暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

湖北省高速公路暴雨致灾风险评估与区划

贺莉微 何明琼 唐永兰 鲁静 王雅新 蔡德攀

Risk assessment and zonation of rainstorm-induced disasters on expressways in Hubei Province

HE Liwei，HE Mingqiong，TANG Yonglan，LU Jing，WANG Yaxin，CAI Depan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2025-091

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

FY-4A卫星夜间大雾识别及其在高速公路服务应用中的潜力分析

Night heavy fog identification based on FY-4A satellite and its potential analysis in the service of expressway

暴雨灾害. 2021, 40(2): 190-200 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.02.011

杭金衢高速公路交通事故与气象条件的关系

The relationship between traffic accidents and meteorological conditionson the Hang-Jinqu highway

暴雨灾害. 2020, 39(3): 312-316 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.03.013

基于GIS的安徽省雷电致灾危险性评估与区划

Assessment and zoning of lightning disaster-causing hazards in Anhui Province based on GIS

暴雨灾害. 2024, 43(6): 733-740 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-186

基于改进层次分析法的湖北省雷电灾害风险区划

Risk zoning of lightning disaster in Hubei Province based on improved analytic hierarchy process

暴雨灾害. 2023, 42(1): 88-96 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-185

基于地形订正技术的安徽冰雹灾害风险区划

Risk zoning of hail disaster in Anhui Province based on terrain correction technology

暴雨灾害. 2023, 42(5): 606-612 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-021

基于风雨综合指数的安徽省台风灾害房屋风险评估方法

Risk assessment method of housing damage by typhoon disaster based on comprehensive wind and rain intensity index in Anhui Province

暴雨灾害. 2024, 43(3): 363-370 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-073

关注微信公众号，获得更多资讯信息

贺莉微,何明琼,唐永兰,等.2026.湖北省高速公路暴雨致灾风险评估与区划[J].暴雨灾害,45(2):297−304. HE Liwei, HE Mingqiong, TANG Yonglan, et al. 2026. Risk assessment and zonation of rainstorm-induced disasters on expressways in Hubei Province [J]. Torrential Rain and Disasters,45(2):297−304 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025−091

湖北省高速公路暴雨致灾风险评估与区划

贺莉微[1],何明琼[1],唐永兰[2],鲁静[1],王雅新[1],蔡德攀[1]

(1. 湖北省气象服务中心, 武汉 430205; 2. 中国气象局武汉暴雨研究所 全国暴雨研究中心/中国气象局流域强降水重点开放实验室/暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430205)

摘　要: 做好暴雨致灾风险区划有利于主动防控和应对灾害,为防御高速公路水毁灾害提供技术支撑。基于湖北省高速公路沿线 2003—2024 年 81 个国家级气象观测站及 2017—2024 年 202 个省级气象观测站逐时降水资料、2016—2024 年湖北省高速公路沿线水毁信息以及数字高程 DEM (Digital Elevation Model)、坡度、坡向、地层岩性等多源资料,首先分析了湖北省高速公路水毁灾害分布特征;然后,选取暴雨致灾危险性和孕灾环境敏感性指标因子,利用层次分析法确定各指标因子权重,计算湖北省高速公路暴雨致灾综合风险指数并开展综合风险区划;最后,利用水毁灾情实况对区划结果进行检验。结果表明:(1) 湖北省高速公路水毁灾害主要分布在鄂西南、鄂东南、鄂西北和鄂东北地区,江汉平原高速公路较少出现水毁灾害;鄂东南和鄂东北地区水毁以积水为主,占比 56.5%;鄂西南和鄂西北地区水毁以滑坡为主,占比 61.7%。(2) 湖北省高速公路暴雨致灾风险呈东部和西南部高、北部和中部低的分布特征,高风险区位于东部的咸宁、天门、仙桃及西南部的恩施、宜昌境内高速公路,鄂西北、武汉市骨干道路、荆门市和黄冈市南部高速公路为低风险区。(3) 根据 2016—2024 年湖北省高速公路沿线 108 个水毁信息对区划结果进行验证,鄂东南、鄂西南以及鄂东北部分地区次低及以上等级的灾害发生占比为 71.3%。此区划结果对湖北省高速公路暴雨致灾风险具有较好的指示作用。

关键词: 暴雨;高速公路;水毁灾害;风险区划

中图法分类号: U418.5; TP79　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2025−091

Risk assessment and zonation of rainstorm-induced disasters on expressways in Hubei Province

HE Liwei[1], HE Mingqiong[1], TANG Yonglan[2], LU Jing[1], WANG Yaxin[1], CAI Depan[1]

(1. *Hubei Meteorological Service Center*, *Wuhan* 430205; 2. *Heavy Rainfall Research Center of China/China Meteorological Administration Basin Heavy Rainfall Key Laboratory/Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research*, *Institute of Heavy Rain*, *China Meteorological Administration*, *Wuhan* 430205)

Abstract: Rainstorm-induced disaster risk zonation facilitates proactive prevention and provides technical support for the defense against highway water-related damages. Based on hourly precipitation data from 81 national-level meteorological observation stations (2003–2024) and 202 provincial-level meteorological observation stations (2017-2024) along highways in Hubei Province, water damage information, and digital elevation model (DEM), slope, aspect, and lithology, this study first analyzed the distribution characteristics of water damage disasters on the expressways in Hubei Province. Then, indicator factors for rainstorm-induced hazard risk and disaster-pregnant environment sensitivity were selected, determined the weight of each indicator using the Analytic Hierarchy Process (AHP), calculated a rainstorm-induced disaster comprehensive risk index for expressways in Hubei Province and conduct comprehensive risk zonation. Finally, the zoning results were verified using the actual water damage disaster situation. The results are as follows. (1) Water-related for expressways damages in Hubei Province are mainly distributed in the southwestern, southeastern, northwestern, and northeastern regions, while the Jianghan Plain experiences fewer highway water-related damages. In the southeastern and northeastern regions, waterlogging dominates, accounting for 56.5%, whereas in the southwestern and northwestern regions, landslides are the primary

