧潮流为西北向, 金塘岛东北海域潮流受岸线影响, 流向主要为西北和正西方向, 流速较小, 为0.2~0.6 m/s。大鹏山和金塘岛以北的大髻山岛、鱼龙山岛、大菜花山岛和横档山岛的复杂岸线会造成整体潮流动能大幅度衰减, 导致潮流流速较金塘岛东北侧水道大幅下降, 均低于0.4 m/s; 同时由于潮流受地形作用, 水质点动量变化复杂, 导致流向错综复杂, 其中鱼龙山东南侧出现西南流, 横档山北侧出现东北流, 但整体潮波运动仍以西北向传播为主, 并不会因该处小尺度动能损耗造成整体运动趋势改变, 因此, 该处潮流仍为西北向流动, 仅在鱼龙山东南侧近岸小范围海域潮流存在相反流动趋势。沥港水道流速在水道拐弯处较大, 可以达到1.0~1.6 m/s, 流向沿着岸线由东北流向变为东南流向后进入灰鳖洋。

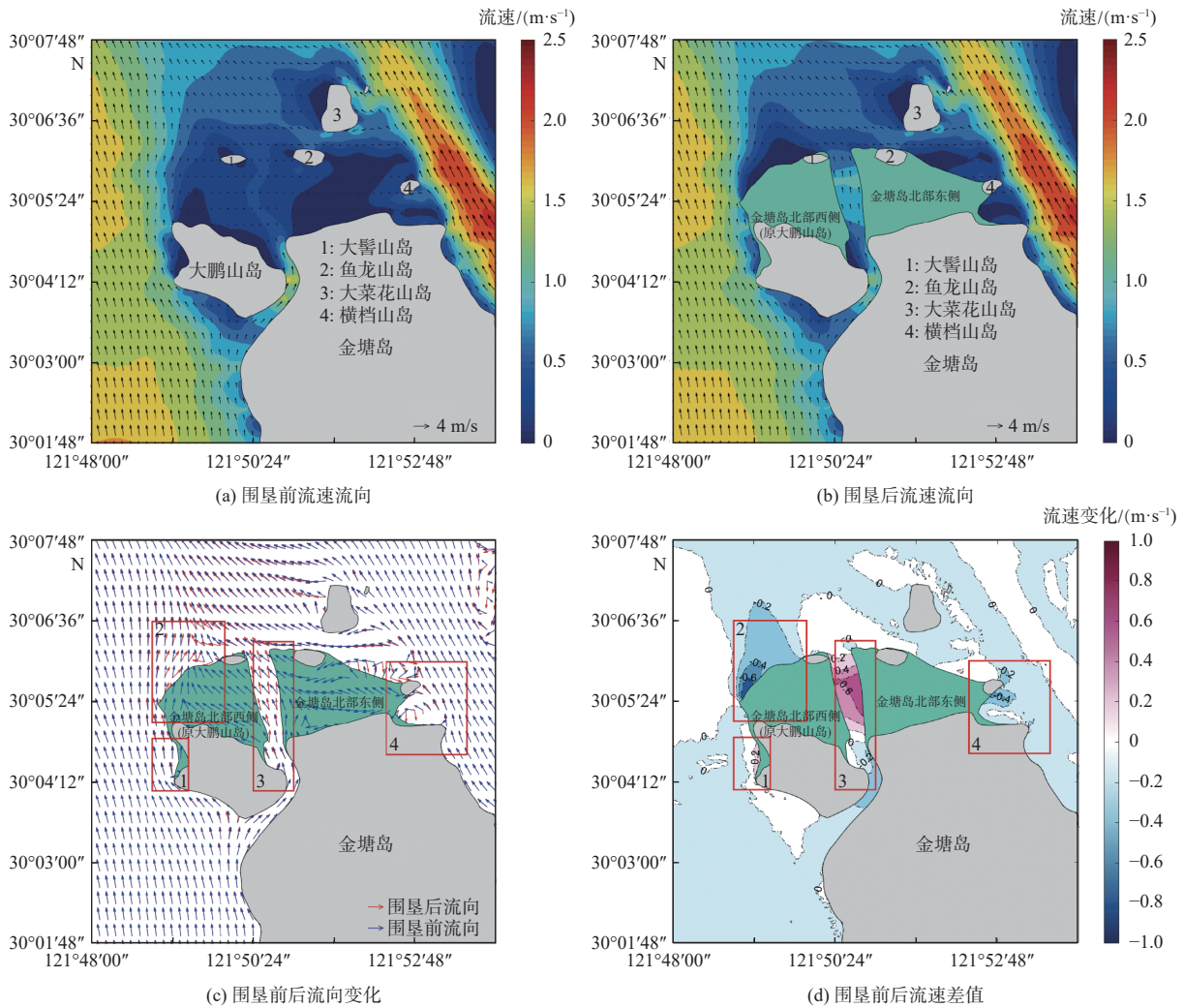


图7 涨急时刻流速、流向变化对比

Fig. 7 Comparison of current fields during spring tide between pre- and post-reclamation

围填海工程后, 区域1的涨急流速比工程前的流速增加约0.1 m/s, 流向向西偏转5°左右; 区域2东西两侧的潮流沿工程后的岸线向中间靠拢, 交汇后向北流, 该区域流速明显变缓, 平均减少约0.4 m/s; 区域3的流速流向变化最大, 流向向东偏转约30°, 流速最大增加约0.6 m/s; 区域4新形成的岬湾使该海域的流速

