DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2025. 02. 015

城市下穿通道积涝特征及其成因分析

许岚杰[1],侯精明[1],王 添[1],潘鑫鑫[1],栾广学[1],王晨晓[2],贾 严[1]

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室,陕西 西安 710048;
2. 长治市城市建设开发有限公司,山西 长治 047500)

摘要:利用 SWMM 与 GAST 模型耦合的水文水动力学模型,对长治市主城区进行数值模拟,分析易涝点积涝特征并探究其成因。结果表明:研究区下穿通道易涝点的积水量峰值和积水水深峰值受降雨重现期影响大于普通路面易涝点,降雨重现期由 5 a 增大到 100 a 时,易涝点 A、B、C、D 的积水量峰值分别增加了 292. 8%、265. 5%、1 281. 3%、59. 7%,积水水深峰值分别增加了 83. 3%、92. 1%、581. 0%、31. 3%;不同降雨重现期对不同类型易涝点的积水水深峰现时间影响不同,降雨重现期由 5 a 增大到 100 a 时,D 点积水水深峰现时间提前了 11 min,A、B、C 点积水水深峰现时间分别滞后了 20、84、40 min。

关键词:城市内涝;易涝点;下穿通道;积水量;积水水深;长治市

中图分类号:TU992;TV122. 1 **文献标志码**:A **文章编号**:1004 - 6933(2025)02 - 0133 - 09

Characteristics and causes of waterlogging in urban underpass channels//XU Lanjie[1], HOU Jingming[1], WANG Tian[1], PAN Xinxin[1], LUAN Guangxue[1], WANG Chenxiao[2] JIA Yan[1] (1. *State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi' an University of Technology, Xi' an* 710048, *China*; 2. *Changzhi City Construction and Development Co., Ltd., Changzhi* 047500, *China*)

Abstract: Using a hydrological and hydrodynamic model coupled with SWMM and GAST models, numerical simulations were conducted on the main urban area of Changzhi City to analyze the characteristics of waterlogging in flood prone points and the causes were explored. The results show that the peak values of accumulated water volume and accumulated water depth at the flood prone points of the underpass in the study area are more affected by the rainfall recurrence period than those at the flood prone points of ordinary road surfaces. When the rainfall recurrence period increases from 5 a to 100 a, the peak value of accumulated water volume at flood prone points A, B, C, and D increases by 292. 8%, 265. 5%, 1 281. 3%, and 59. 7%, respectively, and the peak value of accumulated water depth increases by 83. 3%, 92. 1%, 581. 0%, and 31. 3%, respectively. The impact of different rainfall recurrence periods on the peak time of accumulated water depth in different types of flood prone points varies. When the rainfall recurrence period increases from 5 a to 100 a, the peak value of accumulated water depth at point D appears 11 min earlier, while the peak value of accumulated water depth at points A, B, and C appears 20, 84, and 40 min later, respectively.

Key words: urban waterlogging; flood prone point; underpass; accumulated water volume; accumulated water depth; Changzhi City

随着我国城镇化进程的不断推进,城区热岛效应和雨岛效应日益凸显,导致城市暴雨洪涝灾害频发[1-2]。郑州市 2021 年 7 月 20 日发生特大暴雨,累积平均降水量 449 mm,最大 1 h 降水量 201. 9 mm,导致全市死亡、失踪 380 人,直接经济损失 409 亿元[3]。《中国水旱灾害防御公报 2022》显示,2022 年全国因洪涝共有 3 385. 26 万人次受灾,171 人死亡失踪,直接经济损失 1 288. 99 亿元,占当年 GDP 的 0. 11%[4]。《2023 年全国十大灾害》显示,2023 年的十大灾害中有 5 场与洪涝相关:6 月底到 7 月初,重庆地区遭遇强降雨袭击,造成 25 人死亡失踪,直接经济损失达 13. 1 亿元;7 月底到 8 月初,京津冀等地遭受极端强降雨,造成北京、河北、天津 551. 2 万人不同程度受灾,因灾死亡失踪 107 人,

基金项目:国家自然科学基金项目(52009104);中国电力建设股份有限公司重点科技项目(DJ-ZDXM-2022-41);中德合作交流项目(M-0427);陕西省联合基金重点项目(2022JC-LHJJ-09);陕西省重点研发计划项目(2023GXLH-042)

作者简介:许岚杰(1999—),男,硕士研究生,主要从事城市水利研究。E-mail:1176052459@ qq. com

通信作者:王添(1989—),男,副教授,博士,主要从事地表水及其伴生过程数值模拟研究。E-mail:t. wang@ xaut. edu. cn

直接经济损失 1 657.9 亿元[5]。可见,城市内涝灾害已经威胁到人们的生命财产安全和社会经济的发展,如何利用新技术发现内涝灾害规律及成因并提出解决办法,已经成为迫在眉睫的科学问题。

随着计算机硬件的迭代进步和城市水利理论的发展,城市洪涝模型应运而生。目前常见的水力模型有 InfoWorks、SWMM(storm water management model)、GAST(GPU accelerated surface water flow and transport)、MIKE 模型等[6]。张静等[7]以广州市某地块为例,建立 SWMM 进行内涝安全评估,并综合分析地块及周边的洪涝风险,确定了地块洪涝风险等级;丁青云等[8]采用 SWMM 对杭州西湖区之江新城进行模拟,得出排水系统能力不足会提高城市内涝风险的结论;李国一等[9]基于 TELEMAC-2D 模型构建深圳市深圳河流域洪涝风险评估模型,得到了深圳河流域洪涝风险区面积的变化规律。以上研究没有综合考虑城市复杂的下垫面和地下管网等水利工程设施,SWMM 与 GAST 模型耦合构建的水文水动力模型具有地表地下水流交换过程合理、地表径流过程计算准确、管网排水过程精度高、运行速度快等优点[10],为研究暴雨导致的城市内涝问题提供了新思路。马鑫等[11]应用其对固原市主城区在极端暴雨条件下进行积水模拟,得出道路积水面积与积水量峰值随降水量的变化规律;侯精明等[12]应用其对陕西省西咸新区进行数值模拟,得出设计降雨重现期和峰值比例对城市内涝总积水量的影响规律;李冰雪等[13]应用其对宁波市中心商贸区进行了数值模拟,得出多种移动台风和静止台风对内涝监测点积水时间的影响规律。以上研究均采用数值模型进行城市内涝模拟并得出相关积涝特征的变化规律,但对下穿通道的积涝特征考虑较少。铁路穿过城市不可避免地与公路交叉,形成多个公路下穿通道。由于下穿通道的最低点一般低于普通路面 3 m 左右,形成封闭洼地,周围雨水易于汇入,极易形成严重内涝,如果积水无法及时排除,便会严重影响交通甚至造成事故。本文利用 SWMM 与 GAST 模型的耦合模型对长治市的典型下穿通道进行模拟,总结下穿通道的积涝特征变化规律,并探究其成因,以期为城市内涝研究和治理提供借鉴。

