DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260569

基于贝叶斯网络的城市交通系统韧性评估

杨　辉
(中交第一公路勘察设计研究院有限公司,陕西 西安 710075)

摘　要: 为科学评估城市交通系统韧性,提升交通设施应急保障能力,基于贝叶斯网络构建功能层—特征层—指标层3级城市交通系统韧性评估模型,选取交通系统的4种基本能力作为功能层,8个主要特征作为特征层,18项评价指标作为指标层。以我国6座城市为例,分析了韧性发展趋势并识别了韧性敏感因子。结果表明:2010—2020年间,北京、上海、广州、杭州、武汉、西安的交通系统韧性水平呈现持续增长趋势,各城市交通系统的预防能力、吸收能力、恢复能力和适应能力逐年提升,且不同城市交通系统的韧性能力和特征存在较大差异。交通系统的恢复能力、适应能力、可恢复性、可再利用性、交通基础设施投资和道路交通从业人数是影响韧性水平的主要敏感因素。

关键词: 城市道路;贝叶斯网络;韧性评估;敏感性分析
中图分类号: U491.2　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-7716(2026)11-0018-05

Resilience Assessment of Urban Transportation Systems Based on Bayesian Networks

YANG Hui
(CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: To scientifically evaluate the resilience of urban transportation systems and enhance the emergency support capacity of transportation facilities, a three-level resilience assessment model for urban transportation systems, namely functional layer-feature layer-indicator layer, is constructed based on Bayesian network. Four basic capabilities of the transportation system are selected as the functional layer, eight main characteristics as the feature layer, and 18 evaluation indicators as the indicator layer. Taking six cities in China as examples, the development trend of resilience is analyzed and the resilience-sensitive factors are identified. The results show that from 2010 to 2020, the resilience level of transportation systems in Beijing, Shanghai, Guangzhou, Hangzhou, Wuhan and Xi'an presents a continuous growth trend. The prevention capability, absorption capability, recovery capability and adaptation capability of transportation systems in each city increase year by year, and there are significant differences in resilience capabilities and characteristics among transportation systems of different cities. The recovery capability, adaptation capability, recoverability, reusability, transportation infrastructure investment and the number of employees in road transportation are the main sensitive factors affecting the resilience level.

Keywords: urban road; Bayesian networks; resilience assessment; sensitivity analysis

0　引　言

随着全球气候变化加剧和城市化加速发展,极端天气、交通拥堵、设施故障等扰动事件的频率和强度显著增加,对城市交通系统的正常运行产生了严重威胁[1-2]。作为城市基础设施的重要组成部分,交通系统的风险防御能力直接关系着城市可持续发展水平。韧性作为表征系统抵抗风险能力的关键指标,综合反映了系统在扰动过程中的抵抗、吸收、恢复和适应能力[3-4]。准确评估城市交通系统韧性,对于科学指导交通规划和管理具有重要意义。然而,现有研究在韧性影响因素、量化指标、评价体系等方面尚未达成共识。在此背景下,建立系统完善的韧性评估模型,已成为韧性交通发展面临的首要问题。

当前城市交通韧性评估主要形成拓扑指标法、韧性特征法、系统性能法3类技术路径[5]。其中,拓扑指标法将交通系统抽象为复杂网络,依托介数、聚类系数、平均路径长度等拓扑参数评价韧性[6],仅能反映空间几何特性,无法覆盖非几何维度的韧性表

收稿日期:2026-05-21
作者简介:杨辉(1990—),男,学士,工程师,从事道路与桥梁设计工作。

征[7];韧性特征法通过单一或组合特征指标量化韧性,常用鲁棒性、恢复性等维度开展评价,但指标体系碎片化、难以适配复杂交通系统的综合评估需求[8-10];系统性能法基于韧性三角形理论刻画扰动下的性能衰减与恢复过程,可反映韧性动态演化规律,但系统性能曲线的精准量化与预测仍存在技术瓶颈[11]。城市交通韧性评估属于典型的多属性不确定性决策问题,贝叶斯网络兼具定性因果分析与定量概率推理优势,可有效处理评估过程中的模糊性、随机性问题[12],为交通韧性评估提供了新的技术手段。

