

珠海市横琴岛北部极端风暴与天文大潮不同 遭遇情景下洪涝淹没规律研究

曾照洋^{1,2,3}, 杨芳¹, 吴小明¹, 王兆礼³, 赖成光³, 吴旭树³, 陈晓宏⁴

(1. 水利部粤港澳大湾区水安全保障重点实验室(筹), 广东 广州 510611;
2. 华南农业大学水利与土木工程学院, 广东 广州 510642;
3. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510640; 4. 中山大学土木工程学院, 广东 珠海 519082)

摘要:为探究极端风暴与天文大潮不同遭遇情景下洪涝淹没变化规律,结合跨领域的大气模型、海洋数值模型和城市一二维洪涝模型,提出了一种大气-海洋-城市相耦合的复合洪涝模拟框架,以实现对台风、暴雨、风暴潮、洪涝淹没等完整过程的模拟。以 2018 年台风“山竹”风暴增水峰值与 2022 年 6 月珠江口天文大潮最低(S1、S5 情景)、中(S2、S4 情景)和最高(S3 情景)潮位遭遇情景为例,分析了珠海市横琴岛北部区域洪涝淹没变化规律。结果表明:淹没面积、淹没水深及洪涝水量呈现 $S3>S4>S2>S5\approx S1$ 的规律,表明风暴增水峰值与天文大潮高潮位遭遇时更可能引发严重的复合洪涝淹没;随着总潮位最大值增加,复合洪涝淹没的主导因素将由排水系统溢流转变为海水淹没;同类遭遇情景(如 S2、S4 情景)下的洪涝淹没也可能存在巨大差异,表明风暴增水与天文大潮在不同相位叠加对洪涝淹没具有显著影响。

关键词:复合洪涝灾害;排水系统溢流;极端风暴;天文大潮;遭遇情景;横琴岛北部;珠海市

中图分类号:TV125 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)04-0042-09

Study on flood and inundation law under different encounter scenarios of extreme storms and spring tides in northern part of Hengqin Island, Zhuhai City//ZENG Zhaoyang^{1,2,3}, YANG Fang¹, WU Xiaoming¹, WANG Zhaoli³, LAI Chengguang³, WU Xushu³, CHEN Xiaohong⁴ (1. *Key Laboratory of Water Security Guarantee in Guangdong-Hong Kong-Marco Greater Bay Area of Ministry of Water Resources (preparatory), Guangzhou 510611, China*; 2. *College of Water Conservancy and Civil Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China*; 3. *School of Civil Engineering & Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China*; 4. *School of Civil Engineering, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, China*)

Abstract: In order to explore the law of compound flooding under different encounter scenarios of extreme storms and spring tides, combined with multidisciplinary atmospheric model, oceanographic numerical model and coupled one-dimensional and two-dimensional hydrodynamic model, a modelling framework of compound flooding integrating atmosphere, ocean and city was proposed to simulate the complete processes of typhoon, rainstorm, storm surge, flood inundation, etc. Considering various scenarios in which the peak of storm surge during Typhoon Mangkhut in 2018 just encountered the lowest (S1 and S5 scenarios), middle (S2 and S4 scenarios) and highest (S3 scenario) levels of spring tide happened in June 2022 in the Pearl River Estuary, the flood inundation changes in the northern part of Hengqin Island, Zhuhai were analyzed. The results show that the inundation area, inundation depth, and flood volume present the law of $S3>S4>S2>S5\approx S1$, indicating that the scenario in which the peak of storm surge encounters high level of spring tide is more likely to cause severe compound flooding. As the maximum total water level rises, the dominant factor of compound flooding will change from the node flooding of drainage system to the inundation caused by seawater. There may also be significant differences in the compound flooding under similar concurrent scenarios (such as S2 and S4 scenarios), indicating that storm surge and spring tide encountering in different phases may have a significant impact on compound flooding.

Key words: compound flooding disaster; overflow of drainage system; extreme storm; spring tide; encounter scenario; northern part of Hengqin Island; Zhuhai City

基金项目:水利部粤港澳大湾区水安全保障重点实验室开放研究基金项目(WSGBA-KJ2023010);国家自然科学基金项目(52209019, 52379010);广东省基础与应用基础研究基金项目(2023B1515020087)

作者简介:曾照洋(1994—),男,副教授,博士,主要从事城市洪涝模拟研究。E-mail:zyzeng86@scau.edu.cn

通信作者:王兆礼(1979—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:wangzhil@scut.edu.cn

由于全球气候变化^[1]、城市化^[2]、海平面上升^[3]、地面沉降^[4]等环境变化影响,沿海地区遭遇暴雨、高潮位、上游洪水等洪涝致灾因子的概率增大,容易出现多致灾因子遭遇而引发的复合洪涝灾害^[5-6]。近年来已经发生了许多极端的复合洪涝灾害,例如:极端暴雨内涝与河道洪水叠加引发的2021年7月郑州特大暴雨洪涝灾害^[7]、2022年6月广东省北江特大洪水^[8];2018年9月强台风“山竹”影响下风暴潮与暴雨遭遇导致的珠海、澳门、香港等地的严重洪涝灾害^[9];2013年9月强台风“菲特”影响下暴雨、高潮位与上游洪水相互作用造成的上海“四碰头”洪涝灾害^[10]。因此,定量探究不同致灾因子遭遇模式对复合洪涝淹没影响规律对防御极端洪涝灾害、制定适应性防洪规划策略等工作具有重要意义。

根据发生过程的不同,单因素洪涝淹没主要可以分为3类:强降雨超过区域内排水系统能力而导致的暴雨洪涝淹没^[11];海平面剧烈变化而导致的海水漫滩淹没^[12];上游洪水过境并超过河道防洪能力而导致的河道洪水淹没^[13]。针对不同类型的单因素洪涝淹没,研究者通常采用城市洪涝模型、海洋数值模型、流域水文水动力模型进行动态模拟,取得了较好的量化评估效果^[14-15]。但是沿海地区处于海陆强交互作用区域,极端洪涝淹没往往是气象、海洋、河流、陆地水文水动力等多过程互相影响的结果^[16],仅采用某一种模型难以完整地表征这种复杂过程^[17-18]。因此,近年来采用陆气耦合^[19]、海气耦合^[20]、海陆耦合^[21]、大气-海洋-陆地耦合^[22-23]方式对双因素甚至三因素复合洪涝进行量化评估的研究越来越多。