1 研究区概况

长治市地处山西省东南部,为太行山、太岳山所环绕。从地貌来看,全市山峦起伏,地形复杂,总体呈盆地状。长治市年降水量为 550~700 mm,其多年平均降水量为 573.3 mm,降水日数多集中在夏季,尤以 7 月为多,月平均降水日数为 14.8 d[14]。选取的研究区为长治市主城区,北靠北环西街,南连石子河,东邻东环路,西接西二环路,总面积为 17.7 km^2。研究区概况如图 1 所示。

2 研究方法

本文数值模拟基于 SWMM 与 GAST 模型耦合构建的一二维水动力模型,模型的输入文件主要包括研究区的地形、土地利用类型、排水管网、降水量等数据。研究选取 4 个易涝点,其中 3 个为下穿通道,另外 1 个为普通路面易涝点,作为比较对象。对 4 个易涝点处的积水水量、积水面积、积水水深峰值出现时间等指标进行模拟,结合不同降雨场次各易涝点附近的管道水深变化过程,综合分析易涝点积水变化规律。

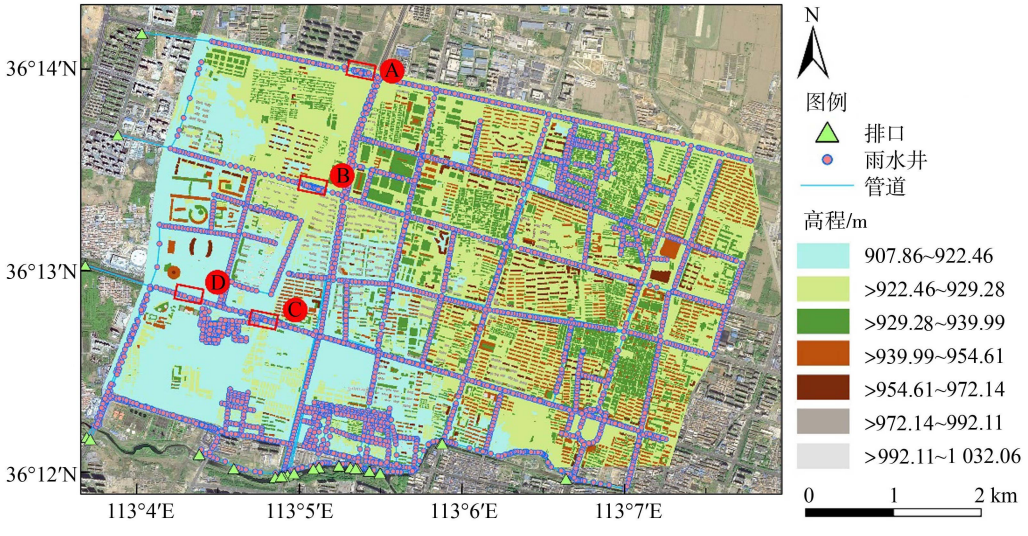


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

2.1 水动力模型

2.1.1 控制方程

模型控制方程为二维浅水方程[15]，忽略其运动黏性项、温流黏性项、风应力和科氏力，则其非线性守恒格式矢量式为

$$\frac{\partial \boldsymbol{q}}{\partial t}+\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial x}+\frac{\partial \boldsymbol{g}}{\partial y}=\boldsymbol{S} \tag{1}$$

其中

$$\boldsymbol{q}=\begin{bmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{f}=\begin{bmatrix} uh \\ uq_x+gh^2/2 \\ uq_y \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{g}=\begin{bmatrix} vh \\ vq_x \\ vq_y+gh^2/2 \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{S}=\begin{bmatrix} i \\ -gh\dfrac{\partial z_b}{\partial x}-C_f u\sqrt{u^2+v^2} \\ -gh\dfrac{\partial z_b}{\partial y}-C_f v\sqrt{u^2+v^2} \end{bmatrix}$$

式中：$\boldsymbol{q}$ 为流量变化矢量；t 为时间；h 为水深；q_x、q_y 分别为 x、y 方向的单宽流量；u 和 v 分别为 x、y 方向的流速；$\boldsymbol{f}$、$\boldsymbol{g}$ 分别为 x、y 方向的通量矢量；$\boldsymbol{S}$ 为源项矢量，包含底坡源项、下渗源项及摩阻力源项；i 为净雨率；z_b 为河底高程；g 为重力加速度；C_f 为床面摩阻系数。

应用堰流公式或孔流公式计算地表汇入雨水井的水量[16]，计算公式见式(2)。当雨水井中水位高程超过地表水位高程时，产生地表溢流，其溢流量采用孔流公式计算，计算公式见式(3)。地表与排水管道积水交换过程如图 2 所示。

$$Q_{in}=\begin{cases} c_w C_i\sqrt{2g}(Z_{2D}-Z_{1D})^{2/3} & Z_{1D}\leqslant Z_{b2D}\leqslant Z_{2D} \\ c_o A_i\sqrt{2g(Z_{2D}-Z_{1D})} & Z_{b2D}\leqslant Z_{1D}\leqslant Z_{2D} \end{cases} \tag{2}$$

$$Q_{out}=c_o A_i\sqrt{2g(Z_{1D}-Z_{2D})} \tag{3}$$

式中：Q_{in} 为地表水通过雨水井汇入管道的流量；Q_{out} 为从雨水井溢流至地表的流量；c_w 为堰流系数；c_o 为孔流系数；C_i 为雨水井入口的周长；A_i 为雨水井入口截面面积；Z_{b2D} 为地表高程；Z_{2D} 为地表水位；Z_{1D} 为雨水井内水位。

