

· 综 合 ·



# 澳门机场填海对九澳湾潮流动力 及水体交换的影响<sup>\*</sup>

孙 龙<sup>1</sup>, 丁 伟<sup>2</sup>, 路川藤<sup>2</sup>, 罗小峰<sup>2</sup>, 张功瑾<sup>2</sup>

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 澳门机场围填海工程束窄了连接九澳湾和澳门水道的连接水道, 工程周边的水动力环境也随之发生改变。基于 CJK3D 模型建立了澳门海域的潮流动力数值模型, 模拟了澳门机场围填海工程前后九澳湾潮流变化, 从潮流特征、水体交换周期等方面探讨九澳湾潮流动力及水体交换能力对围填海的响应机制。结果表明: 1) 澳门机场围填海工程不会导致澳门水域整体的流态发生变化, 但其束窄效应会导致九澳湾趋近半封闭海湾; 2) 湾口断面涨落潮通量显著减小、流速减弱, 进而导致湾内水体半交换周期增加、潮流动力及水体交换能力均有所减弱。

**关键词:** 澳门机场填海; 九澳湾; 潮流动力; 水体交换

**中图分类号:** U 642

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2022)05-0001-08

## Impact of reclamation of Macau Airport on tidal dynamics and water exchange in Ka-Ho Bay

SUN Long<sup>1</sup>, DING Wei<sup>2</sup>, LU Chuan-teng<sup>2</sup>, LUO Xiao-feng<sup>2</sup>, ZHANG Gong-jin<sup>2</sup>

(1. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The Macau Airport's reclamation project has narrowed the connecting waterway that connects Ka-Ho Bay and Macau Waterway, and the hydrodynamic environment around the project has also changed accordingly. We establish a numerical model of tidal current dynamics in the sea area near Macau, simulate the tidal current changes in Ka-Ho Bay before and after the Macau Airport reclamation project based on the CJK3D model, and discuss the response mechanism of tidal dynamics and water exchange capacity in Ka-Ho Bay to reclamation from the aspects of tidal characteristics and water exchange cycle. The results show that: 1) The reclamation project of Macau Airport will not cause the overall flow pattern of Macau waters to change, but its narrowing effect will cause Ka-Ho Bay to approach a semi-enclosed bay. 2) The flux of ebb and flow tides in the section of bay mouth has decreased significantly, and the tidal current velocity decreases. The half exchange period increases, and the tidal power and water exchange capacity are weakened.

**Keywords:** reclamation of Macau Airport; Ka-Ho Bay; tidal dynamics; water exchange

围填海工程是沿海地区向外拓展土地、解决用地紧张问题的主要办法, 但各种围填海工程也会带来诸如污染、影响通航、改变水动力环境等问题<sup>[1-4]</sup>。长期以来的围填工程直接改变沿海岸线

形态, 从而导致水下地形地貌的变化, 影响潮流动力条件。另一方面, 地形变化与潮流动力的相互作用又将给地区带来水环境问题<sup>[5-7]</sup>, 国内外关于围垦工程对周边水域水动力及水环境的影响由

收稿日期: 2021-08-11

<sup>\*</sup>基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB1600702); 澳门科技发展基金项目(0089/2020/A)

作者简介: 孙龙(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口海岸及近海工程的设计与研究。

来已久,大多数学者通过实测、物理模型及数值模拟,就工程附近区域潮汐形式、输沙环境及海床演变过程进行分析和探讨<sup>[8-12]</sup>。

澳门的海洋水文条件复杂、地理位置特殊,由于多年的围填海工程,其岸线一直变化,区域的水动力条件因此受到影响。许翔向等<sup>[13]</sup>、张广艳<sup>[14]</sup>根据历年遥感影像、水下地形等基础资料,利用遥感影像特征分析等手段,研究澳门附近水域汇流区的水流动力环境、泥沙输移特征、滩槽格局平面变化等,并分析冲淤原因、预测冲淤趋势,为该地区综合治理规划或其他工程措施提供了重要的基础数据。黎志均等<sup>[15]</sup>、陈祖华等<sup>[16]</sup>和韩保新<sup>[17]</sup>采用潮流数学模型对澳门海域各阶段的潮流、潮汐等水动力条件进行了模拟分析。黄希敏等<sup>[18]</sup>分析澳门水域十字门水道周边水域流态和冲淤形式,确定了十字门水道北口治导线的平面布置;方神光<sup>[19]</sup>通过实测水文资料对澳门水域围垦最为显著的澳门机场附近潮流动力环境特性进行了详细分析和探讨。

