

城市排水与
雨洪管理

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2025. 19. 021

高密度城区内涝时空变化对降雨空间格局响应规律

同 玉¹, 赵 航¹, 侯精明¹, 黄喜峰², 刘立军¹, 栾广学¹,
李东来¹, 陈光照¹, 高 扬¹

(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. 陕西省
水旱灾害防御中心, 陕西 西安 710004)

摘 要: 为深入了解高密度城区内涝时空变化对降雨空间格局的响应规律,以某高密度城区为例,应用耦合二维地表和一维管网的水文水动力过程数值模型,模拟分析研究区域4种降雨空间格局和3种重现期设计暴雨条件下的内涝积水过程。结果表明,内涝积水模式受局部强降雨区位影响显著,不同降雨空间格局之间的积水总量最高相差27倍;上游局部强降雨可通过排水系统对下游无降雨区域造成潜在的内涝风险,且易导致更长的内涝持续时间,并延迟其峰值时刻至降雨结束后的1~2 h。此外,小重现期降雨条件下,内涝点附近地表径流是导致内涝积水的主要因素;大重现期降雨条件下,内涝积水由地表径流与上游管道来水溢流共同导致,且后者易造成更大的内涝风险。

关键词: 降雨空间分布; GAST-SWMM; 积水模式; 数值模拟

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)19-0147-08

Response Characteristics of Spatiotemporal Changes in Waterlogging to Rainfall Spatial Patterns in High-density Urban Areas

TONG Yu¹, ZHAO Hang¹, HOU Jing-ming¹, HUANG Xi-feng², LIU Li-jun¹,
LUAN Guang-xue¹, LI Dong-lai¹, CHEN Guang-zhao¹, GAO Yang¹

(1. State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Xi'an
University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Flood and Drought Disaster Prevention Center
of Shaanxi Province, Xi'an 710004, China)

Abstract: A numerical model integrating two-dimensional surface runoff with one-dimensional pipe network hydrological and hydrodynamic processes was employed to better understand the response characteristics of spatiotemporal changes in waterlogging to rainfall spatial patterns in high-density urban areas. This model was used to simulate and analyze the waterlogging process under four different rainfall spatial patterns and three design rainstorm scenarios with varying recurrence periods in a specific high-density urban area. The urban waterlogging pattern was significantly affected by the location of local heavy rainfall, with the total waterlogging varying by up to 27 times depending on the rainfall spatial pattern. Local heavy rainfall occurring in upstream areas might pose a potential risk of waterlogging in downstream areas that did not experience direct rainfall through the drainage system, and it was easy to lead to longer

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(2023GXJH-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)

通信作者: 同玉 E-mail: tongyu@xaut.edu.cn

waterlogging duration and delay the peak time of waterlogging to 1–2 hours after the rainfall. In addition, under conditions of rainfall with a small recurrence period, surface runoff near waterlogging point was the primary factor contributing to waterlogging. In contrast, under conditions of rainfall with a large recurrence period, urban waterlogging resulted from the combined effects of surface runoff and overflow from upstream pipelines, with the latter posing a higher risk of severe waterlogging.

Key words: spatial distribution of rainfall; GAST-SWMM; waterlogging pattern; numerical simulation

全球气候变化和城市规模的持续扩张导致城市降雨空间分布的不均匀性日益凸显,且大型城市中的热岛效应进一步加剧了降雨分布的地域差异,极易产生不确定性局部强降雨事件^[1],对城市防涝工作和居民生活安全构成严重威胁。因此,深入研究降雨空间分布对城市内涝形成机制的影响具有重要意义。

长期以来,有关降雨空间分布的研究主要聚焦于江河流域等大区域^[2–3],发现大区域降雨分布具有明显的不均匀性。随着城市面积的增大,其降雨特征也发生了变化,例如,庄琦等^[4]发现上海城区的降雨正在向历时更短、雨强更大的特点变化。已有的研究均表明城市降雨空间分布具有显著不均匀性,极易发生局部强降雨事件,给城市防洪排涝工作带来了巨大挑战。陈光照等^[5]应用泰森多边形法研究了降雨空间分布非一致性对内涝的影响,发现在降雨量与降雨区域相同的条件下,相比空间均匀降雨,各重现期下空间分布不均匀降雨的内涝积水量均会减少。然而,以城市为研究对象时,排水系统连通性是城市水文过程中的重要环节^[6],尤其在短历时局部强降雨情景下,可能因地表径流和管网排水共同作用而导致内涝积水程度增加。局部强降雨区位与城市排水系统相互作用下的城市内涝积水模式及其驱动因素亟须进一步研究。鉴于此,以山西省长治市某高密度城区为例,构建了耦合二维地表和一维排水管网的研究区域雨洪过程数值模型,模拟分析高密度城区内涝形成过程及其驱动因素对降雨空间格局的响应规律,以期为城市内涝模拟研究提供参考。

