

引用格式: 汤俊卿, 安梦琪, 赵鹏军, 等. 时空大数据在交通系统韧性研究中的应用回顾与展望[J]. 地球信息科学学报, 2025, 27(3): 553-569. [Tang J Q, An M Q, Zhao P J, et al. Review and prospects: Application of spatio-temporal big data in transportation system resilience studies [J]. Journal of Geo-information Science, 2025, 27(3): 553-569.] DOI: 10.12082/dqxxkx.2024.240107; CSTR: 32074.14.2024.240107

时空大数据在交通系统韧性研究中的应用回顾与展望

汤俊卿^{1,2*}, 安梦琪¹, 赵鹏军^{1,2}, 官兆亚^{1,2}, 郭增骏¹, 罗陶然¹, 吕 薇¹

1. 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 深圳 518055; 2. 自然资源部陆表系统与人地关系重点实验室, 深圳 518055

Review and Prospects: Application of Spatio-Temporal Big Data in Transportation System Resilience Studies

TANG Junqing^{1,2*}, AN Mengqi¹, ZHAO Pengjun^{1,2}, GONG Zhaoya^{1,2}, GUO Zengjun¹, LUO Taoran¹, LYU Wei¹

1. School of Urban Planning and Design, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China; 2. Key Laboratory of Earth Surface System and Human-Earth Relations of Ministry of Natural Resources of China, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China

Abstract: [Significance] Cities globally face increasingly frequent multi-hazard risks, driving them pursuing more sustainable and resilient urban transportation systems. This paper presents a comprehensive systematic literature review of the application of spatial-temporal data in transportation system resilience studies. It highlights the pivotal role of spatial-temporal big data in understanding and enhancing the resilience of urban transportation systems under various hazard scenarios. Spatial-temporal big data, characterized by high temporal resolution and fine spatial granularity, has been increasingly applied to the field of transportation system resilience, providing essential support for decision-makers. **[Progress]** This study reveals two significant findings: Firstly, quantitative analysis of transportation system resilience is one of the most widely applied uses of spatial-temporal big data. However, real-time monitoring and early warning explorations are relatively rare. Most studies remain at the modelling and numerical simulation stage, indicating a need for more empirical studies using multi-source spatial-temporal big data. Moreover, compared to English literature, Chinese transportation system resilience studies are primarily qualitative and lack empirical research, indicating divergent research emphases between domestic and international scholars. Secondly, high-quality, multi-source spatial-temporal big data could facilitate more comprehensive spatial analysis in transportation system resilience studies. Improved data quality allows for deeper exploration from a microscopic perspective, focusing on individual behaviors and aligning closely with real-world needs. The concept of resilience has evolved from its previous post-disaster focus to a comprehensive life-cycle perspective encompassing pre-, during-, and post-disaster

收稿日期: 2024-02-26; 修回日期: 2024-05-18.

基金项目: 深圳市科技计划资助项目(KQTD20221101093604016); 国家自然科学基金项目(42376213、41925003); 广东省基础与应用基础研究基金(2023A1515010979、2021A1515110537)。[**Foundation items:** Shenzhen Science and Technology Program, No. KQTD20221101093604016; National Natural Science Foundation of China, No. 42376213, 41925003; Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation, No.2023A1515010979, 2021A1515110537.]

作者简介: 汤俊卿(1991—), 男, 陕西西安人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事韧性城市研究。

E-mail: junqingtang@pku.edu.cn

phases, transforming the study framework for transportation system resilience. **[Prospect]** As spatial-temporal big data technology advances and new transportation modes emerge, more innovations and breakthroughs in transportation system resilience studies are expected. Future research should further explore and utilize the potential of spatial-temporal big data in this field, amplifying the policy ramifications of abrupt-onset occurrences. Increased emphasis should be placed on research conducted at the scale of urban agglomerations. Simultaneously, a nuanced examination from a microscopic perspective is imperative to dissect the underlying causes and mechanisms contributing to variations in resilience among distinct groups. Despite the significant progress in transportation system resilience studies, there are still challenges in data collection, processing, and analysis. As technology progresses, researchers should leverage advanced algorithms, platforms, and tools to enhance data processing capabilities and analytical precision, facilitating more complex and detailed studies on transportation system resilience. This will provide a scientific basis for planning and managing urban transportation systems, significantly contributing to the overall resilience and sustainable development of cities.

Key words: spatial-temporal big data; transportation system resilience; literature review; systematic review; review and prospect; sustainable development

***Corresponding author:** TANG Junqing, E-mail:junqingtang@pku.edu.cn

摘要:【意义】在全球城市多灾害风险频发的当下,如何建设具有高水平防灾韧性的交通系统已成为学界关注的焦点。相较于传统的数据类型,时空大数据以其高精度和高信息密度的优势,在交通系统韧性研究中发挥日益显著的重要作用。然而,目前对于时空大数据在交通系统韧性研究中进展脉络的理解相对不清晰,客观上缺少对交通系统韧性领域中时空大数据的类型、应用场景和发展趋向的综合分析。**【进展】**本文利用系统性文献综述方法,对在CNKI中国知网和Web of Science数据库中检索到的中英文相关文献进行了系统的综述分析,全面探讨了时空大数据应用于交通系统韧性研究的主流数据类型,量化评估、监测预警、模拟预测与系统优化4个具体实践领域及在各领域所运用的研究方法,以及相关研究的发展趋势。**【展望】**在总结当前时空大数据在交通系统韧性研究中的应用成就与不足的基础上,进一步展望了若干交通系统韧性研究领域未来可能的发展方向,以期为我国时空大数据赋能交通可持续发展、推进交通强国战略目标落实提供有益思考与借鉴。

关键词:时空大数据;交通系统韧性;文献综述;系统性综述;回顾与展望;可持续发展

1 引言

步入21世纪以来,人类共同面临着全球气候变化、经济社会动荡、局部地区冲突、自然灾害频发等世界性难题,为了应对和有效防范城市发展中的多元风险,建设具有韧性的城市系统成为推进可持续发展的重点研究方向^[1-2]。在此背景之下,国内外学术界围绕“韧性城市”相关议题展开了丰富的探索,特别是对于城市韧性概念有着多元化的解读和阐释。如将城市韧性定义为“城市(个体、社区、机构、商业体或系统)在遭受到任何持续慢性的压力或突然的灾害冲击时生存、适应并发展的能力”^[3],或视韧性城市为“面对冲击和压力,能够做好准备、恢复和适应的城市”^[4],将其应用于城市防灾减灾和风险治理的综合实践之中。时至今日,推进韧性城市建

设、提高城市各系统的韧性,已成为世界范围内推动城市可持续发展的应有之义。

中国是自然灾害影响最为严重的国家之一,建设安全而具有韧性的城市系统是应对未来不确定性风险的必由之路。党的二十大以来,我国韧性城市建设全面铺开,将提高安全防灾减灾能力作为我国国土空间治理的重要支撑,为“推进国家安全体系和能力现代化”提供了实践指导与发展方向^①。交通运输是我国国民经济的命脉,也是城市发展中不可或缺的生命线系统之一。因此,交通系统的韧性水平是城市整体韧性能力的重要组成部分。然而,现阶段我国的交通安全仍面临较为复杂的风险因素,道路交通事故预防、综合运输体系建设等方面有待进一步加强^[5]。因此,客观上需要加强交通系统韧性的相关研究,打造现代化城市交通安全管

^① 参见《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》:“建设宜居、创新、智慧、绿色、人文、韧性城市”;《高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗》:“统筹国土安全和国民安全……打造宜居、韧性、智慧城市”;习近平总书记在河北考察灾后恢复重建工作时,强调要“全面提升防灾减灾救灾能力”,进一步体现出韧性城市建设的必要性。

理系统,健全交通安全综合治理与防控体系的各个方面,进而实现我国“人民满意、保障有力、世界前列”^②的交通强国建设目标。

随着现代科学知识的体系进步和新型信息技术的蓬勃发展,传统的调查方法在交通系统韧性研究中的局限性日渐显现^[6]。相较于费时费力、样本量较小、信息覆盖有限、数据统计粒度过大的“小数据”研究方法,利用时空“大数据”探究城市交通系统韧性的议题逐渐成为学界的主流^[7],以时空信息数据助力数字化发展、赋能高质量发展日益受到社会各界的广泛关注^[8]。然而,尽管目前已有部分文献梳理和总结了交通系统韧性研究的既有成果^[6,9-10],但这些文献侧重于对交通系统韧性的整体研究情况进行评述,重点强调其定义、特征及不同领域的研究方法。随着大数据及相关技术的发展,近年来大数据的应用越来越广泛,时空大数据在交通系统韧性研究中的进展成果百花齐放而脉络相对不清晰,且客观上缺少对交通系统韧性领域中时空大数据的类型、应用场景和发展趋向的系统分析。

因此,本文从时空大数据这一视角出发,对其在交通系统韧性领域中的研究进行了系统性的综述,重点关注:①交通系统韧性研究中常用的时空大数据类型;②时空大数据应用于交通系统韧性研究中解决的具体问题;③时空大数据应用的未来发展趋势。通过对现有文献的整合分析,本文旨在从数字化赋能可持续发展视角出发,厘清时空大数据应用在交通系统韧性研究中的发展脉络,阐明其主要应用场景及对交通系统韧性研究的赋能意义,并进一步展望其未来发展方向,在回答如下研究问题的同时,为我国交通系统的可持续发展提供有益思考。

研究问题1:在城市交通系统韧性相关的研究中,主流的时空大数据包括哪些类型?

研究问题2:时空大数据如何赋能交通系统韧性相关研究?此类时空大数据被应用于解决哪些具体问题?

研究问题3:在交通系统韧性研究领域中,应用时空大数据取得了哪些重要成果,未来又具有怎样的发展趋势和前景?

