

珠江口风暴潮期间波致增水分布数值研究

高文杰¹, 潘毅^{1*}, 李子彬², 陈新平²

(1. 河海大学 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 自然资源部海洋减灾中心, 北京 100194)

摘要: 基于 ADCIRC+SWAN 模式, 构建了珠江口海域的风暴潮和台风浪耦合模型, 并通过对天文潮、风暴潮和台风浪的模拟对模型进行验证。通过比较 5 类 15 场典型台风过程中珠江口海域的波高和波致增水特征, 剖析了珠江口风暴潮期间波致增水分布特征。研究表明: 在典型台风期间, 珠江口波致增水主要分布于磨刀门和三灶岛附近的浅滩, 增水最大值超过 0.35 m, 并且由口门—上游河道、浅水—深水递减; 其次分布在黄茅海、大鹏湾、大亚湾处, 增水最大约为 0.30 m; 从台风类型来看, 受向岸风影响, 西岸登陆型台风造成的波致增水显著大于其他类型台风。

关键词: 波致增水; 耦合模型; 风暴潮; 空间分布; 珠江口

中图分类号: P731.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)05-0033-10

0 引言

风暴潮作为全球范围内导致生命财产损失最为严重的自然灾害之一, 其所伴随的狂风、海水倒灌和巨浪对沿海地区构成了极大的安全威胁。河口三角洲地区, 多为人口密集和经济发达地区, 也是风暴潮灾害影响最为严重的区域之一。在洪水、风暴潮、天文潮、台风浪等多重灾害因素的共同作用下, 三角洲平原地区的防洪排涝系统面临着来自外部的综合高潮位威胁。因此, 研究河口海岸区域风暴期间潮位及其影响因素, 对保障河口三角洲地区居民的生命财产安全具有重要意义。波致增水是指由波浪引起的辐射应力梯度导致的额外水位上升, 这一现象在风暴潮期间会对潮位产生影响。近岸区域的强波浪活动通常会导致显著波致增水, 其强度受水深分布及地形特征共同调控。珠江口地区河网结构复杂, 波浪传播过程与岸线形态、水下地形产生非线性交互作用, 由此引发的波致增水特征及其影响机制尚未明晰。研究该区域波浪、潮流与地形效应耦合作用下的波致增水规律, 可为河

口海岸带防洪体系的优化设计提供关键科学依据。

从 20 世纪 80 年代起, 学者们就对风暴潮过程中的波致增水展开了研究^[1]。对于渤海湾, 有研究表明该海域波致增水最大可达 0.3 m^[2]。对于杭州湾, 有学者比较了波流耦合计算所得水位与无波浪影响时的水位差异, 指出波浪通过辐射应力的方向和大小影响风暴潮水位^[3]。长江口的波致增水相较于东南沿海地区更为显著, 最大可达 0.3 m^[4], 相关研究还总结了长江口台风期间波致增水的空间分布规律^[5]。对于江苏沿海地区, 有学者通过模拟影响该地区的 6 场典型台风过程, 分析了波致增水量级和空间分布特征^[6]。对于珠江口地区, 有学者针对 1822 号台风“山竹”期间的波致增水开展研究, 发现最大波致增水可达 0.2 m^[7]。然而, 现有研究多聚焦于单一台风事件, 导致研究成果的代表性不强, 缺乏对波致增水分布规律的综合总结。

本研究结合实测数据与数值模拟方法, 系统研究珠江河口风暴潮期间有效波高演变规律及波致增水机制。基于珠江口地形数据集构建 ADCIRC+SWAN 耦合模型, 并对天文潮、风暴潮、波浪进行验

收稿日期: 2024-06-24。

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3007900); 水利部重大科技项目(SKS-2022025)。

作者简介: 高文杰(1999-), 男, 硕士, 主要从事海岸水动力研究。E-mail: 1184133961@qq.com

*通信作者: 潘毅(1985-), 男, 教授, 博士, 主要从事海岸防灾研究。E-mail: panyi@hhu.edu.cn

证。选取 15 场对珠江口有较大影响的历史台风事件开展潮浪耦合与非耦合对比试验,揭示最大有效波高的空间分布,并分析珠江口地区台风风暴潮期间波浪增水的量级和空间分布特征,进而得出珠江口地区波致增水的分布规律,研究结果将为珠江口海域的防灾减灾工作提供重要参考依据。

1 模型建立

建立了珠江口及口外海域的台风浪-风暴潮耦合数值模型。风场模型采用 Holland^[8]模式,风暴潮模型采用 ADCIRC(An Advanced Circulation Model For Oceanic, Coastal and Estuarine Waters)^[9],波浪模型采用 SWAN(Simulating Waves Nearshore)^[10]。构建的 ADCIRC+SWAN 模型,通过交换水位、流速和辐射应力实现耦合^[11],该模式已广泛应用于风暴潮过程的数值研究^[12]。

计算网格和上游边界见图 1。模型覆盖整个珠三角地区,经度为 120.6°~105.5°E,纬度为 12.8°~24.9°N,网格分辨率约为 31 000 m。模型网格数为 355 224,节点数为 195 868,外海全球潮波模型(TPX08.0)提供分潮调和常数边界。数值模拟中,珠江上游边界采用高要水文站、石角水文站和博罗水文站实测的月平均径流量数据。由于流溪河和潭江径流对珠江流场的影响较小,因此在验证案例和数值实验案例中,流溪河和潭江边界均采用月平均径流。风场模型采用改进的 Holland^[8]模型,依据热带气旋路径产生风场。风速方程为:

$$V_{rot} = \sqrt{\frac{B}{\rho_a} \left(\frac{R_{max}}{r} \right)^{\beta} (P_n - P_c) \exp\left(-\left(\frac{R_{max}}{r}\right)^{\beta}\right) + \left(\frac{rf}{2}\right)^2} - \frac{rf}{2} \quad (1)$$

$$B = \frac{((v_r - v_{mc})/W_{PBL})^2}{P_n - P_c} \quad (2)$$

式中: V_{rot} 为旋转风暴的速度; P_n 为背景表面压力; P_c 为中心面压力; ρ_a 为空气的密度; f 是科里奥利力; B 为飓风形状参数,控制风眼直径和切向速度梯度的陡度; v_r 为最大风速; v_{mc} 为风暴移动速度; W_{PBL} 是一个风消减因子,定义为在行星边界层影响之上的梯度风流水平^[13]。气压采用 Holland^[8]的方法进行计算:

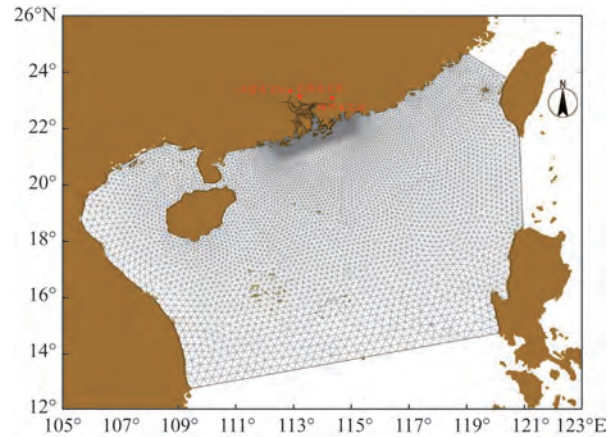


图1 计算网格

Fig.1 Computational mesh

$$P(r) = P_0 + (P_{\infty} - P_0) e^{\left(-\frac{R_0}{r}\right)^{\beta}} \quad (3)$$

式中: P_0 为台风中心气压; P_{∞} 为外围环境大气压; ΔP 是环境气压与台风中心气压的差值, $\Delta P = P_{\infty} - P_0$; r 为台风中心—计算点的距离; R_0 为台风最大风速半径。

2 模型验证

为验证模型对天文潮过程的模拟能力,对三灶、大横琴、横门、泗盛围 4 个潮站的潮位过程进行复演,位点的分布见图 2。将模型计算结果与现场实测数据进行比较,结果见图 3,从图中可以看出,模型模拟的潮位与实测潮位吻合较好。

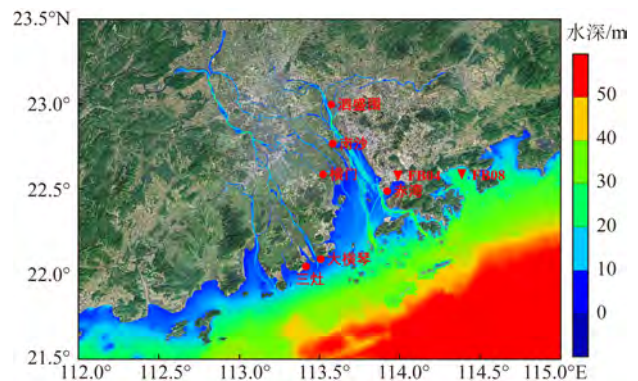


图2 珠江口地形及测站位置分布

Fig.2 The topography of the Pearl River estuary and the distribution of observation stations

