

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.02.011

基于SWMM和InfoWorks ICM的城市街区洪涝模拟与分析

叶陈雷^{1,2}, 徐宗学^{1,2}, 雷晓辉³, 陈阳⁴, 丁星臣⁴, 梁永帅³

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875;
3. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038; 4. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要:针对我国城市日益突出的洪涝问题,以福州市主城区某街区为例,基于SWMM与InfoWorks ICM构建了城市街区尺度洪涝模拟模型,基于差分进化算法率定SWMM关键参数,并在不同的降雨情景下,模拟了城市街区地表内涝淹没与危险性分布,并对比评估了模拟结果的可靠性。结果表明:基于差分进化算法率定得到的SWMM参数具有较好的效果,两次洪峰的模拟水位和实测水位误差均在1%以内;10 a、20 a、50 a和100 a 4种重现期降雨驱动下,研究区淹没面积分别为3.14 hm²、3.37 hm²、3.61 hm²和3.72 hm²,重现期从10 a到100 a,总淹没面积占比由27.40%上升到32.46%;基于SWMM与ICM耦合的模拟方式在研究区具有较好的适用性。

关键词:洪涝模拟;城市街区;SWMM;InfoWorks ICM;差分进化算法;福州市

中图分类号:TV122⁺.1;P333.2

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2023)02-0087-08

Flood simulation and risk analysis on urban block scale based on SWMM and InfoWorks ICM//YE Chenlei^{1,2}, XU Zongxue^{1,2}, LEI Xiaohui³, CHEN Yang⁴, DING Xingchen⁴, LIANG Yongshuai³ (1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China; 3. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 4. College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Aiming at the increasingly prominent flood problem in cities in China, taking a block in the main urban area of Fuzhou City as an example, a flood simulation model is constructed based on SWMM and InfoWorks ICM. The key parameters of SWMM model are calibrated based on differential evolution algorithm. Under different rainfall scenarios, the inundation and risk distribution of block surface is simulated, and the reliability of simulation results is compared and evaluated. The results showed that the SWMM model parameters were effectively calibrated based on differential evolution algorithm. The errors between simulated and observed water level of two flood peaks were under 1%. Driven by rainfall with return periods of 10 a, 20 a, 50 a, and 100 a, the submerged area were 3.14 hm², 3.37 hm², 3.61 hm², and 3.72 hm² respectively. With return period increasing from 10 a to 100 a, the proportion of total submerged area increased from 27.40% to 32.46%. The simulation method based on the coupling of SWMM and ICM has good applicability in the study area.

Key words: flood simulation; urban blocks; SWMM; InfoWorks ICM; differential evolution algorithm; Fuzhou City

近年来,在气候变化与城市化的影响下,城市水循环过程及其要素发生显著变化^[1],极端水文事件增多增强,城市洪涝频繁发生^[2-3],特别在每年汛期,沿海及滨江城市直接受到暴雨洪涝的威胁^[4-5]。城市洪涝已成为我国城市发展的痼疾,严重制约了我国经济社会的发展^[6]。因此,构建适用的模拟模型是实现城市洪涝过程模拟、预测与分析的重要

手段。

相对于流域地区,城市空间尺度较小,而其下垫面局部地形地物又十分密集,因此,城市洪涝建模过程具有极大的复杂性。作为城市排水系统的主要组成部分,地下管网与地表河道在暴雨内涝时承担排水输水的任务,而面对极端暴雨事件,路面及部分地下空间也会短暂成为排水或蓄水设施。20世纪70

基金项目:国家自然科学基金重点项目(52239003)

作者简介:叶陈雷(1991—),男,博士研究生,主要从事城市洪涝数值模拟研究。E-mail: clye@mail.bnu.edu.cn

年代以来,已逐步发展出几种不同的研究建模方法:①以水文学和水动力学为主的方法;②以一、二维水动力学为主的方法;③以 GIS 地形分析方法近似模拟淹没范围的方法。对应场次洪水,降雨在蒸发、下渗、截留、填洼等过程后形成净雨,净雨经坡面汇流进入检查井或雨水篦子,并由地下管网系统排入下游河道。在洪涝形成至消退过程包含了多个物理子过程,分别采用分布式水文模型和水动力模型进行模拟,具有较强的物理机制^[4]。Mignot 等^[7]基于不规则网格的一、二维水动力学耦合模型实现了城市街道、广场和低洼区域的精细化模拟;马勇等^[8]基于暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM),构建了可考虑管网和山洪的山丘城区水文水动力模型;李娜等^[9]基于二维非恒定流水动力学模型和计算机信息管理及图形技术,在系统中实现了从城市暴雨预报、监测到仿真模拟的研究,不仅能处理实时的不均匀降雨数据,还能处理数值模型计算得到的降雨数据;黄国如等^[10]基于 InfoWorks ICM (以下简称 ICM) 构建了城市暴雨内涝模型,研究了不同降雨下的淹没范围和淹没水深;王自明等^[11]将 SWMM 计算得到的管网节点溢流作为二维地表模型的源汇项,将一、二维模型进行了耦合模拟。