受惠于澳门旅游业的发展,澳门机场停机坪将接近饱和,澳门机场在保持一条跑道的情况下,跑道可以满足未来航班需求,但停机坪则会严重不足,鉴于机场范围内及周边现时没有适合的土地可供利用,考虑围填澳门机场跑道西侧三角区。为维护九澳湾与外界水域的水体交换能力,围填区域内将预留一条南北连通的水道,保证九澳湾内水环境、水生态现状以及水质目标的实现。

本文以九澳湾为研究对象,采用数值模拟的手段,基于经过验证的 CJK3D 模型,对澳门机场扩建前后九澳湾内潮动力变化进行模拟分析,并对工程前后的水体交换能力进行研究。

## 1 研究区域

澳门特别行政区位于广东省珠海市的东南面,东隔伶仃洋与香港相望,距香港约 60 km,南临南海,西由湾仔水道、十字门水道与珠海市湾仔、横琴相隔,北连珠海市香洲区,地理位置处于

北纬 22° 06' 39" ~ 22° 13' 06"、东经 113° 31' 33" ~ 113° 35' 43"。澳门由澳门半岛、氹仔岛、路环岛和路氹城组成。澳门国际机场位于澳门氹仔岛和路环岛东部的浅海区,于 1989 年 12 月动工兴建,建成于 1995 年 8 月。澳门国际机场由跑道区、机坪和航站楼组成,其中机坪和航站楼位于氹仔岛,由开山填海形成陆域,跑道区位于氹仔一路环以东海域,为填海形成的人工岛,跑道区和机坪之间通过两座高桩梁板结构的联络桥相连接。澳门机场具体填海范围见图 1,为机场跑道西侧的菱形水域。九澳湾位于澳门路环岛东北部,属伶仃洋西岸浅滩区。九澳湾目前以南口和北侧机场三角区与外界水域连通,湾内水体受径流、潮汐及波浪等多种动力影响。

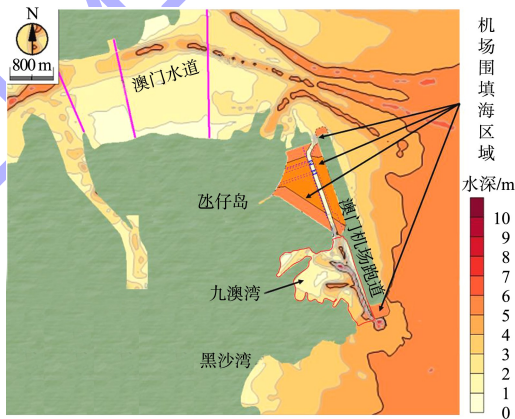


图 1 研究区域位置及周边水域水深

## 2 数学模型的建立

### 2.1 控制方程

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial x} - fv + g \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( N_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( N_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial y} + fu + g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( N_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( N_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + u \frac{\partial \psi}{\partial x} + v \frac{\partial \psi}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( p_x \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( p_y \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) - k\psi \quad (4)$$

式中:  $z$  为潮位;  $h$  为水深;  $H = h + z$  为总水深;  $u$  和  $v$  分别为  $x$  和  $y$  方向上的流体速度;  $f = 2\Omega \sin\phi$  为 Coriolis 系数(其中  $\Omega$  为地球自转角速率,  $\phi$  为当地纬度);  $g$  为重力加速度;  $C$  为谢才系数;  $t$  为时间;  $N_x$  和  $N_y$  分别为  $x$  和  $y$  方向上的水流紊动黏性系数;  $\psi$  为水质浓度;  $p_x$  和  $p_y$  分别为  $x$  和  $y$  方向上的水质扩散系数;  $k$  为水质降解系数。

向量形式可表示为:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \mathbf{E} = \mathbf{M} + \nabla \mathbf{E}^d$$

(5)

式中:  $\mathbf{U} = (H, Hu, Hv)^T$ ;  $\mathbf{E}$  为对流扩散项;  $\mathbf{E}^d$  为紊动扩散项;  $\mathbf{M}$  为源项。

采用三角形网格对计算区域进行离散, 并将单一的网格单元作为控制单元, 水深布置在网格顶点, 其他物理变量配置在每个单元的中心。将第  $i$  号控制元记为  $\Omega_i$ , 在  $\Omega_i$  上对向量式的基本方程组(4)进行积分, 并利用 Green 公式将面积分转化为线积分, 得

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega_i} \mathbf{U} d\Omega_i + \int_{\partial\Omega_i} (\mathbf{E} \times \bar{\mathbf{n}}_i - \mathbf{E}^d \times \bar{\mathbf{n}}_i) dl = \int_{\Omega_i} \mathbf{M} d\Omega_i$$

(6)

