

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20230515001

文章编号: 1672-9331(2023)04-0142-10

引用格式: 张浩键, 伍志元, 刘晓建, 等. 台风“天鸽”影响下珠江口水动力过程数值模拟研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(4): 142-152.

Citation: ZHANG Haojian, WU Zhiyuan, LIU Xiaojian, et al. Numerical simulation of hydrodynamic processes in the Pearl River Estuary influenced by Typhoon "Hato"[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(4): 142-152.

台风“天鸽”影响下珠江口水动力过程数值模拟研究

张浩键¹, 伍志元^{1,2}, 刘晓建³, 吕翌¹

(1. 长沙理工大学 水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙理工大学 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 3. 珠江水利委员会 珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611)

摘要:【目的】探究台风“天鸽”影响下珠江口水动力过程。【方法】基于FVCOM模型, 采用非结构网格对珠江口及其附近海域进行数值模拟。【结果】珠江口八大出海口中的磨刀门受台风影响最大, 最大增水为0.79 m, 中部出海口在台风影响下增水0.30~0.65 m, 外伶仃洋增水不超过0.20 m。受台风影响, 表层流速极值的最大增幅达0.50 m/s, 风暴潮最大表层流速是同时刻天文潮表层流速的2倍, 风向随台风中心的移动在0~180°范围内变化。【结论】流速比潮位更早对台风做出响应, 且受台风影响更大。台风对表层流速的影响明显大于对垂向平均流速的影响。台风“天鸽”运动轨迹的东北方向的风暴增水比西南方向的大, 台风东北部地区所遭受的风暴潮灾害更加严重。

关键词: 台风“天鸽”; 珠江口; 水动力; 出海口; 风暴增水; 数值模拟

中图分类号: P731.2

文献标志码: A

0 引言

风暴潮是指在强烈的大气扰动下海平面异常升高的现象^[1]。风暴潮灾害造成的经济损失在世界自然灾害经济损失中高居榜首, 其作为沿海地区最严重的自然灾害之一^[2], 已严重威胁到我国沿海地区人民的生命和财产安全^[3]。风暴潮对水深较浅、地理条件复杂、人口密度较大地区的影响尤为严重, 例如, 2015—2018年风暴潮所造成的珠江口区域的直接经济损失占全国的28%^[4]。有数据表明, 我国风暴潮灾害具有愈演愈烈的态势^[5]。因此, 风暴潮研究对我国的防灾减灾工作具有重要意义。

珠江三角洲地区是我国东南沿海台风灾害最为多发的区域之一, 也是我国超警戒风暴潮发生最频繁的区域之一^[6]。此外, 珠江三角洲也是世界上水系最复杂的河口三角洲之一, 区域水网稠

密, 河道纵横交错, 水流相互贯通, 具有典型的潮汐河网水文特征, 其动力过程变化多端, 且存在季节性变化^[7]。因其复杂的动力系统, 对该地区水动力过程的研究一直难以深入^[8]。

针对台风影响下珠江口水动力过程, 国内外学者已有一定的研究。谢洋^[9]、王永信等^[10]、史键辉等^[11]和陈文想^[12]对磨刀门、虎门和横门等出海口的风暴增水进行了研究; 徐婉明等^[13]基于MIKE 21软件, 结合台风模型和全球潮汐模型模拟探究了深圳沿岸的潮位分布及其对应的警戒等级; 刘士诚等^[4]基于ADCIRC模型和Holland台风模型建立耦合模型, 对珠江河网的风暴增水进行模拟研究, 结果发现珠江口的河道口门走势和径流作用对风暴增水影响显著; 胡仕焜等^[14]借助ADCIRC和SWAN模型模拟风暴增水过程, 发现当台风在珠江口西岸登陆时风暴潮-天文潮的非线性效应最大; YIN等^[15]采用曲线网格, 建立了台风模型、流体动力学模型(Delft3D-FLOW)、波浪模型

收稿日期: 2023-05-15; 修回日期: 2023-07-22; 接受日期: 2023-08-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52171246、51839002); 长沙理工大学水利与环境工程学院研究生科研创新项目“风暴潮作用下航道淤积数值模拟研究”

通信作者: 伍志元(1989—)(ORCID: 0000-0001-7482-705X), 男, 副教授, 主要从事海岸、海洋动力过程及其模拟技术方面的研究。E-mail: zwu@csust.edu.cn

(Delft3D-WAVE)和泥沙输运模型(Delft3D-SED)相结合的珠江口区域嵌套耦合模型,以此研究风暴潮作用下横门东通道的沉积物堆积和迁移;SHEN等^[16]利用FVCOM-SWAVE模块模拟和预测了围垦对珠江口盐水入侵和风暴潮的影响,发现填海会导致盐度增加,减少风暴潮灾害,但影响范围较小;YANG等^[17]基于半隐式跨尺度水文科学集成系统模型(SCHISM)建立了三维波流-沉积物耦合海洋模型,并对不同外部强迫机制下悬浮泥沙含量的变化进行了研究。上述学者所使用的模型大多借助于结构网格计算,与复杂地形的拟合效果较差,影响了模拟结果的准确性。

非结构网格可以更好地拟合复杂的岸线变化,能有效地提高模型计算精度。因此,本研究基于FVCOM模型,采用非结构网格对台风“天鸽”影响下的珠江口地区的水动力过程进行数值模拟,研究台风“天鸽”对珠江口及其附近海域潮位、流速和流向的影响,探究该区域的水动力过程,为该区域的防灾减灾工作提供理论指导。

1 数据与模型试验

1.1 “天鸽”台风简介及数据来源

台风“天鸽”(Hato)于2017年8月23日在广东省珠海市金湾区沿海登陆,登陆时台风中心附近的最大风力达14级,1 min持续风速估计为185 km/h,最低中心气压为945 hPa,在Saffir-Simpson飓风等级中属于三级,是半个多世纪以来在珠江口区域登陆的最强台风之一。该台风在风暴潮汐(即由风暴潮和天文潮叠加而成的潮汐)和受影响地区等方面都曾突破历史记录。在台风“天鸽”期间,风暴潮最高达2.79 m^[18]。在澳门,自1925年以来,台风“天鸽”造成的洪水的严重程度高居首位,其造成的极端洪水在淹没深度及淹没范围上都是前所未有的,超过一半面积的澳门半岛被淹没。台风“天鸽”的强风和相关洪水导致22人死亡,并造成35亿美元的直接经济损失^[19]。

本研究主要探究台风“天鸽”经过期间,珠江口及其附近海域潮位、流速及流向的变化情况。模拟时间为2017年8月1日—31日,采用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)开发的第五代大气再分析数据集(ERA5)中风速为10 m/s的风场数据进行模拟。

