DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.250668

郑州市内涝风险区域识别研究

李慧杰
[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘　要: 以2021年河南省极端降水事件引发的城市内涝问题为背景,选取郑州市作为典型案例。旨在探索城市关键区域内涝风险识别方法,以响应国家新型城镇化建设对提升城市防灾减灾能力的要求。通过构建多因子风险评估模型,重点评估医疗、交通等关键基础设施的防涝脆弱性,并将风险识别流程系统化纳入城市规划体系。提出了基于区域重要性分级的城市内涝防控策略,验证了风险评估模型在提升关键基础设施内涝标准方面的适用性,所形成的技术方法可为同类城市的内涝防治提供科学依据。

关键词: 内涝;高风险;重要地区;识别
中图分类号: TU998.4　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-7716(2026)01-0258-05

Research on Identification of Waterlogging Risk Areas in Zhengzhou City

LI Huijie
[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Taking the urban waterlogging problem caused by extreme precipitation events in Henan Province in 2021 as the background, and selecting Zhengzhou City as a typical case, the aim is to explore methods for identifying the waterlogging risk in key urban areas in response to the requirements of the national new urbanization construction to enhance urban disaster prevention and mitigation capabilities. By constructing a multi-factor risk assessment model, the focus is on assessing the flood prevention vulnerability of key infrastructure such as medical care and transportation, and the risk identification process is systematically incorporated into the urban planning system. The strategy for urban waterlogging prevention and control based on regional importance classification is proposed, and the applicability of the risk assessment model in improving the waterlogging standards of key infrastructure is verified. The resulting technical methods can provide the scientific basis for waterlogging prevention and control in similar cities.

Keywords: waterlogging; high-risk; critical areas; identification

0　引　言

在当前城市发展进程中,内涝灾害已成为制约城市可持续发展的突出问题。统计数据显示,我国约62%的城市在过去5年内经历过严重内涝事件[1],由此暴露出传统排水系统设计难以适应气候变化背景下的极端降水新常态。在此背景下,以海绵城市建设为代表的低影响开发理念被纳入国家战略体系[2]。

根据国办发〔2021〕11号文件[3],城市内涝治理需构建多层级防控体系,要求2025年前各城市应基本形成“源头减排、管网排放、蓄排并举、超标应急”的排水防涝工程体系。重点提升医院、轨道交通等生命线工程的防涝韧性安全。

以2021年郑州“7·20”极端降水事件为例,单日最大降水量达历史极值的624.1 mm,造成城市系统运行瘫痪[4]。灾害调查结果表明,行政中心、交通枢纽等关键节点的内涝脆弱性尤为突出[5]。因此,城市内涝防控不仅需要提升工程标准,更需建立基于风险分级的差异化防控策略。

本研究创新性地提出“区域重要性-水文特征-灾害损失”三维评估框架,重点解决以下问题:(1)如何量化不同功能区的内涝耐受阈值;(2)如何识别高风险与高敏感性的叠加区域;(3)如何将风险评估结果转化为规划决策依据。研究成果对于正处于快速城镇化阶段的城市具有普适参考价值。

本文技术路线图见图1。

收稿日期:2025-07-01
基金项目:上海市科委基金项目(23DZ1202805)
作者简介:李慧杰(1992—),女,硕士,工程师,从事海绵城市建设和排水防涝工作。

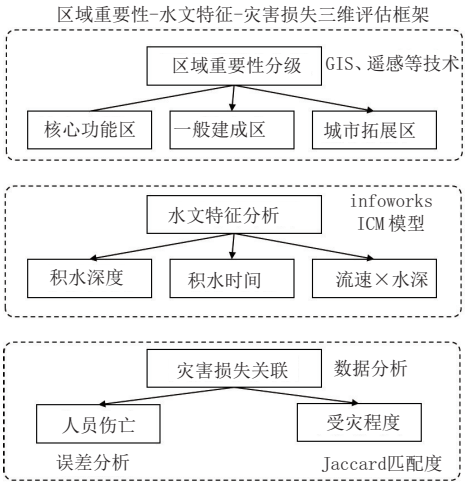

图 1　技术路线图

1　基于城市内涝耐受能力的多因子研究

1.1　区域敏感度分级

根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)的城区分类体系，结合郑州市实际情况，本研究提出了基于功能敏感度的区域分级方法。

