

不同暴雨雨型对北京清河流域内涝过程的影响

施奇妙^{1,2}, 徐宗学^{1,2}, 卢兴超^{1,2}, 于磊³, 黄亦轩^{1,2}, 叶陈雷⁴

(1. 北京师范大学水科学研究院; 2. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室;
3. 北京市水科学技术研究院; 4. 北京师范大学国家安全与应急管理学院)

摘要:为揭示不同暴雨雨型下城市内涝淹没的动态变化规律,构建了北京清河流域 SWMM 与 LISFLOOD-FP 耦合模型,分析了不同降雨重现期雨峰系数分别为 0.2(雨型Ⅰ)、0.4(雨型Ⅱ)、0.6(雨型Ⅲ)和 0.8(雨型Ⅳ)设计降雨下的内涝特征。结果表明:3 场实测降雨的模拟流量和淹没过程与实际观测结果基本吻合,验证了模型的可靠性;与 5 a 降雨重现期相比,100 a 降雨重现期下标准雨型(雨型Ⅱ)的溢流总量增长超过 2 倍,最大溢流时长延长 48.02%,淹没面积占比由 12.73% 扩大至 25.11%,较大水深区淹没面积的增幅更为显著;不同暴雨雨型下,高降雨重现期对应的溢流总量随雨峰系数增大呈先增后减趋势,雨型Ⅲ的溢流总量最大,溢流总量的增幅普遍高于溢流节点的增幅;淹没面积与雨峰系数呈正相关关系,达到最大淹没深度的时间呈现“河道晚、两侧早”的空间特征;耦合模型有效整合了两类模型优势,揭示了淹没特征对暴雨雨型的响应机制。

关键词:城市内涝;暴雨雨型;溢流;水文水动力耦合模型;北京清河流域

Impact of different rainstorm patterns on urban waterlogging process of the Qinghe River Basin in Beijing//Shi Qimiao^{1,2}, Xu Zongxue^{1,2}, Lu Xingchao^{1,2}, Yu Lei³, Huang Yixuan^{1,2}, Ye Chenlei⁴ (1. College of Water Science, Beijing Normal University; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology; 3. Beijing Water Science and Technology Institute; 4. School of National Safety and Emergency Management, Beijing Normal University)

Abstract: To reveal the dynamic variation law of urban flood inundation under different rainstorm patterns, an SWMM and LISFLOOD-FP coupled model was developed for the Qinghe River Basin of Beijing. The waterlogging characteristics of different rainfall return periods were analyzed when the rainfall peak coefficients were 0.2 (rainstorm pattern I), 0.4 (rainstorm pattern II), 0.6 (rainstorm pattern III), and 0.8 (rainstorm pattern IV), respectively. The results show that the simulated flow and inundation processes of three measured rainfall events are largely consistent with the actual observations, verifying the reliability of the model. Under the standard rainstorm pattern (rainstorm pattern II), compared to the rainfall return period of 5 a, the total overflow volume increases by more than twice for a rainfall return period of 100 a, the maximum overflow duration extends by 48.02%, and the proportion of inundated area expands from 12.73% to 25.11%, with a particularly pronounced rise in deeper inundated zones. Under different rainstorm patterns, the total overflow volume corresponding to a longer rainfall return period shows a trend of increasing first and then decreasing as the rainfall peak coefficient increases, and the total overflow volume under rainstorm pattern III is the largest. The increase in total overflow volume is generally higher than the increase in overflow nodes. There is a positive correlation between the inundated area and the peak rainfall coefficient. The time to reach the maximum inundation depth shows a spatial characteristic of “late in the river channel and early on both sides”. The coupled model effectively integrates the advantages of the two types of models, and reveals the response mechanism of flooding characteristics to rainstorm patterns.

Key words: urban waterlogging; rainstorm pattern; overflow; hydrological and hydrodynamic coupled model; the Qinghe River Basin of Beijing

近年来,在全球变暖与快速城市化的共同影响下,全球面临洪水风险人口比例持续攀升,洪涝灾害频次及损失显著增加。《中国极端天气气候事件和灾害风险管理与适应国家评估报告》显示,我国极端天气类型多样、差异显著;1955—2015 年,局部强降水、城市内涝及强台风事件频发,群发性和区域性极端天气增多、影响范围扩大。《2023 年全球自然灾害评估报告》统计,洪水是当年发生最频繁的自然

基金项目:国家自然科学基金重点项目(52239003)
作者简介:施奇妙(2000—),女,硕士研究生,主要从事城市水文学研究。E-mail:shiqimiao@mail.bnu.edu.cn
通信作者:徐宗学(1962—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:zxu@bnu.edu.cn

然灾害,全年共记录 152 起,发生频率比过去 30 年的均值高 3.5%。洪涝灾害在 2022 年导致我国 3385.26 万人受灾,并造成 143 人遇难和约 1289 亿元的直接经济损失^[1]。从海河流域“23·7”特大洪水、郑州“7·20”暴雨,到广东怀集“6·18”及深圳“9·7”暴雨,我国多地极端降雨事件频发,贵州、福建、武汉、广西等地频破极值,导致城市功能瘫痪,造成了惨重的经济社会损失^[2]。城市化在促进经济发展的同时,也显著改变了区域产汇流机制与局地气候,导致降雨循环系统发生显著改变,突出表现为短历时强降雨事件频率显著增大^[3]。与此同时,下垫面硬化、人口与经济密度提高导致承灾体暴露度增加,而滞后的排水系统与调蓄能力进一步放大了内涝隐患,这使得暴雨洪涝成为城市可持续发展的重要制约因素^[4-5]。

城市暴雨洪涝模拟技术是预报和应对极端降雨的重要工具,能够为城市防灾规划与应急管理提供重要科学依据。近年来,雨洪模型在成灾机理解析、洪涝风险评价、低影响开发设计以及韧性城市优化等领域得到了广泛应用。代表性的模型包括 InfoWorks ICM、SWMM、MIKE 系列、WCA2D 和 HEC-RAS 等^[6]。其中,SWMM 模型管网汇流计算能力强、开源且精度较高,已成为城市水文模拟的重要工具。随着研究的深入,为更精准地模拟内涝过程,实现降雨-径流-淹没全过程的动态耦合,不少学者通过耦合水文模型与水动力模型构建综合模拟框架。例如:栾震宇等^[7]动态集成 MIKE URBAN 与 MIKE 21,对湖南新化县典型区域开展内涝情景模拟并分析成因;Bisht 等^[8]耦合 SWMM 与 MIKE URBAN 模型对研究区域排水系统进行了系统性设计与优化。LISFLOOD-FP 模型因参数少、操作简便以及计算高效在国外被广泛应用^[9],如 Nandi 等^[10]通过集成 VIC、RAPID 与 LISFLOOD-FP 模型,快速生成高分辨率流量与淹没范围;Dazzi 等^[11]比较了 PARFLOOD 和 LISFLOOD-FP 模型的模拟效率和精度。

