文章编号:1673-0291(2026)01-0071-12 **DOI**:10.11860/j.issn.1673-0291.20250086

考虑级联效应的煤炭公铁联运网络韧性评估模型

李尚洋[1],陈军华[1],崔赞扬[1],常 征[2],温棹华[1]
(1.北京交通大学 交通运输学院,北京 100044;2.交通运输部公路科学研究院,北京 100088)

摘 要:针对既有研究中对公铁耦合拓扑刻画不足、节点失效下跨系统负载转移与传输时间滞后机理考虑不充分等问题,构建涵盖铁路-公路协同结构的煤炭多模式运输网络拓扑模型,提出考虑容量约束、跨系统转运与时间滞后的公铁联运网络级联效应故障演化机制.面向扰动全过程的功能保持与恢复需求,建立由网络抵抗能力、吸收能力与恢复能力构成的三维韧性评估指标体系,用于量化不同扰动强度与传播范围下网络功能的衰减与回升特征.结合网络结构属性与运力分布特征,设计两类负载重分配策略,比较其在关键节点失效、连锁拥塞与跨方式替代情景中的韧性差异.为刻画蓄意攻击、自然灾害等差异化扰动对系统演化的影响,引入基于灰度信息的动态扰动发生策略,模拟在不同网络结构掌握水平条件下的攻击选择行为与韧性演化路径.最后,以中国典型煤炭运输通道为案例开展仿真验证.研究结果表明:所提出的模型能够有效捕捉关键节点失效特征与网络级联演化规律,负载重分配策略与扰动模式对系统韧性表现差异显著.相关成果可为煤炭运输网络韧性提升、公铁协同运力配置优化与突发事件应对提供理论依据与决策支持.

关键词:煤炭运输;公铁联运;级联效应;韧性评估;灰度信息
中图分类号:U169.6 **文献标志码**:A

A resilience assessment model for coal multimodal transport networks considering cascading failures

LI Shangyang[1], *CHEN Junhua*[1], *CUI Zanyang*[1], *CHANG Zheng*[2], *WEN Zhaohua*[1]
(1.School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2.Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: To address the limitations of existing research in adequately characterizing road-rail topological coupling and the mechanisms of cross-system load transfer and transmission time lags during node failures, this study constructs a topology model for coal multimodal transport networks that incorporates road-rail synergistic structures. A cascading failure evolution mechanism is proposed, explicitly accounting for capacity constraints, cross-system transshipment, and transmission time lags. Addressing functional maintenance and recovery needs throughout the disturbance lifecycle, a three-dimensional resilience assessment index system, comprising resistance, absorption, and recovery capabilities, is established to quantify functional attenua-

收稿日期:2025-06-26;**修回日期**:2025-09-06
基金项目:国家重点研发计划(2024YFA1012904);中国国家铁路集团有限公司科技研发计划(N2024X016);中央高校基本科研业务费专项资金(2022JBQY005)
Foundation items: National Key R&D Plan (2024YFA1012904); China Railway Science and Technology Development Plan Project (N2024X016); Fundamental Research Funds for the Central Universities(2022JBQY005)
第一作者:李尚洋(2001—),男,陕西商洛人,博士生.研究方向为韧性交通.**email**:23111238@bjtu.edu.cn.
通信作者:陈军华(1982—),男,福建南平人,教授,博士.**email**:cjh@bjtu.edu.cn.

引用格式:李尚洋,陈军华,崔赞扬,等.考虑级联效应的煤炭公铁联运网络韧性评估模型[J].北京交通大学学报,2026,50(1):71-82.
LI Shangyang, CHEN Junhua, CUI Zanyang, et al. A resilience assessment model for coal multimodal transport networks considering cascading failures[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2026, 50(1): 71-82.(in Chinese)

tion and restoration under varying disturbance intensities and scopes. Furthermore, two load redistribution strategies based on network structure and capacity distribution are designed to compare resilience under scenarios of key node failure, cascading congestion, and cross-mode substitution. To characterize the impact of differentiated disturbances such as intentional attacks and natural disasters, a dynamic disturbance strategy based on grey information is introduced to simulate attack selection and resilience evolution under varying levels of network knowledge. Finally, a typical Chinese coal transport corridor is used as a case study to simulate the scenario. Simulation results demonstrate that the proposed model effectively captures key node failure characteristics and cascading evolution dynamics. The findings reveal that load redistribution strategies and disturbance modes significantly influence system resilience, providing a theoretical basis for enhancing network resilience, optimizing road-rail capacity allocation, and improving emergency response.

Keywords: coal transportation; rail-road intermodal transport; cascading effect; resilience assessment; gray information

煤炭产业是支撑我国国民经济发展的基础性、战略性产业.国家统计局数据显示,2024年煤炭消费量占能源消费总量的53.2%,当前,煤炭仍是能源供应的“压舱石”.我国煤炭资源禀赋与能源需求呈逆向分布格局,晋陕蒙新四大主产区贡献全国约76%的产量[1],却仅承载约28%的消费需求,由此形成“西煤东运、北煤南运”的长期运输格局.煤炭需通过1 000~2 500公里的多交通方式运输链向东部经济中心调运,这种供需空间错配塑造了复杂的能源供应链拓扑结构,使煤炭运输网络成为保障能源安全与国计民生的重要枢纽.

文献[2]中提出建设山西、蒙西、蒙东、陕北、新疆五大煤炭供应保障基地.这一生产布局深刻影响着煤炭物流走向,使得保障煤炭跨区调配的运输体系成为关键.近年来,我国已形成全球规模领先的多式联运煤炭运输体系.并构建了以铁路为主体、水路为辅助、公路为补充的多式联运体系[3].煤炭运输依托“七纵五横”铁路骨架与长江及沿海港口水运主通道,辅以区域公路短途集疏运,共同构筑了高效的“干线-支线”分层网络.然而,多运输方式耦合存在系统脆弱性:既受制于铁路“点-线”结构对极端天气与突发事件的敏感性及长江航运的水文约束,又因方式间强关联而面临连锁失效风险.局部节点或通道故障易通过负载转移与拥塞扩散在网络中传播,进而演化为系统性中断[4].

针对复杂运输网络在扰动下的脆弱性问题,学界广泛开展了级联故障建模与系统韧性评估研究.级联故障模型旨在刻画故障在网络结构中的传播过程及其引发的系统功能退化,是评估脆弱性的重要手段[5].为了研究复杂网络中失效的传播和影响,文献[6]提出了耦合映射晶格(Coupled Map Lattice,CML)模型,由于其良好的时空和动态特性,可以更好地描述复杂网络中失效和相互作用的动态传播,已广泛应用于城市公交和地铁网络的研究[7-8].在CML模型基础上,文献[9]引入节点负载与容量关系,构建基于负载变化的故障传播模型,增强了对节点能力的刻画.文献[10]进一步将该模型应用于城市轨道网络,分析结构特征与客流分布对节点失效概率的影响.针对多式联运系统的耦合特性,文献[11]扩展CML模型,模拟不同运输方式间的失效耦合路径,探索联运系统中级联效应的动态行为;文献[12]构建了地铁网络的相继故障传播模型.文献[13]从拓扑结构出发评估公交网络的鲁棒性;在韧性评估与恢复的研究方面,文献[14]聚焦铁路快捷货运网络的级联脆弱性,进一步揭示不同攻击策略对系统稳定性的影响.目前,交通网络韧性的评估尚未形成统一的标准,现有研究多集中于静态韧性测度.文献[15]对长沙地铁网络的网络特征进行详细分析,并通过4项网络鲁棒性评价指标,分析了在级联失效情况下长沙市地铁网络的鲁棒性.文献[16]系统界定了交通网络韧性的内涵,提出涵盖“抵抗扰动、吸收冲击、恢复运行”的全过程积分型韧性指数,确立了量化评估的理论框架;在动态过程建模与恢复研究方面,文献[17]构建了考虑恢复策略的级联失效模型,通过地铁网络实证验证其在拟合实际交通故障传播过程中的有效性.文献[18]运用Space L法建立了北京、上海、广州3大城市的无权无向网络模型,对网络特性及面对随机攻击和蓄意攻击时的网络鲁棒性进行了对比.文献[19]提出了一种新的具有4种混合失效模式的级联失效模型,针对供应链网络采用两阶段恢复的联合改进模型来增强系统韧性;在多模式交通网络的脆弱性研究方面.近年来,学者逐渐将研究视角由单一运输方式拓展至多模式交通网络,关注不同运输方式耦合下

的运输系统整体鲁棒性与脆弱性特征.文献[20]以山西煤炭运输网络为例,评估了多模式交通网络的结构鲁棒性,但其研究未能深入揭示铁路与公路间的动态耦合机制.文献[21]聚焦航空与高铁网络,从城市群视角识别关键节点,体现了运输网络脆弱性识别的端到端思路.文献[22]在空铁联运网络中引入竞争效应,构建兼顾修复成本与性能恢复的双目标优化模型,为提高网络恢复效率提供新思路.

