

中文引用格式:汤青慧,刘硕,张瑾. 基于WSR-可拓云理论的地铁车站火灾安全韧性评估[J]. 中国安全科学学报,2025,35(1): 154-162.

英文引用格式:TANG Qinghui, LIU Shuo, ZHANG Jin. Resilience assessment of fire safety in subway stations based on WSR- Extension cloud theory[J]. China Safety Science Journal,2025,35(1):154-162.

基于WSR-可拓云理论的地铁车站火灾安全韧性评估*

汤青慧^{1,2}副教授, 刘硕¹, 张瑾³副教授

(1 青岛理工大学管理工程学院, 山东青岛266520; 2 山东省高校智慧城市建设管理研究中心, 山东青岛266520; 3 青岛理工大学土木工程学院, 山东青岛266520)

中图分类号:X932

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.01.1377

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助(41702320)。

【摘要】 为解决地铁车站火灾安全韧性评估过程中模糊性、随机性等问题,以有效提升地铁车站火灾安全韧性水平,构建基于物理-事理-人理(WSR)-可拓云理论的地铁车站火灾安全韧性评估方法。首先,以WSR方法论为基础,围绕“物理”“事理”“人理”分析地铁车站火灾安全韧性影响因素,结合韧性吸收、抵抗、恢复和适应能力,从设备因素、环境因素、组织管理、物质技术和人员因素5个方面构建地铁车站火灾安全韧性评估指标体系;其次,基于盲数理论构建盲数矩阵并计算定性指标综合得分,结合可拓云理论得出地铁车站火灾安全韧性等级;最后,以青岛地铁某站为例开展实例分析。结果表明:该地铁车站火灾安全韧性等级为IV级,处于较高韧性水平,可信度因子 $\theta = 0.0034 < 0.01$,表明评估结果具有较高可信度。WSR-可拓云理论评估模型可为地铁车站火灾安全韧性评估提供理论依据。

【关键词】 物理-事理-人理(WSR)方法论; 可拓云理论; 地铁车站; 火灾安全韧性评估; 盲数理论

Resilience assessment of fire safety in subway stations based on WSR-extension cloud theory

TANG Qinghui^{1,2}, LIU Shuo¹, ZHANG Jin³

(1 School of Management Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China;
2 University Research Center for Smart City Construction and Management of Shandong
Province, Qingdao 266520, China; 3 School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology,
Qingdao Shandong 266520, China)

Abstract: In order to solve the problems of ambiguity and randomness in the process of fire safety resilience assessment of subway stations, and then effectively improve the level of fire safety resilience of subway stations, the fire safety resilience assessment model for subway stations based on WSR- extension cloud theory was constructed. First, based on WSR methodology, the factors affecting the fire safety resilience of subway stations were analyzed around "physical", "matter", and "human". Combined with the characterization of the resilience absorption, resistance, recovery and adaptive ability, the fire safety

resilience assessment index system of subway stations was established in five aspects, namely, equipment factors, environmental factors, organization and management, material and technology, and personnel factors. Second, based on the blind number theory to construct the blind number matrix and calculate the comprehensive score of qualitative indexes, the fire safety resilience level of subway stations is derived by using the theory of extension cloud theory. Finally, a station of the Qingdao subway was used as an example to carry out the example analysis. The results show that the subway station fire safety resilience level of IV, in the higher resilience level, the credibility factor = 0.003 4 < 0.01, indicating that the assessment results have a high degree of credibility. The WSR-extension cloud theory assessment model can provide a theoretical basis for the fire safety resilience assessment of subway stations.

Keywords: Wuli-Shili-Renli (WSR) methodology; extension cloud theory; subway stations; fire safety resilience assessment; blind number theory

0 引言

地铁是支撑现代化城市发展的核心交通基础设施,地铁车站作为地铁运营的重要换乘点,其安全性关系到整个地铁系统正常运行^[1]。据统计,火灾事故约占地铁运营事故总数的30%,也是威胁地铁运营安全的首要因素,其中,地铁车站是发生火灾事故的主要场所^[2]。相比其他建筑,地铁车站具有封闭性强、人流量集中、救援困难、疏散难度大等特点,一旦发生火灾事故,极易造成巨大经济损失和人员伤亡。因此,在当前韧性城市建设背景下,科学、客观评估地铁车站火灾安全韧性,对于提升其韧性水平具有重要的现实意义。

目前,诸多学者针对地铁车站火灾安全韧性评估开展了相关研究。TANG Yuchun等^[3]结合技术-组织-社会-经济模型和改进逼近理想解排序法,识别地铁车站火灾安全韧性影响因素,并建立贝叶斯网络评估地铁车站火灾安全韧性能力。黄亚江等^[4]利用层次分析法和粒子群优化算法组合赋权,建立基于“人、机、环、管”4个维度的地铁车站火灾安全韧性模糊综合评估模型。随着数学理论的发展,众多学者将物元可拓理论^[5]、正态云模型^[6]等数学模型引入火灾安全韧性评估工作中,为地铁车站火灾安全韧性评估提供了有益参考。然而,地铁车站火灾安全韧性影响因素众多、韧性评估具有一定的不确定性、模糊性和随机性。现有的评估模型计算复杂,较难体现问题的模糊性和随机性等特点。可拓云理论结合物元可拓兼具定性、定量分析的优点与正态云模型不确定推理的特点,不仅能够将定性语言描述转化为定量的数值表示,而且在解决模糊性问题的基础上同时兼顾随机性,被广泛应用于安全韧性评估^[7]等领域。

