

城市排水与
雨洪管理

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.21.023

基于统计雨型的下凹桥区降雨量内涝预警阈值研究

任德福^{1,2}, 李永坤¹, 张书函¹, 陈星³, 刘栋²

(1. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048; 2. 重庆水利电力职业技术学院 水利工程系, 重庆 402160; 3. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 鉴于当前城市缺乏从易涝微观区域和统计雨型的角度确定暴雨致涝降雨量阈值的研究,为提升内涝预警的精确度,采用K-means聚类法对北京市某下凹桥区的降雨数据进行分析,识别出更能反映区域实际降雨特征的统计雨型,并借助北京市下凹桥区内涝判定预警指标,将统计雨型与传统芝加哥雨型作为设计降雨输入,通过InfoWorks ICM软件模拟得出致涝降雨量阈值。结果表明,两种雨型对致涝降雨量阈值的影响不大,而雨峰位置系数对致涝降雨量阈值的影响较为显著,且雨峰位置越靠后,下凹桥区各预警等级对降雨量阈值的敏感度越高,对排水系统造成更大的压力。这种基于统计雨型的致涝降雨量阈值精细化确定方法,可为当前城市应对短时强降雨引发的积水防治和预警工作提供有力的技术支持。

关键词: 城市内涝; 下凹桥区; 降雨预警; K-means聚类分析; 统计雨型

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)21-0155-07

Rainfall Waterlogging Warning Threshold in Lower Concave Bridge Area Based on Statistical Rainfall Pattern

REN De-fu^{1,2}, LI Yong-kun¹, ZHANG Shu-han¹, CHEN Xing³, LIU Dong²

(1. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China; 2. Department of Hydraulic Engineering, Chongqing Water Resources and Electric Engineering College, Chongqing 402160, China; 3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Currently, there is insufficient research on establishing rainfall thresholds for rainstorm in urban areas, particularly from the perspectives of waterlogging-prone micro-regions and statistical rainfall pattern. This study aims to enhance the accuracy of urban waterlogging early warning systems. The K-means clustering method was employed to analyze rainfall data collected from a lower concave bridge area in Beijing, enabling the identification of a statistical rainfall pattern that more accurately reflected the region's actual rainfall characteristics. Subsequently, using the waterlogging determination and early warning index of the area, both the identified statistical rainfall pattern and the conventional Chicago rainfall pattern were applied as design rainfall inputs. A comparative simulation of the thresholds for waterlogging-inducing rainfall was then conducted using InfoWorks ICM software. The two rainfall patterns exerted minimal influence on the threshold for waterlogging-inducing rainfall, whereas the peak

基金项目: 北京市科技计划课题(Z231100003823005); 2023年重庆水利电力职业技术学院院级科研项目(K202321)
通信作者: 任德福 E-mail: 727514351@qq.com

intensity position coefficient had a more pronounced effect. Furthermore, the later the occurrence of the rainfall peak, the higher the sensitivity of each warning level in the lower concave bridge area to the rainfall threshold, thereby placing increased stress on the drainage system. This refined methodology for determining threshold for waterlogging-inducing rainfall based on statistical rainfall pattern, offers robust technical support for mitigating and providing early warnings for urban waterlogging caused by short-duration heavy rainfall.

Key words: urban waterlogging; lower concave bridge area; rainfall warning; K-means clustering analysis; statistical rainfall pattern

