

地表与管网组合排水特征对不同降雨条件的响应规律分析

孙佳辉¹, 侯精明¹, 薛树红², 王 添¹, 马萌华², 张维纳²

(1. 西安理工大学旱区水工程生态环境全国重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要:针对城市内涝治理建设中管网排水能力评估依据不足的情况,基于 GAST-SWMM 二维水力耦合模型,以西安沣西新城为研究区域,模拟分析了在不同累计降雨情况下管网与地表径流排水的占比和流量变化规律,以定量分析管网排水能力变化。结果表明:不同累计降雨下管网与地表径流的排放比值有明显差异,随着累计降雨的增大,该比值呈先增大后减小的趋势,在累计降雨为 10 mm 时达最小值 0.543,在累计降雨 80 mm 时取得最大值 2.241,之后呈下降趋势;管网与地表径流的排放比值对雨峰系数不敏感,在累计降雨较小时最大差异率为 12.96%,在累计降雨较大时最大差异率只有 3.98%;雨峰系数的增大会使各部分排水的峰值流量增大;在累计降雨为 100 mm,雨峰系数为 0.2、0.5、0.8 时管网排水最大流量分别为 6.26、7.45、9.40 m³/s,地表径流排水最大流量分别为 3.19、3.90、4.84 m³/s。

关键词:耦合模型;雨峰系数;排水特征;城市内涝;地表径流排水;管网排水;累计降雨

中图分类号:TU992

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2025)03-0204-08

Analysis of response patterns of combined surface and pipe network drainage characteristics to different rainfall conditions//SUN Jiahui¹, HOU Jingming¹, XUE Shuhong², WANG Tian¹, MA Menghua², ZHANG Weina²(1. State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. POWERCHINA Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: In view of the insufficiency of the basis for evaluating the drainage capacity of pipe networks in urban waterlogging control construction, based on the GAST-SWMM two-dimensional hydrodynamic coupling model, taking Xi'an Fengxi New City as the research area, the proportion and flow variation laws of pipe network and surface runoff drainage under different cumulative rainfall conditions were simulated and analyzed to quantitatively analyze the changes in pipe network drainage capacity. The results show that the emission ratio of pipe network to surface runoff is significantly different under different cumulative precipitation. With the increase of cumulative precipitation, the ratio increases first and then decreases. When the cumulative precipitation is 10 mm, the minimum value is 0.543, and the maximum value is 2.241 when the cumulative precipitation is 80 mm, and then it shows a downward trend. The emission ratio of pipe network and surface runoff is not sensitive to the rain peak coefficient. The maximum difference rate is 12.96% when the cumulative precipitation is small, and the maximum difference rate is only 3.98% when the cumulative precipitation is large. The increase of the rain peak coefficient will increase the peak flow of each part of the drainage. When the cumulative precipitation is 100 mm, the maximum flow of pipe network drainage is 6.26, 7.45, and 9.40 m³/s, respectively when the rain peak coefficient is 0.2, 0.5, and 0.8, and the maximum flow of surface runoff drainage is 3.19, 3.90, and 4.84 m³/s, respectively.

Key words: coupling model; rain peak coefficient; drainage characteristics; urban waterlogging; surface runoff drainage; pipe networks drainage; cumulative precipitation

近年来,受全球气候变化加剧和国内城市化迅速发展的双重影响,下垫面不透水面积占比上升,我国城市遭受暴雨洪涝灾害的频率以及规模不断增

加^[1-3],导致人员伤亡、基础设施损毁以及重大经济损失等灾害事件频发,严重威胁了城市安全运行和可持续发展^[4-5]。

基金项目:国家自然科学基金项目(52009104);陕西重点研发计划项目(2023GXLH-042)

作者简介:孙佳辉(2001—),男,硕士研究生,主要从事城市水利研究。E-mail:1246633276@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

根据统计,我国约有 33% 的大型城市发生过较为严重的内涝灾害^[6],例如河南郑州“20210720”特大暴雨事件,降雨从 2021 年 7 月 20 日 8 时持续至 7 月 21 日 6 时,造成 1478.6 万人受灾,其中因灾死亡、失踪人数高达 398 人^[7];北京“20120721”特大暴雨事件,从 2012 年 7 月 21—22 日 8 时持续降雨,造成 160.2 万人受灾,经济损失 116.4 亿元^[8]。导致城市内涝的一个重要原因是下垫面变化引起的径流过程改变。在非城市区域,雨水主要通过下渗、植物截留、洼蓄等过程消纳^[9];而在城市区域,下垫面发生改变,雨水转为主要从城市地下的排水管网排出,故城市洪涝过程在很大程度上受到管网排水能力的影响^[10]。然而,随着极端暴雨事件频发,城市内涝问题日益凸显^[11]。

计算机技术的快速发展,使得采用数值模型对管网排水及地表径流过程进行模拟成为一种有效的解决方案,通过该模拟方法,可以精确重现和预演城市内涝淹没过程,为相关决策提供科学依据^[12-13]。对于城市降雨径流,可按特征将其分为两个阶段:①地表径流,降雨在经过填洼、下渗等初期损失后产生的净雨;②管网汇流,净雨通过雨水井等汇流入管道,再通过管网排至他处^[14]。针对城市降雨径流、管网排水能力以及排水管网运行机制的研究为建立排水管网模型提供了理论基础^[15]。

