

武家兴, 张卓, 陈鹏, 等. 考虑流量变化影响的西江感潮河道潮汐特征分析[J]. 海洋学报, 2023, 45(7): 8–24. doi:10.12284/hyxb2023101
Wu Jiaying, Zhang Zhuo, Chen Peng, et al. Analysis of the tidal characteristics along the tidal reach of Xijiang River considering river discharge variation[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(7): 8–24. doi:10.12284/hyxb2023101

考虑流量变化影响的西江感潮河道潮汐特征分析

武家兴^{1,2,3}, 张卓^{1,2,3*}, 陈鹏^{1,2,3}, 宋志尧^{1,2,3}, 温亚娟^{1,2,3}, 张璐^{1,2,3}, 王浩丞^{1,2,3}

(1. 南京师范大学 虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210023; 2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏 南京 210023; 3. 南京师范大学 地理科学学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 本文基于 2015–2017 年西江感潮河道的潮位数据, 应用非平稳潮调和和分析模型 NS-TIDE, 研究了不同周期分潮振幅和迟角的时空变化特征、潮汐动力构成变化和潮波变形特征, 并讨论了感潮河道中的潮位变形、极低潮位颠倒等现象的形成原因。结果表明, 不同于全日、半日分潮振幅的沿程衰减和迟角的沿程递增, 浅水分潮振幅先增后减, MS_f 分潮振幅呈递增趋势、迟角有显著的增减交替变化; 各个分潮的振幅洪季衰减速率大于枯季, 迟角在洪季变化较大, 表明径流顶托作用下的潮波向上游传播速度较慢。受径流、地形等因素的影响, 在洪季和上游河段, MS_f 分潮振幅更大, 潮汐动力由主分潮向次分潮转移, M_4 和 M_2 分潮振幅比的变化表明潮汐变形显著, MS_f 与 M_2 、 S_2 分潮的振幅比较大时有最低低水位的颠倒现象。

关键词: 潮汐特征; 调和与分析; 径流; 潮波变形; 最低低水位颠倒

中图分类号: P731.23 文献标志码: A 文章编号: 0253-4193(2023)07-0008-17

1 引言

感潮河段是河流与海洋的交汇区域, 径流、潮汐和地形是影响河道潮位变化的主要因素, 其水动力变化比一般河道更复杂多变。随着潮汐动力的增强^[1], 导致咸潮入侵范围不断增大、潮汐能量被不断消耗、潮波向更上游的地方传播等。研究感潮河道中的潮汐特征, 对于水动力的了解、防洪规划以及水资源的利用等皆具有重要的科学意义和应用价值。

近些年, 众多学者利用平稳潮调和和分析 (T-TIDE 模型)^[2-3]、非平稳潮调和和分析 (NS-TIDE 模型^[4]、S-TIDE 模型^[5]) 以及在二者的基础上改进的解析模型等方法, 对感潮河道的潮汐特征进行研究分析。Gallo 和 Vinzon^[6] 对亚马孙河口潮汐的研究表明浅水分潮 M_4 振幅在口门浅水处达到最大, 而 MS_f 低频潮则会引起大潮期间平均水位高于小潮期间。在长江口, 主要天文

潮和浅水分潮 M_4 、 MS_4 的最大振幅在河道中的位置并不相同^[7-8]; 全日、半日潮向陆呈衰减趋势, 低频、浅水分潮相反, 且低频分潮的最大振幅在上游的位置比浅水分潮更远^[9]; 河口浅水分潮振幅在洪季大于枯季, 且在河口下段最大, 低频分潮则在河口上游振幅最大^[10]。

在珠江三角洲网河区, 欧素英等^[11-13]、杨昊等^[14] 提出了径潮耦合的数据驱动模型 (River-Tidal Harmonic Analysis, RTHA), 该模型基于 Matte 等^[4] 提出的非线性调和与分析思路, 假设任意位置的分潮振幅及相位变化主要受上游流量和地形变化的影响, 研究发现全日、半日、三分之一日分潮的振幅洪季小、枯季大, 与口门段四分之一分潮相反, 且洪季全日、半日分潮传播速度变小 (位相增大); Cai 等^[15] 使用解析模型在磨刀门河口发现径流减少和河床下切后, 潮汐振幅沿河口轴线往上游显著增加, 传播速度增快; 潮汐分潮的振幅和相位, 有显著的季节性变化^[16]; M_2 和 M_4 分

收稿日期: 2022-11-08; 修订日期: 2023-02-09。

基金项目: 海岸灾害及防护教育部重点实验室(河海大学)开放基金(202218); 国家自然科学基金(42171465)。

作者简介: 武家兴(1996—), 男, 安徽省肥西县人, 主要从事河口海岸动力学研究。E-mail: Wujx06@126.com

* 通信作者: 张卓(1981—), 男, 浙江省海宁市人, 副教授, 主要从事河口海岸动力学研究。E-mail: Mercury1214@126.com

潮的相互作用使涨潮优势偏度值的不对称性增强^[17]。在黄茅海河口,主要分潮的振幅同样有显著的季节性变化,全日潮的振幅洪季比枯季大,半日潮相反,枯季时 M_2 分潮的振幅最大,而洪季时 K_1 分潮最大^[18]。在虎门潮汐通道,全日潮振幅梯度和传播速度的年均变化率均比半日潮大^[19]。

关于潮汐动力及潮汐变形的研究,Wang等^[20]分析了潮汐不对称的产生原因与机理,并进一步解释了径潮非线性作用以及河床摩擦对潮波变形的显著影响^[15],Lu等^[21]在长江口发现河口浅水分潮 M_4 的变化表明了潮汐变形的显著性。另外,Luo等^[22]在珠江东江感潮河道中发现了最低低水位颠倒(the reversal of the lowest low waters, RLLW)这一特殊现象,其产生的原因与径潮作用和地形有关。

从上述总结看到,以往的研究较多地分析了全日潮、半日潮以及浅水分潮在河口及潮汐河道内的传播特征,也有研究分析了长周期波在河口内的传播。但是,缺乏径流从枯水期到洪水期再到枯水期全年周期变化影响下的潮汐传播特征(包括分潮振幅、迟角等参数)的动态变化及在不同河段潮汐动力构成的定量分析,尤其是在珠江的西江感潮河段的地理环境下,笔者尚未见到在该区域类似的研究。另外,河口内潮位的RLLW现象是否跟该区域内潮汐传播特征及动力构成相关联,也是值得研究的问题。

2 研究区域概况

西江感潮河道,通常指梧州至磨刀门入海口这一河段,河长约为208 km,平均坡降约为0.086‰。梧州站作为上游流量控制站,其流量在2015–2017年间最大,径流量达38 100 m³/s,最小径流量为1 760 m³/s,年内洪枯季节变化显著。入海口磨刀门多年平均径流量为923×10⁸ m³,位居珠江八大口门之首,磨刀门潮汐属于不正规半日潮,是典型的河优型河口^[1]。本文的研究区域(图1)主要在马口下游河段,因此选取马口、高明、甘竹、天河、百顷头、竹银、灯笼山和三灶8个水文站为研究的主要站点,分析潮波传播特征。水位数据为验证后符合要求的数模结果,径流数据为实测数据(来源于中国水利部水文局编著的《珠江流域水文年鉴》)。

3 研究方法

3.1 一二维耦合水动力模型

为了获得西江感潮河道(马口–磨刀门)内高时空分辨率且长周期的潮位数据,通过已建立的两西江感潮河道一二维耦合水动力模型^[23]复演了潮波传播过程。如图2所示,该模型上游边界为径流量设置在西江梧州,下边界取在磨刀门口门外25 km,平均水深约为28 m的南海海域,外海潮位数据由全球潮汐预