在城市化快速推进的背景下,一系列城市问题随之产生,其中最直接的是极端强降雨事件频发导致的城市内涝问题^[1]。在我国,强降雨导致的下凹桥区积水问题尤为严峻,这种情况不仅妨碍日常出行,在极端条件下更可能危及民众生命财产安全,阻碍城市正常运行,造成巨大经济损失^[2]。因此,准确预测和及时预警城市内涝灾害显得尤为关键。当前,内涝灾害的预报预警阈值确定和响应管理成为防汛工作的重难点,提高致灾因子阈值响应精度对于减轻内涝灾害的影响至关重要^[3]。然而,现有确定致涝降雨量阈值的方法多聚焦于历史资料统计,或采用传统芝加哥雨型等作为设计降雨在数值模型上确定,这些方法在刻画精度上存在局限,也忽略了致灾暴雨在时间和空间上的差异性。例如,Xu等^[4]通过水力模型模拟积水内涝,根据积水经过每个站点的时间推导出地铁站致涝降雨量阈值公式;邸苏闯等^[5]结合数值统计和水动力模型确定暴雨预警应急响应阈值;宋瑞宁等^[6]以芝加哥雨型为输入降雨,利用InfoWorks ICM软件模拟确定致涝降雨量阈值,但均缺乏从区域和统计雨型的角度系统性研究致涝降雨量阈值。鉴于此,笔者基于K-means聚类法对历史降雨资料识别出统计雨型,构建区域精细化内涝模型,在此基础上,以统计雨型为设计降雨情景,深入分析暴雨的致灾降雨量阈值,探究雨型对积水深度和响应时间的影响,以期为城市内涝灾害的预报预警和应急管理工作提供科学可靠的参考依据。

1 研究区域概况及数据来源

1.1 研究区域概况

研究区域位于北京市海淀区,降雨时空分布极不均匀,汛期(6月—9月)雨量占全年降雨总量的80%,且该时段内短时强降雨事件频发。该区域因

其特殊的下凹地形,经常面临强降雨带来的积水压力。积水现象主要发生在铁路下方的西三环中路区域。该桥区的下凹区域占地0.11 km²,而整个汇水区域面积为1.41 km²。基于现场调研和文献查阅^[7],确定研究区域的汇水范围,排水管网分布如图1所示。

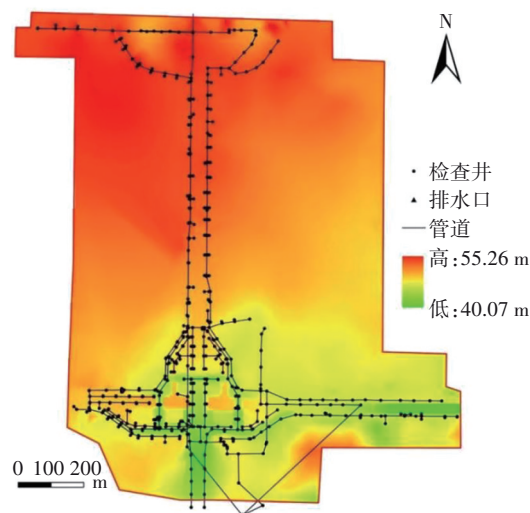


图1 研究区排水管网分布

Fig.1 Distribution of drainage network in study area

1.2 数据来源

本研究构建模型所依据的基础资料涵盖地形数据、遥感影像和排水设施等,这些资料来源于首次全国水务普查的详尽记录。此外,降雨和积水数据来源于北京市水务局的官方记录和发布数据等。为确保数据的准确性和可靠性,对地形数据和排水设施进行了现场踏勘和调研,并根据市排水管理处的记录进行了核对和完善。

2 研究方法

2.1 降雨历时设计

降雨历时的设计对于评估内涝风险具有显著

影响^[8]。根据《城市暴雨灾害预警及响应管理研究报告》分析结果,北京中心城区出现短历时强降雨的频率较高,单峰型降雨过程占比超过80%,历时1~4 h的降雨事件在北京市最为常见^[9]。研究进一步发现,近年来短历时降雨雨峰位置系数呈现偏前的趋势^[10](雨峰位置系数是表征暴雨过程雨峰位置的参数,为从降雨开始至降雨峰值出现时间段与降雨历时的比值)。这种变化意味着降雨的集中度在增强,对城市排水系统构成了更大的挑战。特别是短历时强降雨,其初期的降雨量较大,而城市排水分区的规模较小,加之不透水下垫面的占比较大,导致汇流时间明显缩短,更易引发城市内涝。基于上述分析,本研究选择历时1 h的强降雨作为设计降雨,这一决策综合考量了历史数据以及对当前城市排水能力的实际评估。