许多研究者在对沿海潮位、洪水位进行模拟的过程中发现,风暴增水、天文潮与河道径流水位之间存在显著的非线性叠加关系,而风暴增水与天文潮相位差是导致这种非线性关系的主要原因^[24-25]。Qiang等^[26]探讨了台风“山竹”总潮位、降雨、海浪不同组合情景下沿海城市洪涝淹没差异,但未考虑风暴增水与天文潮不同遭遇情景的影响。Hasan Tanim等^[27]通过构建一维城市洪涝模型与海洋数值模型相结合的模拟框架,考虑台风提前和延后登陆的不同情景,发现当风暴增水发生在天文潮高潮、低潮间的过渡阶段时,增水持续时间较长,进而导致洪水持续时间延长。然而,极端风暴与天文大潮在不同遭遇模式下复合洪涝淹没将产生何种变化仍是需要深入探究的科学问题。

鉴于此,本文拟采用大气模型模拟极端风暴影响下的天气背景,结合海洋数值模型,基于一二维耦合的城市洪涝模型,构建大气-海洋-城市相耦合的

复合洪涝模拟框架,假设2018年台风“山竹”与2022年6月珠江口百年一遇天文大潮遭遇,实现两者不同遭遇情景下珠海市横琴岛北部区域复合洪涝淹没动态过程模拟,探究极端风暴与天文大潮不同遭遇情景下复合洪涝淹没变化规律。

1 研究区概况

本文主要涉及潮位变化与复合洪涝淹没过程模拟。潮位过程模拟区如图1所示,洪涝淹没模拟区选择珠海市横琴岛部分区域(图2)。潮位过程模拟区位于13°N~27°N、105°E~122°E,北至我国福建省及台湾省之间海域,东至我国台湾省与菲律宾之间海域,南至我国南海部分海域,西部及北部陆地边界位于我国大陆及东南亚地区海岸线。潮位过程模拟区内海洋水深最大超过4500m,最小低于0.4m。洪涝淹没模拟区位于珠海市横琴岛北部,面积约为50km²。其中大部分区域地势较低(黄海1956高程系),海岸带高程为3~5m,地势较高的区域

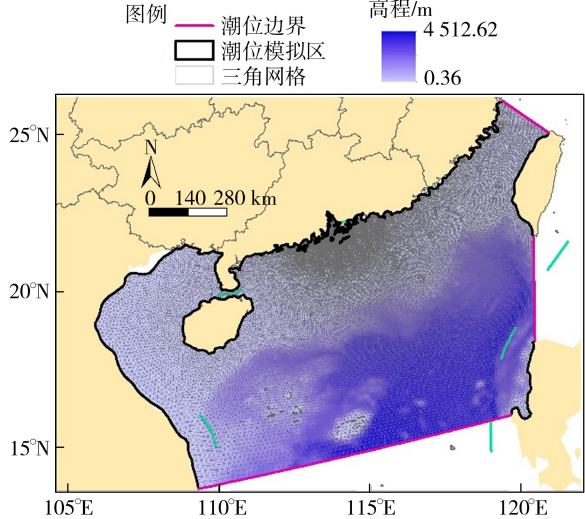


图1 潮位过程模拟区

Fig. 1 Simulation region of tidal level process

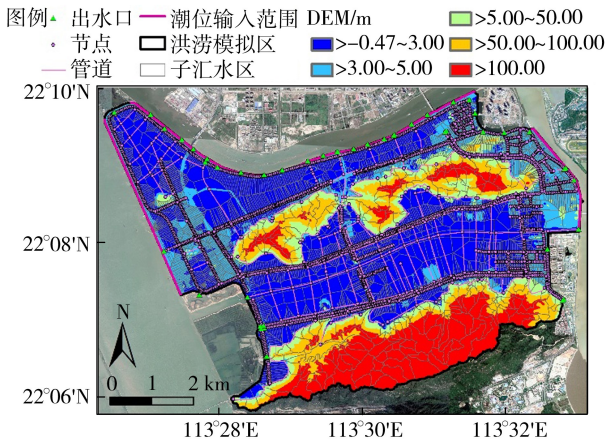


图2 复合洪涝模拟区

Fig. 2 Region of compound flooding simulation

(>50 m) 主要位于南部及中部区域,其他绝大部分区域高程低于 3 m。排水系统出水口主要沿着海岸线分布,暴雨产生的径流主要通过管道、渠道汇集并就近排入附近海域。因此,一旦发生极端风暴事件,潮位过高可能导致海水直接越过堤防造成淹没,同时阻碍暴雨径流正常排放,极易引发潮水与暴雨共同造成的复合洪涝灾害。

2 数据与方法

2.1 研究数据

潮位过程模拟需要获取模拟区内海岸线及海洋水深数据。在美国国家海洋和大气管理局海岸线数据(<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/shorelines/>)基础上,本文对高分辨率遥感影像图进行了局部调整与细化,提高其表征横琴岛及珠江口周边复杂海岸线的精度。海洋水深数据融合了国际海道测量组织和联合国教科文组织政府间海洋学委员会发布的全球海洋通用水深数据(the general bathymetric chart of the oceans, GEBCO)以及电子海图数据(<http://www.zshaitu.com/>)。其中,在电子海图覆盖区域,采用电子海图的水深值,其他区域的海洋水深采用 GEBCO 水深值。GEBCO 空间分辨率为 $15'' \times 15''$,高程基准为全球平均海平面,而电子海图高程基准为理论最低潮。根据当地潮汐表数据将电子海图数据转换为平均海面,并融合 GEBCO 数据,得到用于网格地形插值的水深点。对于风暴潮潮位模拟所需的台风风场和气压场,采用团队前期研究中所构建的中尺度天气研究与预报模型(weather research and forecast model, WRF)模拟结果^[23]。

为实现复合洪涝过程模拟,收集了高分辨率 DEM(分辨率为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$)、排水系统数据、高精度土地利用类型等资料。DEM 与排水系统数据来源于珠海市自然资源局以及水务局,土地利用类型采用 Li 等^[28]公布的数据集(空间分辨率为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$)。此外,潮位站观测数据、潮汐表被应用于验证天文潮、总潮位模拟效果,所采用站点位置如图 3 所示,该数据来源于广东省水文局和潮汐表查询网站(<https://www.chaoxibiao.net/>)。

