



河床下切影响下 珠江三角洲潮流不对称时空变化规律*

郭威^{1,2,3}, 季小梅^{1,4}, 陈婷^{1,4}, 张蔚^{1,4}

(1. 河海大学 江苏省海岸海洋资源开发与环境安全重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 上海滩涂海岸工程技术研究中心, 上海 200061; 3. 河海大学 疏浚技术教育部工程研究中心, 江苏 南京 210098;
4. 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要:潮流不对称对三角洲地区的泥沙净输运和地貌演变有着重要作用, 近年来珠江三角洲的大规模采砂活动引起河床大幅下切, 因此研究河床下切后珠江三角洲潮流不对称的时空变化规律具有重要意义。利用 1999 年和 2010 年珠江三角洲河口河网地形数据, 建立珠江口平面二维水动力模型, 模拟珠江河口河网枯季水动力过程。结合非稳态调和分析方法分解流速信号, 用偏度方法量化分潮组合、余流及分潮和余流相互作用对潮流不对称的贡献程度。研究结果表明: 1) 珠江三角洲潮流不对称受余流影响呈现出落潮占优的特性; 2) 河床下切后, 各分潮组合的不对称性增大, 潮流不对称在下游河道有所减弱、中上游河道有所增强, 且珠江三角洲中上游河道变化大于下游河道; 3) 分潮和余流相互作用的变化是导致该现象产生的主要原因。

关键词:珠江三角洲; 潮流不对称; 河床下切; 非稳态调和; 偏度

中图分类号: TV 148; U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)01-0027-08

Spatial-temporal variation patterns of tidal current asymmetry in the Pearl River Delta under influence of riverbed descending

GUO Wei^{1,2,3}, JI Xiao-mei^{1,4}, CHEN Ting^{1,4}, ZHANG Wei^{1,4}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Coast Ocean Resources Development and Environment Security, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Shanghai Engineering Research Center of Coastal Zones, Shanghai 200061, China;
3. Engineering Research Center of the Education Ministry of Dredging Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China;
4. Key Laboratory of Port, Waterway & Sedimentation Engineering, Nanjing 210029, China)

Abstract: Tidal current asymmetry plays an important role in the net sediment transport and morphological evolution in the delta, and large-scale sand excavation activities in the Pearl River Delta (PRD) have caused significant descending of the riverbed in recent years, so it is important to study the spatial and temporal variation patterns of tidal current asymmetry in the PRD after riverbed descending. This paper establishes a two-dimensional hydrodynamic model which using topographic data of the PRD in 1999 and 2010 to simulate the hydrodynamic process in the Pearl River estuary network during the dry season. Using nonstationary harmonic analysis method to decompose velocity signals, the skewness method is used to quantify the contribution of tidal combinations, residual flow and interaction between tidal components and residual flow to tidal current asymmetry. The study shows that:

收稿日期: 2021-03-16

*基金项目: 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室开放基金项目(Yk220001-5); 国家自然科学基金资助项目(42006155);
河海大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B210202026、B200204036、B200202053)

作者简介: 郭威(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为河口海岸水动力。

通讯作者: 季小梅(1981—), 女, 博士, 副教授, 从事河口海岸动力地貌研究。E-mail: xiaomeimila.ji@gmail.com

1) Tidal current asymmetry is ebb dominant in the PRD due to the influence of the residual flow. 2) After riverbed descending, contribution of tidal combinations to tidal current asymmetry shows increasing trend, tidal current asymmetry weakens in the lower reaches and strengthens in the middle and upper reaches, and the change of the middle and upper reaches of the PRD is greater than that of the lower reaches. 3) Changes in the interaction between tidal components and residual flow are the main cause of this phenomenon.

Keywords: the Pearl River Delta; tidal current asymmetry; riverbed descending; nonstationary harmonic analysis; skewness

潮波沿外海传入河口近岸海域时，由于地形浅化、径流等因素影响，河口中的潮波呈现出一定的非稳态特征，水平方向涨落潮流速的变化称为潮流不对称^[1]。早期 Friedrichs^[2] 提出利用天文分潮 M_2 和浅水分潮 M_4 的相对振幅和相对相位两个参数，定量说明非线性作用造成潮流变形的程度。后来 Nidzieko^[3] 提出偏度的方法来量化潮流不对称，并在斯卡吉特河三角洲做了例证^[4]，但其研究并未考虑余流对潮流不对称的贡献，因此不适用于径流作用显著的河口地区。Song^[5] 进一步指出，当某一分潮频率为另一分潮频率的 2 倍 ($\omega_i = 2\omega_j$) 或两分潮频率之和等于另一分潮频率 ($\omega_i + \omega_j = \omega_k$)，才能对潮不对称产生贡献。李谊纯^[6] 从统计学角度出发，基于三阶原点矩推导了潮流不对称的偏度公式，合理量化了分潮组合和余流对潮流不对称的贡献程度，并将此方法运用于北仑河口。Gong^[7] 基于 Song 和李谊纯的方法，研究了黄茅海河口的潮流不对称，指出黄茅海河口具有落潮占优的特性。