SWMM(storm water management mode)在排水管网模拟中具有较为广泛的应用^[16-17],但由于 SWMM 缺少二维水动力模块,故多数研究通过建立耦合模型来进行高精度模拟。王兆礼等^[18]将 TELEMAC-2D 模型与其进行耦合,构建了 TSWM 新模型;杜佳锴等^[19]研究证明,TSWM 模型在城市内涝模拟中具有较高的精度和广泛的适用性。Li 等^[20]将 GAST 模型进行二维耦合,提出一种对某些存在地形数据或排水管网资料缺失的城市区域进行数值模拟并计算其管网排水能力的方法。

对于管网排水能力与运行机制的研究,叶陈雷等^[21]运用 SWMM 模型,模拟不同重现期降雨,对社区尺度和管网排水进行分析,得出管道排水能力的各项指标受降雨历时影响的程度。李保建等^[22]运用 MIKE urban 模型在不同重现期下进行降雨模拟,评价了江西省鹰潭市月湖新区的管网排水能力,得出其管网排水能力没有达到国家规定小中型城市内涝防治设计标准的结论。赵月^[23]构建了 MIKE 耦合模型,在不同降雨特征下对某校区进行模拟,结果表明,该区域管网排水能力较差,但地表不存在中高风险的地表积水。吕佳豪等^[24]运用 GAST 耦合模型,分析了西安市某城区管网的排水口水位变化对

于内涝的影响,认为当地内涝情况随着排水口水位上升而加重,且下游地区所受影响更为明显。

以上研究均对排水管网建立了数值模型,并分析了管网排水能力在不同重现期下的变化,但并没有考虑不同累计降雨情况下地表径流排水及管网排水的实时变化过程。本文基于 SWMM 和 GPU(graphics processing unit)加速的 GAST(GPU-accelerated surface water transport)-SWMM 二维水动力耦合模型,以西安市沣西新城为研究区,在考虑排水口水位对管网排水能力影响的前提下,通过分析不同累计降雨^[25]及雨峰系数条件下管网排水量的占比变化,及其对应的实时流量动态特征,明晰各种情况下管网及地表所需排出的水量,为在城市内涝治理过程中,以减小地表径流为目的的各种措施(如增加城市河道、建设绿色空间等)提供量化数据支撑。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

研究区为陕西省西安市西咸新区的沣西新城,面积 3 km²,东至丰邑大道,南至公园大街,西至钓鱼台路,北至沣润西路^[26](图 1)。该区域属于温带大陆性半干旱气候区,年降水量为 520 mm,降雨主要集中在 5—10 月,其中降水量主要集中在 7—9 月且期间降雨主要以暴雨的形式出现,导致城市内涝灾害频繁发生^[27]。

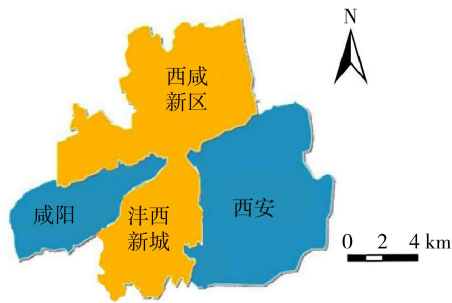


图 1 研究区区位图

Fig. 1 Location map of study area

以研究区的生态绿色廊道及其周围的排水管网系统为研究对象。生态绿色廊道通过两种方式收集雨水:①通过附近的雨水管网收集地表雨水之后汇入绿色廊道;②用雨水边沟收集道路雨水,最后流入绿色廊道。绿色廊道的设计深度依据城市雨水管网规划,开挖深度约为 5 m。为应对暴雨等极端天气引发的内涝风险,绿色廊道内设计为连续的绿谷空间,其深度与雨水管网保持一致。绿色廊道平时作为休闲公园,暴雨时可转变为蓄雨设施,收集周边区域的雨水。雨水管网直接接入绿色廊道,实现雨水的汇集、储存与下渗功能。在暴雨期间,绿色廊道可

作为城市泄洪通道,通过泵站将蓄积的雨水排入邻近的渭河与沔河,该排水机制主要依靠重力作用运行,从而减少人工维护成本。然而在面临大重现期降雨时,若绿色廊道内的蓄积雨水未能及时排放,可能会对排水能力造成影响^[28]。

1.2 研究区数据

采用数字高程数据、降雨数据、土地利用类型分类及分布数据、曼宁数据等构建城市排水管网模型。数字高程数据由 2 m×2 m 的高精度网格构成,共有 510 858 个网格,具体见图 2(a)。土地利用类型分类及分布情况见图 2(b)。曼宁数据中土地利用类型对应的曼宁值由城市排涝标准以及相关文献^[29]确定,子汇水区也需根据土地利用类型划分透水情况,草地、裸土、林地视为完全透水,其余则视为不透水,参数见表 1。