根据郑州市域城镇体系，将城区类型分为核心功能区，包括行政中心(省、市两级政府驻地)、交通枢纽节点(铁路及客运枢纽)、重大市政基础设施(自来水厂、污水处理厂、500 kV 变电站、分输站及门站、热电厂及热源厂，核心局房及以上，轨道交通车辆段)、其他设施(主要包括学校、医院和商业聚集区、市级重点开发区域)；一般建成区和城市拓展区。以上分区经济发展程度、人口聚集程度和建筑密度不同，内涝导致的经济影响和社会影响程度也不同，一般而言，承受能力从小到大排列为：核心功能区＜一般建成区＜城市拓展区；积水可能造成的灾害损失从大到小排列为：中心城区核心功能区>一般建成区>城市拓展区，因此需按地区重要程度分别设置控制要求。

1.2　积水深度影响机制分析

根据城市内涝灾害案例研究，当积水高度小于 0.15 m，水面尚未达到普通轿车排气管高度时，积水对道路交通的影响在容许范围内。当积水高度位于 0.15~0.3 m 时，行人步速下降约 40%~60%，小型车辆通过率将降低至正常状态的 75%[6]；而当积水高度不小于 0.3 m 时，已有 83% 的民用车辆无法正常行驶[7]。当积水深度大于 0.5 m 时，不仅会造成机动车辆发动机进水，还会造成建筑物底层进水等损失。因此，本研究将积水深度和住宅或商业建筑首层进水作为高风险判定的充分条件。

1.3　积水持续时间效应研究

积水时间参数 t 是评估内涝风险的重要参数，其与积水深度 h 存在耦合作用。现行《城市内涝防治规划标准(征求意见稿)》建立了初步的评估框架：当积水深度 $h<0.15$ m、积水时间 $t<30$ min 时，内涝等级为轻微积水；当积水深度 $h<0.3$ m、积水时间 t 为 30 ~ 60 min 时，内涝等级为轻微内涝；当积水深度 $h>0.4$ m、积水时间 $t>60$ min 时，内涝等级为严重内涝[7]。然而，该标准在边界条件处理上存在模糊地带，例如当 h=0.25 m 而 t=90 min 时的情形未予明确。通过对郑州“7·20”事件分析发现，长时间(t>2 h)的中等深度积水(0.2 m≤h≤0.4 m)会导致地下空间渗水、电力设施故障等次生灾害。根据实际内涝防治经验，积水越深的区域，其积水时间往往越长，上述内涝等级划分方式有其合理之处。但为不失一般性，建议在此基础上进一步细化，形成完全闭合的内涝风险等级划分。

1.4　地表径流流速

暴雨期间地表径流的动力特性对人体稳定性构成显著威胁。流体力学研究表明，水流对人体的作用主要表现为 2 种失稳模式：当水深较浅(h<0.55 m)时，水流冲击力与地面摩擦力的平衡关系起主导作用；而在较深水流(h≥0.55 m)中，人体倾倒主要受水流力矩与重力力矩的比值控制[8]。多项实验数据证实，人体稳定性临界条件可用流速与水深乘积($v\times h$)表征：对于平均体型的成年人(身高 1.7 m，体重 68 kg)，当 $v\times h$>0.6 m²/s 时，失稳概率超过 90%；儿童群体(9~13 岁)的临界阈值更低，仅为 0.4 m²/s[9]。现场观测显示，在 0.35 m 水深条件下，当流速达 2.5 m/s 时，即使是经过专业训练的人员也难以保持平衡。国际上的安全规范普遍采用 $v\times h$≤0.4 m²/s 作为行人通行安全阈值，这一标准已纳入澳大利亚 ARR-2019 等权威指南[10]。基于上述研究成果，本研究建议将 $v\times h$>0.4 m²/s 作为郑州市内涝高风险区域的判定标准之一，该阈值可确保包括儿童在内的弱势群体的安全需求。