20 世纪 90 年代以来，珠江三角洲的大规模采砂导致主要航道深度总体下切 0.34~6.48 m^[8]，河床的大幅下切增加了河道的纳潮量，减缓了潮流沿河道的衰减，导致珠江三角洲的径潮相互作用显著增强，潮流不对称发生变化，进一步影响珠江三角洲的泥沙净输运和地貌演变。本文基于 1999 年和 2010 年珠江河口河网地形数据，建立珠江口二维水动力数值模型，考虑到洪季流量大、流速信号分解准确性较低，研究主要聚焦于珠江三角洲枯季(1—3 月)水动力过程，利用非稳态调和分析方法分解流速信号，研究珠江三角洲主要分潮变化，采用偏度方法量化分潮组合、余流及分潮和余流相互作用对潮流不对称贡献程度，分析河床下切

后珠江三角洲潮流不对称的时空变化规律。

1 研究区域

珠江是中国第二大河流，其复杂的几何形态是自然过程和人类活动共同作用的结果。珠江的三大支流分别是西江、北江和东江，平均流量为 7 124、1 465、719 m³/s，进入珠江三角洲 77% 的河流流量和 90% 的泥沙均来自于西江^[9]，河网水流通过八大口门流入南中国海。

珠江口潮流为往复流，枯水期潮流界距离口门 60~160 km；潮汐属于不规则半日潮， M_2 为主要分潮，其次是 K_1 、 O_1 和 S_2 分潮，西部口门附近的潮差为 1.0~1.2 m，东部口门附近的潮差为 1.0~1.5 m^[10]。为具体分析河床下切后珠江三角洲潮流不对称变化规律，本文研究聚焦于珠江三角洲西江(马口—南华—竹银—马骊洲)和北江(三水—紫洞—三善—万顷沙西)一线的潮汐河道，见图 1。

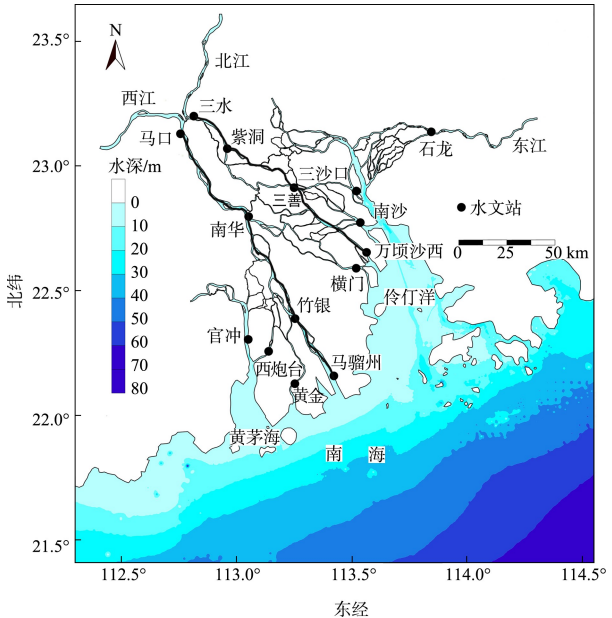


图 1 珠江三角洲河网及研究河道

2 研究方法

2.1 水动力模型

本文建立的珠江口二维水动力模型由上到下覆盖了河网区、河口区以及口门外近海区域, 网格采用矩形和三角形混接网格, 网格步长在 50~2 000 m 不等, 网格数共计 56 911 个, 节点数共计 55 454 个。模型的上边界分别控制到西江高要站、北江石角站、东江博罗站、潭江石嘴站以及流溪河老鸭岗站, 下边界控制到口门外海滨水域的 -30 m 等深线处, 见图 2。

模型固定上边界和下边界, 上边界高要站、石角站、博罗站采用 1984—2012 年计算所得的枯季多年平均流量, 石嘴站及老鸭岗站缺失相关流量数据, 采用常数 23 m³/s 代替; 下边界潮位使用相同调和常数, 利用 1999 年和 2010 年珠江河口河网地形数据, 模拟水动力过程。

