

文章编号: 1003-1421(2026)10-0018-16

引用格式: 陈志强, 陶思宇, 彭其渊, 等. 综合交通枢纽韧性评估与提升研究综述[J]. 铁路运输与经济, 2026, 48(10): 18-33.
CHEN Zhiqiang, TAO Siyu, PENG Qiyuan, et al. Review of Resilience Assessment and Enhancement Research for Integrated Transport Hubs[J]. Railway Transport and Economy, 2026, 48(10): 18-33.

综合交通枢纽韧性评估与提升研究综述

陈志强^{1, 2, 3}, 陶思宇^{1, 2, 3}, 彭其渊^{1, 2, 3}, 甘元伟⁴

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 四川 成都 611756; 2. 西南交通大学 综合交通运输智能化国家地方联合工程研究中心, 四川 成都 611756; 3. 西南交通大学 综合交通大数据应用技术国家工程实验室, 四川 成都 611756; 4. 中国铁路成都局集团有限公司 成都客运段, 四川 成都 610082)

摘 要: 为系统梳理综合交通枢纽韧性研究进展, 开展文献综述。首先从理论内涵出发, 提出“4R+2C”(鲁棒性、冗余性、资源性、快速性以及协同性、兼容性)韧性特征框架; 在此基础上, 从系统构成要素、韧性特征和理论框架3个维度归纳评估指标体系构建思路, 将评估方法总结为概率推理、多准则决策、仿真优化和数据驱动与智能技术4类, 比较其适用条件与局限性; 接着从物理设施、运营管理、技术创新和多元协同与可持续发展4方面总结韧性提升策略。研究表明, 综合交通枢纽韧性研究正由静态评价向动态评估演化、由单一对象向多系统耦合、由被动响应向主动适应转变。研究构建了比较系统的评估与提升分析框架, 可为复杂综合交通枢纽韧性研究提供参考。

关键词: 综合交通枢纽; 韧性; 研究综述; 评估指标; 评估方法; 提升策略

中图分类号: U115 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20260323001

Review of Resilience Assessment and Enhancement Research for Integrated Transport Hubs

CHEN Zhiqiang^{1, 2, 3}, TAO Siyu^{1, 2, 3}, PENG Qiyuan^{1, 2, 3}, GAN Yuanwei⁴

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 2. National and Local Joint Engineering Research Center of Integrated Transportation Intelligence, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 3. National Engineering Laboratory of Integrated Transportation Big Data Application Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 4. Chengdu Passenger Transport Section, China Railway Chengdu Group Co., Ltd., Chengdu 610082, Sichuan, China)

Abstract: To systematically review research progress on integrated transport hub resilience, this paper conducted a systematic literature review. Firstly, based on theoretical implications, a “4R+2C” resilience characteristic framework, including robustness, redundancy, resourcefulness, rapidity, coordination, and compatibility, was proposed. Based on this foundation, the paper established an approach for constructing an evaluation indicator system from three dimensions: system components, resilience characteristics, and theoretical frameworks, and classified evaluation methods into four categories: probabilistic reasoning, multi-criteria decision-making, simulation optimization, and

收稿日期: 2026-03-23 修订日期: 2026-09-15

通信作者: 陶思宇(1980—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 西南交通大学交通运输与物流学院副教授。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB4300502); 广西创新驱动发展专项资金项目(AA21077011-2); 国家自然科学基金项目(72501229)

data-driven intelligent technologies, comparing their applicability and limitations. Subsequently, resilience enhancement strategies were summarized from four aspects: physical infrastructure, operational management, technological innovation, and multi-stakeholder collaboration and sustainable development. The results show that integrated transport hub resilience research is evolving from static evaluation to dynamic assessment, from single-object analysis to multi-system coupling, and from passive response to active adaptation. The study constructs a systematic framework for resilience assessment and enhancement, which provides a reference for research on complex integrated transport hubs.

Keywords: Integrated Transport Hub; Resilience; Literature Review; Evaluation Indicators; Evaluation Methods; Enhancement Strategies

0 引言

综合交通枢纽作为连接城市交通与城际交通(如铁路、航空、公路、水运)的关键节点,其功能已从重要的旅客集散地逐步发展为集交通、商业、服务等于一体的城市功能中心。随着交通强国战略深入推进和综合交通运输体系加快构建,综合交通枢纽作为多种运输方式衔接转换的重要节点,其建设规模不断扩大,系统内部的关联程度日益增强,这种高度的集成性在极大提升运输效率和服务质量的同时,也使得其系统内外部随时面临着可能发生的安全挑战,一旦遭遇扰动,都可能引发级联效应,导致整个综合交通枢纽甚至区域交通网络的瘫痪。

综合交通枢纽作为典型的由人员、设备、环境和管理等多要素耦合的复杂系统,其在自然灾害扰动、设施设备故障或复合风险冲击下的韧性水平,直接关系到城市交通的安全稳定运行、居民出行安全和区域经济社会发展的稳定性。近年来,韧性理论在交通运输领域得到广泛应用,但不同研究对象之间的侧重点存在明显差异。现有研究主要集中在交通网络韧性与单一交通设施韧性2个方面。交通网络韧性方面,研究主要围绕交通运输网络韧性^[1-2]、城市道路交通网络韧性^[3]、城市轨道交通系统韧性^[4]展开,通过网络拓扑结构分析和性能恢复曲线等方法,研究路段或节点失效条件下网络连通性、可达性和系统恢复能力等问题。该类研究更多关注交通网络整体结构特征和宏观运行性能演化规律。单一交通设施韧性方面,学者围绕地铁车站、机场航站楼、港口码头等典型交通设施开展了大量研究,重点分析火灾、洪涝和突发大客流等扰动条件下设施结构安全、设备可靠性和运营组织优化等问题。相关研究为交通运输系统韧性理论发展奠定

了重要基础,但其研究对象多集中于单一交通设施场景,对多交通方式耦合、多主体协同和多层级客流交互等复杂系统特征研究较少。相比交通网络或单一交通设施,综合交通枢纽兼具多交通方式耦合、多主体协同运营、多功能空间叠加等特征,其内部各系统间存在明显的耦合关联与级联效应。交通网络韧性研究的宏观拓扑视角难以刻画综合交通枢纽内部多系统动态交互过程;单一交通设施的韧性研究难以反映多方式协同运行与跨系统联动恢复机制。

因此,系统梳理总结综合交通枢纽韧性研究,深入剖析其理论内涵、评估指标选取、量化方法和提升策略等,以期丰富韧性理论研究、优化研究方法、保障综合交通枢纽安全稳定运行和防范化解重大交通安全风险等提供有效参考。

1 综合交通枢纽韧性内涵特征

1.1 韧性的起源与发展

韧性(Resilience)源自于拉丁语“resilio”,本义为“回弹”,其内涵发展经历了从生态学科到多学科融合的过程。1973年,生态学家Holling^[5]首次把“韧性”引入现代科学,定义为“生态系统在遭受干扰后恢复至初始稳定状态的能力”,奠定了韧性的核心内涵。随后,韧性理论扩展至社会学、经济学、心理学、灾害管理等多个领域。

2003年,Bruneau等^[6]在社区地震韧性研究中,首次系统性提出“韧性”量化评估框架,包括“4R”属性(Robustness, Redundancy, Resourcefulness, Rapidity,即鲁棒性、冗余性、资源性、快速性)和“韧性三角形”量化评估方法,被后续交通运输、基础设施、城市社会等多领域的韧性研究广泛引用。2005年,联合国国际减灾战略署^[7]将韧性定义为系统、社区或社会在面临潜在灾害时,通过抵抗或改

变来适应环境,从而达到并维持其功能和结构处于可接受水平的能力。随着韧性研究的不断深入,韧性内涵逐渐向多维度、深层次拓展。Murray-Tuite^[8]聚焦交通系统在异常条件下的核心表现,明确韧性需纳入系统性能水平、恢复速度及所需外部资源的考量。Henry等^[9]通过研究发现,系统在遭受灾害扰动后,未必能完全恢复至扰动前状态,因此韧性内涵需进一步纳入适应能力与转型能力。Amoaning-Yankson等^[10]提出静态韧性与动态韧性的明确区分:静态韧性与鲁棒性相关,强调系统在冲击后无需立即恢复即可持续运行;动态韧性则侧重灾害发生后尽快恢复初始功能与运行水平,为韧性评估提供了新的分析视角。刘庆等^[3]进一步将上述韧性理论应用于城市道路交通网络研究,验证了静态与动态韧性划分在交通系统分析中的适用性,丰富了交通运输领域韧性理论的实践应用。