本文基于贝叶斯网络构建功能层—特征层—指标层3级城市交通系统韧性评估模型,以北京、上海、广州、杭州、武汉、西安6座城市为实证对象,分析2010—2020年间交通系统韧性演化规律并识别敏感因子。研究成果将进一步丰富交通韧性评估方法,对于科学指导交通规划和管理具有重要参考价值。

1　城市交通系统韧性评估模型构建

1.1　城市交通系统韧性

城市交通系统韧性是指城市交通系统抵抗、减少、吸收扰动的影响,保持可接受的服务水平并在合理成本内恢复正常运行的能力[13]。参考现有研究成果[14],本文揭示了在扰动事件影响下城市交通系统性能变化和韧性特征,如图1所示。其中,在$0<t\leqslant t_1$阶段,交通系统通过预先防护使得性能水平有所提升并维持在稳定状态,体现其预防能力;在$t_1<t\leqslant t_2$阶段,交通系统受到扰动事件影响,其性能水平在达到中断阈值后迅速下降,反映了系统对于扰动冲击的吸收能力;在$t_2<t\leqslant t_3$阶段,交通系统性能水平在扰动结束后逐渐恢复,代表其恢复能力;在$t>t_3$阶段,交通系统完全恢复并达到新的稳态平衡,表现出系统韧性的适应能力。

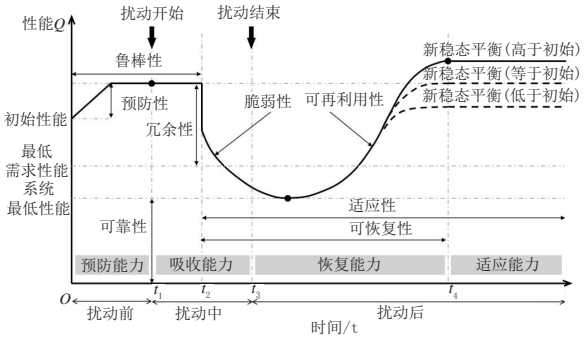


图1　扰动事件下交通系统的性能变化及韧性特征

1.2　韧性评估方法对比及选择

城市交通系统韧性评估属于多属性不确定性决策问题。为科学选取适配方法,从不同维度对现有方法进行系统对比,结果如表1所示。其中,贝叶斯网络方法在不确定性量化、因果关系表达及双向动态推理方面具有显著优势,能够有效适配多因素耦合的综合韧性评估需求,尤其适合开展宏观层面的整体性评价,可为韧性交通规划建设与管理决策提供科学依据。基于此,本文选取该方法构建功能层—特征层—指标层3级城市交通系统韧性评估模型。

表1　韧性评估方法对比

对比维度	拓扑指标法	韧性特征法	系统性能法	贝叶斯网络法(本文)
理论基础	复杂网络理论	韧性工程理论	韧性三角形理论	概率图模型与贝叶斯推理
处理不确定性	较弱	一般	一般	强
因果分析能力	无	弱	弱	强
动态评估能力	静态	半动态	动态	双向动态
主要局限	非几何特征考虑不足	指标体系碎片化	性能曲线量化困难	依赖专家知识建模
适用场景	网络结构韧性分析	特定维度韧性评价	事件驱动的韧性测度	多属性宏观综合评价与规划指导

1.3　贝叶斯网络模型构建

1.3.1　贝叶斯网络基本原理

贝叶斯网络是用来表示变量之间相互依赖关系的概率图模型,本质是利用图结构和概率论来表达和计算变量间的相互关系。贝叶斯网络由有向无环图(directed acyclic graph, DAG)和条件概率表(conditional probability table, CPT)组成,前者定性表征了各个变量间的因果关系,后者定量描述不同变量间的联合概率分布。对于含有n个变量的贝叶斯网络,可通过链式法则计算其联合概率分布,如式(1)所示。贝叶斯网络的分析方法包括正向推理、反向推理和敏感性分析。其中,正向推理是基于根节点概率分布和CPT值计算叶节点概率分布的过程,如式(2)所示;反向推理通过改变叶节点概率分布来计算各个节点先验概率变化情况,如式(3)所示。

