

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.02.008

# 三峡流量调节对长江口潮汐不对称的影响

张蔚<sup>1,2,3</sup>, 郁夏琰<sup>1,2</sup>, 徐怡<sup>1</sup>, 杨晨<sup>1</sup>, 唐明昊<sup>1</sup>, 方拥军<sup>4</sup>

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;  
2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学水利工程实验教学中心, 江苏 南京 210098;  
4. 中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司, 安徽 合肥 230601)

**摘要:** 利用非平稳调和分析方法(NS\_TIDE)对长江口内6个水文测站的长周期水位资料进行调和  
分析,同时引入偏度指标刻画不同分潮组合产生的潮汐不对称时空演变规律。结果表明:随着潮波  
向河口内传播,潮汐不对称呈现先增大、后减小的趋势;流量的季节性变化使得潮汐不对称特征存  
在显著的季节性差异;通过敏感性分析探讨潮汐不对称对径流变化的响应,具体表现为流量增大会  
导致上游潮汐不对称性减弱,而下游的潮汐不对称性会随着流量的增大而增强;三峡大坝在洪季时  
的蓄水使大通站洪季流量显著减小,从而导致长江口上游地区的潮汐不对称现象更加显著,而下游  
地区则表现出相反的趋势。

**关键词:** 潮汐不对称;非平稳调和分析;径流;季节性变化;流量调节;三峡大坝;长江口

**中图分类号:** P731.23      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-1980(2020)02-0143-07

## Influence of discharge regulation by Three Gorges Dam on tidal asymmetry in Yangtze Estuary

ZHANG Wei<sup>1,2,3</sup>, YU Xiayan<sup>1,2</sup>, XU Yi<sup>1</sup>, YANG Chen<sup>1</sup>, TANG Minghao<sup>1</sup>, FANG Yongjun<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence (Hohai University),  
Ministry of Education, Nanjing 210098, China;  
2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
3. The Experimental Teaching Center of Water Conservancy Projects of Hohai University, Nanjing 210098, China;  
4. China Energy Engineering Group Anhui Electric Power Design Institute Co., Ltd., Hefei 230601, China)

**Abstract:** This study applied a nonstationary harmonic analysis (NS\_TIDE) method to analyze the long-term monitoring data of 6 stations in the Yangtze Estuary, and the spatial and temporal variations of multiple sources of tidal asymmetry were quantified by a skewness metric. The results indicated that the tidal skewness shows an initial increase followed by a slight decrease as it propagates landward. The detailed amplitude variations of tidal asymmetry due to changes in the seasonal discharge were investigated. The sensitivity analysis reveals the response of tidal asymmetry to the varying discharge, which is the tidal asymmetry of upstream decreases with the increase of discharge and the tidal asymmetry of downstream shows a opposite trend. The results spanning the periods before and after the operation of the Three Gorges Dam were compared to investigate the impacts of the Three Gorges Dam. Because of the decrease in river discharge during the flood season, tides became more asymmetric at the upstream region, but a contrary trend appears at the downstream region.

**Key words:** tidal asymmetry; nonstationary harmonic analysis; river discharge; seasonal variation; discharge regulation; Three Gorges Dam; Yangtze Estuary

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC0405401)  
作者简介: 张蔚(1979—),男,教授,博士,主要从事河口海岸水动力环境研究。E-mail:w. zhang@hhu. edu. cn  
引用本文: 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.  
ZHANG Wei, YU Xiayan, XU Yi, et al. Influence of discharge regulation by Three Gorges Dam on tidal asymmetry in Yangtze Estuary [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(2):143-149.

河口地区是世界上人类密度最大,经济最为发达的区域之一<sup>[1]</sup>。河口通常地处海陆交界处,因此河口内的潮波运动会受到多种因素的影响,如径流、波浪和潮汐动力等,呈现出高度的非稳态特征<sup>[2-3]</sup>。潮汐不对称是指发生在一个涨落潮周期内的周期性差异<sup>[4]</sup>。除浅水非线性作用外,原始天文分潮间的相互作用也可能是导致潮汐不对称现象的主要因素<sup>[5-6]</sup>。在河口内,由于显著的非线性作用,会使得潮汐不对称呈现相当复杂的特性<sup>[7]</sup>。近年来,河口内频繁的人类活动对于河口的演变产生了重要的影响。然而,由于长周期的观测资料获取难度较大,同时传统的调和分析方法并不能够较好地捕捉潮位中的非稳态信号<sup>[7]</sup>。因此,目前不同类型的潮汐不对称现象在河口内对径流变化的响应过程仍有待更为详尽的研究。