鉴于此,笔者以物理-事理-人理(Wuli-Shili-

Renli,WSR)方法论为基础,结合火灾发展过程中地铁车站韧性变化特征,建立地铁车站火灾安全韧性评估指标体系;引入盲数理论改进定性指标数据处理方法,并结合可拓云理论构建地铁车站火灾安全韧性评估模型;并将该模型应用于青岛地铁某站,验证模型可行性和适用性,以期为评估地铁车站火灾安全韧性提供新思路。

1 地铁车站火灾安全韧性

1.1 地铁车站火灾安全韧性内涵

韧性概念自提出以来,经历了从工程韧性到生态韧性,再到演进韧性2次决定性的认知转型,形成了支撑现代韧性理论的支柱^[8]。黄浪等^[9]将韧性理论引入安全科学领域,将安全韧性定义为系统在一定时空内面对风险的冲击与扰动时,维持、恢复和优化系统安全状态的能力。

结合地铁车站火灾实际背景,可将地铁车站火灾安全韧性定义为地铁车站在面对火灾冲击和扰动时,地铁车站系统随火灾发展依次体现的吸收、抵抗、恢复和适应系统安全状态能力。其中,吸收能力是指火灾发生前系统消除火灾隐患的能力,即降低火灾事故发生概率的能力;抵抗能力是指火灾发生时系统迅速响应以降低火灾冲击的能力,即减少火灾损失的能力;恢复能力是指火灾发生后系统迅速恢复到正常运行状态的能力;适应能力是指通过学习历史事故提高系统适应火灾风险的能力^[10]。

1.2 地铁车站火灾安全韧性分析模型

WSR系统方法论充分考虑“物理”“事理”和“人理”对研究问题的作用,能够系统、完整、分层次地研究复杂问题^[11]。其中,“物理”指地铁车站系统中支撑着车站正常运行的各种客观事物,主要体现在地铁车站的消防设备和内部环境方面;“事理”

是在“物理”的基础上,通过合理配置各种资源以实现火灾预防、应对、降损的方法,主要体现在地铁车站组织管理和物质技术方面;“人理”强调依靠人来协调解决管理过程中的各项事宜,尽力利用“物”把“事”做好,主要体现在地铁车站中的人员因素。地铁车站火灾安全韧性是一个动态、循环的过程,而WSR方法论具有系统性、动态性、科学性的特点。因此,选择WSR方法论以表征地铁车站火灾安全韧性评估体系逻辑架构。围绕地铁车站火灾演化韧性能力变化过程,进一步建立基于WSR方法论的地铁车站火灾安全韧性分析模型,如图1所示。

2 地铁车站火灾安全韧性评估

2.1 地铁车站火灾安全韧性指标体系构建

基于WSR方法论,从设备因素、环境因素、组织管理、物质技术和人员因素5个方面出发,结合韧性吸收能力、抵抗能力、恢复能力和适应能力的表征形式,梳理归纳影响地铁车站火灾安全韧性的影响因素,获取初始地铁车站火灾安全韧性评估指标。根据

文献[12-14],筛选评估指标,随后邀请相关领域专家对指标进行研讨,最终确定26个评估指标,并建立地铁车站火灾安全韧性评估指标体系,如图2所示。

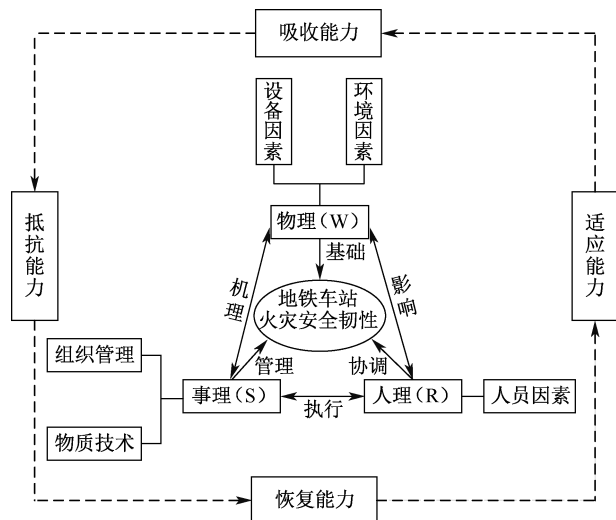


图1 基于WSR方法论地铁车站火灾安全韧性分析模型

Fig.1 Fire safety resilience analysis model for subway stations based on WSR methodology

