

# 黄渤海海域内涨潮 对长江口径流量的影响分析

高芳芳,冯 曦,郭东升

(河海大学 港口海岸与近海工程学院,江苏 南京 210098)

**摘要:**运用FVCOM模型对黄渤海的潮波系统建立了数值模拟,对海域内潮波的涨潮特征对于长江口径流量变化的响应进行了分析,用最高潮位和潮汐不对称性来量化。结果表明,黄渤海海域内最高潮位和最强潮不对称性均出现在江阴附近;潮汐不对称性在江苏沿岸海域呈现空间不均匀性,大部分海域为涨潮占优;长江口径流的季节性变化使得潮汐不对称和最高潮位都表现出不可忽略的季节性差异,洪期长江口附近水域有明显涨潮占优的发展趋势。上述研究成果可为江苏沿岸大潮位预警和潮致淹没灾害防治提供参考。

**关键词:**FVCOM模型;潮汐;长江口

中图分类号:TV122

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2023)08-0027-0005

## Analysis of the impact of flood-tide in the Yellow Sea and Bohai Sea on runoff from the Yangtze River Estuary

GAO Fangfang, FENG Xi\*, GUO Dongsheng

(College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In this paper, a numerical platform is established by using the FVCOM model for tide simulation in the Yellow Sea and Bohai Sea. The response characteristics of the flood-tide, indicated by the peak-water-level and tidal asymmetry index, to the variability of the Yangtze River discharge are analyzed. Results showed that the peak-water-level (~3.5 m) and the strongest tidal asymmetry are both near the Jianggang Port in this region. The tidal asymmetry shows spatial heterogeneity in the coastal waters of Jiangsu province, and is flood-dominant in most area. The seasonal variation of the Yangtze River discharge flow leads to nonnegligible seasonal variation in the tidal asymmetry and the peak-water-level over the domain. Tendency to flood-dominance near the Yangtze River estuary is prominent during flood seasons. The results of this study can provide theoretical support for improving early warning system of high-tides, and prevention management of tide-induced inundation hazard along Jiangsu coast.

**Key words:** FVCOM model; tide; Yangtze Estuary

收稿日期: 2023-01-16

基金项目: 江苏省水利科技项目(2022023);装备预研教育部联合基金(8091B022123)

作者简介: 高芳芳(1999—),女,硕士研究生,主要从事海岸水动力方面研究。E-mail: 221303020058@hhu.edu.cn

通信作者: 冯曦(1987—),女,博士,主要从事海岸水动力和海岸带灾害研究。E-mail: xifeng@hhu.edu.cn

海洋潮波传播到浅海水域时,在浅化效应及不规则的地形、潮滩面积<sup>[1]</sup>等因素作用下,将产生潮汐不对称性现象。潮汐不对称性在河口和海岸系统的泥沙输移和水循环中起着重要作用<sup>[2-3]</sup>,影响着河口海岸地区的地形地貌,进而影响到近岸地区的自然经济发展<sup>[1]</sup>。

黄渤海区域,北起山东半岛,覆盖整个江苏沿海,在江苏沿海有着丰富的潮滩资源,并且有大片的特殊地形辐射沙洲,面积大,地形复杂。该海域处于黄渤海西部的旋转潮波系统与东海前进潮波系统的交汇处,潮差大,潮流强,水动力条件复杂,属于强潮海域。聚焦到辐射沙洲区域的潮汐场,上述潮汐不对称性现象更为明显。苏北浅滩区域海水从外海流入潮流通道过程中,受辐射沙洲地形影响,在潮流通道中形成海水堆积,超出某一限度时,极易引起局地海流流速急增、水位急涨现象。

江苏省位于长江流域下游,长江口径流量巨大,对河口海域的环境有着巨大的影响<sup>[5]</sup>,且其径流量具有显著的季节性变化特征,使得潮汐不对称同时表现出显著的季节性差异<sup>[6-7]</sup>。本研究选取黄渤海作为研究区域并建立水动力模型,首先分析该区域内潮动力特征、主要分潮特征以及潮波不对称的分布特征,而后基于长江口近年长周期水位数据,分析潮汐不对称性对长江口径流量的响应。

潮汐演变研究对科学管理海岸带是必不可少的,同时也对近岸地形的演变,生态岸线的恢复以及海岸带减灾防灾具有重要意义。本文将重点量化研究区域内的最高水位和潮汐不对称性变化量,旨在为河口海岸周期性的高水位预警预报提供服务。

