文章编号：1003-1421(2026)05-0147-14
引用格式：关高峰，胡富文，张君倩.基于层中心性赋权的陆海联运通道脆弱性测度研究[J].铁道运输与经济，2026，48(5)：147-160.
GUAN Gaofeng，HU Fuwen，ZHANG Junqian. Study on Vulnerability Measurement of Land-Sea Multimodal Transport Corridor Based on Layer Centrality Weighting[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(5)：147-160.

基于层中心性赋权的陆海联运通道脆弱性测度研究

关高峰，胡富文，张君倩

(浙江科技大学 管理学院，浙江 杭州 310000)

摘 要：为精准识别陆海新通道多式联运网络关键节点并测度其脆弱性，以西部陆海新通道为对象，构建了集成公路、铁路、港口航运的三层耦合网络模型，并提出一种基于改进的TOPSIS的多层赋权中心性算法，该中心性不仅综合了节点的局部与全局信息，还考虑了网络层的重要性，能够更准确地识别关键节点，研究改进了非线性级联失效模型，引入最近邻负荷分配策略以模拟真实负载传播，并结合节点与边双重失效情景，通过多种攻击策略评估了网络脆弱性。结果表明：港口(如北部湾港)在多层网络中扮演着关键角色；在攻击策略对比中，针对多层赋权中心性算法识别节点的攻击破坏力最强；攻击前5%的关键边可引发网络连通性损失达38%。

关键词：层中心性赋权；多层网络；级联失效；西部陆海新通道；脆弱性测度
中图分类号：U113 **文献标识码**：A DOI：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250930002

Study on Vulnerability Measurement of Land-Sea Multimodal Transport Corridor Based on Layer Centrality Weighting

GUAN Gaofeng，HU Fuwen，ZHANG Junqian

(School of Management, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310000, Zhejiang, China)

Abstract: To accurately identify key nodes of the multimodal transport network in the new land-sea multimodal transport corridor and measure its vulnerability, a three-layer coupled network model integrating highway, railway, and port shipping was constructed by taking the western new land-sea corridor as the object, and a multi-layer weighting centrality algorithm based on improved TOPSIS was proposed. This centrality not only integrated the local and global information of nodes but also considered the importance of network layers, which could identify key nodes more accurately. The non-linear cascading failure model was improved, and a nearest-neighbor load distribution strategy was introduced to simulate real load propagation. By combining the dual failure scenarios of nodes and edges, the network vulnerability was evaluated through various attack strategies. The results show that ports (e.g., Beibu Gulf) play a critical role in the multi-layer network; in the comparison of attack strategies, the attack targeting nodes identified by the multi-layer weighting centrality algorithm has the strongest destructive power; attacking the top 5% of key edges can cause a 38% loss in network connectivity.

收稿日期：2025-09-30
通信作者：胡富文(2001—)，男，江西赣州人，浙江科技大学管理学院硕士研究生。
基金项目：国家社会科学基金项目(23BGJ068)；教育部人文社会科学研究一般项目(22YJAZH023)；浙江省社会科学界联合研究课题(2023N060)

Keywords: Layer Centrality Weighting; Multi-Layer Network; Cascading Failure; Western New Land-Sea Corridor; Vulnerability Measurement

0　引言

为推动西部陆海新通道高质量发展，国家陆续出台多项重大政策加以部署和引导。2021年8月，国家发展和改革委员会印发《“十四五”推进西部陆海新通道高质量建设实施方案》，明确提出要打造高水平、可持续的多式联运体系和现代物流网络[1]。党的二十大报告进一步强调，要加快建设西部陆海新通道，以推进高水平对外开放、构建内陆开放高地。经过多年的持续建设和制度创新，西部陆海新通道已初步形成“通道+枢纽+网络”的发展格局。