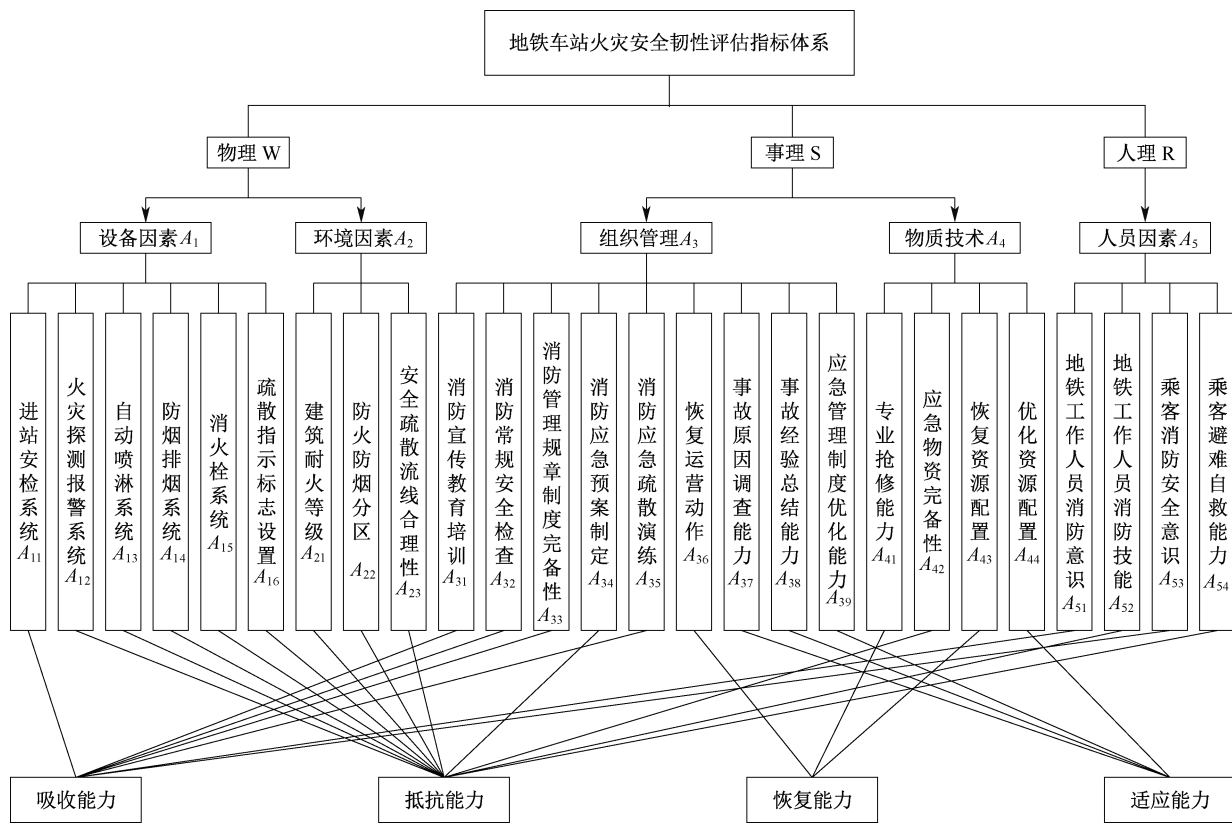


图2 地铁车站火灾安全韧性评估指标体系

Fig.2 Subway stations fire safety resilience assessment index system

2.2 地铁车站火灾安全韧性评估模型建立

在构建地铁车站火灾安全韧性指标体系的基础

上,采用盲数理论计算指标权重,结合可拓云理论建立地铁车站火灾安全韧性评估模型。

2.2.1 基于盲数理论指标赋值

为避免专家直接打分主观性,采用盲数理论^[15]改进专家打分方式,即专家根据待评对象的实际情况,对评估指标给出一个分数范围。考虑到专家认知水平的差异,引入“专家可信度”概念,即专家根据自身专业、经验对评估内容做出客观准确的程度,可信度主要与专家专业职称、学历学位、工龄和工作成果有关^[16]。如专家 Z_1 的可信度为 β_1 ,则该专家在专家组的综合可信度 α_1 为:

$$\alpha_1 = \beta_1 / \sum_{i=1}^t \beta_i \quad (1)$$

式中: β_i 为第 i 个专家可信度; t 为专家总数。

由于专家打分区间存在交叉,需要结合专家综合可信度,对打分区间进行无交叉划分,并重新计算新打分区间的综合可信度。根据可信度构建盲数矩阵 D ,具体如下:

$$D = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdots & \gamma_{1j} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdots & \gamma_{2j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \gamma_{k1} & \gamma_{k2} & \cdots & \gamma_{kj} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 γ_{kj} 为第 k 个指标取值落在第 j 个区间的可能性。

根据地铁车站火灾安全韧性等级标准和区间可信度,确定插入点 a_1, a_2, \dots, a_n ,最终计算第 i 个专家综合得分 b_i ,具体如下:

$$b_i = \sum_{j=1}^m \gamma_{kj} a_n \quad (3)$$

式中 m 为专家打分区间的总数。

2.2.2 基于可拓云理论的韧性评估

可拓云模型是一种将正态云模型与物元可拓理论相结合的多指标评价模型^[17],即利用云模型中 (E_x, E_n, H_e) 代替物元可拓模型中事物特征值 V 。其中, E_x 为期望值, E_n 为熵值, H_e 为超熵值,可拓云模型可表示为:

$$R = \begin{bmatrix} N & C_1 & (E_{x1}, E_{n1}, H_{e1}) \\ & C_2 & (E_{x2}, E_{n2}, H_{e2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (E_{xn}, E_{nn}, H_{en}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: N 为待评估的地铁车站; C_n 为地铁车站火灾安全韧性评估指标; (E_{xn}, E_{nn}, H_{en}) 为评估指标 C_n 关于等级的云描述。