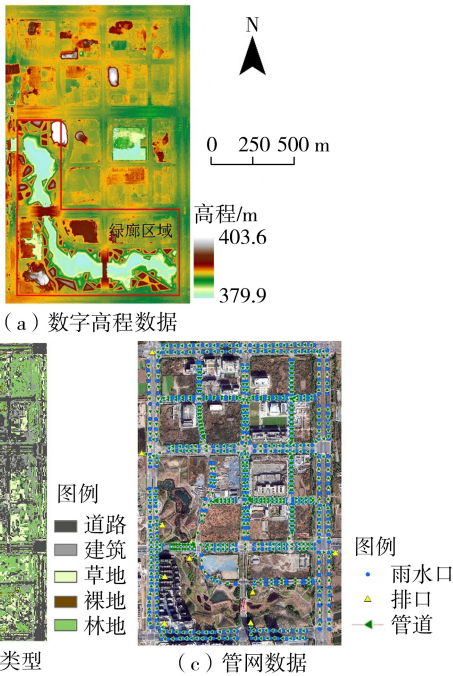


图 2 研究区数据
Fig. 2 Study area data

表 1 土地利用类型及其参数设置

土地利用类型	面积占比/%	下渗率/(mm/h)	曼宁系数
建筑用地	34.93	0	0.015
道路	27.88	0	0.014
草地	12.23	28.39	0.06
裸土	2.19	19.43	0.03
林地	22.77	37.55	0.20

为了保证模型的精确度,研究区的管网信息为由沔西新城城市管理委员会提供的实际测量数据以及现场数据,见图 2(c)。管网基础数据模型中所需的节点坡度及低程,高程数据根据研究区管网数据计算得到,管道的管径形状为圆形,糙率为 0.013^[29]。

2 模型计算

采用 GAST-SWMM 二维水动力耦合模型,排水系统计算部分由 SWMM 采用运力波方法计算^[30]。由于 SWMM 对于二维区域的计算无法满足城市内涝模拟需求^[31],故通过 GAST 模型计算地表水动力过程部分^[32-33]。

模型基于有限体积法 (finite volume method, FVM) 和 Godunov 格式,结合 HLLC 解算器^[29],精确求解二维 Saint-Venant 方程,时间步进采用二阶 Runge Kutta 法^[34],边界处理采用静水重建和底坡通量法^[35],并使用 MUSCL 格式解决非物理现象^[36]。鉴于龚佳辉等^[37]发现使用 GPU 加速可提高模型运算效率 23.88~158.72 倍,故采用 GPU 进行模拟计算。本文主要进行城市雨洪过程模拟,对于模型耦合中的水量交换问题,地表与节点采用垂直连接的方式,运用堰流公式或孔流公式进行计算^[38]。

假设研究区存在某一节点,该管网节点中的水位为 Z_{1D} ,与之对应的地表水位为 Z_{2D} ,地表的高程为 Z , h_{2D} 为地表水位, $h_{2D} = Z_{2D} - Z$ 。如图 3(a)所示,当 $Z_{1D} < Z$ 时,地表产生的地表径流通过管网节点进入排水管网,此时采用堰流公式计算节点入流量。如图 3(b)所示,当 $Z < Z_{1D} < Z_{2D}$ 时,地表径流仍可通过管网节点进入排水管网,但此时采用孔流公式计算节点入流量。如图 3(c)所示,当 $Z_{1D} > Z_{2D}$ 时,管网排水能力达到极限,发生超载,排水管网中的水流将通过该节点溢流到地表,直至管网排水能力恢复才会重新流至管网中,此时采用孔口公式计算管网节点溢流量。

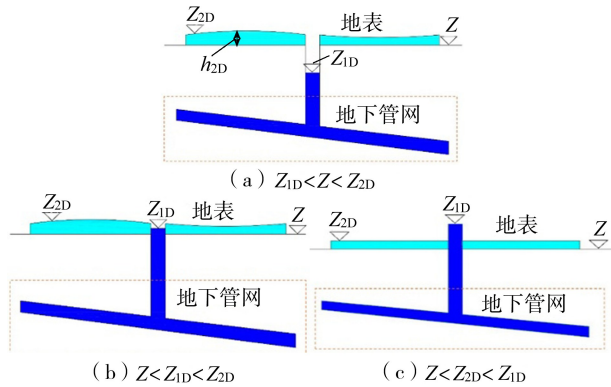


图 3 水量交换
Fig. 3 Water flow exchange

3 模型设计及验证

3.1 模型验证

为证明本文所选取模型及参数的科学性,选取 2016 年 8 月 25 日某场次降雨,将西咸新区云谷小

区 10 号楼处气象站提供的实测降雨数据与本文所用模型模拟得出的数据进行对比。根据气象站实测资料,本次验证采用的降雨为 50 年一遇,双峰雨型,期间累计降雨为 66 mm,历时 7 h。其中降雨峰值出现在 3.1 h。降雨过程见图 4。