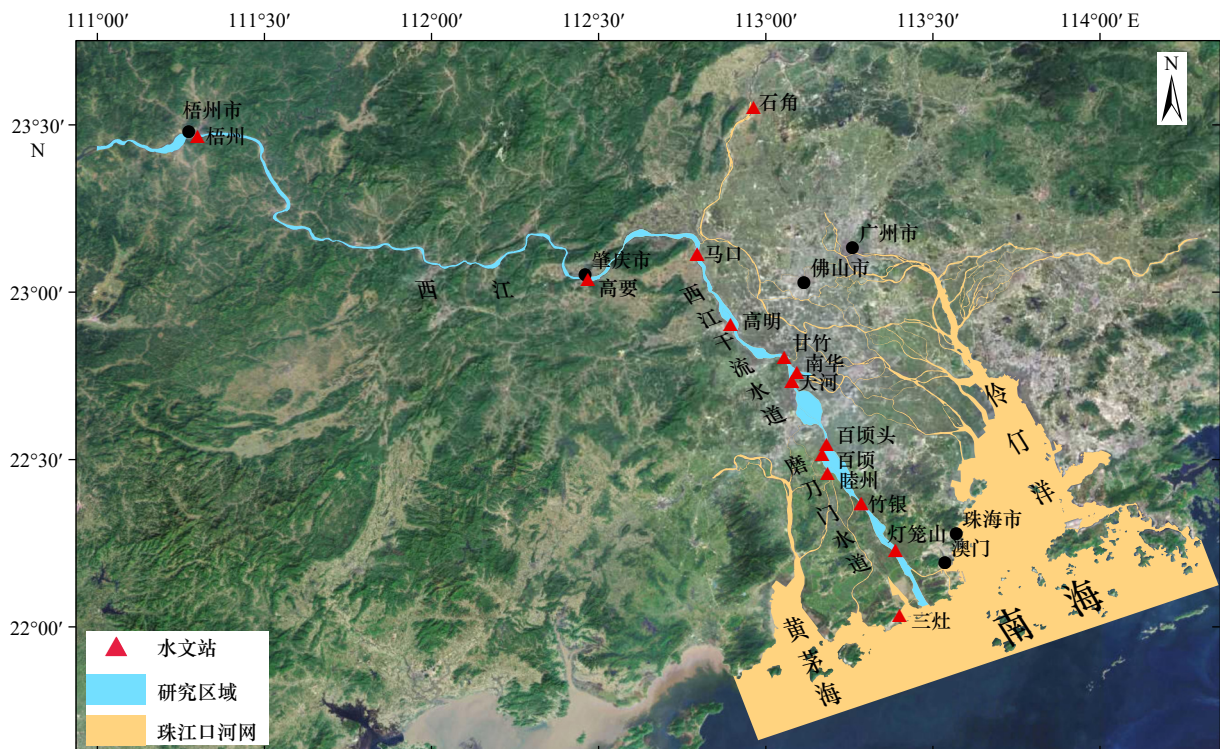


图1 研究区域及测站位置

Fig. 1 Study area and station locations

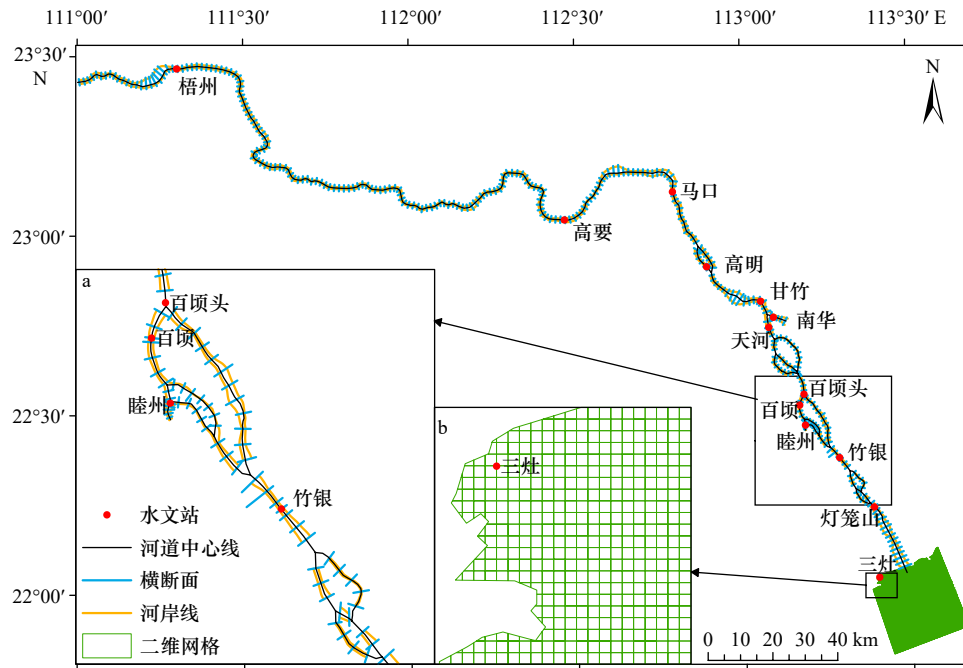


图2 模型计算断面及网格

Fig. 2 Model calculation section and grid

a. 一维区域局部图; b. 二维区域局部图

a. Partial view of 1D area; b. partial view of 2D area

报模型^[24]提供,包括 Q_1 、 O_1 、 P_1 、 K_1 、 N_2 、 M_2 、 S_2 、 K_2 八大分潮和部分浅水分潮、低频分潮。一维模型共有 328 个横断面,二维模型共有 14 626 个不规则多边形网格,局部区域根据实际地形变化,进行加密处理。此模型已利用实测水文数据进行率定和验证,验证结果良好(图 3),模拟了 2015–2017 年的潮位变化。由于篇幅有限,具体建模过程及相关工作见参考文献 [23], 本文将不再赘述。

3.2 非稳态调和分析及验证

调和分析方法经过潮汐动力学理论的补充和完善,已被广泛应用于世界上许多河口,如哥伦比亚河^[25–26]、圣劳伦斯河^[4]、长江口^[9, 27–28]、珠江口^[2, 16]等。无论是经典调和还是连续小波变换均不能完全分辨非平稳潮,NS-TIDE 模型^[4]在经典调和的基础上加以改进,该模型将相关变量(河流径流和海洋潮汐)直接引入至调和基础函数中,分离不同周期的分潮,得出随时间变化的分潮振幅和迟角。具体公式如下^[4, 25]:

$$Z(t) = Z_0(t) + \sum_{j=1}^J [A_j(t) \cos(\sigma_j t) + B_j(t) \sin(\sigma_j t)], \quad (1)$$

$$Z_0(t) = d_{0,j} + d_{1,j} Q^{p_1}(t - t_Q) + d_{2,j} \frac{R^{q_1}(t - t_R)}{Q^{r_1}(t - t_Q)}, \quad (2)$$

$$A_j(t) = A_{0,j} + A_{1,j} Q^{p_1}(t - t_Q) + A_{2,j} \frac{R^{q_2}(t - t_R)}{Q^{r_2}(t - t_Q)}, \quad (3)$$

$$B_j(t) = B_{0,j} + B_{1,j} Q^{p_1}(t - t_Q) + B_{2,j} \frac{R^{q_2}(t - t_R)}{Q^{r_2}(t - t_Q)}, \quad (4)$$

$$H_j(t) = \sqrt{A_j^2(t) + B_j^2(t)}, \quad (5)$$

$$\varphi_j(t) = \arctan \left[\frac{A_j(t)}{B_j(t)} \right], \quad (6)$$

式中, $Z(t)$ 为潮位; $Q(t)$ 为河流流量; $R(t)$ 为外海潮汐潮差; t 为时间; σ 为分潮圆频率; $A_j(t)$ 和 $B_j(t)$ 是对分潮进行三角函数展开时的中间过程变量; $d_{i,j}$ 、 $A_{i,j}$ 和 $B_{i,j}$ ($i = 0, 1, 2$) 为模型中的未知参数,其中 i 是模型系数 ($i = 0$ 表示亚潮模型系数, $i = 1, 2$ 表示径潮模型系数)^[29]; j 为分潮的总个数, $j = 1, 2, 3, \dots$ 表示分潮序号; $Z_0(t)$ 为模型中的平均水位,用来表征亚潮水位波动; (p_1, q_1, r_1) 和 (p_2, q_2, r_2) 分别是 NS-TIDE 模型中亚潮水位模型和径潮水位模型中的待定常数; t_Q 和 t_R 分别表示上游径流和下游潮波传播到测站的超前滞后时间,通过计算 $Q(t)$ 和 $R(t)$ 分别与实测潮位间的最大互相关系数确定; $H_j(t)$ 和 $\varphi_j(t)$ 分别为随时间变化的分潮振幅和迟角。

模型边界条件如图 4 所示,上游径流 ($Q(t)$) 为梧州站低通滤波后的径流值;下游潮差 ($R(t)$) 为门口外南海海洋潮差,为一个太阴日内两个潮差值中的较大值。

模型的参数设置,主要考虑“rayleigh”和“criterion”参数的改变对调和的影响,具体分为两种情况:

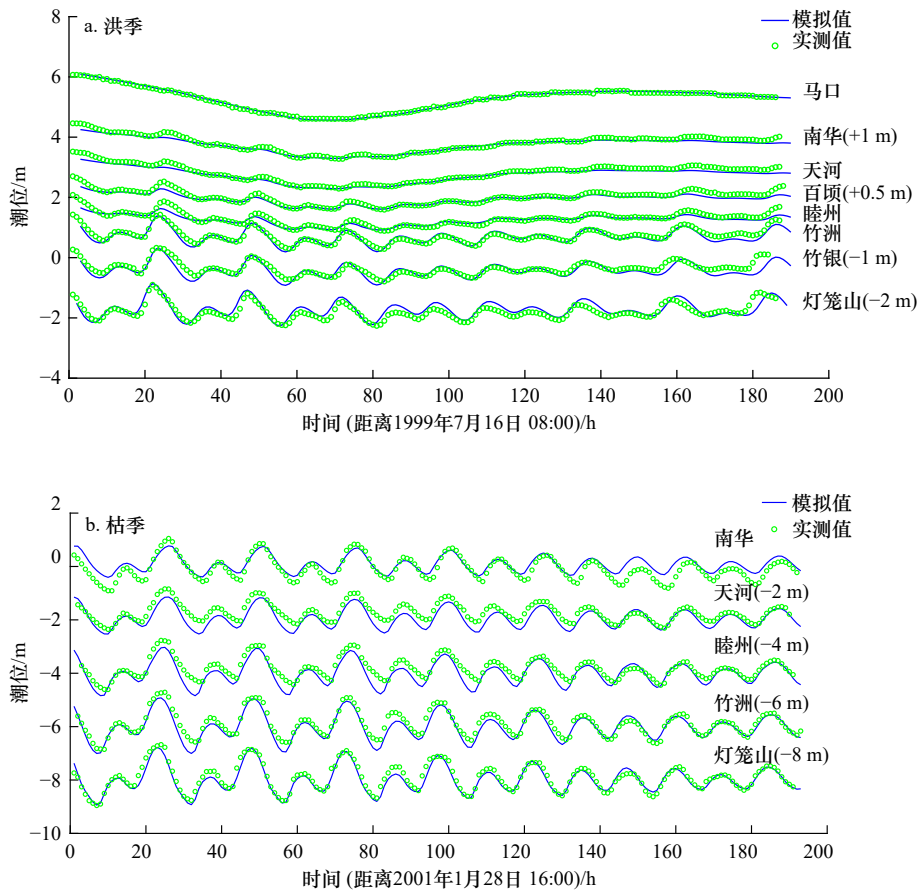


图3 西江感潮河道潮位验证

Fig. 3 Verification of tidal level along the tidal reach of Xijiang River

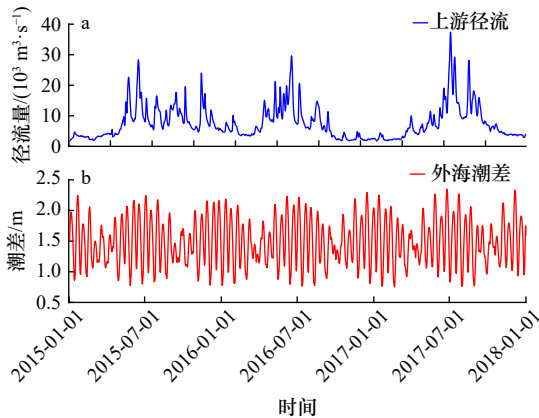


图4 调和分析边界条件

Fig. 4 Harmonic analysis boundary conditions

(1)指定分潮:根据前人的研究经验,通过“rayleigh”参数指定13个分潮(Q_1 、 O_1 、 P_1 、 K_1 、 N_2 、 M_2 、 S_2 、 K_2 、 MN_4 、 M_4 、 MS_4 、 M_6 和 MS_f 分潮,与模型下游边界外海潮位的分潮种类一致)进行调和分析;(2)不指定分潮:通过调整“criterion”参数值自动分离分潮。实验表明,指定分潮时,“criterion”参数的改变并不影响调和分析结果;不指定分潮时,“criterion”参数的增大会使各个测站的均方根误差(Root Mean Square Error,

RMSE)有所减小,结果中的分潮个数增加,但“criterion”参数在大于0.15时各站的RMSE已几乎与0.15相同;且当潮位时间序列足够长时,依然能够分辨 MS_f 分潮。3组实验结果如表1所示。

为证明 P_1 、 K_2 和 MS_f 分潮的分析结果具有物理意义,沿程选取马口、天河、灯笼山和三灶共4个测站,对调和分析结果进行对比。如图5所示,各站 P_1 分潮振幅远小于 K_1 分潮, K_2 分潮振幅远小于 S_2 分潮,上游因为潮波的衰减消耗,差距没有下游大。对比各站的时变迟角均值(表2),结果表明 P_1 与 K_1 分潮接近, K_2 与 S_2 分潮接近。输出各站的时变振幅、迟角及其误差的平均值如表3所示,无论是振幅还是迟角的误差均小于其本身。对比经典调和分析的常数振幅和迟角(表3),时变振幅和迟角的均值皆与其接近。可见指定 P_1 、 K_2 和 MS_f 分潮能满足要求。

本文通过2015–2017共3年的模拟潮位数据对NS-TIDE模型进行率定及验证,验证结果(表1)表明了指定分潮、“criterion”参数取值0.1的方法误差最小,率定结果更好。模型的潮位预测效果在下游的预测精度明显高于上游,但在中上游的预测也基本达到

