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

朔黄铁路沿线降雨致灾危险性分析

张娣 李葳 张金满 曲晓黎 杨琳晗 周朔

Risk analysis of rainfall-induced disasters along the Shuozhou-Huanghua Railway

ZHANG Di，LI Wei，ZHANG Jinman，QU Xiaoli，YANG Linhan，ZHOU Shuo

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2023-151

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

安徽省暴雨致灾危险性评估

Disaster-causing hazard assessment of rainstorms in Anhui Province

暴雨灾害. 2023, 42(3): 353-359 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-118

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

Research of rainstorm event disaster hazard assessment method-A case study of "8·12" rainstorm event in Xiaogan City

暴雨灾害. 2023, 42(6): 724-730 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-068

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

重庆区域性暴雨过程的重现期评估模型构建方法研究

Research on the Construction Method of Return Period Assessment Model for Regional Rainstorm Process in Chongqing

暴雨灾害. 2024, 43(2): 204-213 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-091

逐时降雨的类条件概率密度分区比较与拟合函数初探

Partition comparison and fitting function of class conditional probability density of hourly rainfall

暴雨灾害. 2021, 40(6): 664-674 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.06.011

基于GIS的咸宁市枇杷气象灾害危险性评价

Risk assessment of meteorological disasters of loquat planting in Xianning of Hubei based on GIS

暴雨灾害. 2023, 42(1): 105-112 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-202

关注微信公众号，获得更多资讯信息

张娣,李崴,张金满,等.2025.朔黄铁路沿线降雨致灾危险性分析[J].暴雨灾害,44(2):255−263. ZHANG Di, LI Wei, ZHANG Jinman, et al. 2025. Risk analysis of rainfall-induced disasters along the Shuozhou-Huanghua Railway [J]. Torrential Rain and Disasters,44(2): 255−263 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−151

朔黄铁路沿线降雨致灾危险性分析

张娣[1, 2, 3], 李崴[1], 张金满[1], 曲晓黎[1, 2], 杨琳晗[1], 周朔[1]

(1. 中国气象局雄安大气边界层重点开放实验室, 雄安新区 071800; 2. 河北省气象与生态环境重点实验室, 石家庄 050021; 3. 河北省气象服务中心, 石家庄 050021)

摘　要: 开展铁路沿线地区降雨致灾危险性分析, 可为铁路部门精准防洪提供参考。基于朔黄铁路沿线国家级气象观测站 1951—2022 年日降水量数据, 采用皮尔逊 III 型、耿贝尔和对数正态 3 种分布函数对铁路沿线地区历年最大日降水量重现期进行拟合, 利用卡方检验筛选不同地区最优拟合结果, 得到朔黄铁路沿线地区不同重现期年最大日降水量分布特征; 利用 2004—2023 年国家级气象观测站和 2018—2023 年铁路部门气象站小时降水量数据, 选取降雨过程的过程降水量、最大小时降水量、最大 24 h 降水量分别达到出巡、限速、封锁警戒阈值的年均频次和降水量极值等 12 个因子构建朔黄铁路沿线降雨致灾危险性评价指数; 采用 AHP-熵权法计算各因子的权重系数, 最后得到朔黄铁路沿线降雨致灾危险性等级。结果表明: 朔黄铁路小觉站-三汲站、博野站-蠡县站段沿线为降雨高危险路段, 神池南站-东冶站段沿线为降雨低危险性路段。朔黄铁路沿线降雨致灾危险性等级分布与沿线地区不同重现期最大日降水量分布基本一致。

关键词: 朔黄铁路; 降雨; 重现期; 概率分布; AHP-熵权法

中图法分类号: P426.616　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023−151

Risk analysis of rainfall-induced disasters along the Shuozhou-Huanghua Railway

ZHANG Di[1, 2, 3], LI Wei[1], ZHANG Jinman[1], QU Xiaoli[1, 2], YANG Linhan[1], ZHOU Shuo[1]

(1. *China Meteorological Administration Xiong'an Atmospheric Boundary Layer Key Laboratory*, *Xiong'an New Area* 071800; 2. *Hebei Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment*, *Shijiazhuang* 050021; 3. *Public Meteorological Service Centre of Hebei Province*, *Shijiazhuang* 050021)

Abstract: The risk analysis of rainfall-induced disasters along the railway can provide a reference for precise flood prevention for railway departments. Based on the daily precipitation data from national weather station along the Shuozhou-Huanghua railway from 1951 to 2022, this study used three distribution functions, Pearson III, Gumbel and Logarithmic normal distribution, to fit the recurrence period of annual maximum daily precipitation over the years along the railway respectively. The chi-square test was used to select the optimal fitting distribution model in different regions. Then the distribution characteristics of the maximum daily precipitation for different recurrence periods in each region along the Shuozhou-Huanghua Railway were obtained. Using the hourly precipitation data of the national meteorological stations from 2004 to 2023 and the meteorological stations deployed by the railway department from 2018 to 2023, the rainfall process and precipitation factors along the railway were counted. A total of 12 factors of rainfall process, including the annual average frequency and the extreme value of process precipitation, maximum hourly precipitation and maximum 24-hour precipitation that reaching the thresholds for patrol, speed limit and blockade warning respectively, were selected to construct the risk assessment index of rainfall-induced along Shuozhou-Huanghua Railway. Then the AHP-entropy weight method was applied to calculate the weight coefficient of each evaluation index factor. Finally, the rainfall-induced risk levels along the Shuozhou-Huanghua Railway were obtained. The results show that the sections from Xibaipo Station to Sanji Station and Boye Station to Lixian Station along the Shuozhou-Huanghua Railway were the high-risk region, with the low-risk sections from South of Shenchi Station to Dongye Station. The assessment results are basically consistent with the distribution of maximum daily precipitation in different recurrence periodsalong the Shuozhou-Huanghua Railway.

