

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20241220001

# 考虑物理-社会-环境属性的极端降水风险研究\*

张健磊, 褚宸坤, 王 鹏

(江苏大学土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要:** 本研究旨在开展南京市玄武区栅格尺度极端降水风险评估,以弥补现有指标体系不足,提升风险精细化刻画水平。通过整合物理、社会、环境维度的指标,构建风险评估框架,以全面表征极端降水风险特征。研究采用熵权法计算指标权重,结合ArcGIS技术及K-means聚类算法,分析百年一遇极端降水情景下的风险空间分布特征,并挖掘不同风险等级区域的关键影响指标。结果表明:玄武区极端降水风险等级呈现显著空间异质性,整体呈现中部低风险,四周高风险的分布格局。关键指标影响机制呈现分级响应特征:低风险区主要受城乡、工矿、居民用地淹没面积,水域面积,土壤侵蚀程度,归一化植被指数控制;中风险区受城乡、工矿、居民用地淹没面积,林地淹没面积,紧急服务到达受灾区域的速度,土壤侵蚀程度,归一化植被指数影响;高风险区由城乡、工矿、居民用地淹没面积,林地淹没面积,归一化植被指数共同主导;极高风险区则受林地淹没面积,紧急服务到达受灾区域的速度,最大拼块占景观面积比例三重因素驱动。完善了极端降水风险评估指标体系,明确了风险驱动指标的分级响应规律,为玄武区制定差异化防洪策略提供科学依据,对提升区域洪涝灾害防御能力具有重要理论支撑。

**关键词:** 极端降水; 栅格尺度; 风险; 熵权法; 关键指标识别

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)04-0736-09

## Research on Extreme Precipitation Risk Considering Physical-social-environmental Attributes

ZHANG Jianlei, CHU Chenkun, WANG Peng

(Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** This study aims to conduct a grid-scale extreme precipitation risk assessment in Xuanwu District, Nanjing, so as to fill the gaps in existing indicator systems and improve the precision of risk characterization. By integrating physical, social, and environmental indicators, a risk assessment framework was constructed to comprehensively represent the characteristics of extreme precipitation risk. This study applied the entropy weight method to calculate indicator weights, combined with ArcGIS technology and the K-means clustering algorithm, to analyze the spatial distribution characteristics of risk under a 100-year extreme precipitation scenario and to identify key influencing indicators across different risk levels. The results showed that extreme precipitation risk levels in Xuanwu District exhibited significant spatial heterogeneity, with an overall distribution pattern of low risk in the central area and high risk in the surrounding areas. The influence mechanisms of key indicators showed

\* 收稿日期:2024-12-20;修回日期:2025-03-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51908249)、国家重点研发计划项目(2023YFC3205703)资助

作者简介:张健磊(1998—),男,硕士研究生。主要从事区域系统韧性与安全风险研究。E-mail: upesazjl@163.com

通信作者:王鹏(1986—),男,副教授,博士。主要从事区域系统韧性与安全方面的研究。E-mail: upeswp@ujs.edu.cn

tiered response characteristics: the low-risk areas were mainly controlled by the submerged areas of urban and rural, industrial and mining, and residential lands, water body area, soil erosion level, and normalized difference vegetation index (NDVI). The medium-risk areas were influenced by the submerged areas of urban and rural, industrial and mining, residential lands, the submerged areas of forest land, emergency service response time to disaster-affected areas, soil erosion level, and NDVI. The high-risk areas were jointly dominated by the submerged areas of urban and rural, industrial and mining, residential lands, the submerged areas of forest land, and NDVI. The extremely high-risk areas were driven by three factors—the submerged areas of forest land, emergency service response time to disaster-affected areas, and the proportion of the largest patch to the landscape area. This study improves the indicator system for extreme precipitation risk assessment and clarifies the tiered response patterns of risk-driving indicators, providing a scientific basis for developing differentiated flood control strategies in Xuanwu District while offering important theoretical support for improving regional flood disaster resilience.

**Keywords:** extreme precipitation; grid scale; risk; entropy weight method; key indicator identification

## 0 引言

近年来,气候变化导致极端降水事件及其引发的洪涝频率显著增加,阻碍了全球可持续发展进程<sup>[1]</sup>。特别是发展中国家,由于快速城市化破坏了原有的生态环境,使得极端降水事件频发,造成大量经济损失和人员伤亡<sup>[2]</sup>。例如,郑州市“7.20”暴雨事件,造成郑州市因灾死亡或失踪人口达380人,直接经济损失达409亿元<sup>[3]</sup>。因此,精细化刻画极端降水风险,不仅是实现风险有效管控的重要前提,更是推动洪水灾害科学防治、保障社会经济可持续发展的重要基石。

