

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.07.019

基于秩和比法的内涝风险评估方法研究

李桂章¹, 黄学平², 李思源², 熊匡¹

(1. 江西省人居环境研究院, 江西 南昌 330006; 2. 江西水利电力大学 土木与建筑工程学院, 江西 南昌 330029)

摘要: 为提升城市内涝防治的精准决策水平,针对传统风险评估方法在分级阈值界定上缺乏统计理论依据的问题,提出了一种基于秩和比法的内涝风险评估新方法。首先,构建一、二维耦合雨洪模型,模拟内涝过程;然后,基于“危险性-脆弱性”框架构建评估指标体系,并结合层次分析法与熵权法进行主客观综合赋权;最后,引入秩和比法,其核心在于通过概率单位(Probit)将评价结果与标准正态分布相关联,实现基于统计理论的客观、可比的风险分级,克服了传统方法阈值主观、结果不可比的局限。以南昌市红谷滩区为研究案例,结果表明,该方法能有效识别区域风险格局,评估结果中极高、高、中、低、极低风险区面积占比分别为4.09%、9.16%、21.68%、37.21%和27.86%;该方法提供的精确风险排序与具有统计显著性的分级结果,可为防洪排涝工程“分期分步”的优先级排序决策提供直接、量化的科学依据。

关键词: 城市内涝防治; 雨洪模型; 秩和比法; 风险评估

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)07-0130-07

Research on Urban Waterlogging Risk Assessment Based on Rank-sum Ratio Method

LI Guizhang¹, HUANG Xueping², LI Siyuan², XIONG Kuang¹

(1. Jiangxi Institute of Human Settlements, Nanchang 330006, China; 2. School of Civil and Architectural Engineering, Jiangxi University of Water Resources and Electric Power, Nanchang 330029, China)

Abstract: To enhance the precision of decision-making in urban waterlogging prevention and control, and to address the lack of statistical theoretical basis for threshold definition in traditional risk assessment methods, this study proposed a novel waterlogging risk assessment method based on the rank-sum ratio (RSR) method. Firstly, a coupled 1D-2D rainfall-runoff model was constructed to simulate the waterlogging process. Next, an evaluation indicator system was established based on the “hazard-vulnerability” framework, and a combination of the analytic hierarchy process (AHP) and entropy weight method was applied to achieve integrated subjective and objective weighting. Finally, the RSR method was introduced, whose core lay in associating evaluation results with the standard normal distribution through the probability unit (Probit), thereby achieving objective and comparable risk classification based on statistical theory. This approach overcame the limitations of traditional methods, such as subjective thresholds and incomparable results. A case study conducted in the Honggutan District of Nanchang City demonstrated that the proposed method could effectively identify regional risk patterns. The assessment results showed that the proportions of extremely high, high, medium, low, and extremely low-risk areas

were 4.09%, 9.16%, 21.68%, 37.21%, and 27.86%, respectively. Notably, the precise risk ranking and statistically significant classification results provided by this method offered direct and quantitative scientific support for prioritizing “phased and step-by-step” decision-making in flood control and drainage projects.

Keywords: urban waterlogging prevention; stormwater dynamic simulation modeling; rank-sum ratio method; risk assessment

在全球气候变化与城市化进程加速的双重影响下,城市内涝问题日益严峻。内涝灾害不仅直接威胁人民群众的生命安全,造成人员伤亡,还会引发交通瘫痪、财产损失等次生灾害。因此,开展城市内涝风险评估,对于城市防洪治涝工程的规划、设计与管理至关重要,是城市防灾减灾工作的关键环节。目前,常用的风险区划方法有相等间隔法、分位数法、均值-标准差法、自然间断点法、隶属度函数法等^[1]。其中,相等间隔法、分位数法等原理简单,但阈值设定主观随意;自然间断点法虽能优化组内差异,但其结果严重依赖特定数据集的分布,普适性与统计基础较弱;隶属度函数法则依赖专家经验,客观性不足。近年来,学者们致力于引入更复杂的模型以提升精度,例如,许红师^[2]提出的改进熵权-聚类分析算法为内涝风险区划提供了新途径;赵佳慧等人^[3]提出的基于改进熵权-TOPSIS-灰色关联方法,通过灰色关联度改进欧氏距离来计算各区域与理想状态的接近程度,从而提高了评估结果的合理性。这些方法丰富了内涝风险等级划分的理论基础。但是,上述方法存在共同的局限,即其分级过程均未嵌入概率统计原理,无法实现“按概率进行精确分级”。换言之,其分级阈值缺乏严格的统计推断支撑,导致分级结果的稳健性和可比性存在疑问。然而,政府防涝减灾的投资与建设往往需要分期、分步推进,这就要求风险评估方法不仅能区分风险高低,更能提供一套精确、客观的优先级排序依据,以科学指导不同阶段改造计划的资源分配。

