

DOI: 10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2019. 04. 007

台风“纳沙”过境期间磨刀门水道咸潮上溯的动力机制

潘明婕^{1,2}, 杨 芳³, 荆 立^{1,4}, 罗照阳¹, 王 青¹, 孔 俊¹

(1. 海岸灾害及防护教育部重点实验室(河海大学), 江苏 南京 210098; 2. 南京昊控软件技术有限公司, 江苏 南京 211100; 3. 珠江水利委员会珠江水利科学研究所, 广东 广州 510611; 4. 生态环境部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042)

摘要:选取典型台风“纳沙”, 采用 SCHISM 模型建立磨刀门水道三维水流盐度数值模型, 结合辛普森数(Simpson number)和盐通量机制分析法, 研究台风过境期间磨刀门水道咸潮上溯的动力机制。结果表明:台风在短时间引起强烈的盐水入侵, 在水道内形成明显的盐淡水分层, 进而引发较强的纵向环流; 台风期水道中游呈现应变致周期性层化状态, 水道中的纵向环流主要是受潮汐应变驱动形成; 台风期盐度分布呈现出“双峰”特征, 这与台风“纳沙”增水效应引起平流通量转而向陆输送的动力过程密切相关。

关键词:台风; “纳沙”; SCHISM 模型; 咸潮; 河口环流; 磨刀门水道

中图分类号:TV143; P731.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2019)04 - 0042 - 07

Dynamic mechanism of salinity intrusion in Modaomen Waterway during typhoon "Nesat" transit // PAN Mingjie^{1,2}, YANG Fang³, JING Li^{1,4}, LUO Zhaoyang¹, WANG Qing¹, KONG Jun¹ (1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence (Hohai University), Ministry of Education, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Hawksoft Technology Co. Ltd., Nanjing 211100, China; 3. The Pear River Hydraulic Research Institute, Pearl River Water Resources Commission, Guangzhou 510611, China; 4. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China)

Abstract: Choosing the typical typhoon "Nesat", a Modaomen Waterway three-dimensional baroclinic model which was established by the SCHISM model, combined with the Simpson number and salt flux mechanism analysis methods, were applied to study the change process of salinity intrusion dynamic mechanism in Modaomen Waterway during the typhoon transit. The results show that the typhoon caused strong saltwater intrusion in a short time, forming obvious water stratification in the waterway, resulting in a strong longitudinal circulation. It exhibits strain-induced periodic stratification (SPIS) state in the midstream of the waterway during typhoon, and the longitudinal circulation in the waterway is mainly driven by the tidal strain. The salinity distribution showed a double - peak characteristics in this period, which is closely related to the dynamic process of conversion of horizontal flux to land, which caused by the increasing water effect of typhoon "Nesat".

Key words: typhoon; "Nesat"; SCHISM; saltwater tide; estuarine circulation; Modaomen Waterway

磨刀门水道是中山、珠海、澳门特别行政区的主要饮用水水源地,其水质安全对周边城市的经济、社会发展有重要的影响。2000 年以来,受河道疏浚、围垦工程、人工采砂等人类活动的影响,磨刀门盐水入侵问题日益严峻,极大地威胁到周围城市的供水安全^[1]。磨刀门水道地处亚热带季风气候区,临近南海,容易受到热带气旋的袭击。根据 1949—2008

年在珠江三角洲登陆的热带气旋资料统计,平均每年有 5.7 个热带气旋在此登陆。受台风天气的影响,磨刀门水道盐水入侵的形势变得更为复杂。

针对河口地区的咸潮上溯问题,近年来国内外众多学者开展了深入的研究^[2-3]。Li 等^[4]揭示了强台风影响下,半封闭海湾经历了强盐水上涌、盐淡水分层破坏以及台风过后受重力调整的再次层化过

基金项目:国家自然科学基金(51479055);江苏省六大人才高峰项目(HYGC-004);水利部公益性行业科研专项(201501010)

作者简介:潘明婕(1993—),女,助理工程师,硕士,主要从事河口海岸水动力机理及模拟技术研究。E-mail: panmingjie1993@126.com

通信作者:孔俊,教授。E-mail: kongjun999@126.com

程。Gong 等^[5]基于大量实测数据,利用 EFDC 建立了磨刀门水道三维水流盐度数值模型,分析了枯季盐度输运动力特征,结果显示磨刀门盐水入侵主要受潮汐和径流的相互作用,大的径流量能有效抑制盐水入侵。刘吉等^[6]通过分析 2008 年强台风“黑格比”登陆期间磨刀门水道纵向盐度变化发现,风暴潮期间磨刀门水体盐度具有突发、单峰特征,且盐度变化过程与增水过程基本一致。Burchard 等^[7]指出,在较弱盐度梯度力作用下,潮汐应变控制交换余环流(residual exchange circulation)形成纵向河口环流,且河口环流强度随盐度梯度的增大而明显增大。目前,关于台风对咸潮的影响,大多集中于定性和现象的描述,对其动力作用机制缺乏深入的探讨。

