

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.04.022

晋城市片区洪涝过程响应分析与马路行洪模拟

舒心怡^{1,2}, 徐宗学^{1,2}, 叶陈雷^{1,2}, 廖如婷^{1,2}, 黄亦轩^{1,2}, 贾书惠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. 中国城市规划设计研究院, 北京 100044)

摘要:以晋城市金村区为例,利用SWMM与ICM-2D模型进行多情景洪涝过程模拟,分析降雨雨型与下垫面对晋城市片区内涝的影响;构建双层SWMM模拟马路行洪,分析金村大道和珏山路的淹没特征,并与ICM-2D模型模拟结果进行对比验证。结果表明:随着雨峰系数与降雨重现期的增大,地表洪水总量、淹没范围与水深增大,危险性等级提高;同一降雨重现期下的雨峰与洪峰间的时间间隔随雨峰系数的增大而减小;当52.53%的下垫面转化为不透水面时,同一降雨重现期下的综合径流系数约增加0.5;金村大道市委党校路段与珏山路水西村路段是主要易涝区,淹没面积分别为0.50 hm²和1.31 hm²;双层SWMM在识别易涝点与推求洪水淹没要素方面具有较好的适用性。

关键词:洪涝模拟;马路行洪;SWMM;ICM-2D模型;晋城市

中图分类号:TV122⁺.1;TU992 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)04-0176-011

Flooding/waterlogging process response analysis and road flooding simulation in urban area of Jincheng City //SHU Xinyi^{1,2}, XU Zongxue^{1,2}, YE Chenlei^{1,2}, LIAO Ruting^{1,2}, HUANG Yixuan^{1,2}, JIA Shuhui³ (1. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China; 3. China Academy of Urban Planning and Design, Beijing 100044, China)

Abstract: Taking Jincun District of Jincheng City as an example, the storm water management model (SWMM) and integrated catchment modelling (ICM)-2D model were used to simulate the multi-scenario flooding process, and the influences of rainfall pattern and underlying surface on flooding/waterlogging were analyzed. A double-layer SWMM was constructed to simulate road flooding, and the submergence characteristics of Jincun Avenue and Jueshan Road were simulated and compared with the ICM-2D model simulation results. The results showed that with the increase of rain peak coefficient and rainfall return period, the total amount of surface flood, submerged range, and water depth increased, and the risk level increased. The time interval between the rain peak and flood peak under the same rainfall return period decreased with the increase of the rain peak coefficient. When 52.53% of the underlying surface was converted into impervious surface, the comprehensive runoff coefficient under the same rainfall return period increased by about 0.5, and the Party School section of Jincun Avenue and Shuixi Village section of Jueshan Road were the main flooding/waterlogging areas, with the submerged areas being 0.5 hm² and 1.31 hm², respectively. The double-layer SWMM has good applicability in identifying flood-prone points and deriving flood inundation factors.

Key words: flooding/waterlogging simulation; road flooding; SWMM; ICM-2D model; Jincheng City

城市化快速发展与气候变化共同作用深刻影响了城市水循环过程,导致极端降水事件发生频率增加,城市排水系统安全压力加大,城市内涝问题日益突出,暴雨洪涝风险增大^[1-2]。2018年北京“7·16”^[3]与2021年郑州“7·20”^[4]特大暴雨等极端降水事件广受社会关注,造成了一定的社会经济

损失。政府间气候变化专门委员会第六次评估报告指出,气候变化导致全球地表温度持续上升,将进一步影响全球水循环,极端事件的频率和强度将继续增大^[5]。为应对日益严重的城市洪涝问题,许多专家学者针对城市暴雨洪涝模拟进行了大量的研究工作。暴雨洪水管理模型(storm water management

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC1502701)

作者简介:舒心怡(1998—),女,硕士研究生,主要从事城市水文学研究。E-mail:shuxinyi@mail.bnu.edu.cn

通信作者:徐宗学(1962—),男,教授,博士,主要从事城市水文学研究。E-mail:zxu@bnu.edu.cn

model,SWMM)是应用较为广泛的城市雨洪管理模型,马勇等^[6]基于SWMM模拟了山丘城区的排水流量过程,李雄飞等^[7]基于SWMM分析了不同工况不同降雨情景下的内涝情况。然而SWMM仅可对水文过程和一维管流过程进行计算,无法得到积水点的淹没情况。为此,相关学者开展了一系列研究,在SWMM功能的基础上进行了一定程度的扩展,将GIS与SWMM结合开展了基于地形淹没方法的内涝模拟,如周倩倩等^[8]提出了GIS洼地和径流通路的提取方法,准确识别并提取了易于造成地表淹没的地形特征;王慧亮等^[9]基于GIS和SWMM构建了洪涝淹没分析模型,模拟分析了城市雨洪淹没深度等级及其分布。此外,相关学者还通过构建水文水动力耦合模型,进行了更为精细化的内涝模拟,如叶陈雷等^[10]基于SWMM与InfoWorks ICM(integrated catchment modelling)模型模拟了街区尺度的洪涝特征;王兆礼等^[11]耦合SWMM与TELEMAC-2D模型模拟了极端暴雨下的城区内涝情况。

水文水动力耦合模型在城市暴雨内涝研究中得到了较为广泛的应用^[12]。然而,一维管网与二维地表产汇流模块的耦合涉及多过程、多模块、多尺度,实际情况十分复杂^[10],同时对于基础资料要求较高,建模难度较大,模拟结果不确定性程度较高。城市内部不同位置内涝风险等级存在差异,人们往往更加重视对经济社会发展影响较大的局部易涝区域,模拟分析其内涝淹没特征。道路作为城市各子系统之间的重要纽带,由于道路硬化且地势相对较低,雨水更易汇集在路面形成洪水,城市内涝问题易影响道路的交通运输功能,从而造成一定的社会经济损失。基于点状边界的水文水动力耦合模型的驱动机制无法满足对于马路行洪现象的精确描述^[13],一、二维耦合模型通常伴随较大的计算量,会消耗过多的计算资源,在洪涝预警预报中难以满足时效性要求。

本文通过SWMM和ICM-2D模型,从降雨过程和城市化进程两个方面进行内涝模拟分析,识别典型易涝区;选取典型行洪街道,通过地表低洼区提取和道路概化,构建双层SWMM,快速模拟城区马路在极端降雨下的洪水演进特征。为分析其准确性及适用性,将马路行洪结果与ICM-2D模型模拟结果进行对比验证。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

晋城市位于山西省东南部(东经 $111^{\circ}55'$ ~ $113^{\circ}37'$,北纬 $35^{\circ}11'$ ~ $36^{\circ}04'$),全市总面积 9490 km^2 ,