单一模型往往侧重于洪涝过程的子过程模拟,不少研究集中于不同模型的耦合,这种模拟方式可以实现不同模块的耦合、互补。例如:王兆礼等^[12]基于 TELEMAC-2D 与 SWMM 实现了城市不同重现期暴雨下的内涝数值模拟,并评估了耦合模型的适用性;孔宇等^[13]将 SWMM 中管网排口径流作为边界条件导入到 MIKE11 模型中,构建了 SWMM-MIKE11 耦合模型;曾照洋等^[14]将 SWMM 与 LISFLOOD 模型耦合,并分析了东莞市典型区域暴雨内涝风险;向小华等^[15]耦合 SWMM 与 LISFLOOD-FP 模型,采用 GPU 并行计算技术加速城市二维内涝模拟,大幅提升了计算效率。这些采取耦合多个模型的方式有效拓展了单一模型的功能。另外,针对洪涝风险的研究也是相关研究的重要部分,为有效评估城市洪涝风险的空间异质性,常通过融合洪涝中的关键因素以量化评估城市洪涝风险,如冯均等^[16]构建城市内涝事理图谱,提出了内涝成因分析框架。洪涝风险评估是分析洪涝风险信息、识别高风险区域、减轻城市洪涝灾害的重要技术手段^[17],同时也是评估洪涝减灾措施的有效手段^[18]。洪水危险性分析是对致灾因子的特征进行分析,以获取城市洪涝的淹没范围、淹没水深、流速和淹没历时等关键洪涝特征,为下一步的暴露性、脆弱性分析

做准备,其中淹没深度、流速是最常用的属性^[19]。

目前对不同模型耦合的研究一般聚焦于发挥两个模型各自的功能优势,而对耦合过程中开源模型的信息仍有待继续挖掘。为此,本文以福州市中心城区某典型社区为例,基于街区排水管网及地形等数据,结合 SWMM 与 ICM 构建街区尺度的洪涝模型。SWMM 能够方便与外部参数进行交互,基于优化算法可以快速准确地率定水文过程参数;ICM 实现了高分辨率的二维水动力模拟,可以将 SWMM 输出的节点溢流过程作为点源输入。

1 研究区概况

福州地处我国东南沿海的闽江入海口,属于亚热带海洋性季风气候区,是我国东南沿海的重要城市。福州市中心主要包括鼓楼区、晋安区和台江区,人口密度大,基础设施集中,在面对自然灾害时易遭受较大损失。中心城区位于闽江北岸,东、西、北三面环山,南临闽江,受暴雨、内涝、潮位的多重威胁。近年来,中心城区已多次遭受洪涝极端事件,台风“苏迪罗”(2015 年)、“鲇鱼”(2016 年)、“莫兰蒂”(2016 年)、“玛莉亚”(2018 年)等均造成中心城区多处出现严重内涝,交通停滞,以及经济财产的严重损失。2021 年 8 月,台风“卢碧”又一次造成主城区多地暴雨内涝,道路中断。本文所选的研究区位于中心城区琴亭湖附近,总面积约为 11.48 hm²。研究区空间尺度较小,但具有典型的城市化下垫面特征。研究区概况如图 1 所示,北侧为福州江北城区主要河道晋安河的支流,东侧为邻接晋安河的茶园路,西侧与南侧均为主干道。

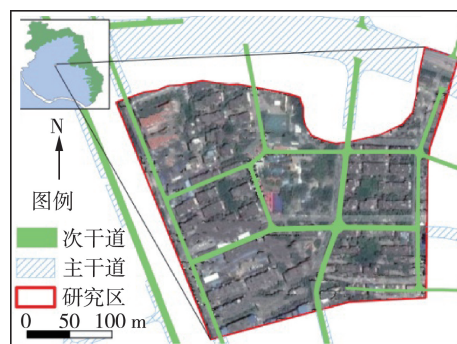


图 1 研究区概况

Fig.1 Description of the studied area

排水管网数据是研究排水洪涝问题的基础数据,表 1 给出了建模时所用到的研究区部分管道编号、进水口和出水口检查井编号、管道长度以及管径信息。所有管道均与其对应的进水口和出水口具有空间上的拓扑联系,且研究区内管道横截面均为圆形。

表 1 部分建模数据

Table 1 Part of the data for model building

管道编号	进水口编号	出水口编号	管道长/m	管径/mm
C1	J38	J79	22.3	600
C2	J1	J2	26.6	500
C3	J2	J10	20.5	500
C4	J3	J4	20.1	400
C5	J4	J26	26.7	300

2 研究方法

2.1 SWMM

SWMM 是一个分布式水文模型,已在城市暴雨径流估算中得到广泛应用,本文基于 SWMM 对研究区的降雨径流关系进行模拟。与大尺度流域的水文过程模拟不同,城市洪涝模拟主要针对场次暴雨洪水,计算时可以对蒸散发、截留等过程适当忽略。采用泰森多边形法与研究区卫星影像,将流域划分成若干个子汇水区,再将每个子汇水区作为集总式产汇流模块,各自相对独立地完成下渗与坡面汇流计算。采用 SWMM 提供的 Horton 模块计算下渗过程。SWMM 有恒定流、运动波、动力波 3 种计算方式演算管网汇流,由于动力波法对圣维南方程组进行完全求解,具有较高的准确性,因此,本文采用动力波法,其数学表达式如下:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gn^2 \frac{Q|Q|}{AR^{4/3}} = 0 \quad (2)$$