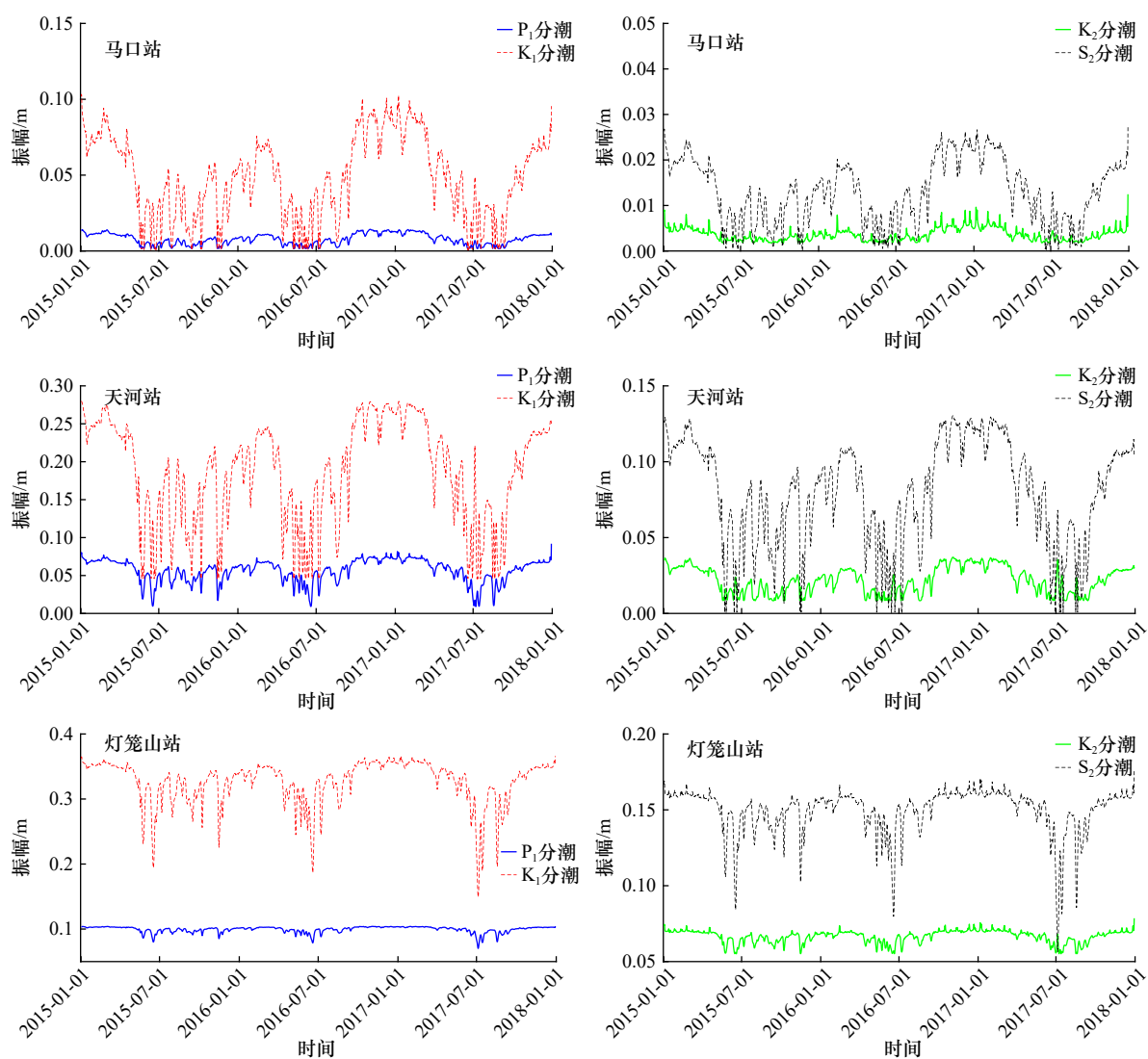
表 1 2015–2017 年西江感潮河道沿程各站潮位均方根误差 (RMSE)

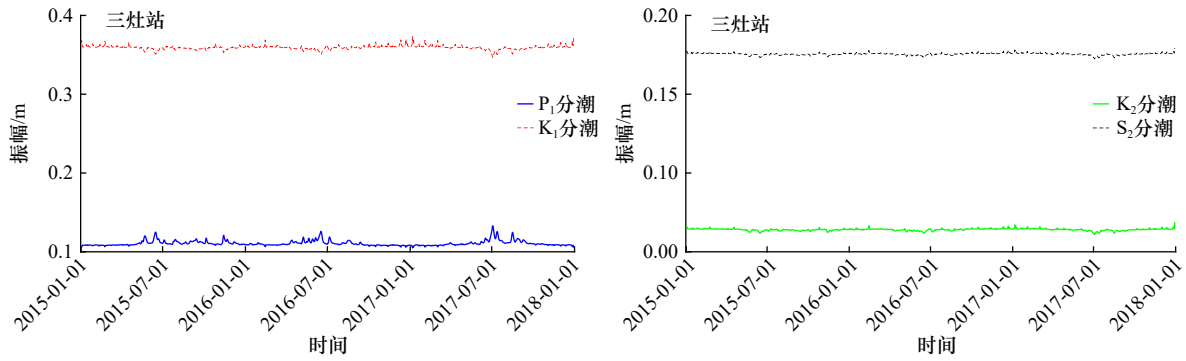
Table 1 Root mean square error (RMSE) of tide level at each station along the tide reach of Xijiang River from 2015 to 2017

测站	实验一: 指定分潮+0.1	实验二: 不指定分潮+0.1	实验三: 不指定分潮+0.15
马口	0.251 3	0.253 9	0.253 8
高明	0.184 9	0.188 7	0.188 0
甘竹	0.150 9	0.155 7	0.153 5
天河	0.140 6	0.148 8	0.146 2
百顷头	0.110 8	0.131 3	0.131 2
竹银	0.059 6	0.111 6	0.109 0
灯笼山	0.053 1	0.106 1	0.103 8
三灶	0.017 6	0.110 3	0.110 1

要求,说明模型适用于研究区域的水动力条件。沿着河道误差的增强,是由于 NS-TIDE 对于径流引起的水位变化的拟合仍然有所不足,径流在上游变化剧烈,导致实验结果中有更大的偏离值,因此, RMSE 越

往上游越大, Chen 等^[30]在长江口的研究中也发现同样现象,径流增大使 NS-TIDE 模型的预测误差较大。不同于传统调和分析, NS-TIDE 模型得到的调和常数($H_j(t)$ 和 $\varphi_j(t)$)随流量、外海潮汐振幅的变化而变



图5 2015–2017年西江感潮河道沿程各站的 P_1 与 K_1 以及 K_2 与 S_2 分潮振幅对比Fig. 5 Comparison of P_1 vs. K_1 and K_2 vs. S_2 tidal constituents amplitudes at each station along the tide reach of Xijiang River from 2015 to 2017表2 2015–2017年西江感潮河道沿程各站的 P_1 与 K_1 和 K_2 与 S_2 分潮时变迟角均值对比Table 2 Comparison of mean values of P_1 vs. K_1 and K_2 vs. S_2 tidal constituents time-varying tide delay angles at each station along the tide reach of Xijiang River from 2015 to 2017

测站	P_1	K_1	K_2	S_2
马口	79.793 6°	87.087 5°	134.144 1°	137.938 1°
天河	77.017 3°	65.229 6°	43.303 4°	44.614 3°
灯笼山	322.557 5°	323.680 1°	348.114 2°	332.217 0°
三灶	300.176 8°	303.870 0°	308.689 3°	299.212 0°

化,了解分潮振幅和迟角的时空变化过程,对于理解感潮河道的潮汐特征和水动力变化具有重要意义。

4 结果分析

本文根据前人的研究经验^[31–33],选取西江感潮河道具有代表性(振幅较大)的分潮进行潮汐特征的研究分析,包括全日分潮 O_1 和 K_1 、半日分潮 M_2 和 S_2 、四分之一日(浅水)分潮 M_4 和 MS_4 以及半月(低频)分潮 MS_f 。各分潮周期及频率如表4所示。

河口区域实测潮位长时间序列(超过1年以上)数据获取难度大,一般水文年鉴中提供的均是高低潮位数据插值而成,在这一步中由于插值方法的不同已经存在误差,不利于后续的调和与分析。数模的结果时间序列可以很长,逐小时数据完整,且得到了较好的验证,其结果满足实验要求。将数模结果中的潮位数据,利用调和与分析的方法计算得到各主要分潮的振幅值和迟角值。

为了分析分潮调和常数的时空变化,绘制成如图6和图8所示的等色线图,其中横坐标代表河道空间的变化距离,最左端是河口;纵坐标代表时间变化,最下端为2015年1月1日,图中颜色分别代表分潮振幅

值和迟角值的大小。

4.1 不同周期分潮振幅时空变化特征

选取了2015–2017年各主要分潮的振幅值(图6),以分析分潮振幅的时空变化。

各分潮的空间变化,分潮由下游向上游传播的过程中, O_1 、 K_1 、 S_2 、 M_2 等主分潮的振幅总体上均呈现逐渐减小的趋势,与潮汐动力的衰减一致,但在竹银至百顷头河段因河道窄深化使有效摩擦减少,导致 M_2 分潮振幅略有增大; M_4 、 MS_4 等浅水分潮由于潮波在河口的汇聚作用,以及天文分潮的相互作用,振幅呈现先增大(三灶–百顷头)后减小(百顷头–马口)的趋势。低频分潮 MS_f 与其他分潮不同,在洪季时有往上游递增的趋势,导致 MS_f 分潮振幅在河道上游和洪季增大的原因是:上游径流沿着河道流动产生了摩擦效应,抑制了半日分潮等主分潮的传播,促使低频分潮 MS_f 不断地产生和增强^[26, 34–36]。虽然Godin^[37]认为衰减率随分潮频率的增大而增大的理论,未考虑感潮河段中的非线性作用,但仍强调较高频率的分潮不能传播很长距离。另外,半月分潮的波长甚至可能比磨刀门感潮河道还长。 MS_f 分潮是 M_2 和 S_2 分潮非线性作用产生的,其振幅是关于流量、 M_2 和 S_2 分潮的函数;因此,河流流量在 MS_f 分潮的产生和传播过程中起主导作用。Gallo和Vinzon^[6]在亚马孙河研究中发现,半月变化十分显著,且在离河口约400 km处达到峰值。Guo等^[9]在长江口也观察到类似的现象。

各分潮的时间变化受径流调节影响,全日分潮(O_1 、 K_1)和半日分潮(M_2 、 S_2)在同一位置的振幅洪季比枯季小,振幅往上游的沿程衰减速度表现为洪季大于枯季,径流较大时潮汐摩擦力增强,从而减小了潮汐通能和潮差^[15, 37–38],对潮汐振幅有强烈的衰减作用^[9]。浅水分潮(M_4 、 MS_4)振幅虽然在数量上远小于主要分潮,但在时间变化上更为复杂,在河段中游(竹银–百顷头–天河段),洪季振幅大于枯季振幅,其他区域则

表 3 2015–2017 年西江感潮河道沿程各站 P_1 、 K_2 和 MS_f 分潮的振幅、迟角及其误差Table 3 Amplitude, phase and their error of P_1 , K_2 and MS_f tidal constituents at each station along the tide reach of the Xijiang River from 2015 to 2017

测站	分潮	非稳态调和分析(取平均值)				经典调和分析	
		振幅/m	振幅误差/m	迟角/(°)	迟角误差/(°)	振幅/m	迟角/(°)
马口	P_1	0.007 7	0.001 2	79.793 6	14.530 4		
	K_2	0.003 6	0.000 5	134.144 1	10.005 8		
	MS_f	0.040 4	0.016 3	236.484 7	55.229 5		
天河	P_1	0.056 3	0.003 4	77.017 3	5.247 2		
	K_2	0.021 8	0.001 6	43.303 4	4.641 9		
	MS_f	0.036 5	0.005 6	39.918 2	9.016 2		
灯笼山	P_1	0.099 4	0.002 2	322.557 5	1.269 9	0.101 2	322.117 7
	K_2	0.066 5	0.002 0	348.114 2	1.700 1	0.068 7	348.521 0
	MS_f	0.023 0	0.001 8	42.845 3	4.138 5	0.024 3	45.736 4
三灶	P_1	0.110 8	$6.044 7 \times 10^{-4}$	300.176 8	0.345 3	0.110 5	300.384 9
	K_2	0.064 0	$5.196 5 \times 10^{-4}$	308.689 3	0.469 0	0.064 0	308.940 5
	MS_f	$8.097 0 \times 10^{-4}$	$4.073 6 \times 10^{-4}$	296.694 6	61.735 1	$2.264 8 \times 10^{-4}$	294.742 6

