

重庆市沙坪坝区内涝风险评估

郑太文, 王婷婷, 郑雨馨, 胡悦, 胡月
(中机中联工程有限公司, 重庆市 400039)

摘要: 以重庆市沙坪坝区为研究区域, 针对山地城市内涝风险的空间异质性与动态演化特征, 构建了包含危险性、暴露度和脆弱性的综合评估体系。采用层次分析法(AHP)与熵权法相结合的主客观赋权方法, 量化分析了降雨强度、高程、坡度、人口密度、路网密度等8项指标的权重。研究发现, 降雨强度(综合权重0.32)高程(0.12)和坡度(0.13)是影响内涝危险性的核心因素, 高程和坡度通过控制径流汇聚与排泄效率, 成为内涝危险性的基础因子, 降雨强度作为气候胁迫因子, 直接决定风险等级上限。东部老城区因低洼地形、高不透水率及人口密集成为高风险区。研究结果为山地城市内涝风险精细化管理提供了科学依据, 也为多源因子风险评估方法的应用提供了实践参考。

关键词: 城市内涝; 洪水风险评估; 层次分析法; 熵权法

中图分类号: TV122

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)09-0039-07

Assessment of Urban Waterlogging Risk in Shapingba District of Chongqing

ZHENG Taiwen, WANG Tingting, ZHENG Yuxin, HU Yue, HU Yue
(CMCU Engineering Co., Ltd., Chongqing 400039, China)

Abstract: Taking Shapingba District of Chongqing as the research area, aiming at the spatial heterogeneity and dynamic evolution characteristics of urban waterlogging risk in mountainous cities, a comprehensive evaluation system incorporating hazard, exposure and vulnerability is built. A combined subjective-objective weighting method integrating the Analytic Hierarchy Process (AHP) and entropy weight method is used to quantitatively analyze the weights of eight indicators, including rainfall intensity, elevation, slope, population density, road network density and the others. The results show that rainfall intensity (comprehensive weight 0.32), elevation (0.12) and slope (0.24) are the core factors influencing the waterlogging hazard. Elevation and slope serve as the fundamental factors of waterlogging hazard by controlling the runoff convergence and discharging efficiency. As a climatic stress factor, the rainfall intensity directly determines the upper limit of risk levels. The eastern old urban area has become the high-risk area because of its low-lying terrain, high imperviousness and dense population. The research results provide a scientific basis for the refined management of urban waterlogging risks in mountainous cities and offer the practical references for the application of multi-factor risk assessment methods.

Keywords: urban waterlogging; flood risk assessment; Analytic Hierarchy Process (AHP); entropy weight method

0 引言

近年来, 城市内涝作为典型的复合型城市灾害呈现显著加剧趋势, 已成为全球城市治理领域的研究热点。这一趋势的形成可归因于气候——人类活动的双向胁迫效应, 一方面在气候变暖的背景下, 极端降雨的重现期缩短, 另一方面我国城镇化率持续攀升, 人类干扰导致下垫面属性改变^[1]。快速的城

市扩张和土地利用的转变, 导致“自然渗透-人工阻隔”的二元水文结构失衡, 进一步加快了洪水发生的概率^[2]。作为典型的山地城市, 重庆因其典型的地形地貌与气候特征(年降雨量超1 200 mm, 且70%集中于5~9月), 叠加快速城市化进程中下垫面不透水比例激增, 导致内涝频发并造成严重危害。

面对复合型洪水风险, 传统洪水风险方法面临双重挑战: 一方面现有研究多基于静态水文模型或单一灾害指标(如积水深度), 难以反映山地城市内涝风险的空间异质性与动态演化特征; 另一方面人口密度、经济活跃度等社会脆弱性指标尚未系统纳

收稿日期: 2025-04-23

作者简介: 郑太文(1985—), 男, 学士, 高级工程师, 从事水利水电工程规划、设计、咨询及管理工作。

入评估体系,导致“见水不见人”的评估偏差。基于灾害系统学理论,学术界普遍将洪水风险定义为危险性、脆弱性、暴露度的复合型函数^[3],本质在于自然灾害与受灾社会人口经济脆弱性的结合体,因此洪水风险评估的关键在于这三个因素之间的互相作用。本研究聚焦于重庆内涝风险评估的优化,融合高精度地形数据,绘制洪水风险区划图,提升大众危险意识,为防灾减灾提供依据。

