

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.21.024

降雨雨型和排口水位对城市内涝的影响

李磊¹, 侯精明¹, 周庆诗¹, 翟泽冰², 王兴桦¹, 李冰雪¹,
任耶西³, 杨宇英⁴

(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. 中铁水利水电规划设计集团有限公司, 江西 南昌 330029; 3. 宁波弘泰水利信息科技有限公司, 浙江 宁波 315100; 4. 渭南市住房和城乡建设局, 陕西 渭南 714000)

摘要: 以宁波市某区域为研究对象, 基于GAST-SWMM耦合模型, 研究不同超标准降雨雨型和排口水位条件下的内涝积水情况。结果表明, 不同降雨雨型导致的城市内涝情形存在明显差异, 其中雨峰系数为0.8的单峰雨型造成的淹没面积最大, 在排口自由出流、重现期为1 000年条件下, 其最大淹没面积比雨峰系数为0.2的单峰雨型大12%; 在雨峰系数为0.8的单峰雨型工况下, 排口水位的变化会影响最大淹没面积, 当排口水位从自由出流增加到超过排口顶1 m时, 各重现期下的最大淹没面积相比自由出流时的增幅从小于1%逐渐增加到10%以上, 但当水位淹没排口不超过50%时, 淹没面积没有显著变化; 排口水位升高并不一定会导致管网排水能力下降, 当排口水位使管网适当满流时, 会提升管网的排水能力。

关键词: 城市内涝; 耦合模型; 雨型; 排口水位; 长历时降雨

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)21-0162-07

Effects of Rainfall Patterns and Discharge Outlet Water Levels on Urban Waterlogging

LI Lei¹, HOU Jing-ming¹, ZHOU Qing-shi¹, ZHAI Ze-bing², WANG Xing-hua¹,
LI Bing-xue¹, REN Ye-xi³, YANG Yu-ying⁴

(1. State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. China Railway Water Conservancy & Hydropower Planning and Design Group, Nanchang 330029, China; 3. Ningbo Hongtai Water Resources Information Technology Co. Ltd, Ningbo 315100, China; 4. Weinan Housing and Urban-Rural Development Bureau, Weinan 714000, China)

Abstract: A study was conducted on urban waterlogging in a specific area of Ningbo City using GAST-SWMM coupled model under various scenarios of excessive rainfall patterns and varying discharge outlet water levels. Rainfall patterns significantly influenced urban waterlogging situations. Specifically, the single-peak rainfall pattern with a peak coefficient of 0.8 resulted in the largest inundation area. Under free outlet discharge conditions and a 1 000-year return period, its maximum inundated area was 12%

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52009104); 陕西省重点研发计划项目(2023GXLH-042); 陕西省联合基金资助重点项目(2022JC-LHJJ-09); 中德合作交流项目(M-0427); 中国电力建设股份有限公司重点科技项目(DJ-ZDXM-2022-41); 江西省水利厅科技项目(202325ZDKT24)

通信作者: 侯精明 E-mail: jingming.hou@xaut.edu.cn

greater than that associated with the single-peak rainfall pattern having a peak coefficient of 0.2. Under the single-peak rainfall pattern simulation with a rain peak coefficient of 0.8, variations in the water level at the discharge outlet influenced the maximum inundation area associated with urban waterlogging. When the water level at the discharge outlet rose from free outflow conditions to more than 1 m above the outlet crest, the maximum inundation area across all return periods gradually increased by over 10% compared to free outflow, rising from less than 1%. However, when the water level of discharge outlet submergence was equal or lesser than 50%, the urban waterlogging area remained largely unchanged. An increase in the water level at the discharge outlet did not necessarily result in a reduction in the drainage capacity of the pipeline network. Under conditions where the elevated water level induced a moderately full flow state within the pipeline network, the drainage efficiency could be enhanced.