式中: A 为过水断面面积, m^2 ; Q 为过流量, m^3/s ; t 为时间变量, s ; x 为空间变量, m ; Z 为水位, m ; R 为水力半径, m ; n 为糙率; g 为重力加速度, m/s^2 。

2.2 ICM

当检查井或雨水井中水位高于相应的地面高程时,地下管网系统局部饱和,因而水量在溢流节点溢出地面形成路面积水。基于 SWMM 可以提取溢流检查井的洪水过程,但是 SWMM 无法直接计算水流的二维淹没过程,单独使用 SWMM 无法得到地表的内涝积水特征,因此本文采用 ICM 的二维计算模块模拟检查井水流溢出地面的过程。ICM 在同一个计算框架中实现了城市及流域水文模块、水动力模块、水质模块、地下水模块等全过程耦合,并提供了 GPU 并行计算功能,大幅提高了二维模型计算效率。采用 Godunov 型有限体积法数值求解浅水方程,守恒型浅水方程表达式如下:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = S \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } U &= \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix} & F &= \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \\ huv \end{bmatrix} \\ G &= \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \end{bmatrix} & S &= \begin{bmatrix} 0 \\ -gh \frac{\partial b}{\partial x} - \frac{gn^2|u|\sqrt{u^2+v^2}}{h^{1/3}} \\ -gh \frac{\partial b}{\partial y} - \frac{gn^2|v|\sqrt{u^2+v^2}}{h^{1/3}} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

式中: y 为空间变量, m ; U 为守恒型变量; F 、 G 分别为 x 和 y 方向的通量; S 为源项变量; u 、 v 分别为 x 和 y 方向的流速, m/s ; h 为水深, m ; b 为河底高程, m ;

2.3 差分进化算法

SWMM 能模拟水文、水力、水质等多个过程,涉及较多待定参数。部分参数(特征宽度、坡度、管径、管长等)属于确定性参数,一般通过实际测量或地理空间分析获得。另一部分参数属于不确定参数(糙率、下渗率等),一般需要进行率定调试,这些参数大多具有物理意义,因此有较明确的取值范围,而水文过程的复杂性又使得这类待率定参数有明显的“异参同效性”。在模型率定时,常基于每个参数的阈值对影响水文过程的各参数进行寻优,使模型计算结果与实测值更吻合。本文采用差分进化算法对 SWMM 进行自动率定,并采用纳什效率系数(Nash-Sutcliffe coefficient of efficiency, NSE)评估 SWMM 模拟结果。

与遗传算法类似,差分进化算法主要包括初始化、变异、交叉、选择等步骤。差分进化算法从种群中随机挑选两个个体,并将两者的差作为第三个个体的变化来源进行变异,是通过种群中个体间的合作与竞争而产生的智能优化搜索算法。算法参数包括种群大小、缩放因子和杂交概率等。在对参数及种群初始化后,将算法优化更新后的个体变量值输入 SWMM 的输入文件中,通过调用 SWMM 计算引擎获取率定点的模拟值,进而得到目标函数。依次执行变异、交叉、选择运算,直到满足迭代终止条件,得到最优个体。本文基于该算法的率定步骤如下:

步骤 1 给定 SWMM 需要率定的参数取值范围,并初始化差分进化算法的参数,生成指定种群规模及维度的实参数向量。初始种群中的个体按下式生成:

$$x_i = x_{\min} + r(x_{\max} - x_{\min}) \quad (4)$$

式中: x_i 为初始种群的个体变量值; $x_{\min}$ 、 $x_{\max}$ 分别为种群个体变量取值的上、下边界; r 为 $(0, 1)$ 之间的

随机数。

步骤2 调用一次 SWMM 运行程序进行计算,并读取 SWMM 计算结果,计算种群个体适应度函数值。

步骤3 判断是否满足迭代终止条件,若不满足,执行步骤4;若满足,结束循环过程。

步骤4 依次通过种群个体变异、交叉、选择操作,完成种群的更新。

步骤5 计算更新后种群个体适应度函数值,转到步骤2。

生成变异个体是算法的关键过程,在父代个体间随机选择3个个体,选择其中的两个个体进行向量作差生成差分矢量,并将第三个个体与该差分矢量求和生成新的变异个体。变异个体计算公式如下:

$$x' = x_{r_1} + f(x_{r_2} - x_{r_3}) \quad (5)$$

式中: x' 为生成的变异个体变量值; r_1, r_2, r_3 为算法中的3个不相等随机数,并且和 i 不等; $x_{r_1}, x_{r_2}, x_{r_3}$ 为父代的3个个体变量值; f 为缩放因子,一般在 $[0, 2]$ 之间选择,通常取0.5。 f 主要影响算法的全局寻优能力,当 f 较小时,算法对局部空间的搜索能力更好;而 f 较大时,算法能更好地捕捉全局最优点,而避免陷入局部最优点。