1) 确定火灾安全韧性等级及指标等级界限。地铁车站火灾安全韧性等级并未有清晰划分准则,

基于相关领域韧性等级划分方法,针对地铁车站火灾实际背景,将地铁车站火灾安全韧性划分为5个等级,见表1。

表1 地铁车站火灾安全韧性等级划分

Table 1 Fire safety resilience classification for subway stations

韧性等级	等级名称	等级描述
I级	低韧性	地铁车站系统吸收、抵抗、恢复和适应火灾能力低,火灾发生概率高,火灾冲击下地铁车站系统不能正常运行,火灾扰动后难以恢复到正常运行状态,无法将韧性优化到更高层次
II级	较低韧性	地铁车站系统吸收、抵抗、恢复和适应火灾能力较低,火灾发生概率较高,火灾冲击下地铁车站系统能维持部分功能运行,火灾扰动后需要大量的时间恢复到正常运行状态,很难将韧性优化到更高层次
III级	中等韧性	地铁车站系统具备一定的吸收、抵抗、恢复和适应火灾能力,火灾发生概率一般,火灾冲击下地铁车站系统关键功能正常运行,火灾扰动后需要较长时间恢复到正常运行状态,可在一定程度上将韧性优化到更高层次
IV级	较高韧性	地铁车站系统吸收、抵抗、恢复和适应火灾能力较高,火灾发生概率较低,火灾冲击下地铁车站系统能够正常运行,受影响较小,火灾扰动后能在较短时间内恢复到正常运行状态,可较好地韧性优化到更高层次
V级	高韧性	地铁车站系统吸收、抵抗、恢复和应对火灾能力高,火灾发生概率低,火灾冲击下地铁车站系统能够正常运行,几乎不受影响,火灾扰动后能够迅速恢复到正常运行状态,可很好地将韧性优化到更高的层次

依据地铁车站火灾安全韧性等级划分原则,将韧性指标对应划分5个等级。其中,定性指标在 $[0, 100]$ 范围内以整数划分指标等级区间,而定量指标根据标准规范限定值划分等级区间。由于不同指标对韧性影响关系不同,并且正向指标和负向指标对韧性的影响也不同,故指标等级区间也存在差异,见表2。

2) 确定云参数。根据评估指标火灾安全韧性等级区间,形成用于计算云参数的约束区间 $[C_{\min}, C_{\max}]$,具体如下:

表2 指标韧性等级区间划分
Table 2 Indicator resilience level interval

评估指标	等级				
	I级	II级	III级	IV级	V级
$A_{11} \sim A_{14}$	[0, 60)	[60, 70)	[70, 80)	[80, 90)	[90, 100]
A_{15}/h	[0, 0.5]	(0.5, 1]	(1, 1.5]	(1.5, 2]	(2, 3]
A_{16}/m	[25, 30]	[20, 25)	[15, 20)	[10, 15)	(0, 10)
A_{21}/h	[0, 1]	(1, 1.5]	(1.5, 2]	(2, 3]	(3, 5]
A_{22}	[0, 60)	[60, 70)	[70, 80)	[80, 90)	[90, 100]
A_{23}/min	[8, 10]	[6, 8)	[5, 6)	[4, 5)	(0, 4)
$A_{31} \sim A_{37}$	[0, 55)	[55, 65)	[65, 75)	[75, 85)	[85, 100]
$A_{32} \sim A_{34} \sim A_{36} \sim A_{38} \sim A_{39}$	[0, 60)	[60, 70)	[70, 80)	[80, 90)	[90, 100]
$A_{35}/\text{次}$	[0, 1]	(1, 2]	(2, 3]	(3, 4]	(4, 5]
$A_{41} \sim A_{43} \sim A_{44}$	[0, 60)	[60, 70)	[70, 80)	[80, 90)	[90, 100]
A_{42}	[0, 55)	[55, 65)	[65, 75)	[75, 85)	[85, 100]
$A_{51} \sim A_{52}$	[0, 60)	[60, 70)	[70, 80)	[80, 90)	[90, 100]
$A_{53} \sim A_{54}$	[0, 55)	[55, 65)	[65, 75)	[75, 85)	[85, 100]

$$\begin{cases} E_x = \frac{C_{\min} + C_{\max}}{2} \\ E_n = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{6} \\ H_e = \lambda \end{cases} \quad (5)$$

式中： C_{\min} 为指标等级界限的下限； C_{\max} 为指标等级界限的上限； λ 为根据模糊程度而确定的常数，可结合指标的随机性、模糊性和实际情况进行调整，文中 λ 取 0.5。

3) 确定综合评判矩阵。将地铁车站火灾安全韧性各项指标假设为云滴，生成正态分布的随机数 E'_n ，设评估指标值为 x ，则云滴可进一步表征为 (x, μ) ，隶属度 μ 计算公式为：

$$\mu = \exp\left[-\frac{(x - E_x)^2}{2(E'_n)^2}\right] \quad (6)$$

由下式得出各指标值与正态云模型之间的云隶属度，并组成综合评判矩阵 Z ：

$$Z = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} & \cdots & \mu_{1g} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \mu_{23} & \cdots & \mu_{2g} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \mu_{n3} & \cdots & \mu_{ng} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中 μ_{ng} 为第 n 个指标与第 g 级正态云模型之间的云隶属度。

