

邓飞,张文晴,王汉岗,等.极端天气下感潮地区地表内涝致灾规律研究:以广州市海珠区为例[J].人民珠江,2026,47(3):1-11.

极端天气下感潮地区地表内涝致灾规律研究

——以广州市海珠区为例

邓飞¹,张文晴^{2*},王汉岗²,宋利祥²,姚帅²

(1.广东省水利水电技术中心,广东 广州 510635;2.珠江水利委员会珠江水利科学研究院,广东 广州 510611)

摘要:沿海感潮地区独特的地理位置和气候条件使内涝灾害防御形势异常复杂,严重制约了当地的城市发展,备受社会关注。为有效治理特大型城市内涝风险,考虑由极端天气引起的暴雨和潮位场景,以广州市海珠区为例,构建河道-管网-地表三向耦合模型,通过实测数据校准模型后,得到了极端天气下感潮地区地表内涝致灾规律。结果表明:内涝积水量与降雨量、潮位高度成正比,不同设计降雨工况的峰值内涝积水量随总降雨量的增长率小于同序列的设计潮位增长率;组合设计降雨、潮位工况的内涝积水量及Ⅳ级内涝面积大于对应同序列的单一设计降雨或潮位工况;所有极端天气设计工况的Ⅳ级内涝面积最大,潮位工况的Ⅳ级内涝面积占比远大于同序列的降雨工况Ⅳ级内涝面积。研究揭示了广州市海珠区极端天气下地表内涝的致灾规律,可为超大型城市内涝防治提供参考。

关键词:城市内涝;感潮河段;超标准暴雨;HydroMPM模型;数值模拟

中图分类号:TV8 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9235(2026)03-0001-11

强烈的人类活动显著增加了全球范围内极端天气的频率和强度,并造成了严重的生命财产损失^[1-3]。其中,由极端天气引起的内涝灾害造成的损失最为持久和严重^[4]。近年来典型的内涝事件如广州市的“5·22”事件(2020-05-22)^[5]、郑州市的“7·20”事件(2021-07-20)^[6]、北京市的“7·31”事件(2023-07-31)等。该系列内涝事件不仅严重损害了当地的基础设施,造成了人员的伤亡和财产的损失,更是引起了民众对于城市安全问题的广泛关注。因此,有效的城市内涝灾害防御是保证城市稳定、高速发展的基石^[7-9]。近年来,相关研究主要通过数值模拟的方法得出城市内涝的特征规律,如林龙等^[10]构建水动力耦合模型评估济南北园地区10、100 a的内涝风险;张文晴等^[4]通过构建GAST-SWMM模型得到了西安市中心城区的内涝灾害风险规律,可以

为当地抗涝救灾部门预防暴雨侵袭的工作提供技术参考;申腾飞等^[11]基于城市雨洪模型模拟的城市内涝风险结果,提出了长治市某城区应急救援路径规划策略,为城市内涝的应急救援提供了技术方法;Liu等^[12]定量分析了潮汐顶托加剧沿海城市内涝的效应,为潮位如何加剧内涝提供了重要见解。以上研究成果通过洪涝数值模型评估了城市内涝的风险,并展示了洪涝灾害防御的方法,但缺少沿海区域由洪、潮、雨综合致涝的规律研究。基于此,本研究以HydroMPM模型构建河道-管网-地表三向耦合模型,以广州市海珠区为研究区域,通过设计降雨工况、设计潮位工况评估研究区域内涝特征,探究极端天气下感潮地区地表内涝致灾规律,为极端天气下感潮地区城市内涝灾害防御提供相关技术依据。

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3001000)

收稿日期:2025-07-31 **修回日期:**2025-10-11 **网络首发日期:**2025-12-17

作者简介:邓飞(1977—),男,高级工程师,主要从事水利水电工程技术审查等工作。

通信作者:张文晴(1997—),男,硕士,主要从事流域及城市洪涝灾害防御等工作。

联系作者:致信rmzj@pearlwater.gov.cn,由期刊转接。

1 数据与方法

1.1 研究区域概况

海珠区地处广东省中部、广州市南部,坐标介于东经 $113^{\circ}14'$ 至 $113^{\circ}23'$,北纬 $23^{\circ}3'$ 至 $23^{\circ}16'$,其辖区面积达 92 km^2 。海珠区河网如织,水系发达,四面被珠江广州河段的前、后航道紧紧环绕。主要水系包含西北部的海珠涌、东北部的黄埔涌、南部的赤沙滘这3个水网系统。其中,石榴岗河堪称海珠岛最大且最为重要的河道,它宛如一条灵动的丝带,从海珠区中东部贯穿而过,起点为海珠湖,终点至后航道,并顺势连通了海珠湖、万亩果林与海珠湿地,是海珠湖及周边区域的主要补水通道。

海珠区常年降雨多发频发,作为珠江三角洲典型感潮河网区,兼具高强度城市化与潮汐动态影响的复合特征。2023—2025年,该区域因极端降雨叠加风暴潮导致的内涝事件频发,例如2023年“7·16”暴雨期间南洲街因潮水顶托致排水效率下降37%。感潮区内涝机制呈现“潮汐-降雨-城市扩张”多因子耦合的新特征。

本次选择海珠区北部东北部老城区作为研究区域,研究区域被珠江前航道、珠江后航道和海珠涌环绕,研究区域面积共计 6.6 km^2 ,研究区域见图1。根据该区域特征开展极端天气下感潮地区地表内涝致灾规律研究具有较强代表性。

1.2 基于HydroMPM的内涝模型

准确地研究地表内涝致灾规律,需要通过构建



图1 研究区域位置

Fig. 1 The location of study area

水文水动力模型模拟地表内涝的演进过程,因此本研究基于HydroMPM模型^[13-15]构建极端天气下城市内涝模型。HydroMPM模型是珠江水利委员会珠江水利科学研究院自主研发的一款具有自主知识产权的城市洪涝数值模拟软件。主要具有雨洪、山洪、风暴潮一维水动力过程模拟、暴雨一维管网水文水动力过程、二维地表漫流水动力过程模拟及动力过程相互耦合模拟的功能。

因沿海地区内涝致灾主要受本地降雨、上游行洪、下游增潮的影响,因此本次构建的地表内涝模型主要包括一维河道水动力模型,一维管网水动力模型、二维地表水动力模型等主要子模块模型。