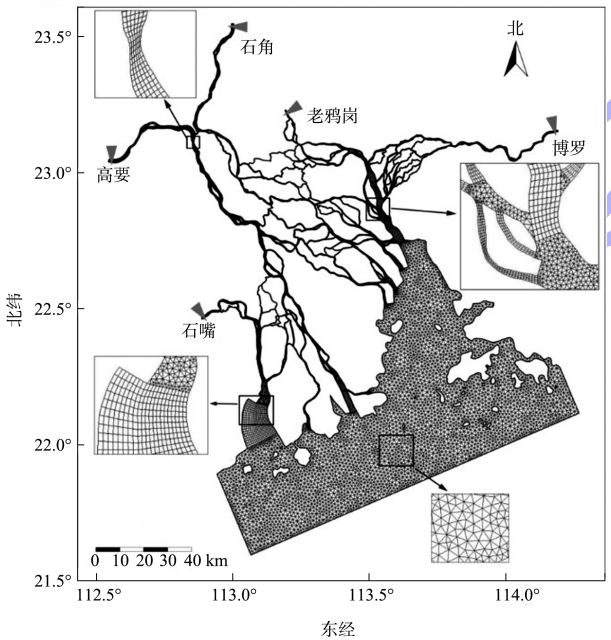


图 2 珠江三角洲模型范围及网格

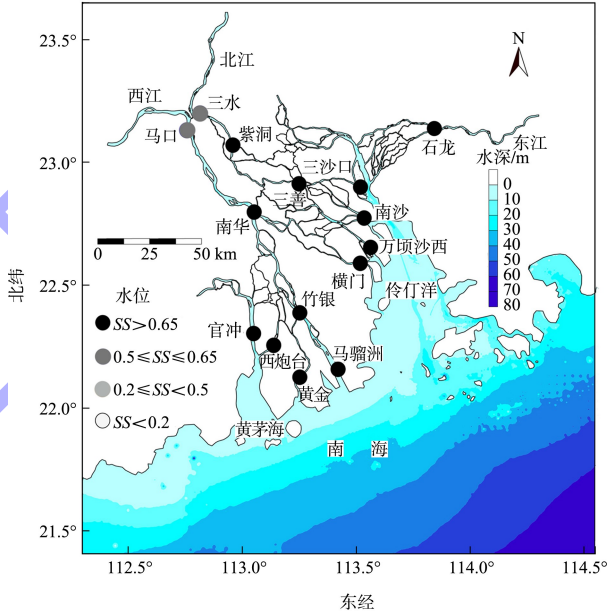
2.2 模型验证

为说明模型的准确性, 根据现有实测水位数据选取 1999 年枯季及 2010 年枯季的 15 个水文站点进行模型验证; 1999 年采用站点实测流量过程代替流速过程, 验证时间为 1999 年 7 月 15 日—7 月 20 日; 为说明 2010 年地形的准确性, 利用 2009 年边界条件, 对 2009 年 1 月 10 日—1 月 11 日西江、北江 12 个流速测点进行验证。

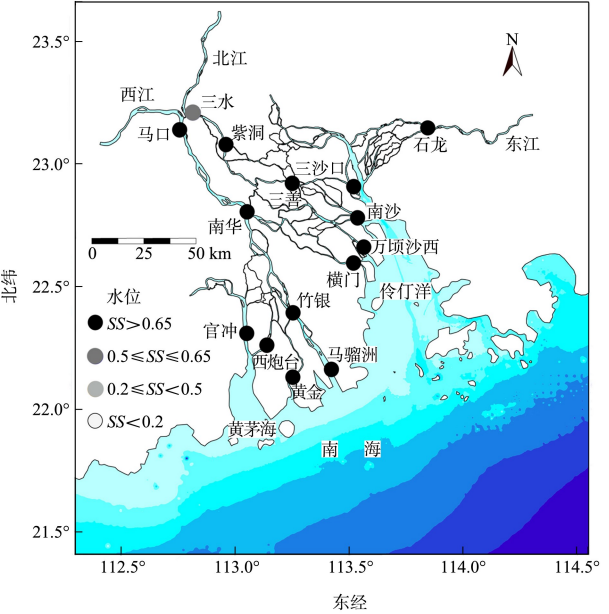
评估模型精度时采用公式^[11]如下:

$$SS=1-\frac{\sum(X_{mol}-X_{obs})^2}{\sum(|X_{mol}-\bar{X}_{obs}|+|X_{obs}-\bar{X}_{obs}|)^2} \tag{1}$$

式中: SS 为模型精度检验参数; X_{mol} 为模型计算值; X_{obs} 为实测值; \bar{X}_{obs} 为实测平均值。判别标准: $SS<0.2$ 为差, $0.2\leq SS<0.5$ 为好, $0.5\leq SS\leq 0.65$ 为很好, $SS>0.65$ 为极好。验证结果见图 3, 模型计算的 1999 年和 2010 年水位过程、1999 年流量过程和 2009 年流速过程与实测资料验证, 大部分站点 SS 大于 0.65, 上游河道由于地形误差、水库调度等原因, 小部分站点 $0.5\leq SS\leq 0.65$, 模型整体验证结果较好, 可信度较高。



