

基于 SWMM 和 SIMWE 模型水文水动力耦合的岳阳市主城区内涝模拟

邱靖宇^{1,2},程磊^{1,2},周楚天^{1,2},吴坤明³,周立浩^{1,2},杨雨寒^{1,2},刘攀^{1,2},夏军^{1,2}

(1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室; 2. 武汉大学海绵城市建设水系统科学湖北省重点实验室;
3. 长江生态环保集团有限公司)

摘要:针对现有城市内涝模拟方法难以兼顾效率与精度,影响实时预测与应急管理的问题,为提升岳阳市主城区内涝风险评估与管理能力,构建了基于 SWMM 和 SIMWE 模型的水文水动力耦合模型,采用实测数据对模型进行了验证,进而分析了岳阳市主城区节点溢流和内涝风险区的分布特征。结果表明:模型模拟的淹没状况与实测数据高度吻合,模型时效性高,模拟暴雨过程 3 h 和 24 h 时长所需时间分别为 5.5、32.5 min;总溢流量和淹没面积随降雨重现期的增大呈对数非线性增长,短历时强降雨溢流量占降水量比例大,溢流起始时间随重现期增大而提前;模型识别出了 16 处内涝风险区,内涝高风险区空间格局相对固定。

关键词:城市内涝;暴雨模拟;内涝风险;SWMM;SIMWE 模型;岳阳市

Simulation of waterlogging in main urban area of Yueyang City based on hydrological-hydrodynamic coupling of SWMM and SIMWE model//Qiu Jingyu^{1,2}, Cheng Lei^{1,2}, Zhou Chutian^{1,2}, Wu Kunming³, Zhou Lihao^{1,2}, Yang Yuhao^{1,2}, Liu Pan^{1,2}, Xia Jun^{1,2} (1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University; 2. Hubei Provincial Key Lab of Water System Science for Sponge City Construction, Wuhan University; 3. Yangtze Ecology and Environment Co., Ltd.)

Abstract: In view of the problem that the existing urban waterlogging simulation methods are difficult to balance efficiency and accuracy, which affects real-time prediction and emergency management, to improve the risk assessment and management ability for waterlogging in the main urban area of Yueyang City, a hydrological-hydrodynamic coupling model based on SWMM and the SIMWE model was constructed. The model was verified by using measured data, and the drainage node overflow and risk distribution characteristics of waterlogging in the main urban area of Yueyang City were further analyzed. The results show that the inundation conditions simulated by the model are highly consistent with the measured data, and the simulation times of the 3-h and 24-h rainstorms are 5.5 min and 32.5 min, respectively, indicating superior computational efficiency of the model. The overflow volume and inundation area of urban flooding increase logarithmically and nonlinearly with the increase of the rainfall return period. The overflow volume of short-duration heavy rainfall accounts for a larger proportion of the total precipitation, and the onset of overflow is advanced with the increase of the rainfall return period. The model identified 16 critical waterlogging-prone areas, and the spatial pattern of high-risk urban flooding areas is relatively fixed.

Key words: urban waterlogging; rainstorm simulation; risk of waterlogging; SWMM; SIMWE model; Yueyang City

近年来,全球气候变化与城市化进程加速加剧了城市洪涝灾害风险。IPCC 第六次评估报告指出,全球平均气温较 19 世纪 50 年代上升 1.1℃,气温每升高 1℃大气持水能力增加约 7%,导致极端降雨频率和强度显著增加^[1-4]。例如:2021 年郑州 7·20 特大暴雨累计降水量达 985.2 mm^[5],2023 年深圳龙

岗区受台风“海葵”残余涡旋影响,3 h 降水量达 222.0 mm^[6]。同时,快速城市化导致不透水面比例激增,削弱了城市自然调蓄能力,引发地表径流量增加、汇流速度加快及峰现时间提前等问题^[7-9]。此外,较多城市现有排水格局紊乱、管网设计标准偏低,城市排水系统应对洪涝灾害的能力明显滞后,多

基金项目:水利部重大科技项目(SKS-2022014);长江生态环保集团有限公司科研项目(HBZB2024029)
作者简介:邱靖宇(2002—),男,硕士研究生,主要从事城市内涝模拟研究。E-mail:jyq2020@whu.edu.cn
通信作者:程磊(1982—),男,教授,博士,主要从事生态水文学与水资源管理研究。E-mail:lei.cheng@whu.edu.cn