尽管现有研究在级联传播建模与多模式网络分析方面已有积累,但仍存在明显不足:一是研究对象多局限于城市客运,针对煤炭运输系统的韧性评估相对匮乏;二是模型构建常将多式联运简化为静态拓扑或单一方式叠加,忽视了模态间的动态负载转移与依赖,难以揭示实际的扰动传播规律;三是评估体系侧重静态鲁棒性,缺乏对动态环境下系统功能保持与吸纳恢复能力的考量.

针对上述局限,立足国家能源安全战略,聚焦煤炭公铁联运网络展开研究:首先,构建“铁路干线-公路支线”复合网络模型,还原我国煤炭集运端的物理网络结构;然后,引入多方式耦合级联故障机制,刻画扰动在公铁间的跨模态传播与联动失效特征;最后,建立涵盖“抵抗-吸收-恢复”的多维动态韧性评估体系,识别关键脆弱环节,为提升系统稳定性提供量化依据与改进策略.

1　煤炭公铁联运网络拓扑构建

煤炭公铁联运网络的拓扑结构构成了级联效应的物理基础.采用Space-L方法,构建以公路与铁路为核心的煤炭联运网络模型.该网络抽象为一个二部图 $G=(V,E)$,其中节点集合 V 由两类节点组成:其中 S^{rail} 表示铁路站点,S^{road} 表示公路煤炭运输节点;边集合 E 表示连接节点之间的运输线路.对于每条边 $e_{i,j}\in E$,其权重 $w_{i,j}$ 为 i,j 之间的距离.

针对公铁耦合特性,设计了包含“虚拟节点”与“转运边”的连接机制:将铁路站点在公路层投影为虚拟节点,并通过转运边 $e_{i,j}^{\text{TP}}$ 将两者相连,以此表征跨运输层级的物理衔接.同时,将负载经过转运边时的换装作业时间记为 t^{TP},作为联运转换的时间成本.最终构建的煤炭多模式运输网络,如图1所示.图1中,联运网络由铁路网络与公路网络两层组成:①上层为铁路网络,其节点 S^{rail} 表示主要的铁路运输枢纽或装卸站点,节点间通过铁路线路相互连接;下层为公路网络,其节点 S^{road} 表示公路运输中的中转站点或非联运节点,节点之间通过公路线路形成较为灵活的短途运输网络.②虚线表示的为“最远耦合半径”用于限定铁路节点与可联运公路节点之间的最大连接范围,为保证参数设置的可行性,耦合半径一般不超过铁路站点间平均站间距.仅当公路节点位于某一铁路节点的耦合半径内时,该节点对可进行“公转铁”或“铁转公”作业,实现跨运输方式的负载转移.位于耦合半径外的公路节点则仅作为单一公路运输节点运行,不参与联运.

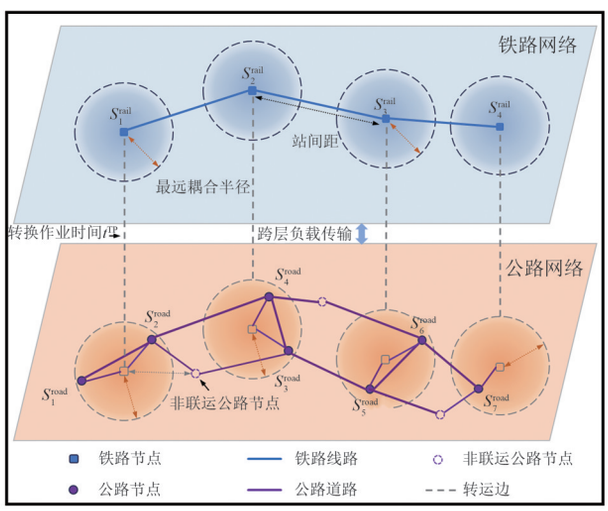


图 1　煤炭公铁联运网络示意

Fig.1　Schematic diagram of the coal road-rail intermodal network

在实际运行中,铁路网络可能因设备故障、极端天气等导致部分节点失效.受“点-线式”结构与路径替代性有限的约束,铁路层内部的负载转移能力相对不足;在联运条件下,铁路失效节点所承载的部分运输需求可沿既有换装通道转移至公路层实现功能替代.因此,有必要刻画铁路节点失效时公路层的负载接纳与分流能力,以评估运输服务的延续性与网络运行稳定性.相应的,当公路层受扰动时,其运输任务亦可通过铁路层或公路层内的可达替代路径进行完成,形成跨模式的负载再分配机制,从而提升整体网络的鲁棒性与适应性.

2　煤炭公铁联运网络级联故障模型

2.1　初始负载

在煤炭多模式运输网络中,受限于货运流的实时波动与数据获取难度,常借鉴复杂网络理论,以反映连通性的节点度来定义“结构负载”[23].由于建立的模型中包含有多种交通方式,而简单拓扑度值容易忽略多式联运网络中的不同交通方式的异质性.基于铁路运输在运能规模与调度组织上显著优于公路运输,其节点应当在负载分配中占据主导地位.

因此,不能简单将两类节点等同处理,需引入体现运能差异的修正因子.基于此,节点初始负载的计算式设定为

$$Q_i=\left[\sum_{j\in N}u_{i,j}\left(\sum_{j\in N_i}k_j\right)\right]^{\lambda} \tag{1}$$

式中:Q_i表示的是节点i的初始负载;$u_{i,j}$表示的是节点j是否与节点i相连,如果相连则为$u_{i,j}=1$,否则$u_{i,j}=0$;N_i为节点i的相邻节点;k_j为节点j的度值;λ为不同交通方式初始负载调节参数.

在既有的级联失效研究中,当节点负载超过容量时,节点往往被直接判断为故障状态[9].但在实际运行中节点存在一定的冗余能力,当节点接收到超过容量的负载分配时,会采取一定的应急策略,将资源分配给网络中的其他节点.因此,在级联失效研究中应考虑节点往往存在一定的应急处理能力,以区分节点的拥塞和失效状态.为了区分节点的拥塞状态和故障状态,设置了节点拥塞阈值C_i^{B}和节点失效阈值C_i^{P},其计算式为

$$C_i^{\mathrm{B}}=(1+\alpha)Q_i \tag{2}$$

$$C_i^{\mathrm{P}}=(1+\beta)C_i^{\mathrm{B}} \tag{3}$$

式中:α为节点的拥塞参数值;β为节点的失效参数值.

当节点负载超过拥塞阈值C_i^{B},节点便会向周边节点分配负载使其自身恢复正常水平,当节点负载超过节点的最大能力值C_i^{P},节点进入失效状态.

2.2 煤炭公铁联运网络韧性评估指标

交通网络韧性评估虽未形成统一标准,但其本质在于刻画运输系统在扰动冲击下的抵抗、吸收、恢复及适应过程[24-25].运输系统的韧性可理解为其在扰动条件下维持或尽快恢复预期服务水平的能力,既反映系统结构特征,也体现其动态响应与适应能力.