a) 1999年水位



b) 2010年水位

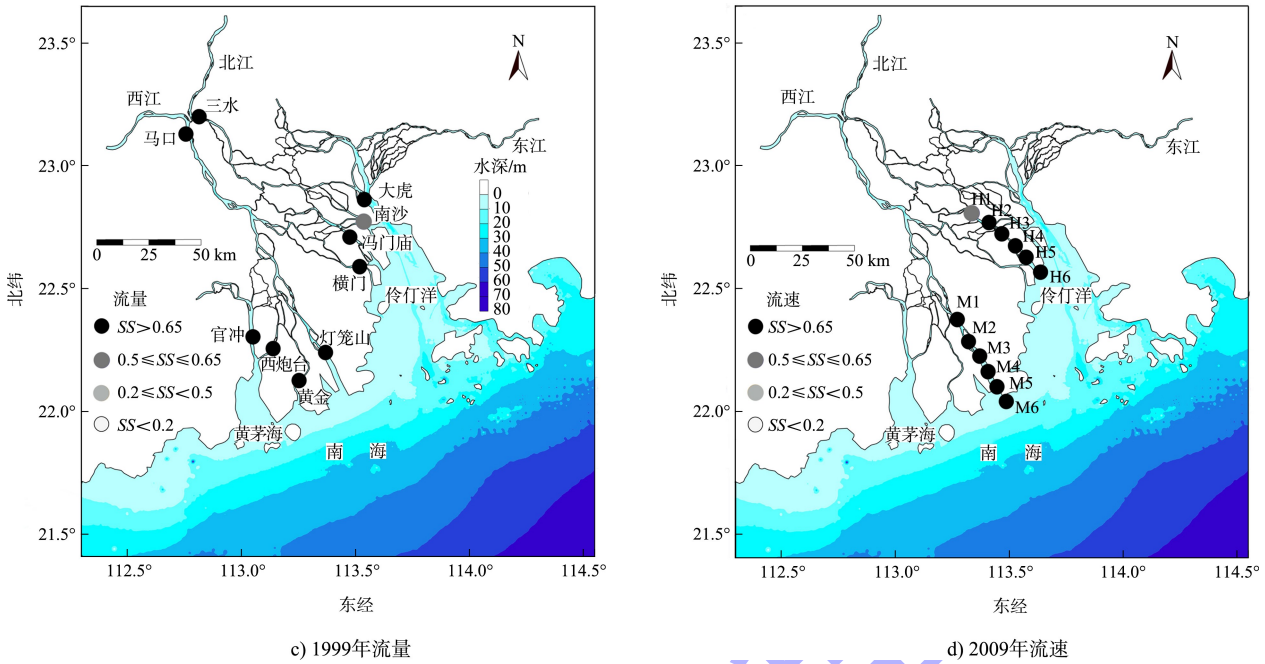


图 3 验证结果

2.3 非稳态调和分析方法

潮波从河口向上游河道传播的过程中，径流作用越来越显著，传统调和分析 T_TIDE 认为实测潮位时间序列中只包含潮汐信号，忽略了非潮汐信号的干扰，因而在受径流影响显著的上游河道，T_TIDE 误差水平会大幅增加。为克服这一问题，Matte^[12]提出了一种非稳态调和分析方法(NS_TIDE)，

研究结果表明：对于河口内径流非平稳信号影响显著的潮汐河道，该方法误差相对于传统调和分

2.4 偏度方法

研究基于 Gong 的计算方法，潮流不对称 (FVA: Flow Velocity Asymmetry) 偏度计算公式如下：

$$\gamma_{FVA} = \frac{\sum_{\omega_i + \omega_j = \omega_k} \frac{3}{2} a_i a_j a_k \cos(\varphi_i + \varphi_j - \varphi_k) + \sum_{2\omega_i = \omega_j} \frac{3}{4} a_i^2 a_j \cos(2\varphi_i - \varphi_j) + \sum_{i=1}^N \frac{3}{2} a_i^2 a_0 \cos\varphi_0 + a_0^3 \cos\varphi_0}{\left(a_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N a_i^2 \omega_i^2\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

式中： $a_{i,j,k}$ 、 $\omega_{i,j,k}$ 、 $\varphi_{i,j,k}$ 分别为分潮振幅、频率和相位； a_0 、 φ_0 分别为余流振幅和相位，本文中余流为负值，取 $\varphi_0 = 0^\circ$ 。分子第 1 项代表频率满足 $\omega_i + \omega_j = \omega_k$ 的分潮组合对潮流不对称的贡献；第 2 项代表频率满足 $\omega_i = 2\omega_j$ 的分潮组合对潮流不对称的贡献；第 3、4 项分别代表分潮和余流相互作用及余流对潮流不对称的贡献。本文取落潮流速方向为正，若 $\gamma > 0$ ，则落潮占优，落潮峰值流速大于涨潮峰值流速；若 $\gamma < 0$ ，则涨潮占优，涨潮峰值流速大于落潮峰值流速；若 $\gamma = 0$ ，则表示流速完全对称，涨潮峰值流速等于落潮峰值流速。

3 研究结果

3.1 流速时空变化

利用珠江口二维水动力模型模拟珠江河口河网流速过程，得到西江、北江站点逐时流速数据，见图 4。由图 4 可知，西江、北江下游河道主要受潮动力控制，如西江马骝洲站和竹银站、北江万顷沙西站和三善站，流速曲线明显可见大小潮半月周期性变化；中上游河道主要受径流控制，如西江马口站和南华站，北江三水站和紫洞站，流速曲线无大小潮半月周期性变化，1999 和 2010 年珠江三角洲西江、北江余流沿程变化见图 5。