1 研究区域

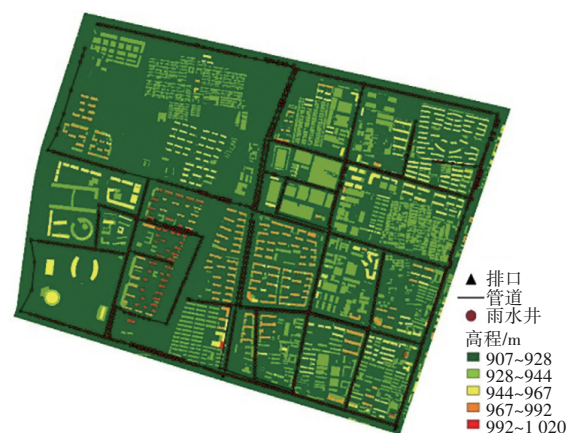
1.1 研究区域概况

长治市位于山西省东南部,与河北、河南两省相邻,群山环绕,大陆性季风强烈、持久,暖温带大

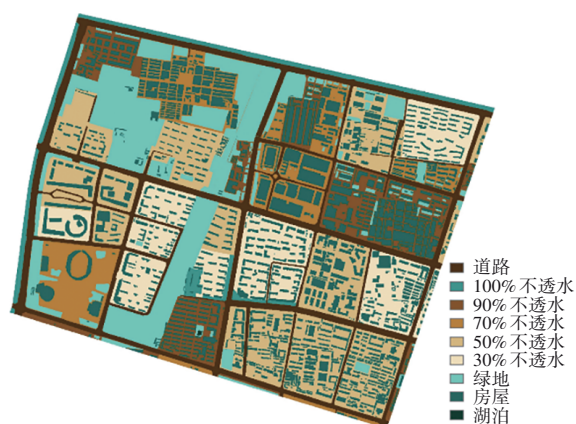
陆性气候显著,属于典型的暖温带半湿润大陆性季风气候。长治市多年平均降水量为407.5 mm。研究区域位于长治市西北方向,漳泽湖国家湿地公园以东。根据住房和城乡建设部公布的全国城市排水防涝安全及重要易涝点整治资料,选择研究区域内一处易涝点捉马西大街铁路立交进行模拟分析。

1.2 基础数据

研究区域东高西低,面积约为8.35 km²,采用无人机航测技术获得研究区域0.25 m的DEM数据,为保证模拟精度和效率,将DEM数据转换成分辨率为3 m的均匀结构网格,共928 193个均匀结构网格,可满足模型模拟道路和房屋等关键微地形对地表漫流的阻水和导流作用。基于正射影像图将研究区域划分为9种土地利用类型。研究区域数字高程信息、管网数据和土地利用类型如图1所示。9种土地利用类型的曼宁值通过查阅相关文献和城市排涝标准确定,下渗过程根据相同区域研究的参考文献^[7–9]确定。道路、100%不透水、90%不透水、70%不透水、50%不透水、30%不透水、绿地、房屋和湖泊的曼宁系数分别为0.014、0.014、0.023、0.04、0.057、0.072、0.1、0.014和0.025,稳定下渗率分别为0、0.5、16.5、27.5、38.5、55、0和0 mm/h。



a. DEM、管网和节点数据



b. 土地利用类型

图1 研究区域的基础数据

Fig.1 Basic data map of study area

2 模拟方法

2.1 模型介绍

2.1.1 GAST模型

GAST模型是由 Simons 等人^[10]开发的耦合了水文和水动力过程的数值模型,该模型基于 Godunov 格式的有限体积法对二维浅水方程进行空间离散,利用 HLLC 近似黎曼求解器进行通量计算^[11],摩阻源项使用模型作者提出的底坡通量法处理^[12],采用基于二阶 TVD-MUSCL 格式提高模型求解精度^[13],CFL 控制稳定性,可严格保持物质守恒并稳健地解决不连续问题。采用两步龙格-库塔法进行时间步长的推进,来保证时间积分的二阶精度^[14]。同时模型引入 GPU 并行计算技术对计算过程进行加速^[15],以达到高速运算的目的。