在气候变化背景下,短历时暴雨的时空分布特征对雨洪过程具有显著影响,其中,单峰型降雨因雨量集中,更易引发严重洪涝^[12]。除降水量与雨强外,雨型也是刻画降雨过程的关键因子,直接关系到洪涝灾害的形成与危害程度^[13]。雨峰系数能反映降雨峰值出现的时间,其取值直接影响洪水过程线的形态。雨峰系数越小,表明雨峰出现越早,前期雨量越集中,进而加快汇流过程,最终加剧城市内涝的突发性和严重性。目前,相关研究多通过构建不同雨峰系数的降雨情景,结合水文水动力模型,定量分

析雨峰位置对产汇流过程、洪峰流量及淹没范围等的影响,如李绍铭等^[14]和 Chen 等^[15]分别基于 MIKE 系列模型与 SWMM-SWM 耦合模型,揭示了不同降雨历时与雨峰系数下的淹没响应特征。尽管已有大量研究关注暴雨雨型对洪涝过程的影响,但由于区域水文响应机制的差异性,尤其在极端降雨条件下,从流域尺度深入剖析暴雨雨型对城市洪涝的作用机制仍是当前亟待厘清的重要问题^[16-17]。因此,本文构建北京清河流域 SWMM 与 LISFLOOD-FP 耦合模型,利用实测数据验证其可靠性,定量模拟不同暴雨雨型和降雨重现期下排水节点溢流与地表淹没特征,系统分析内涝灾害对暴雨雨型的响应规律,以期为北京排水管网优化与洪涝风险防控提供理论支撑。

1 研究区概况与数据来源

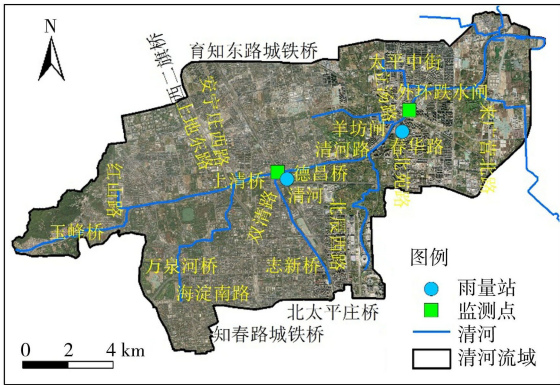
清河流经北京中心城区,河流长度 22.78 km,沿途纳入北旱河、万泉河、小月河等支流,最后汇入温榆河。清河流域地理位置为 39°57'11"N~40°05'23"N、116°12'31'E~116°28'58"E,总面积为 174.83 km²,流域概况如图 1 所示。清河流域兼具山区、平原、低洼区等地形,地势自西南向东北呈下降趋势。流域为暖温带半湿润大陆性季风气候区,汛期主要集中在 6—8 月,年均降水量为 660 mm。河岸区域集中了众多高校、科技园区和行政机构等城市核心功能区,工商业用地占比 35%,人员密集,社会经济价值显著。然而,受管网系统不完善、下垫面渗透能力差及社会经济活动密集等因素影响^[18],该流域内存在多处内涝积水点,形成洪涝风险隐患。

本文研究所用的排水管网、DEM、河道、土地利用、历史积水点和降雨、流量数据由北京市水科学技术研究院提供,DEM 分辨率为 10 m×10 m。降雨数据为清河雨量站和羊坊闸雨量站的 3 场实测数据,流量数据来源于德昌桥和外环跌水闸两个排口的监测设备。典型历史积水内涝点数据来自北京市水务局。

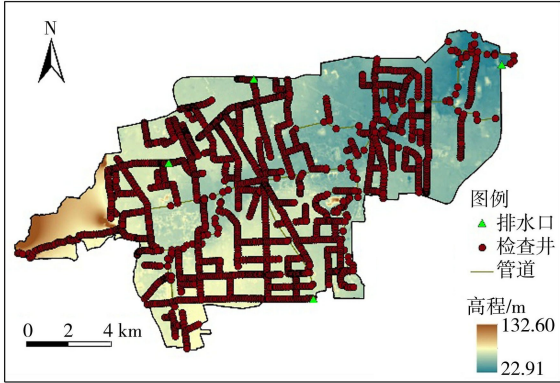
2 模型构建与情景设置

2.1 SWMM 模型构建

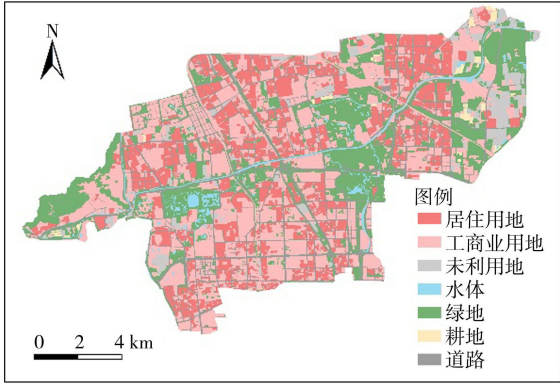
SWMM 模型因轻量化、开源和高精度等特性,在全球多个地区被用于降雨径流、水质水量预测与动态管理^[19]。模型能够模拟单次或连续降雨情形下的地表产汇流、管网输水以及污染物迁移与累积过程,同时集成 LID 模块,为雨洪管理策略制定与排水系统评估提供定量分析依据。本文采用 Horton 模型进行产流入渗计算,动力波法进行管网汇流计



(a) 雨量站和监测点分布



(b) 排水管网概化



(c) 土地利用类型

图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

算。SWMM 模型的构建以 ArcGIS 概化为基础,在完成污水管与细小支管删减及连通性检查后,利用下垫面数据进行水文分析,初步划分小流域。在此基础上采用泰森多边形法生成子汇水区,并结合下垫面特征进一步调整边界,从而确保管网结构的合理性,同时考虑下垫面对模型的影响^[20]。概化后,SWMM 模型共有 2 168 个节点、2 174 条管线、2 168 个子汇水区和 4 个排水口,其中子汇水区面积最大值为 404.52 hm²,最小值为 0.20 hm²。研究区内设有清河与羊坊闸两处雨量站,排水口设置为自由出流模式。基于河道断面情况,将河网划分为 149 个河段,由此构建的 SWMM 模型概化情况如图 2 所示。

