

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.03.010

基于 ANUGA 和 SWMM 耦合模型的车陂涌 流域内涝模拟分析

雷向东¹, 王兆礼^{1,2,3}, 曾照洋^{1,3}, 赖成光^{1,2,3}

(1. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 琶洲实验室, 广东 广州 510335;
3. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510640)

摘要:为探究设计暴雨雨峰位置对城市内涝的响应规律,以广州车陂涌流域某片区为研究区,基于 ANUGA 和 SWMM 构建耦合模型 AGSWM,采用实测降雨的流量和内涝数据对 AGSWM 进行验证,并对不同雨峰位置的设计暴雨情景进行了内涝模拟与分析。结果表明:耦合模型 AGSWM 具有良好的模拟精度,能够较好地反映车陂涌内涝时空演进过程;在低重现期后峰情景和高重现期中峰情景下,内涝积水总量、总淹没面积、重度内涝等级的淹没面积和重度内涝等级的易涝点最大水深较大;在低重现期前峰情景、高重现期后峰情景下,积水峰现延迟时间较长。

关键词:城市内涝;ANUGA;SWMM;设计暴雨;车陂涌流域

中图分类号:P333.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)03-0082-09

Simulation analysis on Chenbei watershed waterlogging based on ANUGA and SWMM coupling model // LEI Xiangdong¹, WANG Zhaoli^{1,2,3}, ZENG Zhaoyang^{1,3}, LAI Chengguang^{1,2,3} (1. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Pazhou Lab, Guangzhou 510335, China; 3. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to explore the law of urban waterlogging response to the designed position of rain peak during storm, taking a certain area in the Chebei watershed in Guangzhou as an example, a coupled model AGSWM was constructed based on ANUGA and SWMM model, and verified with measured rainfall and waterlogging data. The waterlogging simulation analysis was carried out for the designed storm scenarios with different rain peak positions. The results showed that the AGSWM has good simulation accuracy and is able to reflect the temporal and spatial evolution of Chenbei watershed waterlogging properly. Under the post-peak scenario during low return period and the mid-peak scenario during high return period, total amount of accumulated water, total inundated area, submerged area with severe waterlogging and maximum water depth of severe waterlogging-prone points are relatively large. Under the pre-peak scenario during the low return period and the post-peak scenario during the high return period, the delay of peak of water accumulation are relatively large.

Key words: urban waterlogging; ANUGA; SWMM; designed storm; Chebei watershed

在全球气候变化和快速城市化的双重影响下,高度城市化地区的暴雨内涝灾害呈现加剧趋势,城市水文良性循环受到严重威胁^[1-5]。长历时强降雨下,城市排水管网系统因不能容纳多余的地表径流而大量溢出地表形成内涝,会对建筑、道路^[6]、地下空间^[7]等造成严重破坏,危及人民群众的生命财产安全^[8]。2021 年“7·20”特大暴雨期间,郑州市遭

遇 24 h 降水量 624.1 mm 的强降雨^[9],造成全省 302 人遇难、直接经济损失超千亿元的严重后果^[10]。2020 年“5·22”期间,广州市遭遇最大 1 h 雨量 167.8 mm 的超百年一遇强降雨,导致城市内涝淹没严重地区停水停电和地铁停运^[11]。因此,城市内涝灾害的削减乃至消除,仍是气候变化和快速城市化背景下人们面临的一项艰巨任务。

基金项目:国家自然科学基金(51879107,U1911204,52209019);广东省科技计划(2020A0505100009)

作者简介:雷向东(1994—),男,博士研究生,主要从事海绵城市水文水环境研究。E-mail: ctleixiangdong@mail.scut.edu.cn

通信作者:曾照洋(1994—),男,助理研究员,博士,主要从事城市洪涝模拟研究。E-mail: zyzeng86@scut.edu.cn

由于城市暴雨内涝问题日趋严重,许多研究者在城市内涝危险性的量化、暴雨内涝灾害的缓解等方面做了大量研究,而数值模拟是常用的评估方法^[12]。目前已有很多数值模拟模型可用于城市内涝研究,包括 MIKE FLOOD、Infoworks ICM、PCSWMM 等商业模型^[13-16],LISFLOOD-FP、WCA2D、TELEMAC-2D 等开源模型^[17-20],商业模型界面友好、操作简单,但对其二次开发有诸多限制,而开源模型由于源代码公开,便于二次开发,因此开源模型成为模拟研究的主流工具。暴雨雨水管理模型(storm water management model,SWMM)因具有出色的水文、水力等计算能力被广泛应用于城市水文、内涝研究,但 SWMM 缺乏二维水动力计算能力,有研究者将二维水动力模型如 LISFLOOD-FP、WCA2D、TELEMAC-2D 等^[18-19,21]与 SWMM 进行耦合,通过一二维模型耦合发挥各自优势,助力城市内涝模拟研究。

ANUGA 二维水动力模型开源且具有稳定的二维水动力计算能力,已应用于海啸和溃坝等模拟研究中^[22-23],但将该模型与一维管网模型耦合并实现城市内涝演进过程模拟的相关研究还比较缺乏,故仍需进一步探讨。本文以广州车陂涌流域某排水片区为研究区,将 ANUGA 与 SWMM 进行耦合构建城市内涝模型 AGSWM(storm water model based on ANUGA)来探究不同重现期与不同雨峰的设计暴雨情景下城市内涝淹没规律,以期为城市内涝模拟与防控提供参考。

1 研究数据和方法

1.1 研究区概况

车陂涌流域位于广州市中部,流域面积约 78 km²,是天河区内最大的流域,其北部连接山脉,南部比邻珠江水系,南北长约 15 km,东西长约 9 km,整体地势北高南低。车陂涌主涌自北部的龙洞水库向南汇入珠江水系,其最大支涌西边坑涌自北向南汇入车陂涌主涌。该流域属亚热带海洋季风气候,降雨充沛,每年 4—9 月常发生短历时强降雨,易引发城市暴雨内涝灾害。根据广州市水务部门统计资料及实地调研结果,车陂涌西边支流上游易发生内涝,本文以该易涝片区(0.97 km²)为典型研究区(图 1)。

