

暴雨雨型对城市排水管网和地表洪涝过程的联合影响

高长松¹, 肖 洋^{1,2}, 许 栋¹, 李彬权¹, 周 瑛¹, 徐辉荣^{1,3}, 唐洪武¹

(1. 河海大学水利部水循环与水动力系统重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009; 3. 广东省水利电力勘测设计研究院有限公司, 广东 广州 510635)

摘要: 针对气候变化背景下城市暴雨雨型发生变化影响洪涝致灾过程的问题, 在广州南沙金洲涌独立排水区构建了基于 SWMM 和 LISFLOOD-FP 的单向耦合内涝模型, 探讨了雨峰系数分别为 0.431 (标准雨型)、0.2 (雨型 I)、0.5 (雨型 II) 和 0.8 (雨型 III) 的暴雨内涝特征。结果表明: 研究区在标准雨型设计暴雨条件下, 降雨重现期从 2 a 提高至 100 a 时, 溢流节点最大流量提高约 55%, 溢流总量增幅达 207%, 淹没面积占比从 24.2% 增加至 40.8%; 随着降雨重现期的增大, 重度淹没区面积显著增加, 随着雨峰系数的增大, 峰现时间延迟, 达到最大淹没面积的滞后时间也越短, 淹没面积峰值时刻提前于地表积水总量峰值时刻, 且雨峰系数越小提前时间越长; 不同雨型设计暴雨条件下, 淹没面积与雨峰系数呈正相关关系, 淹没面积增长率与降雨重现期呈负相关关系; 对称型雨型导致的溢流总量最大, 各降雨重现期下雨型 II 的溢流总量较标准雨型平均高出 3.765%, 最大可高出 7.728%; 随着降雨重现期从 2 a 提高至 100 a, 管网达到超载开始溢流时刻提前 15~40 min, 超载和溢流时间均延长。

关键词: 城市内涝; 暴雨雨型; 雨峰系数; SWMM; LISFLOOD-FP; 广州市

中图分类号: P333.2 文献标志码: A 文章编号: 1004 - 6933 (2025) 04 - 0060 - 11

Combined impact of rainstorm patterns on urban drainage network and surface flooding process//GAO Changsong¹, XIAO Yang^{1,2}, XU Dong¹, LI Binqun¹, ZHOU Ying¹, XU Huirong^{1,3}, TANG Hongwu¹ (1. Key Laboratory of Hydrologic-Cycle and Hydrodynamic-System of Ministry of Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 3. Guangdong Hydropower Planning & Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510635, China)

Abstract: In response to the issue of how changes in rainfall patterns under the context of climate change affect flood disaster processes, a one-way coupled urban pluvial flood model based on SWMM and LISFLOOD-FP for the independent drainage area of Jinzhou Creek in Nansha, Guangzhou was constructed. The flood characteristics under storm conditions with peak rainfall coefficients of 0.431 (standard rainfall pattern), 0.2 (rainfall pattern I), 0.5 (rainfall pattern II), and 0.8 (rainfall pattern III) were examined. The results show that under the standard rainfall pattern design storm, as the rainfall return period increases from 2 a to 100 a, the maximum flow at the overflow node increases by about 55%, the total overflow volume rises by 207%, and the inundation area proportion expands from 24.2% to 40.8%. As the rainfall return period increases, the area of severe inundation increases significantly. As the peak rainfall coefficient increases, the time to reach the peak flow is delayed, and the lag time to the maximum inundation area becomes shorter. The peak time for inundation area occurs earlier than the peak time for total surface water accumulation, with the earlier the peak time for inundation area being, the smaller the peak rainfall coefficient. Under different rainfall pattern design storm conditions, the inundation area is positively correlated with the peak rainfall coefficient, and the growth rate of inundation area is negatively correlated with the rainfall return period. The symmetric rainfall pattern results in the largest total overflow, with the overflow volume under rainfall pattern II being, on average, 3.765% higher than the standard rainfall pattern, and it can be as much as 7.728% higher at maximum. As the rainfall return period increases from 2 a to 100 a, the time at which the pipeline network reaches overload and begins to overflow occurs 15 to 40 min earlier, with both the overload and overflow durations being extended.

Key words: urban waterlogging; rainstorm pattern; rainfall peak coefficient; SWMM; LISFLOOD-FP; Guangzhou City

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U2340221, 52179076); 广州市南沙区水务局科技项目 (2022-263)
作者简介: 高长松 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事城市洪涝数值模拟研究。E-mail: goshhu2024@163.com
通信作者: 许栋 (1980—), 男, 教授, 博士, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: xudong@hhu.edu.cn

近年来,全球气候变化演进加速,极端暴雨事件频发^[1]。政府间气候变化专门委员会第六次评估综合报告指出,21 世纪全球范围内许多地区的强降水和洪水将加剧且更加频繁^[2-3]。全球城市化水平的快速提升造成城市区域下垫面硬化、产汇流特性发生改变,打破了城市原有的水循环过程,进而导致城市洪涝灾害发生的频率逐渐提高且产生极大危害^[4-8]。城市洪涝已经成为危及城市公共安全和影响社会可持续发展的重要问题^[9-10]。

短历时暴雨是导致城市洪涝最直接的驱动因素,除雨强、雨量外,雨型作为描述暴雨过程的重要指标,对洪涝致灾影响显著^[11-12]。雨型是指不同降雨历时内的暴雨强度随时间变化的特征,以不同降雨历时的降雨过程线表达。雨峰系数是表征暴雨强度过程中雨峰位置的参数,为降雨历时开始至降雨峰值出现的时间长度与降雨历时的比值。雨峰系数是控制整个降雨过程中雨峰出现时间的关键参数,不同的雨峰系数可代表不同的雨型,雨峰系数越小,雨峰出现越早,反之则越晚。刘媛媛等^[13]的研究表明,即使降水量相同,不同雨型导致的洪涝淹没面积和淹没水深仍有较大差异。岑国平等^[14]研究发现,芝加哥雨型更适用于我国暴雨雨型设计。近年来,我国已有大量学者将芝加哥雨型应用于城市洪涝数值模拟。侯精明等^[15-16]的研究指出,降雨重现期大于 20a 时,雨峰系数较大的设计暴雨内涝积水总量、积水面积较大。雨峰出现时间越早,积水总量峰值出现时间越早,这种雨型在城市排水设计中需要重点关注^[17]。芝加哥雨型的雨峰越居中、降雨历时越大,城市雨水系统内涝弹性越小^[18]。在相同降雨历时及降雨重现期下,相比于单峰型降雨,双峰型降雨具有更高的内涝风险等级。随着降雨重现期的增加,单峰型和双峰型降雨所导致的内涝风险之间的差异在不断减小^[19]。也有研究指出,不同暴雨情景下的城市内涝响应特征不同,芝加哥雨型在一定情况下存在低估内涝的风险^[20]。同时,在气候变化影响下,短历时的极端暴雨正变得更为强烈^[21],不同暴雨过程的雨型条件日益复杂。因此,尽管前人对不同雨型导致的城市内涝过程及其风险评估已有大量研究,但不同地区不同雨型所对应的城市内涝响应可能已经发生变化,极端降雨条件下不同雨峰系数的芝加哥雨型对城市排水管网溢流和地表积水过程的综合影响以及典型易涝点溢流对管网脆弱性的联合影响值得进一步研究。

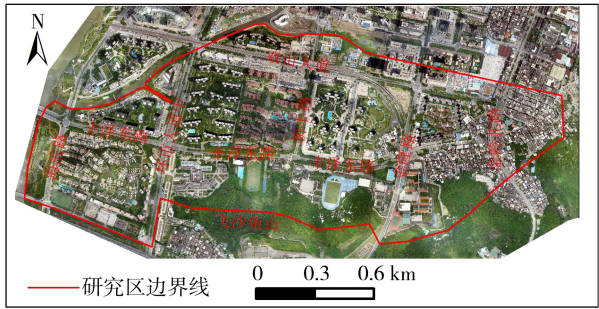
本文采用暴雨洪水模型(storm water management model,SWMM)和 LISFLOOD-FP 模型对不同雨峰系数的芝加哥雨型条件下城市洪涝管网溢