整体减小约 0.2 m/s, 流向由原来的西北向变为逆时针方向在岬湾中流转(区域 1、2、3、4 见图 7c、图 7d 红框处)。

2) 落急时刻潮流变化

围填海工程前, 落急时刻的大鹏山北侧海域潮流为东南向, 金塘岛东北海域潮流受岸线影响流向主要为东南向、东向与南向, 流速较小, 为 0.2~0.8 m/s, 略大于涨急时刻。大鹏山和金塘岛以北海域, 受大髻山、鱼龙山、大菜花山、横档山地形阻挡作用, 流速整体降低, 但横档山西侧海域流速较大, 为 1.2~1.4 m/s; 流向整体为东南向, 在横档山东南侧海域出现东北流; 沥港水道流速在水道拐弯处较大, 最大为 2.0 m/s, 潮水沿着岸线流入金塘水道。

围填海工程后, 金塘岛北部西侧海域的区域 1 流速变化稍大, 西侧靠北位置的流速减小了 0.2~0.6 m/s, 流向由原西南方向向南偏转了 30°左右, 呈现正南流向, 西侧靠南位置的流速增大了 0.2~0.4 m/s, 流向变化不大, 稍向西偏转了 10°左右; 金塘岛西北部区域 2 西侧的潮流在岛屿近岸分成两股, 分别向西和向东流, 此区域流速明显变缓, 平均减少了 0.4 m/s; 金塘岛北部的区域 4 流速稍微减小, 约为 0.2 m/s, 但流向变明显, 此区域的两个岬角使潮水在落潮时呈顺时针方向流动, 与原流向比最大偏转了 180°; 位于沥港水道的区域 3 流速变化最大, 在水道入口处流速最多增加了 0.6 m/s, 在水道拐弯处减小了 0.4~0.6 m/s(区域 1、2、3、4 见图 8c、图 8d 红框处)。