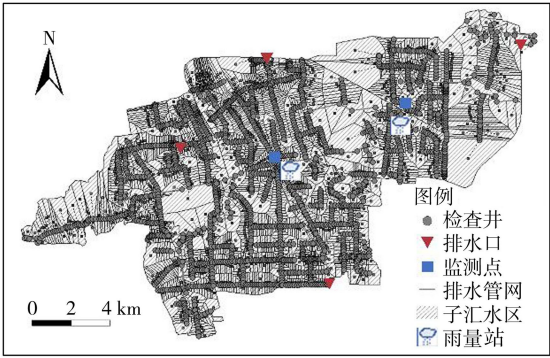


图 2 研究区 SWMM 模型概化图

Fig. 2 SWMM model generalization map of study area

2.2 SWMM 模型率定与验证

SWMM 模型中的参数包括物理参数和过程参数。根据研究区基本资料可以直接计算出子汇水区面积、特征宽度、不透水率等物理参数,但洼蓄量、曼宁系数、入渗率等过程参数需要进行率定和验证^[21]。参数率定结果为:不透水区、透水区曼宁系数和洼蓄量分别为 0.014、0.2 和 1、3 mm,最大、最小入渗率分别为 125、8 mm/h,衰减常数为 2.5,管道、河道糙率系数分别为 0.011 和 0.022。降雨数据取自清河和羊坊闸雨量站,并采用泰森多边形法分配了各站点在流域内的控制区域。实测流量数据来源于德昌桥和外环跌水闸两处排放口的监测值,分别选用不同降雨事件对各排放口进行模型率定与验证。采用纳什效率系数(NSE)与洪峰流量相对误差(R_E)作为模型精度评价指标,评价结果见表 1。

表 1 模型率定与验证结果

Table 1 Calibration and validation results of model

时期	降雨场次	排口	降水量/mm	NSE	R_E /%
率定期	P20200709	德昌桥	45.0	0.702	6.48
	P20210719	外环跌水闸	24.5	0.786	17.92
验证期	P20200812	外环跌水闸	129.5	0.707	3.21

研究区排口流量过程线与清河雨量站降雨过程如图 3 所示。选取 P20200709 与 P20210719 两场降雨进行模型率定,通过对比实测与模拟流量,计算得到 NSE 分别为 0.702 和 0.786。采用 P20200812 场次降雨对率定后的模型进行验证,模拟得到 NSE 为 0.707, R_E 为 3.21%。由图 3 可见,模拟洪水的过程线与实际结果在形态上较为一致,率定期与验证期的 NSE 均超过 0.7, R_E 均小于 20%,符合 GB/T 22482—2008《水文水情预报规范》的要求,表明所建立的模型可应用于研究区的内涝过程模拟。

2.3 模型耦合与验证

LISFLOOD-FP 模型可针对各单元输出水深、淹没范围等多种淹没指标的栅格图,精细刻画径流的时空分布特征。该模型通过 DEM 网格划分地形单

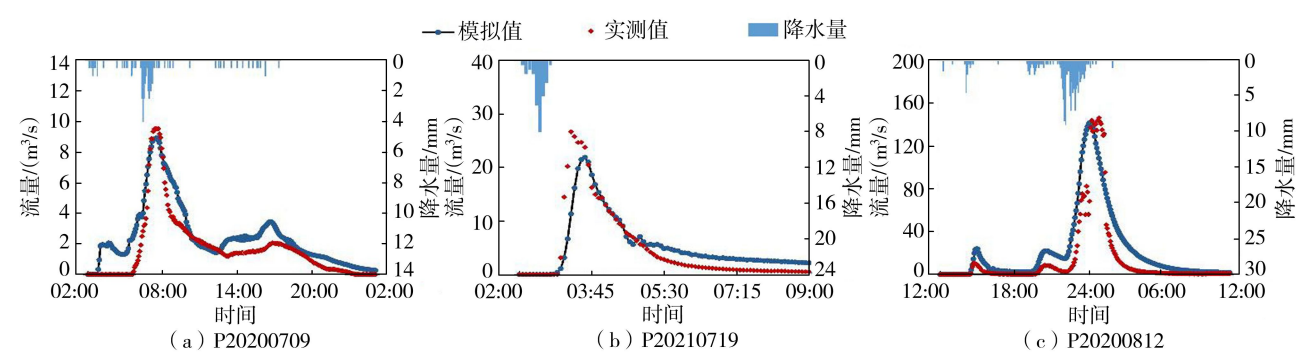


图3 不同场次降雨率定期和验证期的水文过程对比

Fig.3 Comparison of hydrological processes in calibration and validation periods for different rainfall events

元,能够准确模拟河流、海岸及河口洪泛区等复杂地形下的洪涝淹没过程,显著增强了对城市水文时空动态过程的刻画能力^[22-23]。LISFLOOD-FP 模型在保证精度的同时,具备较高的计算效率和可靠的物理机制。

本文采用单向耦合策略,构建 SWMM 与 LISFLOOD-FP 耦合模型。将 SWMM 模型模拟所得节点溢流动态过程作为关键因素,导入 LISFLOOD-FP 模型,开展地表内涝精细化模拟,从而得到淹没范围与动态演进过程等关键信息。具体步骤为:①整合 SWMM 模型输出文件,提取溢流节点位置坐标,转化为点源边界标识符数据;②将各溢流节点的流量时序数据转换为单宽流量,将研究区的地形高程数据输入模型;③依据实际环境配置生成 LISFLOOD-FP 模型的主参数文件,包括模拟时长、传输文件路径、控制参数等内容。运行模型后,可得到研究区内涝淹没的二维模拟结果,并借助 ArcGIS 对输出数据进行处理与分析。

以 P20200812 场次降雨作为验证数据,采用耦合模型进行模拟计算,并将模拟结果与实测内涝点数据及北京市水务局发布的城市积水内涝风险图进行对比验证。溢流节点空间分布模拟结果如

