

城乡路网应对灾害扰动的韧性评估指标研究

白新华, 王靖涵, 李政昱

(郑州西亚斯学院, 河南 郑州 451150)

摘要: 概念层面剖析了自然灾害扰动下城乡路网韧性的内涵, 从韧性核心发展到基于网络拓扑视角明确其概念, 为后续研究筑牢根基。构建城乡路网系统网络拓扑结构是城乡路网系统应对自然灾害扰动的韧性评估研究的关键一步, 将实际路网转化为可量化分析的网络模型, 清晰呈现路网中各要素的连接关系与空间布局。为准确评估韧性, 构建了包含多项关键指标的评估体系, 节点的度和度的分布反映节点连接紧密程度, 中介中心性体现节点在网络中的枢纽作用, 平均路径长度衡量信息或资源传输效率, 节点的聚类系数展示局部连接特性, 网络的节点效率和全局效率则从整体层面评估路网性能。

关键词: 韧性评估; 网络拓扑结构; 城乡路网系统; 自然灾害扰动

中图分类号: U126; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)05-0028-04

Resilience Assessment of Urban-Rural Road Networks to Disaster Disturbances

BAI Xinhua, WANG Jinghan, LI Zhengyu

(Zhengzhou Sias University, Zhengzhou 451150, China)

Abstract: This study begins with a conceptual analysis of the resilience of urban-rural road networks under natural disaster disturbances. It traces the evolution from the core concept of resilience to a clear definition based on the network topology perspective, laying a solid foundation for subsequent research. Constructing the network topology structure of the urban-rural road network system is a crucial step in resilience assessment research for dealing with natural disaster disturbances. This process transforms the actual road network into a quantifiable network model, clearly illustrating the connectivity and spatial layout of its components. To accurately assess resilience, an evaluation system comprising multiple key indicators was developed. The degree and degree distribution of nodes reflect the connectivity tightness; betweenness centrality highlights the hub role of nodes within the network; the average path length measures the efficiency of information or resource transmission; the clustering coefficient of nodes reveals local connectivity characteristics; and network efficiency (node efficiency and global efficiency) evaluates overall road network performance from a holistic perspective.

Keywords: resilience assessment; network topology structure; urban-rural road network system; natural disaster disturbance

0 引言

随着全球气候变化加剧, 暴雨、洪水、地震等自然灾害频发, 对城乡基础设施造成严重破坏。其中, 路网系统作为连接城乡经济、保障应急救援与民生出行的生命线, 其抗灾能力直接关系到区域恢复力与社会稳定。尤其在城乡融合发展背景下, 路网兼

具城市高密度与乡村广覆盖的双重特征, 面临灾害扰动时更易出现“局部瘫痪、全域受阻”的连锁效应。因此, 如何提升城乡路网在灾害冲击下的韧性已成为城乡安全领域的关键课题。

当前研究多聚焦于单一城乡路网或独立交通节点的防灾设计, 却少有从网络拓扑结构(Network Topology)视角系统性分析城乡路网的韧性评估机

收稿日期: 2025-12-16

基金项目: 河南省高校人文社会科学研究一般项目(2025-ZZJH-019); 河南省软科学研究计划项目(252400410295); 河南省社科联2024年度调研课题(SK1-2024-1798); 郑州西亚斯学院2023年度科研资助项目(2023-B004)

作者简介: 白新华(1978—), 男, 硕士, 教授, 主要从事城乡基础设施高质量发展方向的研究工作。

通信作者: 王靖涵(1987—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事财务管理方向的研究工作。电子邮箱: 80235493@qq.com

制。城乡路网在拓扑形态上具有显著异质性:城市区域多呈现高连通度的网格结构,而乡村地区则普遍为树状或放射状拓扑^[1]。这种结构差异导致灾害扰动下的功能失效传播路径与恢复特性存在显著差异。

当前针对城乡路网韧性的评估研究,其深度仍有待加强。当前研究在剖析网络韧性特征时,所选取的韧性评价指标体系存在结构性缺陷,部分指标难以精准刻画灾后城乡路网系统的连通性衰减规律与冗余性恢复机制,导致评估结果与实际韧性水平存在偏差^[2]。

因此,为保证自然灾害扰动下城乡路网系统的平稳运行,亟需深化系统韧性评估研究。提升城乡路网系统中关键城市和道路的抗灾救灾能力和系统恢复能力,基于韧性理论进行城乡路网系统规划、建设与运营,具有重大的现实意义和科学价值。