因素协同作用使内涝问题日益凸显^[10]。构建科学精准的内涝防控体系已成为提升城市韧性的当务之急。

准确模拟和预测内涝是城市洪涝灾害防御的关键,传统方法以一维和二维水动力学模型为主。例如:李品良等^[11]应用 MIKE URBAN 模拟管网溢流,模型兼具建模简便性与运算精确性;王慧亮等^[12]通过 SWMM-GIS 耦合分析暴雨内涝分布特征;王兆礼等^[13]采用 TELEMAC-2D-SWMM 耦合模型模拟内涝,结果表明该模型在复杂城区表现出良好的适用性;黄国如等^[14]利用 InfoWorks ICM 评估不同重现期降雨下的管网排水能力;卢兴超等^[15]通过 SWMM-LISFLOOD-FP 耦合模拟,得到的内涝高风险区与实际观测结果吻合度较高。尽管上述模型精度较高,但是受限于差分求解复杂、计算耗时问题突出,难以满足实时预测需求^[16]。为此,许多学者尝试引入机器学习模型提升效率,Liao 等^[17]提出了基于卷积神经网络(CNN)的代理模型,利用水动力模型构建数据集,用于代理模型的训练,预测的积水深度与水动力模型高度吻合;林凯荣等^[18]构建了 CNN-LSTM-ATT 模型,可快速预测未来 30 min 积水水深,速度较传统模型提升近 200 倍。然而,机器学习模型预测的准确度依赖于历史训练数据,对于未经历过的降雨事件或极端气候条件,其预测能力受限^[19]。且当城市管网和下垫面条件发生变化时,模型需重新训练以适应新的环境,不仅增加了计算成本,也影响了模型应用的灵活性。因此,需要探索一种计算高效且适应能力较强的模型耦合策略,以实现快速内涝风险预测及响应。

SIMWE(simulated water erosion)模型由 Mitas 和 Mitasova 于 1998 年开发,起初用于地表侵蚀与沉积过程模拟,随着 GIS 技术发展,该模型逐步扩展,应用于水流路径分析和淹没模拟^[20]。SIMWE 模型通过简化水流运动方程显著降低计算复杂度,可在保证合理精度的前提下实现大范围淹没模拟,快速输出淹没空间分布与深度,尤其是针对低洼地带、道路交汇处等高风险区的识别精度可满足应急管理中的快速研判需求。此外,SIMWE 模型对地形、下垫面参数及管网溢流量等外部输入的动态响应能力较强,能够适应城市环境的空间异质性与突发性降雨事件的时空变异性。Li 等^[21]将 SIMWE 模型用于挪威奥斯陆市,验证其在实时洪水预报中的应用潜力,模型输出的区域淹没深度可有效应用于洪水风险等级划分,但模型未考虑管网的调控作用。目前,国内外关于将一维管网模型与 SIMWE 模型耦合并应用于城市内涝模拟的研究仍较为缺乏。

本文将 SWMM 与 SIMWE 模型进行耦合,建立了一种具有高时效的耦合模型,并使用该耦合模型模拟和量化岳阳市主城区暴雨情景下城市管网系统的运行与溢流情况以及地表淹没范围和淹没水深,通过计算模型运行时间,验证模型的时效性,并进一步分析岳阳市主城区内涝时空规律,精准识别高风险区。

1 研究区概况与数据来源

岳阳市主城区(29°20'N ~ 29°25'N, 113°04'E ~ 113°13'E)面积为 61.23 km²,其地形与排水管网分布如图 1 所示,研究区域排水管网总长 439 km、节点 13 956 个。岳阳市位于湖南省东北部,西临洞庭湖,北接长江,整体地势低平,属于亚热带湿润气候区,常年气候温暖、雨量充沛。受长江与洞庭湖水位上涨的影响^[22-24],该地区夏季强降雨集中,近年来极端天气事件逐渐增多。岳阳市城区城市化进程加快导致不透水面积增加,内涝事件频发,其内涝的时空分布特征亟须研究分析。本文采用岳阳市气象站 1952—2019 年逐年最大日降水量数据以及现状排水管网数据和地形数据(5 m×5 m)进行模拟分析,数据来自岳阳市市政管理维护中心。

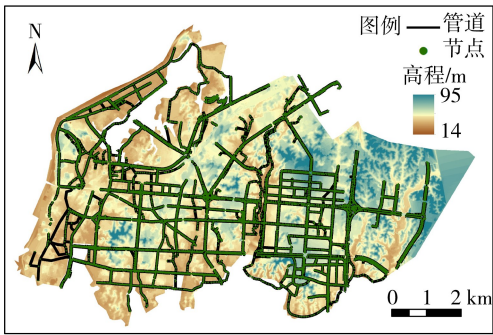


图 1 研究区地形与排水管网

Fig. 1 Terrain and drainage network of study area

2 研究方法

2.1 模型原理

2.1.1 SWMM

SWMM 是由美国环境保护署开发的一款广泛应用于城市雨水管理的动态水文水动力模型。该模型能够模拟降雨径流、管道流量和水质变化等过程,适用于城市排水系统设计、洪水风险评估和水质管理等领域^[25-27]。SWMM 将暴雨径流过程概化为产流过程和汇流过程,在产流概化过程中可采用 Horton、Green-Ampt、曲线数 3 种不同下渗模型^[28]。根据实际需要,SWMM 在求解圣维南方程组时,可采用恒定流、运动波、动力波 3 种计算方法。本文采

用 Horton 模型与运动波法。

2.1.2 SIMWE 模型

SIMWE 模型是一种基于扩散波理论的二维地表漫流模拟工具,通过简化圣维南方程显著提升了计算效率。模型将水力半径近似为正常水深,并直接采用曼宁公式计算水流速度,从而避免了复杂的迭代过程。在稳态条件下,模型通过求解连续性方程和动量方程估计地表径流,并采用近似运动波的水流模拟方式。为进一步体现扩散波效应,在模型方程中引入扩散项,有助于处理数字高程模型中常见的浅注问题,在地形突变或地表覆盖显著变化区域形成更平滑的流动模式,从而避免极端异常值^[20]。该模型可在 GRASS GIS 软件中直接调用。