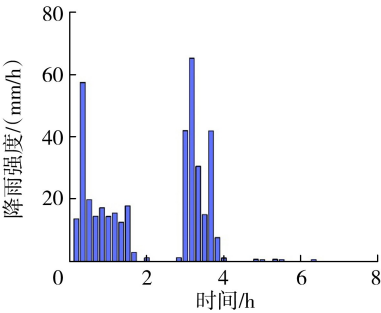


图 4 降雨过程线

Fig. 4 Rainfall process line

GAST-SWMM 二维水动力耦合模型在模拟过程中,能够将积涝雨水通过雨水井等节点汇入排水管网系统,该过程可被视为管网的排水能力。模型参数的设定,堰流系数设为 0.115,地表进入管网孔流系数设为 0.4,管网倒灌到地表孔流系数设为 1。对于下渗率的设定,由于道路、房顶等建筑对于雨水的下渗能力几乎可以忽略不计,故将其视为 0;除建筑、道路外的土地利用类型则采用双环法在当地实测获取,具体参数见表 1。

气象站提供的降雨实测数据为 4 处某时刻的积水点位置与积水面积,具体位置见图 5。通过对比模型模拟实测积水点位置以及积水面积^[39-41],发现两者的积水位置相符。采用式(1)计算积水面积的相对误差,结果均小于 5%(表 2),最大值在点 2 处,为 3.17%;4 个点平均相对误差为 2.35%,验证了本文选取参数的正确性,耦合模型模拟的结果均与实际相符。

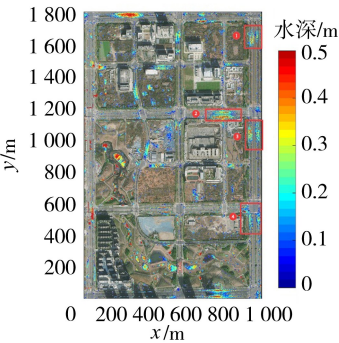


图 5 实际观测积水点与模拟积水点位置

Fig. 5 Observed and simulated flooding locations

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|S_{si} - S_{mi}|}{S_{mi}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: A 为平均相对误差; S_{si} 、 S_{mi} 分别为第 i 个模拟值与实测值; n 为数据个数。

表 2 主要积水点积水面积对比

Table 2 Areal comparison of water accumulation at primary flooding locations

积水位置	实测值/m ²	模拟值/m ²	相对误差/%
1	6 837	6 632	3.00
2	7 901	8 160	3.27
3	6 388	6 592	3.19
4	7 665	7 840	2.28

3.2 降雨数据

根据咸阳气象站提供的 30 a 以上实测降雨资料,推求出暴雨计算公式:

$$q = \frac{1\,239.91(1 + 1.971\lg P)}{167(t + 7.4246)^{0.8124}} \quad (2)$$

式中: q 为设计暴雨强度,mm/min; P 为重现期,a; t 为降雨历时,min。

由式(2)得出雨峰系数为 0.2,以每 10 mm 累计降雨为间隔的 10 次设计降雨过程线如图 6 所示。

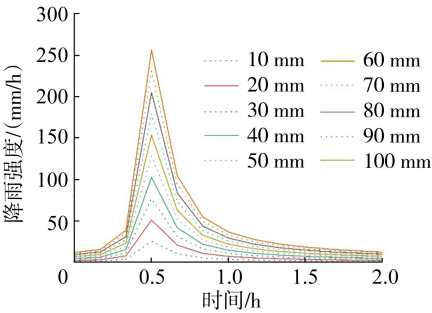


图 6 不同累计降雨设计降雨过程线

Fig. 6 Rainfall process lines of different cumulative rainfall designs

3.3 研究方案

GAST-SWMM 二维水动力耦合模型设定如下:边界条件为开边界,保证边界处雨水能够排出,不影响模拟结果;在降雨前地表不存在内涝积水等;下渗率在模拟期间保持稳定;降雨持续 2 h,模拟共持续 4 h 保证雨水能够充分排出。

关于数据的提取,在 SWMM 中提取绿色廊道附近 7 个排水口的排水量之和作为管网排水量,所选排水口见图 2(c)。在 GAST 模型结果数据中提取绿色廊道各网格水位与地表高程,将两者的差值与单位网格面积相乘得到各网格中的水量,所有网格中水量之和即绿色廊道总水量,最后去除绿色廊道区域降雨总量以及管网排水量即可得到地表径流排水量。

4 模拟结果与分析

4.1 管网与地表径流排水量在不同累计降雨下的比值

分析管网与地表径流排水量比值的变化,明晰管网排水能力极限,可为城市内涝治理措施的制定

提供参考。由图 7 可见,比值随着累计降雨的增加呈现先增加后减少的趋势,且比值在累计降雨 10 mm 处取得最小值 0.543,在 80 mm 时取得峰值,为 2.241。峰值后管网排水量在总排水量的占比开始减小,但仍作为主要的排水设施。分析其原因,主要是因为累计降雨较小,管网排水口水位较低,处于自由出流状态,其水位对于管网的排水能力影响甚微;随着累计降雨的增大,管网排水口开始处于淹没状态,且淹没程度逐渐增加,高水位顶托排水口使得管网排水能力受到限制,雨水难以及时排出,无法通过管网排走的雨水便以地表径流的形式流入绿色廊道中。故在累计降雨 80 mm 后,地表径流排水量的占比逐渐增加。

