



珠江口潮汐不对称特征对岸线演化的 响应规律研究*

尧红成^{1,2}, 徐龔文^{1,2}, 张蔚^{1,2}, 季小梅², 黄黎明², 王晓光², 吴尧¹

(1. 河海大学 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210024;

2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210024)

摘要: 河口地区的潮汐不对称性影响着近岸物质运输和地貌演变。基于 Delft 3D FM 二维水动力模型, 模拟了伶仃洋在 1 970 s、2 010 s 和 2016 年治导线岸线条件下的潮汐运动。通过非稳态调和分析和偏度计算方法, 量化了该海域潮汐不对称性对于岸线变化的响应, 并通过分析不同分潮组合的贡献, 探讨潮汐不对称变化的机制。研究表明: 伶仃洋的大小潮涨落潮的潮高不对称性不同, 岸线向海推进会增强潮汐不对称性的涨潮优势。岸线向海推进会增大浅水分潮的潮汐振幅, 减小天文分潮的潮汐振幅, 同时加快潮波传播速度。天文分潮组合对潮汐不对称性的贡献向上游逐渐减弱, 而浅水分潮组合的贡献则逐渐增强。

关键词: 珠江口; 大规模围垦; 潮汐不对称; 分潮组合; 数值模拟

中图分类号: U658.93; P731.23

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)02-0036-09

Response of tidal asymmetry characteristics to shoreline evolution in Pearl River Estuary

YAO Hongcheng^{1,2}, XU Yanwen^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, JI Xiaomei², HUANG Liming², WANG Xiaoguang², WU Yao¹

(1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: Tidal asymmetry exerts an influence on nearshore material transportation and geomorphic evolution. Based on the Delft 3D FM, a two-dimensional hydrodynamic model is employed to establish the tidal movement simulations of Lingding Bay under the conditions of 1 970 s, 2 010 s and the 2016 governing guideline shoreline. The response of tidal asymmetry to the seaward advancement of the shoreline in this area is analyzed by combining the reconciliation analysis and the skewness calculation method. Furthermore, the mechanism underlying tidal asymmetry change is examined by analyzing the contribution of different tidal constituent combinations. The research results show that the tidal height asymmetry between spring and neap tides in Lingding Bay varies. The seaward advance of the shoreline strengthens the flood tide dominance in tidal asymmetry. The seaward extension of the shoreline increases the tidal amplitude of the shallow water components while reducing the amplitude of the astronomical components, concurrently accelerating the tidal wave propagation speed. The contribution of the astronomical tidal components to tidal asymmetry gradually decreases upstream, whereas the contribution of the shallow water tidal components gradually increases.

Keywords: Pearl River Estuary; large-scale reclamation; tidal asymmetry; tidal constituent combination; numerical simulation

收稿日期: 2024-05-14

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3001000); 中央高校基本科研业务费项目(B240201003); 国家自然科学基金项目(42006155); 水灾害防御全国重点实验室“一带一路”水与可持续发展科技基金项目(2020492111)

作者简介: 尧红成(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为河口海岸水动力。

通信作者: 徐龔文(1988—), 女, 副教授, 研究方向为河口海岸水动力。E-mail: yanwenxu@hhu.edu.cn

由于水深、地形、径流等因素的影响, 潮波自外海传播至河口海岸地区时, 波形会发生变化, 造成涨潮和落潮历时不对称现象 (tidal duration asymmetry, TDA), 对河口海岸地区的泥沙运动、地形变化以及水载污染物迁移有着重要影响。近年来, 许多三角洲和河口地区都面临围垦工程等人类活动引发的岸线变化的影响^[1]。岸线的形态变化极大地改变了潮汐的传播和演变过程, 进而影响了潮汐振幅、相位、速度和潮汐不对称性等特性^[2]。例如, 在南黄海辐射沙洲海域和杭州湾, 岸线的变化导致涨潮更为显著, 潮汐不对称性也愈发突出^[3-4]。大规模的围垦甚至可能引发远场效应, 从而影响生态环境以及河口海岸工程^[5]。

自 20 世纪 70 年代以来, 大规模的围垦工程已导致珠江口伶仃洋滩涂面积急剧减少。其中 1986—2007 年, 伶仃洋侧湾填海造陆面积约为 21.2 km², 减少海湾原始水面面积的 14%^[6]。这些大规模的围垦活动改变了该海域的岸线位置, 导致河口的宽度减小, 也影响了伶仃洋的潮动力。以往的研究主要通过现场观测或数值模拟分析地形变化对伶仃洋河口潮动力的影响。Zhang 等^[7]发现珠江河口涨潮持续时间增加的趋势, 并分析了这种趋势的主要原因。王宗旭等^[8]采用传统的潮汐振幅比和相对相位方法, 描述了岸线变化下珠江河口的分潮振幅、相位、潮汐不对称和潮能通量等潮汐特征。尽管伶仃洋中的潮汐不对称性与大尺度岸线形态演变密切相关, 但很少有研究关注岸线变化下潮汐不对称的空间变化特征和内在机制。

本文以珠江口伶仃洋为研究对象, 通过分析不同年代岸线条件下潮汐不对称性的空间分布特征, 深入探讨该海域潮汐不对称性对岸线向海推进的响应规律。同时, 通过分析不同分潮组合的