1.2 风速及气压分布

图1所示为台风“天鸽”登陆前的风速与气压分布,图中箭头为风速矢量。

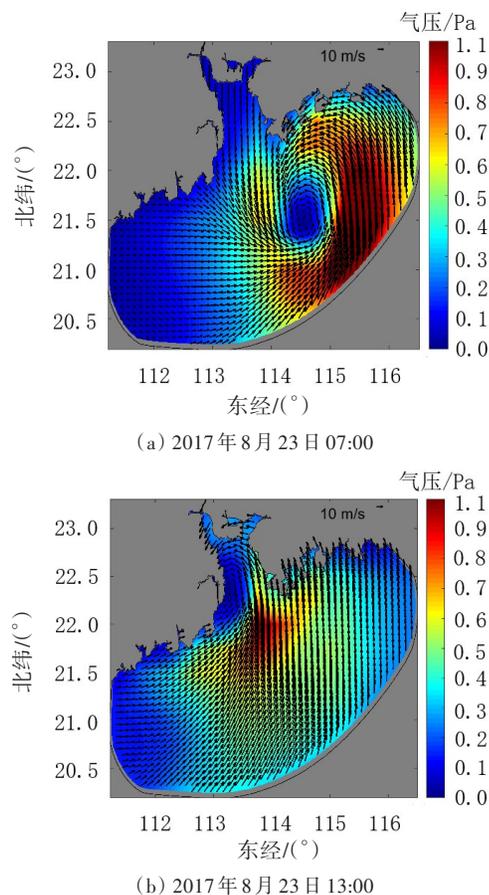


图1 台风“天鸽”的风速与气压分布

Fig. 1 Wind speed and air pressure distribution during Typhoon "Hato"

由图1可知,在台风“天鸽”的影响下,研究区域内有明显的气旋风场,风场中心风速较小,且风场中心即为气压最低的位置。空气从周围气压较高的位置向风场中心运动,产生风应力,气压差越大的位置产生的风应力越大,风应力越大对应风速就越大。从图1可以很容易地发现,台风东南侧的风场强度明显比其他方位的大,最大风速超过了40 m/s;台风引起的风场明显不对称,东南侧风场影响范围的半径最大。

1.3 模型设置

1.3.1 模型简介

FVCOM是由陈长胜教授领导的马萨诸塞大学海洋生态系统实验室和伍兹霍尔海洋研究所(WHOI)开发的集非结构化网格、有限体积、自由表面、三维原始方程为一体的海洋模型^[20]。它是一个可以耦合的冰-波-流-泥沙-生态系统模型,

含有湍流混合参数化、广义地形跟随坐标、数据同化方案和干/湿处理等功能模块。FVCOM在垂向上采用广义地形跟随坐标系对不规则底部地形进行拟合,在横向上则采用非结构化三角形网格,这样能够较好地拟合复杂岸线。非结构化三角形网格的空间离散法还能够灵活地提高特定区域的分辨率^[21]。FVCOM在横向计算上使用的是Smagorinsky湍流闭合模型,在垂向上则混合使用Mellor-Yamada 2.5阶湍流闭合模型^[22]。模型所采用的有限体积法结合了有限元法(FEM)和有限差分法(FDM)的优点,既具备最佳几何灵活性,也能提高计算效率。该模型还能很好地表达沿海和河口地区复杂地形的质量、动量、盐分和热量的变化过程。

FVCOM模型本质上是在笛卡尔坐标系中由连续性方程、动量方程、温度和盐度扩散方程、密度方程组成的一个三维原始控制方程组。

1) 连续性方程。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: u 、 v 和 w 分别为流体在 x 、 y 和 z 方向上的速度分量。

2) 动量方程。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv$$

$$= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu$$

$$= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_v \quad (3)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad (4)$$

式(2)~(4)中: t 为时间; g 为重力加速度; f 为科氏参量; F_u 和 F_v 分别为动量在 x 和 y 方向上的分量; ρ 为密度; P 为压强; K_m 为垂向涡动黏性系数。

3) 温度和盐度扩散方程。

温度:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial T}{\partial z} \right) + F_T \quad (5)$$

盐度:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_S \quad (6)$$

式(5)~(6)中: S 为海水盐度; T 为海水温度; K_h 为扩散系数; F_T 为温度扩散项; F_S 为盐度扩散项。

4) 密度方程。

$$\rho = \rho(T, S) \quad (7)$$

1.3.2 模型基本设置

本研究从GSHHG数据库中获得研究区域的海岸线资料^[23];水深数据来自全球水深地形模型ETOPO。考虑到对模型精度的影响,选择分辨率为1-arc-minute的ETOPO1数据集,该数据集来源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)。为进一步提高模型的计算精度,在近海地区使用我国电子海图和测图的水深数据对所获取的ETOPO1数据进行调整。

FVCOM模型采用球面坐标系,在计算时使用非结构网格。为提高模型在近岸地区的计算精度,在岸线复杂的近岸区域对非结构网格进行局部加密。研究区域由99 220个网格和185 012个网格节点组成。网格分布和测站设置如图2~3所示。

模型采用平均海平面作为基准面,使用干/湿网格模式,设定M2、S2、K1、O1、N2、K2、P1和Q1八个主要分潮,在垂直方向上采用 σ 坐标,共分为10层。为保证模型稳定,根据柯朗-弗里德里希斯-列维条件(Courant-Friedrichs-Lewy condition, CFL),将模型的内模态时间步长设置为10 s,外模态时间步长设置为1 s。

1.3.3 边界条件

模型仅设置一条开边界。在开边界上分布有65个网格节点,使用开边界水位为模型提供驱动

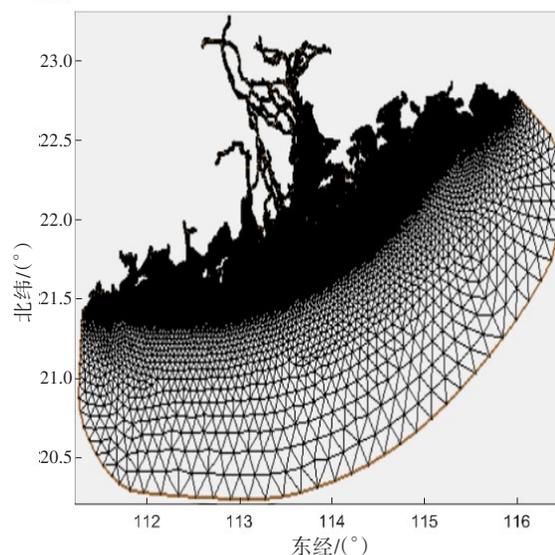


图2 研究区域网格分布

Fig. 2 Grid distribution of the study area

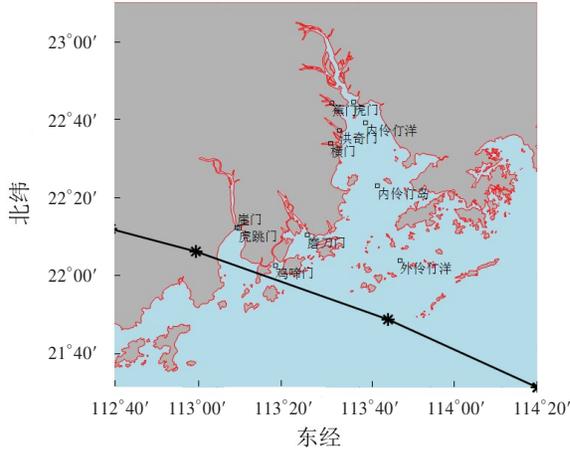


图3 测站位置及台风“天鸽”的运动轨迹

Fig. 3 Location of measurement sites and movement track of Typhoon "Hato"