2.2 研究方法

2.2.1 海洋数值模型

采用 MIKE21 模型模拟天文潮及台风风暴潮潮位变化过程。MIKE21 模型是丹麦水利研究所开发的二维模型,已被广泛应用于河流、湖泊、河口、海洋的水流、波浪、泥沙、水生态环境等工程设计和科学研究。水动力学模块是 MIKE21 模型的基础计算模块,以三向不可压缩和雷诺值均布的 Navier-Stocks

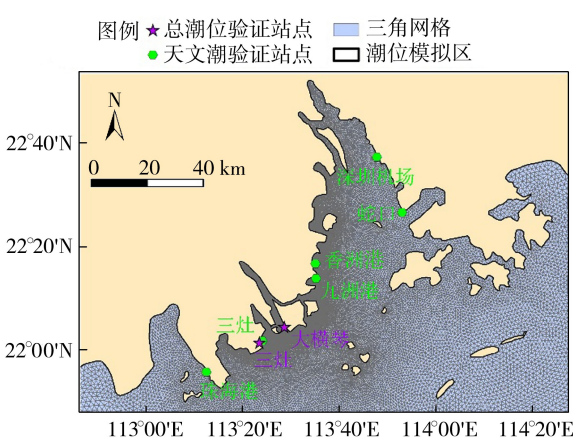


图 3 潮位验证站点位置

Fig. 3 Location of tide stations for validation

(N-S) 方程为理论基础,支持包括水动力、泥沙输移、水质扩散等过程的二维动态模拟。本文在生成计算网格的过程中,按照从远海到横琴岛附近海域网格边长从大到小的原则进行划分,得到 132 767 个不规则三角网格及 68 477 个网格节点(图 1),其中网格边长最长约为 20 km,最短约为 100 m。设置了 3 条开边界(图 1),位于我国福建省及台湾省之间海域、我国台湾省与菲律宾之间海域、菲律宾与越南之间的我国南海海域。根据水深点数据进行网格水深插值,生成网格地形。横琴岛靠近外海,根据 Fei 等^[29]的研究,风暴潮模型中是否考虑珠江径流对台风“山竹”风暴增水模拟结果的影响较小,故本文不考虑珠江径流的影响。本文以发生在 2018 年 9 月的台风“山竹”(近些年影响珠三角地区最严重的台风之一)及其风暴潮作为极端风暴情景,模拟时段为 9 月 12 日 0 时至 9 月 18 日 0 时;以 2022 年 6 月中旬珠江口遭遇的百年一遇大潮作为极端天文大潮情景,模拟时段为 6 月 12 日 0 时至 6 月 18 日 0 时。在进行天文潮和总潮位模拟过程中,3 条开边界均采用预测的相应时段天文潮潮位过程(时间分辨率为 1 h)作为边界条件。与团队已构建的潮位模拟模型^[23]相比,本文调整了模拟范围,并对局部区域进行了网格加密。

2.2.2 城市洪涝模型

将暴雨雨水管理模型(storm water management model, SWMM)与基于加权元胞自动机原理的二维淹没模型(weighted cellular automata 2D inundation model, WCA2D)进行耦合,实现城市降雨径流、排水系统水流传输及复合洪涝淹没过程动态模拟。SWMM 是美国国家环境保护局开发的水文水动力模型,能够考虑城市降雨径流、排水系统水流传输等情景下的水量平衡及动量守恒,常用于与城市雨洪管理相关的工程设计和科学研究^[30-31]。根据所获

取的基础数据,将洪涝模拟区概化为 3476 个子汇水区、3210 个节点、3255 条管道、47 个出水口、1 个蓄水单元。对于下渗、地面径流、管网水流计算模块,分别采用 Horton 下渗模型、非线性水库法和动力波法进行演算。每个子汇水区的降水量输入均采用相应 WRF 网格位置的降水量模拟结果,考虑了降雨的时空变化过程。由于高潮位会阻碍排水系统的雨水排放,在每个入海的出水口加入潮位过程模拟潮水顶托状态,鉴于发生强风暴事件时相关部门会采取防御措施,故不考虑潮水倒灌进入排水系统的情况。WCA2D 是一种基于元胞自动机理论的二维淹没模型,拥有基于权重系统的水流转换规则,求解过程中忽略了惯性项和动量守恒,能够显著提高洪涝淹没过程的模拟效率。其主要计算模块包括中心元胞与相邻元胞的水量交换权重计算、水深计算、流速计算等,控制方程及求解算法见文献[32]。在高潮位与暴雨导致的复合洪涝淹没过程中,洪涝水流主要来源于越过海岸带的海水以及超过排水系统能力的雨水。因此,在二维模拟过程中,将沿着海岸线的模拟潮位过程以及排水系统节点溢流过程作为水位和流量边界条件,并考虑模拟潮位高程基准与 DEM 基准之间的换算关系。与团队已构建的横琴岛洪涝模拟模型相比^[23],本文采用了 Li 等^[28]最新发布的高精度土地利用类型数据,结合不透水率与各城市用地相关关系的研究成果^[33],重新修正了模型不透水率等参数。

2.3 技术路线及遭遇情景设置

为探究极端风暴与天文大潮不同遭遇情景的复合洪涝淹没规律,本文技术路线如图 4 所示,主要包括以下流程:①设置极端风暴与天文大潮不同遭遇情景;②构建大气-海洋-城市相耦合的复合洪涝模拟框架;③分析不同情景下潮位变化及复合洪涝淹没规律。

为更好地确定极端风暴与天文大潮不同遭遇情景,构建了仅考虑台风“山竹”风场与气压场的风暴增水模拟模型,模拟不考虑天文潮影响下的风暴增水过程;构建了 2022 年 6 月中旬珠江口百年一遇天文大潮的潮位模拟模型,模拟研究期间天文潮时空演化过程;调整风场与气压场时间,使得大横琴站点位置的风暴增水峰值时刻分别与天文大潮最高潮位、中潮位、最低潮位时刻重合,设置了 5 种不同的遭遇情景(S1、S2、S3、S4、S5)如图 5 所示,洪涝模拟时长均为 24 h,且模拟的降水序列也随着风场、气压场一并进行调整。此外,实际台风“山竹”影响期间(2018 年 9 月 16 日 0 时至 17 日 0 时)的复合洪涝模拟也作为一种对比情景,记为 SZ。