贡献, 揭示潮汐不对称性变化的内在机理, 以期优化珠江三角洲岸线的科学管理和合理利用提供科学依据。

1 研究区域概况

伶仃洋是珠江口的主要水湾, 包括东部 4 个口门, 即虎门、蕉门、洪奇沥和横门 (图 1)。伶仃洋上游的虎门口宽度约为 5 km, 而外海口门宽度则达 60 km, 两者之间距离约为 63 km。上游年径流量为 1 670 亿 m³, 受夏季季风影响强烈, 洪季 (4—9 月) 径流量占年径流总量的 80%, 约为枯季 (10 月—次年 3 月) 的 4 倍^[9]。因此, 本研究选择枯季为研究时段, 以最大程度减少径流对潮动力变化的影响。伶仃洋以半日潮为主, 平均潮差在 1.0~1.7 m, 最大潮差约为 3.06 m。随着当地经济的发展和城市化进程, 伶仃洋近 50 a 来的岸线变化受围垦工程影响显著, 水域面积减少了近 2 670 km²^[10]。2010 年, 水利部珠江水利委员会发布《珠江口综合治理规划》, 规定了最新的治导线范围, 以限制珠江口的围垦工程。伶仃洋水深地形见图 2。

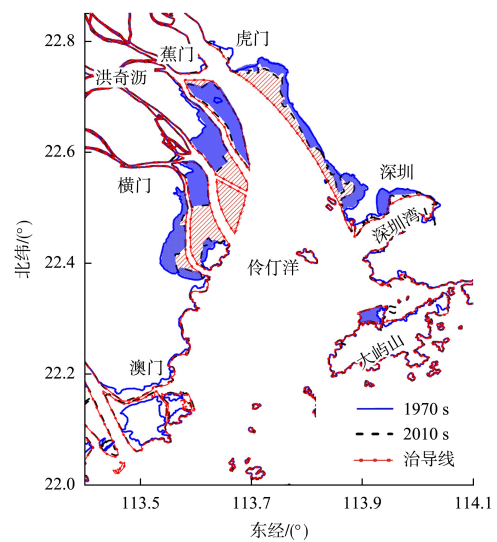


图 1 伶仃洋岸线变化

Fig. 1 Shoreline changes in Lingding Bay

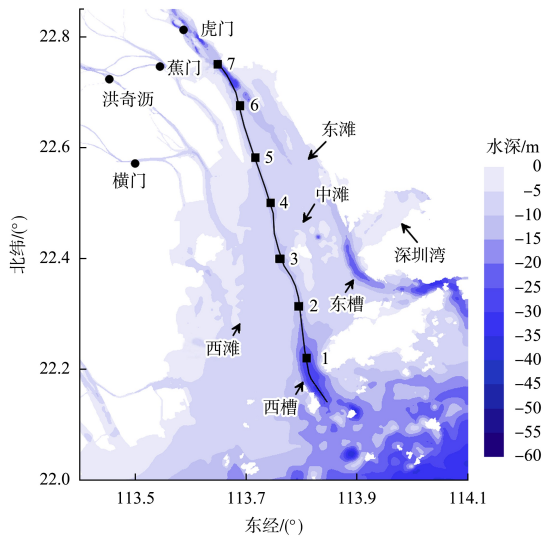


图2 伶仃洋水深地形图

Fig. 2 Bathymetric map of Lingding Bay

2 研究方法

2.1 模型设置

利用前期基于 Delft 3D FM 建立的珠江口二维水动力数学模型开展研究。该模型覆盖了整个珠

江口及南海北部主要区域, 经度范围为 110.2°E~120.4°E, 纬度从 18.7°N 跨越至 24.7°N, 采用正交网格和非结构网格组合, 较好地描绘珠江河口实际岸线(图 3)。网格尺寸由外海向近岸逐渐增大, 近岸区域的最高分辨率达到 50 m, 外海的最低分辨率为 50 km。模型糙率范围为 0.008~0.037, 不考虑风场压迫等因素的影响, 假设温盐场恒定, 温度 15℃, 盐度 30‰。水深和地形数据采用实测数据和 ETOPO1 全球地形模型相结合的方式获取。模型采用冷启动, 运行时间范围为 2005-01-01 T08:00:00—2005-04-16 T00:00:00。模型上游边界条件使用博罗、新家浦、老鸦岗、石角、高要、石嘴 6 个测站的实测流量数据, 而开边界则以全球海潮模型 TPX08 的潮位进行驱动^[11]。

数值试验设置 3 组, 分别是 1 970 s(大规模围垦前)、2 010 s(大规模围垦后)、治导线(岸线达到治导线的极端情况)。为简化潮动力变化的不确定因素, 试验实验使用相同的边界条件。

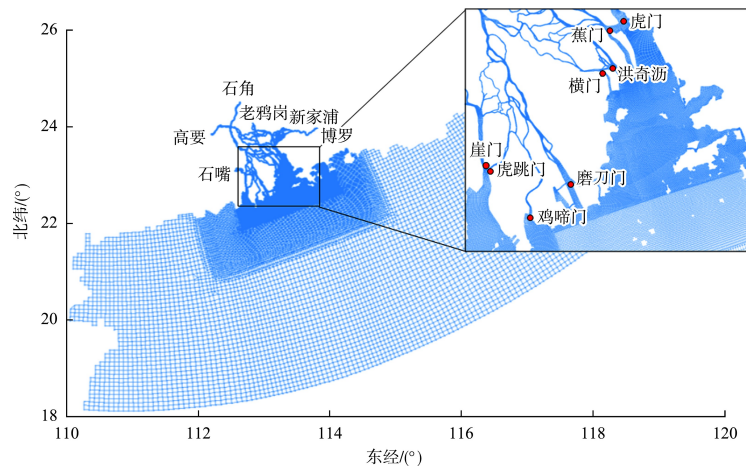


图3 Delft 3D 水动力模型的网格及验潮站位置

Fig. 3 Grids and tidal gauge station locations based on Delft 3D hydrodynamic model