我国煤炭集运端由铁路干线与公路支线共同构成,具有链条长、环节多、主要运输干线承担的货运量大,交通方式间深度耦合的特征.自然灾害或设备故障等局部扰动易诱发级联效应,削弱系统整体效能.基于系统受扰后的动态演化机理,将煤炭公铁联运网络韧性定义为抵抗、吸收、恢复3个连续过程,并分别构建量化指标以评估各阶段的系统能力.

抵抗能力是指煤炭多模式运输网络受到攻击时,能够维持其网络正常运行水平的能力.在级联故障模型中,由于故障传播效应,网络节点的状态是动态变化的.正常的节点保留率反映了运输网络在中断下保持其结构和功能的能力.由此来抵抗干扰带来的冲击,从而能够维持煤炭多模式运输网络正常的运输服务水平,即网络具有较高的抵抗能力.因此可用节点的变化情况表征煤炭公铁联运网络的抵抗能力,用攻击后剩余正常节点数占比来表示抵抗能力R_1,计算式为

$$R_1=\frac{D'}{D^0} \tag{4}$$

式中:D^0为初始状态时运输网络节点数量;D'为攻击后仍保持正常状态的节点数量.

吸收能力指的是煤炭公铁联运网络在遭受扰动初期,抑制系统性能从正常水平骤降至失稳状态的能力.采用网络效率变化情况作为吸收能力的评估指标.网络效率衡量的是节点之间最短路径的平均可达性,反映了整个网络在维持正常运输功能时的信息与资源传输效率,该指标的计算式为

$$E=\frac{1}{N(N-1)}\sum_{i\neq j}\frac{1}{D_{i,j}} \tag{5}$$

$D_{i,j}$是i,j之间的最短路径的长度.由此得到吸收能力R_2计算式为

$$R_2=\frac{E(t)}{E(0)} \tag{6}$$

恢复能力衡量的是煤炭公铁联运网络在遭受扰动后,通过结构调整与资源重构,快速恢复正常运行状态的能力.采用最大连通子图的相对规模作为恢复能力R_3的衡量指标,用以反映网络在攻击后拓扑结构的完整性.该指标定义为扰动后最大连通子图节点数与扰动前最大连通子图节点数之比.该比值越大,表示网络拓扑保持完整性越强,恢复所需资源越少,R_3计算式为

$$R_3=\frac{\sum_{i\neq j\in G'}w_{i,j}}{\sum_{i\neq j\in G^0}w_{i,j}} \tag{7}$$

式中:$w_{i,j}$为节点i与节点j间的连边权重;G'为受到扰动后网络的最大连通子图;G^0为未受扰动时网络的最大连通子图.

通过考虑抵抗能力、吸收能力、恢复能力等指标的变化,构建煤炭多模式运输网络韧性计算式为

$$R_{总}=\mu_1R_1+\mu_2R_2+\mu_3R_3 \tag{8}$$

$$\mu_1+\mu_2+\mu_3=1 \tag{9}$$

式中:μ_1为吸收能力的敏感系数;μ_2为吸收能力的敏感系数;μ_3为恢复能力的敏感系数;$\mu_1,\mu_2,\mu_3\in(0,1)$.

三者的取值反映不同阶段对总体韧性的相对重

要性,可根据情景需求进行设定.较小R意味着对煤炭多模式运输网络的韧性降低得更多.该指标不仅反映了节点和链路的可靠性,也体现系统在不同扰动条件下的动态响应与恢复能力,对煤炭联运系统的安全评估与应急决策具有重要指导意义.

2.3　基于灰度信息的动态扰动策略

在复杂网络研究中,节点失效机制通常分为两类:基于网络结构的扰动与随机扰动.前者依据网络拓扑特性进行扰动节点选择,例如基于节点度数或负载等指标,模拟在部分或全部结构信息可见的情况下关键节点受损的情境;后者则不依赖结构信息,随机选择节点或边实施扰动,反映无序环境下的失效过程.

在现实运输系统中,这两类扰动机制分别对应不同类型的风险源:随机扰动可映射到自然灾害(如地震、洪涝、山体滑坡)或突发地质事件等情境.这类扰动具有突发性、空间分布不确定性强、无法依赖结构信息进行预测等特征,因此可通过无信息基础上的等概率扰动加以模拟.

基于网络结构的扰动则更符合人为破坏、内部故障或针对关键节点的恶意攻击等情景.例如,运输网络中可能由于人为蓄意破坏(如恐怖袭击、设备破坏)、调度操作失误或关键基础设施突然失效导致严重连锁影响.此类扰动具有明确的方向性,攻击往往集中在高负载或关键节点上,属于蓄意攻击类型.

经典复杂网络理论已证实,相较于随机故障,基于网络拓扑结构的蓄意攻击对系统完整性的破坏更为显著,会导致网络连通性在短时间内急剧下降[26].鉴于此,为全面评估运输网络在不同攻击情境下的韧性水平,设计基于节点负载的动态扰动策略,在每轮扰动后动态更新节点负载,以模拟不同结构认知水平下,扰动对网络造成的演化效果.定义$\tilde{f}_i$为节点i的观测负载.如按$\tilde{f}_i$降序依次触发节点失效:当$\tilde{f}_i=f_i$时,等效于按真实负载从大到小依次攻击;当$\tilde{f}_i$与f_i不相关时,则退化为随机扰动.

随着我国煤炭运输的快速发展,在实际情况中,蓄意攻击者通常只能获取网络的部分结构与流量信息.煤炭运输通道内部包含多条铁路线路和大量公路,且存在多元运营主体,使得网络结构高度复杂,外部主体几乎不可能完全掌握其全局信息.

在此基础上,引入灰度信息参数$\phi\in[0,1]$,刻画介于完全知情攻击与完全随机攻击之间的中间情形.根据研究[27],得出节点i的观测指标计算式为

$$\tilde{f}_i=f_i-(f_i-f_{\min})(1-\phi)+(f_{\max}-f_{\min})(1-\phi)\rho=\phi f_i+f_{\min}(1-\phi)+(f_{\max}-f_{\min})(1-\phi)\rho \quad (10)$$

式中:ρ为定义在$[0,1]$上的均匀随机变量,用于刻画观测过程中的信息噪声;$\phi\in[0,1]$表示攻击者对节点负载信息掌握的精度水平.

每一轮扰动按观测负载$\tilde{f}_i$的降序选取失效节点,$\tilde{f}_i$由真实负载f_i与噪声项加权得到.由此可得到3类情形:情形1,$\phi=1$时为蓄意攻击,此时$\tilde{f}_i=f_i$,攻击者完全掌握负载信息,每次优先选择当前负载最大的节点,决策确定且针对性最强;情形2,$0<\phi<1$(灰度攻击),$\tilde{f}_i$与f_i正相关但含噪.攻击者仅有部分、带误差的信息(例如基于公开调度频次、历史热力图或新闻数据等非实时信息),对节点重要性的排序存在偏差,可能漏选关键节点并误选次要节点;情形3,$\phi=0$(随机扰动),$\tilde{f}_i=f_{\min}+(f_{\max}-f_{\min})\rho$,与真实负载无关,相当于在剩余有效节点中等概率选择目标.

2.4　负载分配策略

在煤炭多模式运输网络中,合理的负载分配策略对于提升网络整体运行效率、降低运输成本与延误风险具有重要意义.鉴于此,将节点运行状态划分为“拥塞”和“失效”两类,负载分配需与节点状态判定相结合.节点状态的判定规则定义为

$$\text{节点}i\text{的运行状态}=\begin{cases}\text{正常状态} & f_i\leqslant C_i^{\mathrm{B}}\\ \text{拥塞状态} & C_i^{\mathrm{B}}\leqslant f_i\leqslant C_i^{\mathrm{P}}\\ \text{失效状态} & C_i^{\mathrm{P}}\leqslant f_i\end{cases} \quad (11)$$

式中:C_i^{B}为节点的拥塞阈值;C_i^{P}为节点的最大承载阈值.