2.2 设计暴雨情景

根据岳阳市气象局提供的《岳阳中心城区暴雨强度公式编制及暴雨极值推算》报告资料,利用 P-III 型分布进行曲线拟合,年最大值法进行选择,最小二乘法进行参数估算,得到岳阳市暴雨强度公式:

i = (9.214(1 + 0.529 lgP) / (t + 9.487))^0.619 (1)

式中: i 为暴雨强度; P 为降雨重现期; t 为降雨历时。

目前城市设计雨型多采用芝加哥雨型,研究表明此雨型效果较好,一般能满足精度要求。利用暴雨强度公式推导出芝加哥雨型公式,雨峰前后瞬时降雨强度为:

ia = (A[(1 - n)ta/r + b]) / ((ta/r + b)n + 1) (2)

ib = (A[(1 - n)tb/(1 - r) + b]) / ([tb/(1 - r) + b]n + 1) (3)

式中: ia、ib 分别为雨峰前后瞬时降雨强度; ta、tb 分别为雨峰前后降雨历时; r 为雨峰系数,文中 r 取 0.5; b 为降雨历时修正参数; A 为雨力参数; n 为暴雨衰减指数。

根据设计计算成果,降雨重现期为 2、5、10、25、50、100 a,降雨历时为 3 h 和 24 h 的设计暴雨过程如图 2 所示。需要说明的是,芝加哥雨型及其所依赖的暴雨强度公式主要适用于历时不超过 3 h 的短历时强降雨模拟,对于 24 h 长历时降雨应通过同频率法等方法构建雨型。但由于缺乏多年连续实测降雨资料,难以开展频率分析与特征雨型归纳,因此也采用暴雨强度公式构造 24 h 降雨过程。此方法在精度上存在一定局限,但在数据匮乏的背景下,仍可为模拟提供参考性的降雨条件。

2.3 耦合模型构建

采用单向耦合方式对 SWMM 和 SIMWE 模型进行耦合,利用 SWMM 输出结果驱动 SIMWE 模型的

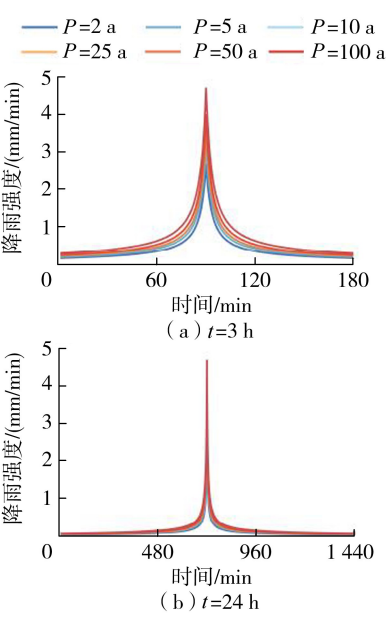


图 2 不同降雨重现期设计暴雨过程

Fig. 2 Design storm hyetographs for different return periods

运行。SIMWE 模型输入主要包括高程、时段降雨强度、曼宁系数和对地形求一阶偏导数得到的流量梯度矢量等,其中时段降雨强度由 SWMM 模拟得到的节点溢流量替代。通过将 SWMM 输出的节点溢流量输入 SIMWE 模型实现城市内涝模拟,可以得到任意时段的地表淹没范围、水深和流速。具体计算步骤为:①将实测或设计降雨情景输入 SWMM,得到各节点的时段溢流量;②将计算时段总溢流量平均到单个栅格像元和整个时段内,单位转换为 mm/h;③使用 Grass GIS 软件中的 r.slope.aspect 模块,计算得到流量梯度矢量;④将各节点的时段溢流量、高程数据和流量梯度矢量输入 SIMWE 模型,不考虑降水产流等其他额外水量输入,设置模拟参数,输出地面淹没水深。

2.4 模型参数设定

由于缺乏排水管网出水口流量的长期实测数据,为保证模拟结果尽可能贴近实际情况,选取 2020 年 7 月 8 日历史实际暴雨过程(P20200708)作为验证事件,基于实地调查的内涝点分布情况,参考 SWMM 用户手册对参数进行手动调整,使模拟淹没范围和深度与实际调查结果相符。由于难以对耦合模型参数进行精确率定,为提高模型在内涝风险评估中的安全裕度,采用相对偏低的最大和最小下渗率,使模拟结果在可能范围内呈现更严重的淹没情形,从而避免低估潜在的内涝风险。SWMM 模型参数包括不透水地面曼宁系数、透水地面曼宁系数、不透水地表注蓄量、透水地表注蓄量、管道糙率、最大下渗率、最小下渗率和衰减系数,分别取值为 0.012、

0.170、1.27 mm、5 mm、0.01、3 mm/h、0.5 mm/h、4。SIMWE 模型参数包括曼宁系数、扩散系数和水深阈值,主要参照文献[20]推荐值选取,分别取值为0.03、2.85、0.1 m,曼宁系数在全区域取统一值。图3为P20200708暴雨过程,总降水量为173.5 mm,降雨历时约为17 h,呈双峰形式,主峰在后。