为山西省东南部区域的中心城市。金村区(图1)位于主城区东部,区内地势西高东低、南高北低,自然高程为 $665\sim 792\text{ m}$ 。建设起步区丹河新城位于金村区中部,总面积约 13 km^2 。主要道路有珏山路、金村大道、府城街等主干路及一些次干路、支路,道路最大纵坡控制约为 5% ,规划道路平均纵坡为 $2\%\sim 3\%$ 。根据1985—2015年历史降雨资料,晋城市年均降水量为 570.9 mm 。降雨主要集中在夏季的6—9月,降水量占全年的 56.4% 。2003—2012年晋城市共发生11次暴雨,每年约1或2次,暴雨天气多集中在6—8月。近年来暴雨呈现降水量极大值多次突破历史极值,具有降雨强度大、降雨时段集中的特点。



图1 研究区概况

Fig.1 Overview of study area

1.2 数据来源

a. 管网数据。SWMM构建所需的基础数据资料包括雨水井、管道数据等,本文管网数据由中国城市规划设计研究院提供。

b. 下垫面数据。下垫面数据分为土地利用类型和DEM高程两类,考虑丹河新城建设前后下垫面不透水率变化,采用了城市化前后两期土地利用类型数据集。城市化前土地利用数据采用中国科学院空天信息创新研究院2020年全球 30 m 地表覆盖精细分类产品;城市化后土地利用数据集来源于中国城市规划设计研究院。DEM高程数据同样由中国城市规划设计研究院提供,分辨率为 5 m 网格。

c. 设计降雨。根据GB 50014—2006《室外排水设计规范》(2016年版),晋城市暴雨强度公式见式(1),采用芝加哥雨型分别推求不同暴雨强度下的设计降雨,分析雨型与重现期大小对模拟结果的影响。本文计算在重现期1、5、10、50、100 a情景下,降雨历

时为 2 h 的设计暴雨,雨峰系数 r 取 0.398^[14-16]。

$$q = \frac{2\,437.198(1 + 0.846\lg P)}{(t + 15.503)^{0.769}} \quad (1)$$

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

2 研究方法

2.1 SWMM 构建与参数确定

SWMM 包括 3 种下渗量的模拟方式^[17], 本文选用可以描述下渗率随降雨时间变化的 Horton 模型模拟降雨下渗过程。考虑到研究区管网数据中存在少量的逆坡现象且模型在构建时同时考虑了雨水井与雨算子, 演算管流时较为复杂, 因此选用动力波流量演算方法模拟管网汇流过程。利用 SWMM 计算前, 在 ArcGIS 中对管网数据进行预处理, 检查管道与节点间的拓扑关系, 检查修正管段错接、逆坡等问题, 部分管段属性见表 1。子汇水区基于数据资料中金村区排水分区构建, 根据雨水井分布对排水分区采用泰森多边形进行初步划分, 并根据建筑物分布、河流与主干道走向将排水分区细化为若干子汇水区, 进一步对边界进行调整细化, 将处理完成的子汇水区及管网数据输入 SWMM。模型共包括 1 151 个子汇水区, 1 153 个检查井节点, 1 170 根雨水管道, 见图 2。排放口位于排水管网下游、北石店河与丹河附近。

SWMM 参数可分为确定性参数和不确定性参数两类。确定性参数包括子汇水区面积、坡度和不透水率等, 需要根据实际情况设置; 不确定性参数包括曼宁系数、洼地蓄水深度和 Horton 入渗参数, 需要根据经验赋予初始值后, 通过参数率定验证来确

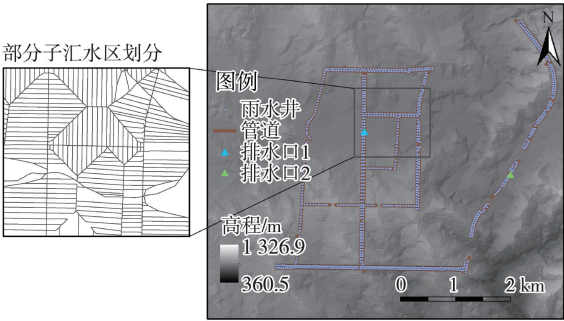


图 2 金村区 SWMM 构建

Fig. 2 SWMM construction for Jincun District

定最终数值。根据地形特征、河道走向、管网系统排水路径等将金村区划分为 D-1 ~ D-10 共 10 个独立的排水分区。根据气象、温度和下垫面情况的对比分析, 金村区与北京市自然条件接近^[18-19], 故借鉴北京市的模型参数作为金村区的初始参数。根据综合径流系数法反复调整模型, 进行参数率定。以前 3 个区域为例, 参数率定结果见表 2。D-1、D-2 与 D-3 排水分区的排水出路和城市化程度不同导致不透水面积具有差异, 在 Horton 入渗参数上也产生了一定差别。

研究区属于拟建规划区域, 在对构建的洪涝模型进行参数率定时, 由于实测资料较为缺乏, 本文采用综合径流系数法验证模型的合理性^[20]。采用分区下垫面的实际径流系数(表 3)进行验证, 各降雨重现期下分区 D-1、D-2 和 D-3 的结果均小于 0.4, 与实测径流系数的误差小于 3%。结合城市建筑稀疏程度, 模拟出的综合径流系数在 0.10 ~ 0.35 之间, 符合城市排水手册中不同城市化的参考值。图 3 给出了两处排水口(图 2)的降雨和径流过程

表 1 管道属性

Table 1 Pipeline properties

管道编号	所在道路	位置	长度/m	粗糙系数	形状	管径/m	进水口节点 编号	出水口节点 编号	坡度
5139.1	金村大道	朝阳街—府城路段东侧	49.97	1.5	圆形	0.6	5139	5140	0.0263
5153.3			79.96	1.5	圆形	1.0	5153	13351	0.0260
5046.1	府城街	府城街北侧	24.99	1.5	圆形	0.8	5047	5046	0.0108
5056.1			48.99	1.5	圆形	1.35	5057	5056	0.0061
5786.1	朝阳街	金村大道—珏山路南侧	50.00	1.5	圆形	1.0	5786	5787	0.0251
5832.1			49.98	1.5	圆形	0.8	5832	5833	0.0151

表 2 参数率定结果

Table 2 Parameter calibration results

区域	曼宁系数			洼地蓄水深度/mm		Horton 入渗参数			
	不透水区	透水区	管道	透水区	不透水区	最大下渗率/(mm/h)	最小下渗率/(mm/h)	衰减常数	干旱天数/d
初始参数	0.05	0.5	0.040	6	15.6	142.4	89.6	23.2	7
D-1	0.05	0.5	0.013	2	8	142.4	20.6	28.2	7
D-2	0.05	0.5	0.013	2	8	142.4	14.8	28.2	7
D-3	0.05	0.5	0.013	2	8	142.4	29.6	23.2	7

线,排水口的出流过程线符合降雨情景下退水的自然过程,表明模型具有较强的合理性。

表3 不同降雨重现期下3个排水分区下垫面径流系数
Table 3 Runoff coefficients for underlying surface of three discharge zones under different rainfall return periods

区域	径流系数				
	$P=1\text{ a}$	$P=5\text{ a}$	$P=10\text{ a}$	$P=50\text{ a}$	$P=100\text{ a}$
D-1	0.173	0.173	0.233	0.346	0.385
D-2	0.220	0.220	0.269	0.358	0.389
D-3	0.076	0.076	0.122	0.228	0.269