Key words: urban waterlogging; coupled model; rainfall pattern; discharge outlet water level; long-duration rainfall

近年来,随着全球气候变化和城市化进程的发展,我国城市面临着严峻的内涝挑战。同时,随着越来越多学者对城市内涝的研究不断深入,在内涝及相关影响因素的数值模拟方面已取得了较多成果^[1-2],这些研究大多数集中在降雨雨型方面,一般重现期最大为100年,而且主要围绕短历时单峰雨型展开,但随着极端超标暴雨事件频发,缺少更高重现期及长历时的降雨雨型和排口水位对城市内涝影响的相关研究。

为此,笔者基于GAST-SWMM模型,以宁波市某区域为研究对象,引入不同超标准模式降雨,结合管网排口水位条件,通过数值模拟,系统对比分析重现期更高及长历时的降雨雨型和不同排口水位情况下的城市内涝过程,得出其对内涝积水影响的量化关系,揭示其影响规律,以期面对不同的超标准降雨时,可为城市防洪排涝提供水位控制的理论支撑,提升城市韧性。

1 研究区域概况及基础数据

研究区域位于宁波市海曙区,总面积为1.81 km²。区域内建筑密度较高,具有典型的特征。该地区属于亚热带季风气候,多年平均降水量为1 521 mm,常受强降雨和台风侵袭,因此选择该区域开展城市内涝模拟研究具有实际价值。

研究区域地形高程数据分辨率为2 m×2 m,具体见图1(a)。通过卫星影像数据处理得到研究区域正射影像图,并根据雨水管网CAD图纸数据搭建研究区域范围内的雨水管网模型,其中包括296个节点、280根管道、11个排口,具体见图1(b)。利用

地理信息软件对正射影像图采用最大似然分类法将土地利用类型分为河道、绿地、道路及建筑用地三类,具体见图1(c)。各土地利用类型的曼宁系数和下渗率参考相关文献^[3-4]选取,并经过模型验证确定最终值,道路及建筑用地、绿地和河道的曼宁系数分别为0.015、0.021和0.015,稳定下渗率分别为1、10和0 mm/h。

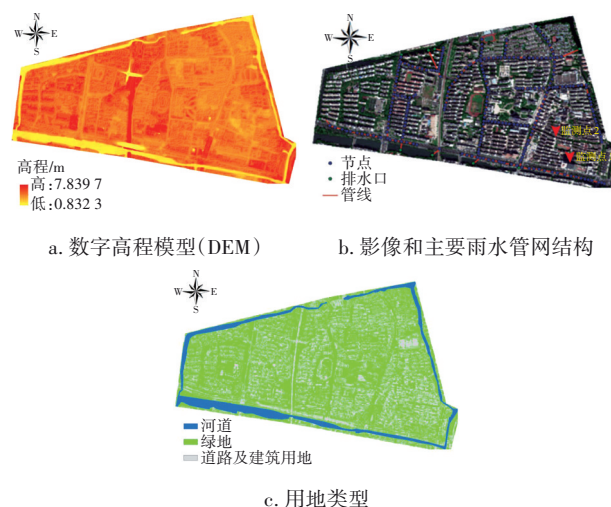


图1 研究区域基础数据

Fig.1 Basic data of study area

2 模型及模型验证

2.1 模型简介

本研究采用GAST-SWMM耦合模型,即耦合SWMM管网模块和显卡加速的地表水及其伴随输移过程模型(GAST)。其中,GAST模型^[5]的地表水动力控制方程为平面二维浅水方程,在计算中忽略运动黏性项、紊流黏性项、风应力和科氏力。

GAST-SWMM耦合模型在雨水井节点处与地下管网进行水量交换(入流或溢流)过程。因此耦合方式主要涉及垂直耦合。根据降雨实际情况,地表与雨水井的水量交换主要涉及3种情形与2种计算方式^[6]。该模型已在国内外多个地区模拟实践中获得验证和应用^[7]。

2.2 模拟设计

本研究在排口自由出流情形下模拟不同设计雨型的短历时降雨过程,通过对比不同雨型下的城市内涝情况寻找最不利的降雨雨型;其次,在最不利雨型下叠加不同的排口水位情形,探究排口水位对城市内涝的影响规律;最后,针对长历时降雨的不同排口水位情形,探究长历时下排口水位对城市内涝的影响规律。