1.2 综合交通枢纽韧性内涵与特征

基于既有韧性研究,结合综合交通枢纽多交通方式耦合^[11]、多功能空间叠加、多层级客流交织、多主体协同运营和多系统一体化管理等系统特性,将综合交通枢纽韧性界定为:综合交通枢纽在面临内部故障(如设备失效、管理失误)、外部冲击(如自然灾害、突发大客流、公共卫生事件等)以及自然-人为复合扰动时,依托其结构与功能的多样性,通过组织管理、内部结构调整、资源优化配置和外部协同联动等方式,有效抵御和吸收扰动,维持集散、换乘与运输等核心服务功能的连续性,并在扰动后实现快速恢复与优化运行,同时通过运行反馈与学习调适机制持续提升系统的适应与演化能力。本研究将综合交通枢纽韧性特征概括为“4R+2C”,其中“2C”指协同性(Collaboration)和兼容性(Compatibility)。综合交通枢纽韧性“4R+2C”特征内涵如表1所示。

2 综合交通枢纽韧性评估指标体系

建立科学合理的综合交通枢纽韧性评估指标体系是科学量化综合交通枢纽韧性水平的基础,也是后续识别系统薄弱环节,开展韧性提升研究的重要前提。在现有研究中,构建综合交通枢纽韧性评估指标体系主要从综合交通枢纽类别、扰动类型等方面展开。其中,根据综合交通枢纽类别可划分为

表1 综合交通枢纽韧性“4R+2C”特征内涵
Tab.1 Resilience characteristics of integrated transport hubs:
the “4R+2C” framework

特征名称	核心内涵
鲁棒性	系统在遭受扰动时维持其核心功能的基础能力
冗余性	系统通过备用资源、替代路径或冗余设施保障功能持续运行的能力
资源性	系统在扰动发生时通过灵活调配资源、制定应急策略应对风险的能力
快速性	系统从遭受扰动中恢复至正常状态的效率
协同性	系统多主体(运营管理部门、政府、应急部门和公众等)与多系统(交通、能源、医疗和应急等)在扰动全过程的联动能力
兼容性	系统与外部环境、其他基础设施等的适配能力

轨道交通枢纽、港口枢纽和航空枢纽等;按照遭受扰动类型可以分为自然扰动、人为扰动和复合扰动等。

然而,按照综合交通枢纽类别划分关注的是综合交通枢纽类型差异,忽视了不同类型综合交通枢纽韧性评估间的共性,难以体现综合交通枢纽多交通方式耦合的特点。按照遭受扰动类型划分主要关注特定场景下综合交通枢纽的韧性水平,无法覆盖综合交通枢纽多功能空间叠加和多层级客流交织的特点。因此,为全面反映综合交通枢纽复杂系统多维特征与韧性能力,从评估视角出发,将现有综合交通枢纽韧性评估指标体系研究划分为系统构成要素类、韧性特征类和理论框架类3个方面。

2.1 系统构成要素类

系统构成要素类评估指标体系源于系统工程理论,将综合交通枢纽视为典型的“社会技术系统”^[12],强调系统整体韧性取决于各子系统之间的非线性耦合与协同作用。此类指标体系旨在通过对系统内部组成要素进行分解,识别系统内部的薄弱环节来表征综合交通枢纽整体韧性水平。

在早期的研究中,为揭示系统各子要素对综合交通枢纽整体韧性水平的支撑和制约作用,“人员-设备-管理-环境”四维要素^[13]被广泛采用。黄亚江等^[14]在地铁火灾安全韧性评估中建立涵盖人员、设备、环境和管理四大类共12项指标的评估体系。杜修力等^[15]进一步补充结构要素,从宏观城市视角评估地铁运营系统安全韧性。Guo等^[16]和Wan等^[17]同样基于“人员-设备-管理-环境”四维要素,分

别建立地铁施工现场安全韧性和城市交通枢纽风险评估指标体系。

随着综合交通枢纽的功能日趋多元、多交通方式衔接需求持续升级,多主体参与特征日益突出,研究逐渐突破传统四维要素划分,向多维子系统拓展,以适配复杂系统韧性评估需求。孙健等^[18]将综合交通枢纽运营系统划分为客流、设备、环境、管理、人员、运输6个子系统,以更全面刻画车站系统组成和其内在联系。李娜^[19]考虑基础设施、运营管理、应急响应和可持续发展因素评估港口韧性,关注港口的长期运营发展。Liu等^[20]以四维要素为基础建立关键基础设施系统韧性的性能拟合曲线。惠天镛^[21]补充政府协同、监测预警等要素作为港口在遭受台风扰动时的韧性评估指标。李子瞳等^[22]提出“网格-流线-主体”三维评估框架,将综合交通枢纽划分为物理单元、功能路径和运营主体,分别表征客流载体、动态流线和综合能力。该框架突破了常规的按系统要素划分维度,为识别各要素维度的韧性薄弱环节提供了新路径。

系统构成要素类指标体系主要围绕设施设备、运营组织、应急管理和外部环境等系统构成要素,对综合交通枢纽进行全要素分析,以识别影响系统韧性的关键薄弱环节,侧重对综合交通枢纽内部结构和功能组成的全面刻画。为增强该维度指标体系的可操作性与工程适用性,以设备冗余度^[23-24]为例对典型指标量化方法进行说明。

$$R = \frac{C_{\text{backup}}}{C_{\text{total}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R 为设备冗余度; C_{backup} 为备用设备容量或备用通道数量, 台/条; C_{total} 为设备总容量或通道总数, 台/条。

设备冗余度能够反映综合交通枢纽在部分设施失效条件下维持系统基本运行功能的能力, 冗余度越高, 说明系统抵御扰动和持续服务能力越强。

2.2 韧性特征类

从韧性特征类出发建立综合交通枢纽韧性评估指标体系, 体现“韧性”的本体内涵, 通过刻画系统在遭受扰动时的抵御-吸收-恢复-适应全过程的功能表现, 实现对综合交通枢纽韧性水平的量化。

Bruneau等^[6]提出的韧性“4R”特征框架作为

韧性评估领域的经典核心理论范式之一, 在综合交通枢纽韧性评估指标体系构建中得到广泛应用, 为后续相关研究提供了核心逻辑遵循。Tang等^[25]在高铁站抗震韧性评估中据此构建评估指标体系, 分别以结构支柱和内部状态表征鲁棒性; 以备份系统和疏散路径指示表征冗余性; 以救援力量与装备和经济支持能力表征资源性; 以人员疏散效率和修复时间表征快速性。

随着综合交通枢纽韧性评估需求的不断提高和研究场景的不断丰富, 韧性维度的设定趋于灵活, 不再局限于传统的韧性“4R”特征框架, 而是根据具体扰动类型和评估目标对“4R”特征进行调整, 以提高指标体系与实际需求的匹配程度。陈锦渠等^[26]针对地铁站大客流场景, 将韧性简化为“抵抗-恢复-适应”三维。孙扬才等^[27]考虑到机场地下空间防汛的核心诉求是最大限度减少洪涝损失并筑牢防汛基础, 因此侧重强化鲁棒性与冗余性, 弱化快速性和适应性指标。

韧性特征类指标体系关注系统在“抵御-吸收-恢复-适应”全过程中的动态演化特征, 能够较好反映综合交通枢纽韧性的演化机理。为明确韧性特征维度指标的量化方式, 以快速性^[9]为例对典型指标的计算方法进行阐释。现有研究通常采用单位时间内系统功能恢复水平的变化量对系统恢复速率进行表征。

$$V = \frac{P(t_2) - P(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

式中: V 为恢复速率, 人/h; $P(t_1)$, $P(t_2)$ 分别为恢复阶段起始与结束时刻的系统性能; t_1 , t_2 为对应时刻。

恢复速率越高, 说明综合交通枢纽在扰动条件下的恢复能力与快速响应能力越强。

2.3 理论框架类

理论框架类评估指标体系以成熟的理论框架为支撑, 将韧性评估需求与理论内在逻辑深度融合, 通过理论对评估指标的层级划分、关联关系进行系统性约束, 从而提高评估过程的科学性和系统性, 为复杂系统的韧性评估提供稳定的底层逻辑支撑。