2.1.2 SWMM模型

SWMM 是一个动态的降水-径流模拟模型,包括地表产流、地表汇流、管网汇流和水质模拟 4 个方面。该模型通过求解圣维南方程来模拟水流在管网中的运动,并提供了运动波、扩散波和动力波三种计算方法^[16]。由于动力波计算方法能够完整求解圣维南方程组,在理论上与实际情况最为接近,故本研究采用动力波法进行排水管网计算。

2.1.3 耦合模型

本研究采用的 GAST-SWMM 耦合水文水动力数值模型可有效耦合二维地表水动力过程与一维管网排水过程^[17]。这种耦合方法主要依赖于雨水井节点处的水量交换机制。当管网内的水位未超过其最大设计高度时,雨水可以通过管网系统排放

至污水处理厂或自然水体。当管网内的水位超过其临界值时,超出的雨水量将通过雨水井溢流至地表。随着管网排水能力的恢复,溢流至地面的雨水又可再次重新流入管网系统。

耦合过程涉及对 SWMM 模型源代码的二次开发,包括在模型中添加雨水节点的水深信息的获取与修改功能。此外,通过创建可以被二维水动力模型实时调用的 SWMM 模型动态链接库 (DLL)^[18]并将其集成到二维水动力模型中,可在雨水节点处实现地表与地下排水系统之间的水量交换模拟。模型采用堰流和孔流公式计算二维地表与一维管网的水量交换过程,并实时更新耦合节点处的地表网格单元与雨水节点的水量计算结果。通过雨水节点的水量信息实时交换,GAST模型与 SWMM 模型实现实时动态耦合^[19]。

2.2 模型验证

为了验证上述耦合模型的合理性,采用长治市 2021 年 7 月 2 日的实际降雨及积水深度数据进行验证,降雨过程见图 2。

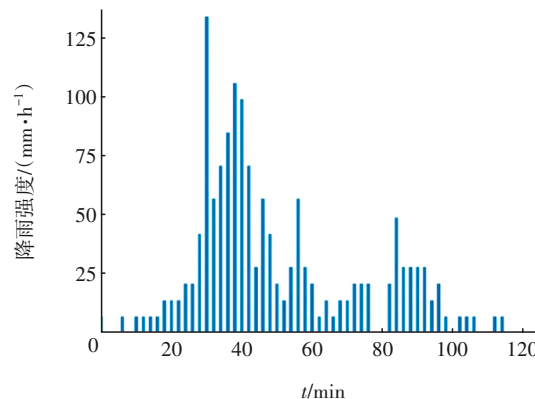


图2 降雨过程

Fig.2 Histogram of rainfall process

将模型模拟结果与实测积水点位及积水深度进行对比。该模型采用水量平衡原理来模拟降雨产流过程,即在降雨量超过地面下渗能力的情况下,超出的水会在地表形成径流,随后通过雨水节点流入地下管网系统。当管网的排水能力低于地表径流量时,导致易涝点逐渐形成内涝。

图 3 展示了研究区域在 6 000 s 时刻的积水深度空间分布结果。可见,本研究构建的城市雨洪模型模拟结果与实测数据高度吻合,平均模拟水深为 43 cm,实测积水深度为 35~45 cm,相对误差为 7.5%,表明本研究构建的模型模拟精度满足研究要求。

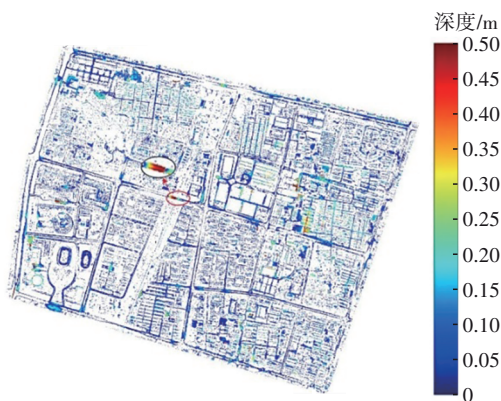


图3 积水量最大时刻地表积水分布情况

Fig.3 Distribution map of surface accumulated water at the moment of maximum accumulated water