表 4 潮汐分潮周期及频率

Table 4 Tidal constituent period and frequency

种类	名称	周期	频率/cph
全日分潮	Q_1	26.868 4 h	0.037 218
	O_1	25.819 3 h	0.038 731
	P_1	24.065 9 h	0.041 552
	K_1	23.934 5 h	0.041 781
半日分潮	N_2	12.658 3 h	0.078 999
	M_2	12.420 6 h	0.080 511
	S_2	12.000 0 h	0.083 333
	K_2	11.967 2 h	0.083 561
四分之一日分潮	MN_4	6.269 1 h	0.159 511
	M_4	6.210 3 h	0.161 023
	MS_4	6.103 3 h	0.163 844
六分之一日分潮	M_6	4.140 2 h	0.241 534
半月分潮	MS_f	14.765 3 d	0.002 822

是洪季振幅小于枯季,说明洪季的大流量对潮波的衰减和耗散作用,部分转化为了浅水分潮。低频(MS_f)分潮振幅变化在枯季相对较小,洪季相对较大,尤其在河道上游段(高明到马口),洪枯交替非常明显。由此可见,河流径流会影响潮波的传播,将主分潮(全日、半

日分潮)中的能量转移至次分潮(浅水、低频分潮)。

为更清楚地比较不同分潮之间的变化差异,图 7 显示西江感潮河道洪季和枯季典型时段分潮振幅的沿程变化趋势,数据为洪、枯季时变振幅的平均值。由图可知,从河口开始,主分潮(O_1 、 K_1 、 M_2 、 S_2)在潮波中占据主要作用,但衰减速度各有不同,从大到小依次为 M_2 、 K_1 、 O_1 、 S_2 ,其中 S_2 分潮约为 M_2 分潮的一半。浅水分潮(M_4 和 MS_4)量级较小,约为主分潮的 1/10;从河口向上游呈先增加后减小的趋势,枯季在灯笼山附近就达到峰值,而在洪季由于主分潮快速衰减并向次分潮转移,导致峰值反而增加且往上游推进到百顷头河段附近。低频分潮 MS_f 则表现出跟主分潮和浅水分潮完全不同的特征,沿着河道上游呈增加趋势;尽管在河口至甘竹河段振幅量级较小,但在洪季的上游河段超过了已经衰减的主分潮^[26],起到了主导作用。根据 Gallo 和 Vinzon^[6] 的研究,潮汐的 RLLW 现象就跟 MS_f 分潮占据主要作用有关。

4.2 不同周期分潮迟角时空变化特征

选取了 2015–2017 年各主要分潮的迟角值(图 8),以分析分潮迟角的时空变化;迟角值的变化代表了同一分潮波在河道中的传播速度,变化值的绝对值越小就代表该分潮波传递的速度越快,反之就代表分潮波传递的速度越慢。

各分潮的迟角值从时间角度出发,分析对比(径

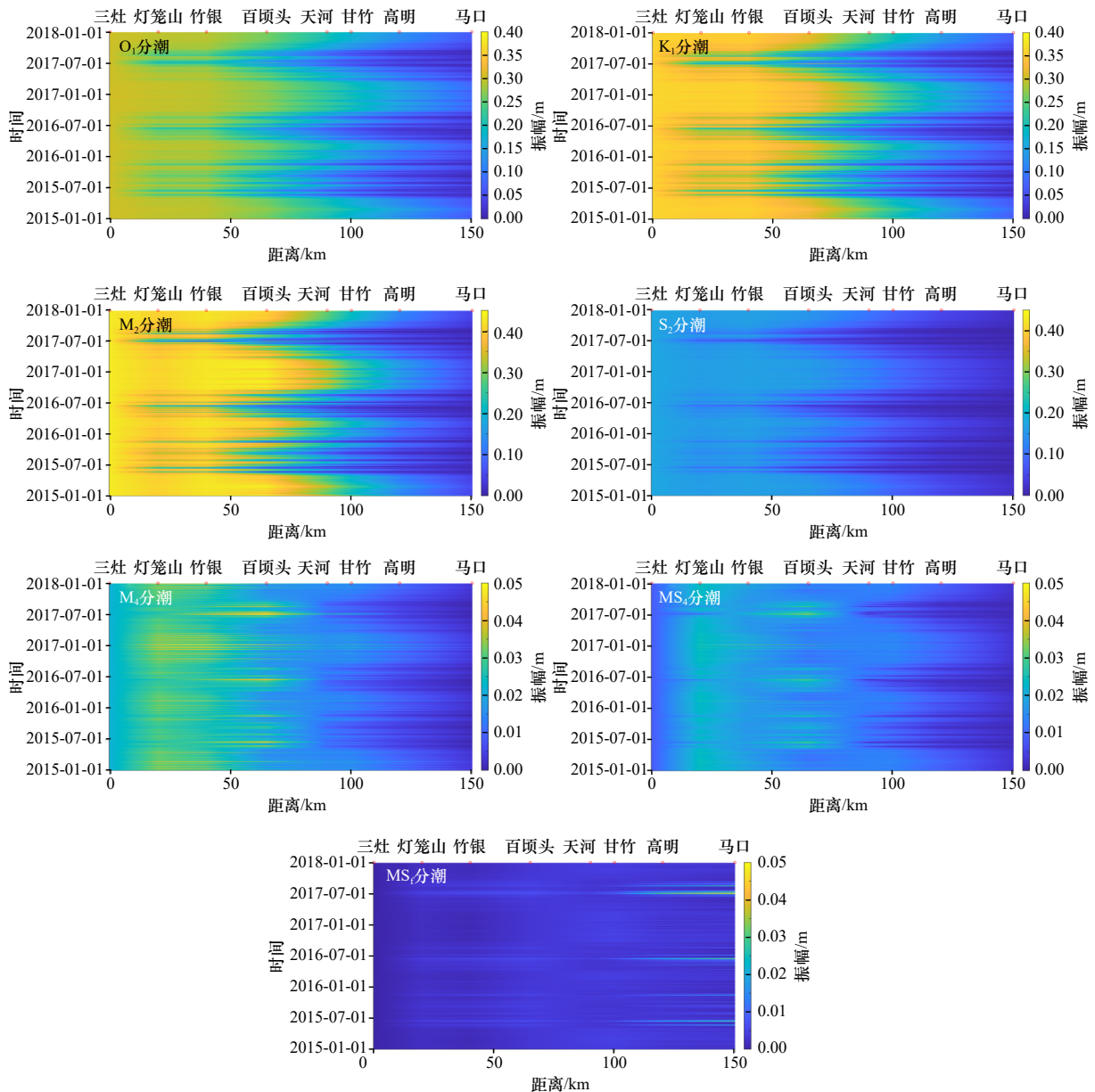


图6 2015–2017年西江感潮河道不同周期分潮振幅时间序列沿程分布

Fig. 6 Distribution of amplitude time series of tidal constituents with different periods along the tidal reach of Xijiang River from 2015 to 2017

流影响下)洪季和枯季的特征。从图8中看出各个分潮的沿程迟角变化总体上为洪季大于枯季,枯季时分潮波从三灶传播至马口时间较短,传播速度较快,这是因为洪季时潮波传播速度受径流顶托作用影响,导致传播时间延长,从而导致传播速度较小,而枯季时受径流影响较小,潮汐动力的增强使传播速度较快,黄竞争等^[39]在长江感潮河段也有相同的发现。

各分潮在空间上,洪季时受径流影响从下游竹银站开始至马口站迟角变化较大,这与水深有明显增大^[23]的空间变化规律相一致,即各个分潮的传播速度从竹银站开始减慢。枯季时主分潮的迟角在河道内变化

不大,浅水分潮(M_4 和 MS_4)在河口段(三灶-灯笼山)有较大的迟角差。

图9表示西江感潮河道洪季和枯季分潮迟角的沿程变化趋势,数据为洪、枯季时变迟角的平均值。由于迟角的范围在 $0^\circ\sim 360^\circ$ 周期性变化,当迟角增加到超过 360° 时,在图上表现出突变,不利于对迟角变化的判断,因此我们对迟角进行了修正,使其变化可以超过 360° 。由图可知:全日分潮和半日分潮迟角沿程变化均不大,其中全日分潮沿程迟角变化略小于半日分潮;浅水分潮(M_4 、 MS_4)迟角沿程变化较大,为所有分潮中最大;低频分潮(MS_1)由于波

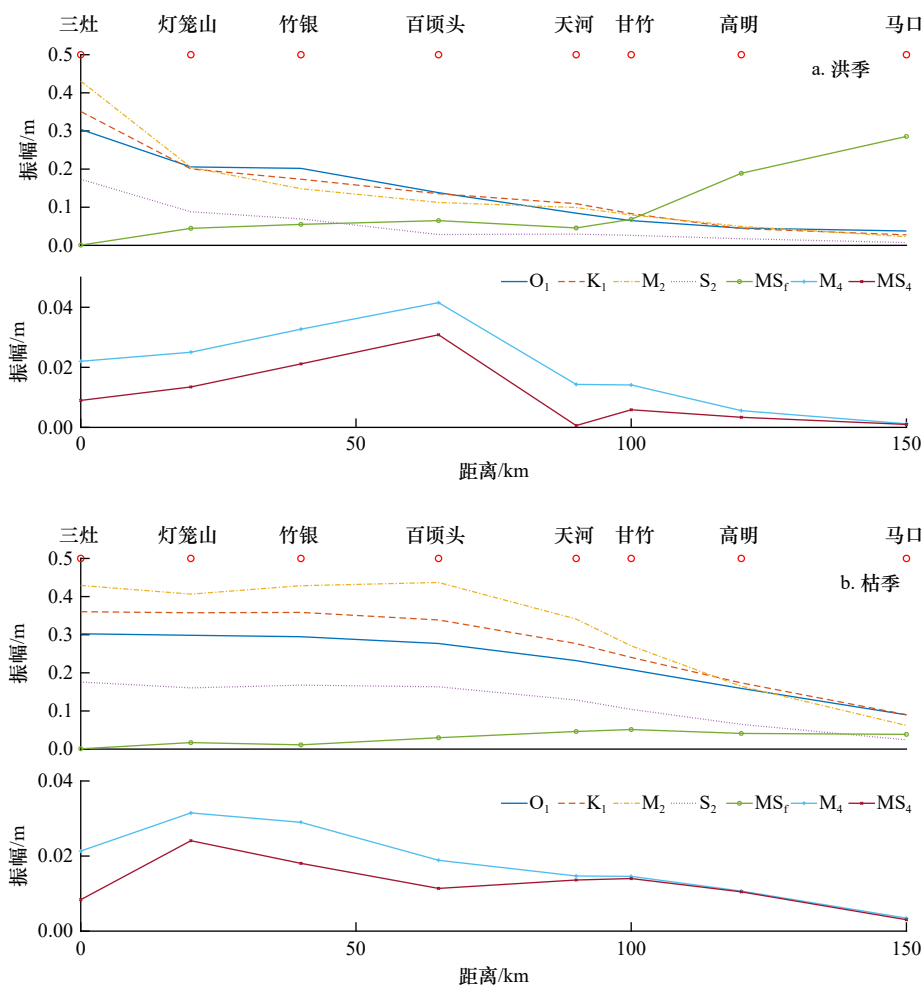


图 7 西江感潮河道洪季(a)、枯季(b)典型时段分潮振幅沿程变化

Fig. 7 Variation of tidal constituents amplitude along the tidal reach of Xijiang River in typical periods of flood season (a) and dry season (b)