1.2 研究数据

由于高分辨率 DEM(5 m × 5 m)未覆盖整个车陂涌流域,在对车陂涌流域构建 SWMM 时,其相关参数计算采用分辨率较低的 DEM(8 m × 8 m);而在地表淹没精细化模拟时采用高分辨率 DEM。研究数据还包括车陂涌流域排水管网数据(2009 年)、水文气象监测数据(降雨、水位、流量)、土地利用数据

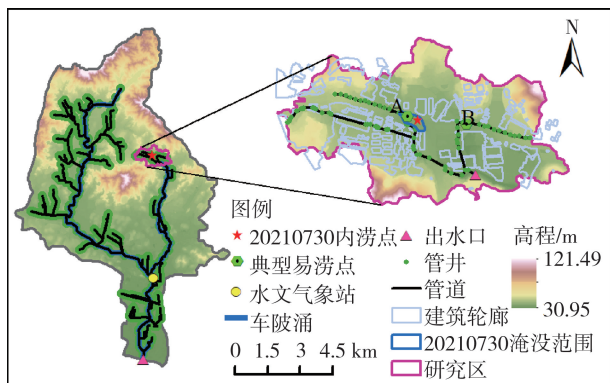


图 1 车陂涌流域及研究区高程和雨水管网
Fig. 1 Map of Chebei watershed with the study area elevation and storm sewer system

(2014 年)、内涝调研数据(2021 年 7 月 30 日的暴雨淹没范围及水深)。

2 模型构建

2.1 SWMM 概况

SWMM 是 1970 年美国环保署开发的水文水动力模型,包括水文模块、水力模块、水质模块、LID 模块,主要用于场次或长历时降雨下城市水文水质模拟。水文模块主要对各子汇水区进行地表产流及汇流计算,水力模块用于计算排水系统水流传输过程,水质模块用于计算径流污染物负荷,LID 模块用于 LID 设施布置及水文水质计算。SWMM 因开源且功能完善,被广泛应用于城市水文水质模拟、排水管网优化设计、海绵城市水文水质效应评估等研究^[17,24-26]。

2.2 ANUGA 概况

ANUGA 是 2005 年由澳大利亚国立大学(Australian National University, ANU)和澳大利亚地球科学部(Geoscience Australia, GA)共同开发的二维水动力模型^[27-28],其核心是基于有限体积法求解浅水方程,通过将研究区地表概化成多个三角网格,获取每个网格水深与水平动量变化过程。

ANUGA 可通过内置网格生成器生成不同规格的三角网格以满足各种计算需求。ANUGA 的构建需考虑研究区几何边界、初始条件(如高程、建筑轮廓、初始水深、糙率场等)、边界条件(如潮汐、降雨、涵洞、入流等)等信息。为了满足不同的计算需求,ANUGA 提供了对浅水方程有限体积法的不同求解方法,包括“1_5”“2_0”“2_5”“DE0”“DE1”“DE2”6 类,计算精度依次提高,但计算时间越来越长,默认采用算法稳健且计算时间适中的“DE0”,其有限体积法求解方法见文献[28]。虽然 ANUGA 用于海啸、风暴潮、洪水等的模拟研究较多,但其在城市内涝二维地表淹没模拟的研究还比较少,因此本文将

ANUGA 应用于不同重现期不同雨峰设计暴雨情景下的城市内涝模拟,探索城市地表内涝演进规律。

2.3 模型耦合方法

SWMM 具备水文水力模块,可进行一维水文水动力模拟计算,但缺乏二维水动力模块而无法进行城市内涝二维地表淹没过程计算,ANUGA 可进行城市内涝二维地表淹没过程计算而无法进行城市水文和一维管网水动力计算,因此将两者进行耦合构建 AGSWM,以满足城市水文、一维管网水动力、二维地表水动力的综合计算。考虑到同步双向耦合的复杂性,AGSWM 仅考虑单向耦合,即将 SWMM 计算的城市排水管网溢流的水量过程输入到 ANUGA 中,进行城市内涝二维地表淹没模拟计算。

AGSWM 构建及计算步骤如下:

步骤 1 利用排水管网、高程、土地利用、降雨等基础数据构建 SWMM,运行模型得到“.OUT”结果文件。

步骤 2 使用 Python 读取管点文件和“.OUT”结果文件,提取溢流点名称、坐标、溢流量时间序列等信息,并将溢流时间序列转化为“.TMS”的 NetCDF 格式文件。

步骤 3 根据研究区 DEM、边界标签、几何边界、糙率、模拟精度、建筑轮廓等信息设定 ANUGA 计算域。

步骤 4 将溢流点名称、位置信息、溢流量时间序列“.TMS”文件和边界条件设定在 ANUGA 计算域,其中考虑实际情况可将溢流点设定为 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 大小的入流孔。

步骤 5 设定“.DE0”计算方式等信息后,驱动 ANUGA 进行 CPU 并行运算,得到“.SWW”结果文件。

步骤 6 借助 Python 对结果文件进行后处理得到自带地理坐标的最大水深、最大流速、最大水平动量等“.TIF”结果文件,并且可根据需求处理得到每个结果变量的平均值、最小值和每个时刻的“.TIF”结果文件。

AGSWM 构建及计算流程如图 2 所示。

2.4 耦合模型参数设置

根据车陂涌流域 SWMM 模拟的相关成果^[29]设定 AGSWM 的一维模块参数,其中管网水力参数采用动力波求解,地表产流计算采取 Horton 模型。在生成网格地形过程中,为兼顾计算效率与模拟精度,在地形条件复杂、易涝点周边的建筑密集区域进行局部网格加密,加密及非加密区域的网格最大面积分别设定为 25 m^2 和 50 m^2 ,将建筑轮廓设定为隔断线并且高度设定为 15 m 。由于模型的网格划分工