目前,国内外学者对洪涝灾害风险评估的方法主要包含基于指标体系的风险评估法<sup>[4]</sup>、基于遥感和GIS技术的风险评估法<sup>[5]</sup>和情景模拟法<sup>[6]</sup>。其中,基于指标体系的风险评估法被大多数学者使用,从不同的维度选取指标,构建洪涝风险评估框架。谢捷等<sup>[7]</sup>从敏感性、易损性、危险性三个维度综合评估暴雨风险。张静等<sup>[8]</sup>从致灾因子、孕灾环境、承灾体、防灾减灾能力四个维度评估暴雨洪涝灾害风险。但现有研究存在一定局限性。一方面,在各个维度下,诸多关键的指标要素并未得到充分考量,致使量化风险时仅能得出较为粗略的结果,难以精准反映实际状况。例如,在物理属性层面,现有研究多聚焦于建筑分布等指标,而对道路、学校、医院等基础设施指标鲜有研究。在社会层面,研究未能有效捕捉人和车辆脆弱性、紧急服务响应时效

性等微观特征。在环境层面,多考虑植被覆盖度、高程、海拔等指标,忽视了景观格局指数等指标的调节机制;另一方面,并非所有指标都会受到洪涝灾害的波及,部分指标与洪涝灾害之间缺乏直接关联性,例如人口密度、社会经济等统计指标,间接影响了城市洪涝风险,在一定程度上影响了研究的全面性与有效性。除此之外,现有研究多基于风险评估,为城市防灾减灾提供参考,而本研究在前人研究的基础上,进一步挖掘影响洪涝风险的关键指标。

在灾害风险的定量评估领域,目前主要存在两大类型的赋权方法:一类是依托主观评价构建的赋权模式,另一类则是以客观评价为基石的赋权途径。李彦萍等<sup>[9]</sup>基于层次分析法对洪涝灾害下的道路风险进行评估。刘海等<sup>[10]</sup>基于熵权法对郑州特大暴雨灾害风险及经济损失进行分析。由于熵权法相较于层次分析法更加客观公正。因此,本研究采用熵权法来评估栅格尺度极端降水风险。

本研究以南京市玄武区为研究区域,充分选取栅格尺度下具有代表性,能充分表征洪涝风险受灾特征的指标,构建物理—社会—环境维度下极端降水风险评估框架,基于熵权法精细化评估栅格尺度极端降水风险,并在此基础上利用SPSS软件中的K-means聚类算法提取风险关键指标。不仅为城市风险管理提供科学的量化和分析方法,也为城市在极端降水事件下的应急管理提供科学依据。

# 1 研究区域与方法

## 1.1 研究区域

南京市位于江苏省西南部,具有典型的亚热带季风气候特征,降水量丰富。玄武区位于南京市中部,坐拥玄武湖和紫金山,地势起伏较大,受季风气候影响,容易发生极端降水事件。因此,本研究选取江苏省南京市玄武区为研究区域<sup>[11]</sup>,如图1所示。

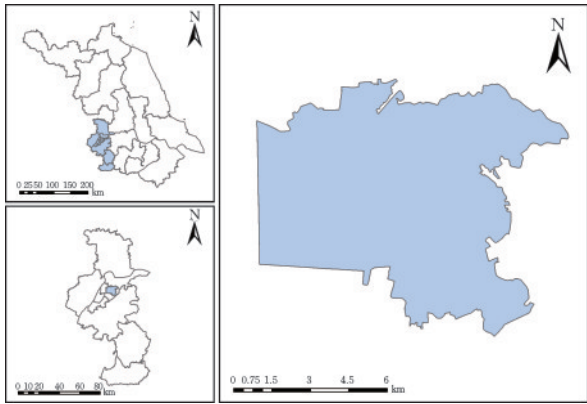


图1 研究区域  
Fig.1 Study area

## 1.2 极端降水模拟

本研究考虑南京市极端降雨事件,以100年为周期进行城市洪水模拟。极端降雨事件的设计基于《室外排水设计标准》(GB 50014-2021)<sup>[12]</sup>中的暴雨强度公式。按照下式对南京市百年一遇的降雨量进行计算,并借助芝加哥雨型生成器创建120 min的降雨量分布图,如图2所示。

$$i = \frac{64.3 + 53.8 \lg P}{(t + 32.9)^{1.011}} \quad (1)$$

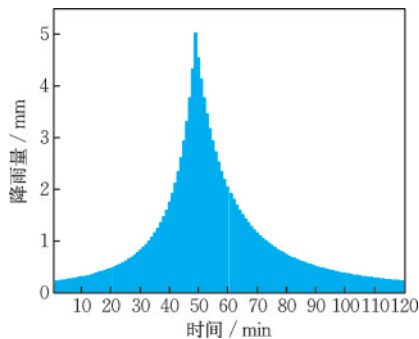


图2 120 min降雨量分布

Fig.2 Distribution of 120-minute rainfall amount

式中, $i$ 为降雨强度(mm/min); $t$ 为降雨历时(min); $P$ 为重现期(年)。

二维浅水方程是许多水动力模型的数学基础,在城市地区的洪水模拟中有广泛应用。本研究采用T. Carlotto等<sup>[13]</sup>开发的SW2D-GPU模型对城市极端降水下的淹没情况进行模拟,该模型不仅代码简短,而且模拟速度快,是顺序模型的34倍。因此本研究基于降水强度数据、建筑数据、高程数据、行政边界数据等基础数据,在CUDA C/C++环境下运行二维浅水方程模型,模拟南京市玄武区的淹没情况。