关于西部陆海新通道的研究，主要集中在经济联系与产业协同[2-3]、网络拓扑结构及关键要素识别等维度。唐红祥等[4]研究产业协同对通道发展的推动作用；王景敏等[5]运用Tobit回归模型对西部陆海通道的物流效率进行了实证检验；马永腾等[6]从基础设施耦合关系角度分析通道运行机制。这类研究从通道整体层面揭示了区域经济联系与物流运输组织的相互关系，但未能深入揭示其内部复杂的物理结构与运行机理。随后，复杂网络理论的应用为解析通道拓扑结构提供了微观视角[7]，在此范畴内，一类研究侧重于单层或复合网络框架下的结构特性与优化分析，Gao等[8]以运输成本、时间与碳排放最小为目标，构建多目标路径优化模型；冯芬玲等[9]构建复合网络并开展级联失效仿真；另一类研究聚焦于网络关键要素识别，从基于局部拓扑的度中心性[10]、里程加权算法[11-12]，到融合全局信息的介数、接近中心性[13]及综合权重方法[14-15]，识别精度不断提升。然而，这些方法本质上仍局限于单层网络的分析范式，难以刻画节点在“公路-铁路-港口”等多层耦合结构中的综合重要性及其跨层桥梁作用。

近年来，多层网络理论的发展为刻画多式联运系统的复杂性提供了新兴框架。如Rahmede等[16]提出的MultiRank方法；Su等[17]研究的PageRank和HITS算法攻击策略；Lin等[18]基于超拉普拉斯能量的新节点识别方法；Huang等[19]提出了一种基于多层网络的高阶邻居中心性引力模型，提高了关键节点识别的准确性和效率。然而，这些方法在应用于西部陆海新通道研究时，仍无法有效刻画公路、铁路与港口之间的多层耦合关系[20]。

为此，基于多层网络理论，提出一种融合局部、全局与层间耦合特征的多层赋权中心性算法，旨在克服单层网络分析范式的理论局限，从而精确识别西部陆海新通道多式联运网络中的关键节点，构建脆弱性测度的框架。该框架以节点关键性识别为基础，综合考虑网络拓扑关联与层重要性特征，通过比较不同攻击策略下网络效率与最大连通子图占比的变化，量化评估通道在不同失效场景下的脆弱性水平，以揭示西部陆海新通道多层网络的结构弱点与潜在风险。

1　问题描述与建模

1.1　网络模型说明与原则

西部陆海新通道的物流组织模式主要包括铁海联运班列、跨境公路班车以及国际铁路联运班列3种类型。基于复杂系统与多层网络的理论视角，将其抽象为一个由公路、铁路与港口3个异质性子网络耦合而成的多层系统。该模型以运输节点的实际空间分布与运输关系为核心，基于Space-L空间建模方法，利用Python进行实现，以揭示西部陆海新通道在不同运输方式耦合下的网络结构特征。模型构建遵循以下原则。

（1）西部陆海新通道为双向运输通道，在构建网络时不考虑方向性，网络的性质为无向的3层复杂网络。

（2）网络仅考虑西部陆海通道内最主要的3种货运方式，即跨境公路运输、跨境铁路运输、水路运输，不考虑其他运输方式，各层网络内部的连边表征实体交通基础设施的连接关系。

（3）网络节点代表具备特定运输功能的物理枢纽，若同一地理位置的枢纽具备多种运输功能，则在模型中将其建模为一个跨层节点，并在其所属的不同网络层之间建立跨层连接，以表征其多式联运能力。如位于铁路层与港口层的同一节点之间的连接，其物理意义即为该枢纽所承载的“铁海联运”功能。

（4）如果2个节点之间存在不止一条连接路径，这些重复的连边在构建网络结构时，统一看作一条连边。

1.2　西部陆海新通道网络模型构建

构建西部陆海新通道三层复杂网络G，其中G的表达式如公式(1)所示。

$$G=(G_a,\ G_b,\ G_c) \tag{1}$$

式中：G_a表示跨境公路运输网络；G_b表示铁路运输网络；G_c表示海运网络。

$$\begin{cases} G_x=(V_x,\ E_x,\ W_x) \\ V_x=(v_1,\ v_2,\ \cdots,\ v_m) \\ E_x=(e_1,\ e_2,\ \cdots,\ e_n) \end{cases} \tag{2}$$

