

珠海市沿海风暴潮数值模拟试验研究

黄宝霞^{1,2}, 李希茜^{1,2}, 罗军^{1,2}

(1. 国家海洋局南海预报中心, 广东 广州 510310; 2. 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室, 广东 广州 510310)

摘要: 基于ELCIRC模型建立了适用于珠海市海域的风暴潮模型, 以1713号台风“天鸽”路径为基础, 通过改变台风入射角、台风登陆点、台风移速等方式构建登陆或者影响珠海市的台风路径, 并进行风暴潮数值模拟计算, 分析珠海市沿海风暴潮特征。结果表明: 改变台风入射角时, 珠海市沿海不同岸段的风暴潮将出现较大差异性; 距离台风中心约15~100 km且位于台风右半圆的沿海地区将是风暴潮的重灾区; 在珠海市的香洲区 and 斗门区沿岸, 风暴增水总体随着台风移速变慢而呈现增大的趋势, 但金湾区的情况则较为复杂, 当台风移速为15~30 km/h时, 在沿着台风“天鸽”的移动路径上会产生较强的风暴潮过程。

关键词: ELCIRC模型; 台风“天鸽”; 数值模拟; 风暴增水

中图分类号: P731.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)02-0013-11

0 前言

珠海市地处珠江口西岸, 濒临广阔的南海, 是珠江三角洲城市群中海洋面积最大、岛屿最多、海岸线最长的城市。根据资料统计^[1], 珠江口沿岸风暴潮灾害频发, 年频数达到3次左右, 主要与其自身的地理位置和海岸地形密切相关, 珠海市不可避免地成为珠江口沿岸风暴潮灾害的重灾区。尤其是1713号台风“天鸽”重创珠海市, 恰逢天文大潮遇上高潮, 珠海市沿海发生严重的风暴潮灾害, 经济损失严重。尽管1822号台风“山竹”也侵袭了珠海市, 但因为群众防灾意识增强和地方防御准备更充分, 台风“山竹”风暴潮灾害造成的损失远小于台风“天鸽”^[2]。根据《2017年广东省海洋灾害公报》和《2018年广东省海洋灾害公报》, 珠海市因风暴潮灾害导致的直接经济损失从2017年的44.01亿元降到了2018年的1.09亿元。虽然台风不可避免, 但及时提供准确的风暴潮预报则能最大限度地减少风暴潮灾害带来的经济损失。风暴潮数值模拟技术是风暴潮预报的重要手段^[3], 本文通过数值模拟分析了

珠海市沿海的风暴潮特征, 有利于提升珠海市风暴潮预警能力, 这不仅为珠海市海洋防灾减灾提供决策服务, 同时为珠海市的涉海规划建设提供方向。

国内外学者开展了大量风暴潮数值模拟研究工作, 基于不同的风暴潮模式, 从台风参数的差异、是否耦合波浪或者潮流等角度分析了沿海地区的风暴潮特征^[4-8], 这些研究结果对当地沿海风暴潮的预报工作有重要的参考价值。庞古乾等^[9]通过计算得到了影响珠海市的可能最强台风路径并通过了1713号台风“天鸽”和1822号台风“山竹”的最大增水和最高潮位验证; 韩晶^[10]分析了1713号台风“天鸽”和1822号台风“山竹”的路径和潮动力差异, 探讨了珠海三灶水文站风暴潮增水的影响因子, 但未能深入探讨珠海市不同岸段的风暴潮特点。为分析珠海市不同岸段的风暴潮特点与台风参数的关系, 本文以1713号台风“天鸽”路径为基础, 通过改变台风入射角(定义为正东方向与台风登陆前后两个经纬度数据点连线逆时针方向的夹角)^[11]、台风登陆点、台风移速等方式, 构建登陆或者影响珠海市

收稿日期: 2022-01-27。

基金项目: 国家重点研发计划重点专项课题(2018YFC1407002); 国家海洋局南海分局海洋科学技术局长基金(180218)。

作者简介: 黄宝霞(1986-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事海洋环境预报工作。E-mail: 28223092@qq.com

的台风路径并进行风暴潮数值模拟计算,分析珠海市沿海的风暴潮特征,并揭示不同岸段最有利于风暴增水的台风路径。

1 风暴潮模型简介及验证

1.1 风暴潮模型

ELCIRC 模型 (Eulerian-Lagrangian CIRCulation) 是美国俄勒冈健康与科学大学海岸陆地边缘陆缘研究中心基于对哥伦比亚河的研究所开发的哥伦比亚环流模型 CORIE 的一部分。该模型水平向采用无结构网格、垂向为 z 坐标体系,算法上考虑了多种紊流闭合模式,也包括了潮汐势、大气压梯度项及水汽交换,是可以实现模拟多种物理过程的三维海洋模型^[12]。由于风暴潮过程考虑的是正压梯度力项,因此本文在原有模型的基础上,将其中的温盐扩散方程和状态方程模块关闭,再将原来的三维模型改成二维模型并对模型中所有交互式结构进行了调整,以提高计算效率,从而进行风暴潮数值模拟^[13]。

ELCIRC 模型采用半隐格式有限体积法求解风暴潮方程组,其中运动方程中的平流项采用欧拉-拉格朗日差值求解。具体方程组为:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta \right) + \\ \frac{\tau_{sx}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0 H} + T_x \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU = -\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta \right) + \\ \frac{\tau_{sy}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0 H} + T_y \end{aligned} \quad (3)$$

式中: x 和 y 分别表示横轴和纵轴坐标; t 为时间; U 和 V 分别为沿 x 和 y 方向的深度平均流速; ζ 为平均水面之上的高度; H 为总水深; f 为科氏力系数; p_s 表面大气压; ρ_0 为水密度; τ_{sx} 与 τ_{sy} 为表面切应力; τ_{bx} 与 τ_{by} 为底摩擦力; T_x 与 T_y 为辐射应力项。

1.2 台风模型

台风是影响风暴潮的重要因素,选择合适的台风模型有助于提高风暴潮模拟的准确度。台风模型主要包括气压模型、环形风速模型、移形风速模型等要素。

本研究的气压模型选择藤田-高桥公式组合模型^[14-15],主要考虑藤田公式能较准确地模拟台风中心~2倍最大风速半径(R ,单位:m)范围内的气压变化,而高桥公式能更好地刻画 $2R$ 范围外的气压场。