长江口是世界上最大的河口之一,径流量巨大,且具有显著的季节性变化特征,是研究不同径流量对潮汐不对称影响的理想场所。同时,2003 年三峡大坝开始蓄水以后,对下游地区的流量调节产生了巨大影响<sup>[8-9]</sup>,径流的季节性波动在水库蓄水后得到减弱,从而对长江口地区的潮汐不对称特征产生更大的影响。本文基于长江口内 6 个不同站点的长周期水位数据,利用非平稳调和分析方法计算得到长江口内分潮的时空演变规律,并利用偏度刻画多种不同分潮组合作用下的潮汐不对称时空变化特征,同时进一步结合三峡工程对下游地区的流量调节分析三峡对于长江口内潮汐不对称演变的影响。

1 研究区域和分析方法

1.1 研究区域概况

长江口作为连接长江和东海的主要通道,是受径潮相互作用影响显著的潮汐强度中等的河口<sup>[10]</sup>。长江口外为正规半日潮,其潮型指数  $F=(a_{K_1}+a_{O_1})/(a_{M_2}+a_{S_2})<0.25$  ( $a$  代表分潮振幅)。在枯季径流较小的情况下,其潮流界和潮区界分别可达到上游的江苏镇江和安徽大通<sup>[11]</sup>。长江口潮汐以  $M_2$  分潮为主,其次分别为  $S_2$ 、 $K_1$  和  $O_1$  分潮<sup>[12]</sup>。

本文采集了分布于长江口内 6 个水文站点(图 1)的长周期水位数据(徐六泾站为 1982—1985 年、2003—2014 年,其他水文站点为 1965—1985 年、2003—2014 年),水位基面为吴淞基面。为满足调和分析的要求,采用三角插值法将搜集的高、低潮水位插值为逐时水位。同时,搜集了上游控制站点——大通站的日均流量数据。芜湖站、南京站、镇江站、江阴站、徐六泾站和高桥站距离大通站的距离分别为 124 km、220 km、320 km、405 km、490 km、575 km。

1.2 分析方法

1.2.1 非平稳调和分析方法(NS\_TIDE)

为验证 NS\_TIDE<sup>[13]</sup> 在长江口的适用性,分别采用 NS\_TIDE 和 T\_TIDE(传统调和分析方法)对 6 个水文站点 2014 年的水位进行调和分析,并将其后报水位同实测的逐时水位进行对比分析,计算 2 种方法后报的水位相对于实测逐时水位的均方根误差(图 2)。在长江口下游地区,NS\_TIDE 和 T\_TIDE 的后报结果均方根误差均处在相对较低的水平。然而随着潮波进一步向上游传播,径流的作用越来越大,T\_TIDE 后报结果的均方根误差显著增加,在芜湖站甚至超过了 2 m。相较于 T\_TIDE,NS\_TIDE 后报结果的均方根误差在长江口内均保持在相对较低的水平,最大不超过 0.22 m。在上游受径流影响显著的芜湖站,其均方根误差仅为 T\_TIDE 的 8%。因此,NS\_TIDE 可以较好地捕捉实测水位中径流等非平稳信号,其在长江口内的适用性显著优于 T\_TIDE。

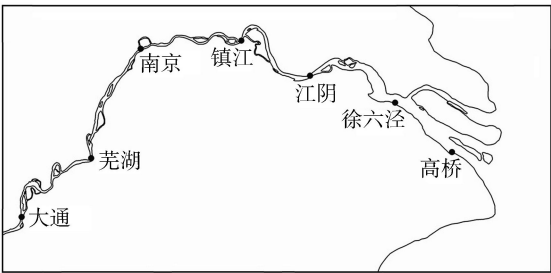


图 1 长江口区域及水位站点位置

Fig.1 Map of the Yangtze River estuary and locations of hydrological stations

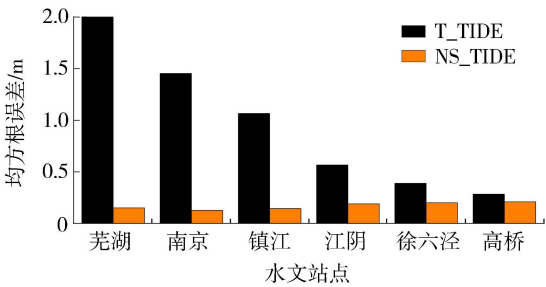


图 2 T\_TIDE 与 NS\_TIDE 后报水位的均方根误差

Fig.2 Root mean square error of water level hindcasts obtained by T\_TIDE and NS\_TIDE

1.2.2 偏度方法

采用偏度方法描述长江口潮汐不对称的特征<sup>[14]</sup>。2 种、3 种分潮组合叠加产生的偏度值  $\gamma_2$ 、 $\gamma_3$  为

$$\gamma_2 = \frac{\frac{3}{4}a_1^2\omega_1^2a_2\omega_2\sin(2\varphi_1-\varphi_2)}{\left[\frac{1}{2}(a_1^2\omega_1^2+a_2^2\omega_2^2)\right]^{\frac{3}{2}}}$$
$$\gamma_3 = \frac{\frac{3}{2}a_1\omega_1a_2\omega_2a_3\omega_3\sin(\varphi_1+\varphi_2-\varphi_3)}{\left[\frac{1}{2}(a_1^2\omega_1^2+a_2^2\omega_2^2+a_3^2\omega_3^2)\right]^{\frac{3}{2}}}$$