2 研究方法

本研究的文献检索过程分为2个阶段。首先,使用系统性文献综述方法(Preferred Reporting

Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses, PRISMA)进行检索^[11]。随后,使用滚雪球法对文献进行追踪补充与查漏补缺。为全面了解国内外研究进展,在系统检索过程中,本研究选择CNKI中国知网和Web of Science两种数据库分别对中文和英文文献进行搜索。

本研究欲探究时空大数据在交通系统韧性研究中的应用,因此首先应明确两个概念,即“交通系统韧性”与“时空大数据”。近年来,各类自然灾害和人为事件等极端事件频发,对交通系统带来巨大的影响。交通系统抵御各类极端事件的脆弱性和临界性风险逐渐增大^[12-13],因此“韧性”这一概念在交通系统研究中日益受到关注。交通系统韧性是指城市交通系统抵抗、减少和吸收扰动(冲击、中断或灾难)的影响,保持可接受的服务水平(静态韧性),并在合理的时间和成本内恢复正常和平衡运行的能力(动态韧性)^[10]。另一方面,在当前智慧城市的建设中,无处不在的传感器网络产生百万兆、十亿兆乃至万亿兆级的海量数据,反映了自然与人类的活动的方方面面,而其中大量与时空位置有关的数据称为时空大数据^[14]。时空大数据种类繁多,在应用时研究者根据其具体需要进行选择。因此在筛选文献过程中,难以选择某一具体的关键词来判定该研究是否应用大数据,故本研究首先根据关键词筛选出交通系统韧性研究的相关文章,再阅读文献判断该研究是否使用时空大数据从而进行进一步筛选(图1)。具体流程如下:

(1)中英文文献的检索时间范围均设定为2024年2月29日之前。对于英文文献选择Web of Science数据库,采用布尔逻辑表达式(“transport* resilience”) OR (“resilient transport*”) OR (“transport* system resilience”) OR (“resilient transport* system”) OR (“transport* vulnerability”) OR (“transport* system vulnerability”) OR (“transport* robustness”) OR (“transport* system robustness”),初步筛选出515篇文献,删除重复或其他语言文献,仅保留英文文献,共有483篇。对于中文文献选择CNKI中国知网,检索表达式为:交通*(韧性+脆弱性+鲁棒性),得到3151篇文献。

(2)根据出版物类型,分别删去中英文出版物中的专利、书章、会议论文、学位论文、综述类文章等类型,仅保留作者、单位完整的学术期刊文章,对检索库不设定限。得到英文文献273篇,

② 参见《交通强国建设纲要》,中国共产党中央委员会、中华人民共和国国务院,2019年9月。

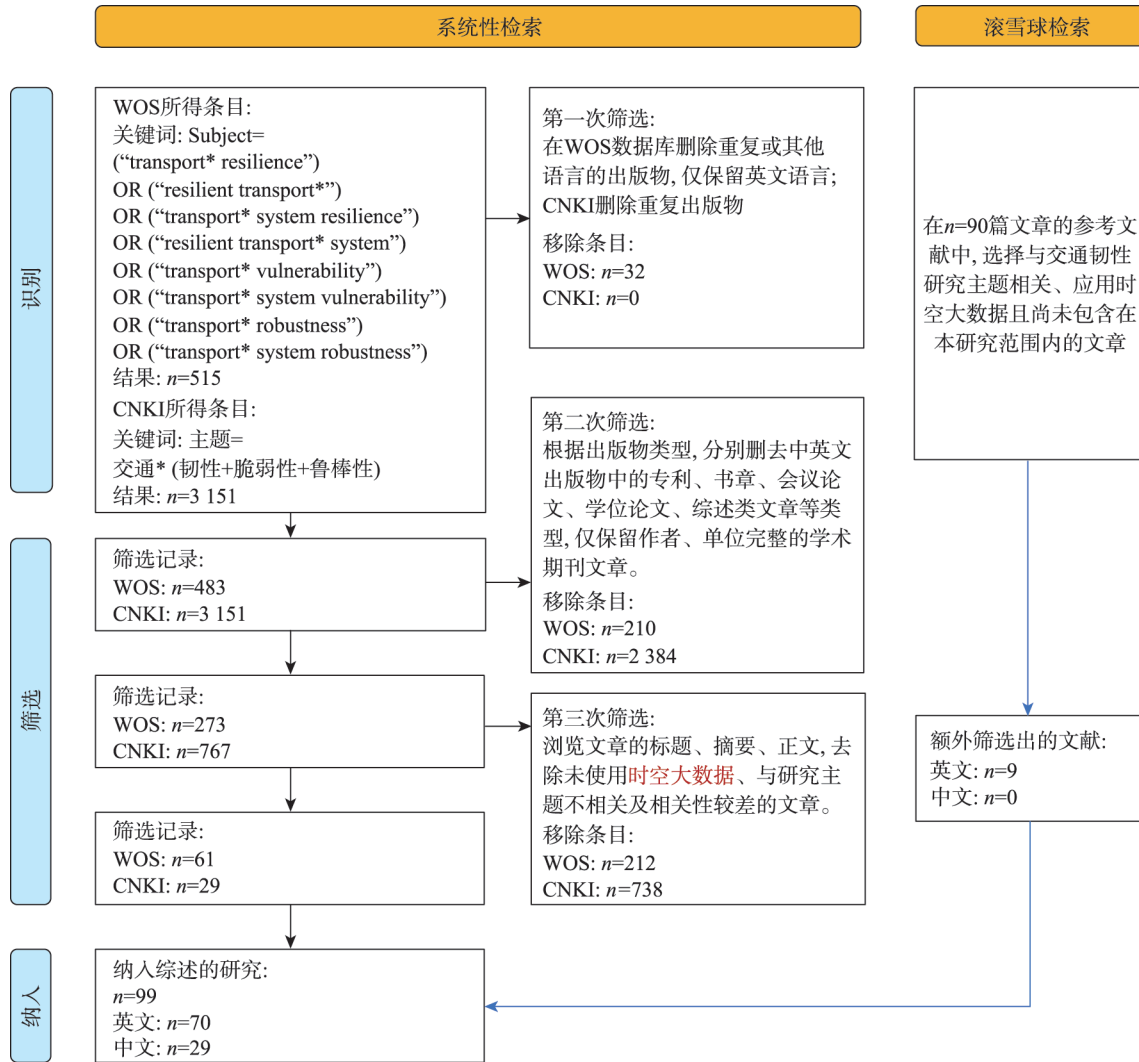


图1 PRISMA 文献检索流程
Fig. 1 PRISMA flow diagram for the review stages

中文文献 767 篇。

(3) 浏览文章的标题、摘要及正文内容, 去除未使用时空大数据、与研究主题不相关或相关性较弱的文献, 得到时空大数据在交通系统韧性研究中的文献共 79 篇, 其中包括英文 61 篇, 中文 29 篇。

(4) 采用滚雪球的方法, 在第(3)步筛选出的 90 篇文献中, 查阅参考文献, 从中筛选出与交通系统韧性研究主题相关且应用时空大数据的文献, 新增 9 篇英文文献, 将其纳入到系统性综述文献范围内。最终, 共得到英文文献 70 篇, 中文文献 29 篇。

3 结果及分析

3.1 既有交通系统韧性研究概况

自韧性概念引入城市学相关研究实践中, 交通

系统韧性已取得了较为丰富的成果。综合来看, 现有文献研究往往将交通系统韧性视作城市交通系统中刚性要素和柔性特征的综合作用结果, 既涵盖了城市交通子系统抵御外界扰动、维持结构与功能稳定的能力, 也关注了常态灾害背景下城市交通系统自我调整、学习和适应以提高抗灾能力的过程, 兼顾宏观与微观、动态与静态、长期扰动与短时冲击背景下城市交通系统的韧性表现, 着重探究延伸自交通系统固有属性的冗余性、脆弱性、鲁棒性、资源丰度、适应性、预防性和迅速性等韧性特征。结合应用包括基础设施大数据、出行订单大数据、交通轨迹大数据等多种时空大数据源, 基于渗流理论、复杂网络理论等理论分析不同灾害情景下的交通系统韧性表现, 通过机器学习方法、统计分析、复杂网络分析等多方法论结合, 实现对交通系统的量

化评估、监测预警、模拟预测和系统优化,在关注道路交通、轨道交通、航运交通等子系统运行规律的同时,实现对韧性要素多变量的识别及评价。对所选取文献集进行归纳总结,可绘制相关研究情况示意图如图2所示。

3.2 交通系统韧性研究中时空大数据的主流应用类型

随着现代信息技术的智能化发展,开放、共享的大数据资源越发具有“流动性”和“可获取性”。时空大数据以更高的时间分辨率和更精细的空间粒度,为城市交通系统的管理和研究提供了重要的决策支持^[15]。既有文献应用了多样化的时空大数据类型,利用机器学习、时空聚类、遥感反演等时空大数据挖掘方法,用以测度、模拟城市交通系统的韧性,进而辅助交通安全事件的监测预警和安全体系的决策优化。就目标文献集而言,相关研究中应用的时空大数据主要包括基础设施大数据、出行订单大数据、交通轨迹大数据、气象监测大数据、遥感影像大数据、个人移动终端大数据、社交媒体大数据、交通轨迹大数据、气象监测大数据、遥感

影像大数据、个人移动终端大数据以及社交媒体大数据7类,其数据特征和一般来源如表1所示。

(1)基础设施大数据:反映城市子系统运行情况、与城市基础设施高度相关的时空大数据类型,例如城市公开路网结构数据(如OpenStreetMap、Google Maps等)^[27,39-41]、各类基础设施数据(如道路基础设施、安全应急设施等)^[16-18,42]、城市道路传感器收集的交通流数据^[43-44]等。基础设施大数据是既有交通系统韧性研究中最常用的时空大数据类型。Wang等^[16]则充分应用了应急和救援设施(学校、医院、公园等)数据,探究地震和野火灾害影响下的交通可达性与韧性问题,从而为灾害治理和应急响应提供决策依据;Otuoze等^[17]利用交通拥堵指数与可达性指数,结合交通基础设施位置信息,通过人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)方法构建了一个交通系统韧性量化评估的新框架,为城市交通模拟与离散拥堵预测提供了新的方法。由此可见,基础设施大数据的应用有利于全面而多维地刻画城市交通所处的自然条件背景、居民出行需求

