



# 珠江河口河网咸潮上溯机制的数值模拟<sup>\*</sup>

周荣香<sup>1,2,3</sup>, 季小梅<sup>1,4</sup>, 张 蔚<sup>1,2,3</sup>, 徐龔文<sup>5</sup>

- (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. 河海大学, 疏浚技术教育部工程研究中心, 江苏 南京 210098;
3. 上海滩涂海岸工程技术研究中心, 上海 200061;
4. 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029;
5. 水利部珠江河口动力学及伴生过程调控重点实验室, 广东 广州 510611)

**摘要:** 随着全球变暖导致海平面上升和人类活动的加剧, 珠江三角洲的咸潮灾害日趋严重, 分析咸潮上溯主要动力因素及响应趋势非常必要。构建珠江河口河网一、三维耦合水流盐度模型, 对地形、上游主要节点流量以及海平面上升高度进行敏感性试验, 利用通量机制分解方法分析不同情况下西江、北江干流的沿程盐通量, 探讨河口河网咸潮上溯对主要动力因素变化的响应规律。结果表明, 各口门的盐通量均以平流运输项为主导; 地形变化与上游径流量对盐通量影响远大于海平面上升; 上游主要节点的径流量在大潮时主要控制平流运输项和剪切扩散项来调节盐通量, 小潮时潮泵运输项变化相对较大; 海平面上升对潮控口门(如洪奇门)的影响大于径控口门(如磨刀门), 但短期内影响相对较小。

**关键词:** 珠江河口河网; 咸潮上溯; 盐通量分解; 人类活动; 海平面上升

**中图分类号:** TV 148.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2021)06-0033-09

## Numerical simulation of salinity intrusion mechanism in the Pearl River Estuary network

ZHOU Rong-xiang<sup>1,2,3</sup>, JI Xiao-mei<sup>1,4</sup>, ZHANG Wei<sup>1,2,3</sup>, XU Yan-wen<sup>5</sup>

- (1. Jiangsu Key Laboratory of Coast Ocean Resources Development and Environment Security, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Engineering Research Center of the Education Ministry of Dredging Technology, Hohai University, Nanjing, 210098, China;
3. Shanghai Engineering Research Center of Coastal Zones, Shanghai 200061, China; 4. Key Laboratory of Port, Waterway & Sedimentation Engineering, Ministry of Communications, PRC, Nanjing 210029, China; 5. Key Laboratory of the Pearl River Estuarine Dynamics and Associated Process Regulation, Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China )

**Abstract:** Under the influence of sea-level rise caused by global warming and intensive human activities, salinity intrusion in the Pearl River Delta (PRD) has obviously intensified. It is necessary to analyze the main dynamic factors and the response trends of salinity intrusion. We establish a coupled 1D-3D coupled water salinity model, carry out the sensitivity test with the topography, upstream discharge at main station and sea-level rise changing respectively, apply the flux mechanism decomposition method to analyze the salt flux along the main streams of Xijiang River and Beijiang River, and discuss the response law of salinity intrusion in the estuary network to the change of main dynamic factors. The results show that the salt transport flux at all outlets are dominated by advection transport. Changes in topography and upstream discharge have a greater impact on the salt transport flux than the sea level rise. The salt transport flux increases less at the entrance after riverbed cutting and increases more

**收稿日期:** 2020-08-31

**\*基金项目:** 水利部珠江河口动力学及伴生过程调控重点实验室开放研究基金资助项目(2018KJ05); 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); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B200204036)

**作者简介:** 周荣香(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为河口海岸及近海工程水动力。

**通讯作者:** 张蔚(1979—), 男, 博士, 教授, 研究方向为河口海岸水动力与地貌。E-mail: zhangweihu@126.com。

in the upstream direction. During the spring tide, the advection transport and steady shear transport are mainly controlled by the upstream discharge at the main station to adjust the salt transport flux. During the neap tide, the tidal oscillatory transport for tide pumping is relatively large. The impact of sea-level rise on tide-dominated outlets (e.g. Hongqimen) is greater than that of river-dominated outlets (e.g. Modaomen), but the impact of sea-level rise in the short term is relatively small.

**Keywords:** the Pearl River Estuary network; salinity intrusion; salt flux decomposition; human activity; sea-level rise

河口咸潮上溯的动力学机制研究是深入理解河口水动力过程的关键科学问题之一<sup>[1]</sup>, 其研究对整个三角洲地区的出海航道的维护以及咸潮治理、口门区域的开发规划和社会经济的发展都有着重大意义。目前较为典型的分析咸潮上溯动力机制的方法是盐通量机制分解<sup>[2]</sup>。盐通量机制分解方法被应用于各大河口<sup>[3-5]</sup>。即使在同一河口的不同区域, 其主导机制也会突然发生变化。例如, 在梅里马克河口, 口门处束窄, 盐通量输运主要由潮泵作用引起, 但河口内部的盐通量输运主要受潮汐不对称性影响<sup>[6]</sup>。同样, 盐通量的输送机制也会在同一河口的不同时期发生变化。以珠江河口磨刀门水道为例, 大潮时由流速切变引起的咸潮上溯较强, 小潮时则由潮汐振荡产生的盐通量输运机制更强<sup>[7-8]</sup>。