(1)

式中： $a_i$ ——分潮振幅； $\omega_i$ ——分潮频率； $\varphi_i$ ——分潮相位。

2 种、3 种分潮组合对总偏度值的贡献  $\beta_2$ 、 $\beta_3$  由式(2)计算,总偏度值  $\gamma_N = \sum \beta_2 + \sum \beta_3$ 。

$$\beta_2 = \gamma_2 \left( \frac{a_1^2\omega_1^2+a_2^2\omega_2^2}{\sum_{i=1}^N a_i^2\omega_i^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$
$$\beta_3 = \gamma_3 \left( \frac{a_1^2\omega_1^2+a_2^2\omega_2^2+a_3^2\omega_3^2}{\sum_{i=1}^N a_i^2\omega_i^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

(2)

2 结果与分析

2.1 流量变化特征

长江口上游来流充沛,大通站的平均流量约为 2.75 万 m<sup>3</sup>/s,且流量呈现显著的季节性差异,洪季(5—10 月)流量达到全年流量的 70% 以上,而枯季(11 月至翌年 4 月)仅占不到 30%。三峡大坝建成以后洪季的流量得到了显著削弱,平均减小了 3 430 m<sup>3</sup>/s,而枯季的流量则增加了 231 m<sup>3</sup>/s(图 3)。上游流量显著的季节性变化与调节对长江口的潮汐不对称产生了直接影响。

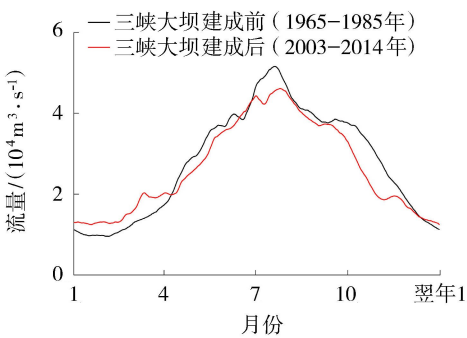


图 3 三峡大坝建成前后流量对比

Fig.3 Comparison of discharges before and after the operation of Three Gorges Dam

2.2 潮汐不对称空间分布特征

通过 NS\_TIDE 计算得到长江口 6 个水文站点的 7 个主要分潮的振幅和相位(表 1)。原始天文分潮 K<sub>1</sub>、O<sub>1</sub>、M<sub>2</sub> 和 S<sub>2</sub> 的最大振幅均出现在最靠近口门处的高桥站,并往上游不断衰减。全日潮 K<sub>1</sub> 和 O<sub>1</sub> 拥有大致相同的振幅量级,且衰减速率相似。M<sub>2</sub> 作为长江口最主要的分潮,其振幅约为 S<sub>2</sub> 的 3~4 倍,且 M<sub>2</sub> 的振幅衰减比其他分潮更为显著。潮波刚进入到河口内时,浅水分潮 M<sub>4</sub>、MS<sub>4</sub> 和 M<sub>6</sub> 在浅水非线性作用下逐步产生并增强。四分之一日潮 M<sub>4</sub> 和 MS<sub>4</sub> 的最大振幅出现在徐六泾站附近,其值分别为 0.15 m 和 0.14 m。M<sub>6</sub> 的最大振幅为 0.03 m,出现在徐六泾站和江阴站附近。随着潮波向上游进一步传播,摩阻作用逐渐占据主导地位并导致浅水分潮逐渐衰弱。同时,从相位的空间演变趋势也可以看出,频率较高的分潮相较于频率较低的分潮而言,在河口内的衰减更快<sup>[15]</sup>。

表 1 长江口主要分潮振幅和相位

| Table 1 Tidal amplitudes and phases of main constituents in the Yangtze River estuary |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| 分潮                                                                                    | 芜湖    |        | 南京    |        | 镇江    |        | 江阴    |        | 徐六泾   |        | 高桥    |        |
|                                                                                       | 振幅/m  | 相位/(°) | 振幅/m  | 相位/(°) | 振幅/m  | 相位/(°) | 振幅/m  | 相位/(°) | 振幅/m  | 相位/(°) | 振幅/m  | 相位/(°) |
| K <sub>1</sub>                                                                        | 0.043 | 75     | 0.037 | 40     | 0.111 | 47     | 0.041 | 103    | 0.020 | 360    | 0.018 | 41     |
| O <sub>1</sub>                                                                        | 0.079 | 29     | 0.063 | 330    | 0.243 | 324    | 0.084 | 26     | 0.042 | 200    | 0.038 | 245    |
| M <sub>2</sub>                                                                        | 0.119 | 354    | 0.092 | 293    | 0.433 | 261    | 0.130 | 320    | 0.084 | 73     | 0.075 | 122    |
| S <sub>2</sub>                                                                        | 0.173 | 295    | 0.121 | 237    | 0.769 | 160    | 0.236 | 220    | 0.137 | 234    | 0.127 | 281    |
| M <sub>4</sub>                                                                        | 0.207 | 253    | 0.142 | 199    | 0.924 | 86     | 0.250 | 145    | 0.149 | 91     | 0.136 | 133    |
| MS <sub>4</sub>                                                                       | 0.244 | 215    | 0.162 | 157    | 1.118 | 16     | 0.285 | 14     | 0.123 | 308    | 0.106 | 349    |
| M <sub>6</sub>                                                                        | 0.043 | 75     | 0.037 | 40     | 0.111 | 47     | 0.041 | 103    | 0.020 | 360    | 0.018 | 41     |