经过若干次迭代后得到的种群个体值即为 SWMM 的参数值,模型参数优化过程见图2。

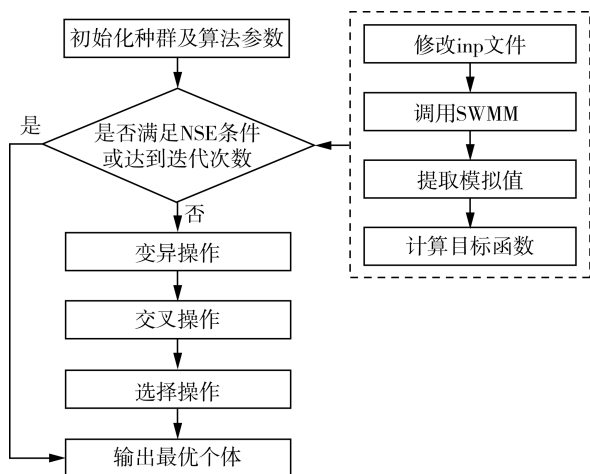


图2 差分进化算法优化模型参数流程

Fig.2 Flowchart of model parameter optimization based on differential evolution algorithm

2.4 洪涝危险性分析

基于二维水动力模型计算得到的水深、流速等一系列洪涝关键特征,结合模型计算结果以及街区下垫面特征计算研究区洪涝危险性。采用英国环保局提出的洪涝危险性分析方法^[20],利用模拟得到的流速、水深以及泥石流因子组合成的表达式(式(6))

来定量表征各点的洪涝危险性,量化得到研究区洪涝危险性的空间分布。

$$H_R = h(u + 0.5) + C_{DF} \quad (6)$$

式中: H_R 为洪涝危险性的量化指标; u 为洪水流速, m/s ; C_{DF} 为泥石流因子,指的是洪水中因携带泥石流而增加的危险系数。 C_{DF} 是对洪水强度特征与区域下垫面自然特征的综合表征,利用英国环保局提供的简化方法反映该因素的影响,即根据实际的水深、流速以及下垫面类型综合确定^[21]。根据 H_R 值划分为 <0.75 、 $0.75 \sim <1.25$ 、 $1.25 \sim <2$ 、 ≥ 2 几个级别,分别表示轻度、中度、重度、极重度4个等级的危险性。

3 结果与讨论

3.1 SWMM 参数优选

本文研究区相对封闭,排水特征及与外部的水量交换均比较清晰。街区下垫面主要由屋顶、街道、不透水广场、绿化带等组成,在 SWMM 中相应被概化为透水面和不透水面两种下垫面类型。在每一个子汇水单元中,两种类型下垫面的比例由其所包含的土地类型确定。下渗模块与子汇水区模块的待率定参数反映了特定下垫面的水文特征。为保证模型计算的准确性,需要对 SWMM 产汇流相关参数进行率定,以提高模型的鲁棒性和泛化能力,使模拟结果与实测结果更为吻合。基于泰森多边形法对研究区汇水单元进行初步划分后,根据研究区的卫星影像,对汇水单元进行再分配。汇水单元的主要参数包括子汇水区面积、不透水面百分比、特征宽度、平均坡度百分比、不透水面和透水面曼宁系数、不透水面和透水面洼地蓄水深度、最大和最小入渗速率、衰减系数等。差分进化算法参数设置如下:种群大小为80,变异算子为1.2,交叉算子为0.7,进化代数数为200。参考文献[21-22]中 SWMM 的取值范围,分别设置 SWMM 子汇水区模块、下渗模块、管道模块中的参数取值范围,基于算法自动寻优来最终确定模型参数。绘制透水面曼宁系数和最大下渗率两个参数的更新过程如图3所示,可以看出,迭代过程中,参数在120代前具有比较明显的波动特征,之后趋于稳定,其他参数在迭代更新过程中具有类似的特征。因此,经过200次迭代得到最终的模型参数。各模块参数设置范围及优化结果如表2所示。

率定期为20180531场次降雨,降水量为43.8 mm,降雨历时为200 min。通过该场次降雨模拟得到纳什效率系数为0.79,实测峰现时间为当日20:40,最高水位为4.64 m;而模型模拟得到峰现时间为20:35,最高水位为4.678 m。验证期选取20180620场次降雨,降水量为53.1 mm,降雨历时为240 min。