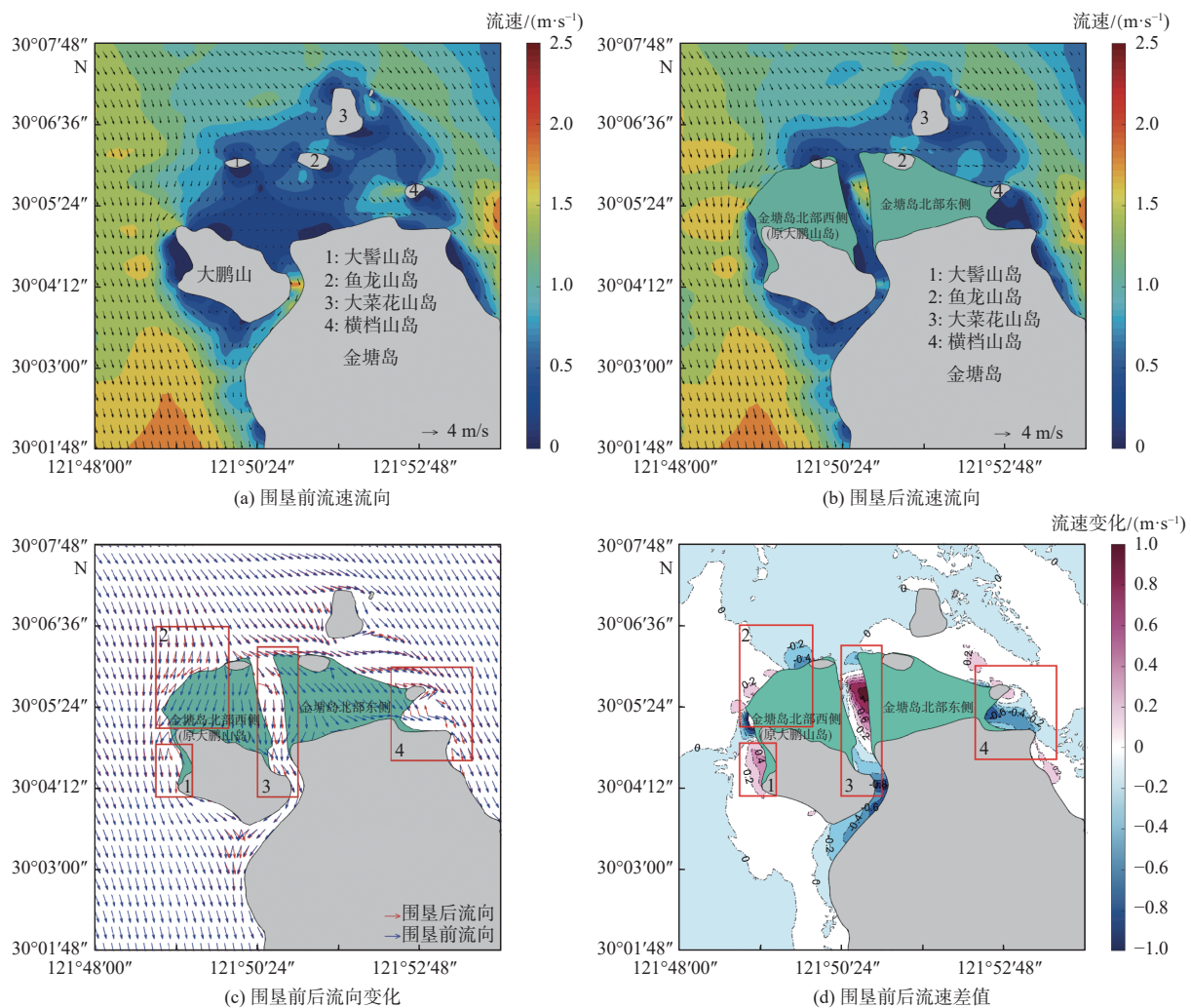


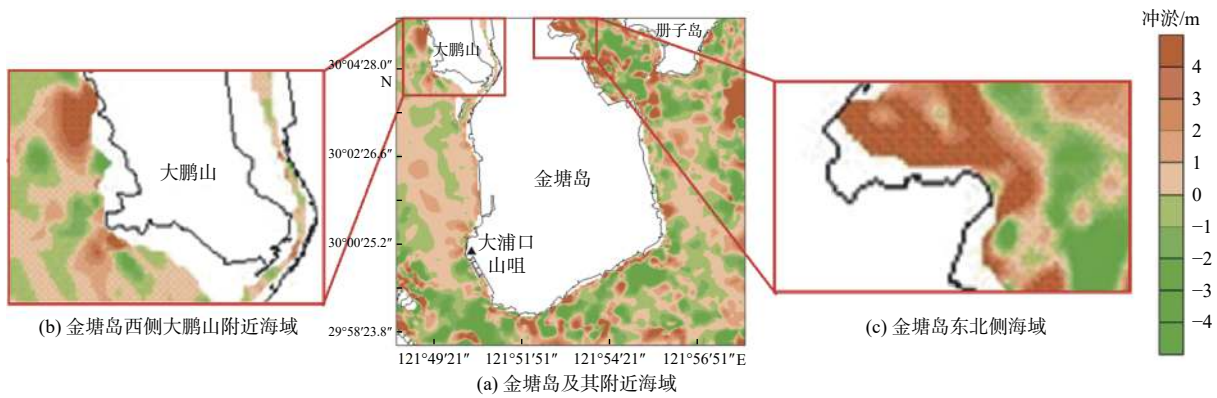
图 8 落急时刻工程前后流速、流向变化对比

Fig. 8 Comparison of current fields during ebb tide between pre- and post-reclamation

2.3.2 潮余流的变化分析

围填海工程引起的旋转流场、涨潮汇流和落潮分流等潮流要素变化对余流强弱有较大影响,进而可能影响冲淤变化。工程区海域水深较浅平均水深不足 10 m,且研究表明浙江近海大部分区域各层余流方向一致性较好^[16],故对模拟得到的围填海前后 2020 年 3 月 25 日至 4 月 25 日的垂向平均潮流进行调和与分析,去除周期性潮流以计算欧拉余流。