1.5　内涝风险等级评定标准

内涝风险等级宜根据城镇重要程度、积水时间、积水深度、地表径流流速等因素综合确定，内涝风险等级划分为内涝高风险区、内涝中风险区和内涝低风险区，划分标准宜符合表 1 和表 2 的规定。需要说明的是，表中未考虑流速与水深乘积对行人的影响，

对于流速与水深乘积大于0.4 m²/s的区域应判定为内涝高风险区。

表1　一般地区内涝风险评估等级表

积水时间/h	0.15 m≤h<0.3 m	0.3 m≤h<0.5 m	h≥0.5 m
0.5<t≤1	低风险	低风险	中风险
1<t≤2	低风险	中风险	高风险
2<t≤3	中风险	高风险	高风险
t>3	高风险	高风险	高风险

表2　重要地区内涝风险评估等级表

积水时间/h	0.15 m≤h<0.3 m	0.3 m≤h<0.5 m	h≥0.5 m
0.5<t≤1	中风险	中风险	高风险
1<t≤2	中风险	高风险	高风险
2<t≤3	高风险	高风险	高风险
t>3	高风险	高风险	高风险

2　郑州市内涝风险等级标准及划分

2.1　郑州市重要地区划分

城市内涝防控重要地区需考虑社会经济影响和人口密度2个重要指标，其中，社会经济越发达、人口密度越高的区域，具有内涝高脆弱属性。经过系统摸排与对接，梳理出郑州市中心城区内重要内涝防控区域，见表3。

表3　重要内涝防控区域

重要地区分类	具体内容
行政中心	省、市两级政府
交通枢纽	铁路及客运枢纽
重大市政基础设施	自来水厂、污水处理厂、500 kV变电站、分输站及门站、热电厂及热源厂，核心局房及以上，轨道交通车辆段
其他	学校、医院和商业聚集区、市级重点开发区域

根据上述方法，识别出郑州市主城区重点区域共524项，其中行政中心3个、交通枢纽14个、重大市政基础设施61个、学校291个、医院136个、商业聚集区2个、市级重点区域17个，总面积达61.18 m²，占全部建成区面积的9.4%，如图2所示。

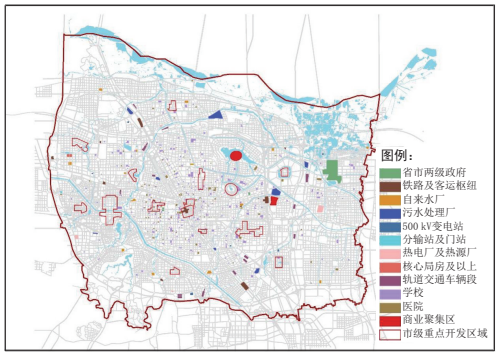

图2　郑州市主城区重要地区划定

2.2　郑州市内涝风险等级划分

采用Infoworks ICM模型，按照郑州市内涝防治标准100 a一遇重现期（24 h降雨量为253.5 mm，其中最大1 h降雨量为88.7 mm）降雨模拟内涝情况，构建管网一维模型的资料包括相关片区雨水专项规划、管网普查资料、部分河道断面和水闸测量等。在一维模型的基础上再引入地面高程模型，构建二维地表漫流模型，进行城市内涝的分析和计算。另外郑州市主城区属于平原地区，市区的涝水往往与洪水相伴而生，管网多为重力排河，受河道水位顶托作用影响，加剧内涝风险。因此，本次建模将河网模型也一并纳入进来，进行管网河网耦合计算，将二者叠加的风险也一并考虑在内。

2.2.1　水力水文参数设置

根据《室外排水设计标准》（GB 50014—2021），在计算管道沿程水头损失时，所选用的管道内壁粗糙系数为0.013。

子集水区相关参数设置见表4。

表4　不同用地性质径汇流初始参数

垫面类型	径流模型	固定径流系数		汇流参数
		2015年前	2015年后	
道路	固定径流系数	0.82	0.78	0.02
工业		0.86	0.80	
机关团体		0.73	0.64	
交通枢纽		0.82	0.78	
教育科研		0.73	0.64	
居住用地		0.78	0.60	
商业用地		0.78	0.71	
文化设施		0.73	0.64	
其他		0.78	0.68	
绿地	霍顿渗透模型	初渗率125 /(mm·h⁻¹)；稳渗率6.3/(mm·h⁻¹)；衰减率2.0/h⁻¹		0.1