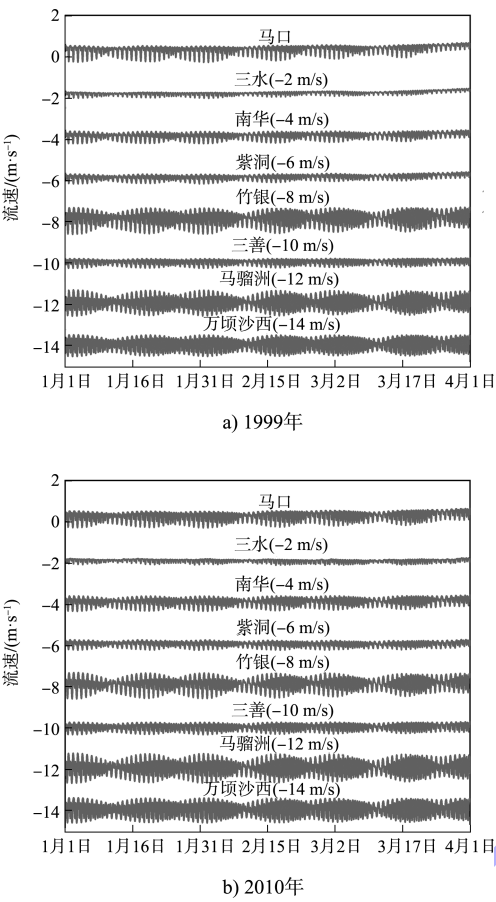


图 4 1999、2010 年珠江三角洲西江和北江站点逐时流速

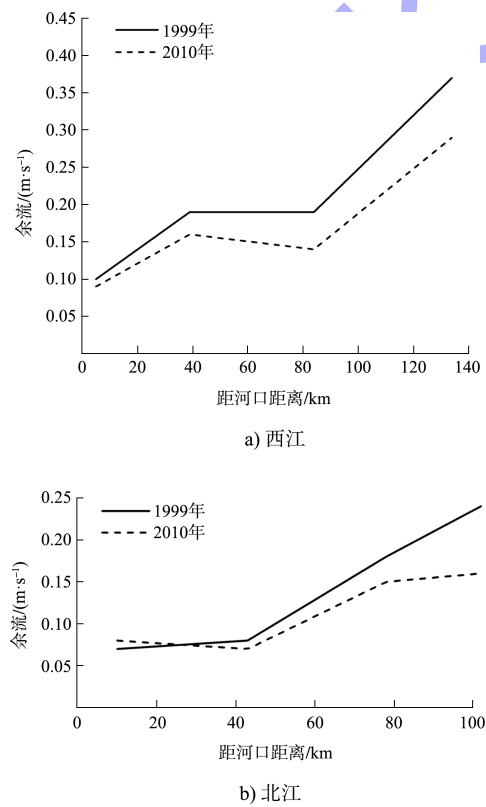
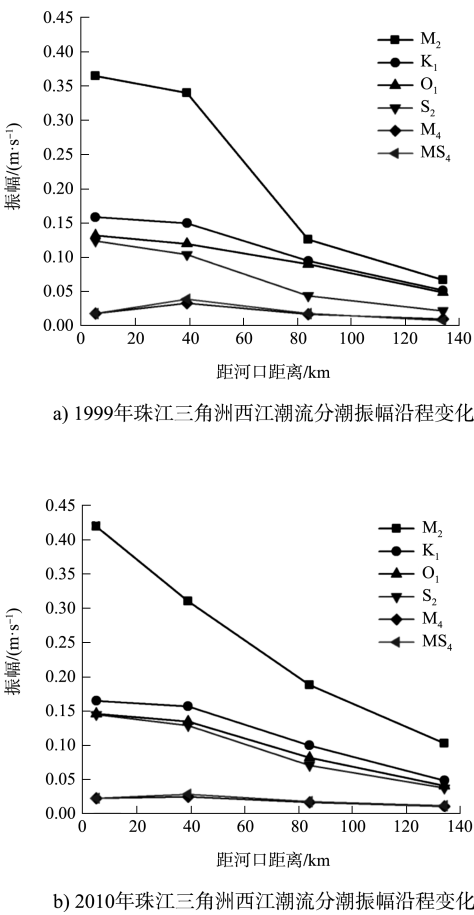


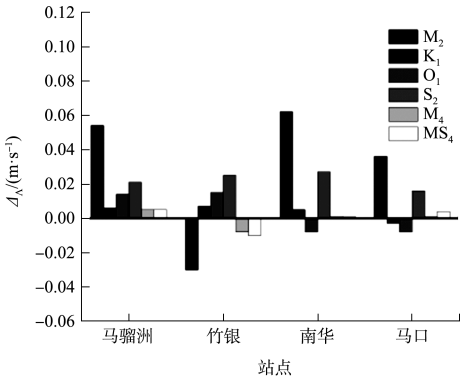
图 5 1999、2010 年珠江三角洲西江和北江余流沿程变化

由图 5 可知,受径流因素的影响,珠江三角洲余流总体沿上游增大,西江竹银站河道突然收敛,导致流速急剧增大、余流值略大于上游南华站。河床下切后,西江和北江河道加深,过水断面面积增大,流速减缓,中上游河道余流明显减小,马口站和三水站减小 0.08 m/s,南华站减小 0.05 m/s,紫洞站减小 0.03 m/s;下游河道受潮动力影响较大,余流变化较小,马骝洲站和万顷沙西站余流几乎保持不变,竹银站减小 0.03 m/s。总体来说,河床下切后,余流变化在空间上表现为西江干流大于北江干流,珠江三角洲上游河道大于中游河道,中游河道大于下游河道。