为验证模型对风暴潮过程的模拟能力,分别模

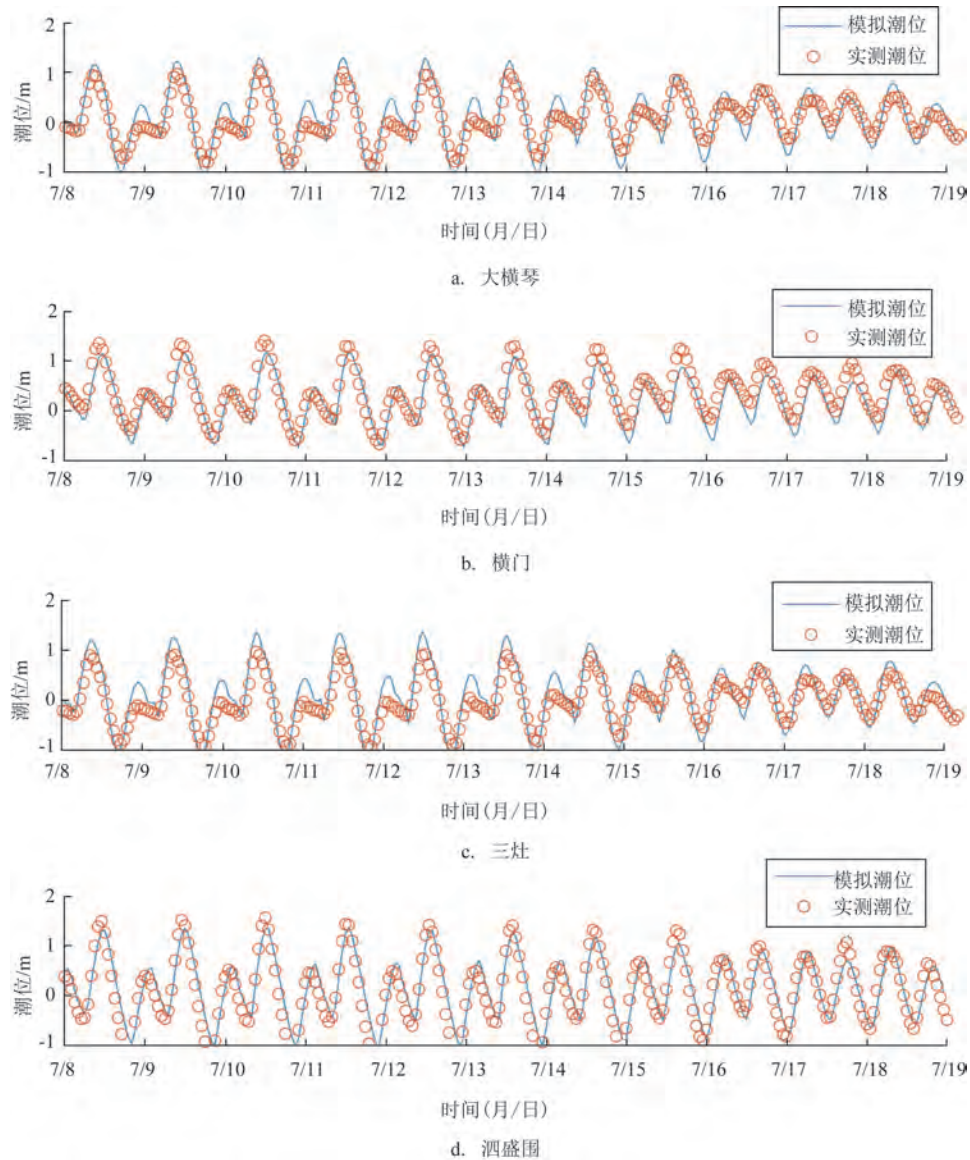


图3 天文潮验证

Fig.3 Astronomical tide verification

拟了3场对珠江口影响较大的台风“山竹”(1822)、“天鸽”(1713)和“黑格比”(0814)的风暴潮过程。选取赤湾站、南沙站、三灶站3个站点,将模型计算结果与实测潮位进行比较(见图4),可以看出,模型模拟结果与实测潮位吻合较好。

为验证模型对波浪过程的模拟能力,基于横门、FB04和FB08测站的台风浪实测数据,分别对台风“山竹”(1822)、“妮姐”(1604)及“天鸽”(1713)的波浪场进行验证分析,结果见图5。从图中可以看到,模型对台风浪过程的模拟结果较好,能较好地

复演台风浪过程。

3 数值研究方案与波致增水特征分析

基于1949—2019年期间的最优台风路径数据,将造成珠江口风暴潮灾害的台风路径分为以下5类:珠江口正面登陆型台风,通常在磨刀门—大鹏湾半岛之间登陆,并直接穿过珠江口;珠江口西岸登陆型台风,在磨刀门以西的广东岸线登陆,路径未穿过珠江口;珠江口东岸登陆型台风,在大鹏湾