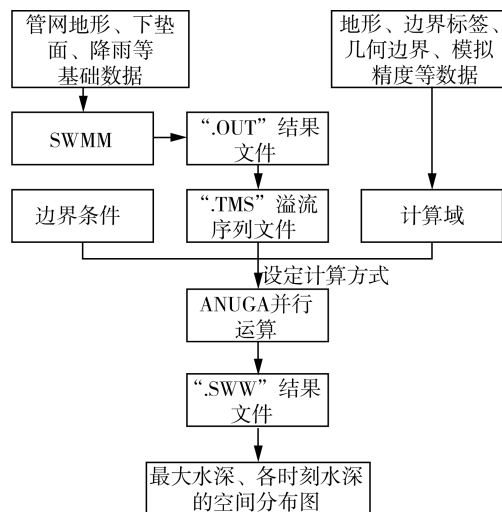


图 2 AGSWM 构建及计算流程

Fig. 2 Flow chart of AGSWM construction and calculation

具会根据实际地形对三角单元在给定条件的基础上加密或加大,因此最终研究区被划分成 $71\ 102$ 个网格,最大面积为 $1\ 441.55\text{ m}^2$,最小面积为 0.02 m^2 。库朗数(CFL)设定为 0.9 ,模拟时长为 6 h ,模拟结果输出步长为 300 s ,初始地表水深设定为 0 m ,研究区边界为开边界。

2.5 情景设置

芝加哥雨型是工程设计中常用的设计暴雨雨型^[30],本文采用广州市暴雨强度公式与芝加哥雨型作为设计暴雨序列的推求依据:

$$q = \frac{3618.427(1 + 0.438\lg P)}{(t + 11.259)^{0.750}} \quad (1)$$

式中: q 为暴雨强度计算值, $\text{L}/(\text{hm}^2 \cdot \text{s})$; t 为降雨历时, min ; P 为暴雨重现期, a 。

为设置不同雨峰位置的设计暴雨情景,采用暴雨强度公式计算多种重现期(2 a 、 10 a 、 20 a 、 50 a 、 100 a)情景下雨峰系数 r 分别为 0.2 (前峰)、 0.5 (中峰)、 0.8 (后峰)的 15 种设计暴雨,降雨历时为 120 min 。各情景下的降雨过程如图 3 所示。

3 模拟结果与分析

3.1 模型验证

3.1.1 SWMM 模拟精度评估

经过筛选,采用 20210602、20210613、20210621、20210628、20210730 共 5 场实测降雨的流量数据对 SWMM 模拟结果进行率定与验证。将 20210602 和 20210621 用于模型率定,20210613、20210628 和 20210730 用于模型验证,以纳什系数(NSE)^[31-33]、平均绝对误差(MAE)^[34]作为精度评估指标。由图 4 可见,模拟和实测出水口流量过程的 NSE 值均不小于 0.60 ,MAE 值均小于 $5\text{ m}^3/\text{s}$,可见模拟与实测