2.3 模拟方案设置

2.3.1 降雨空间格局划分

为评估易涝点东南西北四个方向局部强降雨对内涝点积水时空变化的影响,研究区域被划分为4个面积相同的子区域,如图4所示。进一步设计了分别代表内涝点北方、西方、东方和南方发生局部强降雨的A、B、C、D共4种降雨面积相同的模拟降雨方案,方案A的降雨区域为子区域1和2,方案B的为子区域1和3,方案C的为子区域2和4,方案D的为子区域3和4,旨在模拟分析易涝点周边不同区位局部强降雨对内涝积水的影响,揭示其形成机制及潜在驱动因素。

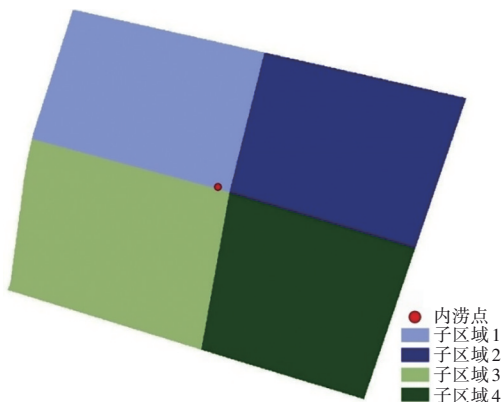


图4 子区域划分示意

Fig.4 Subregion division diagram

2.3.2 降雨数据

根据《长治市城区暴雨强度公式编修规划》,全市降水量在年内分配呈单峰型,故本研究模拟时降雨数据采用芝加哥雨型,降雨重现期选择2年、10年和50年。长治市暴雨强度公式为:

$$q = \frac{3450.721 \times (1 + 0.873 \times \lg P)}{(t + 21.176)^{0.847}} \quad (1)$$

式中: q 为暴雨强度, mm/min; P 为重现期, 年; t 为降雨总历时, min。

根据《长治市城区暴雨强度公式编修规划》,确定长治市综合雨峰系数 $r=0.375$, 降雨集中且雨峰位置较为靠前。根据暴雨强度公式生成的2、10和50年一遇短历时降雨过程如图5所示。

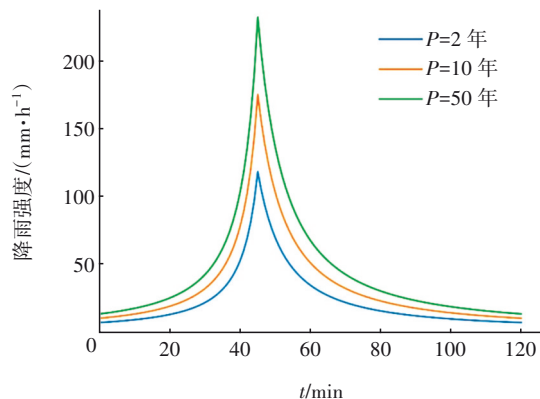


图5 不同重现期设计降雨过程

Fig.5 Design rainfall process at different recurrence periods

3 降雨空间格局对研究区域内涝的影响

基于构建的研究区域雨洪过程高效高精度数值模型,模拟得到捉马西大街铁路立交内涝点在不同模拟方案下的积水过程。模型模拟总时长为6 h,降雨历时2 h,退水4 h,模拟结果输出时间步长为5 min。四周均为开边界,CFL取值0.4。

3.1 内涝点积水总量对不同降雨空间格局的响应

在不同重现期降雨条件下,各降雨方案下捉马西大街铁路立交内涝点积水总量随时间的变化趋势如图6所示。可以发现,在2年降雨重现期下,方案C的内涝积水总量呈现缓慢增长的趋势,这是由于该方案的降雨区域位于上游,管网排水能力充足,上游管网来水不易在内涝点发生溢流,但由于内涝点邻近降雨区域,部分降雨径流通过主道路流向内涝点,从而使得内涝点出现少量积水。相比之下,方案A、B、D由于降雨区域更接近内涝点,因此周边地表径流的汇集速度更快,且更容易通过排水系统排出,仅会在降雨峰值时刻左右地表径流汇集流量超过雨水算子收水流量时,在较短时间内形成较为明显的短时积水,但积水在降雨峰值后快速消退。这表明在较低重现期的降雨事件中,由于城市