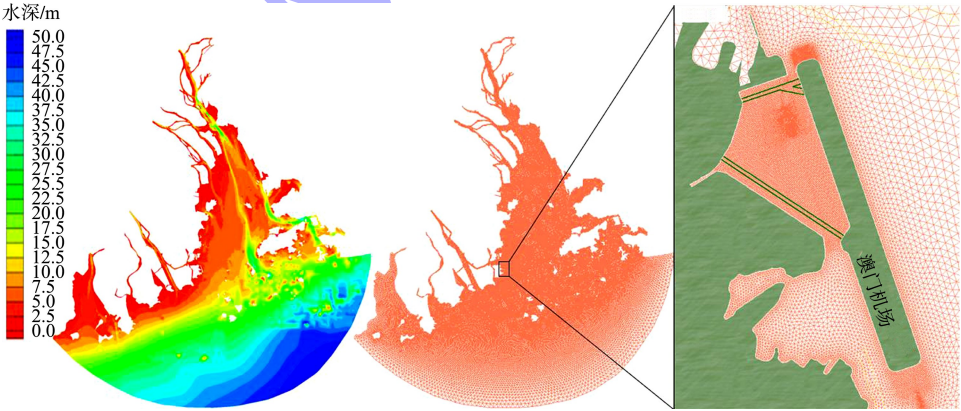


图 2 数学模型范围及局部加密

2.3 模型验证

数学模型验证采用 2017 年 10 月 6—7 日枯季大潮水情, 包括 3 个潮位站、6 条潮流垂线, 验证内容包括潮位、潮流, 验证点位置见图 3。

式中:  $d\Omega_i$  是面积分微元;  $dl$  是线积分微元;  $\bar{\mathbf{n}}_i = (n_{ix}, n_{iy}) = (\cos\theta, \sin\theta)$ ,  $n_{ix}$ 、 $n_{iy}$  分别代表第  $i$  号控制元边界单元单位外法向量  $x$ 、 $y$  方向的分量。

式(6)求解主要分 4 个部分, 一为时变项, 二为水平对流项, 三为底坡项, 四为水平扩散项。对流项数值通量可采用 Roe 格式的近似 Riemann 解; 水平扩散项含有二次项, 采用单元交界的平均值来计算通过该界面扩散项的数值通量; 有限体积法底坡项若不加任何处理, 则会造成静水的伪流动现象, 本文采用“斜底模型”处理底坡项。

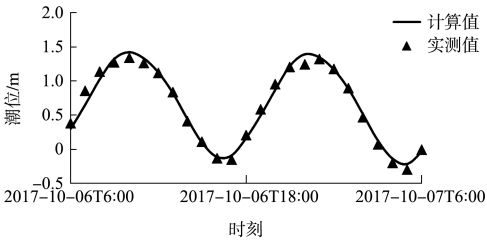
2.2 模型范围

数学模型包括珠江口主要水系网, 北侧边界包含珠江各大入海口门区, 西侧边界在黄茅海西侧附近, 东侧边界至香港附近, 南侧边界至 -40 m 等深线附近, 见图 2, 模型网格总数为 32 516 个, 最大边长 38 565 m, 工程水域网格加密, 最小网格约 5 m。模型外边界通过全球潮汐预报模型 Tide-Process 提供。

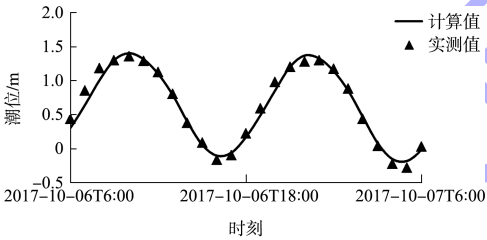
图 4 为潮位验证, 图 5 为潮流验证。潮位计算偏差基本在 0.1 m 之内, 吻合良好; 潮流相位一致, 涨落潮过程基本符合水体运动情况, 偏差大都在 10% 之内。总体而言, 模型能够准确反映澳门水域水力特性。



