

王金虎, 张东晖, 王钰尧. 城市洪涝风险的组合赋重方法研究与应用: 以淮安市为例[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(8): 91-104. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.007

WANG Jinhu, ZHANG Donghui, WANG Yuyao. Research and application of combined empowerment method for urban flood risk: Take Huai'an City as an example[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(8): 91-104. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.007

城市洪涝风险的组合赋重方法研究与应用： 以淮安市为例

王金虎^{1,2}, 张东晖³, 王钰尧⁴

(1. 南京信息工程大学 应急管理学院, 江苏 南京 210044; 2. 南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044; 3. 南京信息工程大学 管理工程学院, 江苏 南京 210044; 4. 南京信息工程大学 大气物理学院, 江苏 南京 210044)

摘要:【目的】城市洪涝灾害对人民的生命和财产安全造成了巨大的损失, 客观、准确的对该灾害进行定量风险评估, 对提高城市韧性发挥至关重要的作用。【方法】以淮安市为研究对象, 从IPCC采纳的城市洪涝风险评估框架“危险性(Hazard)-暴露性(Exposure)-脆弱性(Vulnerability)”即“H-E-V”的框架出发, 建立城市洪涝灾害风险的指标体系, 基于随机森林算法计算洪涝因子对洪涝灾害的相对重要性, 并以此作为客观权重, 融合层次分析法确定各洪涝因子的主观权重。最后利用 Kendall 系数进行一致性检验并计算最优组合权重。使用优化后的新型指标赋权对淮安市的洪涝灾害风险进行精细化评估。【结果】结果表明: (1)利用 Kendall 法进行验证, 协调系数 $W=0.1456$, 在 0.05 显著性水平下, 客、主观权重存在一定的一致性。(2)暴露性和脆弱性的影响显著高于危险性, 尤其在主要河流水系和高人口密度区域, 两者贡献更加突出。(3)淮安市中高风险区与洪泽湖、高邮湖、淮河及三河等主要河流水系分布关系密切, 受人口密度、地均 GDP 等因素的影响, 清江浦区、涟水县西北、东部地区和淮安区的东南部也位于中高风险区。【结论】利用网络爬取近年的极端灾害点进行验证, 88%的极端灾害点位于较高及高等级规划的组合风险等级图中。研究成果对未来城市应对洪涝灾害起到借鉴作用。

关键词: 城市洪涝灾害; 随机森林法; 层次分析法; 风险评估; 淮安市; 韧性城市; 极端天气; 降雨

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.007

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: X43; X915.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)08-0091-14



Research and application of combined empowerment method for urban flood risk:

Take Huai'an City as an example

WANG Jinhu^{1,2}, ZHANG Donghui³, WANG Yuyao⁴

(1. School of Emergency Management, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China;

收稿日期: 2024-09-04; 修回日期: 2024-11-04; 录用日期: 2024-11-06; 网络出版日期: 2025-01-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41905026); 江苏省自然科学基金项目(BK20170945); 南京信息工程大学人才启动基金项目(2016r028); 中国博士后科学基金第63批面上课题(2018M631554); 江苏省333高层次人才培养工程资助; 江苏省高等教育教改立项研究课题(2023JSJG330)

作者简介: 王金虎(1987—), 男, 教授, 博士, 主要从事气象风险评估。E-mail: goldtigerwang@nuist.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

2. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China; 3. School of Management Engineering, Nanjing University of Information Engineering, Nanjing 210044, Jiangsu, China; 4. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Engineering, Nanjing 210044, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] Urban flood disasters have caused significant damage to lives and property. An objective and accurate quantitative risk assessment of these disasters is crucial for enhancing urban resilience. [Methods] Huai'an City was selected as the study area. The urban flood risk indicator system was established using the "Hazard-Exposure-Vulnerability (*H-E-V*)" framework adopted by the IPCC. The relative importance of flood factors was calculated using the random forest algorithm to determine objective weights, while subjective weights were assigned using the Analytic Hierarchy Process (AHP). The Kendall coefficient was applied to test the consistency between the weights, and the optimal combined weight was calculated. The refined indicator weights were then used to conduct a detailed risk assessment of urban flood hazards in Huai'an City. [Results] The results showed that: (1) The Kendall test confirmed a coordination coefficient of $W = 0.1456$, indicating consistency between objective and subjective weights at the 0.05 significance level. (2) The influence of exposure and vulnerability was found to be significantly higher than that of hazard, particularly in areas near major water systems and in regions with high population density. (3) Medium to high-risk areas in Huai'an City were closely associated with the distribution of major rivers and water systems, while Qingjiangpu District, northwest Lianshui County, eastern Huai'an County, and southeastern Huai'an District were also identified as medium to high-risk zones due to the effects of population density and per capita GDP. [Conclusion] Validation using recent extreme disaster points indicated that 88% of these points were located in the medium to high-risk zones of the combined risk level map. These findings are expected to provide valuable insights for improving urban flood disaster management in the future.

Keywords: urban flooding; random forest method; hierarchical analysis; risk assessment; Huai'an City; resilient city; extreme weather conditions; rainfall

0 引言

全球极端天气发生的频率越来越高, 提高城市韧性成为目前发展的重要问题, 洪涝灾害作为全球重大灾害之一, 造成了不可估量的经济财产损失和人员伤亡, 对社会的发展造成了滞后性的伤害。近几年城市暴雨导致的洪涝灾害多发、频发。2021年的河南郑州发生的“7·20”暴雨事件, 造成380人因灾伤亡失踪^[1]。中国是世界上洪涝灾害出现频次最高的国家之一, 根据《全国防洪规划》, 2/3以上的国土面积存在洪水威胁, 现有663个城市中有明确防洪任务的有642^[2]个。在城市洪涝灾害日益严重的趋势下, 洪涝灾害的定量风险评估^[3]和区间规划对提高城市防灾减灾和应急管理能力具有重要作用。

国内外学者对于洪涝灾害的研究大致分为以下三个方面。首先从研究尺度来看, 既有大尺度流域的洪涝灾害的重建与分析^[4], 也有小尺度精细化的局部区域^[5]的洪涝灾害风险评估分析^[6-7]。其次对于指标的选择, 城市洪涝灾害不仅受自然因素的制约, 还受到社会经济等因素的制约^[8]。最后从研究方法来看, 目前常用的评估方法分为历史灾情评估法、多准则指标体系法、遥感和GIS耦合法、情景模拟评价法和机

器学习这五大类。历史灾情评估法是COEUR等^[10]基于历史数据进行洪涝频率和损失预测的方法, 方法简单但对数据依赖性强。除此之外对洪涝灾害的数据来源方面部分学者利用SAS影像对洪涝灾害进行前后对比分析极大程度上提高了数据来源的可靠性^[9]。多准则指标体系法广泛应用于不同尺度区域, 能直观反映指标与洪涝风险的关系, 但在指标选择和权重确定上存在难点^[11]。遥感和GIS耦合的方法是利用遥感技术获取灾区水域、洪水和承载体等信息, 将其导入GIS中进行空间分析。陈述等^[12]应用GIS空间分析技术, 从洪涝灾害的暴露度、敏感性、适应力和恢复力4个维度, 采用G1法(序关系法)和熵权法对湖北省城市洪涝灾害韧性进行评估。王先伟等^[13]使用遥感影像、水力学模型和地理空间分析技术, 综合利用雨量、河道水位、网络淹没图片和视频、卫星遥感影像、地面调研测绘和无人机低空航测等多源数据, 通过实地调研测绘和无人机航测, 快速识别洪水淹没深度范围、分析淹没区内的受灾人口、房屋、农田等基本灾情, 结果表明, 集成天空地网多源信息的暴雨洪涝灾情快速监测评估技术具有较大推广应用价值。近年来, 机器学习方法^[14]在洪涝风险评估中取得显著成效, 通过历史气象、水文和地理数据自动学习潜