下垫面渗透能力降低^[20],周边地表径流汇集是内涝积水的主要成因。在 10 年和 50 年降雨重现期下,4 种方案下积水总量在降雨初期缓慢增长后会会有一个突然增大的趋势,且上游区域存在降雨的方案 A 和 C 相比方案 B 和 D 内涝积水总量突然增大的趋势更加明显,可见随着重现期的增大,4 种方案降雨初

期周边地表径流汇集仍是内涝积水的主要成因,但随着时间推移,存在上游管网来水的方案 A 和 C 使得内涝点附近排水管网长时间处于超载状态^[21],导致后期积水总量快速升高,造成了更大的内涝风险,而方案 B 和 D 由于不存在上游管网来水,内涝点积水可及时由管网排出。

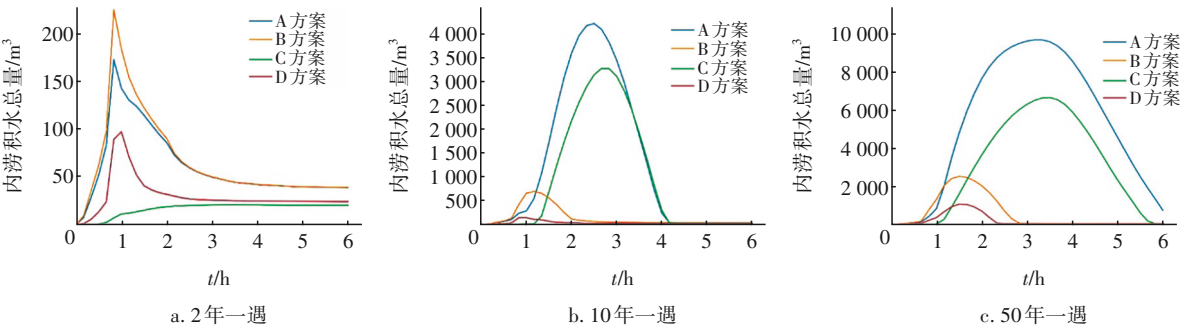


图 6 不同重现期条件下不同降雨方案的内涝点积水总量变化过程

Fig.6 Variation process of total water accumulation in waterlogged point in different rainfall schemes under different recurrence periods

表 1 为各降雨空间格局在不同重现期下的内涝积水总量峰值。可见,不同降雨方案之间内涝积水总量峰值存在差距,2 年、10 年和 50 年重现期下分别为 11、27 和 9 倍。

表 1 各降雨空间格局在不同重现期下的内涝点积水总量峰值

Tab.1 Peak total accumulated water at waterlogging point under different rainfall spatial patterns at various recurrence periods m³

模拟降雨方案	内涝积水总量峰值		
	P=2 年	P=10 年	P=50 年
A	173	4 214	9 671
B	226	697	2 515
C	21	3 275	6 650
D	98	149	1 059

方案 A 在 2 年降雨重现期下的积水总量峰值为 173 m³,随着降雨重现期的增大,积水总量峰值显著增加,尤其在 50 年降雨重现期下,积水总量峰值达到 9 671 m³。这是由于排水管网在小重现期降雨条件下未发生超载现象,地表短时积水仅由内涝点周边地表径流在降雨峰值时段超过雨水算子收水能力导致。降雨区域覆盖了内涝点周边和上游区域,降雨强度较大时,内涝点周边地表径流汇集、上游管网来水溢流和下游排口排水能力的限制共同导致了积水总量显著增加。方案 B 在 2 年一遇降雨条件下的积水总量峰值为 226 m³,且随着降雨强度的

增加而增加,在 50 年降雨重现期下积水总量峰值达到 2 515 m³,但未出现急剧上升趋势。这是由于其降雨区域主要集中在内涝点下游区域,上游无管网水流汇入,小重现期降雨条件下的积水模式与方案 A 一致;随着降雨强度的增加,下游管网发生超载现象,导致内涝点周边地表径流无法及时排入地下管网而使得内涝积水显著增加,内涝点积水模式主要由周边地表径流汇集和下游排口排水能力的限制所致。方案 C 在 2 年降雨重现期下的积水总量峰值最低,仅为 21 m³,这是由于降雨区域距离内涝点较近,虽然排水管网未发生超载现象,但上游区域少部分降雨径流可通过主道路流向内涝积水点;随着降雨重现期的增加,方案 C 的积水总量峰值显著升高,在 50 年降雨重现期下达到 6 650 m³,仅次于方案 A,这是由于内涝点上游管网来水流量较大,管网发生超载现象,使得内涝积水主要由周边雨水井发生溢流所致,可见在降雨重现期较大时,上游局部强降雨可导致下游无降雨区域内涝点发生内涝现象。方案 D 在 2 年降雨重现期下的积水总量峰值为 98 m³,相对较低,在 10 年和 50 年降雨重现期下积水总量峰值(分别为 149、1 059 m³)最低,这是由于方案 D 的降雨区域处于内涝点的下游区域,且在研究区域左下角子区域 3 内存在排水口,子区域 4 内上游管网来水不经过内涝点处排水管网,经其余排水口排出,故方案 D 的内涝积水点不存在上游管网水流汇