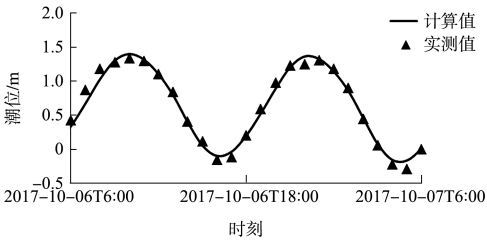
图 3 数学模型潮流潮位验证点布置



a) A潮位站

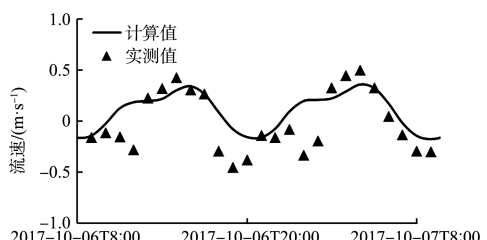


b) B潮位站

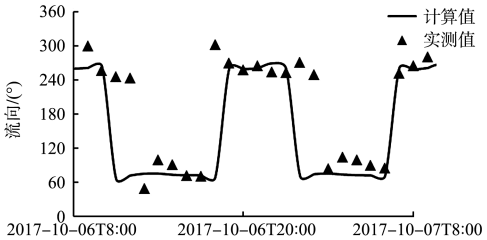


c) C潮位站

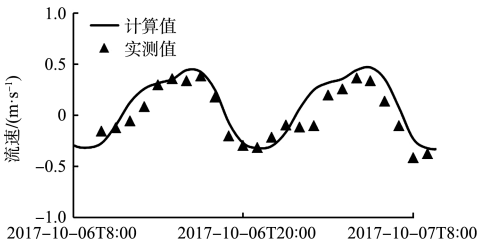
图 4 潮位验证



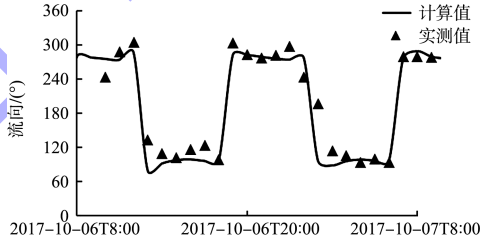
a) 1#流速



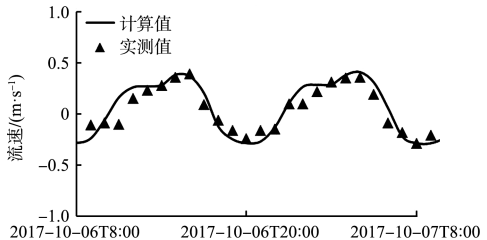
b) 1#流向



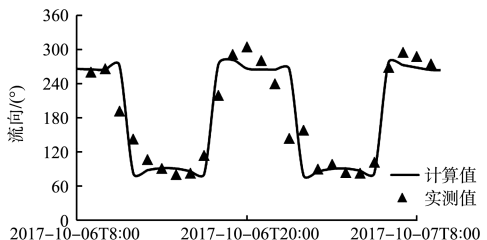
c) 2#流速



d) 2#流向



e) 3#流速



f) 3#流向



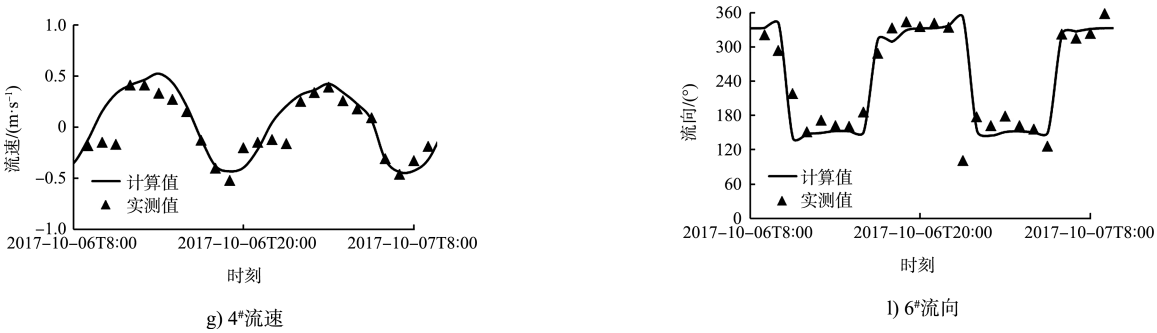


图 5 潮流验证

3 结果分析

3.1 工程对流场的影响分析

根据 2016—2018 年澳门水道内潮位站 (图 3 中潮位站 B) 3 a 洪季潮位资料统计, 将 3 a 累积频率为 10% 的潮型作为潮流动力及水体交换的控制潮型, 即珠江口洪季典型大潮, 见图 6。图 7 为澳门机场围填前后涨落急流态及流场的对比, 很明显, 澳门水域整体涨潮流流向为西南向东北, 潮流自外海进入澳门水域后, 在氹仔岛的分流作用下, 一股向十字门水道运动、另一股向机场方向运动, 由于海域中没有岛屿或工程的阻挡, 因此潮流十分平顺; 落潮时, 水流流向与涨潮相反, 由东北向西南, 十字门水道的落潮流和机场方向的落潮流汇合后向西南方向运动。工程海域的潮流以往复流为主, 外海旋转流特性相对较强。