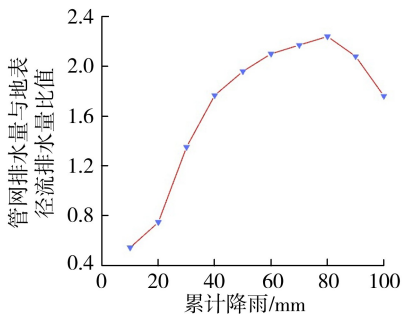


图 7 不同累计降雨下管网排水量与地表径流排水量的比值

Fig. 7 Ratio of drainage volume of pipeline network to surface runoff drainage volume under different cumulative rainfall amounts

累计降雨在 10 mm 与 20 mm 时,比值小于 1。这是因为累计降雨较小时,降雨主要通过下渗作用排出,管网排水量与地表径流排水量只占总降雨的小部分。此外,由于地形影响可能出现内涝等现象,收集的雨水量进一步减少。由于地表径流排水由高程较低的绿色廊道收集,雨水直接通过重力作用流入绿色廊道中。但在累计降雨较小的情况下,地表雨水累积量在达到管网入流量阈值之前,已通过土壤下渗过程被排出。因此,在低累计降雨的情况下,管网排水量低于地表径流排水量。随着累计降雨的增加,管网排水量开始超过地表径流排水量,表明下渗作用排出水量在总排水量的占比逐渐减小,排水管网开始成为主要排雨设施。

4.2 不同雨峰系数下比值的变化

为了探讨地表径流排水与管网排水之间的关系,在原有模型的基础上,考虑了 0.5 和 0.8 两种雨峰系数的情况进行模拟。如图 8 所示,在累计降雨 80 mm 时,不同雨峰系数的管网排水量与地表径流排水量的比值均达到峰值,其中雨峰系数为 0.5 的情况比值最大,达到 2.26;雨峰系数为 0.2 时比值

最小,为 2.24。在所有模拟情况下,比值在 10 mm 累计降雨时均达到最小值。3 种不同雨峰系数得出的比值变化曲线并无显著差异。这主要是因为雨峰系数虽然改变了降雨强度在时间上的分布,但并未改变总的累计降雨。在本次模拟中,降雨过程持续 2 h 后,又有 2 h 允许管网和地表雨水完全流入绿色廊道中,因此在累计降雨较小时,由于下渗作用使得比值的最大差异达 12.96%。虽然在较小降雨强度下,该比值受雨峰系数影响显著;然而随着累计降雨的增加,下渗排水量占比逐渐降低,管网与地表径流排水量的差异在不同雨峰系数条件下均呈现收敛趋势,最终比值趋于稳定,其最大差异仅为 3.98%。

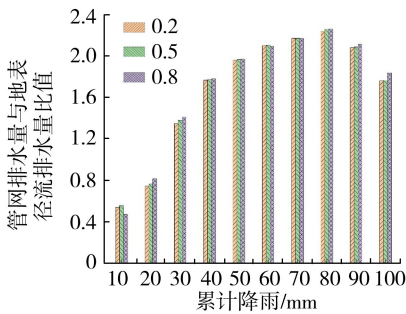


图 8 不同雨峰系数下管网排水量与地表径流排水量的比值

Fig. 8 Ratio of pipeline drainage volume to surface runoff drainage volume under different rain peak coefficients

4.3 地表径流流量与管网流量随时间变化规律

管网排水量与地表径流排水量的比值是降雨通过管网排水口与地表径流排出后进行对比的结果,没有考虑时间的影响,且排水量在时间上可视为该时间段上流量之和,故对管网排水口流量及地表径流流量在不同雨峰系数下在时间上的变化进行分析,以探讨该比值在时间上受雨峰系数的影响情况。

由图 9、图 10 可知,雨峰系数为 0.2 时,管网排水口在 50 min 出现最大流量 6.26 m³/s,地表径流在 40 min 出现最大流量 3.19 m³/s;雨峰系数 0.5 时,管网排水口在 3000 s 出现最大流量 7.45 m³/s,地表径流在 4200 s 出现最大流量 3.9 m³/s;雨峰系数 0.8 时,管网排水口在 6900 s 出现最大流量 9.40 m³/s,地表径流在 6600 s 出现最大流量 4.84 m³/s。可见,随着雨峰系数的增大,管网排水口总流量与地表径流总流量的峰值流量逐渐增大,雨峰系数会在一定程度上影响内涝风险并且雨峰系数越大内涝风险越严重。这是由于在遭受雨峰系数较大的降雨时,在雨峰来临前洼地已经被基本填充,且在管网、地表的积水相对更多,因此在相同的降雨强度下,峰值时间靠后的降雨比峰值较早的降雨具有更大的破坏性。