河口河网地区的咸潮上溯过程极其复杂, 受到径流、潮汐等多种动力因素的耦合作用, 还与河口河网的地形密切相关<sup>[9-10]</sup>。珠江三角洲三江汇流, 八口入海, 具有繁复的地形特征和动力条件。由于净泄量和地理位置不同, 出海的八大口门径潮动力差异明显, 咸潮上溯规律也各不相同, 上溯过程中潮波变形过程相对复杂, 整个区域盐度的平面扩散与垂向掺混都受到了影响<sup>[11]</sup>。为了充分掌握咸潮上溯过程和盐通量大小, 需要建立数学模型辅助进行研究。本文通过构建一维河网与三维河口耦合的水动力盐度模型, 计算珠江八大口门盐通量的潮周期变化及沿程分布情况, 探讨海陆相多因素驱动对珠江河口河网地区咸潮上溯的影响。根据不同地形效应、典型人类活动、极

端气候条件下的盐度输运, 研究河口咸潮上溯基本规律, 为咸潮上溯预报模型提供理论与技术支撑。

1 研究方法

1.1 数值模型

1.1.1 一、三维耦合水流盐度模型

在研究中采用显式耦合方法<sup>[12]</sup>进行一、三维模型耦合, 对于河网部分, 采用一维模型; 对于河口部分, 采用三维模型。一维模型为三维模型提供流量, 三维模型为一维模型提供水位。水位定义在网格中心, 流量定义在网格边界, 一维和三维模型交叠半个网格, 每个时间步长, 三维网格将水位传给一维模型, 一维模型将流量传给三维模型。在一维模型中, 上游流量边界为高要、石角、博罗、老鸦岗、石嘴 5 个水文站点, 下游水位边界分别定于八大口门处的大虎、南沙、冯马庙、横门、灯笼山、黄金、西炮台及官冲。珠江三角洲河网被概化为 113 条河道, 5 061 个计算断面, 216 个河流汉口节点, 模型的网格步长在 50~1 000 m。在三维模型中, -30 m 等深线为外海开边界, 该边界距离河口足够远, 以使其在潮汐影响下保持稳定。计算区域由曲线正交网格离散化。空间步长在水平范围内从 0.1 ~ 1 km。网格相对较小, 适合狭窄的河道, 而在外部海洋区域则较大。网格在垂直方向上分为 20 层, 每层沿水深均匀分布。

上边界流量选取 2001 年枯季 (2001-02-07 T14:00—2001-02-16T10:00) 每小时实测流量, 以

及 1984—2012 年计算所得的枯季多年平均流量, 盐度取 -30~0 m 等深线为外海开边界, 下边界潮汐使用 TPX08 全球大洋潮汐模式<sup>[13]</sup>得到的潮位时间序列。根据统计资料, 模型在从陆地到外海的西南开边界盐度值为 20~33 psu, 东北开边界盐度值为 25~33 psu, 东南开边界盐度值为 33 psu。模型水动力模块参数的调整关键在于河床糙率系数的给定, 通过给定合适的曼宁值来定义各河道的糙率。在本模型中, 给定全河网区一个全局曼宁值 0.025。曼宁值从上游到口门逐渐减小, 网河区上游马口段为 0.028, 北江上游三水段为 0.030, 网河区中段平均为 0.025, 伶仃洋内平均为 0.016。

1.1.2 模型结果验证

为了确保模型的运行精确度, 根据现有的水文实测资料选取了 2001 年枯季的 25 个水位、流量站以及 20 个盐度站对本模型进行验证。

评估此模型精度时采用的公式为:

$$SS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{mol,i} - X_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{mol,i} - \bar{X}_{obs})^2} \quad (1)$$

式中: SS 为模型精度的检验参数;  $X_{mol,i}$  为模型计算数值;  $X_{obs,i}$  为实测数值;  $\bar{X}_{obs}$  为实测值的平均值。判别标准为:  $SS < 0.20$  时为差;  $0.20 \leq SS < 0.50$  时为好;  $0.50 \leq SS \leq 0.65$  时为很好;  $SS > 0.65$  时为极好。

验证结果见图 1。可以看出, 计算的水位过程与实测资料吻合极好, 各站点 SS 均大于 0.65。流量过程与实测资料验证, 大部分站点 SS 大于 0.65, 小部分站点流量的 SS 在 0.50~0.65, 可能是由于河网区挡潮闸调度、水库运用等因素造成。盐度验证的 4 个站点 SS 在 0.50~0.65, 其余站点 SS 均大于 0.65, 低盐度易受风等其他因素影响而很难模拟。另外, 盐度绝对值太小会导致较大的相对误差, 但整体能很好地反映盐度分布, 验证结果较好。

