

城市交通韧性研究进展及未来发展趋势

嵇涛^{1,2}, 姚炎宏¹, 黄鲜¹, 诸云强^{2*}, 邓社军¹, 于世军¹, 廖华军³

(1. 扬州大学建筑科学与工程学院, 江苏 扬州 225127; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
3. 北京超图软件股份有限公司, 北京 100015)

摘要:交通韧性是指在极端条件下交通系统能够通过自身抵抗、减缓以及吸收的方式维持其系统基本功能和结构的能力,或者能够在合理的时间和成本内恢复原始平衡或者新平衡状态的能力。受全球增温、海平面上升以及快速城市化的影响,极端事件的风险日益增加,从而导致城市交通运输基础设施运营面临着严峻的挑战。在此背景下,如何衡量极端事件下城市交通韧性强度(包括不同极端天气事件强度对其强度的影响),如何监测其时空分布特征和演变趋势,以及多长时间交通运输系统能够恢复正常状态?针对这些问题,目前还缺乏有效的监测方法,尤其是缺乏气候变化对交通韧性影响的时空动态变化监测。因此,如何精准识别极端事件下城市交通韧性的状态,提升自然灾害交通防治水平亟待解决。而随着大数据挖掘技术和时空预测深度学习方法的发展,为重建城市交通韧性强度时空数据集,进而揭示历史极端事件影响下城市交通韧性强度时空演变特征、变化趋势以及影响机制提供了可能。论文对国内外近50年来交通韧性研究进行了梳理和概括,结合国内外交通韧性的相关研究成果对已有的研究中存在的不足进行了评述;并指出了气候变暖情况下交通韧性研究的重点领域和方向,旨在为今后开展交通韧性研究提供新的思路。

关键词:交通韧性;极端事件;气候变化;时空演变;未来趋势

城市的不断扩张给城市交通系统带来了巨大挑战。由于城市化进程中常住人口的流动性需求不断增长,交通需求也会随之大幅增加,同时引发交通拥堵、环境污染和交通事故等一系列负面问题^[1]。而交通拥堵直接影响城市交通服务的质量,如人员和货物的流动,从而大大降低城市的可达性和流动水平^[2]。此外,它还会增加延误、能源消耗和大气污染,进一步还会导致生产力水平下降以及社会生活成本上升^[3]。因此,交通管理部门需要充分规划交通网络,控制交通流动,以确保交通系统顺畅运行和减轻流动压力^[1]。

城市交通系统总是受到不同类型事件的干扰,如自然灾害(台风、暴雨、洪水等)或人为事件(恐怖袭击、罢工和由人为错误或管理不善引起的系统故障等)^[4-6]。由于城市中极端事件发生的风险不断增加,这种风险与城市不断扩张和人口城镇化进程加快密切相关,并且有研究发现城市交通系统抵御未来极端事件和灾害的脆弱性和临界性风险也在增大^[7-8]。因此,韧性的概念也在交通系统中被广大学者所关注。而为应对全球气候变化以及自然灾害等环境因素影响^[9],并提升交通基础设施的高质量发展,国家先后出台了《交通强国建设纲要》《国家

收稿日期 2022-07-25;修订日期:2023-03-12。

基金项目 江苏省基础研究计划(青年基金项目)(BK20210833);中国博士后科学基金面上项目(2021M703175);江苏省双创博士项目(JSSCBS20211025)。[**Foundation:** Natural Science Foundation of Jiangsu Province, No. BK20210833; China Postdoctoral Science Foundation, No. 2021M703175; Double-Creation Doctoral Program of Jiangsu Province, No. JSSCBS20211025.]

第一作者简介 嵇涛(1988—),男,江苏扬州人,中国科学院博士后,研究方向为交通大数据分析建模、城市灾害应急救援与辅助决策。E-mail: jitao@yzu.edu.cn

***通信作者简介** 诸云强(1977—),男,江西广丰人,博士,研究员,研究方向为分布式数据共享关键技术、地理空间数据本体与应用、地学知识图谱及应用、资源环境信息系统。E-mail: zhuyq@lreis.ac.cn

引用格式: 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 Tao, Yao Yanhong, Huang Xian, et al. Progress and future development trend of urban transportation resilience research. Progress in Geography, 2023, 42(5): 1012-1024.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2023.05.014

综合立体交通网指标框架》以及《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》,要求建设现代化高质量综合立体交通网,建立自然灾害交通防治体系,提高交通防灾减灾能力,提升交通网络系统的安全性,增强交通运输网络韧性^[10]。

交通系统作为国家重要的基础设施和民生工程,为社会物资和居民出行提供运输服务保障。而基础设施在城市可持续性中发挥着至关重要的作用,并且基础设施韧性作为城市韧性的重要组成部分,其中交通系统作为维持城市正常运转的关键要素,其韧性的提升直接关乎城市社会经济发展和人民生活质量保障^[11-12]。而目前没有一种可靠的方法能够准确揭示极端事件影响下城市交通韧性时空演变过程,科学阐明全球气候变化(气候变暖造成极端天气事件发生频率及强度变化)对城市交通韧性的影响。因此,本文通过对已有的城市交通韧性相关研究进行整理,综述目前对城市交通韧性的研究进展,对已有的研究中存在的不足进行评述,并提出在气候变化情况下未来极端事件对城市交通韧性研究的具体方向,旨在为今后开展相关研究提供新的思路。

1 城市交通韧性的研究进展

城市交通韧性的研究大约起始于20世纪70年代^[13],从90年代开始交通运输系统韧性研究关注度不断上升。根据Web of Science(WoS)核心合集数据库和中国知网(CNKI)北大中文核心数据库历年国内外发表的交通韧性论文统计发现(图1),英文期

刊发表的数量从2000年以来的零星发表到近年来的爆炸式增长(发文量占比也从不到1%快速跃升到23%左右),其中2010—2021年交通韧性的研究论文呈现出较快增长趋势,尤其是从2018年之后,有关交通韧性的研究论文呈现出近乎直线式上升;而中文期刊关于交通韧性的研究相对起步较晚(2006年1篇),并从2017年开始才逐步呈现出缓慢上升的趋势(2020年14篇,2021年6篇),但总体来看,国内相关交通韧性的研究仍处于初步探索阶段。

从目前交通韧性的研究内容分析,国内外现有的相关研究主要集中在概念框架、指标体系评估方法以及定量评估优化等方面,并在上述相关领域取得了丰硕的研究成果^[14]。

1.1 交通韧性概念框架研究现状

韧性(Resilience)起源于拉丁语“Resilio”,又被称为弹性,意思是系统受到扰动后能恢复到“最初状态”。生态学领域最早开始有关韧性研究,随后又陆续被应用到工程学、经济学和社会学等多个学科领域^[15]。而近年来,随着交通韧性研究的方兴未艾,韧性一词的内涵在交通系统得到了进一步外延拓展(表1)。