条件。利用俄勒冈州立大学的 Lana Erofeeva 编写的潮汐模型驱动程序及 MATLAB 工具 Tide Model Driver(TMD),对所选取的 M2、S2、K1、O1、N2、K2、P1 和 Q1 八个分潮的调和常数进行潮汐调和,获取特定时间开边界的预报水位,以此为模型提供驱动条件。预报水位的计算公式为:

$$\zeta = A_0 + \sum_{i=1}^n f_i H_i \cos(\omega_i t + V_{0i} + u_i - g_i) \quad (8)$$

式中: ζ 为水位; A_0 为平均海平面; f_i 为分潮交点因子; H_i 为第*i*个分潮的振幅; ω_i 为角速度; V_{0i} 为分潮的天文初相位; u_i 为分潮的交点订正角; g_i 为迟角。

1.3.4 参数设置

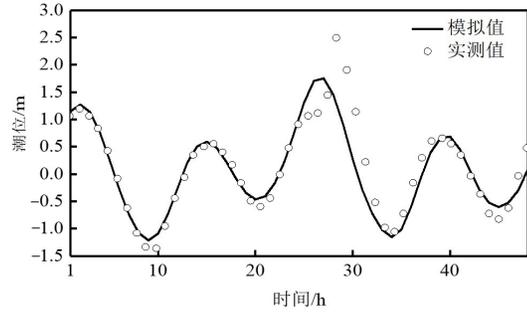
模型运行采用冷启动。将温度和盐度分别设定为 15 °C 和 35 mg/L。将干/湿网格的判定水深设置为 0.05 m,即当某处网格水深小于 0.05 m 时,判定该网格为干网格,模型将不在此处进行计算;当某处网格水深大于等于 0.05 m 时,则可继续进行计算。经过底部粗糙度的长度比例和最小底部粗糙度这两个参数的多次组合试验,最终设定这两个参数的值分别为 0.001 和 0.002 5。

1.4 风暴潮验证

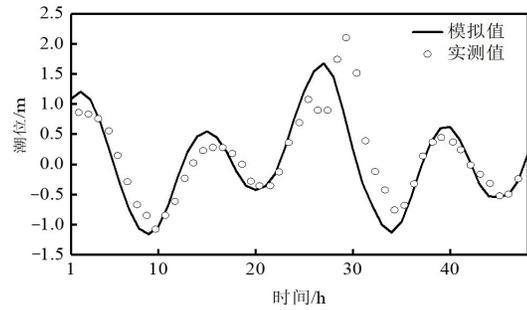
本研究选择“天鸽”和“山竹”这两场台风进行模拟验证。这两场台风的风场数据均选用 ERA5 再分析数据,验证时间分别选取 2017 年 8 月 22 日—23 日(“天鸽”)和 2018 年 9 月 15 日—16 日(“山竹”)。潮位验证结果和误差量化分析结果如图 4~5 所示。

从图 4~5 可以看出,各测站风暴潮潮位模拟得到的极大值比实测得到的极大值小。总体而

言,在这两场台风作用下各测站潮位的均方根误差较小,相关性系数均超过了 0.80,技能系数也均在 0.79 之上,且与台风作用下潮位的实际变化吻合较好,表明模型模拟效果良好。



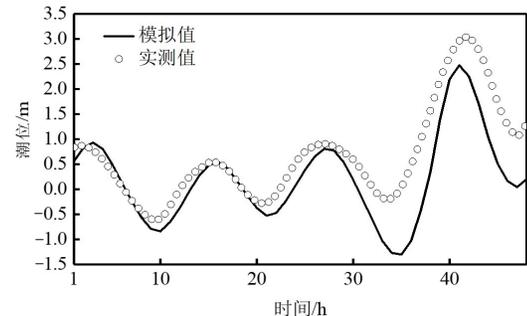
(a) 三灶站



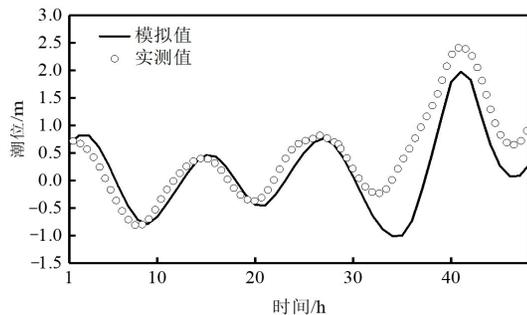
(b) 大横琴站

图4 风暴潮位模拟值与实测值对比(“天鸽”)

Fig. 4 Comparison of storm tide levels between simulated and measured values ("Hato")



(a) 横门站



(b) 蛇口站

图5 风暴潮位模拟值与实测值对比(“山竹”)

Fig. 5 Comparison of storm tide levels between simulated and measured values ("Mangkhut")

2 结果与讨论

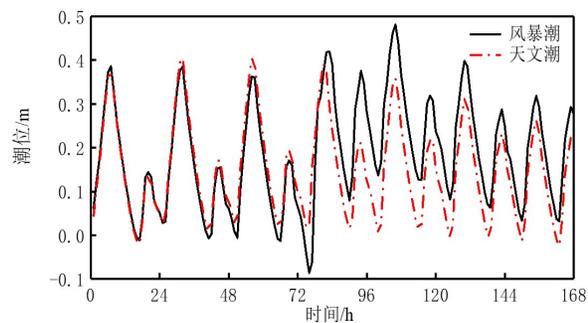
2.1 台风对潮位的影响

出于对珠江口特殊地理位置和实际应用的考虑,本研究重点关注虎门、蕉门、洪奇门等八大出海口和伶仃洋航道,因此将研究测站布置在八大出海口附近及伶仃洋航道上。内伶仃岛是内外伶仃洋的分界点,同时也处于航道上,因此,在内伶仃岛和内外伶仃洋处各布置一个测站(图3)。