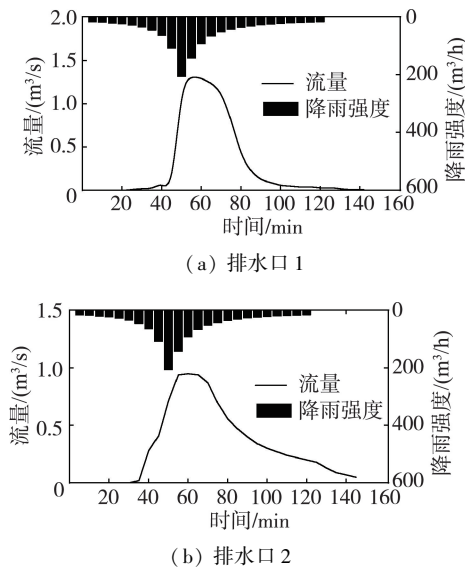


图3 排水口降雨和径流过程线

Fig. 3 Rainfall and runoff hydrographs of drainage outlets

2.2 SWMM 与 ICM-2D 模型耦合

检查井溢流是地面积水的重要来源。在雨洪过程中,检查井位置在垂直方向出现水量的运动和交换,特别当降雨超过管网排水能力时,由管网溢出的水在地表形成积水。在城市洪涝模拟中,一维管网与二维地表两个模块间的联系往往通过垂向的水量交互实现。基于 SWMM 可以模拟降雨径流和管网排水过程,通过输入降雨数据和模型参数得到溢流节点在每个步长的溢流量。对于节点的淹没溢流,本文采用 ICM-2D 模型实现二维水动力过程模拟。ICM-2D 模型基于 Godunov 格式有限体积法求解浅水方程,采用 Roe 格式近似黎曼解求解有限控制体边界数值通量,具有较高的数值精度和稳定性,在洪涝模拟中应用广泛。城市雨洪中,降雨径流计算与二维水动力演算之间有多种耦合模式,其中,单向耦合具有较明确的物理机制,且易于实现。本文基于 SWMM 与 ICM-2D 模型的单向耦合进行地表淹没溢流模拟,将 SWMM 输出的溢流过程作为 ICM-2D 模型每个计算步长的点源输入,并结合地形数据与边界条件驱动 ICM-2D 模型进行水动力模拟,得到地表洪涝演进的动态过程。

2.3 双层 SWMM 构建

基于 Godunov 格式有限体积方法的 ICM-2D 模型进行地表洪水演进模拟时,虽然具有较好的精度和守恒性,但过多的网格数消耗大量计算资源。考虑到实际中往往对于某些重点易涝位置比较关注,本文在构建水文水动力耦合模型的基础上,进一步拓展 SWMM 管流模拟功能,提出一种能够快速识别马路行洪汇流特征的双层 SWMM。金村区内道路地势相对较低,且周边建筑物具有阻水作用,暴雨条件下,超出地下管道排水能力的水量通过节点溢流的方式涌向地表。水流通过路面时,很容易出现流速较大的马路行洪现象。此时,原交通运输路段转换为输水通道,在 SWMM 中概化为排水管道;道路原先的局部低洼区转换为蓄水洼地,在 SWMM 中概化为蓄水装置。将地表道路整体转化为一系列蓄水池与连通管渠的组合,构成上层排水管网。通过对地下管网系统承载力与恢复状态的动态统计分析,合理设置地表排水系统参数与地表洼地的几何蓄水曲线。SWMM 中的节点包括耦合节点与非耦合节点两种类型,其中,耦合节点是模型的关键要素,可实现地表排水系统与地下排水系统间的水量交换;而非耦合节点独立存在于地表或地下排水系统中。当降雨超过地下排水系统的设计标准时,积水通过节点溢流进入上层管网,进一步在概化得到的地表通道进行水量的传输和蓄存,以此构建双层 SWMM 进行内涝分析,模拟降雨情景下的管网出流和淹没范围。

3 结果与分析

3.1 不同雨型洪涝过程模拟和危险性等级分布

3.1.1 不同雨型洪涝过程模拟

为考虑不同降雨过程对内涝程度的影响,本文采用芝加哥雨型推求 1、5、10、50、100 a 重现期下雨峰位置分别在前、中、后部的设计降雨,雨峰系数分别为 0.2、0.4 和 0.8 的设计降雨过程线见图 4。

统计不同重现期与雨峰系数条件下地表洪水总量的演变,绘制地表洪水过程线并标记不同降雨雨峰出现时间,见图 5。由图 5 可见,随着降雨重现期的增大,地表洪水总量随之增大,而洪峰时间基本一致;降雨重现期一定时,随着雨峰系数的增大,雨峰与洪峰间的间隔时间逐渐缩短,雨峰在后的降雨发生更加迅速,洪水过程线呈“瘦高”型陡涨陡落;随着雨峰系数的增大,洪水发生更加迅猛且退水时间缩短,相同时间内雨峰靠后产生的地表洪水总量较大,易对管网系统造成较大的冲击与破坏;同一重现

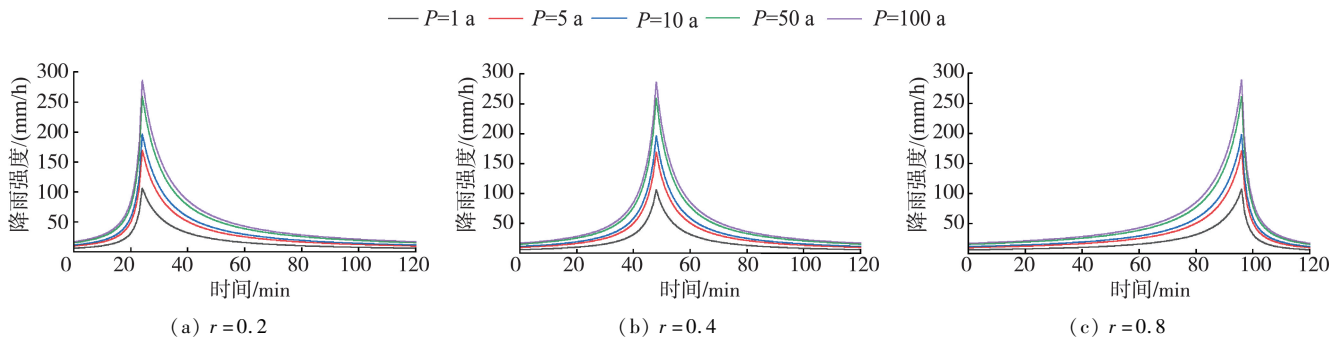


图 4 不同降雨重现期与雨峰系数下设计降雨过程线

Fig. 4 Design rainfall hydrographs under different rainfall return periods and rain peak coefficients