流及地表积水过程进行模拟,对比分析广州市南沙区典型城区不同雨峰系数的芝加哥雨型导致的洪涝过程,得出不同雨型与洪涝灾害的量化关系、典型易涝点溢流规律及其对管网脆弱性的影响,旨在揭示暴雨雨型对城市排水管网溢流和地表积水过程规律的联合影响,以期为市政排水设计和优化提供参考。

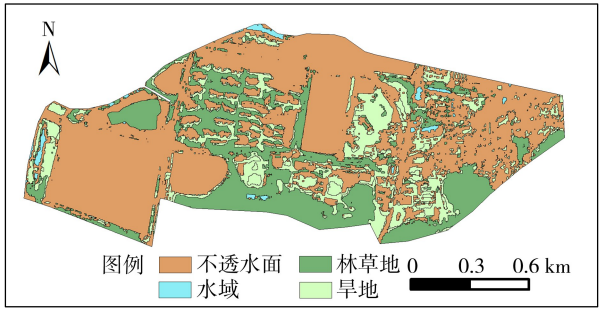
1 研究区概况与设计降雨情景

1.1 研究区概况

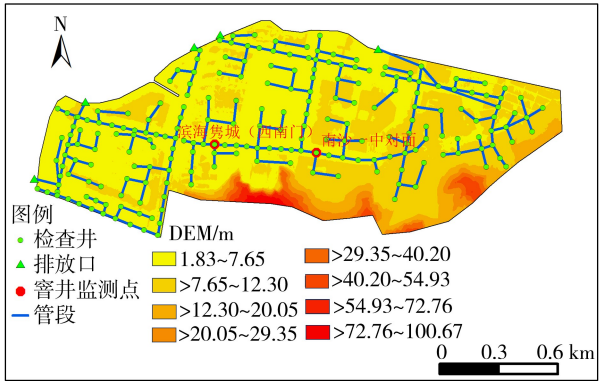
研究区位于广州市南沙区金洲涌流域南沙中心医院周边,是该区域内一个独立的排水片区,同时也是南沙区典型易涝地区,面积约 2.02 km²,遥感影像如图 1(a) 所示。土地利用类型基于高清正射遥感影像利用 ENVI 软件通过最大似然分类法进行划分,以不透水面(74.99%)、林草地(23.73%)、水域(0.36%)、旱地(0.92%)为主,如图 1(b) 所示。排水管网、DEM、高清正射遥感影像由广州市相关部



(a) 遥感影像



(b) 土地利用类型



(c) DEM及排水管网概化

图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

门提供,其中 DEM 分辨率为 $1\text{m}\times 1\text{m}$,由于数据保密要求,本文进行了分区处理;降雨资料来源于南沙区水务局提供的南沙区蕉西水闸雨量计、凤凰湖雨量站、南沙街道办雨量站点数据;滨海隼城(西南门)和南沙一中对面两处窖井液位监测数据来源于南沙区水务局安装的监测设备。研究区管网数据经舍弃污水管段以及概化处理细小支管得到排水管网概化结果,如图 1(c)所示。

1.2 设计暴雨情景

采用《城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定技术导则》推荐的芝加哥雨型作为短历时降雨过程的设计雨型,根据《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)》中计算的广州市南沙区短历时设计暴雨雨型结果,可以得到南沙区降雨重现期分别为 2、5、10、20、50、100 a 且雨峰系数为 0.431 的 120min 标准雨型设计暴雨过程线,如图 2(a)所示。暴雨强度公式采用《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)》中的推荐公式(式(1))。芝加哥雨型雨峰前、雨峰后的降雨强度公式见式(2)(3)。

$$i=\frac{3716.771(1+0.750\lg P)}{(t+18.390)^{0.776}}\tag{1}$$

$$i_b=a\left[\frac{(1-c)t_b}{r}+b\right]\bigg/\left[\left(\frac{t_b}{r}\right)+b\right]^{c+1}\tag{2}$$

$$i_a=a\left[\frac{(1-c)t_a}{1-r}+b\right]\bigg/\left(\frac{t_a}{1-r}+b\right)^{c+1}\tag{3}$$

式中: i 为降雨强度; P 为降雨重现期; t 为降雨历时; i_b 为雨峰前的降雨强度; i_a 为雨峰后的降雨强度; t_b 为雨峰前降雨历时; t_a 为雨峰后降雨历时; r 为雨峰系数; a 、 b 、 c 为设计降雨参数。

为探究不同雨型对城市洪涝的响应特征,前人研究多采用设置不同的雨峰系数来构建不同雨型^[15,19-20]。根据降雨资料统计分析研究区雨峰系数范围,本文除选取 $r=0.431$ (市政排水设计标准雨型的雨峰系数)外,取 r 分别为 0.2、0.5、0.8,以构建 3 种不同雨型,涵盖了研究区降雨资料雨型范围,可

为市政排水设计提供更全面的暴雨资料指导。每种雨型选取 6 种不同降雨重现期,分别为 2、5、10、20、50、100 a。降雨历时取 120 min,得到不同设计暴雨过程线如图 2(b)(c)(d)所示。以标准雨型的峰现时间为基准,雨型 I ($r=0.2$) 的峰现时间提前 53.6%,雨型 II ($r=0.5$) 的峰现时间滞后 16.0%,雨型 III ($r=0.8$) 的峰现时间滞后 85.6%。

2 模型构建

SWMM 常用于模拟地下排水管网中的汇流,但无法模拟地表汇流过程以及城市地表的淹没范围、水深和洪水过程。LISFLOOD-FP 模型可以模拟地表径流过程,但不能模拟地下管网的水流过程。将 SWMM 与 LISFLOOD-FP 模型耦合,可以获得地表径流与地下排水管网之间的水量交换,模拟城市地表水动力过程和地下管网水动力过程^[22-24]。排水管网与地表的水量交换可概括为降雨汇集于地表产流形成径流从管网节点汇入排水管网,当排水管网排水能力不足时,水量通过管网节点溢出,流入地表形成径流;当排水管网恢复排水能力后,地表径流重新汇入排水管网。

由于本文设计暴雨为短历时暴雨,且强度不算太大,研究区地表积水的水头压力对管网排水效果影响较小,因此 SWMM 与 LISFLOOD-FP 模型采用单向耦合,在连接节点交换信息,即前者的计算结果作为后者运行的驱动条件。利用 SWMM 对研究区的降雨径流过程和汇流过程进行模拟,从结果文件中导出管网中溢流点空间位置以及溢流过程信息,配置成 LISFLOOD-FP 的输入文件,通过 LISFLOOD-FP 模型在二维平面上模拟由节点溢流到地表的漫流过程^[25-27]。

2.1 SWMM 率定验证

SWMM 模拟管网汇流过程中,通过圣维南方程计算管道断面流量,遵循动量和质量守恒,演算方式包含恒定流、运动波、动力波 3 种,本文选用动力波方式。为使模型运行具有较高的效率和精度,在

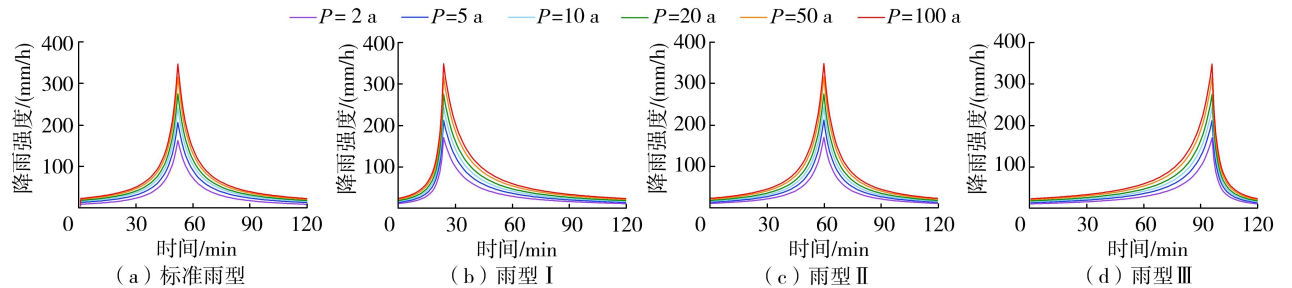


图 2 不同降雨重现期及雨峰系数条件下的设计暴雨过程线

Fig. 2 Design rainstorm hydrograph under different rainfall return periods and rainfall peak coefficients