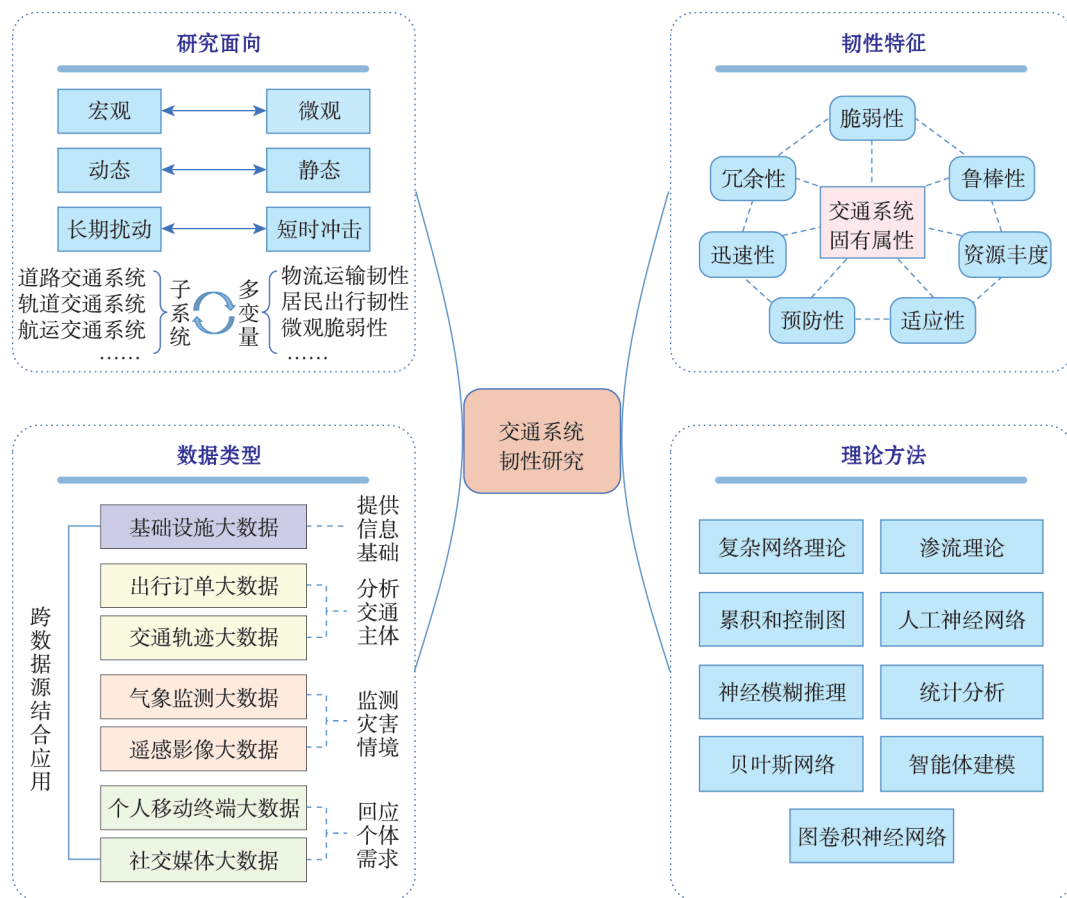


图2 既有交通系统韧性相关研究情况示意

Fig. 2 Overview of existing research on transportation system resilience

表 1 交通系统韧性研究中时空大数据主流应用类型

Tab. 1 The mainstream application types of spatiotemporal big data in transportation system resilience research

时空大数据类型	研究优势	现存局限	一般数据来源
基础设施大数据 ^[16-18]	数据全面而多维、 实时监测和更新	部分数据更新滞后、 分析成本较高	公共交通系统、 道路传感器系统、 政府数据平台
出行订单大数据 ^[19-21]	数据粒度精细、 数据更新速度快	质量依赖于覆盖率、 存在用户使用偏差	网约车平台、 共享出行服务商
交通轨迹大数据 ^[22-26]	全球全天候定位、 精准度较高	卫星信号易受干扰、 收集处理成本高、 存在数据隐私问题	全球定位系统、 车辆导航系统、 航空追踪系统、 船舶自动识别系统
气象监测大数据 ^[27-29]	跨时空尺度、 覆盖面较广、 易于预测	依赖基础设施系统	气象监测系统、 公开数据平台
遥感影像大数据 ^[30-32]	空间连续性、 时间序列性、 多源多维度性	数据采集存在限制、 时空分辨率较低、 受自然条件影响大	共享研究数据集、 航空设备采集
个人移动终端大数据 ^[33-35]	覆盖广泛、 数据规模量大、 具有连续性、 空间分辨率较高	数据代表性、 处理较为复杂、 依赖移动信号基站	移动运营商、 政府合作项目、 第三方数据服务
社交媒体大数据 ^[36-38]	多角度分析、 数据源相互补充、 促进研究创新	实践应用相对较少、 数据质量较难保证、 隐私和安全性问题	社交媒体服务商

注:部分研究基于多源异构时空大数据进行综合分析,表中仅选取其中主要应用数据类型作为案例。

和系统承载能力,服务于交通系统韧性的评估与优化实践。

(2)出行订单大数据:由网约车、共享单车、共享电动滑板车等新兴出行服务平台提供的详细出行订单数据,包括起始位置、目的地、出行时间、行程距离、乘车人数等信息。这类数据能够直观反映城市居民的出行需求与出行模式,对于理解城市动态、优化交通网络布局、提升公共交通服务水平具有重要意义。Aparicio等^[20]利用公共交通系统的智能刷卡数据获取不同时间和地点的乘客流量信息,通过多模式交通系统韧性评估方法,综合评估多模式交通网络在不同情况下的运行效率与韧性水平,为城市交通系统的优化提供了重要的决策支撑。

(3)交通轨迹大数据:包括通过全球定位系统(GPS)、车载传感器、道路监控摄像头、航空追踪系统和船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)等多种技术手段收集的关于车辆、飞机和船舶的位置、速度、行驶方向等信息的大数据。这些数据不仅能够实时监测各种交通模式的流量和行为模式,还能用于分析交通拥堵原因,评估交通事故影响,优化路网与航线设计,提高交通系统的整体效率和韧性水平。例如,Ilbeigi^[24]通过统计

过程控制中的累积和(Cumulative Sum, CUSUM)控制图方法,利用出租车GPS轨迹数据量化交通网络的拓扑特征,从而分析评估飓风等极端事件对交通网络韧性的影响。

(4)气象监测大数据:在本文中特指由分布于特定地理位置的气象观测站所收集到的时间序列数据,不含通过遥感技术反演得到的气象数据。观测站装备了一系列气象测量仪器,实时监测和记录各种气象条件,包括温度、湿度、风速、风向、降水量、气压等。站点气象监测大数据广泛应用于气象分析、气候研究、农业、航运航空以及灾害预警等多个领域。在交通系统韧性研究中,气象监测大数据通常用于分析极端天气事件对交通系统的影响,与其他交通系统运行数据配合使用,从而衡量交通系统常态运行与极端天气扰动情况下的韧性水平。以Wu^[21]等的研究为例,利用气温、降水、湿度、风速等气象监测数据,结合北京市居民交通出行数据,探究了极端天气情境下居民出行需求和出行方式的显著变化。

(5)遥感影像大数据:通过遥感卫星、传感器、无人机等各种遥感技术获取的、对一段时间内地球表面的多时相、多分辨率、多光谱的监测数据集,是

为交通系统韧性研究提供准确和实时信息支持的重要大数据集,通常可利用 Google Earth Engine、NASA Worldview 等公开数据平台获取。举例而言, Karaer 等^[31]基于 Landsat 系列卫星所获取的遥感数据,开发了衡量风暴灾害对交通系统影响的评估方法,为满足交通基础设施的动态监测需求提供了实践经验。

(6) 个人移动终端大数据: 由个人移动设备及这些设备上的应用自动记录生成的数据,通常包括位置数据与通讯记录。手机通话数据(Mobile CDR Data)利用手机用户之间的通话频率、时长等信息,反映城市之间、城市内部各区域之间的信息联系强度;手机信令数据(Mobile Signaling Data)通过手机用户与发射基站或微站的信息交互,确定用户在某一时间的空间位置,从而相对准确的记录人流的时空轨迹。个人移动终端大数据在交通系统韧性研究中应用广泛,如 Hasselwander 等^[33]利用疫情封锁前后的聚合开源手机和 GPS 数据,探究了 COVID-19 疫情对人群流动和交通公平的影响;黄洁等^[34]提出了较为系统的出行韧性理论框架和多维度评价体系,运用手机信令数据解析了北京市出行韧性的空间异质性。可见,运营商手机大数据具有样本大、覆盖范围广、匿名性强、连续性好的特征,有利于城市交通系统在供需耦合过程中韧性的定量描述。

(7) 社交媒体大数据: 各类社交网络平台(如 Twitter、Instagram、小红书、新浪微博等)用户通过主动操作生成的数据集合,包括用户发布的文本、图片、视频内容,以及用户互动生成的签到、评论信息等,为交通系统韧性研究提供了独特而丰富的数据源。与个人移动终端大数据不同,社交媒体数据更具主观性,且通常公开可获取,反映了用户的社交行为、公共舆论与兴趣偏好等信息。王波等^[38]利用新浪微博签到数据,通过构建公众感知与情绪指数分析了居民对暴雨洪涝灾害的时空响应,从软硬件两方面为城市交通系统韧性的提升提供了政策建议。

在进行交通系统韧性研究时,研究者通常不会仅选择单一数据源,而是运用其中多种数据,构建更为全面准确的交通系统韧性分析模型。通过综合利用这些时空大数据,研究者能够从宏观到微观、从静态到动态全方位地描述交通系统韧性特征,为提高交通系统应对未来挑战奠定数据基础。这种跨数据源的综合分析方法标志着交通系统韧性研究正向着更加精细化、动态化和科学化的方向发展。

3.3 时空大数据用于交通系统韧性研究的主要研究内容

3.3.1 量化评估

对交通系统韧性进行量化评估是时空大数据在交通系统韧性研究中运用最为广泛的领域之一。从量化评估的对象来看,研究包括城市综合交通系统韧性^[19,20,45-48]、道路交通系统韧性^[27,42]、轨道交通系统韧性^[49-53]、飞机与船舶航运交通系统韧性^[25,54]、物流运输韧性^[26,55]、居民出行韧性^[34]、微观的城市交通系统韧性(如桥梁脆弱性)^[30]等多种类型的评价变量。这些研究不仅涉及长期或周期性压力影响下的交通系统韧性(如交通拥堵、全球疫情等),也涵盖了极端天气、地震、洪水等突发事件冲击下交通系统韧性的研究。此外,也有前人研究将交通系统韧性分为动态与静态2种状态,分别对其进行评估^[56]。对于量化评估的具体方法,包括层次分析法^[30,42,53]、贝叶斯网络模型^[45,56]、GIS 空间分析^[50,53,57]、机器学习模糊聚类^[51]、卷积神经网络等深度学习模型^[19]及其他多种方法相互结合,共同应用于交通系统韧性量化评估研究,为城市交通网络的规划与应急管理提供了科学依据。