## 1.3 极端降水风险计算

### 1.3.1 极端降水风险指标选取

为了精细化刻画极端降水,本研究从物理、社会、环境三个维度出发,选取21个指标来评估极端降水风险,指标体系见表1。

表1 风险评估指标体系

Table 1 Risk assessment indicator system

维度	二级指标	三级指标	单位
物理属性	建筑群落	建筑淹没面积	m <sup>2</sup>
		建筑淹没深度	m
		建筑结构脆弱性	—
	基础设施	道路淹没长度	m
		道路淹没面积	m <sup>2</sup>
		医院淹没面积	m <sup>2</sup>
		学校淹没面积	m <sup>2</sup>
	土地利用	耕地淹没面积	m <sup>2</sup>
		城乡、工矿、居民用地淹没面积	m <sup>2</sup>
		林地淹没面积	m <sup>2</sup>
社会	社会群体	受灾人数	个
		车辆受灾情况	辆
	社会组织服务	紧急服务到达受灾区域的速度	km/h
环境	水体	水域面积	m <sup>2</sup>
	土壤	土壤侵蚀程度	—
	植被	最大拼块占景观面积比例(LPI)	—
		边缘密度(ED)	—
		拼块数量(NP)	—
		拼块密度(PD)	—
		景观形状指数(LSI)	—
		归一化植被指数(NDVI)	—

### 1.3.2 指标量化及权重计算

基于风险评估指标体系的构建,选取 $300 \times 300$  m的栅格尺度,使用ArcGIS10.8对选取的风险评估指标进行提取和量化。

由于指标数据的单位和量纲不同,为了有效反映极端降水下风险的大小,首先对各个指标进行标准化处理。标准化计算公式如下:

正向指标:

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - \min [x_j]}{\max [x_j] - \min [x_j]} \quad (2)$$

负向指标:

$$X_{ij} = \frac{\max [x_j] - x_{ij}}{\max [x_j] - \min [x_j]} \quad (3)$$

然后,使用熵权法<sup>[14]</sup>确定每个指标的权重。相较于层次分析法(AHP),熵权法能避免主观因素带来的影响,在根据指标变异程度确定权重的过程中具有客观性。熵权法计算过程如下:

首先,按照 $M$ 个极端降水致灾因子以及与之对应的 $N$ 个不同区域,构建极端降水事件评价指标矩阵:

$$R = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{M1} & \cdots & x_{MN} \end{pmatrix} \quad (4)$$

其次,计算第 $i$ 个区域的第 $j$ 个极端降水致灾因子的指标权重:

$$f_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (5)$$

然后,计算第 $j$ 个极端降水致灾因子的熵值:

$$H_j = -k \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \quad (6)$$

其中, $k=1/\ln m$ , $m$ 为评价区域的数量。

最后,计算各极端降水致灾因子的权重:

$$W_j = \frac{1 - H_j}{\sum_{i=1}^n (1 - H_j)} \quad (7)$$

其中, $W_j$ 表示第 $j$ 项指标的权重,且 $0 \leq W_j \leq 1$ 。

## 1.4 极端降水风险评估及关键指标识别

### 1.4.1 极端降水风险评估

基于各指标标准化的数值及熵权法权重,计算极端降水事件下每个栅格内的风险值。利用ArcGIS10.8中自然间断点分级法,将极端降水事件下的洪涝风险划分为低风险、中风险、高风险、极高风险四类风险等级,形成南京市玄武区不同的风险分布图。

### 1.4.2 极端降水风险关键指标识别

K-means聚类算法<sup>[15]</sup>隶属无监督学习范畴,核心用途在于把数据集精准拆解成 $K$ 个相异的簇类。它采取迭代手段运作,先是计算数据集中各样本与各聚类中心的距离,随即将样本归入距其最近的聚类中心所对应的簇里;紧接着,依据簇内样本情况持续刷新聚类中心方位。如此循环往复,直至聚类中心趋于稳定,不再出现显著变动,又或是达到预先设定好的迭代轮次上限,整个流程才宣告终止。

本研究基于风险计算及风险区划,计算每个栅格内指标风险占其对应栅格风险的比例,并按占比大小进行降序排列。选取风险占比大于5%的指标,采用K-means聚类算法,对所选取的指标进行聚类分析,进而识别出极端降水风险关键指标。

## 2 结果与讨论

### 2.1 极端降水模拟结果

本研究在二维浅水模型的基础上,模拟南京市玄武区极端降水,形成洪涝灾害淹没数据。极端降水事件下,玄武区最大淹没深度达5.00 m,淹没面积达447.83万 $m^2$ ,积水量达277.86万 $m^3$ 。120 min极端降水模拟结果如图3所示。

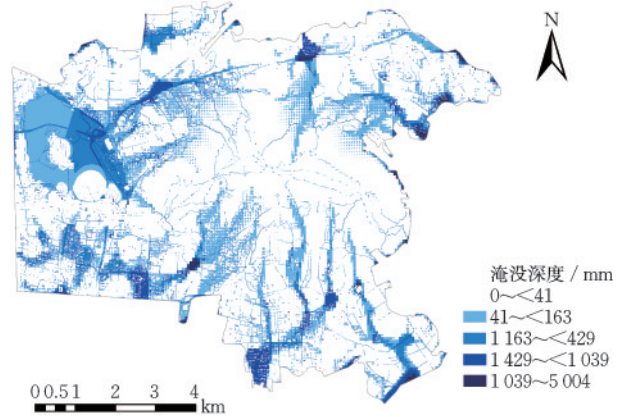


图3 南京市玄武区百年一遇极端降水模拟结果

Fig.3 Simulation results of 100-year extreme precipitation in Xuanwu District, Nanjing