城市交通运输系统总是受到不同极端事件的干扰,自然灾害(例如台风、风暴潮、暴雨、洪涝)或人为事件(例如恐怖袭击、罢工和人为管理不善导致的系统故障),其对城市交通运输系统功能的影响可能与对其他城市系统功能影响相同^[6,19,33]。由于城市中发生极端事件的风险日益增加,因此,城市交通运输系统的抵御能力成为交通韧性概念关注的焦点^[7,34]。交通运输系统的韧性不仅是指防止



注:发文量占比指某一年发文量占总发文量的百分数。

图1 2000—2021年中英文期刊交通韧性相关研究历年发表量时序分布及占比

Fig.1 Temporal distribution and percentage of transportation resilience-related publications during 2000–2021

表1 交通系统韧性的定义

Tab.1 Definitions of resilience of transportation systems

交通韧性定义	研究领域	文献
系统在不发生灾难性事件下吸收冲击的能力,以及在发生破坏或灾难后维持其功能的能力	交通系统	[16-19]
系统能够吸收中断的能力,以减少中断的影响并保持货运流动性	货物运输系统	[20-22]
系统面对冲击时的反应,以及继续提供预期服务水平的能力	道路运输系统	[23]
交通系统在经历潜在的破坏性事件后,在合理的时间内恢复到健康运行状态的速度和能力	铁路运输系统	[24-26]
交通网络能够有效吸收破坏性事件,并在合理的时间范围内将系统恢复到等于或优于中断前的服务水平	交通基础设施	[27]
航空网络遭到破坏后维持现状功能及恢复到原先状态的速度	航空运输系统	[28-29]
海上运输受到事件影响中断后,在一段时间内恢复到正常状态的能力	海上运输系统	[30]
轨道系统受到事件干扰后恢复到正常状态的速度和服务水平的适应能力	城市轨道交通系统	[31-32]

系统因干扰而发生故障行为的能力,而且还指系统适应和减少影响并避免灾难性局部后果或整个系统发生故障的能力^[14]。由此可以看出,交通韧性的内涵理解主要在于对其系统应对事件“抵御”干扰和“恢复”的能力。同时,也有学者从交通韧性变化状态角度进行分析,可以分为静态韧性和动态韧性。其中,静态韧性强调的是交通系统自身对干扰事件的抵抗而能够有效维持其功能的能力;而动态韧性则更加强调交通系统受到事件干扰后系统自身如何通过功能恢复到原始状态或者平衡状态,其恢复的速率受到系统自身能力的大小以及外在事情干扰的程度^[35]。

1.2 交通韧性定量评估指标方法研究

交通韧性评估指标方法研究大致可以分为3种:网络拓扑指标评估、韧性特征指标评估以及韧性性能指标评估^[36]。

(1) 网络拓扑指标评估

早期学者们通常把交通网络建模成无加权无向的网络,并利用相关拓扑指标评估交通网络中断前后的变化情况,从而衡量交通网络韧性。主要网络拓扑指标有网络规模(节点数、边数、网络直径)、拓扑结构(平均度、平均路径长度、平均聚集系数、网络介数)、网络性能(网络效率、网络连通度、自然连通度)来衡量航空、地铁、道路韧性^[32,37-41](图2)。网络拓扑指标评估的是静态交通网络的韧性,能够反映出交通系统在受到干扰前后其网络连通状况。随着研究的深入,陆续有学者考虑评估动态交通网络在中断前后的表现特征,利用交通网络建模叠加时间或者交通流量的加权网络,将上述网络拓扑指标与诸如行程时间、客流等表示交通流量的指标有机结合。后期还有学者运用复杂网络理论分

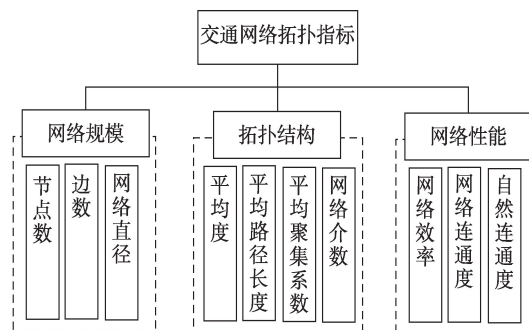


图2 网络拓扑评估指标

Fig.2 Network topology evaluation indicators

别计算子系统网络的网络规模、拓扑结构和网络性能,并综合计算不同子系统间的耦合度、综合协调指数和耦合协调度等,以定量评估交通系统的耦合协调度^[42]。

(2) 韧性特征指标评估

交通韧性特征的指标研究是交通韧性定量评估的必要步骤,相关研究人员采用一个或者多个指标来进行表征,这些指标在测度体系构建过程中起着至关重要的作用,主要包括城市交通运输系统的冗余度(redundancy)、适应性(adaptation)、有效性(eficiency)、鲁棒性(robustness)、依存度(interdependence)、应对性(preparedness)、灵活性(flexibility)以及快捷性(rapidity)等特性。表2统计分析了文献中常用韧性特征指标定义及评估情况。

从表2可以看出,多数文献更加关注交通网络的冗余度和鲁棒性,而系统中断后重新恢复到新的平衡状态,有关适应性研究较少,即反映系统的动态韧性(如适应性、灵活性等),这也是韧性区别于其他概念的重要特征。行程时间和交通流量(行驶速度等)是反映上述各个指标变化的主要性能变量,

表2 基于特征的韧性评估指标
Tab.2 Resilience assessment indicators based on features

特征指标	定义	参考文献
冗余度	系统拥有相同功能的可替代的子系统	[26,40,43-47]
适应性	系统根据外部环境的变化而灵活调节自身的形态、结构或功能,以应对新压力的能力	[31,48-50]
有效性	系统发生中断时仍能保持服务和连通水平的能力	[45,51-53]
鲁棒性	系统抵御和应对外界冲击的能力	[7,54-61]
依存度	各子系统之间的连通性,包括子系统之间关系网络连通性	[24]
应对性	在系统被破坏之前准备某些措施,并通过减少破坏性事件的潜在负面影响来增强系统韧性的能力	[50,62-63]
灵活性	系统应对突发事件冲击并在系统中断后通过应急计划适应变化的能力	[7,24,40,26,54, 56]
快捷性	系统按照优先事项及时实现控制损失并避免未来系统中断目标的能力	[7,64-65]