图4(a)所示,SWMM 模型模拟得出总溢流量为 817.16 万 m³,发生溢流的节点数为 727 个,占节点总数的 33.53%。依据 GB 50014—2021《室外排水设计规范》及文献[24-25],将淹没水深划分为 4 个等级:0~0.15 m、>0.15~0.50 m、>0.50~2.00 m、>2.00 m。地表淹没模拟结果如图4(b)所示,不同水深淹没面积依次为 11.88、9.82、6.50、0.73 km²,总淹没面积达 28.93 km²,在研究区面积中的占比为 16.55%。由图4(b)可知,万泉河桥、上清桥、北太平庄桥、知春路城铁桥、安宁庄西路、上地东路、育知东路城铁桥以及立汤路与太平中街交叉口等易涝点均出现不同深度积水,这与典型历史积水内涝点分布基本一致。其中,安宁庄西路模拟水深为 0.424 m,与实测值 0.4~0.5 m 相符,表明该耦合模型能够有效模拟实际内涝分布,精度良好。

2.4 暴雨情景设计

依据《城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定技术导则》,选用芝加哥雨型确定北京清河流域的暴雨雨型。鉴于研究区降雨特征及文献[26-27],将雨峰系数 r 为 0.4 对应的雨型(雨型 II)设置为标准雨型。参考 DB11/T 969—2016《城镇雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》,北京清

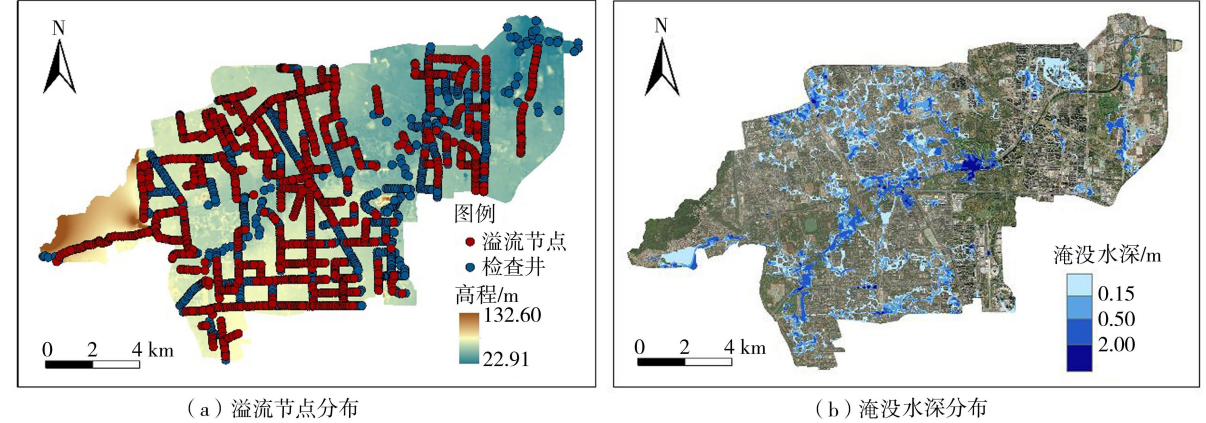


图4 耦合模型模拟结果

Fig.4 Simulation results of coupled model

河流域属于第Ⅱ区,可以得到研究区降雨重现期 P 分别为 5、10、50、100 a,历时为 120 min,标准雨型下的设计降雨过程线。根据《城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定技术导则》,暴雨强度公式为:

$$q = \frac{1602(1 + 1.037\lg P)}{(t + 11.593)^{0.681}} \quad (1)$$

式中: q 为暴雨强度; t 为时间。

为探究城市内涝对不同暴雨雨型的响应机制,选取雨峰系数依次是 0.2(雨型Ⅰ)、0.6(雨型Ⅲ)、0.8(雨型Ⅳ)3 种情形,并分别计算了相同降雨重现期下历时为 120 min 设计降雨。不同暴雨雨型下降雨过程线如图 5 所示。从时间特征来看,雨型Ⅱ的峰值时刻较雨型Ⅰ推迟 24 min,雨型Ⅲ相比雨型Ⅱ、雨型Ⅳ相比雨型Ⅲ也相应延后 24 min。

3 结果与分析

3.1 标准雨型下内涝模拟

3.1.1 节点溢流情况

利用 SWMM 与 LISFLOOD-FP 耦合模型模拟了不同降雨重现期下研究区的内涝过程,得到的节点溢流情况如表 2 和图 6 所示。统计结果表明,降雨

重现期的增大导致降水量增大,溢流总量、最大溢流时长、溢流节点总数与最大超载管道数均随之显著增加。当降雨重现期由 5 a 增加至 100 a 时,溢流总量从 307.67 万 m^3 上升至 945.34 万 m^3 ,增幅超过 2 倍;最大溢流时长由 8.58 h 延长到 12.70 h,增加约 48.02%;溢流节点由 997 个增至 1164 个,溢流节点占比上升了 7.7%;最大超载管道数由 1587 上升至 1792,增幅为 12.92%。当降雨重现期由 10 a 增加至 50 a 时,溢流总量、最大溢流时长和最大超载管道数增长最为显著,增幅分别达到 81.21%、21.41% 和 6.69%。对于溢流节点数,则以 5~10 a 降雨重现期下的增幅最大(6.62%),高降雨重现期下的增幅相对较小。

由图 6 可知,随着降雨重现期增大,溢流节点在空间上呈现更集中、密集和增多的趋势,地表内涝风险相应加剧^[9]。当降雨重现期为 5 a 时,溢流节点主要分布在清河中游河岸两侧的城市建设用地内,如安宁庄西路、双清路及玉峰桥等关键路段。随着降雨重现期增大,溢流范围沿主干管网逐步扩展,同一区域内节点密度增加。当降雨重现期为 100 a 时,来广营北路和上清桥等区域的溢流节点明显增多,

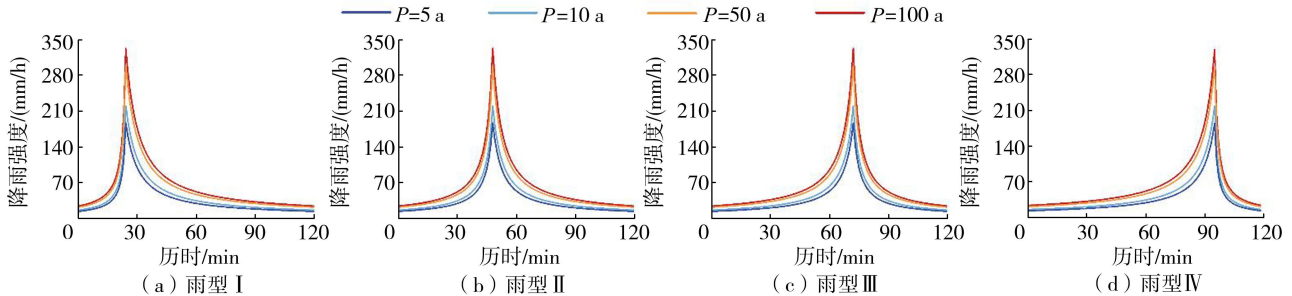


图 5 不同降雨重现期和暴雨雨型下降雨变化过程

Fig. 5 Rainfall variation process under different rainfall return periods and rainstorm patterns