入情况,内涝积水完全由于子区域3的地表径流导致,这也是方案D的内涝积水总量峰值低于方案B的主要原因。

综上可知,在小重现期降雨条件下,排水系统足以应对降雨产生的径流量,管网不易发生溢流现象,内涝点周边径流在降雨峰值时刻左右超过雨水算子排水能力,产生短时轻微内涝现象。随着降雨重现期的增大,降雨强度和累计雨量显著增加,导致排水系统的负荷逐渐接近甚至超过其设计能力。此时,内涝点的积水模式呈现出由周边地表径流主导向周边地表径流、下游管网顶托及上游管网来水叠加的趋势转变,且不同降雨空间格局产生的内涝积水模式及其驱动因素具有显著差异。

3.2 积水峰值时刻对不同降雨空间格局的响应

不同降雨空间格局的内涝积水峰值时刻如图7所示。可知,随着降雨重现期的增大,内涝积水峰值出现的时间也相对延后。具体来说,在2年、10年和50年降雨重现期下,平均内涝积水峰值时刻分别出现在1.5、1.8和2.4 h,与梁鑫等^[22]研究发现的峰形为中前峰的单峰雨型内涝积水峰值时刻随着重现期的增大而延后的结论相同。另外,不同降雨空间格局导致的内涝积水峰值时刻存在一定差异,在2年重现期下,C方案下内涝积水峰值出现在3.33 h,相比其他3种降雨空间格局明显滞后,但由于其内涝积水峰值仅为21 m³,故可认为2年重现期下内涝积水峰值出现在降雨开始后1 h左右,在降雨峰值出现后很快就出现内涝积水峰值;10年和50年重现期下内涝积水峰值时刻明显可分为两类,10年重现期下A、C方案的内涝积水峰值平均出现在2.6 h, B、D方案的内涝积水峰值平均出现在1 h,相差1.6 h;50年重现期下A、C方案的内涝积水峰值平均出现在3.3 h, B、D方案的内涝积水峰值平均出现在1.5 h,相差1.8 h。2年重现期下由于降雨量较少,各方案下内涝点积水由周边地表径流汇集引起,导致不同降雨空间格局之间的内涝积水峰值时刻差距较小,但随着降雨重现期的增大,由前文可知,在B、D两种方案下内涝点积水主要由周边地表汇流主导,排水系统能力富余时可迅速排出,导致峰值时刻出现较早,在降雨开始后2 h以内就已出现, A、C两种方案则由内涝点周边地表汇集和上游管网来水共同作用,结合图6可知,降雨初期周边地表径流汇集导致积水总量缓慢增长,在1 h左右增长趋势

突然增大,导致在降雨结束后1~2 h才出现内涝积水峰值,峰值时间滞后最大可达2 h,可见上游管网来水的滞后效应对内涝积水峰值时刻影响显著。

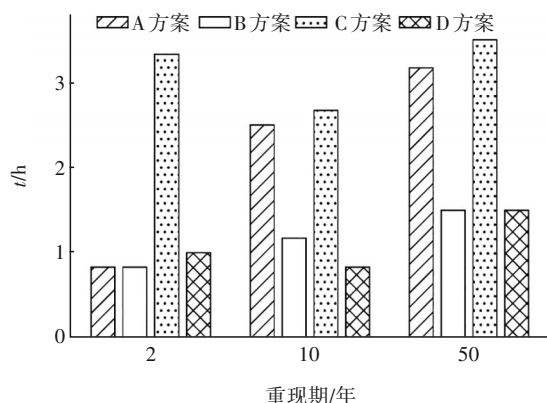


图7 各重现期下不同降雨空间格局的内涝积水峰值时刻

Fig.7 Peak time of waterlogging in different rainfall spatial patterns at each recurrence period

