

城市道路交通网络韧性研究进展

刘庆^{1,2,3}, 龚华凤^{1,2,3}, 何易非^{1,2,3}, 黄博亚^{1,2,3}, 丁梦娇^{1,2,3}

(1. 林同棧国际工程咨询(中国)有限公司, 重庆 401121; 2. 重庆市山地城市可持续交通工程技术研究中心, 重庆 401121; 3. 重庆市首席(龚华凤)专家工作室, 重庆 401121)

摘要: 作为城市基础设施的核心组成部分, 城市道路交通网络对保障城市功能和居民生活需求至关重要。如何确保其在受到外界冲击破坏时能够快速恢复基本功能和结构, 是城市安全面临的关键问题。在此背景下, 综述近年来的相关研究成果, 从城市道路交通网络韧性的定义、评估指标和评估方法等多个维度进行系统回顾和分析。指出当前研究存在的挑战, 并展望未来研究重点和方向, 旨在为城市规划者、政策制定者及研究者提供全面的道路网络韧性知识框架, 以提升城市应对未来挑战的能力。

关键词: 城市道路交通网络; 灾害风险; 韧性; 评估指标; 评估方法; 冗余度

A Review of the Resilience of Urban Road Transportation Network

LIU Qing^{1,2,3}, GONG Huafeng^{1,2,3}, HE Yifei^{1,2,3}, HUANG Boya^{1,2,3}, DING Mengjiao^{1,2,3}

(1. T. Y. LIN International Engineering Consulting (China) Co., Ltd., Chongqing 401121, China; 2. Sustainable Transportation Engineering & Technology Research Center for Mountain Cities, Chongqing 401121, China; 3. Chongqing Chief Expert (GONG Huafeng) Studio, Chongqing 401121, China)

Abstract: As a core component of urban infrastructure, the urban road transportation network plays a vital role for supporting city functions and daily needs of residents. Ensuring the rapid restoration of its fundamental functions and structure after external disruptions is a critical issue for urban safety. Against this backdrop, this paper provides a comprehensive review with systematic analyses of recent research findings across multiple dimensions, including the definition of urban road transportation network resilience, evaluation indicators, and assessment methods. The paper identifies existing research challenges and outlines future research priorities and directions. The goal is to offer urban planners, policymakers, and researchers a holistic knowledge framework of road network resilience, thereby enhancing the capacity of cities to respond to future challenges.

Keywords: urban road transportation network; disaster risk; resilience; evaluation indicators; assessment methods; redundancy rate

收稿日期: 2024-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目“保障生命线的城市道路大排水系统优化原理与方法”(52270087)、国家自然科学基金项目“多因素协同影响下城市道路与排水管网互通排涝系统流量分配机制及模型”(52070027)、重庆市自然科学基金项目“山地城市道路交通碳排放计算方法研究及应用”(2022NSCQ-MSX4013)、重庆市建设科技计划项目“面向长江大规模洪涝灾害的山地城市道路网络韧性评估与优化策略研究——以重庆为例”(城科字 2024 第 7-5 号)

作者简介: 刘庆(1993—), 女, 四川广安人, 硕士, 工程师, 研究方向为韧性交通、可持续交通规划, 电子邮箱 liuqing@tylin.com.cn。

0 引言

随着城镇化进程的不断推进, 城市交通系统的复杂性和重要性日益凸显。作为城市交通系统的核心组成部分, 道路网络承担着连接城市内外、促进经济发展和社会交往的关键角色。然而, 在城镇化、气候变化

和自然灾害等多重压力的影响下, 城市道路交通网络面临着前所未有的挑战。自然灾害、交通拥堵、意外事故等突发事件严重干扰城市道路交通系统的正常运行, 影响居民出行、经济活动和应急救援, 并造成重大人员伤亡和经济损失。例如, 2005 年卡特里娜飓风袭击美国新奥尔良, 防洪大坝倒塌导致道路

交通网络功能失效,造成重大人员伤亡和财产损失;2021年河南郑州“7·20”特大暴雨灾害造成1 478.6万人受灾,直接经济损失高达1 200.6亿元^[1]。因此,研究城市道路交通网络韧性对于应对突发事件挑战、维持系统运行及快速恢复至关重要。

为应对全球气候变化及自然灾害影响、提升交通网络抗干扰能力,美国交通部(US Department of Transportation, USDOT)2009年明确要求“将韧性纳入国家交通恢复战略”^[2]。自2019年起,中国先后出台了《交通强国建设纲要》《国家综合立体交通网指标框架》《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》等系列前瞻性政策,要求“建设现代化高质量的综合立体交通网,建立自然灾害交通防治体系,提高交通防灾抗灾能力,提升交通网络系统的安全性,增强交通运输网络的韧性”,为全社会提供更可靠的交通服务。

构建韧性交通网络和提高网络韧性的前提是明确韧性的评估方法。目前,对于城市道路交通网络韧性的研究处于初步阶段。此外,不同城市面临的常见自然灾害差异巨大,例如,美国墨西哥湾东南部沿岸的各个州和城市常受到飓风影响^[3],日本沿海城市长期遭受地震、海啸之害^[4],而澳大利亚昆士兰州的河流沿岸城市则容易发生洪水侵袭^[5],中国香港则面临着暴雨、热带气旋、海平面上升、酷热和山体滑坡等自然灾害风险^[6]。灾害的多样性降低了韧性量化方法的普适性。因此,本文通过系统回顾、梳理国内外已有的道路交通网络韧性研究成果,分析当前研究的不足与问题,总结现有韧性评

估指标、评估方法及其适用的风险类型,并提出未来研究方向,为城市交通系统韧性提升提供理论支持。

1 研究方法

韧性概念被广泛地应用于多个领域,但在20年前才被引入工程领域,并在近几年受到高度关注。为了系统地研究城市道路交通网络韧性的进展与趋势,本文进行了全面的文献检索与梳理。中文数据库采用中国知网(China National Knowledge Infrastructure, CNKI)数据库,检索主题包含道路网络、交通网络、韧性、弹性、鲁棒性、冗余性、策略性和恢复性;英文数据库采用科学引文索引网络版(Web of Science, WOS)核心合集,检索主题包含 road network, transport network 和 resilience。文献发表时间范围为2000年1月1日至2023年11月29日,检索获得中文文献92篇、英文文献1 727篇。本文采用 CiteSpace 软件进行文献量化研究,分析领域的历史发展脉络和当前研究热点^[7]。

1.1 总体情况分析

国际发文情况大致分为3个阶段(见图1):第一阶段(2000—2009年),早期文献数量逐年变化较小,年发文量均在10篇以内,总发文量51篇;第二阶段(2010—2017年),研究者对该领域的关注度逐渐提升,发文数量快速增长,总发文量325篇;第三阶段(2018—2023年),该领域的研究成果呈现爆发式增长,年发文量超过100篇,总发文量1 351篇。中国关于城市道路交通网络韧性的研究起步较晚,第一篇文献于2013年发表,近5年发文数量有明显增长,但年发文量不足20篇。

从国际期刊中的作者来源看,中国科学院(41篇)、东南大学(33篇)、香港理工大学(32篇)、加州大学系统(27篇)、同济大学(26篇)发文量最多。中国、美国、英国、意大利和加拿大发文最多,其中,中国发文659篇,美国发文388篇,两国发文量占比高达60%。

1.2 关键词分析

统计文献关键词以分析道路交通网络韧性研究体系与趋势,其中英文文献关键词共计707项(见图2),可划分为研究主体、灾害风险、相关概念和研究方法4类。研究主体

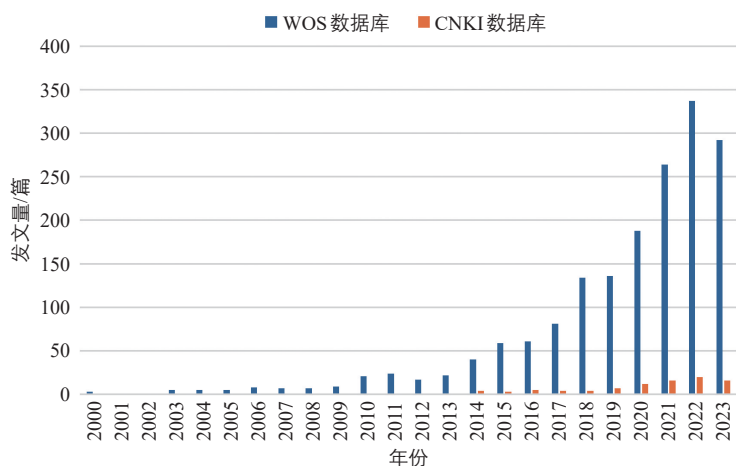


图1 2000—2023年国内外城市道路交通网络韧性相关主题文献发表情况
Fig.1 Publication of domestic and international literature on the resilience of urban road transportation network (2000—2023)