式中：G_x为某层复杂网络，$x\in(a,\ b,\ c)$；V_x为网络中的节点集合；E_x为网络中的连边集合，表示各层节点中实际存在的运输路线。

西部陆海新通道属于交通网络，其边权重，需要从节点距离，或节点负载进行考虑，为此研究将网络的边介数中心性设置为网络的权重。边介数中心性是指边e在网络中其他节点对之间的最短路径上出现的次数比例。这一指标显示了节点的传输和中继能力，其计算公式为

$$C_B(e)=\sum_{s,\ t\in V}\frac{\sigma(s,\ t|e)}{\sigma(s,\ t)} \tag{3}$$

式中：s，t为网络中的2个不同节点，分别代表最短路径的起点和终点；$\sigma(s,\ t)$为最短$(s,\ t)$路径的数量；$\sigma(s,\ t|e)$为通过$e\in E$的路径数量。

当边介数中心性越大时，其代表在网络上的交通压力越大，其相应的权重越大，边介数中心性集合W_x如式(4)所示。

$$W_x=\{w_1,\ w_2,\ \cdots,\ w_h\} \tag{4}$$

式中：w_i为边e_i的权重。

1.2.1　重要节点识别指标选取

针对西部陆海新通道网络结构中运输方式多元、路径耦合紧密的特点，单一拓扑指标难以全面反映节点的重要性。从陆海联运通道局部、全局与层级3个维度构建指标体系，综合刻画节点在多层网络中的结构作用。

在节点重要性评价中，选用度中心性(Degree Centrality，DC)和介数中心性(Betweenness Centrality，BC)作为代表局部信息和全局信息的指标。DC衡量节点的直接连接数量，用于识别各运输子网内部的区域集散枢纽；BC衡量节点对网络流通的控制能力，用于识别连接不同区域或运输层的关键桥梁节点。同时使用DC和BC，可从“局部连通”和“全局控制”2个维度量化节点的重要性，为后续综合评价提供基础。

1.2.2　局部指标和全局指标融合

为科学评估节点在网络中的重要性，从多维度拓扑结构特征出发，采用多指标融合的方式对节点进行综合排名。整个过程包括中心性指标提取、指标归一化、权重计算与融合、节点多层赋权层中心得分计算等步骤，具体如下。

（1）中心性指标构建与归一化。首先，在每一层网络中分别提取中心性指标。选取度中心性和介数中心性为节点结构属性的代表，并组合成如下矩阵。

$$\boldsymbol{X}=\begin{pmatrix} x_{di} & \cdots & x_{bi} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{dn} & \cdots & x_{bn} \end{pmatrix} \tag{5}$$

式中：x_{di}为节点i的中心性值；x_{bi}为节点i的介数中心性。

（2）权重计算与融合。为提升指标加权的科学性与适应性，对归一化的局部指标和全局指标进行权重分配，具体方法如下。①CRITIC法：依据各指标的标准差与指标间相关系数，构建指标权重，强调区分度大、相关性小的指标在综合评价中的贡献。②熵权法：基于信息熵理论，通过评估指标值在所有节点间的分布离散程度进行加权，离散程度越大，信息熵越小，指标权重越高。③信息熵融合法：将CRITIC法和熵权法得到的权重按列归一化，然后进行融合，得到融合权重。④基于融合权重的TOPSIS法：利用融合权重对归一化矩阵进行加权处理，通过测度各节点与理想解和负理想解之间的距离，获得节点的贴近度排序。