## 1 模型建立及验证

### 1.1 FVCOM数值模式

FVCOM是非结构网格、有限体积法、自由表面、三维原始方程的海洋数值模式<sup>[8]</sup>。在FVCOM模型中,垂直方向采用广义地形跟随坐标系,拟合不规则的海底地形;水平方向则采用不重叠的非结构化三角网格,拟合复杂曲折的海岸线。同时,FVCOM模型采用的干湿网格判别法能够很好地模拟出海水涨落潮期间滩涂或潮间带被淹没或裸露的情况,在垂直方向上采用坐标能够较好地模拟海底地形,因此该模式能够较好地体现海湾、滩涂等浅水区域对水动力环境的影响。模式控制方程包括动量方程、连续性方程、温度方程、盐度方程和密度方程。

### 1.2 计算区域

本文的模型计算区域为119°~123°E、30°~36°N,海底水深数据取自机械漂流预报模型<sup>[9]</sup>中使用的数据。

模型计算所使用的非结构化三角形网格是利用SMS生成的,其优势在于可以对岸线复杂、地形变化明显和重点研究的区域进行局部加密。本文模型的开边界区域空间分辨率约为0.07°,岸线区域空间分辨率约为0.01°,共有20 270个节点和39 499个单元。外海开边界上受潮位驱动,主要由8个主要分潮驱动,同时考虑长江口的径流作用,设置径流量参数为多年平均流量28 000 m<sup>3</sup>/s。

### 1.3 模型验证

选取2014年2月11日至3月1日期间的江苏沿岸4个测站的实测潮位资料与模拟值进行对比,这4个测站分别为连云港测站、响水测站、大丰测站、蛎蚜山测站。潮位验证结果的量化评价指标选用相关系数进行统计分析。图1为4个测站的潮位实测值和模型模拟值的潮位对比图。相关系数均大于0.95,可知模拟值与实测值高度相关。

## 2 潮动力特征分析

### 2.1 潮位分析

黄渤海海域内最大潮差呈现近岸大、中部小的趋势,且东岸普遍大于西岸。最大潮差海区出现在琼港附近,最大为5 m左右,向外海域东北方向逐渐降小。作为开敞式的平原海岸,出现如此大的潮差是特殊的潮波分布所导致的,来自东海的前进潮波与来自黄海的旋转潮波相遇后,向西南方向传播的潮波在琼港向东北一带海域形成潮波辐聚区<sup>[10]</sup>,造成琼港附近的辐射沙脊群海域潮差大、潮流强。海州湾附近区域潮差最大可达4.0 m,长江口由于径流的作用潮差稍大,可达3.5 m。黄渤海海域最大潮位分布特征与潮差图相似,最大潮位同样出现在琼港附近,为3.5 m。由此看出辐射沙洲地区发生潮致洪水的灾害远高于其他地区。对最高潮位的研究分析,对江苏海域沿岸潮致淹没灾害的预报具有一定的应用服务价值。

### 2.2 M<sub>2</sub>与M<sub>4</sub>分潮分析

根据相关研究,导致江苏海域潮汐不对称性的最主要分潮组合为M<sub>2</sub>和倍潮M<sub>4</sub>的组合<sup>[11]</sup>。使用T-TIDE工具包,将模型计算结果进行调和分析,得到计算区域内M<sub>2</sub>和M<sub>4</sub>分潮的振幅分布,可知M<sub>2</sub>分潮在海州湾和辐射沙洲附近海域的振幅较大,最大值