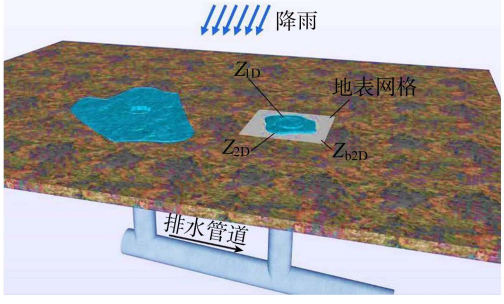


图 2 一二维积水交换过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of one-dimensional and two-dimensional accumulated water exchange process

2.1.2 求解方法

模型的地表产汇流模拟过程中，利用动力波方法求解二维浅水方程，计算区域采用 Godunov 格式有限体积法进行空间离散[17]。利用底坡通量法求解水深的变化，摩阻源项使用改进的分裂点隐式法提高计算稳定性，并利用二阶显式 Runge Kutta 法保证时间积分的二阶精度[18-19]，质量通量和动量通量通过 HLLC 近似黎曼求解器计算。本文主要对研究区的雨洪过程进行研究，对于一维管网和二维地表的水流交换问题，采用垂向连接的方式进行耦合计算[20]，通过 Visual Studio 平台调用 SWMM 动态链接库的方式进行耦合交互计算[21]。

2.2 数据资料与模型验证

2.2.1 数据资料

a. 地形数据。采用激光雷达与倾斜摄影技术扫描得到研究区的 DEM 和影像数据，综合考虑计算精度和计算效率，将 DEM 处理成 3m 分辨率，共计 2 016×1 342 个结构网格，如图 1 所示。

b. 土地利用类型数据。土地利用类型根据机载激光雷达扫描得到的高清影像数据利用 ArcGIS 软件进行划分，参考第三次全国国土调查数据中长治市城区的土地利用类型划分结果，利用最大似然法将研究区划分为公路、绿地、湖泊、屋顶等 8 种土地利用类型，其中 30%、50%、70%不透水区分别指不透水面积占比为 30%、50%、70%的区域。如图 3 所示。土地利用类型的曼宁系数及下渗率参照城市排涝相关标准及文献[22-23]确定，具体如表 1 所示。

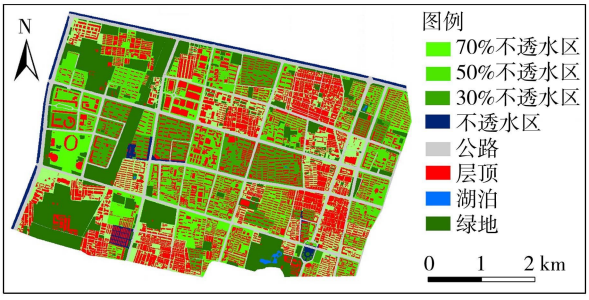


图 3 研究区土地利用类型

Fig. 3 Land use type of study area

c. 排水管网数据。管网模型建立所需的基础数据主要包括雨水口位置、井底高程、管道走向、管径与形状等，本文所用到的管网资料由长治市住房和城乡建设局提供。对研究区的管道、节点、排口进行概化处理，概化后的管道为 2 984 根，节点为 2 955 个，排口为 24 个。研究区内雨水管道均为圆形管道，模型中管道直径参数根据管道实际直径设定。研究区管网分布如图 1 所示。

表 1　不同土地利用类型参数

Table 1　Parameters of different land use types

土地利用类型	下渗率/(mm/h)	曼宁系数	面积/km²	占比/%
公路	0	0.014	2.077 0	11.77
不透水区	0	0.014	0.438 1	2.48
湖泊	0	0.025	0.026 3	0.15
屋顶	0	0.014	4.768 3	27.02
70%不透水区	5.5	0.023	1.955 2	11.08
50%不透水区	16.5	0.040	1.580 2	8.95
30%不透水区	27.5	0.057	2.3932	13.56
绿地	55.0	0.100	4.409 8	24.99

d. 设计降雨。根据《长治市城区暴雨强度公式编修规划》,研究区短历时降雨雨型采用芝加哥雨型,暴雨强度公式见式(4)。根据长治市 1981—2016 年降水量资料,逐年选定各短历时降雨过程的雨峰位置系数,确定长治市综合雨峰系数 $r=0.375$,可见研究区降雨集中且雨峰位置较为靠前。利用芝加哥雨型生成器生成的降雨重现期分别为 5、10、20、30、50、100 a 的短历时(2 h)设计降雨过程如图 4 所示。

$$q=\frac{3\,450.721(1+0.873\lg P)}{(t+21.176)^{0.847}} \tag{4}$$

式中:q 为设计暴雨强度;P 为降雨重现期;t 为降雨历时。

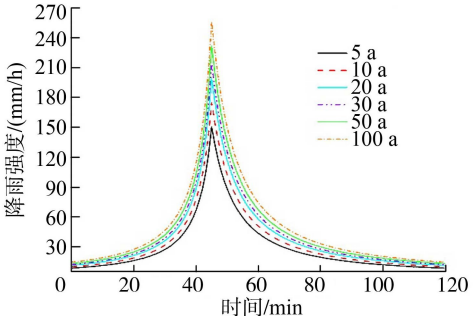


图 4　不同降雨重现期下的短历时设计降雨过程

Fig. 4　Short duration design rainfall processes under different rainfall recurrence periods

e. 易涝点选取。选取的 4 个易涝点分别为:A 点北外环铁路立交、B 点捉马西大街铁路立交、C 点太行西街铁路立交、D 点政务中心及体育路。其中 A、B、C 点为下穿通道,D 点为普通路面易涝点,位置如图 1 所示。