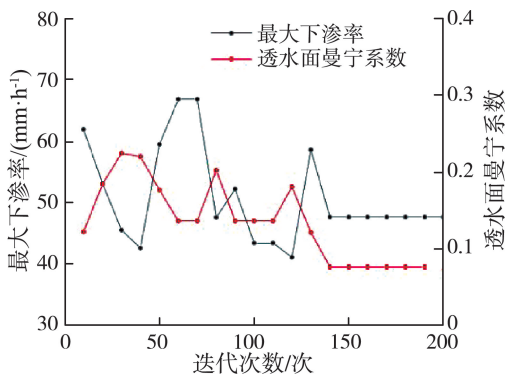


图3 参数迭代过程

Fig. 3 Process of parameter iteration

表2 SWMM 主要参数

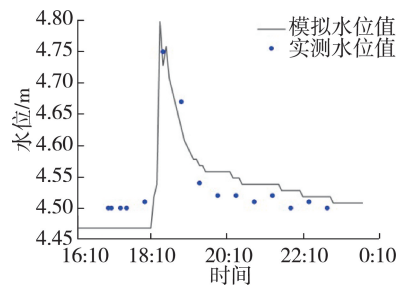
Table 2 Main parameters of SWMM

模块	模型参数	单位	取值范围	优化结果
子汇水区模块	不透水面曼宁系数		0.011 ~ 0.024	0.021
	透水面曼宁系数		0.060 ~ 0.3	0.076
	不透水面洼地蓄水深度	mm	2 ~ 4	2.931
	透水面洼地蓄水深度	mm	2.5 ~ 10	3.028
下渗模块	最大下渗率	mm/h	30 ~ 90	47.663
	最小下渗率	mm/h	0.1 ~ 10	1.760
	衰减系数		2 ~ 7	6.938
	干燥时间	d	2 ~ 10	9
管道模块	糙率系数		0.01 ~ 0.02	0.01

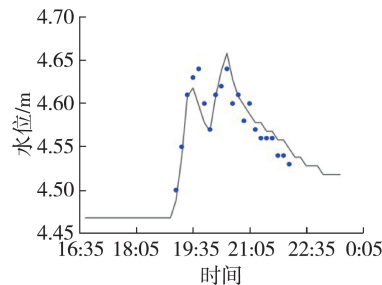
计算得到纳什效率系数为 0.81, 实测峰现时间为当日 18:30, 实测最高水位为 4.75 m; 而模型模拟得到的峰现时间为 18:25, 最高水位为 4.798 m。模拟水位过程与实测水位过程的对比见图 4, 可见模型的模拟效果较好, 可以用于实际洪涝情景分析与计算。两次洪峰的模拟水位和实测水位误差均在 1% 以内, 模型的拟合度较高。

3.2 洪涝淹没状态

采用福州当地设计暴雨进行模拟, 暴雨强度公式采用福建省标准 DBJ13-52—2003《福建省城市及部分县城暴雨强度公式》。为分析研究区内涝淹没状态, 采用 10 a、20 a、50 a 和 100 a 4 种重现期的设计暴雨, 分别进行二维淹没状态模拟。提取 SWMM 输出的管网节点溢流量序列作为二维模型的点源输入, 实现一、二维单向耦合模拟。在 ICM 中, 将建筑所在区域作为计算内边界, 不参与二维计算, 同时考虑到道路比周边地势更低, 将道路所在面图层的网格高程统一降低。因此, 通过卫星影像提取研究区内建筑物和道路的精细化轮廓信息, 并对街区中的建筑和主干道做预处理。ICM 使用非结构网格计算, 设置最小网格单元面积为 4 m^2 , 最大网格单元面积为 25 m^2 , 模拟时间设置为 3 h。考虑到水流一般通过管道排出, 设置二维计算域外边界为“Vertical Wall”模式, 使得水量不能通过计算域外边



(a) 率定期



(b) 验定期

图4 模拟水位与实测水位对比

Fig. 4 Comparison between simulated and observed water level

界进行交互。结果显示, 在 10 a、20 a、50 a 和 100 a 4 种重现期降雨驱动下, 淹没面积分别为 3.14 hm^2 、 3.37 hm^2 、 3.61 hm^2 和 3.72 hm^2 。其中, 重现期 P 由 10 a 到 100 a, 总淹没面积占比由 27.40% 上升到 32.46%。将本文 SWMM 与 ICM 单向耦合的计算方式记作模式 A, 图 5 为不同重现期降雨驱动下研究区模式 A 最大淹没水深模拟结果, 表 3 为不同水深范围对应的淹没面积。

表3 模式 A 模拟的内涝淹没面积

Table 3 Inundation area statistics of mode A

水深/m	淹没面积/ hm^2			
	$P = 10 \text{ a}$	$P = 20 \text{ a}$	$P = 50 \text{ a}$	$P = 100 \text{ a}$
0 ~ 0.2	2.40	2.44	2.49	2.46
> 2.0 ~ 0.6	0.69	0.88	1.06	1.20
> 0.6	0.05	0.05	0.06	0.06

为进一步分析本文采用的耦合模式计算结果, 以基于 ICM 构建的水文水动力耦合模型的耦合模式(模式 B)进行对比。模式 B 采用了 ICM 提供的紧密耦合机制, 在每一个计算步长上对溢流点溢流进行浅水模拟。而当管网排水能力恢复, 管流由有压流转变为明渠流后, 二维表面的积水相应回流至管网。模式 B 的模型相关参数参考文献[23], 具体建模过程不再赘述。同样设置最小网格单元面积为 4 m^2 , 最大网格单元面积为 25 m^2 , 模拟时间设置为 3 h。结果显示, 在 10 a、20 a、50 a、100 a 4 种重现期降雨驱动下, 淹没面积分别为 0.98 hm^2 、 1.35 hm^2 、 2.10 hm^2 和 2.35 hm^2 , 重现期由 10 a 到 100 a, 总淹没面积占比由 8.55% 上升到 20.51%。图 6 为不同