即交通设施或元素包括 road network(道路网络)、systems(系统)、framework(框架)、transportation networks(交通网络)、links(链接)、transportation(交通)、management(管理)、infrastructure(基础设施)、flow(流量)、city(城市)、autonomous vehicles(自动驾驶汽车)等。灾害风险即灾害或冲击包括 climate change(气候变化)、damage(破坏)、earthquake(地震)、natural hazards(自然灾害)等。韧性或相关概念包括 vulnerability(脆弱性)、resilience(韧性)、robustness(鲁棒性)、impact(影响)、performance(性能)、design(设计)、reliability(可靠性)、risk(风险)、accessibility(可达性)、recovery(恢复)、capacity(容量)、centrality(中心性)、time(时间)、risk assessment(风险评估)等。研究方法包括 model(模型)、neural network(神经网络)、algorithm(算法)、deep learning(深度学习)、complex networks(复杂网络)、optimization(优化)、prediction(预测)、feature extraction(特征提取)、machine learning(机器学习)、simulation(模拟)、methodology(方法)、segmentation(分割)、tracking(跟踪)等。

中文文献关键词 146 项(见图 3)。研究主体涵盖公路、道路、地铁网络;灾害类型以地震和暴雨洪涝为主;研究的问题主要为韧性、鲁棒性、脆弱性、冗余性;研究方法以考虑路网拓扑结构的复杂网络建模为主。

聚焦城市道路交通网络韧性主题,进一步制定标准并筛选文献:文献明确提出了城市道路交通系统或道路交通网络韧性的定义、评估指标或评估方法,且英文文献应为引用次数超过 10 次的精选文章(发表于 2020 年及以后且引用次数高于 5 次)。最终筛选出 88 篇具有代表性的文献,在概念框架、评估指标以及评估方法优化方面形成了本文的研究成果。

为了更全面地了解城市道路交通网络韧性领域的研究脉络和主要方向,绘制领域总体研究框架(见图 4)。

2 韧性定义与发展

韧性(Resilience)源自拉丁语“resilio”,又被译为弹性、弹复性、恢复性。韧性概念最早由 C. S. Holling^[8]于 1973 年在现代科学中引入,用以描述生态系统在压力下承受损害并恢复至稳定状态的能力。随后,韧性概

念被引入工程学、心理学、管理学、社会学与经济学等多个领域。M. Bruneau 等^[9]在 2003 年开展的社区地震韧性研究中将韧性定义为“系统减少和吸收故障,以及从故障中快速恢复的能力”,首次提出了韧性系统的 4 个决定属性,即鲁棒性、冗余性、谋略性和快速性。其中,鲁棒性和冗余性衡量系统的抵抗力,谋略性和快速性评估系统的恢复能力。作者同时提出了“韧性三角形”评估方法,通过观察系统在冲击后的性能下降及恢复过程,直观地评估系统韧性(见图 5):系统在 t_0 时刻遭遇冲击,系统性能立即从 100% 降至 50%,随着时间推移,系统性能逐渐恢复,直到 t_1 时刻完全恢复。

K. Tierney 等^[10]将这 4 个属性构成的框架

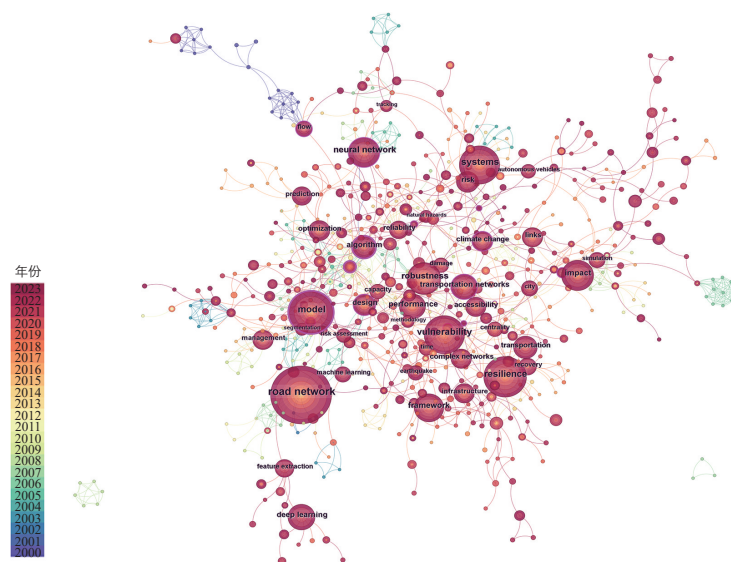


图2 WOS数据库城市道路交通网络韧性文献关键词分析

Fig.2 Keyword analysis of literature in the WOS database on urban road transportation network resilience

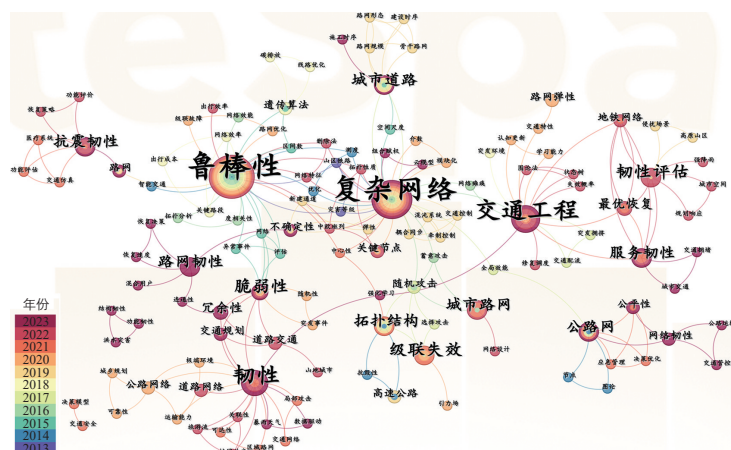


图3 CNKI数据库城市道路交通网络韧性文献关键词分析

Fig.3 Keyword analysis of literature in the CNKI database on urban road transportation network resilience

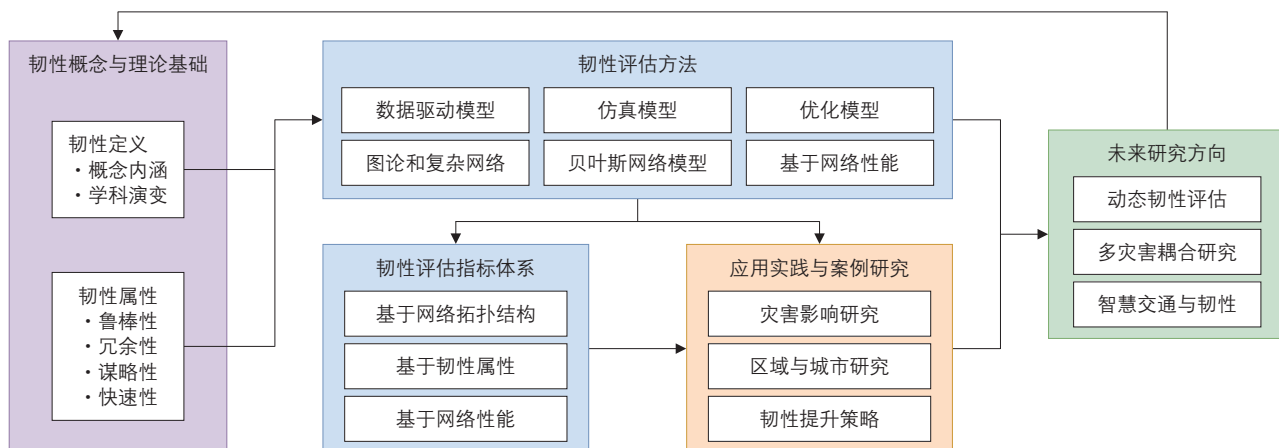


图4 城市道路网络韧性总体研究框架

Fig.4 Overall research framework for urban road transportation network resilience