当$f_i\leqslant C_i^{\mathrm{B}}$时,节点处于正常状态,此时不向外转移负载即$\Delta Q_i=0$,但可以接受来自其他节点的负载转移;当$C_i^{\mathrm{B}}\leqslant f_i\leqslant C_i^{\mathrm{P}}$时,节点进入拥塞状态,需将超出拥塞阈值的部分负载向其相邻未失效节点分配即$\Delta Q_i=C_i^{\mathrm{B}}-f_i$;当$C_i^{\mathrm{P}}\leqslant f_i$时,节点进入失效状态且在本次级联过程中不再恢复,其全部负载需转移至相邻节点,即$\Delta Q_i=f_i$.在此基础上,构建两类典型负载分配策略:基于节点度值的分配策略及综合运输时间与冗余容量的联合分配策略.

第1类:节点度值分配策略.节点度值是网络拓扑中衡量节点连接程度的关键指标.在煤炭运输网络中,节点度值反映了该节点与其他节点之间的直接连接数量,从而影响其在负载转移过程中的承担能力.若节点i在t时刻失效,那么此时负载的分布比例计算式为

$$Q^{i\to j}=\frac{k_j(t)}{\sum_{j\in N_i}k_j(t)}\Delta Q \tag{12}$$

式中：$Q^{i\to j}$为节点i向节点j传递的负载数量；N_i为节点i邻域中的节点集合；$k_j(t)$为t时刻节点j的度值.

由式(12)可知，度值越大，节点在拓扑上越重要，相应承担的负载分配比例也越高.

第2类：综合运输时间与冗余分配策略.在实际运输中，运输时间和冗余资源的分配是紧密相关的.节点间的距离决定了货物的运输时间，而冗余路径和节点提供了替代选项来减轻故障传播的影响.因此，综合运输时间与节点冗余的分配策略能够增强运输系统在突发事件条件下的应对能力.其计算方法为

$$L_j(t)=\frac{1}{T_{i,j}}\quad j\in N_i, j\neq i \tag{13}$$

$$Z_L^{i\to j}(t)=\frac{L_j(t)}{\sum_{j\in N_i}L_j(t)} \tag{14}$$

$$R_j(t)=C_i^{\beta}-f_i(t) \tag{15}$$

$$Z_R^{i\to j}(t)=\frac{\left[C_j^{\beta}-f_j(t)\right]}{\sum_{j\in N_i}\left[C_j^{\beta}-f_j(t)\right]} \tag{16}$$

$$Q_{L\leftrightarrow Z}^{i\to j}=\zeta_1\frac{L_j(t)}{\sum_{j\in N_i}L_j(t)}\Delta Q+\zeta_2\frac{\left[C_j^{\beta}-f_j(t)\right]}{\sum_{j\in N_i}\left[C_j^{\beta}-f_j(t)\right]}\Delta Q \tag{17}$$

式中：$T_{i,j}$为节点i,j之间的运输时间；$R_j(t)$表示在t时刻的节点j的节点冗余；$Q_{L\leftrightarrow Z}^{i\to j}$表示综合运输时间与节点冗余从节点$i$到节点$j$的负载分配数量；$\zeta_1$表示基于冗余量的分配策略的灵敏度参数；$\zeta_2$表示基于传输时间的分配策略的灵敏度参数；满足$\zeta_1+\zeta_2=1,\zeta_1+\zeta_2\in[0,1]$.

由式(14)可知，运行时间越短(即$T_{i,j}$越小、$L_j(t)$越大)的节点将获得更高的负载分配比例；由式(16)可知，剩余冗余量越大的节点，其负载分配比例也越高.式(17)实质上给出了两种分配机制的凸组合，通过调节ζ_1和ζ_2的取值，可在“优先选择运输时间更短的路径”与“优先利用冗余容量更大的节点”之间实现灵活权衡.

2.5 考虑负载传递时滞的算法流程

在既有级联失效建模研究中[24]，通常假设故障节点的全部负载在下一个时间步内瞬时传递至其所有相邻节点并立即产生影响.然而，在煤炭公铁联运网络中，该假设难以准确反映实际过程.由于铁路运输路径通常较长、公路节点间路径相对较短，且不同运输方式之间存在显著的运行速度差异，负载在网络中的传递具有明显的时滞特征.因此，为更真实地刻画公铁联运网络中级联失效的演化过程，有必要在模型中引入负载传递时滞机制.

设定铁路节点间、公路节点间及铁-公节点间的负载传输速度.在初始状态下，若节点i在t时刻发生故障，则与其距离最近的相邻节点记为j_1，其完成负载接收的时间t_1的计算方法为

$$\Delta t_1=\left\lceil\frac{w_{i,j_1}^{\min}}{v}\right\rceil \tag{18}$$

$$t_1=t+\Delta t_1 \tag{19}$$

式中：$w_{i,j_1}^{\min}$为节点i,j_1之间的最短路径；v为对应运输方式的传输速度.

节点j_1的状态将决定后续负载传递路径：若j_1仍处于正常或拥塞状态，则继续判定下一个距离节点i最近的节点j_2，其完成负载接收的时间t_2计算方法为

$$t_2=t+\Delta t_1+(\Delta t_2-\Delta t_1) \tag{20}$$

式中：Δt_2为从节点i向节点j_2的传输时间.若j_1已处于失效状态，则原拟分配给j_1的负载需重新分配给距离其最近的未失效节点l，此时对应的传递完成时间为

$$t_2=t+\Delta t_1+\min\left\{\Delta t_2-\Delta t_1, t_{j_1,l}^{\min}\left(l\in N_{j_1}\right)\right\} \tag{21}$$

式中：N_{j_1}为节点j_1的邻接节点集合；$t_{j_1,l}^{\min}$为节点j_1到节点l的最短传递时间.

此外，在铁路与公路节点之间进行负载传递时，还需考虑运输方式转换带来的附加延迟t^{TP}.负载在跨方式传递时，其总传输时间需叠加该转换时滞.整体而言，负载转移过程按上述规则迭代推进，直至所有待转移负载分配完毕或网络状态不再发生变化.

基于上述方法，构建了考虑灰度信息扰动情景的煤炭多模式运输网络级联演化仿真流程，其框架如图2所示.仿真过程可概括7个步骤.

步骤1：网络初始化.构建煤炭公铁联运网络拓扑，包含铁路链路、公路链路及铁路-公路转运边，完成基础网络结构的初始化.

步骤2：节点参数计算与初始状态判定.计算各节点的初始负载Q_i、拥塞阈值C_i^{B}和失效阈值C_i^{P}，并据此判定其初始状态(正常、拥塞或失效).

步骤3：基于灰度信息施加扰动.引入灰度信息参数$\phi\in[0,1]$，计算各节点的观测负载$\tilde{f}_i$，并按$\tilde{f}_i$降序选择当前攻击目标节点，使其进入失效状态并从网络中移除.

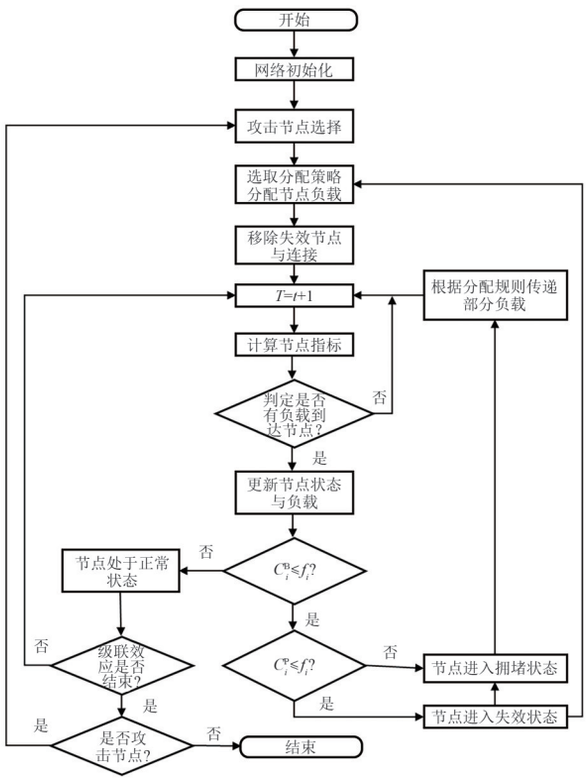


图 2　模拟流程示意

Fig.2　Schematic diagram of the simulation process

步骤 4:失效与拥塞节点的负载重分配.对所有处于拥塞或失效状态的节点进行负载转移.若节点拥塞,则转移超出拥塞阈值的部分负载,$\Delta Q_i = f_i - C_i^{\mathrm{B}}$;若节点失效,则转移其全部负载,$\Delta Q_i = f_i$,并按照既定转移规则将负载分配至相邻节点.

