

文章编号: 1003-1421(2026)08-0188-12

引用格式: 种鹏云, 高浦文, 李林卿, 等. 基于TIFNs-ICI-CN的洪涝灾害应急时期铁路重要物资物流风险评估方法研究[J]. 铁道运输与经济, 2026, 48(8): 188-199.

CHONG Pengyun, GAO Puwen, LI Linqing, et al. Research on Risk Assessment Method for Logistics of Important Railway Materials during Flood Disaster Emergency Period Based on TIFNs-ICI-CN[J]. Railway Transport and Economy, 2026, 48(8): 188-199.

基于TIFNs-ICI-CN的洪涝灾害应急时期铁路重要物资物流风险评估方法研究

种鹏云¹, 高浦文², 李林卿^{3, 4}, 王宇莹², 赵永宁², 张 桢²

(1. 云南省低空产业投资有限公司, 云南 昆明 650100; 2. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 四川 成都 611756; 3. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044; 4. 国家铁路局 市场监测评价中心, 北京 100070)

摘 要: 洪涝灾害应急时期铁路重要物资物流出现风险可能会与其他风险发生耦合, 从而发生事故。研究提出了考虑个体共识水平及风险耦合网络的三角直觉模糊数法(TIFNs-ICI-CN), 用于评估洪涝灾害应急时期的铁路重要物资物流风险。首先用工作分解结构-风险分解结构法(WBS-RBS)对洪涝灾害应急下的铁路重要物资物流过程和风险进行工作分解和风险分解; 其次将专家给出的针对洪涝灾害应急时期物流的七级语言评价转换为三角直觉模糊数(TIFNs), 将TIFNs投入可反映个体共识水平(ICI)的单目标线性规模模型中求解专家权重。基于加入专家权重的TIFNs计算效应值, 投入可反映ICI的单目标线性规划模型计算风险权重; 然后基于风险耦合矩阵构建风险耦合网络(CN), 基于专家对风险耦合情况打分的TIFNs对网络路径赋值, 求出各风险的加权出度中心度; 最后将风险权重和风险的加权出度中心度相乘, 基于TIFNs运算规则计算排序值并排序风险。算例结果显示: 铁路重要物资装运、仓库安全与防洪管理、铁路重要物资运输、配送交付等工作过程存在多个较高风险因素出现; 重要物资的应急作业规程不完善、安全责任制度未落实、应急物流方案不合理、临时调配人员缺乏培训等风险会显著提升多风险耦合的概率。最后, 提出风险管理-事故管理-应急救援管理的三级风险应急架构, 为预防洪涝应急时期铁路重要物资物流风险管控提供一定建议。

关键词: 铁路重要物资; 洪涝灾害应急; 风险评估; TIFNs-ICI-CN; 风险耦合

中图分类号: U2; F259.22 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250618002

Research on Risk Assessment Method for Logistics of Important Railway Materials during Flood Disaster Emergency Period Based on TIFNs-ICI-CN

CHONG Pengyun¹, GAO Puwen², LI Linqing^{3, 4}, WANG Yuying², ZHAO Yongning², ZHANG Zhi²

(1. Yunnan Provincial Low-altitude Industry Investment Co., Ltd., Kunming 650100, Yunnan, China; 2. School of Transportation and

收稿日期: 2025-06-18 修订日期: 2026-07-28

通信作者: 李林卿(1993—), 男, 河北唐山人, 国家铁路局市场监测评价中心工程师, 北京交通大学交通运输学院博士研究生。

基金项目: 云南省“兴滇英才支持计划”项目(YNWR-QNBJ-2020-035); 四川省科技厅面上项目(24NSFSC0526); 国家自然科学基金项目(72571223, 72001179)

Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 3. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 4. Market Monitoring and Evaluation Center, National Railway Administration of the People's Republic of China, Beijing 100070, China)

Abstract: During the emergency period of flood disasters, the logistics risks of important railway materials may couple with other risks, leading to accidents. This paper proposed a triangular intuitionistic fuzzy number method (TIFNs-ICI-CN) considering individual consensus levels and risk coupling networks to evaluate the logistics risks of important railway materials during the emergency period of flood disasters. Firstly, the work breakdown structure-risk breakdown structure (WBS-RBS) method was used to conduct work and risk decomposition for the logistics process and risks of important railway materials under a flood disaster emergency. Secondly, the seven-level linguistic evaluations provided by experts for logistics during the flood disaster emergency period were converted into triangular intuitionistic fuzzy numbers (TIFNs), and the TIFNs were input into a single-objective linear scale model reflecting the individual consensus level (ICI) to solve for expert weights. The effect values were calculated based on the TIFNs incorporating expert weights, and were input into a single-objective linear programming model reflecting the ICI to calculate risk weights. Then, based on the risk coupling matrix, a risk coupling network (CN) was constructed, and the TIFNs scored by experts on the risk coupling situation were used to assign values to the network paths, thereby calculating the weighted out-degree centrality of each risk. Finally, the risk weights were multiplied by the weighted out-degree centrality of the risks, and the ranking values were calculated based on the TIFNs operation rules to rank the risks. The calculation results show that multiple high-risk factors appear in work processes such as the shipment of important railway materials, warehouse safety and flood control management, transportation of important railway materials, and distribution and delivery; risks such as incomplete emergency operation procedures for important materials, unimplemented safety responsibility systems, unreasonable emergency logistics plans, and lack of training for temporarily deployed personnel can significantly increase the probability of multi-risk coupling. Finally, a three-level risk emergency architecture of risk management-accident management-emergency rescue management was proposed, providing certain suggestions for the risk prevention and control of important railway material logistics during the flood emergency period.

Keywords: Important Railway Material; Flood Disaster Emergency; Risk Assessment; TIFNs-ICI-CN; Risk Coupling

0 引言

在全球化与城市化的进程中,重要物资物流已成为维系社会运行、保障经济发展的重要环节。煤炭、石油、粮食、钢材等关乎国计民生的资源,若供给中断将直接影响生产与社会领域的正常运转。铁路物流作为应急救援重要物资保障的核心支撑方式,其运营安全在洪涝灾害应急时期面临多维度挑战,如交通中断、仓储积水、配送延迟等风险,可能导致仓库进水、重要物资受损或理化性质变化,从而造成极大的经济损失。因此在洪涝灾害影响下,亟需系统识别铁路物流全过程的潜在风险,确保洪涝灾害应急时期重要物资运输的准时达、全天候、低耗损,实现高质量的应急物流保障。

当前应急时期的铁路物流风险评估多聚焦于大风^[1-2]、地震^[3-4]、火灾^[5-6]等突发性灾害对铁路物流系统的影响,而对洪涝灾害应急时期物流网络韧性及动态响应策略的研究较少。该领域的缺失导致特别是山区洪涝灾害频发背景下,铁路重要物资物流风险评估方法尚未完善。鉴于上述情况,亟需构建能够解析风险因素关联性的理论框架。为有效识别和控制铁路物流过程中的潜在风险,学者们提出工作分解结构-风险分解结构方法(WBS-RBS),该方法具备系统整理风险规律、清晰划分风险因子等优点^[7],但在风险评估中难以处理模糊性、不完全信息。基于此国内外学者对系统安全风险评估方法做出大量研究,如区间数^[8-9]用区间量化不确定性,勾股模糊加权平均算子^[10]结合勾股模糊集和加权平均,处理模糊性和犹豫性,灰色关联^[11]通过计算序