$$P(X_1,X_2\cdots X_n)=\prod_{i=1}^{n}P(X_i|\varphi_i) \tag{1}$$

$$P(T=t)=P(T=t|X_1=x_1,\cdots,X_n=x_n)\times P(X_1=x_1,\cdots,X_n=x_n) \tag{2}$$

$$P(X_i|T=t)=\frac{P(X_i=x_i)\times P(T=t|X_i=x_i)}{P(T=t)} \quad (3)$$

式中:n为变量数量;φ_i为变量X_i的父节点;$P(T=t|X_1=x_1,\cdots,X_n=x_n)$表示叶节点$T$在状态$t$的条件概率分布;$P(X_1=x_1,\cdots,X_n=x_n)$表示变量$X_i$的联合概率分布。

1.3.2 韧性评估的贝叶斯网络构建

基于交通系统韧性特征,本文构建如图2所示的贝叶斯网络模型。功能层对应系统韧性的4种基本能力,特征层涵盖8项主要特征,指标层选取18项评价指标。其中,预防能力指系统在扰动前通过预先防护降低风险,体现为预防性与鲁棒性。本文选取防灾工程投资、应急救援人员表征预防性,以城市道路总面积、公交线路总长度、轨道交通运营里程反映鲁棒性;吸收能力指系统在扰动中吸收冲击、维持运行的能力,涵盖鲁棒性、冗余性与脆弱性。本文选取出租车运营数量、公交线路站点数、轨道交通站点数反映冗余性,以交通事故数量、死亡人数反映脆弱性;恢复能力指系统扰动后恢复正常运行的能力,涵盖可恢复性、可靠性与适应性,且可恢复性与脆弱性、可再利用性相关。本文通过机动车保有量、年均交通拥堵指数、日均出行总量反映可靠性,以交通基础设施投资、道路交通从业人数量化可再利用性;适应能力指系统灵活应对新扰动的能力,选取公交客运量、轨道交通客运量与平均出行距离表征。各结构指标汇总如表2所示。

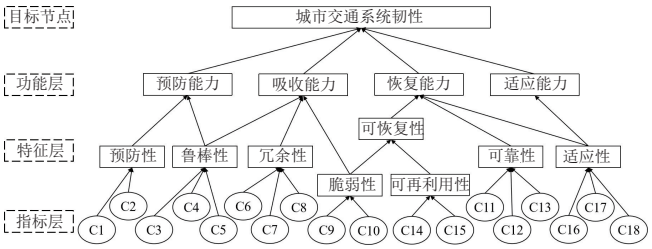


图2　城市交通系统韧性评估的贝叶斯网络模型

表2　贝叶斯网络结构指标

功能层	特征层	指标层	单位	指标层	单位
A1预防能力	B1预防性	C1防灾工程投资	万元	C10死亡人数	人
A2吸收能力	B2鲁棒性	C2应急救援人员	人	C11机动车保有量	辆
A3恢复能力	B3冗余性	C3道路总面积	万平方米	C12年均交通拥堵指数	无量纲
A4适应能力	B4脆弱性	C4公交线路总长度	千米	C13日均出行总量	万人次/日
	B5可再利用性	C5轨道交通运营里程	千米	C14交通基础设施投资	亿元
	B6可恢复性	C6出租车运营数量	辆	C15道路交通从业人数	万人
	B7可靠性	C7公交线路站点数	个	C16公交客运量	万人次/日
	B8适应性	C8轨道交通站点数	个	C17轨道交通客运量	万人次/日
		C9交通事故数量	起	C18平均出行距离	千米

2　城市交通系统韧性评估及分析

2.1　数据获取及处理

本文以北京、上海、广州、杭州、武汉、西安6个城市为例评估城市交通系统韧性。从国家统计局、城市统计年鉴、交通发展年报等多源平台收集上述城市2010—2020年交通发展数据,部分缺失数据采用插值法进行近似补充。