1 自然灾害扰动下的城乡路网韧性的概念

1.1 韧性的核心内涵与发展

“韧性”(resilience)一词源于物理工程学科,指材料在承受外力作用变形后恢复其原形的能力^[3]。如今其内涵已广泛延伸至社会学、应用心理学、工程管理等多个学科领域。在复杂网络学科视角下,韧性被普遍定义为一个网络系统在面对内外部扰动或冲击时,吸收扰动、维持初始结构与功能、适应变化并最终恢复至期望状态或实现有效转型的能力^[4]。

在基础设施系统领域,特别是交通路网系统研究中,工程与社会经济双重属性进一步丰富了韧性概念^[5]。城乡网络韧性关注的是交通基础设施系统在面临极端事件(如自然灾害、人为事故、社会事件等)时,抵御破坏、维持并快速恢复关键通行能力,并保障社会基本出行需求与应急响应的综合能力。其评估维度通常包括鲁棒性(robustness,抵抗冲击的能力)、冗余性(redundancy,提供替代路径的能力)、快速性(rapidity,恢复的速度与效率)和资源性(resourcefulness,调动资源应对危机的组织能力)^[6]。

1.2 基于网络拓扑视角的城乡路网韧性概念界定

结合韧性的一般内涵、自然灾害扰动特性以及城乡路网的结构功能差异,本文研究进行如下概念界定:

自然灾害扰动下的城乡路网韧性是指城乡道路网络作为一个复杂空间网络系统,在遭受特定自然灾害事件冲击时,凭借其内在的网络拓扑结构特性

(如连接模式、节点重要性分布、路径多样性、模块化程度等),所展现出的抵抗扰动能力、维持连通能力、适应恢复能力、城乡差异适应能力^[7]。

2 构建城乡路网系统网络拓扑结构

在城乡路网系统的研究中,网络拓扑结构的构建是关键步骤之一。在评估城乡路网系统应对自然灾害扰动的韧性时,路网的拓扑结构成为分析的基础,决定了系统的抗扰能力、恢复能力及其适应性^[8]。因此,合理地构建城乡路网系统的网络拓扑结构是进行后续韧性评估的前提。

若要深入分析城乡路网系统网络结构模型的拓扑属性,关键在于把路网中的各类对象科学合理地抽象为以点和线构成的拓扑模型^[9]。为全面、综合地考虑公路网络拓扑结构在静态与动态层面的特性,需借助复杂网络理论构建拓扑模型,并通过计算节点的度、平均最短路径等拓扑指标,来精准衡量公路网络在面对自然灾害扰动时所具备的韧性^[10]。

本研究采用节点一边双要素图论模型抽象城乡路网系统。模型以空间地理路网数据为基础,将道路交叉口抽象为节点集,路段实体抽象为边集,形成有向加权图结构。其核心在于通过差异化规则处理城乡拓扑特性,并赋予多维动态属性以耦合自然灾害扰动因素。

$$G=(V,E) \tag{1}$$

式中: V 为节点,即道路交汇点(信号灯控制或无控制),也包含一些特殊节点:隧道出入口、桥梁端点、应急设施(医院或消防站); E 为边,这里的边属于有向边是因为在城市的道路中存在单向通行道路。

表 1 节点生成规则

区域类型	节点选取标准	示例
城市区域	道路交叉口、公交枢纽、应急设施	十字路口、地铁站、医院
乡村区域	乡镇中心路口、村道关键连接点	村委会路口、跨河桥端点

边的构建本质是将连续道路实体转化为离散拓扑连接的过程,其规则设计需同时满足空间真实性、功能合理性及城乡差异性^[11]。

3 基于复杂网络拓扑结构的城乡路网韧性评估指标体系

基于建立的城乡路网系统网络拓扑模型选取 5 类网络拓扑指标作为路网韧性评价指标值,分别为:节点的度和度的分布、中介中心性、平均路径长

度、节点的聚类系数、网络的节点效率和全局效率。

选取上述五个网络拓扑指标,能全面精准衡量公路网络面对自然灾害扰动时的城乡路网韧性。这些指标从不同维度出发,既关注了路网中节点的连接情况、控制能力,又考虑了信息传输效率与局部、整体的紧密程度,可综合反映路网的特性与功能表现,为评估路网在自然灾害下的韧性提供科学、系统的分析框架^[12]。