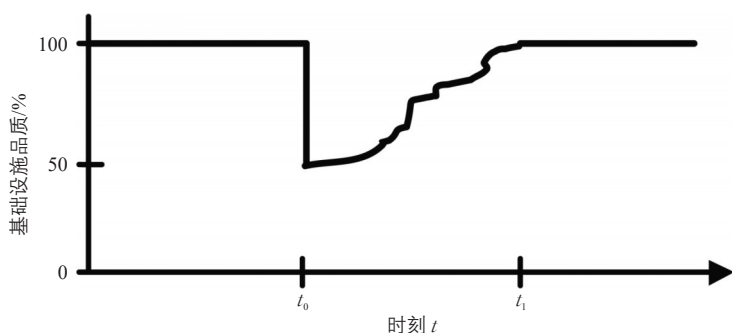


图5 韧性的概念与定义示意

Fig.5 Concept and definition of resilience

资料来源：文献[9]。

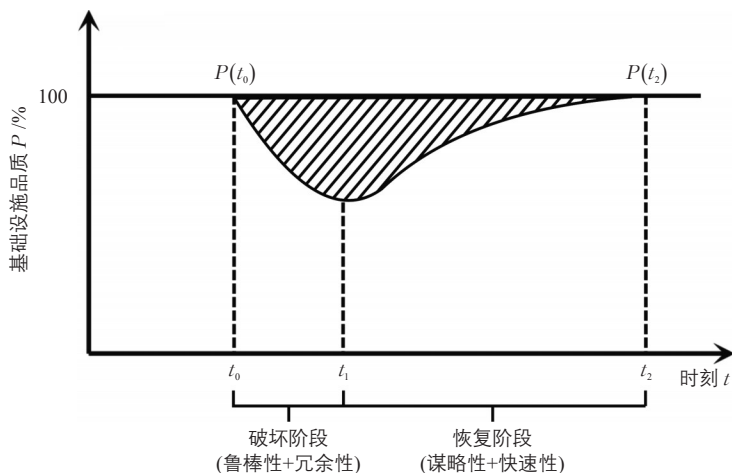


图6 韧性测量的两阶段

Fig.6 Two stages of resilience measurement

资料来源：文献[10]。

定；第二阶段为恢复阶段，从恢复开始到系统性能恢复至初始状态，与系统谋略性和快速性相关。

自2005年卡特里娜飓风对美国交通系统造成严重损坏后，世界各国开始关注韧性在交通领域的研究与应用，韧性的概念也被更深入地解析。D. Henry 等^[11]研究发现，系统在灾害后可能无法完全恢复到中断前的水平。P. M. Murray-tuite^[12]关注交通系统在异常条件下的性能表现、恢复速度和所需的外部资源。K. Heaslip 等^[13]，N. U. Serulle 等^[14]将交通网络韧性定义为系统维持服务或在指定时间内恢复服务水平的能力。Zhang X. 等^[15]将韧性定义为系统应对灾害的能力，强调了灾前准备和灾后恢复的重要性。毕家敏^[16]、何祥 等^[17]、C. M. Leobons 等^[18]认为韧性强调的是抵抗和吸收扰动，以及维持服务、恢复正常功能的能力。李欣^[19]、Li D. 等^[20]将道路网络抗涝韧性视为其在洪涝灾害下的应对、恢复以及应急响应能力。徐鹏程 等^[21]关注道路基础设施网络在暴雨后的连通能力恢复，强调了网络的完整性和连通性。韩明强^[22]、嵇涛 等^[23]将韧性定义为城市道路交通系统在遭受干扰后吸收干扰、维持基本结构和功能，并在可接受的时间和成本内恢复到系统所需水平的能力。S. Amoaning-Yankson 等^[24]强调了静态韧性和动态韧性的差异，为理解系统在冲击后的不同阶段提供了新视角：前者与鲁棒性相关，强调系统在冲击后的持续运行而无须立即恢复，后者侧重于在灾难发生后尽快恢复初始功能和运行水平。

研究表明，学术界对韧性的定义存在差异，其内涵从最初的单一维度(如灾后恢复)向多维度(如恢复速度、资源需求、系统连

命名为“R4框架”，该框架被广泛用于韧性相关的研究。作者认为系统性能下降不一定是立即发生的，而是一个逐渐发生的过程。这一定义深化了对系统恢复阶段的认识，强调了系统的鲁棒性和冗余性。在此基础上，作者提出了韧性两阶段分布图(见图6)：第一阶段为破坏阶段，从破坏开始到系统性能降低至最小值，由系统鲁棒性和冗余性决

通性)拓展，同时考虑了不同灾害类型的特殊性(如地震、洪涝)。普遍认为，韧性包含抵御能力、吸收能力和恢复能力三项主要特征^[25]。这些特征能够较全面地反映城市道路交通网络在面对各种挑战时的复杂性和应变需求，为韧性的评估和量化奠定了理论基础。

3 韧性评估指标

为了衡量交通网络韧性水平，学者开展了广泛研究，提出了多种评估指标。这些指标主要分为3类：基于网络拓扑结构的评估指标、基于韧性属性的评估指标和基于网络性能的评估指标。本文梳理了常用韧性评估

指标，并总结了指标的定义、计算方法和适用性(见表1)。

3.1 基于网络拓扑结构的评估指标

拓扑指标聚焦交通网络的结构，将交通网络抽象为由点和边组成的图形，并利用复杂网络图形的性能指标来衡量韧性。与其他方法相比，该方法计算相对简单，因此广泛应用于大规模的城市道路交通网络韧性研究，经历了从简单静态指标到复杂动态指标的演变过程。

静态指标主要用于描绘网络的结构和功能。例如，文献[15, 22-23, 25-33]使用节点度和度分布等指标来衡量节点在网络中的重

表1 常用韧性评估指标
Tab.1 Common evaluation indicators for resilience

指标类型	指标名称	定义	计算方法	适用性
基于网络拓扑结构的评估指标	节点度	与某节点直接相连的边的数量	统计与每个节点直接相连的边数	评估网络结构特性，识别关键节点
	度分布	网络中节点度值的统计分布	统计不同度值的节点数量或比例	评估网络结构特性
	介数中心度	节点在所有最短路径出现的频率	统计节点出现在所有最短路径上的次数	识别关键节点和路径，评估网络脆弱性
	聚类系数	节点邻居间相互连接的紧密程度	计算节点邻居间的实际连接数与可能连接数之比	评估网络局部聚集性和模块化结构
	平均最短路径长度	网络中任意两节点间最短路径的平均值	计算所有节点对最短路径的均值	评估网络整体连接效率
	最大连通子图比例	故障后最大连通子图的节点数占总节点数的比例	统计最大连通子图的节点占比	评估网络在故障情况下的连通性和鲁棒性
	加权独立路径数	OD对间可靠独立路径的加权平均值	计算所有OD对间独立路径的加权平均值	评估网络整体冗余水平
基于韧性属性的评估指标	覆盖范围	灾害影响区域内受损节点和边的比例	计算受影响节点、边数与总数	量化灾害影响程度，支持应急决策
	鲁棒性	系统在干扰下维持功能的能力	通过全局效率、局部连通性等指标评估	评估系统抗干扰能力
	冗余性	系统备用资源或替代路径的丰富程度	计算路径多样性、容量冗余度等	评估组件失效时系统的功能维持能力
	谋略性	系统资源调配和应急管理的灵活性	综合评估应急预案、监测预警等管理因素	评估系统灾害应对能力
基于网络性能的评估指标	快速性	系统从干扰中恢复到稳定状态的速度	分析性能恢复曲线的斜率或计算恢复时间	评估系统恢复效率
	韧性三角形面积	灾害期间系统性能损失的总量	计算性能-时间曲线下的面积，即韧性三角形面积	量化系统整体韧性损失
	系统性能水平	出行需求满足率、行程时间、网络效率、可达性等综合指标	根据具体场景选择指标(如网络效率、总行程时间、车速变化等)	综合评估网络运行状态
	网络效率	衡量网络在灾害期间的运行效率	计算实际交通量与最大容量的比值	分析网络运行效率和服务水平
	可达性	节点、区域间通过有效路径的可达程度	计算节点之间的最短路径	评估灾害对出行的影响
	车辆速度变化	灾害前后交通流速度的变化	分析灾害前后车速的变化情况	评估道路通行能力的变化

资料来源：基于文献[15-77]整理。

要程度。文献[23, 26, 28, 30, 32-37]使用介数、介数中心度等指标衡量节点位于最短路径的概率。文献[23, 28-30, 33, 38]采用聚类系数反映网络的聚集情况。文献[15, 23, 38-39]采用最短路径均值衡量网络的信息传输能力, 以反映网络的连接强度。文献[36, 40-43]采用最大连通子图衡量网络在紧急情况下保持连接的比例。

随着研究的深入, 越来越多的学者开始关注动态交通网络在中断事件发生前后的表现, 以时间或交通量为权重构建交通加权网络, 将上述网络拓扑指标与行程时间、客流量等表示交通流特征的指标有机结合。例如, W. H. Ip 等^[44]认为可用所有起点和终点之间的路径冗余衡量网络韧性。通过扩展文献[44]提出的概念, Zhang W. 等^[45]首次提出了一种基于系统可靠性和网络连接性的道路网络韧性衡量指标——加权独立路径数 (Weighted Number of Independent Pathways, WIPW), 该指标在近几年被广泛采用。王明振等^[32]、Gao L. 等^[46]同样认为独立路径性能是道路网络抗震韧性的关键。此外, I. G. Kasmalkar 等^[47]提出的覆盖范围指标引入了新的视角, 更直观地评估了灾害对道路网络的影响。

3.2 基于韧性属性的评估指标

基于韧性属性的评估指标通常用于衡量网络在特定时期的韧性属性, 例如鲁棒性、冗余性、谋略性和快速性等。P. M. Murray-Tuite^[12]首先提出了韧性交通系统的 10 个属性, 并提出了适应性、移动性、安全性和快速恢复能力四维衡量指标, 为韧性评估提供了全面视角。李欣^[19]、Li D. 等^[20]从鲁棒性、快速性、谋略性和冗余性 4 个评价维度出发, 选取了 26 个评价指标构建抗涝韧性评价体系。C. M. Leobons 等^[18]提出了涵盖 4 个属性 11 个评价指标的交通系统韧性评估框架。毕家敏^[16]基于运行效率衡量鲁棒性, 采用独立路径数量变化情况评估冗余性, 从排水设施、监测预警、强降雨期间救助资源 3 个维度考量谋略性, 并用鲁棒性下降速率与恢复速率的比值衡量可恢复性。这些研究从多个属性出发, 对韧性进行了综合评估。