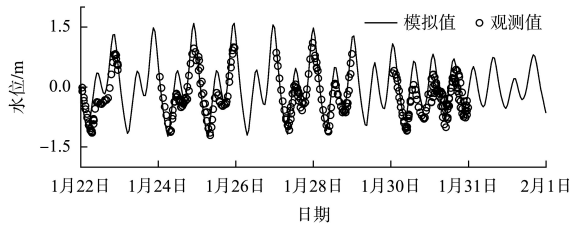
2.2 模型验证

模型验证选取崖门、虎跳门、鸡啼门、横门、蕉门和虎门 6 个测站, 位置如图 2 所示。验证时间段为 2005-01-22 T00:00:00—2005-01-30 T00:00:00, 涵盖了大中小潮周期的变化, 将流速数据模拟值与对应实测数据进行验证。采用参数 S 对模型精度进行统计分析^[12]:

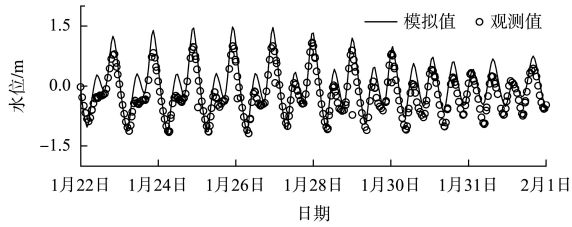
$$S = 1 - \frac{\sum (X_{\text{obs}} - X_{\text{mod}})^2}{\sum (X_{\text{obs}} - \bar{X}_{\text{obs}})^2} \quad (1)$$

式中: X_{obs} 和 X_{mod} 分别为实测值和模拟值, \bar{X}_{obs} 为实测均值。参数衡量标准: $S > 0.65$ 为精度极好; $0.50 < S < 0.65$ 为精度很好; $0.20 < S < 0.50$ 为精度好; $S < 0.20$ 为精度较差。

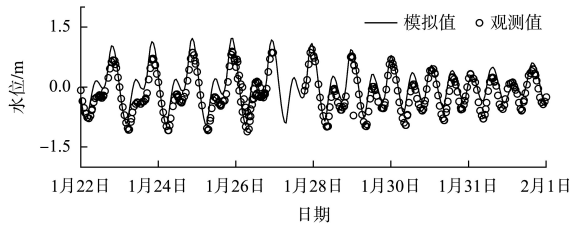
测站水位、流速数据和模型计算结果如图 4、5 所示, 验证结果显示各测站相位拟合良好, S 值大多超过 0.5, 说明模拟结果可信。



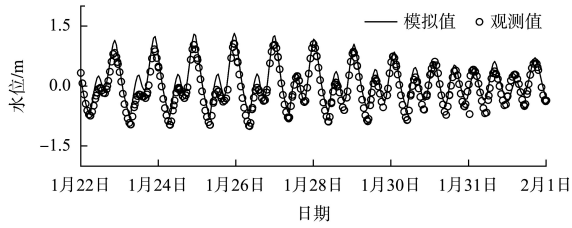
a) 崖门, $S=0.37$



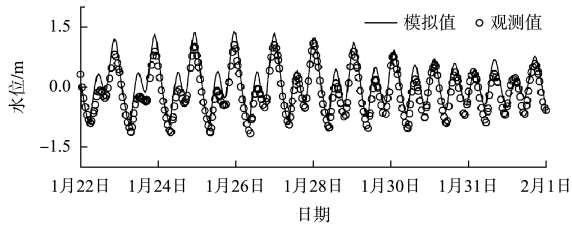
b) 虎跳门, $S=0.54$



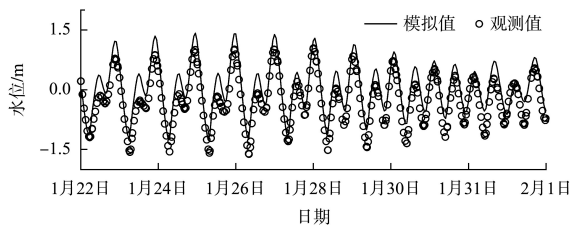
c) 鸡啼门, $S=0.56$



d) 横门, $S=0.76$



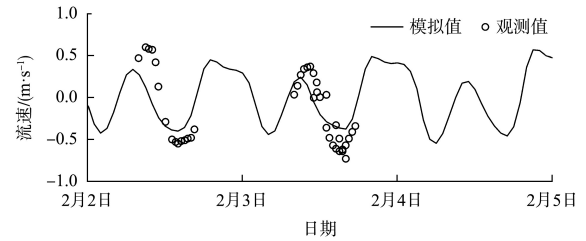
e) 蕉门, $S=0.66$



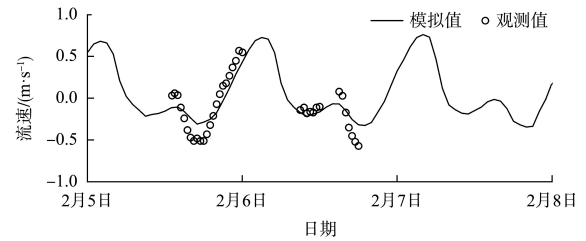
f) 虎门, $S=0.57$

图4 潮位验证

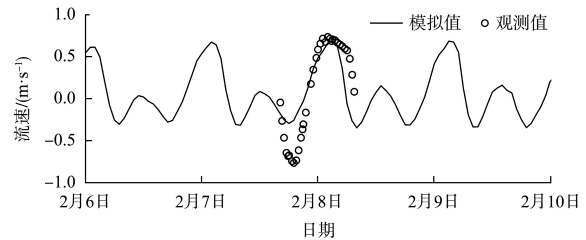
Fig. 4 Validation of water surface elevation