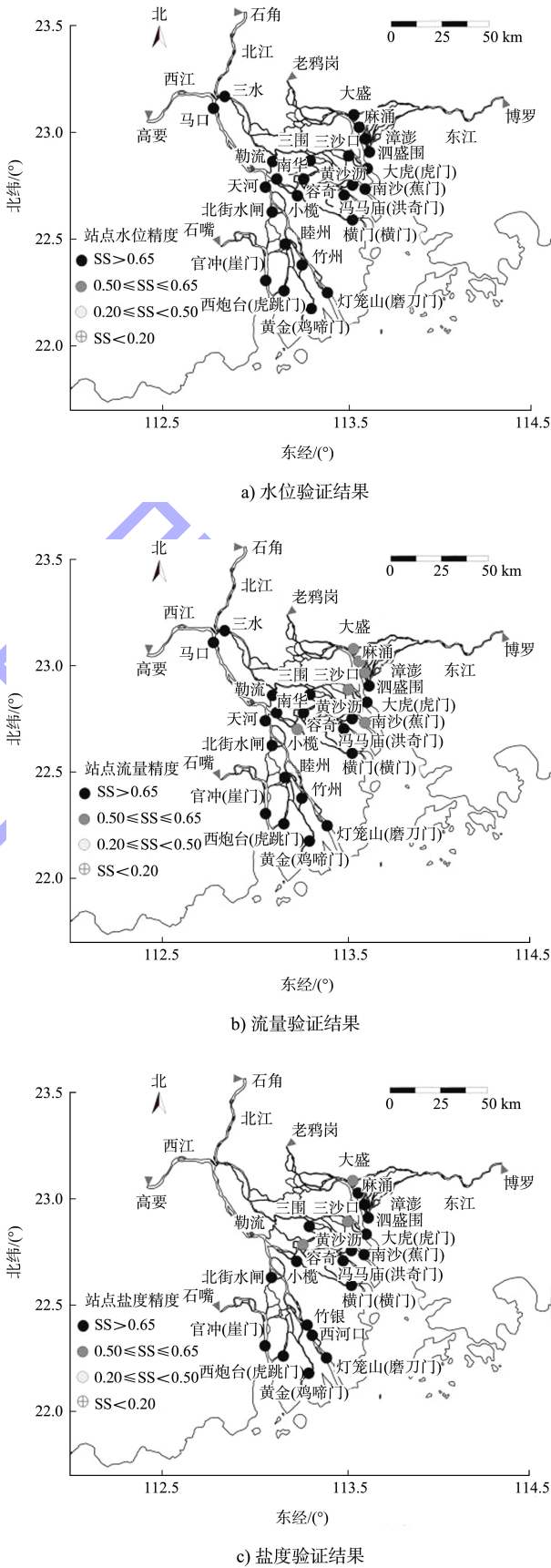


图 1 珠江三角洲地形及模型验证结果

1.2 盐通量机制分解

通过数值模型计算指定断面连续潮周期内的盐通量,其断面盐通量潮周期变化以及沿上溯路径盐通量的沿程变化情况能较好地反映珠江口的咸潮上溯情况。

根据文献[8]的方法进行盐通量机制分解。断面总通量  $F_s$  的公式为:

$$F_s = \int u s dA \tag{2}$$

式中:  $u$  为流速;  $s$  为盐度;  $A$  为断面面积。流速  $u$  和盐度  $s$  分解为断面均值的潮平均项  $\phi_0$ 、断面均值的潮脉动项  $\phi_E$ 、对断面均值的偏差  $\phi_T$ ,  $\phi$  表示流速  $u$  或盐度  $s$ , 则有:

$$\phi_0 = \frac{1}{A_0} \langle \int \phi dA \rangle \tag{3}$$

$$\phi_E = \langle \frac{h+\eta}{h} \phi \rangle - \phi_0 \tag{4}$$

$$\phi_T = \phi - \phi_E - \phi_0 \tag{5}$$

将式(3)~(5)代入式(2), 得:

$$\begin{aligned} F_s &= \langle \int (u_0 + u_E + u_T) (s_0 + s_E + s_T) dA \rangle \\ &\approx \langle \int (u_0 s_0 + u_E s_E + u_T s_T) dA \rangle \\ &= Q_0 s_0 + F_E + F_T \end{aligned} \tag{6}$$

式中:  $\langle \rangle$  表示潮平均值;  $h$  为计算平面下的总水深;  $\eta$  为水面相对于计算基面的水位。盐通量分解计算后分为3项, 分别为  $Q_0 s_0$  平流运输项(断面潮平均输移)、 $F_E$  剪切扩散项(由潮平均垂向及横向剪切扩散引起)以及  $F_T$  潮泵运输项(流速与盐度的时间关联, 时均与潮振动相关)。通量为正表示向海输送, 通量为负表示向岸输送。

2 结果分析与讨论

2.1 盐通量对地形变化的响应

珠江河口河网地区长期无序采砂导致河床严重下切<sup>[14]</sup>, 为了进一步揭示珠江河口河网地区不同地形水深对盐通量的影响, 模型仅改变地形条件, 保持其他条件不变, 并将2010与1999年地形条件下的结果进行对比。

不同地形下, 西江、北江水位沿程均呈现出沿程逐渐增加的趋势, 见图2, 2010年西江的沿

程水位从口门向上均低于1999年, 减少最大值达到13 cm。北江口门附近水位反而升高, 其原因在于北江的潮动力较强, 口门附近水位由于潮汐水流的顶托作用非但没有降低反而增高, 西江则以径流为主导动力。西江和北江沿程盐度变化梯度较大。地形变化后盐度均明显增大, 以0.5 psu 盐度值作为咸淡水分界, 1999年地形下, 西江咸潮上溯距离为21 km, 北江为16 km。但地形改变之后, 西江上溯距离增加了11 km, 而北江增加了22 km, 明显大于西江。地形变化所引起潮流动力的相对增强使海水能够沿河口通道上溯得更远。但两者均在口门处变化较小, 向上游变化加大。这里的盐通量是指从某一段涨潮开始时间到结束时间所经过的总盐通量。盐通量的大小在一定程度上与断面流量(即涨落潮量)有关。盐通量沿程降低也是由于盐度沿程降低。西江盐通量明显大于北江, 且西江的盐通量变化比北江大, 但是北江盐通量的响应上溯得更远, 也都有在口门附近变化稍小、延伸变化加大再变小的趋势。