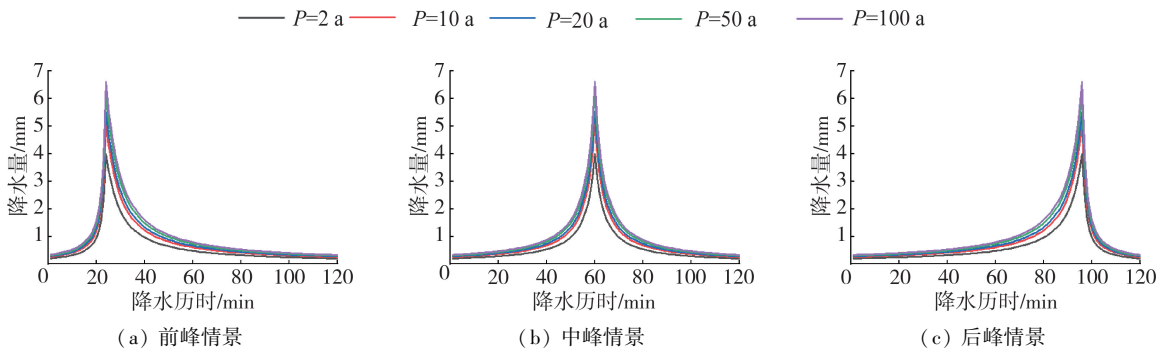


图 3 不同重现期设计暴雨降雨过程

Fig. 3 Design process of storm rainfall with different return periods

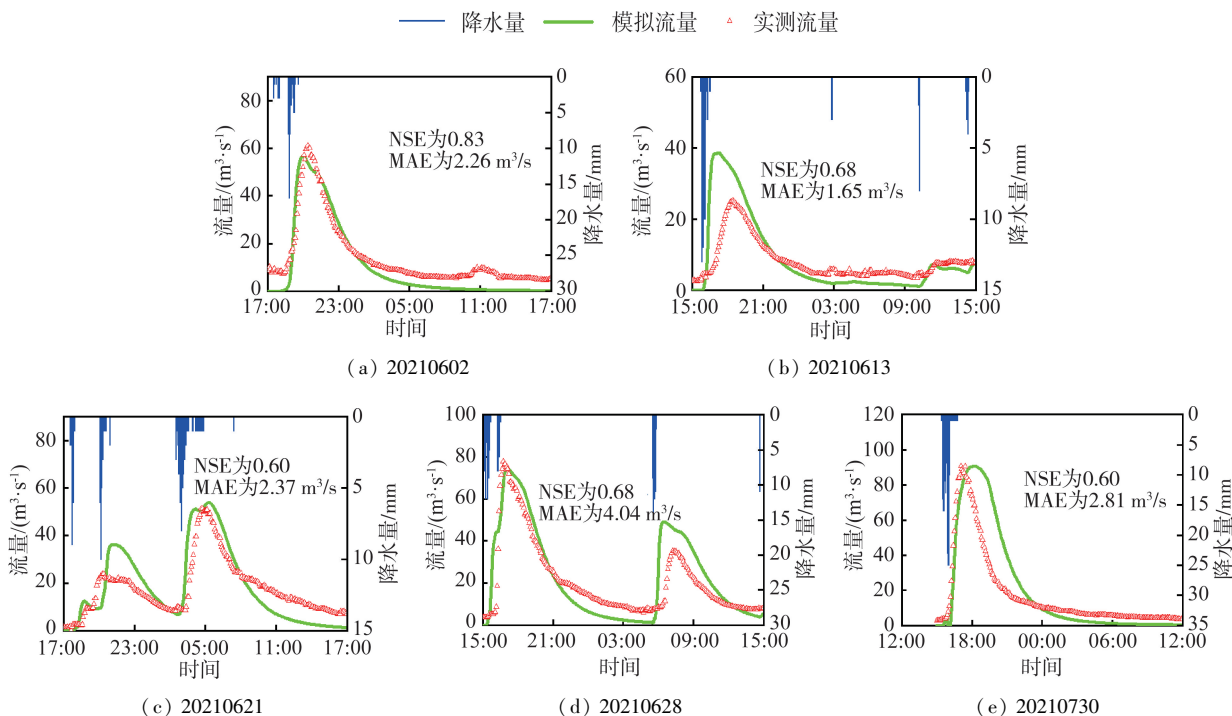


图 4 5 场降雨流量验证曲线

Fig. 4 Rainfall verification curve during 5 rainstorm events

流量过程具有较高的吻合度,所构建的 SWMM 具有良好的精度,可进一步结合 ANUGA 构建 AGSWM,实现城市内涝二维模拟。

3.1.2 ANUGA 二维模拟效果评估

经实地调研,20210730 场次降雨导致研究区部分路段发生严重积水(最大积水深度达到 0.7 m),其淹没范围如图 5 所示。由图 5 可见,AGSWM 模拟淹没范围、水深与实际调研结果具有较好的吻合度。因此,ANUGA 能够与 SWMM 进行耦合模拟,且其二维模拟结果具有良好的精度,表明 AGSWM 能够应用于研究区城市内涝一二维数值模拟。

3.2 不同情景下城市内涝分析

3.2.1 内涝积水总量及峰现时间

忽略水深小于 0.03 m 的积水量,得到不同设计暴雨情景下内涝积水总量变化过程和积水总量对比如图 6 和表 1 所示。对于重现期不大于 50 a 的情景,

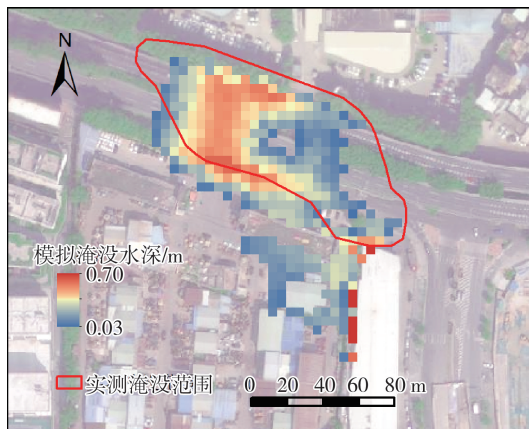


图 5 20210730 场次降雨情景下地表淹没模拟结果

Fig. 5 Simulation results of surface inundation under rainfall scenario of 20210730

仅重现期为 10 a 时中峰情景的积水总量最大,而在其他重现期的设计暴雨情景下,后峰情景的积水总

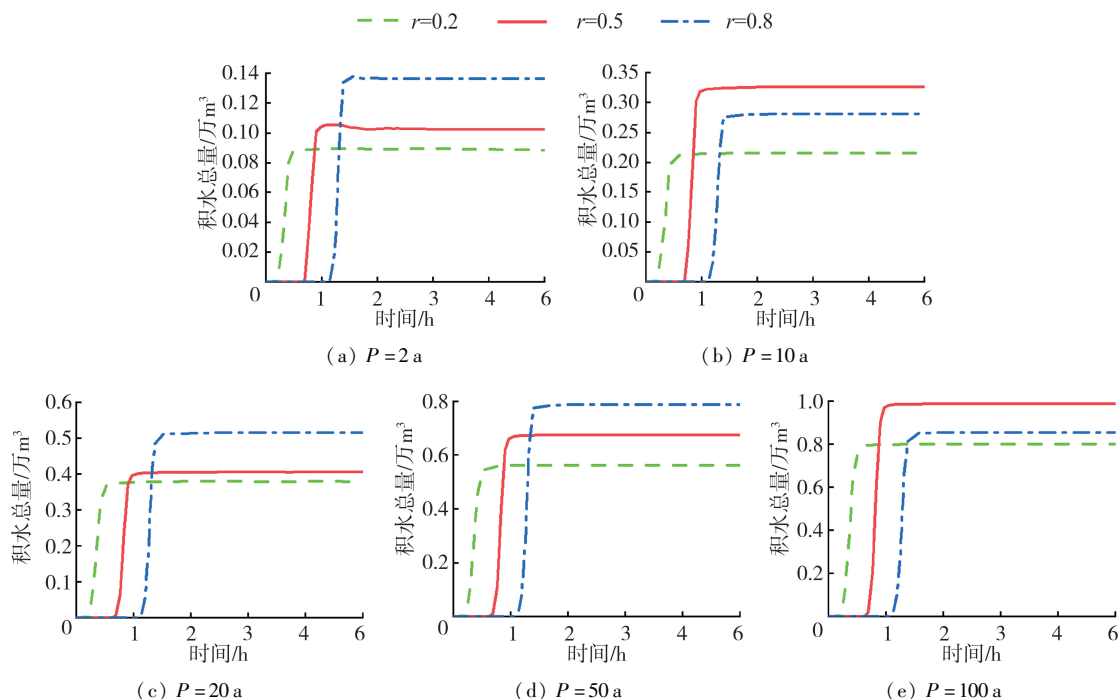


图6 不同设计暴雨情景下内涝积水总量变化过程

Fig. 6 Variation process of total waterlogging accumulation under different designed storm scenarios