选取 4 个不同的分潮组合(M<sub>2</sub>/M<sub>4</sub>、K<sub>1</sub>/O<sub>1</sub>/M<sub>2</sub>、M<sub>2</sub>/S<sub>2</sub>/MS<sub>4</sub>、M<sub>2</sub>/M<sub>4</sub>/M<sub>6</sub>) 刻画总的潮汐不对称特征,结果如图 4 所示。6 个站点的偏度值均为正值,即潮汐不对称在长江口内表现为涨潮占优,总偏度值从下游往上游先增加后减小。M<sub>2</sub> 和 M<sub>4</sub> 分潮组合占主导作用,其次是 M<sub>2</sub>/S<sub>2</sub>/MS<sub>4</sub> 分潮组合,M<sub>2</sub>/M<sub>4</sub>/M<sub>6</sub> 分潮组合的贡献位列第 3。虽然原始天文分潮组合 K<sub>1</sub>/O<sub>1</sub>/M<sub>2</sub> 的贡献相对最小,但同样不能被忽略。在长江口内,由 K<sub>1</sub>/O<sub>1</sub>/M<sub>2</sub> 产

生的潮汐不对称一般表现为涨潮占优,表明长江口外的海洋潮汐具有涨潮占优的特征。不同于  $K_1/O_1/M_2$  产生的潮汐不对称往上传播的过程中沿程增加,其余 3 个分潮组合产生的偏度值呈现先增后减的趋势。在浅水非线性作用下,浅水分潮的产生使得长江口内的潮汐不对称现象更加显著。

2.3 潮汐不对称的洪枯季变化特征

由图 5 可知,长江口下游地区,原始天文分潮 ( $K_1$ 、 $O_1$ 、 $M_2$  和  $S_2$ ) 振幅呈现出“洪季大、枯季小”的特征,这是因为洪季时长江口外海域较强的层化作用,使得垂向涡黏滞系数较小,从而导致潮波从外海传播到长江口的过程耗散更小<sup>[16-17]</sup>,因而洪季振幅更大。随着潮波向上游传播,径流作用逐渐增强,洪季较大的径流量使得振幅衰减更为显著,最后在上游地区表现为“枯季大、洪季小”的特征。同时,洪季较大的流量在下游地区促进浅水分潮 ( $M_4$ 、 $MS_4$  和  $M_6$ ) 的生成,而在上游地区则会促使其衰减,因此浅水分潮的振幅在下游地区表现为洪季更大,而在上游地区则是枯季振幅更大。相位的变化则体现了潮汐的传播速度,洪季较大的径流量会延缓潮汐的传播,体现在较大的相位值,且越往上游径流作用越强,洪枯季的相位差异更加显著。

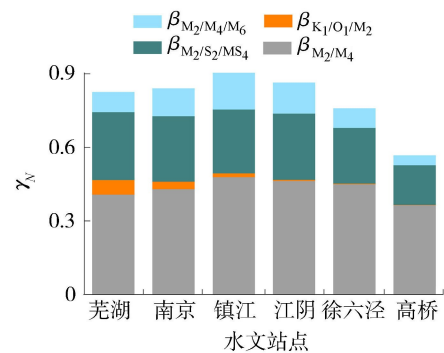


图 4 不同分潮组合作用下的总偏度值  
Fig. 4 Total tidal skewness contributed by four combinations