列曲线的几何相似性,分析因素与目标之间的关联程度,这些方法均适用于数据不足、模糊性较大的情况,但均为单目标评价,评价的角度不够全面。后续学者提出多准则评价法如G1法^[12]通过构造理想解和负理想解,计算各方案与理想解的接近程度,层次分析法^[13]通过分层结构和两两比较矩阵,计算权重并综合排序,直觉模糊加权算子^[14]基于直觉模糊集同时考虑隶属度和非隶属度,通过加权平均融合多属性信息。上述方法可针对多目标、多属性问题,提供综合评价框架。但这些方法在本质上多依赖线性加权+两两独立或0-1是否相关的静态假设,难以刻画多源风险间的非线性增强效应、方向性因果关系与时变耦合强度等问题,尤其在应急物流场景下关于风险传播与联动失效的量化研究仍显不足。

为减少专家评价信息损失,并在评价体系中纳入考虑洪涝灾害影响下重要物资物流的风险耦合,研究在洪涝灾害情境下,提出考虑个体共识水平及风险耦合的三角直觉模糊数法(TIFNs-ICI-CN),将专家语言信息评价转换为三角直觉模糊数(TIFNs)结合个体共识水平(ICI)计算专家权重和单风险权重;为量化多风险耦合的影响用TIFNs为物流风险耦合网络(CN)路径赋值并计算加权出度中心度,2个权重相结合提升对洪涝灾害应急时期重要物资物流的安全评估能力。

1 洪涝灾害应急下铁路重要物资物流过程的WBS-RBS分解

在洪涝灾害应急场景下,铁路重要物资从生产端到消费者手中的物流过程程序复杂、事项繁多,且易面临交通管制、人员隔离、物流运输中断等风险,进而影响物资供应与分配,因此需先对该物流过程进行WBS分解,将完整流程拆解为若干独立工作以全面系统识别风险。铁路重要物资物流过程指将物资从产地运至消费地的计划、实施与管理全流程,基于流程梳理构建的WBS分解树可覆盖不同种类物资物流工作,总体分为加工包装、收货入库、仓储管理、分拣出库、运输配送5个主要环节,各环节包含多项重要工作。

加工包装是生产商将原材料转化为物资成品的核心起始环节,相较于日常运输,需对货物和包装

消毒、对成品防水加固以避免交叉感染与水损,部分铁路重要物资可简化流程缩短时间,其高效运作是保障物资数量与质量的根本。

收货入库是物资从生产线流转至仓库的关键过渡,需完成装运、快速收拣检查水损、入库和快速干燥工作,由于洪涝影响,需重点排查受潮情况并及时干燥。在应急场景下,由于要确保应急物资送达的时效性,仅需确保数量无明显差错、外观无明显破损,后续管理员会依据物资特性与仓库规划选择合适存储方式,为后续环节打基础。

仓储管理是对仓库和存储的重要物资的管理过程,需按物资特性与存储要求制定执行存储方案并定期保养维护,同时加强安全与防洪管理,落实特别防洪措施,保持仓库清洁卫生,保障物资数量、质量与安全。

分拣出库是根据订单信息,将重要物资进行拣选、打包、出库的过程。需依据订单信息快速响应处理,拣选所需物资后打包并采取防水措施,再将物资安全高效搬运装载至运输工具完成出库,确保物资准确高效出库以支撑后续运输配送。

运输配送作为重要物资物流的最终环节,包含运输方案制定与防洪路线规划、物资在途运输及配送交付。受洪涝影响,需兼顾路线防洪安全性与运输时效性,规避线路受灾、运力饱和及二次衍生灾害导致的运输中断与物资损坏问题。

将重要物资的物流过程进行两层分解,铁路重要物资物流过程WBS分解结构如图1所示,有助于对各环节逐一开展风险识别。对于不同种类的重要物资,其物流环节、注意事项及面临的风险点与风险等级存

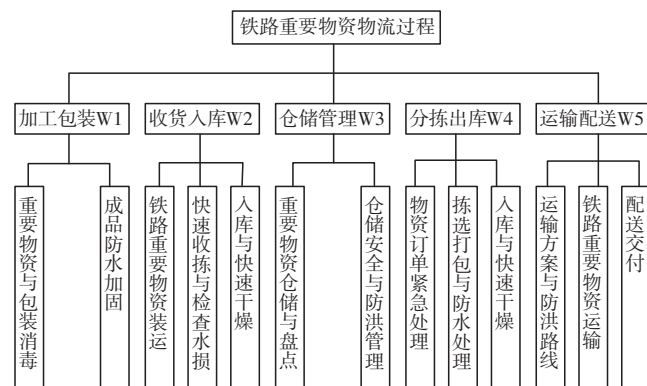


图1 铁路重要物资物流过程WBS分解结构

Fig.1 Work breakdown structure of logistics process of important railway materials

在差异,会导致WBS-RBS耦合矩阵数值不同。

同时,在洪涝灾害应急时期铁路重要物资物流过程中,不同品类物资对应不同物流流程,可能产生的物流风险因素也不尽相同。在RBS分解中,众学者采用较为共性的4M或5M风险因素衡量,在铁路危险货物运输^[8]、道路危险品运输^[15]、粮食储备库作业风险^[16]等研究中具有较好的风险识别效果。研究将基于以下5个因素剖析铁路重要物资物流过程中的风险。

人员因素方面,洪涝环境下作业条件恶劣,人员在高湿、高压、高风险状态下易误操作与组织失误,且应急物流导致工作人员紧缺,临时抽调人员可能缺乏货场工作与灾害应对经验,一线人员还可能因二次洪涝、暴雨产生紧张情绪,或为赶时效省略装卸包装步骤,且人员因素被认为是风险事故主要致因,充分挖掘相关风险可有效控制运输风险、保证运输质量。

设备因素是铁路运输系统中易受洪涝破坏的部分,长时间降雨积水可能导致车厢密闭性下降、容器进水、包装破损,洪水还可能造成轨道形变、信号系统短路,增加列车倾覆或脱轨风险,而物资包装、运输容器、运输工具的完整性、有效性与安全性决定物资受损程度。

重要物资因素方面,应急场景下除粮食、煤油、钢材等常规物资外,还需运输医疗与防洪物资,各类物资存在易腐败、易燃易爆、有毒等物理特征,部分物资相互排斥不宜共同存储运输,毒害性、放射性物资泄漏还会损害人员与生态环境。

环境因素作为重要外部变量,受铁路外部环境安全入侵、安全检查效果较差影响^[17],洪涝后的极端天气会导致线路封闭、威胁仓储与装卸场地安全,洪水退去后潮湿环境、物资变质及地下水细菌病毒滋生可能引发传染病等次生灾害,灾后资源聚集区域还存在恐怖袭击等社会安全隐患。

管理因素方面,物资运输需遵循车站或企业作业方案与流程配置以保障安全有效,而洪涝后运输组织面临应急机制启动、信息不畅、职责交叉等问题,若指挥系统不完善、责任不清、作业规程不具体,易导致多环节协同失效、增加人为管理失误概率。

综上,本研究将重要物资运输分解为25个

风险因素,铁路重要物资物流过程风险分解结构如图2所示。

2 风险因素耦合分析

在洪涝灾害应急时期铁路重要物资物流系统中,风险因素存在显著的耦合特性。传统的风险评估方法无法揭示多维度风险因素的交互作用。故研究突破孤立分析范式,在WBS-RBS分解的基础上考虑多风险因素耦合。依据人员(H)、设备(M_1)、重要物资(M_2)、环境(E)及管理因素(M_3)分类,可将风险耦合划分为3类。

(1) 单因素风险耦合。单因素风险耦合是指同一类风险因素内部的相互作用所引发的风险,具体是指 $H-H$, M_1-M_1 , $E-E$, M_2-M_2 , M_3-M_3 5类。例如,2010年7月甘肃舟曲特大山洪泥石流灾害中,救灾物资运输人员因长时间连续作业(H),部分工人出现疲劳与疏忽大意,导致卸货时多次出现货物摔落和包装破损事故,造成救灾食品受潮报废。这属于典型的 $H-H$ 型单因素耦合风险。