收稿日期: 2025−05−14; **定稿日期**: 2025−11−06

资助项目: 中国气象局气象能力提升联合研究专项 (23NLTSZ009); 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2025J071); 武汉市气象科技联合项目 (2023020201010579); 全国暴雨研究开放基金项目 (BYKJ2025D01)

第一作者: 贺莉微,主要从事气象服务技术研究。E-mail: 616664366@qq.com

通信作者: 何明琼,主要从事气象服务技术研究。E-mail: 25450278@qq.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

form of damage, accounting for 61.7%. (2) The rainstorm-induced hazard of expressways in Hubei Province is characterized by high levels in the east and southwest, and low levels in the north and central regions. High-hazard areas are located on highways in Xianning, Tianmen, Xiantao (eastern Hubei) and Enshi, Yichang (southwestern Hubei), while low-hazard areas include northwestern Hubei, trunk roads in Wuhan, Jingmen and southern Huanggang. (3) The zoning results were validated using 108 rainstorm-induced disaster cases from water damage disasters along expressways in Hubei Province (2016-2024). The analysis revealed that areas classified as sub-low risk or higher in southeastern, southwestern, and parts of northeastern Hubei accounted for 71.3% of disaster occurrences. The zoning results have a relatively good indicative effect to highways rainstorm-induced disaster risk in Hubei Province.

Key words: rainstorm; expressway; water damage disaster; risk zoning

引　言

暴雨等强降水天气是引发高速公路水毁灾害的重要因素。高速公路水毁是指由水力作用 (如冲刷、浸泡、水流冲击) 引发的高速公路交通基础设施功能失效。此外, 暴雨还可引发滑坡、泥石流、山洪、积水等次生灾害, 导致高速公路构筑物损毁、交通阻断及交通事故增多, 对高速公路通行有明显不利影响, 给交通运输带来严重威胁 (张利和汪林, 2011; 顾婷婷等, 2018; Lin and Wang, 2018)。有研究显示, 中国是遭受滑坡灾害最严重的国家之一 (Lin et al., 2017)。暴雨还是诱发边坡失稳的主要因素之一 (李天宝等, 2020)。暴雨期间快速积聚的降水使地表水流量急剧增加, 从而导致边坡失稳并引发滑坡 (蔡小东, 2025)。暴雨造成的高速公路水毁灾害如河南“7·20”特大暴雨引发严重洪涝灾害, 造成公路等交通中断, 其中郑州周边高速公路 75 个路段、2 630 处发生水毁 (曾培培, 2024)。2021 年雅西高速公路因暴雨引发山体滑坡, 部分路段被掩埋, 交通中断多日。暴雨造成的高速公路水毁事件越来越受到各级政府、交通管理部门及社会公众关注, 加强高速公路暴雨致灾风险区划研究、为高速公路水毁灾害防御提供技术支撑是急需开展的工作。

暴雨致灾的危险性评价是暴雨风险评价的重要环节。宋怡轩等 (2023) 从暴雨洪涝致灾因子的危险性、孕灾环境的敏感性、承灾体的脆弱性和防灾减灾能力等方面, 建立暴雨洪涝灾害综合风险评估模型; 王芬等 (2023) 基于湖北孝感市的一次暴雨过程开展危险性评估与分析, 并对评估结果与实际灾情进行验证; 王妮等 (2024)针对新疆不同区域暴雨致灾危险性, 分析总体空间分布特征; 林昕等 (2025) 利用相关系数赋权法计算非台风暴雨和台风暴雨的致灾因子权重系数, 并采用综合指数法开展非台风暴雨致灾危险性评估和检验。高速公路暴雨致灾风险区划是高速公路气象灾害风险评价的重要组成部分, 它显示了潜在水毁破坏的区域、程度, 并实现灾害风险评估 (Nanda et al., 2023; 林沛文等, 2024)。近年来, 学者们在高速公路强降雨灾害区划方面进行了相关研究, 杜建华等 (2020) 开展了 G98 海南环岛高速公路强降雨灾害风险分析, 构建了海南环岛高速公路强降雨气象灾害区划指数模型, 得到环岛高速公路强降雨气象灾害的客观风险空间分布, 指出定安—万宁路段是强降雨高风险路段; 马蕾等 (2022) 和雍佳等 (2023) 开展了宁夏高速公路强降雨灾害风险区划, 指出该高速公路强降雨灾害风险存在北低南高的地域分布特征; 顾婷婷 (2018)等基于层次分析法和专家打分法建立了浙江高速公路强降雨灾害风险区划, 指出浙江高速公路强降雨灾害高风险区主要分布在浙东南沿海地区及西部山区境内的高速路段。已有的高速公路暴雨灾害区划研究以单一线路居多, 针对全省高速公路开展暴雨致灾风险区划的研究仍然不足, 而湖北省高速公路暴雨致灾风险区划还未见相关研究成果。

湖北省素有“九省通衢”、“祖国立交桥”之称, 高速公路四通八达, 是我国重要的交通枢纽。湖北省处于亚热带季风气候区, 年平均降水量 1 200 mm 左右, 且暴雨频发, 尤其梅雨期短时强降水现象突出, 是引发高速公路水毁灾害的主要致灾因子。同时, 湖北省境内地形复杂, 涵盖山地、丘陵和平原, 其中西部山地极易出现山洪、泥石流等次生灾害。通过暴雨致灾风险区划研究, 可以识别高风险区域, 评估灾害发生的可能性和影响范围, 从而为公路规划、灾害预警和应急管理提供科学依据。

本文利用湖北省高速公路沿线气象站降水、地理信息、地层岩性、水毁信息等多源资料, 首先分析了湖北省高速公路水毁灾害分布特征; 然后参照《气象灾害风险评估与区划方法》(章国材, 2010) 的技术方法, 基于层次分析法、专家打分法和加权综合评价法, 从暴雨致灾危险性和孕灾环境敏感性等方面构建湖北省高速公路暴雨致灾风险评估模型并进行综合风险区划; 最后利用水毁灾害实况信息对区划结果进行检验。本文旨在识别湖北省高速公路暴雨致灾关键风险区域, 为湖北省高速公路的暴雨灾害风险管理、科学选线与应急决策提供参考依据与实践指导。