为解决上述问题,本研究引入基于秩和比法(RSR)的内涝风险等级评估方法^[4]。该方法通过编秩融合多指标信息,其核心优势在于:第一,其能输出连续的评价对象排序值(加权秩和比,即WRSR),该值本身即为一个可直接比较的优先级指标;第二,通过将WRSR值的分布与标准正态分布相联系

(基于概率单位Probit),可实现理论上的概率分级,使得分档结果具有统计意义,而非简单的人为切割。因此,本研究方法不仅克服了传统方法阈值界定模糊、缺乏统计基础的问题,其输出的精确排序与概率分档结果,能够直接服务于工程决策——决策者可依据WRSR值的高低及所属概率等级,清晰界定需要优先治理(如高风险档)、中期跟进(中风险档)和远期完善(低风险档)的区域,从而为“分期分步”的投资计划提供量化、透明的决策支持。本研究以南昌市某排涝区为分析案例,验证该方法的有效性与实用性。

1 数据与方法

1.1 研究区域概况

南昌市地处江西省中北部,气候湿润温和,年降水量丰富,年均降水量约为1 611.8 mm,其中73%的降水量集中分布在3月—8月,5月—7月是暴雨高发期^[5]。红谷滩区作为南昌市的新区,随着城市化进程的推进,建筑密度和人口密度不断增大,大量绿地和水域被侵占,不透水面积显著增加,城市排水系统面临巨大压力,内涝灾害频发。

1.2 数据来源

选取红谷滩中心城区作为研究对象,如图1所示。区域内的排水体制均为分流制,汇流面积为9.64 km²;设有3座排涝站,总抽水能力为38 m³/s;管网总长约为96 km,平均管网密度为9.96 km/km²。研究区域共划分为两个排涝分区,西侧片区涝水由3座排涝站共同提升至乌沙河,东侧片区涝水通过重力流直排赣江。区域数据主要包括地形、土地利用、排水管网、排涝设施以及常住人口数据。其中,地形数据来自1:1 000野外高精度测量地形图,土地利用数据来源于区域国土空间规划,排水管网数据来自当地雨水管网普查资料,排涝设施数据由当地水利主管部门提供,常住人口数据来源于2020年人口普查数据。

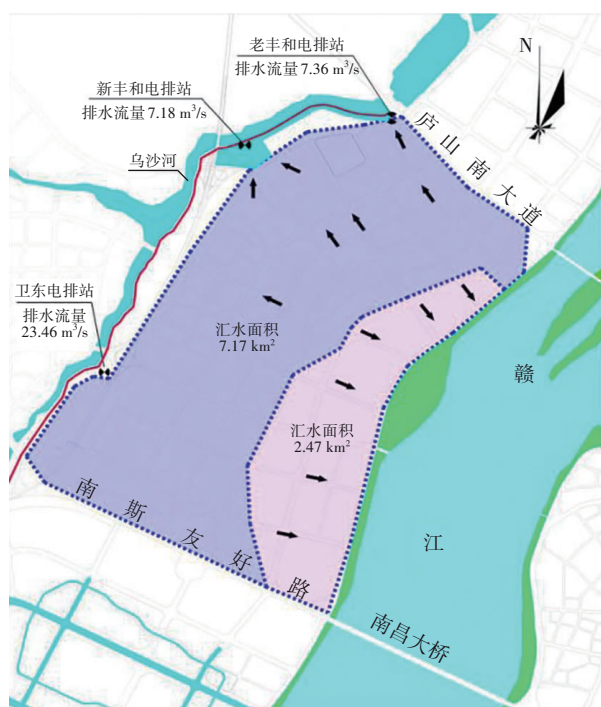


图1 研究区域

Fig.1 Schematic diagram of study area

1.3 研究方法

1.3.1 整体框架

本研究采用情景模拟与指标体系相结合的方法,首先基于“危险性-脆弱性”灾害系统理论框架确定评估指标(其中表征内涝程度的相关指标通过一、二维耦合水文水动力模型模拟结果量化),然后运用层次分析法和熵权法相结合的方式确定指标权重,最后采用秩和比法评估内涝风险。研究框架如图2所示。