1.2.1 河道模型

河道模型采用Saint-Venant方程组作为一维河道非恒定流控制方程,主要包括连续方程和运动方程。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{q}{B} \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\beta \bar{u} Q) + g \frac{|Q|Q}{C^2 AR} = 0 \quad (1)$$

式中: x 为流距, m ; t 为时间, s ; z 为水位, m ; B 为过水断面水面宽度, m ; Q 为流量, m^3/s ; q 为侧向单宽流量, m^2/s ,正值表示流入,负值表示流出; A 为过水断面面积, m^2 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; \bar{u} 为断面平均流速; β 为校正系数; R 为水力半径, m ; C 为Chézy系数, $C=R^{1/6}/n$, n 为Manning糙率系数。

一维河网水动力模型数值求解方法采用单元中心型有限体积法求解控制方程,使用Riemann求解器计算控制体之间的数值通量,通过汉点预测校正法计算河道汉点的内边界条件^[13]。

1.2.2 管网模型

管网模型通过调用SWMM (Storm Water Management Model)模型的源代码实现城市管网的水动力过程模拟,管网模型仍采用Saint-Venant方程组作为一维管网非恒定流控制方程,管网的汇流验算方法为动力波法。城市暴雨内涝过程通过SWMM模型实现地表的降雨-下渗-径流,过量的径流量再汇入雨水井,在管网中流动,当管网中水流

超过其承载量,雨水再通过雨水井发生溢流。地表雨水汇入雨水井的主要因素为径流的产生,在SWMM模型中主要体现为下垫面下渗能力不足,因此SWMM模型主要通过3种模型描述该种地表产流过程,即Horton下渗模型、Green-Ampt下渗模型和SCS曲线法,本研究综合考虑模型计算效率与参数的可获取性最终选择Horton下渗模型。

1.2.3 地表模型

地表模型主要用于计算一维管网在地表的溢流过程和一维河道的漫滩过程,模型采用二维浅水方程作为控制方程。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = S \quad (2)$$

其中:

$$U = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{g(h^2 - b^2)}{2} \\ huv \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} hu \\ huv \\ hv^2 + \frac{g(h^2 - b^2)}{2} \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} 0 \\ g(h+b)S_{0x} - ghS_{fx} \\ g(h+b)S_{0y} - ghS_{fy} \end{bmatrix}$$

式中: U 为守恒向量; E 和 G 分别为 x 和 y 方向上的通量向量; S 为源项; h 为水深; u 、 v 分别为 x 、 y 方向的垂向平均流速; b 为底高程; S_{0x} 和 S_{0y} 分别为 x 和 y 方向上的底坡源项, $S_{0x}=-b/x$, $S_{0y}=-b/y$; S_{fx} 和 S_{fy} 分别为 x 和 y 方向上的摩阻源项,其中 $S_{fx}=n^2u(u^2+v^2)^{1/2}h^{-4/3}$, $S_{fy}=n^2v(u^2+v^2)^{1/2}h^{-4/3}$ 。

二维地表的数值求解方法,一般采用非结构三角网格划分计算域,运用单元中心型有限体积法进行控制方程离散;通过底高程定义于网格节点,水深、水位和流速等变量定义于单元中心;采用近似Riemann求解Harten-Lax-van Leer-contact(HLLC)计算数值通量,运用具有时空二阶精度的守恒律的单调上游中格式(Monotone Upstream-centered Schemes for conservation Laws, MUSCL)进行方程求解^[14]。计算模块主要包括单元干湿状态分类、斜率计算、预测步、空间重构、Riemann问题求解、边界条件处理、源项处理和校正步^[15]。

1.2.4 模型耦合方法

河道模型与地表模型之间为侧向耦合,水量交换主要通过堰流公式实现,根据地表网格水深、河道网格水深和堰高可分为4种判断条件;管网模型与地表模型之间为垂向耦合,水量交换主要通过堰流公式与孔流公式实现,根据地表水深、雨水井溢流水深可分为3种判断条件;管网模型与河道模型之间为正向耦合,水量交换主要通过河道断面水位与排口排出的加权平均水位作为判断条件^[17]。

1.3 模型构建

1.3.1 模型边界条件

对广州市海珠区超标准内涝致灾特征规律的研究主要考虑暴雨与潮位的影响,因此边界条件序列的变化主要为设计暴雨与设计潮位工况。整体的模型边界主要设计一维河道模型与一维管网模型。一维模型的上边界取老鸦岗的多年平均流量1270 m³/s,下边界为黄埔站设计潮位边界,黄埔站设计高潮位来源于《珠江河口综合治理规划修编主要测站设计潮位复核报告》,将黄埔站设计高潮位与近年来典型风暴潮台风“山竹”期间的潮位过程进行同倍比缩放后得到模型的设计潮位过程。一维管网模型的边界为设计降雨,设计降雨通过《广州市暴雨强度公式编制与设计暴雨雨型研究技术报告简本》中广州市中心城区各降雨工况新编暴雨强度公式得到,极端300 mm降雨过程是通过同倍比放大100年一遇降雨过程求得。为研究潮位与暴雨峰值对内涝的叠加影响,河道模型的设计潮汐边界为6 h,潮汐过程主要截取潮汐周期中的高高潮部分,其中高高潮位于第3 h时刻。管网模型降雨过程时长为3 h,管网模型中通过降雨过程时段调整,最终将管网模型设计降雨设置为模型模拟时长6 h,降雨峰值与潮位峰值时刻一致的模型所需降雨数据。设计降雨与设计潮位过程见图2。

$$K_t = \frac{H_t^p}{H_t^r} \quad (3)$$

式中: K_t 为历时 t 的放大倍比; H_t^p 为该历时的设计雨量; H_t^r 为该历时的实际雨量。

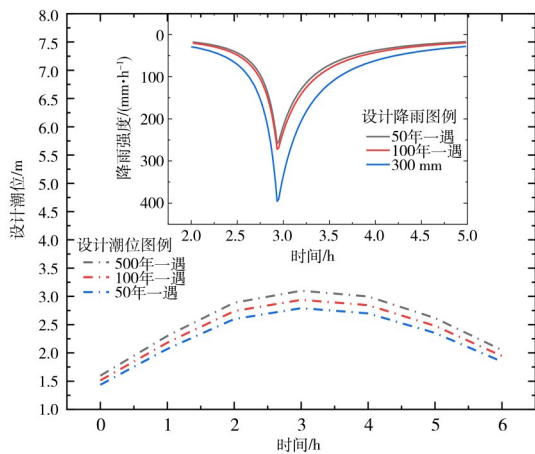


图2 设计降雨及设计潮位过程

Fig. 2 The process of design rainfall and design tide level

《广州市暴雨强度公式编制与设计暴雨雨型研究技术报告简本》为最新广州市设计暴雨成果,成果基于最近40 a资料推求了100 a以内不同设计频率的设计暴雨公式,因此,本文为凸显降雨的极端性将3 h内总量为300 mm的降雨通过同倍比放大法将100年一遇的海珠区设计降雨过程放大至3 h共计300 mm的设计降雨工况。目前常用的设计频率估算方法是通过以前的暴雨强度公式根据降雨总量和降雨历时倒推设计频率,根据此种方法推求资料序列外的极端暴雨具有极大局限性,推求结果降低了此类真实降雨的出现频率,降低了人们对极端暴雨的警惕性,因此本文采用降雨总量为300 mm历时3 h的降雨过程描述研究区域的极端降雨过程。