基于GeNIe4.1软件进行贝叶斯网络建模和分析,其步骤为:①根据图2建立韧性评估的贝叶斯网络结构。②采用截断正态分布计算指标层的先验概率分布。以节点C1为例,其先验概率分布表示为C1:(fit~$TNORM$)~(μ, σ^2, UB=max(C1), LB=min(C1)),μ为统计值均值,σ^2为方差,UB为最大值,LB为最小值。③采用布尔表达式计算特征层的概率分布,以节点B5为例,其布尔表达式为(IF(C14≥210||C15≥32,"True","False")),表明当变量C14≥210且C15≥32时,则节点B5为"True",否则为"False"。④采用专家打分法确定功能层节点的CPT并计算其概率分布,以节点A1为例,其包括2个父节点B1、B2,根据专家经验确定其CPT如表3所示,同理可计算功能层各变量先验概率。⑤计算各个城市历年交通系统韧性。

表3　节点A1的条件概率表

预防性	True		False	
鲁棒性	True	False	True	False
True	0.9	0.4	0.3	0.2
False	0.1	0.6	0.7	0.8

2.2　韧性发展趋势分析

基于贝叶斯网络正向推理,计算得出2010—2020年城市交通系统韧性评估结果,如图3所示。

从整体韧性水平来看,6座城市交通系统韧性均呈现持续增长态势,韧性水平区间为37%(2010年西安市)至76%(2020年北京市)。对比不同城市来看,北京、上海、广州3座一线城市的交通系统韧性水平