表1 不同设计暴雨情景下内涝积水总量对比

Table 1 Comparison of total waterlogging accumulation under different designed storm scenarios

重现期/a	雨峰系数	积水总量 峰值/ m^3	积水总量 增加比例/%
2	0.2	887.51	
	0.5	1052.38	18.58
	0.8	1383.54	55.89
10	0.2	2137.15	
	0.5	3236.56	51.44
	0.8	2786.61	30.39
20	0.2	3767.28	
	0.5	4037.76	7.18
	0.8	5125.32	36.05
50	0.2	5607.91	
	0.5	6743.08	20.24
	0.8	7862.37	40.20
100	0.2	7974.49	
	0.5	9852.47	23.55
	0.8	8538.73	7.08

注:积水总量增加比例为相对前峰情景,中峰情景和后峰情景积水总量增加的百分比。

量最大,且后峰情景相对前峰情景积水总量增加36.05%~55.89%。对于重新期为100a的情景,后峰情景与前峰情景的积水总量差值为564.24 m^3 ,仅占前峰积水总量的7.08%,两者的内涝积水情况最为接近,而中峰情景的积水总量最大,其相对前峰情景增加23.55%。因此,对于重现期小于50a的设计暴雨,前峰情景的暴雨内涝积水最严重;而对于重现期大于50a的设计暴雨,中峰情景的暴雨内涝积水最严重。

暴雨在城市的复杂地表形成产流,并随之汇入

排水管网,当雨量过多排水管网超负荷运行时,大量雨水从排水管网中漫出导致地面积水并引发城市内涝,因此内涝积水峰现时间与暴雨峰现时间相比存在延迟。不同设计暴雨情景下内涝积水峰现延迟时间如表2所示,对于重现期小于50a的设计暴雨,中峰情景与前峰情景的积水峰现延迟时间相差较小(1~4min),而后峰情景与前峰情景的积水峰现延迟时间相差较大(7~12min),并且前峰情景的积水峰现延迟时间最长。对于重现期为100a的设计暴雨,后峰情景积水峰现延迟时间最长。另外,随着重

表2 不同设计暴雨情景下内涝积水峰现延迟时间

Table 2 Delay time of waterlogging accumulation peak occurrence under different designed storm scenarios

重现期/a	雨峰系数	积水峰现 时间/min	积水峰现 延迟时间/min
2	0.2	45	21
	0.5	80	20
	0.8	110	14
10	0.2	55	31
	0.5	95	35
	0.8	120	24
20	0.2	60	36
	0.5	100	40
	0.8	120	24
50	0.2	65	41
	0.5	100	40
	0.8	130	34
100	0.2	65	41
	0.5	100	40
	0.8	140	44

注:积水峰现延迟时间为积水峰现时间比设计暴雨峰现时间延迟的时间。

现期的增大,积水峰现延迟时间呈现增加趋势,重现期 100 a 后峰情景的积水峰现延迟时间最高可达 44 min。综上所述,重现期小于 50 a 的前峰情景的积水峰现延迟时间较长,重现期大于 50 a 的后峰情景的积水峰现延迟时间较长,并且积水峰现延迟时间随重现期增大而增加。

3.2.2 内涝等级

为了量化城市内涝等级,参考侯精明等^[35-36]的研究成果,将城市内涝风险按最大积水深度 H 划分如下: $H < 0.03$ m 属于无内涝, $0.03 \text{ m} \leq H < 0.15$ m 属于轻度内涝, $0.15 \text{ m} \leq H < 0.30$ m 属于中度内涝, $H \geq 0.30$ m 属于重度内涝。

图 7 为重现期 10 a 和 100 a 时不同雨峰设计暴雨情景下内涝等级空间分布。不同雨峰情景下,重现期较小时轻度内涝占比最大,重现期较大时重度内涝占比最大,并且内涝总面积随重现期增大而增大。考虑到轻度内涝水深较浅并且造成的损失较小,本文仅选取不同设计暴雨情景下中度内涝和重度内涝的淹没面积峰值进行对比分析,其模拟结果如表 3 所示。对中度内涝,除重现期为 20 a 的设计暴雨,其他重现期中峰情景淹没面积最大,前峰情景最小;对于重现期为 10 a 的设计暴雨情景,前峰情景比中峰情景的内涝淹没面积减小 33.34% (1573 m^2)。对重度内涝,除重现期为 10 a 的设计暴雨情景,其他重现期小于 50 a 的设计暴雨情景后峰情景的内涝淹没面积最大,前峰情景淹没面积最小;对于重现期为

表 3 不同设计暴雨情景下积水面积峰值对比

Table 3 Comparison of peak water accumulation area under different designed storm scenarios

重现期/a	雨峰系数	积水面积峰值/ m^2		
		中度内涝	重度内涝	总内涝
2	0.2	2596	399	6265
	0.5	2646	1023	7089
	0.8	2571	1597	7863
10	0.2	3145	2846	11207
	0.5	4718	4293	16000
	0.8	4543	3544	14702
20	0.2	4892	5167	17947
	0.5	5117	5342	19494
	0.8	5916	7538	22864
50	0.2	5666	8686	26159
	0.5	6665	10234	31775
	0.8	5566	12755	31276
100	0.2	5841	13204	33822
	0.5	5841	15151	38465
	0.8	5741	13828	34321