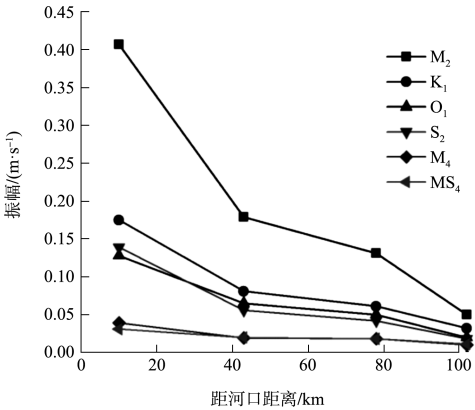
3.2 分潮流调和常数时空变化

本文基于 NS_TIDE 调和分析方法,对 1999 和 2010 年珠江三角洲西江、北江站点流速数据进行调和分析,提取 K_1 、 O_1 、 M_2 、 S_2 、 M_4 、 MS_4 共 6 个主要分潮调和常数,西江、北江的潮流分潮振幅沿程变化及分潮振幅差见图 6,分潮组合相对相位见表 1。

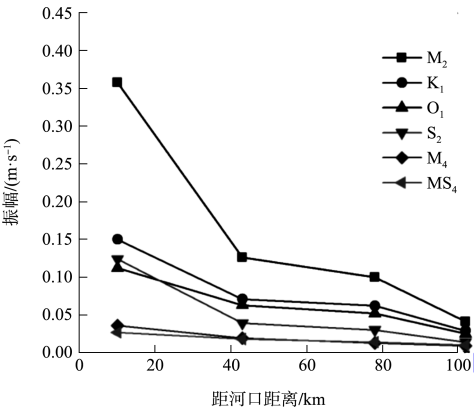




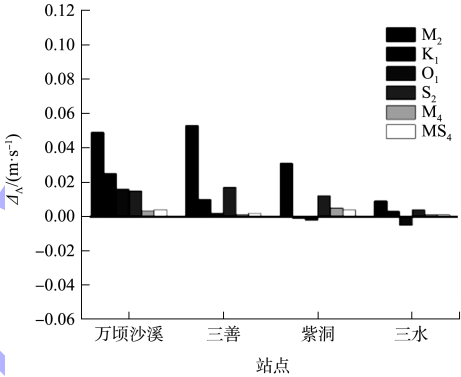
c) 珠江三角洲西江分潮振幅差



e) 2010年珠江三角洲北江潮流分潮振幅沿程变化



d) 1999年珠江三角洲北江潮流分潮振幅沿程变化



f) 珠江三角洲北江分潮振幅差

注：振幅差 $\Delta A = a_{2010} - a_{1999}$ ， a_{2010} 、 a_{1999} 分别表示 2010 和 1999 年的分潮振幅。

图 6 分潮振幅沿程变化及分潮振幅差

表 1 1999、2010 年珠江三角洲西江和北江站点分潮组合相对相位

站点	1999 年			2010 年		
	$\varphi(2M_2 - M_4) / (^\circ)$	$\varphi(M_2 + S_2 - MS_4) / (^\circ)$	$\varphi(K_1 + O_1 - M_2) / (^\circ)$	$\varphi(2M_2 - M_4) / (^\circ)$	$\varphi(M_2 + S_2 - MS_4) / (^\circ)$	$\varphi(K_1 + O_1 - M_2) / (^\circ)$
马骝洲	186	192	46	183	184	45
竹银	191	190	74	191	193	64
南华	209	208	116	199	200	75
马口	205	209	145	201	196	103
万顷沙西	197	196	53	191	193	54
三善	201	203	105	196	197	82
紫洞	213	207	122	201	193	77
三水	216	208	113	196	192	134

由图 6a)、b)、d)、e) 可知，珠江口潮流分潮以 M_2 为主，在最下游站点可达 0.4 m/s，其余潮流分潮振幅均小于 0.2 m/s。由于地形浅化，摩擦及径流的综合作用，西支、北支天文分潮 K_1 、 O_1 、 M_2 、 S_2 振幅沿程减小，且 M_2 、 S_2 衰减程度大于 K_1 、 O_1 ，最上游站点潮流分潮振幅几乎为零。西支马骝洲站至竹银站，浅水分潮 M_4 、 MS_4 振幅有所增加，原因是竹银站河道突然收敛，非线性作用显著增强，极大促进了浅水分潮的生成和发展，竹银站至马口站，摩擦耗散占主导作用， M_4 、

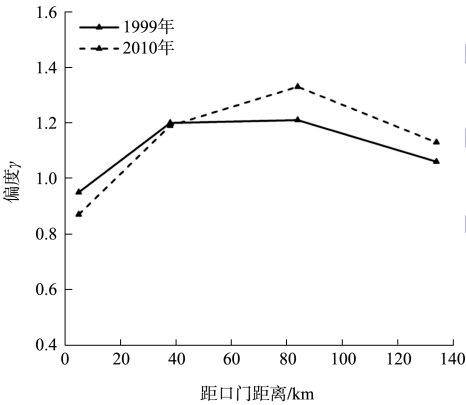
MS_4 振幅沿程减小。北支中摩擦作用引起的耗散大于浅水分潮的生成， M_4 、 MS_4 振幅沿程减小。