1 研究区域概况

1.1 地理位置

重庆市主城区位于四川盆地东南缘褶皱带,处长江上游经济带核心区域,总面积约5 473 km²。受燕山期构造运动影响,区域内形成典型的川东平行岭谷地貌,由华蓥山、铜锣山、明月山等十余条北东—南西走向的条状山脉与宽谷相间排列,是典型的山地城市,地貌以丘陵、低山为主,平均海拔200~400 m。核心城区(如渝中区、江北区)因受构造抬升与河流切割作用,形成阶梯状台地地形,平均坡度15°~25°,而沿江低洼地带(如菜园坝、朝天门)坡度普遍小于5°,形成天然泄洪瓶颈。区域内长江与嘉陵江交汇,形成“两江四岸”的独特格局,坡度梯度差异极大:核心城区(如渝中区)平均坡度达15°~25°,而沿江低洼地带坡度不足5°。这种地形特征导致地表径流速度差异显著,暴雨期间坡面汇流时间可缩短至平原地带的1/3,加剧了低洼区域的内涝风险。

本次研究区域以重庆市沙坪坝区为研究对象,沙坪坝区地处歌乐山与嘉陵江之间的过渡带,西接中梁山,东临嘉陵江,呈“三山夹两槽”地貌(见图1),整体地势西高东低,中部存在多处天然洼地(如三峡广场片区)。坡度差异显著(局部坡度达15°以上),导致暴雨期间坡面汇流速度加快,低洼区域易形成积水。

1.2 气候与水文

重庆市属亚热带季风气候区,受全球变暖影响,水汽输送加强,年均降雨量可达1 237 mm,但时空分布极不均衡:在时间方面,70%降雨集中于5~9月,短时强降雨(大于50 mm/h)频率逐年上升,受西太平洋副热带高压北抬影响,主汛期降雨量占比提高;在空间方面,因地形抬升效应,主城区呈现“四山夹三槽”地形,东北部年均降雨量比西南部高约15%;在水文方面,长江、嘉陵江干流贯穿城区,但城市内部次级河流因河道狭窄、淤积严重,行洪能力不足。气

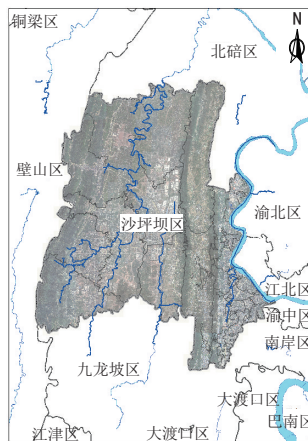


图1 研究区域地理位置图

候与水文条件叠加,加剧极端降雨下的城市内涝风险。

1.3 历史内涝情况

2015—2022年重庆市降雨时空集聚性显著:高频内涝区集中于渝中区解放碑商圈和沙坪坝三峡广场;高损失区则以江北观音桥商圈为代表。2021年全市相继发生5次重大自然灾害,其中“8·26、8·30”灾害过程达市级Ⅳ级救灾应急响应启动条件。

近10 a来沙坪坝区遭受内涝暴雨情况如下。

(1)2016年6月,在凤中路西客站附近,因施工导致地下管网堵塞,暴雨引发严重积水,最深达齐腰深。

(2)2020年7月,因连续强降雨导致辖区公路多处塌方断道,交通局启动水毁重建工作。

(3)2021年9月16日,短时强降雨引发内涝,部分路段积水超1 m,导致交通中断。地铁1号线沙坪坝站因雨水倒灌临时封站。

(4)2023年7月21日,大暴雨导致南开下穿道积水达1 m,数字防汛系统自动熔断交通,启动预案处置,未造成人员伤亡。

(5)2024年6月21日,在双碑街道堆金村,凌晨强降雨引发内涝,居民楼一楼积水最深1.3 m,10余名群众被困。

2 研究方法

2.1 方法介绍

进行洪水风险评估是制定洪水风险管理战略的技术基础,学术届对风险的定论尚未统一,但基本认同风险是危险性、脆弱性、暴露度的合集。目前进行洪水风险评估的主要方法有基于历史统计数据的数据分析法、通过遴选指标的数据分析法、基于水文水