步骤 5:网络演化与状态更新.在每一仿真时间步 t 执行到期的负载传递事件,更新各节点负载水平,并根据 f_i 与阈值的关系判定节点当前状态,当 $f_i \leqslant C_i^{\mathrm{B}}$ 时为正常状态;当 $C_i^{\mathrm{B}} < f_i \leqslant C_i^{\mathrm{P}}$ 时为拥塞状态;当 $f_i > C_i^{\mathrm{P}}$ 时为失效状态,节点失效并再次触发负载转移.

步骤 6:级联演化终止判据.若当前时间步仍存在新进入失效状态的节点,或仍有未完成的负载传递任务,则返回步骤 4 继续负载重分配与网络演化;若上述条件均不再满足,则认为本轮级联过程结束,转入下一步.

步骤 7:扰动次数控制与模拟终止.若累计扰动次数尚未达到预设上限,则返回步骤 3,基于灰度信息选择新的攻击目标节点并重复上述过程;当扰动次数达到设定值且网络不再发生新的级联演化时,结束整个模拟过程.

3　案例分析

3.1　场景选取与构建

为验证所提出煤炭公铁联运网络韧性分析模型在实际大规模网络中的适用性与有效性,选取我国核心煤运区域作为研究案例.该地区作为我国煤炭集运体系的核心地带,长期承担“西煤东运、北煤南运”国家战略中的主力运输任务,在我国煤炭集散运输体系中具有高度代表性与工程应用价值.

所构建的案例网络包括以大准、准池、新准、神朔等 11 条主要煤炭运输铁路干线为基础的铁路网络及与上述铁路形成耦合关系的区域性高等级公路节点与线路,构成覆盖铁路、公路及其转运连接的多模式运输网络拓扑,其物理网络情况如图 3 所示.网络的基本情况如表 1 所示.表 1 中,展示了核心煤运通道中公铁联运网络的基础拓扑特征.该网络由 169 个铁路节点与 172 个公路节点构成,通过 844 条边连接形成统一的联运网络.整体平均度为 3.15,表明网络中的节点具备一定程度的连接冗余.

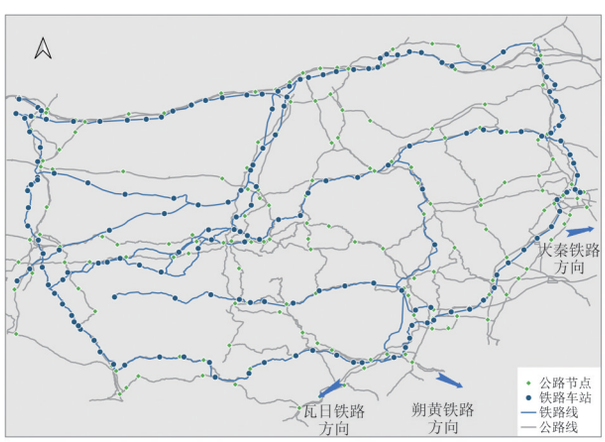


图 3　案例范围内煤炭运输网络

Fig.3　Coal transportation network in the case study area

表 1　网络拓扑情况

Tab.1　Network topology characteristics

网络特征指标	计算值	网络特征指标	计算值
铁路节点	169	平均最短路径长度	10.524 1
公路节点	172	平均介数	0.027 7
边数	844	平均聚集系数	0.083 1
平均度	3.15	网络全局效率	0.129 3
网络密度	0.009 1	—	—

尽管网络密度仅为 0.009 1,呈现出典型的稀疏特征,但平均最短路径长度为 10.52,表明货运路径整体较为紧凑,有利于实现跨区域煤炭快速转运.同时,全局效率达到 0.129 3,显著高于同规模随机网络,反映出多式联运结构在通达性和资源调配方面的优势.

在局部结构方面，平均聚集系数为0.083 1，明显高于理论随机网络，显示出网络在局部区域内具备较强的节点聚集特性，增强了对区域负载波动的响应能力．平均介数为0.027 7，说明网络中存在少数关键节点承担较多的交通流量，整体呈现出以核心枢纽为中心的运输结构．

由相应的网络特征值可知，所选区域既能反映现实煤炭公铁联运的运行逻辑，也为级联故障模拟与冗余策略验证提供了良好的实验基础．

3.2 多模式网络失效评估

案例模拟中，铁路与公路负载传输速度分别取80 km/h和60 km/h，节点拥塞参数设为$\alpha=0.3$，节点失效参数设为$\beta=0.2$．在现有研究中，联运范围受联运类型、物流量、交通条件、周边环境等影响[28]，在40 km以内进行联运有较好的经济效应[29]，结合案例区域内公铁联运的实际组织及铁路站间距的影响，若耦合距离取值过大，将导致多个铁路站点倾向于选择同一公路节点进行联接．综合上述因素，选取15 km作为公铁联运的最大耦合半径，共形成103个联运关系．数值实验在Windows 11操作系统下完成，硬件环境为5.4 GHz Intel Core i7-14700处理器与32 GB内存，算法由Python 3.12实现．并在不同负载分配与扰动发生条件下，评估网络性能的动态演化过程．

3.2.1 网络类型对比分析

核心煤运区域内煤炭运输网络具有典型的“以铁路为主、公路为辅”的结构特征，其级联故障可分为单层失效传播与跨层耦合扩散两类路径．既有研究多聚焦于铁路网络的单层失效机制，较少关注铁路与公路网络在实际运行中的联动特征．为此，在相同扰动情景下，分别对比单一铁路网络、公路网络及公铁联运网络的响应差异，以揭示多运输方式协同对网络韧性水平的潜在提升作用．

在上述案例网络基础上，设置度值导向的负载分配策略与蓄意攻击场景，开展多轮模拟分析，其结果如图4所示．图4中，3类网络的综合韧性指标均随时间步呈阶梯式下降，但衰减速率存在显著差异：公路网络前期下降最陡，约在$t\approx180$已逼近0并进入整体失效状态；铁路网络在扰动初期即快速下滑，约在$t\approx380$失效，而公铁联运网络下降最为平缓，约在$t\approx540$才完全失效，且中后期仍维持较高水平．

由图4可知：公路网络虽在初期具备一定负载分散与绕行能力，但由于整体承载能力有限、枢纽节点冗余性偏弱，在高强度扰动下稳定性不足，难以支撑大规模持续运输任务；铁路网络以线性主干为主且关键节点高度集中，冗余路径相对不足，使得核心枢纽一旦受损更易触发快速且不可逆的级联失效，从而提前丧失整体功能；公铁联运网络通过跨运输方式的结构互补与功能冗余形成缓冲机制，当铁路节点受损时公路可承担部分负载并延缓故障传播，显著提升系统鲁棒性与适应性，但当公路节点相继失效后，系统仍可能因剩余铁路网络缺乏独立维持能力而最终崩溃．