ArcGIS 中对管网数据进行概化处理, 最终得到 217 个检查井、221 条排水管渠、5 个排放口, 利用泰森多边形法结合土地利用类型调整得到 223 个子汇水区, 概化结果如图 3 所示。

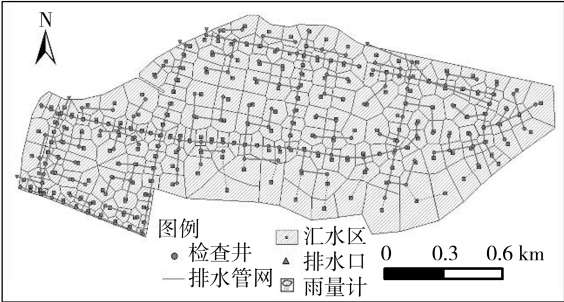


图 3 SWMM 排水管网概化结果

Fig. 3 Drainage network generalization results of SWMM

构建 SWMM 时, 管长、管径、检查井深、管道进出口偏移、排水口高程等参数属于固有物理属性, 不需要率定。对于入渗率、洼蓄量、曼宁系数等需要率定和验证的参数, 由于缺乏出水口的流量实测数据, 仅有部分窨井液位计的监测数据, 故参考了《SWMM 模型用户手册(5.2 版)》中提供的参数参考范围, 结合赖成光等^[20, 22, 24]在周边地区及南沙区的研究成果进行率定, 结果见表 1。

模型精度采用纳什效率系数 (NSE)、平均相对误差 (MRE)、平均绝对误差 (MAE) 和均方根误差 (RMSE) 进行评价。研究区周边有 3 座雨量站: 蕉

表 1 参数率定结果

Table 1 Parameter calibration results

参数类型	符号	名称	取值
不确定性参数	N-Imperv	不透水区曼宁系数	0.014
	N-Perv	透水区曼宁系数	0.4
	D-Imperv	不透水区洼蓄水深	2.1 mm
	D-Perv	透水区洼蓄水深	4.0 mm
	Zero-Imperv	无洼蓄不透水区占比	25%
下渗参数	MaxRate	最大入渗率	83.81 mm/h
	MinRate	最小入渗率	9.44 mm/h
	Decay	渗透衰减系数	6.46
	DryTime	干燥时间/h	7.0

西水闸雨量计、凤凰湖雨量站、南沙街道办雨量站, 考虑数据的精度、完整性和站点与研究区之间的距离, 选取蕉西水闸雨量计的实测数据作为输入降雨数据, 利用滨海隍城西南门 (J53) 和南沙一中对面 (J62) 两处窨井的液位监测数据进行率定验证。选取 P20220821 实测降雨进行模型参数率定, J53 和 J62 两处窨井模拟结果的 NSE 分别达到 0.896 和 0.886, 且 MRE、MAE 和 RMSE 均较小, 如图 4 (a) (b) 所示。选取 P20220608 实测降雨进行模型参数验证, J53 和 J62 两处窨井模拟结果的 NSE 分别达到 0.865 和 0.852, 且 MRE、MAE 和 RMSE 均较小, 如图 4 (c) (d) 所示, 说明模型参数设置合理, 模型具有较高的可靠性。验证数据存在一定的误差, 主要来源于降雨时空分布的不均匀性以及设备监测和

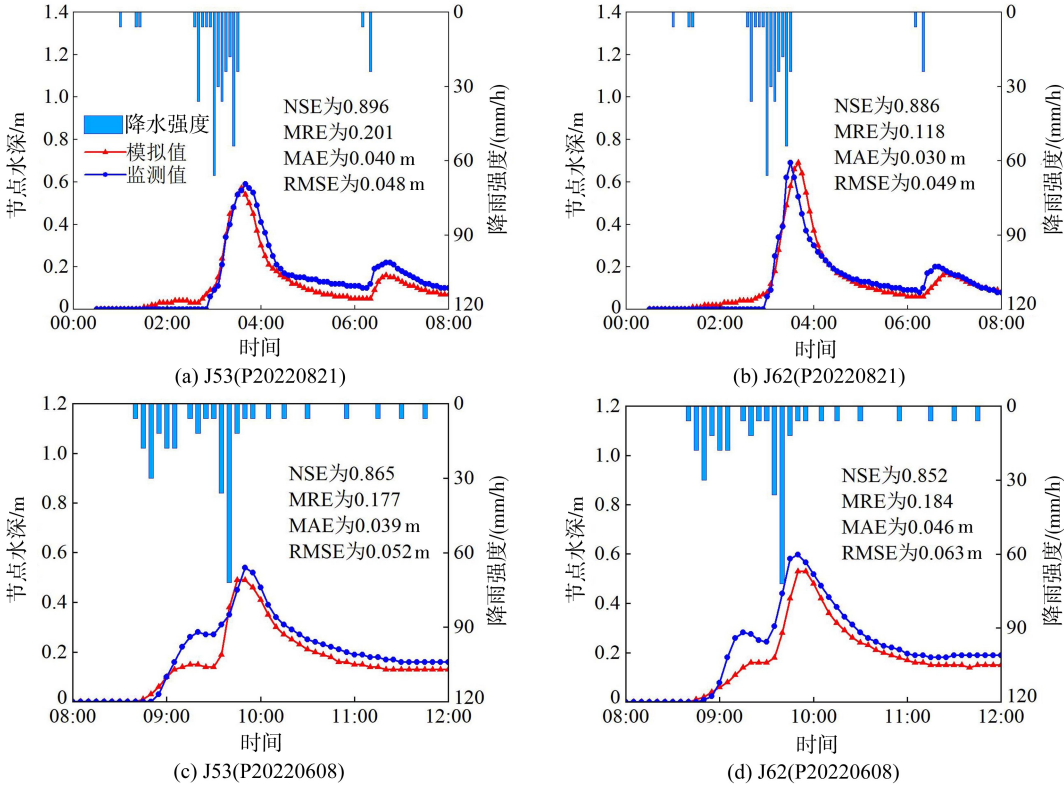


图 4 SWMM 验证结果

Fig. 4 Validation results of SWMM

人工测量过程中产生的误差。

2.2 LISFLOOD-FP 模型精度验证

LISFLOOD-FP 是一种基于栅格的水动力模型,可以输出每个时间步长和各栅格的水深、流速等多个水动力参数的栅格数据集,进而确定整个研究区的水动力时空演变过程^[22]。LISFLOOD-FP 模型对于一维河道和二维泛洪区的水动力模拟使用了不同的求解器。对于一维河道,求解器主要包括运动波求解器和扩散波求解器,其本质是求解简化的一维圣维南方程组;对于二维洪泛区,求解器主要包括汇流求解器(routing)、限流求解器(flow limited)、自适应求解器(adaptive)、加速求解器(acceleration)和 Roe 求解器。LISFLOOD-FP 模型主要通过配置相应输入文件以实现地表二维水动力的模拟。输入文件主要包括 . bdy 文件、. bci 文件、. ascii 文件、. par 文件 4 种,其中,. bdy 文件是节点溢流时间序列文件,. bci 文件是节点坐标文件,. ascii 文件是 DEM 栅格文件,. par 文件是模型参数文件。