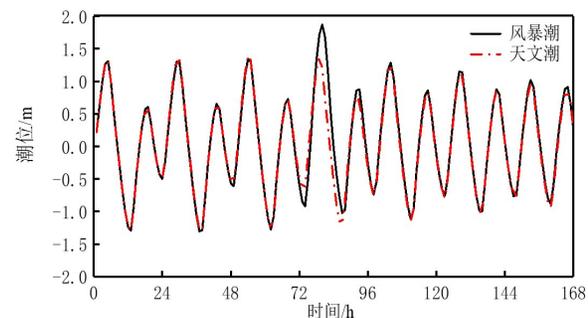
图6为本研究选取的11个测站2017年8月20日—26日的潮位变化曲线。从图6可以看出,研究区域内天文潮整体潮汐的变化特征明显。而在台风影响下,潮位在台风登陆时突然上升,整体呈现先上升后下降的趋势。台风对潮位的影响主要发生在台风登陆前后的两次涨落潮期间。值得注意的是,受地理位置、地形特点等因素的影响,各个测站潮位所受影响的程度有所不同,但总体而言,台风登陆前的影响要大于登陆后的影响。

根据台风“天鸽”登陆前各测站一次涨落潮的变化可知,各测站潮位达到极大值和极小值的时刻相较于天文潮晚了约1 h,且风暴潮的潮周期也向后推迟了1 h左右。进一步的分析表明,各测站潮位达到极值的时刻和潮周期时长均与该测站到台风中心的距离密切相关,即距离越远,达到潮位极值的时刻越晚,潮周期经历的时间越长。

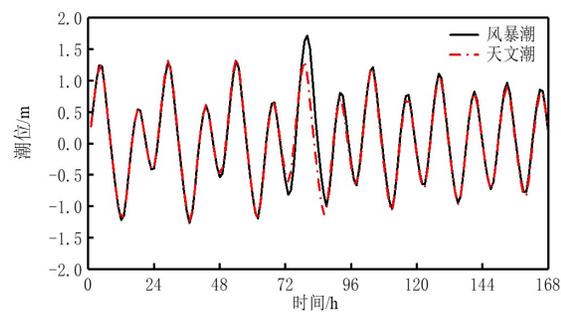
从图6还可以看出,磨刀门测站的潮位受台风影响最大。磨刀门作为西江的主要出海口,在珠江八大出海口中年径流量最大。台风登陆之前一个潮周期的极大值潮位差为0.79 m(也是该站点的最大增水),此时的潮位值为11个测站中最大的,达到了1.91 m。而在蕉门测站,台风登陆之前一个潮周期的极大值潮位差为0.63 m(也是该站点的最大增水),受台风影响程度也较大;在内伶仃洋测站,台风登陆之前一个潮周期的极小值潮位差为0.29 m,其极小值潮位差在各测站中受台风影响程度最大。虎门口位于西江、北江和东江的交汇处,河道宽阔,且测站距两岸较远,潮位整体受台风影响较小。此外,洪奇门、横门、蕉门因地理位置横向勾连,这三大出海口之间的相互影响较为明显,故其潮位变化规律、潮位大小和受台风影响程度均基本相同。虎跳门和崖门的潮位整体受台风影响较小,这是因为这两个测站所处的