时空大数据在交通系统韧性量化评估中的应用见表2,依研究方法大体可分为基于网络拓扑分析的网络韧性评估,基于交通系统韧性特征(如鲁棒性、冗余性、快速性、应变性等)的量化评估,以及基于“韧性三角形”方法展开的交通系统韧性性能评估。基于复杂网络理论进行网络拓扑分析由于所需数据较少,相对简便,在过去的交通系统韧性研究中应用广泛。然而,这种方法忽视了实际的交通流量或车辆动态,在面对实时变化和复杂网络结构的情境时无法动态捕捉交通系统对突发事件的响应。

随着时空大数据的发展,各类短时突发事件与实时数据得以收集,高精度的真实客流数据量日益增加,使得大数据驱动的交通系统韧性量化评估成为新兴发展方向。这一方法往往基于交通系统韧性的多维特征,根据不同的交通场景与需求调整评估指标与方法,能够及时捕捉城市交通系统的动态变化,更为真实地反映交通系统发展状况。但大量精确的数据输入也意味着更复杂的模型与计算资源需求,在实际应用中面临着模型设定与参数校准的困难。基于交通系统的性能进行韧性评估关注系统在受灾全过程中的性能表现,而“韧性三角形”方法将全过程简化为对关键“拐点”的识别与评估,更具可推广性。

表 2 交通系统韧性量化评估研究中时空大数据应用情况

Tab. 2 The application of spatiotemporal big data in quantitative assessment of transportation system resilience

评估角度	应用数据类型	研究方法及模型	应用场景	案例地
基于“韧性三角形”方法展开的交通系统韧性性能评估	出行订单大数据 ^[19] 、基础设施大数据 ^[19,45,56] 、气象监测大数据 ^[19] 、交通轨迹大数据 ^[56]	扩散图卷积神经网络 ^[19] 、贝叶斯网络模型 ^[45,56] 、渗流理论 ^[56]	极端天气、长期状态、交通拥堵	深圳、北京、天津、上海、重庆、西安
基于网络拓扑分析的网络韧性评估	交通轨迹大数据 ^[25] 、气象监测大数据 ^[50,57] 、遥感影像大数据 ^[50,57] 、基础设施大数据 ^[57]	基于主体的模型(Agent-based Model, ABM) ^[25] 、GIS分析 ^[50,57] 、图论方法 ^[57]	恶劣天气、设备故障、恐怖袭击、洪涝灾害	中国(不含台湾省数据);印度班加罗尔;美国爱荷华州
基于交通系统韧性特征的量化评估	基础设施大数据 ^[32,53,58-59] 、遥感影像大数据 ^[32,53] 、气象监测大数据 ^[53] 、出行订单大数据 ^[58,60]	函数模型法 ^[32] 、层次分析法 ^[53] 、GIS分析 ^[53] 、贝叶斯结构时间序列模型 ^[58] 、机器学习方法(随机森林、XGBoost、逻辑回归、BPNN和SVM) ^[59] 、多元回归分析 ^[60]	海啸灾害、洪涝灾害、新冠疫情	日本东北部;智利伊亚佩尔;中国广州;美国伊利诺伊州、盐湖城及其他多个城市

此外,现有的研究通常集中于单一交通模式在特定类型干扰下的韧性表现,缺乏对不同交通模式韧性的综合对比以及对多种干扰因素的复合研究。在研究的时空尺度上,较多集中于短时间内灾害的直接影响,针对特定地区数据进行分析,对长期影响的评估相对较少。未来的研究应着力拓展多模式交通系统的综合韧性评估,并考虑多种类型干扰的长期综合影响,以便更科学地指导城市交通系统的可持续发展。

3.3.2 监测预警

在监测预警方面,时空大数据主要用于交通管理与应急响应层面(表3)。具体而言,包括实时监控交通状况,及时响应交通事故,应对极端天气、灾害及其他突发事件。在实时监控交通过程中,常用的时空大数据为实时交通流量数据,据此可识别交通拥堵点,及时调整交通信号灯或发布相应交通管制信息,以改善交通流,提高交通系统韧性。在应对极端天气和灾害时,可利用天气预报数据及实时气象数

据对事件进行实时监控,同时可结合实时社交媒体大数据分析舆情,针对受灾情况制定应急响应措施。

例如,Alawad等^[61]提出智能风险管理系统(Intelligent System for Managing Risks, ISFMR)框架,收集火车站中大量有关安全与风险信息的数据,包括实时监控视频、传感器信号、票务系统数据等,据此生成实时客流数据,结合人工智能模型建立自适应神经模糊推理系统(Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS),动态、智能地实时监测并预测火车站拥挤风险水平,提高交通系统的应急响应能力。

随着信息与通信技术的快速发展,来自视频监控、车辆监测与道路传感器等智慧城市建设的设施大数据与各类交通流量数据日益丰富,为交通系统状态的实时异常监测、状态识别与趋势预测提供了可能。然而,目前这些时空大数据在交通系统韧性实时监测的学术研究与实践应用仍相对较少,未来的研究仍需继续关注如何高效地整合分析多种时空大数据,建立低延迟、高效准确的实时监测

表 3 交通系统韧性监测预警研究中时空大数据应用情况

Tab. 3 The application of spatiotemporal big data in monitoring and early warning of transportation system resilience

研究内容	应用数据类型	研究方法及模型	案例地
飓风灾害下交通网络性能监测与评估 ^[24]	交通轨迹大数据	累积和控制图(CUSUM)	美国纽约
意外中断事件下交通网络流量变化 ^[44]	基础设施大数据	统计分析、基于感知成本演变的模型	美国明尼苏达州
恶劣天气下城市轨道交通运营线路韧性 ^[52]	气象监测大数据	贝叶斯网络模型、轨道交通实时-预报-预警天气监测体系、轨道交通运营韧性评估模型	中国北京
未知干扰事件下火车站拥挤情况及风险 ^[61]	基础设施大数据、出行订单大数据	自适应神经模糊推理系统(ANFIS)模型	中国北京

与预警系统,以应对各种突发事件的挑战,提高交通系统的整体韧性。

3.3.3 模拟预测

对于交通系统韧性的模拟预测,研究者通常采用交通网络数据(包括路网数据、站点分布情况及其拓扑结构)、交通流量数据(包括公共交通、轨道交通、车辆、自行车流量数据)、GPS轨迹数据,结合人口统计数据、气象数据、GIS数据等多源大数据,借助交通模拟软件,基于复杂网络理论及随机森林、神经网络等机器学习算法,建立交通网络模型,评估多种影响因素下交通网络的韧性,如表4所示。

例如,Chen等^[62]采用复杂网络理论构建交通网络模型,分析随机攻击、有针对性的攻击和自然灾害等不同情景下综合交通网络的脆弱性和韧性;而Aghababaei等^[63]则通过Aimsun Next交通模拟软件,利用道路网络、交通流量、旅行需求等多种时空大数据,模拟了地震后不同时间段的交通网络运行情况,以评估地震这一极端自然事件对交通系统韧性的影响。通过模拟不同灾害或其他事件下对交通流量的潜在影响,预测突发事件干扰下交通系统韧性变化情况,为城市交通网络的规划和应急管理提供了科学依据。

基于复杂网络理论构建交通网络模型,在不同场景下对交通系统韧性进行仿真模拟,是交通系统韧性模拟预测中常见的研究思路。然而,受限于对数据量、数据质量和计算能力的高需求,目前对于交通系统韧性进行情景模拟的研究往往是对短时间小范围的交通系统韧性进行模拟,难以真正有效地在较大尺度下(如城市群范围内)预测各类极端事件发生后交通系统韧性的真实变化。

我国的轨道交通网络规模巨大,为大规模的数据收集与交通模拟提供了丰富的数据来源与应用场景。近年来,我国在大数据分析、人工智能、云计算等技术领域取得的成就也大大增强了对交通系统韧性的模拟和预测能力,政府对交通基础设施和

科技创新的高度重视也为研究提供了政策和资金支持。然而,尽管具有较强的数据收集能力,但各部门与地区间的数据共享机制还不够完善。另一方面,多数高级交通模拟和预测工具最初为西方国家开发,不同的国情与市情需要研究者对模型进行更多的本地化调整与优化。未来的研究应针对这一问题进行改进,促进数据共享,推动模型本地化开发,加强跨学科研究平台的建设,以提高交通系统韧性模拟预测的准确性与实用性。

3.3.4 系统优化

时空大数据在系统优化领域的应用常与前述3个领域相结合。具体应用情况见表5。理解交通系统韧性的内涵并对其进行量化评估,有助于全面了解区域交通系统韧性水平及其影响因素,探究影响交通系统韧性的薄弱环节,从而针对性地对交通系统韧性进行优化。城市交通系统的韧性提升与多系统协同优化研究是交通系统韧性研究领域的重要议题,如Tang等^[66]通过扩展线性规划模型评估城市轨道交通系统面对多重中断时的韧性,并探讨优化通勤流的方法,以新加坡和重庆的轨道交通系统为案例,通过数值模拟分析发现提供公交桥接服务能在不同程度上提高系统的韧性。然而与这一研究类似,相关研究多数仍处于模型构建与数值模拟阶段,结合多源数据进行实证研究相对较少,使用时空大数据优化交通系统韧性的模型研发工作有待进一步深入。

结合时空大数据进行实证研究可以极大地丰富交通系统韧性的量化评估和系统优化策略,具有巨大的应用潜力。Aparicio等^[20]采用了里斯本的公共交通系统作为案例,通过分析智能卡数据来探索公交、电车和地铁网络中的用户流动模式。该研究利用时空大数据动态捕捉多模式联运交通系统的交通流量与乘客分布变化,分析其动态需求,从而提出了针对性的优化策略增强交通系统的韧性,为提高城市交通系统韧性提供了科学有效的方法。

在交通系统韧性优化研究中,网络分析方法是

表4 交通系统韧性模拟预测研究中时空大数据应用情况

Tab. 4 The application of spatiotemporal big data in simulation and prediction of transportation system resilience