鲁棒性方面, A. Kermanshah^[34]强调了极端洪水事件下的路网鲁棒性、路网规模和拓扑结构。S. Tachaudomdach 等^[48]开发了一个分析洪水事件下道路网络鲁棒性的框架, 通

过边和节点的介数中心性来量化道路网络韧性。Zhang N. 等^[31]提出的多尺度鲁棒性指数结合了平均节点度、链路密度、网络冗余度、交通延误损失、交通出行减少和机会成本等多个参数, 为鲁棒性提供了更全面的评估。此外, M. Snelder 等^[33]采用了干扰造成的车辆损失小时数, S. A. Bagloee 等^[49]采用了总旅行时间, Dong S. J. 等^[50]提出了一种新的交通网络鲁棒性度量方法——鲁棒组件, Duan Y. Y. 等^[38]使用网络全局效率、局部效率和最大连通分量的相对大小来评估城市道路网络的鲁棒性。

冗余性方面, 林耿楠^[51]提出的路网冗余度指标包括路径冗余度和容量冗余度, 容量冗余度又包括路段冗余度和节点冗余度。Xu X. D. 等^[52-53]在两次研究中均提出了用替代路径多样性和网络容量评估冗余性的思路, 前者评估出行者可用的出行方式和有效路径数量, 后者量化整个网络剩余容量。S. Jansuwan 等^[54]将此方法应用于货运网络。Zhu J. J. 等^[55]将路径多样性作为道路网络冗余性评估指标。Wang Z. J. 等^[56]在文献[53]基础上改进了冗余度计算方法, 提出用替代路径的多样性和分散性进行冗余性评估。Wang Z. J. 等^[57]将出行者选择其他路径的概率与选择虚拟路径概率的比值作为冗余性评估指标。R. A. El-Rashidy 等^[58]提出了一种新的冗余性评估指标, 该指标综合考虑了道路网络拓扑特征和交通流的动态性质。R. A. H. El Rashidy 等^[59]提出用节点冗余性衡量冗余性特征, 评估指标包含与节点连接的路段数量、通行能力、交通量和速度。Zhang W. L. 等^[60]使用总恢复时间和恢复轨迹的斜率两个指标评估灾后道路桥梁网络恢复策略的效果。

综合来看, 当前的研究主要集中在道路交通网络的鲁棒性和冗余性方面, 而系统中断后恢复到新平衡状态的研究相对较少。这些研究成果为城市道路交通网络的韧性评估提供了丰富的理论方法支撑, 未来的研究仍需在系统恢复能力的评估和提升方面进一步探索和完善。

3.3 基于网络性能的评估指标

基于网络性能的评估指标侧重于根据灾害全过程的道路网络性能来衡量韧性, 通常结合韧性三角形进行定量表征。与基于路网拓扑结构和基于韧性属性的评估指标相比,

基于网络性能的评估指标能够同时反映交通运输系统功能的损失程度、事件的干扰程度,以及系统恢复至正常状态所需的时间,因此得到了广泛应用。

韧性三角形评估方法首先由 M. Bruneau 等^[9]提出,用于度量从灾害发生到系统性能完全恢复期间的所有性能损失,即灾害导致的性能损失总面积(图6中阴影区域面积),其公式为

$$R = \int_{t_0}^{t_2} [100 - Q(t)] dt, \quad (1)$$

式中: R 为灾害导致的性能损失量; t_0 为中断发生的时刻; t_2 为完全恢复的时刻; $Q(t)$ 为地震场景下基础设施的质量/%。

P. Bocchini 等^[61]对上述方法进行了改进,提出基于灾害时间内平均性能损失的衡量方式,其数学公式为

$$R = \int_{t_0}^{t_2} \frac{[100 - Q(t)]}{t_2 - t_0} dt. \quad (1)$$

这些方法被广泛应用于评估道路交通网络的韧性,不同研究在系统性能水平衡量指标的选择上存在差异。

路网运行效率、平均累积性能、路网连通性/可达性、灾前灾后路网服务能力比值、有效节点数量、总行程时间等是衡量网络性能的主要指标。何祥等^[17]使用基于出行需求和出行时间的路网运行效率作为系统性能指标,吕彪等^[62]分析了扰动影响期内道路交通系统的平均累积性能,采用网络效率量化系统性能。任婕^[63]将道路网络全局效率变化情况作为系统性能指标。陈轶钦等^[64]将路网连通性作为系统性能指标,并以韧性的增加值(Resilience Achievement Worth, RAW)量化不同时刻路段的抗震韧性重要性。宣功奉^[65]将地震发生后任意时刻的路网服务能力与震前服务能力的比值作为交通系统功能指标。陈轶钦等^[66]以道路交通系统在地震作用下的连通性随时间变化的曲线作为其抗震韧性量化评价的基础。蒋军浩^[67]将路网可达性作为路网功能评价指标,并将区域路网可达性在灾害发生周期内的积分与时间的比值作为区域路网韧性值。徐鹏程等^[21]在研究持续暴雨灾害对道路网络的影响时,采用网络连通效率作为性能指标。Gu Y. 等^[39]采用出行需求作为系统性能指标。Niu C. ^[68]选取灾害期间车速变化作为衡量道路韧性的指标。Shi Z. Y. 等^[69]将有效节点数量作为系统性能衡量指标,构建了道路交通系统内涝韧性计

算模型。Li Z. L. 等^[70]聚焦于紧急恢复阶段不确定情况下的交通网络恢复策略,引入了两个韧性评估指标:网络恢复速度和网络性能累积损失。Liao T. Y. 等^[71]采用网络连通性表征应对能力、OD 间总行程时间表征鲁棒性、延误时间表征灵活性,对韧性进行综合评估,为网络级交通韧性评估及资源优先分配提供了新方法。

此外,部分学者采用旅行成本增加、路网动态韧性指数、功能损失、延误时间、干扰韧性、拥堵簇大小等动态网络性能指标评估韧性。P. Gauthier 等^[37]通过整体旅行成本增加评估日常干扰对道路网络性能的影响,并与静态拓扑指标介数中心性进行对比,证明了交通需求和网络动态在城市交通网络韧性评估中的重要性。Zhang H. T. 等^[72]建立了路网动态韧性指数,考虑日期和传播时间等变量,用于实时评估道路网络韧性。Sun L. 等^[73]提出量化道路网络抗震韧性的3个指标,包括功能损失、功能桥梁百分比和关键路径的标准化长度。A. A. Ganin 等^[74]用交通延误衡量韧性,对美国40个城市路网进行对比分析,研究发现,虽然一部分城市在正常情况下运行效率高,但在遭受破坏时表现出较低韧性,而部分运行效率低的城市却对破坏有更好的适应能力。M. Nogal 等^[75]通过“干扰韧性”衡量交通网络面对各种干扰时的性能和耐受能力,考虑了用户在干扰期间的出行成本和压力水平。Zhang L. M. 等^[76]提出用拥堵簇的大小计算城市交通系统在交通拥堵情况下的韧性。A. Alipour 等^[77]在研究桥梁老化对交通网络抗震性能的影响时,采用网络中总旅行时间变化百分比衡量系统功能。

综上所述,在城市道路交通网络韧性研究中,学者采用了多样化的基于韧性属性的评估指标,涵盖了从静态结构特征(如连通性、可达性、有效节点数量)到动态交通特征(如出行需求、车速、延误等)的多个方面。

4 韧性评估方法

韧性评估方法可用于交通系统的性能评估,也可用于韧性指标的计算。由于可用数据、学科差异及网络复杂程度不同,学者采用了不同的韧性评估方法,主要包括以下6类:数据驱动模型、仿真模型、优化模型、

图论和复杂网络、贝叶斯网络模型和多指标综合评价。

4.1 数据驱动模型

随着数据采集、存储和处理技术的进步,数据驱动模型在韧性评估中发挥着重要作用。朱彤^[26]融合城市路网数据、视频卡口数据和浮动车数据,监测城市路网韧性指标和韧性指数的历史动态变化。Niu C.^[68]利用谷歌地图接口获取实时车速,通过分析链路中断前、中、后车速的变化建立回归模型,研究路网韧性与路网结构、破坏类型、疏散人员和政府机构的关系,发现道路网络连通性、破坏可预测性和人口密度均不同程度影响道路网络韧性。B. Donovan 等^[78]使用纽约市近7亿次出租汽车服务数据集,通过计算行驶距离和行程时间评估飓风桑迪期间的城市交通网络韧性。此外,基于大规模车辆定位数据集,Zhang L. M. 等^[76]研究交通拥堵的时空特性,为城市交通网络的适应性和恢复性提供新的量化方法。数据驱动模型方法充分利用了大规模实时或历史数据,通过数据分析和挖掘揭示交通网络的特征和规律,能够反映交通网络的状况及其动态变化,对智慧交通网络韧性评估具有积极意义。然而,数据类型和评估指标的选择对韧性水平影响较大,对数据本身要求较高,且该方法无法评估未发生的事件类型可能带来的韧性影响。