收稿日期: 2023−07−18; **定稿日期**: 2024−05−26

资助项目: 河北省重点研发计划项目 (22375405D); 河北省气象局科研开发项目 (24ky02)

第一作者: 张娣, 主要从事专业气象服务及相关技术研究。E-mail: zdluckily@163.com

通信作者: 张金满, 主要从事专业气象服务及相关技术研究。E-mail: zzzjm2046@126.com

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

Key words: Shuozhou-Huanghua Railway; rainfall; return period; probability distribution; AHP and entropy weight method

引 言

铁路运行是天气的敏感行业 (崔新强和郭雪梅, 2018a; Sun et al., 2022)。其中, 降雨是对铁路运行影响最严重的天气现象之一, 会引发滑坡和泥石流等次生灾害, 损毁铁路沿线轨道、路基、桥涵、隧道等基础设施, 对铁路安全运营造成严重影响 (Monal and Aniruddha, 2014; Kellermann et al., 2015; Liu et al., 2018; 张洪宇等, 2019)。朔黄铁路西起山西神池, 东至河北黄骅港, 是我国西煤东运第二大通道的重要组成部分, 铁路沿线地形复杂, 西部路段位于太行山山区, 东部途径海河平原, 强降水时有发生, 常造成严重灾害。例如华北“16·7”特大暴雨、“23·7”极端强降水 (杨舒楠等, 2023) 造成朔黄铁路沿线山体滑坡、桥涵严重积水、路基下沉、路肩边坡溜塌等灾害, 对铁路运输安全带来严峻的挑战。目前, 尚未开展朔黄铁路沿线降雨致灾危险性分析的研究工作。

降雨致灾危险性分析是对降雨致灾因子危险性程度的客观量化 (吉中会等, 2022), 目前主要包括概率分析法和综合指数评价法两种研究方法 (唐明秀等, 2023)。概率分析法是利用概率分布拟合函数计算降水极值重现期来研判极端降水危险性变化趋势, 进而确定降雨致灾危险性程度, 不仅考虑了极端降水的特征变量, 同时也客观考虑了其对应的发生概率。由于地区间的气候差异, 不同地区极端降水的概率分布特征存在差别, 应当采用不同概率分布函数进行拟合, 确定某一区域最优概率分布 (王彬雁等, 2015; 王晓雅等, 2020; 史维良等, 2023; 钟东良等, 2023)。综合指数评价法通过对表征降雨过程特征的强度和频次等降雨致灾评价指标因子赋予不同的权重, 然后加权求和计算降雨致灾危险性评价指数 (周月华等, 2019; 王芬等, 2023), 得到降雨的致灾危险性程度。如何合理设置降雨致灾危险性各评价指标因子权重是综合指数评价法的关键, 已有的研究 (崔新强等, 2018b; 王洁等, 2022) 多是根据主观判断, 缺乏一定的客观性。此外, 针对铁路这一承载体, 国内已有诸多降雨灾害影响的研究 (刘艳, 2016; 崔新强等, 2018b; 李莹等, 2021; 王洁等, 2022), 但鲜有针对降雨过程开展的铁路沿线降雨致灾危险性定量评估。

以往研究多是将概率分析法和综合指数评价法单独进行, 本文综合利用两种方法更加客观全面地刻画降雨的危险性程度。首先采用概率分析法, 基于朔黄铁路沿线国家气象站日降水数据, 统计历年降雨过程的日最大降水量, 利用皮尔逊Ⅲ型分布、耿贝尔分布和对数正态分布三种概率分布函数计算铁路沿线不同地区的不同重现期年最大日降水量分布, 通过拟合优度检验确定各地区最优拟合分布, 得到铁路沿线极端降水的气候变化特征。然后采用综合指数评价法, 基于国家气象站和铁路气象站小时降水数据, 选取降雨过程的过程降水量、最大小时降水量和最大 24 h 降水量分别达到出巡、限速、封锁警戒阈值的年均频次以及降水量极值共 12 个因子构建降雨致灾危险性评价指标因子, 利用 AHP-熵权法计算各评价指标因子的权重系数, 最后通过降雨致灾危险性指数公式加权计算得到降雨致灾危险性的定量评价, 以期为朔黄铁路管理部门精准防洪提供决策和调度依据, 为铁路行业防灾减灾气象服务提供参考。

1 研究区域概况

朔黄铁路为国家 I 级、双线、电气化重载铁路, 正线横跨山西、河北两省, 全长 594 km, 西起山西省西北部神池县神池南站, 海拔 1 531 m, 地处晋西北黄土高原, 地势西高东低, 多为山地丘陵地貌, 东至河北省沧州市渤海新区黄骅港站, 海拔 4.5 m, 地势平坦, 全线设有 33 个车站; 支线黄万铁路线南起沧州市黄骅南站, 北至天津滨海新区神港站, 共设 7 个车站, 全长 76 km。朔黄铁路沿线地形复杂, 经过高原、山地、丘陵、盆地、平原等地形 (图 1), 其中山区路段包括山西省神池县神池南站至河北省平山县三汲站, 平原路段包括河北省灵寿县灵寿站至天津滨海新区神港站 (张娣等, 2022)。

2 资料及相关定义

本文所用的资料包括: (1) 来源于国家气象信息中心的 1951—2022 年朔黄铁路沿线 20 km 范围内 21 个国家级气象观测站 (简称国家气象站, 图 1) 日降水数据, 用于计算不同重现期年最大日降水量; 21 个国家气象站 2004—2023 年小时降水数据, 用于计算降雨过程及指标因子。其中, 日降水数据由于部分气象观测站建站较晚, 数据起始年晚于 1951 年, 对该数据进行了区域界限值、气候学界限值及时空一致性检查, 有较高的可靠性。(2) 来源于国能朔黄铁路发展有限责任公司自建的铁路气象站 (图 1) 降水资料, 即 2018—2023 年朔黄铁路沿线 40 个铁路气象站小时降水数据, 用于计算降雨过程及指标因子。此观测数据由河北省气象信息中心统一管理,

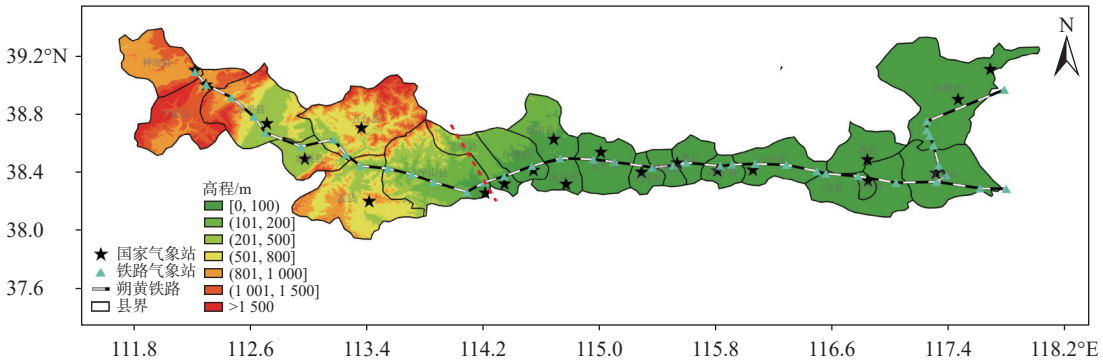


图 1 朔黄铁路沿线行政区划、国家和铁路气象站及地形高程(色斑)分布(红色虚线为山区和平原路段分界线)