藤田-高桥公式的气压场分布为:

$$P = P_\infty - (P_\infty - P_0) \left[1 + 2 \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]^{-0.5} \quad 0 < r \leq 2R \quad (4)$$

$$P = P_\infty - (P_\infty - P_0) \left[1 + \frac{r}{R} \right]^{-1} \quad r > 2R \quad (5)$$

式中: P_0 表示台风中心气压; P_∞ 表示台风外围气压; r 为目标点到台风中心的距离; R 为最大风速半径。

实际上台风是不断移动的,右侧风力较大,具有不对称结构。为了考虑非对称风场的分布,将台风风场看成是台风静止时的中心对称梯度风与台风中心以某一速度移动产生的风场的矢量叠加,即是环形风速和移形风速的矢量叠加^[16]。在本文中,环形风速模型和移形风速模型均采用 JELESNI-ANSKI 公式^[17]。考虑台风风向与地转风的偏角后,台风风场的计算公式可描述为:

$$\begin{cases} w_x = \frac{r}{r+R} u - w_m \left(\frac{r}{R} \right)^{1.5} \frac{1}{r} [(x-x_c) \sin\theta + (y-y_c) \cos\theta] \\ w_y = \frac{r}{r+R} v + w_m \left(\frac{r}{R} \right)^{1.5} \frac{1}{r} [(x-x_c) \cos\theta - (y-y_c) \sin\theta] \end{cases} \quad 0 \leq r \leq R \quad (6)$$

$$\begin{cases} w_x = \frac{R}{r+R} u - w_m \left(\frac{R}{r} \right)^{0.5} \frac{1}{r} [(x-x_c) \sin\theta + (y-y_c) \cos\theta] \\ w_y = \frac{R}{r+R} v + w_m \left(\frac{R}{r} \right)^{0.5} \frac{1}{r} [(x-x_c) \cos\theta - (y-y_c) \sin\theta] \end{cases} \quad r > R \quad (7)$$

式中: w_x, w_y 为 x, y 方向的风速; u, v 为台风移动速度在 x, y 方向的分量; w_m 为台风中心风速; (x_c, y_c) 为台风中心坐标; θ 为台风风向与地转风的偏角,文中取值为 20° 。

1.3 典型台风风暴潮模拟验证和分析

近十年来,珠海市沿海地区发生的较严重的风暴潮过程主要有1208号台风“韦森特”、1713号台风“天鸽”以及1822号台风“山竹”(见图1)。这3个台风在近海主要以西偏北方向靠近珠海市海域,并以台风以上级别在珠海市南部—江门台山一带沿海登陆。受这类型台风影响,珠海市沿海极易产生特大风暴潮^[1]。

本文选取上述3个台风进行风暴潮模拟,并对

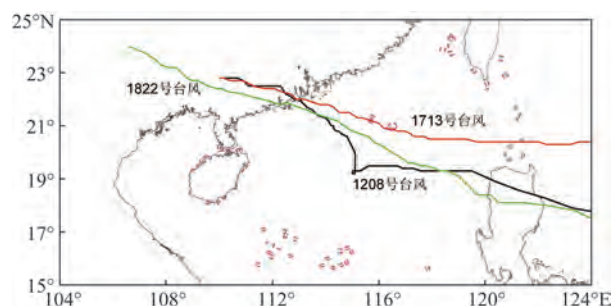


图1 1208号台风“韦森特”、1713号台风“天鸽”以及1822号台风“山竹”路径图

Fig.1 The tracks of Typhoon "Vicente" (No.1208), Typhoon "Hato" (No.1713) and Typhoon "Mangkhut" (No.1822)