使用模型	应用数据类型	研究内容	案例地
人工神经网络模型(ANN)	基础设施大数据 ^[17]	日常状态下城市交通系统拥堵情况 ^[17]	尼日利亚拉各斯、卡诺
复杂网络模型	基础设施大数据 ^[39,63-64] 、 气象监测大数据 ^[39,62] 、 遥感影像大数据 ^[39] 、 出行订单大数据 ^[64]	暴雨内涝灾害下城市交通道路脆弱性 ^[39] 、 多种干扰事件下综合交通网络脆弱性与韧性 ^[62] 、 地震灾害下道路交通网络性能 ^[63] 、 多种干扰事件下相互依赖的交通网络韧性 ^[64]	天津、西安、粤港澳大湾区; 新西兰
基于主体的模型(ABM)	基础设施大数据 ^[65]	海啸灾害下不同交通模式下的应急疏散 ^[65]	美国夏威夷

表5 交通系统韧性系统优化研究中时空大数据应用情况

Tab. 5 The application of spatiotemporal big data in system optimization of transportation system resilience

研究方法及模型	应用数据类型	研究内容	案例地
贝叶斯模型 ^[23]	交通轨迹大数据	雪灾情景下公路网络中断识别与韧性系统优化	中国全境
遥感与GIS空间分析 ^[31]	遥感影像大数据	飓风灾害下城市交通系统损害评估与优化	美国佛罗里达州
统计分析 ^[33]	个人移动终端大数据	疫情期间居民出行及公共交通系统韧性优化	菲律宾马尼拉
随机森林回归模型 ^[43]	基础设施大数据、 气象监测大数据	疫情期间自行车交通系统韧性优化	瑞士巴塞尔、苏黎世
数学优化模型 ^[55]	基础设施大数据、 交通轨迹大数据	自然或人为干扰下交通网络效率和应急响应能力模拟与整体韧性优化	美国阿拉巴马州、阿肯色州、路易斯安那州、密西西比州、田纳西州

最为常见的选择之一。许多学者尝试利用图论和网络科学原理,识别关键节点和路径,调整网络结构,从网络结构优化角度增强交通系统韧性。在研究设计上,研究者通常选择构建复杂网络模型并进行目标优化求解,部分研究基于真实客流数据进行场景模拟仿真,但在数据的选择上往往仅选择一条或多条公共交通线路某日的交通流量数据作为案例,所使用的数据量较小。时空大数据在交通系统韧性优化研究中的应用仍有较大提升空间。在干扰出现前,交通系统韧性优化研究关注鲁棒性、脆弱性,侧重于识别关键节点或脆弱路段,进行系统的结构优化;在干扰出现后,研究关注应变性、快速性,侧重于及时有效疏散与快速有序恢复,减少干扰造成的影响,提高系统的应急响应能力。相较于国外,国内文献中交通系统韧性优化研究仍处于发展阶段,多数学者从理论上提出优化策略,通过构建优化模型进行实际求解的研究较少,运用大数据进行系统优化的研究则相对更为匮乏。

此外,也有研究致力于分析交通系统韧性与其他各个因素之间的关系,如突发干扰(如天气或气候变化^[21,41,67-69]、自然灾害^[31]等)、社会事件^[70]、出行模式^[71]与土地利用^[71-72]等要素。在此过程中,根据影响因素不同分别使用了相应的天气或气候变化数据、灾害数据以及土地利用数据等时空大数据,结合各类交通流量数据,通过回归模型、相关分析、聚类分析等方法,定量评估不同因素对交通系统韧性的影响,为城市交通网络的规划和管理提供理论与实践指导。

3.4 交通系统韧性研究中时空大数据的应用现状

3.4.1 时空大数据赋能交通系统韧性研究体系建设

交通系统韧性研究以建设韧性水平更高、更加可持续的城市交通系统为目标,在极端灾害与突发性事件频发、城市内部流空间耦合关系日益复杂的

当下,需要依靠地理学、管理学、工程学等领域的交叉与前沿技术的创新与融合。时空大数据能提供海量的、连续性好的信息资源,通过对时空大数据的分析处理,研究者和政府部门能深入了解灾害背景下城市交通系统的运行机制与影响传导模式,识别关键因素与脆弱节点,提升应急响应速度与管理水平。时空大数据在交通系统韧性研究中的应用跨越多个学科,为学科间的交流与融合提供了有力的支撑,促进了学科内容的深化与理论的拓展,赋能交通系统韧性研究体系建设(图3)。未来基于交通系统韧性自身的研究内容和框架,应继续融合其他学科的理论框架与技术方法,进而完善自身的研究体系。此外,个体尺度的数据有助于行为地理学聚焦灾害场景下居民的出行行为模式与差异,也为

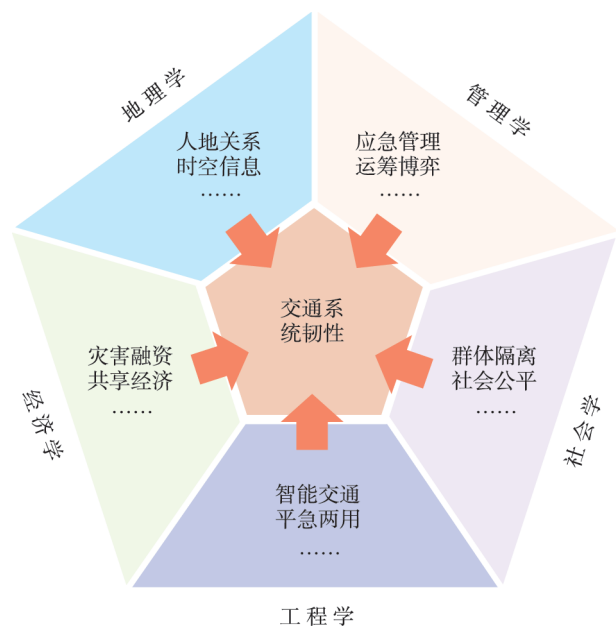


图3 时空大数据赋能交通系统韧性研究体系

Fig. 3 The empowerment of transportation system resilience research framework by spatio-temporal big data

量化评估交通系统的抗灾与恢复能力提供了新的切入点。更进一步,还可在社会学框架下,研究不同人群在灾害场景下使用交通出行的不公平性。除此以外,灾前的交通基础设施区位选择、中央与地方的博弈机制;灾中的交通系统动态监测、应急疏散优化建模;灾后的群体创伤愈合和重建基础设施投融资等研究内容,均可在引入时空大数据后焕发新的活力。

3.4.2 研究趋势

随着时空大数据及其相关技术在交通领域中的创新应用和深度融合,大数据的类型、质量、研究方法等均在不断创新,从而在数字化赋能的基础上时空赋能交通系统韧性研究与可持续发展。在大数据时代,交通系统的集合信息与人的位置、行为等特征都成为可以被感知、记录、存储和分析的数据,这些多模式的综合数据能辅助学者对交通系统韧性进行更为深入和细致的认识,进而被广泛应用在该研究领域,地铁自动售检票机数据^[51]、手机信令数据^[34]等新的大数据类型不断涌现。与此同时,学者们的研究从面向单一的基础地理信息数据或统计调查数据转向位置服务数据、互联网地理信息数据等多种数据类型融合,且随着大数据可获取性越来越强,多元时空大数据交叉融合将会成为交通系统韧性研究领域中的常态。在应用方法方面,引入人工智能算法以增强感知能力与分析效率是一大亮点,学者们运用各类神经网络^[17,19]等较为前沿的方法开展交通系统韧性评估、模拟与优化等研究。总的来说,时空大数据的采集与运用为交通系统韧性研究领域带来了新的数据类型与方法创新。

除此之外,另一大显著趋势是涵盖灾前一灾中一灾后全生命周期的研究逐渐增多,这些研究不仅关注冲击到来时的动态监测,还重视灾害前期的预警与灾害后期的恢复。Mojtahedi等^[73]的研究结合澳大利亚新南威尔士的交通基础设施数据,利用Cox比例风险回归模型,预测不同灾害场景下交通设施的恢复概率;Wu等^[48]的研究以美国田纳西州谢尔比县为例,从地震后紧急医疗响应的角度出发,对交通网络的抗灾性能进行评估,并进行了灾前减灾规划;而Aghababaei等^[63]则针对受阿尔卑斯断层影响的新西兰,开展了灾后公路网的模拟研究。灾前阶段的研究可以通过分析历史数据和模拟预测,识别潜在的灾害风险和脆弱性,帮助政府和有关部门采取预防措施和规划应急预案;灾中阶段的研究可以通过实时监测和数据分析,迅速掌握灾害的实时情况和受灾范围,为应急救援和灾后恢

复提供决策支持;灾后阶段的研究可以通过长期的数据跟踪和分析,评估灾后恢复和重建的效果,总结经验教训,提炼出灾害管理和应对的最佳方案。

利用时空大数据进行复合灾害全生命周期及全灾害链的研究也是重要发展趋势之一,同时是我国推进“平急两用”^[74]、打造新时代韧性安全城市的有益支撑。通过时空大数据增强、时空技术嵌入等方式,能够深化对灾害发生机理、演变规律、影响范围等的认识,促进灾害管理的精细化、智能化、人性化转变。具体而言,未来学者们可以结合时空大数据,重点关注以下研究方向:①揭示复合多灾害全过程中交通系统动态变化与行为模式;②通过智能监测与趋势预测,进行交通系统韧性评估与风险环节识别;③优化交通系统应急预案,构建全周期、常态化、可复用的防灾框架。通过推进对灾害全过程背景下交通系统韧性的认识,有关部门能精准识别不同灾害类型下城市交通的运行模式,确定疏散的重要道路与应急救援节点,进而在城市规划、建设、改造和运营的过程中,使这些交通枢纽、道路等基础设施服务设施既具备日常运营功能,又具备应急响应能力,统筹发展与安全,助力提高城市交通系统韧性。

可以预见,在未来,更多新兴的交通数据类型将进一步应用于交通研究领域,为交通系统韧性研究赋予新的活力。除了已提及的环境传感器数据、智能交通信号数据、无人机图像数据等新型数据之外,还有诸如穿戴设备数据(运动手环、骑行码表等)、驾驶员眼动数据、心理压力测试数据和车路协同交互数据的应用也会逐渐增加。这些数据源能够提供更全面、多维度的交通信息,帮助研究人员更好地理解交通系统的运行和用户行为。另一方面,随着社会的不断发展和技术的日益成熟,更多新兴交通模式兴起,如自动驾驶汽车、共享经济交通工具(如共享单车、共享汽车、共享电动滑板车等)、低空运载(电动垂直起降eVTOL与无人机配送)等。这些新兴交通模式将对城市交通系统产生深远影响,进而也将成为交通系统韧性研究的重要对象。研究人员将关注这些新型交通模式在不同环境和条件下的适应性、安全性和可靠性,以及其对城市交通系统整体韧性的协同作用。这些研究将为未来城市交通规划和管理提供重要参考,推动交通系统向更加智能、可持续的方向发展。