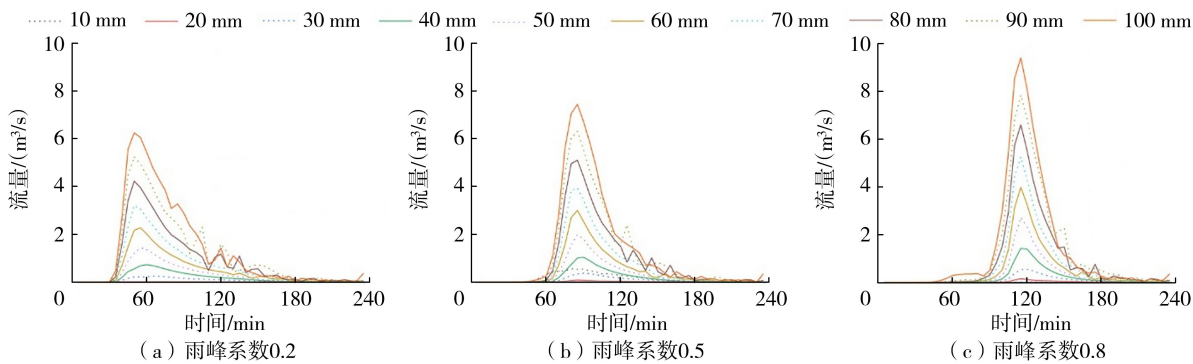


图 9 不同累计降雨下管网排水口总流量变化

Fig. 9 Variation of total discharge at pipe network outfalls under different cumulative rainfall scenarios

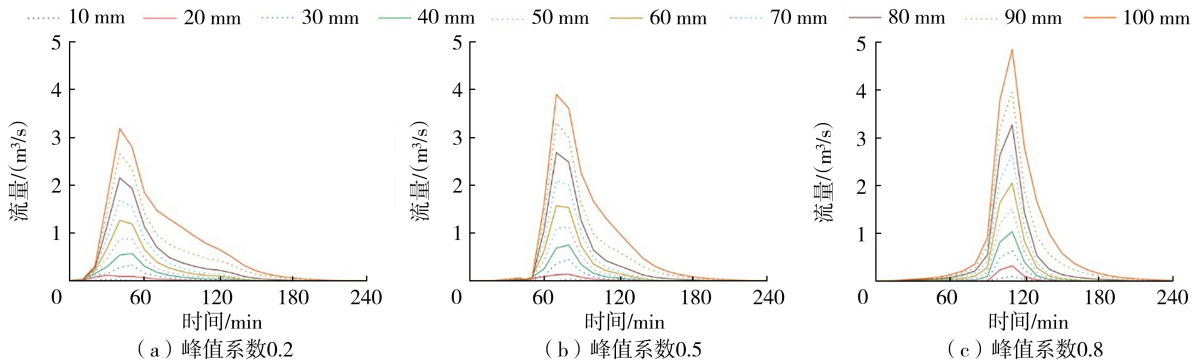


图 10 不同累计降雨下地表径流总流量变化

Fig. 10 Variation of total surface runoff with cumulative rainfall

5 结 论

- a. 不同的累计降雨会影响不同排水路径的排水能力。随着累计降雨的增加,管网排水量与地表径流排水量的比值先增加后减小,在累计降雨 80 mm 时取得峰值 2.26,之后由于排水口水位的影响,管网排水能力受限,故比值开始减小。
- b. 雨峰系数对于管网排水量与地表径流排水量的比值影响在前期有影响,但随着降雨的增大,影响逐渐减弱,这是因为雨峰系数不同但是总降水量相同。在本文设计的工况下,雨水最终都流入绿色廊道中,故不同雨峰系数下的比值相近,在累计降雨较小时,最大差异率为 12.96%,而在累计降雨较大时,最大差异率只有 3.98%。
- c. 雨峰系数对于管网排水口流量与地表径流流量的峰值有明显影响。不同雨峰系数下的地表径流流量与管网排水口流量均接近雨峰处的峰值。且随着雨峰系数的增大,管网排水与地表径流排水的流量峰值均随之增大。在 0.2、0.5、0.85 雨峰系数下,管网排水与地表径流排水取得的峰值流量分别为 6.26、7.45、9.40 m³/s 和 3.19、3.90、4.84 m³/s。

参考文献:

[1] 许文斌,李益飞,李莎,等. 适用于南方城市排水防涝能力评估的暴雨雨型[J]. 中国给水排水, 2023, 39

(23): 133-138. (XU Wenbin, LI Yifei, LI Sha, et al. Rainstorm pattern suitable for evaluation of rainwater drainage and waterlogging control ability in southern cities [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(23): 133-138. (in Chinese))

[2] 许岚杰,侯精明,王添,等. 城市下穿通道积涝特征及其成因分析[J]. 水资源保护, 2025, 41(2): 133-141. (XU Lanjie, HOU Jingming, WANG Tian, et al. Analysis on variation law and cause of waterlogging characteristics of urban underpass channel [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(2): 133-141. (in Chinese))

[3] 李超超,程晓陶,申若竹,等. 城市化背景下洪涝灾害新特点及其形成机理[J]. 灾害学, 2019, 34(2): 57-62. (LI Chaochao, CHENG Xiaotao, SHEN Ruozhu, et al. New characteristics and formation mechanism of flood and waterlogging disasters in the context of rapid urbanization [J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(2): 57-62. (in Chinese))

[4] 张建云,王银堂,刘翠善,等. 中国城市洪涝及防治标准讨论[J]. 水力发电学报, 2017, 36(1): 1-6. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, LIU Cuishan, et al. Discussion on the standards of urban flood and waterlogging prevention in China [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(1): 1-6. (in Chinese))

[5] 徐宗学,陈浩,任梅芳,等. 中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 713-724. (XU Zongxue, CHEN Hao, REN Meifang, et al.