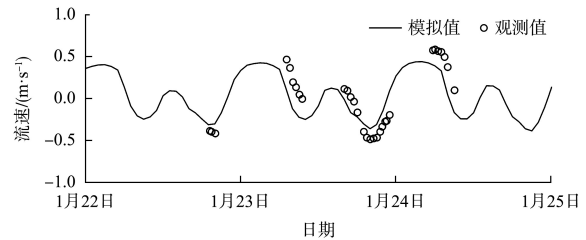
a) 崖门, $S=0.58$



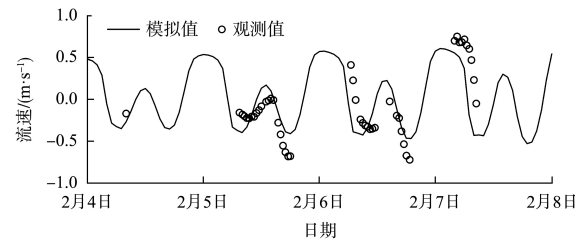
b) 虎跳门, $S=0.70$



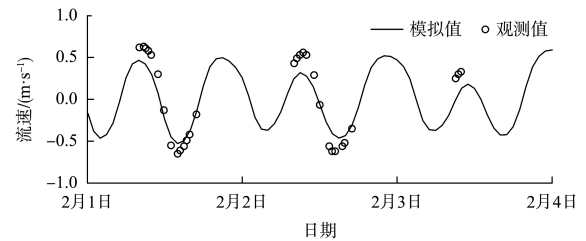
c) 鸡啼门, $S=0.64$



d) 横门, $S=0.57$



e) 蕉门, $S=0.37$



f) 虎门, $S=0.87$

图5 潮流验证

Fig. 5 Validation of current velocities

2.3 潮汐不对称的量化方法

相较于传统方法采用 M_2 和 M_4 分潮的振幅比与相位差来衡量潮波变形，偏度理论不仅能在更大范围的时间尺度上量化潮汐不对称性，而且能给出造成这种不对称性的主要分潮组合^[13]。总偏度计算公式为：

$$\gamma(x) = \frac{1/(N-1) \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{\left[1/(N-1) \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2\right]^{3/2}} \quad (2)$$

式中： γ 为偏度； x_i 为水位对时间的导数； N 为逐潮时间序列的长度； \bar{x} 为变量平均值。偏度绝对值越大，潮汐不对称性越强。 γ 为正，代表涨潮占优，反之则落潮占优。

根据 Song 等^[14] 评估潮汐不对称性的理论框架，只有 2 个或 3 个成分的组合可以导致潮汐不对称性，而只有少数满足频率条件 $2\omega_1 = \omega_2$ 或 $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$ 的分潮组合才会导致长期的不对称。3 种分潮相组合对潮汐不对称性的贡献值为：

$$\gamma_3 = \frac{3/2 a_1 \omega_1 a_2 \omega_2 a_3 \omega_3 \sin(\varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_3)}{\left(1/2 \sum_{i=1}^N a_i^2 \omega_i^2\right)^{3/2}} \quad (3)$$

两种分潮相组合对潮汐不对称性的贡献值为：

$$\gamma_2 = \frac{3/4 a_1^2 \omega_1^2 a_2 \omega_2 \sin(2\varphi_1 - \varphi_2)}{\left(1/2 \sum_{i=1}^N a_i^2 \omega_i^2\right)^{3/2}} \quad (4)$$

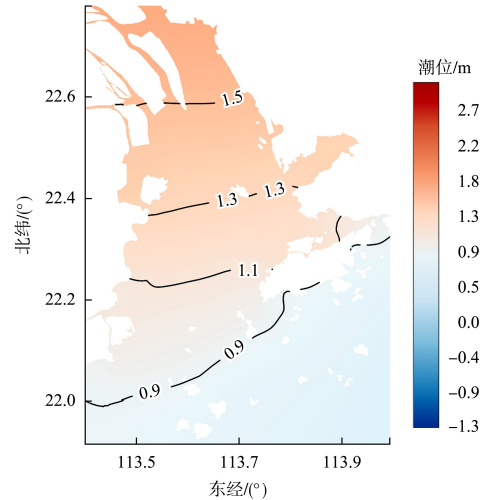
式中： a_i 、 φ_i 、 ω_i 分别为各分潮振幅、频率、迟角。研究规定涨潮方向 γ 为正，落潮方向 γ 为负。