(2) 双因素风险耦合。双因素风险耦合是指不同类别的两类风险因素之间相互作用而引发的风险,具体是指: $H-M_1$, $H-M_2$, $H-M_3$, $H-E$, M_1-M_2 , M_1-M_3 , M_1-E , M_2-E , M_2-M_3 , M_3-E 共10类。例如,2020年7月南方多省洪涝灾害期间,某铁路中转站仓库因暴雨积水(E)导致部分车厢密封性能下降(M_1),加之装卸人员未能及时检查和封堵(H),最终造成大量粮食受潮变质。这属于 $H-E$ 型双因素耦合风险,体现了人员与环境因素的叠加效应。

(3) 多因素风险耦合。多因素风险耦合是指3类及以上不同类别风险因素在同一事件中叠加并相互作用,引发复杂事故,具体是指 $H-M_1-M_2$, $H-M_1-E$, $H-M_2-M_3$ 等16种。例如,2016年湖北武汉“7·20”特大暴雨灾害期间,铁路应急物资运输中,因连续强降雨导致部分线路信号系统受损(M_1-E),运输人员疲劳驾驶未及时发现异常(H),同时应急指挥部门调度方案不合理(M_3),造成一列运送防洪沙袋和食品的列车晚点超过12 h,部分物资受潮报废,严重影响救援进度。这属于 $H-M_1-E-M_3$ 型多因素耦合风险。

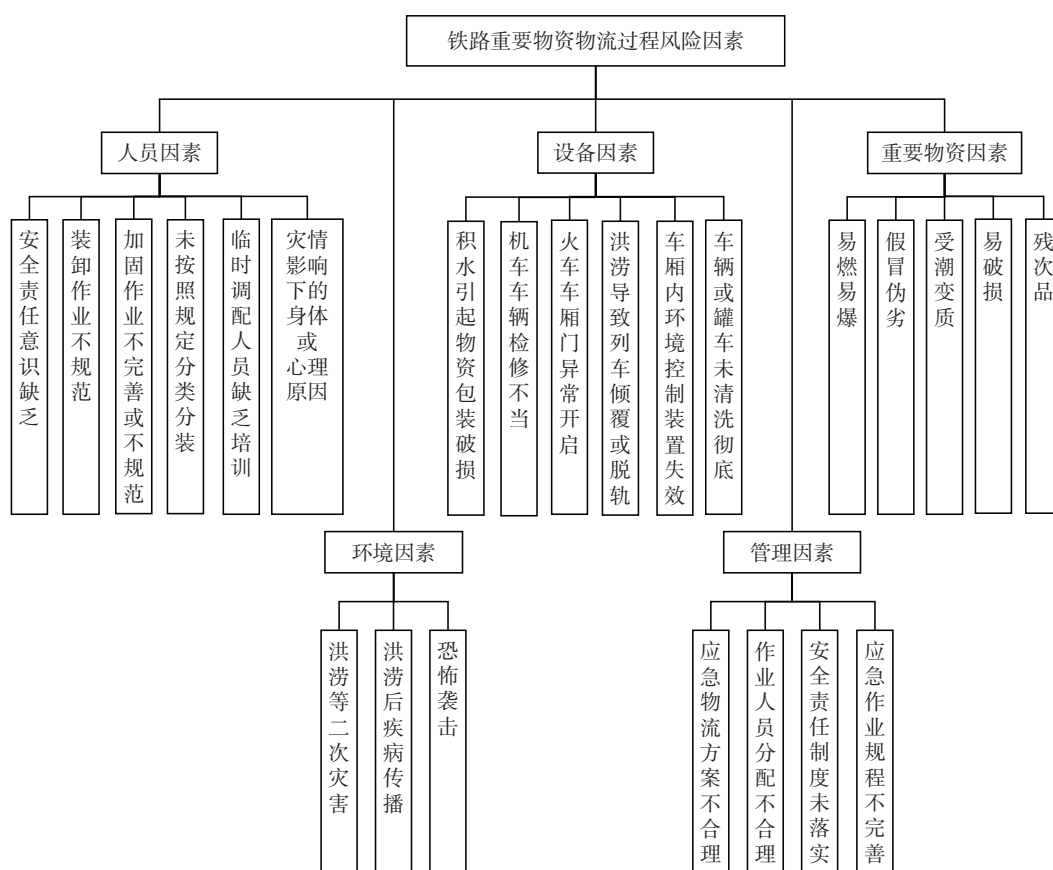


图2 铁路重要物资物流过程风险分解结构

Fig.2 Risk breakdown structure of logistics process of important railway materials

3 基于 TIFNs-ICI-CN 的 WBS-RBS 矩阵改进及权重计算

传统 WBS-RBS 分解矩阵能够在缺乏现场数据的情况下有效识别物流风险，但风险矩阵评价局限于“有”和“无”的 0-1 评价且缺少风险耦合效应的量化分析。为了减少专家语言信息损失与打分主观性以及加入风险耦合评估，研究提出 TIFNs-ICI-CN 方法。此方法可以反映工作过程与风险因素关联强弱的能力，个体共识水平的引入可有效减弱专家打分的主观性，风险耦合网络的建立可有效分析物流风险耦合的能力。1989 年，张世英和林静^[18]引入三角直觉模糊数排序的思想，克服隶属函数实际意义不明和非模糊离散标度对问题描述不全面的问题。现引入三角直觉模糊数相关定义。

定义 1^[19]：设存在有序集合 $TFN = (l, m, n)$ ，满足 $l \leq m \leq n$ ，且隶属函数表示为

$$u_{TFN}(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l} & l \leq x \leq m \\ \frac{u-x}{u-m} & m \leq x \leq u \end{cases} \quad (1)$$

式中： l, m, n 分别为三角直觉模糊数下限值、中间值和上限值，且当 $l \geq 0$ 时，三角直觉模糊数为正向直觉模糊数。

定义 2^[20]：令 $TFN_1 = (l_1, m_1, n_1)$ ， $TFN_2 = (l_2, m_2, n_2)$ ，则三角直觉模糊数的运算法则为

$$\textcircled{1} TFN_1 + TFN_2 = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, n_1 + n_2);$$

$\textcircled{2} \lambda TFN_1 = (\lambda l_1, \lambda m_1, \lambda n_1)$ 。上述运算法则可以推广至 2 个及以上的三角直觉模糊数运算，在此不予赘述。

定义 3^[21]：设有 $TFN = (l, m, n)$ ，则该三角直觉模糊数的排序值为

$$rank(TFN) = \frac{l + 4m + n}{6} + \frac{n - l}{\sqrt{24}} \quad (2)$$

对于三角直觉模糊数 $TFN_i (i = 1, 2)$ ，其排序规

则如下。

①当且仅当 $TFN_1 > TFN_2$ 时, 存在 $rank(TFN_1) > rank(TFN_2)$ 。

②当且仅当 $TFN_1 < TFN_2$ 时, 存在 $rank(TFN_1) < rank(TFN_2)$ 。

③当且仅当 $TFN_1 = TFN_2$ 时, 存在 $rank(TFN_1) = rank(TFN_2)$ 。

3.1 单风险耦合下结合ICI的专家权重计算

现需确认专家决策矩阵权重, 研究采用文献^[22]的ICI确定该权重。设有 e 位专家打分, 对于总体三角模糊数决策矩阵 $T = (TFN_{ij})_{M \times N}$, 矩阵元素 $TFN_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, n_{ij})$ 中各数值计算为

$$\begin{cases} l_{ij} = \sum_{k=1}^e w_k l_{ij}^k \\ m_{ij} = \sum_{k=1}^e w_k m_{ij}^k \\ n_{ij} = \sum_{k=1}^e w_k n_{ij}^k \end{cases} \quad (3)$$