1 研究区概况及高速公路水毁灾害分布

湖北省三面环山, 中间低平, 西部以山地和丘陵为主, 东部和南部多低山丘陵, 中部为江汉平原, 地势平坦, 复杂的地形使得全省许多高速公路需穿越山地丘陵区。复杂的气象条件与地貌组合显著提升了高速公路的灾害风险。比如暴雨易在山区诱发山洪、滑坡和泥石流, 导致路基损毁、边坡坍塌; 在平原区则可能引发内涝, 造成桥涵淤塞、路面淹没。图 1 为湖北省 2016—2024 年高速公路沿线 108 个水毁灾害点与地形叠加图, 可见湖北省高速公路水毁灾害点 (积水和滑坡) 主要分布在鄂西南、鄂东南、鄂西北和鄂东北地区, 发生概率分别为 40.7%、30.6%、15.7% 和 13.0%。鄂东南和鄂东北地区水毁以积水为主, 占比为 56.5%, 鄂西南和鄂西北地区水毁以滑坡为主, 占比为 61.7%。中部地区 (即江汉平原) 的高速公路较少发生水毁灾害。

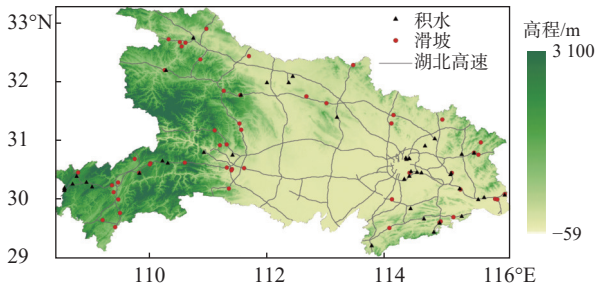


图 1 2016—2024 年湖北省高速公路沿线 108 个水毁灾害点及高程 (填色) 分布

Fig. 1 Distribution map of 108 flood-damage points along expressways and altitude (shaded) in Hubei Province between 2016–2024

2 资料与方法

2.1 资料说明

本文所用资料包括: (1) 湖北省高速公路沿线 2003—2024 年 81 个国家级气象观测站 (以下简称国家站) 及 2017—2024 年 202 个省级气象观测站 (以下简称交通站) 逐时降水资料, 来源于气象大数据云平台“天擎”, 并由该平台进行了质量控制, 用于暴雨致灾危险性相关指标因子的计算, 站点位置如图 2 所示。(2) 湖北省 DEM (Digital Elevation Model) 高程数据, 空间分辨率 25 m, 来源于标准地图服务系统 (http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/); 湖北省高速公路路段信息, 来源于湖北省公路事业发展中心; 湖北省地质结构信息, 包含酸性深成岩、酸性火山岩、基性深成岩、基性火山岩、碳酸盐沉积岩、中性深成岩、中性火山岩、变质岩、混合沉积岩、火山碎屑岩、硅质碎屑沉积岩、松散沉积物等, 来源于湖北省自然资源厅第一次国土资源普查办公室。以上数据用于孕灾环境敏感性相关指标因子的计算。(3) 2016—2024 年湖北省高速公路沿线水毁实例,来源于湖北省公路事业发展中心, 用于分析湖北省高速公路水毁分布及综合风险区划结果的验证。

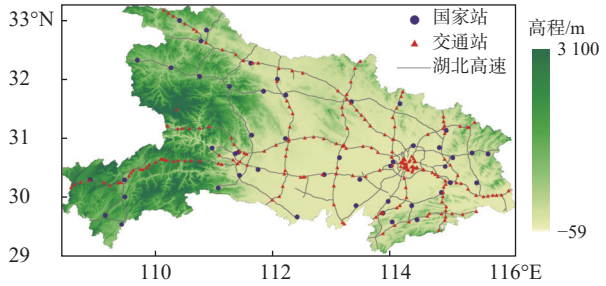


图 2 湖北省高速公路沿线国家站 (三角) 和交通站 (圆点) 及高程 (填色) 图

Fig. 2 Map of national meteorological stations (triangles), traffic meteorological stations (dots) along expressways and altitude (shaded) in Hubei Province

2.2 研究方法

为了对湖北省高速公路暴雨致灾风险进行评估和区划, 选取暴雨致灾危险性和孕灾环境敏感性等指标因子, 基于层次分析法 (Lipovetsky, 2021) 和专家打分法构建评估模型, 并开展高速公路暴雨致灾风险区划研究。

2.2.1 评估指标归一化

在建立高速公路暴雨致灾风险评估模型的过程中, 为了消除各指标因子之间的量纲差异, 对每个指标因子进行归一化处理 (朱卫浩等, 2016; 尹晓东等, 2018; 朱浩等, 2024), 公式如下

$$D_i = 0.5 + 0.5 \times \frac{A_i - A_{\min}}{A_{\max} - A_{\min}} \tag{1}$$

式中, D_i 是第 i 个指标因子的归一化值, A_i 是第 i 个评价指标值, $A_{\max}$ 和 $A_{\min}$ 分别为第 i 个指标因子值中的最大值和最小值。

2.2.2 层次分析法

本文利用层次分析法, 将复杂问题分解为层次结构, 分为目标层、准则层和方案层 (图 3), 通过两两比较构造判断矩阵, 计算权重向量, 进行一致性检验, 确保判断合理性, 最终得出方案层对总目标的综合权重, 开展多准则决策。

2.2.3 指标因子选取

图 3 给出了湖北省高速公路暴雨致灾风险评估与区划流程, 分别选取暴雨致灾危险性和孕灾环境敏感性开展高速公路暴雨致灾风险区划研究, 并基于自然断点法将区划结果分为低、次低、次高和高等级:

(1) 暴雨致灾危险性。强降水是导致水毁灾害的重要因素, 其中, 暴雨量及暴雨持续时间是暴雨致灾

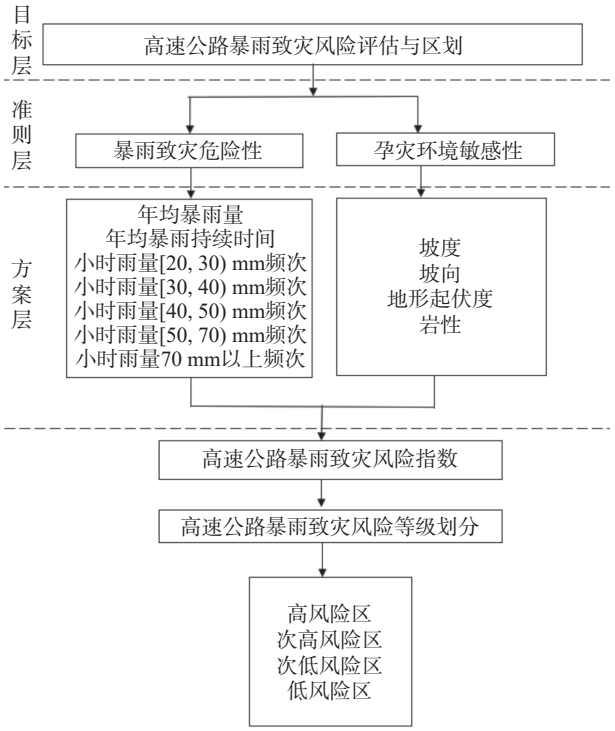


图 3 湖北省高速公路暴雨致灾风险评估与区划流程示意图

Fig. 3 Flowchart of risk assessment and zonation of rainstorm-induced disasters on expressways in Hubei Province

的重要指标, 小时雨量频次反映降雨强度 (崔新强等, 2018)。选取年均暴雨量、年均暴雨持续时间、小时雨量[20, 30) mm、[30, 40) mm、[40, 50) mm、[50, 70) mm 及 70 mm 以上频次等指标因子评估暴雨致灾危险性。

(2) 孕灾环境敏感性。选取坡度、坡向、地形起伏度、地层岩性等指标因子评估孕灾环境敏感性, 其中, 地形起伏度指区域内最高点海拔与最低点海拔高度的差值 (轩春怡等, 2020), DEM 高程影像分辨为 25 m, 地形起伏度为估算某网格与周边 3 个像元之间的最大高度差。坡度及坡向计算公式 (Horn, 1981) 如下

$$S_{\text{lope}} = \arctan\left(\sqrt{\left(\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}x}\right)^2+\left(\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}y}\right)^2}\right)\times\frac{180}{\pi} \tag{2}$$

$$A_{\text{spect}} = \arctan2\left(\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}y},-\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}x}\right)\times\frac{180}{\pi} \tag{3}$$

式中, S_{lope} 和 A_{spect} 分别表示坡度和坡向, $\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}y}$ 和 $\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}x}$ 分别表示垂直和水平方向的高程变化率。

根据湖北省地层岩性数据可知, 省内地层岩性分为酸性深成岩、酸性火山岩、基性深成岩、基性火山岩、碳酸盐沉积岩、中性深成岩、中性火山岩、变质岩、混合沉积岩、火山碎屑岩、硅质碎屑沉积岩、松散沉积物共 12 类。基于 ArcGIS 10 平台, 采用信息量法 (温鑫等, 2022), 将 2016—2024 年湖北省高速公路沿线 108 个水毁点与全省地层岩性信息两个图层数据进行空间叠加分析, 得到 108 个水毁点所在位置的地层岩性, 最后统计得到各地层岩性类别对水毁灾害的贡献率, 采用 1 分制专家打分法赋予等级分值 (表 1)。

表 1 湖北省高速公路沿线地层岩性指标分类及其等级分值

Table 1 Stratigraphic lithology index classification categories and associated rating scores

指标层	类别	贡献率/%	等级分值
地层岩性	酸性火山岩、基性深成岩、中性深成岩、中性火山岩	0	0.1
	酸性深成岩、基性深成岩、火山碎屑岩	[0, 10)	0.2
	碳酸盐沉积岩、变质岩、硅质碎屑沉积岩、松散沉积物	[10, 20)	0.3
	混合沉积岩	≥20	0.4

2.2.4 综合风险指数计算

从暴雨致灾危险性和孕灾环境敏感性两个方面计算湖北省高速公路暴雨致灾综合风险指数 (顾婷婷等, 2016), 公式如下

$$R=G_{\text{h}}\times V_1+G_{\text{e}}\times V_2 \tag{4}$$

式中, R 为综合风险指数, G_{h}、G_{e} 分别代表各指标因子权重系数, 根据层次分析法和专家打分法计算。V_1 代表暴雨致灾危险性, V_2 代表孕灾环境敏感性, 均采用下式计算

$$V_j=\sum_{i=1}^{n}(A_{ij}Q_{ij}) \tag{5}$$

式中, V_j 代表第 j 类指标因子区划指数, A_{ij} 为第 j 类第 i 个指标因子标准化值, Q_{ij} 为第 j 类第 i 个指标因子权重系数。

2.2.5 指标因子权重确定

基于层次分析法和专家打分法 (顾婷婷等, 2018), 确定各级指标因子权重系数 (表 2), 矩阵的一致性系数为 0.07, 即通过一致性检验。为确定权重系数, 征求了湖北省气象和交通部门多位专家的打分结果, 以最大限度保证权重系数的合理性。

3 结果与分析

基于 ArcGIS10 平台, 分别绘制湖北省高速公路暴雨致灾危险性、孕灾环境敏感性和综合风险区划图, 基于自然断点法将区划结果划分为 4 个等级, 即高风险、次高风险、次低风险和低风险。

表 2 湖北省高速公路暴雨致灾风险指标体系及权重分配

Table 2 Risk index system and weight allocation for rainstorm-induced disasters on expressways in Hubei Province