3.3 不同降雨方案对内涝点积水的影响

在分析不同降雨方案对内涝点积水时空变化的影响时,可将降雨空间格局分为两类,分别是内涝点所在区域存在降雨的A和B以及不存在降雨的C和D。发现内涝点是否处于降雨区域对内涝情况影响较小,10年和50年降雨重现期下方方案C同样出现了内涝点积水,可见在排水系统上游出现局部强降雨时也会导致下游内涝点出现积水。

由于2年降雨重现期下积水总量最高仅226 m³,因此主要对10年和50年降雨重现期下的内涝积水情况进行分析。根据4种方案下的模拟结果可以发现,方案B和D显示出相似的内涝积水特性:两种方案的积水量相对较小,分别占全体的10%和4%,且内涝峰值较早出现,平均出现时间为1.3、1.2 h。通过对降雨空间格局以及研究区域地势和排水管网分布进行分析,发现在方案B中降雨主要集中在地势较低的区域,无上游管网来水,因此积水主要来源于附近地表径流的汇集。对于方案D,捉马西大街铁路立交附近未发生降雨,降雨区域的雨水大部分可沿排水管网从子区域3内排出,即便有少量降雨通过排水系统进入内涝点附近,由于流量较小也能迅速排走,因此在这两种方案下内涝点积水量较少且内涝峰值在降雨结束前就已出现。

相比之下,在方案A和C中捉马西大街铁路立交的积水量较大,两种方案下积水总量分别占全体的50%和36%,内涝峰值出现较晚,平均出现时间

为 2.8 和 3.1 h。可以发现,方案 C 中降雨区域聚集在上游区域,上游降雨通过排水系统汇集至立交,引发积水。方案 A 中捉马西大街铁路立交不仅自身处于降雨区域会导致地表径流汇集,还需面对上游管网来水溢流的叠加效应,下游排口排水能力不足时还会导致顶托现象。由此可知,上游管网来水溢流不仅导致了更高的内涝总量,还带来了更长的内涝持续时间。

4 结论

① 内涝积水模式受到局部强降雨区位的显著影响,不同降雨空间格局所导致的内涝积水总量存在差距,在 2、10 和 50 年重现期下分别为 11、27 和 9 倍。

② 小重现期降雨条件下内涝峰值时刻在降雨未结束时就已出现,但随着重现期的增大,上游局部强降雨会导致更长的内涝持续时间,并延迟内涝峰值时刻至降雨结束后 1~2 h。

③ 不同降雨空间格局下的内涝积水模式具有显著差异,且上游管网来水溢流造成了更大的内涝风险。其中,小重现期降雨条件下内涝点周边地表径流汇集是导致内涝积水的主要因素,但随着重现期的增大,内涝积水主要由周边地表径流、下游管网水流顶托及上游管网来水共同作用。