1.3.2 河道-管网-地表三向耦合模型构建

图3为本研究构建的河道-管网-地表三向耦合模型,其中二维地表模型共计313 473个网格,最大网格边长10 m,最小网格边长5 m,对内涝淹没的城市重要道路的网格进行了局部加密处理;管网模型共计1 858段管道,1 835个雨水井,394个汇水分区,21个排水口;河道模型共计16条河道中心线,124条河道断面及3条河道边界。

1.3.3 模型验证

模型验证采用2018年9月台风“山竹”期间的潮位数据作为模型的边界条件(山竹“台风”期间海

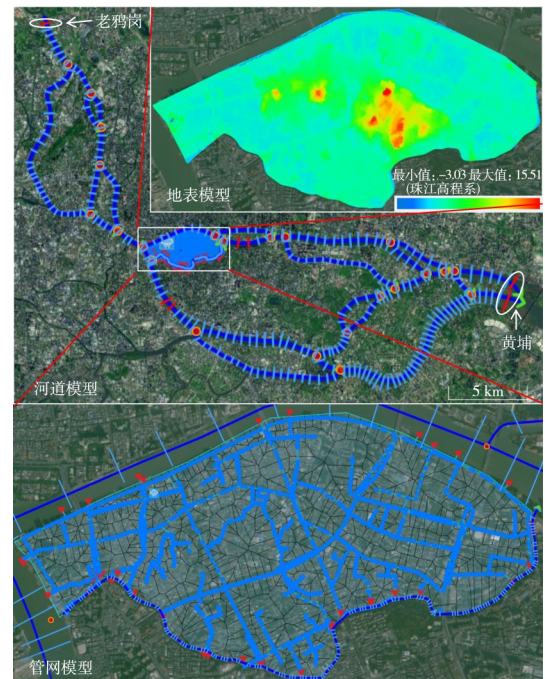


图3 河道-管网-地表三向耦合模型

Fig. 3 river-pipe-surface coupled model

珠区降雨较小,本次内涝模型验证暂不考虑降雨因素),潮位过程见图4。通过该系列数据不断调整模型参数,以内涝水深为校准对象,最终得到实测内涝水深与模拟内涝水深最为接近的地表内涝水深结果见图5,其中A点和B点为台风“山竹”期间实测内涝点位置。模型验证的精度见表1,由该表可知模型两处内涝点的最大水深误差均不大于5%,精度要求满足GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》^[4],因此该模型可靠度较高,可用于该区域内涝致灾规律的研究。

1.3.4 内涝评估工况设置

本研究主要探究感潮地区极端天气下地表内涝致灾规律,峰值时刻内涝淹没面积与峰值时刻内涝积水量可以直接反映内涝的严重程度,因此研究将以峰值时刻内涝淹没面积和峰值时刻内涝积水量作为评估指标^[17]。同时根据内涝水深将内涝风险分为4个等级,见表2。内涝风险评估工况主要为暴雨过程与潮位过程的组合,模型边界条件的设计组合过程见表3。

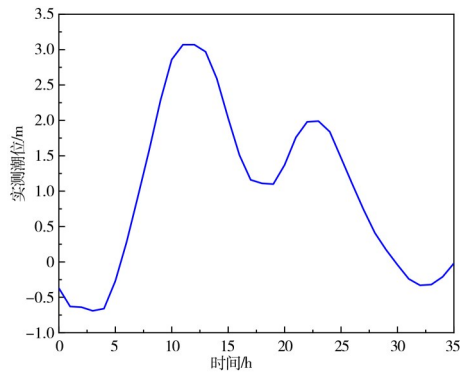


图 4 台风“山竹”期间黄埔站实测潮位

Fig. 4 Measured tidal level at Huangpu station during typhoon ‘Shanzhu’

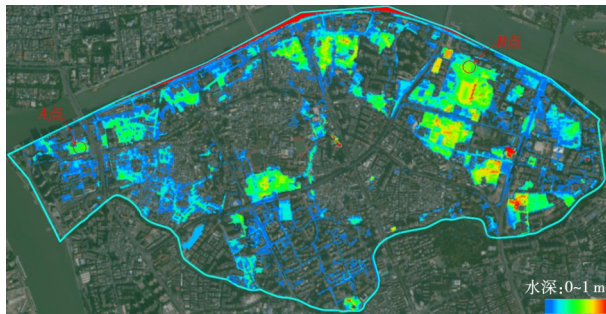


图 5 台风“山竹”模型验证结果

Fig. 5 Model validation results through typhoon ‘Shanzhu’ data

2 结果与分析

图 6 为内涝模型计算所得各设计工况的内涝水深及内涝等级的空间区划,统计各工况不同内涝等

表 1 模型校准后实测水深与内涝水深对比

Tab. 1 Comparison of measured water depth and waterlogging depth after model calibration

内涝点	模拟水深/cm	实测水深/cm	相对误差/%
A	36	35	2.80
B	42	40	5.00

表 2 内涝风险等级划分^[17]

Tab. 2 Waterlogging risk classification

内涝等级	内涝程度	内涝情形
I 级	无内涝	城区地面积水深度在 0~3 cm
II 级	轻度内涝	城区有微量积水,积水深度在 3~10 cm
III 级	中度内涝	城区有积水,积水深度在 10~25 cm
IV 级	重度内涝	城区积水严重,积水深度大于 25 cm