在关系,预测洪水发生概率及其空间分布。NGUYEN等^[15]使用随机森林和支持向量机算法对柬埔寨 Phnom Penh 城市进行洪涝灾害风险评估取得良好效果。另外,研究洪涝灾害目前多从“概率(Probability)-后果(Consequence)”、*H-V*、*H-E-V* 框架出发,相较于前二者,“*H-E-V*”框架评估内容全面且明确,同时又具有良好的操作性,被国内外学者^[16-17]和研究机构广泛使用。“*H-E-V*”框架是 IPCC 采纳针对城市洪涝灾害风险评估研究的框架,此前张会等^[18]总结了目前该框架对城市洪涝灾害风险评估的研究分析,且 WU 等^[19]利用此成熟的框架对中国的淮河流域进行洪涝灾害分析。但是在已有的指标赋权方面,他们的研究缺少对指标权重的优化,不同灾害的考虑因素不同,所以对灾害因子进行赋权的研究方法也不同,目前的权重赋重大多从统计学的角度出发,有学者利用 AHP(层次分析法)^[20],此方法主观性强,叶瑞峰等^[21]多利用 AHP-熵权法主、客观相结合的方法确定权重,此方法对收集数据的依赖性较强和对极端值比较敏感。除此之外赵佳慧等^[22]、尹志国等^[23]、LUU 等^[24]几位学者多用统计学方法进行创新,例如主成分分析法、熵权-TOPSIS-灰色关联方法、博弈论和后悔理论等,以上几种基于统计学的方法存在模型假设不足和缺乏可解释性的缺点。在进行洪涝灾害分析过程中,确定权重是进行风险评估的关键问题,近几年机器学习算法被国内大部分学者使用,冯锋等^[25]将其应用于土壤污染影响因子及空间分布研究区域和数据来源、郗婕等^[26]应用于森林火灾灾害风险预测及韩帅兵等^[27]应用于铁路暴雨洪灾风险评估等方面。同样在关于洪涝灾害的研究方面,王德运等^[28]、林奕晨等^[29]引入了随机森林和 XGBoost 算法确定洪涝灾害风险研究的客观权重,取得了很大进展,柯佳颖等^[9]利用随机森林-AHP 确定主、客观权重对郑州市洪涝灾害进行分析,但此文章利用距离函数进行组合权重的确定,不同的距离度量可能导致不同的结果,容易产生主观性,同样也存在对计算值敏感和忽略了权重之间的相对一致性。所以优化洪涝灾害风险评估的组合权重不仅可以提高评估的精度、减少主观偏差、增强风险评估情景的适应性等优势,还可以使用优化后的权重分配为政策的制定和防灾减灾措施提供了更科学的依据。

本研究将随机森林算法用于客观权重的确定,通过分析大量洪涝灾害相关数据,并赋予相应的客观权重。同时,采用层次分析法进行主观权重的分配,综合专家意见和实际经验,以确保评估结果的科学性和

合理性。利用 Kendall 方法^[32]对两种权重方法进行一致性检验,通过将两种赋权方法的创新结合,既避免了客观权重不考虑特征之间相互作用的缺点,同时平衡了层次分析主观方面的影响,得到普适性高、便捷、高效及准确的精细化评估方法。本文构建了一个基于“*H-E-V*”框架的洪涝灾害综合风险评估模型,并对淮安市进行实际验证。不仅为洪涝灾害风险评估提供了一种新的方法路径,还为未来的防灾减灾工作提供了重要的理论支持和实践指导。通过对评估结果的深入分析,本文旨在为城市规划、防洪工程设计以及应急管理提供科学依据,进而提高城市的洪涝灾害防范和应对能力。

1 研究区域和数据来源

1.1 研究区域概况

淮安市位于江苏省中北部,属于长江三角洲,是苏北重要中心城市。截至 2023 年末,淮安市总面积 10 030 km²,辖 4 个区和 3 个县,常住人口 453.80 万人。地形西高东低,以平原为主,平原面积占总面积的 69.39%(见图 1)。近年来,极端天气频发,2020 年强降雨导致内涝;2021 年夏季暴雨造成基础设施受损和经济损失;2022 年持续降雨致使市区积水,影响交通与生活。作为长江下游和淮河流域的重要城市,淮安因季风气候和复杂水系易发生洪涝灾害,提高城市韧性已成为未来建设的重点。

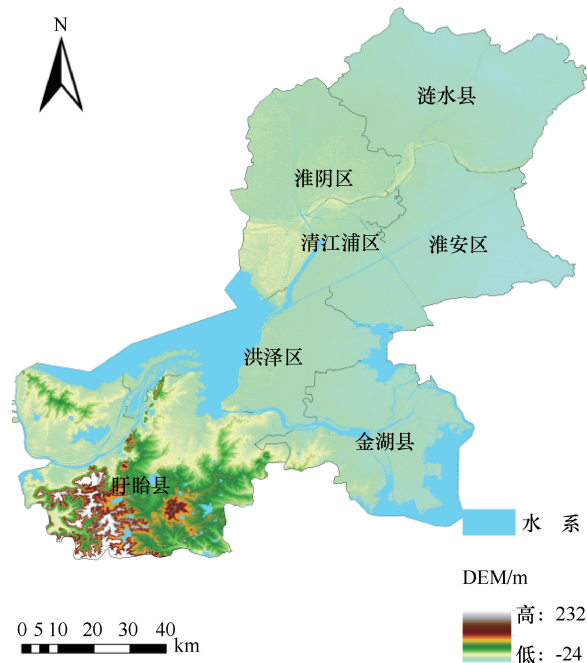


图 1 淮安市主要水系分布

Fig. 1 Distribution of major water systems in Huai'an City

1.2 数据来源

1.2.1 城市洪涝灾害数据

以往对城市暴雨进行研究, 由一开始使用简单的降雨量和城市植被覆盖率等, 发展为使用各项致使城市洪涝灾害的雷达数据。本文利用随机森林算法研究各指标的相关性, 需要大量的数据集来进行训练和测试。利用哨兵二号数据进行研究分析, 确保了数据的准确性和客观性。此部分的工作分为三个流程: (1) 数据预处理; (2) 水体提取; (3) 灾前灾后对比。淮安市 2021 年 7 月 28 日起受台风“烟花”造成的连日暴雨影响, 淮安市大部分地区出现了 6 h 降雨量达 100 mm 的强降水, 已接近近年来短时间强降雨的历史记录。通过欧洲航天局 (<https://dataspace.copernicus.eu/>) 获取淮安市 2021 年 7 月 15 日至 2021 年 8 月 15 日哨兵二号高分率多光谱成像产品, 作为灾后水体提取的时间区间。将时间范围 2 月 20 日至 3 月 20 日作为灾前水体的提取。由于获取的数据影像级别为 level-1C, 因而, 所获取数据需要首先通过 Sen2cor 插件进行辐射定标和大气校正等预处理^[28], 然后, 利用 snap 进行重采样, 利用 envi5.3 软件计算 NDWI, 设置阈值将水体提取为 shp 文件, 最后用 Arcmap 进行裁剪拼接等数据后处理操作^[30]。其流程及提取结果分别如图 2 和图 3 所示。

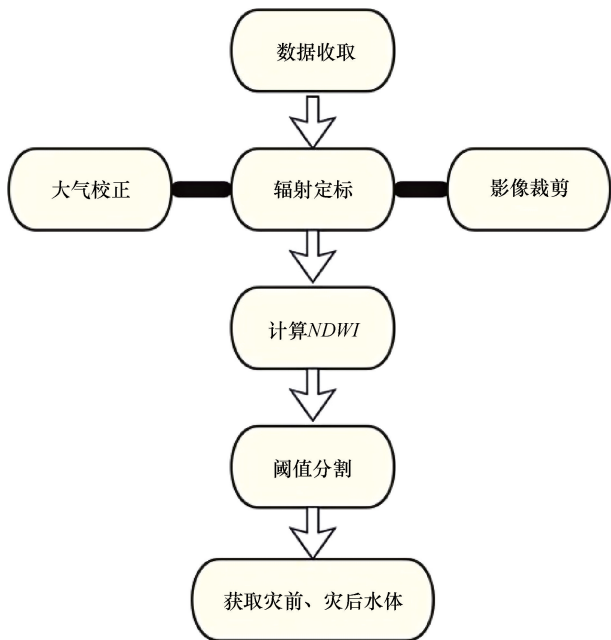


图 2 水体提取流程

Fig. 2 Water body extraction process

1.2.2 城市洪涝灾害影响因素数据

城市洪涝灾害是多种因素共同作用的结果, 不仅包含极端暴雨等自然因素, 还包含了社会经济等因

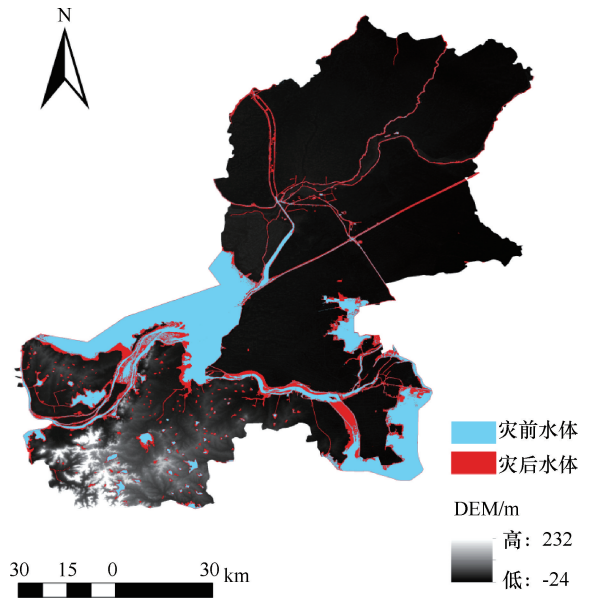


图 3 灾前、灾后水体提取对比

Fig. 3 Comparison of water body extraction before and after disaster

素, 从 IPCC 采用“H-E-V”框架评估城市洪涝风险。“H-E-V”框架由危险性、暴露性、脆弱性三大内容组成。下述为本次淮安市城市洪涝灾害的风险评估体系和数据来源及属性。

