

城市轨道交通安全韧性管理工程研究进展与展望

王子旋

北方工业大学经济管理学院, 北京

收稿日期: 2026年9月19日; 录用日期: 2026年10月9日; 发布日期: 2026年10月23日

摘要

城市轨道交通系统作为典型的复杂社会技术系统, 其运行安全受到基础设施状态、外部环境扰动、组织管理行为以及人员决策过程等多重因素影响, 传统以风险识别和事故控制为核心的安全管理范式已难以满足不确定性环境下系统持续稳定运行的需求。为系统梳理城市轨道交通安全韧性领域的研究进展、理论演化与未来发展方向, 本文对国内外相关研究成果进行综合评述。在辨析韧性概念由工程恢复能力向动态适应能力演进的基础上, 明确城市轨道交通安全韧性的内涵, 即系统通过抵抗、吸收、恢复与适应等能力, 在风险扰动过程中维持关键功能并实现持续优化的能力。围绕现有研究成果, 本文从城市轨道交通网络韧性、安全韧性评价以及安全韧性因素作用机理三个方面展开系统梳理。研究发现, 城市轨道交通韧性研究已形成融合交通工程、安全科学与管理科学的交叉研究领域。其中, 网络韧性研究较为成熟, 主要基于复杂网络理论分析系统结构脆弱性, 并围绕网络优化与恢复策略提升系统抗扰能力; 安全韧性评价研究逐渐由单一风险分析转向多维能力评估, 但现有研究仍较多围绕火灾、暴雨等特定灾害情景展开, 评价体系存在灾种适应性不足和指标体系碎片化问题; 安全韧性作用机理研究进一步关注因素之间的关联关系与演化过程, 但对复杂系统中动态适应行为、组织学习机制以及多层级因素耦合作用的解释仍显不足。总体来看, 现有研究在安全与韧性融合、宏观网络与微观运行要素协同以及动态治理机制构建方面仍存在深化空间。未来研究应进一步推动城市轨道交通安全管理由传统风险控制范式向动态韧性治理范式转变, 加强对人员、组织与技术系统协同适应机制的研究, 构建面向全过程、多尺度和动态演化的安全韧性理论体系, 为城市轨道交通系统安全治理能力提升提供理论支撑。

关键词

安全韧性, 城市轨道交通, 复杂系统治理, 韧性评价, 风险管理

Research Progress and Prospects of Safety Resilience Management Engineering for Urban Rail Transit Systems

Zixuan Wang

文章引用: 王子旋. 城市轨道交通安全韧性管理工程研究进展与展望[J]. 管理科学与工程, 2026, 15(6): 1091-1102.
DOI: 10.12677/mse.2026.156106

Abstract

As a typical complex socio-technical system, the operational safety of urban rail transit systems is affected by multiple factors, including infrastructure conditions, external environmental disturbances, organizational management behaviors, and human decision-making processes. The traditional safety management paradigm, which primarily focuses on risk identification and accident prevention, is insufficient to meet the requirements for continuous and stable system operation under uncertain environments. To summarize the research progress, theoretical evolution, and future development trends in the field of urban rail transit safety resilience, relevant studies conducted both domestically and internationally were systematically reviewed. Based on an analysis of the evolution of resilience concepts from engineering resilience to dynamic adaptive capability, the connotation of urban rail transit safety resilience was clarified. It refers to the capability of a system to maintain critical functions and achieve continuous optimization during risk disturbances through resistance, absorption, recovery, and adaptation. Existing studies were systematically reviewed from three perspectives: urban rail transit network resilience, safety resilience assessment, and the mechanisms underlying safety resilience factors. The results indicate that urban rail transit resilience research has developed into an interdisciplinary field integrating transportation engineering, safety science, and management science. Network resilience research has achieved relatively mature development, mainly focusing on system structural vulnerability analysis based on complex network theory and improvement of disturbance resistance through network optimization and recovery strategies. Safety resilience assessment has gradually evolved from single-risk analysis toward multidimensional capability evaluation; however, existing studies remain mainly focused on specific disaster scenarios, such as fires and heavy rainfall events, resulting in insufficient adaptability across different disaster types and fragmented indicator systems. Research on safety resilience mechanisms has increasingly emphasized the interactions and evolutionary processes among influencing factors; nevertheless, the explanations of dynamic adaptive behaviors, organizational learning mechanisms, and multi-level factor coupling effects in complex systems remain inadequate. Overall, further improvements are still required in the integration of safety and resilience, the coordination between macro-level networks and micro-level operational elements, and the development of dynamic governance mechanisms. Future research should promote the transformation of urban rail transit safety management from a traditional risk-control paradigm toward a dynamic resilience-governance paradigm, strengthen investigations into the synergistic adaptation mechanisms among personnel, organizations, and technical systems, and establish a safety resilience theoretical framework characterized by whole-process, multi-scale, and dynamic evolution, thereby providing theoretical support for improving the safety governance capability of urban rail transit systems.

Keywords

Safety Resilience, Urban Rail Transit Systems, Complex System Governance, Resilience Assessment, Risk Management

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市轨道交通是城市交通的骨干网络，是承载超大规模客流的城市“生命线”工程[1]。随着城市化发展进程的不断加快，轨道交通已成为城市交通系统的核心组成部分[2]。2025年10月，国家明确指出要基本形成绿色的生产生活方式，如期实现碳达峰目标。城市轨道交通作为环保节能的公共交通方式，维护其安全稳定运行可支撑城市的可持续发展，符合“十五五”时期健全现代化综合交通运输体系、促进城市发展提质增效的发展要求[3]。然而，全球气候变化和城市快速发展等所带来的新风险因素使城市轨道交通系统面临巨大的安全挑战，运营事故时有发生。如郑州“7·20”特大暴雨导致地铁严重内涝及重大伤亡、北京地铁昌平线“12·14”列车追尾事故导致全线运行中断及多人重伤等，各类突发事件的扰动暴露出城市轨道交通系统在应对突发事件和持续保障运行稳定性方面的脆弱性问题，凸显了加强系统韧性的紧迫性[4]。