压力-状态-响应模型(PSR)通过压力维度量化外部扰动强度, 状态维度表征系统受扰动后的运行

状态, 响应维度反映系统针对扰动采取的应对措施及其恢复效果。Zhang 等^[28]利用该模型构建了地铁口防洪韧性评估指标体系, 以 InfoWorks ICM 模拟的洪水淹没指标作为压力层量化外部冲击, 以地铁站入口高度和结构形式作为状态层表征物理抵抗力, 以应急设施与救援资源作为响应层评估恢复能力, 实现了对地铁站入口遭遇洪灾全过程的动态评估。Zhang 等^[29]在此基础上, 引入驱动力和影响维度, 拓展为驱动力-压力-状态-影响-响应模型(DPSIR), 以增强对系统形成机制及影响后果的刻画能力。建立了涵盖根源致因(D)、压力负荷(P)、系统状态(S)、潜在后果(I)和防御响应(R)的五维评估指标体系, 实现对地铁施工安全韧性的动态评估。物理-事理-人理理论(WSR)通过物理维度定义系统物理构成、事理维度规范运营管理流程、人理维度关联主体行为特征, 实现韧性评估从单一要素向系统整体的转化。孙健等^[18]运用 WSR 理论构建综合交通枢纽运营韧性评估指标体系, 结合博弈论组合赋权, 识别出客流因素与环境因素是制约综合交通枢纽运营韧性的主要短板。汤青慧等^[30]基于 WSR 理论建立地铁车站火灾安全韧性评估指标体系, 并结合盲数理论降低专家赋权的主观性, 提高了评估结果的可靠性。

综上, 3类韧性评估指标体系在研究目标、适用场景和评估侧重点方面存在一定差异。3类韧性评估指标体系对比如表2所示。同时, 3类指标体系并非相互独立, 系统构成要素类明确综合交通枢纽韧性评估的对象与数据载体, 韧性特征类刻画系统在扰动条件下的核心属性, 理论框架类为指标体系构建提供理论依据, 明确指标层级划分和指标间关联关系, 共同为韧性评估提供整体分析框架。综合交通枢纽韧性评估指标体系框架如图1所示。

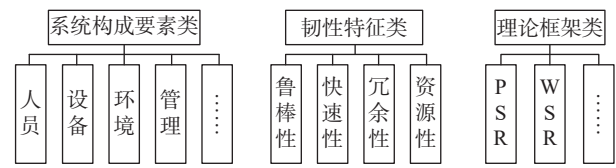


图1 综合交通枢纽韧性评估指标体系框架

Fig.1 Framework for an integrated transport hub resilience assessment indicator system

3 综合交通枢纽韧性评估方法

在综合交通枢纽韧性评估指标体系的基础上, 相关研究从不同技术路径出发, 形成了多样化的评估方法。由于各类方法在理论逻辑、建模步骤等方面存在差异, 有必要从定量视角对其核心原理归纳分析, 以提高各类评估方法分析结果的一致性。其中, Bruneau 等^[6]提出的“韧性三角理论”被广泛认可采用。该方法通过系统性能函数 $Q(t)$ 随时间 t 的演化曲线来描述系统在扰动全过程中的表现, 韧性值 R 常被定义为从扰动发生到系统恢复全过程中性能损失面积的度量。其核心公式为

$$R = 1 - \frac{\int_{t_0}^{t_1} [100 - Q(t)] dt}{100 \cdot (t_1 - t_0)} \quad (3)$$

式中: t_0 为扰动发生时刻; t_1 为系统恢复至稳定状态的时刻。

韧性三角理论从整体上反映系统运行特征, 是韧性定量分析中极具代表性的基础表达形式之一。在此基础上, 基于方法论的逻辑结构与数理模型原理, 将现有主要评估方法划分为概率推理类、多准则决策类、仿真优化类和数据驱动与智能技术类4类。

3.1 概率推理类

概率推理类方法主要是利用概率论与数理统计工具, 对系统中各要素之间的复杂关系和数据的

表2 3类韧性评估指标体系对比
Tab.2 Comparison of three types of resilience evaluation indicator systems

类别	核心思想	优势	局限性	适用场景
系统构成要素类	关注系统内部组成要素	指标全面, 可操作性强	指标冗余, 耦合关系难刻画	大型综合交通枢纽全要素评估
韧性特征类	关注全过程的表现	动态特征明显, 反映时变特征	数据需求高, 量化难度大	动态韧性评估, 韧性演化规律研究
理论框架类	依托经典理论框架约束指标层级与关联关系	理论一致性强, 逻辑清晰	可操作性较低, 权重确定依赖主观方法	复杂系统研究

不确定性进行建模和推理。其中, 贝叶斯网络(Bayesian Network, BN)因能够有效描述随机变量间的条件依赖关系, 并实现复杂系统状态的概率推断被广泛采用。贝叶斯网络是一种表示随机变量及其条件依赖关系的有向无环图, 其核心在于利用贝叶斯公式进行概率推理。对于一组随机变量 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, 其联合概率分布公式^[21]为

$$P(X) = \prod_{i=1}^n P(X_i | \text{Parents}(X_i)) \quad (4)$$

式中: $P(X)$ 为整个随机变量集合的联合概率; X_i 为第 i 个随机变量; $\text{Parents}(X_i)$ 为节点 X_i 的父节点集合。

惠天镛^[21]利用贝叶斯网络模型推演了港口在遭受台风时的失效概率, 量化了不同应急预案对港口韧性提升的贡献程度。Wang 等^[31]针对港口基础设施, 建立了涵盖自然灾害、技术故障和人为因素等多种扰动类型下的贝叶斯网络模型, 利用 Noisy-OR 门模型降低条件概率表的建立难度, 实现了不同扰动组合下港口准备能力和响应能力概率分布的量化分析。

针对传统贝叶斯网络先验概率依赖专家经验、主观性较强的问题, 学者进一步引入多种不确定性理论对模型进行改进。针对韧性动态演化过程随机性与模糊性并存的问题, Wan 等^[17]结合云模型, 利用期望、熵和超熵 3 个数字特征实现定性语言变量向定量云模型的转换, 提高了高铁枢纽运营韧性评估结果的可靠性。Tang 等^[32]引入证据理论(Dempster-Shafer Theory, D-S)构建“证据推理-贝叶斯网络”模型进行改进, 通过正交组合规则融合多位专家意见, 显著降低了主观判断的不确定性, 并通过反向溯源精准识别出可靠性和生存能力是制约散货码头韧性的关键因素。Liu 等^[33]引入了不确定理论, 建立了包含不确定测量函数的地铁站洪灾韧性评估模型, 实现了概率分布未知情况下的韧性评估。刘婧蕾等^[34]采用解释结构模型(ISM)构建贝叶斯网络拓扑结构, 结合最大后验估计法确定参数, 有效解决了韧性评估中因素逻辑关系界定难、小样本条件下参数学习精度低的问题。随着综合交通枢纽系统复杂性不断提高, 概率推理类方法也逐渐呈现与复杂网络分析、机器学习和仿真技术融合发展的趋势。

Wang 等^[35]在港口集装箱分配网络韧性研究中, 将贝叶斯推理与复杂网络分析相结合, 利用随机森林算法识别关键节点重要性, 通过多场景仿真验证网络脆弱性, 构建了融合概率推断、机器学习与网络仿真的综合分析框架。该方法能够有效提升复杂扰动情景下系统状态推断与风险传播识别能力, 增强传统概率推理类方法对动态复杂场景的适应性。

3.2 多准则决策类

多准则决策类方法通过构建多维度的评估指标体系, 经专家打分或者客观数据熵权计算等途径确定指标权重, 进而实现对综合交通枢纽韧性等级的定量计算。根据权重确定方式的差异, 现有研究主要采用主观赋权法、客观赋权法和主客观组合赋权法 3 类。其中, 主观赋权法(如层次分析法、德尔菲法)依赖专家经验和领域知识, 指标意义明确, 但易受专家偏好影响且一致性难以保证; 客观赋权法(如熵权法、CRITIC 法)依据数据统计特征确定权重, 客观性强, 但可能偏离指标的实际场景含义且对数据质量要求高。为兼顾主观经验的合理性与客观数据的科学性, 主客观组合赋权法通过线性加权、博弈论等数学方法将 2 类权重进行融合, 能够有效降低单一赋权方法的偏差, 更适用于系统构成复杂、主客观信息均需考量的综合交通枢纽韧性评估场景。其核心思想是将主观权重 w_i^s 和客观权重 w_i^o 按一定比例或规则进行融合使其偏差最小化后, 得到组合权重 w_i 。组合权重 w_i 可表示为

$$w_i = \alpha \cdot w_i^s + (1 - \alpha) \cdot w_i^o \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (5)$$

式中: α 为组合系数。

近年来, 多准则决策类方法逐渐由单一赋权向多方法融合发展。Wu 等^[36]提出了一种“三阶段循环”的韧性评估模型, 融合博弈论与 TOPSIS 法, 结合最佳-最差法的主观评估和基于熵的客观权重测量, 实现了对港口持续运营的韧性评估。祝连波等^[37]采用博弈论组合赋权与物元可拓模型相结合的方法, 提高了地铁车站抗涝韧性评估结果的可靠性。针对专家判断存在模糊性的问题, Lo 等^[38]应用区间值费马模糊集, 通过引入“隶属度、非隶属度和犹豫度”的三维空间, 更准确刻画了专家在评估机场风险时的犹豫心理。Gonzalez-Solano 等^[39]为深入分析指标间的相互作用, 提出了一种融合决策实