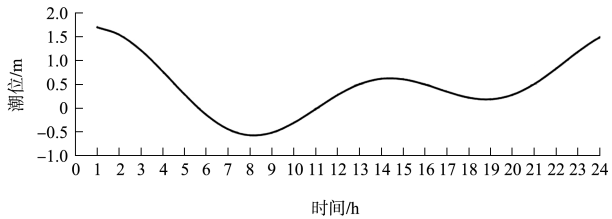
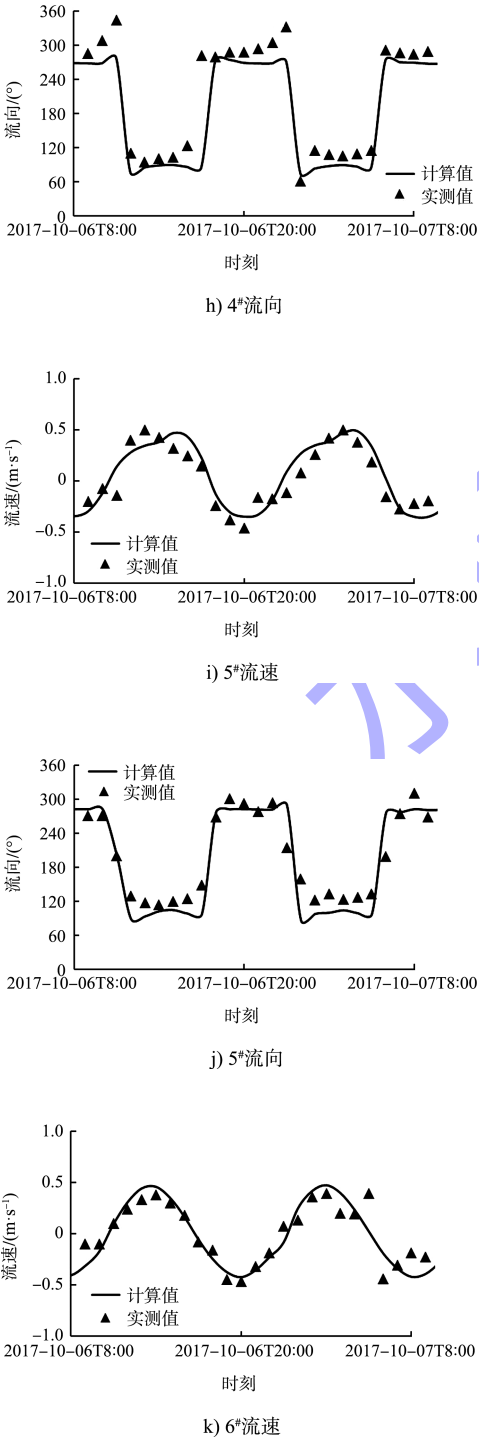
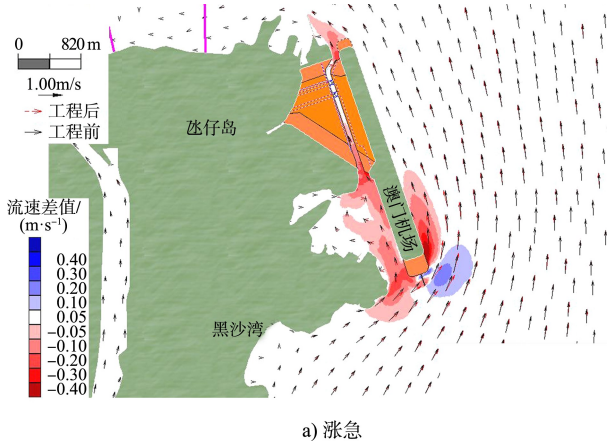


图 6 模型控制潮型 (珠江口典型大潮)



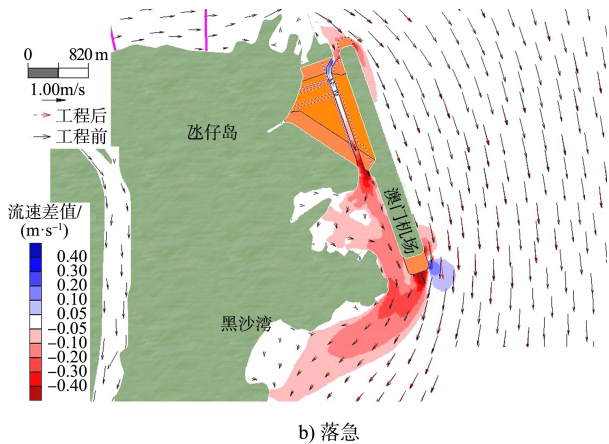


图 7 工程实施前后涨落急时刻流场流态变化

机场扩建工程实施后，机场围填工程对整体流场及九澳湾内的流态影响不大，总体来看，涨落急流速变化范围与趋势总体一致。涨急时，机场跑道北侧延伸段在桩基的阻水作用下，涨急流速呈减小趋势，机场南侧延伸段由于水流的绕流作用，东南侧水域流速呈增大趋势，范围约为机场东北侧 0.8 km，大部分水域流速增加幅度在 0.05~0.10 m/s，局部最大流速增幅在 0.15 m/s 左右，现有机场跑道南侧东西侧水域涨急流速呈减小趋势，机场东侧流速减小范围长度约为 1.6 km，机场西侧流速减小范围至九澳航道转弯处，最大流速减小幅度约为 0.20 m/s。预留连接水道处的北端涨急流速总体呈增大趋势，主要因为该通道较现状水深增大，但流速增加幅度相对较小，基本小于 0.10 m/s。