综上,城市排水系统的设计应充分考虑降雨的空间格局及地表和排水管网汇水情况,以提高局部强降雨造成的内涝风险防治能力。本研究对于城市洪涝防治措施的设计和优化具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] 梁萍,丁一汇,何金海,等. 上海地区城市化速度与降水空间分布变化的关系研究[J]. 热带气象学报, 2011, 27(4): 475-483.
LIANG Ping, DING Yihui, HE Jinhai, *et al.* Study of relationship between urbanization speed and change in spatial distribution of rainfall over Shanghai[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2011, 27(4): 475-483 (in Chinese).
- [2] 刘艳群,陈创买,郑勇. 珠江流域 4~9 月降水空间分布特征和类型[J]. 热带气象学报, 2008, 24(1): 67-73.
LIU Yanqun, CHEN Chuangmai, ZHENG Yong. The characteristics of spatial distribution and types of April-September rainfall in the Pearl River Basin[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2008, 24(1): 67-73 (in Chinese).
- [3] 田风霞,赵传燕,冯兆东. 黄土高原地区降水的空间分布[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2009, 45(5): 1-5.
TIAN Fengxia, ZHAO Chuanyan, FENG Zhaodong. Spatial distribution of precipitation in the Loess Plateau region[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2009, 45(5): 1-5 (in Chinese).
- [4] 庄琦,刘曙光,周正正. 上海城区降雨时空分布变化与暴雨频率分析[J]. 水文, 2021, 41(4): 74-80.
ZHUANG Qi, LIU Shuguang, ZHOU Zhengzheng. The change of spatio-temporal precipitation and rainfall frequency analysis in Shanghai[J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(4): 74-80 (in Chinese).
- [5] 陈光照,侯精明,张阳维,等. 西咸新区降雨空间非一致性对内涝过程影响模拟研究[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(4): 37-45.
CHEN Guangzhao, HOU Jingming, ZHANG Yangwei, *et al.* Effects of rainfall spatial inconsistency on flood inundation processes in the Xixian New Area[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(4): 37-45 (in Chinese).
- [6] 林若洲. 考虑暴雨空间不均匀性的城市内涝特征与优化改扩建研究[D]. 杭州:浙江大学, 2022.
LIN Ruozhou. Research on Urban Flooding Properties and Drainage System Rehabilitation under Spatially Variable Rainfall[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022 (in Chinese).
- [7] 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).
- [8] LUAN G X, HOU J M, WANG T, *et al.* Method for analyzing urban waterlogging mechanisms based on a 1D-2D water environment dynamic bidirectional coupling model[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 360: 121024.
- [9] 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).
- [10] 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.
- [11] ZHANG L L, LIANG Q H, WANG Y L, *et al.* A robust coupled model for solute transport driven by severe flow conditions [J]. *Journal of Hydro-environment Research*, 2015, 9: 49–60.
- [12] HOU J M, LIANG Q H, SIMONS F, *et al.* A 2D well-balanced shallow flow model for unstructured grids with novel slope source term treatment [J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 52(2): 107–131.
- [13] HOU J M, LIANG Q H, ZHANG H B, *et al.* An efficient unstructured MUSCL scheme for solving the 2D shallow water equations [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2015, 66: 131–152.
- [14] 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.
- [15] LIANG Q H, XIA X L, HOU J M. Catchment-scale high-resolution flash flood simulation using the GPU-based technology [J]. *Procedia Engineering*, 2016, 154: 975–981.
- [16] 陈晓燕, 张娜, 吴芳芳, 等. 雨洪管理模型SWMM的原理、参数和应用[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(4): 4–7.
- CHEN Xiaoyan, ZHANG Na, WU Fangfang, *et al.* Stormwater management model (SWMM): principles, parameters and applications [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(4): 4–7 (in Chinese).
- [17] 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).
- [18] 李东来. 精细地形及管网资料缺失城区雨洪过程数值模拟方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- LI Donglai. Research on Numerical Simulation Method of Rainfall-Runoff Process in Urban Areas with Missing Fine Topography and Pipeline Data [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021 (in Chinese).
- [19] 栾广学, 侯精明, 郭敏鹏, 等. 海绵改造对城市内涝过程的时空影响分析[J]. *中国防汛抗旱*, 2021, 31(10): 5–9, 41.
- LUAN Guangxue, HOU Jingming, GUO Minpeng, *et al.* The impact analysis of sponge reconstruction on urban inundation process in temporal and spatial scales [J]. *China Flood & Drought Management*, 2021, 31(10): 5–9, 41 (in Chinese).
- [20] 张文晴, 侯精明, 王汉岗, 等. 基于GAST-SWMM模型的西安市中心城区内涝灾害模拟及风险评估[J]. *人民珠江*, 2023, 44(8): 68–81.
- ZHANG Wenqing, HOU Jingming, WANG Hangang, *et al.* Application of efficient high-resolution hydrodynamic model to simulations of flood propagation [J]. *Pearl River*, 2023, 44(8): 68–81 (in Chinese).
- [21] 侯精明, 董美君, 李东来, 等. 超标暴雨下城市雨水管网排水效果——以西安市沣西新城为例[J]. *地球科学与环境学报*, 2023, 45(2): 427–436.
- HOU Jingming, DONG Meijun, LI Donglai, *et al.* Drainage effect of urban drainage-pipe network under extreme rainstorms—taking Fengxi New City in Xi'an City, China as an example [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2023, 45(2): 427–436 (in Chinese).
- [22] 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]. *水利水电工程学报*, 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).

作者简介: 同玉(1984–), 女, 陕西咸阳人, 博士, 讲师, 主要从事城市水文学方面的研究。

E-mail: tongyu@xaut.edu.cn

收稿日期: 2024-07-18

修回日期: 2024-12-19

(编辑: 刘贵春)