一级指标	二级指标	权重系数
暴雨致灾危险性 (0.699 1)	年均暴雨量	0.066 1
	年均暴雨持续时间	0.061 4
	小时雨量[20,30) mm频次	0.060 7
	小时雨量[30,40) mm频次	0.072 1
	小时雨量[40,50) mm频次	0.082 3
	小时雨量[50,70) mm频次	0.147 3
	小时雨量≧70 mm频次	0.209 2
孕灾环境敏感性 (0.300 9)	DEM	0.018 4
	坡度	0.038 4
	坡向	0.039 7
	地形起伏度	0.068 5
	地层岩性	0.135 9

注: 括号中的数字为权重系数。

3.1 暴雨致灾危险性

对于高速公路水毁现象而言, 不同强度暴雨是衡量高速公路受水毁影响轻重程度的一个最重要因素, 小时雨量频次则反映高速公路受降水影响的频繁程度。因此, 以年均暴雨量、小时雨量[20, 30) mm、[30, 40) mm、[40, 50) mm、[50, 70) mm 和 70 mm 以上频次作为暴雨致灾危险性的指标因子。从图 4a 可见, 年均暴雨量在空间分布上呈现东部和西南部多, 西北少的分布特征。年均暴雨量高值区位于武汉中部、黄石及鄂州大部、黄冈中部等地 (350~400 mm); 次高值区位于恩施南部、武汉、孝感、黄冈、鄂州、黄石、咸宁东北部等地 (300~350 mm)。从图 4b 可见, 小时雨量 70 mm 以上频次在空间分布上呈现东南部和西南部高, 其他地区低的分布特征。高值区位于咸宁东北部 (4.5~6.0 次), 次高值区位于咸宁东部 (3.0~4.5 次)。小时雨量[20, 30) mm、[30, 40) mm、[40, 50) mm、[50, 70)mm 频次的分布特征呈现出中东部和恩施南部部分地区多点大值区分布的特征 (图略)。图 4 高值区与图 1 中湖北省积水和滑坡实况点分布除鄂西北外, 其他基本吻合, 尤其是鄂东和鄂西南地区, 说明选取的指标因子能够很好地反映灾害发生的潜在概率和强度, 即暴雨致灾危险性的指标因子和高速公路暴雨致灾危险性具有较好的对应关系。

暴雨致灾危险性在评估和区划中起着核心作用, 它通过量化灾害触发因素的时空分布特征和潜在破坏力, 决定了灾害发生的概率和强度 (吴歆彦, 2014; 陈晶, 2016)。从图 5 可见, 湖北省高速公路暴雨致灾

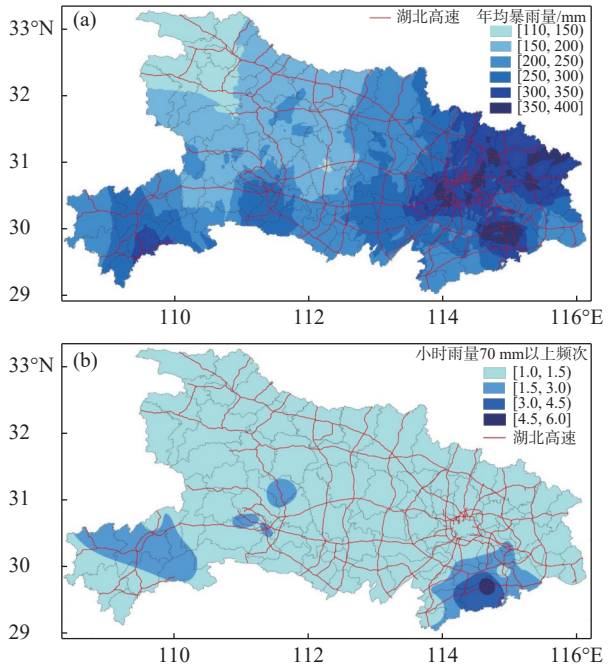


图 4 2003—2024 年湖北省年均暴雨量 (a) 和小时雨量 70 mm 以上频次 (b) 空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of (a) the annual average rainstorm precipitation and (b) the frequency of hourly rainfall exceeding 70 mm in Hubei Province from 2003 to 2024

危险性基本呈现出西北部低、中东部和西南地区高的分布特征。次高和高危险区主要位于恩施大部、宜昌中南部、荆门东部至荆州东部一带、孝感东部到咸宁一带; 低危险区主要位于鄂西北地区。其中, 杭瑞高速通山和崇阳段、京港澳高速咸宁段、咸通高速咸宁段、蕲嘉高速咸宁段、沪武高速英山段、许广高速天门和仙桃段、宜都境内的呼北高速和岳宜高速、沪渝高速恩施段、宜来高速鹤峰段为高危险区。

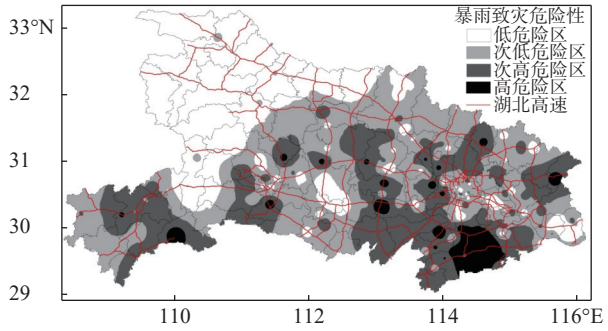


图 5 湖北省高速公路暴雨致灾危险性区划图

Fig. 5 Zoning map of rainstorm-induced disasters on expressways in Hubei Province

3.2 孕灾环境敏感性

孕灾环境敏感性在区划评估中反映了自然地理环境对灾害发生的潜在放大或削弱作用, 其通过分析地形坡度、岩土性质、地形起伏度等环境因子, 揭示特定区域在致灾因子作用下的灾害孕育能力 (吴

歆彦, 2014; 陈晶, 2016)。如陡坡、松散地层等敏感环境会显著增加滑坡风险, 而平坦坚实地层则降低风险。从图 6 可见, 湖北省高速公路暴雨致灾的孕灾环境敏感性基本呈现出西部山区、咸宁南部山区和大洪山附近危险性高, 省内其他地区危险性低的分布特征。其中, 沪渝高速恩施段及长阳和宜都北段、沪蓉高速宜昌和当阳段、呼北高速保康段及远安和当阳段、麻安高速竹溪和竹山段及南漳和保康段为高危险区。除此之外, 枣石高速钟祥段、沪蓉高速京山段、福银高速随州段、杭瑞高速通山段也为高危险区。