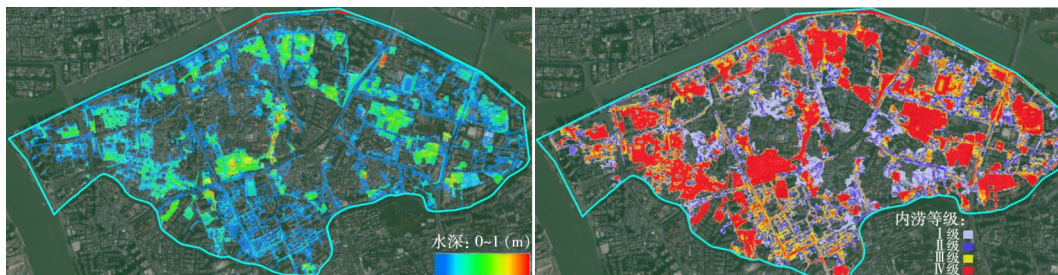
表 3 设计降雨及潮位工况设置

Tab. 3 Setting design rainfall and tide level condition

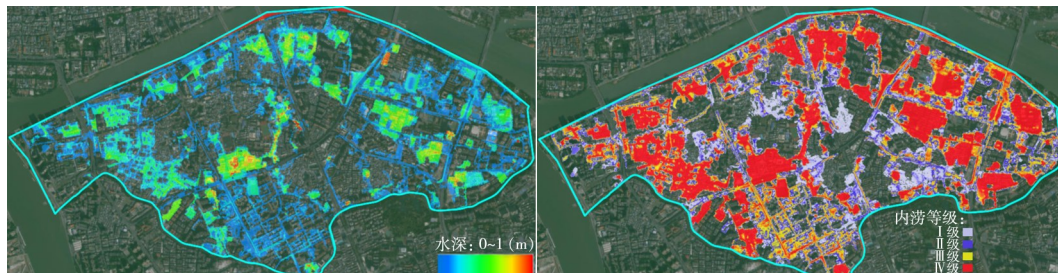
序列号	单一暴雨工况	单一潮位工况	降雨潮位组合工况
1	50 年一遇	50 年一遇	50 年一遇降雨-50 年一遇潮位
2	100 年一遇	100 年一遇	100 年一遇降雨-100 年一遇潮位
3	300 mm	500 年一遇	300 mm 降雨-500 年一遇潮位