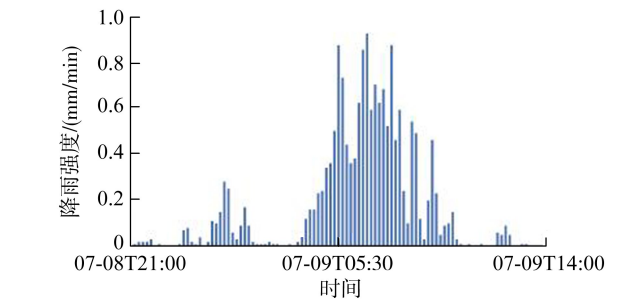


图3 P20200708 暴雨过程

Fig.3 Rainfall hyetograph of storm event P20200708

3 结果与分析

3.1 模型验证

将实测 P20200708 暴雨过程输入耦合模型后,模拟得到的节点溢流分布如图4所示,模型计算的淹没水深与实际调查内涝点位置如图5所示。暴雨过程总溢流量为528 万 m³,溢流节点数1037 个,累积溢流量>10 万、>5 万~10 万、>1 万~5 万、>1000~1 万 m³ 的节点数分别为15、30、154、626 个。图5显示,研究区大部分区域的淹没水深超过0.05 m,部分区域淹没水深超过1 m,其中,南湖游路最大淹没水深为0.2~0.5 m,枫桥湖路最大淹没水深超过0.5 m。模型计算的淹没水深和淹没范围与实际内涝情况基本相符,说明耦合模型可有效模拟研究区的内涝特征。将SWMM输出的节点溢流量输入SIMWE模型后,模型可快速模拟出地面的淹没情况。模拟时长3 h所需时间为5.5 min,模拟时长24 h所需时间为32.5 min,说明耦合模型具有较高的时效性,能够快速模拟城市内涝情况。

表1 不同降雨重现期3h降雨管网溢流模拟结果

Table 1 Simulation results of drainage network overflow under 3-h design rainfall with different return periods									
降雨重现期/a	降水量/mm	总溢流量/万 m ³	总溢流量占降水量比例/%	不同溢流量范围对应的节点数/个					溢流量大于50 m ³ 节点数占比/%
				>50~1 000 m ³	>1 000~1 万 m ³	>1 万~5 万 m ³	>5 万~10 万 m ³	>10 万 m ³	
2	75.1	218	47.4	1 395	337	36	7	0	12.7
5	88.8	277	50.9	1 746	429	47	7	0	16.0
10	99.1	322	53.1	1 995	500	56	10	0	18.4
25	112.7	385	55.8	2 323	596	68	11	1	21.5
50	123.0	433	57.5	2 565	677	76	11	2	23.9
100	133.4	482	59.0	2 787	758	80	12	4	26.1

注:总溢流量占降水量比例为单位面积溢流量与降水量的比值。下同。



图4 P20200708 暴雨过程节点溢流分布

Fig.4 Node overflow distribution in storm event P20200708

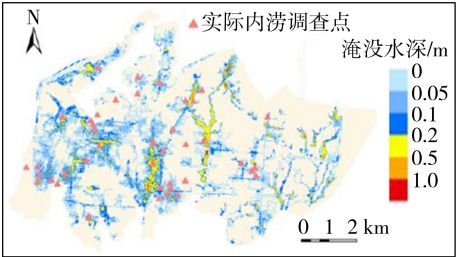


图5 P20200708 暴雨过程淹没水深与实际调查内涝点

Fig.5 Inundation depth and actual investigated waterlogging points in storm event P20200708

3.2 不同设计降雨情景内涝模拟

3.2.1 节点溢流模拟结果

选取降雨重现期为2、5、10、25、50、100 a 的短历时(3 h)和长历时(24 h)设计降雨情景,对研究区内涝情况进行模拟。不同降雨重现期短历时和长历时设计降雨情景节点溢流情况分别如表1和表2所示。结果显示,随着降雨重现期的增大,溢流节点数显著增加,总溢流量呈对数非线性增长,总溢流量占降水量的比例不断升高。

不同降雨重现期溢流量分布存在明显差异。低降雨重现期条件下,溢流量相对较小,主要集中在排水系统负荷较大的区域,这些区域首先达到溢流临界点;高降雨重现期条件下,溢流现象更为普遍,溢流量大幅度增加。尤其是长历时降雨会持续对排水系统产生压力,此时高重现期极端降雨显著超越了排水系统的承受极限。

图6为不同降雨重现期条件下管网节点溢流响

表 2 不同降雨重现期 24 h 降雨情景管网溢流模拟结果

降雨重 现期/a	降水量/mm	总溢流量/ 万 m ³	总溢流量 占降水量 比例/%	不同溢流量对应的节点数/个					溢流量大于 100 m ³ 节点数 占比/%
				>100~ 2000 m ³	>2000~ 2 万 m ³	>2 万~ 10 万 m ³	>10 万~ 20 万 m ³	>20 万 m ³	
2	170.1	435	41.7	1 154	210	41	7	3	10.1
5	200.9	536	43.6	1 476	262	45	9	4	12.9
10	244.3	674	45.0	1 691	318	49	10	5	14.9
25	255.2	730	46.7	1 976	392	56	13	5	17.5
50	278.5	817	47.9	2 171	436	59	14	7	19.3
100	301.9	906	49.0	2 388	482	64	15	7	21.2