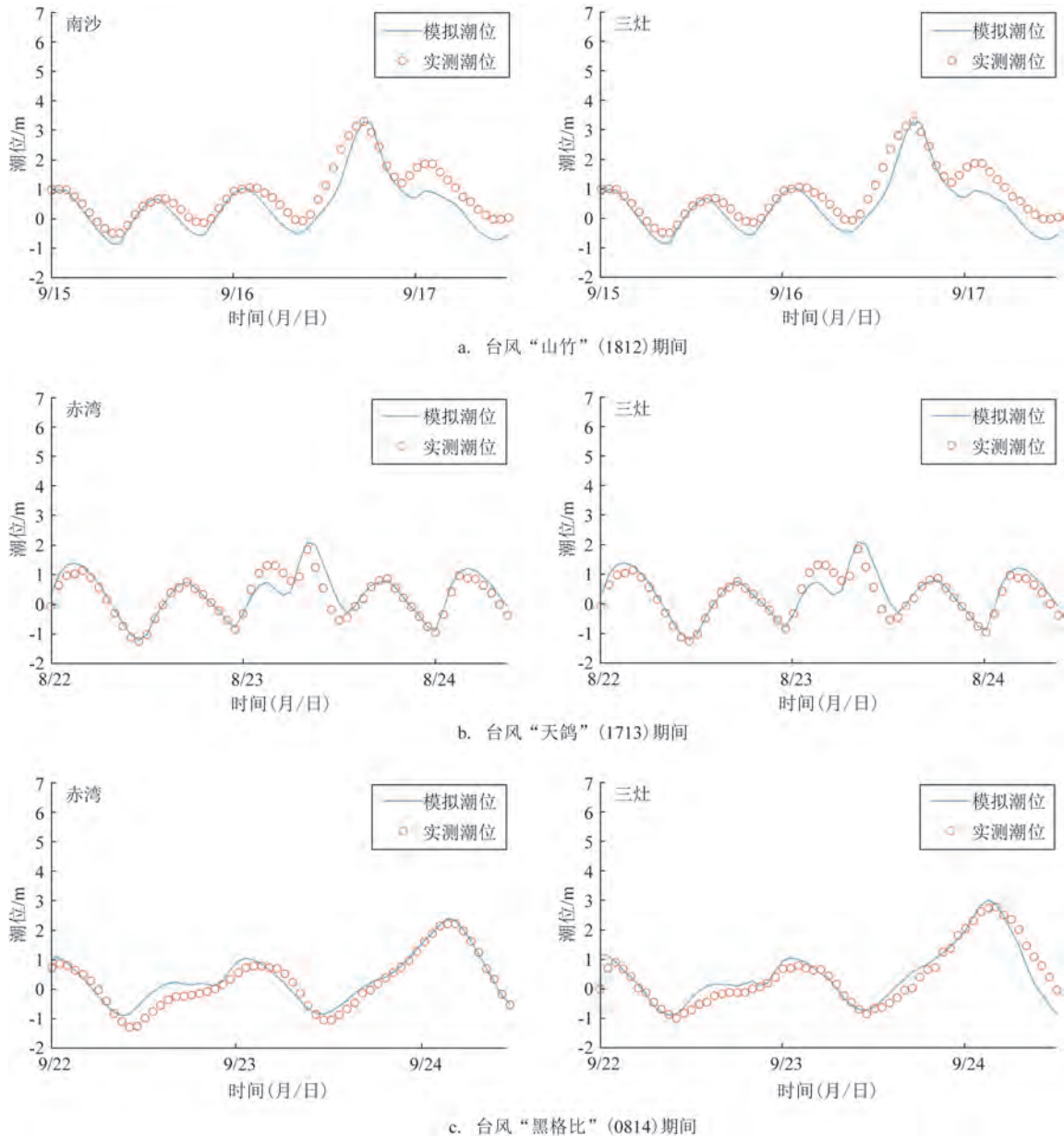


图4 风暴潮验证

Fig.4 Storm surge verification

半岛以东的广东岸线登陆,同样未直接穿过珠江口;珠江口侧面经过型台风,在陆上或海上经过珠江口附近;海上经过型台风,在距离珠江口较远的海域以几乎平行于岸线的路径经过,登陆地点距离珠江口较远或未登陆。从影响珠江口的5类历史典型台风中各选取3场作为代表进行数值模拟:珠江口正面登陆型台风选取台风“鹦鹉”(0812)、“妮妲”(1604)、“约克”(9910),珠江口西岸登陆型台风选

取台风“天鸽”(1713)、“山竹”(1822)、“黑格比”(0814),珠江口东岸登陆型台风选取台风“天兔”(1319)、“海马”(1622)、“玛娃”(1716),珠江口侧面经过型台风选取台风“莲花”(1510)、“艾云尼”(1804)、“凡亚比”(1011),海上经过型台风选取台风“达维”(0518)、“珍珠”(0601)、“泰利”(1205)。典型台风路径见图6。

使用珠江口及口外海域的台风浪-风暴潮耦合

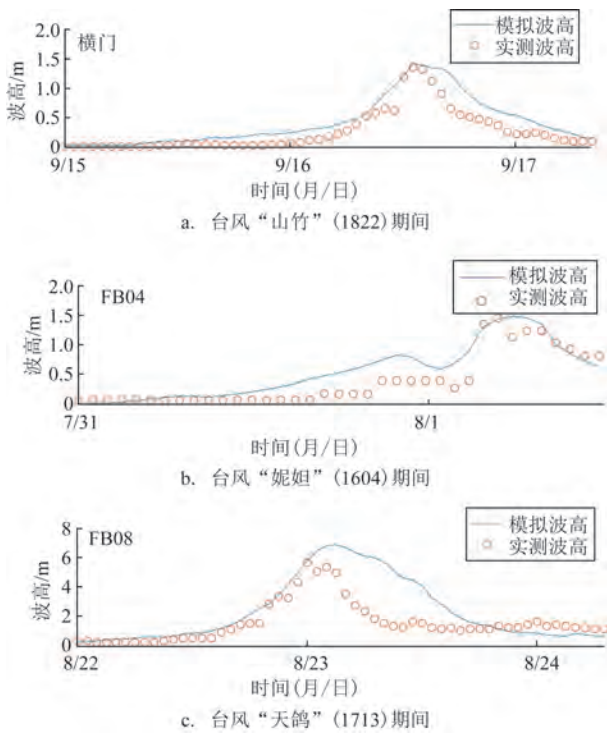


图5 波浪验证

Fig.5 Verification of wave model

数值模型复演 15 场台风风暴潮过程,得到各类型台风的有效波高空间分布,根据潮浪耦合模式与风暴潮模式(非耦合模式即采用单一的潮流模型)的差异

计算波致增水并分析其空间分布特征,研究方案如下:

①在非耦合模式与耦合模式下分别模拟 15 场台风的风暴潮过程,获取耦合模式下有效波高最大时刻的分布,以及两种模式的潮位,通过耦合模式结果减去非耦合模式结果,得到波致增水分布。

②分析各类型台风有效波高最大时刻的分布特征,绘制各类型台风最大波致增水时刻的分布,进一步分析 15 场台风过程中有效波高和波致增水的最大值,识别波致增水较大的地区,最终总结其分布规律。

波高是影响波致增水的重要因素,因此首先分析各类典型台风影响下珠江口海域的波高分布特征。基于台风路径特征分类,图 7 给出了珠江口不同类别台风事件中最大有效波高的空间分布特征。进一步集成全部模拟台风情景,图 8 给出了研究区域有效波高极值的空间分布。从图 7 可以看出,珠江口正面登陆型台风的影响范围主要集中在珠江口东岸,东岸波高约为 5 m,且由东岸向珠江口内方向递减,珠江口内约为 2~3 m。珠江口西岸登陆型台风的波高均匀分布在珠江口近海水深较大海域,与其他类型相比,该类型台风浪对珠江口区域的影响更显著,波高最大,台风浪波高峰值从珠江口外向珠江口内递减,在珠江口外水深约 10 m 处迅速衰减,