2.2.2　参数率定和验证

本次模型参数率定与验证，采用郑州市2016年7月9日和2019年8月1日2场实测降雨进行二维内涝积水模拟率定。将模拟结果中呈现的内涝积水点与《郑州市城市道路积水点治理工作实施方案》提供的145处历史易涝点（主城区131处，港区14处）进行比对分析。

模型中可调整的参数包括不同下垫面的固定径流系数、管道子集水区收水范围等。经参数调整后的率定和验证结果见图3、图4。模拟的积水点与实测易涝点吻合度较高，结果表明模型能反映实际内涝积水情况。

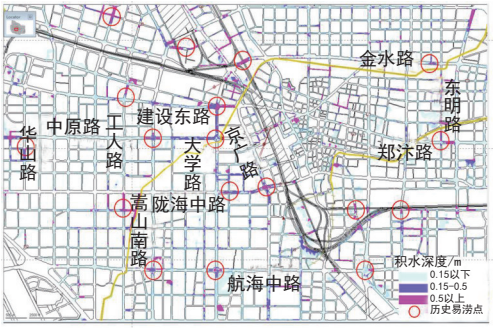

图 3　内涝模拟结果与历史易涝点对比（2016 年 7 月 9 日实测降雨）

图 4　内涝模拟结果与历史易涝点对比（2019 年 8 月 1 日实测降雨）

2.2.3　模拟结果

按照积水深度和积水时间等上述风险等级划分标准，耦合流速与水深乘积超 0.4 m^2/s 区域。结合模型计算结果，得到郑州市主城区内涝中、高风险等级划分结果，见图 5。经与掌握的郑州市实际积水位置对比，该内涝风险模拟结果与实际积水位置基本吻合。

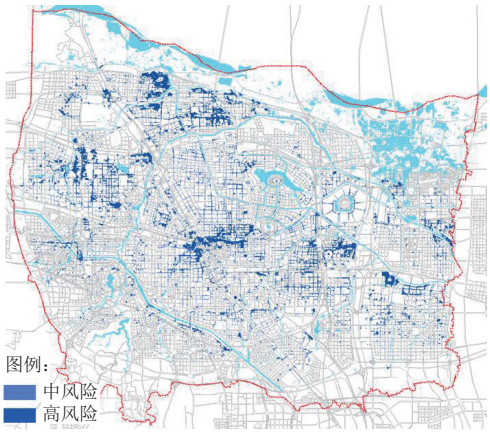

图 5　郑州市内涝风险等级划分

3　内涝风险区划分合理性分析

通过郑州“7·20”暴雨城市内涝事件对上述内涝风险区划合理性进行验证。由于“7·20”超标准暴雨事件带来的内涝影响是广泛且普遍的，因此不能用内涝防治标准来衡量其内涝风险程度，而考虑引用城市管理层最为关注的人员死亡数量和受灾损失程度作为评估高风险区域关键因子。

3.1　人员死亡失踪区域

主城区因灾死亡人员分散在居民小区、地下室、街道、地铁、桥涵、隧道、深基坑、道路塌陷处、河道塌方处等多处。其中，以京广路北隧道为代表的城市低洼地带，以金水区英协鼎峰二号院等居民小区为代表的城市地下空间，阜外华中心血管病医院和郑州大学第一附属医院河西院区，以及地铁 5 号线死亡人员较为集中。

通过水动力模型反演典型灾点，以京广北路隧道为例，其积水模拟值与实测值误差见表 5。由表 5 可见，两者误差均小于 20%，满足水力模型验收标准[11]。

表 5　京广隧道积水模拟值与实测值误差

参数	模拟值	实测值	误差/%
最大水深 h/m	4.2	4.5	6.7
流速峰值 v/($m\cdot s^{-1}$)	2.8	3.1	9.7
$v\times h$/($m^2\cdot s^{-1}$)	11.76	13.95	15.7