1.3 数据处理

11 个指标因子的获取来源如表 1 所列。由于数据的分辨率和坐标系不同, 首先需利用 GIS 系统进行重采样, 以确保统一的坐标系统和 30 m×30 m 的分辨率。部分离散数据还需使用 ArcMap 软件进行空间插值和归一化处理。同样, 获取的灾前和灾后水体的 shp 文件也需确保坐标系一致。最后, 利用 Python 中的 Geopandas、Rasterio、NumPy 和 Pandas 库运行相关代码完成数据处理。

2 研究方法

2.1 “H-E-V” 框架风险评估模型建立

基于“H-E-V”框架的城市洪涝灾害风险评估是由危险性、暴露性、脆弱性三部分构成, 具体如图 4 所示。公式为

$$\text{洪涝风险} = \text{危险性}(H) \times \text{暴露性}(E) \times \text{脆弱性}(V) \quad (1)$$

危险性

$$H(X) = \sum_{i=1}^n [T_i \times H_{in}(X)] \quad (2)$$

暴露性

$$E(X) = \sum_{i=1}^n [T_i \times E_{in}(X)] \quad (3)$$

表 1 数据来源

Table 1 Data sources

H-E-V 框架	指标层	数据来源	属性
危险性	极端日(2021-07-28)降雨量/mm	2017—2022 年 (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) 是一个全球逐日降水数据集	正向
	近五年暴雨天数/d	用 GEE (Google Earth Engine) 从 2017—2021 年 CHIRPS 降水数据集筛选所得	正向
	降雨持续时间/h	NASA/GPM_L3/IMERG_V06 数据集 (Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) Version 06)	正向
	降雨强度/mm · h ⁻¹	NASA/GPM_L3/IMERG_V06 数据集 (Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) Version 06)	正向
	高程/m	中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台	负向
暴露性	人口密度/人 · km ⁻²	WroldPop 全球人口分布数据集 (http://www.worldpop.org)	正向
	道路不透水层(面积)	道路分布来源国家基础地理信息中心	正向
	主要水流河系缓冲区	OSM (Open Street Map) 数据 (https://www.openstreetmap.org)	负向
	土地利用类型(分类)	武汉大学 Landsat 的年度中国土地覆盖数据集	正向
脆弱性	归一化植被指数 NDVI	MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250 m Grid (MOD13Q1)	负向
	地均 GDP/元 · 人 ⁻¹	中科院资源环境科学与数据中心	正向

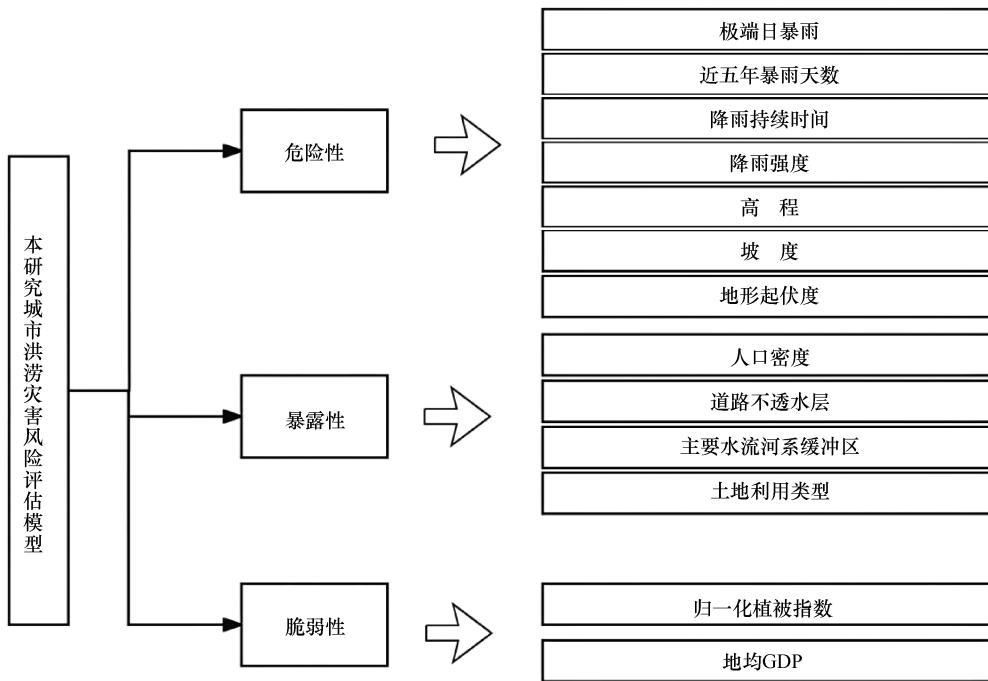


图 4 本研究城市洪涝灾害评估体系

Fig. 4 Assessment framework for urban flood disasters in this study

脆弱性

$$V(X) = \sum_{i=1}^n [T_i \times V_{in}(X)] \quad (4)$$

式中, $H(X)$ 、 $E(X)$ 、和 $V(X)$ 为各单项评价指数 (危险性、暴露性、脆弱性); T_i 为各指标的权重; $H_{in}(X)$ 、 $E_{in}(X)$ 和 $V_{in}(X)$ 为各指标归一化后的指标值。

得出三项的评价指标指数后, 利用幂指数加权评价法将三个指标进行集成叠加, 得出研究区域基于“H-E-V”框架的洪涝灾害综合风险评估, $R(X)$ 为计算所得区域综合风险评估值。公式为

$$R(X) = f(H(X), E(X), V(X)) \quad (5)$$

式中, f 为幂指数模型; $R(X)$ 为区域洪涝风险值。

2.2 所用指标含义及计算方法

2.2.1 所用指标

危险性因子主要由短期因素和长期因素两部分构成, 短期因素是指淮安市 2021 年 7 月 28 日极端日的暴雨强降水量、降水持续时间和降水强度, 直接反映极端降水对洪涝风险的影响。长期因素是统计了 2017—2021 年暴雨天数来观测淮安市的暴雨发生时间、频率等; 坡度、地形起伏度数据利用 GIS 邻域分析工具对 DEM 高程数据进行处理得到。高程越低, 积水风险越高。坡度越小, 排水能力降低。地形起伏

度影响水流分布, 起伏度较大的区域可能增加洪涝风险。暴露性因子选取了人口密度、道路不透水层、主要水河流域缓冲区和土地利用类型等指标。道路不透水层指标直接影响城市洪涝灾害排水能力, 不透水层面积越大, 意味着更多的地表水无法渗透, 导致雨水迅速汇集, 从而增加内涝的风险。脆弱性因子为归一化植被指数和地均 GDP, 植被覆盖不足的区域缺乏涵养水能力, 风险增加。地均 GDP 通常在“H-E-V”框架中视为脆弱性因素的一部分, 该指标可以反映一个地区的经济水平和居民的经济状况, 经济较弱的地区可能在洪涝灾害发生时缺乏足够的资源和能力进行应对和恢复, 从而增加其脆弱性。基于“H-E-V”框架三个因子层面选取了 13 个指标作为本次淮安市城市洪涝灾害进行风险评估的重要支撑。