根据对九澳湾南进口和机场跑道西水域北进口的潮通量统计可以看出（分析断面位置见图 8），由于机场扩建工程的阻流作用，连接九澳湾外水域与澳门水道的水道缩窄，九澳湾南北两侧的进口涨落潮通量大幅度减小，均超过 40%，见图 9。

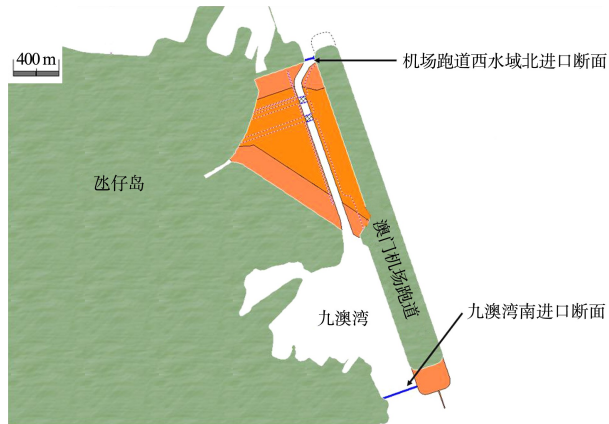


图 8 工程附近潮通量统计断面位置

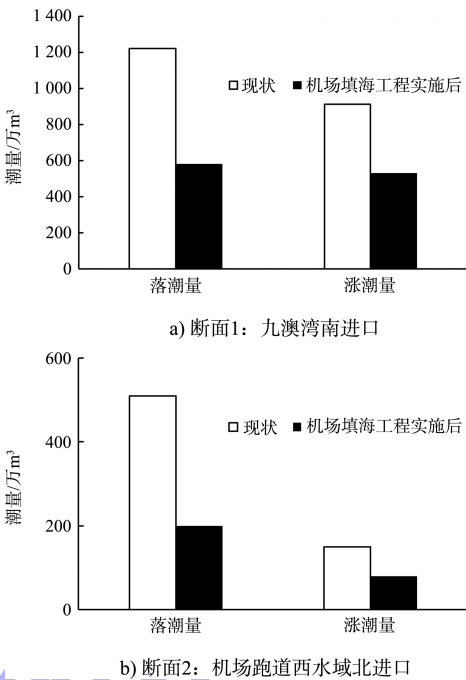


图 9 工程实施前后典型断面涨落潮通量变化

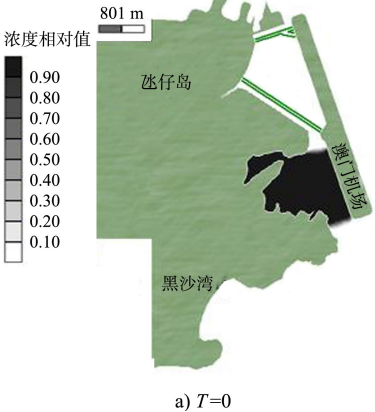
3.2 水体交换影响分析

九澳湾作为连接机场南北水道的海湾，其水体交换能力可以由海水的流动性充分反映。通常，关于水体交换能力大多是通过示踪剂的浓度变化来判断水体的交换率和交换时间<sup>[20]</sup>；本文采用水体半交换周期判断九澳湾内的水体交换能力。半交换周期是指在潮汐和径流的共同作用下，湾内水体交换出 50%到湾外时的时间，在一定程度上表征了海湾的水交换能力。由九澳湾潮流动力特性可见，受潮汐的影响，九澳湾内的水体交换过程会呈现往复性，湾内各处浓度也会随之呈现一定的往复性特征，本文以湾内第一次浓度达到初始浓度一半所用的时间作为湾内水体的半交换时间进行研究。

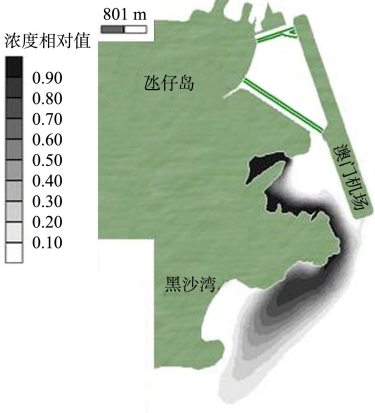
在潮流动力模型基础上，通过模拟示踪剂浓度的变化来计算水体交换的速率和半交换周期，进而分析澳门机场填海工程建设对九澳湾的水动力影响。以九澳湾的口门为界，在湾内释放可溶于水的示踪剂，不可降解，设置湾内示踪剂的浓度为 1，其他水域为 0，模拟在珠江口典型洪季大潮(图 6)潮流作用下浓度场的变化，模拟从高潮涨憩开始，持续 24 h。