验与评价实验室(DEMATEL)和ISM的方法,实现了各评估指标间相互作用的显性化处理,量化了策略间的因果强度,构建了策略间的层级拓扑结构,揭示了通信系统作为底层驱动因素通过级联效应影响应急响应等表层能力。黄亚江等^[40]在地铁站火灾安全韧性评估中,通过ISM-网络分析法(ANP)确定各指标间的依存与反馈关系,验证了考虑指标间的相互依存和相互反馈关系的评估结果更符合实际情况。近年来,多准则决策类方法逐渐与仿真优化、数据驱动方法相结合。Zhao等^[41]基于PSR-TOPSIS模型评估江苏省城市综合韧性,在采用组合赋权法平衡主客观偏差基础上,引入障碍度模型识别关键制约因素,通过蒙特卡洛模拟对模型稳健性进行验证,实现了指标评价、障碍诊断与结果验证的共同分析。该方法不仅提高了多准则决策类方法对复杂动态情景的适应性,还增强了综合韧性评估结果的科学性与稳定性。

3.3 仿真优化类

在面对大规模客流疏散、资源分配等场景时,概率推理类和多准则决策类的评估方法难以充分刻画其时变特征,无法准确反映动态变化过程。为准确模拟动态评估结果,学者通常采用基于物理过程或通过计算机仿真模拟系统运行过程的仿真方法,并在模拟过程中进行优化,以寻求最优的资源配置或运营管理策略等。

系统动力学(System Dynamics, SD)因能够描述复杂系统反馈关系和动态演化过程,被广泛用于宏观系统韧性的演化模拟。Zhang等^[42]运用SD方法探究了多式联运集装箱港口中的风险传导机制。通过构建系统存量流量图,定量解析了铁路子系统中断经由级联效应对整个港口运营网络的冲击深度,仿真结果证实了局部单一环节的故障可诱发系统整体效能的非线性衰退。闫秋实等^[43]采用SD方法构建了军用机场抗爆韧性的对抗仿真模型,分析了攻防博弈下机场功能的动态损失与恢复曲线。薛佳荣^[44]通过SD方法来模拟高铁客运枢纽站内客流波动与作业组织的交互关系,进而分析在不同调度策略下高铁客运枢纽站的韧性水平。

在微观层面,离散事件仿真(Discrete Event Simulation, DES)、排队模型和运筹优化方法等能

够模拟乘客流动、设施服务及资源配置过程,常被用来揭示复杂系统底层的演化机理。陈锦渠等^[26]用M/M/S/∞/∞/FCFS排队模型来量化购票机、安检设备、闸机等关键设备处的乘客延误时间,以此还原大客流下乘客“到达-排队-接受服务”的动态过程。程国勇等^[45]利用DES模型刻画了航站楼内旅客的时空流动轨迹,定量分析了安检环节效率波动对系统整体韧性的边际效应。Ma等^[46]面向机场突发大客流场景,提出了一种基于混合整数规划的应急疏散响应框架,融合InfoWorks ICM水动力模型与运筹优化算法,在动态推演极端暴雨下疏散过程的同时,实现了对旅客等待成本与企业运营成本的双重优化,体现了仿真优化融合方法的优势。周聪^[47]基于AnyLogic平台实现了轨道交通换乘站的全要素仿真,为突发事件下的疏散预案优化提供了量化依据。Xu等^[48]采用M/G/C/C排队模型对地铁车站内乘客步行过程进行建模,以此来探讨设施故障对地铁车站的影响。

3.4 数据驱动与智能技术类

随着大数据、人工智能及数字孪生等新兴技术的快速发展,数据驱动与智能技术类评估方法逐渐成为综合交通枢纽韧性研究的重要方向。这类方法旨在利用算法从多维时空数据中挖掘系统性能在遭受扰动下的演化规律与概率特征,从而实现对韧性的定量分析与自适应决策。

Tang等^[25]在高铁站抗震韧性评估中,利用信念规则库建立了子系统状态与车站整体功能值之间的非线性映射关系。通过计算功能恢复曲线下的积分面积来量化韧性水平,并引入差分进化算法对模型参数进行寻优,实现了对系统功能时变特征的驱动式分析。Lyu等^[49]针对散货港口机械故障,构建了基于深度Q网络的智能调度模型。该模型在仿真环境中通过试错-反馈机制,驱动智能体自主学习在不同故障状态下(如维修时长不确定)的最优策略(泊位重分配或原位等待),实验结果显示其韧性效能(0.87)显著优于传统规则(0.38)。Gu等^[50]提出了一种基于数据驱动的港口韧性评估框架,利用Z-score、孤立森林和长短期记忆网络(LSTM)等统计与机器学习算法,从每日港口拥堵指数中识别异常状态,并构建了包含拥堵时间、恢复速度等维度的定量指标

体系,实现了对全球主要港口在疫情冲击下韧性表现的动态测度与横向对比。Zhang等^[51]提出了一种基于分块时间序列Transformer的时间序列预测模型,利用历史气象与运营数据,精准预测了恶劣天气下机场运营韧性曲线的演化趋势,结果显示其预测精度显著优于传统的LSTM和标准Transformer模型。雷崇等^[52]基于仿真大数据的概率分析,利用增量动力分析获得大量车站震动响应样本,通过统计回归拟合出不同强度震害下的易损性曲线,进而完成车站的韧性指数计算和评级。齐麟等^[53]从数据特征视角出发,提出了基于功能剩余累积比的机场韧性评价指标,通过对雨雪天气下机场运输能力时间序列数据的深度挖掘,提取了下降期、低水平运行期及恢复期3个阶段的机场功能水平变化曲线特征,这种基于高频监测数据的特征提取方法,深刻揭示了韧性所表现出的时空异质性。在此基础上,部分学者将数据驱动方法与机理模型相结合。Niu等^[54]提出的基于时空注意力和自适应专家模型,将深度学习时空预测与网络拓扑-功能韧性指标相耦合,通过记忆增强的门控混合专家架构识别常规交通状态与降雨扰动异常,实现了降雨条件下城市道路网络韧性的实时评估。

总体来看,4类评估方法各具特点。概率推理类方法在处理不确定性和复杂耦合关系方面具有优势;多准则决策类方法适用于方案评价和决策实施;仿真优化类方法能有效模拟系统动态演化过程;数据驱动与智能技术类方法在非线性关系拟合方面表现突出。随着研究的深入,各类方法逐渐呈现融合发展趋势。如概率推理与复杂网络和机器学习融合,提高复杂扰动条件下的动态推断能力;多

准则决策引入仿真优化,增强系统动态分析能力;数据驱动方法与机理模型融合,提高模型可解释性。因此,实际应用中应根据研究目的和数据条件,合理选择单一方法或多方法融合策略,以更全面准确地评估综合交通枢纽韧性。综合交通枢纽韧性评估方法对比分析如表3所示。

4 综合交通枢纽韧性提升策略

对综合交通枢纽韧性进行评估不仅是为了科学化系统当前的韧性水平,更在于准确识别潜在的薄弱环节。韧性评估为提升治理决策提供科学依据,提升策略则将评估结果转化为切实可行的落地治理方案。两者相互支撑,相互衔接,共同构成了综合交通枢纽韧性从问题识别到系统优化的提升链条。研究从物理设施、运营管理、技术创新和多元协同与可持续发展4个方面总结综合交通枢纽韧性提升策略,实现综合交通枢纽从“被动抗灾”到“主动适应”的转变,保障其在不确定性环境下核心功能的稳定运行。

4.1 强化物理设施

综合交通枢纽内部的基础设施设备是保障系统稳定运行的重要物质基础。已有研究认为,传统单一依靠结构加固的被动防御方式难以充分应对复杂不确定环境,应通过提升设施冗余能力、增强关键节点防护水平以及优化灾后恢复能力,提高系统抵抗和恢复能力。

Zhang等^[28]提出地铁站入口防洪应结合灾前防御与灾后应急,通过优化入口布局、提升防护能力以及配置应急设备提高抗灾能力。León-Mateos等^[55]指出提升港口韧性不仅依赖工程防御,还需要

表3 综合交通枢纽韧性评估方法对比分析

Tab.3 Comparative analysis of resilience assessment methods for integrated transport hubs