动力模型的情景分析法。

基于历史统计数据展开的分析方法通过分析长时序灾情数据构建区域损失模型,具有操作简便、规律可循的优势,但对数据完整性依赖度高且空间分辨率粗糙,多用于省市尺度宏观评估。构建指标体系法基于多维度影响因子构建评估框架,指标选取为核心环节,虽能系统反映洪灾综合影响,但易受主观权重分配偏差影响。基于水文水动力的情景模拟法,通过物理机制模拟洪水演进过程,可量化地形-降水-土壤等多要素耦合效应,预测精度较高,但受限于多源数据获取难度及参数不确定性,在复杂地形区应用受限。当前,采用指标体系法进行洪水评估应用广泛,指标赋权的策略灵活多样,风险等级划分方法逐渐完善。本文采用构建指标体系法对研究区域进行洪水灾情评估与分析。在构建洪水风险评估指标体系时,赋权策略的科学性直接决定评估结果的可靠性。当前主流的赋权方法可分为主观赋权、客观赋权及主客观综合赋权三类。层次分析法(AHP)与熵权法分别代表了主观赋权法与客观赋权法的典型特征,而两者的耦合则能有效弥补单一方法的局限性。本文选择层次分析法和熵权法进行指标综合尺度评估,根据不同指标的重要性赋予其权重,将各项指标得分进行加权求和法,从而对风险水平进行综合评估。

(1)层次分析法

层次分析法由美国数学家、管理学家托马斯·萨阿蒂(ThomasL.Saaty)于20世纪70年代提出,用于决策分析和多准则决策的系统性方法。该方法是一种综合了定性和定量分析的综合方法,将复杂的问题分为多层次结构,并根据两两比较判定各指标重要性,帮助决策者确定各因素的权重并选择最优方案。具体步骤如下。

a. 建立层次结构

根据评级目标,设定重庆市内涝风险评估为目标层,设定城市内涝危险性、环境暴露度、承灾体脆弱性为准则层,各评价指标作为指标层。

b. 创建判断矩阵

以城市内涝风险性为目标层,对各指标重要性进行判别,得到判断矩阵。

c. 一致性检验

矩阵的单层次排序能否被认可,需要对矩阵进行一致性检验。矩阵一致性指标 λ_{CI} 可用最大特征根 λ_{max} 与矩阵阶数 n 的比值来衡量,并查找其对应的

随机一致性指标 λ_{CR} ,一致性检验公式如下:

$$\lambda_{CI} = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$
$$\lambda_{CR} = \frac{\lambda_{CI}}{\lambda_{RI}}$$

式中: λ_{RI} 的值可以通过查表得到,见表1。一般来说,当 λ_{CR} 的值小于0.1时,认为矩阵通过一致性检验,权重赋值合理,否则需要重新对判断矩阵进行调整,使其满足一致性检验。

表1 一致性指标

n	1	2	3	4	5
λ_{RI}	0	0	0.58	0.90	1.12

d. 确定层次权重

通过单层次排序和总层次排序,确定各指标权重。

(2)熵权法

熵权法是一种将熵与信息联系起来,通过数据本身的离散程度确定各指标的权重,其核心思想是:指标数据越离散,权重越高。计算步骤如下:

a. 构造判断矩阵

假设研究范围内的像素数为 m ,研究数为 n ,其判断矩阵为:

$$R(R_{ij})_{i \times j} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$$

式中: R_{ij} 为第 i 个评价指标在第 j 个单元内的数值。

b. 按照信息熵理论,构建熵值。

$$H_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^m f_{ij} \ln f_{ij}$$
$$f_{ij} = \frac{R_{ij}}{\sum_{j=1}^n R_{ij}}$$

式中: H_i 为第 i 个指标的熵值。

c. 确定权重

$$w_i = \frac{1 - H_i}{n - \sum_{i=1}^n H_i}$$

式中: w_i 为第 i 个指标的熵权值。一个指标的熵值越大,其权重越小。

(3)综合权重

层次分析法通常会受到专家或者决策者的主观影响,包括指标的两两权重构建,得到的一般是较为主观的权重。熵权法基于各指标的独立性进行计算,一般比较客观,但容易依赖数据,忽略指标的实际意义,赋予不重要的指标高权重。综合层次分析法与熵权法,可减少单一方法的不足与影响,让指标在风险评估中更合理。

ω_i = (ω_i^{*}ω_i[']) / (Σ_{i=1}ⁿ ω_i^{*}ω_i['])