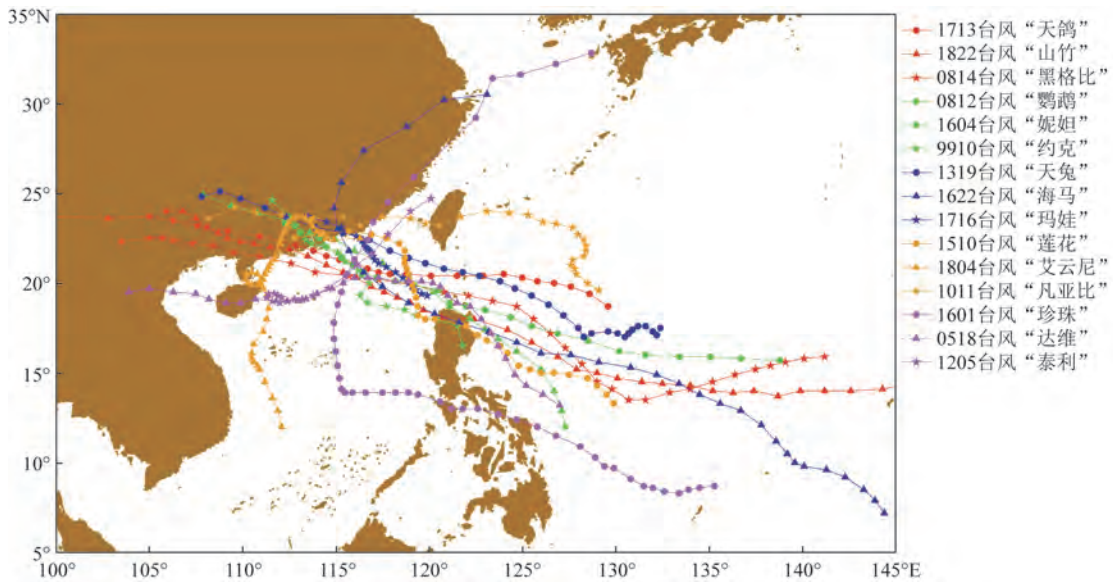


图6 15场典型台风的台风路径

Fig.6 Tracks of 15 typical typhoons

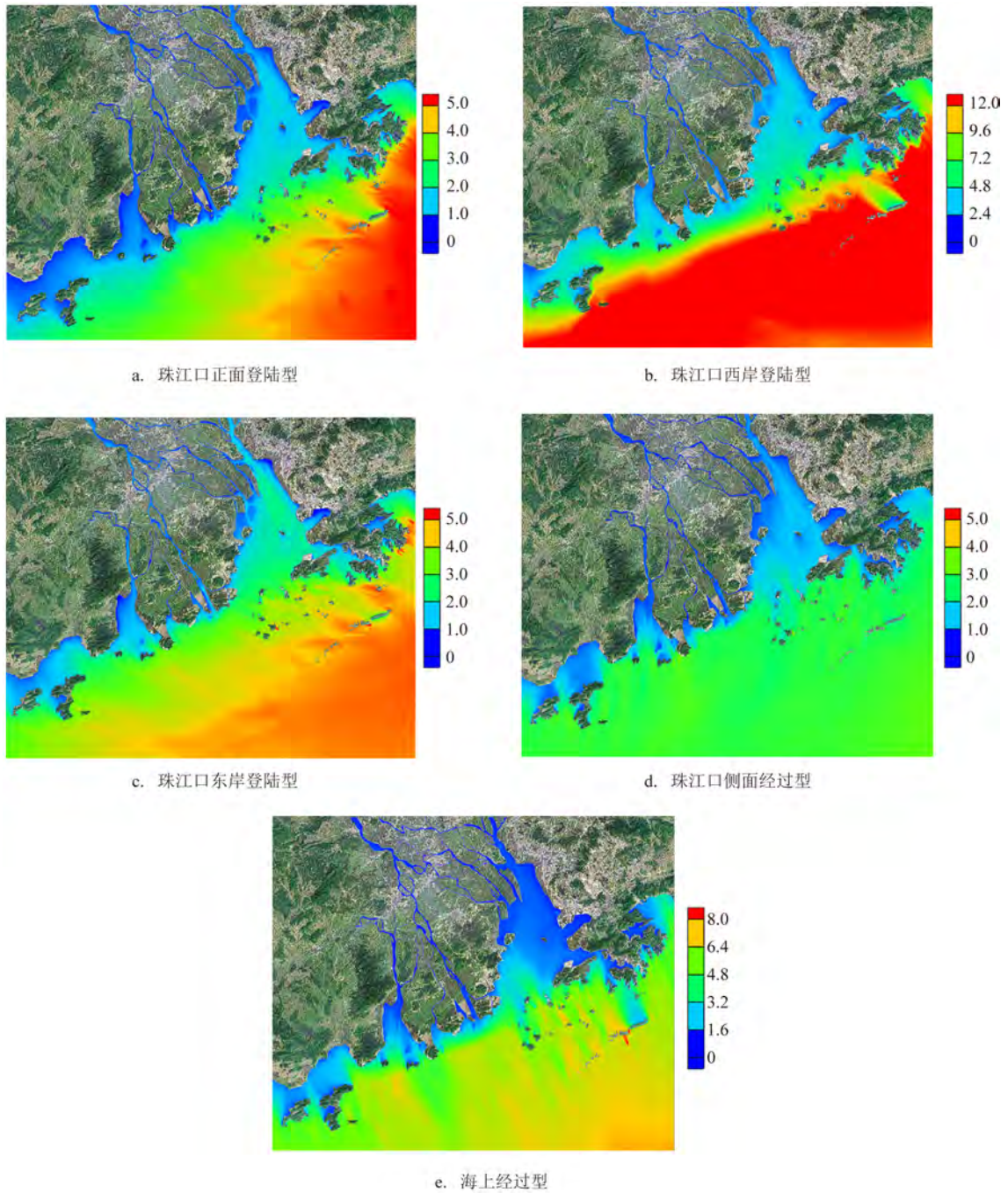


图7 5类台风的最大有效波高分布(单位:m)

Fig.7 Distribution of maximum significant wave heights for five types of typhoons (unit: m)

从12 m以上降至9 m,到达珠江口内时衰减为5 m。珠江口东岸登陆型台风的波高均匀分布在珠江口近海水深较大海域,波高由外海的5 m递减到珠江口内的3 m。珠江口侧面经过型台风的波高整体分布均匀,相较于其他类型,该类型波高变化最小,波