4.2 仿真模型

仿真模型在评估城市交通韧性方面具有重要作用,常用于在假设的情景下获取特定评估指标值,为深入研究城市道路交通网络如何应对各种风险提供可能。

大量学者模拟了自然灾害对城市道路交通网络的影响。在洪水模拟方面,殷凯^[40]利用CaMa-Flood水文模型模拟洪水扰动事件下每条路段的洪水淹没深度。S. Tachaudomdach^[48]通过模拟不同级别洪水对道路的影响,利用边和节点的介数中心性指标量化道路网络韧性。Li D. 等^[20]采用雨洪模拟软件SWMM来获取鲁棒性评估指标中的积水深度及快速性评估指标中的积水时长。

在地震模拟方面,Sun L. 等^[73]使用基于代理的模型来评估地震后快速响应策略的有效性,模型考虑了不同程度损伤桥梁的修复优先级。N. Aydin 等^[36, 43]应用基于拓扑的网

络仿真,预测地震和山体滑坡等地质灾害风险下每种策略的网络连通性恢复能力,同时结合图论和压力测试方法,评估交通网络面对地震等自然灾害时的韧性和恢复能力。通过概率链接移除策略和基于渗流理论的模拟,Dong S. J. 等^[50]研究地震导致的基础设施故障对交通网络鲁棒性的影响。

部分学者通过随机移除道路网络边或节点来模拟交通事故等随机事件对路网的影响。Duan Y. Y. 等^[38]通过模拟攻击分析6个不同城市道路网络在随机和有针对性攻击下的鲁棒性。P. Gauthier 等^[37]提出基于韧性应力测试和动态中观模拟的方法,用于识别和评估城市道路网络中日常干扰对整体道路网络性能最关键的链接。殷凯^[40]利用交通流仿真模型模拟随机破坏、局部攻击事件下每条路段的交通量。通过模拟基于节点度、节点介数、加权路径长度和路径重要度的4种风险扩散方式,马书红 等^[79]研究风险扩散阶段城市群多模式交通网络的动态韧性演化。A. Kermanshah 等^[34]利用地理信息系统(Geographic Information System, GIS)模拟极端事件对路网的多维影响,包括出行分布变化、服务面积、介数中心性等,全面评估道路交通网络韧性。A. A. Gani 等^[74]通过压力模拟方法分析不同严重程度事件对城市交通系统效率的影响。M. Nogal 等^[75]通过动态平衡限制分配模型模拟交通网络在受到干扰后的恢复过程,特别关注用户在干扰期间的出行成本和压力水平。

这些仿真模型的应用范围涵盖多种自然和人为灾害,如洪水、地震及导致路网节点失效的事件等,为深入了解城市交通网络在各种情景下的应对能力提供了有力工具。尽管这些方法适合评估未发生的事件,可以分析不同的交通量构成、网络组件及其相互影响,但由于对数据资源要求较高且模型准确性受参数设定和假设影响,应用时需综合考虑。

4.3 优化模型

优化模型在城市交通韧性方面的应用主要集中于交通量分配和灾后恢复策略制定。李飞燕^[80]提出城市道路网分区鲁棒性优化方法,在最小化路网系统总出行时间基础上提出路网改善方案。Xu X. D. 等^[81]将路径多样性作为道路网络冗余性评估指标,开发路径多样性优化模型,有助于在规划阶段增强路

网抵御灾害能力。Ye Q. 等^[82]提出网络恢复优化模型,通过确定恢复链路的最佳序列,选择最高容量恢复率来优化恢复能力。Liao T. Y. 等^[71]提出的韧性优化模型重点关注在预算和遍历时间约束下优化交通基础设施韧性。Li Z. L. 等^[70]引入网络恢复速度和累积损失两种韧性度量指标,构建基于韧性的双层规划模型,旨在最大化系统韧性:上层模型确定恢复活动,下层模型评估用户对上层决策的响应。这类方法在灾后重建阶段非常有效,可用于灾后规划、恢复策略制定和恢复预算分配。然而,数学优化模型要求对系统和事件有深入理解,需要开发有效的数学模型并进行校准才能正确应用;同时,大型交通网络上的韧性优化计算常受复杂性和规模限制。

4.4 基于图论或复杂网络的拓扑模型

基于图论或复杂网络的拓扑模型是衡量城市交通系统韧性最流行和有效的方法之一。该方法通过节点(如起点、目的地或交叉口)和链路(相邻节点间的路线)表示和简化网络,广泛应用于城市交通、航空、水运和物流网络。图形可以呈现网络中不同元素间的关系,并提供描述韧性的多种特征。例如,文献[32, 45-46, 83]使用可靠独立路径评估道路网络韧性。文献[40-42]通过计算不同中断状态下最大连通图占比和连通子图变化衡量网络性能。为研究网络拓扑在交通网络韧性中的作用,Zhang X. 等^[15]选取吞吐量、OD 连接性和紧凑性 3 个韧性评估指标,对 17 种通用网络结构的韧性水平进行比较评估,结果显示韧性与平均节点度密切相关。F. Rouhana 等^[30]提出基于网络拓扑特性评估交通基础设施在不同故障场景下韧性水平的新方法。这类方法相对简单且数据较易获取,适用于大型交通网络。然而,该方法通常无法考虑交通结构、交通重新分配及事故引起的通行能力减少等因素,因此常与其他方法结合使用,以全面评估城市道路网络韧性。

4.5 贝叶斯网络模型

概率论模型侧重于测量故障可能性及其对网络性能的影响,通常用于反映可靠性。以道路交通系统在地震作用下的连通性随时间变化的曲线为基础,陈轶钦 等^[66]构建了基于动态贝叶斯网络的抗震韧性评价模型,该

模型实现了对道路交通系统全过程抗震韧性的评价,能直观反映系统的抗震鲁棒性与恢复性。赵荣国 等^[84]运用专家经验法,选取客运量、公共汽车数量、道路面积率等 9 个因素,建立贝叶斯网络模型评估城市群交通系统韧性。Tang J. Q. 等^[85]提出基于贝叶斯网络模型的城市交通系统韧性评估方法,该模型选取道路面积占比、人均道路面积、拥堵指数等 14 个评估指标,综合考虑了设计、建设、运营、管理、创新等各阶段因素。贝叶斯网络凭借其对不确定性的处理能力和多变量关联优势,在城市道路交通网络韧性研究中逐渐得到应用,能对复杂城市道路交通网络进行有效建模、支持决策制定,且相对容易更新。然而,贝叶斯网络面临计算复杂、对先验知识的依赖、大量数据的需求以及模型解释难度等挑战。

4.6 多指标综合评价

多指标综合评价方法通过整合多个评价指标,运用加权、归一化等手段全面考虑不同指标的影响,获得综合评价结果。杨超 等^[86]综合考虑基础设施建管、运输服务供给、突发事件应对等维度,从组织管理、交通风险、设施质量、网络运能、安全保障和服务供给 6 个方面,构建了包含 18 个建设准则及 33 个评价指标的韧性交通建设框架及指标体系。郝媛 等^[87]提出的道路网韧性评价指标体系从灾前抗毁性和灾后恢复性两方面出发,包含 12 个指标。TANG S. H. 等^[88]构建的暴雨内涝下城市道路交通系统安全韧性评估体系涵盖排水网、道路网、交通网及应急网 4 层网络,采用模糊层次分析法进行定性与定量相结合的系统韧性评估。N. U. Serulle^[14]等选择代表交通系统重要基础设施和用户行为的道路密度、多式联运水平、平均延误等 9 个变量,运用模糊推理法计算整体韧性指数。这类方法能综合考虑多方面因素,提供全面评估结果,可根据实际需求选择不同指标和权重,具有较广泛的适用性。然而,由于指标选择和权重确定通常依赖专家判断,存在一定主观性。

5 城市道路交通网络韧性的实践应用分析

将韧性理论应用于城市道路交通网络实践,对提升交通系统抵御突发事件能力具有

重要意义。交通系统韧性设计并非源于全新理念,传统的交通规划、设计和管理已在不同程度上兼顾了韧性需求。例如,P. M. Murray-Tuite^[12]通过提出交通系统韧性的冗余、效率、可适应性、安全等特性,强调常规交通规划在多路径配置与交通量分配等方面蕴含的“抵御异常并快速恢复”思路,与韧性理念相互呼应。然而,随着城市规模扩张和灾害风险复杂化,如何更系统地将韧性评估指标融入既有规划设计及管理方法、实现对城市交通系统整体性提升,仍是当前城市交通领域亟待深化研究的课题。