2.2.2　模型验证

选取长治市 2021 年 7 月 2 日的实测降雨及积水数据进行验证,该场降雨历时 2 h,累积降水量为 49 mm,降雨过程如图 5 所示。利用耦合模型分别对 A、B、C 点的积水过程进行模拟,将得到的结果与实测积水深度进行对比,结果表明 A、B、C 点的模拟最大积水水深分别为 0.38、0.42、0.49 m,与实测最大积水水深(0.40、0.45、0.50 m)的相对误差分别为 8.6%、5.0%、3.2%,纳什效率系数为 0.77。可见耦合模型模拟结果与实测数据吻合良好,模型有良好的精度,可用于研究区易涝点积涝特征的研究。

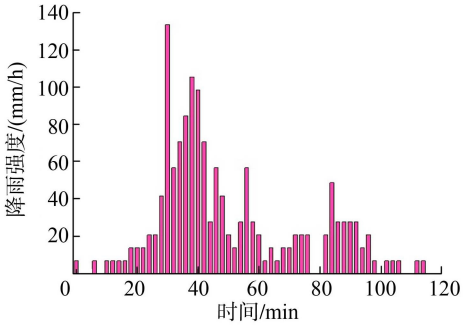


图 5　2021 年 7 月 2 日降雨过程

Fig. 5　Rainfall process in July 2, 2021

3　结果与分析

3.1　易涝点的积涝特征

针对降雨重现期分别为 5、10、20、30、50、100 a 条件下的 6 场短历时设计降雨,对 A、B、C、D 4 个易涝点的积涝特征进行模拟,结果如表 2 所示。

3.2　积水量分析

易涝点的积水量变化过程在一定程度上体现了内涝严重程度。图 6 为不同降雨重现期条件下易涝点积水量变化过程。由图 6 可见,降雨重现期对不同类型的易涝点积水量峰值影响程度不同,并且由于排水条件的差异,对不同下穿通道的影响程度也不同。下穿通道 C 点的积水量增加相对明显,降雨重现期从 5 a 增大到 100 a,C 点积水量峰值由

表 2　不同降雨重现期条件下易涝点的积涝特征

Table 2　Waterlogging characteristics of flood prone points under different rainfall recurrence periods

重现期/a	A 点			B 点			C 点			D 点		
	积水深度峰值/m	积水量峰值/m³	积水面积峰值/m²	积水深度峰值/m	积水量峰值/m³	积水面积峰值/m²	积水深度峰值/m	积水量峰值/m³	积水面积峰值/m²	积水深度峰值/m	积水量峰值/m³	积水面积峰值/m²
5	0.66	2 443	3 717	0.76	4 049	5 364	0.33	512	1 611	0.16	3 223	19 593
10	0.76	4 192	5 544	1.09	7 420	6 840	0.78	2 041	2 637	0.18	3 760	21 609
20	0.86	5 984	6 939	1.25	10 006	8 109	1.11	3 532	3 195	0.18	4 236	23 157
30	0.94	6 935	7 344	1.27	11 362	8 964	1.22	4 387	3 618	0.19	4 483	23 643
50	1.06	8 074	7 614	1.35	12 901	9 585	1.34	5 505	4 131	0.20	4 780	24 354
100	1.21	9 600	7 974	1.46	14 798	10 179	1.55	7 082	4 599	0.21	5 149	25 083

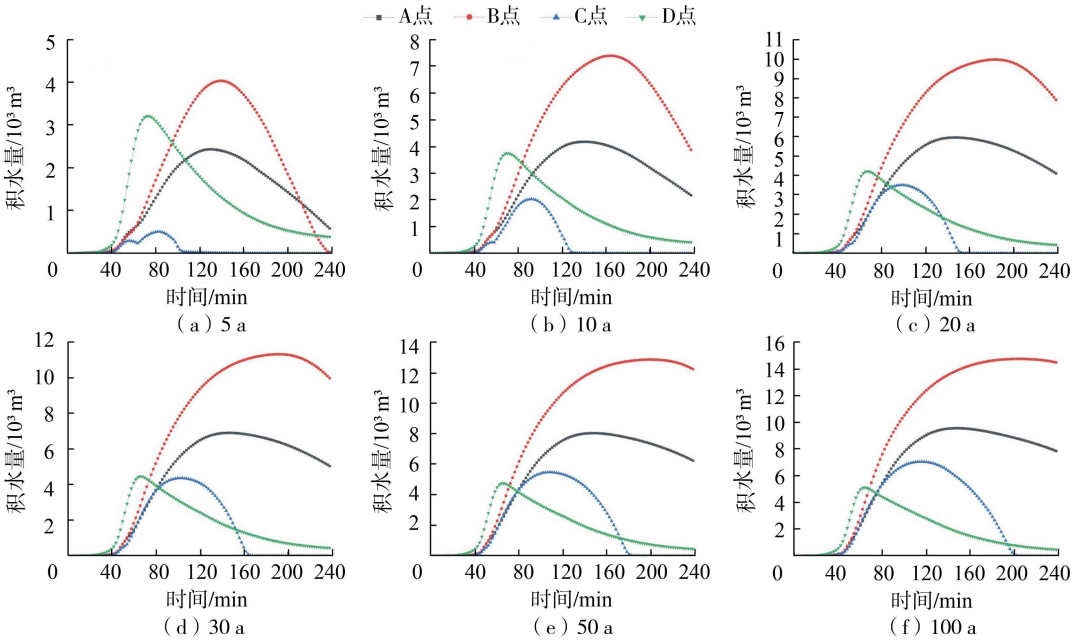


图 6　不同降雨重现期条件下易涝点积水量变化过程

Fig. 6　Process of water accumulation in flood prone points under different rainfall recurrence periods

512.8 m³ 增大到 7 082.9 m³，增加率为 1 281.3%，而 A 点和 B 点积水量峰值分别增加 292.8% 和 265.5%。降雨重现期对 D 点积水量峰值影响较小，降雨重现期从 5 a 增大到 100 a，D 点积水量峰值由 3 223.7 m³ 增大到 5 149.4 m³，增加率为 59.7%，远小于下穿通道易涝点。D 点在不同降雨重现期条件下积水量变化曲线形状几乎相同，除积水量随降雨重现期增加而轻微增大外，积水持续时间、积水消退时间都几乎不变。另外，随着降雨重现期的增加，下穿通道积水持续时间变长、积水消退时间滞后，其中 C 点总能在降雨结束后 2 h 内将积水全部排出。