珠海市海域附近的横门站、珠海站和三灶站的风暴增水进行验证和分析,结果见图2。通过计算可以

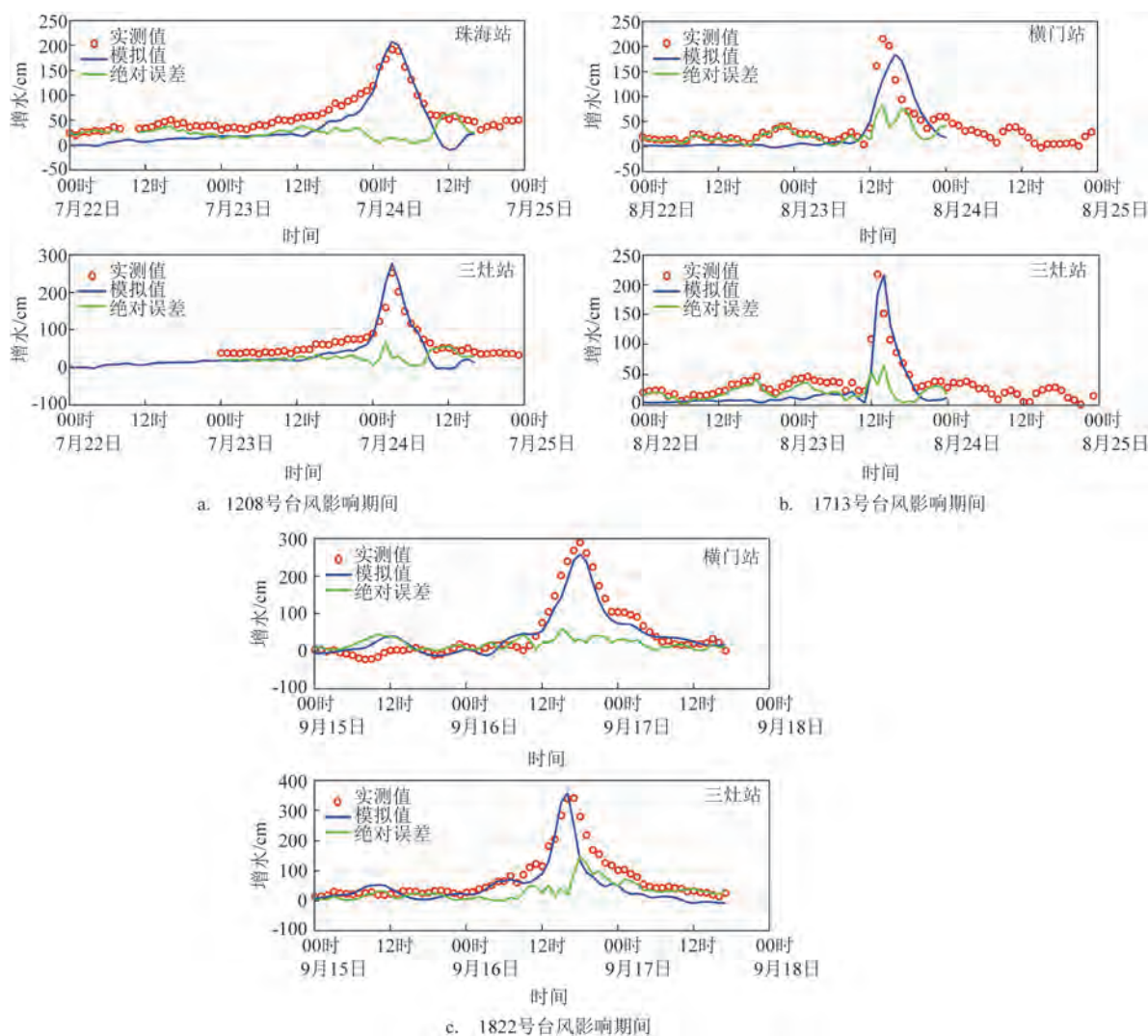


图2 台风影响期间珠海市海域附近验潮站的风暴增水验证图

Fig.2 Comparisons of simulated and observed storm surge at the stations near Zhuhai

表 1 珠海市沿海附近验潮站增水误差统计表

Tab.1 Error statistics of storm surge of tide gauge stations near Zhuhai

台风编号	站点	实测最大增水/cm	模拟最大增水/cm	最大增水绝对误差/cm	最大增水相对误差/%	增水平均绝对误差/cm
1208	珠海站	191	207	16	8.4	26
	三灶站	251	276	25	10.0	26
1713	横门站	215	183	32	14.9	23
	三灶站	216	216	0	0	21
1822	横门站	289	258	31	10.7	19
	三灶站	339	355	16	4.7	31

得出(见表1),珠海市海域附近验潮站的增水平均误差除了三灶站在1822号台风期间达到31 cm外,其他站点在上述3个台风期间均低于30 cm;3场台风的最大增水相对误差均在15%以下,最大增水的绝对误差在35 cm以下。总的来说,模型误差在合理范围内,本文所建立的模型适用于珠海市海域的风暴潮模拟。

2 台风构造

影响台风风暴潮的因素有岸线、地形、底摩擦力、风应力拖曳系数、台风路径、波浪、潮汐等^[18-20],而台风路径是决定风暴增水最关键的因子^[21],因此本文充分考虑台风路径的差异,即通过改变台风入射角、台风登陆点、台风移速等方式,以1713号台风“天鸽”为基础,构造一系列登陆或者影响珠海市的台风路径。在构造台风的过程中,设置台风登陆前后的强度与1713号台风一致。

刘睿哲等^[22]根据国家气象局的台风资料统计了1997—2007年影响珠江口河口区的台风。台风大概可分为三类:一类是以呈 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 的入射角度进入珠江口河口;二类是以与水平线呈 $150^{\circ}\sim 170^{\circ}$ 的角度登陆珠江口区域;三类是以与水平方向呈 $195^{\circ}\sim 215^{\circ}$ 的夹角方向从珠江口前掠过。本文根据此思路,在保持登陆点与台风“天鸽”相一致的前提下,构造了不同入射角的台风路径。构造方法是以1713号台风“天鸽”为基础,以台风登陆后一时刻的中心位置为原点,分别向东西方向旋转,每次旋转 10° ,剔除在沿海多次登陆的台风路径,剩余的台风路径按入射角由小到大编号为A1—A17(见图3a)。

在不考虑台风入射角的情况下,台风中心与珠海市沿岸的距离将直接影响珠海市沿岸的风暴增水大小,这主要与向岸风和离岸风有关。基于此思路,本文以1713号台风“天鸽”为基础,设置台风分别向东西方向移动,每次移动10 km,向东移动8次,向西移动16次,共构造了24条路径,加上1713号台风的路径,从北向南分别编号为B1—B25(见图3b)。

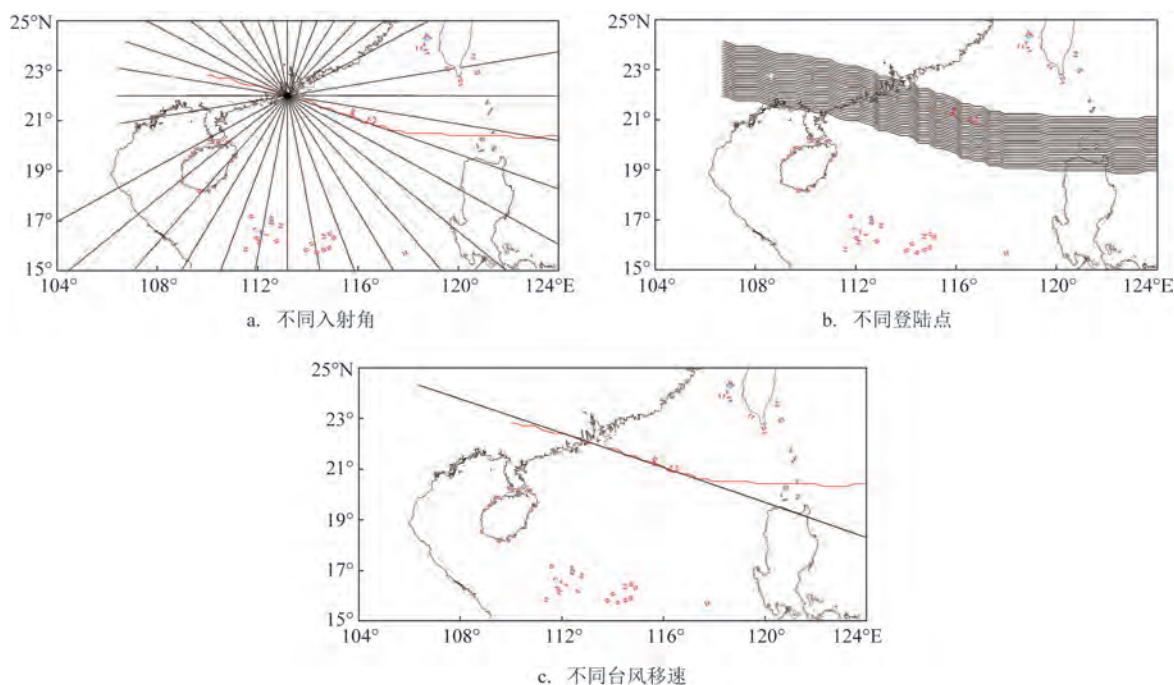
台风移速快慢主要影响的是风暴潮持续时间^[23]。为了解台风移速对珠海市沿岸风暴潮的影响,本文以1713号台风“天鸽”为基础,分别设置台风移速从5 km/h变化至40 km/h,每次变化5 km/h,共构造了8条路径,从低移速至高移速分别编号为C1—C8(见图3c)。