也是受到外在及内在威胁情况下城市交通韧性变化的重要衡量变量^[14,66]。

(3) 韧性性能指标评估

韧性性能指标是通过反映交通系统在受到干扰事件前后系统性能的变化情况。考虑到“韧性三角形”能够反映减缓各种干扰事件的影响而维持自身功能的能力,同时能够反映交通运输系统功能损失的程度、事件的干扰程度,以及交通运输系统恢复正常功能所需的时间。通过构建极端事件影响下城市交通韧性强度测度体系,用韧性三角形定量化表示,即交通韧性损失程度,反映城市道路网络中系统性能的退化,其计算方法是一周中同一天的正常状态下的交通性能与极端天气事件下的交通性能面积差值(图3)^[67]。其数学积分公式如下:

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

式中: $Q(t)$ 为系统的性能, t_0 为系统受事件干扰时间, t_2 为重新恢复平衡时间, R 为韧性损失。该性能指

标测度了交通网络从事件干扰开始到恢复平衡状态的累积性能损失。

Bruneau等^[67]的研究成果为道路交通运输网络等城市基础设施韧性量化评价奠定了坚实的基础。随着研究的深入,后续学者们从自身视角出发不断地延伸与拓展这一基础模型,从而得出新的计算思路和方法表示交通韧性变化,如通过时间依赖的恢复损失比来定量分析灾害事件对交通系统全过程性能变化状态,包括系统初始平衡状态、系统不平衡状态、中断状态、恢复状态、重新平衡状态,反映系统随事件的发生发展变化的动态过程,从而可以定量评估灾害对系统性能的损失以及不同时间下的性能状况^[68-70]。

相比于上述拓扑指标与韧性特征指标定量评估韧性,性能指标更能刻画出系统在应对干扰事件前后系统性能的整个“抵御”过程,从而能够更好地反映交通网络应对干扰事件系统动态变化的能力,因此被广泛应用于交通韧性定量评估。

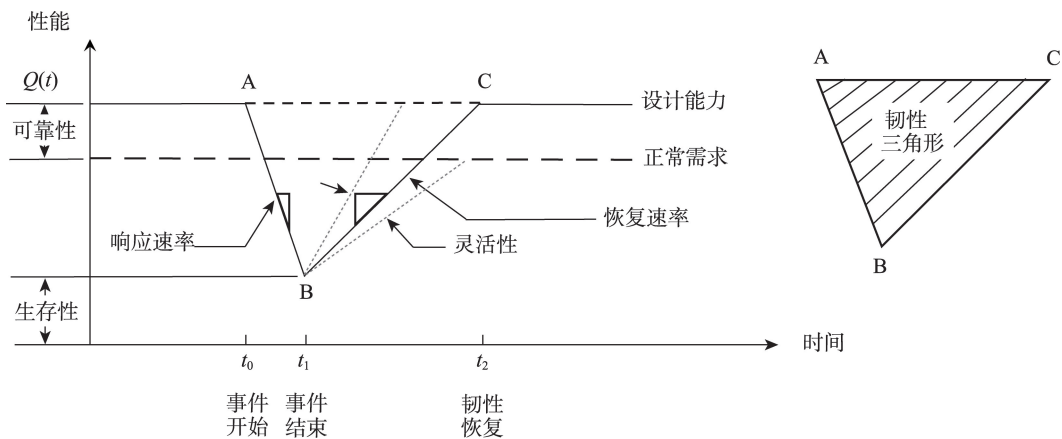


图3 基于韧性三角的韧性损失测度^[69]

Fig.3 Measurement of resilience loss based on the resilience triangle

1.3 交通韧性定量评估优化方法研究

交通韧性定量评估优化方法,一般来说,大致可以分为以下3种:情景模拟方法、数据驱动方法以及统筹优化方法。

(1) 情景模拟方法

情景模拟方法主要假设不同事件干扰下,模拟交通系统可能的性能变化。如利用网络拓扑指标,通过发生极端天气事件时各交通网络节点可能被破坏的节点数和破坏程度,模拟其韧性的变化情况^[71-72]。再如韧性最强为优化指标,模拟海运系统中断情景下如何保障吨位、时间和成本控制前提下,提升海运系统韧性^[73]。随着研究的深入,后期学者们通过模拟不同干扰事件情景,并考虑引入动态交通韧性框架、水文模型结合GIS模拟洪涝灾害、交通信号影响等方式^[74-76],以分析不同交通系统(道路、水运、地铁、航空等)在不同情景下的韧性水平,来识别交通网络中的潜在的脆弱节点,从而探究交通系统受到事件攻击后其韧性状况,并用来指导交通网络优化提升工程。

(2) 数据驱动方法

数据驱动分析是研究城市交通韧性的又一重要有效手段,利用交通出行大数据(例如出租车行驶轨迹数据和公共交通出行数据),通过传统的统计模型、框架测算以及新兴的大数据挖掘技术,构建并评价基于城市交通内部威胁(例如交通事故和人为技术故障)的交通韧性过程,并分析在上述特定事件下交通韧性的形成和发展的历史过程,是目前的普遍做法。如利用浮动车(出租车和公交车等)GPS轨迹数据,结合数据驱动、复杂网络方法以及目前新兴的深度学习技术开展交通系统(航空、道路等)韧性方法研究,分析干扰事件对交通网络性能运营的影响程度及恢复情况^[31,43,77-79]。数据驱动方法能够对交通系统受到干扰事件发生前后全过程的韧性进行评估,通过利用多源异构大数据得出更加反映实际情况的交通网络韧性水平,从而有效指导交通网络开展应急救援,以有效提升系统韧性。

(3) 统筹优化方法

统筹优化交通网络韧性缓解灾害事件给其系统带来的潜在风险,是研究交通韧性的最终目标。近年来,学者们着手开展有关提升交通网络韧性的研究,提出有针对性地提升交通韧性最大化措施或方案。目前交通韧性统筹优化研究主要侧重在预防和恢复2个方面。

预防方面主要针对灾害发生前,通过寻找最佳的交通网络灾前损失最小、资源最大化利用或网络拓扑结构调整最合理等措施,以最小的灾害干扰来有效保障交通网络韧性性能。如考虑到气候变化给交通系统带来的影响,未来几十年交通基础设施可能会面临一系列重大挑战:它们很大程度上无法适应外部条件的变化,使用经常远远超过其预期的寿命,并且影响越来越大^[80]。目前相关学者已经进行了应对气候变化的交通运输系统鲁棒性的研究,通过加强其对气候变化的适应能力,以提升控制、预防和巩固能力的方式来防止因交通基础设施的破坏损毁而导致交通系统的中断^[81-83]。另外,还有少部分学者开展了气候变化影响下的极端天气事件对城市交通韧性影响评价(韧性恢复速率)及预测研究,提出了气候变化影响评估标准指标,阐述极端天气如何影响交通基础设施和运营、气候变化如何改变这些影响极端事件的频率和幅度,以及新型技术进步和社会经济发展如何塑造未来的交通网络,改善或加剧气候变化的影响^[84]。