长较长,在洪枯季沿程迟角变化均较小^[9, 34, 37-38],为所有分潮中最小。总体上, MS_r 分潮迟角沿程增减交替变化,原因可能是与支流分流导致的主河道径流变化有关,南华和睦州的分流能对主河道的径流产生影响,而 MS_r 分潮的变化受主河道径流影响较大。其余分潮在洪、枯季往上游皆呈递增趋势,且频率较高的浅水分潮迟角差较大。

4.3 潮汐动力构成变化

由之前的分析可知,潮波作为一种复杂的准周期波动,可以分解为主要分潮和次生分潮。前者是由外海引潮力引起的,包括全日分潮和半日分潮(八大分潮)。后者是在潮汐进入河口往河道上游传播的过程中,由于地形(河道断面)以及阻力的变化,而产生浅水和低频次生分潮,其中浅水分潮主要是由于底部摩擦力增大引起的非线性效应产生。从本质上来讲,次生分潮的能量都来源于主要分潮,潮波通过河口及潮汐河道时,径流和摩阻作用不断消耗潮能,同时促使八大主要分潮的能量往浅水和低频分潮转移。

选取三灶、灯笼山、天河和马口 4 个水文站,分别在洪、枯季,对同一径流下不同分潮的振幅变化进行统计(图 10),进而分析振幅占比的变化,并进一步讨论潮汐动力的变化。

从图 10 的三灶站可以看到,靠近外海口门处的分潮主要是全日潮和半日潮,占比超过 96%。随着潮波向河道上游传播,次生分潮占比开始增加,说明潮波的能量开始由主要分潮向次生的浅水和低频分潮转移。从灯笼山和天河的分潮振幅占比可以看到, MS_r 分潮洪季从口门不到 1%,到灯笼山 4%,再到天河的 9%,枯季增加不如洪季快,但到天河也增加到了 4%;以 M_4 为代表的浅水分潮由口门处不到 3%增加到 5%再到 8%左右;浅水、低频分潮在枯季增加的程度均不如洪季。从天河到马口河段,一个显著的特征是低频分潮 MS_r 的振幅占比沿程呈现快速增大的趋势,尤其在洪季上游(天河-马口)河段动力增大速度更快,由天河的 9%增长到马口的 59%。可见,潮汐动力已由主分潮(全日、半日分潮)向次分潮(低

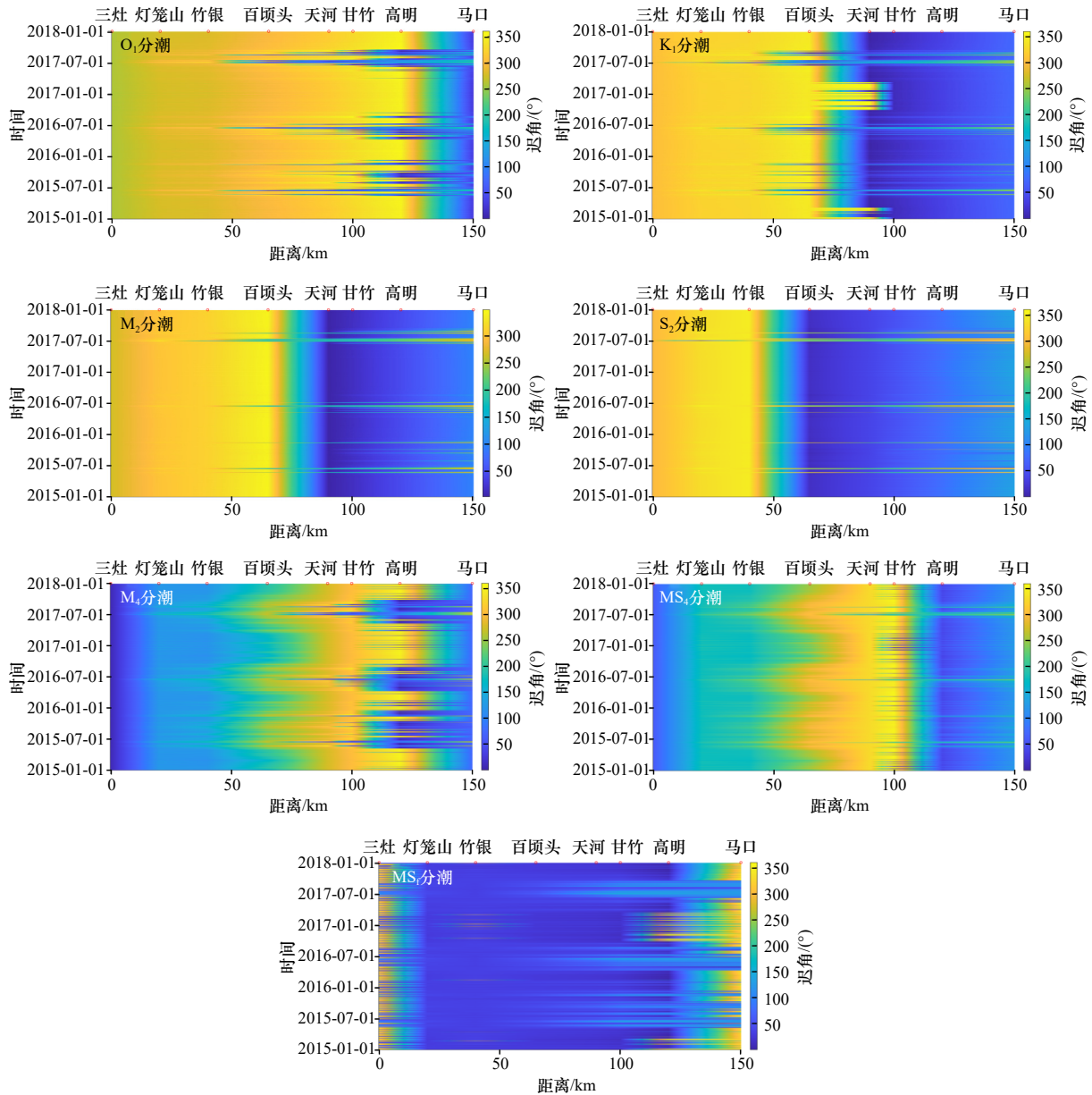


图 8 2015–2017 年西江感潮河道不同周期分潮迟角时间序列沿程分布

Fig. 8 Distribution of phase time series of tidal constituents with different periods along the tidal reach of Xijiang River from 2015 to 2017

频分潮)转变,在洪季更为明显。另外,从河道构成角度分析,西江汇入的流量在南华附近会产生分流,天河以上河段流量远大于其下游河段,而天河到马口段 MS_r 的振幅迅速增大,由此推测,流量增大对 MS_r 分潮的增长具有促进作用,与 Guo 等^[40] 在长江口的发现一致,径流量的增大显著增强 MS_r 分潮,因为径潮相互作用增强了潮下摩擦,且在大、小潮期间摩擦力不同。 MS_r 分潮主要是由 M_2 分潮和 S_2 分潮通过阻力非线性效应形成的次生分潮^[22],因此阻力的大小对于 MS_r 分潮的形成具有至关重要的作用。上游流量可以通过改变阻力大小,增加潮汐能量从 M_2 分潮

和 S_2 分潮向 MS_r 分潮转换的速率。浅水分潮由于沿程变化速度较快,在灯笼山和天河之间达到最大之后,就迅速衰减,一般难以传递更远,洪季在马口站占比基本降至 0。

4.4 潮波变形分析

为了更好地分析潮波变形特征,通常利用浅水分潮 M_4 与半日分潮 M_2 的振幅比 A (潮波变形系数)来衡量潮汐的变形程度^[41]。具体公式为

$$A = H_{M_4}/H_{M_2}. \quad (7)$$

图 11 为 2015–2017 年西江感潮河道 M_4 与 M_2 分潮振幅比的时间序列沿程分布情况。由图可知,下游

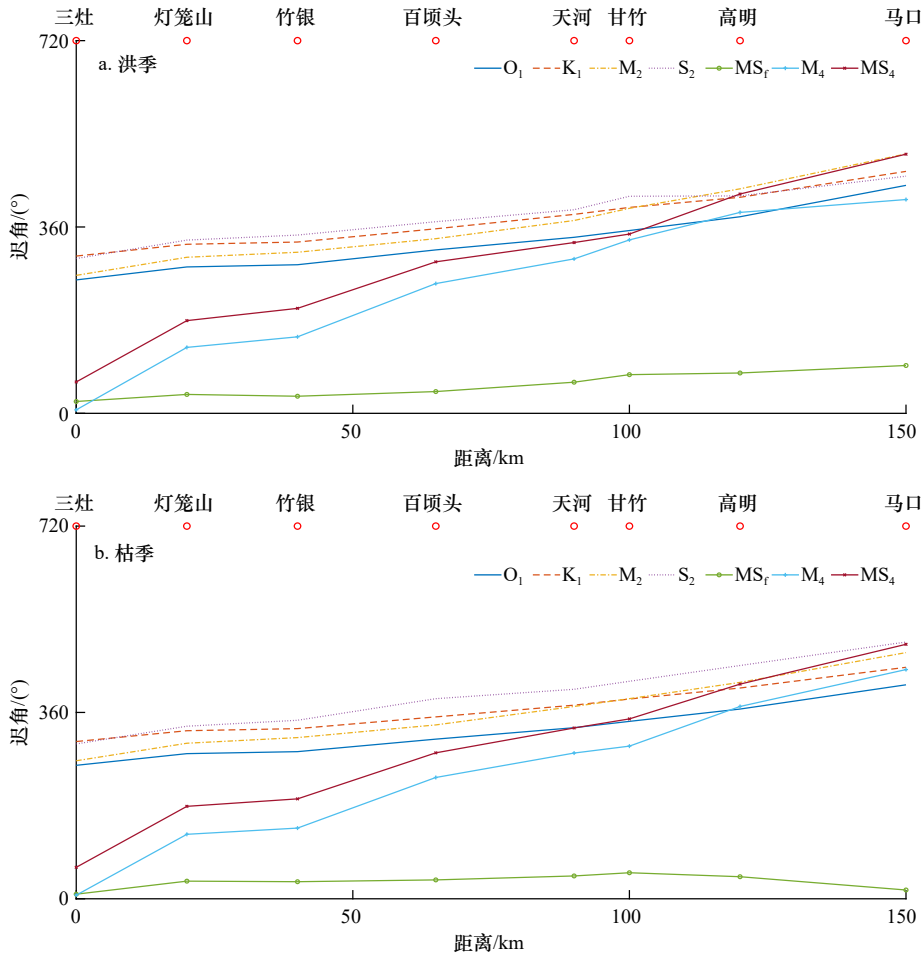


图 9 西江感潮河道洪季(a)、枯季(b)典型时段分潮迟角沿程变化

Fig. 9 Variation of tidal constituents phase along the tidal reach of Xijiang River in typical periods of flood Season (a) and dry season (b)