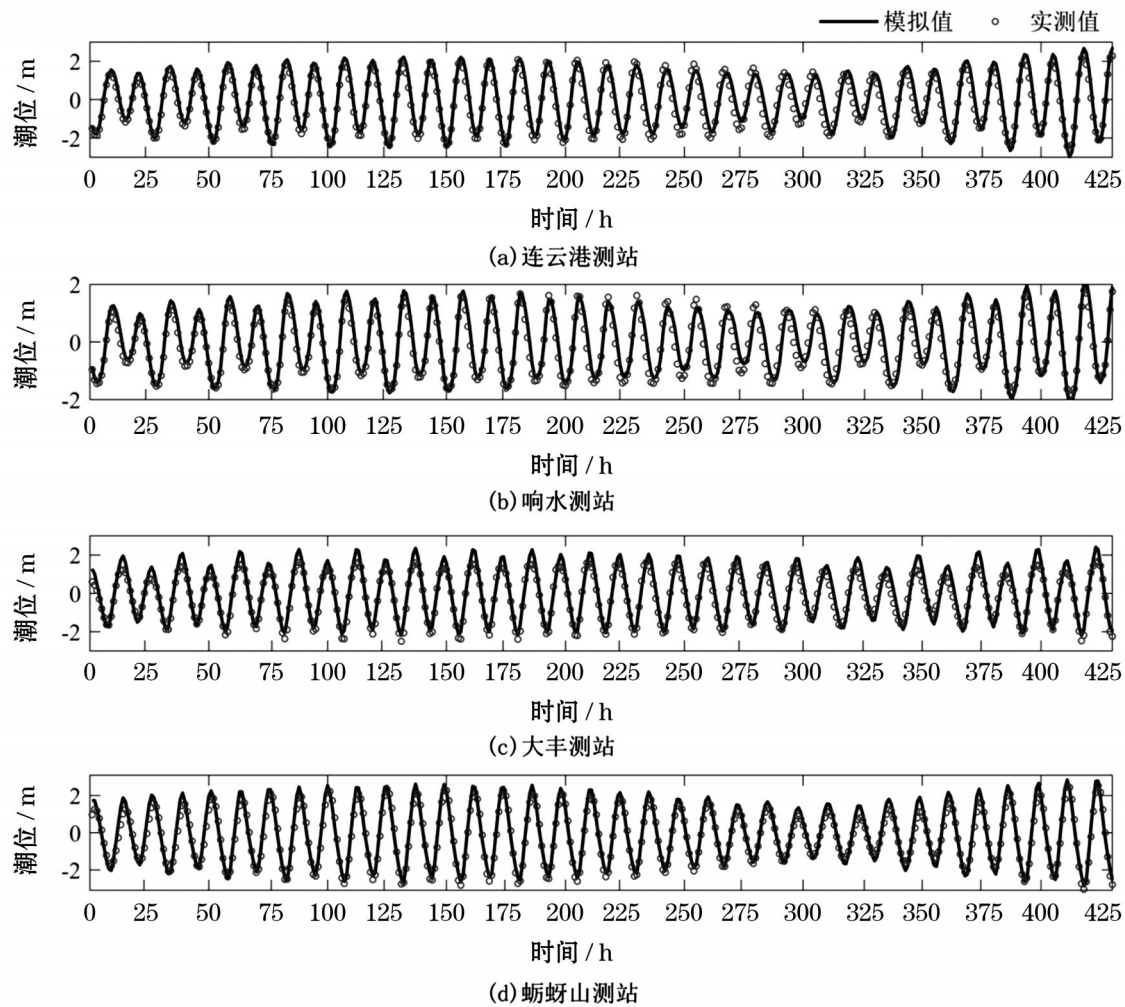


图1 潮位实测值与模型模拟值对比

发生在辐射沙洲近岸区域,可达2.0 m,除射阳县以西海域,振幅都在1.0 m以上。 $M_4$ 分潮的振幅由外海向内陆逐渐增大,在辐射沙洲顶部达到最大值0.4 m。长江口由于径流作用,振幅较大,可以达到0.2 m。

### 2.3 潮汐不对称性分析

Nidzieko等<sup>[12]</sup>提出潮汐不对称性的平均值等于潮位的时间偏导,等于三阶矩与标准偏差的三次方的比值。本文采用Nidzieko等<sup>[12]</sup>提出的量化指标,对黄渤海海域的潮汐不对称性分布进行计算,得到黄渤海海域全局的潮汐不对称性分布图。除无潮点的西北和东南附近潮汐不对称性指标为负值,其余海域均为正值,即大部分海域为涨潮历时较落潮历时短,为涨潮主导型不对称。

## 3 长江口径流的敏感性分析

为探究长江口径流的作用,本文设置了4种实

验工况,如表1所示。2019—2021年的长江下游大通水文测站逐月径流资料,流量分布如图2所示。

表1 实验工况设置

编号	流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	工况说明
(a)	0	无径流,纯潮动力
(b)	28 000	多年平均流量的径流
(c)	40 000	多年洪水期流量的径流
(d)	17 000	多年枯水期流量的径流

不添加径流时的偏度值及添加径流前后的偏度变化如图3所示。图3(a)为无径流、纯外海潮动力驱使下,黄渤海海域的潮汐不对称性偏度值,图3(b~d)为添加径流后潮形状偏度的变化值( $\Delta\gamma$ )。可以看出,长江口的径流对黄渤海潮汐不对称性影响较大。径流量的枯洪期变化不会造成大格局上的潮汐不对称性形状变化,但洪期 $\Delta\gamma$ 增大导致长江