“韧性”最初源于材料力学，指物体在受力后恢复原状的能力，即“工程韧性”。Holling [5]以恢复时间衡量“工程韧性”，后将其引入生态学[6]。“社会-生态韧性”理论强调系统通过学习、调整与重组等主动适应过程，在扰动中维持核心功能并向新稳态演进的能力[7]。国内外学者进一步将韧性理念拓展至城市韧性等城市系统研究领域[8]。在城市轨道交通系统领域，学者们将研究热点集中于交通网络韧性的评估，并从网络结构优化和最优恢复策略等方面探讨了网络韧性的优化提升[9]。而面对日益复杂的非传统风险，以规避风险、被动承受为重点的传统 Safety-I 范式已无法满足现实需求，因此安全管理实践亟需转向动态适应的 Safety-II，关注并提升系统的“安全韧性”[10]。

相较城市轨道交通网络韧性，国内外关于安全韧性的研究起步较晚，研究成果相对较少。现有研究主要涉及安全韧性评价[11]和安全韧性因素作用机理两个方面[12]。因此，本文通过梳理城市轨道交通安全韧性相关研究，归纳其研究热点与局限，探究城市轨道交通安全韧性未来发展趋势，为交通领域提质增效提供理论与实践参考。

2. 城市轨道交通安全韧性概念研究

“韧性”的概念经历了从工程韧性至生态韧性，再到演进韧性的变化，可被定义为在面临扰动时，系统能够迅速响应和组织资源，维持基本功能和结构，并持续适应、学习和转型的能力[12]。Murray-Tuite [13]首先将韧性概念应用到交通系统的研究，提出韧性具有10个维度，包括冗余性、多样性、适应性、安全性、快速恢复能力等。国内学者仇保兴[14]最早关注并从三个方面提炼出韧性交通系统的概念内涵：第一，城市交通系统在内外干扰下保持和恢复可达性的能力；第二，系统在软硬件方面具有足够的适应能力、抗冲击能力、学习能力和恢复能力，这些能力可将交通系统由一个脆弱的系统变成一个反脆弱的系统；第三，从长期来看，城市交通系统在应对各种干扰的过程中，应该与干扰共同进化，其韧性不断提升，脆弱性不断降低。此后，韧性的概念被用于航空[15]、铁路[16]、水运[17]等各种运输模式，其内涵得到了进一步丰富。不同交通运输模式中韧性的相关定义如表1所示。

国内外学者在不同的交通领域的研究中引入韧性的定义，但其本质都强调在系统面临各类突发事件的扰动时的抵抗、吸收和恢复能力[18]。系统安全是维护系统稳定运转的重要保障，其内涵与韧性理念高度契合[19]。随着韧性理论的演进，其与系统安全的结合日益密切，被认为是系统安全应具备的核心能力[20]。而当今城市发展面临着越来越多的不确定性因素和未知风险，“韧性理念”以其特有的系统性视角，打破被动防御性观念，为城市安全和防灾减灾提供了新思路。由此“安全韧性”的概念应运而生。系统安全韧性是指系统在面对风险的扰动时，可以在一定程度上抵御风险的冲击，维持、恢复和优化系统安全状态的能力[21]。伴随着社会技术系统的日益复杂化，学者们不断将安全韧性理念代替传统的安全系统研究范式应用到安全与风险管理中。例如，李瑞奇等[22]通过 Monte Carlo 方法开展城市安全韧性定量分

析研究，从抵御、吸收、恢复三阶段的韧性曲线出发，选取地震灾害作为突发事件，分析各城市子系统在面临不同程度的风险扰动时的安全韧性水平。通过归纳城市轨道交通安全韧性领域的既有研究，可将城市轨道交通安全韧性定义为：交通系统在面临安全风险时，能够通过系统本身的韧性能力在安全事故发生的各个阶段进行有效地抵抗、吸收、恢复和适应，提升面对不确定性风险事件的能力，维持系统的有效运转[23]。

Table 1. Definition of resilience in the transportation sector

表 1. 交通领域韧性定义

领域	年份	作者	韧性定义
道路	2006	Murray-Tuite [13]	交通韧性的 10 维属性：冗余性、多样性、效率、自动组件、强度、协作、适应性、机动性、安全性和快速恢复能力。
航空	2015	Janić [15]	破坏性事件影响期间，系统承受和保持所需安全水平的运行能力，以及在事后恢复到期望状态的速度。
运输	2015	Zhang 等[24]	系统抵御和吸收灾害影响以及通过冗余和过剩容量快速适应的能力。
地铁	2018	Zhang 等[25]	节点中断后的连接水平，以及通过适当的修复措施将连接快速恢复到可接受水平的能力。

3. 城市轨道交通网络韧性研究现状

学者对城市轨道交通韧性的早期研究集中于交通网络的静态拓扑特征。最早的研究见于 Berche 等[26]运用 L 空间法和 P 空间法将交通系统抽象为网络模型，将最大连通性集群的相对大小和平均最短路径长度作为衡量指标，研究随机攻击或蓄意攻击下柏林、巴黎和其他十二个城市公共交通网络的韧性。以该研究框架为基础，学者从扰动建模、度量指标、评价方法、网络建模、优化增强、多交通模式等方面拓展了交通网络韧性研究。

韧性是交通系统应对破坏性事件的能力，因而扰动建模是研究韧性的前提。由于交通网络面临的扰动种类繁多且数据难以获得，通常采用模拟攻击网络中的某些节点或连边来表征扰动[18]。在前期研究的基础上，Berche 等[27]加入了基于连边的攻击策略，如随机连边、具有重新计算最大度的连边、具有最大初始度的连边、具有最大重新计算中介值的连边、以及具有最大初始中介值的连边等。与此同时，学者们进一步丰富了基于节点的攻击类型，Chen 等[28]利用有效路径被选择的概率修正中间中心性，将其定义为 EPB 节点中心性，并提出基于 EPB 的节点蓄意攻击策略。侯本伟等[29]采用地震易损性模型计算网络主要结构单元的破坏概率，并利用蒙特卡洛方法模拟网络主体结构单元的震后状态。杨向飞等[30]构建了包含初始、攻击和恢复三阶段的网络结构韧性评估模型以定量分析城市轨道交通网络应对不同攻击的韧性特征，采用 Space-L 和 Space-C 模型分别构建北京地铁的线路网络与换乘网络，应用基于节点度、聚类系数、中心性和随机排序的四类攻击与恢复模式，以网络密度、网络效率及网络连通率作为关键韧性指标，并通过计算韧性三角面积及空间向量合成，最终量化得到网络在不同攻击 - 恢复组合模式下的韧性值。