注:潮位工况假设雨水管网系统的排水口全无拍门。

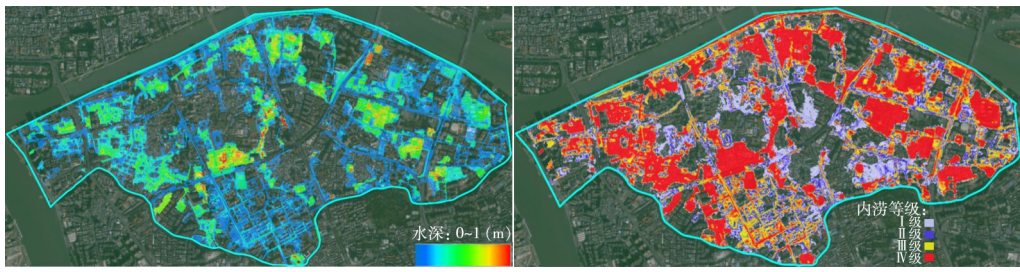
级的相关数据即可分析出研究区域地表内涝积水致灾的相关规律。



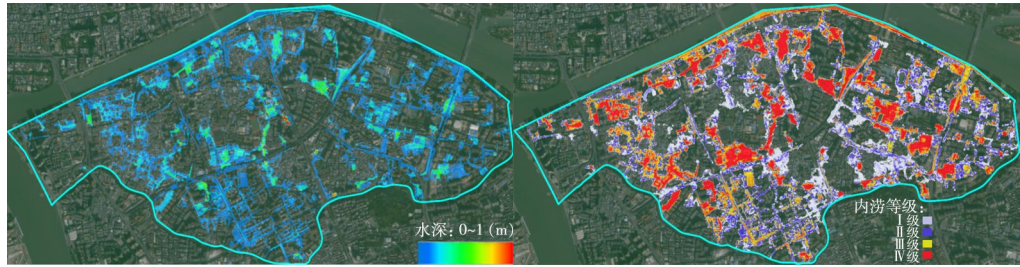
a) 50 年一遇降雨工况峰值时刻内涝水深(左)及内涝等级(右)空间区划



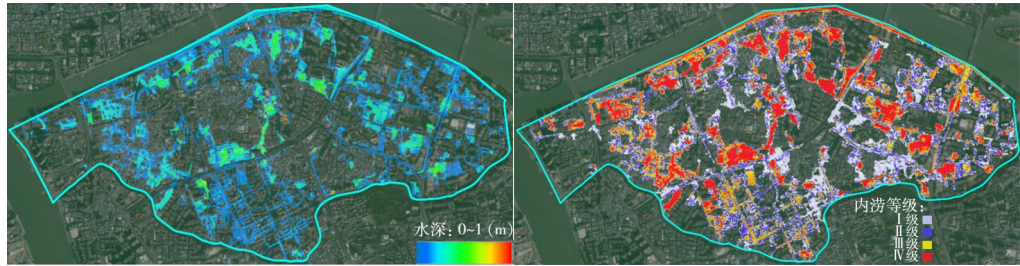
b) 100 年一遇降雨工况峰值时刻内涝水深(左)及内涝等级(右)空间区划



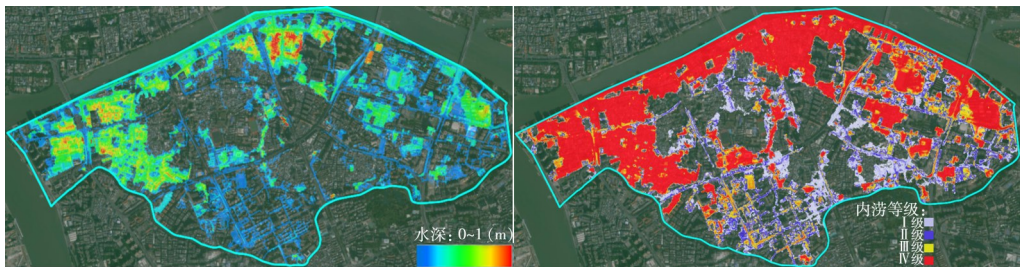
c) 300 mm 降雨工况峰值时刻内涝水深(左)及内涝等级(右)空间区划



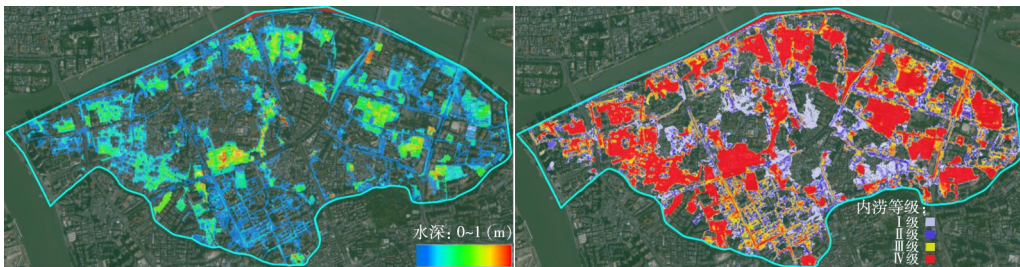
d) 50年一遇潮位工况峰值时刻内涝水深(左)及内涝等级(右)空间区划



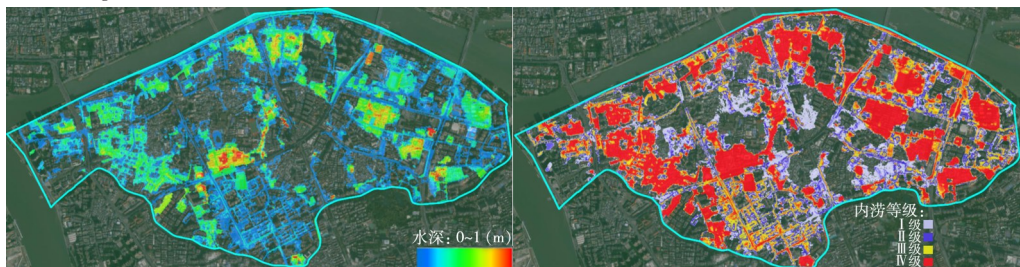
e) 100年一遇潮位工况峰值时刻内涝水深(左)及内涝等级(右)空间区划



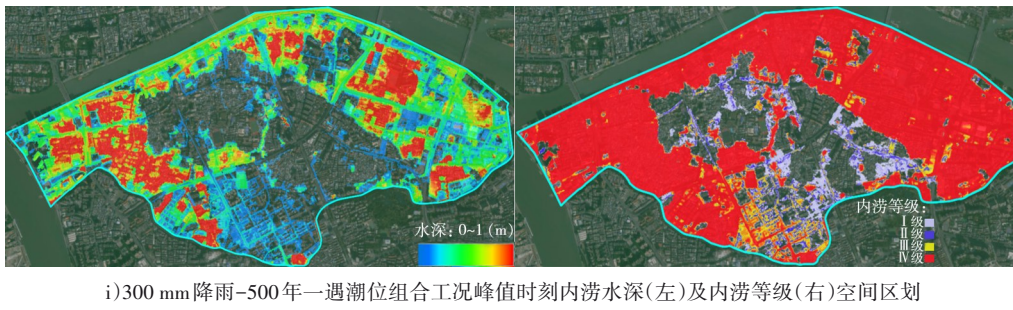
f) 500年一遇潮位工况峰值时刻内涝水深(左)及内涝等级(右)空间区划



g) 50年一遇降雨-50年一遇潮位组合工况峰值时刻内涝水深(左)及内涝等级(右)空间区划



h) 100年一遇降雨-100年一遇潮位组合工况峰值时刻内涝水深(左)及内涝等级(右)空间区划



i) 300 mm 降雨-500 年一遇潮位组合工况峰值时刻内涝水深(左)及内涝等级(右)空间区划

图 6 各设计降雨及潮位工况峰值时刻内涝水深及内涝等级空间区划

Fig. 6 The spatial zoning of waterlogging depth and level at the peak time in different designed rainfall and tide conditions

2.1 峰值时刻内涝积水量

通过统计各设计工况峰值时刻的内涝积水量,可以定量地分析出研究区域内地表内涝淹没水量的量级规律,表 4 为各设计工况峰值时刻的内涝积水量(忽略深度小于 3 cm 的内涝水深)。

表 4 各设计工况峰值时刻的内涝积水量

Tab. 4 Waterlogging volume at peak time of each design condition

工况	项目	峰值时刻积水量/m ³
单一降雨	50 年一遇	662 622.00
	100 年一遇	793 719.53
	300 mm	1 098 462.59
单一潮位	50 年一遇	824 825.36
	100 年一遇	1 053 648.39
	500 年一遇	1 439 646.06
降雨-潮位组合	50 年一遇降雨+50 年一遇潮位	1 543 867.95
	100 年一遇降雨+100 年一遇潮位	2 115 387.53
	300 mm 降雨+500 年一遇潮位	2 664 856.28

图 7 为各单一降雨工况研究区域的峰值时刻积水总量,由该图可知研究区域内 50~100 年一遇暴雨的峰值时刻积水量增长率小于 100 年一遇到 300 mm 暴雨的峰值时刻积水量增长率(峰值时刻积水量增长率指模型计算所得大量级水文工况峰值时刻的总积水量与小量级水文工况峰值时刻总积水量的差值相对于小量级水文工况峰值时刻的总积水量的商),主要原因为 50、100 年一遇降雨工况的总降雨量为 187、206 mm,对于三者间的峰值时刻积

水量,降雨总量之间的增长关系直接反映了降雨重现期之间的增长关系,总体上来说,对于由极端天气引起的单一暴雨事件,同一降雨过程,地表峰值时刻积水量随降雨量的增加而增加。

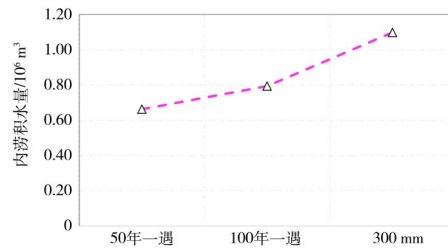


图 7 50、100 年一遇,300 mm 降雨工况峰值内涝积水量

Fig. 7 Peak waterlogging volume under 50, 100 return period and 300mm rainfall conditions