图 9 给出了何微等计算得到的 2011—2016 年金塘岛附近海域的冲淤变化特征^[8],图 10 为本文计算得到的工程前后余流变化图,两者分布特征较为相似,余流显著减小区域也是淤积显著的区域。其中,金塘岛西侧大鹏山海域(图 9b)和金塘岛东北侧(图 9c)是淤积最明显的地方,淤积在 3~4 m,同时这两个区域的余流(图 10b、10c)在地形变化后流速减小最为明显,总体变化趋势一致,工程前后余流的变化与冲淤变化有一定的相关性。



注: 图片来源为参考文献[8]。

图 9 金塘岛 2011—2016 年冲淤变化

Fig. 9 Changes in erosion and deposition near the Jintang Island from 2011 to 2016

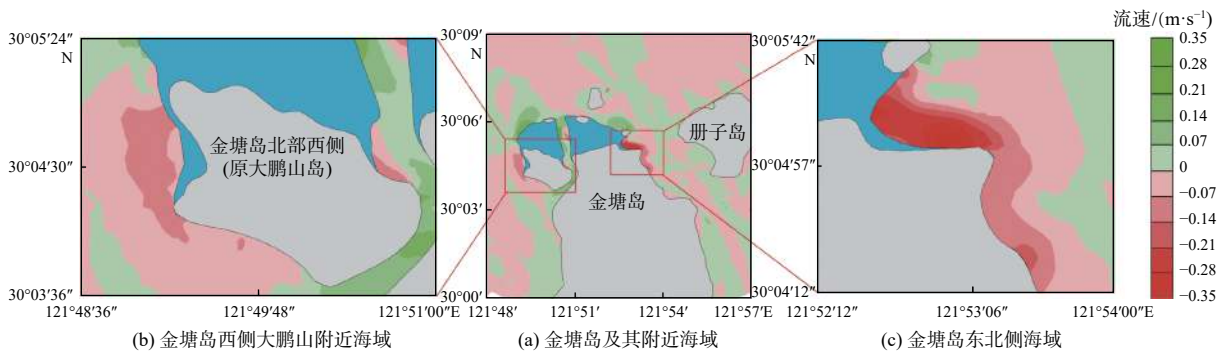


图 10 金塘岛工程前后余流流速变化

Fig. 10 Change in residual current near the Jintang Island pre- and post-reclamation