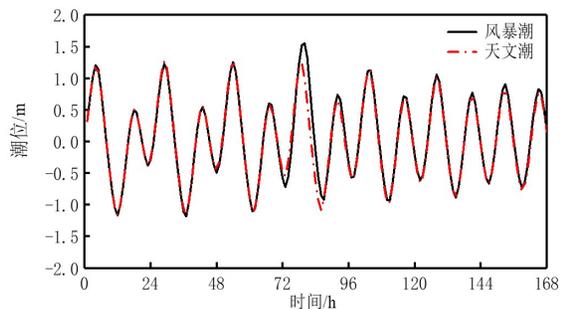
(a) 虎门



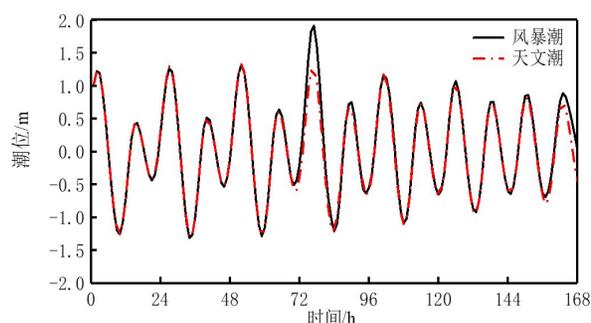
(b) 蕉门



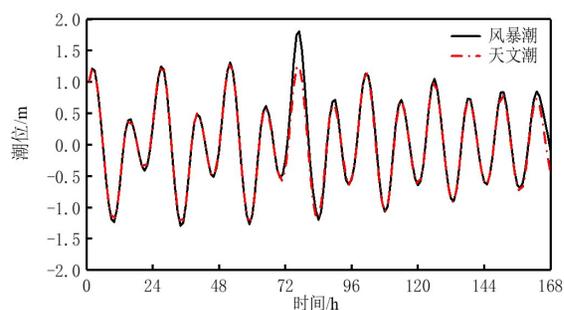
(c) 洪奇门



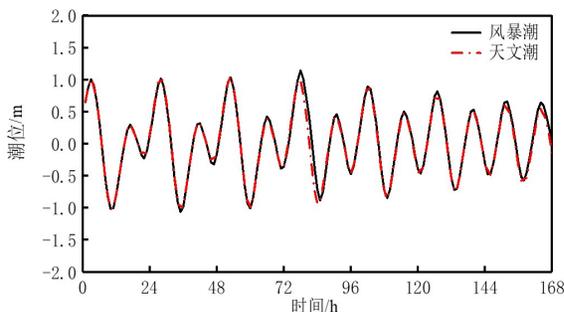
(d) 横门



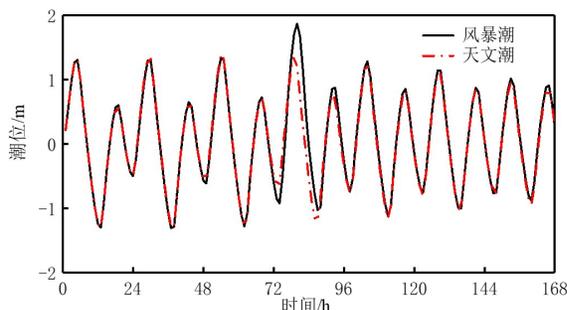
(e) 磨刀门



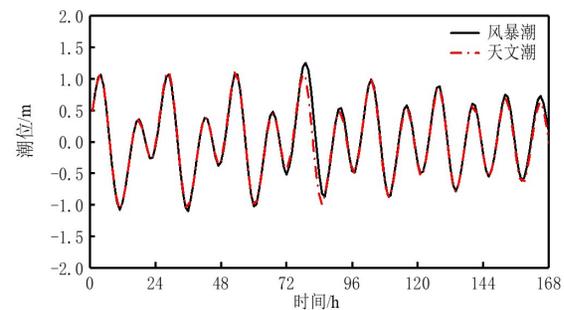
(f) 鸡啼门



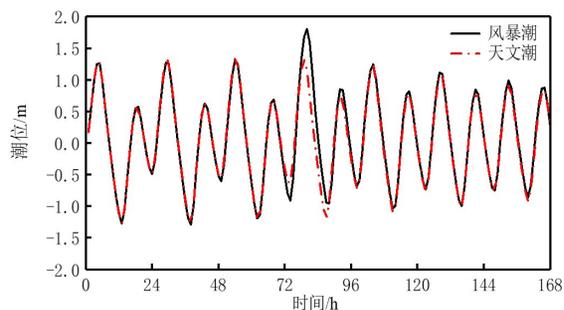
(g) 虎跳门



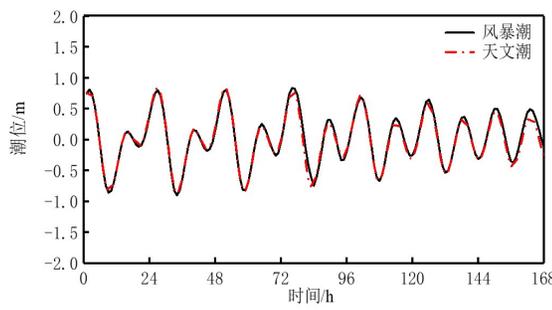
(h) 崖门



(i) 内伶仃岛



(j) 内伶仃洋



(k) 外伶仃洋

图6 各测站风暴潮与天文潮对比

Fig. 6 Comparison of storm surge and astronomical tide at each station

河道较窄,其中虎跳门出海口只能划分出一个非结构三角形网格,测站与陆地之间的距离很小。中部几个出海口在台风的影响下,潮位变化较大,增水范围为0.30~0.65 m。根据航道上3个测站(内伶仃岛、内伶仃洋、外伶仃洋)的潮位变化曲线可知,潮位受台风影响程度由北向南逐渐减小,在外伶仃洋测站处,潮位受台风影响最小,增水不超过0.20 m。

综合分析可知,台风对潮位的影响受测站地理位置和地形、测站到台风中心的距离等因素综合调控。在台风的影响下,越靠近外海,潮位变化幅度受水深逐渐增大等因素的影响逐渐变小。

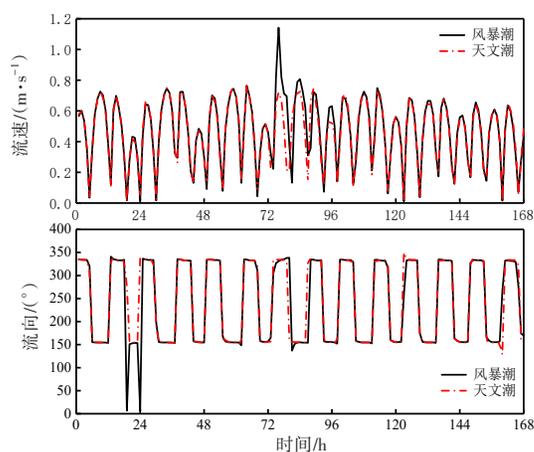
2.2 台风对流速及流向的影响

图7~8为部分测站2017年8月20日—26日表层流速和垂向平均流速的变化曲线(台风“天鸽”的登陆时间为2017年8月23日12时50分)。

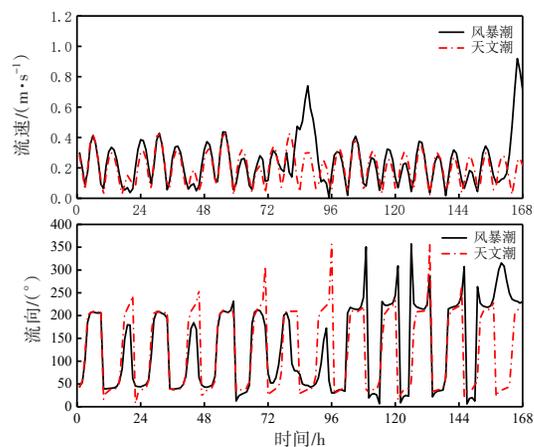
流速受台风影响的时段与潮位受台风影响的时段基本相同,流速在台风“天鸽”登陆过程中出现了明显变化,但是流速对台风做出响应的时间早于潮位对台风做出响应的的时间。在非台风时期,流速的变化幅度受风场影响较小,且与潮位相比,流速对风场的响应更敏锐。台风对珠江口表层流速的变化影响显著,其中,受台风影响最明显的测站是横门和外伶仃洋(图7),其表层流速极值的提升超过了0.40 m/s,最大达0.50 m/s,流向随台风中心的移动而时刻变化着,变化范围为0~180°。

与表层流速相比,垂向平均流速受台风影响的变化幅度相对较小。除鸡啼门测站外,其他测站台风影响下的垂向平均流速的变化幅度均比表层流速的小。鸡啼门测站由于靠近台风中心,底层海流被台风扰动,因此其底层流速发生了剧烈变化,其垂向平均流速也显著增大(图8)。但所有

测站的垂向平均流速均遵循落潮流速大于涨潮流速的规律。进一步比较表层流速和垂向平均流速的变化可知,台风主要影响潮流的表层流速,流速的垂向分布呈现出越靠近底层流速越小的趋势。



(a) 横门



(b) 外伶仃洋

图7 表层流速及流向对比

Fig. 7 Comparison of surface flow rate and flow direction

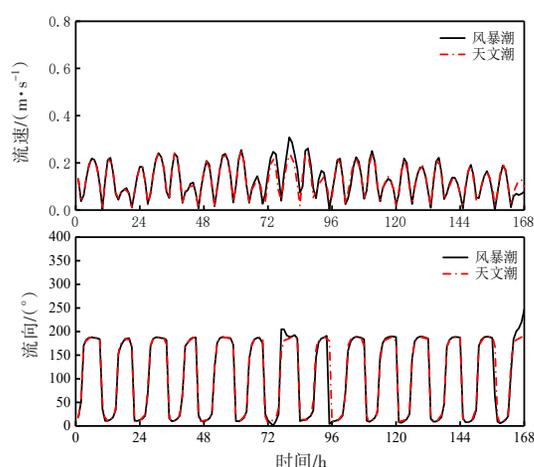


图8 鸡啼门垂向平均流速及流向对比

Fig. 8 Comparison of vertical mean flow velocity and flow direction at the Jitimen