Fig. 1 Distribution of administrative divisions, the national weather stations, the railway meteorological stations and terrain heights (shaded) along Shuozhou-Huanghua Railway(The red dotted line was the boundary between the mountainous area and the plain road section)

并对其进行质量控制, 数据可靠。

根据《朔黄铁路防洪工作管理办法》(2021), 本文定义某个站从出现降雨时刻开始计算, 直至降水停止且之后连续 8 h 内无降水, 记为一次降雨过程, 期间过程降水量的总和记为本次降雨过程的过程降水量 (P), 降雨过程中小时降水量的最大值记为最大小时降水量 (I_{max}), 降雨过程中逐小时滚动计算的 24 h 累计降水量的最大值记为最大 24 h 降水量 (P_{24}), 不足 24 h 的按实际降水时间计算累计降水量。

警戒雨量是铁路部门决定铁路警戒状态的降水指标, 是判断降水影响铁路安全程度的基本依据, 表 1 给出朔黄铁路沿线平原和山区路段出巡警戒、限速警戒和封锁警戒三种警戒类型及其对应的雨量阈值 (张娣等, 2022), 同一降水过程按达到的最高警戒统计。2018—2023 年铁路气象站降水过程达到出巡警戒 680 站次, 限速警戒 29 站次, 封锁警戒 5 站次。2004—2023 年国家气象站达到出巡警戒 492 站次, 限速警戒 8 站次, 封锁警戒 11 站次。

表 1 朔黄铁路平原和山区路段三级警戒类型及相应雨量阈值

Table 1 Three-level warning status and corresponding rainfall thresholds of plain and mountain sections along the Shuozhou-Huanghua Railway

警戒类型	平原路段/mm			山区路段/mm			采取措施
	P	I_{max}	P_{24}	P	I_{max}	P_{24}	
出巡	68.2	30.7	58.7	56.9	19.4	39.7	执行区段冒雨巡查
限速	135.9	70.6	132.4	97.6	57.5	103.2	执行区段限速缓行
封锁	183.3	86.9	165.4	146.4	62.1	110.6	执行区段线路封锁

注: P为过程降水量, I_{max}为降雨过程中的最大小时降水量, P_{24}为降雨过程中逐小时滚动计算的最大24 h降水量, 下同。

3 研究方法

由于各区域气候差异, 需要根据实际降水数据来确定某一区域的最优概率分布 (史维良等, 2023)。本文利用气象要素极值分布中常用的皮尔逊Ⅲ型分布、耿贝尔分布和对数正态分布 (王彬雁等, 2015) 分别计算朔黄铁路不同地区不同重现期的年最大日降水量, 利用卡方优度拟合检验确定最优概率分布函数。然后, 基于风险评估理论构建降雨致灾危险性评价指标体系, 采用层次分析法 (AHP) 确定各路段评价指标因子的主观权重, 再用熵权法确定评价指标因子的客观权重。最后, 利用线性组合法确定 AHP-熵权法综合权重。

3.1 极值概率分布模型

基于国家气象站历年最大日降水量数据, 利用皮尔逊 III 型、耿贝尔和对数正态分布 (王彬雁等, 2015) 分别对朔黄铁路沿线不同地区年最大日降水量重现期进行拟合, 计算朔黄铁路沿线不同地区的 10 a、20 a、50 a、100 a 一遇最大日降水量。

3.1.1 皮尔逊Ⅲ型分布

皮尔逊Ⅲ型密度函数的计算公式为

$$f(x)=\frac{\beta^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)}(x-\alpha_0)^{\alpha-1}e^{-\beta(x-\alpha_0)} \tag{1}$$

式中, $\Gamma(\alpha)=\int_0^{\infty}x^{\alpha-1}e^{x}\mathrm{d}x$为 α的伽马函数; $\alpha=\frac{4}{C_S^{\,2}}$为形状参数; $\beta=\frac{2}{\bar{x}\times c_s\times c_v}$为尺度参数, $\alpha_0=\bar{x}\times\left(1-\frac{2c_v}{c_s}\right)$为分布位置; $c_s=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^3\Big/\left|\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\right|^{3/2}$为偏态系数, $c_v=\frac{\sigma}{\bar{x}}$为偏差系数, x为年最大日降水量(下同), n为样本数, 为 1951—2022 年各站历年数据,

由于建站时间不同，结束时间均为 2022 年，因此每个站的样本数不同。$\bar{x}$为平均值，σ为标准差 (下同)。

3.1.2 耿贝尔分布

耿贝尔概率密度函数为

$$P(x)=P(X\geqslant x)=1-e^{-e^{-a(x-b)}} \tag{2}$$

式中，X为样本极值，$a=1.2825/\sigma$，是尺度参数，$b=\bar{x}-0.5772\times\frac{\sqrt{6}}{\pi}\sigma$，为众数。

3.1.3 对数正态分布

假设$y=\ln x$服从正态分布，其概率密度函数为

$$f(y)=\frac{1}{x\sqrt{2\pi}\delta_y}e^{-(y-m_y)^2/2\delta_y{}^2} \tag{3}$$

式中，$m_y=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\ln x_i$和$\delta_y=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\ln x_i-m_y)^2}$分别为对数年最大日降水量$y$的均值与标准差，$x_i$为第$i$个降水数据样本。

3.2 卡方拟合优度检验

卡方拟合优度检验 (王丽萍等, 2023) 是一种非参数拟合检验方法，根据观测样本数据和拟合分布数据，推断观测样本频数和理论分布频数之间的偏离程度，卡方检验统计量χ^2的计算方法为

$$\chi^2=\sum_{i=1}^{n}(A_i-E_i)^2/E_i \tag{4}$$

式中，A_i为第 i 个观测样本频数，E_i为第 i 个理论分布频数，n 为样本数，通过 0.05 显著性水平检验且χ^2值最小的概率分布为最优拟合分布。

3.3 降雨致灾危险性评价指数及指标因子

根据自然灾害风险评估理论 (章国材, 2014)，铁路沿线降雨致灾危险性大小与降雨过程发生的频次和强度密切相关，降雨致灾危险性指数计算公式为

$$V_H=\sum_{j=1}^{k}(w_j\times R_j) \tag{5}$$

式中，V_H为降雨致灾危险性指数，R_j为标准化处理后的第j个评价指标因子 (下同)，w_j为第j个评价指标因子的权重，k为评价指标因子个数。

确定朔黄铁路降雨致灾危险性评价指标因子是开展降雨致灾危险性分析的前提。张娣等 (2022) 分析发现朔黄铁路沿线降雨过程的严重程度与最大小时降水量、最大 24 h 降水量和过程降水量呈较好的正相关关系。因此，结合朔黄铁路警戒雨量阈值，选取降雨过程的过程降水量、最大小时降水量和最大 24 h 降水量分别达到出巡、限速、封锁警戒阈值的年均频次以及降水量极值共 12 个因子构建降雨致灾危险性评价指标因子(表 2)。