3.3　积水水深分析

积水到达一定深度后会对人民生命财产安全造成严重威胁，故常将积水水深作为判断内涝风险的重要指标。图 7 为不同降雨重现期条件下易涝点积水水深变化过程，图中 $t = 45$ min 为雨强峰值时刻。由图 7 可见，在 45 mim 之前，4 个易涝点积水水深都很小，且降雨重现期对不同类型易涝点的积水水深影响较小，D 点积水水深稍大于 A、B、C 点；45 min 之后，积水水深迅速增加，积水水深增长速率逐渐加快，

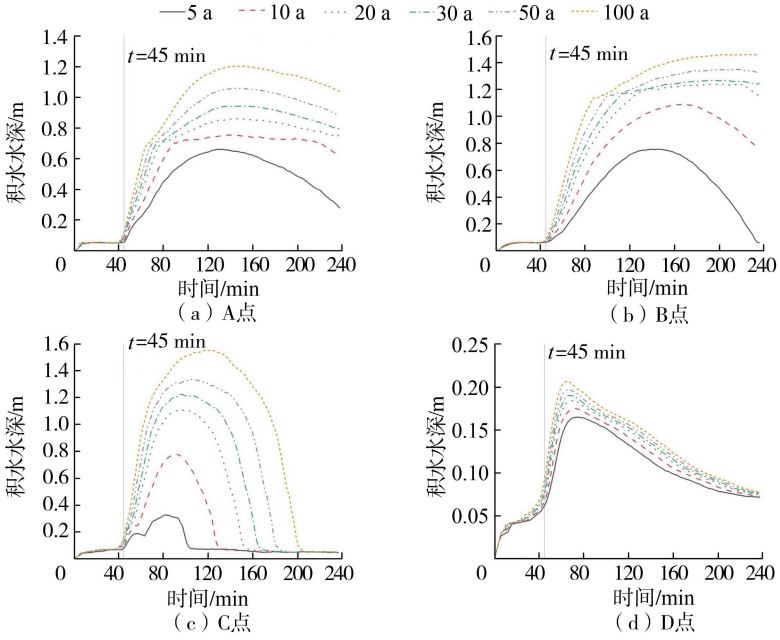


图 7　不同降雨重现期条件下易涝点积水水深变化过程

Fig. 7　Process of water depth variation in flood prone points under different rainfall recurrence periods

直到达到峰值。下穿通道积水水深变化受降雨重现期影响程度远大于普通路面,降雨重现期从 5 a 增加到 100 a,A、B、C 点积水水深峰值分别增加了 0.55、0.70、1.22 m,而 D 点积水水深峰值仅增加了 0.05 m。

表 3 为不同降雨重现期条件下易涝点积水水深最大增长速率。由表 3 可见,下穿通道易涝点积水水深最大增长速率在不同降雨重现期条件下均远大于普通路面易涝点。其中,降雨重现期为 100 a 时,A、B、C 点积水水深最大增长速率分别为 D 点的 340%、350%、670%。降雨重现期对不同类型的易涝点积水水深最大增长速率的影响也不同,降雨重现期从 5 a 增大到 100 a,D 点积水水深最大增长速率为 31.3%,而 A、B、C 点的积水水深度最大增长速率分别为 83.3%、92.1%、581.0%,为 D 点的 266%、294%、1 856%。

表 3　不同降雨重现期条件下易涝点积水水深最大增长速率

Table 3　Max increase rate of water depth in flood prone points under different rainfall recurrence periods

降雨重现期/a	最大增长速率/(m/min)			
	A 点	B 点	C 点	D 点
5	0.017	0.014	0.018	0.007
10	0.022	0.020	0.030	0.008
20	0.027	0.024	0.042	0.009
30	0.031	0.029	0.047	0.009
50	0.030	0.031	0.059	0.010
100	0.034	0.035	0.067	0.010

为更直观地反映易涝点积水状况随时间的变化过程,选取降雨重现期为 30 a 的情况为例,时间节点分别选取 30 min(雨强峰值时刻前)、45 min(雨强峰值时刻)、100 min(雨强峰值时刻后)、180 min(退水期)模拟研究区的积水水深,结果如图 8 所示。由图 8 可见,t = 45 min 时地表开始出现积水;t = 100 min 时地表积水先后达到峰值;t = 180 min 时,下穿通道 A、B 积水未消退,C 点几乎全部消退,地表积水大幅减少。

3.4　峰现时间分析

城市内涝过程中,路面由于相对平滑且下渗率小而成为内涝的易发区,路面易涝点积涝特征峰现时间受地形条件和排水条件的影响较大。图 9 为不同降雨重现期条件下易涝点积涝特征峰现时间。由图 9 可见,降雨重现期越大,A、B、C 点积水量峰值滞后时间越长。其中,A 点积水量峰现时间受降雨重现期影响较小,降雨重现期为 5 a 时积水量峰现时间为 130 min,降雨重现期为 100 a 时积水量峰现时间为 147 min,100 a 相对于 5 a 仅滞后 17 min;B 点积水量峰现时间受降雨重现期影响较大,降雨重现期为 5 a 时积水量峰现时间为 139 min,降雨重现期为 100 a 时积水量峰现时间为 204 min,100 a 相对于 5 a 滞后 65 min。而对于 D 点,降雨重现期为 5 a 时积水量峰现时间为 73 min,降雨重现期为 100 a 时积水量峰现时间为 65 min,100 a 相对于 5 a 提前 8 min。可见,下穿通道与普通路面的易涝点积涝特征峰现时间差别较大,随着降雨重现期的增大,下穿通道易涝点的积水量峰现时间滞后而普通路面易涝点的积水量峰现时间提前;不同易涝点的积涝特征峰现时间变化幅度不同,普通路面易涝点积涝特征