3 结果与讨论

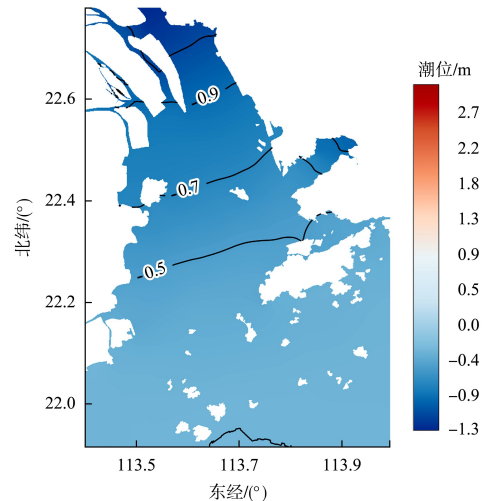
3.1 伶仃洋枯季潮动力特征

伶仃洋的潮位空间分布如图 6 所示。大潮时期，高潮位自湾口向湾顶逐渐升高，变化范围在 0.90~1.65 m；而低潮位则呈相反趋势，范围在 -1.30~-0.36 m；高低潮潮位存在明显的不对称性，高潮时潮位振幅大于低潮时潮位振幅。由于岸线沿着上游方向收缩，高潮位上升，低潮位下降，大潮时期的潮差随之增大，最大潮差达 2.9 m。小潮时期，伶仃洋内的高潮位和低潮位分别呈现出向上游递增和递减的趋势，潮位变化范围分别在 0.10~0.58 m 和 -0.8~-0.1 m。同样地，潮差也沿上游方向增大，最大潮差为 1.2 m。与大潮时

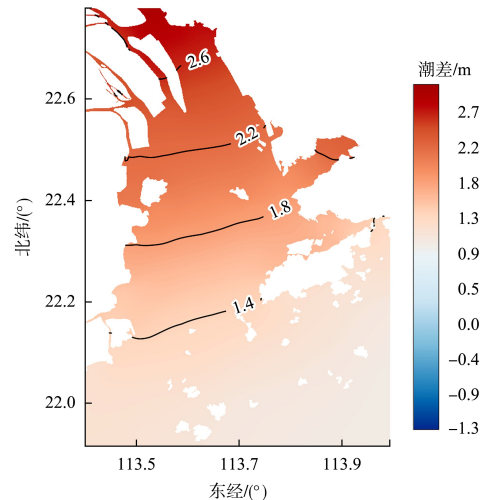
期相似，小潮时期的高低潮潮位之间也表现出不对称性，但此时低潮时潮位振幅大于高潮时潮位振幅。



a) 大潮高潮时



b) 大潮低潮时



c) 大潮时潮差

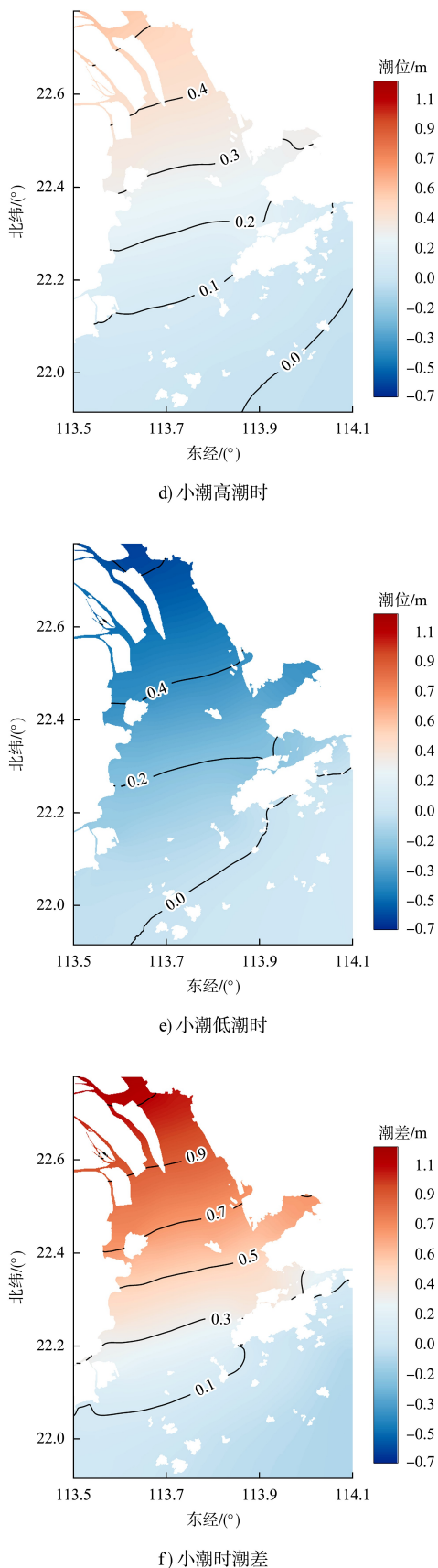


图 6 伶仃洋枯季潮位时空变化特征
Fig. 6 Spatiotemporal variation of tidal levels during dry seasons in Lingding Bay

表 1 统计了 3 种岸线条件下伶仃洋潮动力特征的变化情况。随着岸线不断围垦, 大潮振幅总体呈增大趋势, 高潮位愈高, 低潮位愈低, 二者共同作用导致潮差增大。具体而言, 从 1970 岸线年代至 2010 岸线年代, 大潮平均高潮位和低潮位振幅分别增加了 4 cm, 潮差增大了 8 cm。当岸线继续围垦至治导线时期, 大潮平均高潮位振幅虽有所减小, 但低潮位振幅继续增大, 导致潮差增加。与大潮时期的潮动力特征相反, 小潮时期的潮位振幅随着岸线变化而逐渐减小。