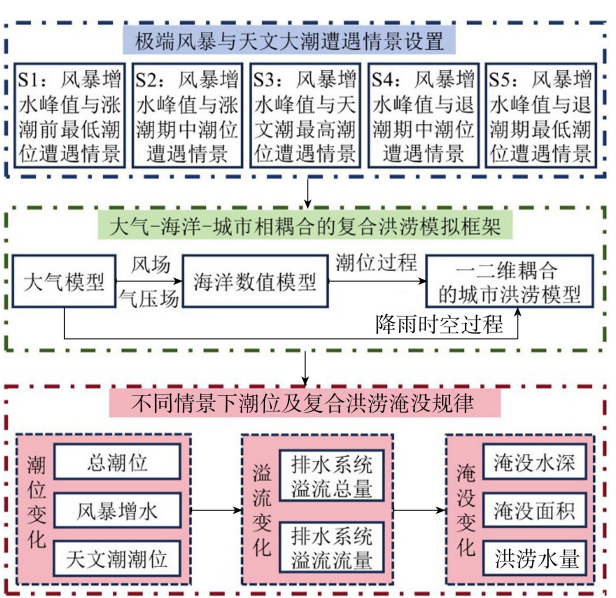


图 4 技术路线

Fig. 4 Technology roadmap

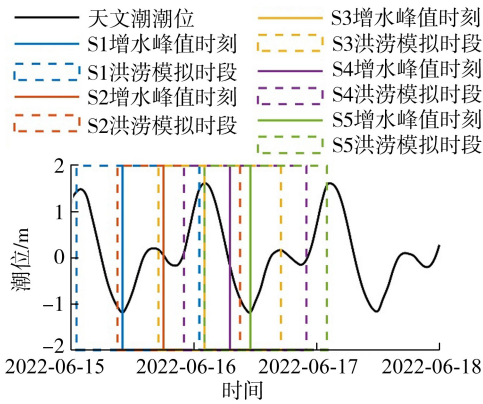


图 5 极端风暴与天文大潮不同遭遇情景

Fig. 5 Different concurrent scenarios of extreme storm and spring tide

3 结果与分析

3.1 潮位验证

采用三灶和大横琴站的观测数据对受台风“山竹”影响的总潮位进行验证,采用三灶、九洲港、香洲港、珠海港、蛇口、深圳机场 6 个站点的观测数据对 2022 年 6 月珠江口天文大潮期间的天文潮潮位进行验证,结果如图 6 和图 7 所示。由图 6 可见,三灶和大横琴两个站点的纳什系数(NSE)均超过 0.8,均方根误差(RMSE)低于 0.30 m,决定系数(R^2)超过 0.90。由图 7 可见,所有站点 NSE 值基本大于 0.90,九洲港、香洲以及珠海港站 RMSE 值小于 0.20 m,三灶、蛇口以及深圳机场站 RMSE 值小于 0.25 m,而 R^2 值都超过 0.95。表明所构建的海洋数值模型能够较好地表征所选取的典型极端风暴与天文大潮期间的潮位变化过程,模拟精度较高,

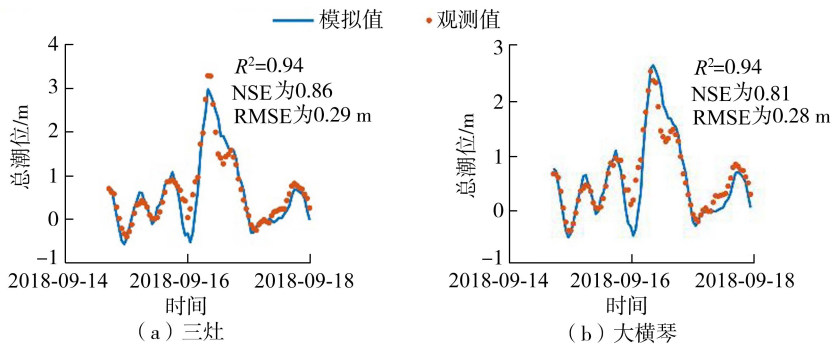


图 6 台风“山竹”影响下总潮位验证结果

Fig. 6 Verification results of total water level under influence of Typhoon Mangkhut