在度量指标方面，学者们引入度数、介数、非重叠子图数量、站点之间的距离差距、聚类系数与网络效率[29][31]等，进一步丰富交通网络的拓扑度量指标。拓扑度量具有易于计算的优势，但未反映城市轨道交通的动态特性。为此，学者提出了网络拓扑指标与动态流量特征相结合的交通网络韧性度量指标。

其中最为常用的是客流加权网络效率[29] [32], 还包括节点客流加权的通道距离和通道可靠性等[33]。为描述系统韧性在扰动影响过程中的持续变化和动态过程, 部分研究进一步转向以乘客出行次数等性能指标评估交通网络韧性。另有一些学者将拓扑指标和性能指标相结合, 综合衡量城市轨道交通韧性。如 Lu [34]提出基于 OD 行程的重要性阻抗性能指标。交通韧性包含诸多属性特征, 对韧性属性特征的研究有助于理解韧性内涵及其形成机理。为此学者基于一个或多个特征的表现来衡量交通系统韧性, 如 Xu 等[35]基于美国国家科学院(NAS)委员会提出的韧性定义, 从准备、吸收、恢复和适应四个阶段构建城市轨道交通韧性评估框架。其中, 准备阶段采用中间中心性、流量加权中间中心性、节点度和节点流四个指标识别交通网络的脆弱性。吸收阶段以网络可承载客流量为关键指标构建系统性能曲线, 并以此计算交通网络的鲁棒性。恢复阶段研究不同攻击类型与恢复难度之间的关系。适应阶段则通过引入新的连边来优化网络鲁棒性。Wang 等[36]从三个与性能相关的维度测量交通网络韧性, 即鲁棒性(性能过剩)、适应性(性能变化)和可恢复性(累计性能损失)。

在评价方法方面, Bruneau 等[37]首次提出系统性能曲线即韧性三角形, 认为韧性可借助从灾害发生到系统性能完全恢复的全过程中产生的累计性能损失来表征。在此基础上, 学者根据系统面对灾害时的状态变化(通过拓扑指标、性能指标、属性指标等加以表征)构建系统性能曲线, 并将其应用于城市轨道交通韧性的分析和评估[19] [27] [29] [32] [38]。现有的城市轨道交通网络韧性评价方法多基于韧性三角形, 并越来越关注通过性能曲线描述事件发生和修复的整个周期, 以及韧性特征要素的演化过程[28]。

网络建模方面, 以最初的基于 L 空间法和 P 空间法的无向无权网络模型为基础, 学者探讨了连边的方向性, 并逐渐考虑了客流[35]、行程时间[39]等边权。如 Chopra 等[31]将伦敦地铁系统建模为基于车站连接的未加权 - 无向网络和基于始发 - 目的地客流信息的加权 - 有向网络。Chen 等[40]考虑了列车折返操作, 将为列车提供折返操作的两个相邻车站之间的链路定义为折返链路。

网络韧性研究的根本目的是提高交通网络的应对能力和恢复能力。一些学者在对城市轨道交通网络韧性进行合理度量的基础上, 从韧性的角度探讨了系统的优化和恢复, 主要包括网络结构优化和最优恢复决策两个方面。在网络结构优化方面, Li 等[33]以最大化网络韧性为目标, 添加连边的位置为决策变量, 构建基于韧性的城市轨道交通网络结构优化模型, 并运用遗传算法求解模型。Chen 等[41]构建了考虑韧性的双层规划模型来优化城市轨道交通网络韧性。上下层模型分别最大化交通网络的可达性和全局效率, 并利用结合逐次加权平均算法的模拟退火算法求解优化模型。关于最优恢复策略的最初研究主要采用穷举恢复[19]、随机恢复[42]、优先恢复[42]等方法来确定失效单元的恢复顺序。穷举恢复方法列举所有可能的恢复方案并逐一比较, 不适用于备选方案较多的情况。随机恢复方法则随机选择恢复次序, 其实施效果存在极大的不确定性。优先恢复基于特定准则(如节点度、失效单元重要性等)确定恢复次序, 但容易受到决策者主观偏好的影响, 并且有时仅能获得次优方案。为解决这些问题, 学者们提出了基于韧性最大化的目标优化方法来确定最优恢复策略[38]。例如, 黄莺等[43]构建了城市地铁网络恢复模型, 以网络效率为目标函数, 并引入遗传算法求解最优恢复策略。在此基础上, Zhang 等[44]的研究进一步考虑了有限预算约束和修复时间的不确定性, 构建基于韧性的地铁站恢复序列优化模型, 并利用 NSGA-II 算法进行求解。此外, 学者还关注了基于区间修复的城市轨道交通故障恢复策略, 如张雯婕等[45]根据不同折返区段分段处理失效线路, 构建以网络韧性损失(网络平均效率)和恢复总时长最小为目标的故障恢复模型, 并设计 NSGA-II 算法求解模型。少数学者还探讨了面向网络韧性的城市轨道交通列车调度模型。如 Li 等[46]提出考虑车站拥挤程度的韧性评估指标, 并构建混合整数非线性规划模型, 通过列车调整以增强系统的韧性。

随着各系统之间相互依存关系的日益密切, 单一交通模式研究的局限性不断凸显。为此, 近年来少数学者基于相互依存网络的研究框架, 对城市多模式公共交通网络韧性进行了一些探索性研究。多层网