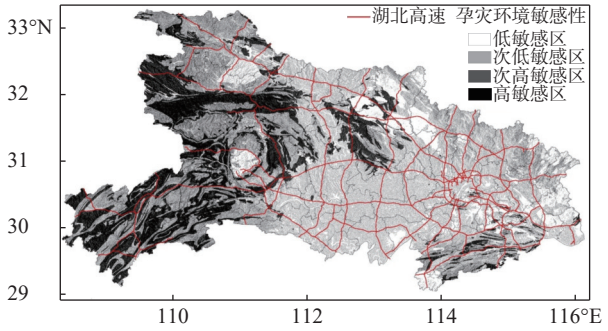


图 6 湖北省高速公路暴雨致灾的孕灾环境敏感性区划图

Fig. 6 Sensitivity zoning map of disaster-prone environment for rainstorm-induced hazards on expressways in Hubei Province

3.3 综合风险区划

基于湖北省高速公路暴雨致灾危险性和孕灾环境敏感性, 根据各指标因子的权重系数, 计算综合风险指数, 并绘制湖北省高速公路暴雨致灾风险区划图 (图 7)。可见湖北省高速公路暴雨致灾风险区划自西北向东南大致呈现出“低-次低-次高-高”的分布特征。其中东部地区咸宁境内的京港澳高速、蕲嘉高速和咸通高速, 以及杭瑞高速通山段为高风险区; 西部地区宜都境内的岳宜高速和呼北高速、呼北高速远安段的部分路段、宜来高速鹤峰段部分路段和沪渝高速恩施段部分路段为高风险区; 此外, 许广高速天门段和仙桃段的部分路段亦为高风险区。

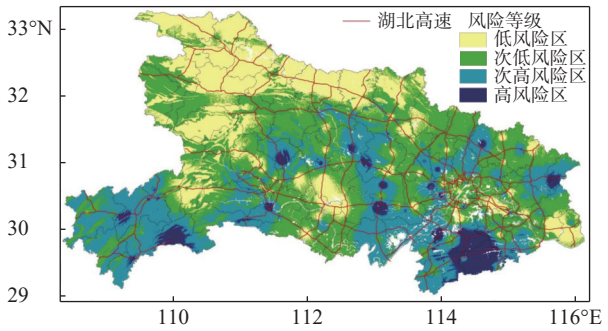


图 7 湖北省高速公路暴雨致灾风险区划图

Fig. 7 Comprehensive risk zoning map of highway water damage susceptibility in Hubei Province

综合风险区划结果大部分与图 1 中的灾害点分布吻合, 其中鄂西北大部分地区为低风险区, 可能原因是湖北的暴雨主要集中在中东部和鄂西南, 鄂西北年均暴雨量较低, 同时也受资料年限样本个数限制, 但是鄂西北孕灾环境敏感性却为次高风险区 (图 6), 因此, 在遭受极端降水时, 鄂西北地区高速公路暴雨致灾风险仍然很高; 武汉市骨干道路为次低风险区, 可能原因是武汉地势低平, 同时年均暴雨量较大, 部分地区城市管网设计老旧, 与日益庞大的排水需求不相匹配; 黄冈市南部地区为低风险区, 可能原因是受交通站资料年限限制, 导致该地区年均暴雨量较低, 因而区划结果与灾害点分布有所出入。

3.4 区划结果实例验证

结合图 1 及 2016—2024 年湖北省高速公路沿线 108 个强降水致灾个例, 对上述研究得到的综合风险区划结果进行验证, 验证结果见表 3。由图 7 可见, 高及次高风险区主要位于鄂东南、鄂西南以及鄂东北部分地区, 个例验证结果 (表 3) 显示上述地区高及次高风险性等级的总占比为 37.0%, 统计上述地区次低及以上等级的占比为 71.3%, 可见区划结果的次低及以上等级能够很好地显示大多数灾害发生的可能性, 具有一定的指示作用; 图 7 显示鄂西北地区为次低和低风险区, 再结合图 6 可知, 该地区在发生强降水时仍需重点关注; 图 7 显示江汉平原部分路段为高及次高风险区, 这可能与此处洪涝发生频率较高以及土壤类型有关, 目前受收集到灾情的资料限制, 无法对江汉平原地区做验证, 后续将继续收集资料来完善区划结果。

表 3 2016—2024 年湖北省高速公路沿线 108 个强降水致灾事件风险等级占比 (单位:%)

Table 3 Percentage composition of hazard severity grades levels for 108 rainstorm-induced disaster events along expressways in Hubei Province (2016—2024) (unit: %)

风险等级	鄂西南	鄂西北	鄂东南	鄂东北
高	0.9	/	3.7	0.9
次高	18.5	/	9.3	3.7
次低	15.7	6.5	12.0	6.5
低	5.6	9.3	5.6	1.9

注: “/”表示无强降水致灾事件发生。

综合上述验证结果可知, 计算得到的综合风险区划结果能够较好地反映湖北省高速公路暴雨致灾的危险等级, 尤其在鄂东南、鄂西南以及鄂东北地区, 区划结果具有一定的指示作用。

4 结论与讨论

本文基于湖北省 2003—2024 年 48 个国家级气象观测站及 2017—2024 年高速公路沿线 208 个交通气象站逐时降水以及数字高程 DEM、坡度、坡向、地质岩性、高速公路沿线水毁信息等多源资料, 采用层次分析法和专家打分法计算指标及各因子权重, 并计算湖北省高速公路暴雨致灾综合风险指数, 利用 GIS 平台绘制湖北省高速公路暴雨致灾风险区划图, 得到以下主要结论:

(1) 湖北省暴雨造成的水毁灾害主要分布在鄂西南、鄂东南、鄂西北和鄂东北地区, 发生概率分别为 40.7%、30.6%、15.7% 和 13.0%。鄂东南和鄂东北地区水毁灾害以积水为主, 占比为 56.5%, 鄂西南和鄂西北地区水毁灾害以滑坡为主, 占比为 61.7%。位于中部地区 (即江汉平原) 的高速公路较少发生水毁灾害。

(2) 按照高风险区、次高风险区、次低风险区和低风险区 4 个等级划分湖北省高速公路暴雨致灾风险区域, 高风险区位于湖北东部和西南部地区, 对应的高速公路为京港澳高速、蕲嘉高速和咸通高速咸宁段、杭瑞高速通山段、岳宜高速和呼北高速宜都段、呼北高速远安段、宜来高速鹤峰段、沪渝高速恩施段、许广高速天门段和仙桃段; 鄂西北、武汉市骨干道路、荆门市和黄冈市南部为低风险区。

(3) 根据省内 108 个暴雨致灾个例对区划结果进行验证, 鄂东南、鄂西南以及鄂东北部分地区次低及以上风险等级的灾害发生占比为 71.3%, 区划结果与水毁灾情实况基本吻合, 具有一定的暴雨致灾风险指示作用。

本研究建立的评估模型, 可为湖北省高速公路水毁灾害的重点区段识别与分级防控提供依据。然而, 由于所收集的 2016—2024 年高速公路水毁灾情资料在时空覆盖上可能存在不均, 导致综合风险区划结果对于某些极端致灾情景与局部脆弱环境的风险评估可能存在偏差。

此外, 为提升区划结果的稳健性与预测能力, 后续研究将致力于构建融合气象、地质、工程设施等多源信息的综合数据库。更重要的是, 未来工作需从“数据驱动”向“数据与物理机理融合”深化, 重点探索以下两个关键科学问题: 第一, 如何量化不同重现期暴雨与特定地质地形单元的耦合效应触发公路水毁, 其关乎降雨致灾阈值的精确判定; 第二, 如何将静态风险区划与短临降水预报动态耦合, 以发展业务化预警技术。该探索可推动风险管理从“静态评估”向“动态预警”转变, 从而为交通气象灾害防御提供技术支撑。

参考文献 (References):

蔡小东.2025.暴雨条件下赣南山区高速公路高边坡稳定性研究[J].价值工程,44(4):139−141. Cai X D. 2025. Study on the stability of high slope of expressway in mountainous area of southern Jiangxi under heavy rainfall conditions [J]. Value Engineering,44(4):139−141 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1006−4311.2025.04.041

陈晶.2016.黑龙江省气象灾害风险区划与灾害评估研究[D].兰州:兰州大学. Chen J. 2016. Risk zoning and disaster evaluation of meteorological disasters in Heilongjiang Province [D]. Lanzhou: Lanzhou University, (in Chinese)

崔新强,付佳,代娟,等.2018.基于 GIS 的沪汉蓉高铁线路暴雨灾害风险区划[J].气象科学,38(1):113−120. Cui X Q, Fu J, Dai J, et al. 2018. GIS-based rainstorm disaster risk zoning over Shanghai-Wuhan-Chengdu high-speed railway [J]. Journal of the Meteorological Sciences,38(1):113−120 (in Chinese). doi:10.3969/2017jms.0031

杜建华,郑虹晖,赵蕾,等.2020.海南环岛高速强降雨灾害风险分析[J].干旱气象,38(4):683−688. Du J H, Zheng H H, Zhao L, et al. 2020. Analysis on meteorological disaster risk of highway around Hainan Island caused by heavy rainfall [J]. Journal of Arid Meteorology, 38(4):683−688 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006−7639(2020)−04−0683

顾婷婷,邓闯,潘娅英,等.2018.基于模糊综合评价法的浙江省高速公路暴雨灾害风险评估[J].干旱气象,36(5):873−878. Gu T T, Deng C, Pan Y Y, et al. 2018. Risk division of rainstorm disasters on expressway in Zhejiang Province based on fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Journal of Arid Meteorology,36(5):873−878 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006−7639(2018)−05−0873

顾婷婷, 潘娅英, 骆月珍.2016.浙江省高速公路低温雨雪冰冻灾害风险评估与区划[J].气象与环境学报,32(3):102−106. Gu T T, Pan Y Y, Luo Y Z. 2016. Risk division and assessment of low-temperature, rain/snow and freezing disasters on highway in Zhejiang province [J]. Journal of Meteorology and Environment,32(3):102−106 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673−503X.2016.03.015

李天宝,许家培,刘开富.2020.降雨及植被加固对红黏土边坡稳定性的影响[J].山东农业大学学报 (自然科学版),51(6):1080−1084. Li T B, Xu J P, Liu K F. 2020. The effects of rainfall and vegetation reinforcement on stability of red clay slope [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition),51(6):1080−1084 (in Chinese). doi:10.3969/i.issn.1000−2324.2020.06.018

林沛文,何书,鲜木斯艳,等.2024.基于逻辑回归-模糊层次分析模型的公路沿线滑坡易发性评价[J].自然灾害学报,33(4):27−36. Lin P W, He S, Xian M S Y, et al. 2024. Landslide susceptibility assessment along highways based on LR-FAHP model [J]. Journal of Natural Disasters,33(4):27−36 (in Chinese). doi:10.13577/j.jnd.2024.0603

林昕,杨开甲,张容焱.2025.福建省暴雨致灾因子权重分析及非台风暴雨致灾危险性评估[J].暴雨灾害,44(4):526−534. Lin X, Yang K J, Zhang R Y. 2025. Analysis of rainfall disaster-causing factors weight and hazard assessment of non-typhoon rainstorms in Fujian Province [J]. Torrential Rain and Disasters,44(4):526−534 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−129

马蕾,刘垚,武万里,等.2022.基于 GIS 的宁夏高速公路降雨灾害风险评估[J].宁夏大学学报 (自然科学版),43(1):98−101. Ma L, Liu Y, Wu W L, et al. 2022. Highway rainfall disaster risk assessment in Ningxia based on GIS [J]. Journal of Ningxia University (Natural Science Edition),43(1):98−101 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.0253−2328.2022.01.019