3.4 降雨致灾危险性指标因子综合权重计算

利用层次分析法 (AHP) 和熵权法分别确定降雨危险性各评价指标因子的主观和客观权重系数，然后通过权重距离函数计算偏好系数，得到各指标因子的 AHP-熵权法综合权重。

3.4.1 层次分析法

层次分析法 AHP 可以用来确定各评价指标的主观权重。利用降雨致灾危险性评价指标，构造两两判断矩阵，参照 1~9 标度方法 (王洁等, 2022; 李瑞英等, 2024)，对两两指标的相对重要程度进行量化，通过一致性检验后，确定各指标因子的主观权重系数w'_j。

3.4.2 熵权法

熵权法是一种通过离散程度确定指标权重的客观评价方法，一定程度上消除了主观因素的干扰 (谢捷等, 2022)。熵值越小，离散程度越大，表示该指标对降雨致灾危险性的权重越大；反之，权重越小。针对降雨致灾危险性评价指标，首先构建指标矩阵，然后计算各指标特征比值，根据特征比值计算各评价指标的信息熵，最后确定各指标信息熵对应的权重值。信息熵权重的计算公式为

$$w''_j=(1-t_j)/\left(k-\sum_{j=1}^{k}t_j\right) \tag{6}$$

式中$0\leqslant w''_j\leqslant 1$，$\sum_{j=1}^{k}w''_j=1$，$t_j=-\frac{1}{\ln k}\sum_{j=1}^{k}z_j\ln z_j$表示第$j$个降雨致灾危险性指标的熵。当$z_j=0$时，令$z_j\ln z_j=0$；$z_j=R_j/\sum_{j=1}^{k}R_j$为特征比值。

3.4.3 综合权重

考虑主观判断定义指标权重的 AHP 和客观赋权的熵权法的综合影响，采用 AHP-熵权法主客观结合来确定降雨致灾危险性评价指标的综合权重更为科学、合理 (谢捷等, 2022)，综合权重w_j计算公式为

$$w_j=pw'_j+qw''_j \tag{7}$$

式中，p 和 q 为偏好系数，$p+q=1$。

为消除较大数据造成的干扰，采用主客观权重距离函数$\mathrm{d}(w'_j,w''_j)$计算 p 和 q，计算公式为

$$\begin{cases}\mathrm{d}(w'_j,w''_j)=\left[\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{k}(w'_j-w''_j)^2\right]^{\frac{1}{2}}\\ \mathrm{d}(w'_j,w''_j)^2=(p-q)^2\end{cases} \tag{8}$$

将降雨致灾危险性各评价指标的主观权重w'_j和客观权重w''_j带入公式(8)进行计算，得到偏好系数p=0.527 3、q=0.472 7，最后将其带入式(7)，得到降雨致灾危险性各评价指标的综合权重，如表 2 所示。

表 2 朔黄铁路降雨致灾危险性评价指标因子及权重系数

Table 2 Factors and weights coefficient of rainfall disaster risk assessment along the Shuozhou-Huanghua Railway

评价指标因子		权重系数		
气象要素	警戒状态	AHP	熵权法	AHP-熵权法
P	出巡警戒频次	0.0200	0.0413	0.0301
	限速警戒频次	0.0839	0.0569	0.0711
	封锁警戒频次	0.1335	0.1126	0.1236
	极值	0.0959	0.1044	0.0999
I_{max}	出巡警戒频次	0.0200	0.0240	0.0219
	限速警戒频次	0.0839	0.0521	0.0689
	封锁警戒频次	0.1335	0.1540	0.1432
	极值	0.0959	0.1227	0.1086
P_{24}	出巡警戒频次	0.0200	0.0489	0.0337
	限速警戒频次	0.0839	0.0549	0.0702
	封锁警戒频次	0.1335	0.1179	0.1261
	极值	0.0959	0.1103	0.1027

3.5 降雨致灾危险性分级方法

均值−标准差法 (张娣等, 2022) 利用降雨致灾危险性评价指数的均值和标准差来划分朔黄铁路沿线降雨危险性等级。标准差反映了评价指数相对于平均评价指数的偏离程度, 用均值和标准差能反映不同评价指数的差异, 因此将降雨致灾危险性指数以 μ(均值)、$\pm std$(标准差)为降雨致灾危险性等级分割点。

4 结果与分析

选取朔黄铁路沿线不同地区年最大日降水量重现期最优概率分布模型, 计算不同重现期年最大日降水量, 分析各地区极端降水的概率分布特征。然后利用 2004—2023 年铁路沿线国家气象站以及 2018—2023 年铁路气象站小时降水数据, 分析铁路沿线降雨过程中降水因子分布特征, 进而综合分析朔黄铁路降雨致灾危险性评价结果。

4.1 不同重现期年最大日降水量

采用三种概率分布函数对朔黄铁路沿线地区分别进行拟合并进行卡方拟合优度检验, 确定原平、五台县、灵寿、蠡县、肃宁和塘沽 6 个地区最优拟合为皮尔逊 III 分布, 其他地区最优拟合均为耿贝尔分布, 计算得到朔黄铁路沿线不同地区最优拟合的 10 a、20 a、50 a、100 a 一遇最大日降水量, 如图 2 所示, 可见铁路沿线地区不同重现期最大日降水量均呈西低东高分布。山西境内山地丘陵地区(神池−盂县) 10 a 一遇最大日降水量相对较小, 平山及其以东地区最大日降水量相对较高, 其中平山地区日降水量最大为 149.0 mm (图 2a); 神池−五台县地区 20 a 一遇最大日降水量相对较小, 盂县及其以东地区最大日降水量相对较高, 其中平山地区最大为 179 mm (图 2b); 50 a 一遇最大日降水量分布特征与 20 a 一遇一致, 平山地区最大为 217.8 mm (图 2c); 100 a 一遇最大日降水量除神池地区(99.2 mm)外, 其他地区均在 100 mm 以上, 平山地区最大为 246.9 mm (图 2d), 铁路沿线 17 个国家气象站现有最大日降水量超过 100 a 一遇最大日降水量, 表明朔黄铁路沿线地区存在局地发生极端强降水事件的可能性。综上所述, 平山及其以东地区不同重现期最大日降水量均相对较高, 其中平山日降水量最大, 位于山西境内山地、丘陵地区的神池−盂县地区相对较小, 其中神池地区最小。