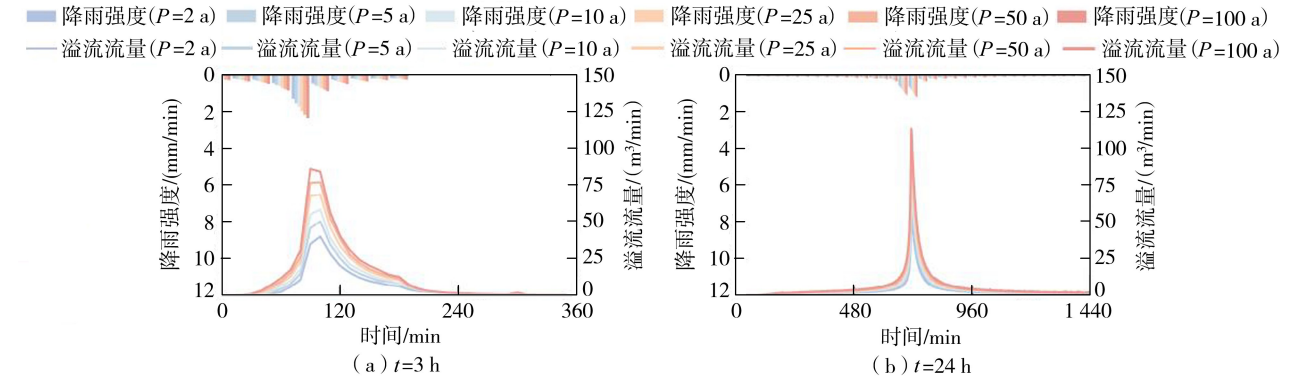


图 6 不同降雨重现期降雨与节点溢流过程

Fig. 6 Temporal evolution of rainfall and node overflows under different return periods

应过程。在 3 h 降雨历时下,当 $P < 50$ a 时,溢流现象于降雨开始后 20 min 显现;而 $P \geq 50$ a 时,溢流触发时间缩短至 10 min。在 24 h 降雨历时下,溢流发生时间随降雨重现期增大呈现分级递进式提前,2、5、10、25、50、100 a 降雨重现期对应的溢流起始时间分别为 90、85、75、70、50、40 min。

以上结果表明,在极端降雨条件下,城市排水系统很快达到饱和状态,随着降雨重现期的增大,雨量不断增加,内涝风险的窗口期也不断前移。短历时暴雨下,高重现期降雨的溢流响应速度明显快于长历时降雨,这源于短历时强降雨在单位时间内产生更大的径流增量,径流快速汇聚对管网形成冲击。一方面,总溢流量随降雨强度增大呈对数非线性增长趋势,且其峰值与降雨峰值高度同步,说明管网的溢流受瞬时降雨强度影响较大;另一方面,当降雨强度超过某一临界值时,溢流流量会呈现陡升的趋势,这是因为管网排水能力达到物理极限后,新增降雨几乎全部转化为溢流。临界值与排水系统的设计容量极限有关,超过临界值后管网的调控能力急剧下降,内涝风险显著增加。

3.2.2 地表淹没模拟结果

短历时和长历时降雨在不同降雨重现期下地表淹没情况分别如图 7 和图 8 所示。短历时降雨下,当降雨重现期分别为 2、5、10、25、50、100 a 时,地表最大淹没面积(淹没水深大于 0.05 m)分别为 7.53、

9.12、10.19、11.50、12.40、13.30 km²。在长历时降雨下,当降雨重现期分别为 2、5、10、25、50、100 a 时,地表最大淹没面积分别为 7.14、8.26、9.05、9.96、10.58、11.15 km²,在长短历时降雨下淹没面积均呈现对数式非线性增长。

降雨主要在低洼地带、道路交汇处和排水设施薄弱的区域形成积水。当降雨重现期较低时,淹没水深有限,但当降雨重现期为 50、100 a 时,这些区域的淹没水深显著加大,淹没区域扩大,部分区域达到深度淹没状态。低重现期降雨已导致广泛淹没,而高重现期降雨更进一步加剧淹没深度,长历时降雨的持续积累作用更加显著。

分析图 7 和图 8 中淹没水深的分布情况可知,无论是短历时还是长历时降雨情景,高淹没风险区域的空间分布位置相对一致,主要集中在城市低洼地带及道路、交通枢纽周边。然而,随着降雨重现期的增大,同一位置的淹没水深呈现非线性增长趋势,例如在青年东路附近,当 $P \leq 5$ a 时,最大淹没水深不超过 0.5 m,而当 $P \geq 20$ a 时,最大淹没水深超过 1 m。这表明,尽管高风险区域的空间格局变化相对较小,但极端降雨事件会显著加剧局部内涝的严重性。此外,建筑密度也会影响城市的内涝情况,在建筑密度较大的地区,由于不透水表面占比更高,滞蓄能力更弱,其淹没情况也更严重。