2.2.2 归一化差异水体指数

基于卫星遥感数据进行水体提取在本研究领域有着广泛的应用^[22], NDWI(Normalized Difference Water Index), 即归一化差异水体指数, 是一种遥感指数, 用于利用近红外(NIR)和绿色波段来识别植被中的水分含量。NDWI 广泛应用于环境监测、农业和水文研究中, 用于水体边界的识别、监测水分含量的变化, 以及评估与水资源可用性相关的植被健康状况。本研究中利用 NDWI 有效区分水体和非水体区域, 提取灾害后的水体变化数据, 为风险评估提供重要依据。NDWI 的计算公式为

$$NDWI = \frac{NIR - G}{NIR + G} \quad (6)$$

式中, NIR 为近红外反射值; G 为绿色波段反射值。

2.2.3 正负指数归一化

由于数据来源和量纲存在差异, 不同影响因子对灾害存在正负相反作用, 为消除差异, 需要首先对不同正负属性的指标进行归一化处理。

正向指标归一化

$$T_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (7)$$

负向指标归一化

$$T_{ij} = \frac{X_{\max} - X_{ij}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (8)$$

式中, X_{ij} 为指标原始值; X_{\max} 为指标原始值的最大值; X_{\min} 为指标原始值的最小值。

2.2.4 随机森林法

随机森林是一种常用的算法。随机森林是通过构建多棵决策树并将它们的预测结果进行组合来提高模型的准确性和鲁棒性。在构造每棵决策树时, 最关键

的步骤之一就是选择最优的节点分裂点, 这直接影响决策树的性能。一个理想的节点分裂应当使分裂后的节点不纯度尽可能低。Gini 指数是用来衡量节点不纯度的一种常用指标。在随机森林中, 通过计算每个特征在决策树节点分裂时的 Gini 指数的平均变化量, 比较不同特征的平均 Gini 指数改变量占所有特征平均 Gini 指数改变量总和的百分比来判断特征重要程度^[18], 其计算公式为

$$Gini(m) = 1 - \sum_{j=1}^k [p(j|m)]^2 \quad (9)$$

式中, $p(j|m)$ 表示在节点 j 上类别 m 的概率, 当特征值 X_k 用于节点分裂时, 计算分裂前后的 Gini 指数变化

$$VIM_k = Gini(m) - Gini(r) - Gini(l) \quad (10)$$

式中, $Gini(m)$ 为分裂前节点 m 的 Gini 指数; $Gini(r)$ 和 $Gini(l)$ 为分裂后的右子节点和左子节点的 Gini 指数。

在一棵决策树中, 累积所有使用特征 X_k 的分裂点的 Gini 变化量, 在整个随机森林中, 计算特征 X_k 在所有决策树中的 Gini 变化量总和为

$$VIM_{Gini, k} = \sum_{i=1}^n VIM_{ik} \quad (11)$$

式中, n 为随机森林中树的总数。

计算总 Gini 变化量占所有特征总 Gini 变化量的百分比, 得到特征的重要性评分

$$VIM_k = \frac{VIM_k}{\sum_{i=1}^c VIM_i} \quad (12)$$

式中, c 为所有特征的数量。

2.2.5 层次分析法

层次分析法^[31-32]是对定性问题进行定量分析的一种简便、灵活而又实用的多准则决策方法, 使用层次分析法对城市洪涝灾害因子指标的权重进行主观层次上的计算, 可以帮助决策者根据专家意见系统地分配权重, 此方法也容易受到人为主观层面的影响。基于层次分析法计算指标主观权重的具体操作如下。

(1) 建立一个明确的层次结构模型, 将城市洪涝灾害问题分为不同的层次, 包括目标层、准则层、指标层等, 每一层的因素都直接与上层次的因素相关联。

(2) 构造判断矩阵, 判断矩阵是用来表示各个准则相对重要性的一个矩阵。通过专家意见打分或以往经验来填充矩阵, 本研究采用 1—9 的标度, 来表示两个因素之间的相对重要性。

(3) 利用几何平均法计算指标的相对权重

$$w_i = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{1/n} \quad (13)$$

最后进行归一化几何平均数来得到相对权重。

(4)一致性检验, 计算一致性指标

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (14)$$

式中, n 为判断矩阵的阶数; λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征值。

查询随机一致性指标 RI , 计算一致性比率 $CR =$

$\frac{CI}{RI}$, 如果 $CR < 0.1$, 则判断矩阵的一致性可以接受, 否则需要重新评估。

2.3 组合权重赋值及一致性检验

2.3.1 组合权重赋值

利用随机森林模型的 *Gini* 指数计算各洪涝因子的权重, 主要关注的是单个特征对目标变量的不纯度贡献。它没有考虑特征之间的相互关系和交互作用。因此考虑添加了专家打分的层析分析法作为补充, 层次分析法 $CI=0.087$, $CR=0.072$, 通过一致性检验。利用 Kendall 系数对主客观系数进行检验, 并计算组合权重, 全面评估各个因子的权重, 确保模型的准确性和可靠性。权重等级分析如表 2 所列。

表 2 权重等级分析

Table 2 Weight level analysis

指标因子	客观权重	主观权重	客观权重等级	主观权重等级
极端日(2021-07-28)降雨量	0.041	0.078	6	3
近五年暴雨天数	0.020	0.018	10	12
降雨持续时间	0.027	0.030	8	4
降雨强度	0.023	0.015	9	6
高程	0.246	0.235	2	2
坡度	0.016	0.016	11	13
地形起伏度/m	0.030	0.028	7	9
人口密度	0.013	0.028	12	7
道路不透水层	0.131	0.120	4	8
主要水流域系缓冲区	0.131	0.125	4	5
土地利用类型	0.018	0.017	11	11
归一化植被指数	0.285	0.270	1	1
地均 GDP	0.019	0.020	10	10

2.3.2 主、客观权重一致性检验

利用 Kendall 系数检验主、客观系数的一致性。

(1)建立 Kendall 检验假设, H_0 为两种加权方法结果不一致, H_1 为两种加权结果一致。

(2)计算等级差异 d_i 及其平方和 $\sum_{i=1}^{13} d_i^2$, 计算得

$$\sum_{i=1}^{13} d_i^2 = 106.$$

(3)计算 Kendall 协调系数 W

$$W = \frac{12 \sum (R_i - \bar{R})^2}{m^2(n^3 - n)} \quad (15)$$

式中, R_i 为第 i 个对象总等级之和; \bar{R} 为所有对象等级和的平均值, $\bar{R} = \frac{m(n+1)}{2}$; m 为参与排序等级数; n 为对象的数量。

本研究中 $m=2$, $n=13$, 带入求得 $W=0.1456$ 。

(4)一致性检验, 计算 $\chi^2 = m(n-1)W = 2 \times (11-1) \times 0.1716 = 3.4944$, 自由度 $df = n-1 = 11-1 = 10$, 根据卡方分布表, 查找在自由度为 10 时, 显著性水平为 0.05 的临界值为 21.03。由于 $\chi^2 = 3.432$ 小于 21.03, 说明在 0.05 显著性水平下, 不能拒绝一致性假设, 表明客观权重和主观权重之间存在一定的一致性。

2.3.3 组合权重计算

Kendall 协调系数为 0.1456, 比较接近于 0, 不能拒绝原假设, 所以主、客观的方法赋权重不一致, 应该选取 Kendall 协调系数 W 来确定客观权重和主观权重的贡献比。基于随机森林算法作为客观权重 s_i , 层次分析法作为主观权重 f_i , 获得最终的组合权重 $d(s_i, f_i)$

$$d(s_i, f_i) = W \cdot s_i + (1 - W) \cdot f_i \quad (16)$$

各指标因子组合权重数值如表 3 所列。

表 3 权重分析

Table 3 Weight analysis

指标因子	组合权重
极端日(2021-07-28)降雨量	0.0441
近五年暴雨天数	0.0186
降雨持续时间	0.0284
降雨强度	0.0242
高程	0.2395
坡度	0.0146
地形起伏度	0.0283
人口密度	0.0143
道路不透水层	0.1248
主要水流域系缓冲区	0.1273
土地利用类型	0.0174
归一化植被指数	0.2750
地均 GDP	0.0193