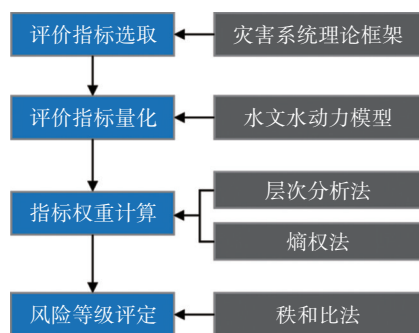


图2 基于秩和比法的内涝风险评估框架

Fig.2 Waterlogging risk assessment framework based on rank-sum ratio method

1.3.2 秩和比法

秩和比法作为整合传统参数统计和现代非参

数统计特征的综合统计分析工具,对数据分布形态无严格要求,适用于处理不满足传统统计假设的复杂数据^[4]。该方法的核心在于对多个评价指标的排序信息进行整合,根据各评价指标的权重,计算出一个0~1区间的标准化综合评价值——WRSR值,并对研究对象进行排序及分档^[6]。凭借高效性和通用性的优势,秩和比法能清晰展现评价对象在多个指标上的相对排列顺序,现已成为跨学科综合评价的重要方法。

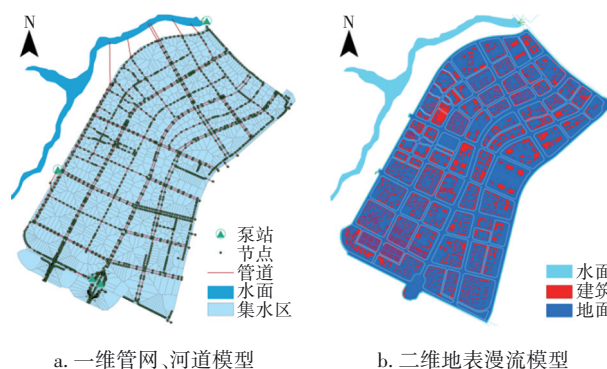
1.3.3 评价指标权重确定

本研究通过结合主观赋权方法(层次分析法)和客观赋权方法(熵权法)得到组合权重,以确保综合评估模型评价指标权重的合理性^[2-3]。

2 结果与分析

2.1 一、二维耦合模型的构建与率定

本研究综合运用MIKE系列水动力模型对红谷滩区进行水文模拟分析,如图3所示。基于MIKE URBAN构建一维管网模型,模拟排水管网的运行状况;基于MIKE 11构建一维河道模型,模拟电排站前池水位变化;基于MIKE 21建立二维地表漫流模型,模拟地表径流过程;最后通过MIKE FLOOD平台实现一维、二维模型的耦合,提升城市内涝模拟的空间分辨率和计算可靠性。在一维管网模型中,将同一条管路上没有支管且断面尺寸相同的相邻管道进行了合理的合并,合并后管网检查井平均间距约为90 m,共包括1 412个检查井、12个排水口、1 398条雨水管道。本研究不关注调蓄水面内部的水流状态,因此调蓄水面采用一维河道模型进行了合理概化,概化后的模型确保了水面面积与实际水面面积一致。二维地表漫流模型的DEM网格精度取5 m×5 m。



a. 一维管网、河道模型

b. 二维地表漫流模型

图3 研究区域的一、二维耦合模型

Fig.3 1D-2D coupled model of study area

模型选取南昌市 2024 年 4 月 2 日的典型降雨事件作为验证案例,此次降雨历时 508 min,累积降雨量约为 195.6 mm。由于城市内涝水位监测成本高、覆盖范围有限,研究区域内仅有 4 个内涝点能提供与模拟情景相匹配的可靠、连续的实测积水数据。将模拟得到的研究区域积水位置和积水深度数据与实测数据进行对比,结果如表 1 所示。可知,4 个内涝积水点的模拟水深与实测值之间的相对误差在-12.50%~6.06%之间,表明模型具有较高的预测精度,可用于研究区域的内涝风险评估。