4.2 降水因子分布特征

根据朔黄铁路降水因子定义, 分别利用国家气象站和铁路气象站统计了降雨过程的过程降水量、

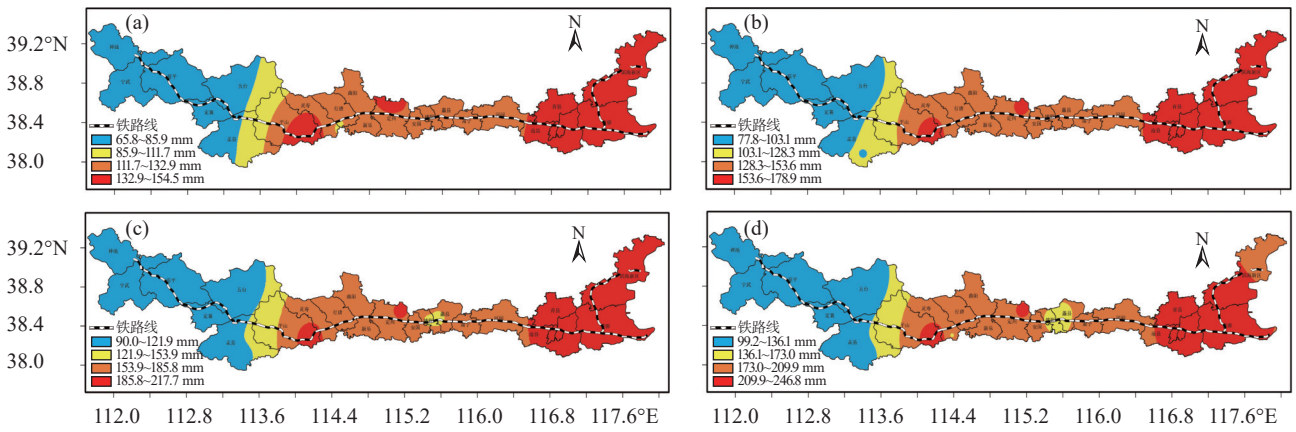


图 2 朔黄铁路沿线地区 10 a (a)、20 a (b)、50 a (c)和 100 a (d)重现期年最大日降水量(色斑)分布

Fig. 2 Distribution of annual maximum daily precipitation (shaded) in recurrence periods of (a) 10 a, (b) 20 a, (c) 50 a and (d) 100 a along the Shuozhou-Huanghua Railway

最大小时降水量和最大 24 h 降水量达到不同级别雨量警戒的频次及强度，发现朔黄铁路沿线铁路站点和国家气象站点的降水因子分布特征具有一致性，但由于国家气象站降水数据统计时段较长，其降水极值一般均高于铁路气象站。以下图中“某某站”代表铁路气象站，其他为国家气象站。

4.2.1 过程降水量

分析朔黄铁路沿线国家气象站和铁路气象站过程降水量达到不同警戒阈值的年均频次及强度(图 3)，铁路气象站过程降水量达到出巡警戒阈值的年均频次在 0.33~2.17 次之间，博野站、黄骅东和黄骅港站达到出巡警戒阈值的年均频次超过 1.5 次，其中黄骅港站最多为 2.17 次；回凤站、南湾站−小觉站和黄骅南站过程降水量达到限速警戒阈值的年均频次超过 0.3 次，其中猴刎站最多为 0.67 次；古月站、西柏坡站和三汲站过程降水量达到封锁警戒阈值的年均频次最多为 0.5 次。滴流磴站−蠡县站、黄骅港站、窦庄子站最大过程降水量超过封锁警戒阈值，其中古月站最大为 317.8 mm。对于国家气象站，平山最大过程降水量达到各级别警戒年均频次最多；定襄及其以东地区最大过程降水量均超过封锁警戒阈值，平山−定州和蠡县最大过程降水量超过 300.0 mm，其中蠡县最大为 372.1 mm。

4.2.2 最大小时降水量

分析朔黄铁路沿线最大小时降水量达到不同警戒阈值的年均频次及强度(图 4)可知，铁路气象站最大小时降水量达到出巡警戒阈值的年均频次在 0.17~2.33 次之间，滴流磴站、猴刎站、三汲站、黄骅

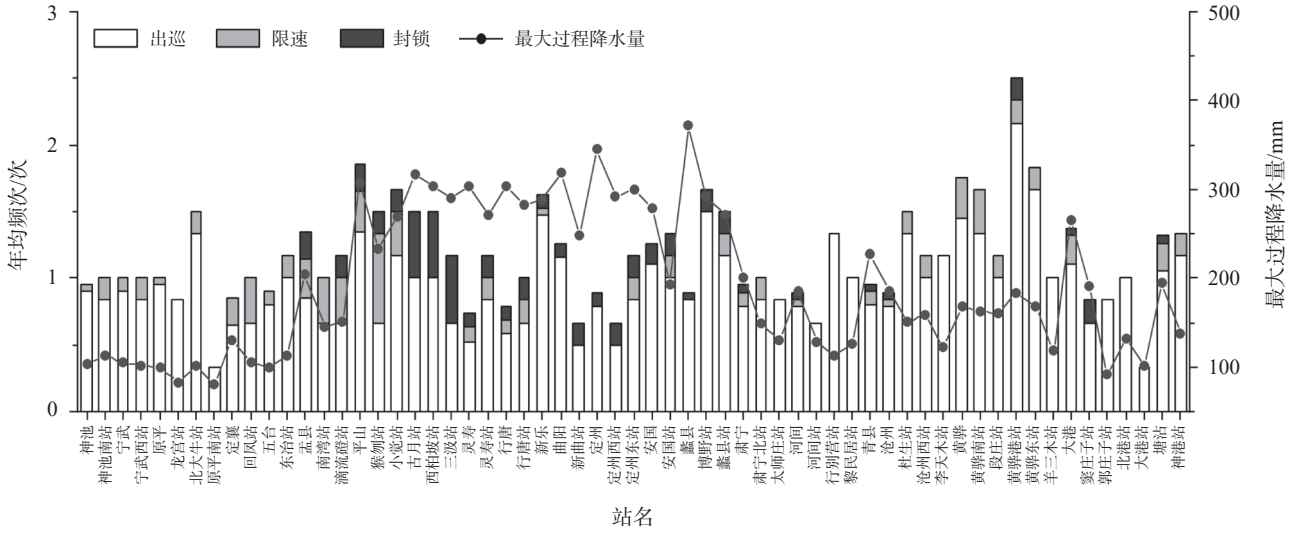


图 3 朔黄铁路沿线气象站点过程降水量达到不同警戒阈值的年均频次及强度

Fig. 3 Annual frequency and intensity of process precipitation reaching different warning thresholds of meteorological stations along the Shuozhou-Huanghua Railway