3 淮安市洪涝灾害风险评估结果分析

3.1 单项风险评估结果

3.1.1 洪涝灾害危险性评估

在“*H-E-V*”模型中, “*H*”指的是危险性, 危险性是进行洪涝灾害进行风险评估的主要因素之一。

本文中危险性因子为极端日降雨量、近五年暴雨天数、降雨持续时间、降雨强度、高程、坡度和地形起伏度这七个指标因子, 从图 5 可以看出, 极端日降雨

量自东向西、自北向南递减, 金湖县、淮安区和涟水县的极端日降雨量较强, 淮阴区、清江浦区和洪泽区的近五年暴雨天数发生最严重, 降雨持续时间和降雨

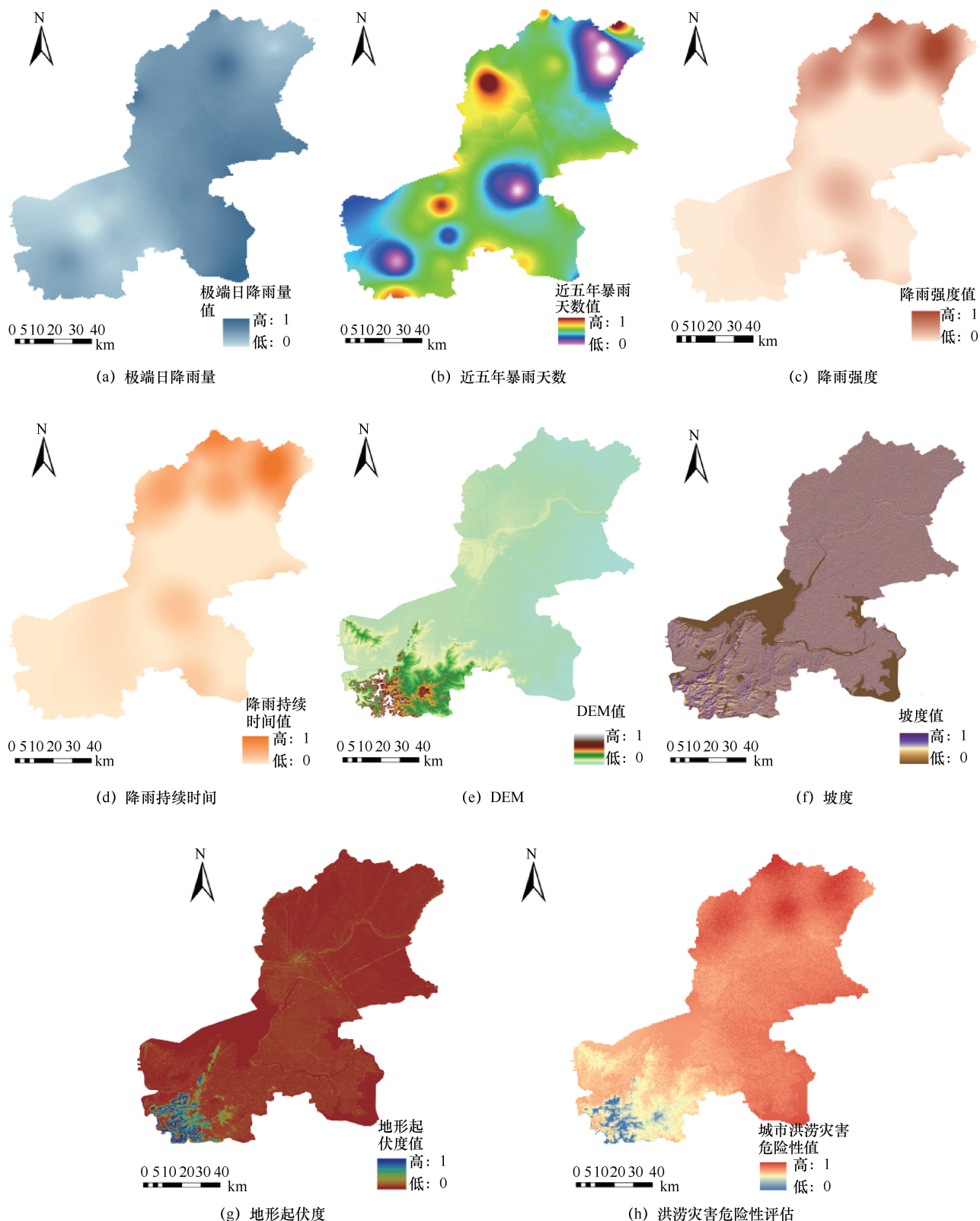


图 5 洪涝危险性分析

Fig. 5 Analysis of flood hazard risk

强度由北向南逐步递减, 选取淮安市的高程数据, 经过 GIS 系统进行处理得到坡度、地形起伏度这两个数据。因此在进行叠加之后, 金湖县南部地区、清江浦区、淮阴区北部和涟水县西南地区的危险性较高, 在洪涝灾害应急管理过程中高度关注这些地区。

3.1.2 洪涝灾害暴露性评估

在“*H-E-V*”模型中, “*E*”指的是暴露性, 是受到洪涝灾害影响的风险要素之一, 城市的水文、建设情况等生态要素在进行洪涝灾害风险评估时存在不同的暴露风险。选取人口密度、体现排水能力的道路不透水层、距主要水河流系和土地利用类型四个指标来评估洪涝灾害暴露性。最后进行权重分配后叠加, 从图 6 中可以看出, 人口密度较高和淮安市大部分河流水系缓冲区较近的区域暴露性最高, 其中, 清江浦区、淮安区东部、涟水县西北和东北部分区域、盱眙县四山湖及圣山湖周围等存在较高的灾害暴

露性。

3.1.3 洪涝灾害脆弱性评估

“*V*”在框架中指脆弱性, 目前的研究中洪涝灾害的脆弱性评估涉及多个方面, 没有统一规定, 一般多指社会、经济等方面的指标因子。本文选取归一化植被指数(*NDVI*)和地均 GDP 两个关键指标。经过数据归一化和叠加分析, 最终形成了脆弱性综合评估结果(见图 7)。从结果来看, 清江浦区在脆弱性评估中得分最高。涟水县南部等地区也存在较高的脆弱性。总体而言, 淮安市各区的脆弱性存在明显差异, 区域分布不均衡, 部分区域对洪涝灾害的抵御能力较弱。

3.2 洪涝灾害 *H-E-V* 框架综合风险评估

淮安市的城市洪涝灾害风险是危险性、暴露性和脆弱性共同作用的结果。本研究采用随机森林算法和层次分析法进行赋重, 得到的综合风险评估结果如图 8 所示。利用自然间断法(*Jenks*)划分低、较低、