2.2 统计雨型分类方法

K-means聚类法是一种可以将暴雨数据进行分类的高效统计工具,能够揭示降雨模式的多样性和复杂性^[11]。K-means聚类法的步骤如下:首先,输入1 h降雨量数据样本,该样本由连续5 min降雨占比数据组成,形成12行数据矩阵;然后,根据肘部法则确定K值(例如10个聚类);随机选择数据矩阵中的12行数据作为初始聚类中心,接着计算每个降雨占比数据与初始聚类中心的距离,并将每个数据点分配给最近的聚类中心;通过迭代过程不断优化聚类中心的位置,直至聚类结果稳定而结束。根据轮廓系数来评估聚类效果:轮廓系数越接近1表示分类效果越好,接近0则表示分类效果基本合格。最终得到10类代表统计雨型。

2.3 模型构建与验证

InfoWorks ICM模型包含一、二维水动力计算模块,可以模拟各类城市排水系统,能高效模拟、预测城市内涝情况,并能深入分析内涝积水、河道溢流等问题的成因。

2.3.1 模型构建

① 管网和河道汇流模型:对管线资料进行拓扑关系检查,确保上下游管道连接关系、上下游管底高程和坡度等属性参数的合理性。研究区域总计588个检查井、589条管道和1个排水口,管道多为圆管或方涵,管径分布在200~2 600 mm区间,管道糙率系数取0.013,建立管网汇流模型。管网汇流经排水口排入暗沟,根据暗沟断面与地形资料并

结合多方调研,建立暗沟河道汇流模型。

② 地表漫流模型:通过实地踏勘和图像识别方法,结合已有地形资料,对易涝区域进行局部微地形修正,确保模型地形能够准确反映雨水汇流和漫流路径。首先利用修正地形数据生成地面TIN模型,根据不同致涝程度创建2D区间,再进行网格化划分处理,建立二维地表漫流模型。为实现对积水过程的精细刻画,对易涝区域和易涝以外区域的网格大小进行合理设计,并设置不同的降雨分布方法:易涝以外区域划分为196个子汇水区,通过GIS技术对同类型下垫面进行合并,将卫星解译影像资料数据的径流表面划分为道路、绿地、水面、建设用地、裸土和房屋6类,定量统计每个子汇水区的6类径流表面面积,网格化生成,共划分为3 903个网格(最大面积为400 m²,最小面积为100 m²),雨水经子汇水区收集后进入检查井并通过管网排走;易涝区域共划分为127 770个网格(最大面积为2 m²,最小面积为0.5 m²),按照净雨降落在地面TIN网格上,顺着地形坡度流向低洼地带或管道。

③ 模型耦合:设置检查井的类型为2D,实现管网汇流、河道汇流和地表漫流模型的耦合,完成精细化内涝模型的构建。

2.3.2 模型率定与验证

径流表面中,对于透水下垫面,采用霍顿下渗法;而对于不透水下垫面,则采用固定径流系数法。率定参数包括曼宁系数、径流系数、初期损失值、初渗率、稳渗率、衰减系数,参考规范标准确定各参数取值范围。鉴于实测流量数据的缺失,选取典型场次不连续降雨积水过程对模型进行率定和准确性验证,采用2011年6月23日和2012年7月21日两场降雨事件进行参数率定,采用2011年7月26日和8月9日两场降雨事件对模型进行验证。参数率定方法采用人工试错法进行调整,此外,对一些敏感参数进行了分析,例如径流系数对模型模拟的积水深度有显著影响,模拟积水深度随着径流系数的增加而明显增加。因此,根据实测的积水数据来率定地表径流系数,模型参数率定结果详见表1。