3.4.3 既有研究不足

通过上述回顾可以发现,随着移动互联网、人工智能、区块链、云计算、物联网等新一代信息技术加快向交通运输系统扩散,越来越多的学者综合利

用时空大数据进行交通系统韧性研究,其研究的广度和深度均与使用传统数据相比有所突破,取得了一系列的成果。不过,全球化时代下各种风险频发,提升城市安全水平、打造韧性交通的重要性日益凸显,该研究领域还存在很大的发展空间。

(1)对城市群尺度下的交通系统韧性关注不够
交通网络错综复杂,以交通系统为重要承载的城市功能地域与影响力辐射范围早已超越了城市原有的行政边界。促进城市交流协作、培育高水平的城市群,不仅是我国探索新型城镇化的应有之义,还是提升城市治理水平、构建韧性城市的重要支撑。除了极少部分的文献关注到了城市群尺度下的交通系统韧性^[67],现有研究大多囿于数据获取条件与研究自身情况,研究区域局限在某个重要地区或城市,如北京^[21]、夏威夷^[65]、新加坡^[72]、哥伦比亚^[75]等。只关注单个城市的交通系统韧性,未能考虑到突发事件的扩散性影响,不利于区域交通整体的韧性水平提升。我国提出要建立以中心城市引领城市群发展、城市群带动区域发展的新模式,促进京津冀城市群、长三角城市群、粤港澳大湾区、成渝城市群、关中平原城市群等相关板块的发展^③,因此应加强对于城市群尺度下交通系统韧性的研究,关注灾害情景下城市之间的交通互动、要素流动情况,提升整体的灾害应对与风险管控能力,下好韧性交通全国“一盘棋”。

(2)对突发性事件的分析与政策推演仍有待深入
时空大数据赋能交通领域的一大亮点是其对现实案例的挖掘与分析,可以全面感知交通系统的动态变化,在应对突发事件、辅助科学决策方面发挥独特作用。新冠疫情作为冲击全球的突发性公共卫生事件,对世界各地的交通系统造成了明显影响,得到了学者们的广泛关注^[33,43,72,75-77]。学者们对不同交通子系统的状况进行了研究,并提出了相应的政策建议,例如 Song 等^[72]聚焦“微移动”(Micro-mobility)中共享单车的时空特征变化,认为交通部门可以增加更多的配合以满足公共交通需求,但并未考虑这潜在的对其他主动出行方式的替代效应;Hasselwander 等^[33]的研究侧重分析不同交通方式受疫情封锁影响的差异并概述了不同交通政策的影响,却未能考虑到发展中国家的交通措施以及其直接与间接的成本与效益。除此之外,还有学者对香港社会运动冲击后的交通系统开展研究,建议警方采取道路封闭和交通分流^[77]、不同运营商进行合作、提供实时交通信息^[70]等,不过这些建议通常是

引述其他学者进行的另一个案例研究,其可复制性与可操作性还有待商榷。未来应利用人工智能等高效的技术手段,进行时空情景模拟与政策沙盘推演,充分考虑案例区域的特殊性与异质性,做到因地制宜,彰显出利用时空大数据进行交通系统韧性研究的重要现实价值。

(3)对群体时空差异的原因讨论较为欠缺

传统数据支撑的交通研究大多局限在中宏观尺度,以车流、航运等为研究对象。高质量的时空大数据则能让研究者深入到微观视角,以人或单个交通工具作为出行主体进行开创性研究。精度高、时空连续性好的数据能反映交通系统运行的真实情况,为实现全系统动态感知、精准认知和智慧运营奠定了基础。个体社会经济背景、出行需求差异引致的出行偏好差异是出行韧性呈现群体时空分异的原因^[78],然而现有研究中对突发事件影响下居民出行时空模式的研究较少^[79],且多数研究只是刻画了不同群体的出行韧性差异现状,针对其作用机制的细致归因仍较为少见。未来应结合经济地理、心理学、复杂网络等分析框架,在刻画不同群体或交通方式韧性差异的基础上,进一步厘清差异的形成原因,为后续的统筹优化奠定良好基础。

4 结论与展望

近年来,城市化发展不仅为人类带来福祉,同时也衍生出了制约社会、经济和环境可持续发展的一系列问题^[80]。而城市韧性作为城市可持续性的重要目标与具体体现,是应对这类问题的一种有效途径,日益受到政府、学界和公众的广泛关注^[1,81]。交通系统作为国家重要的基础设施和民生工程,是国民经济发展的命脉,交通系统的韧性是城市韧性的重要组成部分,近年来相关研究不断涌现。

随着大数据时代的到来,数据的应用在城市规划和管理中重要性日益显著。在此基础上,时空大数据的概念应运而生,它通过融合时间和空间维度的数据,为城市发展提供了更为丰富和精准的信息^[14,82,83]。传统的数据收集方法通常耗时耗力,因而无法捕捉实时信息或突发状况,限制交通系统应急响应;也难以收集到长时序高精度数据,影响交通系统优化策略的前瞻性与适应性。高精度的时空大数据是评估各类干扰对城市系统各要素影响的先决条件^[27,57],通过捕捉各个时空节点的信息,可以

③ 参见《关于建立更加有效的区域协调发展新机制的意见》,中国共产党中央委员会、中华人民共和国国务院,2018年11月。

支撑研究者从全周期多维度对交通流进行综合分析,适应交通系统的复杂性与动态性,是应急管理的重要决策依据,可以提高应急交通指挥决策的科学性,显著提升交通系统的智能化与韧性水平^[14]。本研究对时空大数据在交通系统韧性领域的应用进行了全面回顾,通过系统性的文献综述,揭示了时空大数据在理解和增强城市交通系统对于各种冲击的应对能力方面的关键作用,得到以下重要结论:

(1)在各个应用领域中,对于交通系统韧性的量化评估研究是最为广泛的应用领域之一,而实时监测预警的相关研究则相对匮乏,亟待填补。在模拟预测研究中,受限於对数据量、数据质量以及处理技术的高要求,目前的交通系统情景模拟难以在较大尺度下有效预测交通系统韧性的真实变化。交通系统韧性的优化与提升常常与其他三者相结合进行研究,其中多数研究仍处于模型构建与数值模拟阶段,结合多源时空大数据进行实证研究相对较少,有待进一步深入。此外,相比于英文文献,中文的交通系统韧性研究中定性研究较多而实证研究较少,需进一步补充。

(2)基于精细化的多源时空大数据,交通系统韧性研究中的时空分析更加综合、更加高质量;高质量的时空大数据使得交通系统韧性研究更加深入于微观视角,聚焦于个体,贴合现实需求。韧性概念本身也随之发展,从过去“重灾后、轻灾前”转变为“灾前-灾中-灾后”全生命周期研究,带动了交通系统韧性研究的范式转变。

尽管目前交通系统韧性研究已取得了一定进展,但仍面临着数据获取、处理和分析的挑战。一方面,个人数据涉及的隐私与安全问题尚未完全解决,且个人时空大数据由于用户群体偏好不同存在一定偏差。另一方面,高精度时空大数据的处理与分析也要求更高的技术水平与复杂的分析方法。此外,时空大数据适用于预测整体趋势,但在解释个体微观行为方面存在不足,仍需与更为精细的调查研究等方法相结合。更为重要的是,尽管时空大数据可用于揭示交通流模式并预测其趋势,但无法直接解释现象产生的根本原因,其背后的形成机制仍需要更深入的研究进行解释。展望未来,随着时空大数据技术的不断进步和新型交通模式的出现,我们有理由相信,交通系统韧性研究将会迎来更多的创新和突破。未来的研究应进一步探索和利用时空大数据在交通系统韧性领域的潜力,加强实证研究,理论与实践相结合,填补现有研究的空白。

研究者应充分利用新算法、新平台和新工具,不断提升数据处理能力和分析精度,以支持更为复杂和细致的交通系统韧性研究。同时,进行跨学科合作,整合不同领域的知识和技术共同推进交通系统韧性理论的发展与实践应用的创新,为城市交通系统的规划和管理提供科学依据,为提高城市的整体韧性与可持续发展贡献重要力量。

利益冲突: Conflicts of Interest

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflicts of interest.

作者贡献: Author Contributions

汤俊卿、赵鹏军、宫兆亚参与内容构思;安梦琪、郭增骏、罗陶然参与文献搜集与分析;汤俊卿、安梦琪、郭增骏、罗陶然、吕薇参与论文的写作与修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

TANG Junqing, ZHAO Pengjun and GONG Zhaoya contributed conceptualization; AN Mengqi, GUO Zengjun and LUO Taoran contributed data collection and analysis; TANG Junqing, AN Mengqi, GUO Zengjun, LUO Taoran and LYU Wei contributed draft writing and revision. All the authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献(References):

- [1] 杨敏行,黄波,崔翀,等.基于韧性城市理论的城市防治研究回顾与展望[J].城市规划学刊,2016(1):48-55. [Yang M X, Huang B, Cui C, et al. Review and prospect: Urban disaster resilience[J]. Urban Planning Forum, 2016(1):48-55.] DOI:10.16361/j.upf.201601006
- [2] 陈轶,葛怡,陈睿山,等.气候变化背景下国外城市韧性研究新进展——基于citespace的文献计量分析[J].灾害学,2020,35(2):136-141. [Chen Y, Ge Y, Chen R S, et al. New development of urban resilience research in foreign countries under the background of climate change[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(2): 136-141.] DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.02.025
- [3] The Rockefeller Foundation. 100 Resilient Cities[EB]. (2013-8-5) [2024-3-1] <http://www.rockefellerfoundation.org/our-work/initiatives/100-resilient-cities/>
- [4] 徐耀阳,李刚,崔胜辉,等.韧性科学的回顾与展望:从生态理论到城市实践[J].生态学报,2018,38(15):5297-5304. [Xu Y Y, Li G, Cui S H, et al. Review and perspective on resilience science: From ecological theory to urban practice[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(15):5297-5304.] DOI:10.5846/stxb201709081620
- [5] 严新平,吴兵,贺宜,等.我国“零死亡愿景”交通安全理念