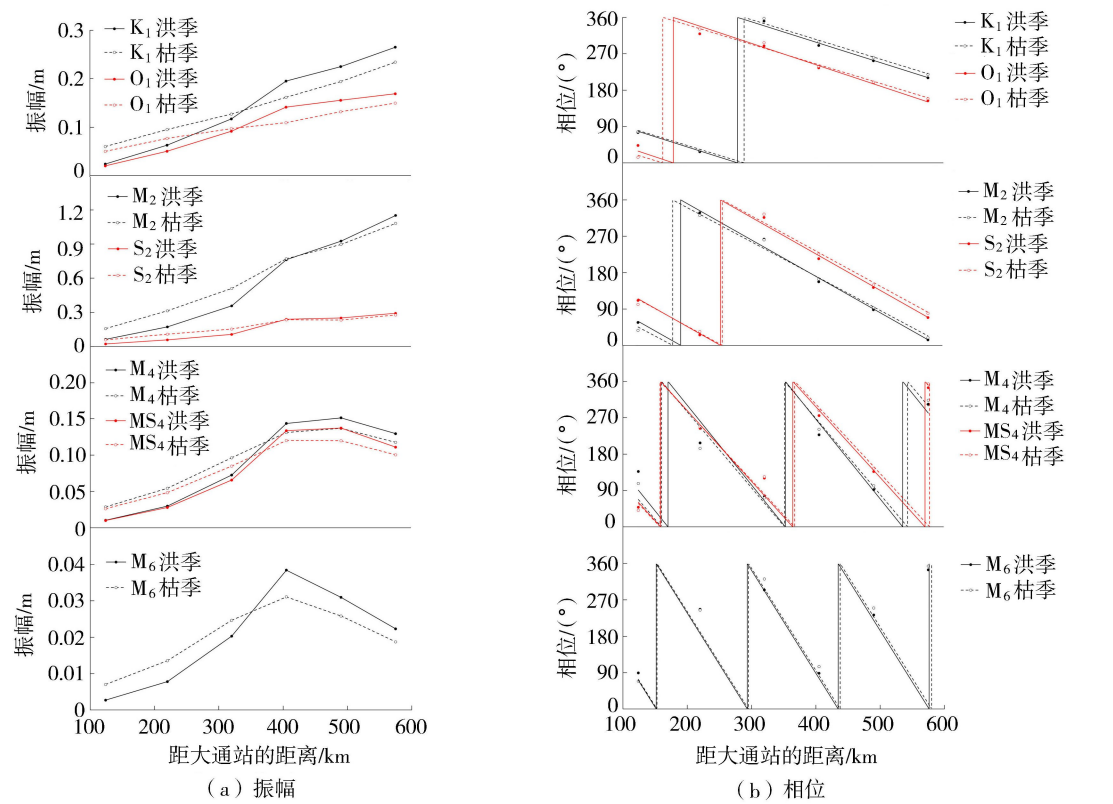


图 5 洪枯季主要分潮振幅和相位比较

Fig. 5 Comparative analysis of tidal amplitude and phase of main tidal constituents between flood and dry season

长江口径流的季节性变化也导致了潮汐不对称的季节性。由图 6 可知:上游地区,洪季的偏度小于枯季偏度,最大差值出现在最上游的芜湖站,这一规律在中游地区逐渐减弱,并且在下游地区出现相反的情况,即洪季偏度大于枯季偏度;在最下游的高桥站,由于受流量季节性变化的影响较小,因此洪枯季的偏度差异也较小。

2.4 敏感性分析

采用 NS\_TIDE 将输入的流量时间序列乘以一定的系数 (0.5、0.6、0.7、0.8、0.9),评估长江口内潮汐不对称对于不同量级径流的响应程度,结果如图 7~8 所示,图中  $Q$  为流量。



由图7可知, $K_1$ 和 $O_1$ 分潮在长江口大部分地区会随着流量的增大而衰减,具体表现为其振幅的减小和相位的延迟。而在江阴站及其下游的站点处, $K_1$ 分潮的振幅会随着流量的增加而增加,其原因在于流量的增加导致水深增加,从而使振幅增加。这些振幅变化的空间差异性可以将长江口划分为潮控区域和径控区域,这种空间差异性是由地形或是河道底部坡度的突变引起的<sup>[15,18]</sup>。然而, $O_1$ 分潮并没有呈现出类似的空间差异性,这是由于在较强的底部摩擦作用下, $M_2$ 对于 $K_1$ 和 $O_1$ 的影响不同而导致<sup>[18]</sup>。在河口的径控区域内,径流作用显著, $K_1$ 和 $O_1$ 分潮对于径流波动的敏感性较大;在潮控区域内, $K_1$ 分潮和 $O_1$ 分潮对于径流的波动敏感性显著减弱。半日分潮 $M_2$ 对于流量的响应呈现出与全日分潮相似的空间态势,即在长江口内随着流量的增加而衰减,且随着径流影响的减弱,分潮振幅对于流量的敏感性也会越往下游越弱。对于四分之一日潮 $M_4$ 分潮而言,其对于不同