（3）信息熵权融合。利用各节点的综合权重和归一化中心度得分，用信息熵权融合法，计算节点重要性综合指数。具体公式如下。

$$W=\begin{bmatrix} \boldsymbol{w}_j^{\text{critic}} \\ \boldsymbol{w}_j^{\text{entropy}} \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\tilde{w}_j^k=\frac{w_j^k}{\sum_{j=1}^{n}w_j^k} \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{w}_j^{\text{critic}}$为CRITIC法得到的权重向量；$\boldsymbol{w}_j^{\text{entropy}}$为熵权法得到的权重向量；$\tilde{w}_j^k$为每列归一化的权重。

计算融合权重。

$$E_k = -\frac{1}{\ln K}\sum_{j=1}^{m}\tilde{w}_j^{\,k}\ \ln(\tilde{w}_j^{\,k}+\varepsilon) \tag{8}$$

$$d_k = 1 - E_k \tag{9}$$

$$\omega_k = \frac{d_k}{\sum_{k=1}^{K} d_k} \tag{10}$$

$$w_j^{\text{final}} = \sum_{k=1}^{K}\omega_k\,\tilde{w}_j^{\,k} \tag{11}$$

式中：K为类别数、指标数或最大可能的状态数；ε为一个极小正数；d_k为差异系数；w_j^{final}为最终融合权重。

将通过信息熵融合法得到的权重矩阵与熵权法初始矩阵相乘。

$$X_{\text{topsis}} = w_j^{\text{final}}\boldsymbol{X} \tag{12}$$

式中：w_j^{final}为最终融合权重；$\boldsymbol{X}$为初始矩阵。

最后，通过TOPSIS法计算最终得到的节点i的综合得分为s_i^{topsis}。

1.2.3　基于多层赋权层中心的关键节点识别

为了进一步考虑多层交通网络中不同交通方式之间的结构异质性，引入MultiRank层中心性作为层权重因子[16]。MultiRank可同时评估节点的重要性与其所在层的重要性，从而能够更全面地识别关键节点。该方法包括2个步骤：一是通过迭代计算获得节点中心性得分，二是评估各层在整体网络中的影响力；最终将节点重要性得分与所在层权重相融合，形成兼具局部特征、全局特征与层间异质性的多层赋权层中心性(Multi-Layer Empowerment Centrality，MEC)指标。

在获得节点综合得分后，考虑到多层网络结构的异质性，进一步引入MultiRank层中心性作为层权重，以反映不同交通方式在网络整体中的结构地位。层中心性计算公式如下所示。

$$X_i = \tilde{\alpha}\sum_{i=1}^{N}\frac{\boldsymbol{G}_{ji}}{K_j}X_j + \beta v_i \tag{13}$$

式中：X_i为节点i的中心性得分；$\boldsymbol{G}_{ji}$为邻接矩阵；K_j为节点j的出度；v_i为节点i的先验重要性；β为随机跳转项。

$$z^{[\alpha]} = \frac{1}{N}\left(W^{[\alpha]}\right)^{a}\left(\sum_{i=1}^{N}B_{\alpha i}^{in}\left(X_i\right)^{\gamma}\right)^{s} \tag{14}$$

式中：$z^{[\alpha]}$为第α层的中心性权重；$W^{[\alpha]}$为层α的结构权重；a为对层结构权重的敏感性调节参数，取值范围[−1，1]；γ为控制节点得分的非线性权重，通常取值范围[0，1]；s为调节层中心性评分与节点得分之间的敏感性。

最终，节点得分与其所属层权重相乘，形成融合“局部−全局−层级”特征的节点重要性得分，用于关键节点的识别排序。具体公式如下。

$$F_i = \hat{S}_i \times \lambda_{l(i)} \tag{15}$$

式中：$\hat{S}_i$为节点i在多层网络中综合评分；$\lambda_{l(i)} = z^{[\alpha]}$为节点$i$所在层的MultiRank权重。