3.1 节点的度和度的分布

在城乡路网网络拓扑结构中,节点的度指的是与该路网节点直接相连的边的数量,它直观反映了路网节点在网络中的连接丰富程度。与节点 i 相连通的边的数量用 D_i 来表示,节点度的计算公式为:

$$D_i = \sum_{j=1}^n M_{ij} \quad (2)$$

式中: M_{ij} 为城乡路网拓扑结构邻接矩阵中的各个元素值,元素值表示节点 i 与节点 j 的是否存在连接关系。若两点相连通,值为1;反之,值为0。在自然灾害扰动下,节点的度是衡量城乡路网局部受到冲击时路网韧性的关键指标。度值高的节点通常是城乡路网中的关键枢纽节点,如大型交通枢纽、重要路口等。一旦这些路网节点因灾害受损,将直接导致路网中的大量道路中断,引发路网交通的瘫痪^[13]。因此,节点度越高,在灾害中受损时对路网韧性的冲击时造成的灾害损失往往就越大。

作为描述城乡路网系统中节点统计特征的度,能展现整个路网连接的整体性和均衡性。如果路网中各个节点的度值分布均匀,路网的关键路口不会因自然灾害的扰动出现大范围的交通瘫痪。反之,若度的分布过于集中,即各个节点的度值较为离散,路网在灾害中就极易出现脆弱性,度值高的路口节点会成为自然灾害扰动后对路网造成大范围瘫痪的关键节点^[14]。

3.2 中介中心性

中介中心性是衡量路网韧性的关键指标,测量节点在位于图中其他“点对”的“中间”的程度。中介中心性的计算公式为:

$$D_i = \frac{q_j(i)}{q_j} \quad (3)$$

式中: q_j 为节点 j 到节点 f 之间最短路径的数量,而 $q_j(i)$ 则为节点 j 到节点 f 之间最短路径中经过节点 i 的数量。

在城乡路网网络拓扑结构系统里,中介中心性高的

节点通常是关键的“桥梁”或“交通枢纽”。这类节点担负着交通中转的角色,对维持路网的整体连通性和信息流通起着至关重要的作用。

当自然灾害发生时,路网会受到扰动,部分节点和路段可能受损。若中介中心性高的节点受损,原最短路径中断,交通必须绕行进而使得路网的紧密性受到了割裂,连通性大幅下降,进而严重影响路网的韧性^[15]。

3.3 平均路径长度

平均路径长度是网络中任意两个节点之间最短路径长度的平均值,反映了路网中节点联系的紧密程度与信息或交通传输的效率,其计算公式为:

$$L = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i>j} d_{ij} \quad (4)$$

式中: d_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间最短路径的长度; N 为网络中节点的数量。

在自然灾害扰动下,路网结构会受到冲击破坏,之前相互连通的最短路径的两地则会无法通行。此时,平均路径长度的变化能够直观反映路网韧性的变化。若平均路径长度显著增加,说明路网中节点间的连接变得更为松散,信息或交通传输需要经过更多节点,路网韧性则会变得较为脆弱。反之,若平均路径长度变化较小或保持稳定,则表明路网具有较强的韧性,即使灾害后也能够维持较好路网系统的连通性和传输效率。

3.4 节点的聚类系数

节点的聚类系数衡量的是节点邻居之间相互连接的程度,即一个节点的邻居节点之间实际存在的边数与这些邻居节点之间可能存在的最大边数之比,其计算公式为:

$$G_i = \frac{2E_i}{K_i(K_i-1)} \quad (5)$$

式中: E_i 为节点 i 的邻居节点之间实际存在的边数,而 $K_i(K_i-1)$ 为节点 i 的 K_i 个邻居节点之间可能存在的最大边数。

在城乡路网系统里,聚类系数高的区域意味着道路网络更为密集,节点间的连接更加紧密,形成了相对独立且稳定的局部子网络。当自然灾害发生时,路网会受到不同程度的扰动,部分路段或节点可能受损。此时,聚类系数高的区域由于内部连接丰富,具有较强的自我修复和维持功能的能力。即使某些节点或路段失效,信息或交通仍可通过其他路径在局部子网络内流通,不会导致整个区域交通瘫