- 及实施战略研究[J]. 交通信息与安全, 2019, 37(1): 1-6.
- [Yan X P, Wu B, He Y, et al. A study of "version zero" concept of transportation safety and its implementation strategies in China[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2019, 37(1): 1-6.] DOI: 10.3963/j.issn.1674-4861.2019.01.001
- [6] Zhou Y M, Wang J W, Yang H. Resilience of transportation systems: Concepts and comprehensive review[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20(12): 4262-4276. DOI: 10.1109/TITS.2018.2883766
- [7] 黄慧萍, 陈芳森. 城市群建设与管理的时空大数据体系框架构建研究[J]. *遥感技术与应用*, 2023, 38(2): 443-453. [Huang H P, Chen F M. Research on the construction of spatiotemporal big data framework system of urban agglomeration construction and management[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2023, 38(2): 443-453.] DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2023.2.0443
- [8] 陈军, 王艳慧, 武昊, 等. 时空信息赋能高质量发展的基本问题与发展方向[J]. *时空信息学报*, 2023, 30(1): 1-11. [Chen J, Wang Y H, Wu H, et al. Basic issues and development directions of high-quality development empowered by spatio-temporal information[J]. *Journal of Spatio-Temporal Information*, 2023, 30(1): 1-11.] DOI: 10.20117/j.jsti.202301001
- [9] Wan C P, Yang Z L, Zhang D, et al. Resilience in transportation systems: A systematic review and future directions [J]. *Transport Reviews*, 2018, 38(4): 479-498. DOI: 10.1080/01441647.2017.1383532
- [10] 黄建中, 胡刚钰, 石佳宁, 等. 城市交通系统的韧性研究: 概念、特征与议题[J/OL]. *城市规划*, 2024: 1-12. (2024-01-10). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2378.TU.20240108.2135.006.html>. [Huang J Z, Hu G Y, Shi J N, et al. Research on resilience of urban transportation system: Concept, characteristics, and important issues[J/OL]. *City Planning Review*, 2024: 1-12. (2024-01-10). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2378.TU.20240108.2135.006.html>.]
- [11] Page M J, Moher D, Bossuyt P M, et al. PRISMA 2020 explanation and elaboration: Updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews[J]. *BMJ*, 2021, 372: n160. DOI: 10.1136/bmj.n160
- [12] Stamos I, Mitsakis E, Salanova J M, et al. Impact assessment of extreme weather events on transport networks: A data-driven approach[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2015, 34: 168-178. DOI: 10.1016/j.trd.2014.11.002
- [13] Markolf S A, Hoehne C, Fraser A, et al. Transportation resilience to climate change and extreme weather events-Beyond risk and robustness[J]. *Transport Policy*, 2019, 74: 174-186. DOI: 10.1016/j.tranpol.2018.11.003
- [14] 李德仁, 马军, 邵振峰. 论时空大数据及其应用[J]. *卫星应用*, 2015(9): 7-11. [Li D R, Ma J, Shao Z F. On spatio-temporal big data and its application[J]. *Satellite Application*, 2015(9): 7-11.]
- [15] 中国电子技术标准化研究院. 大数据标准化白皮书[R]. 全国信息技术标准化技术委员会大数据标准工作组, 2018. [China Electronics Standardization Institute. Big Data Standardization White Paper[R]. Big Data Standards Working Group of the China National Information Technology Standardization Technical Committee, 2018.]
- [16] Wang C H, Chen N, Olwert C. Investigating accessibility resilience of emergency and lifesaving facilities under natural hazards[J]. *Natural Hazards*, 2024, 120(2): 1785-1807. DOI: 10.1007/s11069-023-06272-8
- [17] Otuoze S H, Hunt D V L, Jefferson I. Neural network approach to modelling transport system resilience for major cities: Case studies of Lagos and Kano (Nigeria)[J]. *Sustainability*, 2021, 13(3): 1371. DOI: 10.3390/su13031371
- [18] 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/OL]. *武汉大学学报(工学版)*, 2022: 1-11. (2022-11-03). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1675.T.20221110.1054.002.html>. [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/OL]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2022: 1-11. (2022-11-03). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1675.T.20221110.1054.002.html>.]
- [19] Wang H W, Peng Z R, Wang D S, et al. Evaluation and prediction of transportation resilience under extreme weather events: A diffusion graph convolutional approach [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 115: 102619. DOI: 10.1016/j.trc.2020.102619
- [20] Aparicio J T, Arsenio E, Santos F C, et al. LINES: Multi-modal transportation resilience analysis[J]. *Sustainability*, 2022, 14(13): 7891. DOI: 10.3390/su14137891
- [21] Wu J W, Liao H. Weather, travel mode choice, and impacts on subway ridership in Beijing[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2020, 135: 264-279. DOI: 10.1016/j.tra.2020.03.020
- [22] Chen Y J, Qin Y F. Operational efficiency comparison and transportation resilience: case study of Nanjing, China[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2022, 2022: 1-13. DOI: 10.1155/2022/2463208
- [23] Yang Z Z, Liu F, Gao Z Y, et al. Estimating the influence of disruption on highway networks using GPS data[J]. *Expert Systems with Applications*, 2022, 187: 115994. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.115994
- [24] Ilbeigi M. Statistical process control for analyzing resilience of transportation networks[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2019, 33: 155-161. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2018.10.002
- [25] Wang Y J, Zhan J M, Xu X H, et al. Measuring the resilience of an airport network[J]. *Chinese Journal of Aero-*

- nautics, 2019,32(12):2694-2705. DOI:10.1016/j.cja.2019.08.023
- [26] 张欣,孙代源. 基于复杂网络的全球集装箱海运网络脆弱性分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2022,41(2): 1-7. [Zhang X, Sun D Y. Vulnerability analysis of global container shipping network based on complex network[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2022,41(2): 1-7.] DOI:10.3969/j.issn.1674-0696.2022.02.01
- [27] Singh P, Sinha V S P, Vijhani A, et al. Vulnerability assessment of urban road network from urban flood[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2018,28: 237-250. DOI:10.1016/j.ijdrr.2018.03.017
- [28] Liao X S, Wu G Y, Yang L, et al. A Real-World Data-Driven approach for estimating environmental impacts of traffic accidents[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2023,117:103664. DOI:10.1016/j.trd.2023.103664
- [29] 李雨杭,陈旭盈,徐雨佳,等. 融合天气因素的交通路网脆弱性综合评估模型研究——以杭州亚运路网为例[J]. 中国安全生产科学技术,2023,19(12):164-171. [Li Y H, Chen X Y, Xu Y J, et al. Study on comprehensive assessment model of traffic network vulnerability incorporating weather factors: Taking traffic network of Hangzhou Asian Games as example[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023,19(12):164-171.] DOI:10.11731/j.issn.1673-193x.2023.12.022
- [30] Loli M, Kefalas G, Dafis S, et al. Bridge-specific flood risk assessment of transport networks using GIS and remotely sensed data[J]. Science of the Total Environment, 2022,850:157976. DOI:10.1016/j.scitotenv.2022.157976
- [31] Karaer A, Chen M Y, Gazzea M, et al. Remote sensing-based comparative damage assessment of historical storms and hurricanes in Northwestern Florida[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2022, 72: 102857. DOI:10.1016/j.ijdrr.2022.102857
- [32] Williams J, Wilson T, Horspool N, et al. Assessing transportation vulnerability to tsunamis: Utilising post-event field data from the 2011 Tōhoku tsunami, Japan, and the 2015 Illapel tsunami, Chile[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2020,20:451-470. DOI:10.5194/NHESS-20-451-2020
- [33] Hasselwander M, Tamagusko T, Bigotte J F, et al. Building back better: The COVID-19 pandemic and transport policy implications for a developing megacity[J]. Sustainable Cities and Society, 2021,69:102864. DOI:10.1016/j.scs.2021.102864
- [34] 黄洁,王姣娥. 出行韧性的理论与方法及实证[J]. 地理学报,2023,78(10):2507-2519. [Huang J, Wang J E. Theory, method, and empirical studies of travel behavior resilience [J]. Acta Geographica Sinica, 2023,78(10):2507-2519.] DOI:10.11821/dlxb202310008
- [35] 韦佳伶,赵丽元. 城市路网脆弱性评估及改善对策研究——以武汉市主城区为例[J]. 现代城市研究,2020(11): 10-15. [Wei J L, Zhao L Y. Urban road network vulnerability assessment and mitigation strategies: A case study in Wuhan main city[J]. Modern Urban Research, 2020 (11):10-15.] DOI:10.3969/j.issn.1009-6000.2020.11.002
- [36] Yao F, Wang Y. Towards resilient and smart cities: A real-time urban analytical and geo-visual system for social media streaming data[J]. Sustainable Cities and Society, 2020,63:102448. DOI:10.1016/j.scs.2020.102448
- [37] Wang B, Loo B P Y, Zhen F, et al. Urban resilience from the lens of social media data: Responses to urban flooding in Nanjing, China[J]. Cities, 2020,106:102884. DOI: 10.1016/j.cities.2020.102884
- [38] 王波,甄峰,孙鸿鹄. 基于社交媒体签到数据的城市居民暴雨洪涝响应时空分析[J]. 地理科学,2020,40(9):1543-1552. [Wang B, Zhen F, Sun H H. The spatio-temporal patterns of public responses towards rainstorms and associated floods based on social media check-in data[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020,40(9):1543-1552.] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2020.09.016
- [39] 黄震,张学全,张庭瑞,等. 暴雨内涝环境下城市交通脆弱路段预测方法[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版):1-9[2024-04-23]. [Huang Z, Zhang X Q, Zhang T R, et al. Prediction method of urban traffic vulnerable road under rainstorm and waterlogging environment[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering): 1-9[2024-04-23].] <https://link.cnki.net/urlid/42.1824.U.20240102.1045.002>
- [40] 邱昊月,赵晗萍. 灾害高风险区域路网韧性评估——以阿坝藏族羌族自治州为例[J]. 地理研究,2023,42(12): 3130-3146. [Qiu H Y, Zhao H P. A road network resilience assessment in high disaster risk areas: The case study of Aba Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture [J]. Geographical Research, 2023, 42(12): 3130-3146.] DOI:10.11821/dlyj020230517
- [41] Qi Y M, Zheng Z D, Jia D Y. Exploring the spatial-temporal relationship between rainfall and traffic flow: A case study of Brisbane, Australia[J]. Sustainability, 2020, 12 (14):5596. DOI:10.3390/su12145596
- [42] 唐少虎,朱伟,程光,等. 暴雨内涝下城市道路交通系统安全韧性评估[J]. 中国安全科学学报,2022,32(7):143-150. [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.] DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2022.07.1391
- [43] Büchel B, Marra A D, Corman F. COVID-19 as a window of opportunity for cycling: Evidence from the first wave [J]. Transport Policy, 2022,116:144-156. DOI:10.1016/j.tranpol.2021.12.003
- [44] Danczyk A, Di X, Liu H X, et al. Unexpected versus ex-