4) 确定韧性综合评判等级。采用序关系法^[18]对指标赋权，以减少主观赋权较强主观性的弊端，随后计算综合评判向量值 Q ：

$$Q = \sum_{n=1}^{26} W_n \cdot Z \quad (8)$$

式中 W_i 为第 n 个指标的权重值。

此外，评判模糊等级特征值 r 计算方法如下：

$$r = \frac{\sum_{l=1}^5 q_l f_l}{\sum_{l=1}^5 q_l} \quad (9)$$

式中： q_l 为 Q 对应的分量值； f_l 为各评估等级对应的评分值，韧性评估等级 I ~ V 级对应的评分值分别为 1、2、...、5。

由于式(7)求解 μ 时存在随机性，故需多次求解以减少随机因素的影响，综合评判分数的 E_{rx} 和 E_{rn} 分别为：

$$\begin{cases} E_{rx} = \sum_{p=1}^h r_p / h \\ E_{rn} = \sqrt{\frac{1}{h} \sum_{p=1}^h [r_p - E_{rx}]^2} \end{cases} \quad (10)$$

式中： E_{rx} 为多次运算得到的期望值； E_{rn} 为多次运算得到的熵； h 为运算次数，文中取 1 000； r_p 为第 p 次计算得到的等级特征值。

由于大量复杂运算后结果很难令人信服，因此考虑可信度，引入 θ 以表征结果的可信程度：

$$\theta = E_{rx} / E_{rn} \quad (11)$$

式中 θ 为评估结果分散程度，其值大小与可信度成反比，当 $\theta < 0.01$ 时，表明评估结果可信。

3 火灾安全韧性评估实例分析

3.1 地铁车站概况

青岛地铁某站主体轮廓总长 491.4 m，总高

24.2 m,共设 4 组出入口。车站内部设置火灾探测报警系统、通风排烟系统、自动喷淋系统及手提灭火器等消防设备。该车站日最高客流量 16.26 万人次,日均 2.3 万人次,对火灾安全隐患敏感性较高,发生火灾可能性较大。因此,选取该地铁车站为研究对象,并运用所构建的评估模型分析地铁车站火灾安全韧性情况。

3.2 确定指标权重和盲数矩阵

由地铁消防机构、运营领域参与方、地方消防救援支队、地铁设计部门以及高等院校等学者组成专家组确定指标权重,并对定性指标赋值。专家组包括 2 名地铁消防工程师、1 名地铁运营公司应急部门专家、1 名地铁车站站长、1 名消防安全研究领域

高校教师、1 名消防救援支队班长、1 名地铁规划设计院高级工程师以及 1 名消防安全研究领域高校教师。其中,消防工程师、应急部门专家、救援支队班长、规划设计院高级工程师和车站站长具有丰富的实践经验和专业职称,高校教师具备专业理论知识,并且长期从事消防安全评估工作。经分析,7 位专家的可信度分别为 0.90、0.90、0.85、0.80、0.85、0.80、0.85。根据公式(1)计算专家综合可信度分别为 0.151、0.151、0.143、0.134、0.143、0.134、0.143。随后,依据序关系法计算指标权重,并据此确定指标体系各指标综合权重。其次,根据地铁车站实际情况,给出各定性和定量指标分数范围,见表 3。

表 3 各指标权重和赋值结果

Table 3 Indicator weights and assignment results

一级指标	权重	二级指标	权重	综合权重	专家赋值情况							综合得分	
					Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Z ₆	Z ₇		
A ₁	0.249	A ₁₁	0.139	0.035	82~88	85~95	80~90	85~90	80~95	78~85	85~92	86.09	
		A ₁₂	0.183	0.047	80~85	85~90	75~85	85~95	86~95	83~90	85~92	86.04	
		A ₁₃	0.202	0.050	88~95	80~90	85~90	80~90	83~90	85~92	86~90	86.55	
		A ₁₄	0.183	0.046	85~90	75~85	85~90	80~90	86~93	82~90	88~90	84.85	
		A ₁₅	0.167	0.042	2	2	2	2	2	2	2	2	2
		A ₁₆	0.126	0.032	25	25	25	25	25	25	25	25	25
A ₂	0.124	A ₂₁	0.312	0.039	3	3	3	3	3	3	3	3	
		A ₂₂	0.283	0.035	85~95	75~85	86~95	80~90	90~95	78~85	88~90	87.53	
		A ₂₃	0.405	0.050	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	
A ₃	0.299	A ₃₁	0.109	0.032	72~78	75~80	70~82	80~85	75~85	65~70	72~74	65.79	
		A ₃₂	0.152	0.045	75~85	80~90	80~95	80~86	83~86	77~83	83~85	84.57	
		A ₃₃	0.237	0.071	85~95	86~96	80~95	80~90	83~90	88~90	85~88	87.14	
		A ₃₄	0.198	0.059	84~90	70~85	80~95	80~92	80~85	75~80	85~92	83.76	
		A ₃₅	0.099	0.030	3	3	3	3	3	3	3	3	
		A ₃₆	0.071	0.021	76~88	80~86	80~92	85~90	80~95	76~80	85~90	86.34	
		A ₃₇	0.047	0.014	70~75	75~84	65~75	80~85	75~80	75~80	80~82	77.61	
		A ₃₈	0.047	0.014	80~85	70~85	75~85	85~90	85~95	82~85	72~75	82.44	
		A ₃₉	0.0423	0.013	83~88	75~85	80~95	85~90	80~90	70~80	65~70	74.74	
A ₄	0.137	A ₄₁	0.356	0.049	82~90	80~85	85~90	86~92	85~95	80~84	82~85	86.08	
		A ₄₂	0.254	0.035	75~80	70~85	75~83	85~88	80~85	60~70	55~65	72.21	
		A ₄₃	0.195	0.027	85~90	80~90	88~95	78~86	85~90	75~80	70~80	74.95	
		A ₄₄	0.195	0.027	80~92	75~80	80~85	80~95	82~90	75~80	78~80	72.64	
A ₅	0.191	A ₅₁	0.195	0.037	85~95	80~90	85~90	75~85	70~85	80~87	82~90	84.06	
		A ₅₂	0.355	0.068	80~90	78~85	80~95	80~85	88~95	82~90	85~92	86.40	
		A ₅₃	0.177	0.033	75~80	65~75	65~70	80~85	68~78	62~68	65~70	72.54	
		A ₅₄	0.273	0.052	65~75	70~75	60~65	70~80	70~85	62~66	75~80	70.54	