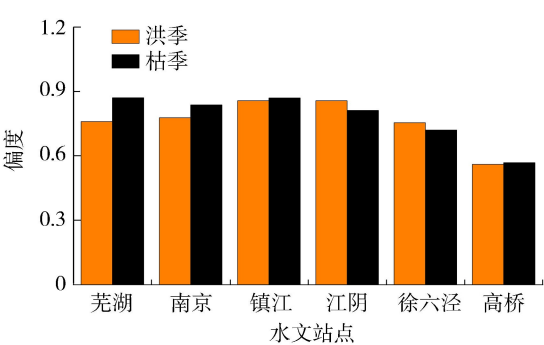


图6 洪枯季偏度比较

Fig.6 Comparative analysis of tidal skewness between flood and dry season

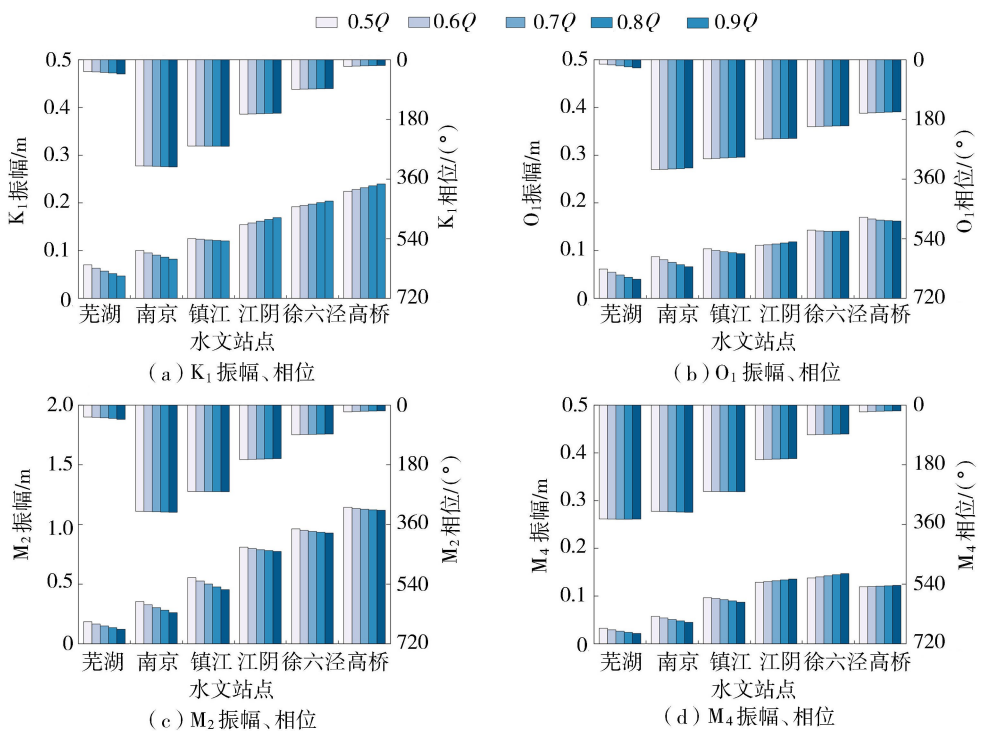


图7 主要分潮振幅相位对于不同量级流量的敏感性

Fig.7 Sensitivity of tidal amplitudes and phases of main constituents to different quantiles of river discharge

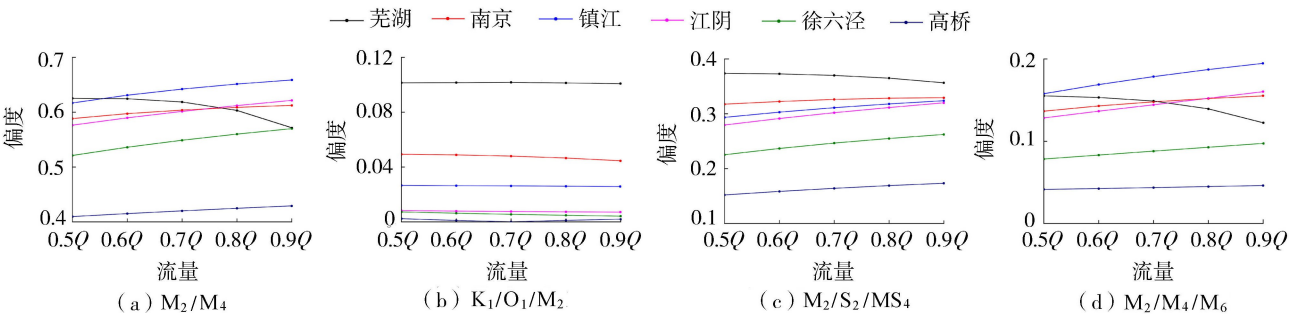


图8 不同量级流量下不同分潮组合偏度沿程分布

Fig.8 Tidal skewness of different tidal combinations along the channel against the different quantiles of discharge

量级流量的响应呈现出显著的空间变化趋势。在江阴站及其下游地区(潮控区域),流量增加会引起  $M_4$  振幅增加和相位减小。这表明径流通过摩擦作用,使能量从  $M_2$  向  $M_4$  转移,从而促进了  $M_4$  分潮的生成。相反,在镇江站及其上游地区(径控区域),流量增加反而会促使  $M_4$  分潮更快地衰减,表现为振幅的减小和相位的增加。