2　西部陆海新通道网络脆弱性仿真建模

2.1　级联失效模型

在复杂交通网络中，节点间存在密切的结构与功能耦合关系，一旦关键节点因突发事件或人为攻击而失效，其承载的交通运输任务将不可避免地向周边节点转移，从而可能引发连锁性的级联失效现象。西部陆海新通道作为多节点、多模式交织的综合性运输网络，面临更高的系统性风险。因此，有必要引入符合现实运输逻辑的负载转移策略，分析西部陆海新通道运输网络受到干扰后的脆弱性演化过程。

2.1.1　节点初始负载

由于目前部分区域的西部陆海新通道运营数据尚未公开，且沿线涉及的城市较多，各种运输方式统计口径不一致，且实际节点涉及到货物中转、存储或处理等多个环节，节点的货物负载信息难以获取，因此将网络节点的介数中心性作为节点的初始负载。

$$L_n = C_B(i) = \sum_{s\neq i\neq t}\frac{\sigma_{st}(i)}{\sigma_{st}} \tag{16}$$

式中：σ_{st}为节点s到t的最短路径数；$\sigma_{st}(i)$为经过节点i的最短路径数。

2.1.2　节点容量

一个节点的容量是该节点所能处理的最大负载，其受成本严格限制。在基于负载的级联失效模型中，节点V_n的容量C_n与初始负载L_n成正比，公式如下。

$$C_n = (1 + r_1)L_n \tag{17}$$

式中：r_1为容忍参数，表示节点V_n额外的容量；L_n为初始负载。

实际网络中容量和负载展示了一种非线性行为。因此，本研究使用更加接近于真实物流场景的负载容量模型，该模型采用2个参数，更具灵活性。

$$C_n = L_n + r_2 L_n^{r_1} \tag{18}$$

式中：r_2为容忍参数，其中，$r_1 \geqslant 0$且$r_2 \geqslant 0$。

2.1.3　失效节点负载分配

为反映现实中节点功能冗余与就近调度机制的实际特征，采用李欢[21]的NNL策略，当某一节点因超负荷而失效时，其原有货运量将根据其直接邻接节点的剩余承载能力进行比例分配。该分配机制不仅模拟了现实的负载传播，还刻画了局部范围内运输网络通过路径与节点的相互替代来吸收扰动、维持基本运行的韧性能力。邻接节点的剩余容量共同构成了该失效节点的局部韧性缓冲池。具体而言，设失效节点的负载为L_i，其邻居集合为N_i，每个邻接节点$j \in N_i$的剩余容量为R_j，则节点i的负载将按如下比例重新分配至其可用邻接节点。

$$\Delta L_{(i \to j)} = L_i \frac{R_j}{\sum_{k \in N_i} R_k} \tag{19}$$

式中：L_i为失效节点i的当前负载；N_i为节点i的邻接节点集合；R_j为邻接节点j的剩余容量，若邻接节点中有$R_j = 0$，则该节点无法接受任何转移负载。

当部分邻接节点的剩余容量不足以完全吸收失效节点的负载时，可能出现次级节点因承载过载而继续失效的情况，形成典型的级联失效链条。NNL策略通过就近原则与剩余承载能力联合控制，有效模拟了现实运输体系中“就近调度+容量限制”的运行逻辑。

2.2　西部陆海新通道脆弱性测度方法构建

为精准测度西部陆海新通道网络在扰动下的脆弱性，构建了面向节点与边失效的脆弱性测度模型。模型基于蓄意攻击与随机攻击策略，模拟通道网络在关键节点或关键通道受损时的性能退化过程，并通过级联失效模拟扰动的传播效应。为量化脆弱性变化，选取网络效率与最大连通度为核心指标，分别反映网络运输效率与结构连通性的损失程度。综合两者变化幅度，可反映三层网络在多种攻击场景下的脆弱性水平，进而识别通道结构的薄弱环节与韧性极限。