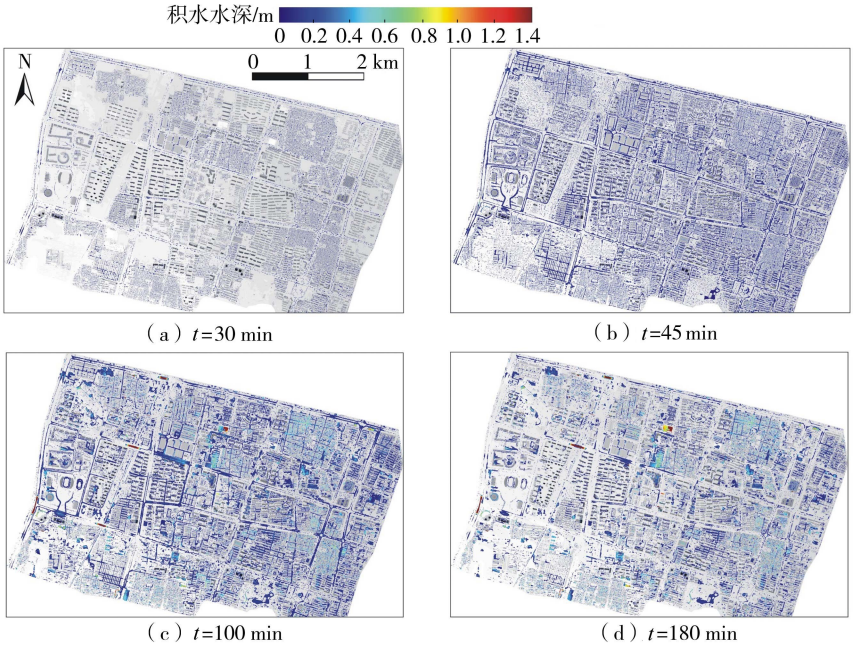


图 8　降雨重现期为 30 a 条件下研究区积水水深模拟结果

Fig. 8　Simulation results of accumulated water depth in study area under condition of rainfall recurrence period of 30 a

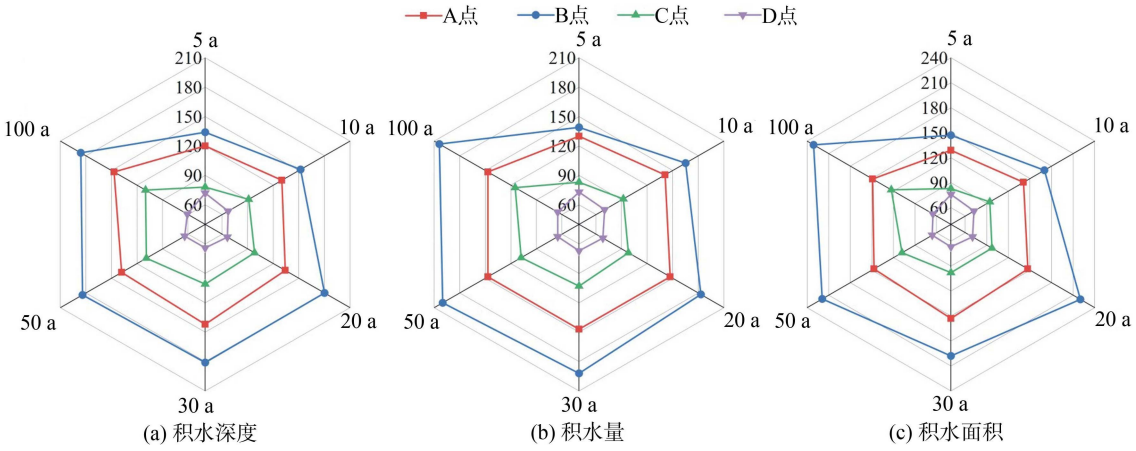


图 9　不同降雨重现期条件下易涝点积涝特征峰现时间(单位:min)

Fig. 9　Time of peak occurrence of waterlogging characteristics in flood prone points under different rainfall recurrence periods (unit: min)

峰现时间变化幅度比下穿通道小,下穿通道中 B 点积涝特征峰现时间变化幅度最大。

由图 9 可见,同一降雨重现期条件下,不同易涝点积水水深峰现时间由先至后依次为 D 点、C 点、A 点、B 点。随着降雨重现期的增加,D 点积水水深峰现时间与 A、B、C 点差值增大。降雨重现期为 5 a 时,A、B、C、D 点积水水深峰现时间依次为 129、147、83、76 min,D 点积水水深峰现时间相对于 B 点提前 71 min,相对于 C 点提前 7 min;降雨重现期为 100 a 时,D 点积水水深峰现时间相对于 B 点提前 166 min,相对于 C 点提前 58 min。下穿通道易涝点之间积水水深峰现时间的差异也随降雨重现期的变化而变化,C 点与 A 点积水水深峰现时间之差在降雨重现期为 100 a 时最小,为 26 min;在降雨重现期为 30 a 时最大,为 55 min。C 点与 B 点积水水深峰现时间之差在降雨重现期为 100 a 时最小,为 64 min;在降雨重现期为 20 a 时最大,为 123 min。

3.5　成因分析

不同降雨重现期下易涝点积水水深和管道水深变化曲线形状相似,为探究下穿通道易涝点的内涝成因,以降雨重现期为 30 a 为例,将易涝点积水水深与管道水深的变化过程进行对比,如图 10 所示。