- Progress on disaster mechanism and risk assessment of urban flood/waterlogging disasters in China[J]. Advances in Water Science,2020,31(5):713-724. (in Chinese))
- [6] 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))
- [7] 国务院灾害调查组.河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告[R].北京:中华人民共和国应急管理部,2022.
- [8] 孔锋.2012年北京“7·21”特大暴雨洪涝灾害应对及启示[J].中国减灾,2022(9):42-45. (KONG Feng. Response to the “July 21” heavy rain and flood disaster in Beijing in 2012 and its implications [J]. Disaster Reduction in China,2022(9):42-45. (in Chinese))
- [9] 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))
- [10] 贾高峰,杨福天,梁斌,等.基于SWMM的北京市核心区合流制排水管网清淤方案研究[J].给水排水,2024,60(1):108-114. (JIA Gaofeng, YANG Futian, LIANG Bin, et al. Research on desilting scheme of combined drainage network in Beijing core area based on SWMM [J]. Water & Wastewater Engineering,2024,60(1):108-114. (in Chinese))
- [11] 魏瑛侠,邱顺添,刘洋,等.不同拓扑结构雨水管网对系统承涝韧性的影响[J].中国给水排水,2024,40(11):129-136. (WEI Yingxia, QIU Shuntian, LIU Yang, et al. Impact of topological structure on waterlogging resilience of storm sewer network[J]. China Water & Wastewater, 2024,40(11):129-136. (in Chinese))
- [12] CHEN Wenjie, HUANG Guoru, ZHANG Han. Urban stormwater inundation simulation based on SWMM and diffusive overland-flow model [J]. Water Science & Technology,2017,76(11/12):3392-3403.
- [13] 乔贤玲,侯精明,张文晴,等.社区尺度居民楼内涝淹没过程精细化模拟及室内财产损失评估[J].水利水电科技进展,2023,43(5):73-81. (QIAO Xianling, HOU Jingming, ZHANG Wenqing, et al. Community scale refined simulation of inundation process of houses and indoor property loss assessment[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(5):73-81. (in Chinese))
- [14] 周玉文,赵洪宾.城市雨水径流模型研究[J].中国给水排水,1997,13(4):4-6. (ZHOU Wenyu, ZHAO Hongbin. Research on urban stormwater runoff model[J]. China Water & Wastewater, 1997, 13(4):4-6. (in Chinese))
- [15] YU F T, HONG H Z, CHANG W L, et al. Studies on the integration of geographic information system (GIS) and drainage pipe network model [J]. Advanced Materials Research,2011,317/318/319:1749-1754.
- [16] CAMPBELL C W, SULLIVAN S M. Simulating time-varying cave flow and water levels using the storm water management model[J]. Engineering Geology,2002,65(2/3):133-139.
- [17] 康得军,邱福杰,温儒杰,等.基于SWMM的LID参数局部与全局敏感性分析[J].中国给水排水,2023,39(17):131-138. (KANG Dejun, QIU Fujie, WEN Rujie, et al. Analysis on local and global sensitivity of LID parameters based on SWMM [J]. China Water & Wastewater,2023,39(17):131-138. (in Chinese))
- [18] 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))
- [19] 杜佳锴,徐梦华,陈昱宏,等.无管网资料地区城市雨洪过程模拟研究[J].水力发电学报,2023,42(2):87-96. (DU Jiakai, XU Menghua, CHEN Yuhong, et al. Study on urban stormwater process simulations for areas with no sewer network data [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2023,42(2):87-96. (in Chinese))
- [20] LI Donglai, HOU Jingming, XIA Junqiang, et al. An efficient method for approximately simulating drainage capability for urban flood[J]. Frontiers in Earth Science, 2020;Doi:10.3389/feart.2020.00159.
- [21] 叶陈雷,徐宗学,雷晓辉,等.基于SWMM的城市社区尺度管网排水模拟:以福州市某排水小区为例[J].南水北调与水利科技,2022,20(2):271-280. (YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. Simulation of pipeline network drainage at urban community scales based on SWMM;a case study in Fuzhou City[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2022,20(2):271-280. (in Chinese))
- [22] 李保建,王林,余俊.基于MIKE urban模型的管道排水能力评估[J].净水技术,2022,41(2):111-117 (LI Baojian, WANG Lin, YU Jun. Evaluation of pipelines drainage capacity based on MIKE urban model[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(2):111-117. (in Chinese))
- [23] 赵月.基于MIKE模型的城市典型区内涝模拟及排水除涝方案效果研究[D].西安:西安理工大学,2021.
- [24] 吕佳豪,侯精明,李东来,等.城市排水管网排水口水位变化对城市洪涝过程的影响[J].给水排水,2023,59(5):140-149. (LYU Jiahao, HOU Jingming, LI Donglai, et al. Impacts of variation of drainage pipe network outlet water level on urban flood inundation [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 59(5):140-149. (in Chinese))