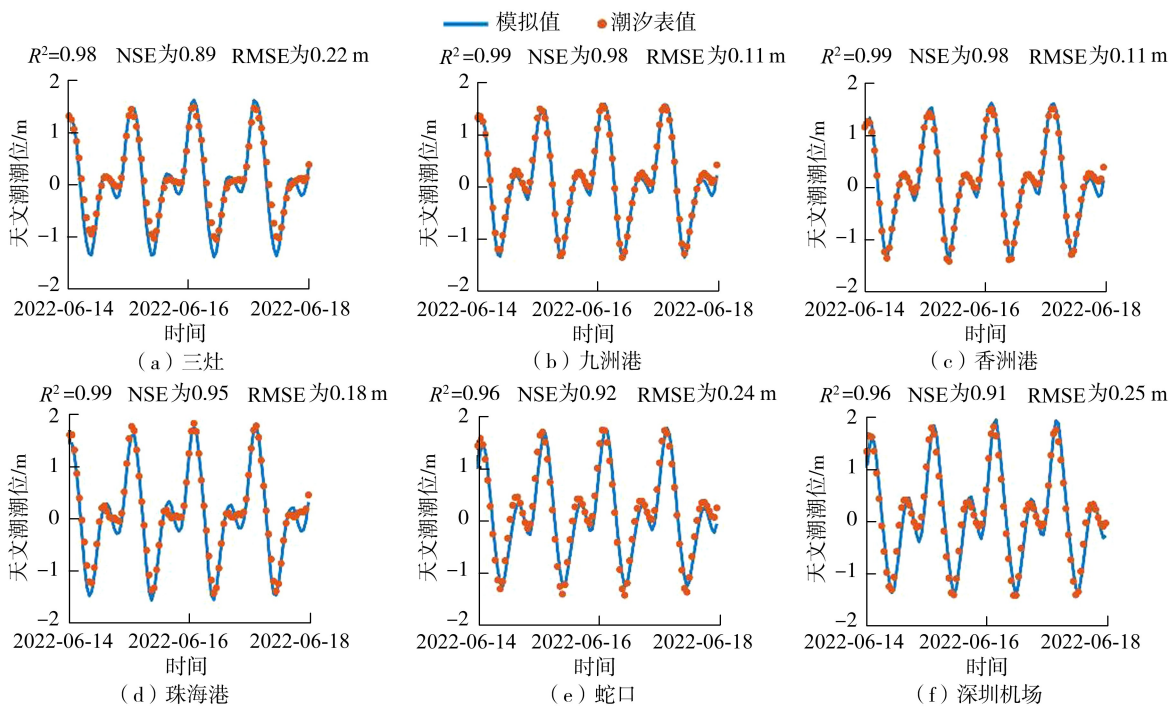


图 7 2022 年 6 月天文大潮潮位验证结果

Fig. 7 Verification results of spring tide in June 2022

可为后续复合洪涝淹没过程模拟提供潮位输入。台风“山竹”期间风速、气压、降水量以及洪涝淹没的模拟效果验证参考本团队的前期研究成果^[23]。

3.2 不同情景下潮位模拟

驱动极端风暴与天文大潮不同遭遇情景下的海洋数值模型,得到总潮位时空演变过程。为提取洪涝模拟区海岸线边界的潮位过程作为复合洪涝淹没模拟的水位边界,将图 2 中的潮位输入范围线段按照 5 m 间隔 (与 DEM 像元大小一致) 转换成 3315 个潮位输入点。图 8 为不同情景下所有潮位输入点的总潮位变化过程。图中彩色实线表示所有潮位输入点总潮位的平均值,其阴影部分表示总潮位变化范围;黑色实线表示所有潮位输入点对应海岸线边界点高程值的第 50 百分位数,其阴影部分表示第 10 百分位数到第 90 百分位数高程范围 (采用

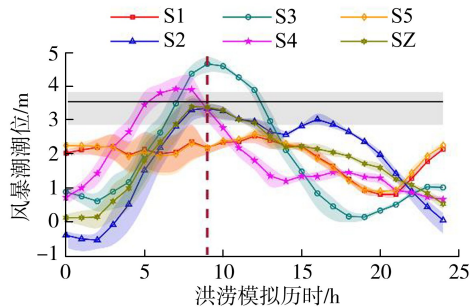


图 8 不同情景下所有潮位输入点的总潮位变化过程

Fig. 8 Change process of total water level for all tidal input points under different scenarios

黄海 1956 高程系);红色虚线表示最大风暴增水峰值所处历时。由图 8 可见,洪涝模拟时段内总潮位最大值呈现 $S3 > S4 > SZ \approx S2 > S5 \approx S1$ 的规律,其中 S3 情景最大总潮位超过了 4.5 m。而对于总潮位最大值出现的历时,仅 S2、S3 情景与风暴增水峰值一

致,S4 及 SZ 情景偏早,而 S1 与 S5 情景偏晚。

分析图 8 中洪涝模拟区海岸线处 DEM 分布,发现 S3 及 S4 情景在 8~12 h、5~8 h 的总潮位已明显超过第 90 百分位数高程值,表明潮水已越过大部分海岸线,可能导致严重的海水淹没事件;S2 及 SZ 情景最大总潮位大都低于第 50 百分位数高程值,表明部分区域可能会发生潮水越过海岸线的情况;S1 与 S5 情景最大总潮位小于第 10 百分位数高程值,表明洪涝模拟范围内受海水淹没的可能性较小。只有总潮位高于对应边界点高程值,不一定会引起海水淹没,如果该边界点是地形插值的局部洼地,海水淹没该点后可能无法继续向内部区域扩散形成较大范围淹没,需要通过二维淹没模拟进一步得到具体淹没范围。

3.3 不同情景下排水系统溢流

排水系统溢流对城市洪涝淹没具有直接影响,提取复合洪涝淹没模拟中的排水系统溢流结果进行分析。溢流流量变化过程如图 9 所示,图中降水量为研究区空间平均值,彩色虚线表示对应情景的总潮位最大值发生时刻,其中 S1 与 S5 情景、S2 与 S3 情景的最高潮位发生在同一时刻。表 1 为最大溢流流量及溢流总量统计结果。由于所有情景输入的降雨序列相同,仅在 SWMM 出水口考虑不同潮位过程的影响,故不同情景下溢流流量过程、溢流总量差异受到潮位顶托效果的影响不同。由图 9 和表 1 可见,排水系统最大溢流流量以及溢流总量分别呈现 S3>S2>SZ>S5≈S1>S4、S3>S2>SZ>S4>S5≈S1 的规律。在洪涝模拟

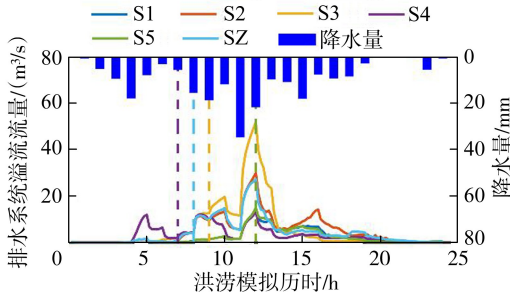


图 9 不同情景下排水系统溢流流量变化过程
Fig. 9 Change process of node flooding flow from drainage system under different scenarios

表 1 排水系统溢流流量和溢流总量统计结果
Table 1 Statistic results of node flooding flow and volume from drainage system

模拟情景	最大溢流流量/(m³/s)	溢流总量/万 m³
S1	14.77	19.48
S2	30.05	42.94
S3	51.87	50.62
S4	13.42	28.02
S5	15.17	19.81
SZ	27.29	38.36

历时为 12 h 时,所有情景的溢流流量达到最大,比雨峰发生时刻滞后 1h。S3 情景最大溢流流量及溢流总量分别高达 51.87 m³/s、50.62 万 m³, S4 情景分别为 13.42 m³/s、28.02 万 m³, S1 情景仅为 14.77 m³/s、19.48 万 m³。尽管 S4 情景最大潮位仅次于 S3 情景,出水口受潮位顶托的影响较大,但其最大溢流流量最小,溢流总量也低于 S2 及 SZ 情景。进一步分析发现,S4 情景虽然最大潮位较高,但其发生时间较早(洪涝模拟历时为 7 h 时);达到峰值后,总潮位随历时增加而大幅下降;在雨峰及溢流流量峰值时段(洪涝模拟历时为 11~15 h),总潮位是所有情景中最低水平,因此避开了雨峰和高潮位对排水系统的双重影响,故其最大溢流流量最低,溢流总量也偏低。因此,高潮位是否与雨峰遭遇也是影响沿海城市洪涝淹没的重要因素。