上述分析结果说明台风对潮流的影响主要体现在表层流速方面,而垂向平均流速的变化幅度较小,且天文潮流速的整体变化符合潮汐规律。

图9所示为2017年8月23日08时(落急时刻)和16时(涨急时刻)珠江口及其附近海域潮位和流场的分布情况。由于流场随着涨落潮的反复而不断变化着,因而不同时刻的流速分布将不同。因此,为更好地探究流场的分布规律,本研究分别选取涨急和落急时刻进行潮位和流场的分析。图10所示为2017年8月23日10时和18时珠江口及其附近海域最大、最小潮位时刻的风暴增水情况。

由图9~10可知,在台风的影下,整个研究区域的潮位均有不同程度的增大,外海区域的潮位增长由东北方向往西南方向逐渐减小,台风对研究区域西南边界附近的影响不明显。在珠江口区域,潮位在东北方向增长最为明显,且珠江口区域潮位的整体变化更加显著。在时间维度上,通过3组潮位云图可以明显观察到,台风对潮位的影响主要体现在登陆前的一段时间内,登陆后台风的影响逐渐减弱。

根据图9中表层流速矢量箭头的变化可知,整个研究区域的表层流速在台风的影下都明显增大,这种增大趋势在出海口和岛屿密集区尤为明显。在落急时刻,潮流整体为从虎门向外海流动的离岸流,流速先减小后增大,最后再减小,最终从虎门出海口流出,由于通道骤然变宽,流速有所减小;在之后的流动中,来自虎门、蕉门和洪奇门等出海口的水流逐渐汇入,在河宽不变的情况下,流量突增致使流速增大,并在内伶仃岛附近达到最大;潮流继续向海运动,径流作用减小,流速也不断减小。此外,在珠江口区域东侧水深比西侧的大,所以流速在空间分布上呈现出东大西小的格局,具体表现为东侧航道区的流速明显比西侧浅滩的大。在黄茅海海域中,离岸流与附近的沿岸流汇合后向西南方向流动,黄茅海东侧流速比西侧的大。除此之外,落潮时受岸线和岛屿等的影响,天文潮流整体逆时针偏转,但在台风作用下,黄茅海等研究区域西侧的潮流出现了顺时针偏转。

在涨急时刻,潮流整体为向岸流,但横门、洪奇门和蕉门测站的潮流因珠江下泄流的影响出现了离岸流的特征。进一步聚焦于伶仃洋区域可以发现,由外伶仃洋到内伶仃洋,潮流流速先增大后

减小,潮流从外海向珠江口内移动。在珠江口湾口变窄处,潮能得以聚集,因此潮流流速不断增大,在内外伶仃洋分界线处流速达到最大。当潮流继续向北移动时,随着水深的逐渐变浅,潮流受到的海底摩擦力不断增大,即阻力不断增大,导致流速有所减小。在黄茅海区域,潮流由西南方向流入后,沿岸流向崖门和虎跳门,由于河道急剧收缩变窄,潮流变得湍急,流速骤然增大。值得注意的是,图9所示为表层流速的流场,在实际情况下,底层流场和表层流场存在差异,需要进一步深入研究。

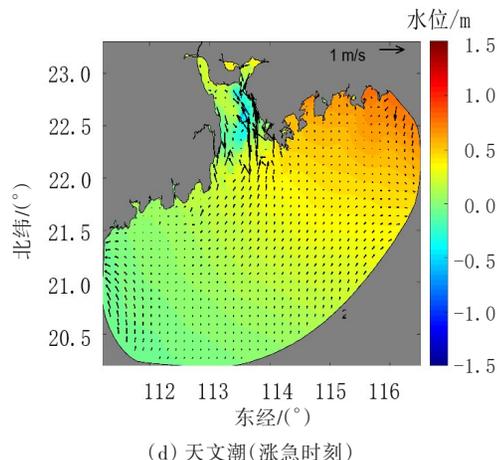
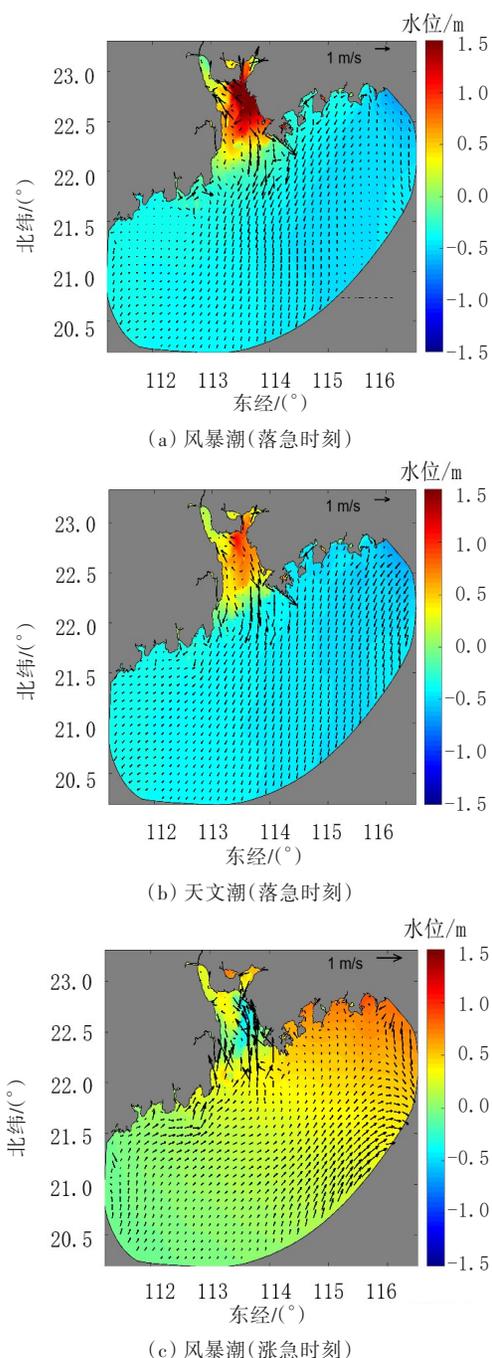