疾。反之,聚类系数低的区域,道路连接较为稀疏,节点间依赖单一路径进行连接。一旦这条路径因灾害中断,整个区域的连通性将受到严重影响,路网韧性较差^[16]。

3.5 网络的节点效率和全局效率

节点效率聚焦于局部连通性,衡量网络中特定节点到达所有其他节点的平均便捷程度(为节点到其他所有节点最短路径倒数之和的平均值)。其计算公式为:

$$E_i = \frac{1}{N-1} \sum_{j \neq i} \frac{1}{d_{ij}} \quad (6)$$

节点效率用于量化单个节点在网络中的信息传递能力。在自然灾害扰动下,若某节点因灾害受损(如道路中断、桥梁坍塌),其与周围节点的最短路径长度会显著增加,导致该节点的效率降低。具体计算时,先确定该节点到其他所有节点的最短路径长度,取其倒数并求平均值,该值越小,表明节点在灾害后的信息传递能力越弱,路网局部韧性越差。

全局效率则从宏观层面评估整个网络的平均连通性能(计算为网络中所有节点对之间最短路径倒数之和的平均值)。它是度量网络整体韧性最直接的拓扑指标之一。自然灾害扰动会破坏路网结构,使部分节点间最短路径变长或中断,导致全局效率降低。其计算公式为:

$$E_{\text{global}} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{j \neq i} \frac{1}{d_{ij}} \quad (7)$$

通过对比灾前灾后的节点效率和全局效率,可定量评估自然灾害对城乡路网系统网络拓扑结构韧性的影响,为路网规划、灾害预防和应急响应提供科学依据,如识别关键脆弱节点、优化路网拓扑结构以提升整体韧性。

4 结 语

基于网络拓扑结构的城乡路网系统应对自然灾害扰动的韧性并非单纯指路网在灾害后的恢复能力,而是涵盖了路网在遭受冲击时维持连通性与功

能性、快速恢复并实现功能提升与结构优化的综合能力,节点的度和度的分布能反映节点重要程度与路网连接特征,中介中心性可识别关键中转节点,平均路径长度衡量信息传输效率,节点的聚类系数体现局部网络紧密性,网络的节点效率和全局效率从整体角度评估路网功能。

参考文献:

- [1] Shi Y, Wang N, Ellingwood R B. Advanced terrain-adaptive tropical cyclone wind field modeling using deep learning for infrastructure resilience planning[J]. Structural Safety, 2025, 114102580-102580.
- [2] Alexopoulos J M, Niemi A, Skobiej B, et al. Examination of the Critical Infrastructure Resilience Directive From the Maritime Point of View[J]. Journal of Common Market Studies, 2024, 63(2): 667-678.
- [3] 唐莹,陈梦涵.农业基础设施对农业经济韧性的作用机制与效应研究[J].农林经济管理学报,2023,22(3):292-300.
- [4] 陶希东.中国韧性城市建设:内涵特征、短板问题与规划策略[J].城市规划,2022,46(12):28-34;66.
- [5] 段怡嫣,翟国方,李文静.城市韧性测度的国际研究进展[J].国际城市规划,2021,36(6):79-85.
- [6] 罗紫元,曾坚.城市化品质、城市韧性与“台风-暴雨”灾害风险分析——以7个东南沿海省市为例[J].科技导报,2021,39(15):124-134.
- [7] 刘彦平.城市韧性系统发展测度——基于中国288个城市的实证研究[J].城市发展研究,2021,28(6):93-100.
- [8] 毕玮,汤育春,冒婷婷,等.城市基础设施系统韧性管理综述[J].中国安全科学学报,2021,31(6):14-28.
- [9] 吴嘉琪,游鸽.城市灾害韧性综合评价指标体系的构建——以深圳市为例[J].城市与减灾,2021(3):39-45.
- [10] 师满江,曹琦.城乡规划视角下韧性理论研究进展及提升措施[J].西部人居环境学刊,2019,34(6):32-41.
- [11] 石媛,袁菲,张海波.城市社区防灾韧性评价指标研究[J].防灾科技学院学报,2019,21(4):47-54.
- [12] 廖茂林,苏杨,李菲菲.韧性系统框架下的城市社区建设[J].中国行政管理,2018(4):57-62.
- [13] 王晶,刘昊天,朱建明.基于韧性城市视角的冰雪天气下路网恢复问题研究[J].中国管理科学,2018,26(3):177-187.
- [14] 戴伟,孙一民,韩·迈尔,等.气候变化下的三角洲城市韧性规划研究[J].城市规划,2017,41(12):26-34.
- [15] 李亚,翟国方,顾福妹.城市基础设施韧性的定量评估方法研究综述[J].城市发展研究,2016,23(6):113-122.
- [16] 郭小东,苏经宇,王志涛.韧性理论视角下的城市安全减灾[J].上海城市规划,2016(1):41-44;71.