恢复方面主要针对灾害发生后,交通网络遭受严重破坏将发生运营中断甚至瘫痪时,如何采取合适的恢复措施,以尽快恢复系统正常运行。如极端高温事件导致沥青路面老化/氧化、开裂,极端暴雨事件导致道路淹没、冲刷以及引发滑坡、泥石流,海平面上升影响下的台风—洪涝极端事件导致沿海低洼地区洪水频繁、路基/桥梁侵蚀以及地面沉降等^[85-88],运营管理者如何根据上述事件对交通系统的实时状态做出最优优化决策,以最大限度地降低因灾害事件而带来的破坏,确保系统能够顺畅安全地运行,以成本最小、转移路线地点最安全以及应急救援时间最短等选择最佳疏散路线、疏散地点。后续还有相关学者提出了双目标双层优化方法,以保证资源分配有效性最大化,提升系统韧性^[89]。

2 当前研究中存在的问题

虽然城市交通韧性相关研究在概念框架、指标体系评估方法以及定量评估优化等方面取得了丰硕的研究成果,但如何通过发展和构建高精度的城市交通韧性测度体系,准确揭示极端事件影响下城市交通韧性时空特征,科学阐明灾害事件对城市交通韧性强度的影响机制等相关问题,尤其是气候变暖给城市交通韧性强度带来的变化分析,仅依靠上

述研究进展仍不能够完全实现,各个研究还存在以下不足:

(1) 交通韧性概念框架以及测度体系构建方面。虽然目前国内外学术界尚未有衡量交通韧性强度等级的统一定量指标,普遍认为,冗余度、适应性、鲁棒性、应对性以及快捷性等特性是最能反映交通系统韧性强弱的主要指标^[14,90]。但这些特性又用哪些具体指标表示,目前的相关研究还不够明确。再加之近年来,极端事件发生频率及强度增加,并且系统复杂性、连通性及依赖性不断增加、易受灾地区快速城市化等使得极端事件对交通运输系统的影响不断加剧,这就导致目前的交通韧性测度体系很难精准反映其系统韧性强度。因此,如何构建能够反映城市交通运输系统韧性的测度体系,是精确刻画区域交通运输系统在极端事件影响下其韧性强度的关键所在,而目前的研究严重制约了对交通韧性强度特征的整体和全局性认知。

(2) 极端事件影响下交通韧性时空演变特征分析方面。虽然情景模拟方法可以作为一种研究极端事件下的交通运输韧性研究方法,并能够明确分析出极端事件下的交通运输系统可能存在的薄弱环节。但是在面对现实极端天气事件的影响时,这种方法仍然存在困难,即不能够有效反映极端事件发生前后交通韧性的真实变化情况,从而不能根据极端事件预判其对交通系统正常运行的冲击和中断程度,同时其影响因素多且关系复杂^[18,91]。数据驱动方面,该方法数据需求量巨大,需要同时考虑多源异构数据在时空尺度上如何融合,并且结果可能会受到数据源、数据质量等因素影响^[92]。因此,尝试应用数据驱动的方法来评价在外部威胁下的交通运输网络韧性,需要掌握一定质量的数据和扎实的处理方法^[18,93]。统筹优化方法虽然考虑到灾害事件后资源分配与时间成本,能够为灾后的系统恢复提供最优的方案;但是,该方法需要占用大量的计算资源以及依赖高精度的数学模型,并且考虑的约束因素越多,求解就越复杂。因此,目前情景预测方法具有现实模拟的局限性,而数据驱动以及统筹优化方法也存在数据和计算资源保障等问题,都无法完全满足在时空尺度上城市交通韧性演变特征分析及预测的要求。

(3) 全球气候变化对交通韧性强度的影响机制方面。虽然目前道路、堤坝等交通基础设施建造都是满足特定极端事件等级标准设计的(如百年一遇

的洪水事件,即交通基础设施能够承受在任何情况下1%几率发生该事件的强度),在发生这种情况下的极端事件进行鲁棒性研究是切实可行的。然而,交通系统还面临着气候变化产生其他间接的、非物理的等难以量化的影响^[7]。例如,当极端事件变得更加频繁激烈时,如何设计和提高它们的韧性?又如,如果一条道路设计为能够承受百年一遇的洪水事件,但驾驶员只有抵御50年的洪水事件的经验,那么如何最有效地避免因交通中断而造成交通事故以及如何提升交通恢复速率?而目前上述情景模拟、数据驱动以及统筹优化方法都不能解决此类问题。随着全球气候变暖,极端事件发生频次以及强度的增加,无疑会进一步加大对城市交通运输系统的压力,从而对城市交通韧性(时间、空间、趋势等的变化)产生了巨大的挑战。因此,“气候变化—极端事件”对其时空演变规律的影响有待进一步厘清,尤其是揭示极端事件对城市交通韧性影响的机理,而目前的有关极端事件对交通韧性的影响研究还仅限在个例条件,并不能充分认知极端事件对交通韧性影响的规律特征。

3 未来城市交通韧性的研究方向

联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次评估报告再次指出,过去百年来,全球气候系统正经历着以全球变暖为主要特征的显著变化,并且进入21世纪,全球极端气候事件发生的频率将快速增加且其影响范围呈现扩大趋势^[7,94]。而未来全球气候变化背景下,极端事件对交通韧性时空演变规律的影响有待进一步厘清,包括未来交通韧性强度的空间特征如何变化,哪些地区需要加强交通应急管理,以及交通韧性强度随时间变化趋势如何,等等。这些问题目前还没有明确且肯定的答案^[84]。因此,气候增温背景下采用何种方法研究极端事件对交通韧性影响的时空特征还没有清晰完整的框架。在此背景下,本文认为可以从以下几个方面考虑。

3.1 交通韧性的测度体系研究

城市交通韧性是在适应演化中与周围环境达到了一定的动态平衡。而无论是暴雨、洪涝、台风、风暴潮,都偏离了交通系统所长期适应的通勤环境,从而抑制交通有序组织甚至导致交通瘫痪,并进一步影响城市社会经济的发展^[29,95]。另一方面,