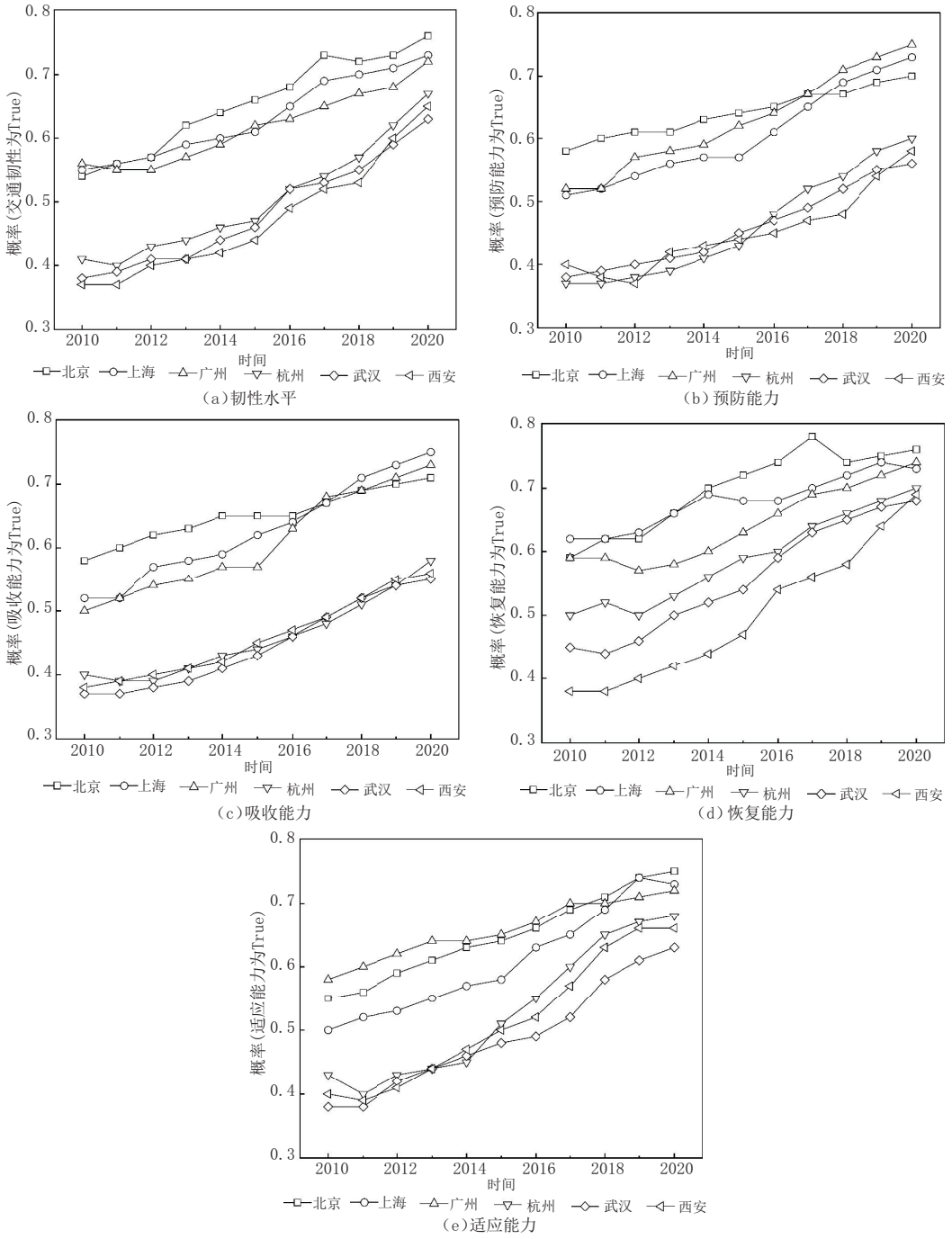


图3　城市交通系统韧性评估结果

整体高于杭州、武汉、西安3座新一线城市,说明交通系统韧性与城市综合实力紧密相关。已有研究证实[15],城市路网交通韧性随人均GDP增长而提升,本文评估结果与该结论相一致。对比不同时间来看,2015年之后各城市交通系统韧性均出现显著提升,这可能由于智慧交通快速发展、交通管理水平不断提高,有效增强了交通系统的风险防控能力。

从分项韧性能力来看,6座城市交通系统的预防能力、吸收能力、恢复能力与适应能力均呈逐年上升趋势。北京、上海、广州的各项韧性能力整体同样高于其余3座城市,这主要与城市规模、经济发展水平、交通管理能力等因素相关。同时,不同城市交通系统在韧性能力与特征方面存在明显差异,例如北京市交通系统的恢复能力、适应能力更强,应急响应与灾后重建能力突出,而上海、广州的预防能力、吸收能力相对更优,展现出更强的风险预防与干扰抵抗能力。

2.3　韧性影响因素敏感性分析

基于贝叶斯网络反向推理,通过调整目标节点概率分布,以节点后验概率变化率表征各变量对系

统韧性的敏感程度，分析结果如图4所示。由分析结果可知，功能层中恢复能力与适应能力是决定交通系统韧性的核心能力，吸收能力和预防能力的影响相对较小；特征层中可恢复性、可再利用性为影响韧性的关键特征，预防性的敏感程度相对较低；指标层中交通基础设施投资、道路交通从业人数对交通韧性的影响较为敏感。

敏感性分析有效识别了影响交通韧性的关键因素。结果表明，为了提升城市交通系统韧性，需重点强化恢复能力和适应能力，提升系统可恢复性与可再利用性，同时应进一步加大交通基础设施投资、加强交通行业人才建设，从而全面提升城市交通系统的风险防控能力。