专家打分的ICI可由个体决策矩阵 T_k 和总体决策矩阵 T 之间的偏差确定, 该水平可由个体共识指标反映。

$$ICI^k = \frac{1}{MN} d(T_{ij}^k, T_{ij}) \quad (4)$$

其中 $d(T_{ij}^k, T_{ij})$ 为闵可夫斯基距离, 计算公式为

$$d(T_{ij}^k, T_{ij}) = \left(\frac{1}{3} [(l_{ij}^k - l_{ij})^p + (m_{ij}^k - m_{ij})^p + (n_{ij}^k - n_{ij})^p] \right)^{1/p} \quad (5)$$

当 $p = 1$ 时, 闵可夫斯基距离将变为汉明距离, 令 $p = 1$, 则个体共识指标为

$$ICI_1^k = \frac{1}{3MN} (|l_{ij}^k - l_{ij}| + |m_{ij}^k - m_{ij}| + |n_{ij}^k - n_{ij}|) \quad (6)$$

当 $p \rightarrow +\infty$, 则此时个体共识指标为灵敏共识指标

$$ICI_{+\infty}^k = \frac{1}{3MN} \max(|l_{ij}^k - l_{ij}| + |m_{ij}^k - m_{ij}| + |n_{ij}^k - n_{ij}|) \quad (7)$$

式(6)为个体与总体偏差的平均值, 反映专家打分积极性; 式(7)为个体与总体偏差的最大值, 反映专家打分消极性。将2种特殊情况下的打分方式结合, 则打分专家的平均个体共识指标为

$$AICI^k = \alpha ICI_1^k + (1 - \alpha) ICI_{+\infty}^k \quad (8)$$

其中参数 $\alpha \in [0, 1]$, 当 $\alpha = 0$ 时, 反映专家对风险的消极态度, 当 $\alpha = 0.5$ 时, 反映专家对风险的中立态度, 当 $\alpha = 1$ 时, 反映专家对风险的积极态度。由上述可知, 若平均个体公式指标 $AICI^k$ 越小, 代表专家评价与总体差距越小, 此时决策结果越可靠。为使得 $AICI$ 最小, 建立如下的单目标线性规划模型。

$$\begin{aligned} \min & \sum_{k=1}^e AICI^k \\ \text{s.t.} & \begin{cases} 0 \leq w_k \leq 1 & k = 1, 2, \dots, e \\ \sum_{k=1}^e w_k = 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{令: } l_{ij}^{k+} &= \frac{1}{2} (|l_{ij}^k - l_{ij}| + l_{ij}^k - l_{ij}), \quad l_{ij}^{k-} = \frac{1}{2} (|l_{ij}^k - l_{ij}| - l_{ij}^k + l_{ij}), \\ m_{ij}^{k+} &= \frac{1}{2} (|m_{ij}^k - m_{ij}| + m_{ij}^k - m_{ij}), \quad m_{ij}^{k-} = \frac{1}{2} (|m_{ij}^k - m_{ij}| - m_{ij}^k + m_{ij}), \\ n_{ij}^{k+} &= \frac{1}{2} (|n_{ij}^k - n_{ij}| + n_{ij}^k - n_{ij}), \quad n_{ij}^{k-} = \frac{1}{2} (|n_{ij}^k - n_{ij}| - n_{ij}^k + n_{ij}), \\ \gamma^k &= \max(|l_{ij}^k - l_{ij}| + |m_{ij}^k - m_{ij}| + |n_{ij}^k - n_{ij}|). \end{aligned}$$

将式(3)至式(8)代入线性规划模型(9)中, 整理后则有

$$\begin{aligned} \min &= \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^e [\alpha (l_{ij}^{k+} + l_{ij}^{k-} + m_{ij}^{k+} + m_{ij}^{k-} + n_{ij}^{k+} + n_{ij}^{k-}) + (1 - \alpha) \gamma^k] \\ \text{s.t.} & \begin{cases} 0 \leq w_k \leq 1 \\ \sum_{k=1}^e w_k = 1 \\ l_{ij}^{k+} - l_{ij}^{k-} = l_{ij}^k - \sum_{k=1}^e w_k l_{ij}^k & \forall i \in I, j \in J \\ m_{ij}^{k+} - m_{ij}^{k-} = m_{ij}^k - \sum_{k=1}^e w_k m_{ij}^k & \forall i \in I, j \in J \\ n_{ij}^{k+} - n_{ij}^{k-} = n_{ij}^k - \sum_{k=1}^e w_k n_{ij}^k & \forall i \in I, j \in J \\ l_{ij}^{k+} + l_{ij}^{k-} + m_{ij}^{k+} + m_{ij}^{k-} + n_{ij}^{k+} + n_{ij}^{k-} \leq \gamma^k & \forall i \in I, j \in J \\ I = \{1, 2, \dots, M\}; J = \{1, 2, \dots, N\} \\ K = \{1, 2, \dots, e\} \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

令 $\alpha = 0.5$, 求解上述单目标线性规划模型后即可确定专家权重。

3.2 基于ICI的风险权重计算

定义4: 设 x 的三角可行性密度函数 $f_{TFN}(x)$ 表示为

$$f_{TFN}(x) = \begin{cases} \frac{2(x-l)}{(m-l)(n-l)} & l \leq x \leq m \\ \frac{2(n-x)}{(n-m)(n-l)} & m \leq x \leq n \end{cases} \quad (11)$$

定义5: 两个有序集合 $TFN_1(l_1, m_1, n_1)$, $TFN_2(l_2, m_2, n_2)$, 令 $TFN_1(l_1, m_1, n_1) \geq TFN_2(l_2, m_2, n_2)$, 则偏好程度 $P(TFN_1 \geq TFN_2)$ 定义为

$$P(TFN_1 \geq TFN_2) = \frac{9}{4} \iint_{x_1 \geq x_2} u_{TFN_1}(x_1) \cdot u_{TFN_2}(x_2) \cdot f(x_1) \cdot f(x_2) dx_1 dx_2 \quad (12)$$

对偏好度有以下规则。

$$\textcircled{1} 0 \leq P(TFN_1 \geq TFN_2) \leq 1.$$

$$\textcircled{2} P(TFN_1 \geq TFN_1) = \frac{1}{2}.$$

$$\textcircled{3} P(TFN_1 \geq TFN_2) + P(TFN_2 \geq TFN_1) = 1.$$

现需确认每个风险因素的权重, 计算专家权重后的三角模糊数决策矩阵 $T = (TFN_{ij})_{M \times N}$, 构造积极和消极的理想评级 TFN_j^+ , TFN_j^-

$$TFN_j^+ = (l_j^+, m_j^+, n_j^+) =$$

$$\left(\max_{i=1, 2, \dots, M} (l_{ij}), \max_{i=1, 2, \dots, M} (m_{ij}), \max_{i=1, 2, \dots, M} (n_{ij}) \right) \quad (13)$$

$$TFN_j^- = (l_j^-, m_j^-, n_j^-) =$$

$$\left(\min_{i=1, 2, \dots, M} (l_{ij}), \min_{i=1, 2, \dots, M} (m_{ij}), \min_{i=1, 2, \dots, M} (n_{ij}) \right) \quad (14)$$

根据 TFN_j^+ , TFN_j^- 计算效应值 $T\hat{F}N_{ij}$, 而后得到标准化的效应值 TFN_{ij}^{nor}

$$T\hat{F}N_{ij} = P(TFN_j^+ \geq TFN_{ij}) - P(TFN_{ij} \geq TFN_j^-) \quad (15)$$

$$TFN_{ij}^{nor} = \frac{T\hat{F}N_{ij} - t\hat{f}n_j^-}{t\hat{f}n_j^+ - t\hat{f}n_j^-} \quad (16)$$

其中 $t\hat{f}n_j^+$ 和 $t\hat{f}n_j^-$ 分别表示 $t\hat{f}n_j^+ = \max_{i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N}$