选取南沙区凤凰湖雨量站 20230325 场次降雨的 SWMM 模拟结果,配置 LISFLOOD-FP 运行所需文件,得到地表二维水动力模拟结果,将其与实测积水情况进行对比,如图 5 所示。LISFLOOD-FP 模型模拟结果显示总淹没面积为 8 352 m²,由图 5 可见,内涝积水区主要集中在丰泽东路,其中最大积水深度可达 0.399 m,与实测数据(积水深 0.2~0.5 m)较为相符,可见 LISFLOOD-FP 模型模拟结果能够反映实际洪涝情况,模型具有较好的模拟精度。

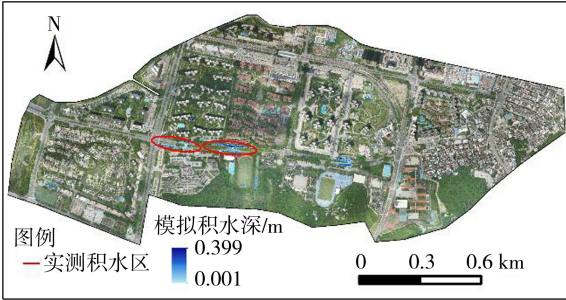


图 5 实测积水区与模拟结果对比

Fig. 5 Comparison of measured waterlogging areas and simulation results

表 2 不同降雨重现期标准雨型下的溢流指标均值

Table 2 Average of overflow indexes of standard rainstorm pattern undere different rainfall return periods							
P/a	降水量/mm	最大降雨强度/(mm/h)	最大流量/(m ³ /s)	溢流总量/(万 m ³)	最大溢流时长/h	溢流点数	溢流点占比/%
2	67.57	163.20	2.87	5.56	1.65	124	57.14
5	87.42	206.52	3.34	8.38	1.82	142	65.44
10	101.86	241.56	3.68	10.60	1.92	151	69.59
20	113.79	275.46	3.94	12.55	1.97	158	72.81
50	128.99	316.02	4.24	15.09	2.03	159	73.27
100	140.62	347.10	4.44	17.08	2.07	166	76.50

3 结果与分析

3.1 标准雨型下洪涝模拟

3.1.1 节点溢流情况

基于 SWMM 和 LISFLOOD-FP 模型,选取 6 种不同降雨重现期下标准雨型设计暴雨对研究区进行暴雨洪涝过程模拟,得到所有溢流节点的溢流指标均值,如表 2 所示。由表 2 可见,随着降雨重现期的增大,溢流节点最大流量、溢流总量、最大溢流时长、溢流点数均呈显著增加趋势。随着降雨重现期从 2 a 提高到 100 a,溢流节点最大流量从 2.87 m³/s 增大至 4.44 m³/s,提高了 55%左右;然而溢流总量却从 5.56 万 m³,增加至 17.08 万 m³,增幅达到 207%;最大溢流时长从 1.65 h 增加至 2.07 h,提高了 25%左右;溢流节点数从 124 增加至 166;溢流节点占比从 57.14%增长至 76.50%。

图 6 为不同降雨重现期标准雨型下的溢流量分布。由图 6 可见,降雨重现期为 2 a 时,较高溢流量的节点大多集中在丰泽东路中心地带;降雨重现期为 100 a 时,丰泽东路上的检查井普遍处于溢流状态,金岭北路与双山大道交叉口也有较大流量的溢流。溢流量大于 3 000 m³ 的节点具有较大的管网承载压力,从降雨重现期 2 a 提高到 100 a,溢流点有增多与集中的趋势,从 3 增加至 11,占节点总数比例从 2.4%增加至 6.6%,使研究区全域管网承载压力逐渐增大。对于较小降雨重现期的设计暴雨,溢流点主要集中于丰泽东路滨海隍城附近,而对于较大降雨重现期的设计暴雨,整个丰泽东路以及周边部分街道都有较高的节点溢流存在。这可能与研究区南部飞沙角山的降雨汇流有关,同时,管道的设计建造标准较低和管道连接不佳也是丰泽东路易形成内涝积水的原因。

3.1.2 地表淹没情况

图 7 为不同降雨重现期标准雨型下的最大淹没水深分布。由图 7 可见,随着降雨重现期的增大,丰泽东路中心路段是淹没范围和积水深度较大的区域。降雨重现期为 2 a 时,积水区域主要集中于丰

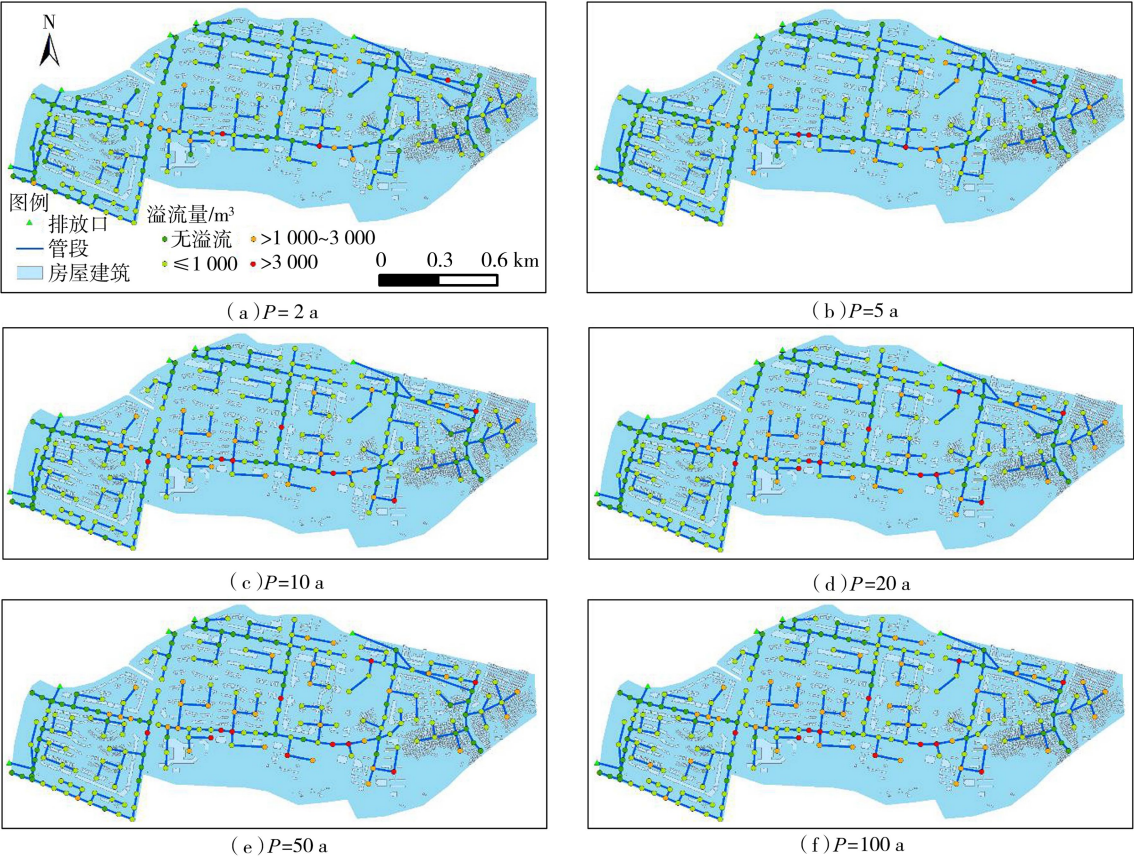


图 6 不同降雨重现期标准雨型下的溢流量分布

Fig. 6 Overflow distribution of standard rainstorm pattern under different rainfall return periods