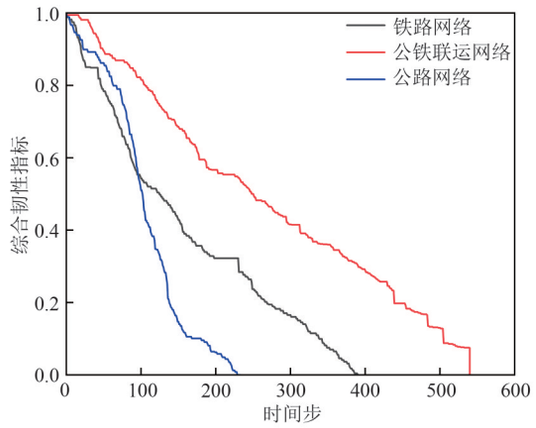


图4 不同网络类型综合韧性变化情况

Fig.4 Variation in integrated resilience across different network types

3.2.2 不同能力参数敏感度分析

为识别各能力维度对综合韧性的影响，在同一扰动情景与网络参数下，仅调整评估权重进行敏感性分析，其中μ_1，μ_2，μ_3分别对应抵抗、吸收与恢复维度的权重．不同权重组合下的综合韧性的演化情况，如图5所示．

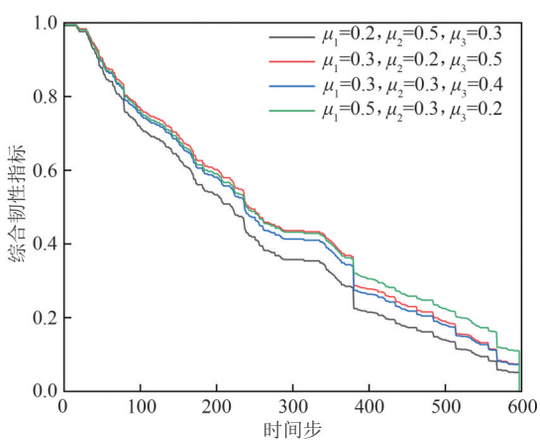


图5 综合韧性的参数敏感性测试

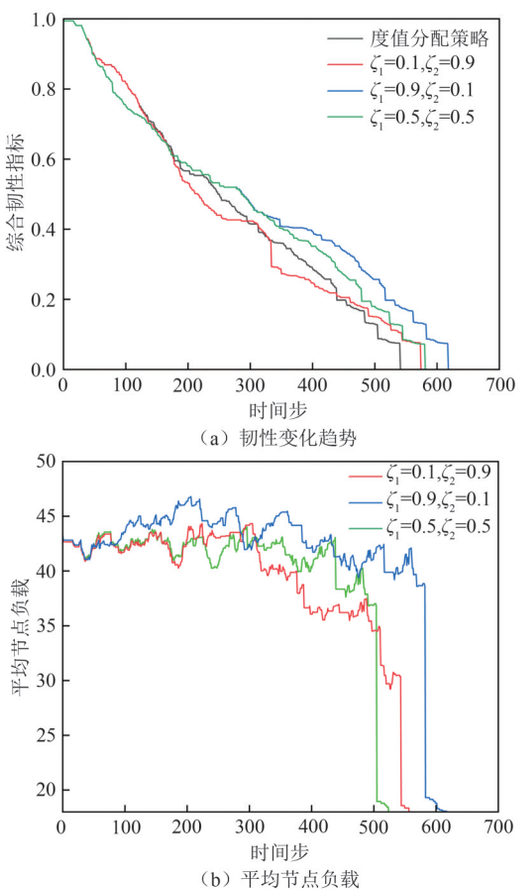
Fig.5 Parameter sensitivity analysis of integrated resilience

由图5可知：①当$\mu_2=0.5$时，相较其他权重组合，综合韧性在全程内水平更低且下降更快，说明在本网络中，中期的“吸收阶段”受损后，铁路干线之间的衔接能力下降，跨方式绕行路径有限，导致可达性

和效率快速恶化;在权重中放大吸收维度的影响,会显著拉低综合韧性值.②当$\mu_1=0.5$时,曲线整体高于其他组合,前期降幅较缓,这表明提升初期抵抗能力可有效延缓性能衰减,为后续吸收与恢复争取时间.③曲线在中后段优于μ_2与μ_3权重较高的组合,表明在当前网络结构下,有效节点数量对综合韧性具有更为关键的影响.

3.3　不同负载分配策略的级联效应影响分析

为评估不同负载分配机制对煤炭公铁联运网络级联效应的影响,并探讨资源配置对网络韧性水平的作用,根据设计的两类负载分配策略,在蓄意攻击条件下设置不同的策略分配参数进行对比模拟,不同负载分配策略下多模式网络的综合韧性演化轨迹及节点平均负载变化情况如图6所示.



（a）韧性变化趋势

（b）平均节点负载

图6　不同分配策略韧性特征值变化

Fig.6　Variation in resilience characteristic metrics under different allocation strategies

由图6可知:①相比于单一的度值分配策略,综合考虑运输时间和节点冗余的策略明显提高了网络的整体韧性水平.其中,当$\zeta_1=0.9$,$\zeta_2=0.1$时,网络韧性表现最佳,在$t\approx600$时仍具备相当的功能保持能力;而$\zeta_1=0.1$,$\zeta_2=0.9$时,网络韧性表现较差,仅略优于度值分配策略,说明过度强调节点冗余因素对整体系统韧性提升作用有限.②不同负载分配策略对网络节点负载的动态影响呈现出明显差异.当$\zeta_1=0.1$,$\zeta_2=0.9$时,网络节点的平均负载长期处于较低水平,随着仿真的推进,节点负载波动逐渐显著增加,表明此策略在初期虽能分散失效节点的负载,但随时间推移负载逐步集中于少数节点,进而加剧节点失效的风险,表现出相对较弱的持续负载维持能力;当$\zeta_1=0.5$,$\zeta_2=0.5$时节点负载亦呈现出明显波动且波动幅度逐渐扩大,这反映出强调节点冗余容量的负载分配机制可能导致局部节点快速过载,从而提前触发节点失效与系统性崩溃;相比之下,当$\zeta_1=0.9$,$\zeta_2=0.1$时,节点平均负载在较长时间区间内维持较高水平,能有效地控制节点负载波动,延缓系统级联效应的传播与扩散,表现出更强的负载稳定性与网络鲁棒性.

3.4　基于灰度信息的攻击策略的影响分析

在实际运行中,网络节点的失效既可能源于蓄意破坏,也可能由天气、地震等自然因素引发的随机事件所致.不同类型的扰动在攻击路径选择上体现出信息掌握程度的差异.为模拟攻击者结构认知能力对系统韧性的影响,引入灰度信息参数ϕ,$\phi=0$表示完全随机攻击,$\phi=1$表示完全知情攻击,并设置$\phi=0.0$、0.3、0.5、0.7几种典型场景开展仿真.每轮级联过程结束后,依据相应的ϕ水平继续选取下一轮攻击目标,直至网络整体崩溃.不同灰度信息条件下的计算情况,如表2所示.不同ϕ值下网络综合韧性的演化轨迹,如图7所示.

表2　灰度信息模拟情况

Tab.2　Simulation scenarios based on gray information

序号	灰度信息参数	扰动次数	运行时间/s
1	$\phi=1.0$	8	1 139.7
2	$\phi=0.7$	8	1 151.04
3	$\phi=0.5$	11	1 546.57
4	$\phi=0.3$	12	1 890.38
5	$\phi=0.0$	23	2 859.35

图7中:在不同信息精度参数ϕ下,综合韧性指标均随时间步呈阶梯式下降;$\phi=0$(随机扰动)对应曲线下降最为缓慢,直至$t\approx1\,200$才完全失效,且有效攻击次数约为23次;随着ϕ增大(攻击更定向),系统失效时间显著提前,$\phi=0.3$约在$t\approx800$失效(攻击12次),$\phi=0.5$约在$t\approx700$失效(攻击11次),$\phi=0.7$与$\phi=1.0$约在$t\approx600$失效(攻击均8次),且二者曲线形态接近.