式中:ω_i为第*i*个指标的综合权重;ω_i^{*}为第*i*个指标通过层次分析法得到的权重;ω_i[']为第*i*个指标通过熵权法得到的权重。

2.2 指标选取

城市内涝风险因子受到多重影响,本文采用多元数据,按风险三要素进行评估指标选取。参考相应文献^[4-7],确定相应指标,并考虑其效应。正向效应指标会加剧洪水风险,负向效应指标则能缓解风险。

危险性:危险性代表自然灾害产生的危险程度,本文选用降雨强度、高程和坡度来表征城市内涝的危险性,降雨强度越高,城市排水压力越大,产生城市内涝的风险越高,高程越高,积水越容易排出,产生内涝的风险越低,坡度越缓,积水越不容易排出,发生内涝的可能性越低。

暴露度:孕灾环境的暴露度反映了研究区域的属性,土地利用类型反映研究区域的下垫面情况,下垫面直接影响研究区域的排水情况。人口密度越大,路网密度越大,代表研究区域的城镇化程度越高,地表不透水率越高,发生城市内涝的可能性更大。

脆弱性:在城市内涝风险评估中,脆弱性层是衡量城市系统在面临内涝灾害时易受损害程度的关键维度。老龄人口密度代表社会层面的脆弱性,老龄人口越多,应急疏散难度越大,经受内涝后受到的影响越大。人均GDP值越大,经受内涝灾害后,代表该地区经受内涝灾害的经济层面上的脆弱性更强。

风险评价指标见表2。

表2 风险评价指标

指标类型	指标	效应
危险性	高程	负向
	坡度	负向
	降雨强度	正向
暴露度	土地利用类型	正向
	人口密度	正向
	路网密度	正向
脆弱性	老龄人口	正向
	人均GDP	正向

2.3 指标提取

(1)危险性指标

芝加哥雨型是一种基于历史统计数据构成的合成降雨过程线方法,可灵活模拟实际降雨过程的时

间分布特征。重庆市沙坪坝区降雨强度公式如下:

q = (1 132(1 + 0.958lg P)) / (t + 5.408)^{0.595}

式中:q为重庆市沙坪坝区降雨强度,L/s·hm²;P为降雨设计重现期,a;t为降雨历时,min。

短时强降雨是指短时间内出现的高强度降雨事件,突发性强,雨势猛,对城市管网排水要求高,极易造成灾害。因此,本次设计降雨模拟历时2 h,重现期为20 a的降雨过程。

沙坪坝区设计降雨见图2。

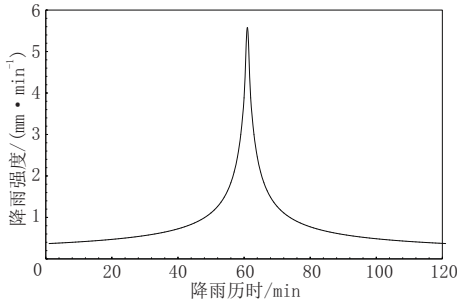


图2 沙坪坝区设计降雨

沙坪坝区高程分布在153~752 m之间,西部以歌乐山山脉为核心,为高海拔区域,同时为陡坡集中区,中部高程200~400 m,为平缓过渡带,东部沿嘉陵江沿岸为低洼区,坡度平缓(见图3、图4)。

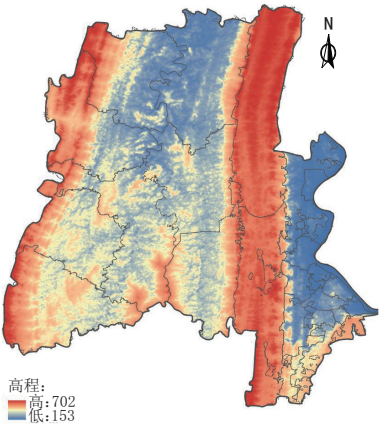


图3 研究区域高程分布图

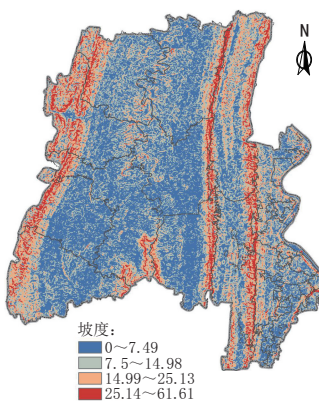


图4 研究区域坡度分布图

(2)暴露度指标

沙坪坝区以三峡广场商圈为核心的老城区(渝碕路、沙坪坝街道等),集中了大量居民、高校师生及流动人口,西部新城(大学城、西永片区)因产教融合区规划,学生群体占比高,人口密度较低。沙坪坝区路网密度呈现“东密西疏”特征,东部老城区路网密度约为西部的 1.5 倍,山区路网密度显著降低(见图 5 至图 7)。