表 2 不同降雨重现期标准雨型下节点溢流统计

Table 2 Node overflow statistics for standard rainstorm pattern under different rainfall return periods

P/a	降水量/mm	溢流总量/万 m^3	最大溢流时长/h	溢流节点数/个	溢流节点占比/%	最大超载管道数/段	超载管道比例/%
5	71.91	307.67	8.58	997	45.99	1587	73.00
10	84.93	428.94	9.62	1063	49.03	1645	75.67
50	115.15	777.27	11.68	1099	50.69	1755	80.73
100	128.16	945.34	12.70	1164	53.69	1792	82.43

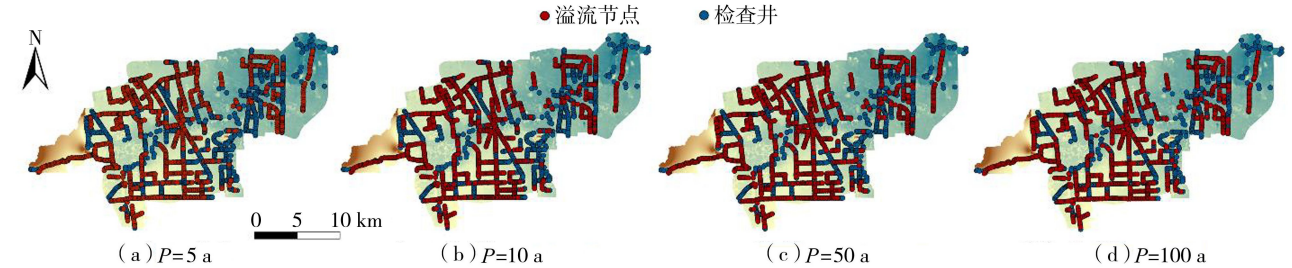


图 6 不同降雨重现期标准雨型下溢流节点空间变化

Fig. 6 Spatial variation of overflow nodes for standard rainstorm pattern under different rainfall return periods

红山路及北苑路等地也从无溢流转为溢流状态。上述变化可能归因于检查井与管网设计标准偏低,输水能力受限,或存在管道错接混接等问题。同时,河道两侧建设用地高度集聚,导致地表硬化率高、径流系数大,在极端降雨下远超管网原有消纳能力,进一步放大了内涝风险。

3.1.2 地表淹没情况

图 7 为 SWMM 与 LISFLOOD-FP 耦合模型模拟得到的研究区各降雨重现期标准雨型下的淹没水深空间分布,利用 Arcgis 统计计算了相应的淹没数据,结果见表 3。随着降雨重现期从 5 a 增大至 100 a,总淹没面积由 22.25 km² 增至 43.90 km²,增长约 1 倍,研究区淹没面积占比由 12.73% 升高到 25.11%。各水深等级的积水范围及平均水深均随降雨重现期增大表现出递增趋势。具体而言,0~0.15 m 水深淹没面积从 11.42 km² 扩大至 16.93 km²,增长 48.25%;>0.15~0.50 m 水深淹没面积由 7.15 km² 扩大至 15.96 km²,增长超 1 倍;>0.50~2.00 m 水深淹没面积从 3.47 km² 扩大至 10.17 km²,增长近 2 倍;>2.00 m 水深淹没面积由 0.21 km² 扩大至 0.84 km²,增长超 3 倍;区域平均水深由 0.16 m 增大至 0.23 m,上升 43.75%。结果表明,随着降雨重现期增大,更大水深对应的淹没面积增长幅度更为明显,尤其在降雨重现期从 10 a 增加至 50 a 时,不同水深淹没面积及平均水深增大最为显著。在各降雨重现期下,0~0.15 m 的浅水淹没面积占比均未超过 50%,>0.15~0.50 m 水深淹没面积占比在 40% 以内。但随着雨强加大,深水区面积比例明显上升,反映出内涝风险趋于严峻,需引起防汛管理部门的重视。

从空间分布(图 7)来看,低降雨重现期下,积水较深且淹没范围较大的区域主要分布在上清桥、清

河路、万泉河路、西二旗桥和来广营北路等地。当降雨重现期增大至 100 a 时,上述区域淹没水深和范围显著扩大,并几乎扩展至所有主干道,出现普遍积水现象。志新桥、北辰西路、春华路等地在高降雨重现期下也出现了严重积水现象。部分下凹式立交桥或路段由于地势低洼、降雨时汇流集中且排水不畅,更易形成积水。此外研究区高度城市化导致不透水下垫面比例居高,加之排水管网系统存在错接、混接与断头管等结构性问题,共同加剧了区域的洪涝灾害风险。

3.2 不同暴雨雨型下内涝模拟

为了探究芝加哥雨型雨峰系数对内涝模拟淹没结果的影响,针对 4 种暴雨雨型,分别设计 5、10、50、100 a 降雨重现期下历时为 120 min 降雨,共 16 种降雨情景。SWMM 与 LISFLOOD-FD 耦合模型在不同雨峰系数下的溢流模拟结果如图 8 所示。在同一雨型下,随着降雨重现期增大,溢流总量、最大溢流时长和溢流节点数都呈同步增长态势。雨型 I 的溢流总量为最低值,除降雨重现期为 5 a 的情形外,其余降雨重现期下的溢流总量均随雨峰系数的增大呈先升后降趋势,并在雨型 III 达到峰值,但增幅随降雨重现期增大而逐渐减小,因此实际降雨下的内涝风险可能高于标准雨型模拟的风险。不同降雨重现期下,溢流总量的增幅普遍高于溢流节点数的增幅。低降雨重现期下,溢流节点数随雨峰系数增大而减少的速率呈先加快后减缓的非线性特征;高降雨重现期下,溢流节点数降幅随雨峰系数增大而趋缓。雨峰系数较小时,洪峰提前出现,短时间内大量径流汇入排水系统,但降雨在前期会产生截留、下渗等损失,峰值被削弱,导致溢流总量较小。当雨峰系数增大时,峰现时间靠后,降雨峰值来临时排水管