交通系统对极端事件也有一定程度的适应和抵抗能力^[14,18]。当极端事件的强度和频次没有超出交通系统的忍耐限度时,极端事件通常只是降低整个交通系统运行的效率和能力。当极端事件的强度和频次超出交通系统的忍耐限度时,极端事件会导致交通系统大面积瘫痪。总之,极端事件对交通系统的影响通常是负面的^[96]。精确定量描述这一影响,有赖于学者们对极端事件影响交通韧性的理解程度,包括如何提高对交通系统的恢复时间、速率,以及抵抗极端事件机理的准确描述^[93]。然而,过去的工作大多侧重于现象描述,对其如何进行量化测度体系构建,以及深入分析其背后的驱动机理尚较为缺乏。

因此,我们需要探索和提高关于交通系统韧性特征的认知,进一步厘清极端事件对交通韧性的影响,包括如何选择合适的交通韧性指标精确反映极端事件对交通系统的影响;结合极端事件对交通系统中断前准备和中断后恢复行动的模型,创建一个综合交通系统韧性的量化测度方法,并在交通韧性评估的虚实结合中不断调整评估方案,以能够科学揭示交通系统在极端事件影响下的整个演变过程,即初始平衡—相对不平衡—不平衡—动态平衡—恢复平衡。通过计算历次极端事件影响下如图3所示的韧性三角形,从而重建历次极端事件影响下城市交通韧性强度时空数据集,进而监测历史城市交通韧性时空变化特征,并对比极端事件跟周期性事件(如早晚高峰拥堵)所形成的交通韧性定量测度区别。

3.2 城市交通韧性时空演变特征分析研究

基于构建的交通韧性强度测度体系,重建极端事件影响下的城市高时空分辨率交通韧性强度测度体系时空数据集。在此基础上,采用时空统计分析等方法,分析极端事件影响下的城市交通韧性强度时空尺度演变特征,即统计分析在不同极端事件

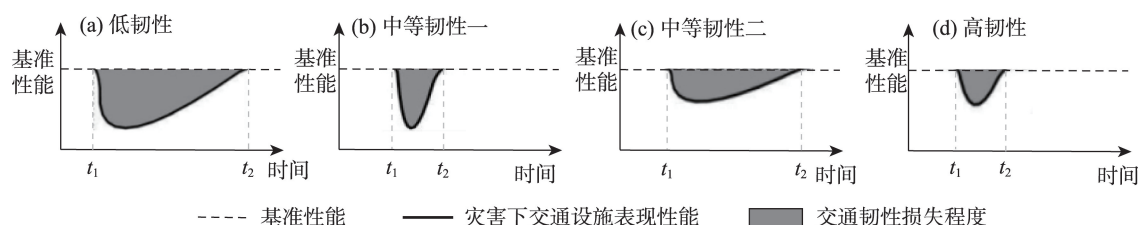
强度下交通韧性强度的表现特征,如不同暴雨强度(暴雨、大暴雨以及特大暴雨)、不同台风预警等级(蓝色、黄色、橙色以及红色)以及在复合极端事件(如台风—暴雨—洪涝)下交通韧性强度的表现特征,以及分析交通韧性强度在不同暴雨强度、不同台风危险等级和复合极端事件下的时间序列和空间演变特征。

因此,我们需要通过构建极端事件影响下城市交通韧性强度测度,即交通韧性损失强度;并根据韧性三角形面积对交通韧性损失强度等级进行划分(图4)。通过统计历次极端事件影响下交通韧性强度等级(低、中等以及高韧性),分析其在时间和空间2个维度的演变特征。在上述研究的基础上,可以对一年内所有发生极端事件影响下的城市交通韧性进行统计,从而进行年际交通损失强度面积的累加,将其结果定义为该空间网格单元上极端事件影响下的年度交通韧性“综合强度”。对各个空间网格,进行逐年度的交通韧性“综合强度”统计,即可获得逐网格、逐年度的交通韧性“综合强度”数据时空序列,并对其年际特征进行分析。

3.3 新技术模拟气候变化影响的交通韧性强度趋势变化研究

当前许多气候变化预测工具包的开发都没有考虑到交通运输等相关部门。空间连贯性和真实天气情况的再现也是未来一个非常重要的需求,因为交通运输容易受到极端天气事件的影响,这些天气事件会在空间上同时影响多个交通节点^[95]。同时,鉴于大数据挖掘和人工智能技术已被证明是评估交通系统性能影响的一种有价值的方法,交通系统需要其发挥更积极的作用,应用这种技术来指导紧急情况下的“准确规划”^[84]。

因此,我们可以通过联合利用多源异构大数据(浮动车GPS、视频监控、手机信令、城市路网、卫星遥感、气象观测及实测潮位观测等数据),根据IPCC



注:本图参考文献[68]绘制。

图4 极端天气时间下城市交通韧性强度的可能情景

Fig.4 Scenarios of urban transportation resilience under extreme weather

的第六次评估报告(sixth assessment report, AR6)的5种代表性浓度路径(representative concentration pathways, RCPs)情景下,以第六次国际耦合模式比较计划(coupled model intercomparison project phase 6, CMIP6)多模式比较模拟数据预测未来极端事件(台风、风暴潮及暴雨)强度的总体可能变化趋势,构建高精度的城市交通韧性强度评价指标体系,并通过深度学习及大数据挖掘的相关算法,构建极端事件对城市交通韧性强度影响的评价及预测方法。此外,联合深度学习预测模型和GIS技术结合和集成,能够规范化模型计算的数据结构,并综合应用组件技术、数据对象访问技术及动态链接库技术等建立可以与GIS嵌入式紧密集成的交通韧性时空动态模拟模块,将预测模型与GIS、RS和数据库管理系统完全集成,为城市交通韧性空间数据管理、模型运算和空间数据可视化与分析集成为一体,进而科学认知极端事件下城市交通韧性强度时空变化规律,提高城市道路网的管理能力和建立完善的极端事件交通应急响应措施,保障中国城市的可持续发展以及应对气候变化的风险管理创新发展。

4 结论与展望

近年来不同极端事件的频发给交通系统带来了巨大的影响。本文根据已有研究成果,系统总结了交通韧性的概念框架、指标体系评估以及定量评估优化等方面的研究进展。目前研究普遍表明,极端事件对交通系统影响明显,不同事件对其影响程度存在时空异质性,但是在气候变化背景下的时空演变特征以及未来的时空变化趋势等还存在较大争议和不确定性。这种不确定性给模型模拟和预测极端事件影响下的交通韧性时空演变特征分析带来了巨大困难。因此,建议未来可以充分利用现有的卫星遥感技术、GIS空间技术并结合模式分析、情景预测等方法加强对极端事件的模拟及预测,以提高极端事件的发生频次、强度、影响范围以及地理分布格局监测能力;同时,通过利用大数据挖掘技术和深度学习的人工智能预测模型对交通韧性强度的时空演变特征进行研究,掌握极端事件影响下交通韧性强度变化的格局与趋势。