为保证模型的可靠性和准确度,对模型率定和验证场次进行分析,结果见表2。模拟精度的检验采用相对误差和Nash-Sutcliffe效率系数(NSE)两个指标,其中,NSE越接近1,表明模拟值与实测值的吻合度越高。由表2可知,模型模拟的NSE均超过

0.6,最大积水深度的相对误差均不超过20%,最大积水深度出现时间误差在75 min以内,模型率定和验证结果拟合度较好,模拟结果可靠。在降雨2和降雨3模拟过程中存在积水阶段模拟积水值偏高的情况,这是由于在积水早期受抢险抽水作业影响,使得实际积水量减少;在全部场次模拟过程中存在退水阶段模拟积水值偏高的情况,这是由于全部场次在积水达到一定深度时受抽排作业影响,导致积水量迅速减少,另外降雨1、2和3还因为该下凹桥区出水口渠道暗沟水位壅高,河道顶托导致排水管道堵塞和回灌,积水无法顺利排走。尽管模型受排水系统运行状况、人为抽排积水等影响,但总体来说,模拟结果能较好地反映内涝积水变化过程,这表明模型具有较高的精度和可靠性,适用于不同降雨情景下的模拟分析。

表1 模型参数率定结果

Tab.1 Calibration results of model parameters

用地类型	径流量类型	曼宁系数	固定径流系数	初期损失值/mm	Horton 初渗率/(mm·h ⁻¹)	Horton 稳渗率/(mm·h ⁻¹)	衰减系数
道路	Fixed	0.014	0.85	1.2			
绿地	Horton	0.200		15.0	200	12.7	2.00
水面	Fixed	0.010	1.00	0			
建设用地	Fixed	0.017	0.81	1.6			
裸土	Horton	0.060		7.0	76	2.5	2.78
房屋	Fixed	0.015	0.84	1.5			

表2 下凹桥区积水模拟结果

Tab.2 Simulation results of waterlogging in lower concave bridge area

项目	降雨编号	降雨时间	降雨总量/mm	NSE	最大积水深度			最大积水深度出现时间	
					实测值/m	模拟值/m	相对误差/%	实测值	误差/min
率定场次	1	2011-06-23	88.7	0.68	1.50	1.44	4.0	18:20	25
	2	2012-07-21	198.8	0.83	2.50	2.47	1.2	20:15	75
验证场次	3	2011-07-26	110.6	0.74	1.60	1.68	-5.0	次日00:10	20
	4	2011-08-09	50.8	0.65	0.20	0.16	20.0	19:25	30

2.4 积水阈值标准及其设计

暴雨致涝对城市的影响主要以积水深度为预

警指标,因此,为确定致涝降雨量阈值,首先需要确定积水深度阈值标准。为此,参考国内外相关研究和标准,并结合实地调研和对历史积水事件的分析,从而确保积水深度阈值的科学性和实用性。参考相关文献^[12-13]以及各分区实际情况,结合北京市暴雨预警和内涝等级划分标准,综合考虑积水对城市运行、居民生活以及交通安全等方面的影响,将下凹桥暴雨内涝致灾等级划分为4级,具体见表3。

表3 内涝积水风险等级划分标准

Tab.3 Classification criteria for waterlogging risk levels

预警等级	内涝风险等级	判定标准:积水深度/cm	影响程度
蓝色预警	较低	$15\leq H<27$	容易造成行人安全和驾驶隐患
黄色预警	中等	$27\leq H<40$	淹没排气管,造成车辆熄火
橙色预警	较高	$40\leq H<60$	造成部分汽车进气口进水
红色预警	高	$H\geq 60$	可能对人身安全造成威胁,造成汽车进气口进水、地铁进水