从八大口门代表站点的盐通量分解来看, 各分解项均在大潮时较大, 小潮时逐渐减小, 见图3。从官冲(崖门)一灯笼山各口门以潮泵运输项转变为以平流运输项皆占优, 而后至虎门逐渐转变为以潮泵运输项占优, 说明自西向东各口门从潮控转变为径控再变为潮控。平流运输项通常随着流量变化而变化, 但也会受到大小潮变化的影响。表明在平流运输的作用下盐通量大多向海输运, 通过河口断面向上游输移, 使上溯流加强, 下泄流减弱, 咸潮入侵也进一步加剧。剪切扩散项在量级上要远小于其他两项, 这一项实质上是对平流运输的补充, 在盐度混合比较均匀的河口区域可以忽略不计。潮泵运输项主要与潮汐的不对称输运以及流速盐度的相位有关, 具有明显的潮周期变化, 以向海运输为主, 只有横门、冯马庙(洪奇门)向岸运输。在地形改变之后, 河床发生明显下切, 各分解项均明显增加, 尤其在洪奇门, 河床下切使潮泵运输项影响代替平流运输项成为主导, 盐通量运输方向也由向海转为向岸, 说明会影响潮汐上溯过程中的不对称性。



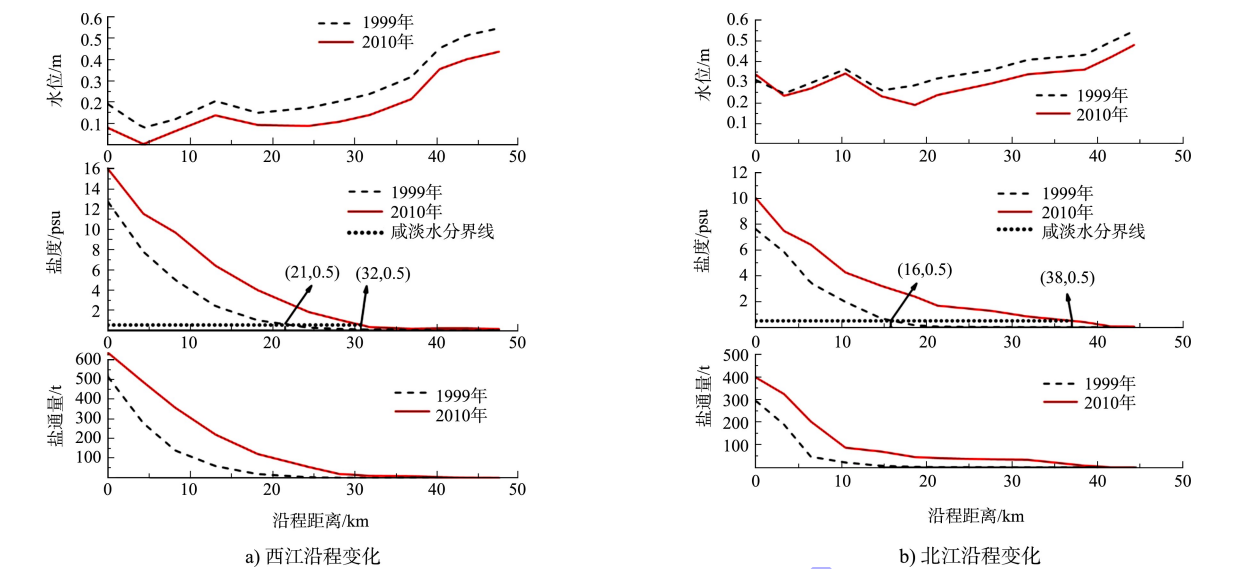
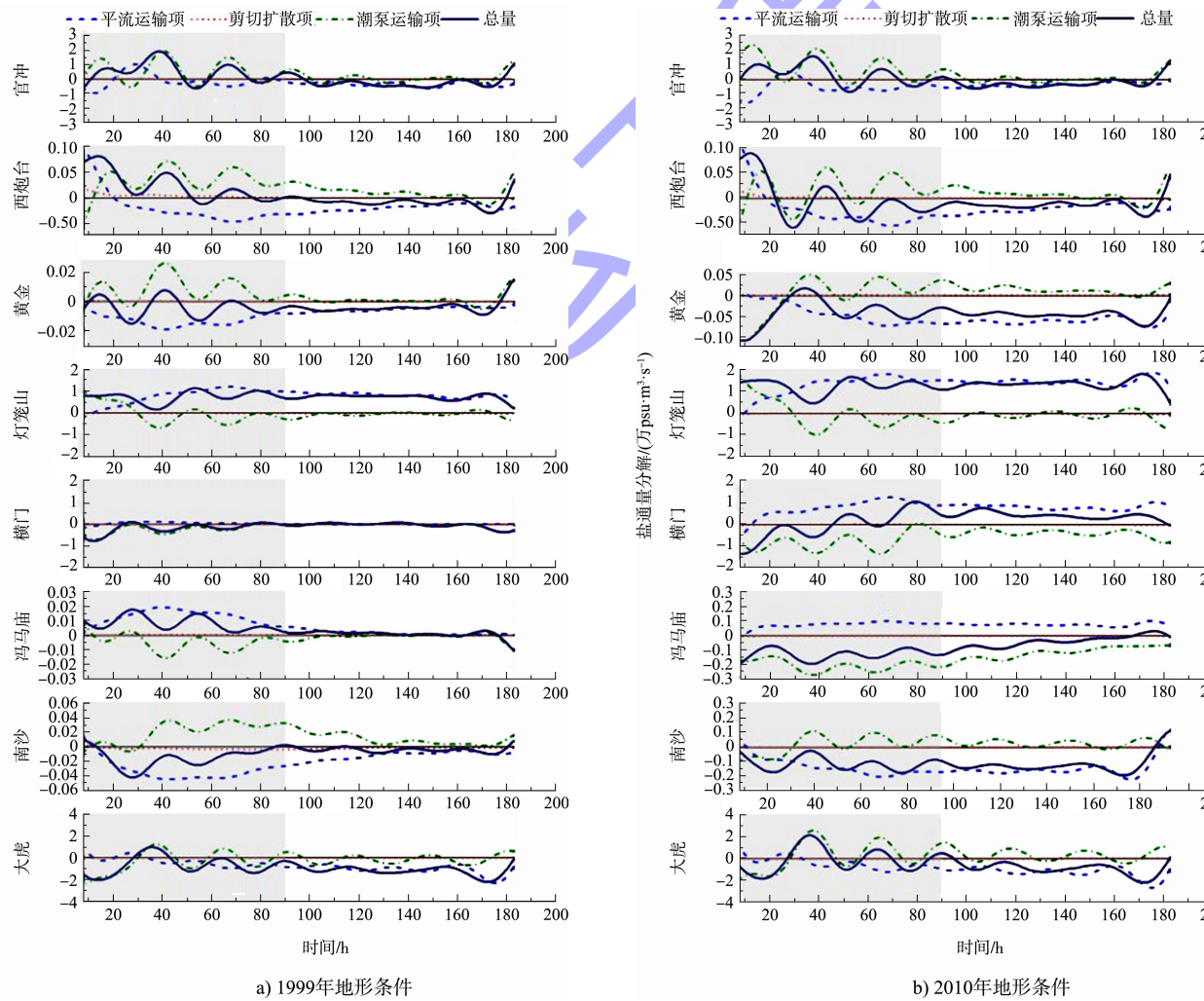