结合专家可信度,对专家打分结果进行无交叉划分,并构建 D 。以 A_{11} 为例,7 位专家打分区间分别为 82~88、85~95、80~90、85~90、80~95、78~85、85~92,对其进行重新排序,进一步得到无交叉区间

为 78~80、80~82、82~85、85~88、88~90、90~92、90~95。结合专家可信度,计算重新排列后的得分区间可信度为 $\alpha_1 = (80-78)/(85-78) \times 0.134 = 0.038$ 。同理,其他得分区间可信度分别为

$\alpha_2=0.086, \alpha_3=0.204, \alpha_4=0.334, \alpha_5=0.172, \alpha_6=0.090, \alpha_7=0.074$ 。根据重新计算的区间可信度,构建盲数函数 $f_{A_{11}}(x)$ 为:

$$f_{A_{11}}(x) = \begin{cases} 0.038 & [78, 80) \\ 0.086 & [80, 82) \\ 0.204 & [82, 85) \\ 0.334 & [85, 88) \\ 0.172 & [88, 90) \\ 0.090 & [90, 92) \\ 0.074 & [92, 95) \end{cases} \quad (12)$$

根据得到的盲数函数,结合地铁车站火灾安全韧性等级划分区间,并计算 A_{11} 落在各等级区间的可信度,可得到盲数矩阵函数 $f'_{A_{11}}(x)$ 为:

$$f'_{A_{11}}(x) = \begin{cases} 0 & [0, 60) \\ 0 & [60, 70) \\ 0.038 & [70, 80) \\ 0.796 & [80, 90) \\ 0.164 & [90, 100) \end{cases} \quad (13)$$

基于上述方法,最终可得到全部定性指标 D ,具体如下:

$$D = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 & 0.038 & 0.796 & 0.164 \\ A_{12} & 0 & 0 & 0.072 & 0.740 & 0.187 \\ A_{13} & 0 & 0 & 0 & 0.855 & 0.146 \\ A_{14} & 0 & 0 & 0.076 & 0.863 & 0.061 \\ A_{22} & 0 & 0 & 0.045 & 0.657 & 0.298 \\ A_{31} & 0 & 0 & 0.269 & 0.587 & 0 \\ A_{32} & 0 & 0 & 0.142 & 0.816 & 0.048 \\ A_{33} & 0 & 0 & 0 & 0.786 & 0.214 \\ A_{34} & 0 & 0 & 0.235 & 0.654 & 0.111 \\ A_{36} & 0 & 0 & 0.184 & 0.745 & 0.072 \\ A_{37} & 0 & 0 & 0.295 & 0.712 & 0 \\ A_{38} & 0 & 0 & 0.315 & 0.612 & 0.072 \\ A_{39} & 0 & 0.143 & 0.134 & 0.598 & 0.048 \\ A_{41} & 0 & 0 & 0 & 0.883 & 0.116 \\ A_{42} & 0 & 0.143 & 0.117 & 0.538 & 0.134 \\ A_{43} & 0 & 0 & 0.206 & 0.586 & 0.102 \\ A_{44} & 0 & 0 & 0.312 & 0.501 & 0.070 \\ A_{51} & 0 & 0 & 0.162 & 0.761 & 0.076 \\ A_{52} & 0 & 0 & 0.043 & 0.765 & 0.191 \\ A_{53} & 0 & 0.067 & 0.604 & 0.328 & 0 \\ A_{54} & 0 & 0.244 & 0.450 & 0.305 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

根据韧性等级划分标准,确定各等级区间插入点。以指标 A_{11} 为例,区间插入点分别为: $a_1=30, a_2=65, a_3=75, a_4=85, a_5=95$ 。根据盲数矩阵计算可知, A_{11} 落在各区间的可能性分别为:0、0、0.038、0.796、0.164。通过式(3)可得到指标 A_{11} 的综合得分为 $b_1=86.09$,其他指标综合得分见表3。