参考文献(References)

[1] Farahani R Z, Miandoabchi E, Szeto W Y, et al. A review

- of urban transportation network design problems [J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 229(2): 281-302.
- [2] Ko Y, Jang K, Radke J D. Toward a solar city: Trade-offs between on-site solar energy potential and vehicle energy consumption in San Francisco, California [J]. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2017, 11(6): 460-470.
- [3] Bastos J, Marques P, Batterman S A, et al. Environmental impacts of commuting modes in Lisbon: A life-cycle assessment addressing particulate matter impacts on health [J]. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2019, 13(9): 652-663.
- [4] Suarez P, Anderson W, Mahal V, et al. Impacts of flooding and climate change on urban transportation: A system-wide performance assessment of the Boston Metro Area [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2005, 10(3): 231-244.
- [5] Koetse M J, Rietveld P. The impact of climate change and weather on transport: An overview of empirical findings [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2009, 14(3): 205-221.
- [6] Pregolato M, Ford A, Wilkinson S M, et al. The impact of flooding on road transport: A depth-disruption function [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 55: 67-81.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 翟盘茂, 袁宇锋, 余荣, 等. 气候变化和城市可持续发展 [J]. *科学通报*, 2019, 64(19): 1995-2001. [Zhai Panmao, Yuan Yufeng, Yu Rong, et al. Climate change and sustainable development for cities. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(19): 1995-2001.]
- [10] 杨琦, 张雅妮, 周雨晴, 等. 复杂网络理论及其在公共交通韧性领域的应用综述 [J]. *中国公路学报*, 2022, 35(4): 215-229. [Yang Qi, Zhang Yani, Zhou Yuqing, et al. A review of complex network theory and its application in the resilience of public transportation systems. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(4): 215-229.]
- [11] 周方, 赵伟, 胡翔奎, 等. 基于关键基础设施耦合关系的城市韧性评价研究 [J]. *安全与环境学报*, 2023, 23(4):

- 1014-1021. [Zhou Fang, Zhao Wei, Hu Xiangkui, et al. Research on the urban resilience assessment for critical infrastructure interdependency. *Journal of Safety and Environment*, 2023, 23(4): 1014-1021.]
- [12] 刘洁, 张丽佳, 石振武, 等. 交通运输系统韧性研究综述 [J]. *科技和产业*, 2020, 20(2): 47-52. [Liu Jie, Zhang Lijia, Shi Zhenwu, et al. Summary of research on the resilience of transportation system. *Science Technology and Industry*, 2020, 20(2): 47-52.]
- [13] Holling S C. Resilience and stability of ecological systems [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4(1): 1-23.
- [14] Goncalves L A P J, Ribeiro P J G. Resilience of urban transportation systems. Concept, characteristics, and methods [J]. *Journal of Transport Geography*, 2020, 85: 102727. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2020.102727.
- [15] 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 Rui-dong, Fang Chuanglin, Liu Haimeng. Progress and prospect of urban resilience research. *Progress in Geography*, 2020, 39(10): 1717-1731.]
- [16] Osogami T, Imamichi T, Mizuta H, et al. Toward simulating entire cities with behavioral models of traffic [J]. *IBM Journal of Research and Development*, 2013, 57(5): 1-10. doi: 10.1147/JRD.2013.2264906.
- [17] Reggiani A. Network resilience for transport security: Some methodological considerations [J]. *Transport Policy*, 2013, 28: 63-68.
- [18] Mattsson L-G, Jenelius E. Vulnerability and resilience of transport systems: A discussion of recent research [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015, 81: 16-34.
- [19] Cheng P W, Zai L Y, Di Z, et al. Resilience in transportation systems: A systematic review and future directions [J]. *Transport Reviews*, 2017, 38(4): 479-498.
- [20] Ta C, Goodchild A, Pitera K. Structuring a definition of resilience for the freight transportation system [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2009, 2097: 19-25.
- [21] Miller-hooks E, Zhang X, Faturechi R. Measuring and maximizing resilience of freight transportation networks [J]. *Computers and Operations Research*, 2012, 39(7): 1633-1643.
- [22] Spiegler V L M, Naim M M, Wikner J. A control engineering approach to the assessment of supply chain resilience [J]. *International Journal of Production Research*, 2012, 50(21): 6162-6187.
- [23] Azolin L G, Silva A, Pinto N N. Incorporating public transport in a methodology for assessing resilience in urban mobility [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2020, 85: 102386. doi: 10.1016/j.trd.2020.102386.
- [24] Jian G J, Tang L C, Sun L, et al. Enhancing metro network resilience via localized integration with bus services [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2014, 63: 17-30.
- [25] D'lima M, Medda F. A new measure of resilience: An application to the London underground [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015, 46: 35-46.
- [26] Chan R, Schofer J L. Measuring transportation system resilience: Response of rail transit to weather disruptions [J]. *Natural Hazards Review*, 2016, 17(1): 05015004. doi: 10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000200.
- [27] Freckleton D, Heaslip K, Louisell W, et al. Evaluation of resiliency of transportation networks after disasters [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2012, 2284: 109-116.
- [28] Janic M. Modelling the resilience, friability and costs of an air transport network affected by a large-scale disruptive event [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015, 71: 1-16.
- [29] Zhou L, Chen Z. Measuring the performance of airport resilience to severe weather events [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2020, 83: 102362. doi: 10.1016/j.trd.2020.102362.
- [30] Hossain N, Hosseini S, Jaradat R, et al. A Bayesian network based approach for modeling and assessing resilience: A case study of a full service deep water port [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2019, 189: 378-396.
- [31] Lu Q C. Modeling network resilience of rail transit under operational incidents [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2018, 117: 227-237.
- [32] Zhang D M, Du F, Huang H, et al. Resiliency assessment of urban rail transit networks: Shanghai metro as an example [J]. *Safety Science*, 2018, 106: 230-243.
- [33] Bollinger L A, Bogmans C W J, Chappin E J L, et al. Climate adaptation of interconnected infrastructures: A framework for supporting governance [J]. *Regional Environmental Change*, 2014, 14(3): 919-931.
- [34] Maria, Pregnolato, Alistair, et al. Assessing urban strategies for reducing the impacts of extreme weather on infrastructure networks [J]. *Royal Society Open Science*, 2016, 3(5): 160023. doi: 10.1098/rsos.160023.
- [35] Pan S, Yan H, He J, et al. Vulnerability and resilience of transportation systems: A recent literature review [J].

- Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2021, 581: 126235. doi: 10.1016/j.physa.2021.126235.
- [36] 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: 4262-4276.
- [37] Testa A C, Furtado M N, Alipour A. Resilience to coastal transportation networks faced with extreme climatic events [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2015, 2532: 29-36.
- [38] Akbarzadeh M, Memarmontazerin S, Derrible S, et al. The role of travel demand and network centrality on the connectivity and resilience of an urban street system [J]. Transportation, 2017, 46: 1127-1141.
- [39] Dunn S, Wilkinson S M. Increasing the resilience of air traffic networks using a network graph theory approach [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 90: 39-50.
- [40] 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(1): 1-32.
- [41] 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.
- [42] 薛锋, 何传磊, 黄倩, 等. 多式轨道交通网络的耦合协调度 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(6): 2040-2050. [Xue Feng, He Chuanlei, Huang Qian, et al. Coordination degree of multimodal rail transit network. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(6): 2040-2050.]
- [43] 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.
- [44] Donovan N 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.
- [45] Rashidy R A H E, Grant-mullre S. A composite resilience index for road transport networks [J]. Transport, 2017, 172(3): 1-10.
- [46] Liao T Y, Hu T Y, Ko Y N. A resilience optimization model for transportation networks under disasters [J]. Natural Hazards, 2018, 93(1): 469-489.
- [47] Xiang D X, Anthony C, Sarawut J, et al. Transportation network redundancy: Complementary measures and computational methods [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 114: 68-85.
- [48] Nogal M, O'connor A, Martinez-pastor B, et al. Novel probabilistic resilience assessment framework of transportation networks against extreme weather events [J]. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 2017, 3(3): 04017003. doi:10.1061/AJRUA6.0000908.
- [49] Yazicioglu A Y, Roozbehani M, Dahleh M A. Resilient control of transportation networks by using variable speed limits [J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2017, 5(4): 2011-2022.
- [50] Engler E, Gewies S, Bany P, et al. Trajectory-based multimodal transport management for resilient transportation [J]. Transport Problems, 2018, 13(1): 81-96.
- [51] Chopra S S, Dillon T, Bilec M M, et al. A network-based framework for assessing infrastructure resilience: A case study of the London metro system [J]. Journal of the Royal Society Interface, 2016, 13(118): 20160113. doi: 10.1098/rsif.2016.0113.
- [52] Ganin A A, Kitsak M, Marchese D, et al. Resilience and efficiency in transportation networks [J]. Science Advances, 2017, 3(12): e1701079. doi: 10.1126/sciadv.1701079.
- [53] Mohammad, Ilbeigi. Statistical process control for analyzing resilience of transportation networks [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2019, 33: 155-161.
- [54] Alipour A, Shafei B. Seismic resilience of transportation networks with deteriorating components [J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(8): C4015015. doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001399.
- [55] Kim S, Yeo H. A flow-based vulnerability measure for the resilience of urban road network [J]. Procedia: Social and Behavioral Sciences, 2016, 218: 13-23.
- [56] Soltani-sobh A, Heaslip K, Scarlatos P, et al. Reliability based pre-positioning of recovery centers for resilient transportation infrastructure [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2016, 19: 324-333.
- [57] Wang J W, Wang H F, Zhou Y M, et al. On an integrated approach to resilient transportation systems in emergency situations [J]. Natural Computing, 2019, 18(4): 815-823.
- [58] Calvert S C, Snelder M. A methodology for road traffic resilience analysis and review of related concepts [J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2015, 14(1/2): 130-154.
- [59] Jun Q T, Rudolf H H, Xiao L M. A resilience-oriented approach for quantitatively assessing recurrent spatial-tem-

- poral congestion on urban roads [J]. PLoS One, 2018, 13 (1): e0190616. doi: 10.1371/journal.pone.0190616.
- [60] 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.
- [61] Duan Y Y, Lu F. Structural robustness of city road networks based on community [J]. Computers Environment and Urban Systems, 2013, 41: 75-87.
- [62] Faturechi R, Miller-hooks E. Travel time resilience of roadway networks under disaster [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2014, 70: 47-64.
- [63] Azadeh A, Atrchin N, Salehi V, et al. Modelling and improvement of supply chain with imprecise transportation delays and resilience factors [J]. International Journal of Logistics, 2014, 17(4): 269-282.
- [64] Zobel C W, Khansa L. Characterizing multi-event disaster resilience [J]. Computers and Operations Research, 2014, 42: 83-94.
- [65] 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.
- [66] Balakrishnan S, Zhang Z, Machemehl R, et al. Mapping resilience of Houston freeway network during Hurricane Harvey using extreme travel time metrics [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2020, 47: 101565. doi: 10.1016/j.ijdrr.2020.101565.
- [67] 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, 2012, 19 (4): 733-752.
- [68] Qiang Y, Xu J. Empirical assessment of road network resilience in natural hazards using crowdsourced traffic data [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2019, 34(12): 2434-2450.
- [69] Serdar M Z, Koc M, Al-ghamdi S G. Urban transportation networks resilience: Indicators, disturbances, and assessment methods [J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 76: 103452. doi: 10.1016/j.scs.2021.103452.
- [70] 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.
- [71] Chen Y, Wang J E, Jin F J. Robustness of China's air transport network from 1975 to 2017 [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2020, 539: 122876. doi: 10.1016/j.physa.2019.122876.
- [72] 高鹏, 胡剑波, 魏高乐. 变权重的城市轨道交通复杂网络鲁棒性分析 [J]. 计算机仿真, 2013, 30(9): 153-156.
- [73] Gao Peng, Hu Jianbo, Wei Gaole. Robustness analysis of urban transit network based on complex network with varied weight. Computer Simulation, 2013, 30(9): 153-156.]
- [74] Omer M A, Mostashari A, Nilchiani R, et al. A framework for assessing resiliency of maritime transportation systems [J]. Maritime Policy and Management, 2012, 39: 685-703.
- [75] Li C, Fang Q, Ding L, et al. Time-dependent resilience analysis of a road network in an extreme environment [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020, 85(10): 102395. doi: 10.1016/j.trd.2020.102395.
- [76] Duy P N, Chapman L, Tight M. Resilient transport systems to reduce urban vulnerability to floods in emerging-coastal cities: A case study of Ho Chi Minh City, Vietnam [J]. Travel Behaviour and Society, 2019, 15: 28-43.
- [77] Ganin A A, Mersky A C, Jin A S, et al. Resilience in intelligent transportation systems (ITS) [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 100: 318-329.
- [78] Yin J, Ren X, Liu R, et al. Quantitative analysis for resilience-based urban rail systems: A hybrid knowledge-based and data-driven approach [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2022, 219: 108183. doi: 10.1016/j.res.2021.108183.
- [79] Yuan Z, Ozbay K, Xie K, et al. Using big data to study resilience of taxi and subway trips for hurricanes Sandy and Irene [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2016, 2599: 70-80.
- [80] Wong A, Tan S, Chandramouleeswaran K R, et al. Data-driven analysis of resilience in airline networks [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 143: 102068. doi: 10.1016/j.tre.2020.102068.
- [81] Chester M V, Allenby B. Toward adaptive infrastructure: Flexibility and agility in a non-stationarity age [J]. Sustainable and Resilient Infrastructure, 2019, 4(4): 173-191.
- [82] Meyer M, Weigel B. Climate change and transportation engineering: Preparing for a sustainable future [J]. Journal of Transportation Engineering, 2011, 137(6): 393-403.
- [83] Rattanachot W, Wang Y, Chong D, et al. Adaptation strategies of transport infrastructures to global climate change [J]. Transport Policy, 2015, 41: 159-166.
- [84] Woods D D. Four concepts for resilience and the implications for the future of resilience engineering [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015, 141: 5-9.