图 8 为各单一潮位工况研究区域的峰值时刻积水总量,该图可知,研究区域内 50~100 年一遇潮位的峰值时刻积水量增长率大于 100~500 年一遇潮位的峰值时刻积水量增长率,然而 50、100、500 年一遇设计潮位之间的增长率变化较小,这种情况表明,对于由极端天气引起的单一潮水倒灌事件,随着潮位频率的增加,峰值内涝积水量的增长率将逐渐变小。产生该规律的主要原因是对于由单一极端潮水顶托管网产生溢流的内涝现象,过高的潮水位虽能通过排水口倒灌入管网系统中,但是否发生内涝淹没的主要原因还是取决于雨水井高程与潮位之间的关系,而位于感潮地区的城市虽然靠近河流的局部陆地区域由于地表高程的原因,会使得雨水井高程小于潮位,但越靠近城市中心大部分雨水井的建设高程还是会高于极端潮水位,因此,对于由单

一潮水引起的内涝,峰值内涝积水量增长率会出现随潮位重现期增长而逐渐减小的情况。

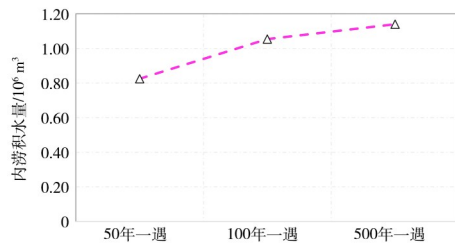


图8 50、100、500年一遇潮位工况峰值内涝积水量

Fig. 8 Peak waterlogging volume under under 50, 100 and 500 return period tide level conditions

由图9可知,由极端天气导致的组合极端暴雨与极端潮位,内涝峰值时刻积水量与降雨量和潮高成正比,其增长率呈现出较为接近的态势。通过表4可以看出对于组合工况来说,其峰值积水总量分别大于对应的单一降雨或带潮位设计工况,且组合工况峰值积水总量大于2个单一工况峰值积水总量的和。主要原因为对于单一降雨工况,虽然在达到内涝峰值积水时刻的过程中,会因为管网承载能力不足产生溢流,形成地表内涝,但仍有部分水量通过排口排进了河道;对于单一的潮位工况,虽然研究区域内由于潮位顶托使得潮水溢流进城市,但此种内涝源全部为潮水,无本地暴雨的影响;而当极端潮位遭遇极端暴雨时,会使得区域内本身产生潮水倒灌,且本地暴雨无法通过管网排出,全部在当地内涝。因此,在遭遇极端天气时的极端潮位和极端暴雨组合过程,内涝峰值积水量会小于单独的极端潮位或极端暴雨过程。

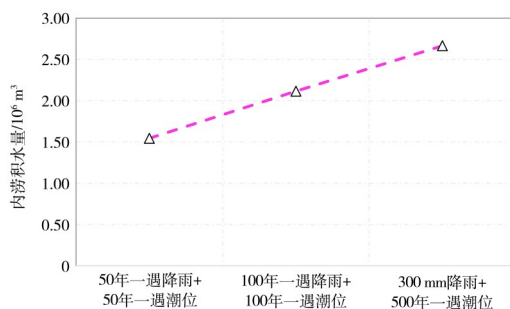


图9 降雨-潮位组合工况峰值内涝积水量

Fig. 9 Peak waterlogging volume under combined rainfall-tide level condition

2.2 峰值时刻内涝积水面积

通过统计各设计工况峰值时刻的内涝面积可以定量地分析出研究区域内地表内涝淹没水深的转化规律,表5为各设计工况峰值时刻的内涝面积(忽略深度小于3 cm的内涝水深)。图10为各单一降雨工况不同内涝等级的峰值积水时刻内涝面积,由该图可知由极端天气引起的暴雨内涝,其峰值时刻的IV级内涝面积最大。同时,随着降雨量的增加,出现了II级内涝面积逐渐减小,III级内涝面积幅度增加,IV级内涝面积较大幅度增加的规律,主要原因为随着降雨量的增加II级内涝水深逐渐转换为III级内涝水深,III级内涝水深也逐渐转换为IV级内涝水深。

图11为单一潮位工况不同内涝等级的峰值积水时刻内涝面积,由该图可知设计潮位工况仍表现出了在所有设计潮位工况中IV级内涝面积最大的规律,但相对于设计降雨工况设计潮位工况的IV级内涝面积占比要远大于设计潮位工况,主要原因是在设计潮位工况下淹没范围主要影响的是靠近河道的陆地区域,该区域的淹没情况除管网产生持续溢流之外还有高潮位造成的河道漫溢,河道漫溢本身的量级相较于降雨较大,因此也会产生更多的IV级内涝。另外与单一降雨工况不同,随着潮位的增加,其III级内涝面积呈现出下降趋势,主要原因也是潮水漫滩造成的大量浅水深内涝迅速转换成了深水深内涝。

图12为降雨-潮位组合工况不同内涝等级的峰值积水时刻内涝面积,由该图可知降雨潮位组合工况的IV级内涝面积最大,与单一潮位或单一降雨设计工况规律一致,但同序列的降雨-潮位组合设计工况的IV级内涝面积占比小于单一潮位设计工况,大于降雨设计工况。同时降雨-潮位组合设计工况的IV级内涝面积均大于同序列的单一降雨设计工况或单一潮位设计工况,却小于同序列单一降雨与单一潮位工况的IV级内涝面积之和,该种现象与前文内涝积水量的规律不同,组合工况不是同序列各单一工况量的叠加,主要原因为不同设计工况的各IV级内涝水深网格随降雨量或潮位的增加,存在大

量同一网格的水深增加,因此此种内涝水深的增加,不改变该种内涝等级面积。因此,对于组合降雨-潮位设计工况,IV级内涝面积会大于同序列的单

一降雨设计工况或单一潮位设计工况,却小于同序列单一降雨与单一潮位工况的IV级内涝面积之和。

表 5 各设计工况峰值时刻的内涝面积

Tab. 5 Waterlogging area at peak time of each design condition

单位:m²

设计工况	II级内涝面积	III级内涝面积	IV级内涝面积	II、III、IV级内涝总面积
50年一遇降雨	821 803.31	797 266.42	864 531.21	2 483 600.94
100年一遇降雨	809 341.38	824 656.27	956 277.18	2 590 274.83
300 mm 降雨	723 561.35	886 579.61	1 124 568.66	2 734 709.62
50年一遇潮位	708 564.38	692 536.86	1 358 459.82	2 759 561.06
100年一遇潮位	673 561.36	665 728.94	1 548 325.26	2 887 615.56
500年一遇潮位	613 361.47	641 439.20	1 772 031.78	3 026 832.45
50年一遇降雨+50年一遇潮位	756 948.76	795 876.67	1 486 957.89	3 039 783.32
100年一遇降雨+100年一遇潮位	713 579.68	853 697.69	1 736 751.39	3 304 028.76
300 mm 降雨+500年一遇潮位	653 976.31	893 675.18	2 159 367.76	3 707 019.25