络模型能够表征不同交通模式间的异质性,其中每一层网络刻画一种交通模式,并利用单层网络的 L 空间法、P 空间法等构建模型。多数研究中各层的建模方法相同,如 Ju 等[47]运用 L 空间法将由城际轨道交通、城市轨道交通和市郊轨道交通组成的多模式区域轨道交通系统建模为客流加权的多层网络模型。除各层网络的建模方法,另一个需要关注的问题是层间节点之间的连接规则。当不同交通模式站点间的距离或步行时间在给定范围内时,通常认为两站点相互连接或耦合[48],层间连接多抽象为无权边;部分学者则将时间[49]等属性作为层间边的权重加以刻画。在多层网络建模的基础上,网络韧性的分析框架和方法被引入多模式交通韧性研究中。如 Ju 等[47]以相关系数、网络异质性、平均路径长度和加权网络效率表征系统性能,并运用系统性能曲线方法评估多模式轨道交通网络的韧性。为评估公交-电车-地铁多层网络韧性, Aparicio 等[39]利用运输需求与供应的比例构建系统性能曲线。汤洪霞等[50]构建了融合网络拓扑特征与系统功能的公交-地铁复合网络韧性评估与修复决策框架,采用 Space L 方法构建包含 118 个节点和 561 条边的公交-地铁复合网络模型,并结合加权网络效率与韧性三角形理论量化系统性能的动态变化,并引入基于 SAC 强化学习算法的动态修复序列优化方法,求解以网络韧性最大化为目标的最优修复序列。

城市轨道交通网络韧性研究已覆盖扰动建模、度量指标、评价方法与优化决策的各个方面。在度量指标层面,拓扑指标以网络结构决定系统功能为隐含假设,难以刻画客流组织与运营调度等动态过程对网络性能的支配作用;基于客流或性能的度量对 OD 客流、出行行为等数据提出较高要求,数据的可获得性与精度制约其跨系统推广。在扰动建模层面,随机攻击与蓄意攻击的抽象处理难以再现真实灾害中站点失效的空间关联与级联效应,地震易损性与洪涝淹没等物理机制尚未被充分纳入网络分析。在优化决策层面,结构优化与恢复策略多依托韧性三角形所刻画的静态性能曲线,对系统自适应演化能力的表征较为薄弱。因此,未来研究可将拓扑结构与动态客流相融合、把物理灾害机制嵌入扰动建模并发展面向动态韧性的量化框架,使网络韧性研究向安全韧性深化拓展。

4. 城市轨道交通安全韧性评价研究

近年来,学者逐渐认识到“安全韧性”概念的重要性,并将其引入城市轨道交通安全研究领域。多指标综合评价是安全韧性研究的重要方向,通常需要针对不同扰动类型构建评价指标体系。在地铁车站火灾安全韧性评价方面,黄亚江等[51]通过文献频次统计建立安全韧性评价指标体系,并运用层次分析法-粒子群算法(AHP-PSO)和改进 CRITIC 的主客观组合赋权模糊评价法对地铁车站火灾安全韧性进行评价。夏侯遯迩等[52]以设计方案为切入点,基于防火安全韧性的吸收、抵抗、恢复和适应能力 4 个维度,构建基于网络层次分析法(ANP)-熵权法的地铁防火安全韧性评价指标体系,并运用逼近理想解排序法(TOPSIS)建立评价模型。刘敬严等[53]结合韧性管理 4M1E-4Rs 理论,构建了地铁火灾灾害预警评价指标体系,并采用熵权法和 CRITIC 法确定指标组合权重,利用云模型综合判定风险预警等级。汤青慧等[54]以韧性的吸收能力、抵抗能力、恢复能力和适应能力表征为核心,从人-机-环-管四个方面建立地铁车站火灾安全韧性评价指标体系,并构建基于改进变权物元可拓的安全韧性评价模型。

随着全球气候变暖 and 恶劣天气事件频发,学者逐渐开始关注暴雨洪涝灾害下城市轨道交通系统安全韧性的综合评价。Jiao 等[55]从抵抗、恢复和适应三个方面对 20 个地铁车站暴雨灾害安全韧性因素进行分析,并提出基于有序二元比较法、熵权法和云模型法的评价模型。祝连波等[56]构建包括人员管理、物资装备、环境三个一级指标及 18 个二级指标的地铁车站抗涝安全韧性评估指标体系,并建立了基于博弈论组合赋权物元可拓模型的安全韧性评价模型。陈娜等[57]从抵抗能力、适应能力和恢复能力三个方面提出包含 20 个韧性指标的地铁站水灾安全韧性指标体系,采用 H-OWA 算子修正层次分析法的主观误差,再结合投影寻踪模型确定安全韧性指标体系综合权重,应用疏散模拟软件 Massmotion 获取地铁站应急疏

散时间作为指标数据,并基于模糊综合评价建立安全韧性评价模型。为进一步克服传统以脆弱性为中心的风险评估方法的局限,并更系统地捕捉地铁车站在洪水场景下的多维动态韧性能力,Guo 等[58]基于韧性理论,构建了 TOSE-4Rs 分析框架,据此建立了包含 4 个一级、18 个二级指标的洪水灾害风险评价体系,通过融合拉格朗日优化、C-OWA 算子和熵权法的组合赋权法来确定指标权重,并考虑风险发生概率与风险损失两个维度,引入二维云模型,通过生成评估云图并与标准云图对比来确定风险等级,处理风险评价中的模糊性与随机性。该方法应用于长沙地铁 8 个车站的案例研究,结果显示评估结果与实际状况相符,且与模糊层次分析法(FAHP)的验证结果一致,证实了该框架的准确性与适用性。为了更精确地刻画地铁系统在暴雨内涝灾害下的动态响应过程,Xu 等[59]利用 InfoWorks ICM 水文模型模拟的积水范围、深度和历时数据作为灾害触发的直接输入,以更真实地反映地表积水情景,基于系统性能曲线,对应灾害的前、中、后三个时期,提出了“稳定性-抵抗力-恢复力”三阶段评估框架,构建了包含积水情况、自然环境、地铁信息和社会人口信息 4 个维度、25 项指标的综合评价体系,并采用熵权法确定指标客观权重,结合 TOPSIS 评估地铁站的水灾韧性。

王起全等[60]针对地铁系统的拥挤踩踏事故风险,提出了融合系统动力学(SD)与物元可拓(MEE)模型的动态韧性评估框架。该研究以韧性的吸收、抵抗、恢复、适应四种能力为核心,围绕“人群密度”这一关键致灾因子,构建了包含 4 个一级指标、15 个二级指标的评价体系,实现了对地铁车站韧性等级的连续、动态量化评估,为动态风险管理提供了新工具。