2.2.1 超标准降雨雨型设计

目前常规排水设计规范推荐的设计雨型为单峰芝加哥雨型,但其代表的降雨情形有限,而模式

雨型^[8]对雨型的划分更为细致和全面。因此,本研究采用模式降雨,包括单峰雨型(雨峰系数为0.2、0.5和0.8)、均匀雨型和双峰雨型。考虑到短历时强降雨是致涝的主要因素,且研究区域也存在长历时降雨致涝情况,设计降雨历时设置短历时(2 h)和长历时(24 h)两种。其中单峰雨型为芝加哥雨型,均匀雨型和双峰雨型根据文献^[9-10]选取,长历时雨型则根据台风“梅花”在研究区域24 h历史降雨数据得到。

单峰雨型由浙江省《暴雨强度计算标准》提供的公式直接计算得到,并求得各重现期的总降雨量,再根据均匀雨型和双峰雨型比例进行分配得到7种重现期(10、20、30、50、100、500和1 000年)的设计降雨过程线,共计35场降雨,依次见图2(a)~(e)。长历时降雨以24 h降雨总量为200、400、600、800和1 000 mm按长历时雨型进行分配,共计5场降雨,设计降雨过程线见图2(f)。

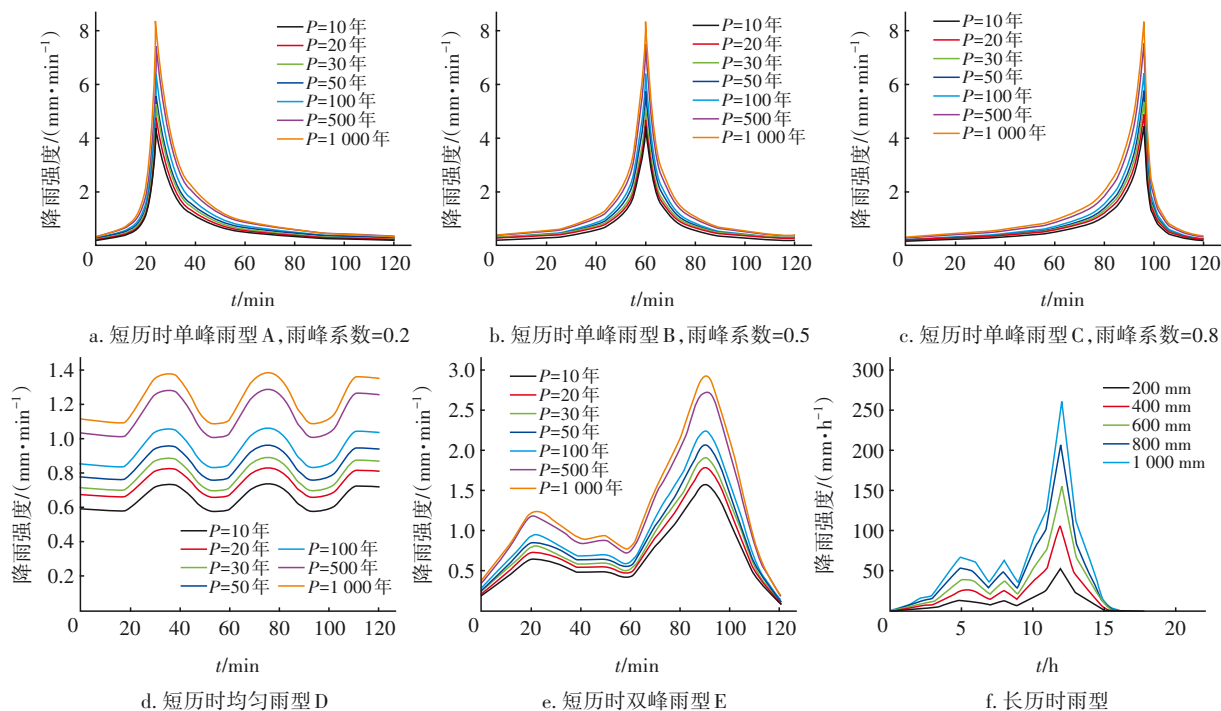


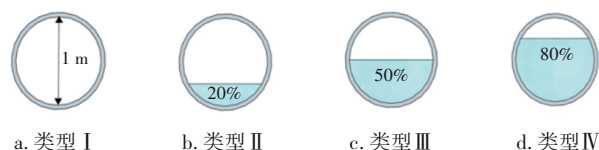
图2 模式雨型降雨过程线

Fig.2 Temporal profile of the model rainfall pattern's precipitation process

2.2.2 排口水位类型

为更好地模拟实际内涝情形,本研究在SWMM的管网排口处设置了多种排口水位条件(各排口均一致),包括水位淹没排口0%(自由出流)、20%、50%、80%和100%,以及超过排口顶0.5 m和1 m,共计7种排口水位类型,依次记作I~VII,具体见图

3。由于研究区域的地形地势原因,排口水位类型VI和VII会出现外水倒灌现象。



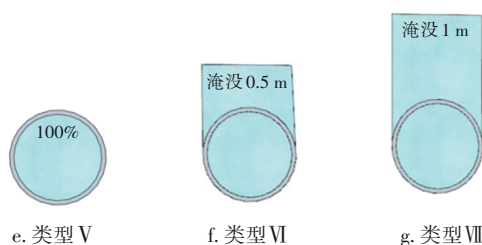


图3 各排口水位类型示意

Fig.3 Schematic of water levels at drainage outlet

2.3 模型验证

为验证所构建模型的可靠性,选择研究区域2019年8月9日10:00至10日15:00的实测降雨数据进行模拟验证,该场降雨历时30 h,总降雨量为121 mm,总模拟时长为36 h。监测点1和2的位置见图1(b),实测和模拟积水深度如图4所示。对于监测点1,纳什效率系数为0.81,最大积水深度误差为8.5%;对于监测点2,纳什效率系数为0.71,最大积水深度误差为7.5%。两个监测点的纳什效率系数均大于0.6,说明所构建的模型具有较高的模拟精度,可以用于模拟研究。