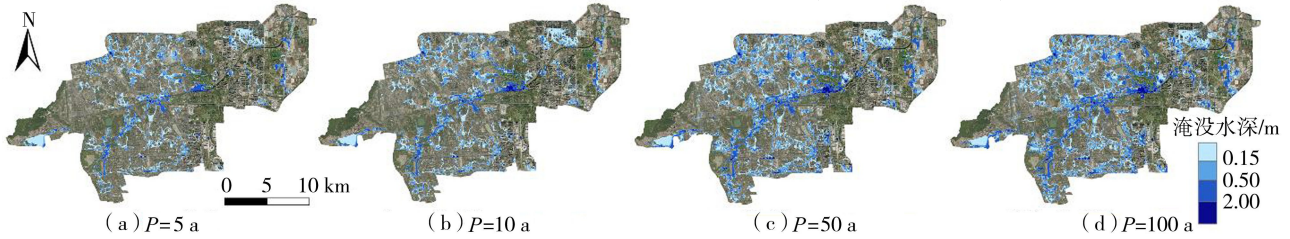


图 7 不同降雨重现期标准雨型下淹没水深分布

Fig. 7 Distribution of inundation depth for standard rainstorm pattern under different rainfall return periods

表 3 不同降雨重现期标准雨型下地表淹没统计

Table 3 Surface inundation statistics for standard rainstorm pattern under different rainfall return periods

P/a	不同淹没水深面积/km ²				总淹没面积/km ²	淹没面积占比/%	平均水深/m
	0~0.15 m	>0.15~0.50 m	>0.50~2.00 m	>2.00 m			
5	11.42	7.15	3.47	0.21	22.25	12.73	0.16
10	13.32	9.25	4.71	0.44	27.72	15.86	0.18
50	16.06	14.01	8.26	0.68	39.01	22.31	0.21
100	16.93	15.96	10.17	0.84	43.90	25.11	0.23

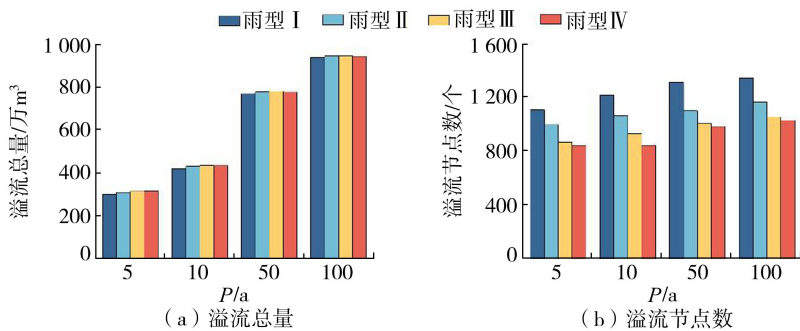


图 8 不同降雨重现期和暴雨雨型下溢流结果

Fig. 8 Overflow results for different rainfall return periods and rainstorm patterns

网存在一定的充满度,排水系统响应滞后,造成泄流压力,导致了较大的溢流量。

图 9 为 100 a 降雨重现期不同暴雨雨型下的内涝情况。将模拟的淹没范围与北京城市积水内涝风险地图中的历史积水点进行对比,结果表明二者在空间分布上较为一致,说明该模型的模拟准确度较高,具有可靠的应用价值。雨型 I、Ⅲ、Ⅳ对应的淹没面积分别为 42.38、44.88、44.96 km²,总淹没面积随雨峰系数增大而逐渐增加,然而增长幅度逐渐降低。>0.15~0.50 m 和>0.50~2.00 m 水深淹没面积也随雨峰系数增大而扩大,并在雨型Ⅳ下达到最大,分别为 16.41、10.42 km²。较大水深区对雨峰系数变化响应更为敏感,淹没范围波动明显,内涝风险更高。0~0.15 m 和>2.00 m 水深淹没面积则随雨峰系数增大呈先增后减的非线性变化规律。总体而言,雨峰系数越大,淹没范围与水深都越大,对已发生内涝区域的影响尤为显著。模拟结果中,地势低洼的河道与下凹区域易积水,这与 DEM 数据相关,地表淹设计

算时,雨水从高处流入低处,易形成积水点。在实际下垫面中,河道护岸、路缘石和建筑物高程等因素会影响汇流路径,可能导致模拟结果与实际情况存在部分偏差。通过采用精细化 DEM 及降雨等输入数据可以更准确地刻画内涝淹没的空间特征^[28-30]。

图 10 为 100 a 降雨重现期不同暴雨雨型下达到最大淹没深度的时间分布。依据 GB 50014—2021《室外排水设计规范》,将达到最大淹没深度的时间分为 3 个等级,分别为 ≤1.5 h、>1.5~3.0 h 和 >3.0 h。4 种暴雨雨型下,研究区达到最大淹没深度时间分布均呈现出河道区域时间长,南北两侧时间短的空间特征。降雨径流经各子汇水区汇集,通过管网排至清河后沿河排出。因此,河道沿线作为排水末端,汇流时间长、水量大,达到最大淹没深度时间较晚;两侧区域汇流路径短,更早达到淹没峰值,达到最大淹没深度时间较早。区域内达到最大淹没深度时间的分布情况与图 9 的淹没水深分布基本一致,表明两者呈正相关关系。统计显示,达到最

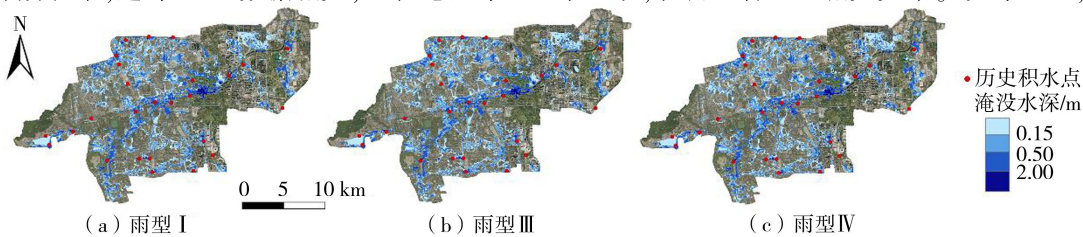


图 9 100 a 降雨重现期不同暴雨雨型下淹没水深分布

Fig. 9 Distribution of inundation depth for different rainstorm patterns under rainfall return period of 100 a