余流的量值虽不大,但它直接指示着水体的运移和交换情况,对海水中悬浮物质和可溶性物质的运输、稀释及扩散等都起十分重要的作用^[16],通常余流弱易淤积,余流强易冲刷。根据模型计算结果可知(表 5),S01 站余流流速由 0.17 m/s 增大为 0.27 m/s,增强了 59%,冲刷作用增强;S02 站余流流速变化较小;S03 站工程后的余流流速由 0.05 m/s 增大为 0.12 m/s,增强了 140%,冲刷作用显著增强;S04 站余流流速由 0.03 m/s 增大为 0.05 m/s,增强了 67%,冲刷作用较为明显;S05 站余流流速由 0.06 m/s 减小为 0.05 m/s,减弱了 -17%,有利于淤积。

A 点在 S04 站附近,更靠近工程后的海岸,其余流的变化比 S01 站大得多,流速由 0.04 m/s 增大至

0.11 m/s, 增强了 175%, 冲刷作用显著增强。B 点在 S02 与 S04 站之间, 工程后 B 点余流流速由 0.95 m/s 减小为 0.22 m/s, 减弱了 77%, 此处形成淤积。C 点在原沥港水道中, 靠近 S03 站, 余流流速由 0.03 m/s 增加至 0.06 m/s, 增强了 100%, 此处呈现一定程度的冲刷现象。D 点在工程后余流流速由 0.55 减小为 0.04 m/s, 减弱了 93%, 此区域形成明显淤积。

表 5 各特征点在不同情况下余流流速对比
Table 5 Comparison of residual current velocity at typical locations in different scenarios

流速参数	潮流观测站					特征点			
	S01 站	S02 站	S03 站	S04 站	S05 站	A	B	C	D
工程前流速/(m·s ⁻¹)	0.17	0.04	0.05	0.03	0.06	0.04	0.95	0.03	0.55
工程后流速/(m·s ⁻¹)	0.27	0.04	0.12	0.05	0.05	0.11	0.22	0.06	0.04
变化值流速/(m·s ⁻¹)	0.10	0	0.07	0.02	-0.01	0.07	-0.73	0.03	-0.51
流速变化率/%	59	0	140	67	-17	175	-77	100	-93

3 结 论

本文基于实测数据分析了金塘岛北部海域工程区的潮流潮汐特征, 利用 SCHISM 模式对金塘岛北部海域进行高分辨率数值模拟, 根据验证后的数模结果对地形变化前后的水动力环境进行分析, 并根据前人研究的冲淤分布情况进行比对, 得到如下结论。

1) 围填海工程区海域属于规则半日潮类型, 近岸潮流受地形影响流速流向差异明显, 但基本都沿着海岸线呈往复流形态, 工程后流场流速大小整体变化不大, 除工程海域外, 大鹏山西北侧海域流速、沥港水道和金塘岛北部的东侧岬角处流速和流向变化明显, 涨、落急时刻的流速变化率均超过 20%, 其中沥港水道、东侧岬角处的流速变化率均超过 65%。

2) 由于围填海工程改变了岸线和地形, 破坏了周边海域的冲淤平衡, 根据工程前后余流变化和淤积分布比对发现, 两者整体分布具有相关性, 且在淤积明显的海域, 余流在工程后明显变小, 表明受地形变化影响的余流变化分布与冲淤分布有密切的关联。

3) 在不考虑陆地的泥沙溢流及来往船只泥沙泄漏的情况下, 因围填海工程而导致的地形变化对金塘岛北部海域的潮汐动力环境和冲淤情况有较大影响。沥港水道内和金塘岛西北侧岬角附近的余流增强, 冲刷作用增强, 而金塘岛东侧岬湾处余流减弱, 容易产生淤积。建议对余流减弱显著区域加强监控。

本文仅基于观测数据和数值模型分析了围填海工程造成的地形变化对潮流和潮致余流的影响, 对泥沙输运及冲淤特征未展开详细的分析和研究, 后续拟在本文水动力模型基础上, 加入波浪以及泥沙冲淤模块, 进一步探讨围填海工程对该海域泥沙冲淤的影响。

参考文献 (References):

[1] 张捷. 抓住宁波舟山港一体化机遇——加快推进金塘岛开发[J]. 政策瞭望, 2005(12): 25-27. ZHANG J. Seize the opportunity of Ningbo Zhoushan Port integration: accelerate the development of Jintang Island[J]. Zhengce Liaowang, 2005(12): 25-27.