图 2 不同地形下西江、北江沿程水位、盐度、盐通量



注: 灰色区域表示大潮时期。

图 3 不同地形下八大口门代表站点盐通量

2.2 盐通量对径流变化的响应

本文进行敏感性试验, 相关取值见表 1。在 2010 年地形条件下, 根据多年实测资料, 计算高要、石

角、博罗的多年枯季平均流量，以此为基础对上游边界点进行同倍比调水，为试验 1~8 对应 0.50~2.25 倍流量。

表 1 敏感性试验流量取值

编号	平均潮差/ m	流量/( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ )		
		高要	石角	博罗
1	1.68	1 000	250	100
2		1 500	375	200
3		2 000	500	300
4		2 500	675	400
5		3 000	750	500
6		3 500	875	600
7		4 000	1 000	700
8		4 500	1 125	800

注：试验 3 为枯季多年平均流量，其他按相应倍数调整。

随着上游径流量的增加，河道内水流壅滞，沿程的水位均匀增加，见图 4。而来自上游的淡水流量加大压制住口外涨潮送来的高盐海水，沿程盐度则逐步减小，在枯季多年平均流量时，咸潮上溯距离为 26 km，在达到 1.75 倍流量时，即高要和石角总流量为  $4\,375\text{ m}^3/\text{s}$  时，上溯距离已经降至 21 km。沿程盐通量变化更加复杂，在靠近口门区域基本是流量最小时盐通量最大，但在距口门 16 km 处开始，沿程盐通量随流量的增加而不断减少，这时随着潮流不断向上游推进，在河床阻力的作用下，涨潮量不断减小，与淡水混合的咸潮越来越少，盐度值也降低，盐通量也不断减小。

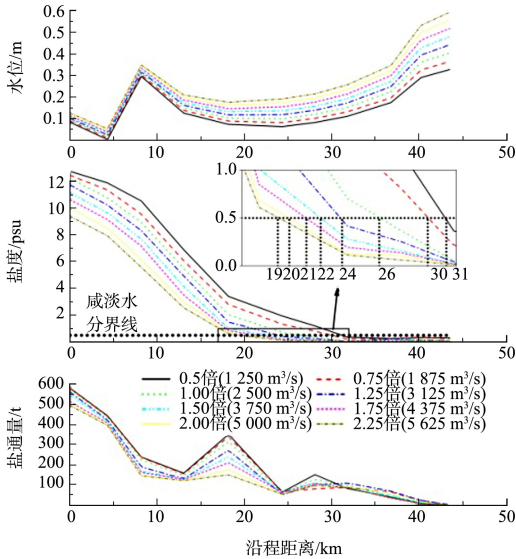
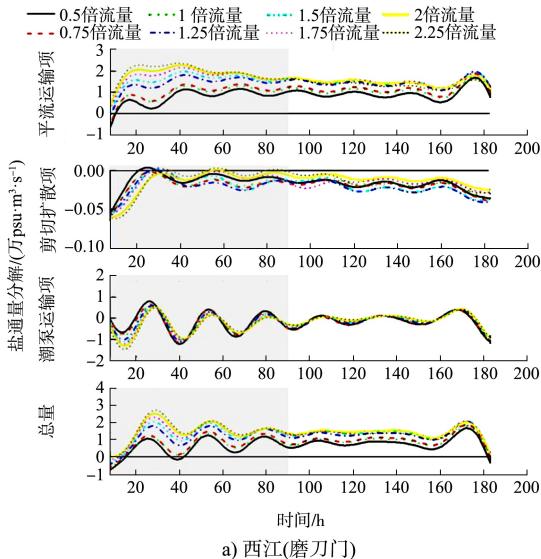
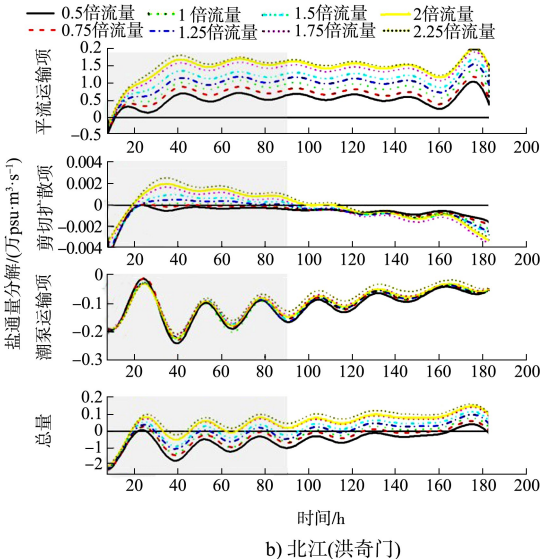