### 2.2 风险指标量化及风险计算

#### 2.2.1 风险指标量化

本研究基于ArcGIS10.8将南京市玄武区划分为733个栅格,并量化栅格尺度极端降水风险指标,形成可视化空间分布图,如图4所示。

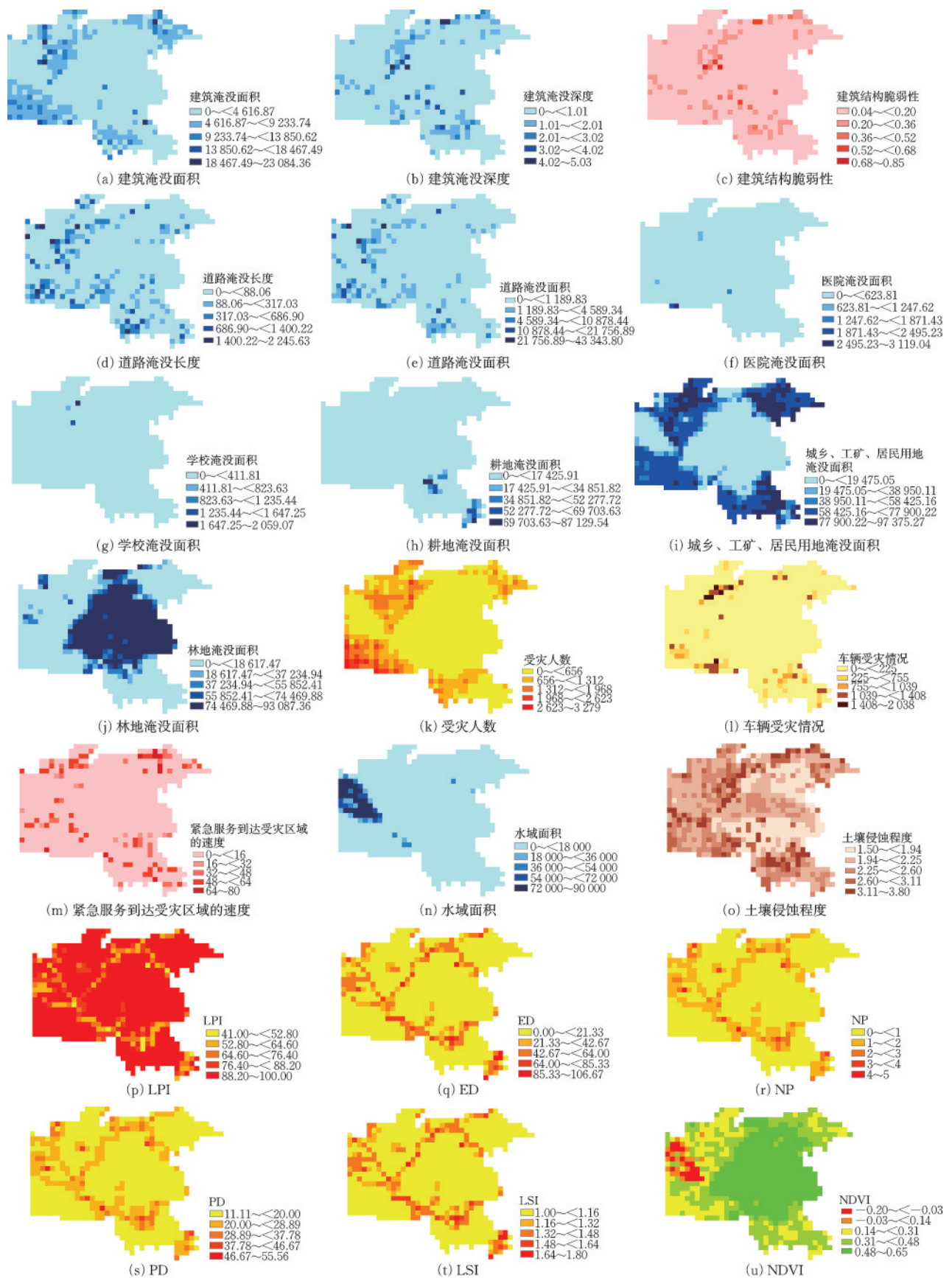


图4 各指标空间分布

Fig.4 Spatial distribution maps of different indicators

### 2.2.2 风险计算

本研究对风险指标进行标准化处理,基于熵权法,分别计算每个指标的熵值和权重,具体见表2。其中,熵值反映数据的变异程度,熵值越小,数据的变异程度越大,指标的信息量越大。权重越高的指标,在风险综合评估体系中越重要。林地淹没面积、紧急服务到达受灾区域的速度、学校淹没面积、NDVI、医院淹没面积等指标熵权较高,是衡量栅格尺度极端降水风险的重要指标。