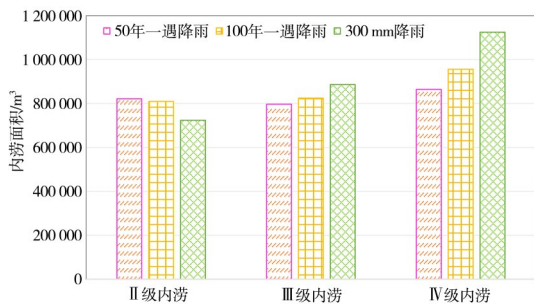


图 10 50、100年一遇,300 mm 降雨工况峰值内涝积水面积

Fig. 10 Peak waterlogging area under 50, 100 return period and 300mm rainfall conditions

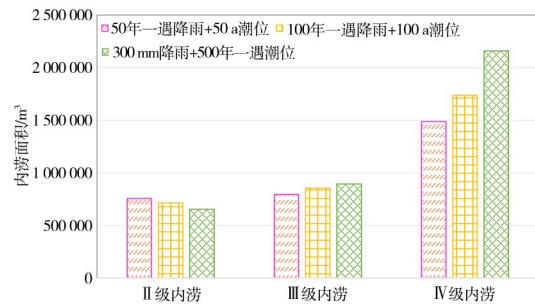


图 12 组合降雨潮位工况峰值内涝积水面积

Fig. 12 Peak waterlogging area under combined rainfall-tide level condition

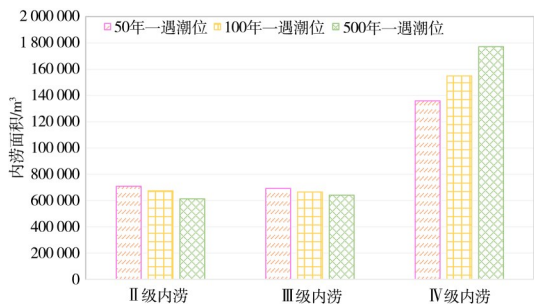


图 11 50、100、500年一遇设计潮位工况峰值内涝积水面积

Fig. 11 Peak waterlogging area under under 50, 100 and 500 return period tide level conditions

3 结论

为对极端天气下感潮地区地表内涝灾害进行有效防御,以广州市海珠区为例,构建了河道-管网-地表三向耦合模型,通过 50、100 年一遇,300 mm 设计降雨工况和 50、100、500 年一遇设计潮位工况评估了极端天气下研究区域地表内涝致灾规律,得到的主要结论如下。

a)降雨事件与潮位事件均能表现出内涝积水量随降雨量或潮位增加而增加的规律,但广州市海珠区设计降雨事件的地表内涝积水量增长率随着

降雨量的增加呈下降趋势,设计潮位事件的地表内涝积水量增长率随着潮位的增加呈上升趋势。

b)广州市海珠区在遭遇同序列的潮位或降雨事件时,内涝积水面积均表现为Ⅳ级内涝面积占比最大,其中设计潮位的Ⅳ级内涝面积占总内涝面积的比值远大于同序列的设计暴雨,组合300 mm降雨和500年一遇潮位设计工况较单一500年一遇潮位设计工况Ⅳ级内涝面积提升了21.85%。

参考文献:

- [1] 周波涛,钱进. IPCC AR6 报告解读:极端天气气候事件变化[J]. 气候变化研究进展,2021,17(6):713-718.
ZHOU B T, QIAN J. Changes of weather and climate extremes in the IPCC AR6 [J]. Climate Change Research, 2021, 17 (6): 713-718. (in Chinese)
- [2] 苑希民,兰卓青,王丽娜,等. 极端天气城市特大暴雨洪涝灾害特征再分析及应对策略[J]. 水利学报,2024,55(11):1298-1308.
YUAN X M, LAN Z Q, WANG L N, et al. Reanalysis of the characteristics of extreme rainstorm and flood disaster in urban areas and coping countermeasures [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(11):1298-1308. (in Chinese)
- [3] 王博文,贺一,滕飞. 我国极端天气气候事件直接和间接经济损失的评估及归因[J]. 气候变化研究进展,2025,21(4):502-518.
WANG B W, HE Y, TENG F. Attribution and assessment of direct and indirect economic losses from extreme weather events in China [J]. Climate Change Research, 2025, 21 (4): 502-518. (in Chinese)
- [4] 张文晴,侯精明,王汉岗,等. 基于GAST-SWMM模型的西安市中心城区内涝灾害模拟及风险评估[J]. 人民珠江,2023,44(8):68-81.
ZHANG W Q, HOU J M, WANG H G, et al. Simulation and Risk Assessment of Urban Waterlogging Disasters in the Main Urban Area of Xi'an Based on the GAST-SWMM Model [J]. Pearl River, 2023, 44(8):68-81. (in Chinese)
- [5] 宋子龙. 暴雨洪灾成因分析及其防治对策:以广州市增城区“5.22”、“6.8”两场特大暴雨为例[J]. 珠江水运,2021(19):75-76.
SONG Z L. Analysis of the Causes of Heavy Rain and Flood Disasters and Their Prevention and Control Strategies: Taking the Two Extreme Rainstorms on 'May 22' and 'June 8' in Zengcheng District, Guangzhou City as Examples [J]. Pearl River Water Transport, 2021(19):75-76. (in Chinese)
- [6] 马建明. 关于城市洪涝风险防控体系构建的建议:郑州市“7·20”特大暴雨灾害思考[J]. 中国防汛抗旱,2022,32(4):45-47,71.
MA J M. Suggestions on the construction of urban flood risk prevention and control system: Reflections on the "7·20" extreme rainstorm disaster in Zhengzhou City [J]. China Flood&Drought Management, 2022, 32(4): 45-47, 71. (in Chinese)
- [7] 严恒恒,卢巧慧. MIKE FLOOD模型在高密度建成区排涝方案中的应用:以深圳市福海河南片区为例[J]. 人民珠江,2024,45(12):30-38.
YAN H H, LU Q H. Application of MIKE FLOOD Model in Drainage Schemes for High-density Built-up Areas: Taking the Southern Region of Fuhai River in Shenzhen as an Example [J]. Pearl River, 2024, 45(12):30-38. (in Chinese)
- [8] 陈文龙,何颖清. 粤港澳大湾区城市洪涝灾害成因及防御策略[J]. 中国防汛抗旱,2021,31(3):14-19.
CHEN W L, HE Y Q. Causes and prevention strategies on urban flood disasters in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. China Flood&Drought Management, 2021, 31(3): 14-19. (in Chinese)
- [9] 范玲. 中国城市洪涝灾害韧性的作用机理、时空格局演化与提升路径研究[D]. 太原:山西财经大学,2023.
FAN L. Research on the Mechanism, Spatiotemporal Pattern Evolution, and Improvement Path of Urban Flood Disaster Resilience in China [D]. Taiyuan: Shanxi University of Finance and Economics, 2023. (in Chinese)
- [10] 林龙,焦裕飞,马萍,等. 基于水动力耦合模型的济南北园地区内涝风险评估[J/OL]. 济南大学学报(自然科学版),1-8[2025-07-04]. DOI:10.13349/j.cnki.jdxbn.20250604.003.
LIN L, JIAO Y F, MA P, et al. Flood Risk Assessment in Beiyuan Area of Jinan Based on a Hydrodynamic Coupling Model [J/OL]. Journal of University of Jinan (Natural Science Edition), 1-8 [2025-07-04]. DOI: 10.13349/j.cnki.jdxbn.20250604.003. (in Chinese)
- [11] 申腾飞,侯精明,李丙尧,等. 基于城市雨洪模型的长治市某城区应急救援路径规划研究[J]. 自然灾害学报,2024,33(3):67-78.
SHEN T F, HOU J M, LI B Y, et al. Research on emergency rescue path planning in an urban area of Changzhi City based on urban rainfall-flood model [J]. Journal of Natural Disasters, 2024, 33(3):67-78. (in Chinese)
- [12] LIU Y, WANG H, DING Y, et al. The exacerbating effect mechanism of tidal jacking on waterlogging hazards in coastal cities [J]. Water Resources Research, 2025, 61(3). DOI: 10.1029/2024WR039226.
- [13] 杨莉玲,宋利祥,邓军涛,等. 一、二维耦合数学模型在感潮河网洪水风险图编制中的应用[J]. 长江科学院院报,2017,34(9):36-40.
YANG L L, SONG L X, DENG J T, et al. Application of a 1-D and 2-D Coupled Mathematical Model in the Mapping of Tidal