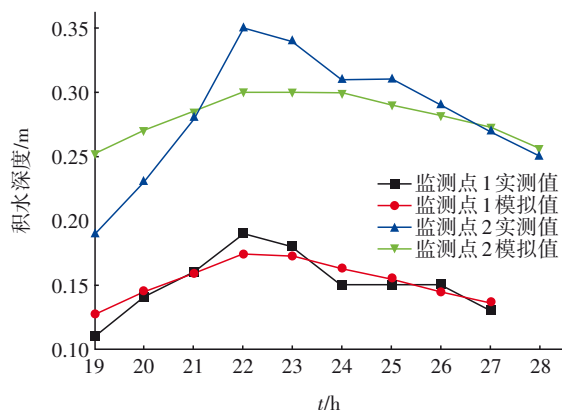


图4 模拟与实测积水深度对比

Fig.4 Comparison of simulated and measured water accumulation depth

3 结果与分析

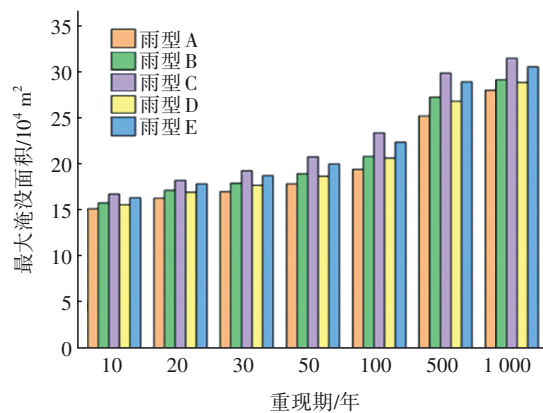
3.1 积水淹没面积

积水面积是判断城市内涝程度的重要指标,因此,将积水深度 >0.15 m的淹没面积求和,得到不同工况下的积水淹没面积模拟数据,并绘制内涝积水淹没面积峰值图。

3.1.1 自由出流下不同短历时雨型的淹没面积

自由出流下不同短历时雨型的积水淹没面积如图5所示。从图5(a)可以看出,在同一重现期下,各雨型的最大淹没面积各不相同,最大淹没面积高

低顺序为:雨型C>雨型E>雨型B>雨型D>雨型A。当 $P=10$ 年时,雨型B~E的最大淹没面积分别是雨型A的1.04、1.11、1.03和1.08倍;当 $P=100$ 年时,雨型B~E的最大淹没面积分别是雨型A的1.07、1.20、1.06和1.15倍;当 $P=1000$ 年时,雨型B~E的最大淹没面积分别是雨型A的1.04、1.12、1.03和1.09倍。5种雨型的最大淹没面积均随着重现期的增加而增大,当重现期从10年增至100年时,最大淹没面积分别增加28.2%、32.0%、39.6%、32.3%和36.8%;当重现期从100年增至500年时,最大淹没面积分别增加29.9%、30.9%、27.7%、29.8%和29.2%;当重现期从500年增至1000年时,最大淹没面积分别增加11.0%、6.9%、5.4%、7.6%、5.6%。