表2 风险评估指标熵值及权重

Table 2 Entropy values and weights of risk assessment indicators

指标	熵值	权重
建筑淹没面积	0.997 1	0.004 08
建筑淹没深度	0.997 8	0.003 07
建筑结构脆弱性	0.998 5	0.002 17
道路淹没长度	0.998 7	0.001 87
道路淹没面积	0.999 4	0.000 79
医院淹没面积	0.999 6	0.000 51
学校淹没面积	0.999 7	0.000 43
耕地淹没面积	0.998 9	0.001 62
城乡、工矿、居民用地淹没面积	0.970 3	0.042 18
林地淹没面积	0.956 3	0.062 00
受灾人数	0.995 3	0.006 69
车辆受灾情况	0.997 6	0.003 46
紧急服务到达受灾区域的速度	0.690 4	0.439 77
水域面积	0.993 0	0.009 93
土壤侵蚀程度	0.990 3	0.013 78
最大拼块占景观面积比例(LPI)	0.766 7	0.331 34
边缘密度(ED)	0.994 9	0.007 26
拼块数量(NP)	0.997 2	0.003 92
拼块密度(PD)	0.997 2	0.003 92
景观形状指数(LSI)	0.994 9	0.007 26
归一化植被指数(NDVI)	0.962 1	0.053 90

## 2.3 极端降水风险评估及风险关键指标提取

### 2.3.1 极端降水风险评估

本研究基于标准化的指标数据和权重,计算栅格尺度极端降水风险。风险值越大表示玄武区的极端降水风险越大,风险值越小表示玄武区的极端降水风险越小。基于 ArcGIS10.8 中自然间断点分级法,将风险划分为低风险(0.10—0.19)、中风险(0.19—0.32)、高风险(0.32—0.49)、极高风险(0.49—0.75)四类等级,形成相对应的风险分布图,如图5所示。

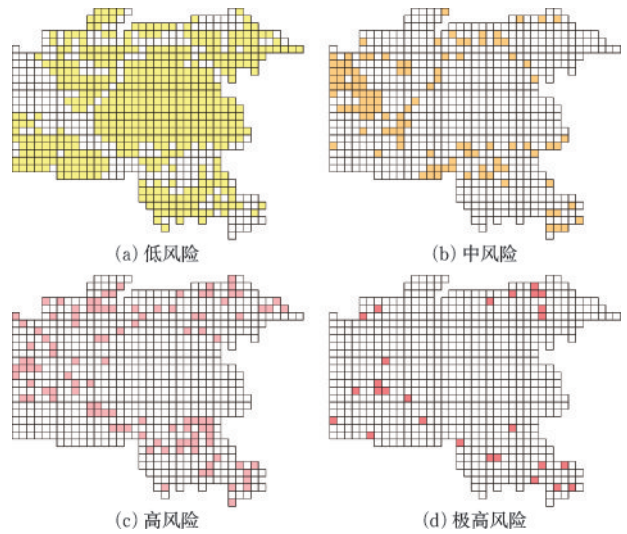


图5 极端降水不同风险等级分布图

Fig.5 Distribution of different risk levels of extreme precipitation

由图6可知,南京市玄武区极端降水风险总体呈中间低,四周高的趋势。低风险区域、中风险区域、高风险区域、极高风险区域分别占玄武区总面积的65.89%、15.42%、15.01%、3.68%。

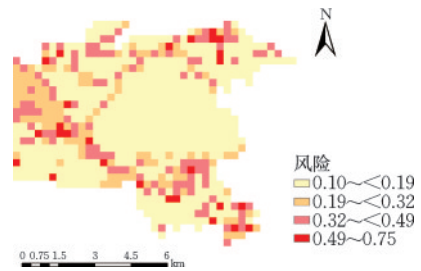


图6 极端降水风险分布

Fig.6 Distribution of extreme precipitation risk

低风险区域主要集中分布在玄武区的中部,北部、南部和西南部也有大量分布。主要位于紫金山区域、城乡和居民区域。得益于紫金山区域地势高的特点,降水由紫金山区域向四周扩散。

中风险、高风险及和极高风险区域主要稀疏分布在玄武区的四周。主要位于玄武湖和紫金山区域周边。受玄武区特殊地势影响,降水主要分布在紫金山区域以外的地方,因此,降水风险也相较于紫金山地区高。

### 2.3.2 风险关键指标提取

本研究基于 SPSS 软件中的 K-means 聚类算法将不同风险等级区域内的指标进行聚类分析,在聚类分析的过程中,选择合适的聚类数目以保证每个

指标的显著性小于0.05。不同风险区域指标聚类如图7所示,低风险区域、中风险区域、高风险区域、极高风险区域指标聚类分别为7、4、8、2。基于每个栅格内指标风险占其对应栅格风险的比例,筛选出风