河床下切后，水深的增加使得河道摩擦作用相对减弱，潮波能量耗散减慢，根据图 6c)、f) 对比可知：2010 年珠江三角洲西江、北江天文分潮和浅水分潮振幅总体上有所增加，分潮振幅变化在空间上具体表现为西江大于北江、三角洲下游大于三角洲上游。天文分潮中半日潮 M_2 、 S_2 增幅大于全日潮 K_1 、 O_1 ， M_2 分潮增加最为显著，说明水深增加对半日潮的影响大于全日潮，浅水分潮

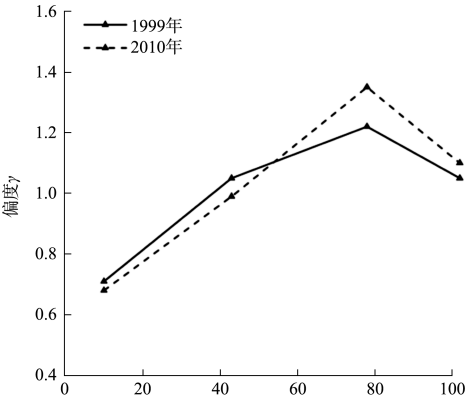
的增大说明了河网内水深的增加更有利于浅水非线性作用。水深增加后潮波传播速度加快, 各分潮相位发生变化, 导致西江、北江分潮组合相对相位总体上有一定幅度减小, 说明分潮组合相位有一定幅度提前, 且三角洲上游相位提前幅度大于下游, 具体见表 1。

3.3 潮流不对称时空变化

本文主要研究 M_2 - M_4 、 K_1 - O_1 - M_2 、 M_2 - S_2 - MS_4 共 3 个分潮组合以及余流、分潮和余流相互作用对潮流不对称的贡献程度, 珠江三角洲西江、北江潮流不对称时空变化见图 7。珠江三角洲径流作用显著, 余流导致西江、北江潮流不对称表现出落潮占优的特性, 落潮流速峰值大于涨潮流速峰值。由图 7 可知: 西江、北江潮流不对称沿河道上游先增大后减小, 潮流不对称峰值发生在西江南华站、北江紫洞站附近, 各分潮组合、余流、分潮和余流相互作用对潮流不对称的贡献见表 2。



a) 西江



b) 北江

图 7 珠江三角洲西江、北江潮流不对称时空变化

表 2 1999 年和 2010 年珠江三角洲西江、北江潮流不对称偏度分解

年份	站点	$\gamma_{M_2-M_4}$	$\gamma_{M_2-S_2-MS_4}$	$\gamma_{K_1-O_1-M_2}$	$\gamma_{余流}$	$\gamma_{分潮-余流}$
1999	马骝洲	-0.049	-0.035	0.210	0.031	0.794
	竹银	-0.061	-0.047	0.057	0.152	1.107
	南华	-0.012	-0.010	-0.090	0.525	0.796
	马口	-0.001	-0.001	-0.009	0.924	0.148
	万顷沙西	-0.111	-0.058	0.183	0.014	0.684
	三善	-0.084	-0.049	-0.087	0.137	1.140
	紫洞	-0.010	-0.007	-0.025	0.700	0.560
	三水	-0.000 6	-0.000 5	-0.002	0.944	0.111
2010	马骝洲	-0.056	-0.043	0.177	0.027	0.770
	竹银	-0.046	-0.046	0.093	0.113	1.079
	南华	-0.036	-0.030	0.046	0.252	1.092
	马口	-0.003	-0.003	-0.004	0.855	0.281
	万顷沙西	-0.110	-0.060	0.185	0.012	0.647
	三善	-0.092	-0.061	0.041	0.072	1.033
	紫洞	-0.033	-0.022	0.021	0.499	0.882
	三水	-0.004	-0.003	-0.008	0.878	0.239

根据表 2 可知: 浅水分潮组合 M_2 - M_4 、 M_2 - S_2 - MS_4 均具有涨潮占优的特性; 天文分潮组合 K_1 - O_1 - M_2 在下游河道表现为落潮占优, 中上游河道表现为涨潮占优。原因是潮波向上游河道传播时, 浅水分潮组合相对相位在 $180^\circ \sim 270^\circ$ 范围内, 相对相位余弦值恒为负值; K_1 - O_1 - M_2 相对相位逐渐超过 90° , 导致相对相位余弦值由正变负, 落潮占优转变为涨潮占优, 分潮组合相对相位值见表 1。相对于分潮组合, 余流、分潮和余流相互作用对潮流不对称起着决定性作用, 两者均具有落潮占优的特性, 随着径流的增强和潮波能量的衰减, 余流对潮流不对称的贡献沿上游河道增加, 分潮和余流相互作用对潮流不对称的贡献沿上游河道减小, 两者之和在西江南华站、北江紫洞站附近达到峰值, 潮流不对称也达到最大。