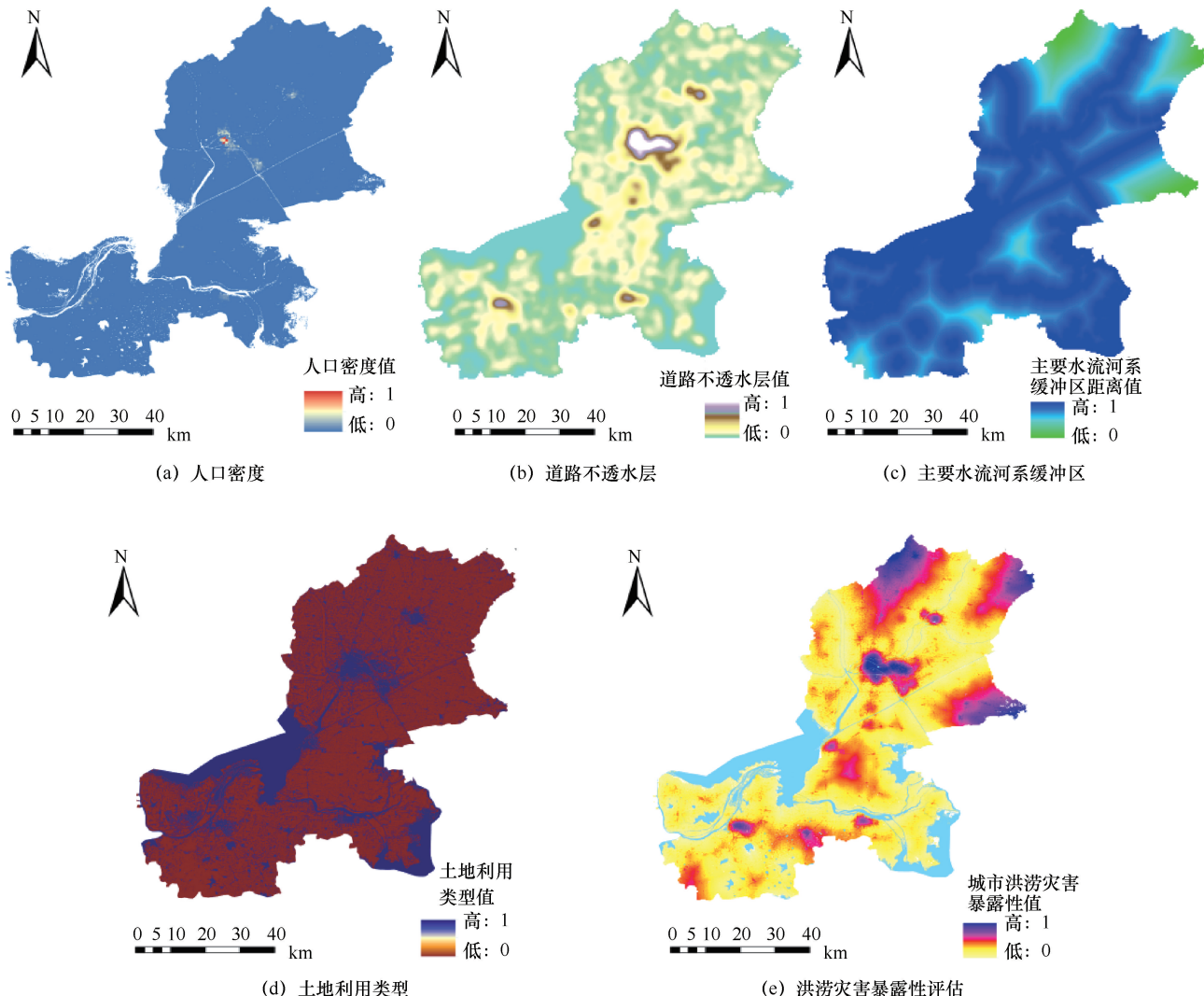


图 6 洪涝暴露性评估

Fig. 6 Assessment of flood exposure

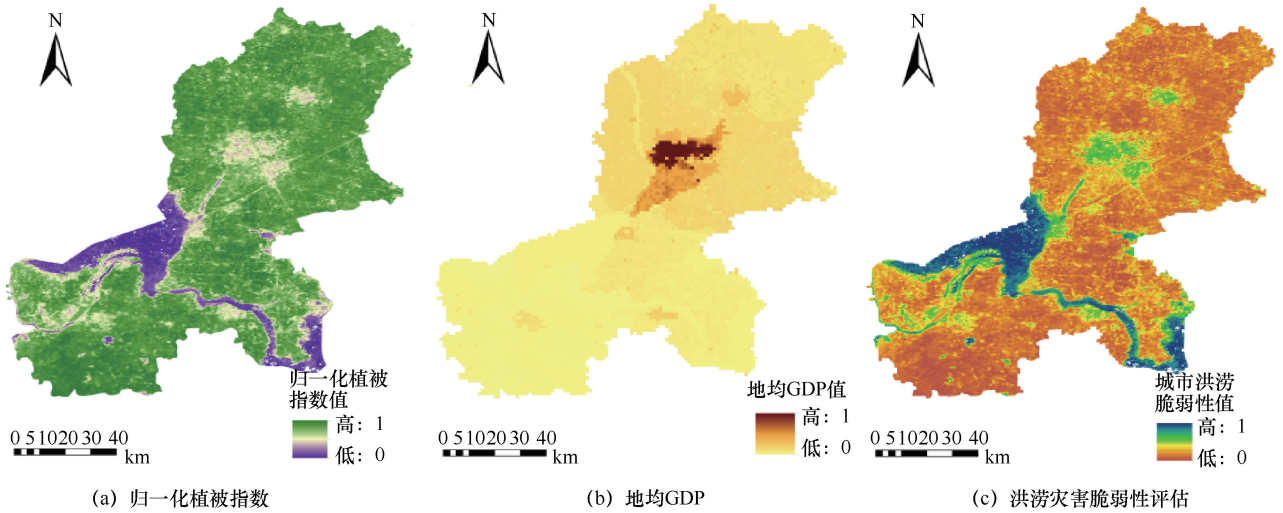


图 7 洪涝脆弱性评估

Fig. 7 Assessment of flood vulnerability

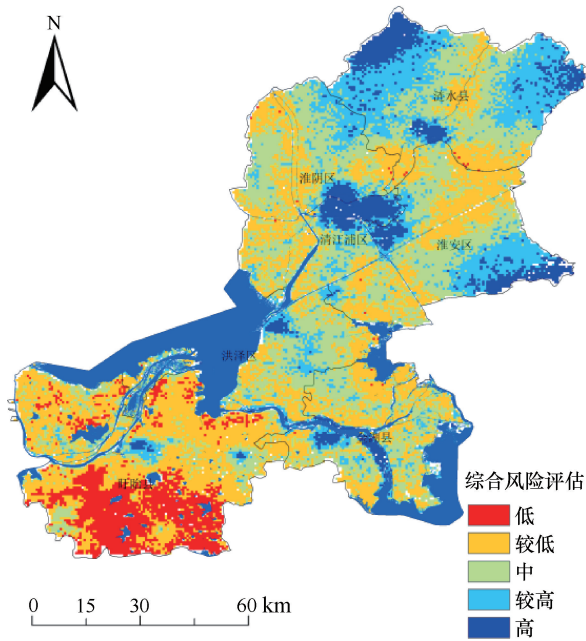


图 8 洪涝灾害风险综合评估

Fig. 8 Comprehensive assessment of flood disaster risk

中、较高和高的风险区, 该方法通过最大化每个区间内值的同质性、最小化区间的差异, 能够很好地处理具有不均匀分布的风险数据, 能够清晰地反映风险的空间异质性。低风险指洪涝发生的可能性低, 通常发生在地势较高、植被覆盖较好、暴露度和脆弱性较低的区域, 中风险区风险较为平均, 可能具备中等程度的暴露度或脆弱性, 但由于水文条件、地形等因素, 仍可能面临一定风险。高风险区通常指洪涝频繁发生、暴露度和脆弱性较高的区域, 如人口密集、地均 GDP 较高、主要水体附近的低洼地区。总体来看,

淮安市的洪涝灾害综合风险呈现出东部高、西部低的分布趋势, 这与该市主要河流和水系的布局密切相关。由于地势本身东低西高, 除紧邻主要河流和水系的区域外, 清江浦区为城市洪涝灾害的高风险地区。这不仅因为该区的植被覆盖率较低, 更由于其人口密度大、地均 GDP 高, 脆弱性水平显著。当洪涝灾害发生时, 损失可能较为严重。此外, 涟水县西北、东部地区和淮安区的东南部分地区危险性较高, 被划分为高风险区域。从整体来看, 洪泽湖、高邮湖、淮河及三河等主要河流水系周边区域均为高风险地带。针对以上研究给出以下防洪建议: (1) 清江浦区应强化应急响应能力; 建立专门的应急管理团队, 负责洪涝灾害的快速响应和资源调配; 完善排水系统; 升级和维护排水设施, 确保在暴雨期间迅速排水, 减少内涝风险。(2) 涟水县西北和东部地区应实施风险评估与监测, 定期进行洪涝风险评估, 建立监测系统, 确保信息及时传递; 建设防洪设施, 修建防洪堤坝和蓄洪区, 以减少洪水对居民和基础设施的影响。(3) 洪泽湖、高邮湖及淮河周边应建立综合防洪体系, 整合周边地区的防洪资源, 形成跨区域的联防机制, 提高整体防洪能力; 生态恢复和管理方面, 维护湿地和植被, 增强自然的防洪能力, 减缓洪水流速; 最后加强公众教育和社区参与以及应急预案系统的建设。