3.3 可拓云模型运算

根据地铁车站火灾安全韧性各评估指标等级划分结果,可通过式(5)获得标准云模型各参数值。其次,由式(6)可得各评估指标的云隶属度,进而得到 Z 。根据 Z 和权重向量,可求得该车站火灾安全韧性 Q 。同时,通过式(9)可计算出该车站火灾安全韧性等级特征值。随后对该步骤进行1000次重复计算,通过式(10)、式(11)可最终获得综合评估特征 E_{rx}, E_{rn} 和 θ ,见表4。

表4 各参数计算结果

Table 4 Calculation results of each parameter

指标	I级	II级	III级	IV级	V级
A_{11}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.794 5	0.000 0
A_{12}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.819 2	0.000 0
A_{13}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.649 2	0.000 0
A_{14}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.996 4	0.000 0
A_{15}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.157 2
A_{16}	0.000 0	0.000 0	1.000 0	0.000 0	0.000 0
A_{21}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.081 7	0.021 8
A_{22}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.314 8	0.000 0
A_{23}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	1.000 0	0.000 1
A_{31}	0.000 2	0.001 0	0.049 6	0.000 0	0.000 0
A_{32}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.970 9	0.000 0
A_{33}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.502 5	0.000 0
A_{34}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.726 0	0.000 0
A_{35}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.147 1	0.000 0
A_{36}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.719 2	0.000 0
A_{37}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.349 3	0.000 0
A_{38}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.310 1	0.000 0
A_{39}	0.000 0	0.000 0	0.988 3	0.000 0	0.000 0
A_{41}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.841 9	0.000 0
A_{42}	0.000 0	0.000 0	0.371 5	0.000 1	0.000 0
A_{43}	0.000 1	0.000 0	0.999 6	0.000 0	0.000 0
A_{44}	0.000 1	0.000 0	0.350 5	0.000 0	0.000 0
A_{51}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.854 4	0.000 0
A_{52}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.744 9	0.000 0
A_{53}	0.000 0	0.000 0	0.243 2	0.000 1	0.000 0
A_{54}	0.000 0	0.000 0	0.944 1	0.000 0	0.000 0
Q	0.000 0	0.000 0	0.152 1	0.482 0	0.007 4
E_{rx}	3.766 3				
E_{rn}	0.122 7				
θ	0.003 4				

根据最大关联度原则,该地铁车站火灾安全韧性等级为IV级,即较高韧性。此外,计算得出 $\theta=$

0.003 4 (< 0.01), 表明评估结果可信度较高。

综上,通过评估得出该地铁车站火灾安全韧性处于较高水平,表明该车站系统吸收、抵抗、恢复和适应火灾能力较高,火灾发生概率较低,火灾冲击下地铁车站系统能够正常运行,火灾扰动后能在较短时间内恢复到正常运行状态,可较好地将韧性优化到更高层次。针对单个指标, A_{16} 、 A_{31} 、 A_{39} 、 A_{42} 、 A_{43} 、 A_{44} 、 A_{53} 和 A_{54} 指标韧性等级为Ⅲ级,处于一般韧性水平,需要着重对以上指标采取进一步改进措施。基于以上结果分析,提出以下韧性提升措施,以期提升该地铁车站火灾安全韧性水平。

针对 A_{16} ,可考虑在站台、站厅、自动扶梯和疏散通道等区域醒目位置,增加电光源型疏散指示标志的数量,并保持疏散通道两侧疏散指示相邻间距小于 10 m。疏散指示标志的图形及其文字尺寸应与空间大小及标志的设置间距相匹配。针对 A_{31} 和 A_{39} ,建议至少每半年组织开展一次在岗人员消防安全培训,建立消防知识和应急能力考核制度,积极开展消防公益宣传活动,通过网络、电视和广播等媒介,向乘客宣传防火措施、消防器材的使用方法和避难逃生方式等消防安全知识。此外,应当健全组织,加强领导,统筹协调各方资源认真做好火灾事件的评估、分析和总结工作,落实后续整改措施。针对 A_{42} 、 A_{43} 和 A_{44} ,应尽可能增设用于通信、灭火、疏

散、破拆、防护及救护等应急物资储备数量,并定期巡视确保其完好有效。此外,车站消防安全责任人应当积极筹措必要的专项资金和组织保障,加大车站恢复和优化等专项资金投入,进行资源的合理化配置。针对 A_{53} 和 A_{54} ,建议乘客积极参与地铁车站开展的消防安全宣传教育活动,认真学习相关防火措施、消防器材的使用方法和避难、逃生等消防安全知识,提升消防安全意识。

4 结 论

1) 应用盲数理论改进定性指标赋值方式,可削弱指标赋值带有主观性的影响;再利用可拓云模型分析评判地铁车站火灾安全韧性等级,能够有效避免韧性评估过程中存在的模糊性、随机性等问题,使评估过程更加客观,评估结果更加合理。

2) 运用文中模型对青岛地铁某站开展火灾安全韧性评估,结果表明:该地铁车站火灾安全韧性等级为Ⅳ级“较高韧性”水平,可信度因子 $\theta = 0.003 4$ (< 0.01),表明评估结果具有较高的可信度,验证了模型的可行性。