部分研究未明确区分扰动类型,而是采用普适性的评价指标,更为全面地考察城市轨道交通系统的安全韧性水平。如霍小森等[61]从城市轨道交通系统的应急处理能力、乘客管理能力和公共管理能力三个方面构建了适灾韧性评价体系,运用层次分析法(AHP)与熵权法来分别确定指标的主客观权重,并进一步开发了可拓云韧性水平综合评价模型。杜修力等[62]从地铁系统物理构成要素的五个维度、韧性的四个特征和地铁系统韧性一个目标出发,构建 5-4-1 指标体系,并采用 AHP 与可拓物元理论相结合的方法,建立了地铁系统安全韧性评价模型。由于在突发事件下,地铁的安全韧性作用效果与系统适应力密切相关,赵冬月等[63]采用指数函数形式,确定系统韧性评估目标,构建地铁系统运营安全韧性评估模型,依据模型计算的韧性值和综合韧性判断矩阵提出针对性的改进措施和建议。针对现有研究在跨灾害、综合性评估以及将 TOSE 维度与 4Rs 能力明确量化关联方面的不足,Hong 等[64]提出了一个整合 TOSE-4Rs 理论框架、熵权法、探索性因子分析(EFA)与云模型的紧凑操作框架,用于评估城市地铁系统的多灾害韧性,并应用该框架识别出员工安全培训与评估、整改资源分配及事后调查机制为最具影响力的关键杠杆,同时揭示了应急组织结构合理性是常被忽视的问题,为面向决策的地铁韧性规划提供了透明的证据和优先次序。

城市轨道交通安全韧性评价研究在指标体系构建与评价模型选择上已形成多元格局,但其方法体系仍有一定局限。在指标赋权层面,层次分析法与网络层次分析法依赖专家经验,主观偏好易对权重的客观性造成影响;熵权法与 CRITIC 法虽依据数据客观确定权重,但忽视了指标在安全管理实践中的相对重要性;博弈论组合赋权等主客观融合策略的适用性与稳定性仍需系统检验。在评价模型层面,云模型具备处理模糊性与随机性的优势,物元可拓与 TOPSIS 适用于多属性综合评价,但多数模型隐含指标相互独立的假设,不适用于安全韧性因素高度耦合的本质属性。在数据来源层面,既有研究多以专家打分与文献频次统计为依据,少数引入疏散仿真或水文模拟数据,对韧性动态演进特征的刻画不足。因此,研究需突破单一灾害的碎片化格局,构建兼顾组合赋权、因素耦合与动态过程的跨案例综合评价框架,进一步使安全韧性评价研究走向系统化。

5. 城市轨道交通安全韧性因素相互作用机理研究

贝叶斯网络是一种有向概率图模型,能够通过概率推理有效评估系统安全韧性并预测未来态势,并

且直观模拟系统中各因素间的相互作用及其对系统安全韧性的影响。该网络支持基于数据的学习,可以利用历史数据训练和更新网络参数,提高安全韧性评价的准确性和可靠性。贝叶斯网络在处理不确定性、因果关系建模、数据驱动、灵活性和可扩展性等方面展现出显著优势,因此被广泛应用于城市轨道交通系统安全韧性的分析与评估。Wei 等[65]通过分析地铁系统的功能结构获得安全韧性评估指标,利用失效模式与效应分析(FMEA)技术确定可能的故障模式,识别出高风险指标,并结合气象监测数据,构建地铁安全韧性评估的贝叶斯网络模型。Yin 等[66]基于贝叶斯网络模型,提出一种混合知识驱动和数据驱动的系统韧性分析方法。利用历史事件数据(包括事件发生的时间、天气条件、线路状况、故障模式、影响以及恢复时间等信息)训练贝叶斯网络,并应用该模型评估地铁系统的安全韧性。

除此之外,一些学者将复杂系统分析方法引入城市轨道交通安全韧性研究中,在评估系统安全韧性水平的同时,探讨评价指标间的相互作用关系。如黄亚江等[67]从吸收能力、恢复能力和适应能力三个维度出发,识别地铁运营安全韧性评价指标,利用 DEMATEL 模型确定关键因素,并采用解释结构模型(ISM)揭示指标间的相互关系。在此基础上,构建基于 ANP 和模糊综合评价法的地铁运营安全韧性评价模型。李华和乔峥元[68]结合事故案例分析和技术-组织-社会-经济(TOSE)模型,识别出地铁站抗涝安全韧性的 22 个影响因素,并基于对抗解释结构模型法(AISM)和 DEMATEL 构建影响因素的多级递阶层次模型,分析韧性因素间的综合影响关系。申玲等[69]结合复杂网络模型(CN)与功能共振分析方法(FRAM),构建公共交通系统运营安全韧性度量模型,综合考虑网络组件的韧性、子系统的重要性与子系统间的耦合关系,量化系统在遭受破坏至恢复全过程的运营安全韧性。为进一步深入火灾风险在地铁车站复杂系统中的演化路径,Qin 等[70]综合运用 PSR 模型和 DEMATEL-ISM 方法,系统分析了地铁车站火灾风险因素的相互作用与层级结构,构建了 22 因素评价体系,通过应用 DEMATEL 方法量化因素间的因果关系与中心性,识别出五个兼具高中心性和高因果性的关键驱动因素,进而利用 ISM 方法建立了因素间的六级递阶层级结构,揭示了从根本原因到直接原因的风险演化逻辑,最终基于层次结构和中心性分析,量化识别出从关键驱动因素出发的六条主要火灾风险传输路径以制定针对性的干预措施。