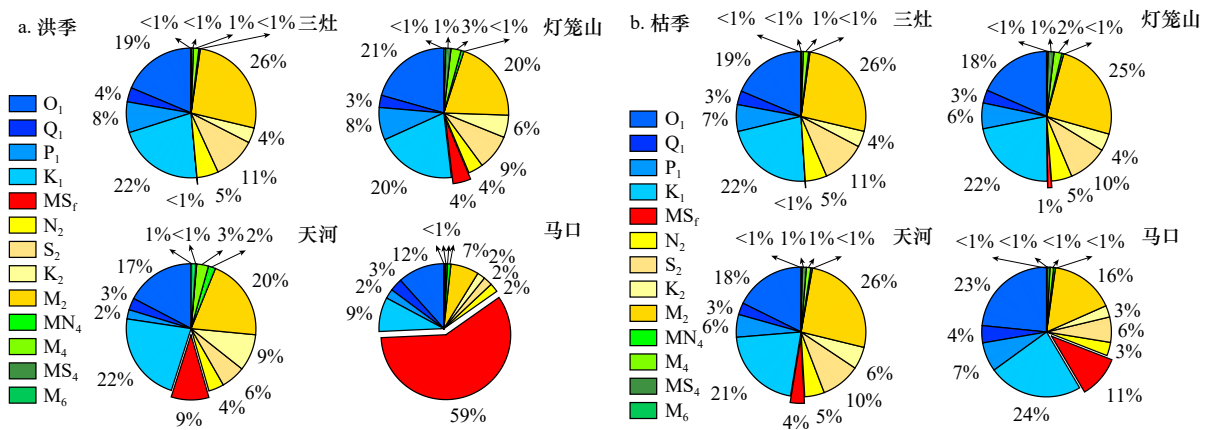


图 10 西江感潮河道洪季(a)、枯季(b)典型时段分潮振幅占比沿程变化

Fig. 10 Variation of tidal constituents amplitude proportion along the tidal reach of Xijiang River in typical periods of flood season (a) and dry season (b)

的三灶站的潮汐变形系数约为 0.046 8, 潮汐变形较小。从下游往上游, 潮汐变形系数先增大后减小, 最大值分布在洪季(7月)附近, 说明在径流的影响下洪季的潮汐变形更显著。分析潮汐变形系数存在季节变化的原因, 在图 10 中发现浅水分潮 M_4 的振幅占比

变化在洪枯季皆不明显, 但半日分潮 M_2 的季节变化显著, 在洪季占比较枯季显著减小, 因此浅水分潮的影响会在上游更明显, 同时导致涨、落潮时间差更大, 这与潮位的沿程变化相一致^[23]。

从下游到中上游河道不同位置测站, 选取灯笼

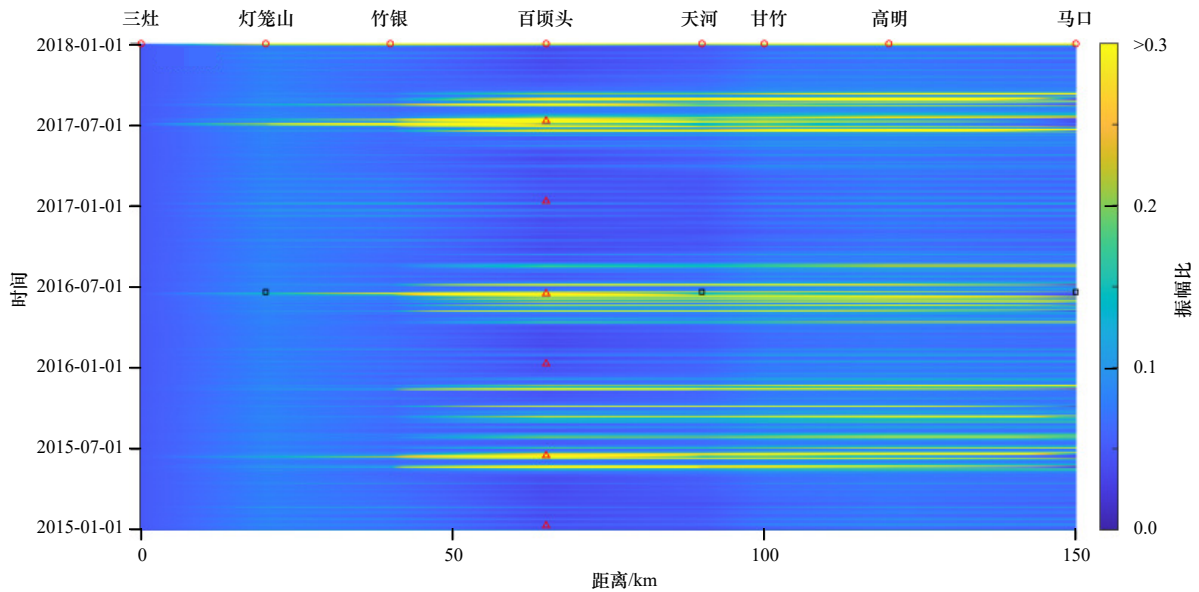


图 11 2015–2017 年西江感潮河道 M_4 分潮和 M_2 分潮振幅比时间序列沿程分布
Fig. 11 Time series distribution of M_4 constituent and M_2 tidal constituent amplitudes ratio along the tidal reach of Xi Jiang River from 2015 to 2017

山、天河和馬口 3 站 48 h 连续水位序列如图 12(对应时期在图 11 中用符号 \square 标识)所示,分析潮汐变形系数较大时潮汐变形的发展过程。从图 12 中可以看出,潮汐变形系数较大时潮汐变形十分明显,随着潮波的衰减,有潮汐日不等现象和潮汐不对称现象,涨潮历时由灯笼山的 5 h 增长到天河的 6 h,再到馬口的 9 h,越往上游涨潮历时越大,潮汐作用变小,径流作用变强,涨落潮历时的不对称性越显著,王彪等^[42]、郭磊城等^[10]在长江口也发现此特征,说明潮汐变形系数能够表征潮汐变形程度,且西江感潮河道潮汐变形显著。

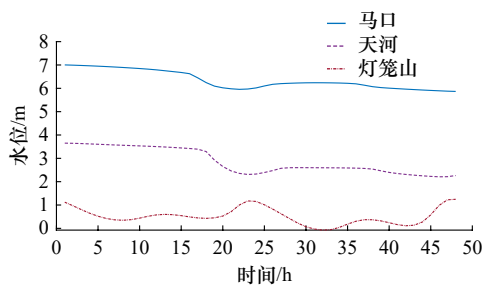


图 12 潮汐变形系数较大时潮位沿程变化
Fig. 12 The tidal level variation for larger tidal deformation coefficient along the tidal reach

从图 11 中可以明显看出,百顷头站的潮汐变形系数在洪季时最大,枯季时相对较小,为更好地对比洪枯季变形特征,选取该站 2015–2017 年洪、枯季连续 48 h 水位序列如图 13(对应时期在图 11 中用符号 \triangle 标识)所示,可以看出,洪季潮波变形较于枯季更严重,即涨落潮时间差增大,其中 2016 年最为显著。以 2017 年为例,涨落潮历时之比在洪季为 0.5,在枯季

为 0.75,洪枯季差异显著,说明径流是引起潮波变形的主要因素,径流增强,有利于减小涨潮流速、增大落潮流速,童朝锋等^[17]在伶仃洋河口也发现此特征。不同年间枯季涨潮历时变化不明显,但均超过 5 h,说明潮汐作用在河道中游依然很强,与蔡华阳^[43]和袁小婷^[44]分别在磨刀门河口、长江口的研究结果一致。

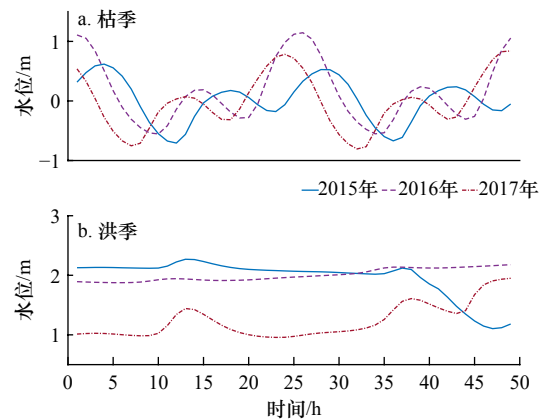


图 13 2015–2017 年百顷头站枯季(a)、洪季(b)潮位 48 h 时间序列

Fig. 13 48-hour time series of tide levels at Baiqingtou Station in dry season (a) and flood season (b) from 2015 to 2017

5 关于研究区域内极值低潮位的讨论

在海洋潮汐影响为主的沿海水文站中,最低低水位通常出现在大潮期间,但在靠近河道上游的区域,最低水位会出现在小潮、中潮期间,而不是大潮期间,这种现象被称为最低低水位颠倒(RLLW)^[22]。低潮位的产生会影响河段的通航能力,因此也是众多学

者关注的问题之一。

目前的许多研究认为低频分潮 MS_f 是导致最低低水位发生在非大潮期间的主要因素^[34-35], 而 MS_f 分潮是由 M_2 和 S_2 分潮相互作用产生的。RLLW 对于潮汐河流的界线划定具有实际意义, 在变化点位的上游河段主要受次分潮影响, 而在该点的下游河段主要受主分潮影响, 可以利用 RLLW 对感潮河道中潮汐和径流的影响河段进行大致划分, Jay 等^[26] 和 Guo 等^[9] 分别将此方法应用于哥伦比亚河和长江。因此, 本文

参考 Luo 等^[22] 的方法, 利用低频分潮 MS_f 分别与半日分潮 S_2 、 M_2 的振幅比 R_1 、 R_2 来分析 RLLW 的时空变化, 并分析最低低水位的变化点以及 RLLW 演变在河道中发生的位置, 以解释 RLLW 现象。具体公式如下:

$$R_1 = H_{MS_f} / H_{S_2}, \quad (8)$$

$$R_2 = H_{MS_f} / H_{M_2}. \quad (9)$$

图 14、图 15 分别表示 2015–2017 年西江感潮河道 MS_f 分潮与 S_2 、 M_2 分潮振幅比 R_1 、 R_2 的时空变化情况。图 16 为受影响较大的马口和高明站的 MS_f 、

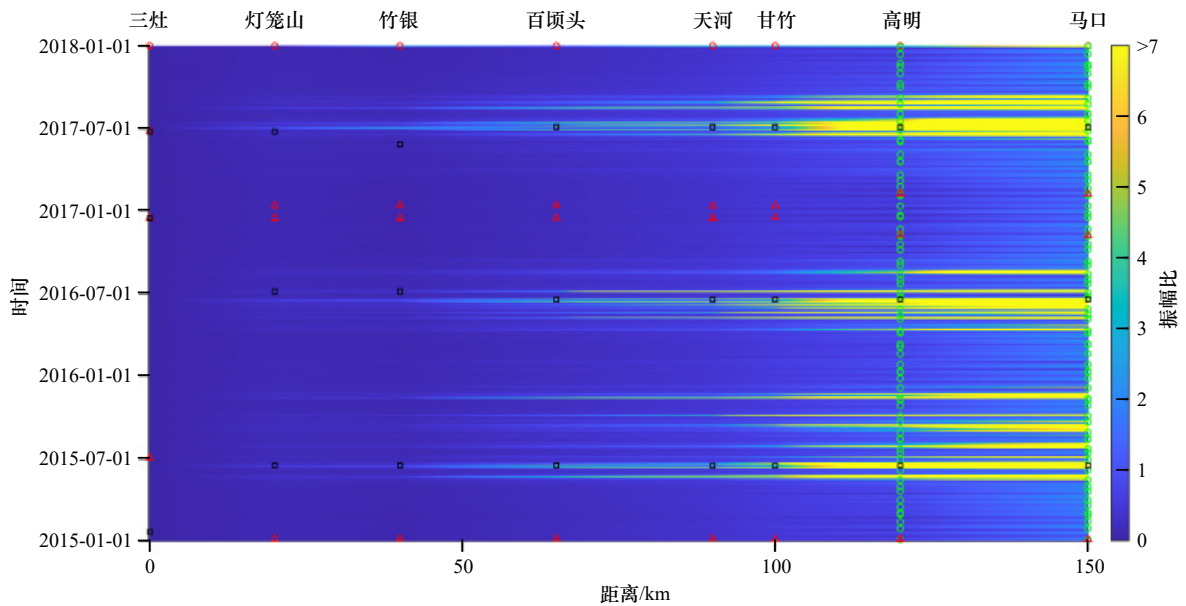


图 14 2015–2017 年西江感潮河道 MS_f 分潮和 S_2 分潮振幅比 R_1 时间序列沿程分布
Fig. 14 Time series distribution of MS_f constituent and S_2 constituent amplitudes ratio R_1 along the tidal reach of Xijiang River from 2015 to 2017