[2] 蔡相芸, 张金善, 王金城, 等. 金塘水道水动力特性分析[C]// 第二十五届全国水动力学研讨会暨第十二届全国水动力学学术会议文集(下册). 北京: 海洋出版社, 2013: 583-589. CAI X Y, ZHANG J S, WANG J C, et al. Analysis of hydrodynamic characteristics of Jintang Waterway[C]//Proceedings of the 25th national symposium on hydrodynamics and the 12th national academic conference on hydrodynamics (Volume II). Beijing: Ocean Press, 2013: 583-589.

[3] 张明慧, 陈昌平, 索安宁, 等. 围填海的海洋环境影响国内外研究进展[J]. 生态环境学报, 2012, 21(8): 1509-1513. ZHANG M H, CHEN C P, SUO A N, et al. International advance of sea areas reclamation impact on marine[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(8): 1509-1513.

- [4] 林磊, 刘东艳, 刘哲, 等. 围填海对海洋水动力与生态环境的影响[J]. 海洋学报, 2016, 38(8): 1-11. LIN L, LIU D Y, LIU Z, et al. Impact of land reclamation on marine hydrodynamic and ecological environment[J]. Haiyang Xuebao, 2016, 38(8): 1-11.
- [5] 张秋丰, 靳玉丹, 李希彬, 等. 围填海工程对近岸海域海洋环境影响的研究进展[J]. 海洋科学进展, 2017, 35(4): 454-461. ZHANG Q F, JIN Y D, LI X B, et al. Progress in the impact of reclamation projects on offshore marine environment[J]. Advances in Marine Science, 2017, 35(4): 454-461.
- [6] 董娇娇, 孙健, 陈燕珍, 等. 渤海岸线及水深变化对水动力影响的数值模拟[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(4): 676-687. DONG J J, SUN J, CHEN Y Z, et al. Numerical simulation of the hydrodynamics affected by coastline and bathymetry changes in the Bohai Sea[J]. Advances in Marine Science, 2020, 38(4): 676-687.
- [7] 曹成林, 熊丛博, 李霞, 等. 日照石臼港人工岬湾海岸设计及稳定性研究[J]. 海洋科学进展, 2019, 37(4): 181-191. CAO C L, XIONG C B, LI X, et al. Study on the design and stability of artificial headland bay beaches in Shijiu area of Rizhao, China[J]. Advances in Marine Science, 2019, 37(4): 181-191.
- [8] 何微, 张建勇, 管晓彤, 等. 金塘岛周边海域冲淤研究[J]. 中国水运(下半月), 2021, 21(1): 138-139, 158. HE W, ZHANG J Y, GUAN X T, et al. Study on erosion and deposition around Jintang Island[J]. China Water Transport, 2021, 21(1): 138-139+158.
- [9] 韩海骞, 牛有象, 熊绍隆等. 金塘大桥桥墩附近的海床冲刷[J]. 海洋学研究, 2009, 27(1): 101-106. HAN H Q, NIU Y X, XIONG S L. Seabed scour near the piers of the Jintang Bridge[J]. Journal of Marine Sciences, 2009, 27(1): 101-106.
- [10] 邵卓, 桂峰, 王柳柱, 等. 海岛岸线资源开发利用生态压力评估研究——以舟山市金塘岛为例[J]. 国土与自然资源研究, 2020(4): 12-16. SHAO Z, GUI F, WANG L Z, et al. Ecological stress evaluation of island shoreline development: a case study on Jintang Island, Zhoushan[J]. Territory & Natural Resources Study, 2020(4): 12-16.
- [11] 戴路, 陈鹏, 祖晓涵. 跨海大桥拦阻设施实施的悬沙扩散影响分析[J]. 水道港口, 2020, 41(2): 133-139. DAI L, CHEN P, ZU X H. Analysis on influence of suspended sediment diffusion caused by implementation of arresting facilities used in sea-crossing bridges[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2020, 41(2): 133-139.
- [12] ZHANG Y, BAPTISTA A M. SELFE: A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation[J]. Ocean Modelling, 2007, 21(3): 71-96.
- [13] ZHANG Y J, FEI Y, STANEV E V, et al. Seamless cross-scale modelling with SCHISM[J]. Ocean Modelling, 2016, 102: 64-81.
- [14] 李嵩, 管卫兵, 曹振铁, 等. 大亚湾和大鹏湾两个相邻海湾潮波浅水变形的异同分析[J]. 海洋学研究, 2020, 38(3): 31-47. LI S, GUAN W B, CAO Z Y, et al. Similarities and differences of shallow water deformation of tidal wave in two adjacent bays: Daya bay and Dapeng bay[J]. Journal of Marine Sciences, 2020, 38(3): 31-47.
- [15] 林作梁, 朱学明, 鲍献文等. 基于FVCOM的泉州湾海域三维潮汐与潮流数值模拟[J]. 海洋学报, 2013, 35(1): 15-24. LI Z L, ZHU X M, BAO X W, et al. Three-dimensional tide and tidal current numerical simulation based on FVCOM in Quanzhou Bay[J]. Haiyang Xuebao, 2013, 35(1): 15-24.
- [16] 陈倩, 黄大吉, 章本照, 等. 浙江近海潮流和余流的特征[J]. 海洋学研究, 2003, 21(4): 1-14. CHEN Q, HUANG D J, ZHANG B Z, et al. Characteristics of the tidal current and residual current in the seas adjacent to Zhejiang[J]. Journal of Marine Sciences, 2003, 21(4): 1-14.