20 a 的设计暴雨情景,前峰情景比后峰情景的淹没面积减小 31.45% (2371 m^2);对于重现期为 100 a 的设计暴雨情景,中峰情景的淹没面积最大,前峰情景的淹没面积最小,前峰情景比中峰情景的淹没面积减小 12.85% (1947 m^2)。综上可知,对于中度内涝,中峰情景的内涝淹没面积较大;对于重度内涝,重现期小于 50 a 的后峰情景内涝淹没面积较大,而重现期大于 50 a 的中峰情景内涝淹没面积较大。

各内涝等级的淹没面积之和定义为总内涝面

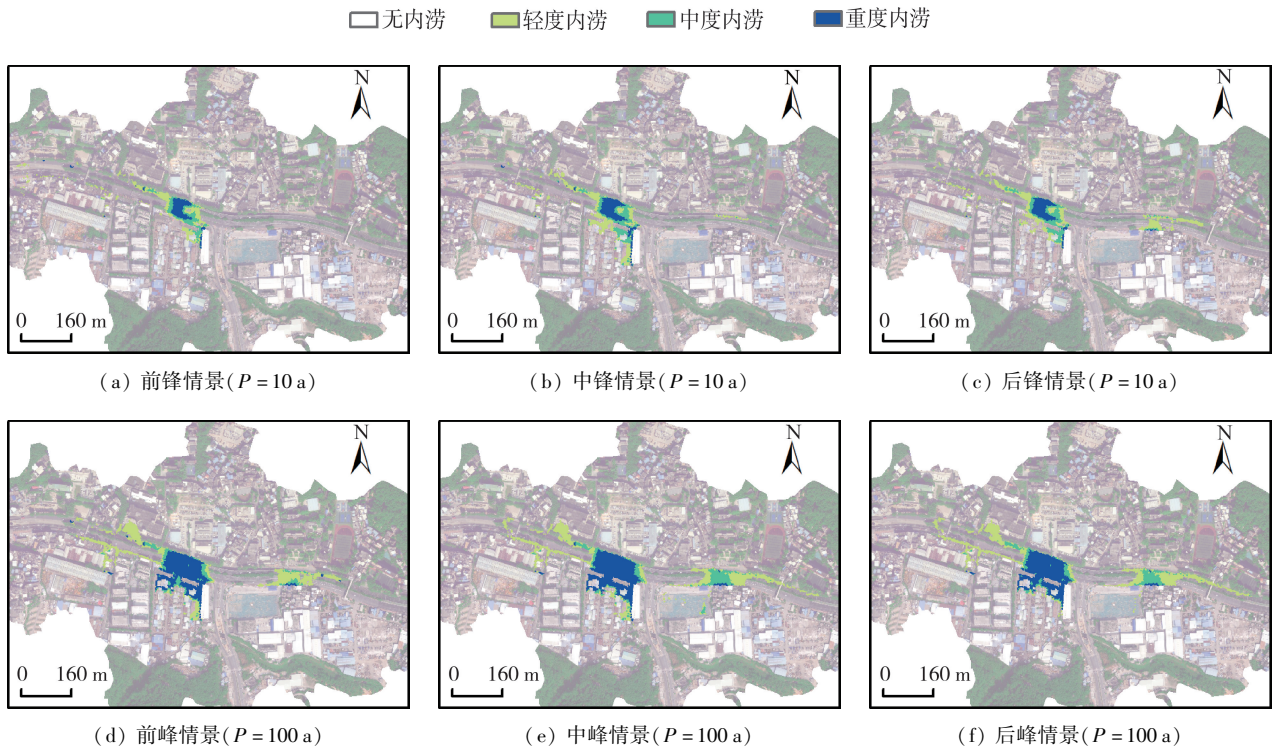


Fig. 7 Spatial distribution of waterlogging grades under different designed rain peak scenarios

积,由表3可见,重现期小于50 a时,除重现期为10 a的设计暴雨情景,其他情景的总内涝面积随雨峰系数增大而增大;重现期大于50 a情景的总内涝面积随雨峰系数增大而减小。因此,重现期小于50 a的后峰情景总淹没面积较大,而重现期大于50 a的中峰情景总淹没面积较大。

3.2.3 内涝水深

为了探究研究区内涝水深在不同设计暴雨情景下的变化规律,选取两个典型易涝点(图1中A、B)进行积水深度分析,最大水深模拟结果如表4所示。

表4 不同设计暴雨情景下典型易涝点最大水深统计
Table 4 Statistics of maximum water depth at typical flood-prone points under different designed storm scenarios

重现期/a	雨峰系数	最大水深/m	
		A点	B点
2	0.2	0.30	
	0.5	0.32	
	0.8	0.37	
10	0.2	0.43	
	0.5	0.49	0.13
	0.8	0.48	0.16
20	0.2	0.53	
	0.5	0.54	0.18
	0.8	0.60	0.20
50	0.2	0.63	0.19
	0.5	0.67	0.27
	0.8	0.74	0.27
100	0.2	0.75	0.25
	0.5	0.83	0.30
	0.8	0.76	0.30

对典型易涝点A,所有情景的最大水深均不小于0.30 m,属于重度内涝等级。重现期小于50 a时,除重现期为10 a的设计暴雨情景,后峰情景的最大水深较大,前峰情景的最大水深较小。对重现期为20 a的设计暴雨情景,后峰情景比前峰情景的最大水深大13.21%(0.07 m)。对重现期为100 a的设计暴雨情景,中峰情景的最大水深较大,而前峰情景的最大水深较小,中峰情景比前峰情景的最大水深大10.67%(0.08 m)。

对典型易涝点B,不同情景的最大水深为0~0.30 m,处于轻度和中度内涝等级。重现期为2 a、10 a与20 a的前峰情景无积水。当重现期不大于20 a时,后峰情景的最大水深较大,中峰情景的最大水深较小。当重现期大于20 a时,后峰情景与中峰情景的最大水深相同,而前峰情景的最大水深较小。