$(T\hat{F}N_{ij})$, $t\hat{f}n_j^- = \min_{i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N} (T\hat{F}N_{ij})$ 。在计算中希望权重更偏向于理想评级远离消极评级, 故 $P(TFN_j^+ \geq TFN_{ij})$ 的值越大 $P(TFN_{ij} \geq TFN_j^-)$ 的值越小, 这样分配的权重更符合实际。

将式(12)至(16)代入线性规划(17)中, 整理后有

$$\begin{aligned} \min \theta & \sum_{j=1}^N \left(s_j \sum_{i=1}^M TFN_{ij}^{nor} \right) + (1-\theta) \sum_{i=1}^M \zeta_i \\ \text{s.t.} & \begin{cases} 0 \leq s_j \leq 1 \\ \sum_{j=1}^M \zeta_i = 1 & i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N \\ \zeta_j \geq s_j \cdot TFN_{ij}^{nor} \end{cases} \end{aligned} \quad (17)$$

令 $\theta = 0$, $\theta = 0.5$, $\theta = 1$ 这3种情况求解上述单目标线性规划方程可得风险因素的权重分别为 s_{j1} , s_{j2} , s_{j3} 。结合3种情况得到最后的权重 s_j 表示为

$$s_j = \frac{s_{j1} + 2 \cdot s_{j2} + s_{j3}}{\sum_{j=1}^N (s_{j1} + 2 \cdot s_{j2} + s_{j3})} \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (18)$$

3.3 CN构建及加权出度中心度计算

设现有耦合矩阵 $N^{ou} = (N_{ij}^{ou})_{M \times N}$ (风险源能耦合 $N_{ij}^{ou} = 1$, 不能耦合则为0), e' 位专家打分, 对于耦合总体三角模糊数决策矩阵 $T^{ou} = (TFN_{ij}^{ou})_{M \times N}$, 矩阵元素 $TFN_{ij}^{ou} = (L_{ij}^{ou}, M_{ij}^{ou}, N_{ij}^{ou})$ 中各数值计算为

$$L_{ij}^{ou} = \sum_{k=1}^e w'_k L_{ij}^k, M_{ij}^{ou} = \sum_{k=1}^e w'_k M_{ij}^k, N_{ij}^{ou} = \sum_{k=1}^e w'_k N_{ij}^k \quad (19)$$

将式(19)代入式(10)并令 $\alpha = 0.5$ 得到专家权重 w'_k , 以耦合矩阵为邻接矩阵, 构建CN。令 $G = (I, E)$, 其中 $I = \{1, 2, \dots, N\}$ 。根据式(2)得到 $rank(TFN^{ou})$ 对向图 G 边赋值, 计算各风险源的加权出度中心度。

$$C_{out}(j) = \sum_{j \neq k} rank(TFN_{ik}^{ou}) \quad (20)$$

更新总体三角模糊数决策矩阵。

$$TFN_{ij}' = (C_{out}(j) + 1) \cdot (s_j \cdot l_{ij}, s_j \cdot m_{ij}, s_j \cdot n_{ij}) \quad (21)$$

综上所述, 方法论流程图如图3所示。

4 洪涝灾害下铁路重要物资物流风险评估分析

研究基于上述方法完成铁路重要物资物流的WBS-RBS矩阵构建, 根据物流过程出现风险事故时与风险因素的关联程度强弱, 确定语言评价标度为

$H = \{H_1 = \text{非常弱}, H_2 = \text{弱}, H_3 = \text{较弱}, H_4 = \text{一般}, H_5 = \text{较强}, H_6 = \text{强}, H_7 = \text{非常强}\}$, 共7个评价等级^[23-24]。根据上述7个语言评价等级, 对应7个不

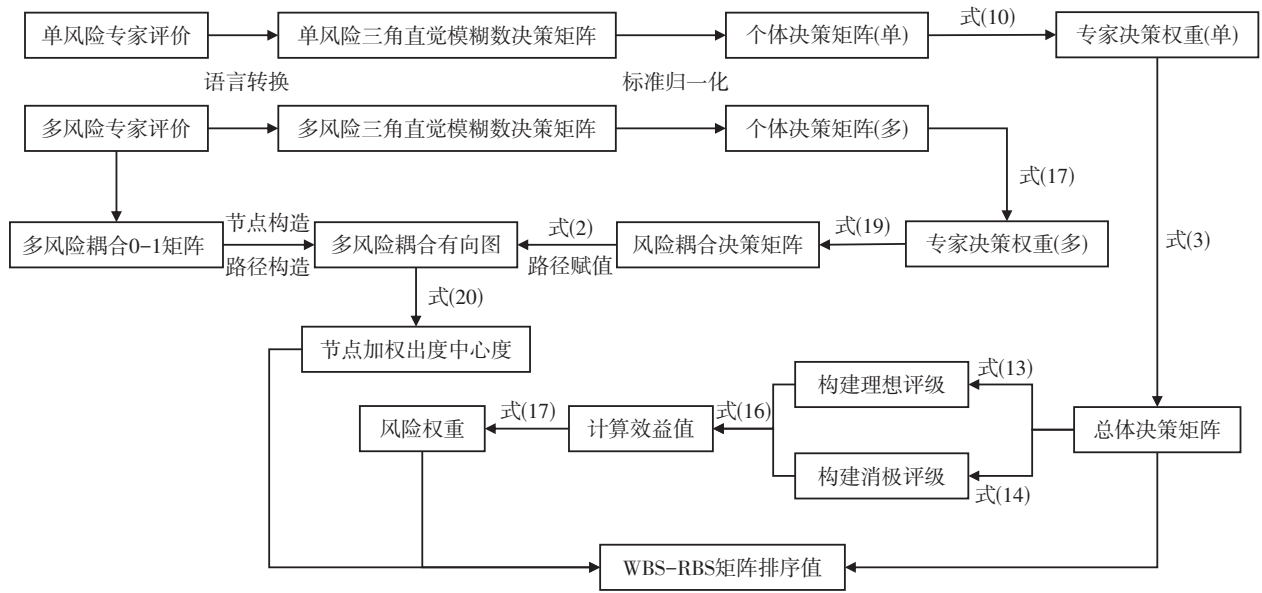


图3 方法论流程图

Fig.3 Methodology flowchart

同的三角直觉模糊数,语言评价等级对应的三角直觉模糊数如表1所示。上述指标均为效益性指标,令式(10)的目标函数中 $\alpha = 0.5$,将专家的语言评价标度分别转换为专家决策矩阵,并提取 l_{ij}^k , m_{ij}^k 和 n_{ij}^k ,投入模型(10)中,通过求解器得到专家权重分别为 $w_1 = 0.31$, $w_2 = 0.21$, $w_3 = 0.32$, $w_4 = 0.15$ 。根据各专家权重 w_k 和专家决策矩阵 T_k ,通过式(3)得到总体决策矩阵 T ,最后根据式(2)得到 $W_{ij}R_{ij}$,基于个体共识水平确定专家权重的各个工作过程与风险因素排序值如图4所示。

表1 语言评价等级对应的三角直觉模糊数

Tab.1 Triangular intuitionistic fuzzy numbers corresponding to linguistic evaluation levels

语言变量	三角直觉模糊数	语言变量	三角直觉模糊数
非常弱	(0, 0, 0.167)	较强	(0.500, 0.667, 0.833)
弱	(0, 0.167, 0.333)	强	(0.667, 0.833, 1)
较弱	(0.167, 0.333, 0.500)	非常强	(0.833, 1, 1)
一般	(0.333, 0.500, 0.667)		