3 珠海市沿海风暴潮特征

基于上文构造的44条台风路径,采用ELCIRC模式模拟计算了珠海市沿海风暴增水,并在珠海市沿岸均匀选取9个代表点(见图4),其中点1—5代表珠海市香洲区沿岸,点6—8代表珠海市金湾区沿岸,点9代表珠海市斗门区沿岸,我们从改变台风入射角、台风登陆点、台风移速等方面来分析珠海市沿海风暴潮特征。

3.1 台风入射角对珠海市沿海风暴潮的影响

图5a和5b是珠海市沿岸9个代表点在台风以不同入射角登陆时的最大增水曲线图。总体来说,以强台风级别登陆珠海市南部沿海的台风,均能在珠海市沿岸产生较强的风暴潮过程,其中金湾区沿



注:红色线为1713号台风“天鸽”路径

图3 不同入射角、不同登陆点和不同移速的台风“天鸽”路径图

Fig.3 The simulated tracks of Typhoons "Hato" in response to different incident angles, landfall locations and moving speeds

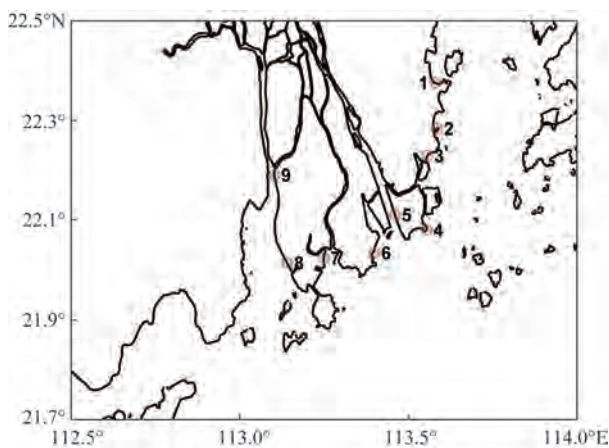


图4 代表点位置分布

Fig.4 Distribution of representative points

岸风暴潮最严重,其次为香洲区。

香洲区沿岸面向珠江口海域,点1选在淇澳岛西南部沿海与香洲区沿岸之间的海湾内,即位于港珠澳大桥2号码头附近,产生最大增水的路径为A4,台风入射角为 60° ,即台风大致以东北偏北方向登陆珠海市南部沿海,并穿过珠海市、中山市进入伶仃洋。点2和3位于伶仃洋西部沿岸,产生最大

增水的路径分别为A13和A15,台风入射角分别为 150° 和 170° ,这两条路径大致以西北偏西方向登陆珠海市南部沿海,随后穿过黄茅海再次登陆江门市沿海,最有利于点2和3的海水堆积。当台风以入射角 120° 方向登陆珠海市南部沿海,随后穿过黄茅海进入江门新会区境内(台风路径A10)时,点4产生最大增水。点5位于磨刀门水道的东岸上,在台风以正北方向登陆珠海市南部沿海并进入斗门区境内(A7)时,点5获得最大增水。总体来说,香洲区沿岸不同代表点的风暴潮特征与台风入射角关系密切,即台风入射角的差异会导致台风风场出现差异,而当代表点所处位置的地形条件差异较大时,其对应的风暴潮特征也呈现较大差异。

香洲区沿岸的点4和金湾区沿岸的点6均面向珠海高栏海域,因此产生最大增水的台风路径较为接近,分别为A10和A9。金湾区沿岸的代表点7、8和斗门区沿岸的代表点9产生最大增水的台风路径分别为A16、A15和A14,台风入射角分别为 180° 、 170° 和 160° 。此类型台风大致横穿珠海市金湾区,然后穿过黄茅海再次登陆江门台山沿海,大量的海水堆积于金湾区和斗门区沿岸并产生较强的风暴