2.2.1　节点攻击策略

研究构建了9类攻击情景，并与近些年多层网络前沿方法进行横向对比。具体策略如下：①度中心性攻击：高频承载货物流动的高连接度节点(如重庆铁路枢纽、钦州港)遭遇攻击时，会快速切断多条运输路径。仿真中按照度中心性值排序逐步移除节点。②介数中心性攻击：介数中心性高的节点承担大量路径转运功能，具有显著的“桥梁”作用(如成都、贵阳、南宁)。其失效将严重影响网络整体连通性。策略依据节点介数中心性排序优先移除。③多层赋权层中心性攻击：为反映节点在多层网络中的综合作用，采用多层赋权层中心性指标对节点排序，并依次移除高分节点，模拟其在多层耦合结构中失效的冲击。④接近中心性攻击：高接近中心性节点(如南宁、贵阳)到网络中其他节点的平均距离最短，是网络的几何中心。攻击时按其接近中心性值排序移除。⑤PageRank攻击：该算法衡量节点全局综合影响力。高PageRank值节点(如新加坡港、香港港)通常是核心中转站，其运营中断会引发广泛连锁反应。仿真按其PageRank值排序移除。⑥HITS攻击：该算法区分节点的权威值和枢纽值。高权威值节点代表重要的货源地或目的地(如重庆、成都)。仿真按照权威值排序移除这些核心货源节点。⑦超拉普拉斯能量攻击：基于超拉普拉斯能量的方法识别对全网结构稳定性至关重要的节点(如北部湾港、上海港)。攻击时按照SLE值排序移除这些结构核心节点。⑧多层拉普拉斯重力中心性攻击：MLGC是一个更综合的指标，其将SLE作为节点的“质量”并嵌入重力模型，同时考虑节点间拓扑距离。高MLGC值节点(如上海港、新加坡港)是能辐射全局的超级枢纽。攻击时按其MLGC值排序移除。⑨随机攻击：在西部陆海新通道的运营过程中，枢纽城市或港口可能因突发的自然灾害而在短时间内失去运输功能。由于灾害具有不可预测性和影响的随机性，受损节点往往呈现随机分布特征。

2.2.2　连边攻击策略

为了进一步模拟西部陆海新通道运输网络在边失效情况下的脆弱性表现，研究设定了2种具有代表性的连边攻击策略。

（1）随机攻击。考虑到自然灾害、交通事故等

不可预测因素，导致运输通道(边)随机失效的现实情况。模拟中每步随机选择一条尚未失效的边进行删除，反映自然灾害、突发事故等引发的运输线路随机中断，体现运输网络的随机风险。

（2）基于边权重的攻击。在运输网络中，不同边承载的货运量和重要性存在显著差异。高权重边通常代表主要运输通道，如铁路主干线、公路重要路段等，失效对网络连通性和效率影响极大。综合考虑基于边的权重指标及边介数中心性，按照边权重由高到低依次删除，模拟针对关键运输通道的蓄意攻击或系统性破坏，揭示关键边失效对网络的脆弱性影响。

这2种连边攻击策略紧密贴合实际运输风险场景，分别反映随机突发性破坏和重点通道蓄意打击，为网络脆弱性评价提供重要视角。

2.2.3　网络脆弱性衡量指标

为系统评估西部陆海新通道的脆弱性，需采用能直接反映其物流功能的核心指标。最大连通度与网络效率因其明确的物理意义及在基础设施网络研究中的广泛应用[22]，用于本研究的测度标准。

（1）最大连通度。指网络中最大连通子图所包含的节点数占总节点数的比例，该指标能够反映网络在遭受节点攻击后是否保持大范围连通。

$$R = \frac{N_{\max}}{N} \tag{20}$$

式中：R为最大连通度；$N_{\max}$表示当前剩余网络中的最大连通子图数量；N表示网络中的初始节点总数。

该指标的有效性在于其直观量化了网络的基础通达性。最大连通度的下降直接表征网络发生结构性分裂，其数值直接映射为现实运输网络中因关键节点或边失效而导致通道连通性丧失风险。