单风险因素权重表如表2所示。令式(17)中 $\theta = 0$, $\theta = 0.5$, $\theta = 1$,风险源耦合评价中3位专家的语言评价转换为专家决策矩阵,投入模型(10)得专家权重为: $w'_1 = 0.27$, $w'_2 = 0.54$, $w'_3 = 0.18$ 。通过结合总体决策矩阵 T 得到25个风险因素权重,多风险耦合风险加权出度中心度如表3所示。结合式(21)可得各个物流过程风险值以及排序结果如表4所示。

对比表2和表3中,受潮变质(R_{33})造成的安全事故权重最大,在多风险耦合角度应急作业规程不完善(R_{54})、安全责任制未落实(R_{53})、应急物流方案不合理(R_{51})、临时调配人员缺乏培训(R_{16})这几个风险单独造成事故的权重不高但会显著提升与其他风险的耦合发生概率。

表4中可知成品防水加固(W_{21})、铁路重要物资运输(W_{52})、仓储安全和防洪管理(W_{32})3个环节容易出现事故。在图4中,横向比较风险因素 R_{ij} ,可知安全责任意识缺乏(R_{11})、未认真校核重要物资品类(R_{13})、积水引起重要物资包装破损(R_{21})、易燃易爆(R_{31})、受潮变质(R_{33})、易破损(R_{34})和应急物流方案不合理(R_{51})等风险因素更易导致运输事故。

纵向比较工作过程,可知铁路重要物资装运(W_{21})、仓库安全与防洪管理(W_{32})、铁路重要物资运输(W_{52})、配送交付(W_{53})等工作过程存在多个较高风险因素。

综合比较,发现在重要物资安全与防洪管理中在岗人员缺乏安全责任意识($W_{32}R_{11} = 0.940$)、卸货入库与快速干燥过程中不规范的装卸作业($W_{23}R_{12} = 0.974$)、成品防水加固过程中因操作不当导致的积水引起包装破损($W_{12}R_{21} = 0.940$)、铁路重要物资运输过程中车厢内控制环境装置失效($W_{52}R_{25} = 0.926$)和重要物资与包装消毒工作中因防护不当造成的疾

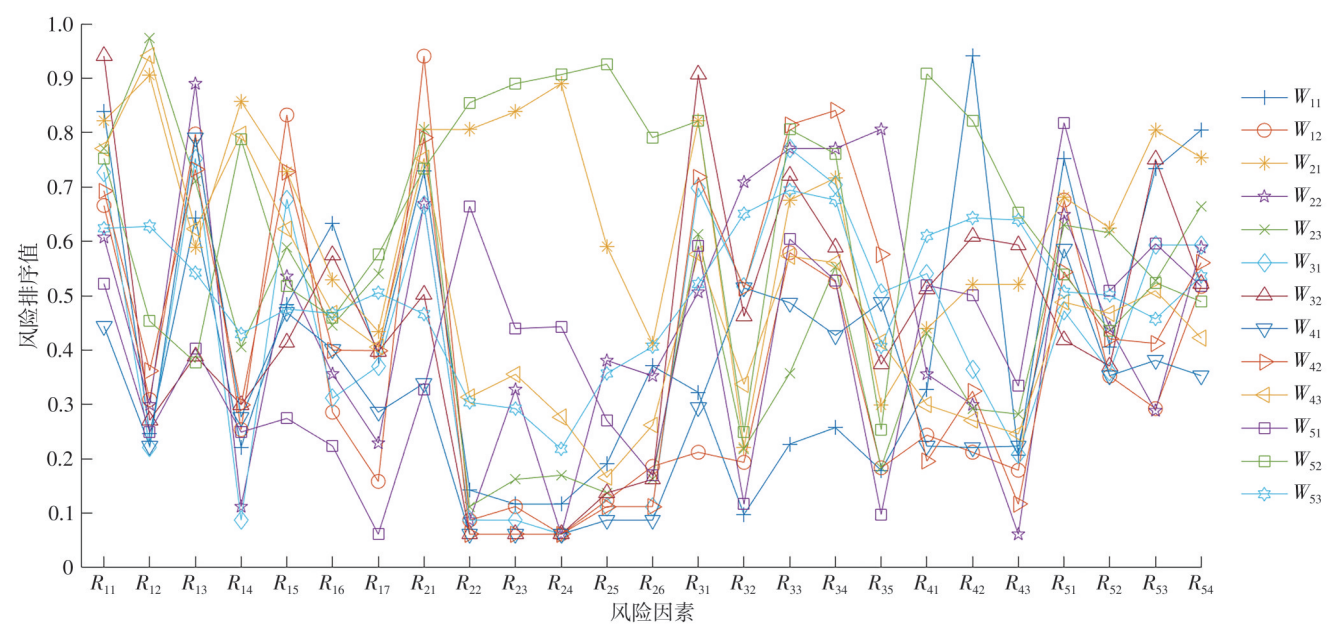


图4 基于个体共识水平确定专家权重的各个工作过程与风险因素排序值

Fig.4 Ranking values for each work process and risk factor based on expert weights determined by individual consensus level

表2 单风险因素权重表
Tab.2 Single risk factor weights

风险因素	s_j	风险因素	s_j	风险因素	s_j	风险因素	s_j
R_{11}	0.039	R_{21}	0.044	R_{32}	0.048	R_{51}	0.028
R_{12}	0.009	R_{22}	0.009	R_{33}	0.302	R_{52}	0.009
R_{13}	0.006	R_{23}	0.009	R_{34}	0.051	R_{53}	0.037
R_{14}	0.033	R_{24}	0.009	R_{35}	0.048	R_{54}	0.037
R_{15}	0.051	R_{25}	0.010	R_{41}	0.028		
R_{16}	0.050	R_{26}	0.011	R_{42}	0.009		
R_{17}	0.051	R_{31}	0.037	R_{43}	0.035		

表3 多风险耦合风险加权出度中心度
Tab.3 Weighted out-degree centrality of multi-risk coupling risks

风险因素	$c_{out}(j)$	风险因素	$c_{out}(j)$	风险因素	$c_{out}(j)$	风险因素	$c_{out}(j)$
R_{11}	5.219	R_{21}	0.955	R_{32}	0	R_{51}	6.074
R_{12}	2.337	R_{22}	2.354	R_{33}	0	R_{52}	3.679
R_{13}	3.973	R_{23}	3.060	R_{34}	0	R_{53}	7.641
R_{14}	2.237	R_{24}	4.621	R_{35}	0	R_{54}	9.189
R_{15}	3.685	R_{25}	0.748	R_{41}	2.535		
R_{16}	6.611	R_{26}	1.622	R_{42}	1.628		
R_{17}	3.888	R_{31}	0	R_{43}	1.752		

病传播($W_{11}R_{42} = 0.940$)排序值高，容易导致物流事故发生。

为验证基于上述模型评价结果的有效性，将上述模型中专家权重确定方法替换为CRITIC权重法并再次计算。将4位专家的评价数据转换为三角直

表4 物流过程总风险排序
Tab.4 Ranking of total risks in logistics process

物流过程	风险值	排序	物流过程	风险值	排序
W_{11}	1.690	4	W_{41}	1.210	13
W_{12}	1.382	11	W_{42}	1.617	8
W_{21}	2.118	1	W_{43}	1.618	7
W_{22}	1.485	10	W_{51}	1.345	12
W_{23}	1.650	6	W_{52}	1.925	2
W_{31}	1.611	9	W_{53}	1.663	5
W_{32}	1.737	3			