Influence of Topography Change on Hydrodynamics in the Sea Area to the North of the Jintang Island

SU Yu¹, JI Qi-yan¹, ZUO Jun-cheng², CAI Yun-xia², SUN Yong-zhao¹, PENG Teng-teng¹, ZHANG Jie¹

(1. *Marine Science and Technology College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;*

2. *College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*)

Abstract: The reclamation project in the north of the Jintang Island has greatly changed the topography of its surrounding sea areas, and thus impacts the hydrodynamics in the sea areas. Based on observational data and numerical simulations, this paper analyzes the impacts of the reclamation project on tidal currents, residual currents, erosion, and deposition in the sea areas near the Jintang Island. The results show that the topography change has a great impact on the Ligang channel - its northern entrance shifts to the north and the current velocity at the entrance increases significantly. The maximum flood velocity increases from 0.50 m/s to 0.92 m/s, an increase of 84%, the maximum ebb velocity increases from 0.30 m/s to 0.53 m/s, an increase of 77%, and the residual current velocity increases from 0.05 m/s to 0.12 m/s, an increase of 140%. The maximum flood velocity at the central part of the Ligang channel decreases. The current velocity near the newly formed headland by the reclamation also changes significantly, with rotating flow field formed between the two headlands. The maximum flood velocity decreases from 0.46 m/s to 0.14 m/s, weakened by 70%, the maximum ebb velocity decreases from 0.61 m/s to 0.17 m/s, weakened by 72%, and the residual current velocity decreases from 0.55 m/s to 0.04 m/s, weakened by 93%. The spatial distribution of sediment deposition in the sea areas to the north of the Jintang Island is consistent with that of residual current change, suggesting that they are closely related and significantly affected by the topography change.

Key words: Jintang Island; topography change; SCHISM; tidal current; residual current; erosion and deposition

Received: May 8, 2021