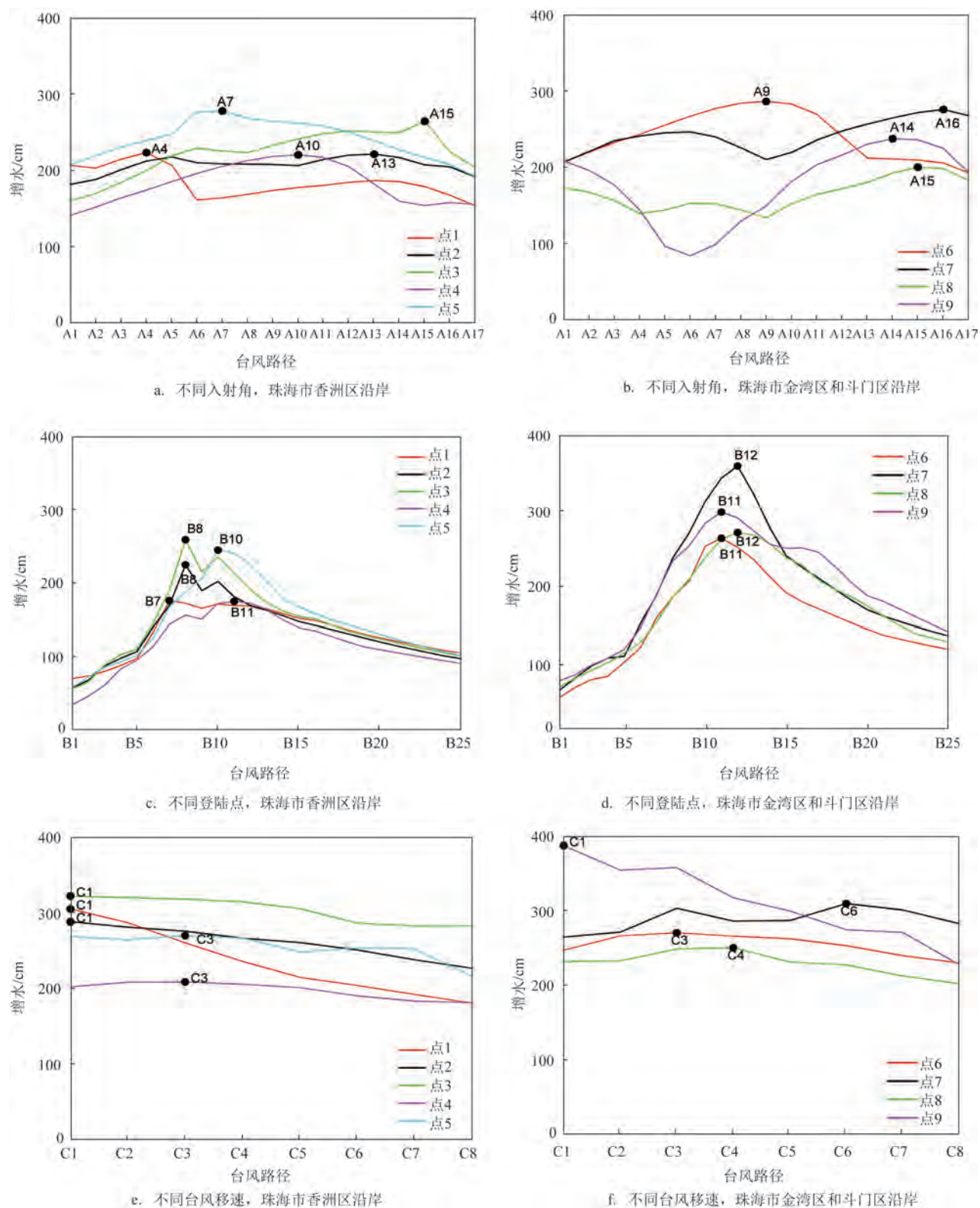


图5 代表点在不同台风入射角、台风登陆点、台风移速时的最大增水曲线图

Fig.5 Maximum storm surges of representative points in response to different incident angles, landfall locations and moving speeds

潮过程。

从各个代表点的最大增水随台风登陆角度的变化趋势来看,最大增水变化并不明显,原因可能是台风路径的登陆点保持一致。从风暴潮的预警预报角度分析,台风登陆点一旦明确,风暴潮的预报准确率会大大提高。

3.2 台风登陆点对珠海市沿海风暴潮的影响

图 5c 和 5d 是珠海市沿岸 9 个代表点在台风于不同地点登陆时的最大风暴增水图。一般来说,台风前进方向的右侧是受风暴潮影响较严重的地区。根据图 7c 和 7d 来看,珠海市沿岸 9 个代表点产生最大增水时均位于台风的右半圆。在香洲区、金湾区和斗门区沿岸产生最大增水的路径分别为 B8、B12 和 B11,这些路径沿岸的增水差异较大,主要原因在于台风的不对称性和沿岸地形差异。

当台风路径 B8 横过珠江口外海并登陆珠海市南部沿海时,香洲区沿岸不同点的最大增水值相差约 100 cm,其最大增水比金湾区和斗门区沿岸大 30 cm 左右。当台风路径 B12 穿过黄茅海外海并登陆江门台山沿海时,金湾区沿岸不同点的最大增水值相差约 110 cm,其最大增水比香洲区和斗门区沿岸分别大 120 cm 和 60 cm 左右。台风路径 B11 比 B12 略偏东,登陆点也较为接近,斗门区沿岸最大增水为 295 cm,比香洲区沿岸大 50 cm 左右,而比金湾区沿岸小约 50 cm。

从各个代表点的最大增水随台风登陆点的变化趋势来看,最大增水先逐渐增大,达到峰值后逐渐减小,原因在于台风登陆点和台风中心位置的不同会直接影响沿岸风力大小,进而影响到风暴增水的大小。

3.3 台风移速对珠海市沿海风暴潮的影响

图 5e 和 5f 是珠海市沿岸 9 个代表点在台风不同移速时的最大风暴增水图。由图可知,在台风登陆点和入射角固定的情况下,不同的台风移速均能在珠海市沿岸产生较强的风暴潮过程,其中斗门区沿岸在台风移速为 5 km/h 时的最大风暴增水最大,达到了 387 cm,其次是香洲区沿岸,最大增水达到 322 cm,而金湾区沿岸的最大风暴增水最小,仅为 309 cm。

香洲区沿岸的点 1—3 位于伶仃洋靠岸一侧,其产生最大增水的台风路径是 C1,台风移速为 5 km/h,台风移动速度越快,沿岸的海水堆积越少,风暴增水就越小。而点 4 和 5 产生最大增水的台风路径是 C3,台风移速为 15 km/h。除了点 5,香洲区沿岸从南到北最大风暴增水的变化幅度随着台风移动速度加快而变大。

金湾区沿岸产生最大风暴增水的台风路径是 C3、C4、C6,台风移速分别为 15 km/h、20 km/h、30 km/h,也就是说当台风移速为 15~30 km/h 并登陆珠海南部沿海时,金湾区沿岸会产生较强的风暴潮过程,最大增水可达到 309 cm。

当台风移速为 5 km/h 时(台风路径 C1),斗门区沿岸的最大风暴增水可达到 387 cm。随着台风移动速度加快,斗门区沿岸的最大风暴增水越来越小,主要原因是该地为逐渐变窄的黄茅海,水深变小,当台风移速加快时,海水来不及上涨,海水堆积有限。

香洲区和金湾区沿岸的代表点在不同台风移速下的最大风暴增水变化平缓,原因可能是各代表点位于相对开阔的海域或者距离开阔海域较近;而斗门沿岸代表点随着不同台风移速的变化,最大增水变化较显著,主要原因是代表点位于狭窄的水道上,水位易发生明显变化。

4 分析与讨论

本文考虑通过改变台风入射角、台风登陆点、台风移速等方式改变台风参数,以 1713 号台风“天鸽”为基础,构造了一系列登陆或者影响珠海市的台风路径,并采用 ELCIRC 模式进行珠海市风暴潮模拟计算,分析珠海市沿海的风暴潮特征,并揭示珠海市不同岸段最有利于风暴增水的台风路径,结果见图 6。