表 1 内涝点模拟与实测最大积水深度对比

Tab.1 Comparison between simulated and measured maximum ponding depths at waterlogging points

内涝点	模拟最大积水深度/m	实测最大积水深度/m	相对误差/%
丰和大道与春晖路交叉口	0.21	0.23	-8.69
凤凰大道与飞虹路交叉口	0.27	0.30	-10.00
雅苑路与金融大街交叉口	0.28	0.32	-12.50
芳华路与金融大街交叉口	0.35	0.33	6.06

2.2 评价指标体系构建

基于“危险性-脆弱性”框架,根据灾害系统理论,遵循科学性、系统性、可量化性等原则,设计了目标层、准则层、指标层的三级结构,准则层综合考量致灾因子与孕灾环境两个维度,指标层共选取 4 个指标构建了内涝灾害风险评价指标体系,如图 4 所示。具体如下:①致灾因子维度表征内涝的物理强度,考虑到“积水深度”直接决定了内涝可能造成的损失与安全威胁,“积水时间”综合反映了区域的排水能力和退水速度,它们是评价内涝严重程度最直观、最有效的综合性指标,因此选用“积水深度”和“积水时间”作为致灾因子指标,量化数据直接来源于水文水动力模型的输出结果。②孕灾环境维度表征承灾体的暴露程度和脆弱性,考虑到“人口密度”用于量化暴露在风险中的人口数量,直接关联影响范围,“用地属性”用于差异化表征风险要素的空间分布,是评估生命财产风险程度的关键,因此选用“人口密度”和“用地属性”作为孕灾环境指标,量化数据来源于社会经济数据。这 4 个指标分别从物理强度和社会经济影响两个层面覆盖了内涝风险的核心要素,共同构成了一个精简但完整的内涝风险评估框架。在保证信息全面的前提下,力

求指标精简,以符合秩和比法对指标数量适中的要求,使用综合性结果指标,替代了大量相关的、可能存在共线性的原始参数。而且这些指标与管理部门关注的灾害后果直接挂钩,实用性强。另外,这 4 个评价指标均属于低优指标,即指标值越小,对应的内涝风险越低。

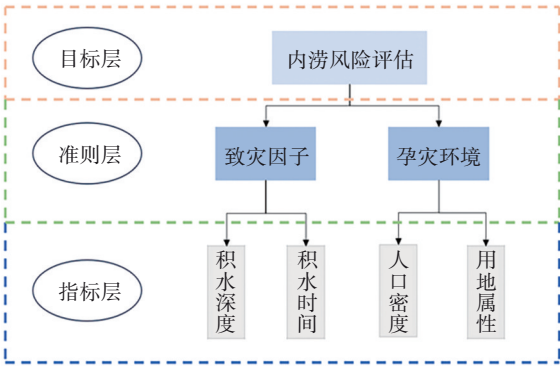


图 4 红谷滩区内涝风险评估体系

Fig.4 Waterlogging risk assessment system for Honggutan District

本案例组合权重系数取 0.6,结合层次分析法和熵权法得到各评价指标的组合权重,具体如表 2 所示。

表 2 红谷滩区内涝风险评估指标权重

Tab.2 Risk assessment indicator weights for Honggutan District

项目	评价指标			
	积水深度	积水时间	人口密度	用地属性
层次分析法	0.399	0.274	0.194	0.133
熵权法	0.257	0.256	0.283	0.204
组合权重	0.313	0.263	0.248	0.176

2.3 区域内涝模拟及评价指标数据获取

基于南昌市暴雨强度公式推求雨峰系数为 0.35、重现期为 50 年、历时 2 h 的芝加哥雨型作为本次内涝风险评估的设计暴雨雨型。以设计雨型作为模型的输入,得到研究区域在该降雨情景下的积水分布。通过 ArcGIS 软件对模拟结果进行可视化处理,生成积水深度分布图和积水时间分布图,直观展示内涝灾害的空间分布特征,为后续内涝风险评估提供基础数据。