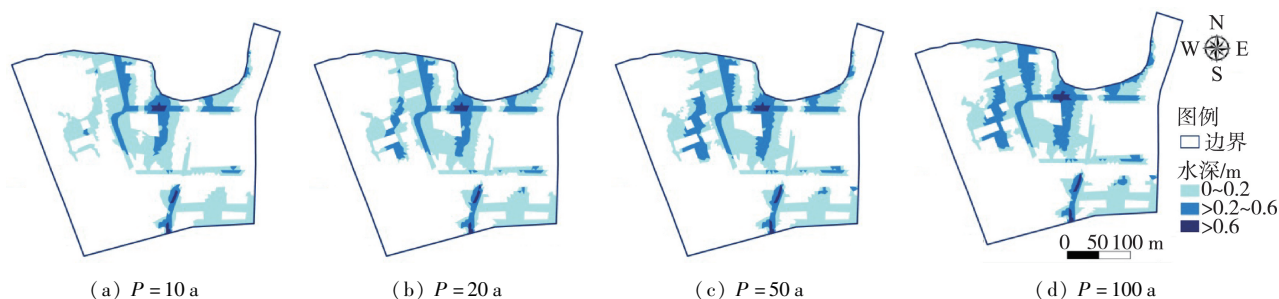


图5 模式 A 最大淹没水深模拟结果

Fig.5 Maximum inundation depth simulation results of mode A

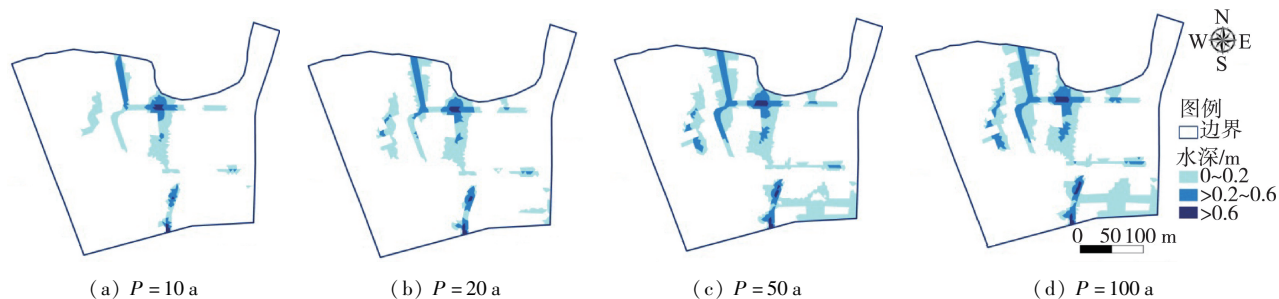


图6 模式 B 最大淹没水深模拟结果

Fig.6 Maximum inundation depth simulation results of mode B

重现期降雨驱动下研究区模式 B 最大淹没水深模拟结果,表 4 为不同水深范围对应的淹没面积。

表 4 模式 B 模拟的内涝淹没面积

Table 4 Inundation area statistics of mode B

水深/m	淹没面积/hm ²			
	P = 10 a	P = 20 a	P = 50 a	P = 100 a
0 ~ 0.2	0.70	0.97	1.58	1.73
> 2.0 ~ 0.6	0.25	0.35	0.48	0.57
> 0.6	0.03	0.03	0.04	0.05

在 4 种重现期降雨驱动下,模式 A 模拟得到的总淹没面积与各个分区的淹没面积均要大于模式 B 的模拟结果。分析表 4 和表 5 可知:①对小于 0.2 m 水深的淹没面积,模式 A 模拟结果明显高于模式 B,而对于淹没水深更大的区间,模式 A 与模式 B 模拟结果差异减小,尤其是大于 0.6 m 水深的淹没面积,模式 A 与模式 B 模拟结果比较接近;②随着降雨重现期增大,模式 A 和模式 B 模拟结果之间的差异在减小,小水深对应的淹没面积增加比较明显。上述现象主要是由模拟模式的不同所致。在模式 A 中,统计 SWMM 模拟的节点溢流量数据,将其作为点源入流驱动 ICM 二维计算模块,并基于二维网格计算街区洪泛水量,而这种驱动模式具有单向性,溢流量仅由管网系统输入到地表网格,而缺乏两者之间的互馈作用。而在模式 B 中,管网系统的超载水量与二维网格的交换通过堰流公式计算,且两者具有双向性,洪峰后随着排水系统持续运行,部分超载管网逐渐恢复排水能力,此时地面积水回流至管网中。

总的来说,模式 A 的模拟结果一般要大于模式 B 的模拟结果,淹没水深较小的区域两者差异较大,而淹没水深较大的区域两者差异较小。同时由于更大的降雨导致的淹没情况更为严重,排水能力不足的管网或地势低洼区极易被淹,所以在强降雨下两个模式的差异相对较小。

3.3 内涝危险性分析

城市局部街区过大的水深与过大的流速会对街区造成不同类型的破坏^[5]。为进一步呈现研究区的洪涝危险性,由式(6)计算得到研究区洪涝危险性,其空间分布结果见图 7 和图 8。由于研究区为市中心城区,将泥石流因子 C_{DF} 根据水深取为 0 或 1^[21]。结合 H_R 值表示的轻度、中度、重度、极重度 4 个洪涝危险性等级,由式(6)计算得到的 H_R 最大值未超过 2,因此模拟得到的研究区洪涝危险性只有轻度、中度和重度 3 个等级。对比图 7 和图 8 可知,与内涝淹没水深结果类似,模式 A 模拟得到的内涝危险性空间分布情况与模式 B 模拟结果较为接近。本文采用式(6)得到的洪涝危险性量化指标值与流速和水深有关,模式 A 下的淹没情势总体上比模式 B 下更严重,这使得模式 B 得到的危险性程度要稍弱于模式 A。