相较于网络韧性与安全韧性评价研究,安全韧性因素相互作用机理研究已超越单纯的指标打分,向因素间关系结构的辨识与量化拓展,其各类方法在因果性刻画与数据依赖方面存在差异。贝叶斯网络用于处理不确定性并支持数据驱动的参数学习,但以变量间条件独立为先验假设,对先验概率与历史数据的依赖限制其在数据匮乏情景下的应用;DEMATEL、ISM 及其改进模型能够揭示因素间的层级结构与影响路径,但关系判定多依赖专家打分,结果的主观性难以消除;CN-FRAM 虽能刻画因素间的功能耦合与共振关系,但对系统功能结构的先验认知要求较高。多数识别关系的方法本质上依赖专家经验,难以严格区分伪相关与真实因果驱动,且多以静态网络表征,对动态演化情景刻画不足。因此,融合数据驱动的因果发现算法与专家知识的结构化约束以构建动态因果网络是揭示安全韧性因素作用机理的深化方向。

6. 结论

1) 城市轨道交通安全韧性研究已从早期借鉴生态学、材料学等领域的“韧性”概念,逐步发展成为融合安全科学等多学科知识的交叉前沿领域,整体仍处于由“网络韧性”向“安全韧性”深化发展的过渡阶段,需进一步深化理论研究,并与实践应用建立有效衔接。

2) 城市轨道交通网络韧性的评估受到国内外学者广泛关注,重点探讨网络在部分中断时保持连通并迅速恢复稳定运行的能力。现有研究通常遵循“网络抽象-指标选取-韧性量化”的技术路线,以复杂网络理论将城市轨道交通抽象为无向/有向、无权/加权网络模型,从拓扑、性能与属性三个维度选取度量指标,基于历史数据或仿真模拟获得指标取值并以韧性性能曲线评估网络韧性,进而从网络结构优化与

最优恢复策略两方面探索韧性的提升路径。

3) 城市轨道交通安全韧性评价体系初步建立,但呈“碎片化”特征。针对火灾、暴雨内涝等特定灾害的评价研究已取得显著进展,学者普遍围绕“抵抗、吸收、恢复、适应”等核心能力维度,从“人-机-环-管”或“技术-组织-社会-经济”等系统视角构建指标体系,广泛采用 AHP、熵权法、博弈论组合赋权、云模型、物元可拓等综合评价方法,但现有体系多面向单一灾种,缺乏涵盖多灾种、普适性强的综合评价框架。

4) 从当前文献看,城轨安全韧性因素作用机理研究超越单纯的指标打分,致力于揭示影响安全韧性的关键因素及其相互作用机理,量化风险因素间的因果关联并描绘演化路径,强调系统性认知,为制定精准的韧性提升干预措施提供了理论依据。

5) 动态适应能力的量化机理亟待突破。现有研究多局限于事后损失评估,尚未深刻融合 Safety-II 范式所强调的“系统在多变环境下保持安全运行的能力”。其科学问题在于如何界定并量化系统未受扰动时的“韧性潜力”,确立吸收与适应储备的测度基准;如何建立贯穿预测、监测、响应、适应全过程的动态韧性演化模型;如何构建适用于城轨运营场景的“韧性绩效指标”。研究路径上,可融合运营监测与历史事故数据,借助韧性曲线、系统动力学等方法刻画能力时序演化,推动韧性评估由静态阈值判断转向动态过程诊断。

6) 宏观网络与微观安全评估之间的尺度割裂制约着系统韧性的整体认知,存在如何建立线网、车站、设施、人员多层次要素的跨尺度耦合模型、微观设施失效经网络结构放大为全网级联效应的临界条件与阈值如何判定、不同尺度韧性指标间的映射与传递机制如何刻画科学问题。未来可整合网络流量、车站客流、设备状态与人员绩效等多源异构数据,借助复杂网络与功能共振分析等框架刻画跨尺度耦合,形成兼顾局部失效与全网级联的一体化韧性评估体系。

7) 人员与组织层面韧性的动态作用机制尚待深化。现有研究对乘客、运营人员、管理人员等“人”的关注多停留于静态风险因素,但应急情境下人员决策韧性如何度量并纳入系统韧性模型、组织学习机制如何将事故经验转化为韧性提升的持续动力等问题亟需突破。研究可采集应急演练、事故处置与培训考核等行为数据,结合贝叶斯网络等方法刻画人员因素与系统韧性间的耦合关系,将人员与组织的协同适应性能力内化于韧性评价与提升框架。

参考文献

- [1] 马飞, 杨滢萱, 杨治杰, 等. 基于时空图神经网络的暴雨灾害下城市轨道交通客流恢复力评估方法[J/OL]. 交通运输工程学报, 1-17. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.229>, 2026-04-10.
- [2] Bai, Z., Zhang, P., Sun, L., Li, B. and Zhang, J. (2025) Fire Resilience Assessment and Application in Urban Rail Transit Systems. *Systems*, **13**, Article No. 761. <https://doi.org/10.3390/systems13090761>
- [3] 潘昭宇. “十五五”时期城市轨道交通发展思路及重点任务[J]. 铁道运输与经济, 2026, 48(4): 115-125.
- [4] Bi, W., Linkov, I. and MacAskill, K. (2025) Supporting Urban Sustainability through Resilient Rail Transit Systems. *Cities*, **167**, Article ID: 106373. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2025.106373>
- [5] Holling, C.S. (1996) Engineering Resilience versus Ecological Resilience. In: Schulze, P.C., Ed., *Engineering within Ecological Constraints*, National Academy Press, 31-44.
- [6] Holling, C.S. (1973) Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **4**, 1-23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
- [7] Folke, C. (2006) Resilience: The Emergence of a Perspective for Social-Ecological Systems Analyses. *Global Environmental Change*, **16**, 253-267. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.04.002>
- [8] 杨钰莹, 郭海湘. 灾害链视角下城市韧性影响因素研究[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(11): 190-197.
- [9] Tian, T., Liang, Y., Peng, Z., Cheng, Y. and Chen, K. (2023) Assessing the Dynamic Resilience of Urban Rail Transit Networks during Their Evolution Using a Ridership-Weighted Network. *PLOS ONE*, **18**, e0291639.