觉模糊数的排序值后，基于CRITIC权重法求解专家权重，可得 $e_1 = 0.264$ ， $e_2 = 0.242$ ， $e_3 = 0.236$ 和 $e_4 = 0.258$ 。基于CRITIC确定专家权重的各个工作过程与风险因素排序值如图5所示，可得研究方法的评价结果与CRITIC评价结果趋势一致。重要物资安全与防洪管理中在岗人员缺乏安全责任意识($W_{32}R_{11} = 0.956$)、卸货入库与快速干燥过程中不规范的装卸作业($W_{23}R_{12} = 0.981$)、成品防水加固过程中因操作不当导致的积水引起包装破损($W_{12}R_{21} = 0.956$)、铁路重要物资运输过程中车厢内控制环境装置失效($W_{52}R_{25} = 0.926$)和重要物资与包装消毒工作中因防护不当造成的疾病传播($W_{11}R_{42} = 0.956$)排序值仍然较高，与研究模型结果一致，可证明该模型研究结果具备有效性。

在洪涝灾害期间，由于高强度物流作业和洪涝

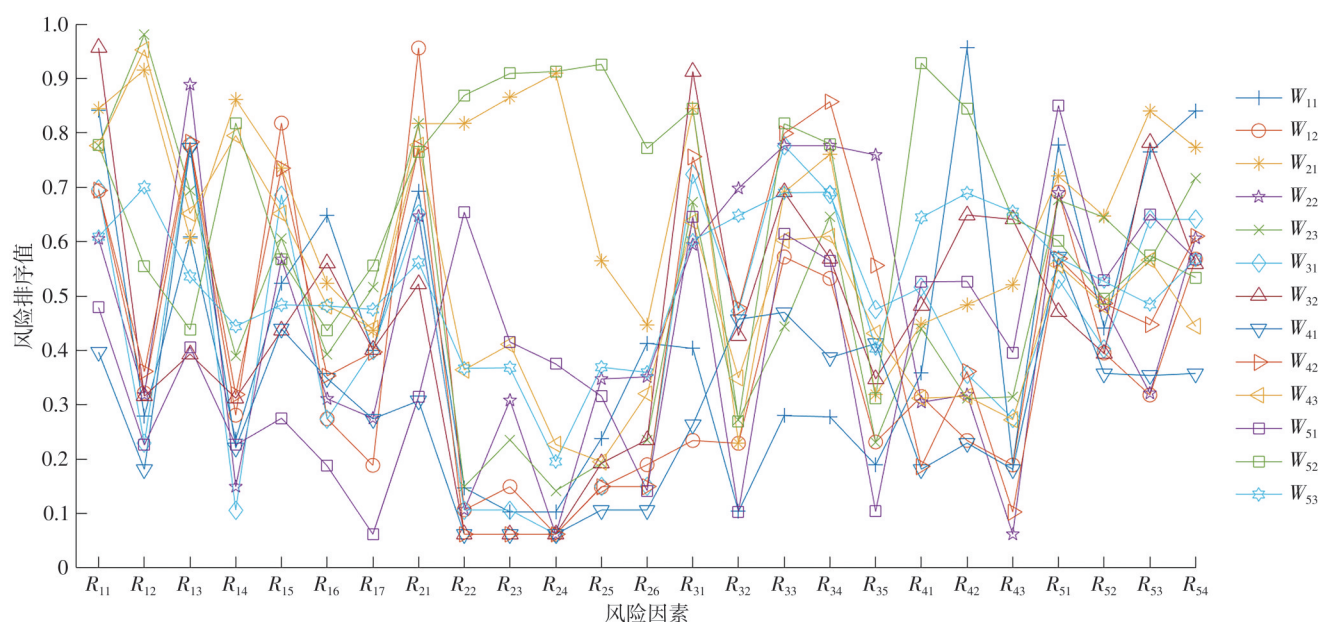


图5 基于CRITIC确定专家权重的各个工作过程与风险因素排序值

Fig.5 Ranking values for each work process and risk factor based on expert weights determined by CRITIC

灾害引起的紧张情绪,易导致在岗人员安全意识缺乏、操作不当,同时为及时响应受灾区域重要物资需求,会减少物流作业过程,导致物流风险提高。因此在洪涝灾害应急期间,需额外调配更多应急物流在岗人员,以满足大量应急物流需求,同时注意在岗人员作业时间,及时完成作业人员换班,避免疲劳和长时间高压环境作业。洪涝灾害应急期间,由于可能的强降雨天气和积水环境,导致车厢内控温装置因进水失效,易引发铁路重要物资变质等物流事故,因此需安排作业人员定时定岗检查车辆设备是否进水故障,若存在则及时上报并完成设备修复和更换,尽可能降低设备故障对铁路重要物资物流延误的影响。洪涝灾害后,地下水、河流水等的细菌易带至地表并滋生,受灾区域饮水饮食卫生状况恶劣,铁路重要物资运输前需做好重要物资及其包装的细菌病毒消杀工作,避免外界病毒细菌输入受灾区域,导致民众和救援人员的健康受到威胁。

为应对洪涝灾害影响下的铁路重要物资物流风险,研究基于风险矩阵识别结果,提出风险管理-事故管理-应急救援管理的三级风险应急架构。风险管理旨在洪涝灾害未发生时,预防可能存在的应急物流风险。在风险管理期间,铁路重要物资物流相关部门可联合当地气象和洪涝灾害监测部门,并基于无人机实时探测与监控技术,构建无人机-气

象-洪涝灾害预警的三方协同风险预防体系。若出现强降雨天气,则及时启动洪涝灾害应急预案,预防铁路重要物资物流中断情况。事故管理旨在洪涝灾害发生时应对风险对铁路重要物资物流的影响,进而避免事故发生。基于上述评估结果可知,在事故管理时期,铁路重要物资物流作业人员应着重注意重要物资防水包装与铁路车厢设备干燥,采用作业人员两两交叉式检验流程,确保重要物资包装无破损、设备无异常,交叉式检验尽可能避免应急物流期间作业人员紧缺的问题,同时可保证物流过程中不出现因洪涝积水导致的包装破碎、设备故障等问题。应急救援时期旨在高效率抢修受洪涝灾害影响导致的水毁路段,快速恢复铁路重要物资物流运输工作。在强降雨和洪涝灾害初期阶段,铁路货运部门可基于大数据、强降雨区域跟踪、无人机等技术结合,实时预测较大可能的受灾路段并监控,储备抢险人员与抢险设备。通过无人机监控发现出现受灾路段后,及时派遣抢险团队及时救灾,在损毁程度较低时完成受阻路段的抢修与疏通工作,可实现最大效率恢复路段运行,保证铁路重要物资物流的持续工作。

5 结论

研究定性剖析洪涝灾害应急时期重要物资物流

的特点和方式。利用传统WBS-RBS风险矩阵分解风险,为减少专家语言信息损失引入TIFNs;为进一步减少专家打分主观性基于TIFNs和ICI,计算专家权重与风险权重;为量化风险耦合作用构建CN,利用TIFNs和ICI计算的结果为CN路径赋值,计算加权出度中心度;后根据TIFNs运算法则,加入风险权重以及风险加权出度中心度计算风险的各个排序值,获取高风险工作过程和高事故率风险因素等信息。最后基于CRITIC权重法与研究方法对比,2种方法结果大致相同,证明研究方法的有效性。

根据算例结果与洪涝灾害应急特征可知,洪涝灾害应急物流期间的极端暴雨与洪水天气,易导致车厢设备故障和重要物资包装破损。为满足应急物流的高负荷工作以及快速响应受灾区域重要物资需求,应急物流在岗人员易因缺乏安全责任意识,简略部分卸货入库与快速干燥重要物资步骤,进而导致物流风险的增加。同时未对重要物资及其包装做好细菌病毒消杀,易导致洪涝受灾区域出现传染病的次生灾害。鉴于此,研究提出风险管理-事故管理-应急救援管理的三级风险应急架构:①风险管理时期,构建无人机-气象-洪涝灾害预警的三方协同风险预防体系,及时启动洪涝灾害应急预案,预防铁路重要物资物流中断情况;②事故管理时期,采用作业人员两两交叉式检验流程,确保重要物资包装无破损、设备无异常;③应急救援时期,可基于大数据、强降雨区域跟踪、无人机等技术结合,实时预测较大可能的受灾路段并监控,及时派遣抢险团队救灾。未来研究将拓展梯形直觉模糊数的组合赋权模型在风险评价中的应用,进一步提升多维度风险因子的量化评估精度与系统鲁棒性。