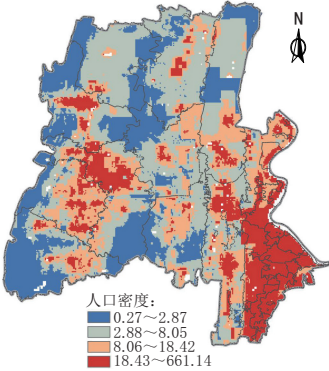


图5 研究区域人口密度分布图

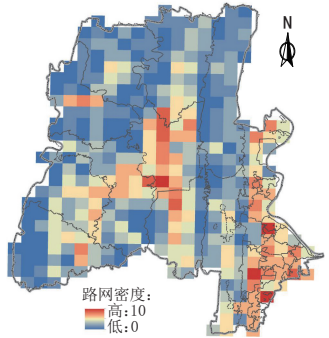


图6 研究区域路网密度分布图

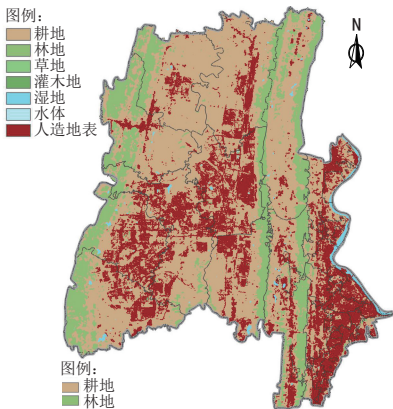


图7 研究区域土地利用类型分布图

(3)脆弱度指标

沙坪坝区老龄人口分布呈现“基数大、比例高、城乡差异显著”的特征,东部老城区(如渝碕路、沙坪坝街道等)因城镇化率高且集中了三峡广场商圈、综合医院及密集的社区养老服务设施,成为老龄人口高密度聚集区(见图 8、图 9)。

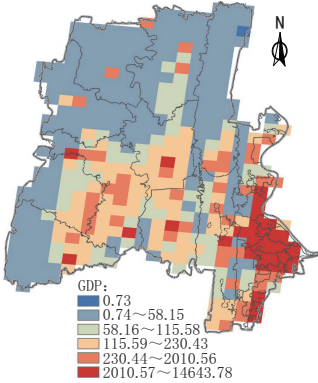


图8 研究区域GDP分布

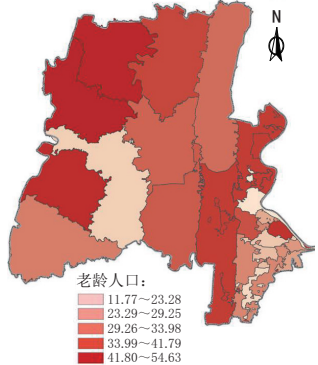


图9 研究区域老龄化人口分布

3 结果分析

3.1 指标权重

对于评价指标权重的计算,层次分析法确定评价指标之间的相对重要性,熵权法则考虑指标之间的相互关联性,2种方法联合应用,提高了评价结果的客观性和可信度。本研究按照以往洪水风险评估实践案例^[8-10],考虑不同指标间的比较度,在考虑重庆市自然地理特征的基础上,构建指标评价体系,具体步骤如下。

3.1.1 层次分析法

构建各级指标的判断矩阵,具体见表 3 至表 7,并计算各级指标的权重。

表 3 城市内涝风险整体判断性矩阵

指标	危险性	暴露度	脆弱性
危险性	1	2	3
暴露度	1/2	1	1/2
脆弱性	1/3	2	1

表 4 危险性判断矩阵

指标	高程	坡度	降雨强度
高程	1	1/2	1/3
坡度	2	1	1/2
降雨强度	3	2	1

表5 暴露度判断矩阵

指标	土地利用类型	人口密度	路网密度
土地利用类型	1	1/3	1/2
人口密度	3	1	1/3
路网密度	2	3	1

表6 脆弱性判断矩阵

指标	老龄人口	人均GDP
老龄人口	1	2
人均GDP	1/2	1

表7 研究区域指标主观权重

准则层	权重	指标层	权重	主观总权重
危险性	0.54	高程	0.16	0.09
		降雨强度	0.54	0.3
		坡度	0.3	0.16
暴露度	0.26	土地利用类型	0.16	0.04
		人口密度	0.30	0.08
		路网密度	0.54	0.14
危险性	0.2	老龄人口	0.67	0.13
		人均GDP	0.33	0.07