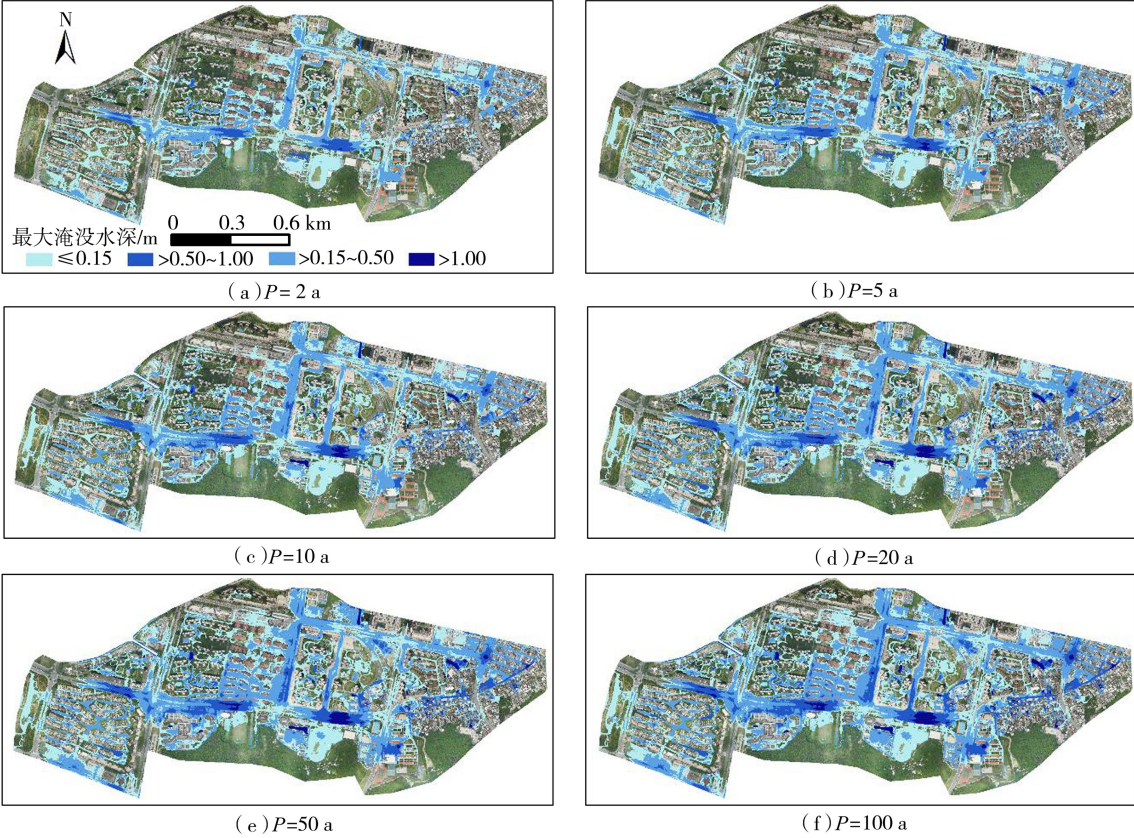


图 7 不同降雨重现期标准雨型下的最大淹没水深分布

Fig. 7 Maximum submergence depth distribution of standard rainstorm pattern under different rainfall return periods

泽东路滨海隄城段、南沙一段;降雨重现期为100 a时,研究区几乎所有街道都有不同程度的淹没,且淹没水深大于0.15 m的范围不断扩大,淹没水深也有显著增加趋势。丰泽东路易积水现象可能是由于此处高程相较于周边区域低,发生暴雨时,水流易汇入其中,即便在低降雨重现期设计暴雨条件下,其淹没范围和淹没水深仍然较大,是内涝高风险区。

表3为不同降雨重现期标准雨型下的地表淹没情况。由表3可见,当降雨重现期从2 a提高到100 a,总淹没面积由48.86万m²增加至82.36万m²,淹没面积占比从24.20%增加至40.80%,增幅接近1倍。不同水深的淹没面积和淹没水深都呈上升趋势,其中淹没水深小于0.15 m的淹没面积由30.10万m²增加至34.33万m²,增加了0.14倍;而水深为>0.15~0.5 m的淹没面积由16.09万m²增加至34.98万m²,增加了1.17倍;水深为>0.5~1 m的淹没面积由2.59万m²增加至10.98万m²,增加了3.24倍;水深大于1 m的淹没面积由0.08万m²增加至2.06万m²,增加了

24.75倍。可见随着降雨重现期的增大,较大水深的淹没面积将会快速增加。

3.2 不同雨型下洪涝模拟

3.2.1 地表积水过程

基于雨型Ⅰ、雨型Ⅱ、雨型Ⅲ,对不同降雨重现期下节点溢流导致的地表积水过程及淹没情况进行模拟,图8分析了确定降雨重现期的情况下,不同雨型对淹没面积的影响。由图8可见,同一降雨重现期下,随着雨峰系数的增大,最大淹没面积逐渐增大,降雨重现期为2 a时,雨型Ⅰ的最大淹没面积为33.14万m²,雨型Ⅲ的最大淹没面积为35.83万m²,增加了8.10%;降雨重现期为100 a时,雨型Ⅰ的最大淹没面积为64.39万m²,雨型Ⅲ的最大淹没面积为66.61万m²,增加了3.45%。可见,随着降雨重现期的增大,最大淹没面积增长率逐渐减小。同时,在降雨重现期相同时,随着雨峰系数的增大,达到最大淹没面积所需时间也越来越长,这与降雨过程是一致的。

图9分析了确定雨型的情况下,不同降雨重现

表3 不同降雨重现期标准雨型下的地表淹没情况

P/a	不同水深淹没面积/万 m ²				总淹没面积/万 m ²	淹没面积占比/%	平均水深/m	最大水深/m
	0~0.15 m	>0.15~0.5 m	>0.5~1 m	>1 m				
2	30.10	16.09	2.59	0.08	48.86	24.20	0.15	1.01
5	32.91	22.34	3.99	0.42	59.65	29.55	0.19	1.06
10	33.71	26.97	5.33	0.91	66.91	33.15	0.21	1.22
20	34.18	29.99	6.94	1.23	72.35	35.84	0.23	1.26
50	34.28	33.22	9.07	1.67	78.24	38.76	0.25	1.29
100	34.33	34.98	10.98	2.06	82.36	40.80	0.26	1.38