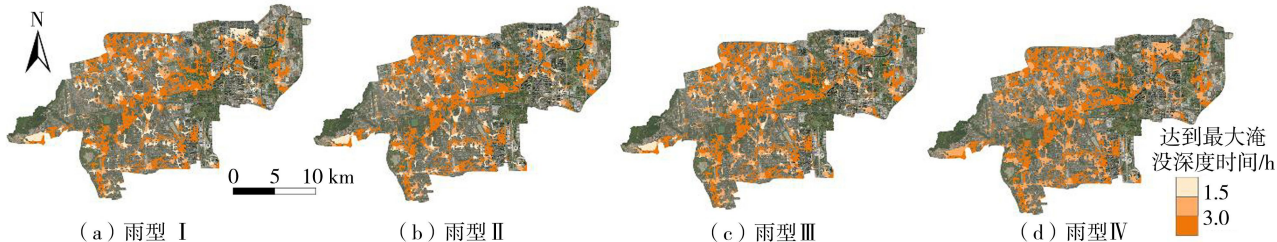


图 10 100 a 降雨重现期不同暴雨雨型下达到最大淹没深度时间分布

Fig. 10 Time distribution of reaching maximum inundation depth for different rainstorm patterns under rainfall return period of 100 a

大淹没深度时间为>3.0 h 的区域占比最大,≤1.5 h 的区域占比最小。随着雨峰系数增大,达到最大淹没深度时间为≤1.5 h 的区域逐渐缩减,时间为>1.5~3.0 h 和>3.0 h 的区域占比持续上升。

4 结 论

a. 基于实测降雨数据开展 SWMM 与 LISFLOOD-FP 耦合模型率定与验证,模拟结果与实测值吻合。耦合模型模拟结果显示,关键区域积水特征显著,安宁庄西路水深模拟值与观测值相符,表明该耦合模型精度可靠。

b. 随着降雨重现期增大,标准雨型下的溢流总量、最大溢流时长、溢流节点数及最大超载管道数均显著增长。当降雨重现期从 5 a 增大至 100 a 时,溢流总量增幅超过 2 倍,最大溢流时长延长 48.02%,溢流节点数增加 7.7%,最大超载管道数增幅为 12.92%,淹没面积占比由 12.73% 上升至 25.11%。易涝区域主要集中在上清桥、清河路和万泉河路等地,不同水深区间的淹没面积和平均水深均随降雨重现期增大而增大,其中较大水深区面积增幅更为显著。

c. 高降雨重现期下,不同暴雨雨型的溢流总量随雨峰系数增加表现出先增后减的变化规律,雨型Ⅲ的溢流总量最大,但其增幅随降雨重现期增大逐渐减缓。同一降雨重现期下,不同暴雨雨型的溢流节点数随雨峰系数增大而减少,淹没面积随之增加,在雨型Ⅳ下淹没面积最大。不同暴雨雨型下达到最大淹没深度的时间均呈现“河道晚、两侧早”的空间分布。SWMM 与 LISFLOOD-FP 耦合模型兼具高效性与可靠性优势,为后续开展双向耦合与精细化模拟奠定了基础。

参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害防御公报[M]. 北京:中国水利水电出版社,2023.

[2] 刘丁蓉,杨凯,孙仕. 珠三角城市群内涝灾害韧性综合评估及障碍因子识别[J]. 水利经济,2024,42(4):23-29. (Liu Dingrong, Yang Kai, Sun Shi. Comprehensive assessment and obstacle factor recognition of waterlogging disaster resilience in Pearl River Delta urban agglomeration [J]. Journal of Economics of Water Resources,2024,42(4):23-29. (in Chinese))

[3] Zhang Wei, Villarini G, Vecchi G A, et al. Urbanization exacerbated the rainfall and flooding caused by hurricane harvey in Houston [J]. Nature, 2018, 563 (7731): 384-388.

[4] Panos C L, Wolfand J M, Hogue T S. Assessing resilience of a dual drainage urban system to redevelopment and climate [J]. Journal of Hydrology, 2021, 596: 126101.

[5] 李孟泽,褚俊英,周祖昊,等. 基于多智能体系统的城市极端暴雨内涝风险动态评估[J]. 水资源保护,2025,41(2):95-105. (Li Mengze, Chu Junying, Zhou Zuhao, et al. Dynamic assessment of urban extreme rainstorm waterlogging risk based on multi-agent system [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (2): 95-105. (in Chinese))

[6] 卢兴超,徐宗学,李永坤,等. 基于 SWMM 与 LISFLOOD-FP 耦合模型的城市街区内涝模拟研究[J]. 水资源保护,2024,40(3):98-105. (Lu Xingchao, Xu Zongxue, Li Yongkun, et al. Research on urban block waterlogging simulation based on coupling model of SWMM and LISFLOOD-FP [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (3): 98-105. (in Chinese))

[7] 栾震宇,金秋,赵思远,等. 基于 MIKE FLOOD 耦合模型的城市内涝模拟[J]. 水资源保护,2021,37(2):81-88. (Luan Zhenyu, Jin Qiu, Zhao Siyuan, et al. Simulation of urban waterlogging based on MIKE FLOOD coupling model [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (2): 81-88. (in Chinese))

[8] Bisht D S, Chatterjee C, Kalakoti S, et al. Modeling urban floods and drainage using SWMM and MIKE URBAN: a case study [J]. Natural Hazards, 2016, 84 (2): 749-776.

[9] 李鹏,徐宗学,赵刚,等. 基于 SWMM 与 LISFLOOD-FP 模型的城市暴雨内涝模拟:以济南市为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2021,19(6):1083-1092. (Li Peng, Xu Zongxue, Zhao Gang, et al. Simulation of urban rainstorm waterlogging processes based on SWMM and LISFLOOD-FP models: case study in Jinan City [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19 (6): 1083-1092. (in Chinese))

[10] Nandi S, Reddy M J. An integrated approach to streamflow estimation and flood inundation mapping using VIC, RAPID and LISFLOOD-FP [J]. Journal of Hydrology, 2022, 610: 127842.

[11] Dazzi S, Shustikova I, Domeneghetti A, et al. Comparison of two modelling strategies for 2D large-scale flood simulations [J]. Environmental Modelling & Software, 2021, 146: 105225.