高峰值也最小,波高由外海的3 m以上衰减到珠江口内的2 m左右。海上经过型台风在珠江口外的波高分布与侧面经过型类似,外海波高约为7 m,但珠江口内波高分布差异较大,该类型台风波高峰值进入珠江口后由6 m迅速衰减为1 m。

图8可代表所有台风路径特征下珠江口区域台风浪的最极端情况:珠江口外海最大波高可达12 m以上,波高峰值在口外形成一条平行于岸线的波高等高线;珠江口外沿岸浅滩有效波高最大值约为8 m,珠江口内波高最大可达6 m左右。

通过潮浪耦合模式计算的总水位减去未考虑波浪作用的风暴潮水位,可得到波致增水。图9绘制了各类型台风过程中波致增水的最大值,在其基础上,绘制所有模拟台风的波致增水最大值,结果见图10。

这5种类型台风路径的最大波致增水分布各有特点(见图9)。正面登陆型台风的波致增水集中于

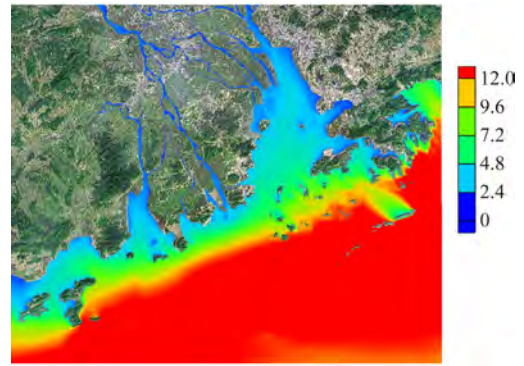


图8 全台风过程最大有效波高分布(单位:m)

Fig.8 Distribution of maximum significant wave heights during all typhoon processes (unit: m)

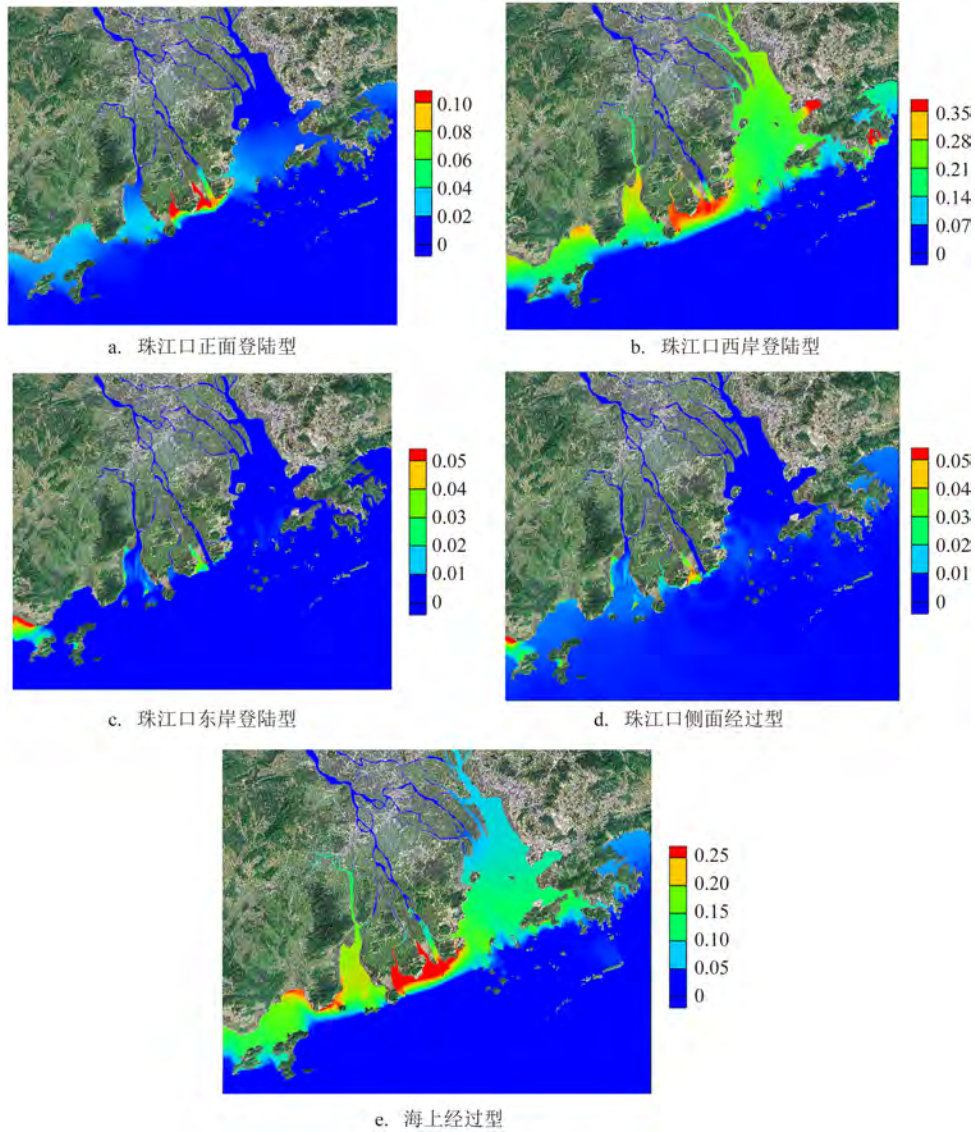


图9 5类台风的最大波致增水分布(单位:m)

Fig.9 Distribution of maximum wave-induced setup for five types of typhoons (unit: m)