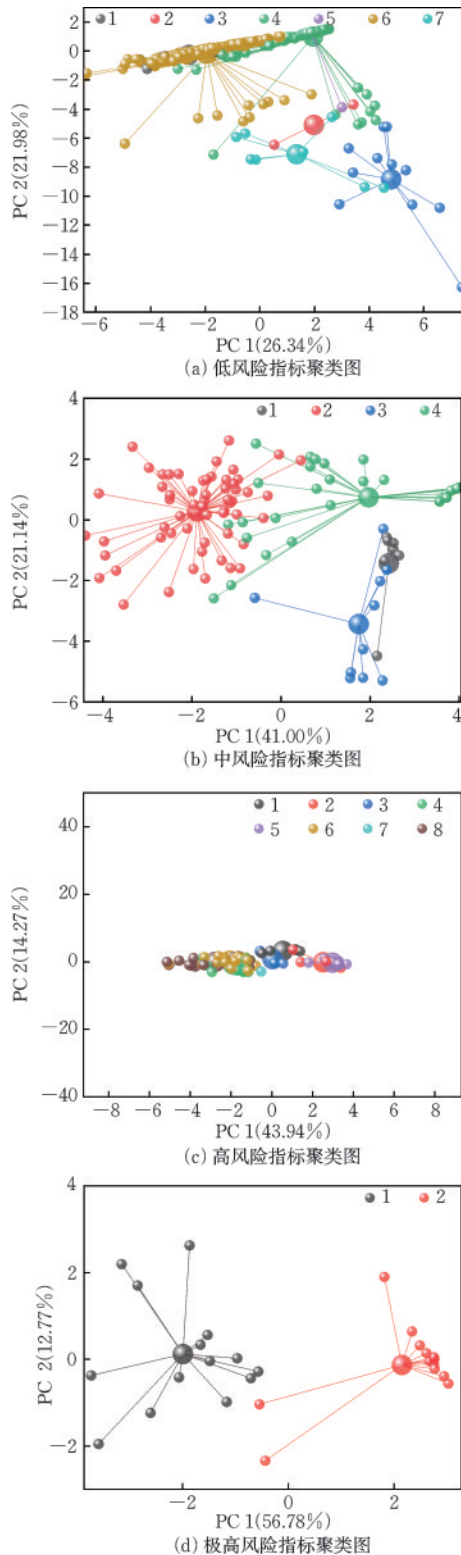


图7 不同风险区域指标聚类图

Fig.7 Cluster diagrams of indicators in different risk areas

险占比大于5%的指标。在筛选出的指标中,基于不同聚类数目下指标的占比情况,挖掘出不同风险区域内指标的共同特性,确定影响风险的关键指标。

基于对低风险区域的风险指标聚类分析,发现聚类1中包含8个栅格。其中,林地淹没面积、紧急服务到达受灾区域的速度、水域面积、NDVI各占17.78%,城乡、工矿、居民用地淹没面积占15.56%,土壤侵蚀程度占13.33%。聚类2中包含2个栅格。其中,林地淹没面积、城乡、工矿、居民用地淹没面积各占28.57%,土壤侵蚀程度、水域面积、NDVI各占14.29%。聚类3中包含11个栅格。其中,城乡、工矿、居民用地淹没面积、LPI各占21.57%,土壤侵蚀程度占17.65%,林地淹没面积、水域面积各占15.69%,NDVI占7.84%。聚类4中包含213个栅格。其中,城乡、工矿、居民用地淹没面积、水域面积各占15.81%,ED、LSI、受灾人数各占15.37%,土壤侵蚀程度占14.92%,林地淹没面积占4.16%,NDVI占2.67%,LPI占0.52%。聚类5中包含1个栅格。其中,紧急服务到达受灾区域的速度、城乡、工矿、居民用地淹没面积、土壤侵蚀程度、LPI、水域面积各占20.00%。聚类6中包含240个栅格。其中,林地淹没面积、NDVI、水域面积各占21.86%,城乡、工矿、居民用地淹没面积占15.66%,土壤侵蚀程度占13.48%,LSI占2.91%,ED占2.46%,LPI、紧急服务到达受灾区域的速度各占0.09%。聚类7中包含8个栅格。其中,林地淹没面积、LPI、水域面积各占20.51%,NDVI占15.38%,城乡、工矿、居民用地淹没面积占12.82%,土壤侵蚀程度占10.26%。

基于对中风险区域的风险指标聚类分析,发现聚类1中包含7个栅格。其中,紧急服务到达受灾区域的速度占43.75%,城乡、工矿、居民用地淹没面积占37.50%,土壤侵蚀程度、林地淹没面积、NDVI各占6.25%。聚类2中包含58个栅格。其中,LPI占29.74%,林地淹没面积占29.23%,城乡、工矿、居民用地淹没面积占26.15%,NDVI占11.79%,紧急服务到达受灾区域的速度占1.54%,土壤侵蚀程度占1.03%,水域面积占0.51%。聚类3中包含9个栅格。其中,紧急服务到达受灾区域的速度占26.47%,林地淹没面积、NDVI各占23.53%,城乡、工矿、居民用地淹没面积占11.76%,土壤侵蚀程度占8.22%,水域面积占5.88%。聚类4中包含39个栅格。其中,林地淹没面积占27.86%,城乡、工矿、居民用地淹没面积、NDVI各占26.43%,LPI占14.29%,土壤侵蚀程度占3.57%,紧急服务到达受