本文选取具有代表性的台风“纳沙”,基于 SCHISM 模型,建立了台风天气下磨刀门水道三维潮流盐度数值模型,并结合辛普森数(Simpson number)分析了台风过境期间水道河口环流形成的动力机制,同时采用盐通量机制分析法解释台风期盐度分布“双峰”特征形成的动力机制。

1 台风“纳沙”过境期间特殊动力条件与现象

图 1 为研究区域和水位、盐度测站位置示意图(图中 S—S 为水道沿程纵断面,断面 TR 为横断面,1、2、3、4 为所选分析点)。“纳沙”为 2011 年登陆珠江的年度最强台风。结合表 1 可知,移动过程中“纳

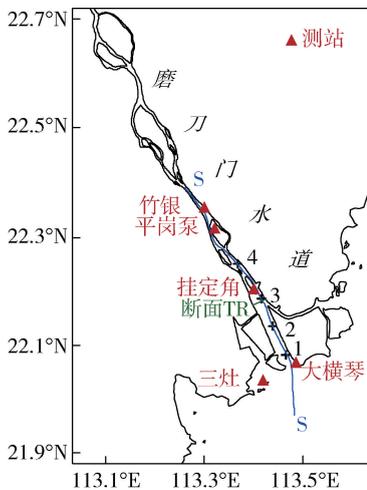


图 1 研究区域和水位、盐度测站位置

沙”先后于 9 月 26 日 23 时和 29 日 7 时两次加强到强台风强度且长期维持在台风强度。此次台风影响范围广、作用强度大,对我国海南、广东和广西以及菲律宾多地造成重大影响。

“纳沙”过境期间,磨刀门水道出现严重的盐水入侵,平岗泵测站盐度过程呈现出特殊的“双峰”现象(图 2)。该现象的形成还受到上游径流量影响,由于 2011 年珠江流域遭受干旱灾害,9 月流量长期维持在 2 000 m³/s 左右,低径流量为咸潮上溯创造了有利条件。

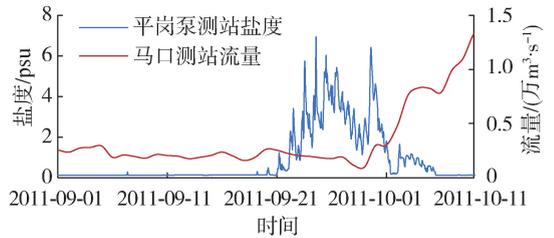


图 2 “纳沙”过境期间磨刀门水道表层盐度和流量过程

2 研究方法

2.1 数值模型

2.1.1 模型建立

磨刀门水道三维水流盐度数值模型采用 Zhang 等^[8]开发的、广泛用于河口海洋水动力问题研究的 SCHISM 跨尺度湖泊-河流-河口-海洋水动力模型。模型水平方向采用无结构网格(图 3),垂向采用 SZ

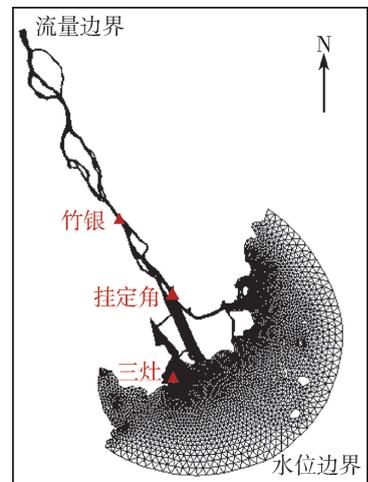


图 3 磨刀门水道三维模型网格

表 1 “纳沙”台风中心位置、气压、风速特征

时间	中心位置/(°)		中心气压/hPa	最大风速/(m·s ⁻¹)	台风等级
	东经	北纬			
2011-09-25T 8:00	131.1	14.9	985	25	强热带风暴
2011-09-26T 8:00	126.2	15.3	975	33	台风
2011-09-27T 8:00	121.4	16.5	960	42	强台风
2011-09-28T 8:00	117.3	17.4	960	40	台风
2011-09-29T 8:00	112.4	19.5	955	42	强台风
2011-09-30T 8:00	108.0	21.0	980	30	强热带风暴

混合坐标,输运方程采用 TVD² (高阶隐式平流格式)求解。上游流量边界和外海水位、盐度边界从珠江大范围潮流数学模型提取,二维模型范围及网格如图 4 所示。大范围二维模型上游流量边界为实测流量,外海水位由潮汐预报值和实测水位值综合率定调整得到,盐度边界为定值 33 psu;风速条件采用构建的台风场计算得出,台风场由 CCMP/NECP 背景风场和台风经验模型风场合成得到。详细构建方法参见文献[9]。模型运行 102 d 达到稳定状态。