由图7可知:该煤炭公铁联运网络对攻击者掌握结构信息的程度高度敏感,ϕ越大则攻击越集中、越

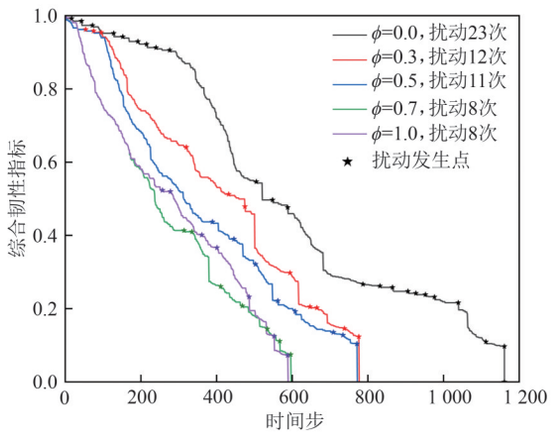


图 7 灰度信息参数变化的网络韧性演化情况

Fig.7 Network resilience evolution under varying gray information

精准，韧性曲线前段下降越快，表明定向攻击更易在早期击中关键枢纽并触发连锁传播，从而加速系统整体崩溃；ϕ 越小则攻击更随机且破坏更分散，关键节点在早期被命中的概率降低，网络需要经历更多轮“攻击-负载重分配-二次失效”的级联演化，因而失效过程被显著拉长（对应更长的时间步与更多的有效攻击次数）；$\phi=1.0$ 与 $\phi=0.7$ 的韧性轨迹与失效时间接近，说明网络中关键枢纽的重要性高度突出，即便攻击者仅掌握部分结构信息，也可能实施接近完全定向攻击强度的破坏并造成严重影响；随机扰动情景（$\phi=0$）下韧性曲线呈多次小幅衰减的特征，反映冗余与可替代路径可在较长时间内维持基本功能，但局部损伤的长期累积仍会导致系统最终失效.

3.5 公铁联运网络关键节点评估

为进一步明确公铁联运网络中的关键枢纽节点，选取网络内负载排名前列的典型铁路站点逐一进行节点失效仿真，并分析其对网络韧性的影响程度，计算结果如图 8 所示. 图 8 中：神池站失效对应的负载损失最大，约为 1.5×10^3，综合韧性下降超过 8%；神木北站次之，负载损失接近 9×10^2，综合韧性下降超过 6%；神池站失效诱发的连锁失效节点数约为 19 个，而拥塞节点数仅约为 1 个；点岱沟站失效引起的综合韧性降幅超过 7%，且其诱发的拥塞节点与失效节点数量分别约为 7 个与 17 个；平鲁西站、耿庆沟站与大同西站在负载损失、综合韧性降幅及拥塞/失效节点数量方面整体较低.

由图 8 可知：神池站与神木北站在负载损失和韧性降幅两个维度的数据变化均表现突出，说明其更可能处于神朔铁路、包神铁路与准池铁路等通道的关键节点位置，一旦失效将显著削弱网络的运输承载与功能保持能力，体现出较高的结构敏感性；神池站呈现“高连锁失效-低拥塞节点”的特征，表明其失效后更易触发快速的连锁中断而非渐进式拥堵扩散，反映周边缺乏具备大容量承接能力的替代节点与分流通道，亟需提升区域内负载分担能力与冗余配置水平；点岱沟站虽对应的负载损失相对较低，但综合韧性降幅较大且拥塞/失效节点数同步偏高，说明其影响更偏向连接性与通达性削弱，即该站位于大准、准东、巴准、呼准等线路的关键路径上，承担重要的通道衔接功能，失效易放大级联拥堵与连锁反应；平鲁西站、耿庆沟站与大同西站相关指标整体较低，表明其周边替代路径与节点冗余相对充分，局部扰动更易被吸收，网络结构风险相对可控.

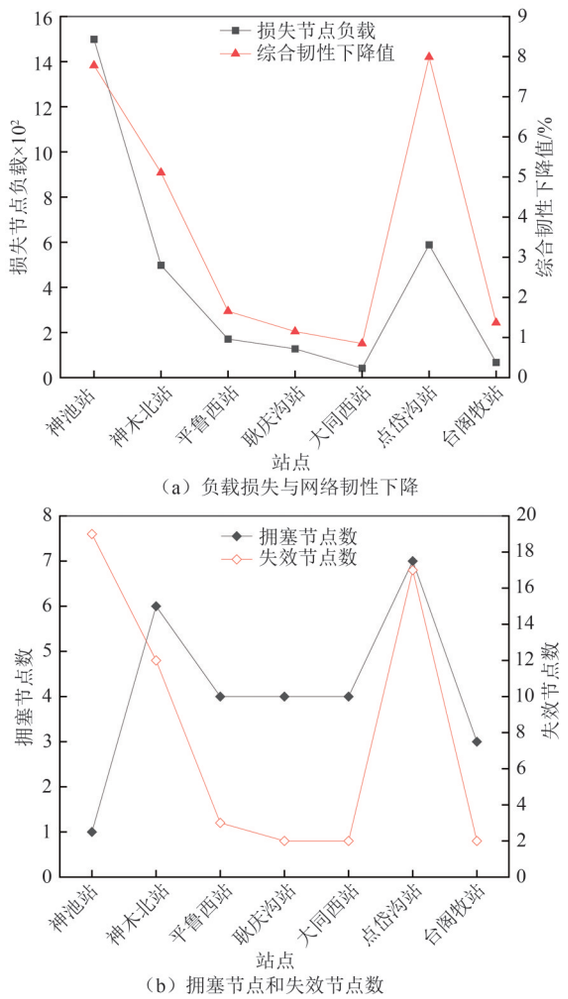


图 8 高负载节点特征值变化情况

Fig.8 Variation in characteristic values of high-load nodes

4 结论

1）公铁协同结构能够显著提升综合韧性并延缓系统崩溃. 在相同扰动与策略条件下，单一公路或单一铁路网络更易出现快速、不可逆的功能衰减，而公铁联运网络的韧性下降更平缓、失效时刻明显

滞后,说明公铁联运网络可在关键铁路节点受损时提供缓冲,有效抑制级联扩散速度并延长运输系统可服务时间.

2）负载重分配策略是决定级联传播路径与失效阈值的关键.对比结果表明,相较于仅依据拓扑度值进行分配,兼顾“运输时间-冗余容量”的分配策略能够更有效地平抑节点负载波动、降低关键节点过载概率,从而提升系统整体稳定性;相反,若在扰动下将货流集中向少数“大容量节点”堆积,易诱发局部负载集聚,反而加速级联扩散并提前触发运输系统崩溃.由此可知,突发事件下更优的应急调度应优先保障货流快速疏解与跨通道周转效率,而非静态积压式的容量占用,这也表明应急预案制定需考虑整个网络的周转效率.

3）扰动信息精度会显著放大系统风险.系统对攻击信息的敏感度极高.数据表明,由于网络高度依赖少数核心枢纽,攻击者哪怕只掌握一部分关键信息,也能实施精准打击,导致系统快速瘫痪.这种破坏力远高于随机发生的故障.这表明,在煤炭公铁联运网络中,关键枢纽的重要性足以使“部分结构信息”带来接近定向攻击的破坏强度,运输系统韧性对扰动的信息精度呈显著敏感.

4）关键节点的脆弱性集中在特定区域.关键节点失效仿真识别出神池站、神木北站与点岱沟站等敏感枢纽,其中神池站失效可引发显著连锁失效,反映其周边替代承载节点不足、跨方式分流能力弱,是需优先加固与配置冗余的极高风险节点.

基于上述结论,煤炭公铁联运网络的韧性提升应优先聚焦3类措施:一是面向关键枢纽增配备用运力与跨层转运通道,形成可快速启用的多路径替代体系;二是将兼顾运输时间与剩余容量的策略纳入应急预案,优先保障货流快速疏解,避免货物堆积引发二次拥堵;三是加强对关键枢纽结构与流量数据的保密管理,降低因信息泄露带来的系统性破坏风险.