a. 最大淹没面积

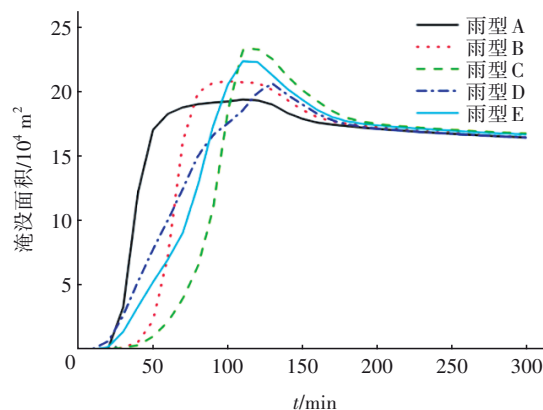
b. $P=100$ 年时淹没面积变化过程

图5 自由出流下的积水淹没面积

Fig.5 Inundated area under free outflow conditions

由图5(b)可知,在同一重现期下,各雨型最大淹没面积峰现时间各有不同,峰现时间由先到后依次为:雨型A、雨型B、雨型C和E、雨型D。5种雨型淹没面积 $>18 \times 10^4$ m²的持续时间依次是90、90、90、60和80 min,可见单峰雨型相比均匀雨型和双峰雨

型造成的淹没时间更长。综合最大淹没面积可知,雨型C造成的内涝积水淹没危害最大,因此雨型C为最不利雨型。

3.1.2 同一雨型不同排口水位下的淹没面积

① 最不利短历时降雨(雨型C)

不同排口水位下雨型C的积水淹没面积如图6所示。

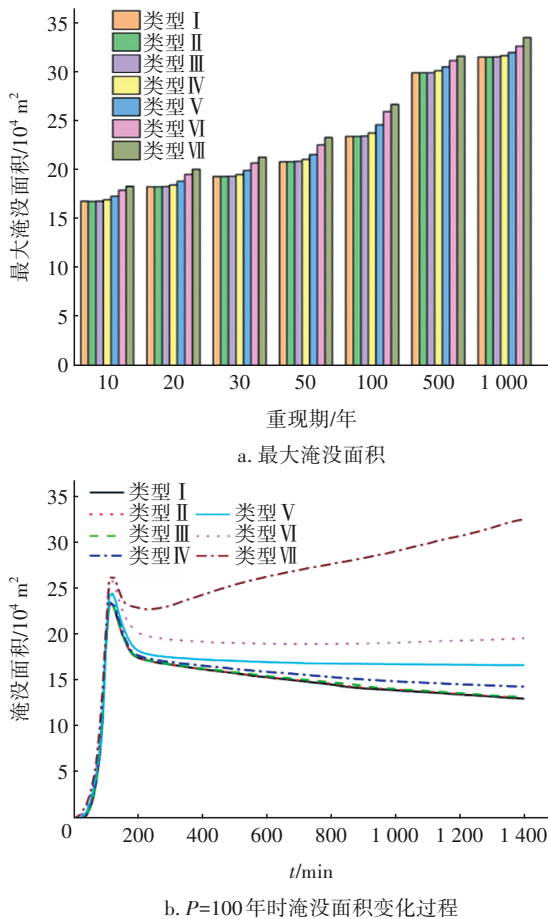


图6 不同排口水位下雨型C的积水淹没面积

Fig.6 Inundated area for rainfall pattern C at different water levels of drainage outlet