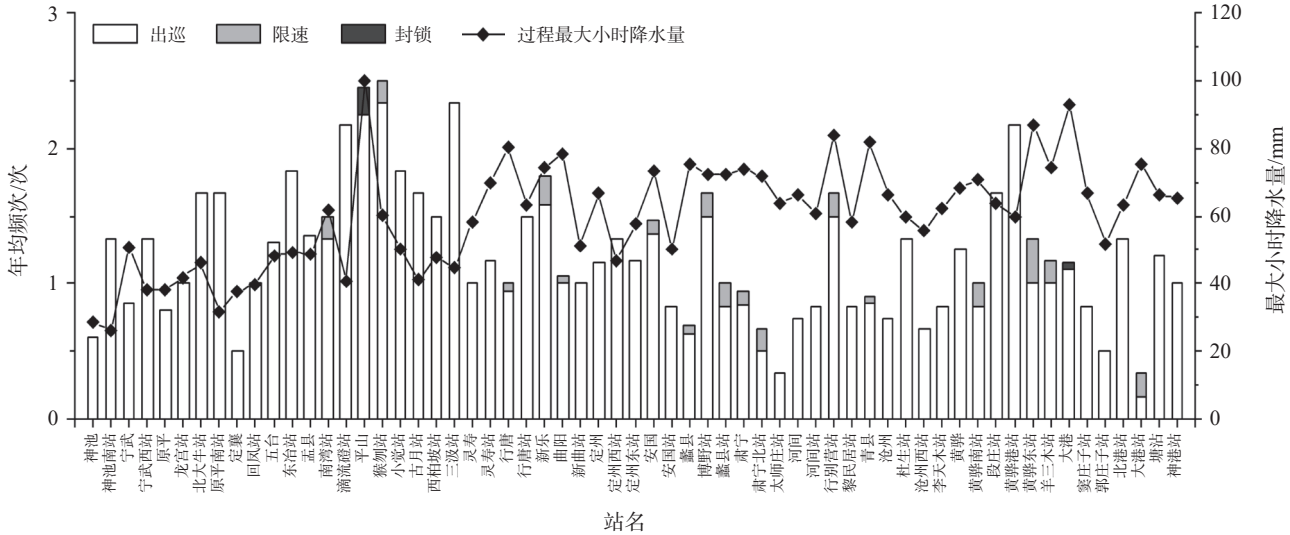


图 4 同图 3，但是为最大小时降水量

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for the maximum hourly precipitation

港站达到出巡警戒阈值的年均频次超过 2.0 次, 其中猴刎站和三汲站最多为 2.33 次; 南湾站、猴刎站、博野站、蠡县站、肃宁北站、行别营站、黄骅南站、黄骅东站、羊三木站和大港站最大小时降水量达到限速警戒阈值的年均频次较多, 其中黄骅东站最多为 0.33 次; 博野站–行别营站、黄骅南站、黄骅东站、羊三木站、大港站最大小时降水量超过限速警戒阈值, 未出现达到封锁警戒情况, 黄骅东站小时降水量最大为 86.7 mm。对于国家气象站, 平山最大小时降水量达到各级别警戒阈值的年均次数最多; 平山和大港最大小时降水量达到封锁警戒阈值, 分别为 99.9 mm 和 92.9 mm。

4.2.3 最大 24 h 降水量

分析朔黄铁路沿线最大 24 h 降水量达到不同警戒阈值的年均频次及强度(图 5), 铁路气象站最大 24 h 降水量达到出巡警戒阈值的年均频次在 0.4~2.8 次之间, 东冶站、滴流磴站、猴刎站、古月站、西柏坡站和黄骅港站达出巡警戒阈值的年均频次超过 2.0 次, 其中古月站和黄骅港站最多为 2.8 次; 小觉站、行唐站、定州西站和安国站达限速警戒阈值的年均频次最多, 均为 0.2 次; 龙宫站、南湾站、猴刎站、小觉站–灵寿站、定州东站、博野站、蠡县站和沧州西站达封锁警戒阈值的年均频次较多, 其中古月站、西柏坡站、三汲站和蠡县站最多为 0.4 次。小觉站–灵寿站、定州东站、博野站和蠡县站最大 24 h 降水量超过封锁警戒阈值, 其中蠡县站最大为 235.1 mm。国家气象站中, 平山最大 24 h 降水量达各级别警戒阈值的年均频次最多; 定襄及其以东地区最大 24 h 降水量均超过封锁警戒阈值, 定州最大为 293.6 mm。

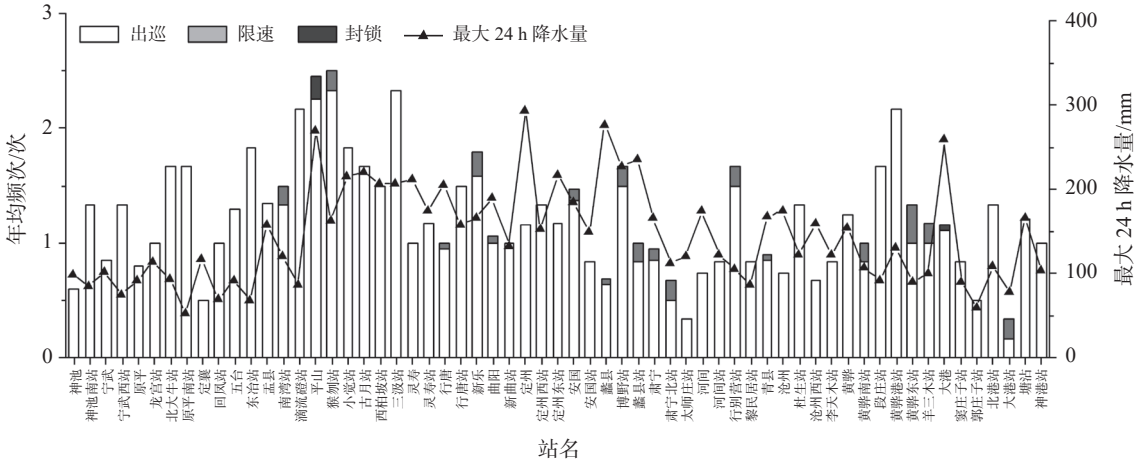


图 5 同图 3, 但是为最大 24 h 降水量

Fig. 5 Same as Fig. 3, but for the 24-hour precipitation

4.3 降雨致灾危险性结果与分析

将表 2 中 AHP-熵权法权重带入降雨致灾危险性指数公式计算降雨致灾危险性指数, 然后通过均值-标准差法将降雨致灾危险性划分为低危险、中危险、较高危险和高危险 4 个等级(表 3), 得到朔黄铁路沿线降雨致灾危险性分布情况(图 6), 可见朔黄铁路沿