3) WSR-可拓云理论评估模型在地铁车站火灾安全韧性评估中具有较好的适用性,可以为地铁车站火灾安全韧性评估提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] 杨阳,孙利民.基于 FPP-Grey 的地铁车站火灾安全灰色聚类评价[J].安全与环境工程,2019,26(2):99-104.
YANG Yang, SUN Limin. Grey clustering evaluation of fire safety of subway station based on FPP-Grey[J]. Safety and Environmental Engineering, 2019, 26(2): 99-104.
- [2] WU Jiansong, HU Zhuqiang, CHEN Jinyue, et al. Risk assessment of underground subway stations to fire disasters using Bayesian network[J]. Sustainability, 2018, 10(10): DOI:10.3390/su10103810.
- [3] TANG Yuchun, BI Wei, VARGA L, et al. An integrated framework for managing fire resilience of metro station system: Identification, assessment, and optimization[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2022, 77: DOI:10.1016/j.ijdr.2022.103037.
- [4] 黄亚江,李书全,项思思.基于 AHP-PSO 模糊组合赋权法的地铁火灾安全韧性评估[J].灾害学,2021,36(3):15-20,40.
HUANG Yajiang, LI Shuquan, XIANG Sisi. Evaluation of subway fire safety resilience based on AHP-PSO fuzzy combination weighting method[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(3): 15-20,40.
- [5] 付小千,胡肖,张骞,等.基于熵权物元可拓理论的高层建筑火灾韧性评价[J].建筑结构,2023,53(13):142-146,141.
FU Xiaoqian, HU Xiao, ZHANG Qian, et al. Evaluation of fire resilience of high-rise buildings based on matter-element extension theory of entropy weight[J]. Building Structure, 2023,53(13):142-146,141.
- [6] BAI Minghao, LIU Qiong. Evaluating urban fire risk based on entropy-cloud model method considering urban safety resilience[J]. Fire, 2023: DOI:10.3390/fire6020062.

- [7] GUO Qingjun, AMIN S, HAO Qianwen, et al. Resilience assessment of safety system at subway construction sites applying analytic network process and extension cloud models[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2020: DOI: 10.1016/j.res.2020.106956.
- [8] 毕玮, 汤育春, 冒婷婷, 等. 城市基础设施系统韧性管理综述[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(6): 14-28.
BI Wei, TANG Yuchun, MAO Tingting, et al. Review on resilience management of urban infrastructure system[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(6): 14-28.
- [9] 黄浪, 吴超, 杨冕, 等. 韧性理论在安全科学领域中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(3): 1-6.
HUANG Lang, WU Chao, YANG Mian, et al. Application of resilience theory in field of safety science[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(3): 1-6.
- [10] 汤青慧, 刘硕, 刘文杰. 基于改进变权物元可拓模型的地铁车站火灾安全韧性评价[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(4): 1346-1355.
TANG Qinghui, LIU Shuo, LIU Wenjie. Evaluation of fire safety resilience of metro station based on improved matter-element extension model with variable weight[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(4): 1346-1355.
- [11] 田水承, 高玲, 范彬彬, 等. 基于 WSR 方法论的煤矿突发事件应急管理评价[J]. 西安科技大学学报, 2022, 42(4): 647-654.
TIAN Shuicheng, GAO Ling, FAN Binbin, et al. Capability evaluation of coal mine emergency management based on WSR methodology[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022, 42(4): 647-654.
- [12] GB 51298—2018, 地铁设计防火标准[S].
GB 51298—2018, Standard for fire protection design of metro[S].
- [13] GB/T 40484—2021, 城市轨道交通消防安全管理[S].
GB/T 40484—2021, Fire safety management for urban rail transit[S].
- [14] GB/T 33668—2017, 地铁安全疏散规范[S].
GB/T 33668—2017, Code for safety evacuation of metro[S].
- [15] 王瑞强, 许永莉, 杜军, 等. 基于盲数与成熟度理论的化工园区火灾爆炸事故应急能力评估[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(2): 30-35, 43.
WANG Ruiqiang, XU Yongli, DU Jun, et al. Evaluation of emergency response capability of fire and explosion accidents in chemical industry park based on blind number and maturity theory[J]. Safety and Environment Engineering, 2021, 28(2): 30-35, 43.
- [16] 方前程, 李中原. 基于盲数理论和物元可拓法的装配式建筑吊装施工风险评估模型研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(1): 8-16.
FANG Qiancheng, LI Zhongyuan. Research on risk assessment model of prefabricated building hoisting construction based on game theory and extension theory[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(1): 8-16.
- [17] 潘寒川, 刘丹阳, 张煜睿, 等. 基于组合赋权-可拓的城市轨道交通线路运营安全评价[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(4): 160-166.
PAN Hanchuan, LIU Danyang, ZHANG Yurui, et al. Urban rail transit line operation safety evaluation based on combined weighting-extension cloud method[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(4): 160-166.
- [18] 张渺. G1-EW 组合赋权云模型下地铁运营安全风险评价[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(6): 163-170.
ZHANG Miao. Risk assessment of metro operation based on G1-EW combination weighting cloud model[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(6): 163-170.

作者简介: 汤青慧 (1978—), 女, 河南驻马店人, 博士, 副教授, 主要从事工程项目管理等方面的研究。E-mail: seaytangqh@163.com。