参考文献:

- [1] 张 娣, 张金满, 曲晓黎, 等. 基于AHP-熵权法的重载铁路典型段大风灾害风险评估[J]. 气象科技, 2024(4): 592-600.
ZHANG Di, ZHANG Jinman, QU Xiaoli, et al. Risk Assessment Gale Disaster along Typical Sections of Heavy-Haul Railway Based on AHP and Entropy Weight Method[J]. Meteorological Science and Technology, 2024(4): 592-600.
- [2] ZHAO G Y, MA X P, QIU X Y, et al. Data-Driven Gale-Induced Risk Assessment Strategy for the High Speed Railway System[J]. Journal of Transportation Safety & Security, 2024, 16(8): 799-819.
- [3] 王 鹏, 魏 强, 王景春, 等. 基于灰色模糊语言的铁路隧道施工风险评估[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(11): 106-112.
WANG Peng, WEI Qiang, WANG Jingchun, et al. Risk Assessment of Railway Tunnel Construction Based on Grey Fuzzy Linguistic Theory[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(11): 106-112.
- [4] ZHOU G Y, ZHU Z H, HUANG Y, et al. Post-Earthquake Damage Probability Assessment of High Speed Railway Simply Supported Bridge Based on Traffic Capacity[J]. Engineering Structures, 2024, 318: 118741.
- [5] 金玉祥. 仓储物流场所火灾风险评估[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(7): 1018-1020.
JIN Yuxiang. Fire Risk Assessment of Storage and Logistics Place[J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(7): 1018-1020.
- [6] KONG S M, KIM H G, LEE H H, et al. Development of a Fire Risk Assessment Program for Submerged Tunnels[J]. Applied Sciences, 2025, 15(12): 6798.
- [7] RAFELE C, HILLSON D, GRIMALDI S. Understanding Project Risk Exposure Using the Two-Dimensional Risk Breakdown Matrix [C]//Project Management Institute. PMI Global Congress 2005: EMEA Proceedings. Newtown Square, PA: Project Management Institute, 2005: 1-8.
- [8] 黄文成, 帅 斌, 张光亚. 基于改进的WBS-RBS识别铁路危险品运输风险[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(8): 93-99.
HUANG Wencheng, SHUAI Bin, ZHANG Guangya. Improved WBS-RBS Based Identification of Risks in Railway Transportation of Dangerous Goods[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(8): 93-99.
- [9] JIANG Weiyang, HE Xiaolong, DU Hejia. Safety Risk Analysis of Large-Scale Complex Project Based on WBS-RBS and Interval Numbers[J]. International Journal of Plant Engineering and Management, 2022, 27(3): 129-143.
- [10] 贺政纲, 郭静妮, 徐君翔. 基于WBS-RBS和PFWA算子的多式联运网络安全风险评估[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(2): 441-446.
HE Zhenggang, GUO Jingni, XU Junxiang. On the Safety Risk Assessment of the Multimodal Transportation Network Based on the WBS-RBS and PFWA Operator[J]. Journal of

- Safety and Environment, 2020, 20(2): 441-446.
- [11] 于景飞, 刘俊俊. 组合赋权-云模型的变电站检修风险评估[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(9): 3315-3324.
- YU Jingfei, LIU Junjun. Risk Assessment of Substation Maintenance Based on Combined Weighting-Cloud Model[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(9): 3315-3324.
- [12] 李润国, 周早弘, 肖茹竞, 等. 基于WBS-RBS-G1法的溶洞地区钻孔灌注桩旋挖施工风险识别与评价[J]. 建筑科技, 2024, 8(8): 129-132.
- LI Runguo, ZHOU Zaohong, XIAO Rujing, et al. Risk Identification and Evaluation of Rotary Excavation Construction of Bored Pile in Karst Areas Based on the WBS-RBS-G1 Method[J]. Build Technology, 2024, 8(8): 129-132.
- [13] 陈红军, 刘波, 任鑫. 基于改进的WBS-RBS与FHAP方法的煤炭企业管理信息化项目建设关键风险识别[J]. 中国煤炭, 2015, 41(6): 30-37.
- CHEN Hongjun, LIU Bo, REN Xin. Key Risks Identification of Management Informatization Projects Construction for Coal Enterprises Based on Improved WBS-RBS and FHAP Method[J]. China Coal, 2015, 41(6): 30-37.
- [14] 法慧妍, 帅斌, 吕敏, 等. 基于WBS-RBS和IFWA算子的中欧班列多式联运安全风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(6): 200-206.
- FA Huiyan, SHUAI Bin, LYU Min, et al. Safety Risk Assessment of Multimodal Transportation of China Railway Express Based on WBS-RBS and IFWA Operator[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(6): 200-206.
- [15] 卢红奇, 聂芳艺. 基于WBS-RBS和风险度的危险品道路运输风险分析[J]. 工业安全与环保, 2021, 47(12): 32-36.
- LU Hongqi, NIE Fangyi. Risk Analysis of Hazardous Goods Road Transportation Based on WBS-RBS and Risk Degree[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2021, 47(12): 32-36.
- [16] 崔鹏程, 陈鑫, 单常尧, 等. 基于WBS-RBS和BN耦合的粮食储备库作业风险识别与分析[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(S2): 82-89.
- CUI Pengcheng, CHEN Xin, SHAN Changyao, et al. Risk Identification and Analysis of Grain Storage Operation Based on WBS-RBS and BN[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(S2): 82-89.
- [17] 包云, 李亚群, 沈腾, 等. 铁路外部环境安全监测方案研究[J]. 中国铁路, 2022(4): 97-101.
- BAO Yun, LI Yaqun, SHEN Kun, et al. Research on Monitoring Scheme of Railway External Environmental Safety[J]. China Railway, 2022(4): 97-101.
- [18] 张世英, 林静. 层次的模糊决策[J]. 天津大学学报, 1989(4): 81-92.
- ZHANG Shiyong, LIN Jing. Fuzzy Decision of Hierarchy[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 1989(4): 81-92.
- [19] DUBOIS D, PRADE H M. Fuzzy Sets and Systems[M]. New York: Academic Press, 1980.
- [20] VAN LAARHOVEN P J M, PEDRYCZ W. A Fuzzy Extension of Saaty's Priority Theory[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1983, 11(1-3): 229-241.
- [21] GU Q P, XUAN Z X. A New Approach for Ranking Fuzzy Numbers Based on Possibility Theory[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2017, 309: 674-682.
- [22] WANG F. Preference Degree of Triangular Fuzzy Numbers and Its Application to Multi-Attribute Group Decision Making[J]. Expert Systems with Applications, 2021, 178: 114982.
- [23] 曾昕涛, 郭阳, 何佳艺, 等. 基于两阶段鲁棒优化的铁路隧道应急资源调度研究[J]. 铁道运输与经济, 2026, 48(6): 71-81.
- ZENG Xintao, GUO Yang, HE Jiayi, et al. Research on Emergency Resource Scheduling of Railway Tunnels Based on Two-Stage Robust Optimization[J]. Railway Transport and Economy, 2026, 48(6): 71-81.
- [24] 唐永升, 李花子. 基于改进Apriori的地铁运维危险源致灾度量及风险预判[J]. 铁道运输与经济, 2025, 47(4): 152-161.
- TANG Yongsheng, LI Huazi. Disaster-Causing Degree Quantification and Risk Prediction of Hazard Sources in Metro Operation and Maintenance Based on Improved Apriori[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(4): 152-161.

(责任编辑 吴文娟)