- <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291639>
- [10] Elliott, J. (2016) Safety I and Safety II: The Past and Future of Safety Management. *Ergonomics*, **59**, 859-860. <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1093290>
 - [11] 樊燕燕, 牛瑞. 基于 ISM-BN-FDNA 的 URT 运营安全系统韧性评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2026, 23(2): 888-901.
 - [12] 张翕然, 李正中, 张馨, 等. 城市轨道交通系统韧性研究现状及展望[J]. 交通信息与安全, 2024, 42(4): 1-11.
 - [13] Murray-Tuite, P.M. (2006) A Comparison of Transportation Network Resilience under Simulated System Optimum and User Equilibrium Conditions. *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*, Monterey, 3-6 December 2006, 1398-1405. <https://doi.org/10.1109/wsc.2006.323240>
 - [14] 仇保兴. 构建韧性城市交通五准则[J]. 城市发展研究, 2017, 24(11): 1-8+149.
 - [15] Janić, M. (2015) Reprint of “Modelling the Resilience, Friability and Costs of an Air Transport Network Affected by a Large-Scale Disruptive Event”. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **81**, 77-92. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.07.012>
 - [16] Adjetej-Bahun, K., Birregah, B., Châtelet, E. and Planchet, J. (2016) A Model to Quantify the Resilience of Mass Railway Transportation Systems. *Reliability Engineering & System Safety*, **153**, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.03.015>
 - [17] Wang, N. and Yuen, K.F. (2022) Resilience Assessment of Waterway Transportation Systems: Combining System Performance and Recovery Cost. *Reliability Engineering & System Safety*, **226**, Article ID: 108673. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108673>
 - [18] 杨琦, 张雅妮, 周雨晴, 等. 复杂网络理论及其在公共交通韧性领域的应用综述[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 215-229.
 - [19] 范维澄. 以安全韧性城市建设推进公共安全治理现代化[J]. 人民论坛·学术前沿, 2022(Z1): 14-24.
 - [20] 汪洋, 黄金辉, 付姗姗, 等. 系统安全的思维转型: 风险与韧性的比较研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(1): 62-68.
 - [21] 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.
 - [22] 李瑞奇, 黄弘, 周睿. 基于韧性曲线的城市安全韧性建模[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020, 60(1): 1-8.
 - [23] 颜红艳, 宁海, 易欣. 基于 Delphi-IAHP-SPA-GCM 的城市轨道交通项目运维韧性评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(8): 3680-3690.
 - [24] Zhang, X., Miller-Hooks, E. and Denny, K. (2015) Assessing the Role of Network Topology in Transportation Network Resilience. *Journal of Transport Geography*, **46**, 35-45. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.05.006>
 - [25] Zhang, D., Du, F., Huang, H., Zhang, F., Ayyub, B.M. and Beer, M. (2018) Resiliency Assessment of Urban Rail Transit Networks: Shanghai Metro as an Example. *Safety Science*, **106**, 230-243. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.03.023>
 - [26] Berche, B., von Ferber, C., Holovatch, T. and Holovatch, Y. (2009) Resilience of Public Transport Networks against Attacks. *The European Physical Journal B*, **71**, 125-137. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2009-00291-3>
 - [27] Berche, B., Ferber, C.V., Holovatch, T. and Holovatch, Y. (2012) Transportation Network Stability: A Case Study of City Transit. *Advances in Complex Systems*, **15**, Article ID: 1250063. <https://doi.org/10.1142/s0219525912500634>
 - [28] Chen, J., Liu, J., Peng, Q. and Yin, Y. (2022) Resilience Assessment of an Urban Rail Transit Network: A Case Study of Chengdu Subway. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **586**, Article ID: 126517. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.126517>
 - [29] 侯本伟, 游丹, 范世杰, 等. 基于网络效率的城市轨道交通网络抗震韧性评估[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2024, 64(3): 509-519.
 - [30] 杨向飞, 童冬冬, 张静芳. 基于复杂网络的城市轨道交通网络韧性分析[J]. 中国铁路, 2025(11): 141-150.
 - [31] Chopra, S.S., Dillon, T., Bilec, M.M. and Khanna, V. (2016) A Network-Based Framework for Assessing Infrastructure Resilience: A Case Study of the London Metro System. *Journal of The Royal Society Interface*, **13**, Article ID: 20160113. <https://doi.org/10.1098/rsif.2016.0113>
 - [32] 马飞, 赵成勇, 孙启鹏, 等. 重大公共卫生灾害主动限流背景下城市轨道交通网络集成韧性[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(1): 208-221.
 - [33] Li, M., Wang, H. and Wang, H. (2019) Resilience Assessment and Optimization for Urban Rail Transit Networks: A Case Study of Beijing Subway Network. *IEEE Access*, **7**, 71221-71234. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2919105>
 - [34] Lu, Q. (2018) Modeling Network Resilience of Rail Transit under Operational Incidents. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **117**, 227-237. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.08.015>