从图6(a)可以看出,在同一重现期下,最大淹没面积随着排口水位的增加而增大。在 $P=10$ 年情形下,排口水位类型Ⅱ~Ⅶ相比类型Ⅰ(自由出流)的最大淹没面积分别增加0.01%、0.09%、1.00%、3.10%、6.70%和9.20%;在 $P=100$ 年情形下,排口水位类型Ⅱ~Ⅶ相比类型Ⅰ的最大淹没面积分别增加0.03%、0.14%、1.49%、5.03%、10.74%和13.99%;在其他重现期下,与排口水位类型Ⅰ的最大淹没面积相比,排口水位类型Ⅱ和Ⅲ增加幅度均小于1%,排口水位类型Ⅶ的增加量是水位类型Ⅴ

增加量的3倍。由此可见,当排口水位低于类型Ⅲ时,排口水位不会对城市内涝产生影响,但当排口水位超过类型Ⅲ时,随着排口水位的增加,对城市内涝的影响愈发显著。

如图6(b)所示,在整个降雨过程中,7种排口水位下淹没面积的峰现时间没有明显的变化,均在最大降雨强度结束后的10~20 min内出现,淹没面积随着重现期的增加而增大,同时均会在最大降雨强度结束后出现淹没面积峰值,并开始退水过程,但对于排口水位类型Ⅵ和Ⅶ,淹没面积不会无限减小,当管网进口水位低于排口水位时,外水倒灌发生,淹没面积将会继续增加。在排口水位类型Ⅵ和Ⅶ情形下,随着重现期的增加,退水时段从 $P=10$ 年的1 h增加到 $P=1000$ 年的3 h;在排口水位类型Ⅶ情形下,当退水1 h时,7种重现期的下降面积分别是最大淹没面积的9.95%、13.58%、15.47%、16.67%、14.50%、6.89%和8.86%。因此,在排口水位容易发生倒灌的平原城市,应该有效利用退水阶段开展应急救援活动,以减少超标准降雨事件带来的灾害。

② 长历时降雨

不同排口水位条件下长历时雨型的积水淹没面积如图7所示。从图7(a)可以看出,对于长历时超标准降雨,随着24 h降雨量从200 mm逐步增加到1000 mm,排口水位类型Ⅰ和Ⅵ的最大淹没面积分别相差38.7%、13.1%、1.7%、0.8%和0.3%,可见,当24 h降雨量为600 mm时,研究区域已经基本被淹没。

如图7(b)所示,在整个淹没面积变化过程中,排口水位类型Ⅵ和Ⅶ并没有出现像短历时雨型的淹没面积下降再上升现象。主要原因是长历时超标准降雨已经将研究区域基本淹没,排水过程不再是单一的管网排水,还包括路面直接向河道的漫溢。但在退水过程中,前5种排口水位类型的淹没面积下降速率明显快于类型Ⅵ和Ⅶ,在24 h降雨量为800 mm情形下,降雨结束后经过34 h的退水过程,7种排口水位类型的积水淹没面积分别下降了56.5%、56.9%、53.5%、49.3%、44.4%、14.8%和11.2%。因此,对于重点防护的平原城市,在面对长历时超标准降雨时,将排口水位控制在类型Ⅴ以下,可以有效加快城市内涝积水消退时间。