3.1.2 熵权法

熵权法可以考虑各个指标之间的随机性和相关性,无需主观赋权,具有较好的客观性与可信度。

研究区域各评价指标的客观权重见表8。

表8 准则层下各指标客观权重

准则层	指标层	权重
危险性	高程	0.23
	坡度	0.35
	降雨强度	0.42
暴露度	土地利用类型	0.26
	人口密度	0.30
	路网密度	0.44
危险性	老龄人口	0.62
	人均GDP	0.38

3.1.3 综合权重

层次分析法和熵权法各有优劣,综合权重法可优化指标权重。其融合二者,折中处理,既纳入主观判断,又依据数据客观赋权,精准平衡主客观因素,让指标权重更合理,使决策反映各方共识与妥协。计算结果见表9、表10。

由表9、表10可知,降雨强度是洪水风险的绝对主导因素,其高权重源于气候特征与数据离散度的双重驱动。重庆市属亚热带季风气候,降雨集中且强度大,易引发各类洪水;其他指标(坡度、人口密度等)通过地形调控、暴露度放大风险。

表9 准则层下各指标权重

准则层	指标层	主观权重	客观权重	总权重
危险性	高程	0.16	0.23	0.19
	坡度	0.3	0.35	0.32
	降雨强度	0.54	0.42	0.49
暴露度	土地利用类型	0.16	0.26	0.11
	人口密度	0.30	0.30	0.24
	路网密度	0.54	0.44	0.64
危险性	老龄人口	0.67	0.62	0.75
	人均GDP	0.33	0.38	0.25

表10 研究区域各指标综合权重

指标	主观权重	客观权重	综合权重
高程	0.09	0.11	0.12
坡度	0.16	0.10	0.13
降雨强度	0.3	0.32	0.32
土地利用类型	0.04	0.07	0.05
人口密度	0.08	0.16	0.11
路网密度	0.14	0.09	0.12
老龄人口	0.13	0.08	0.10
人均GDP	0.07	0.06	0.06

3.2 结果分析

3.2.1 指标权重分析

通过综合权重分析法可得,沙坪坝区产生内涝现象影响最严重的指标是降雨强度(综合权重0.32)、高程(综合权重0.12)、坡度(综合权重0.13)。重庆市属亚热带季风气候,夏季多短时强降雨,远超地表排水系统的负荷能力,且降雨常集中于主城区的山地迎风坡,缙云山、中梁山等地形抬升作用导致局地降水增强,形成“雨岛效应”。东部老城区平均海拔约250 m,西部中梁山脉主峰达698 m,形成天然汇水盆地。三峡广场商圈(海拔242 m)作为全区最低洼节点,汇集歌乐山南麓(坡度15°~25°)约38 km²集雨面积的径流。东部建成区平均坡度3°~5°,西部大学城片区坡度陡增至8°~12°,导致径流速度加快,形成“高速径流-低速排水”的结构性矛盾。主城区地表不透水率可达80%,雨水下渗率不足10%,导致降雨峰值流量提前,加重管网承载能力。降雨强度主导,地形条件叠加效应,下垫面硬化影响,三大因素协同作用,导致重庆市主城区内涝频发。

通过权重分析可知,暴露度中,路网密度(0.12)>人口密度(0.11)>土地利用类型(0.05),主城区交通设施完善,主要道路位于嘉陵江沿岸的丘陵地带,直接暴露于洪水淹没路径中,路网既是洪水直接冲击对象,更是灾害连锁反应的枢纽;人口密度虽较高,但核心居住区与洪水高风险区错位,实际暴露度相

对弱化;土地利用类型因高度城市化导致地表径流模式趋同,削弱其暴露度差异。在脆弱性层面,老龄人口(0.10)>人均GDP(0.06),主要源于这一群体的生理特性、资源获取能力与灾害应对较差,老龄人口因疏散迟缓、自救能力弱而成为洪水直接威胁对象,表明社会脆弱性对于洪水风险的放大效应更为显著。