磨刀门和三灶岛附近的浅滩处,量级约为0.10 m,该类型台风期间的波高相对较小,波致增水仅在珠江口外浅滩较为明显。西岸登陆型台风的波致增水最大,主要分布在磨刀门、三灶岛、深圳湾附近浅滩处,量级可达0.35 m,其次分布在珠江口内以及珠江口西侧的黄茅海和广海湾浅滩处,量级约为0.20~0.30 m,该类型台风期间的波高最大,最大超过12 m,且影响范围遍布整个珠江口区域,故对应的波致增水在整个珠江口及沿岸区域都较为明显。东岸登陆型台风的波致增水集中于磨刀门和三灶岛附近的浅滩处,量级约为0.04 m,该类型台风期间的波高较小,仅三灶岛附近浅滩处有较小的波致增水。侧面经过型台风的波致增水主要集中在磨刀门、三灶岛、大亚湾附近,最大量级约为0.05 m,该类型台风期间的波高也较小,对应的波致增水同样量级较小。海上经过型台风的波致增水较大,主要分布在磨刀门和三灶岛附近浅滩处,量级约为0.25 m,其次分布在珠江口内以及珠江口西侧的黄茅海和广海湾浅滩处,量级约为0.15~0.20 m,此类型台风期间波高分布与西岸登陆型台风类似,仅量级较小,故其增水分布也与西岸登陆型类似。总的来说,波高较大的台风路径(如珠江口西岸登陆型台风、海上经过型台风),其波致增水在整个珠江口区域都较为明显;而波高较小的台风路径(如珠江口正面登陆型台风、珠江口东岸登陆型台风),其波致增水主

要集中在磨刀门和三灶岛浅滩区域。

结合图10分析,所有类型台风的波致增水最大值可代表珠江口区域的可能最极端情况。从图中可以看出,珠江口地区风暴期间的最大波致增水集中在三灶岛和黄茅海附近浅滩区域,增水可达0.35 m,大鹏湾近岸水域的波致增水约0.30 m,珠江口内的最大波致增水为0.2~0.3 m,航道水域受深水航道工程影响,波致增水不超过0.20 m。

为分析波致增水和台风强度的关系,将各场台风的最大波致增水和台风强度的关系绘制于图11,图中虚线为趋势线。总体来看,最大波致增水呈现出与台风中心最小气压负相关、与最大风速正相关

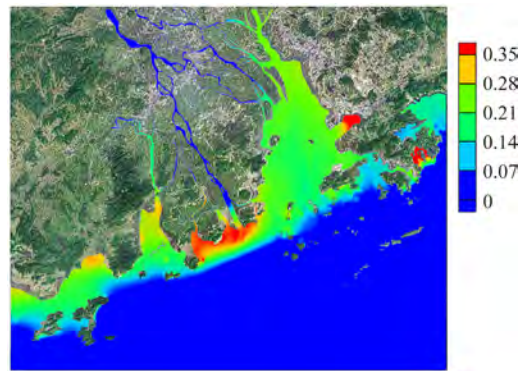
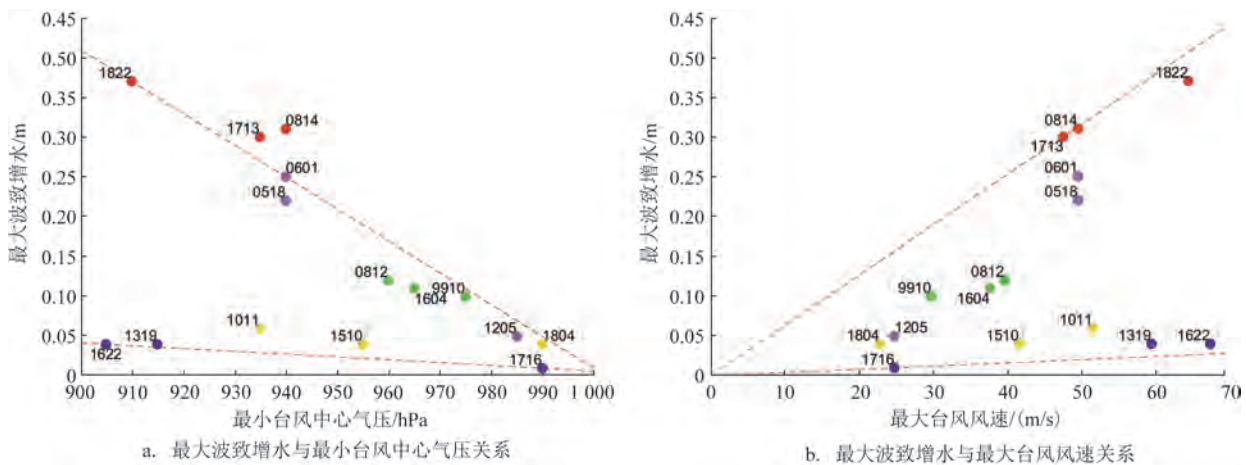


图10 全台风过程最大波致增水分布(单位:m)

Fig.10 Distribution of maximum wave-induced setup during all typhoon processes (unit:m)



注: ● 珠江口正面登陆型 ● 珠江口西岸登陆型 ● 珠江口东岸登陆型 ● 珠江口侧面经过型 ● 海上经过型
图中数值为台风编号

图11 最大波致增水与台风强度的关系

Fig.11 Relationship between maximum wave-induced setup and typhoon intensity

的规律;相同台风强度下,西岸登陆型台风的最大波致增水明显大于其他类型。但不同类型台风的最大波致增水对台风强度变化的敏感性存在差异。西岸登陆型、正面登陆型、海上经过型台风的最大波致增水对台风强度变化更为敏感,东岸登陆型和侧面经过型台风的最大波致增水对台风强度变化的响应则较小,且最大波致增水量级也更小。

4 结论

本文建立了珠江口海域的台风浪-风暴潮耦合模型,模拟了近年来影响珠江口的5类15场典型台风,对比耦合模型与非耦合模型的模拟结果,讨论了不同特征台风影响下珠江口海域有效波高和波致增水的分布规律。主要结论如下:

①典型台风过程中,珠江口外最大有效波高约12 m,波浪在珠江口浅滩附近集中破碎,导致进入珠江口内的波浪波高骤减,珠江口内最大有效波高约6 m。正面登陆型台风对珠江口东岸的影响显著;西岸登陆型台风的最大有效波高均匀分布在珠江口近海水深较大海域,进入珠江口内后迅速衰减;东岸登陆型和侧面经过型台风的最大有效波高分布均匀,对珠江口海域影响范围较广;海上经过型台风对珠江口海域影响范围较广,但对珠江口内影响较小。

②典型台风过程中,珠江口波致增水主要分布于磨刀门和三灶岛附近浅滩,最大值超过0.35 m,且由口门向上游河道、由浅水至深水递减;其次分布在黄茅海、大鹏湾附近,最大值约为0.30 m;结合台风类型和台风强度来看,西岸登陆型台风造成的波致增水显著大于其他类型,这是因为西岸登陆的台风在珠江口附近引发大量向岸风,使外海波浪更易传入珠江口,从而造成相对较大的波致增水。

参考文献:

- [1] WOLF J, HUBBERT K P, FLATHER R. A feasibility study for the development of a joint surge and wave model[R]. Birkenhead: Proudman Oceanographic Laboratory, 1988: 109.
- [2] 金正华, 王涛, 尹宝树. 浪、潮、风暴潮联合作用下的底应力效应[J]. 海洋与湖沼, 1998, 29(6): 604-610.
JIN Z H, WANG T, YIN B S. The effect of bottom friction in the process of wave-tide-surge interaction[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1998, 29(6): 604-610.
- [3] 郑立松. 风暴潮-天文潮-波浪耦合模型及其在杭州湾的应用[D]. 北京: 清华大学, 2010.
ZHENG L S. Development and application of a numerical model coupling storm surge, tide and wind wave[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [4] 贾岩, 尹宝树, 杨德周. 东中国海浪流相互作用对水位和波高影响的数值研究[J]. 海洋科学, 2009, 33(8): 82-86.
JIA Y, YIN B S, YANG D Z. A numerical study of the influence of wave-current interaction on water elevation and significant wave height in the East China Sea[J]. Marine Sciences, 2009, 33(8): 82-86.
- [5] 王雪迎, 潘毅, 张壮, 等. 长江口台风期间波致增水空间分布特征研究[J]. 海洋预报, 2021, 38(6): 12-20.
WANG X Y, PAN Y, ZHANG Z, et al. Study on the spatial pattern of wave-induced setup in the Yangtze River estuary during typhoon processes[J]. Marine Forecasts, 2021, 38(6): 12-20.
- [6] 谭家辉, 潘毅, 于普兵, 等. 江苏沿海台风风暴潮过程中的波浪增水分布研究[J]. 海洋预报, 2022, 39(1): 48-55.
TAN J H, PAN Y, YU P B, et al. Study on the distribution of wave-induced setup along the coast of Jiangsu Province during typhoon processes[J]. Marine Forecasts, 2022, 39(1): 48-55.
- [7] 罗志发, 黄本胜, 谭超, 等. 珠江河口波浪-风暴潮耦合数值模拟[J]. 广东水利水电, 2021(7): 1-6.
LUO Z F, HUANG B S, TAN C, et al. Coupled numerical simulation on wave and storm surge around Peral River Estuary[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2021(7): 1-6.
- [8] HOLLAND G J. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes[J]. Monthly Weather Review, 1980, 108(8): 1212-1218.
- [9] WESTERINK J J, BLAIN C A, LUETTICH R A JR, et al. ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts and estuaries; Report 2: user's manual for ADCIRC-2DDI[R]. Halls Ferry Road: Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, 1994.
- [10] BOOIJ N, RIS R C, HOLTHUIJSEN L H. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1999, 104(C4): 7649-7666.
- [11] DIETRICH J C, TANAKA S, WESTERINK J J, et al. Performance of the unstructured-mesh, SWAN + ADCIRC model in computing hurricane waves and surge[J]. Journal of Scientific Computing, 2012, 52(2): 468-497.
- [12] BHASKARAN P K, NAYAK S, BONTHU S R, et al. Performance and validation of a coupled parallel ADCIRC - SWAN model for THANE cyclone in the Bay of Bengal[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2013, 13(6): 601-623.
- [13] POWELL M D, VICKERY P J, REINHOLD T A. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones[J]. Nature, 2003, 422(6929): 279-283.

A numerical study on wave setup in the Pearl River Estuary during storm surges

GAO Wenjie¹, PAN Yi^{1*}, LI Zibin², CHEN Xinpeng²

(1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. National Marine Hazard Mitigation Service, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Beijing 100194, China)

Abstract: A coupled model of storm surge and typhoon waves along the Pearl River Estuary was constructed based on the ADCIRC and SWAN models, and validated through simulations of astronomical tides, storm surges, and typhoon waves. By comparing the wave-induced elevation characteristics in the Pearl River Estuary during 15 typical typhoon events, this study shows that the wave-induced elevation in the Pearl River Estuary is mainly distributed over shoals near Modaomen and Sanzao Island, with a maximum value exceeding 0.35 m. The wave-induced elevation decreases from the estuary to upstream river channels and from shallow to deep water. Additionally, significant wave-induced elevation occurs at Huangmaohai, Dapeng Bay, and Daya Bay, reaching a maximum value of approximately 0.3 m. The wave-induced elevation caused by typhoons with landfall on the western coast is significantly greater than those caused by other types of typhoons.

Key words: wave-induced setup; coupled model; storm surge; spatial pattern; Pearl River Estuary