方法类别	核心原理	优势	局限性	代表性技术方法	相关文献
概率推理类	条件概率推断	双向推断、支持小样本与不确定推理	节点增多易陷入维数灾难、先验概率主观性难消除	贝叶斯网络、云模型等	Wan等 ^[17] 、惠天镭 ^[21] 、Tang等 ^[32]
多准则决策类	加权聚合	可操作性强、可处理管理类指标	静态评估、忽略指标间非线性耦合	DEMATEL-ISM, ISM-ANP, PSR模型等	Wu等 ^[36] 、Gonzalez-Solano等 ^[39] 、黄亚江等 ^[40]
仿真优化类	仿真模拟动态演化	准确刻画级联效应、结论策略可验证	建模复杂、参数校准难	系统动力学、离散事件仿真、运筹优化模型等	Zhang等 ^[42] 、程国勇等 ^[45] 、Ma等 ^[46] 、Xu等 ^[48]
数据驱动与智能技术类	算法学习演化规律	非线性拟合能力强、自适应能力强	依赖数据质量、可解释性弱	强化学习、时间序列预测等	Lyu等 ^[49] 、Gu等 ^[50] 、Zhang等 ^[51]

通过关键基础设施改造和备用设施建设,增强系统的适应能力。Zhang等^[29]和Yang等^[56]进一步强调智能监测设备应用、设施维护管理和先进设备配置对提升基础设施感知能力和恢复效率的重要作用。黄信等^[57]和Li等^[58]经过研究证实,通过识别关键设施、优化恢复顺序和动态调整设施负荷,可有效提高系统扰动后的恢复效率。总体来看,物理设施方面的韧性提升策略主要围绕增强设施防护能力、提高资源冗余水平和优化灾后恢复效率展开,通过构建具有抗扰动和可恢复能力的基础设施体系,为综合交通枢纽持续运行提供保障。

4.2 提升运营管理

在综合交通枢纽物理空间结构和设施规模存在一定约束的情况下,优化运营组织模式、完善风险管理机制成为提升系统韧性的重要途径。已有研究主要从客流组织、应急管理、资源调配和运行调度优化等方面开展探索。

孙健等^[18]提出通过完善应急救援物资储备,强化客流诱导分流,搭建大客流监测预警系统等提升大型综合交通枢纽应对风险的能力。Xing等^[59]认为应根据灾害演化阶段动态调整资源用途和配置,实现资源在应急保障和恢复阶段之间的灵活转换。Hong等^[60]从调度调整和运输组织优化等角度提出提升综合交通枢纽运行效率的方法。陈嘉凌等^[61]基于动态韧性评估结果,提出建立分级预警响应机制,以提升扰动条件下机场运营管理能力。Han等^[62]提出分级客流控制、优化列车调度、差异化管理等措施,提升地铁站的运营韧性。Liu等^[63]认为通过减少无效设备冗余、优化流线组织和调整运行计划,能以较低成本提升系统韧性。运营管理方面的研究重点在于通过动态监测、精准调度和应急管理机制优化,提高综合交通枢纽面对突发扰动时的运行调节能力,实现由被动应对向主动管理转变。

4.3 技术创新赋能

随着人工智能、大数据、物联网和数字孪生等新兴技术的发展,数字化智能技术逐渐成为推动综合交通枢纽向智慧化、自动化转型的有力支撑。已有研究主要关注利用智能技术实现风险识别、状态监测和辅助决策。

黄亚江等^[14]认为物联网技术能提升交通设施的实时信息检测能力,降低火灾发生时的损失。Wang等^[64]针对高铁站多类型灾害风险环境,构建了基于高密度传感器的智能环境监测网络,实现风险实时感知和自动响应。Dui等^[65]融合数字孪生与生成式人工智能技术,实现物理系统性能状态的实时映射与动态感知,以及应急方案智能生成,提升系统的自修复能力。刘敬严等^[66]基于BIM技术构建消防管理信息系统,提升地铁站的应急疏散效率。王冶^[67]通过人工智能视频检测技术实现客流密度动态识别,为人员疏散和风险控制提供支持。总体来看,技术创新方面的韧性提升主要依托数字感知、智能分析和辅助决策技术,实现综合交通枢纽运行状态的实时监测、风险提前预警和应急响应智能化,为提升系统主动适应能力提供技术支撑。

4.4 多元协同与可持续发展

多主体协同运营管理是综合交通枢纽的特点之一,这一特点决定了综合交通枢纽韧性的提升需要所有与之相关的部门共同参与,构建多主体协同治理体系。同时,在“双碳”目标和环境约束背景下,可持续发展也成为综合交通枢纽长期韧性提升的重要方向。

Hiney等^[68]主张建立包容性与结构化的利益相关者协作机制和事前契约化的治理逻辑,通过强化政府、企业和社会组织之间的信息共享与资源协同,提升系统在资源环境约束下的代际生存和适应能力。李娜^[19]进一步拓展了协同运营管理的内外部边界,认为通过加强区域合作、推广清洁能源应用,推动港口与城市融合发展,可实现经济韧性、社会韧性与生态韧性的协同提升。Wandelt等^[69]指出,通过构建“空-铁-公”多式联运体系,实现不同交通方式之间的资源互补和运输转换,可降低单一交通网络失效带来的风险。丁敏等^[70]和任晓红等^[71]进一步强调区域协同机制和绿色发展理念对于提升港口可持续发展能力的重要作用。总体而言,多元协同与可持续发展方面的研究强调通过多主体协同、区域资源共享和绿色低碳转型,构建开放协同的韧性治理体系,实现综合交通枢纽由局部优化向系统协同发展的转变。

综上,综合交通枢纽韧性提升是一项系统工程。其中,物理设施提供韧性保障基础,运营管理提供运行支撑,技术创新提升智能响应水平,多元协同与可持续发展推动系统长期适应。四者相互关联,共同构成从“被动响应”到“主动适应”的韧性提升闭环,综合交通枢纽全要素韧性提升如图2所示。

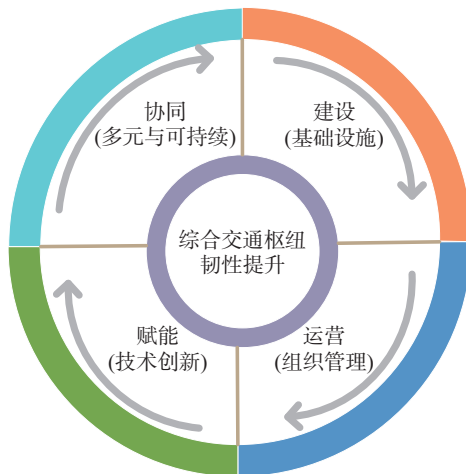


图2 综合交通枢纽全要素韧性提升

Fig.2 Comprehensive resilience enhancement across all elements of integrated transport hubs

5 评述与展望

本研究首先结合韧性内涵特征和综合交通枢纽特点界定综合交通枢纽韧性的内涵与特征,然后从韧性评估指标体系构建、韧性评估方法和韧性提升策略3个方面梳理总结了综合交通枢纽韧性的研究现状。随着韧性理论在交通运输领域研究和应用的不断深化,综合交通枢纽韧性研究逐步发展,并形成了一定的研究基础。综合交通枢纽韧性研究内容和方法等呈现出从单一对象向复杂系统,从静态评价到动态评估,从被动响应向主动适应的深化发展趋势。基于此,对综合交通枢纽韧性研究现状进行评述,并提出研究展望。

5.1 评述

(1) 研究对象从单一设施到综合系统。早期相关研究多聚焦于地铁车站、机场航站楼、港口码头等单一交通设施,重点关注其在工程结构安全、设备可靠性和特定灾害情景下的抗扰能力与恢复能力。随着综合交通枢纽多运输方式耦合、多功能叠

加等特征日益突出,学界逐渐认识到综合交通枢纽并非孤立运行的单体设施,而是由交通、信息、设备、能源和组织管理等多系统共同构成的复杂系统,相应地,研究对象开始由单一交通设施向综合系统拓展,研究关注点也由局部设施安全转向系统在扰动冲击下维持核心功能连续性、抵御和吸收冲击、逐步恢复并持续适应的综合能力。

(2) 研究方法从静态评价到动态评估。早期研究主要以韧性评估指标体系构建和综合评价方法为主,对综合交通枢纽在某一特定状态下的韧性水平进行定量测度。随着综合交通枢纽系统集成度和复杂性不断提升,以及对系统韧性机理认识的不断深化,学者逐渐意识到静态评价方法难以反映综合交通枢纽在扰动全过程中的时变特征。在此基础上,研究开始引入概率推理、系统仿真和情景模拟等方法,对综合交通枢纽系统在扰动发生、响应、恢复和适应等阶段的功能变化及其级联效应进行分析。近年来,新兴技术的应用进一步推动韧性评估向动态监测与预测方向发展。