4 结 论

a. 基于差分进化算法对研究区 SWMM 的参数率定具有较好的效果。率定期降雨(20180531 场

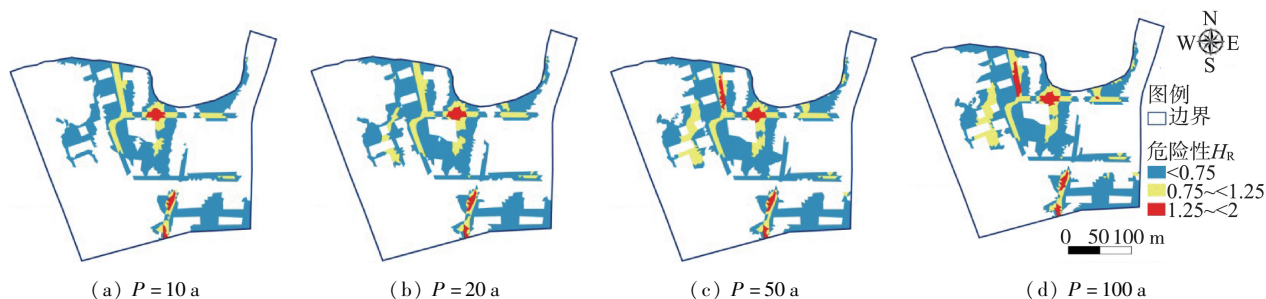


图7 模式A下内涝危险性空间分布

Fig.7 Spatial distribution of flood hazard of mode A

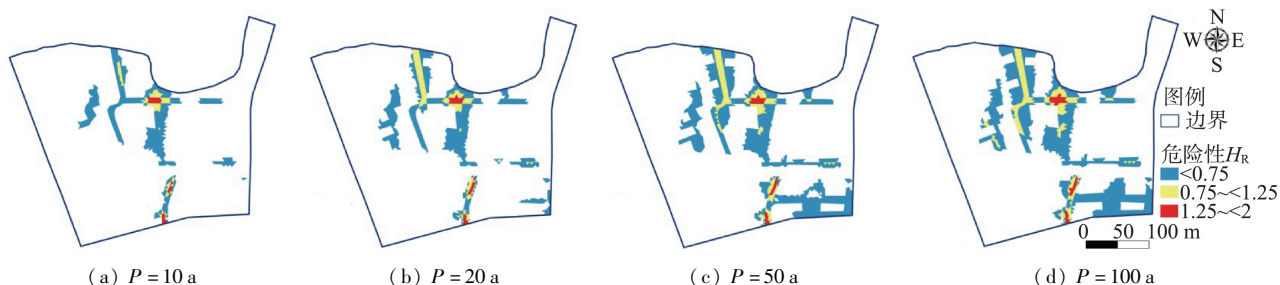


图8 模式B下内涝危险性空间分布

Fig.8 Spatial distribution of flood hazard of mode B

次)和验证期降雨(20180620 场次)计算得到纳什效率系数分别为 0.79 和 0.81。两次峰值的模拟水位和实测水位误差均在 1% 以内,模型拟合度较高。

b. 研究区在 10 a、20、50 a 和 100 a 4 种重现期降雨驱动下模拟的淹没面积分别为 3.14 hm²、3.37 hm²、3.61 hm²和 3.72 hm²。随着重现期增大,淹没情况更为严重,重现期由 10 a 到 100 a,总淹没面积占比由 27.40% 上升到 32.46%。

c. 对于大于 0.6 m 水深淹没范围的模拟结果,模式 A 与模式 B 比较接近。随着重现期增大,模式 A 和模式 B 之间的差异在减小,小水深对应的淹没面积增加比较明显。

参考文献:

- [1] 徐宗学,赵刚,程涛.“城市看海”:城市水文学面临的挑战与机遇[J]. 中国防汛抗旱,2016,26(5):54-55. (XU Zongxue, ZHAO Gang, CHENG Tao. “Looking at sea in city”: challenges and opportunities for urban hydrology [J]. China Flood & Drought Management, 2016,26(5):54-55. (in Chinese))
- [2] 张建云,王银堂,胡庆芳,等.海绵城市建设有关问题讨论[J]. 水科学进展,2016,27(6):793-799. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, HU Qingfang, et al. Discussion and views on some issues of the sponage city construction in China[J]. Advances in Water Science, 2016,27(6):793-799. (in Chinese))
- [3] 张书函,郑凡东,邸苏闯,等.从郑州“2021.7.20”暴雨

洪涝思考北京的城市内涝防治[J]. 中国防汛抗旱, 2021,31(9):5-11. (ZHANG Shuhan, ZHENG Fandong, DI Suchuang, et al. Thoughts on urban waterlogging control in Beijing from the rainstorm and flood of “2021. 7. 20” in Zhengzhou [J], 2021, 31 (9): 5-11. (in Chinese))