研究采用时段平均的方式将 SWMM 输出的溢

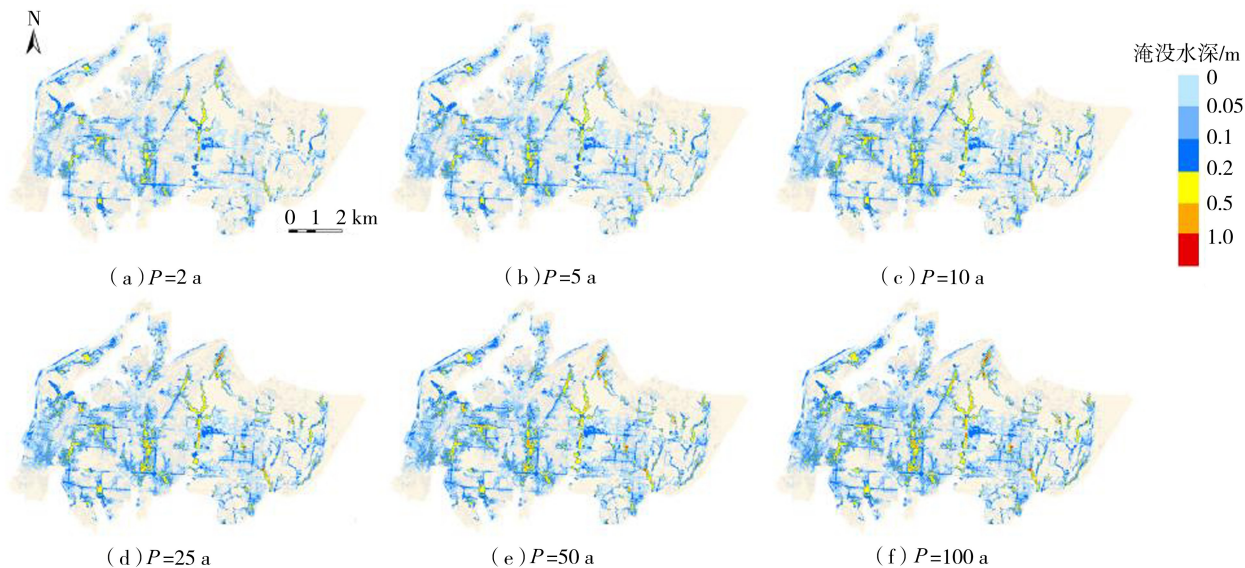


图 7 不同降雨重现期 3 h 降雨淹没水深分布

Fig. 7 Inundation depth distribution under 3-h design rainfall with different return periods

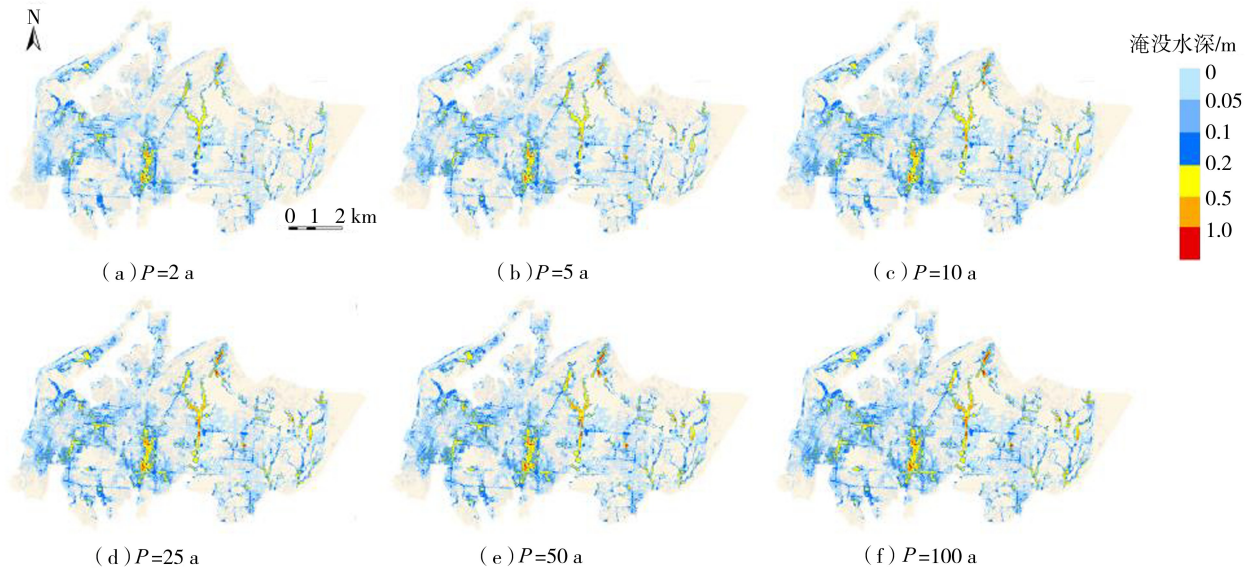


图 8 不同降雨重现期 24 h 降雨淹没深分布

Fig. 8 Inundation depth distribution under 24-h design rainfalls with different return periods

流量作为 SIMWE 模型的输入。尽管这种简化处理可能在降水初期造成淹没水深偏高的结果,但在主要溢流发生时段,模拟结果整体上仍能合理反映淹没空间分布特征,具有较好的实用价值。

3.2.3 内涝风险区识别

结合易涝区域的实际调查情况以及不同降雨重现期不同降雨历时内涝模拟结果,将岳阳市中心城区划分为极高风险区、高风险区、中风险区和低风险区 4 类。划分标准综合考虑淹没水深与临界雨量对应的重现期,以 0.5 m 作为最大淹没水深阈值,若某一区域在 5 a 重现期设计降雨条件下超过阈值,则判定为极高风险区;若在 >5~10 a 重现期设计降雨条件下超过阈值,则区域判定为高风险区;若在