3.4 不同情景下复合洪涝淹没

基于不同情景下的沿海潮位过程及排水系统溢流过程,实现了复合洪涝淹没过程模拟,最大淹没水深空间分布如图 10 所示,不同水深阈值下的淹没面积见表 2,洪涝水量随洪涝模拟历时变化见表 3。结果表明,S3 情景下淹没水深、淹没面积以及洪涝水量均最大,研究区北部到西部沿海区域大都被淹没,且水深普遍超过 1.0 m,东部沿海区域也存在比较大范围的淹没(水深为 0.2~1.0 m),淹没水深大于 1.0 m、>0.5~1.0 m 的淹没面积分别高达 7.56、2.02 km²,最大洪涝水量超过 1900 万 m³。S4 情景下的淹没水深、淹没面积以及洪涝水量也比较高,淹没水深大于 1.0 m 的淹没面积达到 2.95 km²,主要分布在研究区北部沿海区域,其他区域淹没水深普遍较低,最大洪涝水量超过 700 万 m³。其他情景淹没面积和淹没水深较小,S2 与 SZ 情景、S1 与 S5 情景的最大淹没水深空间分布、淹没面积及洪涝水量结果比较相似。

表 2 不同情景的不同水深阈值下复合洪涝的淹没面积

Table 2 Compound flooding area under different water depth thresholds of different scenarios

模拟情景	淹没面积/km²			
	0.05~0.2 m	>0.2~0.5 m	>0.5~1.0 m	>1.0 m
S1	0.58	0.19	0.09	0.02
S2	1.28	0.48	0.18	0.04
S3	1.41	1.67	2.02	7.56
S4	1.45	1.17	1.71	2.95
S5	0.59	0.19	0.09	0.02
SZ	1.61	0.52	0.18	0.05

与表 1 对比发现,S1、S2、S5、SZ 情景的洪涝水量与排水系统溢流总量相近,表明这 4 种情景下排水系统溢流的雨水是造成洪涝淹没的主要原因;而 S3 及 S4 情景的洪涝水量远远超过排水系统溢流

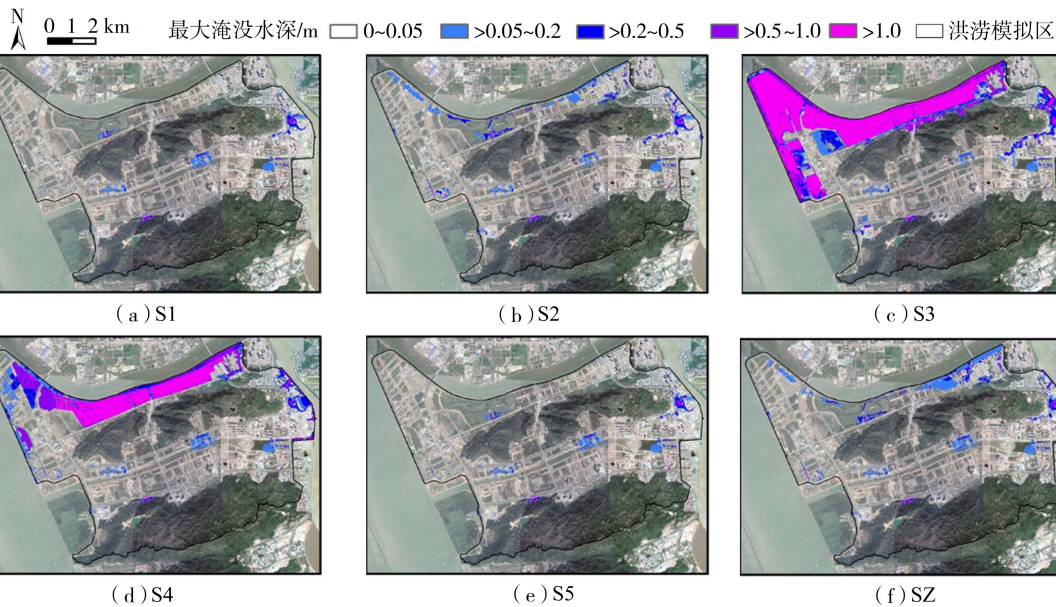


图 10 不同情景下复合洪涝最大淹没水深空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of maximum inundation depth for compound flooding under different scenarios

量,表明沿海区域严重复合洪涝淹没主要是高潮位超过海岸带高程而引发的,排水系统溢流引发的淹没主要分布在内陆城市地区,其水深和范围普遍较小。对表 3 的结果进行分析发现,S3、S4 情景洪涝

水量在洪涝模拟历时 6~11、4~9 h 从不到 3 万 m³ 分别迅速增加到 1 896.44 万、713.16 万 m³,这是由于两种情景总潮位分别在 9、8 h 达到峰值,该时段内潮位比较高,期间大量潮水超过海岸带高程造成大范围淹没。在洪涝模拟历时 6~17 h,S2、SZ 情景洪涝水量从不到 2 万 m³ 快速增加到约 36 万 m³;而在 11~16 h,S1、S5 情景洪涝水量从约 3.7 万 m³ 增加至约 16 万 m³。结合图 9 结果可以发现,S1、S2、S5、SZ 情景洪涝水量增加较快的时段与排水系统溢流流量及降雨量较大时段基本吻合,进一步表明排水系统溢流是上述情景复合洪涝淹没的主因。

综上所述,极端风暴与天文大潮遭遇时,风暴增水最大值出现在天文潮潮位低值、中值还是高值位置,都会导致叠加后的总潮位峰值及其峰现时间、潮位过程发生明显变化。当两者最高值叠加时(S3 情景),总潮位峰值将达到最大,若超过海岸带高程,将极大增强复合洪涝淹没量级;当峰值与最低潮位叠加时(S1、S5 情景),总潮位峰值将显著降低,复合洪涝淹没更可能受排水系统溢流的雨水主导;而峰值与不同位置中潮位叠加时(S2、S4 情景),总潮位最大值及潮位过程可能存在较大差异,并可能导致潮水淹没和排水系统溢流对复合洪涝淹没的贡献产生巨大差异。比如,S4 情景因为部分时段潮位明显超过海岸带高程造成大量的海水淹没,导致其复合洪涝淹没面积、水深、水量远大于 S2 情景。

4 结 论

a. 极端风暴增水峰值与天文大潮最低潮位(S1、S5)、中潮位(S2、S4)、最高潮位(S3)遭遇时,

表 3 不同情景下洪涝水量随洪涝模拟历时变化

Table 3 Change of flooding volumes with flood simulation time under different scenarios