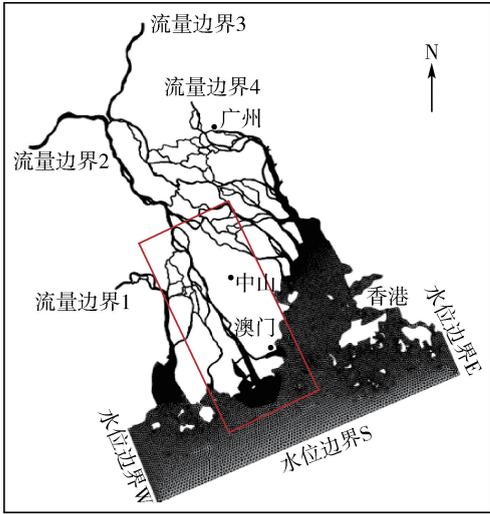


图 4 珠江二维模型网格

2.1.2 模型验证

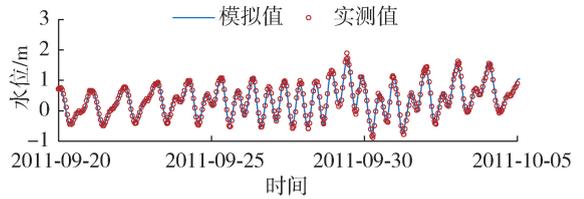
采用“纳沙”过境期间实测水位和表层盐度数据对磨刀门水道三维模型进行验证,水位和盐度测站位置见图 1。模型验证结果如图 5 和图 6 所示,由于台风期外海风浪较大,大横琴测站部分盐度数据缺测。验证结果显示模型模拟结果较好,可用于后期计算分析。

2.2 辛普森数分析法

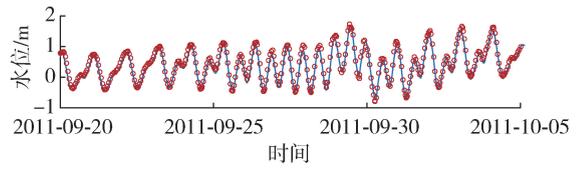
潮汐河口受水平水体密度梯度影响,潮周期过程水道中主要呈现出 3 种基本盐淡水状态:完全混合状态、应变致周期性层化 (strain-induced periodic stratification, SPIS) 状态以及持续层化状态^[10]。采用辛普森数 S_i 可以刻画潮汐应变的动态变化,其定义为应变引起的势能变化与湍动能产生率之比^[7,11-12]:

$$S_i = \frac{\partial_x b H^2}{U_*^2} \quad (1)$$

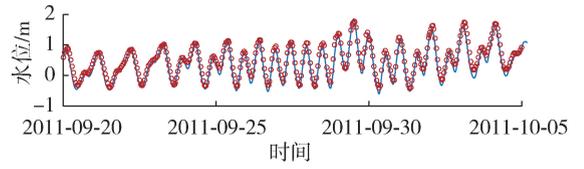
其中 $b = -g \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}$ $U_* = C_D^{1/2} U_T$
 式中: $\partial_x b$ 为潮平均的纵向浮力梯度; H 为平均水深; U_* 为底摩阻流速; g 为重力加速度; ρ 为水体密度; ρ_0 为参考清水密度值 (1000 kg/m^3); C_D 为底部拖曳力系数; U_T 为潮流速幅值, $U_T = \frac{\eta}{H} \sqrt{gH}$, 其中