3.2.2 内涝风险分析

利用综合评估结果,对研究区域的风险性、暴露度、脆弱性进行加权,得到重庆市沙坪坝区研究区域洪水风险分布图,并根据风险指数进行等级划分。沙坪坝区内涝风险最高的点位位于东部老城区,东部老城区地处低洼地带,商业、居住和公共服务设施高度集中,形成连片建成区,地表不透水能力增强,管网排水能力难以满足需求。东部地区人口密度大,老龄人口集中,导致发生内涝后应急救援难度增加,城市内涝风险进一步增大。较高风险区位于中部缓坡过渡带高程300~400 m,坡度5°~8°,虽人口密度较低,但存在多个天然洼地,易形成局部积水。西部新城部分区域、歌乐山山麓、中梁山等地区,内涝风险相对可控。沙坪坝区内涝风险示意图10。

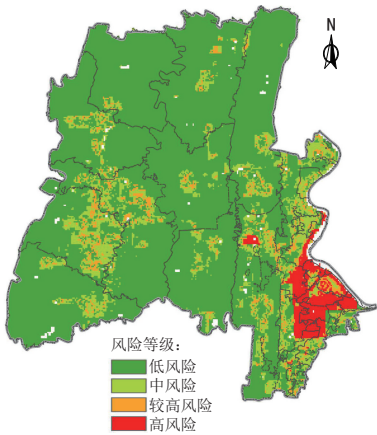


图 10 沙坪坝区内涝风险示意图

4 结 语

本研究以重庆市沙坪坝区为对象,构建了包含危险性、暴露度与脆弱性的内涝风险评估体系,通过

主客观赋权法量化指标权重,得出以下结论。

(1)高程(综合权重0.12)和坡度(0.13)通过控制径流汇聚与排泄效率,成为内涝危险性的基础因子;降雨强度(0.32)作为气候胁迫因子,直接决定风险等级上限。暴露度中,路网密度(0.12)权重最高,反映城市基础设施对径流阻断的敏感性;脆弱性方面,老龄人口密度(0.10)权重高于人均GDP(0.06),表明社会脆弱性对风险放大效应更显著。

(2)高风险区集中于东部老城区(如三峡广场商圈),受低洼地形、高密度人口与低效排水系统的三重叠加影响,成为内涝高发区。西部新城因坡度陡、人口密度低风险较低,但需关注局部低洼区域的汇流加速效应。

(3)针对沙坪坝区进行内涝整治时,优先对东部老城区实施管网升级与海绵城市改造,加强西部新城开发中的地形适应性规划;未来可结合动态水文模型与实时监测数据,提升评估时效性与精准性。

参考文献:

[1] 程晓陶,刘昌军,李昌志,等.变化环境下洪涝风险演变特征与城市韧性提升策略[J].水利学报,2022,53(7):757-768.

[2] de Koning K, Filatova T, Need A, et al. Avoiding or mitigating flooding: Bottom-up drivers of urban resilience to climate change in the USA[J]. Global Environmental Change, 2019(59): 101981.

[3] 朱文轩,梁志勇,黎树式,等.北部湾南流江洪灾时空变化特征及其风险评估[J].水电能源科学,2023,41(6):78-81.

[4] 朱文轩,梁志勇,黎树式,等.北部湾南流江洪灾时空变化特征及其风险评估[J].水电能源科学,2023,41(6):78-81;86.

[5] 张锋.基于水文水力耦合模型的山洪数字预演方法研究[D].武汉:华中科技大学,2022.

[6] KRON W. Flood Risk = Hazard · Values · Vulnerability[J]. Water International, 2005, 30(1): 58-68.

[7] 冯刚.珠江流域浔江防洪保护区洪水风险与保险研究[D].西安:西安理工大学,2024.

[8] 刘媛媛,王绍强,王小博,等.基于AHP—熵权法的孟印地区洪水灾害风险评估[J].地理研究,2020,39(8):1892-1906.

[9] 苑希民,苏智,王丽娜,等.基于AHP—CRITIC—灰色关联分析的城市洪水风险评估研究[J].水资源与水工程学报,2025,36(1):11-17.

[10] 郭鑫宇,杨敬畏,厉智成,等.主客观组合权重-TOPSIS-k-means++法内涝风险评估[J].中国给水排水,2024,40(5):130-136.