4 结果讨论

4.1 评估结果验证

为了验证研究的准确性和合理性, 网络爬取了淮安市近几年的洪涝灾害点 (见图 9), 2018 年 7 月淮安区的暴雨期间出现严重积水, 2020 年南

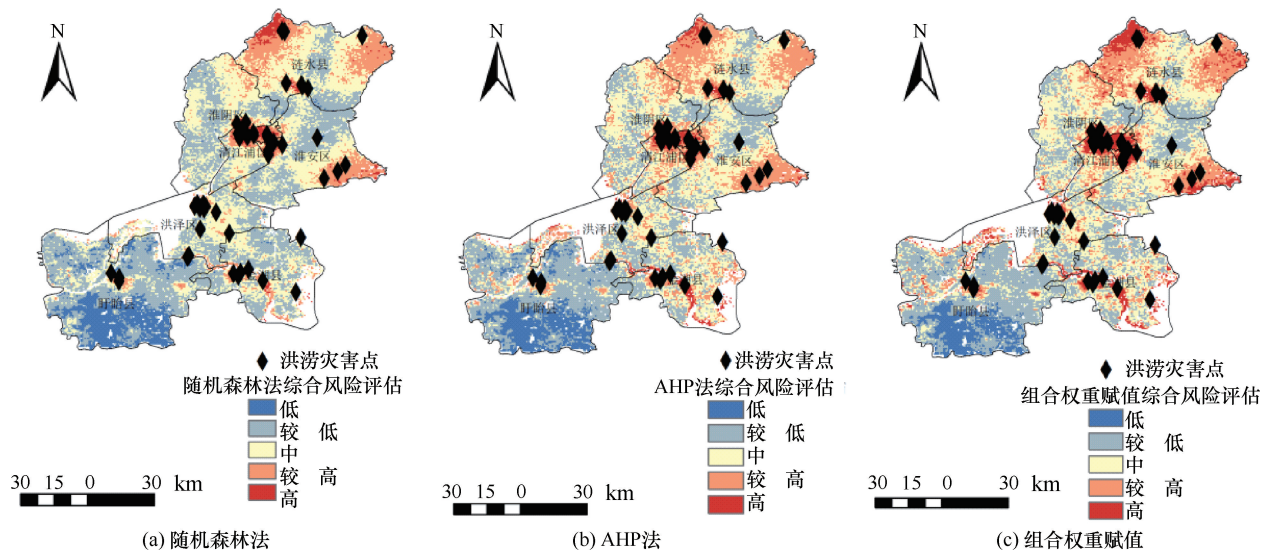


图9 三种方法灾害点对比

Fig. 9 Comparison of disaster points from three methods

表4 极端灾害点占各风险区百分比

Table 4 Percentage of extreme disaster points in each risk zone

风险区等级	随机森林 客观数量	随机森林 客观占比/%	层级分析法 主观数量	层级分析法 主观占比/%	极端灾害点组合 权重数量	极端灾害点 组合权重占比/%
较高及高风险区	39	78	42	84	44	88
总计	50	100	50	100	50	100

方洪水事件中, 清江浦区、淮阴区和淮安经济技术开发区出现了严重内涝, 多处街道出现积水严重, 2021年夏季暴雨期间洪泽区和盱眙县因强降雨导致内涝, 特别是靠近河流区域。2021年清江浦区和涟水县也出现内涝现象, 2023年7月和8月, 因受台风“杜苏芮”影响, 淮安市区及周边多个地点出现极端降水, 引发城市内涝, 同样清江浦区部分街道积水严重, 影响了交通及居民生活。将收集的近几年的极端灾害点与灾害风险等级图进行叠加, 计算落入各风险区中灾害点的数量与百分比(见表4), 量化评估结果的精度。

由实际调查结果验证所得, 78%的灾害点位于随机森林算法客观权重确定的风险等级规划中, 84%的灾害点位于层次分析法主观权重确定的风险等级规划中, 88%的在灾害点位于组合权重的较高及高的风险规划等级中, 显然组合赋重的风险评估准确率高于二者, 验证了该模型及风险评估等级的可靠性和准确性。

4.2 讨论

本文提出的城市洪涝灾害风险评估方法改善了传统洪涝灾害评估在指标赋权、数据收集、以及评估结果精细化表达等方面的不足, 能够在有效评估

淮安市洪涝灾害风险的同时保持较高的准确性。此外, 本文在构建城市洪涝灾害风险评估框架方面有所创新, 采用了基于 IPCC 的城市洪涝风险评估框架“危险性 (Hazard) - 暴露性 (Exposure) - 脆弱性 (Vulnerability)”, 即“*H-E-V*”的三维框架, 体现了不同洪涝灾害因子对结果的综合影响。

在同等的研究中, 熊凡等^[6]和郑德凤等^[31]等利用比较普遍的 AHP-熵权法相结合的主、客观权重基于 GIS 对区域进行洪涝灾害风险评估, 该模型用于洪涝灾害风险评估相对比较简单, 且对数据的依赖性较高。王德运等^[24]和林奕晨等^[25]等基于机器学习算法的城市洪涝灾害风险评估, XGBoost 赋权方法自动化程度高, 适合数据量大、特征复杂的场景, 但模型解释性较差。而随机森林算法是一种基于决策树的集成学习方法, 能通过树的分裂机制有效捕捉复杂关系并具有内置的变量重要性评估功能。本文方法在主客观结合、专家参与下具有较好的解释性, 适合洪涝灾害评估需要明确解释的应用场景。

然而, 本文研究同样也存在不足及发展空间, 首先, 在后续的洪涝灾害风险评估过程中需要纳入气候变化、城市化进程和防洪措施等相关因素将有助于进行更全面的多因素综合分析。其次, 哨兵二号的数据

存在时间周期长和分辨率低等限制性缺点, 后续需要采用分辨率更高的数据进行处理, 对更加精细化的区域进行洪涝灾害风险评估。例如, 可以引入高分辨率的遥感卫星数据, 如 WorldView 或 GeoIQ, 提供更详细的地表信息。此外, 利用 Landsat 数据的长期时间序列, 有助于分析洪涝变化趋势。同时, 整合气象站的逐小时降水数据和高精度的 LiDAR 地形数据, 将增强对水流和积水区域的分析能力。另外在收集的数据中, CHIRPS 逐日降水数据集的分辨率太低可能与实际的降水情况有所差异, 最后, 采用网络爬取的极端暴雨点进行评估验证, 数据点可能有所遗漏。希望在以后的小尺度的洪涝灾害风险评估中能更好的解决以上问题。

5 结论

本文以淮安市为研究区域, 基于哨兵二号数据与 GIS 系统, 结合随机森林算法和层次分析法对其洪涝灾害进行了精细化评估和区划, 为城市防洪提供了有力支撑, 得出以下结论。

(1) 赋重方法可行性: 通过随机森林算法计算的客观权重与层次分析法得到的主观权重具有较高一致性, Kendall 协调系数为 0.145 6, 验证了两者的组合具有科学合理性, 能够有效提高洪涝灾害风险评估的精度。

(2) 风险分布特点: 研究结果表明, 淮安市洪涝灾害风险呈现东高西低的分布特征, 且与主要河流及水系的分布密切相关。高风险区域集中在清江浦区、涟水县西北、东部地区和淮安区的东南部, 这些区域的人口密度较高。此外, 暴露性与脆弱性这两个因素的影响作用显著大于危险性, 特别是在主要河流水系及高人口密度区域, 暴露性和脆弱性指标的贡献更为突出。

(3) 风险评估验证精度: 利用历史极端洪涝事件进行验证, 88% 的极端灾害点位于高风险区域, 表明评估结果具有较高的准确性和可靠性, 为未来防洪工作提供了数据支撑。

参考文献 (References):

- [1] 国务院灾害调查组. 灾害调查报告[R]. 北京: 应急管理部, 2022.
- Disaster Investigation Group of the State Council. Disaster Investigation Report [R]. Beijing: Ministry of Emergency Management, 2022.
- [2] 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.

- SONG Xiaomeng, XU Nantao, ZHANG Jianyun, et al. Urban flooding in China: current situation, causes and challenges [J]. progress in water science, 2024, 35(3): 357-373.
- [3] MARANZONI A, D'ORIO M, RIZZO C. Quantitative flood hazard assessment methods: A review [J]. Journal of Flood Risk Management, 2023, 16(1): e12855.
- [4] 杨巨佳, 覃军, 李骁锐, 等. 长江中上游流域过去千年极端洪涝事件重建与分析[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(1): 201-213.
- YANG Jujia, QIN Jun, LI Xiaorui, et al. Reconstruction and analysis of extreme flood events in the middle and upper reaches of the Yangtze River basin in the past millennium [J]. Resources and Environment in the Yangtze River Basin, 2024, 33(1): 201-213.
- [5] VOJTEK M, VOJTEKOVÁ J. Flood hazard and flood risk assessment at the local spatial scale: a case study [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2016, 7(6): 1973-1992.
- [6] 宋晓猛, 徐楠涛, 董子然. 变化环境下城市洪涝风险评估与调控策略[J]. 水利发展研究, 2025, 25(1): 56-64, 85.
- SONG Xiaomeng, XU Nantao, DONG Ziran. Risk assessment and control strategies of urban flooding under changing environments [J]. Water Resources Development Research, 2025, 25(1): 56-64, 85.
- [7] 周紫蕊, 廖卫红, 雷晓辉, 等. 基于 InfoWorks ICM 的城市河网调控与分析: 以福州市仓山区龙津阳岐片区为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(4): 770-779.
- ZHOU Z R, LIAO W H, LEI X H, et al. InfoWorks ICM-based urban river network regulation and analysis: A case study of Longjin Yangqi area in Cangshan District, Fuzhou City [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(4): 770-779.
- [8] 贺玲, 陈佳川, 程春歌, 等. 长江经济带洪涝灾害社会脆弱性评价及时空分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(3): 24-39.
- HE Ling, CHEN Jiachuan, CHENG Chungge, et al. Assessment of social vulnerability to flood disasters in the Yangtze River Economic Belt and spatio-temporal analysis [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(3): 24-39.
- [9] 周妍, 白国营, 赵洪岩, 等. 分布式地表水-地下水耦合数值模型研究进展[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(3): 435-446.
- ZHOU Y, BAI G Y, ZHAO H Y, et al. Research advances in distributed coupled surface-subsurface numerical model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(3): 435-446.
- [10] COEUR D, LANG M. Use of documentary sources on past flood events for flood risk management and land planning [J]. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Série Geoscience, 2008, 340: 644-650.
- [11] DUTTA D, HERATH S, MUSIAKE K. A mathematical model for