在红谷滩区内涝风险评估中,对于 4 个评价指标,利用 GIS 空间分析技术得到每个栅格的指标值。根据指标特性,对于积水深度和积水时间,在本案例中,积水深度(d)分为无内涝($d < 0.15$ m)、轻度内

涝($0.15\text{ m} \leq d < 0.30\text{ m}$)、中度内涝($0.30\text{ m} \leq d < 0.50\text{ m}$)和重度内涝($d \geq 0.50\text{ m}$)四个等级,空间分布情况如图 5(a)所示。积水时间(t)参考《室外排水设计标准》(GB 50014—2021),结合红谷滩区的实际情况,划分为轻度积水($0.5\text{ h} \leq t < 1\text{ h}$)、中度积水($1\text{ h} \leq t < 2\text{ h}$)和重度积水($t \geq 2\text{ h}$)三个等级,空间分布情况如图 5(b)所示。

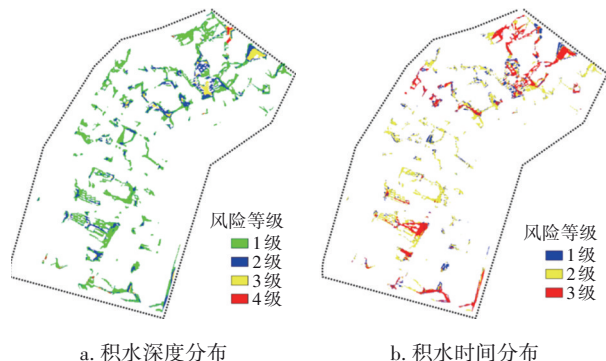


图 5 研究区域积水深度及积水时间分布

Fig.5 Distribution of waterlogging depth and waterlogging duration in study area

不同研究区域内人口密度的指标值域范围存在显著差异,为了准确反映特定研究区域的实际特征,结合区域的数据特性,采用自然间断点分级法进行风险等级划分,划分情况如图 6 所示。

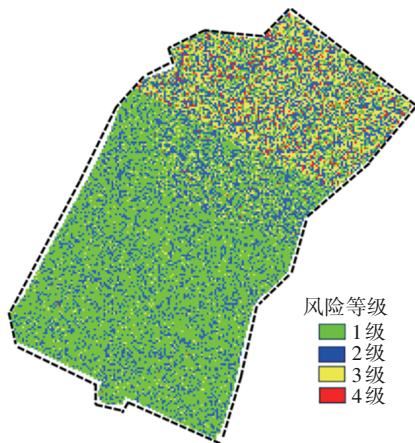


图 6 研究区域人口密度分布

Fig.6 Distribution of population density in study area

为了直观地表示研究区域内每个网格单元的用地属性,依据相关研究经验和实际需求将用地属性划分为人行道、车行道和地块。在 ArcGIS 的网格属性表中添加用地属性字段,并赋值为 1、2、3,分别对应地块、人行道和车行道,得到用地属性的矢量图层。

基于新构建的评价指标体系整理原始数据,将每个网格对应的四个评价指标数值进行整合,具体如表 3 所示。

表 3 评价指标取值(部分)

Tab.3 Partial values of evaluation indicators

网格名称	积水深度/ cm	积水时 间/s	人口密度/ (万人/km ²)	用地属性
R1280C966	37.64	27 088.25	0.4	3
R1280C967	43.95	27 300.75	0.8	3
R1280C968	48.51	27 454.07	0.8	3
R1280C969	47.91	27 436.75	1.2	3
R1281C984	18.44	25 701.83	0.4	2
R1281C985	18.81	25 741.83	0.4	2
R1281C986	19.18	25 787.83	0.4	2
R1281C987	19.52	25 836.83	0.8	2
R1281C1037	3.47	20 741.83	0.4	1
R1281C1039	4.41	20 789.33	0.4	1
R1281C1041	4.38	20 846.00	0.4	1
R1281C1043	4.26	20 895.83	0.8	1

2.4 基于秩和比法的内涝风险评估

依据表 3 中的 4 项指标取值及表 2 中的组合权重,利用秩和比法对研究区域各网格进行编秩,并计算加权秩和比。

将所有网格各指标的加权秩和比从小到大排序,计算频数、累计频数、平均秩次及 WRSR 值所对应的累计频率 P ,查找《百分数与概率单位对应表》得到对应的概率单位 Probit。通过 Matlab 计算求得回归方程: $WRSR = -0.450\ 667 + 0.190\ 134 \times \text{Probit}$,相关系数 $R^2 = 0.981$,回归方程检验结果统计量 $F = 29\ 190\ 706.13$, T 检验结果 $P < 0.001$,表明回归方程通过了检验。