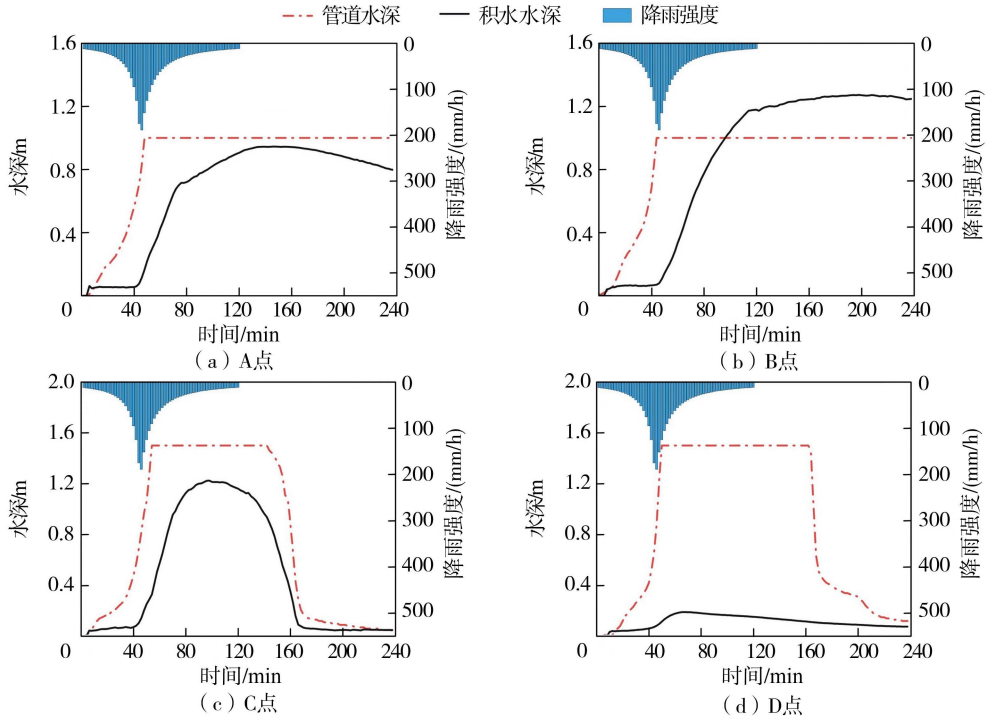


图 10　降雨重现期为 30 a 条件下易涝点积水水深与管道水深变化过程对比

Fig. 10　Comparison of changes in water depth of flooding prone points and pipeline water depth under condition of rainfall recurrence period of 30 a

由图 10 可见,4 个易涝点在雨强峰值时刻之前,管网由空管到满管,排水与蓄水结合使得管网能将地表积水大部分排出或暂时储存;在雨强峰值时刻前后,排水管网作为地下空间被充满,排水速率达到最大值,但由于管网排水能力有限,降雨汇流在易涝点产生积水。在 A、B、C 点,下穿通道由于地势低且汇流面积大,汇流区雨水汇入下穿通道,积水迅速累积。在 D 点,地面易涝点水头高于下穿通道,可以优先将积水通过管网排出。当地面积水几乎排净,管道水头低于下穿通道积水水头时,下穿通道积水开始排出,积水量减少

针对 4 个易涝点进行具体分析,A 点处管道直径为 1 m,在雨强峰值到来前,由于管网蓄排结合,A 点几乎没有产生内涝,但管道水深迅速增加,管网作为地下空间逐渐被充满;在雨强峰值时刻,管道被充满,同时 A 点积水水深迅速增加;直到降雨完全停止,管网依然处于满管状态,但水头有所降低,A 点积水得以排出,积水水深减小;但由于之后管道持续处于满管状态,排水能力有限,A 点积水无法全部排出。B 点处管道直径为 1 m,在雨强峰值到来前,管网和积水水深变化与 A 点相似;但 B 点由于底高程较小,只有当水头更小时才能将积水排出,故 B 点在降雨过程后期积水水深增加速率较 A 点快,峰现时间较 A 点晚;B 点与 A 点管道水深变化曲线形状相似,且几乎不受降雨重现期的影响,故两个易涝点积涝特征受降雨重现期影响相近。C 点的下穿通道底高程低于 A、B 点,但管道直径为 1.5 m,排水和储存积水的能力都较强,因此其管道充满时间晚于 A、B 点,脱离满管状态时间早于 A、B 两点,所以内涝持续时间较短,积水量、积水水深峰现时间较早;随着降雨重现期增大,C 点处管道满管时间增长,积涝时间增长,故其积涝特征受重现期的影响程度远大于 A、B 两点。相比于 3 处下穿通道易涝点,普通路面低洼程度较小,积水水深上限较小,积水累积时积水量很快达到峰值,积涝特征峰现时间较早,在降雨重现期较小时积水量和积水水深峰值就接近上限,故 D 点积涝特征受降雨重现期变化影响较小。

4 结 论

a. SWMM 与 GAST 耦合模型的计算精度高,物理机制明确,其模拟结果的纳什效率系数为 0.77,模拟结果可靠,可用于长治市易涝点积涝特征研究。

b. 研究区下穿通道易涝点积水水深变化受降雨重现期影响程度远大于普通路面易涝点。当降雨重现期由 5 a 增大到 100 a,A、B、C 点积水水深峰值分别增加了 0.55、0.70、1.22 m,而 D 点积水水深峰值仅增加了 0.05 m。同一降雨重现期条件下,下穿通道易涝点积水水深增长速率大,当降雨重现期为 100 a 时,A、B、C 点积水水深最大增长速率分别为 D 点的 340%、350%、670%。

c. 随着降雨重现期的增大,下穿通道易涝点积水量峰现时间滞后而普通路面易涝点时间提前。降雨重现期由 5 a 增大到 100 a,D 点积水量峰现时间提前 8 min,A、B、C 点积水量峰现时间分别滞后 17、65、32 min。同一降雨重现期条件下,易涝点积涝特征峰值出现的顺序依次为:D 点、C 点、A 点、B 点。当降雨重现期为 5 a 时,A、B、C、D 点积水水深峰现时间依次为 129、147、83、76 min, A、B、C 点积水水深峰现时间相对于 D 点分别滞后 53、71、7 min。

d. 降雨雨强达到峰值前,由于排水管网能容纳和排出大部分积水,易涝点仅有少量积水。在降雨雨强达到峰值时,管网被充满,排水能力受限;同时,由于下穿通道汇水面积大,周围雨水汇入,积水量迅速增加。降雨结束后,由于下穿通道底高程较小,而管网水头高于下穿通道积水水头,导致下穿通道积水难以排出,积涝时间长。

参考文献:

[1] 赵彦军,夏军,徐宗学,等. 深圳市雨岛效应分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2021,57(6):768-775. (ZHAO Yanjun, XIA Jun, XU Zongxue, et al. Rain island effect in Shenzhen City[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science),2021,57(6):768-775. (in Chinese))

[2] 白杨,王晓云,姜海梅,等. 城市热岛效应研究进展[J]. 气象与环境学报,2013,29(2):101-106. (BAI Yang, WANG Xiaoyun, JIANG Haimei, et al. Progress of urban heat island effect [J]. Journal of Meteorology and Environment,2013,29(2):101-106. (in Chinese))