由图 7 可知, 河床下切后, 珠江三角洲西江、北江下游河道潮流不对称有所减小, 马骝洲站和万顷沙西站偏度值分别减小 0.08、0.03; 中上游河道潮流不对称有所增大, 南华站、紫洞站增加最为显著, 偏度值分别增加 0.12、0.13。将偏度变化值 ($\Delta\gamma = \gamma_{2010} - \gamma_{1999}$) 进行分解, 观察河床下切后各分潮组合、余流、分潮和余流相互作用的变化情况, 结果见图 8。

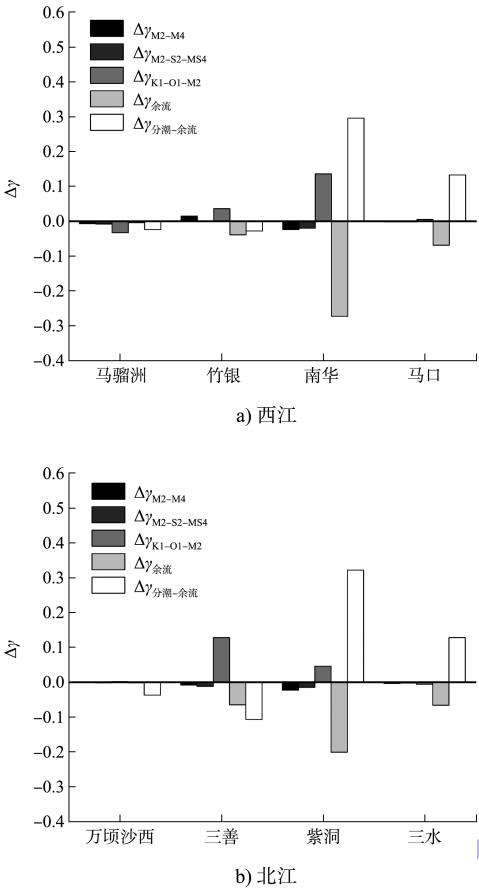


图 8 珠江三角洲西江、北江偏度差值分解

根据图 8，河床下切后，余流的减小导致余流对潮流不对称贡献减小，而分潮和余流相互作用对潮流不对称的贡献表现出下游河道减小、中上游河道增大的趋势，且中上游河道分潮和余流相互作用偏度值的增大幅度超过余流偏度值的减小幅度，说明余流的减小更有利于中上游河道的径潮相互作用，但主要受潮动力影响的下游河道会产生相反的结果。分潮振幅的增加使得各分潮组合对潮流不对称的贡献程度在三角洲中下游河道明显增大，浅水分潮组合 M_2 - M_4 、 M_2 - S_2 - MS_4 涨潮占优趋势有所增强，在三角洲下游河道约占余流及分潮和余流相互作用变化值的 10%~20%； K_1 、 O_1 、 M_2 分潮振幅的显著增加及分潮组合相对相位的提前，使得三角洲下游河道潮流不对称变化以天文分潮组合 K_1 - O_1 - M_2 为主导，但仍小于余流及分潮和余流相互作用两者所带来的变化，因此，珠江三角洲总体表现出下游河道潮流不对称减弱、

中上游河道潮流不对称增强的趋势。

4 结论

- 1) 珠江三角洲受径流影响，余流总体沿上游增大。河床下切后，三角洲余流有不同程度减小，余流变化在空间上表现为西江干流大于北江干流，珠江三角洲上游河道大于中游河道，中游河道大于下游河道。
- 2) 外海潮波进入河口后，潮波能量发生衰减，西江、北江天文分潮振幅向上游沿程减小，浅水分潮振幅在西江竹银站有所增强，北江沿程衰减。河床下切后，珠江三角洲西江、北江总体表现出分潮振幅增大和分潮组合相对相位提前的趋势。
- 3) 珠江三角洲潮流不对称沿上游河道呈现先增大后减小的趋势，西江、北江分别在南华站和紫洞站附近达到峰值。河床下切后，分潮和余流相互作用的变化是导致珠江三角洲下游河道潮流不对称减弱、中上游河道潮流不对称增强的主要原因。

参考文献：

[1] DRONKERS J. Tidal asymmetry and estuarine morphology[J]. Netherlands journal of sea research, 1986, 20(2/3): 117-131.

[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] NIDZIEKO N J, NICHOLAS J. Tidal asymmetry in estuaries with mixed semidiurnal/diurnal tides[J]. Journal of geophysical research, 2010, 115, C08006, doi: 10.1029/2009JC005864.

[4] NIDZIEKO N J, RALSTON D K. Tidal asymmetry and velocity skew over tidal flats and shallow channels within a macrotidal river delta[J]. Journal of geophysical research, 2010, 117, C03001, doi: 10.1029/2011JC007384.

[5] SONG D H, WANG X H, KISS A E, et al. The contribution to tidal asymmetry by different combinations of tidal constituents[J]. Journal of geophysical research, 2011, 116, C12007, doi: 10.1029/2011JC007270.