4 结论

a. AGSWM 验证结果表明,5场实测数据一维模拟结果的NSE值均大于0.6,MAE值均小于5,并

且AGSWM的模拟淹没水深、范围与实际调研数据相符,表明AGSWM能较好地模拟研究区暴雨内涝时空演变过程。

b. 研究区在低重现期的后峰情景以及高重现期的中峰情景下内涝积水较严重;而在低重现期的前峰情景、高重现期的后峰情景下积水峰现延迟时间较长。

c. 对于中度内涝,中峰情景的淹没面积较大;对于重度内涝,低重现期后峰情景、高重现期中峰情景淹没面积较大。

d. 对于重度内涝等级的典型易涝点A,低重现期后峰情景、高重现期中峰情景的最大水深较大;对于轻度和中度内涝等级的典型易涝点B,低重现期后峰情景、高重现期中峰和后峰情景的最大水深较大。

参考文献:

[1] ZHANG W, 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] SHAO Z F, FU H Y, LI D R, et al. Remote sensing monitoring of multi-scale watersheds impermeability for urban hydrological evaluation [J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 232:111338.

[3] HE L, LI S, CUI C H, et al. Runoff control simulation and comprehensive benefit evaluation of low-impact development strategies in a typical cold climate area[J]. Environmental Research, 2022, 206:112630.

[4] GUO Y C, QUAN L H, SONG L L, et al. Construction of rapid early warning and comprehensive analysis models for urban waterlogging based on AutoML and comparison of the other three machine learning algorithms[J]. Journal of Hydrology, 2022, 605:127367.

[5] 马超, 赵凯, 齐文超, 等. 基于示踪方法的沿海城市内涝防灾方案研究[J]. 水资源保护, 2022, 38(1):91-99. (MA Chao, ZHAO Kai, QI Wenchao, et al. Formulation of flood mitigation scheme in coastal cities based on source tracking method[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1):91-99. (in Chinese))

[6] ZHANG M L, XU M H, WANG Z L, et al. Assessment of the vulnerability of road networks to urban waterlogging based on a coupled hydrodynamic model[J]. Journal of Hydrology, 2021, 603:127105.

[7] JIANG W W, YU J S. Impact of rainstorm patterns on the urban flood process superimposed by flash floods and urban waterlogging based on a coupled hydrologic-hydraulic model: a case study in a coastal mountainous

- river basin within Southeastern China [J]. Natural Hazards, 2022, 112(1): 301-326.
- [8] SHIN E, KIM H J, RHEE D S, et al. Spatiotemporal flood risk assessment of underground space considering flood intensity and escape route[J]. Natural Hazards, 2021, 109(2): 1539-1555.
- [9] 冉令坤, 李舒文, 周玉淑, 等. 2021 年河南“7·20”极端暴雨动、热力和水汽特征观测分析[J]. 大气科学, 2021, 45(6): 1366-1383 (RAN Lingkun, LI Shuwen, ZHOU Yushu, et al. Observational analysis of the dynamic, thermal, and water vapor characteristics of the “7·20” extreme rainstorm event in Henan Province[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2021, 45(6): 1366-1383. (in Chinese))
- [10] 史文茹, 李昕, 曾明剑, 等. “7·20”郑州特大暴雨的多模式对比及高分辨率区域模式预报分析[J]. 大气科学学报, 2021, 44(5): 688-702. (SHI Wenru, LI Xin, ZENG Mingjian, et al. Multi-model comparison and high-resolution regional model forecast analysis for the “7·20” Zhengzhou severe heavy rain[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021, 44(5): 688-702. (in Chinese))
- [11] 陈文龙, 夏军. 广州“5·22”城市洪涝成因及对策[J]. 中国水利, 2020(13): 4-7. (CHEN Wenlong, XIA Jun. Analysis of causes and countermeasures of extraordinary rainstorm in 22nd, May, Guangzhou [J]. China Water Resources, 2020(13): 4-7. (in Chinese))
- [12] 夏军, 张印, 梁昌梅, 等. 城市雨洪模型研究综述[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(2): 95-105. (XIA Jun, ZHANG Yin, LIANG Changmei, et al. Review on urban storm water models [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(2): 95-105. (in Chinese))
- [13] 李永坤, 薛联青, 邸苏闯, 等. 基于 Infoworks ICM 模型的典型海绵措施径流减控效果评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 398-405. (LI Yongkun, XUE Lianqing, DI Suchuang, et al. Evaluation of runoff reduction effect of typical sponge measures based on Infoworks ICM model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(5): 398-405. (in Chinese))
- [14] 袁绍春, 王怀鋈, 吕波, 等. 基于 InfoWorks_ICM 模型的山地城市老旧建筑小区海绵化改造方案设计及评估[J]. 水资源保护, 2020, 36(5): 43-49. (YUAN Shaochun, WANG Huaijun, LYU Bo, et al. Design and evaluation of sponge city reconstruction scheme for old building district in mountainous city based on InfoWorks_ICM model [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 43-49. (in Chinese))
- [15] 栾震宇, 金秋, 赵思远, 等. 基于 MIKE FLOOD 耦合模型的城市内涝模拟[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 81-88. (LUAN Zhenyu, JIN Qiu, ZHAO Siyuan, et al. Simulation of urban waterlogging based on MIKE FLOOD coupling model [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 81-88. (in Chinese))
- [16] 傅春, 付耀宗, 肖存艳, 等. 基于 MIKE FLOOD 模型的鹰潭市内涝弹性分析[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(1): 33-39. (FU Chun, FU Yaorong, XIAO Cunyan, et al. Analysis of urban waterlogging resilience based on MIKE FLOOD Model in Yingtan City [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1): 33-39. (in Chinese))
- [17] 雷向东, 赖成光, 王兆礼, 等. LID 改造对城市内涝与面源污染的影响[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 131-139. (LEI Xiangdong, LAI Chengguang, WANG Zhaoli, et al. Influence of LID adaptation on urban flooding and non-point source pollution [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 131-139. (in Chinese))
- [18] 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))
- [19] 曾照洋, 赖成光, 王兆礼, 等. 基于 WCA2D 与 SWMM 模型的城市暴雨洪涝快速模拟[J]. 水科学进展, 2020, 31(1): 29-38. (ZENG Zhaoyang, LAI Chengguang, WANG Zhaoli, et al. Rapid simulation of urban rainstorm flood based on WCA2D and SWMM model [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(1): 29-38. (in Chinese))
- [20] 李国一, 刘家宏. 基于 TELEMAC-2D 模型的深圳洪涝风险评估[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 58-64. (LI Guoyi, LIU Jiahong. Flood risk assessment of Shenzhen based on TELEMAC-2D model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 58-64. (in Chinese))
- [21] 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))
- [22] POLIYAPRAM V, RAGHAVAN V, METZ M, et al. Implementation of algorithm for satellite-derived bathymetry using open source GIS and evaluation for tsunami simulation [J]. ISPRS International Journal of