(3) 研究情景从单一灾害到复合扰动。早期主要围绕火灾、地震、洪涝等单一自然灾害,或大客流等特定运行事件,研究对综合交通枢纽运行的影响和综合交通枢纽的应对响应表现。随着运行环境不确定性增强以及极端气候、人为扰动、公共卫生事件等多类风险的交织叠加,相关研究逐步开始关注多源扰动条件下的级联效应与系统性风险问题,推动综合交通枢纽韧性研究由单一情景响应分析向综合治理转变。

(4) 研究重心从被动响应到主动适应。综合交通枢纽韧性研究逐渐突破以物理结构和设施安全为核心的工程韧性范式,开始纳入组织管理、制度协同和多主体参与等要素。相关研究表明,在高度复杂的综合交通枢纽系统中,单一依靠设施冗余或技术加固等工程措施难以有效应对系统性风险,组织管理能力、资源调度效率、信息共享水平和多部门协同机制等在韧性形成过程中发挥着日益重要的作用。随着研究的深入,韧性研究关注内容逐步由扰动前的风险防御和扰动后的功能恢复,拓展至不确定环境下的主动适应与动态演化能力,推动研究从被动响应向主动适应深化。在运营协同方面,近年

来多模式交通时刻表优化研究进一步由单一交通方式协调向多交通方式协同优化发展,研究重点逐渐拓展至跨方式运输组织协同、动态鲁棒优化及智能决策^[72],为综合交通枢纽主动韧性管理提供了新的研究思路。

总体而言,现有研究在理论框架构建、方法体系拓展和韧性提升路径等方面已形成较为扎实的研究基础,研究的系统性和综合性不断增强。但仍存在以下不足:①现有研究多基于静态指标体系进行评估,对综合交通枢纽在“抵御-吸收-恢复-适应”全过程的动态演化机理刻画不足,难以充分刻画复杂扰动条件下系统韧性的时变特征;②现有研究仍以单系统分析为主,对多交通方式、多运营主体和多系统之间的耦合关联和扰动级联传播机制研究较少;③现有评估方法较依赖经验赋权与统计分析,对多源异构数据、实时感知信息和智能决策技术的综合应用有待深化。基于此,有必要从更综合、更前瞻的视角对综合交通枢纽韧性研究的发展方向进行进一步展望。

5.2 展望

(1) 深化综合交通枢纽动态韧性演化研究。现有研究多基于静态指标体系开展综合评估,侧重对韧性结果的表征,对系统在“抵御-吸收-恢复-适应”全过程的动态演化特征关注不足,难以充分反映复杂扰动条件下综合交通枢纽韧性的时变特征与空间异质性^[73]。未来研究需强化对综合交通枢纽系统全过程动态演化规律的刻画,揭示多交通方式协同条件下客流、设备和运营等系统之间的级联传导规律。结合时空演化模型与动态客流模拟方法,构建面向复杂扰动场景的综合交通枢纽动态韧性评估模型。近年来,城市轨道交通客流分配研究不断融合乘客行为建模、动态客流分配、客流-列车协同优化及人工智能等技术,为综合交通枢纽动态客流模拟、运行状态识别和动态韧性评估提供了重要的方法借鉴^[74]。综合客流时空分布数据、设备运行状态数据和多场景扰动参数等,实现对综合交通枢纽运行状态的实时感知与动态风险预测,从而推动综合交通枢纽韧性研究由静态评价向动态演化分析转变。

(2) 开展“综合交通枢纽-城市系统”协同韧

性研究。随着站城融合和城市群一体化发展不断深化,综合交通枢纽逐渐由传统交通换乘节点向城市功能综合体演变。综合交通枢纽内部客流波动、设施故障等扰动可能通过能源供应、信息传输等路径向城市系统级联传播,同时城市基础设施系统的运行状态也会直接影响综合交通枢纽的恢复效率和服务连续性。现有研究多聚焦于综合交通枢纽内部韧性研究,对综合交通枢纽与城市能源、通信、应急管理等城市系统之间的协同韧性研究相对不足。未来可突破单一系统研究范式,结合韧性城市理论、多主体协同治理理论和复杂网络理论等,开展“综合交通枢纽-城市系统”协同韧性分析研究。可引入城市电力-交通系统韧性研究的多系统关联分析思路^[75],利用多层复杂网络、多主体仿真和系统动力学等方法,研究多系统之间的耦合关联与扰动传播机制。应用场景上,可结合综合交通枢纽对城市经济韧性影响研究中的相关方法^[76],重点面向国家级综合交通枢纽、城市群综合客运枢纽等场景,探索跨部门信息共享、资源协同配置和应急联动机制。

(3) 基于数据驱动与智能决策的动态韧性研究。随着智慧交通与数字基础设施建设不断推进,大数据、人工智能和数字孪生技术等逐渐成为综合交通枢纽韧性研究的重要发展方向。未来可开展基于数据驱动与智能决策的实时韧性研究。可结合自动售检票数据、视频监控数据、物联网感知数据和轨道交通运行数据等多源异构信息,引入多源数据融合方法^[77],结合地理信息系统空间分析、视频图像识别和兴趣点数据挖掘等,实现综合交通枢纽运行状态实时感知与脆弱性诊断。利用机器学习、图神经网络、强化学习和知识图谱等人工智能方法,实现复杂扰动条件下系统风险识别、故障预测与动态资源调度。在模型构建中,可将领域知识嵌入决策模型^[78],推动数据驱动模型与机理模型融合,提升模型可解释性与工程适用性,最终形成“感知-诊断-决策-反馈”闭环韧性管理体系,提升综合交通枢纽在复杂扰动下的自适应与快速恢复能力。

(4) 面向新交通业态的综合交通枢纽韧性与绿色低碳协同发展研究。在“双碳”战略与绿色交通发展背景下,综合交通枢纽不仅需要具备抵

御复杂扰动与快速恢复的能力, 还需统筹低碳运行与可持续发展目标。随着共享出行、自动驾驶接驳及共享微出行等新交通业态快速发展, 交通系统与能源系统之间的耦合关系不断增强^[79]。现有研究多关注客流恢复与运营效率, 对新能源供给波动、共享运力失衡等新型扰动情景下韧性与绿色低碳目标之间的耦合关系研究相对不足。未来可运用物流领域绿色韧性与效率协同研究方法^[80], 开展综合交通枢纽功能韧性与绿色韧性的协同研究, 结合数字孪生、多源实时数据、多目标优化和复杂网络建模等, 模拟极端天气、设备故障等各种扰动条件下“客流-车流-能源流”的级联传播和协同恢复过程, 探索共享运力动态调度、新能源设施协同配置等场景下系统恢复效率与绿色低碳目标之间的协同优化机制, 实现综合交通枢纽韧性提升与绿色低碳发展的协调推进, 为绿色智慧交通枢纽建设提供理论支撑。

参考文献:

- [1] YANG Y, HUANG HB, LI G, et al. A Systematic Review of Resilience Assessment and Enhancement of Urban Integrated Transportation Networks[J]. *Journal of Transport Geography*, 2025, 129: 104420.
- [2] 张玉召, 丁欣茹, 侯长啸, 等. 交通运输网络韧性研究现状及展望[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2026, 56(3): 585-602.
ZHANG Yuzhao, DING Xinru, HOU Changxiao, et al. Research Status and Prospects of Resilience for Transportation Networks[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2026, 56(3): 585-602.
- [3] 刘庆, 龚华凤, 何易非, 等. 城市道路交通网络韧性研究进展[J]. *城市交通*, 2025, 23(4): 9-24, 39.
LIU Qing, GONG Huafeng, HE Yifei, et al. A Review of the Resilience of Urban Road Transportation Network[J]. *Urban Transport of China*, 2025, 23(4): 9-24, 39.
- [4] 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.
ZHANG Xiran, LI Zhengzhong, ZHANG Xin, et al. Status and Prospects of Studies on Urban Rail Transit Resilience[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2024, 42(4): 1-11.
- [5] HOLLING C S. Resilience and Stability of Ecological Systems[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 1-23.
- [6] BRUNEAU M, CHANG S E, EGUCHI R T, et al. A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities[J]. *Earthquake Spectra*, 2003, 19(4): 733-752.
- [7] UN-ISDR. UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction[R]. Geneva: United Nations International Strategy for Disaster Reduction, 2009.
- [8] MURRAY-TUITTE P M. A Comparison of Transportation Network Resilience under Simulated System Optimum and User Equilibrium Conditions[EB/OL]. (2006-12-03)[2026-08-11]. <https://doi.org/10.1109/WSC.2006.323228>.
- [9] HENRY D, EMMANUEL RAMIREZ-MARQUEZ J. Generic Metrics and Quantitative Approaches for System Resilience as a Function of Time[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2012, 99: 114-122.
- [10] AMOANING-YANKSON S, AMEKUDZI-KENNEDY A. Transportation System Resilience: Opportunities to Expand from Principally Technical to Sociotechnical Approaches[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2017, 2604(1): 28-36.
- [11] CHAUHAN V, GUPTA A, PARIDA M. Do Users' Characteristics Really Influence the Perceived Service Quality of Multimodal Transportation Hub (MMTH)? An Association Rules Mining Approach[J]. *Multimodal Transportation*, 2023, 2(2): 100069.
- [12] TRIST E L, BAMFORTH K W. Some Social and Psychological Consequences of the Longwall Method of Coal-Getting[J]. *Human Relations*, 1951, 4(1): 3-38.
- [13] 陈宝智, 张培红. 安全原理: 第3版[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2016.
- [14] 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.
- [15] 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.
- DU Xiuli, ZHANG Yang, MIAO Huiquan, et al. Indicator System for the Evaluation of Metro System Safe Operation from the Perspective of Resilient Cities[J]. Journal of Natural Disasters, 2023, 32(3): 1-13.
- [16] GUO Q J, AMIN S, HAO Q W, et al. Resilience Assessment of Safety System at Subway Construction Sites Applying Analytic Network Process and Extension Cloud Models[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 201: 106956.
- [17] WAN G L, SUN D, PENG B B, et al. Risk Assessment of Urban Transportation Complex Hub from Resilience Perspective: An Empirical Study on Xi'an North Railway Station[J]. Natural Hazards Review, 2024, 25(4): 04024042.
- [18] 孙 健, 万高乐, 康鹏灏, 等. 大型综合交通枢纽系统运营韧性评价及障碍因素分析[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(7): 2473-2483.
- SUN Jian, WAN GaoLe, KANG Penghao, et al. Evaluation of Operational Resilience in Comprehensive Transportation Hub Systems: An Analysis of Obstacle Factors[J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(7): 2473-2483.
- [19] 李 娜. 大连港港口韧性评估及提升路径研究[J]. 珠江水运, 2025(12): 65-67.
- [20] LIU S S, LIU H, YAN K S. A Capabilities-Based Resilience Assessment Method for Critical Infrastructure System[J]. IEEE Access, 2025, 13: 188713-188729.
- [21] 惠天镛. 台风扰动下基于贝叶斯网络的港口韧性评价研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2024.
- [22] 李子瞳, 杨 勇, 张力丰, 等. 基于多维度韧性评估的地铁枢纽瓶颈识别[J]. 铁道运输与经济, 2026, 48(2): 130-141.
- LI Zitong, YANG Yong, ZHANG Lifeng, et al. Identification of Bottlenecks in Metro Hubs Based on Multidimensional Resilience Assessment[J]. Railway Transport and Economy, 2026, 48(2): 130-141.
- [23] 曾小清, 朱明昌, 刘 源, 等. 城市轨道交通车站系统韧性承载能力评估指标体系研究[J]. 交通与运输, 2024, 40(6): 20-26.
- ZENG Xiaoqing, ZHU Mingchang, LIU Yuan, et al. Evaluation Index System for the Resilience Capacity of Urban Rail Transit Station Systems[J]. Traffic & Transportation, 2024, 40(6): 20-26.
- [24] 王明振, 高 霖. 道路网络抗震韧性评价模型及其应用研究[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(4): 110-116.
- WANG Mingzhen, GAO Lin. Aseismic Resilience Evaluation Model of the Road Network and Its Application[J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(4): 110-116.
- [25] TANG Y M, LI S, ZHAI C H. A Belief Rule-Base Approach to the Assessment and Improvement of Seismic Resilience of High Speed Railway Station Buildings[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 165: 107680.
- [26] 陈锦渠, 张 帆, 彭其渊, 等. 大客流下城市轨道交通站点韧性评估及划分[J]. 安全与环境学报, 2022, 22 (6): 2994-3002.
- [27] 孙扬才, 徐 扬, 王之卓, 等. 大型交通枢纽地下空间防汛韧性研究设计[J]. 给水排水, 2025, 61(6): 101-109.
- SUN Yangcai, XU Yang, WANG Zhizhuo, et al. Research and Design of Flood Resilience in the Underground Space of Large Transportation Hubs[J]. Water & Wastewater Engineering, 2025, 61(6): 101-109.
- [28] ZHANG Z Z, HUANG G R. Flood Resilience Assessment of Metro Station Entrances Based on the PSR Model Framework: A Case Study of the Donghaochong Basin, Guangzhou[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 366: 121922.
- [29] ZHANG L A, WANG J W, ZHANG M M, et al. Research on Safety Vulnerability Assessment of Subway Station Construction Based on Evolutionary Resilience Perspective[J]. Buildings, 2025, 15(15): 2732.
- [30] 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.
- 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.
- [31] WANG N X, WU M, YUEN K F. Assessment of Port Resilience Using Bayesian Network: A Study of Strategies to Enhance Readiness and Response Capacities[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 237: 109394.
- [32] TANG M Y, ZHANG Y W, LI C H, et al. Assessment of Port Resilience Based on Evidential Reasoning and Bayesian Network: An Improved Framework by Segmenting the Metrics across Time and Performance Dimensions[J]. Reliability

- Engineering & System Safety, 2025, 262: 111172.
- [33] LIU J Y, ZHANG S, ZHENG W W, et al. Resilience Measurement and Enhancement of Subway Station Flood Disasters Based on Uncertainty Theory[J]. Applied Sciences, 2024, 14(23): 10930.
- [34] 刘婧蕾, 彭其渊, 陈锦渠. 基于贝叶斯网络的区域多制式轨道交通网络韧性评估[J]. 铁道运输与经济, 2025, 47(3): 151-160.
- LIU Jinglei, PENG Qiyuan, CHEN Jinqu. Resilience Assessment of a Regional Multi-Modal Rail Transit Network Based on Bayesian Network[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(3): 151-160.
- [35] WANG D Z, YAN W, CHEN S N, et al. Data-Driven Hierarchy Identification and Resilience Analysis of a Port Container Distribution Network: Evidence from the Yangtze River Delta[J]. Ocean & Coastal Management, 2026, 276: 108172.
- [36] WU Y Y, YANG J Q, TU M, et al. Comprehensive Assessment of Port Resilience: A Three-Stage Cycle Approach[J]. Regional Studies in Marine Science, 2025, 86: 104170.
- [37] 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.
- ZHU Lianbo, WANG Shidi, LIN Lingna, et al. Based on the Combination of Game Theory and Weighted Matter-Element Extension Model Study on Waterlogging Resilience Assessment of Metro Stations[J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(3): 1-6, 42.
- [38] LO H W, CHEN T H, FANG T Y, et al. Airport Sustainability and Risk Assessment Using Interval-Valued Fermatean Fuzzy MCDM Network Analysis[J]. Research in Transportation Business & Management, 2025, 62: 101454.
- [39] GONZALEZ-SOLANO F, GALINDO G, ROMERO-RODRIGUEZ D. A Bayesian Network and DEMATEL-ISM Based Approach for Evaluating Resilience: A Case Study in Inland Waterway Port[J]. Ocean & Coastal Management, 2025, 270: 107881.
- [40] 黄亚江, 康 飞, 易 杰, 等. 基于ISM-ANP-Fuzzy算法的地铁车站火灾安全韧性评价体系[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(11): 31-35, 42.
- HUANG Yajiang, KANG Fei, YI Jie, et al. Evaluation System for Fire Safety Resilience of Subway Stations Based on ISM-ANP-Fuzzy Algorithm[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(11): 31-35, 42.
- [41] ZHAO Z K, LIU C, CHANG W Y, et al. Comprehensive Resilience Assessment and Obstacle Analysis of Cities Based on the PSR-TOPSIS Model: A Case Study of Jiangsu Cities[J]. Land, 2025, 14(7): 1437.
- [42] ZHANG J L, XIN X R, DUBEY R, et al. Impact of the Ripple Effect on the Resilience of Multimodal Container Port Operations: A System Dynamics Simulation Approach[J]. Risk Analysis, 2025, 45(12): 4903-4932.
- [43] 闫秋实, 蒋裕丹, 缪惠全, 等. 基于系统动力学的军用机场抗爆韧性评估[J]. 防护工程, 2023, 45(4): 39-49.
- YAN Qiushi, JIANG Yudan, MIAO Huiquan, et al. Assessment on Anti-Blast Resilience of Military Airfields Based on System Dynamics[J]. Protective Engineering, 2023, 45(4): 39-49.
- [44] 薛佳荣. 高铁客运枢纽站作业组织的韧性评价与柔性计划编制[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- [45] 程国勇, 陈 实. 基于离散事件模拟的航站楼运行韧性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(11): 3310-3318.
- CHENG Guoyong, CHEN Shi. Terminal Operation Resilience Analysis Based on Discrete Event Simulation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(11): 3310-3318.
- [46] MA R C, HUANG A L, JIANG Z H, et al. A Data-Driven Optimal Method for Massive Passenger Flow Evacuation at Airports under Large-Scale Flight Delays[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 245: 109988.
- [47] 周 聪. 基于仿真的城市轨道交通换乘站韧性评价与优化[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- [48] XU P C, LU Q C, FENG T, et al. Resilience Analysis of Metro Stations Integrating Infrastructures and Passengers[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 252: 110467.
- [49] LYU Y Q, GAO Y Q, LIU J L. Dual Strategies-Based Resilience Enhancement in a Bulk Cargo Port under Dynamic Machinery Failure Scenarios with Reinforcement Learning[J]. Ocean & Coastal Management, 2025, 260: 107484.
- [50] GU B M, LIU J G, YE X H, et al. Data-Driven Approach for Port Resilience Evaluation[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2024, 186: 103570.