通过构建下凹桥区内涝模型来模拟不同设计降雨量的统计雨型降雨,依据给定的积水阈值预警标准,当研究区域内模拟出现的最大积水深度达到不同预警等级积水阈值时,对应的降雨量即为下凹桥区内涝预警等级下降雨量阈值。

3 结果与分析

3.1 统计雨型生成结果

采用北京市气象局提供的5 min间隔降雨数据进行可靠性和一致性检查,并运用局部空间插值方法增强数据的连续性与完整性,从而确保数据质量。对2008年—2019年玉渊潭雨量站点5 min精度的1 h降雨量数据进行K-means聚类分析,确定聚类数K=10,得出综合轮廓系数为0.41,识别出10种主要雨型,提取频率分别为0.27、0.21和0.15出现的前三类统计雨型。这些高频率出现的统计雨型更能真实反映该地区实际降雨特征,因此被选为本次研究的设计雨型,为后续的模型提供了重要且较真实的降雨输入数据。图2为雨峰位置系数分别为0.21、0.50和0.83的三种出现频率最高的统计雨型,柱状数据表示每5 min的降雨量与1 h总降雨量的比值。

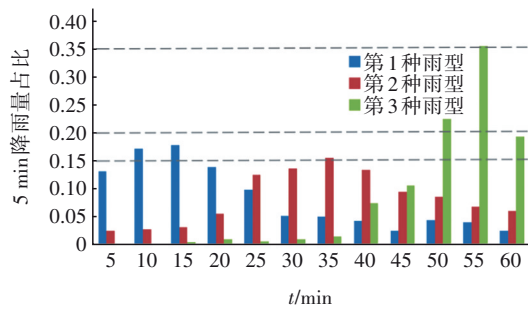


图2 设计降雨雨型

Fig.2 Design rainfall patterns

3.2 统计雨型和芝加哥雨型致涝降雨量阈值分析

在本研究中,特别关注统计雨型和芝加哥雨型对致涝降雨量阈值的影响。为此,对研究区域两种1 h雨型进行内涝积水模拟,结果见表4。

表4 不同降雨雨型的内涝模拟结果

Tab.4 Simulation results of waterlogging under different rainfall patterns

雨型	雨峰位置系数	预警等级	降雨量/mm	最大降雨强度/(mm·h ⁻¹)	最大积水深度/m	启动内涝预警所需时间/min
芝加哥雨型	0.50	蓝色	38	108.00	0.16	80
		黄色	50	142.11	0.29	100
		橙色	53	150.63	0.41	105
		红色	56	159.16	0.62	110
统计雨型	0.50	蓝色	45	83.99	0.15	90
		黄色	51	95.18	0.28	120
		橙色	53	98.92	0.39	125
		红色	56	104.52	0.59	130

注: 启动内涝预警所需时间为降雨开始至出现最大积水深度的时间。

通过对比模拟结果发现,两种雨型对致涝降雨量阈值的影响不明显。从表4可以看出,随着预警等级的提升,统计雨型下的致涝降雨量阈值逐渐增加,显示内涝预警严格性随等级增强。在蓝色预警等级中,两种雨型下的致涝降雨量阈值相差较大,而在其余三个预警等级中,两种雨型下的致涝降雨量阈值基本一致。以雨峰位置系数 $r=0.50$ 为例,在芝加哥雨型下启动蓝色、黄色、橙色和红色预警的致涝降雨量阈值分别为38、50、53、56 mm;而在统计雨型下,与这些预警等级对应的致涝降雨量阈值分别为45、51、53、56 mm。由此可知,两种设计雨型对致涝降雨量阈值的影响并不明显。