(a) 三灶测站

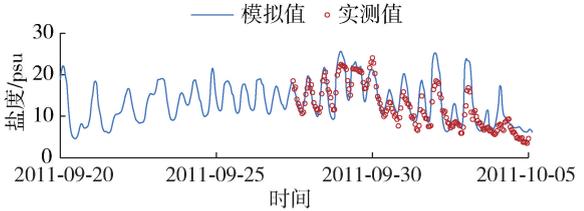


(b) 大横琴测站

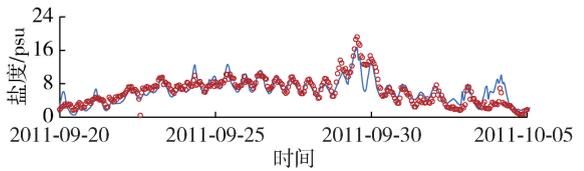


(c) 竹银测站

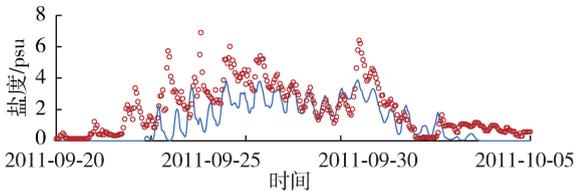
图 5 水位验证



(a) 大横琴测站



(b) 挂定角测站



(c) 平岗泵测站

图 6 表层盐度验证

η 为潮位幅值。当辛普森数较小时,落潮时湍动能作用超过潮汐应变的层化稳定作用,导致水体垂向完全混合;当辛普森数处于中间大小时,水体呈现 SPIS 状态,即落潮期水体层化、涨潮期水体混合;当辛普森数较大时,河道长期处于层化状态^[11]。针对不同河口,辛普森数的临界值有所不同, Simpson 等^[12]针对 Liverpool Bay 划定:完全混合和 SPIS 状态的临界值为 8.8×10^{-2} , SPIS 和持续层化状态的临界值为 8.4×10^{-1} ;而 Stacey 等^[13]取 0.2 作为落

潮期持续层化和混合的临界值,即此时垂向混合和SPIS作用相平衡。此外,辛普森数的临界值大小还受风应力^[14]、地球自转和相对潮汐频率^[15]的影响。

2.3 盐通量机制分析法

为分析台风期盐度运输的动力机制,采用Lerczak等^[16]提出的盐通量机制分析法,其中总盐通量 F_s 表示为

$$F_s = \langle \iint usdA \rangle \quad (2)$$

式中: u 为横断面法向流速; s 为盐度; A 为横断面面积;角括号表示33h的低通滤波,角括号内横断面积分则得到瞬时的盐通量值。 F_s 可被分解为

$$F_s = \langle \iint (u_0 + u_E + u_T)(S_0 + S_E + S_T) dA \rangle \approx \langle \iint (u_0 S_0 + u_E S_E + u_T S_T) dA \rangle = Q_r S_0 + F_E + F_T \quad (3)$$

式中: u_0 、 u_E 、 u_T 分别为潮平均断面平均的流速、潮平均断面变化的流速和潮汐变化断面变化的流速; S_0 、 S_E 、 S_T 分别为潮平均断面平均的盐度、潮平均断面变化的盐度和潮汐变化断面变化的盐度。机制分解结果显示,盐通量运输取决于潮平均断面平均的平流运输 $Q_r S_0$ 、潮平均剪切扩散 F_E 和潮汐震荡 F_T 三者动力运输的平衡。此外,Lerczak等^[16]特别指出, F_E 和 F_T 项主要驱动盐分向陆运输,而 $Q_r S_0$ 项主要受上游径流量影响,驱动盐分向海运输。

3 结果分析与讨论

针对纵断面沿程的流速、盐度分布,分析台风过境前、中、后期的变化差异,研究台风对磨刀门水道流速、盐度分布的影响;并采用辛普森数来定量分析磨刀门水道潮周期盐淡水混合状态,探究河口纵向环流的形成机制。此外,针对“纳沙”过境期间盐度分布的“双峰”性,设置数值试验并结合盐通量机制分析法,探究其形成的动力机制。

3.1 纵向水流盐度时空分布特征

通过分析台风过境前、中、后期纵向流速和盐度分布特点,详细对比不同时期纵断面差异性的动力特征,突出台风对纵向水流、盐度结构的影响。图7为三灶测站“纳沙”过境期间水位过程线(图中红色为潮周期历时),统一选取落憩涨初时刻(图7中虚线)作为研究时刻,得到图1中S—S断面(从口门外拦门沙至竹银上游)流速、盐度分布如图8所示。

a. 台风来临前,磨刀门水道正处于小潮转大潮时期(图8(a))。21日小潮期垂向等盐度线分布最为密集,表底层盐度差较大,盐淡水分层最为明显。由于落憩时刻受盐度梯度影响,水道中普遍存在着