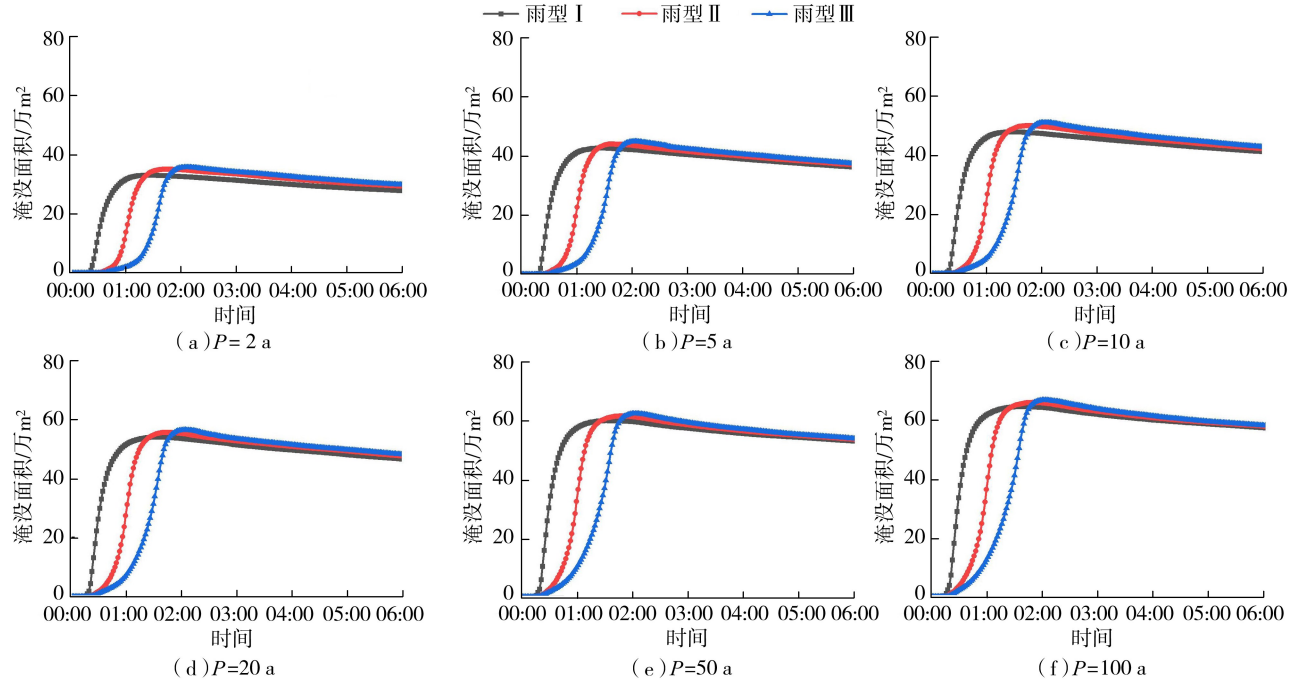


图8 不同降雨重现期下的淹没面积

Fig. 8 Submerged area under different rainfall return periods

期对淹没面积的影响。由图 9 可见,在 120min 降雨历时条件下,雨型 I 的降雨峰现时间为 1 440 s,雨型 II 的降雨峰现时间为 3 600 s,雨型 III 的降雨峰现时间为 5 760 s。分析不同降雨重现期各雨型设计暴雨的地表淹没过程,达到淹没面积峰值时刻最早的是雨型 I 中降雨重现期为 2 a 的情况,为 5 100 s;最晚的是雨型 III 中降雨重现期为 2 a、10 a 的情况,为 7 600 s。各降雨重现期下雨型 I、雨型 II、雨型 III 达到淹没面积峰值的平均时刻分别为 5 500、6 300、7 450 s,较暴雨峰现时间分别滞后 3 660、2 700、1 690 s。可见,雨峰系数越大,峰现时间越晚,达到最大淹没面积的滞后时间越短。

3.2.2 管网溢流总量与地表积水总量

图 10 为不同降雨重现期各雨型下的排水管网溢流总量及其与标准雨型相比的增幅。由图 10 可见,不同降雨重现期下,雨型 I 的溢流总量较标准雨型平均高出 1. 783%,最多高出 4. 595%;雨型 II 的溢流总量较标准雨型平均高出 3. 765%,最多高出 7. 728%;雨型 III 的溢流总量较标准雨型平均高出 3. 229%,最多高出 7. 266%。相较于雨型 I、雨型 II、雨型 III,标准雨型条件下除降雨重现期为 10 a 的情况以外,其余的溢流总量均较低,且降雨重现期相差越多,溢流总量差值越大,可见标准雨型有低估

内涝程度的风险。在 4 种雨型中,雨型 II 的溢流总量最大,可见雨峰越靠近中部,溢流总量越大,排水管网的承载压力越大。在雨型 I、雨型 II、雨型 III 中,雨型 I 的溢流总量在所有降雨重现期下都是最小的,可见雨峰越靠前,溢流总量越小,排水管网的承载压力越小。

不同雨峰系数对管网溢流总量的影响体现了降雨时空分布、降雨强度与排水系统响应之间的复杂关系。雨峰系数较小时,降雨强度迅速增加,短时间的高强度降雨会导致排水系统的超负荷,从而引起溢流,但排水管网能够应对后期较小的降雨,因而溢流总量小。雨峰系数较大时,强降雨到来时排水管网已经有一定积水,排水系统的响应更加滞后,导致管网在后期遭遇极大的排水压力,形成较大的溢流总量。对称型雨型的雨峰居中,降雨强度在整个降雨过程中较为均匀且强度较大,管网较难承受,从而产生最大的溢流总量。

表 4 为不同降雨重现期各雨型下地表积水总量与淹没面积的峰值时刻。由表 4 可见,淹没面积峰值时刻总是提前于地表积水总量峰值时刻,且雨峰系数越小,提前时间越长,这主要是因为水流在地表的扩展速度和积水深度的积累速度不同。雨峰系数对这一关系有显著影响,雨峰系数更小时,淹没面积

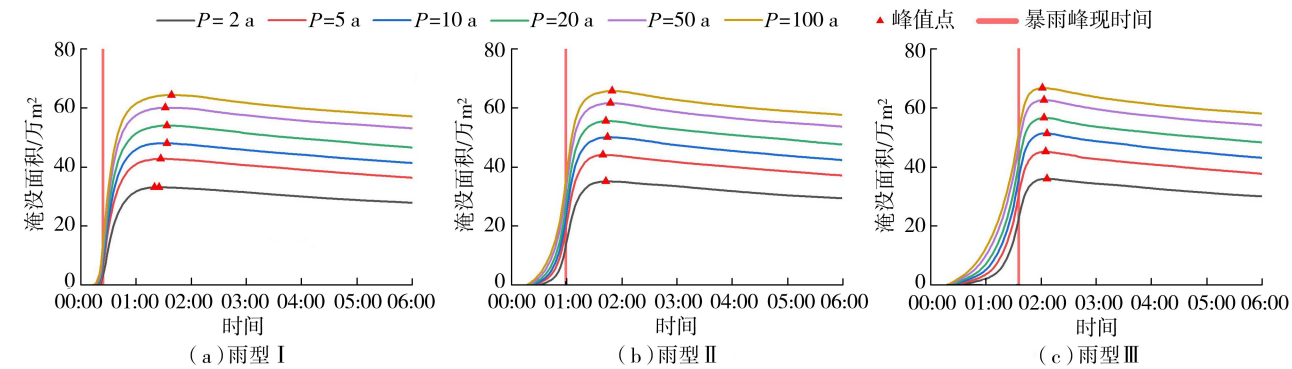


图 9 不同雨型下的淹没面积
Fig. 9 Submerged area under different rainstorm patterns

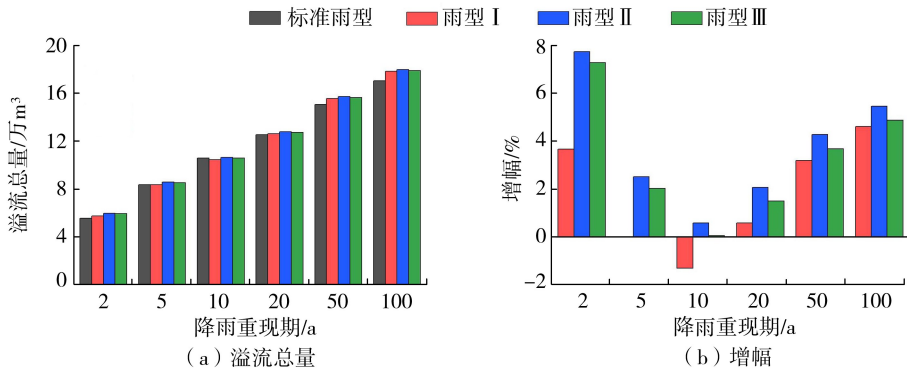


图 10 不同降雨重现期不同雨型下的排水管网溢流总量及其与标准雨型相比的增幅

Fig. 10 Total amount of drainage network overflow under different rainfall return periods and rainstorm patterns, and its increase compared to standard rainstorm pattern

表 4 不同降雨重现期各雨型下地表积水总量与淹没面积的峰值时刻

Table 4 Peak moments of total surface water accumulation and submerged area for various rainstorm patterns under different rainfall return periods

P/a	积水总量峰值时刻				淹没面积峰值时刻			
	标准雨型	雨型 I	雨型 II	雨型 III	标准雨型	雨型 I	雨型 II	雨型 III
2	2:06:40	2:06:40	2:08:20	2:15:00	1:36:40	1:25:00	1:43:20	2:06:40
5	2:10:00	2:08:20	2:10:00	2:16:40	1:41:40	1:26:40	1:40:00	2:05:00
10	2:10:00	2:10:00	2:11:40	2:18:20	1:45:00	1:33:20	1:45:00	2:06:40
20	2:11:40	2:10:00	2:13:20	2:20:00	1:40:00	1:33:20	1:43:20	2:03:20
50	2:11:40	2:11:40	2:13:20	2:20:00	1:43:20	1:31:40	1:48:20	2:03:20
100	2:13:20	2:11:40	2:15:00	2:21:40	1:46:40	1:38:20	1:50:00	2:01:40