图 4 不同流量下西江沿程水位、盐度、盐通量

将流量变化对整个区域的盐度场进行分析，发现主要对西江及北江干流产生影响，因此只分析西江及北江干流及其口门磨刀门(灯笼山)、洪奇门(冯马庙)盐通量的响应。流量变化过程中，盐通量各分解项均在大潮时变化较大，小潮时变化相对较小，并且大潮时主要控制平流运输项和剪切扩散项来调节盐通量，见图 5。盐通量在磨刀门的响应更为复杂，在磨刀门以平流运输项为主导，随着上游径流的加大，在大潮时各分解项值也增大，平流运输项和剪切扩散项在大潮向小潮过渡的过程中，变化幅度明显降低，而对潮泵运输项的影响则较小。洪奇门同样对潮泵运输项的影响较小，主要变化在另外两项，潮泵项小潮时变化比大潮时更明显。



注：灰色区域表示大潮时期。

图 5 不同流量下西江(磨刀门)、北江(洪奇门)盐通量分解项

2.3 盐通量对海平面变化的响应

考虑最不利情况下海平面变化, 按 1.1 cm/a 考虑, 分别将外海开边界的潮位增加 30、50、100、150 cm 进行计算。

海平面上升前后, 就短期来看, 海平面上升对咸潮上溯的影响比较小, 但是在海平面上升不断加剧过程中, 还是对咸潮上溯产生了很大影响, 见图 6。西江、北江水位沿程增加, 而盐度和盐通量沿程减小。海平面上升以后, 西江沿程水位有不同程度的抬高, 影响范围和影响值随海平面上升值值的加大而加大, 河口附近地区的影响稍大, 向上游逐渐减小, 但不是很明显, 且水位的上升值与海平面上升值基本相当。根据沿程盐度可以看出, 在口门

处的变化量明显小于向上游延伸后的变化量, 在海平面上升高度在 50 cm 以内时, 与地形变化相比非常小。但可以发现在上升到150 cm后上溯距离达到 35 km, 已经超过地形变化的影响, 但沿程盐通量均匀减少。北江水位沿程略有起伏但总体增加, 海平面上升以后, 沿程水位的变化趋势与西江基本相同, 但总的上溯距离增长量略大于西江。而盐度和盐通量依然沿程减小, 沿程盐度的变化趋势与西江基本相同, 但上溯距离的增长量要大于西江。影响范围因河口洪潮特性(包括径流强度、水面比降等)不同而有所差异, 一般潮流河口口略大于径流河口。沿程盐通量由于地形影响不再均匀减少, 在口门 7 km处变化幅度较大。