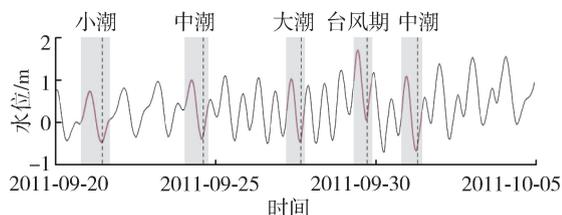


图7 “纳沙”过境期间三灶测站水位过程线

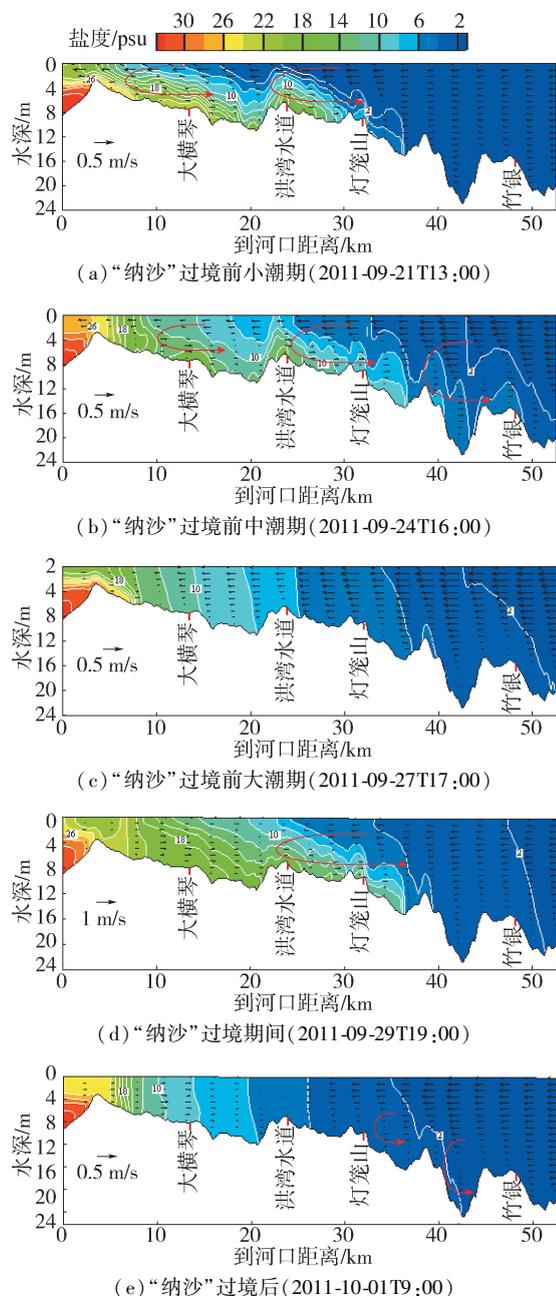


图8 “纳沙”过境前后磨刀门水道纵断面流速、盐度分布

表层向海、底层向陆的纵向环流,盐度从底层不断上溯。洪湾水道处盐度沿程分布不连续,盐度明显高于两侧,可见洪湾水道向主水道输送较多盐分,有助于盐分向上游扩散。此外,由于受倒坡地形影响,盐水被凸起的地形阻挡,小潮动力较弱,难以将盐水排出,从而囤积在上游水道中。

b. 24日中潮期(图8(b)),表底层盐度差减

小,盐淡水分层相对小潮期减弱,水道中纵向环流强度也随着盐度梯度减小而有所减弱。但由于潮动力的增强,小潮期在水道中囤积的盐分得以向上游不断扩散,导致盐水上溯距离进一步增大。

c. 随着 27 日大潮期(图 8(c))的到来,表底层盐度差锐减,盐淡水分层减弱,混合加强,盐水近乎垂直地退出水道,纵向环流基本消失。

d. 台风过境期间,磨刀门水道处于大潮转中潮时期(图 8(d))。咸潮上溯本应较大潮期更弱,但受台风引发的外海增水影响,口门外高浓度盐水短时间大量涌入水道,导致水道中、下游盐度整体偏高且分层明显,进而在水道中部形成了较大范围的纵向环流。

e. 台风过境后,磨刀门水道大致处于中潮期(图 8(e)),台风期涌入水道的盐水不断向外海排出。10 月 1 日 9 时,台风影响基本消失,水道恢复正常天气下大潮后中潮期的流速、盐度分布状态,即水道混合较强,落潮时等盐度线垂直地退出水道。

3.2 河口环流形成的动力特征

采用辛普森数分析法,针对台风过境期间的特征潮周期历时(图 7 中红线),分析水道沿程 1、2、3、4 点(图 1)位置处的纵向环流形成的动力机制。4 个沿程点分别位于磨刀门水道口门、下游水道中部、洪湾水道与主水道交汇处以及水道中游弯曲处。由于不同河口地形、动力条件的差异,辛普森数的临界值有所不同(表 2)。本文结合磨刀门水道盐淡水混合状态的变化情况,参考 Simpson 等^[12]以及 Stacey 等^[13]研究成果,初步拟定辛普森数在 0.08 ~ 0.12 之间为 SPIS 状态,高于 0.12 为持续层化状态,低于 0.08 为完全混合状态。

表 2 不同时期 4 个沿程点的辛普森数

点位	小潮	中潮	大潮	台风期	中潮(大潮后)
1	0.0350	0.0361	0.0352	0.0190	0.0412
2	0.3460	0.0897	0.0684	0.0578	0.0552
3	0.0834	0.0517	0.0328	0.0311	0.0214
4	0.1390	0.0924	0.0565	0.1560	0.0357

a. 小潮期 2、4 点的辛普森数较大(>0.1),其中 2 点的值超过 0.15,可见该点附近产生持续层化,下游水道中部的河口环流不仅是由潮汐应变引起的,更主要的是强盐水体密度梯度力驱动下的重力环流;4 点的值略小于 0.15,水道中游盐度值相对下游整体偏低,水体密度梯度较小,局部纵向环流的主要驱动力还是潮汐应变,但是由于所处位置河道较为弯曲易于产生侧向环流,进而可能对纵向环流产生影响;1 点的辛普森数最小,表示水体混合强烈,这主要与其所处位置密切相关,即口门处受潮汐混合作用最为强烈;3 点的辛普森数为 0.0834,受洪