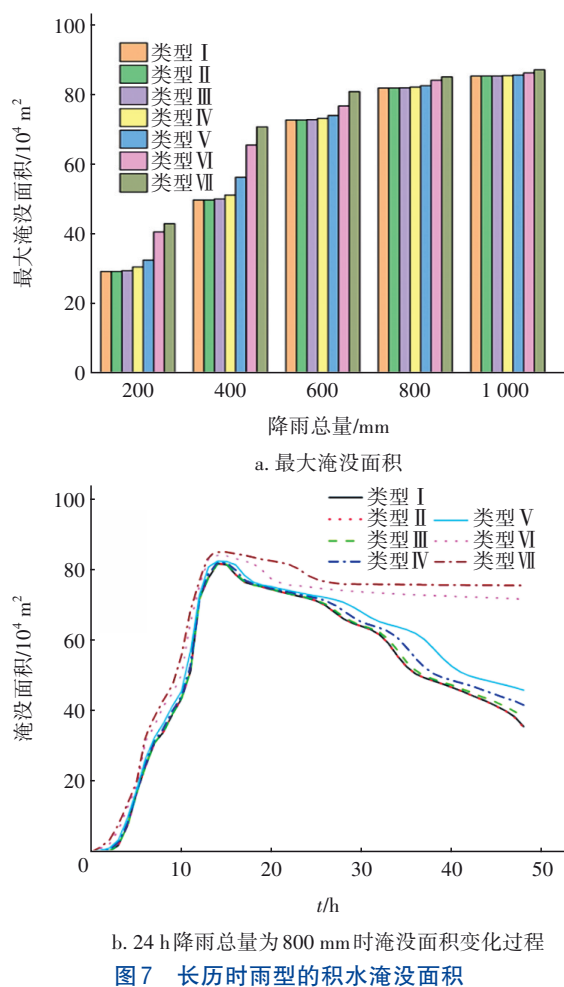


Fig.7 Inundated area for long-duration rainfall patterns

3.2 管网排水总量

管网排水量是城市排水系统能力的重要体现。自由出流工况和雨型C下排口水位类型I~IV在不同重现期的管网排水总量见图8。由图8(a)可知,在自由出流下,当 $P=10$ 年时,管网排水总量由大到小依次为雨型D、雨型B、雨型E、雨型A、雨型C,但随着重现期的增大,雨型C和E的排水总量得到了较大提升,雨型E>雨型C>其他雨型。

从图8(b)可以看出,管网排水能力并不是随着排口水位的升高而减弱。当 $P=10$ 年时排口水位类型IV和III的排水总量明显大于排口水位类型I和II,但随着重现期从50年增大到100年,管网排水总量为:类型III>类型II>类型I>类型IV。造成此现象的主要原因是水位达到一定值时促进了排口管网满流^[10],提高了排口的排水能力。因此,在面对超标准短历时降雨时,将排口水位保持在类型III有利于研究区域的管网排水。