表 3 朔黄铁路沿线降雨致灾危险性等级划分

Table 3 Classification of rainfall-induced risk assessment along the Shuozhou-Huanghua Railway

危险等级	I级 (高危险)	II级 (较高危险)	III级 (中危险)	IV级 (低危险)
危险指数	V>0.56	0.38<V≤0.56	0.20<V≤0.38	V≤0.20

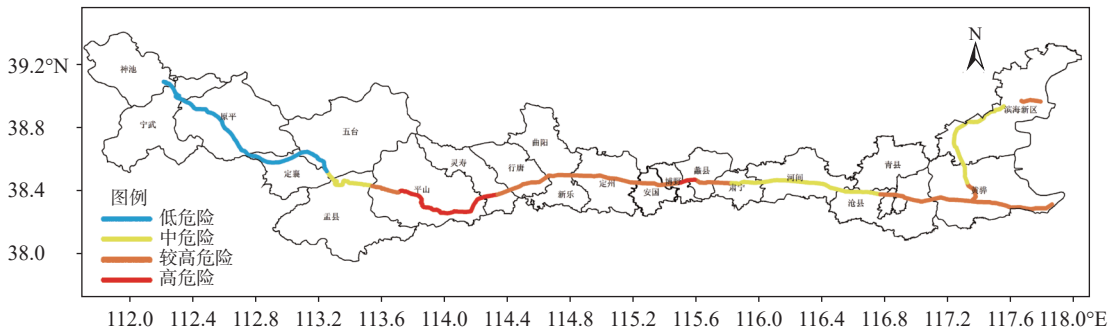


图 6 朔黄铁路降雨致灾危险性等级 (色斑) 分布图

Fig. 6 Distribution of rainfall-induced risk level (shaded) along the Shuozhou-Huanghua Railway

线降雨致灾危险性整体呈山西境内山地丘陵地区路段危险性较低，而河北西部的平山地区、东部平原及沿海地区铁路路段降雨致灾危险性相对较高的分布特征，与铁路沿线地区降水气候特征分布规律基本一致。位于河北平山地区的小觉站−三汲站段、博野站−蠡县站段为降雨致灾高危险路段；猴刎站、灵寿站−安国站、肃宁站、沧州西站−黄骅港站、黄骅东站−羊三木站、神港站等路段为降雨致灾较高危险路段；南湾站−滴流磴站、肃宁北−杜生站、窦庄子站−大港站等路段为降雨致灾中危险路段，神池南站−东冶站段为降雨致灾低危险路段。

5 结论与讨论

本文利用 1951—2022 年国家气象站日降水量数据，统计了铁路沿线国家气象站不同重现期年最大日降水量分布；利用国家气象站和铁路气象站小时降水数据，结合铁路沿线不同警戒级别降水量阈值，构建了降雨致灾危险性评价指标因子，通过 AHP-熵权法确定各指标因子综合权重，得到了朔黄铁路沿线降雨致灾危险性等级。得出主要结论如下：

(1) 原平、五台县、灵寿、蠡县、肃宁和塘沽 6 个地区最优拟合为皮尔逊 III 分布，其他地区最优拟合均为耿贝尔分布。根据最优拟合分布计算的各地区不同重现期年最大日降水量分布特征为：平山及其以东地区不同重现期最大日降水量均相对较高，其中平山日降水量最大，神池−盂县地区相对较小，其中神池地区最小，铁路沿线地区出现局部极端强降水事件的可能性较高。

(2) 太行山东麓河北平山地区的小觉站−三汲站、博野站−蠡县站段为降雨高危险路段；猴刎站、灵寿站−安国站、肃宁站、沧州西站−黄骅港站、黄骅东站−羊三木站、神港站等路段为降雨致灾较高危险路段；南湾站−滴流磴站、肃宁北−杜生站、窦庄子站−大港站等路段为降雨致灾中危险路段，神池南站−东冶站段为降雨致灾低危险路段。降雨致灾危险性等级分布与铁路沿线不同重现期年最大日降水量分布特征基本一致。

随着铁路行业日益增长的精细化气象服务需求，下一步可利用高时空分辨率气象数据、结合铁路沿线孕灾环境等因素，开展坡度、坡向等复杂地形对降雨及其次生灾害如山洪、滑坡、泥石流和内涝等影响的研究，同时积累铁路部门降水资料和灾害记录资料进一步优化细分不同路段雨量阈值，探索更加客观合理的精细化铁路降雨致灾危险性评价，为铁路部门精准防洪、汛期物资储备、加密气象监测站网构建等提供科学依据和参考。

参考文献 (References)：

崔新强,郭雪梅.2018a. 1950−2015 年我国铁路气象及其衍生灾害特征分析[J].气象与环境科学,41(2):98−104. Cui X Q, Guo X M. 2018a. Feature analysis of meteorological and derivative disasters in China railway during 1950-2015 [J]. Meteorological and Environmental Sciences,41(2):98−104 (in Chinese). doi:10.16765/j.cnki.1673−7148.2018.02.014

崔新强,付佳,代娟,等.2018b.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. 2018b. 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

国能朔黄铁路发展公司. 国能朔黄铁路公司防洪工作管理办法[Z]. 2021

吉中会,张蝶,于小兵.2022.淮河流域暴雨危险度时空特征分析[J].暴雨灾害,41(5):580−587. Ji Z H, Zhang D, Yu X B. 2022. Analysis of the spatiotemporal characteristics of the danger degree of the torrential rain in the Huaihe River basin [J]. Torrential Rain and Disasters, 41(5):580−587 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2021−132

李瑞英,吕桂恒,樊杰,等.2024.华东地区台风气候特征及危险性分析[J].沙漠与绿洲气象,18(1):119−125. Li R Y, Lv G H, Fan J, et al. 2024. Climatic characteristics and risk analysis of typhoon in east China [J].18(1):119−125 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2024.01.015