- Chinese))
- [25] 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:a case of Guyuan City, Ningxia Autonomous Region[J]. Yangtze River, 2023, 54(7):1-7. (in Chinese))
- [26] 马越,姬国强,石战航,等.西咸新区沣西新城秦皇大道低影响开发雨水系统改造[J].给水排水,2017,53(3):59-67. (MA Yue, JI Guoqiang, SHI Zhanhang, et al. Reconstruction of rain water system in Qinhuang Road, a low-impact development in Fengxi New Town, Xixian New Area[J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 53(3):59-67. (in Chinese))
- [27] 侯精明,李东来,王小军,等.建筑小区尺度下LID措施前期条件对径流调控效果影响模拟[J].水科学进展,2019,30(1):45-55. (HOU Jingming, LI Donglai, WANG Xiaojun, et al. Effects of initial conditions of LID measures on runoff control at residential community scale[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(1):45-55. (in Chinese))
- [28] 孙浩.沣西新城中心绿廊规划及一期工程建设评述[D].西安:西安建筑科技大学,2018.
- [29] 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))
- [30] 官保君,侯精明,李东来,等.小区尺度雨洪过程模拟及径流分配特性研究[J].水力发电学报,2024,43(3):24-34. (GUAN Baojun, HOU Jingming, LI Donglai, et al. Study on simulations of rainfall-flood processes and runoff allocation characteristics on community scale[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024, 43(3):24-34. (in Chinese))
- [31] 房亚军,于川淇,金鑫,等.基于SWMM-CCHE2D单向耦合模型的山地海绵城市内涝管控效果研究[J].武汉大学学报(工学版),2021,54(10):898-906. (FANG Yajun, YU Chuanqi, JIN Xin, et al. Research on water-logging control effect of mountain sponge city based on SWMM-CCHE2D unidirectional coupling model[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(10):898-906. (in Chinese))
- [32] 侯精明,李桂伊,李国栋,等.高效高精度水动力模型在洪水演进中的应用研究[J].水力发电学报,2018,37(2):96-107. (HOU Jingming, LI Guiyi, LI Guodong, et al. Application of efficient high-resolution hydrodynamic model to simulations of flood propagation[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(2):96-107. (in Chinese))
- [33] 齐文超,侯精明,刘家宏,等.城市湖泊对地表径流致涝控制作用模拟研究[J].水力发电学报,2018,37(9):8-18. (QI Wenchao, HOU Jingming, LIU Jiahong et al. Lake control on surface runoff causing urban flood inundation[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(9):8-18. (in Chinese))
- [34] HOU J, SIMONS F, MAHGOUB M, et al. A robust wellbalanced 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(15):126-149.
- [35] 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))
- [36] HOU Jingming, LVANG Qiuqia, ZHANG Hongbin, et al. An efficient unstructured MUSCL scheme for solving the 2D shallow water equations[J]. Environmental Modelling and Software, 2015, 66:131-152.
- [37] 龚佳辉,侯精明,薛阳,等.城市雨洪过程模拟 GPU 加速计算效率研究[J].环境工程,2020,38(4):164-169. (GONG Jiahui, HOU Jingming, XUE Yang, et al. Computational efficiency of gpu acceleration in numerical simulation of urban rain-flood process[J]. Environmental Engineering, 2020, 38(4):164-169. (in Chinese))
- [38] LUAN G, HOU J, WANG T, et al. Research on hydrodynamic and water quality optimization scheduling based on optimization technology for complex of river network structures[J]. Water Resources Management, 2024, 38(4):1339-1358.
- [39] CHEN G, HOU J, ZHOU N, et. High-resolution urban flood forecasting by using a coupled at mospheric and hydrodynamic flood models[J]. Water Resources Management, 2024, 38(4):1339-1358.
- [40] 侯俊,陈诚,郑玉磊,等.基于MIKE flood模型的平原水网地区内涝治理效果模拟研究[J].水利水电科技进展,2024,44(6):41-47. (HOU Jun, CHEN Cheng, ZHENG Yulei, et al. Simulation study on effectiveness of waterlogging control in plain water network areas based on MIKE flood model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6):41-47. (in Chinese))
- [41] 崔洁,王晨,赖文蔚,等.基于水动力耦合模型的城市内涝治理方案效果评估[J].中国防汛抗旱,2024,34(9):53-58. (CUI Jie, WANG Chen, LAI Wenwei, et al. Hydrodynamic coupling model-based evaluation on urban water-logging-control scheme[J]. China Flood & Drought Management, 2024, 34(9):53-58. (in Chinese))

(收稿日期:2024-08-07 编辑:胡新宇)