表 1 岸线变化下的伶仃洋潮动力特征

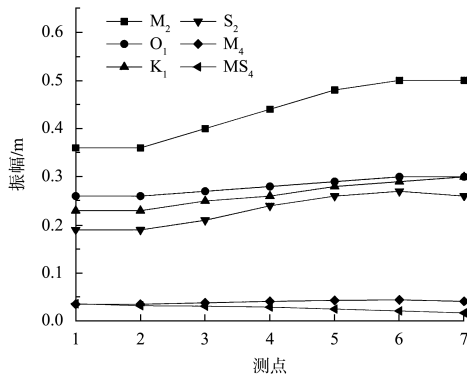
Tab. 1 Tidal dynamics characteristics of Lingding Bay under shoreline change m

时期	大潮平均高潮位	大潮平均低潮位	大潮平均潮差	小潮平均高潮位	小潮平均低潮位	小潮平均潮差
1970 s	1.44	-1.27	2.71	0.87	-0.70	1.57
2010 s	1.48	-1.31	2.79	0.59	-0.61	1.20
治导线	1.44	-1.36	2.80	0.58	-0.61	1.19

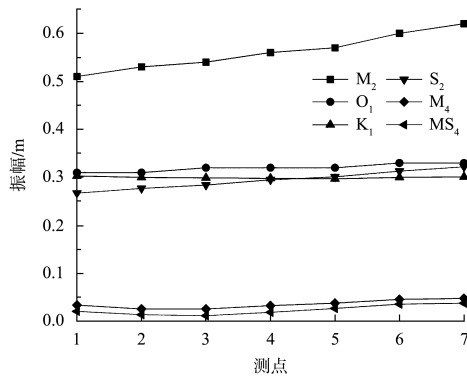
3.2 潮汐分潮振幅相位特征

对潮位时间序列进行调和分析, 筛选出伶仃洋主要的潮汐分量, 包括 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 、 M_4 、 MS_4 。通常情况下, 同一潮型中的分量具有相似的传播特性。由于 M_2/S_2 、 K_1/O_1 、 M_4/MS_4 分别属于半日潮、全日潮、浅水 1/4 分潮, 因此, 选择 M_2 、 K_1 和 M_4 分潮进行分析。主要潮汐分量的沿程分布特征(沿图 2 深泓线的 7 个代表点, 每个测点间距 10 km)如图 7 所示。在主要分潮中, M_2 分潮的振幅显著大于其他分潮。随着大规模围垦, 岸线收缩率增大, 能量汇聚作用加强, M_2 分潮振幅显著增加。伶仃洋的 M_2 分潮振幅呈由湾口向湾顶递增的趋势, 振幅大小总增值约 0.06 m。 M_2 分潮相位等值线向上游移动, 湾口与湾顶相位差减小约 10° , 表明分潮传播速度加快。 K_1 分潮的变化模式与 M_2 分潮大致相似, 振幅整体略有增大, 湾顶与湾口相对相位差减少约 10° 。在 2010 s 和治导线情况下, M_4 分潮振幅受到岸线收缩的显著影响, 从湾口向上游方向递减至岸线截面较宽处(湾中部), 然后沿程逐渐增大, 相位也从湾口增加至湾顶。而在 1970 s 的情况下, M_4 分潮振幅从湾口直