由图 8 可知, $K_1/O_1/M_2$  分潮相互作用导致的涨潮不对称对径流的敏感性较弱,并且随着流量的增加略微减小。由  $M_2/M_4$ 、 $M_2/S_2/MS_4$  和  $M_2/M_4/M_6$  分潮组合产生的偏度值在下游地区随着流量的增加而增加,上游地区随着流量的增加而减小。这是由于径流在河口的下游地区会促使潮汐能量不断从原始天文分潮向浅水分潮转变,从而使得潮汐不对称现象更为显著;而随着潮波往上传播,摩阻作用开始占据主导地位,相较于原始天文分潮,浅水分潮的衰减更为显著,因而导致上游地区随着径流的增加,潮型会变得更加对称。

2.5 三峡调节流量对于潮汐不对称的影响

如 2.1 节所述,三峡大坝对流量的调节主要体现在洪季流量的变化,因此为了分析三峡大坝流量调节对长江口潮汐动力学的影响,计算了三峡建成前后的振幅差  $\Delta_{\text{振幅}}$ 、相位差  $\Delta_{\text{相位}}$ 。三峡在洪季时的蓄水导致洪季整体流量减少,使得原始天文分潮振幅在长江口大部分站点都有所增加;而浅水分潮在上游地区增加、下游地区则会出现略微减小(图 9)。相对于其他站点,口门附近的高桥站的振幅变化较小。相位的变化主要反映潮波在河口中的传播速度,三峡大坝建成后,大多数分潮的相位在洪季都有所减小,尤其在上游芜湖、南京等站点。这表明三峡在洪季时的蓄水使得流量有所减小,从而导致潮波能够进一步向上游地区传播。流量的变化也使得长江口内的潮汐不对称特征发生了改变,偏度差  $\Delta_{\text{偏度}}$  结果显示:在上游地区,流量的减小使得潮型变得更加不对称,中游地区这种趋势逐渐减弱,下游地区出现相反的态势。而对于靠近口门的站点,受流量的影响较弱,其变化规律不明显。

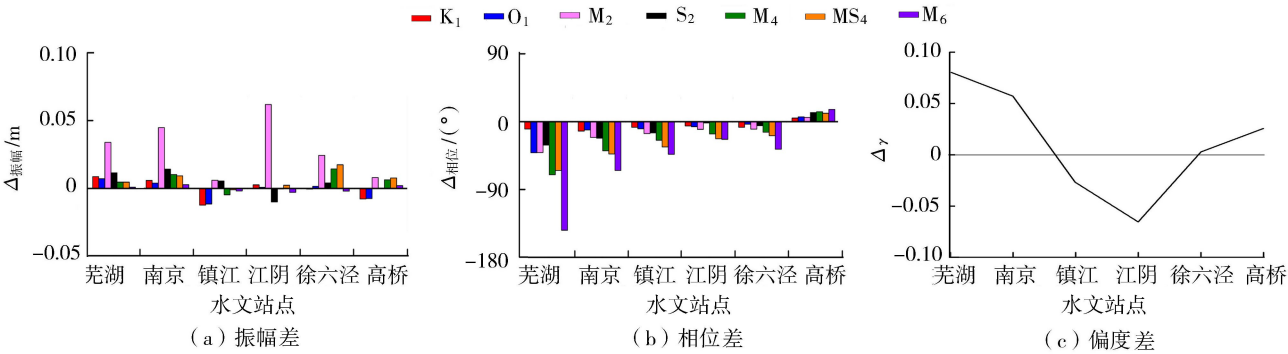


图 9 三峡建成前后洪季振幅差、相位差及偏度差

Fig. 9 Differences in tidal amplitudes, phases and skewness in flood season before and after TGD's operation

3 结 论

- a. 长江口分潮振幅和相位呈现显著的时空分布特征。受径流等因素影响,原始天文分潮向上游逐渐衰减,浅水分潮在入口处逐渐增强,继而在摩阻作用下随之衰减。长江口潮汐不对称性受到多组不同分潮组合影响。潮汐不对称性整体呈现涨潮主导型不对称,浅水非线性作用产生的潮汐不对称增强了原始天文分潮本身具有的潮汐不对称性质。 $M_2$  与  $M_4$  的相互作用对总的潮汐不对称的贡献最大,其次为  $M_2/S_2/MS_4$  和  $M_2/M_4/M_6$ 、 $K_1/O_1/M_2$  分潮组合。
- b. 长江口径流的季节性变化使得潮汐调和振幅相位和潮汐不对称都表现出显著的季节性差异。洪季较大的流量使上游地区的原始天文分潮和浅水分潮振幅均呈现“洪季小、枯季大”的特征,且枯季的潮汐不对称现象相比洪季更显著;下游地区则表现出相反的态势。
- c. 根据径流对长江口内分潮振幅相位与潮汐不对称的影响,可以将河口划分为径控区域与潮控区域。在径控区域内,径流增加会导致原始天文潮与浅水分潮发生衰减,潮型变得更加对称,从而减弱潮汐不对称性;在潮控区域内,径流量增加对分潮的作用较小,可能会促进浅水分潮产生,从而使潮波发生变形。
- d. 三峡大坝洪季蓄水使大通站的流量在洪季时显著减小,导致原始天文分潮和浅水分潮在上游地区都有所增加,使潮汐不对称现象更加显著,随着径流作用往下游方向的减弱,这种趋势在长江口中部地区有所