4.1 台风入射角

通过以登陆点为圆心旋转改变台风的入射角。珠海市的海岸线曲折绵长,其沿海风暴潮呈现不规则的特征,加上台风本身具有不对称性,沿海地区的风场呈现明显的不对称性^[9],珠海市沿海不同岸段的风暴潮将出现较大差异。例如台风路径 A7 垂

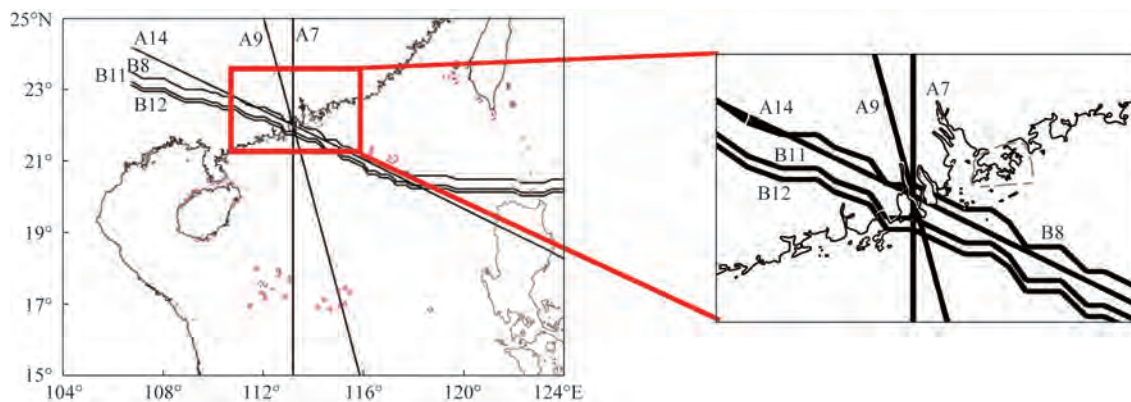
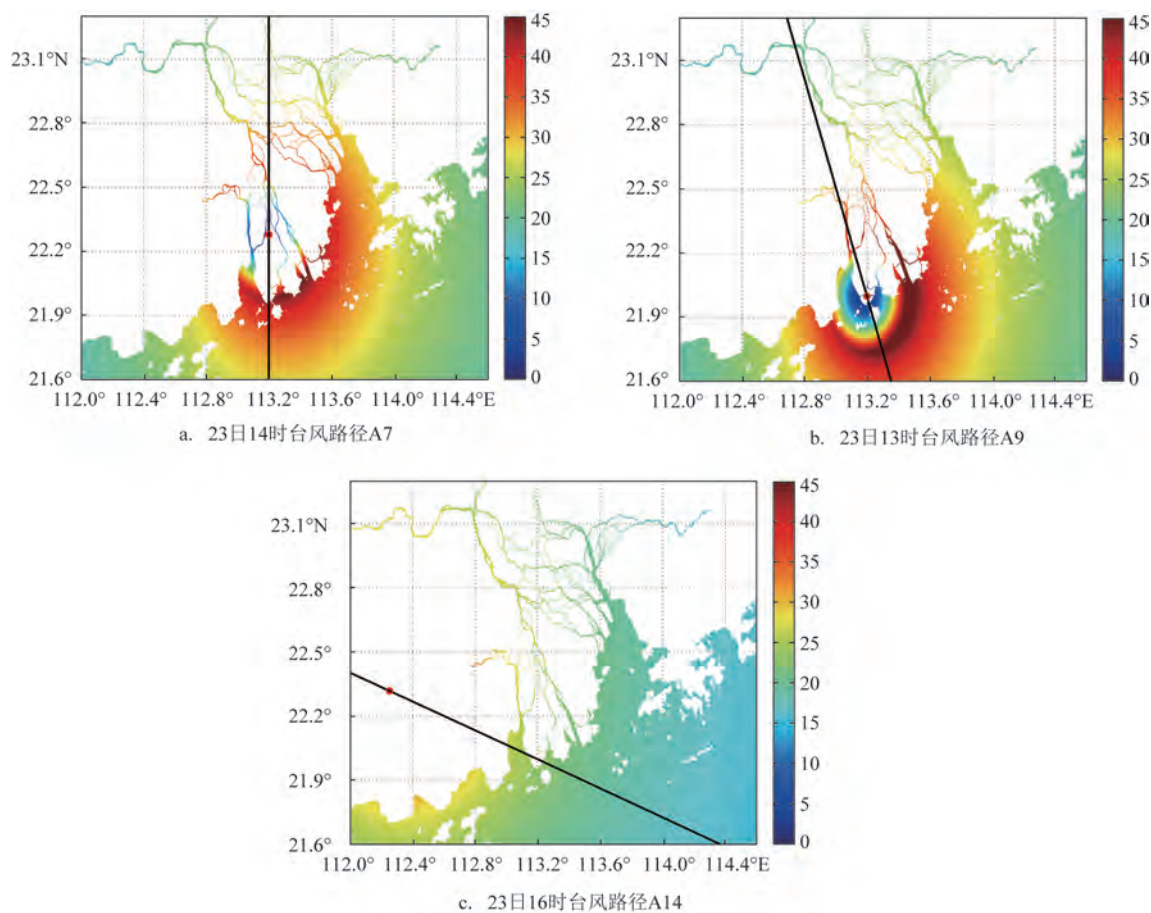


图6 最有利于珠海市风暴增水的台风路径图

Fig.6 The typhoon tracks with maximum storm surges in Zhuhai



注:红色点为台风中心

图7 珠海市沿岸最大增水时对应的风场图

Fig.7 Wind fields corresponding to the maximum storm surges in Zhuhai

直登陆于珠海市南部沿海,登陆后,珠海市香洲区沿岸与金湾区沿岸的点6和7处于向岸风作用下(见图7a,23日14时),风速可达45 m/s,最大增水为278 cm,而金湾区沿岸的点8和斗门区处于台风的

左半圆,即在离岸风的作用下处于减水状态;类似地,台风路径A9也出现相同现象,台风中心距离金湾区沿岸约40 km,风力强劲且持续时间较长,更利于海水堆积于金湾区沿岸,而斗门区沿岸和香洲区

表2 各代表点获得最大增水的台风路径及相关信息(不同入射角)

Tab.2 List of the typhoon tracks and relevant information with maximum storm surges at representative points (different incident angles)