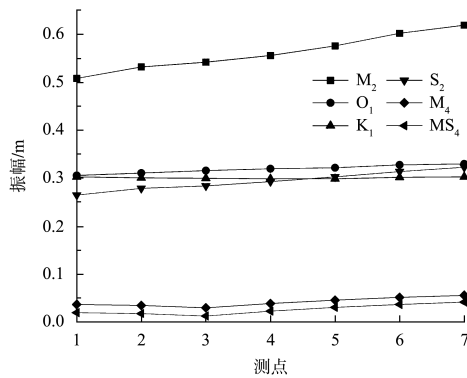
接递减至湾上部，相位的变化趋势则一致。



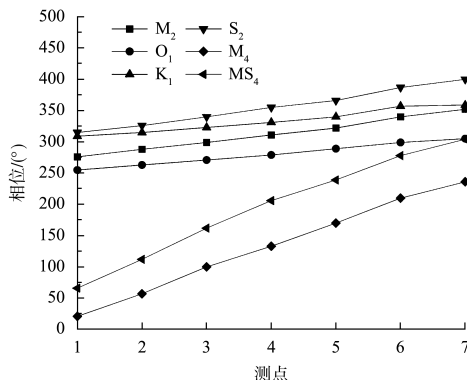
a) 1970s分潮振幅



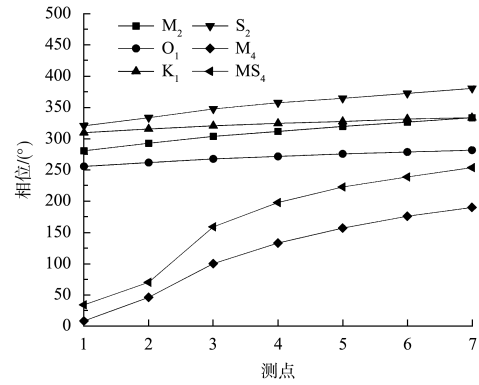
b) 2010s分潮振幅



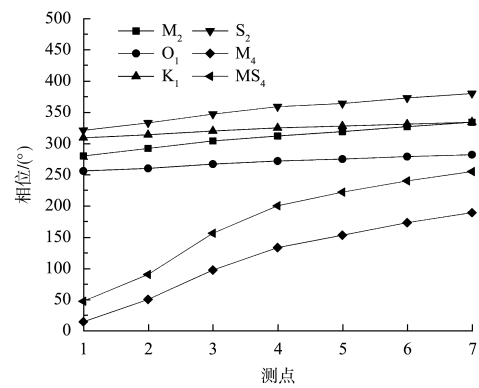
c) 沿导线分潮振幅



d) 1970s分潮相位



e) 2010s分潮相位



f) 沿导线分潮相位

图7 不同岸线条件下分潮振幅和相位的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of amplitudes and phases of partial tides under shorelines different

3.3 潮位历时不对称

图8为不同岸线条件下伶仃洋的潮位历时不对称性(TDA)的沿程分布特征。在20世纪70年代,从湾口到湾顶,偏度值逐渐增加,变化幅度在 $-0.35 \sim 0.15$,表明该海域从湾口往上游方向,落潮优势逐渐减弱,涨潮影响逐渐增强。在距离湾口约42 km的横门南出海口附近,偏度值为0,表示此区域落潮与涨潮历时相当。然而,继续向上游,涨潮开始占据优势;而向湾口的方向,则是落潮占优。随着围垦工程的迅速推进,到了2010年代,伶仃洋的岸线发生了显著变化,向海推进并收缩。这一变化使得伶仃洋落潮优势被明显削弱,涨落潮历时相同区域相较于之前往湾口方向南移约12 km。此外,伶仃洋北部海域的偏度值有所增加,而南部湾口附近的偏度值则有所减小,变幅

保持在 ± 0.15 之内。在治导线的情况下, 落潮优势进一步减弱, 具体表现为落潮历时变长, TDA的空间分布趋势与前两种情况大致相同, 但涨落潮历时相同区域再次向南移动了大约 11 km。此外, 湾口的偏度值减小约 0.1, 而上游区域的偏度值则增加约 0.2。

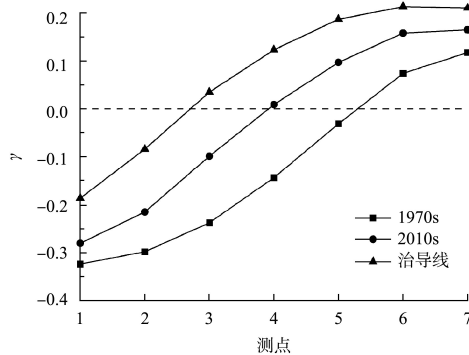


图8 岸线变化对 TDA 的影响

Fig. 8 Impact of shoreline change on TDA

3.4 分潮组合对潮汐不对称的贡献

根据分潮组合对潮汐不对称的贡献值计算公式, 得到沿深泓线(图2)不同岸线条件下主要分潮组合对潮位历时不对称性的贡献, 如图9所示。引起伶仃洋潮汐不对称性的主要分潮组合包括 $K_1/O_1/M_2$ 、 M_2/M_4 和 $M_2/S_2/MS_4$ 3种分潮组合。外海传来的潮波主要由天文潮组成, 潮波动力较强, 分潮所携带的能量较大, 因此伶仃洋 $K_1/O_1/M_2$ 分潮组合贡献明显高于其他单组分潮组合, 分潮贡献值在 $-0.22 \sim -0.15$ 。潮波进入伶仃洋后, 分潮振幅随岸线向上游收缩而增加, $K_1/O_1/M_2$ 分潮组合引起的分潮贡献值沿上游方向减小, 变化幅度在 0.04 以内。相比之下, M_2/M_4 和 $M_2/S_2/MS_4$ 浅水分潮组合在湾顶与河口内变化趋势相反, 表现为湾顶偏度值为正值, 而河口为负值, 分潮贡献值沿上游增加, 变化幅度在 0.25 左右, 较为显著。 M_2/M_4 和 $M_2/S_2/MS_4$ 分潮组合对 TDA 的贡献变化范围大于 $K_1/O_1/M_2$ 分潮组合, 对 TDA 的贡献出现此消彼长的现象, 这种现象是由于收缩型河口对高频分潮的增大作用远大于对低频分潮的影响。

伶仃洋岸线的向海推进会增加浅水分潮组合导致的正偏度值, 减小其导致的负偏度值。岸线的收缩变化加速了这种转变过程, 增强了浅水分潮的作用, 造成浅水分潮组合主导的涨潮占优。此外, 随着河口平面收缩率的增强, 余流变化也会导致近岸地区涨潮占优趋势增强。虽然各分潮组合沿湾口向上游的变化是单调的, 但伶仃洋岸线收缩率并不是沿上游单调递增的, 因此伶仃洋潮汐不对称性空间变化还受其他因素影响。