从表4还可以看出,在最大降雨强度相同而降

雨量不同时,两种雨型下的最大积水深度表现差异很大。当芝加哥雨型最大降雨强度为108.00 mm/h时,1 h降雨量为38 mm,最大积水深度为0.16 m;而当统计雨型最大降雨强度为104.52 mm/h时,1 h降雨量为56 mm,最大积水深度为0.59 m。主要原因是在最大降雨强度相同的情况下,降雨总量决定着积水深度,虽然两种雨型在雨峰时段的降雨量相同,但在其他时段统计雨型的降雨量均高于芝加哥雨型,因此统计雨型下的雨水更早充满排水管网,导致管网溢流形成积水,后续降雨将继续增加内涝积水深度。进一步分析发现,尽管两种雨型在相同降雨量下的最大积水深度相近,但芝加哥雨型因其高强度特性更快达到最大积水深度,对城市排水系统正常运行造成较大压力。例如,在53 mm降雨量下,芝加哥雨型以150.63 mm/h的最大降雨强度在105 min内形成0.41 m积水深度,而统计雨型以98.92 mm/h的最大降雨强度在125 min内形成0.39 m积水深度;芝加哥雨型模拟下的最大积水深度仅比统计雨型高5%,而其达到橙色预警所需的时间则比统计雨型少了16%,表明其高强度降雨容易迅速占满排水管网,增加溢流量,使积水风险升高。相比之下,统计雨型因其降雨强度较低而积水形成较慢,为管理工作提供了更为宽松的应急响应时间,降低误判内涝风险的可能性。

3.3 统计雨型雨峰位置系数对降雨阈值的影响

雨峰位置系数对内涝预警的降雨量阈值有着显著影响。为深入探究这一影响,通过对不同雨峰位置系数的统计雨型进行模拟,评估它们在不同预警等级下的致涝潜力。采用三种具有最高出现频率的统计雨型,分别对应不同的雨峰位置系数(0.21、0.50、0.83),并模拟它们在1 h设计降雨事件下的积水情况,结果见表5。可知,随着雨峰位置系数的增大,启动各致涝预警的降雨量阈值依次降低,雨峰位置系数对致涝降雨量阈值的影响较为明显。当雨峰位置系数 $r \leq 0.50$ 时,随着雨峰位置系数的增加,启动内涝预警的降雨量阈值降低,同时启动预警所需的时间也更长;当雨峰位置系数 $r > 0.50$ 时,随着雨峰位置系数的增加,启动内涝预警的降雨量阈值开始显著降低,但同时也会缩短启动相应预警等级所需的时间。究其原因,当雨峰位置系数 $r \leq 0.50$ 时,最大降雨强度基本相同,雨峰越靠前,降雨初期雨水(可能包括雨峰时段降雨)将会被下垫

面吸收和管网容纳,需要更多的降雨量才会开始积水致涝,因此致涝降雨量阈值较高,然而,一旦开始积水,由于雨峰靠前且降雨强度相同,积水速度较快,所以从积水到触发预警的时间会更短;当雨峰位置系数 $r>0.50$ 时,雨峰越靠后,前期雨水进入管网超过其排水能力,后期降雨强度大导致管网雨水溢流内涝的情况更为严重,而1 h雨型降雨历时相对较短但降雨强度很大,管网雨水溢流和地面雨水迅速汇入下凹桥区低洼处,从而缩短启动相应预警等级所需的时间,这对于排水抢险应急工作将是严峻的考验。这一发现可以帮助相关部门更准确地设定预警阈值,以应对不同雨型可能带来的风险,对于优化内涝预警系统设计具有重要意义。

表5 不同雨峰位置系数降雨的内涝模拟结果

Tab.5 Waterlogging simulated results of rainfall with different peak intensity position coefficients

雨峰位置系数	预警等级	降雨量/mm	最大降雨强度/(mm·h ⁻¹)	最大积水深度/m	启动内涝预警所需时间/min
0.21	蓝色	45.0	96.04	0.15	90
	黄色	54.0	115.24	0.28	110
	橙色	56.5	120.58	0.39	115
	红色	59.5	126.98	0.61	120
0.50	蓝色	45.0	83.99	0.15	90
	黄色	51.0	95.18	0.28	120
	橙色	53.0	98.92	0.39	125
	红色	56.0	104.52	0.59	130
0.83	蓝色	39.0	166.15	0.16	80
	黄色	42.0	178.93	0.27	85
	橙色	44.5	189.58	0.42	85
	红色	48.5	206.62	0.61	130