灾区域的速度、水域面积各占0.71%。

基于对高风险区域的风险指标聚类分析,发现聚类1中包含7个栅格。其中,紧急服务到达受灾区域的速度、城乡、工矿、居民用地淹没面积各占43.75%,LPI占12.50%。聚类2中包含6个栅格。其中,紧急服务到达受灾区域的速度占37.50%,林地淹没面积占31.25%,NDVI占25.00%,城乡、工矿、居民用地淹没面积各占6.25%。聚类3中包含3个栅格。其中,紧急服务到达受灾区域的速度、LPI各占30.00%,林地淹没面积占20.00%,城乡、工矿、居民用地淹没面积、NDVI各占10.00%。聚类4中包含18个栅格。其中,LPI、林地淹没面积各占27.69%,城乡、工矿、居民用地淹没面积占26.15%,NDVI占18.46%。聚类5中包含36个栅格。其中,紧急服务到达受灾区域的速度、林地淹没面积各占40.91%,NDVI占18.18%。聚类6中包含22个栅格。其中,LPI、林地淹没面积占31.43%,城乡、工矿、居民用地淹没面积占28.57%,NDVI占8.57%。聚类7中包含1个栅格。其中,LPI、NDVI、紧急服务到达受灾区域的速度、林地淹没面积、城乡、工矿、居民用地淹没面积各占20.00%。聚类8中包含17个栅格。其中,LPI、林地淹没面积、城乡、工矿、居民用地淹没面积各占31.48%,NDVI占5.56%。

基于对极高风险区域的风险指标聚类分析,发现聚类1中包含13个栅格。其中,紧急服务到达受灾区域的速度、LPI各占32.50%,林地淹没面积占27.50%,城乡、工矿、居民用地淹没面积占7.50%。聚类2中包含14个栅格。其中,紧急服务到达受灾区域的速度、林地淹没面积各占41.18%,LPI、NDVI各占8.82%。

如表3所示,基于不同风险等级区域内各聚类情况下指标的占比情况及指标出现的频率,确定每个关键指标的平均权重范围及其聚类占比,判断不同风险等级区域内的关键指标及其影响程度。对于低风险区域,城乡、工矿、居民用地淹没面积,水域面积,土壤侵蚀程度,NDVI这四个指标其关键作用;对于中风险区域,城乡、工矿、居民用地淹没面积,林地淹没面积,紧急服务到达受灾区域的速度,土壤侵蚀程度,NDVI这五个指标起关键作用;对于高风险区域,城乡、工矿、居民用地淹没面积,林地淹没面积,NDVI这三个指标起关键作用;对于极高风险区域,林地淹没面积,紧急服务到达受灾区域的速度,LPI这三个指标起关键作用。

表3 不同风险等级区域的关键指标及其影响程度

Table 3 Key indicators and their impact levels in areas with different risk levels

风险等级划分	关键指标	平均权重范围/%	聚类占比/%
低风险	城乡、工矿、居民用地淹没面积	12.82~28.57	100.00
	水域面积	14.29~21.86	100.00
	土壤侵蚀程度	10.26~20.00	100.00
	NDVI	2.67~21.86	85.71
中风险	城乡、工矿、居民用地淹没面积	11.76~37.50	100.00
	林地淹没面积	6.25~29.23	100.00
	紧急服务到达受灾区域的速度	0.71~43.75	100.00
	土壤侵蚀程度	1.03~8.22	100.00
高风险	NDVI	6.25~26.43	100.00
	城乡、工矿、居民用地淹没面积	6.25~43.75	85.71
	林地淹没面积	20.00~40.91	85.71
极高风险	NDVI	5.56~25.00	85.71
	林地淹没面积	27.50~41.18	100.00
	紧急服务到达受灾区域的速度	32.50~41.18	100.00
	LPI	8.82~32.50	100.00

注:平均权重范围指取各聚类中该指标占比的最小最大值;核心聚类占比指该指标在对应风险等级聚类中的出现频率

### 3 结论

本研究从物理、社会、环境三个维度出发,精细化刻画了栅格尺度下极端降水风险,挖掘出不同风险区域内影响风险的关键指标,所得结论如下:

(1)南京市玄武区百年一遇的极端降水事件下,淹没面积达447.83万m<sup>2</sup>,积水量达277.86万m<sup>3</sup>。

(2)南京市玄武区极端降水风险总体呈中间低,四周高的趋势。低风险区域、中风险区域、高风险区域、极高风险区域分别占玄武区总面积的65.89%、15.42%、15.01%、3.68%。

(3)低风险区域,城乡、工矿、居民用地淹没面积,水域面积,土壤侵蚀程度,NDVI这四个指标起关键作用;中风险区域,城乡、工矿、居民用地淹没面积,林地淹没面积,紧急服务到达受灾区域的速度,土壤侵蚀程度,NDVI这五个指标起关键作用;高风险区域,城乡、工矿、居民用地淹没面积,林地淹没面积,NDVI这三个指标起关键作用;极高风险区域,林地淹没面积,紧急服务到达受灾区域的速度,LPI这三个指标起关键作用。