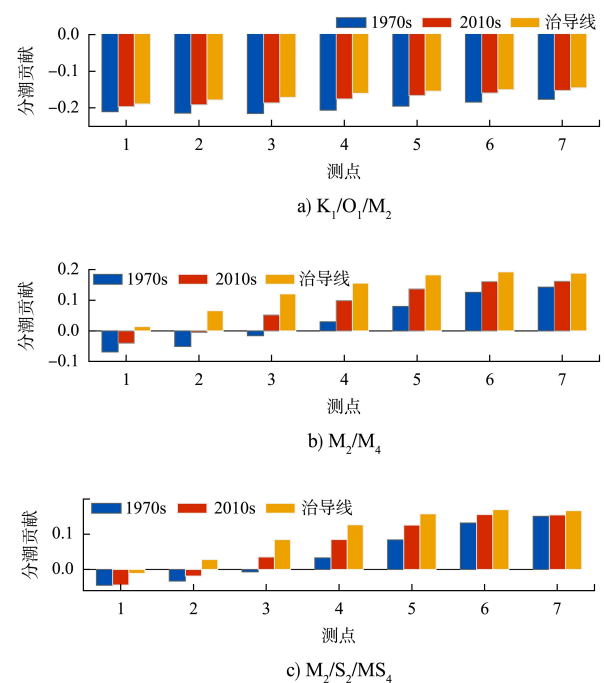


图9 不同岸线下 TDA 主要分潮组合的沿程分布

Fig. 9 Distribution of main combinations of TDA along west channel under different shorelines

4 结论

1) 伶仃洋的潮位不对称性显著, 且大小潮期间的优势不对称性不同。岸线沿上游方向收缩导致潮波能量聚集, 使得高潮位升高、低潮位降低, 潮差沿程增大, 最大为 2.9 m。低潮位受岸线收缩的影响更大, 湾口与湾顶的潮位值相差更大。

2) 岸线的变化会增大浅水分潮的潮汐振幅, 减小天文分潮的潮汐振幅, 随着岸线向外海延伸, 主要分潮的振幅值增大, 相位沿上游方向推移,

潮波传播速度加快。

3) 伶仃洋的 TDA 趋势为湾口落潮占优, 湾顶涨潮占优, 涨落潮历时沿程变化。岸线的变化会增强伶仃洋 TDA 的涨潮优势。天文分潮组合对 TDA 的贡献沿上游方向减弱, 而浅水分潮组合的贡献逐渐增强, 岸线变化会增强浅水分潮组合的作用, 同时削弱 $K_1/O_1/M_2$ 分潮组合的作用。

参考文献:

- [1] CAO D F, SHEN Y M, SU M L, et al. Numerical simulation of hydrodynamic environment effects of the reclamation project of Nanhui tidal flat in Yangtze Estuary[J]. Journal of hydrodynamics, 2019, 31(3): 603-613.
- [2] YANG Q S, FU L X, CAI H Y, et al. Responses of tidal duration asymmetry to morphological changes in Lingding Bay of the Pearl River Estuary [J]. Frontiers in marine science, 2022, 9: 983182.
- [3] 钱沛, 冯曦, 冯卫兵, 等. 辐射沙洲海域潮汐不对称对岸线变化的响应[J]. 水利水运工程学报, 2020(3): 51-60.
- QIAN P, FENG Xi, FENG W B, et al. Response of tidal asymmetry to coastline changes in radial sand ridges sea area[J]. Hydro-science and engineering, 2020(3): 51-60.
- [4] LI Y, YANG E S, PAN Y, et al. Numerical modeling of the impact of sea level rise on tidal asymmetry in Hangzhou Bay [J]. Journal of marine science and engineering, 2022, 10(10): 1445.
- [5] SONG D, WANG X H, 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 and shelf science, 2013, 133: 147-160.
- [6] YANG Y, CHUI T F M, SHEN P P, et al. Modeling the temporal dynamics of intertidal benthic infauna biomass with environmental factors: Impact assessment of land reclamation[J]. Science of the total environment, 2018, 618: 439-450.
- [7] ZHANG W, RUAN X H, ZHENG J H, et al. Long-term change in tidal dynamics and its cause in the Pearl River Delta, China [J]. Geomorphology, 2010, 120 (3/4): 209-223.
- [8] 王宗旭, 乔煜, 季小梅, 等. 珠江河口岸线变化对潮动力的影响[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(3): 1171-1180.
- WANG Z X, QIAO Y, JI X M, et al. The influence of coastline changes on tidal dynamics in the Pearl River Estuary [J]. Science technology and engineering, 2020, 20(3): 1171-1180.
- [9] 韩西军, 杨树森. 珠江口鸡抱沙附近地形冲淤演变研究[J]. 水道港口, 2008(5): 328-332.
- HAN X J, YANG SS, Scour and silting evolution of topography around Jibao sha in the Zhujiang estuary [J]. Journal of waterway and harbor, 2008(5): 328-332.
- [10] DENG J J, BAO Y. Morphologic evolution and hydrodynamic variation during the last 30 years in the LINGDING Bay, South China Sea [J]. Coastal research, 2011, 64: 1482-1489.
- [11] EGBERT G D, EROFEEVA S Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides [J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 2002, 19 (2): 183-204.
- [12] ALLEN, J I, SOMERFIELD P J, GILBERT F J. Quantifying uncertainty in high-resolution coupled hydrodynamic-ecosystem models [J]. Journal of marine systems, 2007, 64(1/4): 3-14.
- [13] NIDZIEKO N J. Tidal asymmetry in estuaries with mixed semidiurnal/diurnal tides [J]. Journal of geophysical research: oceans, 2010, 115(C8): C08006.
- [14] SONG D, WANG H X, KISS E A, et al. The contribution to tidal asymmetry by different combinations of tidal constituents[J]. Journal of geophysical research: oceans, 2011, 116(C12): C12007.

(本文编辑 王传瑜)