宋怡轩,郭洁,何永青,等.2023.基于 GIS 的渠江流域暴雨洪涝灾害风险评估与区划[J].高原山地气象研究,43(2):67−71. Song Y X, Guo J, He Y Q, et al. 2023. Risk assessment of rainstorm and flood disasters in Qujiang River Basin based on GIS [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,43(2):67−71 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2023.02.009

王芬, 洪国平, 赵小芳, 等.2023.暴雨过程致灾危险性评估方法研究—以孝感市“8.12”暴雨过程为例[J].暴雨灾害,42(6):724−730. Wang F, Hong G P, Zhao X F, et al. 2023. Research of rainstorm event disaster hazard assessment method-A case study of “8.12” rainstorm event in Xiaogan City [J]. Torrential Rain and Disaster,42(6):724−730 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−068

王妮,崔彩霞,张连成.2024.新疆新源县暴雨洪涝灾害风险区划[J].沙漠与绿洲气象,18(4):30−35. Wang N, Cui C X, Zhang L C. 2024. Riskzonation of heavy rainfall and flood disasters in Xinyuan County, Xinjiang [J]. Desert and Oasis Meteorology,18(4):30−35 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2024.04.005

温鑫,范宣梅,陈兰,等.2022.基于信息量模型的地质灾害易发性评价: 以川东南古蔺县为例[J].地质科技通报,41(2):290−299. Wen X, Fan X M, Chen L, et al. 2022. Susceptibility assessment of geological disasters based on an information value model: A case of Gulin County in Southeast Sichuan [J]. Bulletin of Geological Science and Technology,41(2):290−299 (in Chinese). doi:10.19509/j.cnki.dzkq.2022.0054

吴歆彦. 2014. 基于 GIS 的呼和浩特市赛罕区气象灾害风险区划研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学. Wu X Y. 2014. Zoning of Risk Assessment of Meteorological Disaster Based on GIS in Saihan District [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, (in Chinese)

轩春怡,刘勇洪,杨晓燕,等.2020.基于 1 km 网格的北京暴雨洪涝灾害风险区划[J].气象科技,48(4):579−589. Xuan C Y, Liu Y H, Yang X Y, et al. 2020. Risk zoning of Beijing rainstorm disasters based on 1km resolution grids [J]. Journal of Meteorological Science and Technology,48(4):579−589 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.20190424

尹晓东,董思言,韩振宇,等.2018.未来 50 a 长江三角洲地区干旱和洪涝灾害风险预估[J].气象与环境学报,34(5):66−75. Yin X D, Dong S Y, Han Z Y, et al. 2018. Projected risk of drought and flood at Yangtze River Delta for the next 50 years [J]. Journal of Meteorology and Environment,34(5):66−75 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673−503X.2018.05.009

雍佳,王建英,包新宇,等.2023.宁夏高等级公路强降雨时空分布特征及灾害风险评估[J].宁夏工程技术,22(2):109−116. Yong J, Wang J Y, Bao X Y, et al. 2023. Temporal and spatial distribution characteristics of heavy rainfall and disaster risk assessment for Ningxia High-grade highways [J]. Ningxia engineering technology,22(2):109−116 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1671−7244.2023.02.004

曾培培.2024. 2021 年 7 月 17—23 日河南极端暴雨天气过程分析及对交通安全的影响[J].农业灾害研究,14(2):200−202. Zeng P P. 2024. Analysis of the extreme heavy rainfall weather event in Henan from July 17–23, 2021, and its impact on traffic safety [J]. Journal of Agricultural Catastrophology,14(2):200−202 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095−3305.2024.05.066

章国材.2010.气象灾害风险评估与区划方法[M].北京:气象出版社. Zhang G C. 2010. Risk Evaluation and Regionalization Methods for Meteorological Hazards [M]. Beijing:China Meteorological Press (in Chinese)

张利,汪林.2011.不利气象条件对公路交通安全的影响及对策[J].公路交通科技,28(1):120−123. Zhang L, Wang L. 2011. Influence of adverse weather conditions on road traffic safety and its countermeasures [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,28(1):120−123 (in Chinese)

朱浩,程向阳,田红,等.2024.基于 GIS 的安徽省雷电致灾危险性评估与区划[J].暴雨灾害,43(6):733−740. Zhu H, Cheng X Y, Tian H, et al. 2024. Assessment and zoning of lightning disaster-causing hazards in Anhui Province based on GIS [J]. Torrential Rain and Disasters, 43(6):733−740 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−186

朱卫浩,陈霞,邵丽芳,等.2016.基于格网的河北省精细化暴雨洪涝灾害风险区划[J].中国农学通报,32(23):142−147. Zhu W H, Chen X, Shao L F, et al. 2016. Refined risk zoning of storm and flood disaster in Hebei: Based on grid data [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,32(23):142−147 (in Chinese). doi:10.11924/j.issn.1000−6850.casb16050155

Horn B K P. 1981. Hill shading and the reflectance map [J]. Proceedings of the IEEE, 69(1):14−47. doi:10.1109/PROC.1981.11918

Lipovetsky S. 2021. Understanding the analytical hierarchy process [J]. Technometrics,63(2):278−279. doi:10.1080/00401706.2021.1904744

Lin L, Lin Q G, Wang Y. 2017. Landslide susceptibility mapping on a global scale using the method of logistic regression [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences,17(8):1411−1424. doi:10.5194/nhess−17−1411−2017

Lin Q G, Wang Y. 2018. Spatial and temporal analysis of a fatal landslide inventory in China from 1950 to 2016 [J]. Landslides,15(12): 2357−2372. doi:10.1007/s10346−018−1037−6

Nanda A M, Hassan Z, Ahmed P, et al. 2023. Landslide susceptibility zonation along national highway 1D from Sonamarg to Kargil, North Western Himalaya [J]. Journal of the Geological Society of India,99(4):570−577. doi:10.1007/s12594−023−2346−5

(责任编辑 张 文)