近年来,许多学者将韧性理论应用于实际交通网络并取得显著效果。E. Koks 等^[89]通过对全球道路和铁路基础设施的多灾害风险分析,提出针对洪水风险的道路优化设计方案。研究发现,仅需投入道路总价值的2%用于升级排水和防洪设施,即可使60%易受洪水影响的道路受益,大幅提升道路网络在洪水灾害下的韧性。该研究不仅验证了韧性理论在交通基础设施规划与设计中的适用性,也说明在现有道路防护技术和管理制度上进一步优化投入分配、完善应急管理手段具有可行性。

在地震多发地区,Gao L. 等^[90]将工程韧性理念引入城市道路网络抗震性能评估,阐明节点与独立路径对整体韧性的内在影响机理,提出兼具合理性和全面性的抗震韧性评价方法。研究结果显示,通过分析节点重要度以及独立路径的数量与可靠性,可在有限资金条件下优化网络布局与设施改造方案,有效提升城市道路网络抗震防护能力,为高地震风险地区交通规划与应急管理提供可行参考。

面对热带气旋等极端天气事件,Hu F. Y. 等^[91]研究路边树木倒伏导致的道路网络失效问题,提出基于韧性的道路网络改造优化模型,通过合理分配预算提高道路网络预期恢复效率、降低经济损失。研究表明,传统道路设计中对防风、排水等要素的考虑可通过引入韧性评估指标进一步强化,同时结合关键节点与脆弱区域的优先改造,使原有体系更能应对极端天气挑战。

在提升交通网络的适应性方面,Zheng Y. 等^[92]提出多模式补贴设计以优化网络容量灵活性;通过实施综合补贴方案,网络容量灵活性提高18.5%,为韧性背景下政府制定交通补贴政策提供依据。这些成果与传统运

输需求管理和公共交通供给策略有机结合,在原有方法框架中引入韧性指标可以更高效评估补贴策略在风险与突发环境中的表现,为适应性规划提供实证支撑。

此外,Shang W. L.^[93]等利用深度强化学习方法开发基于自适应信号控制的城市道路交通网络韧性分析模型。在道路容量大幅减少情况下,采用自适应信号控制可将相对面积指数从0.25提升至4.65,显著改善交通网络韧性。这一成果在现行信号配时与控制系统的基础上,为动态调度与实时感知技术的融入提供新发展方向。技术迭代更新过程中,应将韧性指标纳入系统调优和评估的核心要素,确保升级后的信号控制方案能切实应对多变交通环境。

值得注意的是,冗余度等韧性指标的提升与基础设施投资紧密相关。研究表明,在网络规划阶段合理建设或改造交通基础设施,提升路网备用通道与路线多样性,可在极端事件或设施故障情景下显著减少经济损失并增强系统恢复能力。例如,J. K. Cho 等^[94]发现可替代路径丰富的交通网络在遭遇交通干扰时的经济损失明显低于冗余度较低的网路;E. Jenelius 等^[95]探讨在公共交通系统中增设新线路提升冗余度对网络鲁棒性与可靠性的作用,结果显示额外基础设施投入往往能带来灾时交通效率与安全保障的显著改善。这些发现与M. Snelder 等^[33]关于“针对干扰事件进行预先投资可提高运输系统的整体韧性”的观点相呼应。

然而,冗余度等韧性指标的提升与基础设施投资并非简单线性关系。Zhu J. J. 等^[55]在对加拿大温尼伯路网的案例研究中指出,新增冗余线路在早期能显著改善路网出行效率与灾后恢复能力,但多次叠加后边际收益明显递减,伴随交通量与路径多样性的饱和,成本收益比(Benefit-Cost Ratio, BCR)随之降低。在一定基础设施水平下,新增备用通道或关键节点改造的边际效益可能显著增加;但随着投资规模逐渐加大,冗余度的增量收益通常递减。换言之,先期投入能为路网提供“从无到有”的替代路径,大幅提升抵御外部冲击与快速恢复的能力;当已有备用通道较充足时,进一步大规模投入可能仅带来有限冗余度增量,导致整体投入产出比下降。这表明,“如何在冗余度提升与资金使用效率间取得平衡”是城市规划和决策者在交通基础设施建设中需深入思考的问题。

上述实践案例表明,韧性理论在城市道路交通网络中的应用具有重要的实际意义。通过优化基础设施投资、改进网络结构规划、加强交通信号管理等措施,可有效提升交通网络韧性水平,并与既有交通系统规划与管理策略结合。例如,将韧性评估指标纳入传统可行性研究、交通影响评价及设计规范,可帮助各类项目更精准识别风险并制定相应防范和应急预案。此外,针对不同灾害类型和城市发展阶段,有必要分层次、分区域持续推进韧性评估与实施,为既有路网及未来扩建项目提供更灵活适应与改进空间。这些提升韧性的措施在实践中也面临诸多挑战:尽管先期投入能显著增进路网冗余度与整体恢复能力,但随着投资规模加大,边际收益递减现象逐步显现,如何在多重需求与有限预算间达成最优平衡仍是亟待解决的问题。灾害场景的多样性也要求在既有规划方法与评估体系中更全面纳入新型韧性指标,并与施工、运维及交通治理等实际需求契合。未来应进一步深化交通韧性内涵研究,结合多学科理论与技术创新,加强投资效率与收益的动态监测评估,提升城市道路交通网络在复杂环境下的可靠性和持续性,为应对未来不确定性挑战奠定基础。

6 结论与展望

本文全面收集、系统回顾并分析了城市道路交通网络韧性相关文献。现有研究提出了交通系统韧性定义,以及评估交通网络韧性的指标、方法和应用,取得了丰富成果。当前常用韧性评估指标主要包括基于网络拓扑结构、韧性属性和网络性能三类评估指标;常用韧性评估方法主要包含数据驱动模型、仿真模型、优化模型、拓扑模型、贝叶斯网络模型和多指标综合评价六类方法,不同方法在适用灾害类型和基础数据层面存在差异。

目前针对城市道路交通网络韧性的研究仍面临诸多挑战。首先,现有研究主要侧重单一类型、静态指标为主的评估方法,难以全面反映交通系统在动态复杂环境下的应对能力。其次,学界普遍认为鲁棒性、冗余性、谋略性和快速性是韧性的主要特性,但尚未形成衡量这些特性的统一指标和计算方法,且指标与韧性属性的相关性尚不明确。最后,不同城市和地区面临的灾害类型差异

较大,而现有研究主要聚焦地震、暴雨洪涝等特定灾害类型下的韧性评估,成果适用性相对有限。

针对上述挑战,未来研究可聚焦模拟方法、指标体系和灾害类型3个方面。首先,应加强动态网络模拟方法研究,特别是大数据驱动和仿真模型等方法在交通系统韧性评估中的应用,以更准确模拟交通系统在不同灾害条件下的响应和恢复过程。其次,亟须建立统一的韧性评估框架,以鲁棒性、冗余性、谋略性和快速性为基础,构建多维度、多层次评估指标体系,确保不同研究成果的可比性和一致性。最后,应该加强对多种灾害类型下韧性水平的研究,提升研究成果的实际应用价值。城市交通规划和应急管理需要更准确、全面地评估交通系统韧性水平。

参考文献:

References:

- [1] 国务院灾害调查组. 河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告[EB/OL]. 2022-01[2024-01-01]. <http://www.xunxian.gov.cn/xunxian/resource/cms/article/3656823/4038345/%E6%B2%B3%E5%8D%97%E9%83%91%E5%B7%9E%E2%80%9C%9C%E2%B7%20%E2%80%9D%E7%89%B9%E5%A4%A7%E6%9A%B4%E9%9B%A8%E7%81%BE%E5%AE%B3%E8%B0%83%E6%9F%A5%E6%8A%A5%E5%91%A8.pdf?eqid=a80d111a00026dcf00000006646c4207>.
- [2] U.S. Department of Transportation. Recovering from disasters: the national transportation recovery strategy[EB/OL]. 2009-09[2024-01-01]. https://www.transportation.gov/sites/dot.gov/files/docs/Disaster_National_Transportation_Recovery_Strategy.pdf.
- [3] WINDERL T. Disaster resilience measurements: stocktaking of ongoing efforts in developing systems for measuring resilience[EB/OL]. 2014-02[2024-01-01] https://www.unisdr.org/files/37916_disasterresiliencemeasurementsundpt.pdf.
- [4] AYYUB B M. Practical resilience metrics for planning, design, and decision making[J]. ASCE-ASME Journal of risk and uncertainty in engineering systems, part A: civil engineering, 2015, 1(3): 04015008.
- [5] ESPADA R J, APAN A, MCDOUGALL K. Vulnerability assessment and interdependency