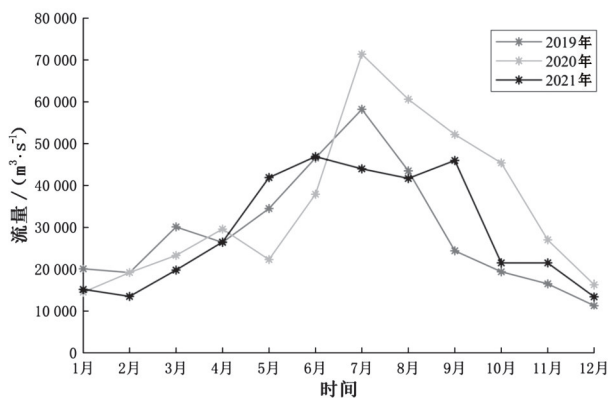


图2 2019—2021年大通水文站逐月平均径流流量

口附近的潮汐不对称性值明显增加。长江口向外,潮汐不对称性呈相反趋势变化,即向落潮占优的趋势发展,并沿外海方向程度逐渐减小。其中,盐城

响水县附近的废黄河口海域向着落潮占优的趋势发展( $\Delta\gamma < 0$ ),而废黄河口临近海域( $\Delta\gamma > 0$ ),这表明长江口的径流作用会影响废黄河口外无潮点的位移,从而影响了渤海和黄海交界处的潮波系统。因此,径流的作用不仅会影响到河口附近的海域,对相隔较远的近海潮波也会产生影响。

不添加径流时的最高潮位及添加径流前后的最高潮位变化如图4所示。图4(a)为无径流、纯外海潮动力驱使下的最高潮位分布图,图4(b~d)为添加径流后最高潮位的变化值( $\Delta\zeta_{\max}$ )。径流对最高潮位的影响主要集中在长江口附近,不会对长距离的范围造成影响。径流量的枯洪期变化使最高潮位也表现出季节性变化,洪水期长江口位置最高潮位明显增加,最多增大0.34 m,枯水期最高潮位减小,最多减小0.07 m。

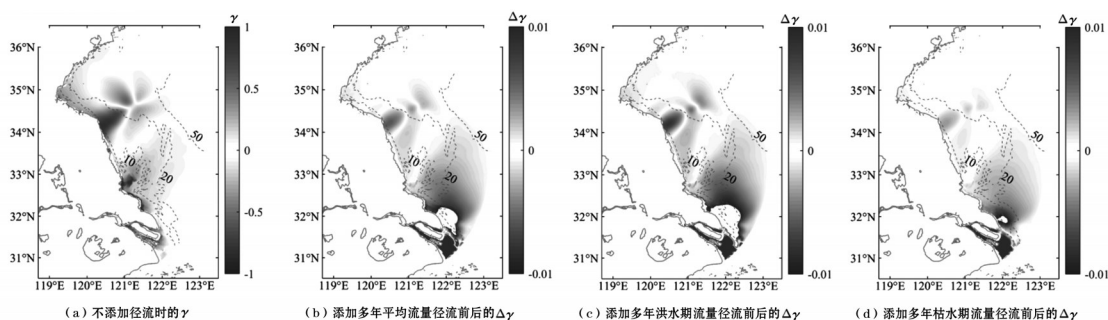


图3 不添加径流时的偏度值及添加径流前后的偏度变化

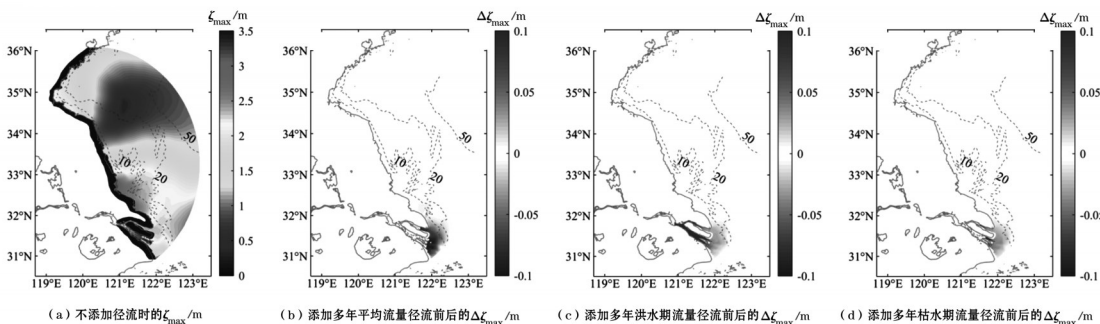


图4 不添加径流时的最高潮位及添加径流前后的最高潮位变化

## 4 结论与建议

本文基于FVCOM海洋水动力模型,对黄渤海海域的潮波系统建立了数值模拟平台。对黄渤海海域内的潮动力特征进行了分析,包括潮位分析、主要分潮分析以及潮汐不对称分析,基于长江口近年长周期水位数据,分析长江口径流量对于该海域