- [23] MUNGKASI S,VAN DRIE R,ROBERTS S G. Predictions on arrival times of water of the St. Francis dam break flood using ANUGA[C]//PIANTADOSI J,ANDERSSEN R S,BOLAND J. 20th International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM). Adelaide, Australia: Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand Inc.,2013:304-309.
- [24] 赵刚,徐宗学,庞博,等. 基于改进填洼模型的城市洪涝灾害计算方法[J]. 水科学进展,2018,29(1):20-30. (ZHAO Gang,XU Zongxue,PANG Bo,et al. Estimation of urban flooding processes based on enhanced inundation model[J]. Advances in Water Science,2018,29(1):20-30. (in Chinese))
- [25] 李璟冉,周毅,李哲,等. 基于 SWMM 的管道淤积对排水能力影响的模拟分析[J]. 中国给水排水,2022,38(3):118-125. (LI Jingran,ZHOU Yi,LI Zhe,et al. Effect of pipeline siltation on drainage capacity based on SWMM simulation[J]. China Water & Wastewater,2022,38(3):118-125. (in Chinese))
- [26] 樊金璐,徐红,陆益忠,等. 基于 LID 组合措施的张家港中心城区雨洪控制效果模拟研究[J]. 水电能源科学,2022,40(3):75-78. (FAN Jinlu,XU Hong,LU Yizhong,et al. Simulation study on rainwater control effect of central urban area of Zhangjiagang based on LID combination measures[J]. Water Resources and Power,2022,40(3):75-78. (in Chinese))
- [27] NIELSEN O,ROBERTS S,GRAY D,et al. Hydrodynamic modelling of coastal inundation [C]//ZERGER A, ARGENT R M. MODSIM 2005 International Congress on Modelling and Simulation. Melbourne, Australia: Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand Inc.,2005:518-523.
- [28] MUNGKASI S,ROBERTS S G. A finite volume method for shallow water flows on triangular computational grids [C]// HAN F,MARINOVA D,ANDERSSEN R S. 2011 International Conference on Advanced Computer Science and Information Systems. Jakarta:IEEE,2011:79-84.
- [29] 陈佩琪,王兆礼,曾照洋,等. 城市化对流域水文过程的影响模拟与预测研究[J]. 水力发电学报,2020,39(9):67-77. (CHEN Peiqi,WANG Zhaoli,ZENG Zhaoyang,et al. Assessing influence of future urbanization on hydrological process in typical river basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2020,39(9):67-77. (in Chinese))
- [30] LI J,DENG C N,LI H E,et al. Hydrological environmental responses of LID and approach for rainfall pattern selection in precipitation data-lacked region[J]. Water Resources Management,2018,32(10):3271-3284.
- [31] 曾家俊,麦叶鹏,李志威,等. 广州天河智慧城 SWMM 参数敏感性分析[J]. 水资源保护,2020,36(3):15-21. (ZENG Jiajun,MAI Yepeng,LI Zhiwei,et al. Sensitivity analysis of SWMM parameters in Guangzhou Tianhe wisdom city[J]. Water Resources Protection,2020,36(3):15-21. (in Chinese))
- [32] 朱晓琳,李一平,许益新,等. 时间尺度对平原感潮河水动力水质模拟精度的影响[J]. 水资源保护,2020,36(3):67-75. (ZHU Xiaolin,LI Yiping,XU Yixin,et al. Effects of time scale on simulation accuracy of hydrodynamic water quality of plain tidal river network [J]. Water Resources Protection,2020,36(3):67-75. (in Chinese))
- [33] 彭虹,周文婷,张万顺,等. 流域突发水污染云溯源体系构建与应用[J]. 水资源保护,2022,38(1):176-181. (PENG Hong,ZHOU Wenting,ZHANG Wanshun,et al. Construction and application of cloud traceability system for sudden water pollution in river basin [J]. Water Resources Protection,2022,38(1):176-181. (in Chinese))
- [34] 冯哲颖,岳林蔚,沈焕锋. 基于多源水文数据融合的 GRACE 水储量精度校正[J]. 遥感技术与应用,2021,36(3):605-617. (FENG Zheyang,YUE Linwei,SHEN Huanfeng. Accuracy correction of GRACE water storage based on multi-source hydrological data [J]. Remote Sensing Technology and Application,2021,36(3):605-617. (in Chinese))
- [35] 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))
- [36] 陈小兰,喻海军,杨滨,等. 城市雨洪模型在排水系统升级改造中的应用[J]. 水电能源科学,2021,39(10):135-139. (CHEN Xiaolan,YU Haijun,YANG Bin,et al. Application of urban storm and flood model in upgrading and reconstruction of drainage system [J]. Water Resources and Power,2021,39(10):135-139. (in Chinese))

(收稿日期:2022-04-25 编辑:熊水斌)