为了便于主管部门精准决策,根据 WRSR 将所有网格分为极低风险区、低风险区、中风险区、高风险区、极高风险区 5 档,分档结果如表 4 所示。

表 4 基于 WRSR 的内涝风险分区

Tab.4 Waterlogging risk zoning based on WRSR

项目	Probit 值	WRSR 值
极低风险区	>6.58	>0.8
低风险区	$(5.53, 6.58]$	$(0.6, 0.8]$
中风险区	$(4.47, 5.53]$	$(0.4, 0.6]$
高风险区	$(3.42, 4.47]$	$(0.2, 0.4]$
极高风险区	≤ 3.42	≤ 0.2

在 ArcGIS 中创建与模型网格匹配的渔网矢量图层,通过 Spatial Join 工具将网格风险等级(关联字段为网格名称索引)与矢量图层属性进行关联,实现内涝风险空间分布可视化,具体如图 7 所示。该过程通过唯一编码规则确保数据空间对齐,精准呈现风险等级的空间分布特征。

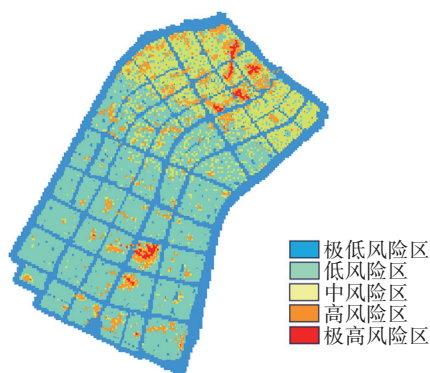


图7 红谷滩区网格内涝风险等级空间分布

Fig.7 Spatial distribution of grid-based waterlogging risk levels for Honggutun District

由图 7 可知,不同内涝风险等级的空间分布具有显著差异,极高风险区主要集中在丰和北大道与庐山南大道交口、安井小区、沙井路沿线、商城世纪村及万达星城等区域;高风险区分布在碟子湖大道与庐山南大道交口、红谷世纪花园、银燕名苑等区域;中风险区主要位于研究区域北部,具体包括世茂广场、东华锦城、庐南写字楼等区域;低风险区主要分布在研究区域南部;极低风险区则以研究区域内的道路为主要分布载体。

为进一步量化各风险等级的空间占比特征,对不同内涝风险等级的面积占比进行提取,其中,低风险区面积占比最大,达到 37.21%,其次为极低风险区、中风险区和高风险区,分别占 27.86%、21.68% 和 9.16%,极高风险区面积占比最小,为 4.09%。

具体来看,极低风险区主要分布于地势相对较高且坡度设置合理的区域,加之排水口布局科学,利于雨水自然排泄,因此内涝风险较低;而极高风险区多集中在地势低洼、建筑密集的广场等,这些区域的下垫面以硬化地面为主,再加上地形高程较低、管网排水能力不足,导致雨水既难以快速渗透,又无法通过排水系统及时排出,最终形成内涝高发的极高风险区。

2.5 秩和比法与自然间断点法的比较

为了验证秩和比法的优越性,采用传统方法(以自然间断点法为例)对研究区域进行内涝风险等级的划分,发现自然间断点法将内涝风险区域大致按面积等比例划分为 5 个等级,各等级面积占比均在 20% 左右,这种机械的切割方式导致划分的结果指导性不强。这一分布特征一方面缘于研究区域内涝风险值序列较为连续、无明显离散值的数据特点;另一方面则与自然间断点法自身的原理有关,该方法属于描述性统计范畴,其算法旨在实现组内差异最小化与组间差异最大化,并不具备统计推断基础。

相比之下,秩和比法不仅能够给出评价对象的精确排序,更借助概率单位(Probit)这一统计工具,将 WRSR 值的分布与标准正态分布相关联,从而实现了基于概率理论的分级(以累积频率为依据设定分级阈值),这是仅能提供离散等级标签的自然间断点法无法实现的。该方法的评估结果中极高风险与极低风险区域占比较小,中间三个等级占据主导。这一分布形态相较于简单的依等距、等分位数分级的做法,更具有科学性与合理性,也更符合实际情况,有助于主管部门准确把握内涝风险等级的分布结构。