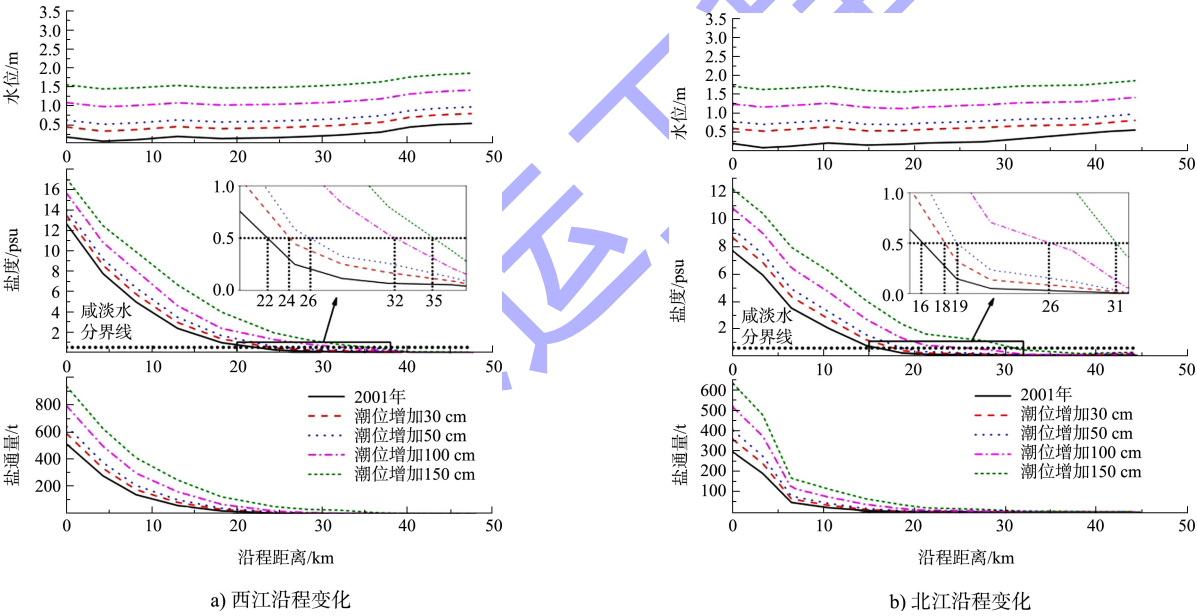


图 6 海平面上升不同高度下西江、北江沿程水位、盐度、盐通量

海平面上升的影响也只考虑西江干流及其口门磨刀门(灯笼山), 北江干流及其口门洪奇门(冯马庙)盐通量的响应。随着海平面不断上升, 各分解项的值也随之增加, 产生的影响主要在洪奇门, 对磨刀门的影响较小, 说明潮汐作用在洪奇门为主导作用, 见图 7。在磨刀门, 平流运输项也随着海平面上升而增加, 但变化

幅度非常小, 相对于平流运输项, 海平面上升对剪切运输项和潮泵运输项产生影响较大, 并且增长主要发生在大潮时期。随着海平面上升高度的增加, 变化幅度也加大, 但进入小潮之后逐渐减弱。而洪奇门各分解项均为向海运输, 整体在大潮时增加幅度较大, 进入小潮后则增加幅度变小。



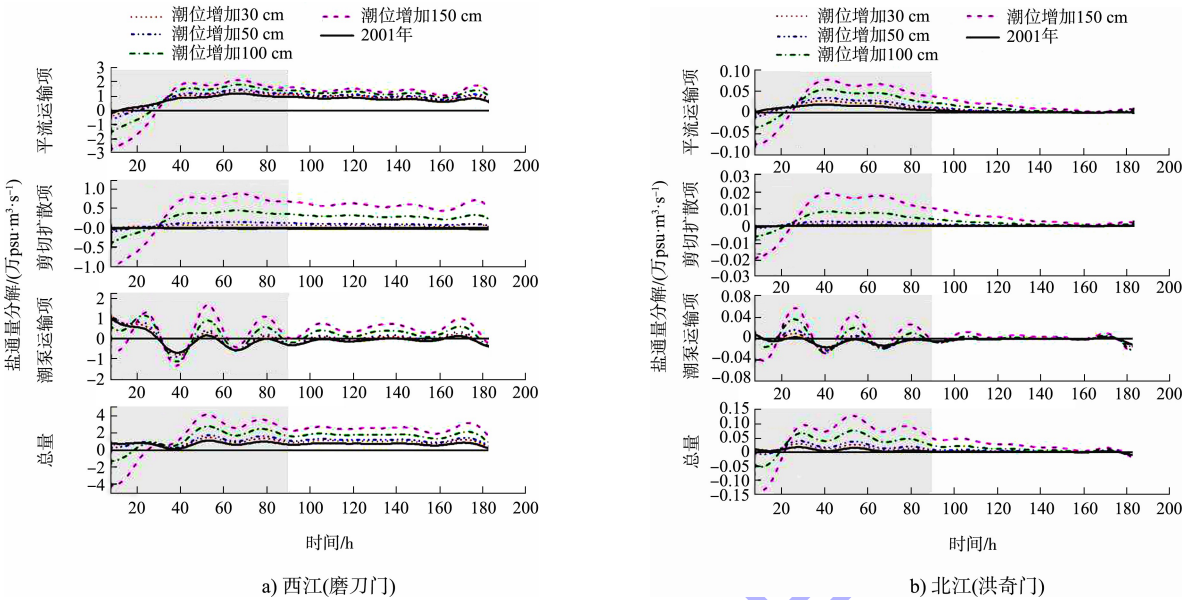


图 7 海平面上升不同高度下西江(磨刀门)、北江(洪奇门)盐通量分解项

3 结论

1)地形改变后西北江干流的水位明显下降。沿程盐通量剧烈增加,在口门增加较小,而向上游后增加较大。盐通量机制分解后,可以发现盐通量在大潮时产生的改变更大,在小潮时的影响相对较小,但在潮控口门各时期影响均较大。地形改变同时会增加潮泵运输的影响,说明地形改变会影响上溯过程中的潮汐不对称性。河道河床地形的下切引起河槽容量的增加为潮汐涌入提供空间,使潮流动力相对增强,海水也能够从河口沿河道上溯得更远,从而影响到沿岸居民的生活生产。因此需要对区域内河道采砂活动进行合理的规划和监督。

2)上游主要节点的径流量基本能调控整个河口河网地区的盐度分布情况,并且大小潮时都有较大影响。上游流量每增加 0.25 倍,咸潮上溯距离减少约 4 km,可以有效调节区域内的咸潮上溯情况。同时通过对上游流量的调节,在小潮时利用水库蓄积淡水,以更好地进行咸潮治理,减少大潮期间咸潮上溯造成的损失。

3)海平面上升过程中对西北江沿程水位影响较大,水位抬升高度值与海平面上升高度值基本相当,沿程盐度在北江的变化要大于在西江的变

化,说明潮控口门对海平面上升的响应较为明显。盐通量机制分解后,发现海平面上升主要会增加剪切运输项和潮泵运输项,对平流运输项的影响不大。就短期来看,海平面上升对咸潮上溯的影响相对较小,但海平面上升达到一定程度时,其影响仍然不可忽略,须保持警惕。

参考文献:

[1] LERCZAK J A, GEYER W R, CHANT R J. Mechanisms driving the time-dependent salt flux in a partially stratified estuary[J]. Journal of physical oceanography, 2006, 36(12): 2296-2311.