代表点	1	2	3	4	5	6	7	8	9
路径编号	A4	A13	A15	A10	A7	A9	A16	A15	A14
台风入射角/(°)	60	150	170	120	90	110	180	170	160
最大增水/cm	223	221	264	220	278	287	257	200	238
对应时间	15时	13时	12时	13时	14时	13时	14时	16时	16时
距离/km	14.4	50.5	21.4	37.5	32.7	20.9	30.6	97.4	88.5
左半圆/右半圆	右	右	右	右	右	右	右	右	右

表3 各代表点获得最大增水的台风路径及相关信息(不同登陆点)

Tab.3 List of the typhoon tracks and relevant information with maximum storm surges at representative points (different landfall locations)

代表点	1	2	3	4	5	6	7	8	9
路径编号	B7	B8	B8	B11	B10	B11	B12	B12	B11
最大增水/cm	176	225	259	175	245	259	358	267	295
对应时间	12时	12时	12时	14时	14时	13时	14时	16时	16时
距离/km	33.7	33.6	27.1	73.3	61.8	31.5	48.7	86.7	83.0
左半圆/右半圆	右	右	右	右	右	右	右	右	右

沿岸因地理位置特殊或者离台风中心较远,海水堆积有限;台风路径A14在登陆珠海金湾区沿岸后(见图7c,23日16时),东南风将海水不断往黄茅海推送^[21],而黄茅海是一个呈喇叭状的河口湾,海水堆积快,因此斗门区沿岸出现了较强的风暴潮过程,而香洲区 and 金湾区沿岸风力开始减弱,海水逐渐往外海退去。

另外,本文还统计了各代表点发生最大增水对应的时间和台风路径,以及到台风中心的距离(见表2)。珠海市沿岸风暴潮最大增水发生时间约在12—16时,即为台风登陆前1h~登陆后3h内,位于台风右半圆且距离台风中心约15~100 km内的珠海市沿海将受到严重风暴潮的袭击。

4.2 台风登陆点

将台风平移可改变台风的登陆点和台风中心位置,风场的最大风速影响范围会随之整体平移。由于金湾区和斗门区沿岸较香洲区沿岸偏西,因此前者产生最大增水的台风路径也比后者偏西(见表

3)。各代表点取得最大增水时均位于台风右半圆,同时距离台风中心为27~87 km,而构造的台风在23日12—16时的12级风圈半径取为90~100 km,通过计算得到最大风速半径约为30 km。这表明处于最大风速半径~12级风圈半径范围内且位于台风右半圆的沿海地区,将是风暴潮的重灾区。

4.3 台风移速

本文开展了风暴潮对台风移速快慢响应的敏感性试验,发现珠海市沿海风暴潮增水并没有随着台风移速的加快而增加。在香洲区 and 斗门区沿岸,风暴增水总体上随着台风移速变慢而呈现增大的趋势,但两者并没有明显的比例关系。这与WANG等^[21]关于珠江口部分岸段的风暴潮特征研究结论大体一致,但是与REGO等^[24]和PARK等^[25]认为台风移速的快慢与风暴增水的增减呈正相关关系的观点完全相反,可能是由于研究区域的地理位置、地形地貌和台风结构差异等因素造成的。金湾区沿岸的情况较为复杂,当台风移速为15~30 km/h

并沿着台风“天鸽”的路径移动时,会产生较强的风暴潮过程。

5 结论

①通过构造不同入射角和不同登陆点的台风,发现珠海市不同岸段的风暴潮响应有较大的差异性,主要是由珠海市的海岸线位置和台风结构共同造成的。金湾区是珠海市最严重的风暴潮受灾地区,且由于其海岸线较长,位置面向开阔的海域,更易遭受风暴潮的袭击。从构造的不同入射角和不同登陆点的台风来看,珠海市沿岸的最大增水发生在登陆前1 h~登陆后3 h内,如果此时天文潮位较高,珠海市沿岸将遭受严重的风暴潮影响。

②距离台风中心约15~70 km且位于台风右半圆时,香洲区沿岸将是风暴潮的重灾区;距离台风中心约20~100 km且位于台风右半圆时,金湾区沿岸将是风暴潮的重灾区;距离台风中心约80~90 km且位于台风右半圆时,斗门区沿岸将是风暴潮的重灾区。该结论对沿海地区的风暴潮研究具有普遍意义,同时对沿海地区风暴潮的预警报工作具有参考价值。

③对珠海市沿海地区而言,基于类似台风“天鸽”的路径,当台风移速较小时,较有利于香洲沿区和斗门区沿岸的海水堆积,但当台风移速为15~30 km/h时,更利于金湾区沿岸的海水堆积。

参考文献:

- [1] 张海燕. 南海区台风风暴潮时空分布特征[J]. 海洋预报, 2019, 36(6): 1-8.
ZHANG H Y. Spatio-temporal distribution of typhoon storm surge along the South China Sea coast[J]. Marine Forecasts, 2019, 36(6): 1-8.
- [2] 贾宁, 刘强, 石先武, 等. 基于现场调查的台风“天鸽”(1713)和台风“山竹”(1822)风暴潮灾害影响和致灾对比分析[J]. 海洋预报, 2022, 39(5): 94-99.
JIA N, LIU Q, SHI X W, et al. Comparative analysis of the impact of typhoon storm surge disaster and the disaster-causing difference between typhoon "Hato" (1713) and "Mangkhut" (1822) based on field survey[J]. Marine Forecasts, 2022, 39(5): 94-99.
- [3] 傅赐福, 董剑希, 刘秋兴, 等. 1409号和1415号台风风暴潮预报的数值研究[J]. 海洋预报, 2016, 33(4): 26-33.
FU C F, DONG J X, LIU Q X, et al. Numerical simulation study on typhoon "Rammasun" (1409) and typhoon "Kalmaegi" (1415) storm surge forecast[J]. Marine Forecasts, 2016, 33(4): 26-33.
- [4] DU M, HOU Y J, QI P, et al. The impact of different historical typhoon tracks on storm surge: A case study of Zhejiang, China[J]. Journal of Marine Systems, 2020, 206: 103318.
- [5] LIU W C, HUANG W C. Investigating typhoon-induced storm surge and waves in the coast of Taiwan using an integrally-coupled tide-surge-wave model[J]. Ocean Engineering, 2020, 212: 107571.
- [6] 梁连松, 张钊, 顾冬明, 等. 典型路径下台风移速调整对鳌江站增水的数值分析[J]. 海洋预报, 2020, 37(5): 59-66.
LIANG L S, ZHANG Z, GU D M, et al. Numerical analysis of typhoon's moving speed adjustment influence on storm surge of Aojiang station under typical route[J]. Marine Forecasts, 2020, 37(5): 59-66.
- [7] LI A L, GUAN S D, MO D X, et al. Modeling wave effects on storm surge from different typhoon intensities and sizes in the South China Sea[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2019, 235: 106551.
- [8] MURTY P L N, RAO A D, SRINIVAS K S, et al. Effect of wave radiation stress in storm surge-induced inundation: a case study for the east coast of India[J]. Pure and Applied Geophysics, 2020, 177(6): 2993-3012.
- [9] 庞古乾, 黄玉明, 何健, 等. 珠海市台风及其次生风暴潮特征分析与评估[J]. 热带气象学报, 2020, 36(1): 42-50.
PANG G Q, HUANG Y M, HE J, et al. Analysis and assessment of the characteristics of typhoon induced storm surge in Zhuhai[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2020, 36(1): 42-50.
- [10] 韩晶. 台风山竹和天鸽对珠海沿海风暴潮增水影响[J]. 吉林水利, 2019(8): 47-49.
HAN J. Effect of typhoon "Hato" and "Mangkhut" on rainfall of storm surge in Zhuhai Coastal area-taking Sanzao hydrological station as an example[J]. Jilin Water Resources, 2019(8): 47-49.
- [11] 殷成团, 张金善, 熊梦婕, 等. 我国南海沿海台风及暴雨灾害趋势分析[J]. 热带海洋学报, 2019, 38(1): 35-42.
YIN C T, ZHANG J S, XIONG M J, et al. Trend analysis of typhoon and storm surge disaster on the South China Sea coast of China[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2019, 38(1): 35-42.
- [12] 杨飞, 杨文俊, 杨森. ELCIRC源程序代码分析[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(5): 97-102.
YANG F, YANG W J, YANG S. Algorithm of ELCIRC source code[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(5): 97-102.
- [13] 王培涛, 董剑希, 赵联大, 等. 黄渤海精细化温带风暴潮数值预报模式研究及应用[J]. 海洋预报, 2010, 27(4): 1-8.
WANG P T, DONG J X, ZHAO L D, et al. Studies and applications of refined numerical extratropical storm surge forecast model for Bohai and Yellow Sea[J]. Marine Forecasts, 2010, 27(4): 1-8.
- [14] 王喜年, 尹庆江, 张保明. 中国海台风风暴潮预报模式的研究与应用[J]. 水科学进展, 1991, 2(1): 1-10.

- WANG X N, YIN Q J, ZHANG B M. Research and applications of a forecasting model of typhoon surges in China Seas[J]. *Advances in Water Science*, 1991, 2(1): 1-10.
- [15] FUJITA T. Pressure distribution in typhoon[J]. *Geophysical Magazine*, 1952, 23: 437-452.
- [16] 陈洁, 汤立群, 申锦瑜, 等. 台风气压场与风场研究进展[J]. *海洋工程*, 2009, 27(3): 136-142.
- CHEN J, TANG L Q, SHEN J Y, et al. Advances in typhoon wind field and pressure field[J]. *The Ocean Engineering*, 2009, 27(3): 136-142.
- [17] JELESNIANSKI C P. A numerical calculation of storm tides induced by a tropical storm impinging on a continental shelf[J]. *Monthly Weather Review*, 1965, 93(6): 343-358.
- [18] CHU D D, ZHANG J C, WU Y S, et al. Sensitivities of modelling storm surge to bottom friction, wind drag coefficient, and meteorological product in the East China Sea[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, 231: 106460.
- [19] ISLAM M R, TAKAGI H. Typhoon parameter sensitivity of storm surge in the semi-enclosed Tokyo Bay[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2020, 14(3): 553-567.
- [20] ZHANG H, CHENG W C, QIU X X, et al. Tide-surge interaction along the east coast of the Leizhou Peninsula, South China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 142: 32-49.
- [21] WANG Y X, GAO T, JIA N, et al. Numerical study of the impacts of typhoon parameters on the storm surge based on Hato storm over the Pearl River Mouth, China[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2020, 34: 101061.
- [22] 刘睿哲, 朱庆勇, 倪培桐. 珠江河口地区风暴潮增水过程数值模拟[J]. *广东水利水电*, 2018(4): 6-10.
- LIU R Z, ZHU Q Y, NI P T. Numerical simulation of storm surge process in Pearl River Estuary[J]. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 2018(4): 6-10.
- [23] KWON Y Y, CHOI J W, KWON J I. Simulation of storm surge due to the changes of typhoon moving speed in the south coast of Korean peninsula[J]. *Journal of Coastal Research*, 2020, 95(sp1): 1467-1472.
- [24] REGO J L, LI C Y. On the importance of the forward speed of hurricanes in storm surge forecasting: A numerical study[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(7): L07609.
- [25] PARK Y H, YOUN D. Characteristics of storm surge based on the forward speed of the storm[J]. *Journal of Coastal Research*, 2021, 114(S1): 71-75.

Study of storm surge numerical simulation along the coastal area of Zhuhai

HUANG Baoxia^{1,2}, LI Xixi^{1,2}, LUO Jun^{1,2}

(1. South China Sea Prediction Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510310, China; 2. Key Laboratory of Marine Environmental Survey Technology and Application, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510310, China)

Abstract: Based on the ELCIRC model and Typhoon "Hato" (1713), a series of typhoon tracks landing or affecting Zhuhai have been conducted by changing incident angle, landfall location or moving speed of the typhoon. Feature of coastal storm surge in Zhuhai are studied by the ELCIRC numerical simulation. The results show that large differences in maximum storm surge exist in different coastal areas of Zhuhai when the incident angle is changed. Coastal areas are severely impacted when locate in the right half circle of the typhoon with its distance to the typhoon center being 15~100 km. The maximum storm surge increases along with the slows down of the moving speed of the typhoon in Xiangzhou district and Doumen district, however in Jinwan district, strong storm surge occurs along the typhoon track when the moving speed of the typhoon is 15~30 km/h.

Key words: ELCIRC model; Typhoon "Hato"; numerical simulation; storm surge