洪涝模拟 历时/h	洪涝水量/万 m ³					
	S1 情景	S2 情景	S3 情景	S4 情景	S5 情景	SZ 情景
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.47	0.00	0.03	0.07	0.56	0.00
2	0.55	0.00	0.03	0.20	0.58	0.00
3	0.61	0.00	0.05	0.69	0.59	0.01
4	0.44	0.07	0.14	1.95	0.41	0.10
5	1.13	0.76	1.16	21.39	1.03	0.94
6	1.22	1.62	2.95	163.70	1.16	1.84
7	1.40	3.64	34.39	442.67	1.33	3.89
8	1.98	9.39	462.63	698.44	1.90	14.48
9	2.11	11.43	1231.26	713.16	2.09	17.42
10	3.04	14.94	1717.74	708.66	3.05	21.14
11	3.71	16.49	1896.44	707.42	3.76	22.43
12	7.19	23.16	1905.19	709.89	7.34	28.72
13	10.48	27.19	1805.44	711.73	10.89	31.87
14	12.27	29.00	1779.47	712.29	12.77	33.06
15	14.27	31.54	1766.79	713.17	14.73	34.30
16	16.30	35.09	1760.50	714.13	16.43	35.51
17	17.12	36.78	1756.50	714.71	17.12	36.11
18	17.46	37.40	1753.68	715.25	17.46	36.64
19	17.72	37.47	1751.61	715.86	17.74	37.76
20	17.77	37.54	1749.80	716.21	17.83	38.19
21	17.77	37.35	1748.20	716.23	17.89	38.29
22	17.88	37.08	1746.85	716.23	18.07	38.35
23	18.12	36.89	1745.75	716.27	18.39	38.33
24	18.45	36.87	1744.83	716.38	18.76	38.35

注:红色的数据部分为相应情景下洪涝水量增速较快的时间段。

叠加后总潮位峰值、峰现时间、潮位过程都表现出很大差异。总潮位最大值呈现 $S3>S4>S2>S5\approx S1$ 的规律, $S2$ 和 $S4$ 虽然都是与天文大潮中潮位遭遇情景,但后者最高潮位明显更大。

b. 不同情景排水系统最大溢流流量及溢流总量呈现 $S3>S2>S5\approx S1>S4$ 、 $S3>S2>S4>S5\approx S1$ 的规律,基本满足最高潮位越大的情景溢流越严重的特征。但 $S4$ 情景溢流流量及总量明显偏小,这是由于雨峰位于总潮位较低时段,排水系统受顶托影响较小,而其他情景都存在雨峰与高潮位遭遇的情况。

c. 不同情景复合洪涝淹没面积、淹没水深以及洪涝水量都呈现 $S3>S4>S2>S5\approx S1$ 的规律,即风暴增水峰值与天文大潮更高潮位叠加将更可能导致严重的洪涝淹没。高潮位引发的海水淹没是 $S3$ 、 $S4$ 情景复合洪涝淹没的主导因素,而其他情景则是排水系统溢流引发的淹没占主导。 $S4$ 情景因高潮位引发的海水淹没远超 $S2$ 情景排水系统溢流导致的淹没,故两者虽为同类情景,但洪涝淹没差异巨大。

参考文献：

[1] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展,2016,27(4):485-491. (ZHANG Jianyun,WANG Yintang,HE Ruimin,et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advances in Water Science,2016,27(4):485-491. (in Chinese))

[2] ZSCHEISCHLER J, MARTIUS O, WESTRA S, et al. A typology of compound weather and climate events [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1(7): 333-347.

[3] 郑金海,鲍仕昱,张蔚,等. 河床下切对珠江三角洲峰值水位演变的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022,50(4):1-6. (ZHENG Jinhai, BAO Shiyu, ZHANG Wei,et al. Effect of channel deepening on the evolution of peak water level in the Pearl River Delta[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(4):1-6. (in Chinese))

[4] NICHOLLS R J, LINCKE D, HINKEL J, et al. A global analysis of subsidence, relative sea-level change and coastal flood exposure[J]. Nature Climate Change, 2021, 11(4):338-342.

[5] ZSCHEISCHLER J, WESTRA S, VAN DEN HURK B J J M, et al. Future climate risk from compound events[J]. Nature Climate Change, 2018, 8(8):469-477.

[6] 周举,陈黎明,胡腾飞,等. 洪潮影响下潭江流域安全行洪阈值研究[J]. 水资源保护, 2024, 40(5):53-61. (ZHOU Ju, CHEN Liming, HU Tengfei, et al. Research on safety threshold of flood discharge in the Tanjiang River Basin under impact of floods and tides [J]. Water

Resources Protection, 2024, 40(5):53-61. (in Chinese))

[7] 张建云,舒章康,王鸿杰,等. 郑州“7·20”暴雨洪涝几个水文问题的讨论[J]. 地理学报, 2023, 78(7):1618-1626. (ZHANG Jianyun, SHU Zhangkang, WANG Hongjie, et al. A discussion on several hydrological issues of “7·20” rainstorm and flood in Zhengzhou [J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(7):1618-1626. (in Chinese))

[8] GAO Liang, MEI Jiangpeng, LI Jinhui, et al. Effect of intense rainfall and high riverine water level on compound flood hazards in a river-valley city: a case study of Yingde, China [J]. Journal of Hydrology, 2023, 625:130044.

[9] 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 Ning, LIU Qiang, SHI Xianwu, 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. (in Chinese))

[10] 贺芳芳,胡恒智,董广涛,等. 上海中心城区复合洪涝淹没模拟及未来重现预估[J]. 灾害学, 2020, 35(4):93-98. (HE Fangfang, HU Hengzhi, DONG Guangtao, et al. Compound flooding simulation and prediction of future recurrence in Shanghai downtown area [J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(4):93-98. (in Chinese))

[11] 雷向东,王兆礼,曾照洋,等. 基于 ANUGA 和 SWMM 耦合模型的车陂涌流域内涝模拟分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(3):82-90. (LEI Xiangdong, WANG Zhaoli, ZENG Zhaoyang, et al. Simulation analysis on Chenbei watershed waterlogging based on ANUGA and SWMM coupling model[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3):82-90. (in Chinese))

[12] XU Lilai, CUI Shenghui, WANG Xiaoming, et al. Dynamic risk of coastal flood and driving factors: integrating local sea level rise and spatially explicit urban growth [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 321:129039.