内潮汐不对称性的影响。

(1)黄渤海海域内最大潮差呈现近岸大而中部小的趋势,且东岸普遍大于西岸,最大潮差海区出现在弥港附近,最大为5.0 m左右,最高水位出现在弥港附近。

(2)江苏海域潮汐不对称性的最主要分潮组合 $M_2$ 分潮和 $M_4$ 分潮。前者在海州湾和辐射沙洲附近

海域的振幅较大,最大值发生在辐射沙洲近岸区域,可达2.0 m;后者的振幅由外海向内陆逐渐增大,在辐射沙洲顶部达到最大值0.4 m。

(3)黄渤海海域潮汐不对称性在空间上呈不均匀分布,除外海无潮点的西北和东南附近潮型偏态指标为负值( $\gamma < 0$ ),其余海域均为正值( $\gamma > 0$ ),即大部分海域为涨潮主导型不对称。

(4)长江口径流的季节性变化使得潮汐不对称和最高潮位都表现出显著的季节性差异。长江口附近水域有明显向涨潮占优的发展趋势, $\Delta\gamma$ 最大值为0.2,还会对相隔较远的中部岸线产生影响,但影响程度不大。洪水期长江口位置最高潮位明显增加,枯水期最高潮位减小。

本文的研究成果可为江苏沿岸潮致淹没灾害的预报提供一定基础理论支撑。从海岸管理的角度考虑,建议着重考虑辐射沙洲区域的响应以及长江口径流量的季节性变化,结合区域政策、实际海防工程深入开展海岸与潮动力之间相互作用的研究,为区域防潮防洪以及生态改造提供决策依据。

#### 参考文献:

- [1] SPEER P E, AUBREY D G. A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems Part II: Theory[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1985, 21(2): 207-224.
- [2] GATTO V M, VAN PROOIJEN B C, WANG Z B. Net sediment transport in tidal basins: quantifying the tidal barotropic mechanisms in a unified framework[J]. *Ocean Dynamics*, 2017, 67(11): 1385-1406.
- [3] HOITINK A J F, HOEKSTRA P, VAN MAREN D S. Flow asymmetry associated with astronomical tides: Implications for the residual transport of sediment [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2003, 108(10): 20.
- [4] YANG Z S, WANG H J, SAITO Y, et al. Dam impacts on the Changjiang (Yangtze) River sediment discharge to the sea: The past 55 years and after the Three Gorges Dam[J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(4): 13.
- [5] 徐灿灿,刘超,刘俊杰,等. 长江江苏段水生态环境保护思考与建议[J]. *江苏水利*, 2021(2): 26-29.
- [6] 张蔚,郁夏琰,徐怡,等. 三峡流量调节对长江口潮汐不对称的影响[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(2): 143-149.
- [7] 冯曦,周雨晨,孙凤明,等. 温州湾海域潮形偏态时空分布特征研究[J]. *海洋学报*, 2022, 44(7): 25-36.
- [8] CHEN C, BEARDSLEY R C, COWLES G, et al. An unstructured-grid, finite-volume community ocean model: FVCOM user manual[M]. Cambridge, MA, USA: Sea Grant College Program, Massachusetts Institute of Technology, 2012.
- [9] ZHANG W N, HUANG H M, WANG Y G, et al. Mechanistic drifting forecast model for a small semi-submersible drifter under tide-wind-wave conditions[J]. *China Ocean Engineering*, 2018, 32(1): 99-109.
- [10] 张东生,张君伦. 黄海海底辐射沙洲区的 $M_2$ 潮波[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 1996, 37(5): 30-35.
- [11] FENG H, FENG X, FENG W, et al. Sensitivity of tides and tidal components to sea-level-rise in the Radial Sand Ridges[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2021(47): 101-118.
- [12] NIDZIEKO N J. Tidal asymmetry in estuaries with mixed semidiurnal/diurnal tides[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115(8): 9.