图 9 台风作用下潮位及流场对比

Fig. 9 Comparison of tidal levels and flow fields under the influence of typhoon

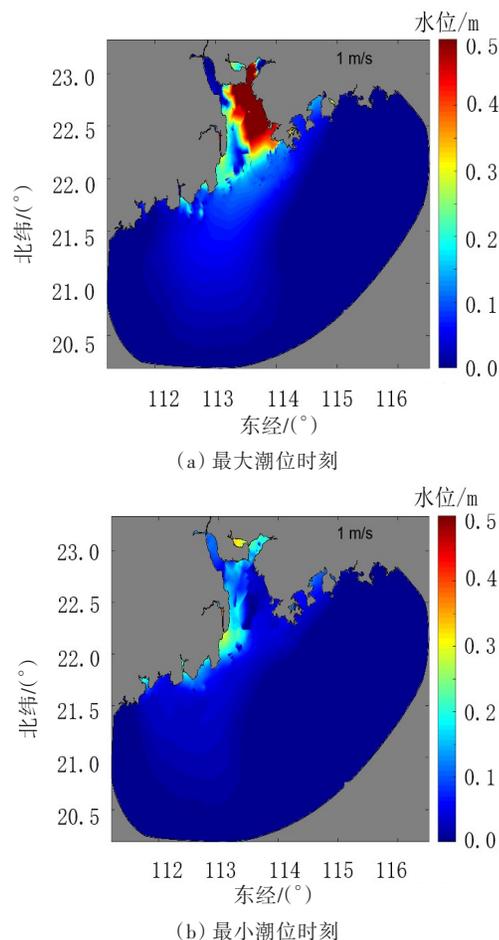


图 10 最大、最小潮位时刻风暴增水情况

Fig. 10 Storm-surge water gain at the moment of maximum and minimum tide levels

在台风的影响下,涨急和落急时刻流速的增长更加剧烈,流速的最大值也显著增大,这将导致潮流对岸滩的冲刷作用增强,同时会对船只的航行带来不便。台风的运动轨迹对潮位和流速的变

化也有影响,以台风“天鸽”为例,其运动轨迹对东北区域涨落潮流速的影响更大,因而对沿途岸线的冲刷作用也更加剧烈,需要引起足够的重视^[24-25]。从流场角度来看,台风作用下的流场变化复杂,需要进一步探究其物理机制,以更好地了解台风对沿海地区的影响。

3 结论

本研究基于验证良好的模型对台风“天鸽”的水动力过程进行分析,研究内容包括台风对潮位的影响和台风对流速及流向的影响。

1) 台风对潮位的影响与位置关系密切。在潮位云图中,台风“天鸽”对其运动轨迹东北方向潮位的影响比西南方向的大,位于台风东北方向的地区,其所遭受的风暴潮灾害更加严重。在珠江八大出海口中,磨刀门受台风影响最大,台风登陆前其最大增水为0.79 m,风暴潮极值达到了1.91 m;中部几个出海口在台风的影下增水的变化范围为0.30~0.65 m;外伶仃洋测站处的增水不超过0.20 m,因外伶仃洋水深较大,台风对外伶仃洋潮位的影响比对内伶仃洋潮位的影响小。

2) 流速对台风的响应比潮位对台风的响应更敏锐,受影响程度相对更大;台风对表层流速的影响明显比对垂向平均流速的大,表层水流的流向受台风的影响也较大,受台风影响流速极值最大提升了0.50 m/s,流向变化范围为0~180°。在靠近台风中心处,底层流速也因台风的扰动而剧烈变化,其增大幅度甚至比表层流速的大。

[参考文献]

- [1] 蒋昌波,伍志元,陈杰,等. 风暴潮作用下泥沙运动和岸滩演变研究综述[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2014, 11(1): 1-9.
JIANG Changbo, WU Zhiyuan, CHEN Jie, et al. Review of sediment transport and beach profile changes under storm surge [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2014, 11(1): 1-9.
- [2] 蒋昌波,赵兵兵,邓斌,等. 铁山湾海域风暴潮的数值模拟[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2017, 14(2): 49-54.
JIANG Changbo, ZHAO Bingbing, DENG Bin, et al. Numerical simulation of storm surge in Tieshan Bay [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2017, 14(2): 49-54.
- [3] 刘旭,付翔,王峰,等. 我国风暴潮灾害直接经济损失分布与风险可保性研究[J]. 海洋预报, 2022, 39(6): 90-101. DOI: 10.11737/j.issn.1003-0239.2022.06.010.
LIU Xu, FU Xiang, WANG Zheng, et al. The direct economic loss distribution and risk insurability of typhoon storm surge disaster in China [J]. Marine Forecasts, 2022, 39(6): 90-101. DOI: 10.11737/j.issn.1003-0239.2022.06.010.
- [4] 刘士诚,陈永平,谭亚,等. 珠江河口1822号台风“山竹”期间风暴增水模拟及特性分析[J]. 海洋预报, 2021, 38(2): 12-20. DOI: 10.11737/j.issn.1003-0239.2021.02.002.
LIU Shicheng, CHEN Yongping, TAN Ya, et al. Storm surge simulation and characteristic analysis during Typhoon “Mangkhut” 2018 in the Pearl River Estuary [J]. Marine Forecasts, 2021, 38(2): 12-20. DOI: 10.11737/j.issn.1003-0239.2021.02.002.
- [5] 姜志浩,蔡勤禹. 我国海洋灾害演变趋势分析(1949—2020)[J]. 防灾科技学院学报, 2022, 24(2): 90-99. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8047.2022.02.010.
JIANG Zhihao, CAI Qinyu. Analysis on the evolution trend of marine disasters (1949—2020) [J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2022, 24(2): 90-99. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8047.2022.02.010.
- [6] 董剑希,李涛,侯京明,等. 广东省风暴潮时空分布特征及重点城市风暴潮风险研究[J]. 海洋学报, 2014, 36(3): 83-93. DOI: 10.3969/J. ISSN.0253-4193.2014.03.009.
DONG Jianxi, LI Tao, HOU Jingming, et al. The characteristics of temporal and spatial distribution of storm surge in Guangdong Province and storm surge hazard study at Yangjiang City [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(3): 83-93. DOI: 10.3969/J. ISSN.0253-4193.2014.03.009.
- [7] 王光宇. 珠江口海域潮流及物质输运特征研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020. DOI: 10.27151/d.cnki.ghnlu.2020.002099.
WANG Guangyu. Study on the characteristics of tidal current and material transportation in the pearl river estuary [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020. DOI: 10.27151/d.cnki.ghnlu.2020.002099.
- [8] 何蕾,李国胜,李阔,等. 珠江三角洲地区风暴潮灾害工程性适应的损益分析[J]. 地理研究, 2019, 38(2): 427-436. DOI: 10.11821/dlyj020180526.
HE Lei, LI Guosheng, LI Kuo, et al. Benefit-cost analysis of engineering adaptation for storm surge risk in coastal areas: a case study on the Pearl River Delta [J]. Geographical Research, 2019, 38(2): 427-436. DOI: 10.11821/dlyj020180526.