4 结论与展望

① 采用K-means聚类分析,成功从历史降雨数据中识别出统计雨型,这些雨型可反映该区域降雨事件的不同特征。这一分析过程可增强对降雨模式的理解,也可为水动力模型的构建和内涝预警系统的开发提供数据支持。

② 芝加哥雨型和统计雨型对致涝预警的降雨量阈值影响不明显。芝加哥雨型降雨对城市排水系统造成的压力更大,这种压力尤其体现在内涝预警的启动时间上,降雨量会更快地使排水管网达到容量极限,引发管网溢流造成内涝,进而加重排

水系统的负担。

③ 雨峰位置系数对致涝预警的降雨量阈值有显著影响。在统计雨型中,雨峰越靠后,降雨强度越大,内涝风险也越高,各预警等级的致涝降雨阈值会降低。当雨峰位置系数 $r\leq 0.50$ 时,雨峰越靠前,启动内涝预警时间越快,这是因为降雨前期(可能包括雨峰时段降雨)的雨水会被管网容纳,需要更多降雨才会导致积水致涝,因此致涝降雨的阈值较高,然而,一旦开始积水,由于雨峰靠前,积水速度较快,所以从积水到触发预警的时间会更短;当雨峰位置系数 $r>0.50$ 时,随着雨峰后移,启动相应预警等级所需时间反而更短,这归因于雨强较高导致雨水汇流速度较快,从而缩短了从降雨开始到启动内涝预警所需的总时间,这对排水管网的运行维护管理和预警应急管理工作带来了极大挑战。

本研究也存在一些局限性需要解决。首先,模型的准确性受到土地利用变化、管网改造和人为活动等因素影响,模型参数需要定期更新来反映这些变化。其次,本研究在设计雨型时主要考虑1 h的降雨历时,为提高预警的全面性,未来应考虑不同降雨历时的强降雨事件,探索不同降雨特征对城市内涝的影响,更全面地研究致涝降雨量阈值和评估内涝风险。总之,希望通过结合实时监测数据和先进模型预测技术,提高内涝预警的准确性和响应速度,从而更好地服务于城市防洪减灾工作。

参考文献:

- [1] 马嘉忆,董增川,蒋飞卿,等. 城镇化背景下太湖流域极端降雨时空演变特征[J]. 水电能源科学, 2022, 40(3): 1-4, 21.
MA Jiayi, DONG Zengchuan, JIANG Feiqing, et al. Spatio-temporal variation characteristics of extreme rainfall in Taihu Lake Basin under urbanization [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(3): 1-4, 21 (in Chinese).
- [2] 刘兴哲. 城市下凹桥区内涝积水综合治理设计探讨[J]. 中国给水排水, 2019, 35(4): 47-53.
LIU Xingzhe. Comprehensive treatment design of waterlogging and water accumulation in urban concave bridge area [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(4): 47-53 (in Chinese).
- [3] 邸苏闯,潘兴瑶,刘洪伟,等. 北京城市暴雨内涝预警指标体系构建和致灾因子阈值量化研究[C]//北京