(4)一方面,本研究在指标选取过程中受数据可获取性限制,部分风险因子未纳入评估框架,可能影响评估结果的全面性。未来研究应通过多源

数据融合,完善风险评估指标体系,提升极端降水风险评估的精细化程度。另一方面,本研究中仅将重现期为100年且降水历时120 min的淹没数据应用到城市极端降水风险评估。未来研究拟引入多时段模拟,通过不同淹没阶段的情景对比,分析风险敏感性阈值及关键指标响应时序特征,为城市应急响应决策提供理论支撑。

## 参考文献:

- [1] Fang J, Hu J, Shi X, et al. Assessing disaster impacts and response using social media data in China: A case study of 2016 Wuhan rainstorm[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2019, 34: 275-282.
- [2] Yin J, Yu D, Yin Z, et al. Evaluating the impact and risk of pluvial flash flood on intra-urban road network: A case study in the city center of Shanghai, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 537: 138-145.
- [3] 王德运,张露丹,吴祈.基于社交媒体数据的城市暴雨洪涝灾害风险评估:以郑州市“7·20”暴雨事件为例[J].*安全与环境工程*,2024,31(3):11-22,46.  
Wang D Y, Zhang L D, Wu Q. Urban storm flood disaster risk assessment based on social media data: A case study of the “7·20” rainstorm event in Zhengzhou City[J].*Safety and Environmental Engineering*, 2024, 31(3):11-22,46.(in Chinese)
- [4] Wang P, Zhu Y, Yu P. Assessment of urban flood vulnerability using the integrated framework and process analysis: a case from Nanjing, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(24): 16595.
- [5] Diriba D, Takele T, Karuppanan S, et al. Flood hazard analysis and risk assessment using remote sensing, GIS, and AHP techniques: a case study of the Gidabo Watershed, main Ethiopian Rift, Ethiopia[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2024, 15(1): 2361813.
- [6] 李超超,田军仓,申若竹.洪涝灾害风险评估研究进展[J].*灾害学*,2020,35(3):131-136.  
Li C C, Tian J C, Shen R Z. Review on assessment of flood and waterlogging risk[J].*Journal of Catastrophology*, 2020, 35(3):131-136.(in Chinese)
- [7] 谢捷,刘玮,徐月顺,等.基于AHP-熵权法的西宁地区汛期暴雨灾害风险评估[J].*自然灾害学报*,2022,31(3):60-74.  
Xie J, Liu W, Xu Y S, et al. Rainstorm disaster risk assessment in Xining area in rainy season based on the AHP weight method and entropy weight method [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2022, 31(3): 60-74.(in Chinese)
- [8] 张静,保广裕,刘玮,等.青海公路沿线暴雨洪涝灾害风险指数特征与模型研究[J].*干旱区地理*,2024,47(1): 28-37.  
Zhang J, Bao G Y, Liu W, et al. Characteristics and model of rainstorm and flood disaster risk index along Qinghai Highway [J]. *Arid Land Geography*, 2024, 47(1):28-37.(in Chinese)
- [9] 李彦萍,王涛,王玺伟,等.层次分析法支持下的道路洪涝灾害风险评价:以武夷山地区为例[J].*测绘通报*, 2022,(3):166-170.  
Li Y P, Wang T, Wang X W, et al. Assessment of road flood disasters risk based on analytic hierarchy process: taking the Wuyi Mountain region as an example [J].*Bulletin of Surveying and Mapping*, 2022, (3): 166-170.(in Chinese)
- [10] 刘海,刘凤,郑粮,等.风险分析与损失评估相结合的北方城市洪涝灾害研究:以郑州市2021年7月特大暴雨洪涝灾害为例[J].*华中师范大学学报(自然科学版)*, 2023,57(1):59-68.  
Liu H, Liu F, Zheng L, et al. Research on flood disaster in northern cities combining risk analysis and loss assessment: taking the heavy rainstorm and flood disaster in Zhengzhou City in July 2021 as an example [J].*Journal of Central China Normal University(Natural Sciences)*, 2023, 57(1):59-68.(in Chinese)
- [11] Zhan Z, Jia L, Wang P, et al. Impact of building morphology on outdoor thermal comfort in summer afternoons: A case study in Nanjing, China[J]. *Urban Climate*, 2024, 56: 102064.
- [12] Wang C, Hou J, Miller D, et al. Flood risk management in sponge cities: The role of integrated simulation and 3D visualization[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2019, 39: 101139.
- [13] Carlotto T, Chaffe P L B, dos Santos C I, et al. SW2D-GPU: A two-dimensional shallow water model accelerated by GPGPU [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2021, 145: 105205.
- [14] 陈丽慧,陈洁,高郭平.滨海城市洪涝风险评估:以上海临港新城为例[J/OL].*长江科学院院报*,1-11(2024-10-11)[2025-07-12].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20241011.1331.004.html>.  
Chen L H, Chen J, Gao G P. Flood risk assessment of coastal cities: a case study of Shanghai Lingang New City [J/OL].*Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*: 1-11 (2024-10-11) [2025-07-12].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20241011.1331.004.html>.(in Chinese)
- [15] Xu H, Ma C, Lian J, et al. Urban flooding risk assessment based on an integrated k-means cluster algorithm and improved entropy weight method in the region of Haikou, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 563: 975-986.

(本文编辑:周小潭)