3 结论与建议

① 针对城市内涝风险评估中风险分级阈值模糊的难题,提出并验证了一种基于秩和比法的评估方法。对南昌市红谷滩区的案例研究表明,该方法能够有效整合致灾因子与承灾体信息,提供兼具精确排序与统计显著性的风险分级结果,为区域防洪排涝的精准治理与分期投资提供了量化决策依据。

② 基于秩和比法的内涝风险评估方法具有较强的适用性,尤其适用于像红谷滩区这类具备较完善基础地理信息与水文数据,且管理部门急需对风险区域进行优先级排序以指导“分期分步”治理的城市建成区。相较于自然间断点法等传统方法,秩和比法基于概率理论的分级结果更具统计稳健性和跨区域可比性,其输出的连续秩和比值可直接服务于工程优先级判定。

③ 此方法也存在一定的局限性。首先,方法的准确性高度依赖于前端水文水动力模型模拟的

精度以及基础数据(如高精度地形、管网数据)的质量;其次,风险评估指标体系虽力求精简,但指标权重(如主客观综合赋权)的确定仍包含一定主观判断;此外,当前的评估属于静态风险评估,基于单一设计降雨情景,未能体现气候变化与城市发展下的风险动态演变。

④ 展望未来,建议可从以下几个方面进行深化研究:推动动态风险评估,耦合未来降雨模式与土地利用变化情景,评估风险时空演变趋势;开展多情景分析,模拟不同降雨重现期与排水系统改造方案下的风险响应,服务于方案比选与效益评估;探索更广泛的推广应用,可将本框架适配于其他具有不同气候与下垫面特征的城市,并尝试与智慧水务管理平台集成,实现风险评估的业务化运行。

参考文献:

- [1] 黄国如,罗海婉,卢鑫祥,等. 城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 1-6, 17.
HUANG G R, LUO H W, LU X X, et al. Study on risk analysis and zoning method of urban flood disaster [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 1-6, 17 (in Chinese).
- [2] 许红师. 沿海城市多维致灾洪涝风险分析与灾防决策模型研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
XU H S. Research on Urban Flooding Risk Caused by Multi-dimensional Hazards and Disaster Prevention Decision Model for Coastal Cities [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018 (in Chinese).
- [3] 赵佳慧,许红师,王田野,等. 基于改进熵权-TOPSIS-灰色关联方法的城市洪涝风险评估[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(10): 58-73.
ZHAO J H, XU H S, WANG T Y, et al. Improved entropy weight-TOPSIS-grey correlation method-based urban flood-waterlogging risk assessment [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(10): 58-73 (in Chinese).
- [4] 赵佳明. 基于GIS的南昌市中心城区养老设施多维度空间分布与优化研究[D]. 南昌: 江西师范大学, 2020.
ZHAO J M. Research on Multi-dimensional Spatial Distribution and Optimization of Nursing Facilities Based on GIS in Nanchang City Center [D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2020 (in Chinese).
- [5] 唐明,许文斌,尧俊辉,等. 基于城市内涝数值模拟的设计暴雨雨型研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(5): 97-105.
TANG M, XU W B, YAO J H, et al. Design rainstorm patterns based on numerical simulation of urban flooding [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(5): 97-105 (in Chinese).
- [6] 李子木,唐慧漪,刘晓佳. 利用熵权-非整秩次加权秩和比法的铁路规划评价[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2023, 28(5): 428-434.
LI Z M, TANG H Y, LIU X J. Study on railway planning evaluation based on entropy weight-non-integral rank weighted rank sum ratio model [J]. Journal of Jimei University (Natural Science), 2023, 28(5): 428-434 (in Chinese).

作者简介:李桂章(1979—),男,山东高密人,本科,高级工程师,主要从事城市供排水方面的规划咨询及研究工作。

E-mail:405377335@qq.com

收稿日期:2025-11-08

修回日期:2026-01-04

(编辑:刘贵春)

复苏河湖生态,建设人水和谐美丽中国