- 市水科学技术研究院. 北京水问题研究与实践(2018年). 北京: 中国水利水电出版社, 2019.
- DI Suchuang, PAN Xingyao, LIU Hongwei, *et al.* Construction of early warning index system and quantification of disaster-causing factors in Beijing[C]// Beijing Institute of Water Science and Technology. Research and Practice on Water Issues in Beijing (2018). Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2019 (in Chinese).
- [4] XU X, LI Z, WANG M, *et al.* Research on the method of determining rainfall thresholds for waterlogging risk in subway stations[J]. Water, 2024, 16(11): 1596.
- [5] 邸苏闯, 刘洪伟, 苏泓菲, 等. 北京城市暴雨预警及应急管理现状与挑战[J]. 中国防汛抗旱, 2016, 26(3): 49-53, 59.
- DI Suchuang, LIU Hongwei, SU Hongfei, *et al.* Current situation and challenges of rainstorm warning system and emergency response management in urban region of Beijing [J]. China Flood & Drought Management, 2016, 26(3): 49-53, 59 (in Chinese).
- [6] 宋瑞宁, 任梦瑶, 刘强, 等. 基于InfoWorks ICM模型的内涝预警降雨量阈值研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(2): 5-8, 73.
- SONG Ruining, REN Mengyao, LIU Qiang, *et al.* Study on the waterlogging warning rainfall depth threshold based on InfoWorks ICM model [J]. Water Resources and Power, 2021, 39(2): 5-8, 73 (in Chinese).
- [7] 吕放放, 胡俊, 卢爱国, 等. 北京某下凹桥区排水系统建模研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(7): 103-108.
- LÜ Fangfang, HU Jun, LU Aiguo, *et al.* Building of mathematical model for drainage system at an underpass in Beijing [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(7): 103-108 (in Chinese).
- [8] 宋瑞宁, 谢芳, 李小宁, 等. 设计降雨特征对城市内涝模拟结果的影响分析[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(3): 136-143.
- SONG Ruining, XIE Fang, LI Xiaoning, *et al.* Design rainfall characteristics affects urban flood inundation simulation [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34(3): 136-143 (in Chinese).
- [9] 王彬雁, 赵琳娜, 巩远发, 等. 北京降雨过程分型特征及短历时降雨重现期研究[J]. 暴雨灾害, 2015, 34(4): 302-308.
- WANG Binyan, ZHAO Linna, GONG Yuanfa, *et al.* Characteristics of temporal pattern and return period of short-duration rainfall at Beijing observatory [J]. Torrential Rain and Disasters, 2015, 34(4): 302-308 (in Chinese).
- [10] 袁冯. 北京市暴雨分布规律与洪涝灾害风险评估研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
- YUAN Feng. Study on the Distribution of Rainstorm and the Risk Assessment of Flood Disaster in Beijing [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020 (in Chinese).
- [11] 杨友健, 郭林, 林乐曼, 等. 基于K-means雨型分类方法的温州市台风暴雨时空演变特征研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(4): 55-70.
- YANG Youjian, GUO Lin, LIN Leman, *et al.* K-means classification method of rain pattern-based study on spatio-temporal evolution characteristics of typhoon rainstorm in Wenzhou [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(4): 55-70 (in Chinese).
- [12] 刘媛媛, 王毅, 刘洪伟, 等. 针对不同受灾体城市内涝预警指标的研究[J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(2): 15-18.
- LIU Yuanyuan, WANG Yi, LIU Hongwei, *et al.* Study on early warning indexes of urban pluvial floods for various disaster-affected bodies [J]. China Flood & Drought Management, 2018, 28(2): 15-18 (in Chinese).
- [13] 张书函, 肖志明, 王振昌, 等. 北京市城市内涝判定标准量化研究[J]. 中国防汛抗旱, 2019, 29(9): 1-5.
- ZHANG Shuhan, XIAO Zhiming, WANG Zhenchang, *et al.* Quantitative study on the criteria for determining urban flood in Beijing [J]. China Flood & Drought Management, 2019, 29(9): 1-5 (in Chinese).

作者简介:任德福(1994-),男,重庆人,硕士,助教,
主要研究方向为洪涝灾害模拟与预警。

E-mail:727514351@qq.com

收稿日期:2024-10-02

修回日期:2024-11-17

(编辑:刘贵春)