（2）网络效率。网络效率衡量的是所有节点对之间信息或货物流通的平均效率，即网络中每一对节点之间距离的倒数之和，是评估服务连续性的重要指标。其计算公式为

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij} \tag{21}$$

式中：E为网络效率；d_{ij}为节点i与节点j之间的最短路径长度，当i与j不连通时，$\frac{1}{d_{ij}} = 0$；$E \in [0, 1]$，值越大表示网络传输效率越高。

该指标直接关联运输系统的运营效率。网络效率值的下降意味着节点间平均最短路径增加，这精准反映了现实物流中因路径中断或绕行所引起的平均运输时间延长与物流成本上升。

2.2.4　级联失效节点攻击策略流程图

基于NNL策略，建模西部陆海新通道级联失效仿真流程，西部陆海新通道级联失效仿真流程如图1所示，主要包括以下步骤。

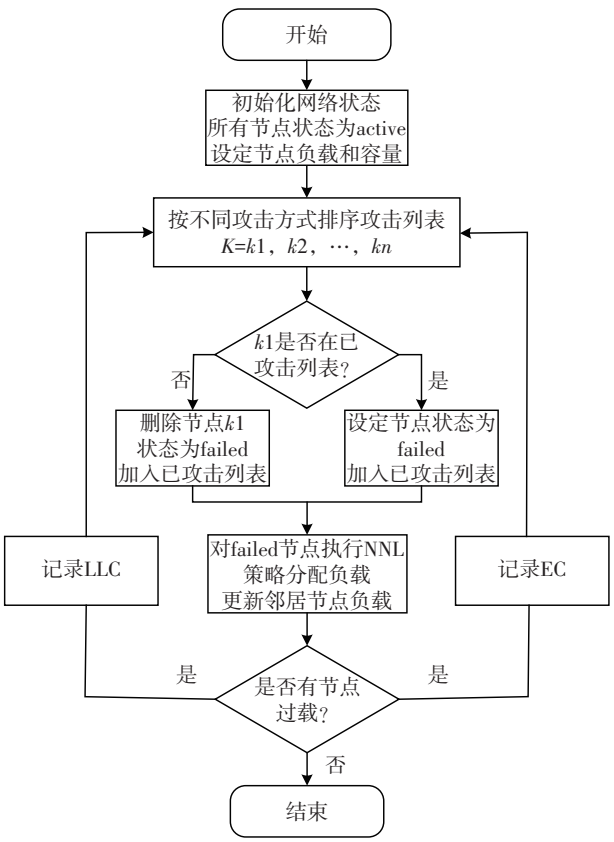

图1　西部陆海新通道级联失效仿真流程

Fig.1　Simulation process of cascading failure in western new land-sea corridor

（1）网络初始化。设定每个节点的初始状态为“active”，计算其负载，并计算承载容量r_1与r_2。

（2）攻击顺序设定。根据指定策略(如随机、基于度中心性、介数中心性、多层赋权中心性)生成攻击节点序列。

（3）攻击节点选择与处理。依次检查攻击节点是否已在攻击列表中，若未被攻击，则设为“failed”状态并记录。

（4）NNL负载再分配。对所有已失效节点，基

于邻居剩余容量执行最近邻负载转移，更新邻居节点的负载。

（5）过载判断。判断当前网络中是否存在节点负载超过其容量，若存在，则将其加入失效节点列表并返回到步骤(3)继续迭代。

（6）指标记录与仿真终止。在每轮迭代结束后，记录最大连通度与网络效率等脆弱性指标。当网络中无新增过载节点，仿真结束。

通过该流程，可动态模拟节点失效引发的级联过程，从而分析网络结构稳定性与关键节点的重要性。

2.2.5　级联失效连边攻击策略流程图

从边失效视角进一步模拟西部陆海新通道运输网络的脆弱性表现，级联失效连边攻击策略流程如图2所示。