从水体半交换时间的空间分布(图 10、11)可见，澳门机场扩建工程实施后，九澳湾口门附近水体基本不受工程影响，交换能力最强；受平面

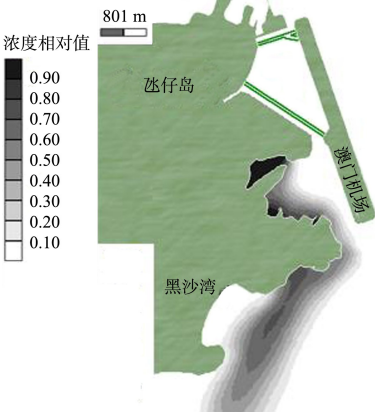
形态、地形及距离口门远近的影响, 路环电厂北侧内湾的水体交换最弱, 在工程前后水体交换能力均较弱; 受机场扩建工程影响最显著的区域为九澳湾内路环电厂往南的凹岸水域, 由于机场扩建工程在一定程度上阻碍了九澳湾与澳门水道间的水体交换, 加之落潮流的削弱, 九澳湾内路环电厂往南的凹岸水域水体交换能力明显下降。



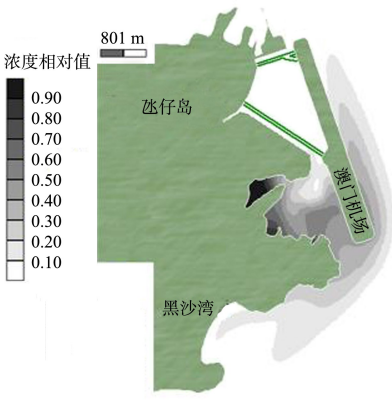
a)  $T=0$



b)  $T=2\text{ h}$

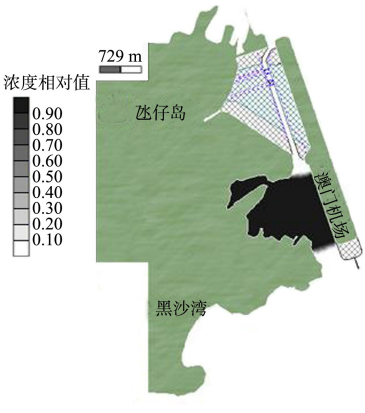


c)  $T=4\text{ h}$

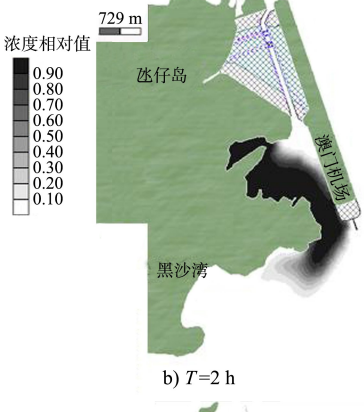


d)  $T=6\text{ h}$

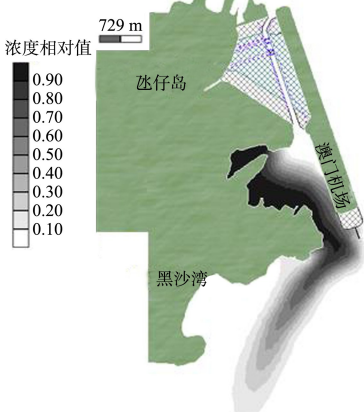
图 10 工程前九澳湾内浓度分布随时间变化等值线



a)  $T=0$



b)  $T=2\text{ h}$



c)  $T=4\text{ h}$



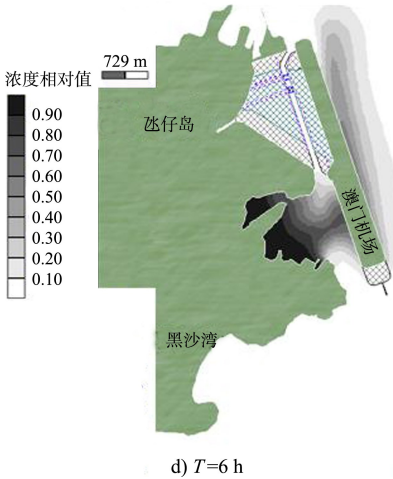


图 11 工程后九澳湾内浓度分布随时间变化等值线

从图 12 可以看出，九澳湾内的平均浓度随时间递增呈现周期性震荡。统计结果显示，工程前，湾内水体的平均半交换周期为 2.9 h；珠澳人工岛建设后，其水体交换能力有所下降，半交换周期增加约 2.2 h，达到 5.1 h。