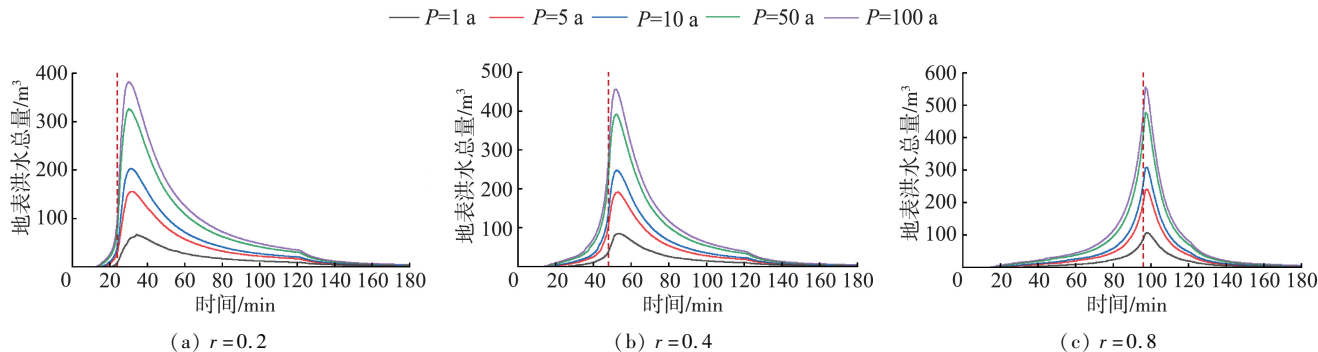


图 5 不同降雨重现期与雨峰系数下地表洪水总量过程线

Fig. 5 Surface flood hydrographs under different rainfall return periods and rain peak coefficients

期下雨峰系数较大的降雨产生的地表洪水退水时间较短,土壤渗透与地表蓄积水量一定时,不同降雨退水后地表剩余洪量基本一致。

采用 SWMM 和 ICM-2D 耦合模型模拟了雨峰系数为 0.2、0.4 和 0.8,重现期为 1、50、100 a 降雨情景下的淹没范围与水深分布情况,结果见图 6。9 种降雨情景下淹没程度不同,主要淹没区域分布于雁栖湖周边地势低洼处、金村大道和珏山路两条主干道附近。不同降雨重现期下淹没情况差异较大,随重现期增大,淹没范围增大,同一位置水深也增加;

同一重现期下随着雨峰系数的增大,淹没范围与淹没水深也随之增大,但变化范围较小。

重现期为 50 a,雨峰系数分别为 0.2、0.4 和 0.8 降雨情景下排水口 1、降雨和径流过程线见图 7。3 种降雨情景下的径流峰值相差不大,分别为 $1.28 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1.30 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $1.33 \text{ m}^3/\text{s}$;随着雨峰系数的增大,径流峰值与雨峰间隔时间逐渐缩短,由 $r=0.2$ 时的 5 min 逐渐减小至 $r=0.8$ 时的 1 min;径流退水时间随雨峰系数的增大而逐渐减小,由 $r=0.2$ 时的 148 min 减小至 $r=0.8$ 时的 82 min。

水深/m ≤ 0.5 $>0.5\sim 1$ $>1\sim 2$ >2

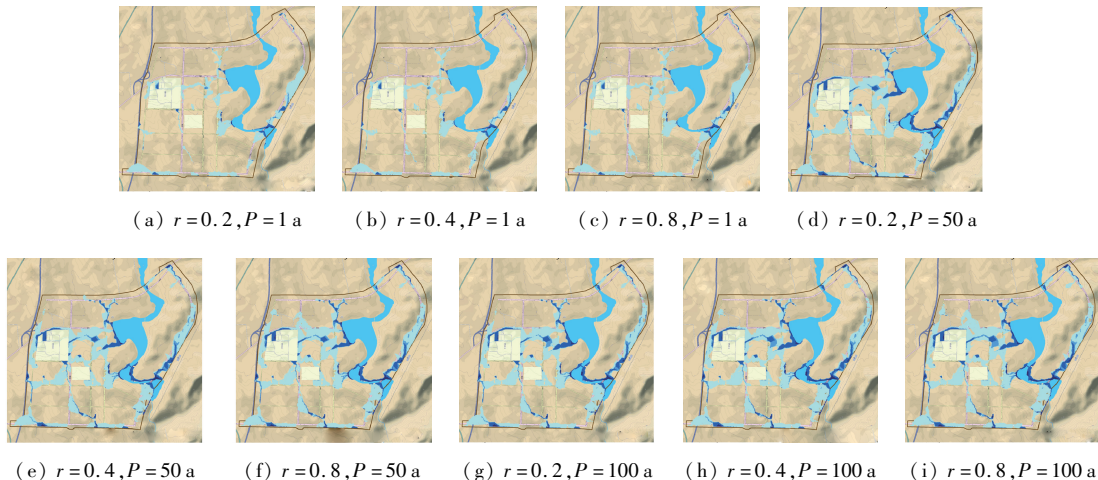


图 6 不同降雨重现期与雨峰系数下淹没范围与水深分布

Fig. 6 Submerged regions and water depth distributions under different rainfall return periods and rain peak coefficients

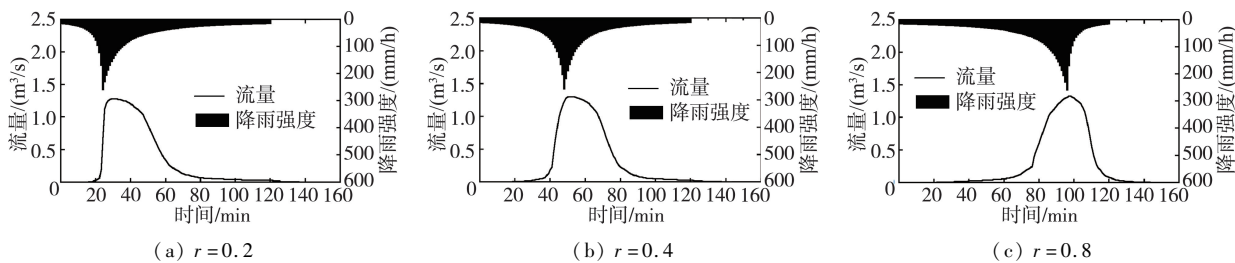


图7 不同雨峰系数下排水口1降雨和径流过程线

Fig. 7 Rainfall and runoff hydrographs of drainage outlet 1 under different rain peak coefficients

3.1.2 不同雨型危险性等级区划

城市内涝问题造成的危险性,不能仅用淹没水深作为判断指标,应结合水深、流速等多重指标对不同风险对象进行综合分析。本文采用英国环境、食品和农村事务部(Department for Environment, Food and Rural Affair)使用的洪水中人或物安全计算的危险性评价方法^[21],计算公式为

$$R_H = h(v + 0.5) + F \quad (2)$$

式中: R_H 为危险性值; h 为水深; v 为流速; F 为区块类别因子,其数值取决于区块类别对洪涝危险性的影响程度。本文 F 值采用城市区块类别因子: $0 \leq h < 0.25 \text{ m}$, $F = 0$; $h \geq 0.25 \text{ m}$ 或 $v \geq 2 \text{ m/s}$, $F = 1$ 。