[3] 张建云,舒章康,王鸿杰,等. 郑州“7·20”暴雨洪涝几个水文问题的讨论[J]. 地理学报,2023,78(7):1618-1626. (ZHANG Jianyun, SHU Zhangkang, WANG Hongjie, et al. A discussion on several hydrological issues of “7·20” rainstorm and flood in Zhengzhou[J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78 (7): 1618-1626. (in Chinese))

[4] 《中国水旱灾害防御公报》编写组.《中国水旱灾害防御公报 2022》概要[J]. 中国防汛抗旱,2023,33(10):78-82. (Compilation Group of China Flood and Drought Disaster Prevention Bulletin. Summary of China flood and drought disaster prevention bulletin 2022[J]. China Flood & Drought Manageme, 2023, 33 (10): 78-82. (in Chinese))

[5] 国家防范减灾救灾委员会办公室. 2023 年全国十大自然灾害报告[J]. 中国减灾,2024(3):7. (The Office of

the National Disaster Prevention, Mitigation and Relief Commission. The top ten natural disasters in the country in 2023[J]. China Disaster Reduction, 2024(3): 7. (in Chinese))

[6] 李欣怡,侯精明,潘占鹏,等. 城市更新的雨洪过程动态响应模拟研究:以银川市为例[J]. 水利学报,2023,54(11): 1347-1358. (LI Xinyi, HOU Jingming, PAN Zhanpeng, et al. Simulation study on dynamic response of rain and flood process in urban renewal: a case study of Yinchuan City [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023,54(11):1347-1358. (in Chinese))

[7] 张静,张翔宇,白芝兵. SWMM 模型在城市规划阶段洪涝安全评估中的应用[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(增刊 1): 380-385. (ZHANG Jing, ZHANG Xiangyu, BAI Zhibing. Application of SWMM model in flood safety assessment in urban planning stage[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(Sup1): 380-385. (in Chinese))

[8] 丁青云,习雪飞. 基于 SWMM 模型的城市内涝成因分析[J]. 水利水电快报, 2024, 45(4): 31-34. (DING Qingyun, XI Xuefei. Cause analysis of urban waterlogging based on SWMM model[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2024, 45(4): 31-34. (in Chinese))

[9] 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 City based on TELEMAC-2D model[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 58-64. (in Chinese))

[10] LI Xinyi, HOU Jingming, PAN Zhanpeng, et al. Responses of urban flood processes to local land use using a high-resolution numeric model[J]. Urban Climate, 2022, 45: 101244.

[11] 马鑫,侯精明,李丙尧. 城市极端暴雨涝情变化特征模拟分析:以宁夏固原市为例[J]. 人民长江, 2023, 54(7): 1-7. (MA Xin, HOU Jingming, LI Bingyao. Simulation on variation characteristics of urban extreme rainstorm and waterlogging: case of Guyuan City, Ningxia Autonomous Region[J]. Yangtze River, 2023, 54(7): 1-7. (in Chinese))

[12] 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))

[13] 李冰雪,史超,侯精明,等. 沿海城市台风暴雨时空变化致涝特征模拟研究[J]. 水科学进展, 2024, 35(3): 440-452. (LI Bingxue, SHI Chao, HOU Jingming, et al. Characteristics of urban waterlogging induced by spatiotemporal variations of typhoon rainfall in a coastal city[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(3): 440-452. (in Chinese))

[14] 马鑫. 极端暴雨致涝特征变化规律研究:以山西省长治市为例[D]. 西安:西安理工大学, 2023.

[15] SIMONS F, BUSSE T, HOU J M, et al. A model for overland flow and associated processes within the hydroinformatics modelling system [J]. Journal of Hydroinformatics, 2014, 16(2): 375-391.

[16] 杨东,侯精明,李东来,等. 基于扩散波方法的管网排水过程数值模拟[J]. 中国给水排水, 2020, 36(15): 113-120. (YANG Dong, HOU Jingming, LI Donglai, et al. Numerical simulation of pipe network drainage process based on diffusion wave method [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(15): 113-120. (in Chinese))

[17] 侯精明,王润,李国栋,等. 基于动力波法的高效高分辨率城市雨洪过程数值模型[J]. 水力发电学报, 2018, 37(3): 40-49. (HOU Jingming, WANG Run, LI Guodong, et al. High-performance numerical model for high-resolution urban rainfall-runoff process based on dynamic wave method[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(3): 40-49. (in Chinese))

[18] HOU J M, SIMONS F, MAHGOUB M, et al. A robust well-balanced model on unstructured grids for shallow water flows with wetting and drying over complex topography [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2013, 257: 126-149.

[19] HOU Jingming, LIANG Qiuhua, ZHANG Hongbin, et al. An efficient unstructured MUSCL scheme for solving the 2D shallow water equations[J]. Environmental Modelling & Software, 2015, 66: 131-152.

[20] LI Donglai, HOU Jingming, ZHANG Yangwei, et al. Influence of time step synchronization on urban rainfall-runoff simulation in a hybrid CPU/GPU 1D-2D coupled model[J]. Water Resources Management, 2022, 36(10): 3417-3433.

[21] 李东来,侯精明,申若竹,等. 基于地块概化和路网精细模拟理念的城市雨洪过程分区自适应模型[J]. 水科学进展, 2023, 34(2): 197-208. (LI Donglai, HOU Jingming, SHEN Ruozhu, et al. Partition adaptive model of urban rainstorm and flood process based on the simulation concept of plots generalization and road networks fine[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(2): 197-208. (in Chinese))

[22] 高二鹏. 不同植被边坡糙率研究[D]. 北京:北京林业大学, 2014.

[23] 郭雨华,赵廷宁,孙保平,等. 草地坡面水动力学特性及其阻延地表径流机制研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(4): 264-267. (GUO Yuhua, ZHAO Tingning, SUN Baoping, et al. Study on the dynamic characteristics of overland flow and resistance to overland flow of grass slope [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(4): 264-267. (in Chinese))

(收稿日期:2024-05-22 编辑:王芳)