- [84] Jaroszweski D, Hooper E, Chapman L. The impact of climate change on urban transport resilience in a changing world [J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2014, 38(4): 448-463.
- [85] 易嘉伟, 王楠, 千家乐, 等. 基于大数据的极端暴雨事件下城市道路交通及人群活动时空响应 [J]. *地理学报*, 2020, 75(3): 497-508. [Yi Jiawei, Wang Nan, Qian Jiale, et al. Spatio-temporal responses of urban road traffic and human activities in an extreme rainfall event using big data. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(3): 497-508.]
- [86] 胡文燕, 李梦雅, 王军, 等. 暴雨内涝影响下的城市道路交通拥挤特征识别 [J]. *地理科学进展*, 2018, 37(6): 772-780. [Hu Wenyan, Li Mengya, Wang Jun, et al. Feature identification of urban road traffic congestion under the influence of rainstorm and waterlogging. *Progress in Geography*, 2018, 37(6): 772-780.]
- [87] 尹占娥, 许世远, 殷杰, 等. 基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估 [J]. *地理学报*, 2010, 65(5): 553-562. [Yin Zhan'e, Xu Shiyuan, Yin Jie, et al. Scenario simulation and risk assessment of urban rainstorm and waterlogging disaster based on small-scale. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(5): 553-562.]
- [88] 殷杰. 基于高精度地形表面模型的城市雨洪情景模拟与应急响应能力评价 [J]. *地理研究*, 2017, 36(6): 1138-1146. [Yin Jie. Urban storm flood scenario simulation and emergency response capability evaluation based on high-precision topographic surface model. *Journal of Geography Research*, 2017, 36(6): 1138-1146.]
- [89] Zhao T, Zhang Y. Transportation infrastructure restoration optimization considering mobility and accessibility in resilience measures [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 117: 102700. doi: 10.1016/j.trc.2020.102700.
- [90] 马令勇, 王振好, 梁静, 等. 基于韧性城市理论的大庆市道路交通空间韧性策略研究 [J]. *河南科学*, 2018, 36(6): 978-984. [Ma Lingyong, Wang Zhenhao, Liang Jing, et al. Research on spatial resilience strategy of Daqing road traffic based on resilient city theory. *Henan Science*, 2018, 36(6): 978-984.]
- [91] Wang H W, Peng Z R, Wang D, 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.
- [92] Loo B P Y, Leung K Y K. Transport resilience: The occupy central movement in Hong Kong from another perspective [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2017, 106: 100-115.
- [93] Zhu Y, Xie K, Ozbay K, et al. Data-driven spatial modeling for quantifying networkwide resilience in the aftermath of hurricanes Irene and Sandy [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2017, 2604: 9-18.
- [94] Ridder N N, Pitman A J, Westra S, et al. Global hotspots for the occurrence of compound events [J]. *Nature Communication*, 2020, 11(1): 5956. doi: 10.1038/s41467-020-20502-8.
- [95] Hao Z, Hao F, Sinch V P, et al. A multivariate approach for statistical assessments of compound extremes [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 565: 87-94.
- [96] Sathlaraj D, Pankasem T O, Wang F, et al. Data-driven analysis on the effects of extreme weather elements on traffic volume in Atlanta, GA, USA [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2018, 72: 212-220.

Progress and future development trend of urban transportation resilience research

JI Tao^{1,2}, YAO Yanhong¹, HUANG Xian¹, ZHU Yunqiang^{2*}, DENG Shejun¹,

YU Shijun¹, LIAO Huajun³

(1. College of Architectural Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, Jiangsu, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

3. SuperMap Software Co., Ltd., Beijing 100015, China)

Abstract: Urban transportation resilience reflects the ability of the transportation system to maintain its basic functions and structure through its resistance, mitigation, and absorption under extreme conditions, or the ability to restore the original equilibrium or reach a new equilibrium state within a reasonable time and with reasonable cost. Global warming, sea-level rise, and rapid urbanization all increase the risk of compound extreme weather events, presenting challenges for the operation of urban-related infrastructure including transportation infrastructure. In this context, some questions become important. For example, how to measure the strength of urban transportation resilience under extreme weather events (including the impact of different extreme weather event intensities on its strength); how to monitor its spatial and temporal features and evolution trends; and how long will it take for the entire system to restore balance? At present, effective monitoring methods for transportation resilience under the influence of extreme events are lacking, especially the monitoring of the temporal and spatial dynamic changes of transportation resilience under climate change, to answer these questions. Therefore, it is urgently needed to solve the problem of accurately identifying the state of urban transportation resilience under extreme weather events and improving the level of prevention and control of transportation system impact of natural hazard-related disasters. The development of big data mining technology and deep learning methods for spatiotemporal prediction made the construction of spatiotemporal datasets for evaluating and predicting urban transportation resilience possible. Such datasets can reveal the spatiotemporal evolution features, changing trends of urban transportation resilience intensity under the influence of extreme weather events, as well as the mechanism of influence. It indicates the key research areas that should be focused on for transportation resilience under climate warming. This article reviewed and summarized the research on transportation resilience in China and internationally in the past 50 years, analyzed the deficiencies in the existing research based on the relevant research results of transportation resilience in China and globally, and identified the key areas and directions of the research on transportation resilience under climate warming in order to provide new ideas for future research on transportation resilience.

Keywords: transportation resilience; compound extreme weather events; climate change; spatiotemporal dynamics; future trends