尽管本文研究在理论建模与策略验证方面取得了初步成果,但存在有待进一步探索的方向.首先,当前模型尚未显式刻画铁路与公路运输任务之间的服务依赖关系,未来可通过引入多层网络结构或任务协同机制,进一步提升对公铁联运业务流程的刻画精度;其次,研究主要聚焦扰动与级联失效过程,尚未系统纳入节点修复、路径重构等动态恢复机制,后续可构建扰动-恢复联动的时序韧性分析框架,以更全面反映系统在全生命周期内的演化特征;最后,运输成本、政策约束等现实因素尚未充分融入模型参数设定与情景构造,未来可结合实地运营数据开展多维度验证与参数标定,以进一步增强模型的决策支持能力与工程应用价值.

参考文献(References):

[1] 中国煤炭工业协会.2023煤炭行业发展年度报告[R].2024.
China National Coal Association. Annual report on coal industry development 2023[R]. 2024.(in Chinese)

[2] 国家发展改革委,国家能源局.“十四五”现代能源体系规划[EB/OL].(2022-03-22)[2025-09-06]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/5680759/files/ccc7dffca8f24880a80af12755558f4a.pdf.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. The 14th Five-Year plan for modern energy system[EB/OL].(2022-03-22)[2025-09-06]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/5680759/files/ccc7dffca8f24880a80af12755558f4a.pdf.(in Chinese)

[3] 王小洋,李先国.能源革命背景下我国煤炭运输通道的发展趋势及对策[J].中国流通经济,2019,33(10):67－75.
WANG Xiaoyang, LI Xianguo. The development trend of China's coal transportation in the context of energy revolution and the countermeasures[J]. China Business and Market, 2019, 33(10): 67－75.(in Chinese)

[4] 张玉召,康欢欢,邓雨露.多层网络视角下的中欧海铁运输网络级联失效脆弱性分析[J].计算机工程与应用,2025,61(5):298－308.
ZHANG Yuzhao, KANG Huanhuan, DENG Yulu. Vulnerability analysis of cascading failure of Sino-Europe Sea-rail transport network from perspective of multi-layer network[J]. Computer Engineering and Applications, 2025, 61(5): 298－308.(in Chinese)

[5] ZHOU J, HUANG N, COIT D W, et al. Combined effects of load dynamics and dependence clusters on cascading failures in network systems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2018, 170: 116－126.

[6] KANEKO K. Overview of coupled map lattices[J]. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 1992, 2(3): 279－282.

[7] SUN L S, HUANG Y C, CHEN Y Y, et al. Vulnerability assessment of urban rail transit based on multi-static weighted method in Beijing, China[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2018, 108: 12－24.

[8] ZHANG J H, MIN Q J, ZHOU Y, et al. Vulnerability assessments of urban rail transit networks based on extended coupled map lattices with evacuation capability[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 243: 109826.

[9] MOTTER A E, LAI Y C. Cascade-based attacks on complex networks[J]. Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2002, 66(6 Pt 2): 065102.

[10] ZHANG J H, WANG Z Q, WANG S L, et al. Vulnerability assessments of weighted urban rail transit networks with integrated coupled map lattices[J]. Reliabil-

ity Engineering & System Safety, 2021, 214: 107707.

[11] ZHANG L, XU M, WANG S A. Quantifying bus route service disruptions under interdependent cascading failures of a multimodal public transit system based on an improved coupled map lattice model[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 235: 109250.

[12] 张铁岩, 宋瑞, 郑锂, 等. 基于复杂网络理论的国内地铁网络特性分析[J]. 交通信息与安全, 2012, 30(5): 50－54.
ZHANG Tieyan, SONG Rui, ZHENG Li, et al. Analysis of domestic subway network characteristics based on complex network theory[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2012, 30(5): 50－54. (in Chinese)

[13] 赖强, 张宏昊, 王徐旰. 基于复杂网络理论的城市公交网络鲁棒性分析与优化[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(10): 249－254.
LAI Qiang, ZHANG Honghao, WANG Xuxu. Robustness analysis and optimization of urban public transport network based on complex network theory[J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(10): 249－254. (in Chinese)

[14] 张振江, 张玉召, 王小荣. 铁路快捷货运网络鲁棒性分析[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(3): 150－156.
ZHANG Zhenjiang, ZHANG Yuzhao, WANG Xiaorong. Robustness analysis of railway express freight network[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(3): 150－156. (in Chinese)

[15] 蔡鉴明, 邓薇. 长沙地铁网络复杂特性与级联失效鲁棒性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(6): 1587－1596.
CAI Jianming, DENG Wei. Complex characteristics of Changsha metro network and robustness analysis of cascading failures[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(6): 1587－1596. (in Chinese)

[16] 吕彪, 高自强, 刘一骝. 道路交通系统韧性及路段重要度评估[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(2): 114－121.
LV Biao, GAO Ziqiang, LIU Yiliu. Evaluation of road transportation system resilience and link importance[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(2): 114－121. (in Chinese)

[17] 程静, 卢群, 吴同政, 等. 地铁网络级联失效恢复策略韧性评估方法[J]. 交通信息与安全, 2023, 41(4): 173－184.
CHENG Jing, LU Qun, WU Tongzheng, et al. A method for evaluating recovery strategies for cascade failures of metro networks[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2023, 41(4): 173－184. (in Chinese)

[18] ZHANG J H, WANG S L, WANG X Y. Comparison analysis on vulnerability of metro networks based on complex network[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2018, 496: 72－78.

[19] ZHANG L, ZHOU J, MA Y Z, et al. Resilience improvement of cyber-physical supply chain networks considering cascading failures with mixed failure modes[J]. Computers & Industrial Engineering, 2024, 187: 109812.

[20] 乔金锁, 王喜富, 沈喜生, 等. 煤炭运输网络结构鲁棒性评价及应用研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(4): 126－133.
QIAO Jinsuo, WANG Xifu, SHEN Xisheng, et al. Robustness evaluation and application of structure of coal transportation network[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2013, 13(4): 126－133. (in Chinese)

[21] WANG Y Q, CAO X B, QIN F Y, et al. Vulnerability analysis of the Chinese coupled aviation and high-speed railway network[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(12): 189－199.

[22] 赵桂红, 郭家羽, 邹灿. 考虑竞争效应的空铁联运网络脆弱性修复策略研究[J]. 北京交通大学学报, 2025, 49(2): 36－47.
ZHAO Guihong, GUO Jiayu, ZOU Can. Research on restoration strategies for the vulnerability of air-rail intermodal transportation networks considering competitive effects[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2025, 49(2): 36－47. (in Chinese)

[23] WANG J W, RONG L L. Cascade-based attack vulnerability on the US power grid[J]. Safety Science, 2009, 47(10): 1332－1336.

[24] 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.

[25] ARANGO E, NOGAL M, YANG M, et al. Dynamic thresholds for the resilience assessment of road traffic networks to wildfires[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 238: 109407.

[26] ALBERT R, JEONG H, BARABÁSI A L. Error and attack tolerance of complex networks[J]. Nature, 2000, 406(6794): 378－382.

[27] 朱潜, 王一帆, 朱志良, 等. 灰色信息攻击下相依网络的鲁棒性[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(10): 1393－1397.
ZHU Qian, WANG Yifan, ZHU Zhiliang, et al. Robustness of interdependent networks under grey information attacking[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016, 37(10): 1393－1397. (in Chinese)

[28] 姚新虎, 余理, 冯帆. 公铁联运物流中心功能区布局的三阶段法[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(4): 51－57.
YAO Xinhu, YU Li, FENG Fan. Three stage method for layout of functional areas in road-rail intermodal logistics centers[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(4): 51－57. (in Chinese)

[29] 向思桐. 基于汽运经济半径分析的铁路煤炭运输路径选择研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2018.
XIANG Sitong. Study on railway coal transport path selection based on road transport economic service radius analysis[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, 2018. (in Chinese)