根据式(2)计算危险性值,并根据 R_H 值范围进行危险性等级划分。将 R_H 值划分为4个区间: $0 \leq R_H < 0.75$ 、 $0.75 \leq R_H < 1.25$ 、 $1.25 \leq R_H < 2.5$ 、 $R_H \geq 2.5$,分别代表危险性等级Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ。各等级对应的淹没面积分布情况见图8。随降雨重现期

危险性等级 Ⅰ Ⅱ Ⅲ Ⅳ

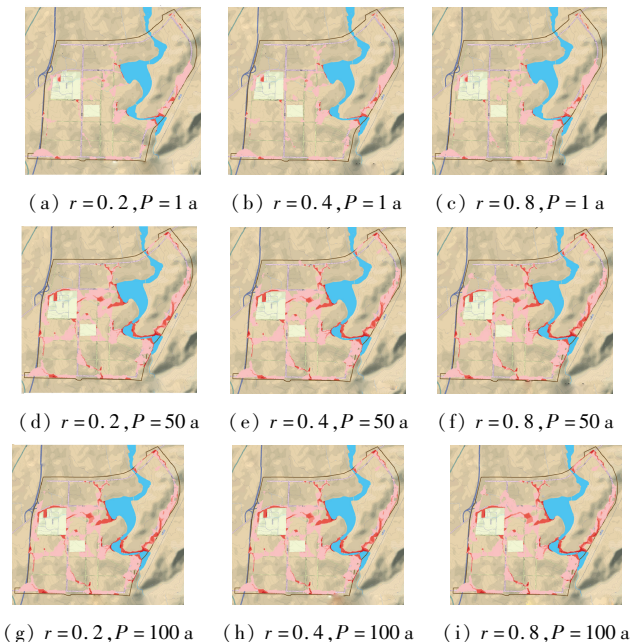


图8 不同降雨重现期和雨峰系数下各危险性等级对应的淹没面积分布

Fig. 8 Distributions of submerged area corresponding to each risk level under different rainfall return periods and rain peak coefficients

的增大,总危险面积与各危险性等级面积随之增大,同一区域淹没范围与水深增加,相应的危险性值也增大,危险性等级随之提高;同一降雨重现期下,随雨峰系数的增大,各危险性等级面积逐渐增加,雨峰靠后的降雨情景下,短时间内产生的地表洪水量较大,同一区域淹没程度较大,危险性也较大。

3.2 洪涝成因分析与易涝区识别

3.2.1 下垫面变化

对下垫面变化情况进行综合分析,结果见图9。金村区建设开发后大量透水面转化为不透水面,仅有小部分不透水面转化为透水面,整体下垫面不透水面积显著增加。城市建设后不透水面积为 699.723 hm^2 ,占总面积的 62.37% 。其中共有 600.524 hm^2 的透水面转变为不透水面,占总面积的 52.53% 。不透水下垫面的增加会影响城市产汇流过程^[21],导致洪涝致灾机理发生变化。

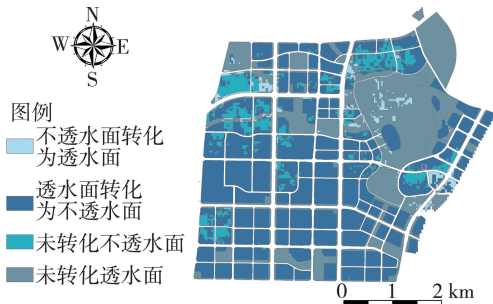


图9 金村区城市化前后下垫面变化

Fig. 9 Urbanization-induced underlying surface change in Jincun District

3.2.2 径流系数变化

计算城市化前后不同重现期下各分区径流系数,结果见图10。城市化后分区D-3、D-4和D-7的径流系数增长最为明显。同一下垫面情况下,金村区径流系数随着降雨重现期的增加表现出增大的趋势,径流系数越大,地表产流比越大,洪量增加、洪峰提前使得暴雨洪涝风险增大。降雨情景不变时,金村区径流系数随着城市化后不透水面的增加表现出不同程度的增大,开发程度越高的分区径流系数越大,各重现期径流量增加导致洪量整体变大,加重管网排水压力。计算城市化前后金村区综合径流

径流系数 ≤ 0.2 $>0.2\sim0.3$ $>0.3\sim0.4$ $>0.4\sim0.6$ $>0.6\sim0.8$ >0.8

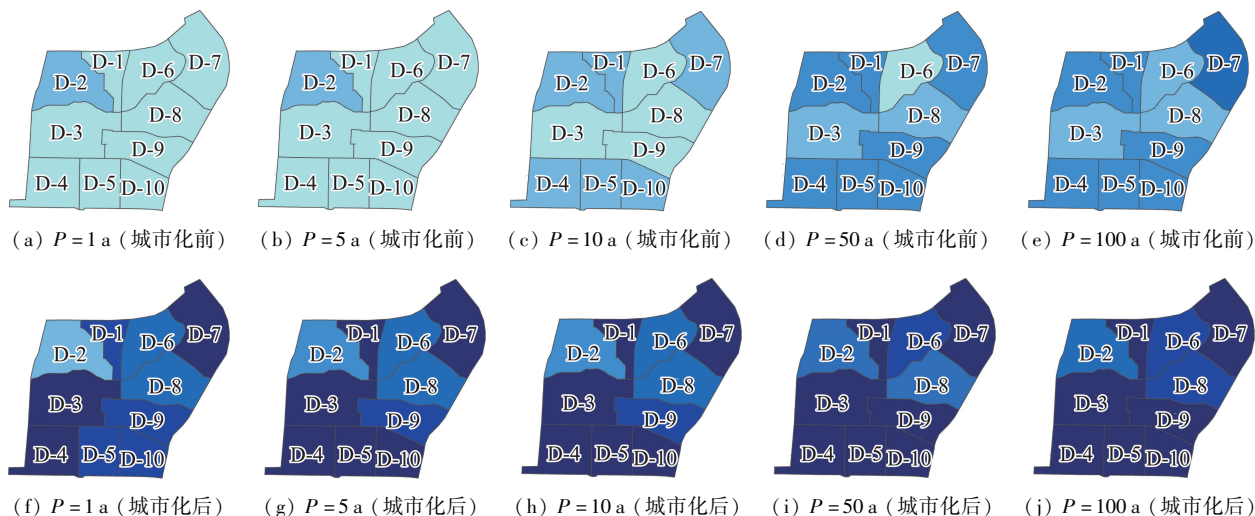


图 10 城市化前后不同降雨重现期各分区径流系数

Fig. 10 Runoff coefficient of each partition under different rainfall return periods before and after urbanization

系数,结果见表 4。片区建设前,透水面积占比较大,径流系数较小,在 0.147 ~ 0.341 之间;丹河新城建设后大量不透水面取代自然下垫面,对产汇流产生较大影响,径流系数在 0.646 ~ 0.780 之间。

表 4 城市化前后金村区综合径流系数

Table 4 Comprehensive runoff coefficient of Jincun District before and after urbanization

状态	径流系数				
	$P=1a$	$P=5a$	$P=10a$	$P=50a$	$P=100a$
城市化前	0.147	0.147	0.200	0.304	0.341
城市化后	0.646	0.707	0.729	0.767	0.780