- [4] 徐宗学,叶陈雷.城市暴雨洪涝模拟:原理、模型与展望[J]. 水利学报,2021,52(4):381-392. (XU Zongxue, YE Chenlei. Simulation of urban flooding/waterlogging processes:principle,models and prospects[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52 (4): 381-392. (in Chinese))
- [5] 徐宗学,叶陈雷.从“城市看海”到“城市看江”:极端暴雨情景下福州市洪涝过程模拟与风险分析[J]. 中国防汛抗旱,2021,31(9):12-20. (XU Zongxue, YE Chenlei. From “looking at sea in city” to “looking at river in city”: simulation and risk analysis of flood and waterlogging process in Fuzhou City under extreme rainstorm scenarios [J]. China Flood & Drought Management, 2021,31(9):12-20. (in Chinese))
- [6] 徐宗学,程涛.城市水管理与海绵城市建设之理论基础:城市水文学研究进展[J]. 水利学报,2019,50(1):53-61. (XU Zongxue, CHENG Tao. Basic theory for urban water management and sponge city: review on urban hydrology[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(1):53-61. (in Chinese))
- [7] MIGNOT E, PAQUIER A, HAIDER S. Modeling floods in a dense urban area using 2D shallow water equations [J]. Journal of Hydrology,2006,327(1/2):186-199.

- [8] 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))
- [9] 李娜,仇劲卫,程晓陶,等. 天津市城区暴雨内涝仿真模拟系统的研究[J]. 自然灾害学报, 2002, 11 (2): 112-118. (LI Na, CHOU Jinwei, CHENG Xiaotao, et al. Study on simulation system of rainstorm waterlogging in Tianjin City [J], Journal of Natural Disasters, 2002, 11 (2): 112-118. (in Chinese))
- [10] 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))
- [11] 王自明,查良瑜,王斌. 二维地表水动力模型与 SWMM 耦合研究及应用[J]. 浙江水利科技, 2019, 47 (4): 1-4. (WANG Ziming, ZHA Liangyu, WANG Bin. Research and Application of coupled model of 2D surface hydrodynamics and SWMM [J]. Zhejiang Hydraulics, 2019, 47 (4): 1-4. (in Chinese))
- [12] 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))
- [13] 孔宇,孙巍,李小龙,等. 河道海绵建设中 SWMM-MIKE 11 耦合模型的构建及应用思路[J]. 水资源保护, 2021, 37 (6): 74-79. (KONG Yu, SUN Wei, LI Xiaolong, et al. Building and application idea of SWMM-MIKE 11 coupling model in sponge river construction [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (6): 74-79. (in Chinese))
- [14] 曾照洋,王兆礼,吴旭树. 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 Zhaoxiang, 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))
- [15] 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))
- [16] 冯钧,王云峰,邬炜,等. 城市内涝事理图谱构建方法及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48 (6): 479-487. (FENG Jun, WANG Yunfeng, WU Wei, et al. Construction method and application of event logic graph for urban waterlogging [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48 (6): 479-487. (in Chinese))
- [17] MEYER V, SCHEUER S, HAASE D. A multicriteria approach for flood risk mapping exemplified at the Mulde River, Germany [J]. Natural Hazards, 2009, 48 (1): 17-39.
- [18] ZHOU Q, MIKKELSEN P S, HALSNAES K, et al. Framework for economic pluvial flood risk assessment considering climate change effects and adaptation benefits [J]. Journal of Hydrology, 2012, 414-415: 539-549.
- [19] TENG J, JAKENMAN A J, VAZE J, et al. Flood inundation modelling: a review of methods, recent advances and uncertainty analysis [J]. Environmental Modelling & Software, 2017, 90: 201-216.
- [20] 王静,李娜,王杉. 洪水危险性评价指标与等级划分研究综述[J]. 中国防汛抗旱, 2019, 29 (12): 21-26. (WANG Jing, LI Na, WANG Shan. Review on flood hazard assessment index and grade classification [J]. China Flood & Drought Management, 2019, 29 (12): 21-26. (in Chinese))
- [21] 王文川,陈阳,康爱卿. 基于 SWMM 模型的城市 LID 措施优选研究[J]. 水利规划与设计, 2019 (11): 69-72. (WANG Wenchuan, CHEN Yang, KANG Aiqing. Study on optimization urban LID measures based on SWMM model [J]. Water Resources Planning and Design, 2019 (11): 69-72. (in Chinese))
- [22] 常晓栋,徐宗学,赵刚,等. 基于 Sobol 方法的 SWMM 模型参数敏感性分析[J]. 水力发电学报, 2018, 37 (3): 59-68. (CHANG Xiaodong, XU Zongxue, ZHAO Gang, et al. Sensitivity analysis on SWMM model parameters based on Sobol method [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37 (3): 59-68. (in Chinese))
- [23] YE C, XU Z, LEI X, et al. Assessment of the impact of urban water system scheduling on urban flooding by using coupled hydrological and hydrodynamic model in Fuzhou City, China [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 321: 115935.

(收稿日期: 2022-02-20 编辑: 熊水斌)