3.2　受灾损失严重区域

根据灾害发生发展和现场核查情况，结合遥感监测和多模型评估等技术，采用 Jaccard 相似系数[12]量化模型高风险区与实际灾区的空间匹配度 J：

$$J=|A\cap B|/|A\cup B|\times 100\% \tag{1}$$

式中：A 为模拟高风险区（61.18 km^2）；B 为“7·20”实际受灾范围（78.42 km^2）。

经 GIS 叠加计算得 J=72.3%（>50% 阈值），表明模型具有显著空间相关性。

4　结　语

（1）基于郑州市 2021 年“7·20”特大暴雨内涝灾害，构建了“区域重要性-水文特征-灾害损失”三维风险评估框架，提出了内涝高风险及重要地区的识别方法。通过多因子耦合分析和模拟分析，完成了郑州市主城区内涝风险等级划分，识别出高风险区 61.18 km^2，占建成区 9.4%，涵盖行政中心、交通枢纽、医院等关键设施。结合历史灾情数据验证，高风险区与人员伤亡、经济损失严重区域高度吻合，证明了模型可靠性。

（2）创新性地提出基于功能敏感度的区域分级体系，量化了不同设施的内涝耐受阈值，弥补了传统标准对关键基础设施保护的不足。但未能将人口流动、应急响应等动态人为因素纳入评估框架。下一步应加强城市群内涝连锁效应分析，提升复杂情景模拟效率。

参考文献：

[1] 宋晓猛，徐楠涛，张建云，等．中国城市洪涝问题：现状、成因与挑战[J]. 水科学进展，2024，35（3）：357-373.

[2] 国务院办公厅．关于推进海绵城市建设的指导意见（国办发〔2015〕75 号）[Z]. 北京：国务院办公厅，2015.

[3] 国务院办公厅．关于加强城市内涝治理的实施意见（国办发〔2021〕11 号）[Z]. 北京：国务院办公厅，2021.

[4] 国务院调查组．河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告[R]. 北京：应急管理部，2022.

[5] 刘家宏，裴羽佳，梅超，等．郑州“7·20”特大暴雨内涝成因及灾害防控[J]. 郑州大学学报（工学版），2023，44（2）：38-45.

[6] JUNQIANG X ANCHUAN G, CAIWEN S, *et al*. Criterion of human stability in floodwaters based on theoretical and experimental studies[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29（3）: 4-11.

[7] 中国城镇供水排水协会．城镇内涝治理系统规划设计技术规程（征求意见稿）[Z]. 北京：中国城镇供水排水协会，2023.

[8] KELLER R J, MITSCH B. Safety aspects of the design of roads and bridges in relation to flooding[J]. Journal of Flood Risk Management, 1993, 15（3）: 123-135.

[9] JONKMAN S N, PENNING-ROWSELL E C. Human instability in flood flows[J]. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA), 2008, 44（5）: 1208-1218.

[10] Australian Rainfall and Runoff （ARR). Guidelines for flood risk assessment and management[R]. Canberra：Geoscience Australia, 2019.

[11] CECS 647—2019，城镇内涝防治系统数学模型和应用规程[S].

[12] 李小慧．基于 Jaccard 项目类别相似性的个性化推荐算法研究[D]. 长沙：中南大学，2025.

（上接第 247 页）

工程建设与设计，2022（24）：92-94.

[15] 魏炜．盾构隧道施工侧穿桥梁对桩基位移和受力特性的影响[J]. 市政技术，2020，38（2）：162-165.

[16] 周国志．基于 FLAC 3D 的盾构施工穿越高架桥梁桩基稳定性影响数值试验研究[J]. 北方交通，2020（10）：5-10.

[17] 郭旭东．地铁盾构隧道下穿城市高架桥的影响分析[J]. 山西建筑，2022，48（22）：153-157.

[18] 周群立，张有桔．盾构隧道近距离下穿立交桥施工影响分析及控制[J]. 城市轨道交通研究，2019，22（5）：47-50.

[19] 赵小虹．盾构隧道施工引起地层损失率的变化规律[J]. 山西建筑，2022，48（24）：168-172.

[20] DB11/T 716—2019，穿越既有道路设施工程技术要求[S].