[12] Ayat H, Evans J P, Sherwood S C, et al. Intensification of subhourly heavy rainfall [J]. Science, 2022, 378 (6620): 655-659.

[13] 陈靖,李明财,曹经福,等. 基于设计暴雨雨型的天津城市内涝模拟研究[J]. 气象与环境学报,2022,38(6):89-97. (Chen Jing, Li Mingcai, Cao Jingfu, et al. Urban waterlogging simulation in Tianjin based on designed rainstorm patterns [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2022, 38 (6): 89-97. (in Chinese))

[14] 李绍铭,金辉,李鹏,等. 基于 MIKE FLOOD 耦合模型的城市暴雨洪涝模拟[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2025,23(5):1143-1152. (Li Shaoming, Jin Hui, Li Peng, et al. Urban rainstorm inundation simulation based

- on MIKE FLOOD coupling model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(5):1143-1152. (in Chinese))
- [15] Chen Wenjie, Huang Guoru, Zhang Han, et al. Urban inundation response to rainstorm patterns with a coupled hydrodynamic model: a case study in Haidian Island, China[J]. Journal of Hydrology, 2018, 564: 1022-1035.
- [16] 高长松,肖洋,许栋,等.暴雨雨型对城市排水管网和地表洪涝过程的联合影响[J].水资源保护, 2025, 41(4):60-70. (Gao Changsong, Xiao Yang, Xu Dong, et al. Combined impact of rainstorm patterns on urban drainage network and surface flooding process[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(4):60-70. (in Chinese))
- [17] 李鑫月,侯精明,王泽林,等.设计暴雨雨型对狭谷城市洪涝影响数值模拟[J/OL]. 武汉大学学报(工学版), 2024-08-30. <https://link.cnki.net/urlid/42.1675.T.20240830.0937.002>. (Li Xinyue, Hou Jingming, Wang Zelin, et al. Numerical simulation of the influence of design rainstorm pattern on urban flood in narrow valley [J/OL]. Engineering Journal of Wuhan University, 2024-08-30. <https://link.cnki.net/urlid/42.1675.T.20240830.0937.002>. (in Chinese))
- [18] 徐宗学,陈浩,任梅芳.变化环境下我国典型特大城市洪涝灾害成因分析[J].水资源保护, 2025, 41(5):33-40. (Xu Zongxue, Chen Hao, Ren Meifang. Analysis on causes of flooding/waterlogging disasters in typical megacities of China under changing environment [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(5):33-40. (in Chinese))
- [19] 徐宗学.水文模型:回顾与展望[J].北京师范大学学报(自然科学版), 2010, 46(3):278-289. (Xu Zongxue. Hydrological models: past, present and future [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2010, 46(3):278-289. (in Chinese))
- [20] 王心舒,江思珉,郑茂辉,等.城市高密度区域排水系统优化方案模拟评价[J].河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(6):49-56. (Wang Xinshu, Jiang Simin, Zheng Maohui, et al. Simulation evaluation of drainage system optimization schemes in urban high-density areas [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(6):49-56. (in Chinese))
- [21] 廖如婷,徐宗学,叶陈雷,等.基于 SWMM 和 InfoWorks ICM 模型的大红门排水区暴雨内涝模拟[J].水资源保护, 2023, 39(3):109-117. (Liao Ruting, Xu Zongxue, Ye Chenlei, et al. Simulation of rainstorm waterlogging in Dahongmen Drainage Area based on SWMM and InfoWorks ICM models [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3):109-117. (in Chinese))
- [22] Neal J C, Bates P D, Fewtrell T J, et al. Distributed whole city water level measurements from the Carlisle 2005 urban flood event and comparison with hydraulic model simulations[J]. Journal of Hydrology, 2009, 368(1/2/3/4):42-55.
- [23] 曾照洋,王兆礼,吴旭树,等.基于 SWMM 和 LISFLOOD 模型的暴雨内涝模拟研究[J].水力发电学报, 2017, 36(5):68-77. (Zeng Zhaoyang, Wang Zhaoli, Wu Xushu, et al. Rainstorm waterlogging simulations based on SWMM and LISFLOOD models [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(5):68-77. (in Chinese))
- [24] 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))
- [25] 王成坤,黄纪萍,曾胜,等.基于积水特征和暴露脆弱性的城市内涝风险评估[J].中国给水排水, 2019, 35(5):125-130. (Wang Chengkun, Huang Jiping, Zeng Sheng, et al. Urban flooding risk assessment based on coupling of waterlogging characteristics and exposed vulnerability [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(5):125-130. (in Chinese))
- [26] 严正宵,夏军,宋进喜,等.中小流域设计暴雨雨型研究进展[J].地理科学进展, 2020, 39(7):1224-1235. (Yan Zhengxiao, Xia Jun, Song Jinxi, et al. Research progress on design hyetographs in small and medium-scale basins [J]. Progress in Geography, 2020, 39(7):1224-1235. (in Chinese))
- [27] 袁冯,张君枝,王冀,等.气候变化背景下北京市短历时暴雨的强度及雨型变化特征[J].大气科学学报, 2020, 43(5):802-809. (Yuan Feng, Zhang Junzhi, Wang Ji, et al. Variation characteristics of intensity and pattern of short duration rainstorm in Beijing under the background of climate change [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(5):802-809. (in Chinese))
- [28] 周添红,唐佐槐,褚俊英,等.极端暴雨条件下城市内涝模拟研究进展与展望[J].人民长江, 2025, 56(5):14-22. (Zhou Tianhong, Tang Zuohuai, Chu Junying, et al. Progress and prospects of urban waterlogging simulation under extreme rainstorm conditions [J]. Yangtze River, 2025, 56(5):14-22. (in Chinese))
- [29] 张伟,王璇,孙慧超,等.基于多重精度降雨数据的北京市极端降雨事件研究[J].水资源保护, 2025, 41(2):123-132. (Zhang Wei, Wang Xuan, Sun Huichao, et al. Research on extreme precipitation events in Beijing based on multi-resolution rainfall data [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(2):123-132. (in Chinese))
- [30] 冯鈞,邵萍萍,张继茹,等.物理引导数据驱动方法研究综述及其在水文模型构建中的应用与展望[J].河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(5):1-9. (Feng Jun, Shao Pingping, Zhang Jiru, et al. Research review of physics-guided data-driven methods and their application and prospects in hydrological model development [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(5):1-9. (in Chinese))

(收稿日期:2025-10-09 编辑:施业)