- [51] ZHANG Y H, LIU L L, PENG X. Time Series Prediction of Airport Operational Resilience under Severe Weather Conditions[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2025, 129: 102862.
- [52] 雷 崇, 孙 波, 张东明. 基于易损性分析的地铁车站抗震韧性评价方法[J]. *铁道工程学报*, 2024, 41(10): 117–126.
- LEI Chong, SUN Bo, ZHANG Dongming. Seismic Resilience Assessment Method of Subway Station Based on Fragility Analysis[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2024, 41(10): 117–126.
- [53] 齐 麟, 戴克娟. 雨雪天气下民航机场运输能力的韧性评价[J]. *安全与环境学报*, 2025, 25(3): 835–842.
- QI Lin, DAI Kejuan. Resilience Evaluation of Civil Aviation Airport Transportation Capacity under Rain and Snow Weather[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2025, 25(3): 835–842.
- [54] NIU J G, YU Q, JIANG X G, et al. Real-Time Resilience Assessment of Urban Road Network under Rainfall Based on Adaptive Multi-Expert Spatio-Temporal Learning[J]. *Expert Systems with Applications*, 2026, 307: 131048.
- [55] LEÓN-MATEOS F, SARTAL A, LÓPEZ-MANUEL L, et al. Adapting Our Sea Ports to the Challenges of Climate Change: Development and Validation of a Port Resilience Index[J]. *Marine Policy*, 2021, 130: 104573.
- [56] YANG Z S, LAU Y Y, POO M C, et al. Port Resilience to Climate Change in the Greater Bay Area[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2025, 142: 104681.
- [57] 黄 信, 徐 平, 吴 堃. 降雪天气对机场基础设施系统韧性恢复的影响[J]. *中国安全科学学报*, 2024, 34(4): 175–182.
- HUANG Xin, XU Ping, WU Kun. Influence of Snowfall Weather on Resilience Recovery of Airport Infrastructure System[J]. *China Safety Science Journal*, 2024, 34(4): 175–182.
- [58] LI Y, ZHANG M Y. Resilience Assessment for Streamline Network of Transportation Hub Complex Based on Service Performance[J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2023, 29(2): 04023014.
- [59] XING Z, ZHOU C H, SHEN Y, et al. Optimizing Port System Resilience through Integrated Preparedness and Recovery Strategies[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2026, 266: 111770.
- [60] HONG S J, KIM W, HIATT B. Examining Airport Agility at Air Cargo Hub Airports[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2025, 122: 102710.
- [61] 陈嘉凌, 李龙海, 杨力源, 等. 民航机场运行韧性评价研究[J]. *综合运输*, 2025, 47(5): 69–78.
- CHEN Jialing, LI Longhai, YANG Liyuan, et al. Research on the Resilience Evaluation of Civil Aviation Airport Operation[J]. *China Transportation Review*, 2025, 47(5): 69–78.
- [62] HAN K, LIANG Q H, ZHANG J L, et al. A Passenger Flow-Based Resilience Measurement Model for Sustainable Operation of the Metro Station[J]. *Sustainability*, 2025, 17(19): 8918.
- [63] LIU X W, CHEN J Q, DU B, et al. Resilience Assessment of Urban Rail Transit Stations Considering Disturbance and Time-Varying Passenger Flow[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2025, 40(12): 1627–1651.
- [64] WANG S Y, HUA B L, LI P X, et al. Advancing Multi-Hazard Resilience and Urban Integration: A Quantitative Framework for High Speed Rail Stations[J]. *Environmental and Sustainability Indicators*, 2025, 28: 100953.
- [65] DUI H Y, GUO W N, XIA W Y, et al. Digital Twin-Based Resilience Analysis and Emergency Maintenance with Generative AI of Smart Urban Metro Systems[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2026, 265: 111537.
- [66] 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.
- LIU Jingyan, CHEN Jia, TIAN Jing, et al. Risk Early Warning of Subway Fire Disaster under the Concept of Resilience Based on 2-Dimensional Cloud Model[J]. *Journal of Catastrophology*, 2023, 38(3): 43–47, 74.
- [67] 王 冶. 轨道交通站域地下空间防灾韧性研究: 以青岛北站为例[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2022.
- [68] HINEY N, EFTHYMIU M, MORGENROTH E. Adapting to Uncertainty: Black Swans, VUCA Challenges and Airport Resilience Strategies[J]. *Journal of the Air Transport Research Society*, 2025, 4 (1): 297–311.
- [69] WANDELT S, ZHANG A M, SUN X Q. Global Airport Resilience Index: Towards a Comprehensive Understanding of Air Transportation Resilience[J]. *Transportation Research Part*

- D; Transport and Environment, 2025, 138: 104522.
- [70] 丁 敏, 赵 炎, 张婧姝, 等. 我国港口韧性提升路径[J]. 港口科技, 2023(4): 38-40, 47.
- [71] 任晓红, 沈 佳, 冯知滔. 港口运行效率和安全韧性[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(7): 2975-2985.
- REN Xiaohong, SHEN Jia, FENG Zhitao. Port Operation Efficiency and Safety Resilience[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(7): 2975-2985.
- [72] 张心仪, 陶思宇, 彭其渊, 等. 综合客运枢纽多模式交通时刻表优化研究综述[J]. 铁道运输与经济, 2026, 48(7): 1-13.
- ZHANG Xinyi, TAO Siyu, PENG Qiyuan, et al. Literature Review on Timetable Optimization for Multi-Modal Transportation in Integrated Passenger Transport Hubs[J]. Railway Transport and Economy, 2026, 48(7): 1-13.
- [73] WEN X, SI B F, XU M. A Comprehensive Resilience Assessment Model for Transportation Hub Considering Passenger Spatial Mobility Efficiency[J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2025: 1-37.
- [74] 袁 航, 许得杰, 巩 亮, 等. 城市轨道交通客流分配方法研究综述[J]. 铁道运输与经济, 2025, 47(11): 1-17.
- YUAN Hang, XU Dejie, GONG Liang, et al. Review of Passenger Flow Assignment Methods in Urban Rail Transit[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(11): 1-17.
- [75] 徐潇源, 李佳琪, 王 晗, 等. 城市电力-交通系统韧性研究综述及展望[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(23): 1-15.
- XU Xiaoyuan, LI Jiaqi, WANG Han, et al. Review and Prospect of Research on Urban Power-Transportation System Resilience[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(23): 1-15.
- [76] WANG Y P, XU Z Y, LIANG J. Impact of Transportation Hubs on Urban Economic Resilience: Evidence from National Comprehensive Transportation Hub Cities[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2026, 203: 104751.
- [77] JIA S F, LI W, GUO X Y. Multisource Data-Driven Resilience Assessment and Optimization of Metro Station Public Spaces: A Case Study of Suzhou Metro[J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2025: 1-29.
- [78] TIAN Q, DU K, LIANG Y M. Assessing the Resilience of Specialized Terminals within Coastal Port Transportation Systems: An Improved RBOP Method[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2025, 13(12): 2382.
- [79] 李瑞杰. 面向绿色低碳的韧性公路交通-能源融合发展技术和展望[J]. 交通节能与环保, 2024, 20(5): 1-7.
- LI Ruijie. Development Technology and Prospect for Green and Low-Carbon Resilient Road Transport-Energy Integration[J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2024, 20(5): 1-7.
- [80] 乔国通, 廖 瑞, 胡佳旭, 等. 长江经济带物流绿色韧性与效率协同演化及驱动因素研究[J]. 铁道运输与经济, 2026, 48(4): 51-62.
- QIAO Guotong, LIAO Rui, HU Jiaxu, et al. Research on Co-Evolution and Driving Factors of Green Resilience and Efficiency of Logistics in Yangtze River Economic Belt[J]. Railway Transport and Economy, 2026, 48(4): 51-62.

(责任编辑 金 晶)