3.2.3 典型内涝区识别

模拟 50 年一遇降雨情景下的管网超载时间分布,结果见图 11。根据模拟结果,金村区超管道数占总管道数的 84.96%。由图 11 可见,金村大道、珏山路、太岳街与丹河快线 4 处管网超载情况较为严重,且节点水深较大,初步识别这 4 处位置为典型内涝区。金村区目前处于建设起步阶段,丹河新城建设后,下垫面不透水率增加,超出管网排水能力的雨水汇集时,容易聚积在道路上产生马路行洪的现象。金村区四周多山地,地表水流易向地势较低处汇集,太岳街与丹河快线所处位置地势相对较高,在这两条道路上难以蓄积雨水。金村大道和珏山路位于片区中心地段,贯通南北部,周边区域城市建筑相对密集。两条主干道沿线管径较小,加上管网设计标准较低,管网溢流量较大,部分管道积水无法顺利排出,造成局部管网排水压力,内涝积水问题严重。综合考虑,选取金村大道与珏山路两条主干道作为典型易涝区进行双

层 SWMM 的构建。

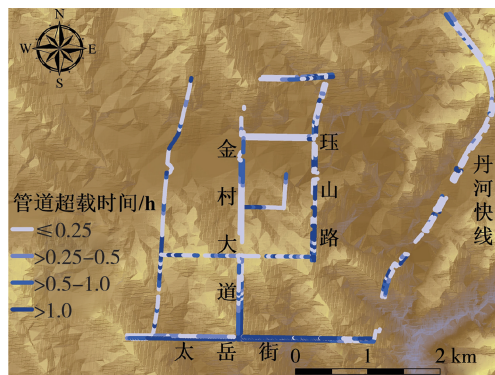


图 11 50 a 降雨重现期下管道超载时间分布

Fig. 11 Distribution of pipeline overloading time under 50-year rainfall return period

3.3 马路行洪模拟与分析

3.3.1 马路行洪模拟

以金村大道为例,对典型行洪通道进行概化,自北向南沿道路走向绘制 DEM 高程剖面图(图 12(a))。以金村大道 DEM 剖面为例,洼地概化为蓄水装置(图 12(b)),进行水量输送的道路作为上层管道,形成节点、管道、蓄水装置连通的上层排水系统,实现上层管网内部以及上层管网与地下管网之间的水量交互。由 DEM 高程网格提取低洼蓄水区相关特征计算蓄水单元内任意一点到底部的高程差随面积的变化,根据提取到的深度-面积对应关系,绘制蓄水装置的水位-面积曲线图(图 12(c)),利用双层 SWMM 进一步识别内涝点,模拟降雨情景下道路的二维淹没范围、水深和流速等主要洪涝因子。

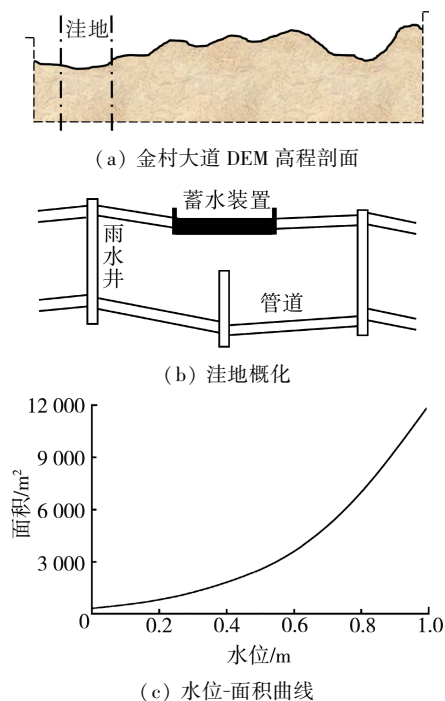


图 12 金村区地表道路概化

Fig. 12 Road generalization in Jincun District

选取珥山路易涝点周边水西村西北侧、西南侧上层管段,统计不同降雨重现期下管段内流量随降雨时间的变化,绘制流量过程线,见图 13。图 13(a)中,1、5、50、100 a 降雨重现期下管段内径流对应总历时分别为 95、105、120、120 min,对应的流量峰值分别为 0.38、0.50、0.66、0.70 m^3/s ,峰现时间基本一致。图 13(b)中,随着设计降雨重现期的增大,管段内的峰值流量随之增大,1、100 a 降雨重现期下径流总量分别为 0.55 m^3 和 6.19 m^3 。管段内行洪总历时随着设计降雨重现期的增大而增大,1、5、50、

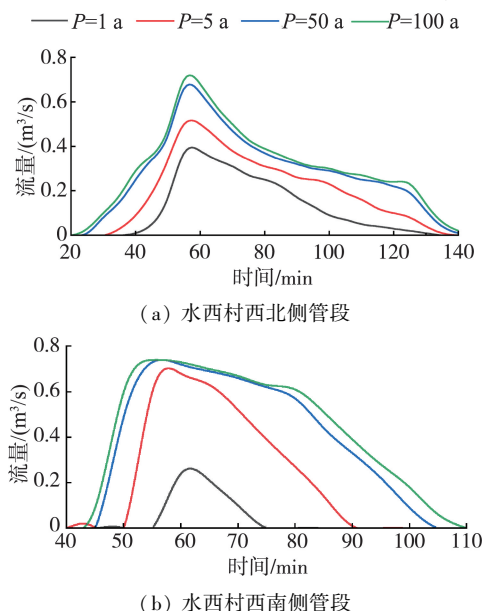


图 13 不同降雨重现期下管道流量过程线

Fig. 13 Pipeline flow process line under different rainfall return periods

100 a 降雨重现期下行洪总历时分别为 15、40、55、65 min,对应的峰值流量也逐渐变大,分别为 0.24、0.68、0.73、0.74 m^3/s 。100 a 降雨重现期下大量管段流量超过自身排水能力,管道处于满管状态,对应的流量峰值与 50 a 重现期下管道流量过程线峰值接近。

3.3.2 双层 SWMM 效果评估

为进一步验证双层 SWMM 的准确性与适用性,将双层 SWMM 与 ICM-2D 模型的模拟结果进行对比分析。ICM-2D 模型的网格划分通常更为精细,能实现对于一维过程与二维过程的耦合模拟,结果一般更为可靠,但 ICM-2D 模型对数据要求较高。相比于 ICM-2D 模型,SWMM 易于操作,模拟计算工作量小。以金村大道、珥山路两条主干道为研究对象,基于 5 m 分辨率网格以及马路和房屋边界,构建 ICM-2D 模型。设置非结构网格的最小网格单元面积为 25 m^2 ,最大网格单元面积为 50 m^2 ,总网格数为 9173,计算步长取 10 s,设置模拟时间为 3 h。SWMM 与 ICM-2D 模型的耦合采用单向耦合模式,计算得到两条主干道上的淹没水深、淹没范围、最大流速等。