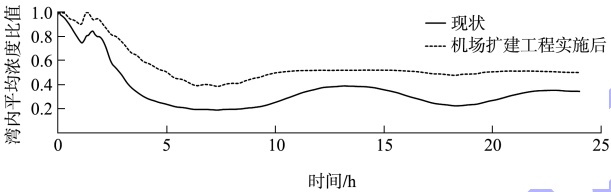


图 12 九澳湾内示踪剂浓度随时间变化

4 结论

- 1) 澳门机场围填海工程前后，海域潮流性质没有改变，主流仍经机场跑道东侧北上南下，小股经九澳湾至澳门水道的潮流受工程束窄作用大幅削弱。
- 2) 澳门机场围填海工程缩窄了九澳湾与澳门水道的水体流通水域，九澳湾与澳门机场跑道间的水域存在大幅流速降低区域，最大减弱幅度超过 0.3 m/s，不利于九澳湾内的水体流动。
- 3) 澳门机场围填海工程前后，九澳湾内的平均浓度均随时间递增呈现周期性震荡降低的态势，工程的阻水效应使得九澳湾水体交换能力下降。在珠江口典型大潮水文条件下，湾内水体半交换周期由 2.9 h 增加至 5.1 h。

参考文献：

[1] 王留洋. 瓊江口大规模围海工程对周边水动力环境的影响[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.

[2] 邢贞相, 刁晴茹, 纪毅, 等. 基于遥感的辽河口岸线动态变化及成因分析[J]. 东北农业大学学报, 2020, 51(5): 70-77.

[3] 陈小文, 张蔚, 赵慧, 等. 近 30 年来珠江河口岸线演变时空特征及效应[J]. 热带地理, 2010, 30(6): 591-596.

[4] 张蕾, 李广雪, 刘雪, 等. 渤海海岸线的时空变化[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(2): 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.

[6] LEE H J, SANG O R. Changes in topography and surface sediments by the Saemangeum dyke in an estuarine complex, west coast of Korea[J]. Continental shelf research, 2008, 28(9): 1177-1189.

[7] 牙韩争, 许尤厚, 李宜纯, 等. 岸线变化对钦州湾水动力环境的影响[J]. 广西科学, 2017, 24(3): 311-315, 322.

[8] CAMORANI G, CASTELLARIN A, BRATH A. Effects of land-use changes on the hydrologic response of reclamation systems[J]. Physics & chemistry of the earth, 2005, 30(8/10): 561-574.

[9] SONG D, XIAO H W, ZHU X, et al. Modeling studies of the far-field effects of tidal flat reclamation on tidal dynamics in the East China Seas[J]. Estuarine coastal & shelf science, 2013, 133(20): 147-160.

[10] SUH S W, LEE H Y, KIM H J. Spatio-temporal variability of tidal asymmetry due to multiple coastal constructions along the west coast of Korea[J]. Estuarine coastal & shelf science, 2014, 151(5): 336-346.

[11] 吕和娜. 温州近海围垦工程对瓯江口水动力的影响[D]. 宁波: 宁波大学, 2015.

[12] 李东, 侯西勇, 张华. 曹妃甸围填海工程对近海环境的影响综述[J]. 海洋科学, 2019, 43(2): 82-90.

[13] 许祥向, 余顺超, 杨健新, 等. 珠江河口澳门水域遥感监测分析[J]. 人民珠江, 1999(5): 24-27.

[14] 张广燕. 澳门附近水域汇流区冲淤演变分析[J]. 人民珠江, 2006(3): 19-21.

[15] 黎志均, 李英杰. 澳门海域潮流现场观测与数值分析[J]. 水运工程, 2005(9): 30-33.

[16] 陈祖华, 王光谦, 王志石. 澳门周围水域潮汐流动的数值模拟[J]. 应用基础与工程科学学报, 2001(Z1): 251-258.

[17] 韩保新. 澳门水域水动力条件及水污染状况初探[J]. 海洋环境科学, 1990(2): 25-31.

[18] 黄希敏, 沈汉坤. 珠海—澳门附近水域十字门水道北口治理导线平面布置的确定[J]. 水利规划, 1997(1): 53-56.

[19] 方神光. 珠江河口澳门机场周边水域洪枯季潮流动力环境分析[J]. 中国农村水利水电, 2019(5): 56-60.

[20] 何杰, 辛文杰. 挖入式港池水体交换能力研究[J]. 水利学报, 2007(S1): 330-333. (本文编辑 武亚庆)