- flood loss estimation [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 277: 24-49.
- [12] 陈述, 远维康, 颜克胜, 等. 融合多源数据的湖北省城市洪涝灾害韧性综合评估[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(3): 51-60.
CHEN Shu, YUAN Weikang, YAN Kesheng, et al. Comprehensive assessment of urban flood resilience in Hubei Province based on multisource data fusion [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(3): 51-60.
- [13] 王先伟, 宁亚洲, 方勇军, 等. 暴雨洪涝灾情快速监测评估技术框架体系与应用: 以 2022 年 6 月北江流域洪水灾情分析为例[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(3): 1-20.
WANG Xianwei, NING Yazhou, FANG Yongjun, et al. A technique framework and implementation for rapid survey and assessment of flood disasters: A case study in the North River Basin in June 2022[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(3): 1-20.
- [14] SINGHA C, RANA V K, PHAM Q B, et al. Integrating machine learning and geospatial data analysis for comprehensive flood hazard assessment [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, 31(35): 48497-48522.
- [15] 刘馨遥, 曾穗平, 田健. 基于“*H-E-V*”框架的洪涝灾害风险评估及韧性策略研究: 以天津市内六区为例[C]//中国城市规划学会. 2023 中国城市规划年会论文集(01 城市安全与防灾规划). 武汉: 中国城市规划学会, 2023: 261-269.
LIU Xinyao, ZENG Suiping, TIAN Jian. Research on flood disaster risk assessment and resilience strategy based on “*H-E-V*” framework: A case study of six districts in Tianjin [C]//Urban Planning Society of China. Proceedings of the 2023 China Urban Planning Annual Conference (1 Urban Safety and Disaster Prevention Planning). Wuhan: Urban Planning Society of China, 2023: 261-269.
- [16] 张会, 李铖, 程炯, 等. 基于“*H-E-V*”框架的城市洪涝风险评估研究进展[J]. *地理科学进展*, 2019, 38(2): 175-190.
ZHANG Hui, LI Cheng, CHENG Jiong, et al. Research progress on urban flood risk assessment based on “*H-E-V*” framework [J]. *Progress in Geoscience*, 2019, 38(2): 175-190.
- [17] WU Y N, ZHONG P A, ZHANG Y, et al. Integrated flood risk assessment and zonation method: A case study in Huaihe River Basin, China[J]. *Natural Hazards*, 2015, 78(1): 635-651.
- [18] 程朋根, 黄毅. 基于 AHP-熵权法的南昌市洪涝风险评估[J]. *人民长江*, 2021, 52(10): 18-25.
CHENG Penggen, HUANG Yi. Flood risk assessment in Nanchang City based on AHP-entropy weight method [J]. *Yangtze River*, 2021, 52(10): 18-25.
- [19] 叶瑞峰, 潘耀忠, 唐钰嫣, 等. 基于主成分分析的城市内涝灾害风险评估: 以杭州市临安区为例[J]. *杭州师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 21(3): 320-326.
YE Ruifeng, PAN Yaosheng, TANG Yuyan, et al. Risk assessment of urban waterlogging disaster based on principal component analysis: A case study of Lin'an District of Hangzhou [J]. *Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition)*, 2022, 21(3): 320-326.
- [20] 姬金雪, 王乐, 要威, 等. 基于 AHP-模糊综合评价法的蓄滞洪区可持续发展评价[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2024, 22(2): 299-308.
JI J X, WANG L, YAO W, et al. Evaluation of sustainable development of flood storage area based on AHP-fuzzy comprehensive evaluation method [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2024, 22(2): 299-308.
- [21] 尹志国, 牛发阳, 汤辉. 基于博弈论和后悔理论的城市洪涝灾害韧性评价: 以西安市为例[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(1): 74-87.
YIN Zhiguo, NIU Fayang, TANG Hui. Evaluation of urban flood disaster resilience based on game theory and regret theory: A case study of Xi'an [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(1): 74-87.
- [22] LUU C, VON MEDING J. A flood risk assessment of Quang Nam, Vietnam using spatial multicriteria decision analysis [J]. *Water*, 2018, 10: 461. <https://doi.org/10.3390/w10040461>.
- [23] 冯锋, 王育红, 左雨芳. 基于 RF-XGBoost 的土壤镉污染影响因子及空间分布研究[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(4): 811-819.
FENG Feng, WANG Yuhong, ZUO Yufang. Study on influencing factors and spatial distribution of cadmium pollution in soil based on RF-XGBoost [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(4): 811-819.
- [24] 郗婕, 傅微. 基于机器学习的流域尺度森林火灾灾害风险预测[J]. *自然灾害学报*, 2024, 33(1): 89-98.
XI Jie, FU Wei. Watershed-scale forest fire disaster risk prediction based on machine learning [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2024, 33(1): 89-98.
- [25] 韩帅兵, 苏成, 寇晓康, 等. 基于随机森林模型的山区铁路线暴雨洪灾风险评估: 以朔黄铁路原平段为例[J]. *地理与地理信息科学*, 2024, 40(2): 44-50.
HAN Shuaibing, SU Cheng, KOU Xiaokang, et al. Risk assessment of rainstorm and flood of mountain railway line based on random forest model: A case study of the Yuanping section of Shuohuang Railway [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2024, 40(2): 44-50.
- [26] 王德运, 张露丹, 吴祈, 等. 基于机器学习算法的洪涝灾害风险评估: 以宜昌市为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(8): 1710-1723.
WANG Deyun, ZHANG Ludan, WU Qi, et al. Flood Disaster Risk Assessment Based on Machine Learning Algorithm: A Case Study of Yichang City [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(8): 1710-1723.
- [27] 林奕晨, 周鹏, 潘悦, 等. 荆州市洪涝灾害影响因子探究及风险评估: 基于随机森林和 XGBoost 算法[J]. *中国农村水利水电*

- 电, 2022(6): 125-132.
- LIN Yichen, ZHOU Peng, PAN Yue, et al. Exploration and risk assessment of flood disasters in Jingzhou City: Based on random forest and XGBoost algorithm [J]. China Rural Water Resources and Hydropower, 2022(6): 125-132.
- [28] 王敬明, 王世新, 王福涛, 等. 基于 Sentinel-1 SAR 数据洪水淹没提取方法研究[J]. 灾害学, 2021, 36 (4): 214-220.
- WANG Jingming, WANG Shixin, WANG Futao, et al. Research on Flood Inundation Extraction Method Based on Sentinel-1 SAR Data [J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36 (4): 214-220.
- [29] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
- DENG Xue, LI Jiaming, ZENG Haojian, et al. Research on the analysis and application of analytic hierarchy process weight calculation method[J]. Practice and Understanding of Mathematics, 2012, 42(7): 93-100.
- [30] 熊凡, 李沛鸿, 袁逸敏, 等. 基于 GIS 和组合赋权的城市洪涝灾害风险评估[J]. 人民长江, 2023, 54(8): 60-66.
- XIONG Fan, LI Peihong, YUAN Yimin, et al. Urban flood disaster risk assessment based on GIS and combination empowerment [J]. Yangtze River, 2023, 54(8): 60-66.
- [31] 张真真, 单延功, 陈家栋, 等. 南京市水资源脆弱性动态变化及驱动因素分析[J]. 水利发展研究, 2022, 22(3): 62-68.
- ZHANG Zhenzhen, SHAN Yangong, CHEN Jiadong, et al. Analysis of dynamic change and driving factors of water resources vulnerability in Nanjing City[J]. Water Resources Development Research, 2022, 22(3): 62-68.
- [32] 胡江, 叶伟, 马福恒. 长距离调水工程安全风险综合评估[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(3): 417-426.
- HU J, YE W, MA F H. Comprehensive risks assessment of engineering safety for long-distance water transfer projects[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(3): 417-426.

(责任编辑 王海锋)