>10~25 a 重现期设计降雨条件下超过阈值,则区域判定为中风险区;若仅在 ≥25 a 重现期设计降雨条件下才可能出现超过阈值的情况,则区域判定为低风险区。根据内涝模拟结果,对于不同降雨历时共识别出 16 处内涝风险区,其中,东茅岭街道柴家山社区、枫桥湖路、琵琶王立交桥和五里牌街道花板桥社区附近、岳阳大道三眼桥街道和西枫树岭社区、冷水铺路、青年东路以北八字门小区和阳光小区均为极高风险区;岳阳楼街道庙前街社区、东茅岭街道炮台山社区、洛王街道大桥湖社区、白石岭村居委会附近为高风险区;洞庭南路、云梦路与岳阳大道交接处、南湖游路、洞庭街道东风湖社区、望岳路街道、雷锋山社区鲁家组和洛王街道洛王社区雷锋山组为中

风险区;其他地区内涝风险相对较低,为低风险区。

4 结 论

a. 基于岳阳市主城区 2020 年 7 月 8 日实测降雨对模型进行验证,模拟结果与实际内涝点位置分布和淹没情况高度吻合,验证了模型可靠性;针对不同降雨重现期(2、5、10、25、50、100 a)设计降雨,模型模拟 3 h 和 24 h 暴雨过程所需时间分别为 5.5、32.5 min,时效性显著,满足实时模拟需求。

b. 总溢流量和淹没面积随降雨重现期的增大均呈对数非线性增长。对于 3 h 降雨历时,降雨重现期从 2 a 增加到 100 a 时,总溢流量从 218 万 m³ 增加到 482 万 m³,淹没面积从 7.53 km² 增加到 13.30 km²;对于 24 h 降雨历时,降雨重现期从 2 a 增加到 100 a 时,总溢流量从 435 万 m³ 增加到 906 万 m³,淹没面积从 7.14 km² 增加到 11.15 km²。

c. 溢流起始时间随降雨重现期增加而分级递进式提前,对于 24 h 降雨历时,100 a 降雨重现期的溢流起始时间较 2 a 降雨重现期提前 50 min。溢流量与降雨强度的变化趋势高度同步,且当降雨强度超过临界阈值后,管网调控能力急剧下降,短历时强降雨对管网冲击更为强烈。

d. 内涝高风险区集中在低洼地带及高密度建成区,空间格局相对稳定,但降雨重现期的增加会显著加剧局部内涝的严重性。模型识别出东茅岭街道柴家山社区、枫桥南路等 16 处内涝风险区。

参考文献:

[1] 姜大膀,王娜. IPCC AR6 报告解读:水循环变化[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17 (6): 699-704. (Jiang Dabang, Wang Na. Water cycle changes: interpretation of IPCC AR6[J]. Climate Change Research, 2021, 17 (6): 699-704. (in Chinese))

[2] 王振亚,姚成,董俊玲,等. 郑州“7·20”特大暴雨降水特征及其内涝影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50 (3): 17-22. (Wang Zhenya, Yao Cheng, Dong Junling, et al. Precipitation characteristic and urban flooding influence of “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50 (3): 17-22. (in Chinese))

[3] 张姣,胡庆芳,黄璟胜,等. 基于 ITA 法和 Mann-Kendall 法的漓江流域极端降水变化解析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52 (6): 15-22. (Zhang Jiao, Hu Qingfang, Huang Jingsheng, et al. Analysis of extreme precipitation changes in Lijiang River Basin based on ITA and Mann-Kendall methods [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (6): 15-22. (in Chinese))

[4] 张伟,王璇,孙慧超,等. 基于多重精度降雨数据的北京市极端降雨事件研究[J]. 水资源保护, 2025, 41 (2): 123-132. (Zhang Wei, Wang Xuan, Sun Huichao, et al. Research on extreme precipitation events in Beijing based on multi-resolution rainfall data [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (2): 123-132. (in Chinese))

[5] 苏爱芳,吕晓娜,崔丽曼,等. 郑州“7.20”极端暴雨天气的基本观测分析[J]. 暴雨灾害, 2021, 40 (5): 445-454. (Su Aifang, Lyu Xiaona, Cui Liman, et al. The basic observational analysis of “7.20” extreme rainstorm in Zhengzhou [J]. Torrential Rain and Disasters, 2021, 40 (5): 445-454. (in Chinese))

[6] 吴辉明,陈文龙,杨芳,等. 深圳龙岗区 2023 年“9·7”极端特大暴雨洪涝灾害风险评估与对策[J]. 中国防汛抗旱, 2024, 34 (1): 36-40. (Wu Huiming, Chen Wenlong, Yang Fang, et al. Risk assessment and countermeasures of flood and waterlogging caused by “9·7” extreme heavy rainstorm in Longgang District of Shenzhen City in 2023 [J]. China Flood & Drought Management, 2024, 34 (1): 36-40. (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] 张金良,罗秋实,王冰洁,等. 城市极端暴雨洪涝灾害成因及对策研究进展[J]. 水资源保护, 2024, 40 (1): 6-15. (Zhang Jinliang, Luo Qiushi, Wang Bingjie, et al. Research progress on causes and countermeasures for extreme rainstorm-induced urban flood disasters [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (1): 6-15. (in Chinese))