减弱,并且在镇江站及其下游地区出现相反的趋势,流量的减少削弱了浅水非线性作用,使浅水分潮有所减小,从而导致下游站点潮汐的不对称性减弱。对于靠近口门处的站点,三峡流量调节的影响可以忽略不计。

参考文献:

[ 1 ] 胡四一. 人类活动对长江河口的影响与对策[J]. 人民长江,2009,40(9):1-3. ( HU Siyi. Impact of human activities on Yangtze Estuary and countermeasures[J]. Yangtze River,2009,40(9):1-3. ( in Chinese) )

[ 2 ] FRIEDRICHS C T, AUBREY D G. Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science,1988,27(5):521-545.

[ 3 ] 李庆臻,张学庆,赵杨,等. 辽河口岸线变化对潮不对称影响的研究[J]. 应用海洋学学报,2018,37(3):339-347. ( LI Qingzhen, ZHANG Xueqing, ZHAO Yang, et al. Modeling tidal asymmetry response to shoreline change in Liaohe Estuary[J]. Journal of Applied of Oceanography,2018,37(3):339-347. ( in Chinese) )

[ 4 ] DRONKERS J. Tidal asymmetry and estuarine morphology[J]. Netherlands Journal of Sea Research, 1986, 20(2/3): 117-131.

[ 5 ] 林国尧,龚文平. 海南岛莺歌海近岸的潮汐不对称与潮致余流研究[J]. 海洋学报,2017,39(7):36-42. ( LIN Guoyao, GONG Wenping. Tidal asymmetry and tide-induced residual currents in the Yinggehai Coast, Hainan Island[J]. Acta Oceanologica Sinica,2017,39(7):36-42. ( in Chinese) )

[ 6 ] 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(C10):3315.

[ 7 ] HOITINK A J F, JAY D A. Tidal river dynamics: implications for deltas[J]. Reviews of Geophysics, 2016, 54(1): 240-272.

[ 8 ] 曹勇,陈吉余,张二凤,等. 三峡水库初期蓄水对长江河口淡水资源的影响[J]. 水科学进展,2006,17(4):554-558. ( CAO Yong, CHEN Jiyu, ZHANG Erfeng, et al. Influence of Three Gorge reservoir filled with water on freshwater resource in the Yangtze River estuary[J]. Advances in Water Science,2006,17(4):554-558. ( in Chinese) )

[ 9 ] YAN Tao, YANG Yunping, LI Yibing, et al. Possibilities and challenges of expanding dimensions of waterway downstream of Three Gorges Dam[J]. Water Science and Engineering, 2019, 12(2): 136-144.

[ 10 ] 恽才兴. 长江河口近期演变基本规律[M]. 北京:海洋出版社, 2004.

[ 11 ] 徐汉兴,樊连法,顾明杰. 对长江潮区界与潮流界的研究[J]. 水运工程,2012(6):15-20. ( XU Hanxing, FAN Lianfa, GU Mingjie. On tidal mark and tidal current mark in the Yangtze River[J]. Port and Waterway Engineering,2012(6):15-20. ( in Chinese) )

[ 12 ] 杨正东,朱建荣,王彪,等. 长江河口潮位站潮汐特征分析[J]. 华东师范大学学报(自然科学版),2012(3):111-119. ( YANG Zhengdong, ZHU Jianrong, WANG Biao, et al. Analysis of tidal characteristics of the tide gauges in the Changjiang Estuary[J]. Journal of East China Normal University(Natural Sciences),2012(3):111-119. ( in Chinese) )

[ 13 ] MATTE P, JAY D A, ZARON E D. Adaptation of classical tidal harmonic analysis to nonstationary tides, with application to river tides[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2013, 30(3): 569-589.

[ 14 ] SONG Dehai, WANG Xiaohua, KISS A E, et al. The contribution to tidal asymmetry by different combinations of tidal constituents[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2011, 116(C12):C12007.

[ 15 ] GODIN G. The propagation of tides up rivers with special considerations on the upper Saint Lawrence River[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1999, 48(3): 307-324.

[ 16 ] KANG S K, FOREMAN M G G, LIE H J, et al. Two-layer tidal modeling of the Yellow and East China Seas with application to seasonal variability of the M2 tide[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2002, 107(C3): 6-18.

[ 17 ] MULLER M. The influence of changing stratification conditions on barotropic tidal transport and its implications for seasonal and secular changes of tides[J]. Continental Shelf Research, 2012, 47: 107-118.

[ 18 ] SASSI M G, HOITINK A J F, BRYE B, et al. Downstream hydraulic geometry of a tidally influenced river delta[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2012, 117(F4):F04022.

( 收稿日期:2019 - 05 - 25 编辑:刘晓艳)