会更早达到峰值,而积水量的累积则需要更多时间,从而导致时间差增大。分析不同降雨重现期条件下地表淹没面积峰值时刻比积水总量峰值时刻提前的时间,标准雨型平均提前 1700 s;雨型 I 平均提前 2300 s,较标准雨型提前 35.3%;雨型 II 平均提前 1617 s,较标准雨型滞后 4.9%;雨型 III 平均提前 850 s,较标准雨型滞后 50%。

3.2.3 易涝点溢流过程

城市化水平的提高使城市地表水文水力条件发生了显著改变,城市易涝点已经严重威胁到人们的生命财产安全,因此对研究区的易涝地段进一步研究。选取研究区易涝地段典型节点 J53 的溢流过程进行分析,结果如图 11 所示。在 4 种雨型的设计暴雨中,标准雨型条件下节点溢流量峰值总是最大,而雨型 I、雨型 II、雨型 III 的节点溢流量峰值相对一致,可见标准雨型在检查井溢流方面对排水管网具有更高要求。由图 11 可见,随着降雨重现期的增

大,除雨型 I 本身的峰现时间较早,标准雨型、雨型 II、雨型 III 的节点的溢流开始时间都逐渐提前。对于标准雨型,从降雨重现期为 2a 的 0:35 到降雨重现期为 100 a 的 0:20,提前了 15 min;对于雨型 II,从降雨重现期为 2 a 的 0:40 到降雨重现期为 100 a 的 0:20,提前了 20 min;对于雨型 III,从降雨重现期为 2 a 的 1:00 到降雨重现期为 100 a 的 0:20,提前了 40 min。并且,各雨型溢流结束时间也相应有所延迟,直至延迟至降雨结束。可见,随着降雨重现期的增大,排水管网开始超载时刻将逐渐提前,超载和溢流时间都将延长。

4 结 论

a. 对 SWMM 与 LISFLOOD-FP 模型进行单向耦合,构建了广州市南沙区金洲涌流域独立排水区的内涝模拟模型,基于实测数据对模型进行了率定验证,模型模拟精度较高。构建了雨峰系数分别为

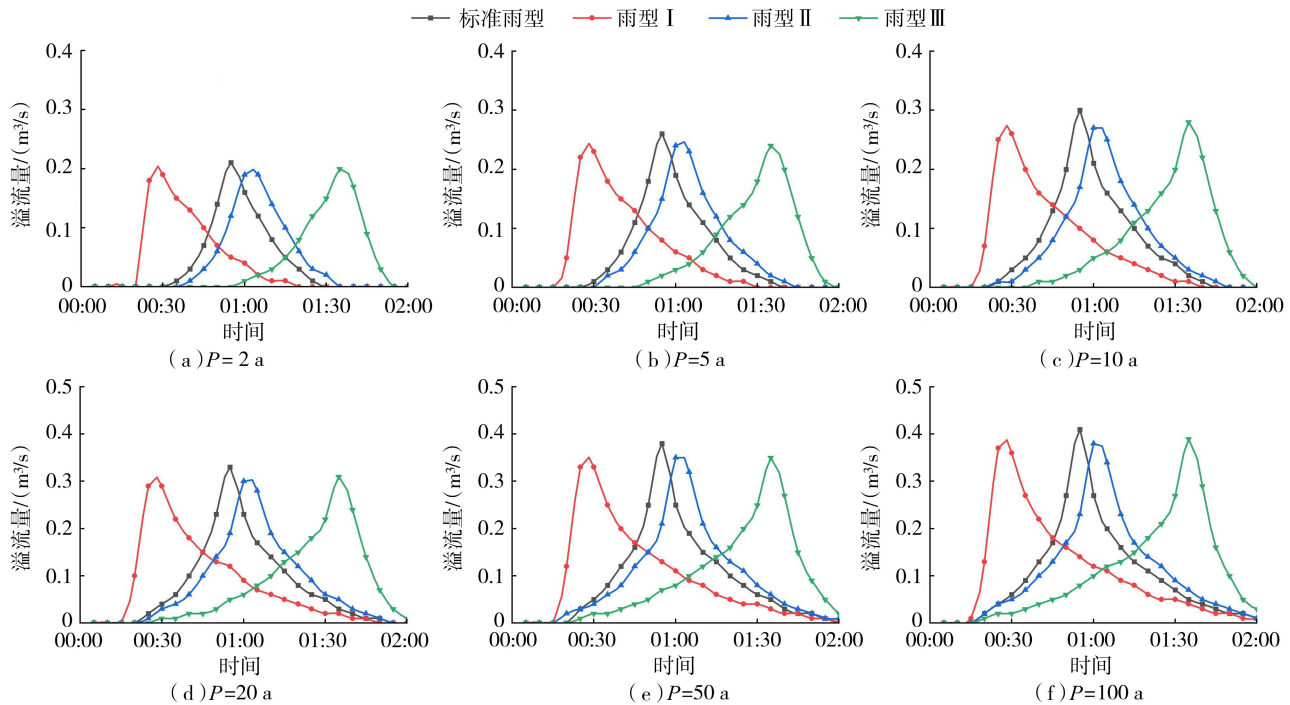


图 11 J53 的溢流过程
Fig. 11 Overflow process at J53

0.431、0.2、0.5 和 0.8 的标准雨型、雨型 I、雨型 II 和雨型 III,以标准雨型为基准,雨型 I 峰现时间提前 53%,雨型 II 峰现时间滞后 16%,雨型 III 峰现时间滞后 85.6%。

b. 标准雨型设计暴雨条件下,降雨重现期从 2a 增长到 100 a,溢流节点最大流量提高了 55%左右,溢流总量增幅达到了 207%;溢流量大于 3000 m³ 的节点占比从 2.4%增加至 6.6%,且有明显的集中趋势,使研究区全域管网承载压力逐渐增大;总淹没面积占研究区面积比例从 24.20%增加至 40.80%;淹没水深小于 0.15 m 的淹没面积增加了 0.14 倍,而水深大于 1 m 范围的淹没面积增加了 24.75 倍。可见,随着降雨重现期的增大,大水深的淹没面积将会增加得更快。

c. 不同雨型设计暴雨条件下,降雨重现期为 2a 时,雨型 III 较雨型 I 条件下的最大淹没面积增加了 8.10%;降雨重现期为 100 a 时,雨型 III 较雨型 I 条件下的最大淹没面积增加了 3.45%。可见,虽然雨峰系数的增大会使最大淹没面积增大,但是随着降雨重现期的增大,最大淹没面积增长率逐渐减小。达到淹没面积峰值时刻最早的为降雨重现期为 2 a 的雨型 I;最晚的为降雨重现期为 2 a 和 10 a 的雨型 III;随着雨峰系数的增大,峰现时间越晚,达到最大淹没面积的滞后时间也越短。

d. 不同雨型设计暴雨中,雨型 II 在不同降雨重现期下的溢流总量总是最大,较标准雨型平均高出 3.765%,最大可高出 7.728%;雨峰越靠近中部,溢流总量越大,雨峰越靠前,溢流总量越小。对不同降雨重现期条件下淹没面积峰值时刻总是提前于地表积水总量峰值时刻,且雨峰系数越小提前时间越长;但不同雨型之间存在差异与标准雨型相比,雨型 I 提前 35.3%、雨型 II 滞后 4.9%、雨型 III 滞后 50%。在 4 种雨型的设计暴雨中,标准雨型条件下节点溢流量峰值总是最大,随着降雨重现期的增大,管网达到超载开始溢流时刻将提前 15~40 min,超载和溢流时间都将会延长,对管网排水功能造成更大压力。

参考文献:

[1] ZHANG Wei, VILLARINI G, VECCHI G A, et al. Urbanization exacerbated the rainfall and flooding caused by hurricane Harvey in Houston[J]. Nature, 2018, 563 (7731):384-388.

[2] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. IPCC.