李莹,高歌,程驰.2021.影响中国高速铁路运行的暴雨危险性特征研究[J].地理科学,41(10):1843−1851. Li Y, Gao G, Cheng C. 2021. Hazard intensity of rainstorm affecting high-speed railway operation in China [J]. Scientia Geographica Sinica,41(10):1843−1851 (in Chinese). doi:10.13249/j.cnki.sgs.2021.10.016

刘艳,何清,戴晓爱,等.2016.新疆铁路沿线主要气象灾害风险区划及减灾对策探讨[J].自然灾害学报,25(3):48−57. Liu Y, He Q, Dai X A, et al. 2016. Risk mapping of main meteorological disasters and disaster mitigation strategies for Xinjiang railway lines [J]. Journal of Natural Disasters,25(3):48−57 (in Chinese). doi:10.13577/j.jnd.2016.0306

史维良,车璐阳,李涛.2023.陕西省汛期极端降水概率分布及综合危险性评估[J].干旱区地理,46(9):1407−1417. Shi W L, Che L Y, Li T. 2023. Probability distribution and comprehensive risk assessment of extreme precipitation in flood season in Shaanxi Province [J]. Arid Land Geography,46(9):1407−1417 (in Chinese). doi:10.12118/j.issn.1000−6060.2022.567

唐明秀,孙劭,朱秀芳,等.2023.中国不同气候区的暴雨危险性分析[J].自然灾害学报,32(2):151−160. Tang M X, Sun S, Zhu X F, et al. 2023. Hazard analysis of rainstorms in different climatic regions of China [J]. Journal of Natural Disasters,32(2):151−160. doi:10.13577/j.jnd.2023.0217

王彬雁,赵琳娜,巩远发,等.2015.北京降雨过程分型特征及短历时降雨重现期研究[J].暴雨灾害,34(4):302−308. Wang B Y, Zhao L N, Gong Y F, et al. 2015. Characteristics of temporal pattern and return period of short-duration rainfall at Beijing observatory [J]. Torrential Rain and Disasters,34(4):302−308 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2015.04.002

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

王洁,张中杰,曲晓黎,等.2022.基于层次分析法的朔黄铁路暴雨灾害风险评估[J].气象科技,50(6):870−877. Wang J, Zhang Z J, Qu X L, et al. 2022. Risk zoning of rainstorm disaster along Shuohuang Railway based on meteorological geography method [J]. Meteorological Science and Technology,50(6):870−877 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.20210393

王莉萍,王韫喆,向欣,等.2023.基于耿贝尔—线性矩和 K-Means 算法的短时强降水等级划分研究[J].地球物理学报,66(8):3171−3184. Wang L P, Wang Y Z, Xiang X, et al. 2023. Research on classification of short-duration heavy rain based on Gumbel-Linear Moment and K-Means algorithm [J]. Chinese journal of geophysics, 66(8):3171−3184 (in Chinese). doi:10.6038/cjg2022Q0317

王晓雅,蒋卫国,邓越,等.2020.基于多重现期的京津冀小时极端降雨特征分析及致灾因子危险性评估[J].地理研究,39(11):2581−2592. Wang X Y, Jiang W G, Deng Y, et al. 2020. Characteristic analysis and fatalness of disaster-inducing factors assessment of hourly extreme rainfall in different return periods of Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Geographical Research,39(11):2581−2592 (in Chinese). doi:10.11821/dlyj020190781

谢捷,刘玮,徐月顺,等.2022.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,31(3):60−74. Xie J, Liu W, Xu Y S, et al. 2022. 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,31(3):60−74 (in Chinese). doi:10.13577/j.jnd.2022.0306

杨舒楠,张芳华,胡艺,等.2023. “23·7”华北特大暴雨过程的基本特征与成因初探[J].暴雨灾害,42(5):508−520. Yang S N, Zhang F H, Hu Y, et al. 2023. Analysis on the characteristics and causes of the "23·7" torrential rainfall event in North China [J]. Torrential Rain and Disasters,42(5):508−520 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−187

张娣,曲晓黎,张中杰,等.2022.朔黄铁路水害特征及雨量警戒阈值研究[J].干旱气象,40(4):677−682. Zhang D, Qu X L, Zhang Z J, et al. 2022. Research on water disasters characteristics and rainfall warning threshold on the Shuozhou-Huanghua Railway [J]. Journal of Arid Meteorology,40(4):677−682 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006−7639(2022)−04−0677

章国材.2014.自然灾害风险评估与区划原理和方法[M].北京:气象出版社:120-150. Zhang G C. 2014. Principles and methods of natural disaster risk assessment and zoning [M]. Beijing:Meteorological Press:120-150 (in Chinese)

张洪宇,孟亮,戴贤春.2019.铁路高影响天气分析及应对策略研究[J].中国铁路,2019(5):12−16+26. Zhang H Y, Meng L, Dai X C. 2019. Analysis of extreme weather conditions and study of railway’s coping strategies [J]. China Railway,2019(5):12−16+26 (in Chinese). doi:10.19549/j.issn.1001−683X.2019.05.012

钟东良,曾钦文,谭哲,等.2023.河源降水重现期方法对比及暴雨致灾危险性分析[J].广东水利水电,2023(1):57−61. Zhong D L, Zeng Q W, Tan Z, et al. 2023. Comparison of methods of precipitation recurrence in Heyuan and analysis of the risk of heavy rainfall [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower,2023(1):57−61 (in Chinese)

周月华,彭涛,史瑞琴.2019.我国暴雨洪涝灾害风险评估研究进展[J].暴雨灾害,38(5):494−501. Zhou Y H, Peng T, Shi R Q. 2019. Research progress on risk assessment of heavy rainfall and flood disasters in China [J]. Torrential Rain and Disasters,38(5):494−501 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2019.05.011

Kellermann P, Schbel A, Kundela G, et al. 2015. Estimating flood damage to railway infrastructure-the case study of the March River flood in 2006 at the Austrian Northern Railway [J]. Natural hazards and earth system sciences,15(11):2485−2496. doi:10.5194/nhess−15−2485−2015

Liu K, Wang M, Cao Y X, et al. 2018. Susceptibility of existing and planned Chinese railway system subjected to rainfall-induced multi-hazards [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 117(11):214−226. doi:10.1016/j.tra.2018.08.030

Monal R, Aniruddha S. 2014. Rain-triggered slope failure of the railway embankment at Malda, India [J]. Acta Geotechnica,9(5):789−798. doi:10.1007/s11440−014−0345−9

Sun S, Gao G, Li Y, et al. 2022. A comprehensive risk assessment of Chinese high-speed railways affected by multiple meteorological hazards [J]. Weather and Climate Extremes,38:100519. doi:10.1016/j.wace.2022.100519

(责任编辑　张 文)