- River Flood Risk [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(9):36-40. (in Chinese)
- [14] 杨芳,胡豫英,宋利祥,等. 基于动态网格和局部时间步长技术的城市洪涝模型加速方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2024, 64(12):2132-2143.
- YANG F, HU Y Y, SONG L X, et al. Acceleration method of the urban flood model based on the dynamic grid system and local time step technology [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2024, 64(12): 2132-2143. (in Chinese)
- [15] 宋利祥,胡晓张. 洪水实时模拟与风险评估技术研究及应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.
- SONG L X, HU X Z. Research and Application of Real-Time Flood Simulation and Risk Assessment Technology [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007. (in Chinese)
- [16] 黄国如,陈文杰,喻海军. 城市洪涝水文水动力耦合模型构建与评估[J]. 水科学进展, 2021, 32(3):334-344.
- HUANG G R, CHEN W J, YU H J. Construction and evaluation of an integrated hydrological and hydrodynamics urban flood model [J]. Advances in Water Science, 2021, 32(3): 334-344. (in Chinese)
- [17] 马鑫. 极端暴雨致涝特征变化规律研究[D]. 西安:西安理工大学, 2023.
- MA X. Study on the Changing Patterns of Flood Characteristics Caused by Extreme Rainfall [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023. (in Chinese)

Study on Disaster Law of Surface Waterlogging in Tidal Area under Extreme Weather: Case of Haizhu, Guangzhou

DENG Fei¹, ZHANG Wenqing^{2*}, WANG Hangang², SONG Lixiang², YAO Shuai²

(1. Guangdong Technology Center of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China; 2. The Pearl River Hydraulic Research Institute, Guangzhou 510611, China)

Abstract: The unique geographical location (adjacent to coastal waters with frequent tidal fluctuations) and climatic conditions (susceptible to concentrated heavy rainfall) of coastal tide-affected areas make the prevention of waterlogging disasters extremely complex. This complexity not only severely restricts local urban development, including delaying the construction of low-lying residential and commercial areas, limiting the expansion of infrastructure like roads and subways, and discouraging industrial investment that requires stable environments, but also draws widespread social attention, as residents worry about property damage, traffic disruptions, and health risks from prolonged waterlogging, while governments face mounting pressure to address the issue. To effectively mitigate waterlogging risks in mega cities, where dense populations and high economic activity amplify disaster losses, this study constructed a river-pipe-surface coupled model integrating rivers, pipe networks, and the ground surface, the river-pipe-surface coupled model integrating rivers, pipe networks, and the ground surface, considering design scenarios of heavy rainfall and high tides triggered by extreme weather (such as typhoons and storm surges, worsened by climate change), taking Haizhu District, Guangzhou, a typical tide-affected area in the Pearl River Delta where rainfall and tides often overlap to exacerbate waterlogging as a case study. This model simulates the entire waterlogging cycle, including rainfall infiltration, water flow in pipe networks, interaction with river systems, and drainage blockages caused by high tides. After calibrating the model with detailed measured data to ensure its accuracy, the disaster-causing patterns of surface waterlogging in tide-affected areas under extreme weather were identified. Results show that: ① Waterlogging volume is proportional to rainfall and tide height; even moderate increases in either factor raise accumulated water, especially when they occur simultaneously. ② For different designed rainfall scenarios, the growth rate of the peak waterlogging accumulation volume with the total rainfall amount is lower than the growth rate of the designed tide level in the same sequence. ③ Under combined rainfall-tide conditions, both waterlogging volume and Level-IV waterlogging areas are larger than those under single rainfall or tide conditions with the same hydrological frequency, showing a synergistic "double pressure" effect. ④ Among all extreme weather designs, Level-IV waterlogging areas are the largest, and their proportion in tide-only scenarios is much higher than in rainfall-only scenarios of the same frequency. This study reveals the disaster causing law of surface waterlogging under extreme weather conditions in Haizhu District, Guangzhou, which can provide reference for the prevention and control of waterlogging in super large cities.

Keywords: Urban waterlogging; Tidal reach; Super standard rainstorm; HydroMPM model; Numerical simulation