- analysis of critical infrastructures for climate adaptation and flood mitigation[J]. International journal of disaster resilience in the built environment, 2015, 6(3): 313-346.
- [6] CHAN E Y, YEUNG M P, LO S T. Hong Kong's Emergency and Disaster Response System[EB/OL]. 2015-10[2024-01-01]. http://ccouc.org/_asset/file/policy-brief-1.pdf.
- [7] 缪惠全, 钟紫蓝, 杜修力. 基于 CiteSpace 的韧性城市视角下耦合基础设施文献的量化分析[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(5): 12-27.
- MIAO H Q, ZHONG Z L, DU X L. Literature review on interdependent infrastructures based on CiteSpace from the perspective of resilient cities[J]. Journal of natural disasters, 2021, 30(5): 12-27.
- [8] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual review of ecology and systematics, 1973, 4(1): 1-23.
- [9] RUTENAU 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.
- [10] TIERNEY K, BRUNEAU M. Conceptualizing and measuring resilience: a key to disaster loss reduction[J]. TR news, 2009, 250(250): 14-17.
- [11] HENRY D, RAMIREZ-MARQUEZ J E. Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time[J]. Reliability engineering & system safety, 2012, 99: 114-122.
- [12] MURRAY-TUITTE P M. A comparison of transportation network resilience under simulated system optimum and user equilibrium conditions[C]//IEEE. Proceedings of the 2006 winter simulation conference. Monterey, USA: IEEE, 2006: 1398-1405.
- [13] HEASLIP K, LOUISELL W, COLLURA J, et al. A sketch level method for assessing transportation network resiliency to natural disasters and man-made events[M]. Washington DC: National Academy of Sciences, 2010.
- [14] SERULLE N U, HEASLIP K, BRADY B, ET AL. Resiliency of transportation network of Santo Domingo, Dominican Republic: case study[J]. Transportation research record: journal of the Transportation Research Board, 2011(2234): 22-30.
- [15] ZHANG X, MILLER-HOOKS E, DENNY K. Assessing the role of network topology in transportation network resilience[J]. Journal of transport geography, 2015, 46: 35-45.
- [16] 毕家敏. 强降雨期间城市道路交通系统韧性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
- BI J M. Study on the resilience of urban road traffic systems during heavy rainfall [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022.
- [17] 何祥, 袁永博, 周方, 等. 道路网络路段韧性重要度的 EFAST 评价方法[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(3): 675-681.
- HE X, YUAN Y B, ZHOU F, et al. An EFAST-based evaluation method for resilience importance of road-network links[J]. Journal of safety and environment, 2023, 23(3): 675-681.
- [18] LEOBONS C M, CAMPOS V B G, BANDEIRA R A M. Assessing urban transportation systems resilience: a proposal of indicators[J]. Transportation research procedia, 2019, 37: 322-329.
- [19] 李欣. 城市交通道路网络抗涝韧性定量评价方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- LI X. Quantitative evaluation method of urban traffic road networks resilience to waterlogging disasters[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [20] LI D, ZHU X, HUANG G, et al. A hybrid method for evaluating the resilience of urban road traffic network under flood disaster: an example of Nanjing, China[J]. Environmental science and pollution research, 2022, 29(30): 46306-46324.
- [21] 徐鹏程, 路庆昌, 李静, 等. 连续暴雨灾害下道路网络时变韧性建模与分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2024, 57(11): 1610-1618.
- XU P C, LU Q C, LI J, et al. Research on modeling and analysis of time-varied resilience of road network under continuous rainstorm disasters[J]. Engineering journal of Wuhan University, 2024, 57(11): 1610-1618.
- [22] 韩明强. 洪涝灾害下城市道路交通系统韧性与安全评价研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- HAN M Q. Research on urban roadway sys-

- tem resilience and safety evaluation under the influence of flood disaster[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [23] 嵇涛, 姚炎宏, 黄鲜, 等. 城市交通韧性研究进展及未来发展趋势[J]. 地理科学进展, 2023, 42(5): 1012–1024.
- JI T, YAO Y H, HUANG X, et al. Progress and future development trend of urban transportation resilience research[J]. Progress in geography, 2023, 42(5): 1012–1024.
- [24] 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.
- [25] FRANCIS R, BEKERA B. A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems[J]. Reliability engineering & system safety, 2014, 121: 90–103.
- [26] 朱彤. 基于多源数据的城市路网韧性监测方法[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- ZHU X. Resilience monitoring method of urban road network based on multi-source data [D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [27] 张广亮. 基于复杂网络的城市路网韧性提升策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- ZHANG G L. Research on strategies of urban road network resilience improvement based on complex network[D]. Harbin: Harbin institute of technology, 2021.
- [28] 王俊莹. 山地城市道路交通网络韧性研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
- WANG J Y. Study on the road resilience of road traffic network in mountainous cities [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022.
- [29] 洪凡, 李易. 局部洪水灾害下集疏运路网韧性分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(2): 20–26.
- HONG F, LI Y. Resilience analysis of collection and distribution road network under local flood disaster[J]. Journal of safety science and technology, 2023, 19(2): 20–26.
- [30] ROUHANA F, JAWAD D. Transportation network resilience against failures: GIS-based assessment of network topology role [J]. International journal of disaster resilience in the built environment, 2021, 12(4): 357–370.
- [31] ZHANG N, ALIPOUR A. Multi-scale robustness model for highway networks under flood events[J]. Transportation research part D: transport and environment, 2020, 83: 102281.
- [32] 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 M Z, GAO L. Aseismic resilience evaluation model of the road network and its application[J]. Journal of natural disasters, 2021, 30(4): 110–116.
- [33] SNELDER M, VAN ZUYLEN H J V, IMMERS L H. A framework for robustness analysis of road networks for short term variations in supply[J]. Transportation research part A: policy and practice, 2012, 46(5): 828–842.
- [34] KERMANSHAH A, DERRIBLE S. Robustness of road systems to extreme flooding: using elements of GIS, travel demand, and network science[J]. Natural hazards, 2017, 86: 151–164.
- [35] KAMMOUH O, CARDONI A, MARASCO S, et al. Resilience assessment of city-scale transportation networks using Monte Carlo simulation[C]//Taylor & Francis. Proceedings of the 9th international conference on bridge maintenance, safety and management (IABMAS 2018). Melbourne, Australia: Taylor & Francis, 2018: 9–13.
- [36] AYDIN N Y, DUZGUN H S, WENZEL F, et al. Integration of stress testing with graph theory to assess the resilience of urban road networks under seismic hazards[J]. Natural hazards, 2018, 91: 37–68.
- [37] GAUTHIER P, FURNO A, FAOUZI N E E. Road network resilience: how to identify critical links subject to day-to-day disruptions [J]. Transportation research record: journal of the Transportation Research Board, 2018, 2672(1): 54–65.
- [38] DUAN Y Y, LU F. Robustness of city road networks at different granularities[J]. Physica A: statistical mechanics and its applications, 2014, 411: 21–34.
- [39] GU Y, FU X, LIU Z Y, et al. Performance of

- transportation network under perturbations: reliability, vulnerability, and resilience[J]. Transportation research part E: logistics and transportation review, 2020, 133: 101809.
- [40] 殷凯. 城市交通网络韧性综合评估研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- YIN K. Integrated resilience assessment of urban transportation network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [41] 张志琛. 基于多情景模拟的武汉城市道路网络韧性评估与规划响应[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- ZHANG Z C. Resilience evaluation and planning response of Wuhan urban road network based on multi - scenario simulation [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [42] OSEI-ASAMOAH A D N, LOWNES N E. Complex network method of evaluating resilience in surface transportation networks[J]. Transportation research record: journal of the Transportation Research Board, 2014, 2467(1): 120-128.
- [43] AYDIN N Y, DUZGUN H S, HEINIMANN H R, et al. Framework for improving the resilience and recovery of transportation networks under geohazard risks[J]. International journal of disaster risk reduction, 2018, 31: 832-843.
- [44] IP W H, WANG D. Resilience and friability of transportation networks: evaluation, analysis and optimization[J]. IEEE systems journal, 2011, 5(2): 189-198.
- [45] ZHANG W, WANG N. Resilience-based risk mitigation for road networks[J]. Structural safety, 2016, 62: 57-65.
- [46] GAO L, WANG M, LIU A, et al. Comprehensive evaluation of urban road network resilience facing earthquakes[J]. Mathematical problems in engineering, 2021, 2021: 1-12.
- [47] KASMALKAR I G, SERAFIN K A, MIAO Y, et al. When floods hit the road: resilience to flood-related traffic disruption in the San Francisco Bay Area and beyond[J]. Science advances, 2020, 6(32): eaba2423.
- [48] TACHAUDOMDACH S, UPAYOKIN A, KRONPRASERT N, et al. Quantifying road-network robustness toward flood-resilient transportation systems[J]. Sustainability, 2021, 13(6): 3172.
- [49] BAGLOEE S A, SARVI M, WOLSHON B, et al. Identifying critical disruption scenarios and a global robustness index tailored to real life road networks[J]. Transportation research part E: logistics and transportation review, 2017, 98: 60-81.
- [50] DONG S J, WANG H Z, MOSTAFAVI A, et al. Robust component: a robustness measure that incorporates access to CRITICAL facilities under disruptions[J]. Journal of the royal society interface, 2019, 16(157): 20190149.
- [51] 林耿楠. 城市道路网络路径及容量冗余度研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.
- LIN G N. Research on route and capacity redundancy of urban road network[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2019.
- [52] XU X D, CHEN A, JANSUWAN S, et al. Modeling transportation network redundancy [J]. Transportation research procedia, 2015, 9: 283-302.
- [53] XU X D, CHEN A, JANSUWAN S, et al. Transportation network redundancy: complementary measures and computational methods[J]. Transportation research part B: methodological, 2018, 114: 68-85.
- [54] JANSUWAN S, CHEN A, XU X D. Analysis of freight transportation network redundancy: an application to Utah's bi-modal network for transporting coal[J]. Transportation research part A: policy and practice, 2021, 151: 154-171.
- [55] ZHU J J, XU X D, WANG Z J. Economic evaluation of redundancy design for transportation networks under disruptions: framework and case study[J]. Transport policy, 2023, 142: 70-83.
- [56] WANG Z J, XU X D, DU Y C. Assessing transportation network redundancy by integrating route diversity and spare capacity[J]. Transportmetrica A: transport science, 2023, 21(2): 1-30.
- [57] WANG Z J, XU X D. Assessing route redundancy of freeway networks in mega-city regions[J]. Transportation research part D: transport and environment, 2022, 106: 103275.
- [58] EL-RASHIDY R A, GRANT-MULLER S. The evaluation of redundancy for road traffic networks[J]. Transport, 2016, 31(4): 427-