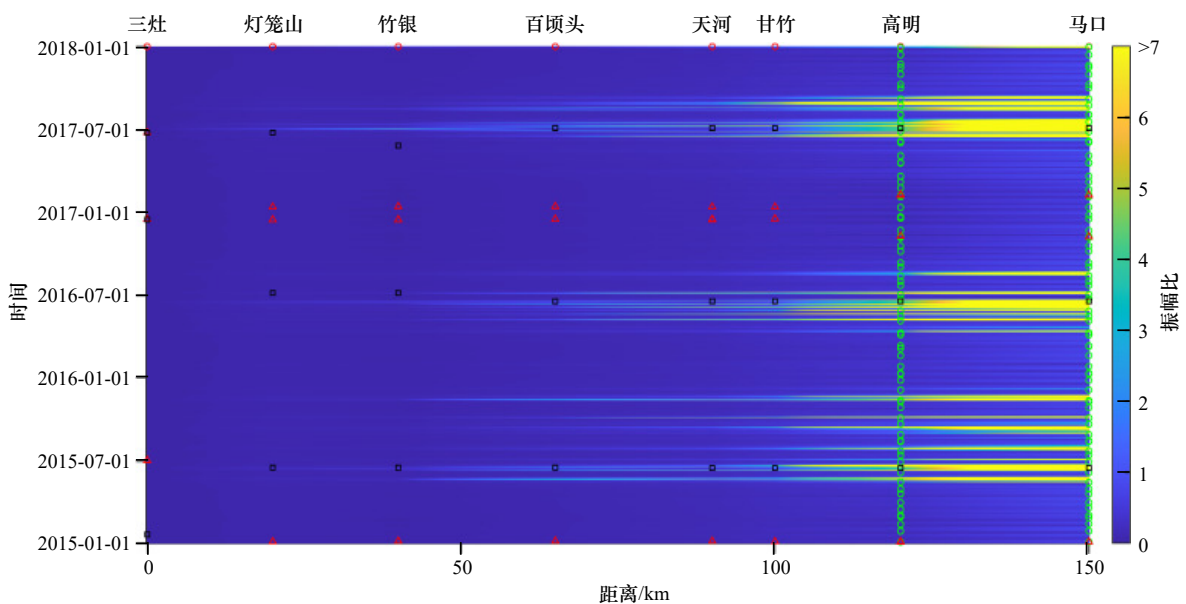
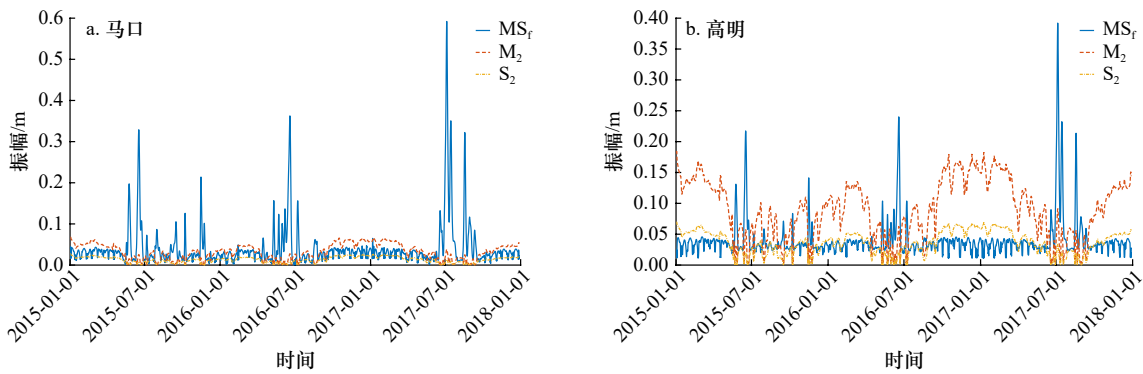


图 15 2015–2017 年西江感潮河道 MS_f 分潮和 M_2 分潮振幅比 R_2 时间序列沿程分布
Fig. 15 Time series distribution of MS_f constituent and M_2 constituent amplitudes ratio R_2 along the tidal reach of Xijiang River from 2015 to 2017

图 16 2015–2017 年马口站(a)和高明站(b) MS_r 、 M_2 和 S_2 分潮振幅时间序列Fig. 16 Time series of MS_r , M_2 , and S_2 constituents amplitude from 2015 to 2017 at Makou Station (a) and Gaoming Station (b)

M_2 、 S_2 分潮振幅时间序列。由图可知: 振幅比 R_1 、 R_2 在三灶站均变化较小, 整体上从下游往上游呈递增趋势, 但洪季的增长速度远大于枯季, 且在洪季上游大多数时间内振幅比 R_1 、 R_2 均超过 1, 表明 MS_r 分潮的振幅不断增加且已超过半日分潮 S_2 和 M_2 。 MS_r 分潮振幅沿河道上游方向的不断增大和半日分潮的不断衰减导致 R_1 、 R_2 沿河道上游显著增大, 且增长速度越来越大, S_2 分潮振幅显著小于 M_2 分潮振幅, S_2 与 MS_r 分潮的差距更小, 因此在大多数河段 R_1 大于 R_2 , 且增速较快; Luo 等^[22] 在珠江东江流域也发现类似特征, 并将其与 RLLW 现象关联。

将 2015–2017 年西江感潮河道上游的马口站和高明站最低低水位发生时刻对应的外海潮位值在图 17 上标记, 且考虑马口站和高明站与外海潮位 31 h 和 29 h 的滞后时间。可以看出, 马口站和高明站最低低水位大多数均未发生在大潮期间, 即有 RLLW, 其中马口站共发生 52 次, 高明站共发生 65 次, 分别占总数的 72% 和 90%, 发生概率极大。最低低水位发生时 R_1 与 R_2 值在图 14、图 15 以符号 \circ 表示, 选取 RLLW 发生时的 R_1 、 R_2 值, 讨论两个比值与 RLLW 演变的相关性, 统计结果如图 18 所示, 可以看出, 马口站的 R_1 、

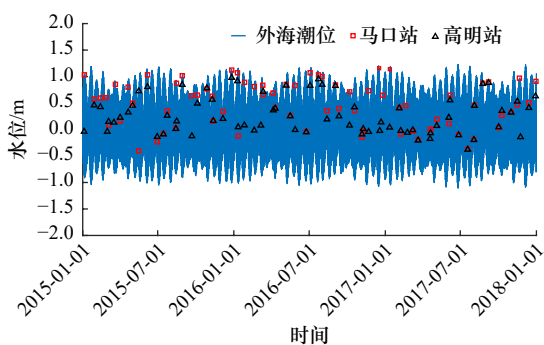
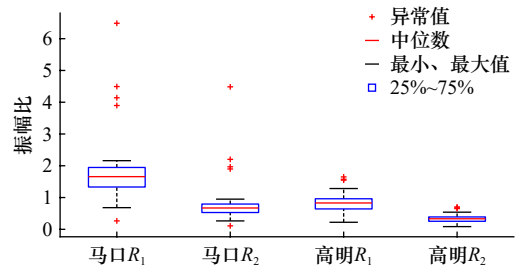


图 17 2015–2017 年马口站和高明站最低低水位发生时间分布

Fig. 17 Distribution of the occurrence period of the lowest low water level at Makou and Gaoming stations from 2015 to 2017

R_2 值及波动区间皆比高明站大, 且相对于 R_2 值, R_1 值波动更显著。 R_1 与 R_2 值数据分布偏度皆为左偏形状, 即平均值小于中位数。 R_1 和 R_2 值超过年均值占比在马口站分别为 81% 和 65%, 高明站分别为 64% 和 55%, 所以 R 值较大时, 容易发生 RLLW 演变, 且越往上游发生概率越大, R_1 比 R_2 数值更大、占比更大, 更具有代表性。

图 18 马口站和高明站最低低水位颠倒发生时 R_1 、 R_2 值分布情况Fig. 18 Distribution of R_1 and R_2 during the reversal of the lowest low waters at Makou and Gaoming stations

6 结论

本文通过非平稳潮调和分析的方法, 对西江磨刀门河段不同周期分潮的振幅和迟角的时空变化特征进行分析。研究发现:

(1) MS_r 分潮振幅沿程递增, M_4 等浅水分潮沿程先增后减, 全日、半日分潮的振幅皆沿程衰减, 且表现为洪季的变化速率大于枯季; 其中 K_1 分潮、 M_2 分潮和 M_4 分潮是各自分潮簇中振幅变化速率较快、量级较大、起主导作用的分潮; MS_r 分潮受径流和摩擦效应的影响, 在洪季上游河段振幅更大, 低频分潮的显著增加也解释了河道上游半月变化的水位特征。

(2) 各个分潮的迟角沿程变化皆表现为洪季大于枯季, 即径流顶托作用下潮波的传播速度较慢; 分潮迟角沿程均呈递增趋势, 仅低频分潮有显著的增减交

替变化;空间上,分潮迟角从竹银站往上游变化速度较快与径流的变化一致。

(3)在洪季和上游河段,受径流等因素的影响,潮汐动力构成明显由主分潮向次分潮转变;潮汐变形显著时,潮汐变形系数 A 较大;最低低水位从大潮期间颠倒时,RLLW 系数 R_1 、 R_2 也均超过 1。