[13] 李致家,张心愿,白云鹏,等. 海河“23·7”流域性特大洪水复盘模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(5):13-19. (LI Zhijia, ZHANG Xinyuan, BAI Yunpeng, et al. Retrospective simulation on the Haihe “23·7” basin-wide extreme flood [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(5):13-19. (in Chinese))

[14] 侯俊,陈诚,郑玉磊,等. 基于 MIKE FLOOD 模型的平原水网地区内涝治理效果模拟研究[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(6):41-47. (HOU Jun, CHEN Cheng, ZHENG Yulei, et al. Simulation study on effectiveness of waterlogging control in plain water network areas based on MIKE FLOOD model [J]. Advances in Science and

- Technology of Water Resources, 2024, 44 (6) : 41-47. (in Chinese))
- [15] 李国一, 邵薇薇, 刘家宏, 等. 基于 TELEMAC-2D 模型的济南市洪涝模拟及淹没分析[J]. 水资源保护, 2024, 40 (5) : 46-52. (LI Guoyi, SHAO Weiwei, LIU Jiahong, et al. Flood simulation and inundation analysis in Ji' nan City based on TELEMAC-2D model [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (5) : 46-52. (in Chinese))
- [16] 袁竹, 高亮, 张文生, 等. 风暴潮与极端暴雨叠加作用下九龙半岛内涝防控方法[J]. 水资源保护, 2024, 40 (4) : 56-64. (YUAN Zhu, GAO Liang, ZHANG Wensheng, et al. Waterlogging prevention and control methods in Kowloon Peninsula under superimposed effect of storm surge and extreme rainstorm[J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (4) : 56-64. (in Chinese))
- [17] SANTIAGO-COLLAZO F L, BILSKIE M V, HAGEN S C. A comprehensive review of compound inundation models in low-gradient coastal watersheds [J]. Environmental Modelling & Software, 2019, 119 : 166-181.
- [18] 方佳毅, 殷杰, 石先武, 等. 沿海地区复合洪水危险性研究进展[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17 (3) : 317-328. (FANG Jiayi, YIN Jie, SHI Xianwu, et al. A review of compound flood hazard research in coastal areas [J]. Climate Change Research, 2021, 17 (3) : 317-328. (in Chinese))
- [19] 孙明坤, 刘志雨, 姚成, 等. WRF/Grid-XAJ 双向耦合系统构建及其暴雨洪水模拟应用[J]. 水科学进展, 2024, 35 (5) : 752-762. (SUN Mingkun, LIU Zhiyu, YAO Cheng, et al. Building of WRF/Grid-XAJ two-way coupling system and its application in rainstorm and flood simulation[J]. Advances in Water Science, 2024, 35 (5) : 752-762. (in Chinese))
- [20] 孙钦珂, 周亮, 王宝. 气候变化背景下沿海特大城市复合洪水灾害空间模拟[J]. 地球信息科学学报, 2023, 25 (12) : 2427-2438. (SUN Qinke, ZHOU Liang, WANG Bao. Spatial simulation of compound flood hazard risk in coastal megacities under climate change [J]. Journal of Geo-information Science, 2023, 25 (12) : 2427-2438. (in Chinese))
- [21] CHEN Weitian, WU Huan, KIMBALL J S, et al. A coupled river basin-urban hydrological model (DRIVE-Urban) for real-time urban flood modeling [J]. Water Resources Research, 2022, 58 (11) : e2021WR031709.
- [22] 王璐阳, 张敏, 温家洪, 等. 上海复合极端风暴洪水淹没模拟[J]. 水科学进展, 2019, 30 (4) : 546-555. (WANG Luyang, ZHANG Min, WEN Jiahong, et al. Simulation of extreme compound coastal flooding in Shanghai [J]. Advances in Water Science, 2019, 30 (4) : 546-555. (in Chinese))
- [23] ZENG Zhaoyang, LAI Chengguang, WANG Zhaoli, et al. Future sea level rise exacerbates compound floods induced by rainstorm and storm tide during super typhoon events: a case study from Zhuhai, China [J]. Science of the Total Environment, 2024, 911 : 168799.
- [24] LIANG Huidi, ZHOU Xudong. Impact of tides and surges on fluvial floods in coastal regions [J]. Remote Sensing, 2022, 14 (22) : 5779.
- [25] HU Shikun, LIU Bingjun, HU Maochuan, et al. Quantification of the nonlinear interaction among the tide, surge and river in Pearl River Estuary [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2023, 290 : 108415.
- [26] QIANG Yejia, HE Jian, XIAO Te, et al. Coastal town flooding upon compound rainfall-wave overtopping-storm surge during extreme tropical cyclones in Hong Kong [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2021, 37 : 100890.
- [27] HASAN TANIM A, GOHARIAN E. Developing a hybrid modeling and multivariate analysis framework for storm surge and runoff interactions in urban coastal flooding [J]. Journal of Hydrology, 2021, 595 : 125670.
- [28] LI Zhuohong, HE Wei, CHENG Mofan, et al. SinoLC-1: the first 1 m resolution national-scale land-cover map of China created with a deep learning framework and open-access data [J]. Earth System Science Data, 2023, 15 (11) : 4749-4780.
- [29] FEI Kai, DU Haoxuan, GAO Liang. The contribution of typhoon local and remote forcings to storm surge along the Makou-Dahengqin tidal reach of Pearl River Estuary [J]. Science of The Total Environment, 2023, 899 : 165592.
- [30] WU Xushu, WANG Zhaoli, GUO Shenglian, et al. Scenario-based projections of future urban inundation within a coupled hydrodynamic model framework: a case study in Dongguan City, China [J]. Journal of Hydrology, 2017, 547 : 428-442.
- [31] 卢兴超, 徐宗学, 李永坤, 等. 基于 SWMM 与 LISFLOOD-FP 耦合模型的城市街区内涝模拟研究 [J]. 水资源保护, 2024, 40 (3) : 98-105. (LU Xingchao, XU Zongxue, LI Yongkun, et al. Research on urban block waterlogging simulation based on coupling model of SWMM and LISFLOOD-FP [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (3) : 98-105. (in Chinese))
- [32] ZENG Zhaoyang, WANG Zhaoli, LAI Chengguang. Simulation performance evaluation and uncertainty analysis on a coupled inundation model combining SWMM and WCA2D [J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2022, 13 (3) : 448-464.
- [33] 姜泮珊, 傅星峰, 赵雷, 等. 基于洪涝灾害韧性 GIS 空间量化评价的城市应急避难规划 [J]. 测绘通报, 2024 (1) : 169-174. (JIANG Fengshan, FU Xingfeng, ZHAO Lei, et al. Urban emergency shelter planning based on GIS spatial quantitative evaluation of flood resilience [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2024 (1) : 169-174. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 10 - 21 编辑: 王芳)