- pected network disruption: Effects on travel behavior[J]. *Transport Policy*, 2017, 57: 68-78. DOI: 10.1016/j.tranpol.2017.02.002
- [45] 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. DOI:10.1016/j.trc.2020.102840
- [46] Li D W, Liu Y P, Song Y C, et al. A framework for assessing resilience in urban mobility: Incorporating impact of ridesharing[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(17): 10801. DOI: 10.3390/ijerph191710801
- [47] Pan X, Dang Y H, Wang H X, et al. Resilience model and recovery strategy of transportation network based on travel OD-grid analysis[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, 223: 108483. DOI:10.1016/j.res.2022.108483
- [48] Wu Y Y, Chen S R. Resilience modeling and pre-hazard mitigation planning of transportation network to support post-earthquake emergency medical response[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 230: 108918. DOI: 10.1016/j.res.2022.108918
- [49] 马敏, 胡大伟, 舒兰, 等. 城市轨道交通网络韧性评估及恢复策略[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2023, 53(2): 396-404. [Ma M, Hu D W, Shu L, et al. Resilience assessment and recovery strategy on urban rail transit network[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2023, 53(2): 396-404.] DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20220453
- [50] Huang Z R, Loo B P Y. Vulnerability assessment of urban rail transit in face of disruptions: A framework and some lessons from Hong Kong[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 98: 104858. DOI:10.1016/j.scs.2023.104858
- [51] 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. [Chen J Q, Zhang F, Peng Q Y, et al. Resilience assessment and partition of an urban rail transit station under large passenger flow[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2022, 22(6): 2994-3002.] DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2021.1344
- [52] 宁尧, 张向峰, 李娟娟, 等. 恶劣天气下城市轨道交通运营韧性评估技术研究[J]. *现代城市轨道交通*, 2023(5): 83-89. [Ning Y, Zhang X F, Li J J, et al. Research on assessment techniques for operational resilience of urban rail transit under atrocious weather conditions[J]. *Modern Urban Transit*, 2023(5): 83-89.]
- [53] Lyu H M, Sun W J, Shen S L, et al. Flood risk assessment in metro systems of mega-cities using a GIS-based modeling approach[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 626: 1012-1025. DOI:10.1016/j.scitotenv.2018.01.138
- [54] Chen H R, Zhou R Y, Chen H, et al. Static and dynamic resilience assessment for sustainable urban transportation systems: A case study of Xi 'an, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 368: 133237. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133237
- [55] 王直欢, 胡炜琴, 王逸文. 基于复杂网络的长三角和粤港澳航运网络韧性评估[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2023, 23(5): 184-193. [Wang Z H, Hu W Q, Wang Y W. Resilience assessment of Yangtze River Delta and Guangdong-Hong Kong-Macao shipping networks based on complex network[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2023, 23(5): 184-193.] DOI:10.16097/j.cnki.1009-6744.2023.05.020
- [56] Hosseini S, Al Khaled A. Freight flow optimization to evaluate the criticality of intermodal surface transportation system infrastructures[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 159: 107522. DOI: 10.1016/j.cie. 2021. 107522
- [57] Alabbad Y, Mount J, Campbell A M, et al. Assessment of transportation system disruption and accessibility to critical amenities during flooding: Iowa case study[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 793: 148476. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148476
- [58] Xiao W Y, Wei Y D, Wu Y Y. Neighborhood, built environment and resilience in transportation during the COVID-19 pandemic[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, 110: 103428. DOI: 10.1016/j.trd.2022.103428
- [59] Peng Q, Bakkar Y, Wu L P, et al. Transportation resilience under Covid-19 Uncertainty: A traffic severity analysis [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2024, 179: 103947. DOI:10.1016/j.tra.2023.103947
- [60] Zhang Z P, Chai H, Guo Z J. Quantitative resilience assessment of the network-level metro rail service 's responses to the COVID-19 pandemic[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 89: 104315. DOI:10.1016/j.scs.2022.104315
- [61] Alawad H, An M, Kaewunruen S. Utilizing an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) for overcrowding level risk assessment in railway stations[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(15): 5156. DOI:10.3390/app10155156
- [62] Chen M Y, Lu H P. Analysis of transportation network vulnerability and resilience within an urban agglomeration: Case study of the greater bay area, China[J]. *Sustainability*, 2020, 12(18): 7410. DOI:10.3390/su12187410
- [63] Aghababaei M, Costello S B, Ranjitar P. Transportation impact assessment following a potential Alpine fault earthquake in New Zealand[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2020, 87: 102511. DOI:10.1016/j.trd.2020.102511
- [64] Xu P C, Lu Q C, Xie C, et al. Modeling the resilience of interdependent networks: The role of function dependency in metro and bus systems[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2024, 179: 103907. DOI: 10.1016/j.tra.2023.103907
- [65] Kim K, Kaviari F, Pant P, et al. An agent-based model of

- short-notice tsunami evacuation in Waikiki, Hawaii[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022,105:103239. DOI:10.1016/j.trd.2022.103239
- [66] Tang J Q, Xu L, Luo C L, et al. Multi-disruption resilience assessment of rail transit systems with optimized commuter flows[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021,214:107715. DOI:10.1016/j.ress.2021.107715
- [67] Zhou Y, Mao S C, Zhao H L, et al. How rainfalls influence urban traffic congestion and its associated economic losses at present and in future: Taking cities in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China for example?[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2022, 150(1): 537-550. DOI:10.1007/s00704-022-04172-8
- [68] Mathew S, Pulugurtha S S. Quantifying the effect of rainfall and visibility conditions on road traffic travel time reliability[J]. *Weather, Climate, and Society*, 2022, 14(2): 507-519. DOI:10.1175/wcas-d-21-0053.1
- [69] Schweikert A, Espinet X, Goldstein S, et al. Resilience versus risk[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2015,2532(1): 13-20. DOI:10.3141/2532-02
- [70] Chan H Y, Ma H X, Zhou J P. Public transportation and social movements: Learning from the Hong Kong anti-extradition bill protests[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2022,2676(2):553-566. DOI:10.1177/03611981211044466
- [71] Xie X F, Wang Z J. Uncovering urban mobility and city dynamics from large-scale taxi Origin-Destination (O-D) trips: case study in Washington DC area[M]. arXiv, 2018 [2024-01-30]. <http://arxiv.org/abs/1812.09583>
- [72] Song J, Zhang L Y, Qin Z, et al. Spatiotemporal evolving patterns of bike-share mobility networks and their associations with land-use conditions before and after the COVID-19 outbreak[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2022, 592: 126819. DOI: 10.1016/j.physa.2021.126819
- [73] Mojtahedi M, Newton S, Von Meding J. Predicting the resilience of transport infrastructure to a natural disaster using Cox's proportional hazards regression model[J]. *Natural Hazards*, 2017,85(2): 1119-1133. DOI: 10.1007/s11069-016-2624-2
- [74] 新华社. 中共中央政治局召开会议分析研究当前经济形势和经济工作中 中共中央总书记习近平主持会议[EB]. (2023-4-28) [2024-3-24] https://www.gov.cn/yaowen/2023-04/28/content_5753652.htm
- [75] Arellana J, Márquez L, Cantillo V. COVID-19 outbreak in Colombia: An analysis of its impacts on transport systems [J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2020, 2020: 8867316. DOI:10.1155/2020/8867316
- [76] 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. [Ma F, Zhao C Y, Sun Q P, et al. Integrated resilience of urban rail transit network with active passenger flow restriction under major public health disasters[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2023,23(1): 208-221.] DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2023.01.016
- [77] 马宝奎,柴浩,张志鹏. 后疫情时期城市轨道交通客流特征与韧性探讨[J]. *综合运输*,2022,44(7): 75-80. [Ma B K, Chai H, Zhang Z P. Assessment and countermeasures for urban rail transit resilience governance in post-pandemic era[J]. *China Transportation Review*, 2022, 44(7): 75-80.]
- [78] 赵鹏军,万婕. 城市交通与土地利用一体化模型的理论基础与发展趋势[J]. *地理科学*,2020,40(1):12-21. [Zhao P J, Wan J. The key technologies of integrated urban transport-land use model: Theory base and development trends[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(1): 12-21.] DOI:10.13249/j.cnki.sgs.2020.01.003
- [79] 何惠雨,付晓,吕启航. 突发事件影响下的城市居民出行活动时空模式研究[J]. *时空信息学报*,2024,31(2): 02011. [He H Y, Fu X, Lyu Q H. Spatio-temporal patterns of urban residents' travel activities with the impacts of emergencies[J]. *Journal of Spatio-temporal Information*. 2024,31(2): 02011.] DOI:10.20117/j.jsti.202402011
- [80] 吕永龙,曹祥会,王尘辰. 实现城市可持续发展的系统转型[J]. *生态学报*,2019,39(4):1125-1134. [Lyu Y L, Cao X H, Wang C C. Systematic transformation towards urban sustainable development[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(4):1125-1134.] DOI:10.5846/stxb201809141996
- [81] 赵瑞东,方创琳,刘海猛. 城市韧性研究进展与展望[J]. *地理科学进展*,2020,39(10):1717-1731. [Zhao R D, Fang C L, Liu H M. Progress and prospect of urban resilience research[J]. *Progress in Geography*, 2020, 39(10): 1717-1731.] DOI:10.18306/dlkxjz.2020.10.011
- [82] 王家耀,武芳,郭建忠,等. 时空大数据面临的挑战与机遇[J]. *测绘科学*,2017,42(7):1-7. [Wang J Y, Wu F, Guo J Z, et al. Challenges and opportunities of spatio-temporal big data[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2017,42(7):1-7.] DOI:10.16251/j.cnki.1009-2307.2017.07.001
- [83] 陈芳淼,黄慧萍,贾坤. 时空大数据在城市群建设与管理中的应用研究进展[J]. *地球信息科学学报*,2020,22(6): 1307-1319. [Chen F M, Huang H P, Jia K. Study on the administration and construction of urban agglomeration with spatiotemporal big data: A progress review[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2020,22(6):1307-1319.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190524