- 439.
- [59] EL RASHIDY R A H, GRANT-MULLER S. A composite resilience index for road transport networks[C]//Institution of Civil Engineers(ICE). Proceedings of the institution of civil engineers- transport. London, UK: Thomas Telford Ltd, 2019, 172(3): 174-183.
- [60] ZHANG W L, WANG N Y, NICHOLSON C. Resilience-based post-disaster recovery strategies for road-bridge networks[J]. Structure and infrastructure engineering, 2017, 13(11): 1404-1413.
- [61] BOCCHINI P, FRANGOPOL D M. Restoration of bridge networks after an earthquake: multicriteria intervention optimization[J]. Earthquake spectra, 2012, 28(2): 427-455.
- [62] 吕彪, 高自强, 刘一骊. 道路交通系统韧性及路段重要度评估[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(2): 114-121.
- LYU B, GAO Z Q, LIU Y L. Evaluation of road transportation system resilience and link importance[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2020, 20(2): 114-121.
- [63] 任婕. 上海五大新城的道路网络特征解析与韧性测度[J]. 城市规划, 2022, 46(9): 82-92.
- REN J. Research on road network characteristics and resilience measurement of five new towns in Shanghai[J]. City planning review, 2022, 46(9): 82-92.
- [64] 陈轶钦, 黄淑萍. 一种基于路网抗震韧性的路段重要度评价方法[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(10): 1250-1260.
- CHEN Y Q, HUANG S P. An evaluation method of link importance based on seismic resilience of road network[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2023, 57(10): 1250-1260.
- [65] 宣功奉. 区域交通系统抗震韧性评估[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2022.
- XUAN G F. Seismic resilience evaluation of regional transportation system[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2022.
- [66] 陈轶钦, 黄淑萍. 基于动态贝叶斯网络的道路交通系统抗震韧性评价[J]. 地震研究, 2023, 46(2): 280-290.
- CHEN Y Q, HUANG S P. Seismic resilience evaluation of the traffic system based on the dynamic Bayesian network[J]. Journal of seismological research, 2023, 46(2): 280-290.
- [67] 蒋军浩. 区域路网应对泥石流流灾害的韧性评估与提升[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- JIANG J H. Resilience assessment and enhancement of regional road networks against debris flow hazards[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [68] NIU C. Resilience in transportation networks [D]. Sydney, Australia: The University of New South Wales, 2023.
- [69] SHI Z W, TAN X Y, LI H Y, et al. Quantitative study on the waterlogging resilience of road transportation system based on the validity view of system functions[J]. Journal of engineering science & technology review, 2019, 12(1): 117-125.
- [70] LI Z L, JIN C, HU P, et al. Resilience-based transportation network recovery strategy during emergency recovery phase under uncertainty[J]. Reliability engineering & system safety, 2019, 188: 503-514.
- [71] LIAO T Y, HU T Y, KO Y N. A resilience optimization model for transportation networks under disasters[J]. Natural hazards, 2018, 93: 469-489.
- [72] ZHANG H T, SONG G H, He F, et al. Dynamic evaluation method for urban road network resilience based on congestion propagation and dissipation[J]. Transportation research record: journal of the Transportation Research Board, 2023: 03611981231183714.
- [73] SUN L, D'AYALA D, FAYJALOUN R, et al. Agent-based model on resilience-oriented rapid responses of road networks under seismic hazard[J]. Reliability engineering & system safety, 2021, 216: 108030.
- [74] GANIN A A, KITSACK M, MARCHESE D, et al. Resilience and efficiency in transportation networks[J]. Science advances, 2017, 3(12): e1701079.
- [75] NOGAL M, O'CONNOR A, CAULFIELD B, et al. Resilience of traffic networks: from perturbation to recovery via a dynamic restricted equilibrium model[J]. Reliability engineering & system safety, 2016, 156: 84-96.

- [76] ZHANG L M, ZENG G W, LI D Q, et al. Scale-free resilience of real traffic jams[J]. Proceedings of the national academy of sciences, 2019, 116(18): 8673-8678.
- [77] ALIPOUR A, SHAFEI B. Seismic resilience of transportation networks with deteriorating components[J]. Journal of structural engineering, 2016, 142(8): C4015015.
- [78] DONOVAN B, WORK D B. Empirically quantifying city-scale transportation system resilience to extreme events[J]. Transportation research part C: emerging technologies, 2017, 79: 333-346.
- [79] 马书红, 杨磊, 陈西芳. 风险扩散下城市群多模式交通网络的韧性演化[J]. 广东: 华南理工大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 42-51.
- MA S H, YANG L, CHEN X F. Resilience evolution of multi-mode transportation network in urban agglomeration based on risk diffusion[J]. Guangdong: journal of South China University of Technology (natural science edition), 2023, 51(6): 42-51.
- [80] 李飞燕. 城市道路网关键路段识别及路网鲁棒性优化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- LI F Y. Research on identification of critical links and robustness optimization of urban road networks[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [81] XU X D, CHEN A, XU G M, et al. Enhancing network resilience by adding redundancy to road networks[J]. Transportation research part E: logistics and transportation review, 2021, 154: 102448.
- [82] YE Q, UKKUSURI S V. Resilience as an objective in the optimal reconstruction sequence for transportation networks[J]. Journal of transportation safety & security, 2015, 7(1): 91-105.
- [83] 唐孝军. 基于韧性理论的城市道路网络抗震性能评价方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
- TANG X J. Research on evaluation method of seismic performance of urban road network based on resilience theory[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021.
- [84] 赵荣国, 杨锦琛, 李洁, 等. 粤港澳大湾区内地城市群路网韧性的贝叶斯网络评估[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(3): 825-835.
- ZHAO R G, YANG J C, LI J, et al. Bayesian network evaluation of road network resilience in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area city cluster[J]. Journal of safety and environment, 2024, 24(3): 825-835.
- [85] TANG J Q, HEINIMANN H, HAN K, et al. Evaluating resilience in urban transportation systems for sustainability: a systems-based Bayesian network model[J]. Transportation research part C: emerging technologies, 2020, 121: 102840.
- [86] 杨超, 李兴华, 龙志刚, 等. 交通基础设施韧性评价指标体系研究[J]. 公路, 2023, 68(6): 303-308.
- YANG C, LI X H, LONG Z G, et al. Research on resilient evaluation index system of transport infrastructure[J]. Highway, 2023, 68(6): 303-308.
- [87] 郝媛, 徐天东, 王雨轩, 等. 面向城市管理平台的道路网韧性评价指标体系构建[J]. 城市交通, 2023, 21(2): 60-72.
- HAO Y, XU T D, WANG Y X, et al. Urban road network resilience index system for urban management platform[J]. Urban transport of China, 2023, 21(2): 60-72.
- [88] TANG S H, ZHU W, CHENG G, et al. Safety resilience assessment of urban road traffic system under rainstorm waterlogging[J]. China safety science journal, 2022, 32(7): 143-150.
- [89] KOKS E, ROZENBERG J, ZORN C, et al. A global multi-hazard risk analysis of road and railway infrastructure assets[J]. Nature communications, 2019, 10(2677): 1-11.
- [90] GAO L, WANG M Z, LIU A S, et al. Comprehensive evaluation of urban road network resilience facing earthquakes[J/OL]. Mathematical problems in engineering, 2021, 2021(1): 6659114[2025-01-03]. <https://doi.org/10.1155/2021/6659114>.
- [91] HU F Y, YANG S N, THOMPSON R G. Resilience-driven road network retrofit optimization subject to tropical cyclones induced roadside tree blowdown[J]. International journal of disaster risk science, 2020, 12(1): 72-89.

(下转第39页)