- [35] Xu, Z., Chopra, S.S. and Lee, H. (2022) Resilient Urban Public Transportation Infrastructure: A Comparison of Five Flow-Weighted Metro Networks in Terms of the Resilience Cycle Framework. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **23**, 12688-12699. <https://doi.org/10.1109/tits.2021.3116667>
- [36] Wang, J., Liao, F., Wu, J., Sun, H., Wang, W. and Gao, Z. (2023) Measurement of Functional Resilience of Transport Network: The Case of the Beijing Subway Network. *Transport Policy*, **140**, 54-67. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2023.06.016>
- [37] Bruneau, M., Chang, S.E., Eguchi, R.T., Lee, G.C., O'Rourke, T.D., Reinhorn, A.M., et al. (2003) A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. *Earthquake Spectra*, **19**, 733-752. <https://doi.org/10.1193/1.1623497>
- [38] 吕彪, 管心怡, 高自强. 地铁网络服务韧性评估与最优恢复策略[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(5): 198-205+221.
- [39] Aparicio, J.T., Arsenio, E., Santos, F.C. and Henriques, R. (2022) LINES: muLtlmodal traNsportation rEsilience analy-Sis. *Sustainability*, **14**, Article No. 7891. <https://doi.org/10.3390/su14137891>
- [40] Chen, J., Liu, J., Du, B., Peng, Q. and Yin, Y. (2022) Resilience Assessment of an Urban Rail Transit Network under Short-Term Operational Disturbances. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **23**, 24841-24853. <https://doi.org/10.1109/tits.2022.3195937>
- [41] Chen, J., Liu, J., Peng, Q. and Yin, Y. (2022) Strategies to Enhance the Resilience of an Urban Rail Transit Network. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2676**, 342-354. <https://doi.org/10.1177/03611981211037888>
- [42] 张洁斐, 任刚, 马景峰, 等. 基于韧性评估的地铁网络修复时序决策方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(4): 14-20.
- [43] 黄莺, 刘梦茹, 魏晋果, 等. 基于韧性曲线的城市地铁网络恢复策略研究[J]. 灾害学, 2021, 36(1): 32-36.
- [44] Zhang, J., Ren, G. and Song, J. (2022) Resilience-Based Restoration Sequence Optimization for Metro Networks: A Case Study in China. *Journal of Advanced Transportation*, **2022**, Article ID: 8595356. <https://doi.org/10.1155/2022/8595356>
- [45] 张雯婕, 胡军红, 闻成维, 等. 考虑网络韧性的城市轨道交通故障恢复研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(4): 179-186.
- [46] Li, Z., Yin, J., Chai, S., Tang, T. and Yang, L. (2023) Optimization of System Resilience in Urban Rail Systems: Train Rescheduling Considering Congestions of Stations. *Computers & Industrial Engineering*, **185**, Article ID: 109657. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109657>
- [47] Ju, Y., Yuan, H., Li, Z., Gan, M. and Chen, Y. (2022) Multilayer Structures and Resilience Evaluation for Multimode Regional Rail Transit System. *IET Intelligent Transport Systems*, **16**, 843-859. <https://doi.org/10.1049/itr2.12179>
- [48] 宋英华, 李玉枝, 霍非舟, 等. 城区内涝条件下城市公交-地铁双层交通网络的脆弱性分析[J]. 安全与环境工程, 2021(2): 114-120.
- [49] Baggag, A., Abbar, S., Zanouda, T. and Srivastava, J. (2018) Resilience Analytics: Coverage and Robustness in Multi-Modal Transportation Networks. *EPJ Data Science*, **7**, 1-21. <https://doi.org/10.1140/epjds/s13688-018-0139-7>
- [50] 汤洪霞, 马桂芸, 杨淼, 等. 突发事件情景下公交-地铁复合网络韧性评估及修复策略优化[J/OL]. 铁道标准设计, 1-10. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202510270005>, 2026-09-13.
- [51] 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.
- [52] 夏侯遐迹, 颜紫璇, 罗扬, 等. 面向设计的地铁车站防火安全韧性评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(12): 169-176.
- [53] 刘敬严, 陈佳, 田静, 等. 韧性理念下地铁火灾灾害风险二维云模型预警[J]. 灾害学, 2023, 38(3): 43-47+74.
- [54] 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.
- [55] Jiao, L., Zhu, Y., Huo, X., Wu, Y. and Zhang, Y. (2023) Resilience Assessment of Metro Stations against Rainstorm Disaster Based on Cloud Model: A Case Study in Chongqing, China. *Natural Hazards*, **116**, 2311-2337. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05765-2>
- [56] 祝连波, 王世笛, 林陵娜, 等. 基于博弈论组合赋权-物元可拓模型的地铁车站抗涝韧性评估研究[J]. 灾害学, 2023, 38(3): 1-6+42.
- [57] 陈娜, 郭浩然, 张志鹏, 等. 基于 H-OWA 算子和投影寻踪的地铁站水灾安全韧性评估[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(4): 148-154.

-
- [58] Guo, D.S., Yang, X.X., Yang, J.C., Wu, H., Meng, F. and Chen, R. (2026) Assessing Subway Station Flood Risks with a Resilience Framework: Combining Weighting Methods and Two-Dimensional Cloud Model. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **168**, Article ID: 107170. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.107170>
- [59] Xu, F., Fang, D., Chen, B. and Wang, H. (2024) Resilience Assessment of Subway System to Waterlogging Disaster. *Sustainable Cities and Society*, **113**, Article ID: 105710. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105710>
- [60] 王起全, 冯炜翔, 杨松立. 基于 SD-MEE 模型的地铁拥挤踩踏事故韧性评估[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(12): 187-195.
- [61] 霍小森, 舒鑫宇, 焦柳丹. 突发公共卫生事件下城市轨道交通系统适灾韧性评估[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(5): 152-158+164.
- [62] 杜修力, 张洋, 缪惠全, 等. 韧性城市视角下地铁系统安全运营评价指标体系[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(3): 1-13.
- [63] 赵冬月, 陈乾, 聂士斌, 等. 多事件下城市生命线系统运营期安全韧性评估方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2025, 65(4): 732-741.
- [64] Hong, J., Jiang, R., Feng, C. and Li, X. (2026) Identification and Quantitative Evaluation of Disaster Resilience for Urban Metro Systems. *Natural Hazards*, **122**, Article No. 112. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07788-x>
- [65] Wei, Y., Liang, J., Deng, Y., Dou, F., Ning, Y., Zhou, D., *et al.* (2023) Resilience Assessment of Beijing Subway Lines under Extreme Precipitation Weather. *Applied Sciences*, **13**, Article No. 3964. <https://doi.org/10.3390/app13063964>
- [66] Yin, J., Ren, X., Liu, R., Tang, T. and Su, S. (2022) Quantitative Analysis for Resilience-Based Urban Rail Systems: A Hybrid Knowledge-Based and Data-Driven Approach. *Reliability Engineering & System Safety*, **219**, Article ID: 108183. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108183>
- [67] 黄亚江, 李书全, 李益铨, 等. 基于 DEMATEL-ISM-ANP 的地铁运营安全韧性综合评价[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(6): 171-177.
- [68] 李华, 乔峥元. 地铁站抗涝韧性影响因素识别与分层研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(5): 1457-1464.
- [69] 申玲, 唐令怡, 廖洁. 基于 CN-FRAM 的公共交通设备设施系统运营安全韧性度量[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(3): 45-54.
- [70] Qin, R., Zhang, X., Shi, C., Zhao, Q., Yu, T., Xiao, J., *et al.* (2025) Identifying Critical Fire Risk Transmission Paths in Subway Stations: A PSR-DEMATEL-ISM Approach. *Fire*, **8**, Article No. 332. <https://doi.org/10.3390/fire8080332>