湾水道潮周期性输水输盐影响,加强了水体混合,打破了主水道的高度层化状态,具有 SPIS 效应。

b. 中潮期仍是 2 点和 4 点的辛普森数较大(在 0.09 左右),3 点次之,1 点最小。除口门 1 点变化不大,其余点位均较小潮期有所减小,表明潮汐混合作用增强,水道整体呈现 SPIS 状态。由于水道中水体密度梯度较小,重力环流较弱,河口环流主要由潮汐应变驱动且几乎只在落潮期出现。

c. 大潮期潮汐混合作用进一步加大,各点位的辛普森数进一步减小,水道以完全混合为主,仅落潮期出现弱层化状态,河口环流基本消失。小、中、大潮期辛普森数的变化与台风过境前纵断面流速、盐度分布变化(图 8(a)(b)(c))相一致,解释了各时期环流形成的主要原因。

d. 台风期辛普森数的分布发生较大变化,1、2、3 点较大潮期进一步减小,而 4 点却大幅增大,表明下游水道受台风影响混合更为强烈,而中游处随着盐水囤积增多,形成一定的水体密度梯度,导致水体层化。水道中纵向环流的形成,主要受潮汐应变作用,在落潮期出现,与图 8(d)中环流出现时间及位置一致。

e. 大潮后中潮期辛普森数除 1 点外,均较大潮期有所减小,经过大潮期以及台风期强烈的混合作用,水道处于完全混合状态,与小潮后中潮的 SIPS 状态差别较大。

总体看来,辛普森数沿程分布存在差异,口门处 1 点辛普森数持续较小,水体长期处于完全混合状态,2、4 点位置处在正常潮周期内,即从小潮至大潮后中潮期辛普森数不断变小,水道大体经历了“层化—SPIS—完全混合”的过程,3 点受洪湾水道影响,比 2 或 4 点混合强烈,但是弱于 1 点。在洪枯季之交,上游径流量(马口站)为 $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,当水道处于高度层化状态时(小潮期),纵向环流主要是受水体密度梯度驱动下的重力环流;水道处于 SPIS 状态时(小潮后中潮期),纵向环流的形成主要受潮汐应变影响;水道处于完全混合状态时(大潮期及大潮后中潮期),纵向环流几乎不可见。此外,辛普森数对台风的响应明显,改变了大潮后期水体完全混合的状态,水道中游出现特殊的 SPIS 状态,受潮汐应变影响落潮时形成纵向环流。

3.3 盐度分布“双峰”特征形成的动力机制

结合前文实测数据(图 2)分析可知,台风“纳沙”过境期间,磨刀门水道盐度测站(平岗泵和挂定角)盐度变化过程呈现出“双峰”特征。针对这一特殊现象,设计去除“纳沙”影响的数值试验,并与经过实测数据验证的“纳沙”台风模型模拟结果进行对比,探究“双峰”特征形成的动力机制,结果见图 9。

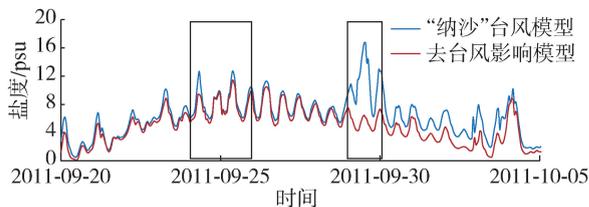


图9 挂定角测站盐度过程线模拟

从挂定角测站处的表层盐度变化过程可以直观地看出,盐度分布的“前峰”变化较为缓慢,而“后峰”的形成及衰落都十分迅速,且峰值高于“前峰”。去除台风影响后,盐度分布的“后峰”随之消失,表明“后峰”的形成与此次台风密切相关,而“前峰”的盐度几乎不变,应与此次台风无关。从潮周期来看,9月20日为小潮期,27日为大潮期,盐度“前峰”出现在25日,正是小潮后的中潮期。胡溪等^[17]研究发现,磨刀门水道咸潮上溯过程具有明显的半月周期变化,盐水入侵在小潮期加强,在大潮期较弱,咸界上溯最远出现在小潮之后的中潮期,可见盐度分布的“前峰”很可能是周期性的盐水入侵所致。