- [9] 谢洋. 海平面上升对珠江口风暴潮增水和波浪的影响研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
XIE Yang. Impact of sea level rise on storm surge and wave in the pearl river estuary[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [10] 王永信, 史键辉, 于斌, 等. 台风暴潮沿珠江河道上溯分析[J]. 海洋通报, 1998, 17(5): 10-16.
WANG Yongxin, SHI Jianhui, YU Bin, et al. Analysis of the upstream-going tropical storm surge along the Pearl River [J]. Marine Science Bulletin, 1998, 17(5): 10-16.
- [11] 史键辉, 王永信, 于斌, 等. 珠江口纵深的风暴潮和增水特征[J]. 海洋预报, 2000, 17(4): 47-51. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0239.2000.04.008.
SHI Jianhui, WANG Yongxin, YU Bin, et al. Characteristics of storm surge and water increase in the depth of Pearl River Estuary [J]. Marine Forecasts, 2000, 17(4): 47-51. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0239.2000.04.008.
- [12] 陈文想. 2008—2018年强台风对珠江口—横门及其上游的增水影响分析[J]. 广东水利水电, 2019(5): 28-31.
CHEN Wenxiang. Influence analysis of 2008—2018 strong typhoon setup on Pearl River Estuary-Hengmen [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2019(5): 28-31.
- [13] 徐婉明, 邓伟铸, 赵明利, 等. 深圳0814号台风风暴潮数值模拟及最高潮位特征分析[J]. 海洋预报, 2020, 37(1): 11-17. DOI: 10.11737/j.issn.1003-0239.2020.01.002.
XU Wanming, DENG Weizhu, ZHAO Mingli, et al. Numerical simulation of the storm surge and characteristics of the highest tide level in Shenzhen caused by typhoon 0814 [J]. Marine Forecasts, 2020, 37(1): 11-17. DOI: 10.11737/j.issn.1003-0239.2020.01.002.
- [14] 胡仕焜, 刘丙军, 邱江潮, 等. 珠江河口区风暴潮增水过程非线性叠加效应研究[J]. 海洋科学, 2023, 47(1): 1-12. DOI: 10.11759/hyhx20220105004.
HU Shikun, LIU Bingjun, QIU Jiangchao, et al. Nonlinear effects of a storm surge in the Pearl River Estuary [J]. Marine Sciences, 2023, 47(1): 1-12. DOI: 10.11759/hyhx20220105004.
- [15] YIN K, XU S D, HUANG W R, et al. Effects of sea level rise and typhoon intensity on storm surge and waves in Pearl River Estuary [J]. Ocean Engineering, 2017, 136: 80-93. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.03.016.
- [16] SHEN Y M, JIA H, LI C P, et al. Numerical simulation of saltwater intrusion and storm surge effects of reclamation in Pearl River Estuary, China [J]. Applied Ocean Research, 2018, 79: 101-112. DOI: 10.1016/j.apor.2018.07.013.
- [17] YANG Y, GUAN W B, DELEERSNIJDER E, et al. Hydrodynamic and sediment transport modelling in the Pearl River Estuary and adjacent Chinese coastal zone during Typhoon Mangkhut [J]. Continental Shelf Research, 2022, 233: 104645. DOI: 10.1016/j.csr.2022.104645.
- [18] YANG J E, LI L L, ZHAO K F, et al. A comparative study of Typhoon Hato (2017) and Typhoon Mangkhut (2018): their impacts on coastal inundation in Macau [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2019, 124(12): 9590-9619. DOI: 10.1029/2019jc015249.
- [19] LI L L, YANG J E, LIN C Y, et al. Field survey of Typhoon Hato (2017) and a comparison with storm surge modeling in Macau [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2018, 18(12): 3167-3178. DOI: 10.5194/nhess-18-3167-2018.
- [20] CHEN C S, BEARDSLEY R C, COWLES G, et al. An unstructured-grid, finite-volume community ocean model: FVCOM user manual [M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2012.
- [21] MELLOR G L, YAMADA T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems [J]. Reviews of Geophysics, 1982, 20(4): 851. DOI: 10.1029/rg020i004p00851.
- [22] 张志康. 基于FVCOM黄渤海主要浅水分潮的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020. DOI: 10.27314/d.cnki.gsscu.2020.000497.
ZHANG Zhikang. Characteristics analysis of shallow water tidal constituents in the Huanghai and Bohai Sea based on FVCOM [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020. DOI: 10.27314/d.cnki.gsscu.2020.000497.
- [23] WESSEL P, SMITH W H F. A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1996, 101(B4): 8741-8743. DOI: 10.1029/96jb00104.
- [24] 刘峥. 海洋灾害对滨海公路的影响及对策[J]. 公路与汽运, 2010(3): 111-114. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2010.03.032.
LIU Zheng. Influence of marine disasters on coastal highways and its countermeasures [J]. Highways & Automotive Applications, 2010(3): 111-114. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2010.03.032.
- [25] 刘冬荣, 张伟娜, 莫加伟. 河海岸带国土空间管控探讨[J]. 国土资源导刊, 2022, 19(4): 54-58. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5603.2022.04.011.
LIU Dongrong, ZHANG Weina, MO Jiawei. Discussion on territorial space regulation and control of river bank and lakeshore zone [J]. Land & Resources Herald, 2022, 19(4): 54-58. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5603.2022.04.011.

Numerical simulation of hydrodynamic processes in the Pearl River Estuary influenced by Typhoon "Hato"

ZHANG Haojian¹, WU Zhiyuan^{1,2}, LIU Xiaojian³, LYU Zhao¹

(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. Pearl River Hydraulic Research Institute, Pearl River Water Resources Commission, Guangzhou 510611, China)

Abstract: [Purposes] This study investigated the hydrodynamic processes in the Pearl River Estuary under the influence of Typhoon "Hato". [Methods] The hydrodynamic processes in the Pearl River Estuary and the nearby sea area were simulated using the FVCOM model based on an unstructured grid. [Findings] Among the eight outlets of the Pearl River Estuary, Modaomen was the one that most severely affected by the typhoon, with a maximum water increase of 0.79 m, followed by the central outlets (0.30–0.65 m), and the Wailingdingyang outlet (0.20 m). Under the influence of the typhoon, the maximum increase of surface current speed was 0.50 m/s. The maximum surface current speed of the storm surge was twice that of the astronomical tide at the same time. The wind direction varied within the range of 0–180° along with the movement of the center of the typhoon. [Conclusions] The current velocity responded earlier to the typhoon than the tide level and was more severely affected by the typhoon. The typhoon exerted a stronger influence on the surface current speed than on the vertical mean current speed. The storm surge in the northeast direction of the track of Typhoon "Hato" induced larger water increase than that in the southwest direction, and the area located in the northeast of the typhoon suffered more serious storm surge disaster.

Key words: Typhoon "Hato"; Pearl River Estuary; hydrodynamic; outlet; storm surge; numerical simulation

Manuscript received: 2023-05-15; **revised:** 2023-07-22; **accepted:** 2023-08-10

Foundation item: Project (52171246, 51839002) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project "numerical simulation of sudden silting of channel under storm surge" supported by postgraduate research innovation project, School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology

Corresponding author: WU Zhiyuan (1989—)(ORCID:0000-0001-7482-705X), male, associate professor, research interest: coastal and ocean dynamic processes and their simulation technology. E-mail: zwu@csust.edu.cn

(责任编辑:石月珍;校对:刘平;英文编辑:黄志勇)