双层 SWMM 识别的易涝点位置见图 14,主要易涝点分别邻近金村大道市委党校、珥山路丹河湿地公园和水西村,与 ICM-2D 模型识别的内涝严重位置吻合程度较高,反映出地势低洼、地下管网承载力较低的区域更容易引发积水内涝问题。金村区体育场馆附近、珥山路最北侧与水西村西侧均存在积水区域,相比于主要易涝点,其影响范围较小,内涝严重程度较为缓和,与 ICM-2D 模型模拟结果也基本符合。通过对比验证可知,双层 SWMM 对淹没程度严重的内涝点识别更为准确,而难以提取一些地势起伏较小洼地的小范围淹没位置,如金村大道晋城中专左侧与珥山路水西村西南侧的淹没位置。

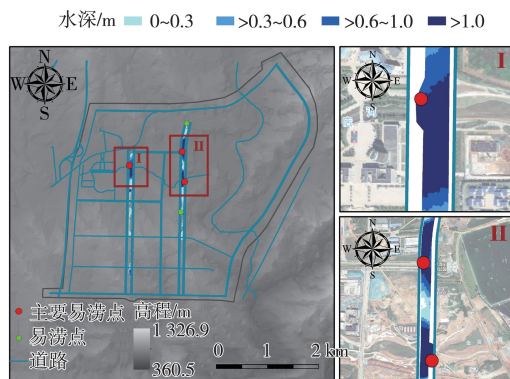


图 14 主干道淹没情况及内涝点分布

Fig. 14 Submergence of main roads and distribution of waterlogging points

选取金村大道市委党校附近和珏山路水西村附近两个具有明显淹没特征的内涝区,将双层 SWMM 得到的淹没范围与 ICM-2D 模型结果进行对比。双层 SWMM 得到的金村大道和珏山路典型内涝范围分别为 0.5 hm^2 和 1.31 hm^2 , ICM-2D 模型得到的淹没面积分别为 0.58 hm^2 和 1.57 hm^2 , 相对误差分别为 13.8% 和 16.6%, 误差在允许的范围内, 结果基本合理。双层 SWMM 计算金村大道主要易涝点流速为 1.7 m/s , 与 ICM-2D 模型得到的流速 1.245 m/s 相差 26.76%。

选取珏山路水西村南侧路段与丹河湿地公园两处,计算两种模型 50 a 降雨重现期下节点水深随时间的变化过程,结果见图 15。图 15(a) 中,双层 SWMM 求得最大水深为 0.63 m , 雨洪总历时为 2.9 h , ICM-2D 模型得到最大水深为 0.45 m , 总历时为 2.3 h , 二者相差 28.57%。两种模型节点积水深度随着历时变化的趋势相似, 双层 SWMM 的淹没水深出现时间早于 ICM-2D 模型, 主要由双层 SWMM 的概化模式导致。ICM-2D 模型计算时采用预设的时间步长, 在较为精细的二维网格上演算, 初始时刻该位置对应的网格水深为 0, 经过一段时间洪水演进后, 高程较低的网格开始产生积水。因此, ICM-2D 模型呈现的现象更接近实际情况。图 15(b) 中, 双层 SWMM 与 ICM-2D 模型求得的最大水深分别为 1.16 m 和 1.12 m , 相差 3.45%。丹河湿地公园位于易涝区附近, ICM-2D 模型中的节点溢流在地表进入

低洼区网格后才会产生积水, 而双层 SWMM 中节点溢流量直接通过管道输送到蓄水装置, 双层 SWMM 中积水产生时间会相对较早。

两种模型在淹没位置、淹没面积、淹没水深以及流速 4 个方面的对比分析表明, 构建的双层 SWMM 具有较好的合理性和适用性, 对淹没位置与淹没面积的模拟效果更好; 对于最大淹没水深, 珏山路模拟效果较差, 丹河湿地公园模拟效果较好; 对于流速, 两个模型的结果相差较大。双层 SWMM 的上层管网由地表空间位置、地形高程以及拓扑关系概化而来, 无法精细化描述地表特征; 本文局部低洼区蓄水曲线根据数字高程进行提取, DEM 分辨率大小对结果精度存在一定影响; 双层 SWMM 模拟的流速为内涝积水区域的平均水深流速, 无法反映任意点位与时刻的淹没情况。在后续的研究中需要采集空间分辨率更高的 DEM 数据来进一步提高模拟精度; 本文仅将两条主干道概化为上层排水管网, 未来可进一步在更大尺度上模拟分析片区内暴雨内涝情况。

4 结 论

a. 金村区地表洪水量、淹没范围与水深以及区域危险性等级随着降雨重现期的增大而增大。重现期一定时, 随着雨峰系数的增大, 短时间内产生的地表洪水量增大, 淹没范围与水深也随之增大, 径流峰值与雨峰间隔时间以及退水时间均逐渐缩短, 区域危险性等级提高。城市化后建筑密度增加, 52.53% 的透水面转化为不透水面, 综合径流系数范围由 $0.147 \sim 0.341$ 变化为 $0.646 \sim 0.780$ 。

b. 金村大道与珏山路两条主干道为典型行洪马路, 两条道路地势较低, 部分管网排水能力不足。由 SWMM 模拟结果发现, 不同降雨情景下两条行洪马路上的管网超载情况严重, 雨水井节点水深较大。

c. 双层 SWMM 得到金村大道市委党校与珏山路水西村附近路段为易涝位置, 淹没范围分别为 0.58 hm^2 与 1.31 hm^2 , 与 ICM-2D 模型得到的淹没面积结果误差较小, 表明双层 SWMM 对于易涝点位置识别和淹没面积模拟的效果较好。

参考文献:

[1] 王浩, 王佳, 刘家宏, 等. 城市水循环演变及对策分析[J]. 水利学报, 2021, 52(1): 3-11. (WANG Hao, WANG Jia, LIU Jiahong, et al. Analysis of urban water cycle evolution and countermeasures [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(1): 3-11. (in Chinese))