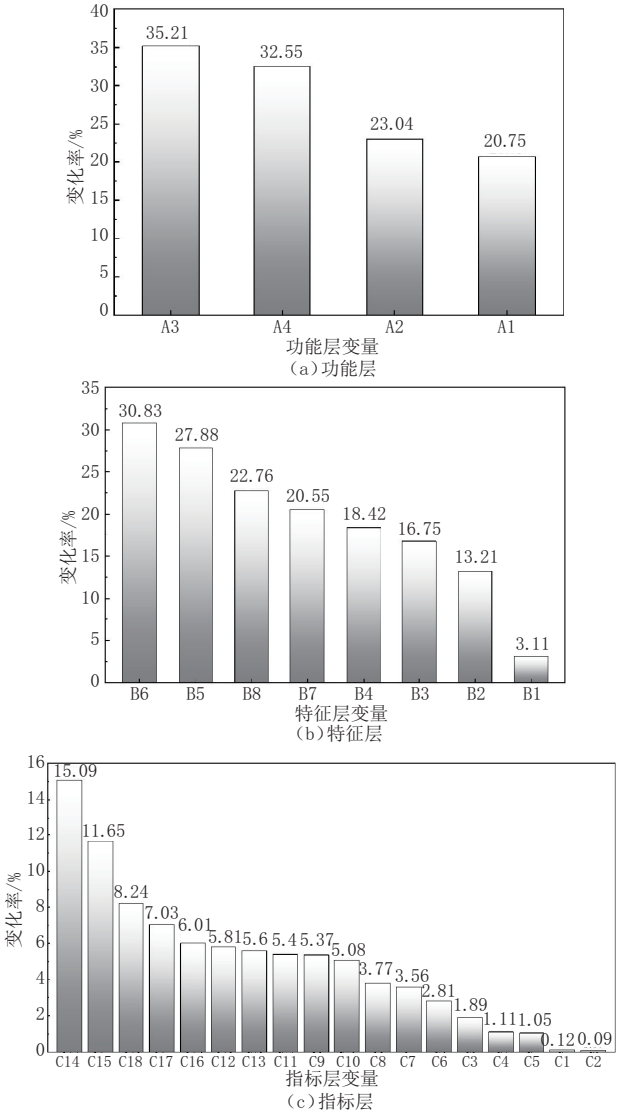


图4　韧性影响因素敏感性分析结果

3　结　语

本文基于贝叶斯网络构建了城市交通系统韧性评估模型，并以6座城市为例，对其韧性发展趋势和敏感因子进行分析。主要结论如下。

（1）2010—2020年间，北京、上海、广州、杭州、武汉、西安6座城市的交通系统韧性水平呈现持续增长趋势，且一线城市交通韧性整体上高于新一线城市。各城市交通系统的预防能力、吸收能力、恢复能力和适应能力均逐年提升，且不同城市交通系统的韧性能力和特征存在较大差异。

（2）敏感性分析表明，贝叶斯网络功能层中的恢复能力和适应能力、特征层中的可恢复性和可再利用性、指标层中的交通基础设施投资和道路交通从业人数，是影响交通系统韧性水平的主要敏感因素。

（3）为了提升城市交通系统韧性，需重点关注系统的恢复能力和适应能力，提升系统的可恢复性和可再利用性，同时建议进一步加强交通基础设施投资和交通行业人才建设，从而全面提升城市交通系统的风险防控能力。

（4）城市交通韧性分析表明本文构建的贝叶斯网络模型具有良好的适用性，但其网络结构和概率参数的确定主要基于专家经验，后续研究可通过机器学习算法从历史数据中挖掘各变量的因果关系和条件概率，从而进一步提高模型的准确性。

参考文献：

[1] 李得伟，张若楠，邹林翰，等.气候适应性城市综合交通系统韧性综述[J].北京交通大学学报，2026，50(1)：1-14.

[2] 金溪，穆延.暴雨内涝下城市路网抗涝韧性评估[J].交通运输系统工程与信息，2024，24(5)：226-236.

[3] 石谨诚，李瑞敏.综合交通系统韧性研究综述[J].北京交通大学学报，2026，50(1)：15-34.

[4] 赵成勇，马飞，崔睿颖，等.都市圈多模式交通网络建模及集成韧性测度[J].清华大学学报(自然科学版)，2025，65(10)：1930-1944.

[5] Wan C, Yang Z, Zhang D, et al. Resilience in transportation systems: a systematic review and future directions[J]. Transport Reviews, 2018, 38(4): 479-498.

[6] 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.

[7] 黄晓明，赵润民.道路交通基础设施韧性研究现状及展望[J].吉林大学学报(工学版)，2023，53(6)：1529-1549.

[8] Gonçalves 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.

[9] Chen H, Zhou R, 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.

[10] Zhou Y, Wang J, Yang H. Resilience of Transportation Systems: Concepts and Comprehensive Review[J]. IEEE Transactions on

（下转第44页）