[9] 姚蕊,杨群涛,张书亮. 城市暴雨内涝灾害脆弱性研究综述[J]. 水资源保护, 2023, 39 (1): 93-100. (Yao Rui, Yang Quntao, Zhang Shuliang. Review on vulnerability of urban rainstorm waterlogging disaster [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (1): 93-100. (in Chinese))

[10] 宋晓猛,张建云,贺瑞敏,等. 北京城市洪涝问题与成因分析[J]. 水科学进展, 2019, 30 (2): 153-165. (Song Xiaomeng, Zhang Jianyun, He Ruimin, et al. Urban flood and waterlogging and causes analysis in Beijing [J]. Advances in Water Science, 2019, 30 (2): 153-165. (in Chinese))

[11] 李品良,覃光华,曹冷然,等. 基于 MIKE URBAN 的城市内涝模型应用[J]. 水利水电技术, 2018, 49 (12): 11-16. (Li Pinliang, Qin Guanghua, Cao Lingran, et al. Application of MIKE URBAN-based urban waterlogging model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49 (12): 11-16. (in Chinese))

- [12] 王慧亮,吴泽宁,胡彩虹. 基于 GIS 与 SWMM 耦合的城市暴雨洪水淹没分析[J]. 人民黄河,2017,39(8):31-35. (Wang Huiliang, Wu Zening, Hu Caihong. Rainstorm waterlogging and submergence model and its application in urban areas based on GIS and SWMM[J]. Yellow River, 2017,39(8):31-35. (in Chinese))
- [13] 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))
- [14] 黄国如,王欣,黄维. 基于 InfoWorks ICM 模型的城市暴雨内涝模拟[J]. 水电能源科学,2017,35(2):66-70. (Huang Guoru, Wang Xin, Huang Wei. Simulation of rainstorm water logging in urban area based on InfoWorks ICM model[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(2):66-70. (in Chinese))
- [15] 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))
- [16] 向小华,陈颖悟,吴晓玲,等. 城市二维内涝模型的 GPU 并行方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):528-533. (Xiang Xiaohua, Chen Yingwu, Wu Xiaoling, et al. GPU parallelized algorithm of urban two-dimensional inundation model [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2020,48(6):528-533. (in Chinese))
- [17] Liao Yaoxing, Wang Zhaoli, Chen Xiaohong, et al. Fast simulation and prediction of urban pluvial floods using a deep convolutional neural network model[J]. Journal of Hydrology, 2023, 624: 129945.
- [18] 林凯荣,欧阳佳娜,马旭民,等. 基于深度学习的城市内涝积水水深预测模型[J]. 水资源保护,2025,41(1):56-63. (Lin Kairong, Ouyang Jia'na, Ma Xumin, et al. Prediction model of urban waterlogging water depth based on deep learning[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1):56-63. (in Chinese))
- [19] He Jian, Zhang Limin, Xiao Te, et al. Deep learning enables super-resolution hydrodynamic flooding process modeling under spatiotemporally varying rainstorms[J]. Water Research, 2023, 239: 120057.
- [20] Mitás L, Mitásova H. Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention [J]. Water Resources Research, 1998, 34(3):505-516.
- [21] Li Hong, Gao Hongkai, Zhou Yanlai, et al. Usage of SIMWE model to model urban overland flood: a case study in Oslo[J]. Hydrology Research, 2020, 51(2):366-380.
- [22] 黄菊梅,覃鸿,刘学. 岳阳市中心城区水文特征及内涝积水成因[C]//第 35 届中国气象学会年会 SS2 科学家论坛:城市气候变化特征、原因和影响. 合肥:中国气象学会,2018:8-11.
- [23] 朱颖蕾,于永强,俞芳琴,等. 基于 MIKE21 和 MIKE Urban 耦合的湖区平原城市内涝模拟应用研究[J]. 中国农村水利水电,2018(10):177-181. (Zhu Yinglei, Yu Yongqiang, Yu Fangqin, et al. Research on the waterlogging simulation of the lakeshore plain city based on MIKE21 and MIKE urban coupling model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(10):177-181. (in Chinese))
- [24] 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))
- [25] 胡伟贤,何文华,黄国如,等. 城市雨洪模拟技术研究进展[J]. 水科学进展,2010,21(1):137-144. (Hu Weixian, He Wenhua, Huang Guoru, et al. Review of urban storm water simulation techniques[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(1):137-144. (in Chinese))
- [26] 马勇,顾正华,王庭辉,等. 基于 SWMM 的山丘城区防洪排涝能力分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(6):499-505. (Ma Yong, Gu Zhenghua, Wang Tinghui, et al. Analysis of flood control and drainage capacity of hilly city based on SWMM [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(6):499-505. (in Chinese))
- [27] 杨立园,黄标,刘甲春,等. 基于 SWMM-贝叶斯耦合方法的排水管网污染源溯源[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):20-29. (Yang Liyuan, Huang Biao, Liu Jiachun, et al. Pollution source tracing in sewer networks based on a Bayesian-SWMM coupled approach [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(5):20-29. (in Chinese))
- [28] 梅超,刘家宏,王浩,等. SWMM 原理解析与应用展望[J]. 水利水电技术,2017,48(5):33-42. (Mei Chao, Liu Jiahong, Wang Hao, et al. Introduction of basic principle and application prospect for SWMM[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(5):33-42. (in Chinese))

(收稿日期:2025-04-30 编辑:施业)