[2] 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

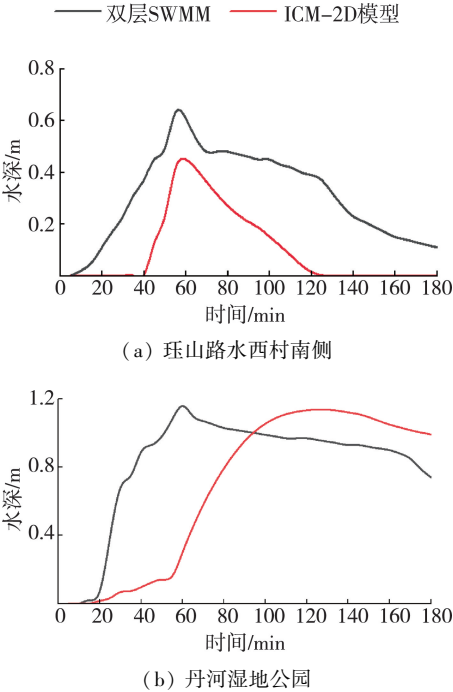


图 15 50 a 降雨重现期下水深过程线

Fig. 15 Water depth hydrographs under 50-year rainfall return period

- (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))
- [3] 于超,贺靛,张恒德,等. 北京市 2018 年“7·16”极端暴雨特征及成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 42-49. (YU Chao, HE Liang, ZHANG Hengde, et al. Analysis on characteristics and causes of the extreme rainstorm on 16 July 2018 in Beijing City[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(4): 42-49. (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] 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 Botao, QIAN Jin. Changes of weather and climate extremes in the IPCC AR6[J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 713-718. (in Chinese))
- [6] 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))
- [7] 李雄飞,田甜,程香菊,等. 综合管廊雨水舱缓解城市内涝的效果分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 20-26. (LI Xiongfei, TIAN Tian, CHENG Xiangju, et al. Effects of rainwater tank in integrated pipe gallery on alleviating urban waterlogging[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 20-26. (in Chinese))
- [8] 周倩倩,许小文,苏炯恒. GIS 几何分析法在易涝区识别和空域构建中的应用[J]. 中国给水排水, 2018, 34(19): 114-117. (ZHOU Qianqian, XU Xiaowen, SU Jiongheng. Application of GIS geometric analysis for identification of flood-prone areas and construction of surface structure[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(19): 114-117. (in Chinese))
- [9] 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))
- [10] 叶陈雷,徐宗学,雷晓辉,等. 基于 SWMM 和 InfoWorks ICM 的城市街区洪涝模拟与分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 87-94. (YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. Flood simulation and risk analysis on urban block scale based on SWMM and InfoWorks ICM[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 87-94. (in Chinese))
- [11] 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))
- [12] 宋利祥,徐宗学. 城市暴雨内涝水文水动力耦合模型研究进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(5): 581-587. (SONG Lixiang, XU Zongxue. Coupled hydrologic-hydrodynamic model for urban rainstorm water logging simulation: recent advances[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2019, 55(5): 581-587. (in Chinese))
- [13] 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 Guoru, CHEN Wenjie, YU Haijun. Construction and evaluation of an integrated hydrological and hydrodynamics urban flood model[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(3): 334-344. (in Chinese))
- [14] 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 Yaoping, WANG Zhaoli. Analysis of urban waterlogging response characteristics under different rainstorm rainfall scenarios[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 101-108. (in Chinese))
- [15] 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))
- [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 Yaozong, 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] 宋晓猛,张建云,王国庆,等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战: II. 城市雨洪模拟与管理[J]. 水科学进展, 2014, 25(5): 752-764. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: II. urban stormwater modeling and management[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(5): 752-764. (in Chinese))
- [18] 杨钢,徐宗学,赵刚,等. 基于 SWMM 模型的北京大红门排水区雨洪模拟及 LID 效果评价[J]. 北京师范大

- 学学报(自然科学版), 2018, 54(5): 628-634. (YANG Gang, XU Zongxue, ZHAO Gang, et al. Simulating urban rainfall-runoff and assessing LID facilities by SWMM model in Dahongmen catchment[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2018, 54(5): 628-634. (in Chinese))
- [19] 赵刚, 史蓉, 庞博, 等. 快速城市化对产汇流影响的研究:以凉水河流域为例[J]. 水力发电学报, 2016, 35(5): 55-64. (ZHAO Gang, SHI Rong, PANG Bo, et al. Impact of rapid urbanization on rainfall-runoff processes in urban catchment: case study for Liangshui River Basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(5): 55-64. (in Chinese))
- [20] 邵蕊, 邵薇薇, 苏鑫, 等. 基于 TELEMAC-2D 模型分析不同洪涝情景对城市应急响应时间的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(1): 60-69. (SHAO Rui, SHAO Weiwei, SU Xin, et al. Impact of various flood scenarios on urban emergency responses times based on the TELEMAC-2D model[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2022, 62(1): 60-69. (in Chinese))
- [21] 张建云, 宋晓猛, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战:I. 城市水文效应[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 594-605. (ZHANG Jianyun, SONG Xiaomeng, WANG Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I. hydrological response to urbanization[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4): 594-605. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-08-16 编辑:施业)

(上接第 110 页)

- [20] 梁红艳. 中国城市群生产性服务业分布动态、差异分解与收敛性[J]. 数量经济技术经济研究, 2018, 35(12): 40-60. (LIANG Hongyan. Distribution dynamics, difference decomposition and convergence mechanism of producer services industry in Chinese urban clusters[J]. Journal of Quantitative & Technical Economics, 2018, 35(12): 40-60. (in Chinese))
- [21] ANSELIN L. Spatial econometrics: methods and models [J]. Journal of the American Statistical Association, 1990, 85(411): 160.
- [22] REY S J, MURRAY A T, ANSELIN L. Visualizing regional income distribution dynamics[J]. Letters in Spatial and Resource Sciences, 2011, 4(1): 81-90.
- [23] WANG Jinfeng, LI Xinhua, CHRISTAKOS G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.
- [24] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. (WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134. (in Chinese))
- [25] 裴延峰. 中国产业结构变迁的空间不平衡对地区经济差距的影响[J]. 数量经济技术经济研究, 2022, 39(3): 3-23. (PEI Yanfeng. Study on the impact of spatial imbalance of industrial structure change on regional economic disparity in China [J]. The Journal of Quantitative Economics & Technical Economics, 2022, 39(3): 3-23. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-07-25 编辑:施业)

(上接第 125 页)

- [32] 俞建河, 吴永林, 丁长荣. 皖东江淮丘陵区不同水文年水稻优化灌溉制度的研究[J]. 节水灌溉, 2017(1): 94-97. (YU Jianhe, WU Yonglin, DING Changrong, et al. A Study on optimal irrigation schedule of paddy in different hydrological years in the hilly areas of Eastern Anhui Province [J]. Water Saving Irrigation, 2017(1): 94-97. (in Chinese))
- [33] 耿庆玲. 西北旱区农业水土资源利用分区及其匹配特征研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2014.
- [34] 张礼兵, 喻海閔, 金菊良, 等. 基于联系数的大型灌区水资源空间均衡评价与优化调控[J]. 水利学报, 2021, 52(9): 1011-1023. (ZHANG Libing, YU Haiguan, JIN Juliang, et al. Evaluation and optimal regulation of spatial equilibrium of water resources in large irrigation area based on connection number [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(9): 1011-1023. (in Chinese))
- [35] 陈守煜. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2005.
- [36] 金菊良, 吴开亚, 魏一鸣. 基于联系数的流域水安全评价模型[J]. 水利学报, 2008, 39(4): 401-409. (JIN Juliang, WU Kaiya, WEI Yiming. Connection number based assessment model for watershed water security [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(4): 401-409. (in Chinese))
- [37] 陈守煜. 可变模糊集理论与模型及其应用[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2009.
- [38] 金菊良, 孔令茹, 崔毅, 等. 基于五元半偏减法集对势的区域农业旱灾脆弱性评价[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 340-348. (JIN Juliang, KONG Lingru, CUI Yi, et al. Assessment of regional agricultural drought vulnerability based on five-element semipartial subtraction set pair potential [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 340-348. (in Chinese))
- (收稿日期:2021-10-21 编辑:王芳)