本文的相关研究,进一步加深了对西江感潮河道潮波传播的认识,但结果可能仍存在一定的局限性,包括:地形变化引起的摩擦变化对潮汐振幅的影响有多大,是否存在定量关系,对最低低水位和极值潮位颠倒的影响程度是否大于径流的影响,后续还需要进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 徐民. 珠江八大出口潮汐特性变化浅析[J]. 广东水利水电, 2003(4): 47-49.
Xu Min. Analysis on variance of tidal regime of the Pearl River estuaries[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2003(4): 47-49.
- [2] 肖莞生, 卢婧青, 陈国轩, 等. 珠三角八大口门潮汐调和分析及潮性特征对比[J]. 广东水利水电, 2013(5): 6-11.
Xiao Guansheng, Lu Jingqing, Chen Guoxuan, et al. Analysis of tidal harmonic and comparison of tidal characteristics of eight major gateways in the Pearl River Delta[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2013(5): 6-11.
- [3] 袁小婷, 程和琴, 郑树伟, 等. 近期长江大通至南京河段潮动力变化趋势与机制[J]. 海洋通报, 2019, 38(5): 553-561.
Yuan Xiaoting, Cheng Heqin, Zheng Shuwei, et al. A study on the trend and change mechanism of tidal dynamic at Datong-Nanjing Reach of the Changjiang River in recent years[J]. Marine Science Bulletin, 2019, 38(5): 553-561.
- [4] Matte P, Secretan Y, Morin J. Temporal and spatial variability of tidal-fluvial dynamics in the St. Lawrence fluvial estuary: an application of nonstationary tidal harmonic analysis[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119(9): 5724-5744.
- [5] Pan Haidong, Lü Xianqing, Wang Yingying, et al. Exploration of tidal-fluvial interaction in the Columbia River Estuary using S_TIDE[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2018, 123(9): 6598-6619.
- [6] Gallo M N, Vinzon S B. Generation of overtides and compound tides in Amazon Estuary[J]. Ocean Dynamics, 2005, 55(5/6): 441-448.
- [7] 路川藤. 长江口潮波传播[D]. 南京: 南京水利科学研究所, 2009.
Lu Chuanteng. Tidal wave propagation in the Changjiang Estuary[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2009.
- [8] 路川藤, 罗小峰, 陈志昌. 长江口不同径流量对潮波传播的影响[J]. 人民长江, 2010, 41(12): 45-48.
Lu Chuanteng, Luo Xiaofeng, Chen Zhichang. Influence of different runoffs on tidal wave propagation at Changjiang River Estuary[J]. Yangtze River, 2010, 41(12): 45-48.
- [9] Guo Leicheng, van der Wegen M, Jay D A, et al. River-tide dynamics: exploration of nonstationary and nonlinear tidal behavior in the Changjiang River Estuary[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2015, 120(5): 3499-3521.
- [10] 郭磊城, 朱春燕, 何青, 等. 长江河口潮波时空特征再分析[J]. 海洋通报, 2017, 36(6): 652-661.
Guo Leicheng, Zhu Chunyan, He Qing, et al. Examination of tidal wave properties in the Changjiang River Estuary[J]. Marine Science Bulletin, 2017, 36(6): 652-661.
- [11] 欧素英, 杨清书. 珠江三角洲网河区径流潮流相互作用分析[J]. 海洋学报, 2004, 26(1): 125-131.
Ou Suying, Yang Qingshu. Interaction of fluctuating river flow with a barotropic tide in river network of the Zhujiang Delta[J]. Haiyang Xuebao, 2004, 26(1): 125-131.
- [12] 欧素英, 田枫, 郭晓娟, 等. 珠江三角洲径潮相互作用下潮能的传播和衰减[J]. 海洋学报, 2016, 38(12): 1-10.
Ou Suying, Tian Feng, Guo Xiaojuan, et al. Propagation and damping of tidal energy in the Pearl River Delta[J]. Haiyang Xuebao, 2016, 38(12): 1-10.
- [13] 欧素英, 杨清书, 杨昊, 等. 河口三角洲径流和潮汐相互作用模型及应用[J]. 热带海洋学报, 2017, 36(5): 1-8.
Ou Suying, Yang Qingshu, Yang Hao, et al. The development and application of river-tide harmonic model[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2017, 36(5): 1-8.
- [14] 杨昊, 欧素英, 傅林曦, 等. 珠江磨刀门河口日均水位变化及影响因子辨识[J]. 水利学报, 2020, 51(7): 869-881.
Yang Hao, Ou Suying, Fu Linxi, et al. Quantifying the impacts of external forcing on daily averaged water levels in the Modaomen Estuary of the Pearl River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(7): 869-881.
- [15] Cai Huayang, Savenije H H G, Yang Qingshu, et al. Influence of river discharge and dredging on tidal wave propagation: Modaomen Estuary case[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 138(10): 885-896.
- [16] Cao Yu, Zhang Wei, Zhu Yuliang, et al. Impact of trends in river discharge and ocean tides on water level dynamics in the Pearl River Delta[J]. Coastal Engineering, 2020, 157: 103634.
- [17] 童朝锋, 司家林, 张蔚, 等. 伶仃洋洪季潮波传播变形及不对称性规律分析[J]. 热带海洋学报, 2020, 39(1): 36-52.
Tong Chaofeng, Si Jialin, Zhang Wei, et al. Analysis of tidal wave propagation distortion and asymmetry in Lingding Bay during wet season[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2020, 39(1): 36-52.
- [18] 龚文平, 刘欢, 任杰, 等. 黄茅海河口潮波的传播特征与机理研究[J]. 海洋学报, 2012, 34(3): 41-54.
Gong Wenping, Liu Huan, Ren Jie, et al. The study of tidal propagation the in Huangmaohai Estuary and its underlying mechanisms[J].

- Haiyang Xuebao, 2012, 34(3): 41–54.
- [19] 谢梅芳, 张萍, 杨昊, 等. 珠江“伶仃洋河口湾-虎门-潮汐通道”的潮波传播特征[J]. 热带海洋学报, 2021, 40(4): 1–13.
- Xie Meifang, Zhang Ping, Yang Hao, et al. Tidal wave propagation dynamics in Lingdingyang Bay-Humen outlet-tidal channel of the Pearl River[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2021, 40(4): 1–13.
- [20] Wang Zhengbing, Jeuken C, de Vriend H J. Tidal asymmetry and residual sediment transport in estuaries[R]. [S.l. : s.n.], 1999.
- [21] Lu Sheng, Tong Chaofeng, Lee D Y, et al. Propagation of tidal waves up in Changjiang Estuary during the dry season[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(9): 6445–6473.
- [22] Luo Xiaoya, Zhang Wei, Chen Shijia, et al. Evolution of reversal of the lowest low waters in a tidal river network[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 585: 124701.
- [23] 武家兴, 王浩丞, 张璐, 等. 西江感潮河道(马口-磨刀门)的潮波传播特征研究[J/OL]. 热带海洋学报, 2023, 42 (4): 47–62. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1500.p.20220921.0911.002.html>.
- Wu Jiaying, Wang Haocheng, Zhang Lu, et al. Investigation into the tidal propagation features along the tidal reach of West River (Makou-Modaomen)[J/OL]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2023, 42 (4): 47–62. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1500.p.20220921.0911.002.html>.
- [24] Padman L, Erofeeva S. Tide model driver (TMD) manual[EB/OL]. (2021–11–20) [2022–11–08]. http://www.esr.org/polar_tide_models/README_TMD.pdf.
- [25] 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.
- [26] Jay D A, Leffler K, Diefenderfer H L, et al. Tidal-fluvial and estuarine processes in the Lower Columbia River: I. Along-channel water level variations, Pacific Ocean to Bonneville dam[J]. *Estuaries and Coasts*, 2015, 38(2): 415–433.
- [27] Gan Min, Chen Yongping, Pan Shunqi, et al. A modified nonstationary tidal harmonic analysis model for the Changjiang Estuarine Tides[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2019, 36(4): 513–525.
- [28] Yu Xiayan, Zhang Wei, Hoitink A J F. Impact of river discharge seasonality change on tidal duration asymmetry in the Changjiang River Estuary[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 6304.
- [29] 吕咸青, 潘海东, 王雨哲. 潮汐调和与分析方法的回顾与展望[J]. 海洋科学, 2021, 45(11): 132–143.
- Lü Xianqing, Pan Haidong, Wang Yuzhe. Review and prospect of tidal harmonic analysis method[J]. *Marine Sciences*, 2021, 45(11): 132–143.
- [30] Chen Yongping, Gan Min, Pan Shunqi, et al. Application of auto-regressive (AR) analysis to improve short-term prediction of water levels in the Changjiang Estuary[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125386.
- [31] 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.
- [32] Wong L A, Chen J C, Xue Huijie, et al. A model study of the circulation in the Pearl River Estuary (PRE) and its adjacent coastal waters: 1. Simulations and comparison with observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2003, 108(C5): 3156.
- [33] Mao Qingwen, Shi Ping, Yin Kedong, et al. Tides and tidal currents in the Zhujiang River Estuary[J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24(16): 1797–1808.
- [34] Hoitink A J F, Jay D A. Tidal river dynamics: implications for deltas[J]. *Reviews of Geophysics*, 2016, 54(1): 240–272.
- [35] Buschman F A, Hoitink A J F, van der Vegt M, et al. Subtidal water level variation controlled by river flow and tides[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(10): W10420.
- [36] Sassi M G, Hoitink A J F. River flow controls on tides and tide-mean water level profiles in a tidal freshwater river[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(9): 4139–4151.
- [37] 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.
- [38] LeBlond P H. Forced fortnightly tides in shallow rivers[J]. *Atmosphere-Ocean*, 1979, 17(3): 253–264.
- [39] 黄竞争, 张先毅, 吴峥, 等. 长江感潮河段潮波传播变化特征及影响因素分析[J]. 海洋学报, 2020, 42(3): 25–35.
- Huang Jingzheng, Zhang Xianyi, Wu Zheng, et al. Investigation into the spatial and temporal tide-river dynamics and the underlying controlled factors along the tidal reach of the Changjiang River[J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(3): 25–35.
- [40] Guo Leicheng, Zhu Chunyan, Wu Xuefeng, et al. Strong inland propagation of low-frequency long waves in river estuaries[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(19): e2020GL089112.
- [41] 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.
- [42] 王彪, 朱建荣, 李路. 长江河口涨落潮不对称性动力成因分析[J]. 海洋学报, 2011, 33(3): 19–27.
- Wang Biao, Zhu Jianrong, Li Lu. A study on the dynamics of the asymmetry between flood and ebb in the Changjiang Estuary[J]. *Haiyang Xuebao*, 2011, 33(3): 19–27.
- [43] 蔡华阳. 径流对珠江磨刀门河口潮波传播的影响[D]. 广州: 中山大学, 2010.
- Cai Huayang. The effect of river discharge on the tidal propagation in Modaomen Estuary, the Zhujiang River[D]. Guangzhou: Sun Yat-

Sen University, 2010.

[44] 袁小婷. 近40年长江河口潮汐动力变化特征[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.

Yuan Xiaoting. Variation character of tidal dynamics along Changjiang River Estuary for the past four decades[D]. Shanghai: East China Normal University, 2019.

Analysis of the tidal characteristics along the tidal reach of Xijiang River considering river discharge variation

Wu Jiaying^{1,2,3}, Zhang Zhuo^{1,2,3}, Chen Peng^{1,2,3}, Song Zhiyao^{1,2,3},
Wen Yajuan^{1,2,3}, Zhang Lu^{1,2,3}, Wang Haocheng^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. State Key Laboratory Cultivation Base of Geographical Environment Evolution (Jiangsu Province), Nanjing 210023, China; 3. School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Based on the tide level data along the tidal reach of Xijiang River from 2015 to 2017, we applied the non-stationary tidal harmonic analysis model NS-TIDE to study the spatial and temporal variation characteristics of the amplitude and phase of different cycles of tidal constituent, the change of tidal dynamics composition and tidal wave deformation characteristics, and discussed the causes of tidal level deformation and the reversal of the lowest low waters along the tidal reach. The results show that, unlike the diurnal constituent and semi-diurnal constituent along the tidal reach that have amplitude decay and phase increment, the shallow water component amplitude increases and then decreases, the amplitude of MS_f is increasing, and the phase is changing alternately; the decay rate of each tidal amplitude is higher in the flood season than in the dry season, and the phase changes more in the flood season, indicating that the tidal wave propagates upstream more slowly under the top support of river discharge. Due to the influence of river discharge and topography, the amplitude of MS_f is larger in the flood season and upstream section of the river, and the tidal dynamic composition changes from the main tidal constituent to the secondary tidal constituent; the change of amplitude ratio of M_4 and M_2 indicates significant tidal deformation, and the reversal of the lowest low waters when the amplitude ratio of MS_f to M_2 and S_2 is relatively large.

Key words: tidal characteristics; harmonic analysis; river discharge; tidal wave deformation; the reversal of the lowest low waters