[3] KREIBICH H, VAN LOON A F, SCHRÖTER K, et al. The challenge of unprecedented floods and droughts in risk

management[J]. Nature, 2022, 608(7921): 80-86.

[4] 宋晓猛,徐楠涛,张建云,等. 中国城市洪涝问题:现状、成因与挑战[J]. 水科学进展, 2024, 35(3): 357-373. (SONG Xiaomeng, XU Nantao, ZHANG Jianyun, et al. Urban flooding in China: current status, causes and challenges[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(3): 357-373. (in Chinese))

[5] 刘家宏,梅超,刘宏伟,等. 特大城市外洪内涝灾害链联防联控关键科学技术问题[J]. 水科学进展, 2023, 34 (2): 172-181. (LIU Jiahong, MEI Chao, LIU Hongwei, et al. Key scientific and technological issues of joint prevention and control of river flood and urban waterlogging disaster chain in megacities[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(2): 172-181. (in Chinese))

[6] 徐宗学,李鹏. 城市化水文效应研究进展:机理、方法与应对措施[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 7-17. (XU Zongxue, LI Peng. Progress on hydrological response to urbanization: mechanisms, methods and solutions [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (1): 7-17. (in Chinese))

[7] 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))

[8] 任宏昌,张恒德. 郑州“7·20”暴雨的精细化特征及主要成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 1-9. (REN Hongchang, ZHANG Hengde. Refined features and main causes of “ 7 · 20 ” rainstorm in Zhengzhou [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(5): 1-9. (in Chinese))

[9] ZHANG Qingxia, HU Junyan, SONG Xuping, et al. How does social learning facilitate urban disaster resilience?: a systematic review [J]. Environmental Hazards, 2020, 19 (1): 107-129.

[10] 宋晓猛,张建云,占车生,等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 779-790. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, ZHAN Chesheng, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7): 779-790. (in Chinese))

[11] 梁鑫,侯精明,陈光照,等. 考虑降雨空间分布的城市内涝对模式雨型响应特征分析[J]. 水利水运工程学报, 2024(2): 44-54. (LIANG Xin, HOU Jingming, CHEN Guangzhao, et al. Investigation of the response characteristics of urban waterlogging to model rainfall patterns taking into account the spatial distribution of rainfall [J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(2): 44-54. (in Chinese))

[12] 陈靖,李明财,曹经福,等. 基于设计暴雨雨型的天津城

- 市内涝模拟研究[J]. 气象与环境学报,2022,38(6): 89-97. (CHEN Jing,LI Mingcai,CAO Jingfu,et al. Urban waterlogging simulation in Tianjin based on designed rainstorm patterns [J]. Journal of Meteorology and Environment,2022,38(6):89-97. (in Chinese))
- [13] 刘媛媛,刘洪伟,霍风霖,等. 基于机器学习短历时暴雨时空分布规律研究[J]. 水利学报,2019,50(6): 773-779. (LIU Yuanyuan,LIU Hongwei,HUO Fenglin,et al. An application of machine learning on examining spatial and temporal distribution of short duration rainstorm[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(6): 773-779. (in Chinese))
- [14] 岑国平,沈晋,范荣生. 城市设计暴雨雨型研究[J]. 水科学进展,1998,9(1): 41-46. (CEN Guoping, SHEN Jin,FAN Rongsheng. Research on rainfall pattern of urban design storm [J]. Advances in Water Science,1998,9(1):41-46. (in Chinese))
- [15] 侯精明,郭凯华,王志力,等. 设计暴雨雨型对城市内涝影响数值模拟[J]. 水科学进展,2017,28(6):820-828. (HOU Jingming, GUO Kaihua, WANG Zhili, et al. Numerical simulation of design storm pattern effects on urban flood inundation [J]. Advances in Water Science,2017,28(6):820-828. (in Chinese))
- [16] CHEN Wenjie,HUANG Guoru,ZHANG Han,et al. Urban inundation response to rainstorm patterns with a coupled hydrodynamic model: a case study in Haidian Island, China[J]. Journal of Hydrology,2018,564:1022-1035.
- [17] 曹经福,杨艳娟,郭军,等. 天津市短时暴雨雨型时空分异及其对城市内涝的影响[J]. 气象与环境学报,2021,37(4): 114-121. (CAO Jingfu, YANG Yanjuan, GUO Jun,et al. Spatiotemporal differentiation of short-duration rainstorm pattern and its influence on urban waterlogging in Tianjin[J]. Journal of Meteorology and Environment,2021,37(4):114-121. (in Chinese))
- [18] 宋川,王琳,王浩程,等. 降雨雨型对城市雨水系统内涝弹性的影响[J]. 中国农村水利水电,2024(1): 197-206. (SONG Chuan,WANG Lin,WANG Haocheng,et al. The influence of rainfall patterns on the waterlogging resilience of urban rainwater system [J]. China Rural Water and Hydropower,2024(1): 197-206. (in Chinese))
- [19] 胡彩虹,姚依晨,刘成帅,等. 降雨雨型对城市内涝的影响[J]. 水资源保护,2022,38(6):15-21. (HU Caihong, YAO Yichen, LIU Chengshuai, et al. Effects of rainfall patterns on urban waterlogging [J]. Water Resources Protection,2022,38(6):15-21. (in Chinese))
- [20] 赖成光,廖耀星,王兆礼. 不同暴雨情景下的城市内涝响应特征分析[J]. 水资源保护,2023,39(3):101-108. (LAI Chengguang,LIAO Yaoxing,WANG Zhaoli. Analysis of urban waterlogging response characteristics under different rainstorm rainfall scenarios [J]. Water Resources Protection,2023,39(3):101-108. (in Chinese))
- [21] AYAT H, EVANS J P, SHERWOOD S C, et al. Intensification of subhourly heavy rainfall [J]. Science,2022,378(6620):655-659.
- [22] 曾照洋,王兆礼,吴旭树,等. 基于 SWMM 和 LISFLOOD 模型的暴雨内涝模拟研究[J]. 水力发电学报,2017,36(5): 68-77. (ZENG Zhaoyang, WANG Zhaoli, WU Xushu,et al. Rainstorm waterlogging simulations based on SWMM and LISFLOOD models [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2017,36(5): 68-77. (in Chinese))
- [23] 李智,张倩,兰双双. 基于 SWMM 和 LISFLOOD-FP 的城市内涝耦合模型研究[J]. 水电能源科学,2024,42(2): 202-206. (LI Zhi, ZHANG Qian, LAN Shuangshuang. Research on urban waterlogging coupling model based on SWMM and LISFLOOD-FP [J]. Water Resources and Power,2024,42(2): 202-206. (in Chinese))
- [24] 王兆礼,陈昱宏,赖成光. 基于 TELEMAC-2D 和 SWMM 模型的城市内涝数值模拟[J]. 水资源保护,2022,38(1): 117-124. (WANG Zhaoli, CHEN Yuhong, LAI Chengguang. Numerical simulation of urban waterlogging based on TELEMAC-2D and SWMM model [J]. Water Resources Protection,2022,38(1): 117-124. (in Chinese))
- [25] 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))
- [26] 李鹏,徐宗学,赵刚,等. 基于 SWMM 与 LISFLOOD-FP 模型的城市暴雨内涝模拟:以济南市为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2021,19(6):1083-1092. (LI Peng, XU Zongxue, ZHAO Gang, et al. Simulation of urban rainstorm waterlogging processes based on SWMM and LISFLOOD-FP models: case study in Jinan city [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2021,19(6):1083-1092. (in Chinese))
- [27] 郑茂辉,姚帅,周念清,等. 一维管网与二维地表双向耦合的城市暴雨内涝模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版),2024,52(2):223-231. (ZHENG Maohui, YAO Shuai, ZHOU Nianqing, et al. Simulation of urban rainstorm waterlogging with bidirectional coupling of one-dimensional sewer network and two-dimensional surface [J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2024,52(2):223-231. (in Chinese))

(收稿日期:2024-11-17 编辑:王芳)