[2] 肖莞生, 陈子燊. 珠江河口区枯季咸潮入侵与盐度输运机理分析[J]. 水文, 2010, 30(3): 10-14, 21.

[3] GEYER W R, MACCREADY P. The estuarine circulation[J]. Annual review of fluid Mechanics, 2014, 46: 175-197.

[4] GEYER W R, RALSTON D K, HOLLEMAN R C. Hydraulics and mixing in a laterally divergent channel of a highly stratified estuary[J]. Journal of geophysical research (oceans), 2017, 122(6): 4743-4760.

[5] 潘明婕, 杨芳, 荆立, 等. 台风“纳沙”过境期间磨刀门水道咸潮上溯的动力机制[J]. 水资源保护, 2019, 35(4): 42-48.

[6] RALSTON D K, GEYER W R, LERCZAK J A. Structure,



variability, and salt flux in a strongly forced salt wedge estuary[J]. Journal of geophysical research( oceans ), 2010, 115: 1-21.

[7] GONG W P, SHEN J. The response of salt intrusion to changes in river discharge and tidal mixing during the dry season in the Modaomen Estuary, China [J]. Continental shelf research, 2011, 31( 7) : 769-788.

[8] GONG W P, MAA J P Y, HONG B, et al. Salt transport during a dry season in the Modaomen Estuary, Pearl River Delta, China[J]. Ocean & coastal management, 2014, 100: 139-150.

[9] LIU B J, LIAO Y Y, YAN S L, et al. Dynamic characteristics of saltwater intrusion in the Pearl River Estuary, China[J]. Natural hazards, 2017, 89( 3) : 1097-1117.

[10] HE W, ZHANG J, YU X D, et al. Effect of runoff variability and sea level on saltwater intrusion: a case study of Nandu

River Estuary, China[J]. Water resources research, 2018, 54( 12) : 9919-9934.

[11] 孔兰, 陈晓宏. 珠江口咸潮影响因素分析[J]. 水资源保护, 2015, 31( 6) : 94-97, 134.

[12] TWIGT D J, GOEDE E D D, ZIJL F, et al. Coupled 1D-3D hydrodynamic modelling, with application to the Pearl River Delta[J]. Ocean dynamics, 2009, 59( 6) : 1077-1093.

[13] JI X M, ZHANG W. Tidal influence on the discharge distribution over the Pearl River Delta, China[J]. Regional studies in marine science, 2019, 31( 10) : 1-12.

[14] WU Z Y, MILLIMAN J D, ZHAO D N, et al. Recent geomorphic change in LingDing Bay, China, in response to economic and urban growth on the Pearl River Delta, Southern China[J]. Global and planetary change, 2014, 123: 1-12.

( 本文编辑 王璁 )

~~~~~  
( 上接第 25 页 )

因此, 在保证足够的倒车距离的前提下, 试验船舶可安全离泊。此外, 结合图 6 可以看出潮流变化对于安全线距离的影响较小, 距离变化有足够的冗余范围, 车客渡、客轮的操纵性能完全可以克服不利水流条件。且各船舶均为双发动机, 在离泊条件较不利的情况下, 可选择靠泊时在开阔水域提前掉头、倒车后以船首朝东方式靠泊( 船尾上客, 如试验 E 中靠泊过程), 保证顺利离泊。

3 结论

1) 所采用的实测方案可准确观测影响船舶操纵安全的各影响因素, 准确量化的影响因素数据可用于分析船舶操纵安全性。

2) 结合实测自然条件数据以及船舶轨迹, 在保证足够倒车距离的前提下, 试验船舶均可在靠离泊过程中与拟建三期码头保持安全距离, 码头的平面布置较为合理。在离泊条件较不利的情况下, 可选择在靠泊时在开阔水域提前掉头、倒车后以船首朝东方式靠泊( 船首上客), 保证顺利离泊。

参考文献:

[1] 李胜为, 陈智辉, 陈立家, 等. 六鳌重装码头船舶操纵模拟试验[J]. 中国水运( 下半月), 2019, 19( 8) : 11-13.

[2] 张定军, 高鹏, 赵传刚, 等. 基于船舶操纵模拟的某海港码头港内水域布置优化[J]. 水道港口, 2016, 37( 6) : 589-592.

[3] 俞家锐, 李向宇. 沈家湾区域复杂水域环境对船舶施工的影响[J]. 水资源开发与管理, 2019( 2) : 66-69.

[4] 严伟, 陈永奎, 杨文俊. 三峡工程明渠通航船模与实船试验[J]. 长江科学院院报, 2000( 2) : 1-5.

[5] 杨忠超, 陈明栋, 陈明. 水富港靠泊安全及进出港航行条件实船试验[J]. 水利水运工程学报, 2012( 4) : 19-23.

[6] 李宝玉, 刘垒, 张建宝, 等. 船舶靠离泊过程中安全影响因素及应对措施分析[J]. 珠江水运, 2015( 7) : 64-66.

[7] 曾志, 陈智杰, 郑斌鑫, 等. AWAC 在海洋波浪观测应用中若干问题的探讨[C] //中国海洋工程学会. 第十六届中国海洋( 岸) 工程学术讨论会论文集( 上册) [C]. 北京: 海洋出版社, 2013.

[8] 左其华. 现场波浪观测技术发展和应用[J]. 海洋工程, 2008( 2) : 124-139.

( 本文编辑 王璁 )