通过计算“纳沙”台风模型和去台风影响模型三灶测站位置处的水位差,得到台风“纳沙”过境期间磨刀门水道大致的增水情况,如图10(图中时间以9月28日0时为起点“0”)所示。可见,此次台风增水约持续了36h,最大达到1.0m左右,使得磨刀门水道的外海动力加强,推动盐水向河道内涌入。

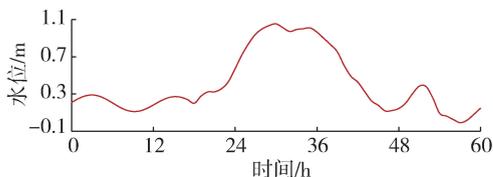
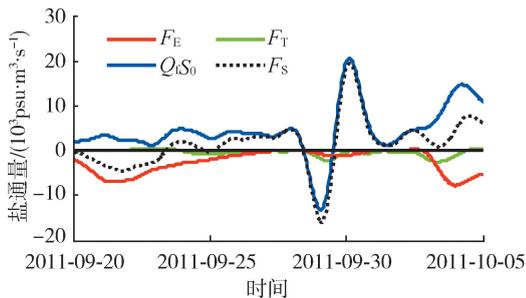


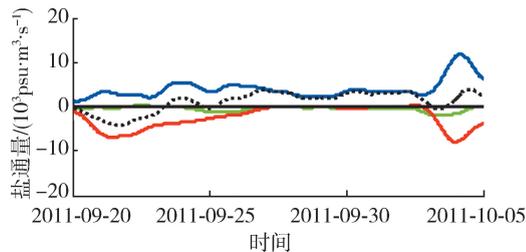
图10 三灶测站台风“纳沙”过境期间增水过程线

进一步计算水道断面TR(图1)的盐通量(图11),从盐水入侵动力机制上对比分析盐度“双峰”特征形成的原因。由图11可见,9月20日小潮期总盐通量向陆输送,盐分不断向水道上游累积,其中平流通量和潮汐震荡通量变化不大,而剪切通量向陆输送明显增大,成为总盐通量向陆输送增大的主导因素。剪切通量与横断面流速分布有关,剪切通量增大表明表底层流速差大,盐淡水分层明显,重力环流不断加强,高浓度盐水从底层上溯,盐度分布不断上涨。23日之后水道进入中潮期,总盐通量转为向海输出,但量级较小,剪切通量有所减小,盐水从底层上溯变缓,盐度分布达到峰值。随着27日大潮的到来,剪切通量降到零点,总盐通量主要受平流通量控制,以向海输出为主,盐度分布逐渐降低。因此,在小潮转大潮的过程中,形成了盐度分布的“前

峰”。此外,磨刀门盐水入侵长度受径流量影响很大,此次“前峰”产生的重要前提条件是,水道上游径流量长时间维持在 $2000\text{ m}^3/\text{s}$ 左右。



(a) “纳沙”台风模型



(b) 去台风影响模型

图11 有无台风“纳沙”影响下断面TR的盐通量变化过程对比

而在台风影响下,28—30日总盐通量向陆输送大幅增加,相比于去台风影响后,总盐通量较小且向海输出,可见此次台风对盐度输运产生了重要影响。台风“纳沙”过境期间,强烈的气旋风应力导致外海增水,使得平流通量转而向陆输送,大量高浓度盐水从口门向上游输送,导致水道盐度的突然升高,由此产生盐度分布的“后峰”。

4 结论

a. 台风促进外海水体混合,不同于小潮期盐水逐渐在水道内囤积,而是高浓度盐水在涨潮期近乎垂直地向水道内推进,导致盐水上溯距离在短时间内大幅增加。此外,高浓度盐水受地形等因素影响难以及时排出,在水道内形成明显的盐淡水分层,进而引发较强的纵向环流。

b. 结合辛普森数定量分析发现,与台风前、后期相比,台风期辛普森数变化较大,水道下游仍处于强烈混合状态,而水道中游随着盐水囤积,出现特殊的SPIS状态。水道中纵向环流的形成,主要是受潮汐应变的驱动。

c. 台风“纳沙”过境期间咸潮上溯导致盐度分布呈现“双峰”特征。盐通量机制分析结果显示,“前峰”是持续低流量条件下,受剪切通量控制,小潮转大潮时期盐水随潮波周期性上溯;“后峰”则是台风“纳沙”的增水效应导致平流通量转而向陆输

送,导致盐度突然增大。

参考文献:

- [1] 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. (KONG Lan, CHEN Xiaohong. Analysis on the influence factors of saltwater in Pearl River Estuary [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(6):94-97. (in Chinese))
- [2] 陈祖军. 后三峡工程时代长江口水源地盐淡水入侵规律及其应对措施 [J]. 水资源保护, 2014, 30 (3): 19-24. (CHEN Zujun. Saltwater intrusion into water source zone in Yangtze Estuary in post-Three Gorges engineering era and countermeasures [J]. Water Resources Protection, 2014, 30(3):19-24. (in Chinese))
- [3] 陈妮,唐建华,蓝霄峰,等. 北支咸潮倒灌对东风西沙水库取水水质的影响 [J]. 水资源保护, 2013, 29(1):37-40. (CHEN Wei, TANG Jianhua, LAN Xiaofeng, et al. Impact of salinity intrusion of north branch on water quality of intake water areas of Dongfengxisha Reservoir [J]. Water Resources Protection, 2013, 29(1):37-40. (in Chinese))
- [4] LI Ming, ZHONG Liejun, BOICOURT W C, et al. Hurricane-induced storm surges, currents and destratification in a semi-enclosed bay [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(2):356-360.
- [5] GONG Wenping, MAA P Y, HONG Bo, et al. Salt transport during a dry season in the Modaomen Estuary, Pearl River Delta, China [J]. Ocean & Coastal Management, 2014, 100:139-150.
- [6] 刘吉,苏波,何贞俊,等. “黑格比”风暴潮对磨刀门水道沿岸取水的影响 [J]. 人民珠江, 2012(增刊1):25-27. (LIU Ji, SU Bo, HE Zhenjun, et al. Influence of the storm surge “Hagupit” on coastal water intaking in the Modaomen Waterway [J]. Pearl River, 2012(Sup1): 25-27. (in Chinese))
- [7] BURCHARD H, HETLAND R D, SCHULZ E, et al. Drivers of residual estuarine circulation in tidally energetic estuaries; straight and irrotational channels with parabolic cross section [J]. Journal of Physical Oceanography, 2011, 41(3):548-570.
- [8] ZHANG Y J, YE F, STANEV E V, et al. Seamless cross-scale modelling with SCHISM [J]. Ocean Modelling, 2016, 102:64-81.
- [9] 叶荣辉,钱燕,孔俊,等. 珠江三角洲大系统风暴潮数学模型建立与验证 [J]. 人民长江, 2013, 44(21):76-80. (YE Ronghui, QIAN Yan, KONG Jun, et al. Mathematical model establishment and verification for large scale storm surge in Pear River Delta [J]. Yangtze River, 2013, 44(21):76-80. (in Chinese))
- [10] BECHERER J. Estuarine circulation in well-mixed tidal inlets [D]. Rostock; University of Rostock, 2013.
- [11] GEYER W R, MACCREADY P. The estuarine circulation [J]. Encyclopedia of Ocean Sciences, 2014, 46(1):299-305.
- [12] SIMPSON J H, BROWN J, MATTHEWS J, et al. Tidal straining, density currents, and stirring in the control of estuarine stratification [J]. Estuaries and Coasts, 1990, 13(2):125-132.
- [13] STACEY M T, RALSTON D K. The scaling and structure of the estuarine bottom boundary layer [J]. Journal of the Institution of Electrical Engineers, 2005, 35(1):477-478.
- [14] VERSPECHT F, RIPPRTH T P, HOWARTH M J, et al. Processes impacting on stratification in a region of freshwater influence: application to Liverpool Bay [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2009, 114 (C11): 507-514.
- [15] BURCHARD H. Combined effects of wind, tide, and horizontal density gradients on stratification in estuaries and coastal seas [J]. Journal of Physical Oceanography, 2009, 39(9):2117-2136.
- [16] 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.
- [17] 胡溪,毛猷忠. 珠江口磨刀门水道咸潮入侵规律研究 [J]. 水利学报, 2012, 43(5):529-536. (HU Xi, MAO Xianzhong. Study on saltwater intrusion in Modaomen of the Pearl River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(5):529-536. (in Chinese))

(收稿日期:2018-09-09 编辑:熊水斌)

(上接第29页)

- [24] 孙东迁. 托什干河上游梯级水库水温预测研究 [D]. 西安:西安理工大学, 2008.
- [25] 余常昭, MARKOVSKY M, 李玉梁. 水环境中污染物扩散输移原理与水质模型 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 1989.
- [26] 任玉新, 陈海昕. 计算流体力学基础 [M]. 北京:清华大学出版社有限公司, 2006.
- [27] 中华人民共和国水利部水文局. 中华人民共和国水文年鉴:2009年第4卷第1册 黄河上游区上段(黑山峡以上) [Z]. 北京:中华人民共和国水利部水文局, 2010.
- [28] 中华人民共和国水利部水文局. 中华人民共和国水文年鉴:2010年第4卷第1册 黄河上游区上段(黑山峡以上) [Z]. 北京:中华人民共和国水利部水文局, 2011.
- [29] 中华人民共和国水利部水文局. 中华人民共和国水文年鉴:2011年第4卷第1册 黄河上游区上段(黑山峡以上) [Z]. 北京:中华人民共和国水利部水文局, 2012.

(收稿日期:2018-09-15 编辑:熊水斌)