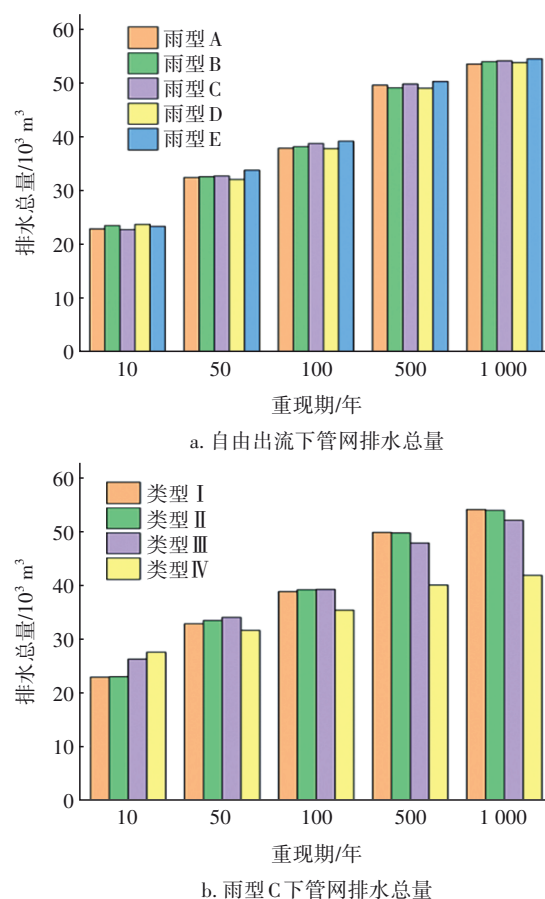


图8 管网排水能力

Fig.8 Drainage capacity of the pipe network

4 结论

① 不同降雨雨型造成的城市内涝情形存在明显差异。在设计5种短历时降雨雨型中,雨峰系数为0.8的单峰雨型致涝性最强,其在重现期为10年和1000年时,最大淹没面积比雨峰系数为0.2的单峰雨型分别大了11%和12%。因此,在进行平原城市风险区域规划时,建议使用适合各自城市的峰后型雨型作为输入雨型。

② 排口水位的变化会影响城市内涝的最大淹没面积。在面对超标准短历时降雨时,当排口水位低于淹没50%时,内涝最大淹没面积相比自由出流时增加幅度均小于1%,基本不会对城市内涝产生影响;当排口水位超过淹没50%时,随着水位的上升,对城市内涝的影响愈发显著。在面对超标准短历时降雨时,排口水位控制在淹没50%以下为最佳;当面对超标准长历时降雨时,应在最大降雨强度结束后将排口水位控制在淹没100%以下,以加快城市内涝消退速度。

③ 排口水位对管网排水能力并不总是减小的作用。随着排口水位从自由出流增加到淹没排口80%,管网排水能力逐步增大,但随着重现期的增大,淹没排口50%的水位类型更有利于管网排水。

参考文献:

- [1] 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).
- [2] 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):101-108,133.
LAI Chengguang, LIAO Yaoxing, WANG Zhaoli. Analysis of urban waterlogging response characteristics under different rainstorm rainfall scenarios[J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(3): 101-108, 133(in Chinese).
- [3] 杨东,侯精明,李丙尧,等.无资料城区管网排水过程概化模拟研究[J].水资源与水工程学报,2020,31(3):139-144.
YANG Dong, HOU Jingming, LI Bingyao, *et al.* Generalized simulation of drainage process in urban networks without data[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020, 31(3): 139-144 (in Chinese).
- [4] 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).
- [5] 侯精明,王润,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, WANG Run, 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).
- [6] 银雅伦,侯精明,李欣怡,等.GAST-SWMM耦合数值模型在大尺度城区致涝风险评估中的应用[J].环境工程,2024,42(4):82-90.
YIN Yalun, HOU Jingming, LI Xinyi, *et al.* Application of GAST-SWMM coupled numerical model in large-scale urban inundation risk assessment[J]. *Environmental Engineering*, 2024, 42(4): 82-90 (in Chinese).
- [7] LI X Y, HOU J M, PAN Z P, *et al.* Responses of urban flood processes to local land use using a high-resolution numeric model[J]. *Urban Climate*, 2022, 45: 101244.
- [8] 梁鑫,侯精明,陈光照,等.考虑降雨空间分布的城市内涝对模式雨型响应特征分析[J].水利水运工程学报,2024(2):44-54.
LIANG Xin, HOU Jingming, CHEN Guangzhao, *et al.* Investigation of the response characteristics of urban waterlogging to model rainfall patterns taking into account the spatial distribution of rainfall[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2024(2):44-54(in Chinese).
- [9] 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[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).
- [10] 朱悦茹,郑子萱,姬熠冉,等.雨水管道末端与河道水动力相互作用模拟研究[J].科技通报,2023,39(8):19-24,32.
ZHU Yueru, ZHENG Zixuan, JI Yiran, *et al.* Numerical simulation study of the hydrodynamic interaction between the end of stormwater pipes and river channels[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2023, 39(8): 19-24, 32 (in Chinese).

作者简介:李磊(1999-),男,甘肃天水人,硕士研究生,主要从事城市水利方面的研究。

E-mail:2781409660@qq.com

收稿日期:2024-06-12

修回日期:2024-08-03

(编辑:刘贵春)