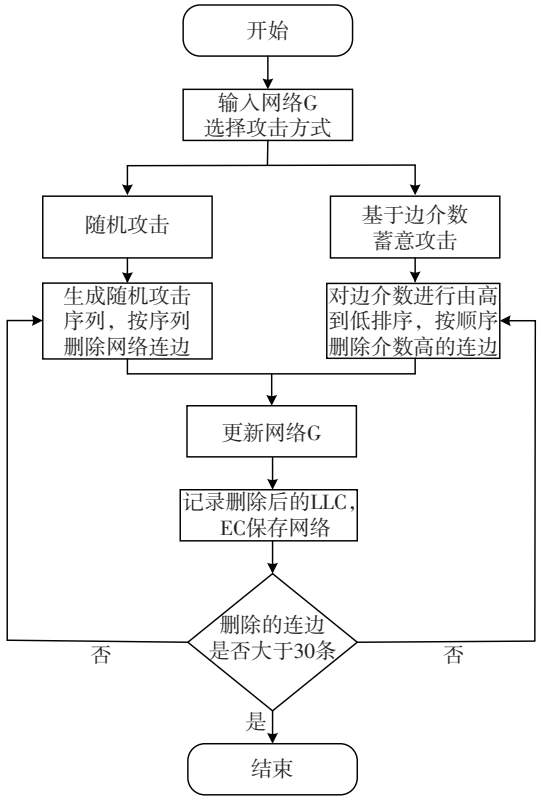

图 2　级联失效连边攻击策略流程

Fig.2　Flowchart of edge attack strategy for cascading failure

（1）网络初始化。设定初始网络拓扑结构，复制原始图以避免修改原图。若网络为非连通图，计算并记录其初始最大连通子图节点数作为基准。

（2）攻击策略设定。根据设定的边攻击方式生成攻击边序列。根据介数策略计算当前图中所有边的介数中心性并排序。

（3）攻击边选择与移除。按照攻击序列，依次选取目标边并从图中删除。每步攻击后，网络结构发生变化，进入指标评估阶段。

（4）结构性指标评估。在每次攻击后，判断当前图是否连通；若非连通，则提取最大连通子图。计算整个网络的全局效率与当前最大连通子图节点数占比作为脆弱性评估指标。

（5）数据记录与迭代执行。将当前步骤下的网络效率与最大连通度比例进行记录，保存为仿真输出数据并更新网络。随后进入下一轮边移除操作，返回到步骤(3)持续迭代。

（6）仿真终止判断。当攻击步骤达到设定次数或无更多边可移除时，仿真结束。最终输出各阶段网络脆弱性指标变化情况。

3　西部陆海新通道网络构建与脆弱性仿真

3.1　数据来源与网络模型概述

数据主要来源于2021年1月至2024年11月之间“西部陆海新通道门户网”公布的统计数据。数据整理得到西部陆海新通道三层运输网络如图3所示，红色为铁路运输网络，绿色为公路运输网络，蓝色为海运网络，其中G的点集V中共有462个节点，边集E中共有882条边。G的网络平均度为3.56，其中A层(公路运输网络)网络平均度为2.20，B层(铁路运输网络)网络平均度为2.42，C层(海运网络)网络平均度为4.39。

为深入理解网络的拓扑特性，对网络度分布特征进行分析，度分布柱状图如图4所示，图4显示该网络有明显的长尾特征，具有无标度属性，少数节点拥有极高的度数，多数节点度数较小，这符合交通运输网络的特性。

3.2　西部陆海新通道关键节点识别

为准确评估西部陆海新通道多式联运网络中各层的结构重要性及关键节点的功能价值，首先利用MultiRank算法计算层中心性，并通过系统的参数敏感性分析确定最优参数组合，以确保结果能够反映各层的功能价值和战略地位，而非简单地受层规模影响。在此基础上，进一步采用多层赋权层中心性指标对网络中的关键节点进行识别与排序。

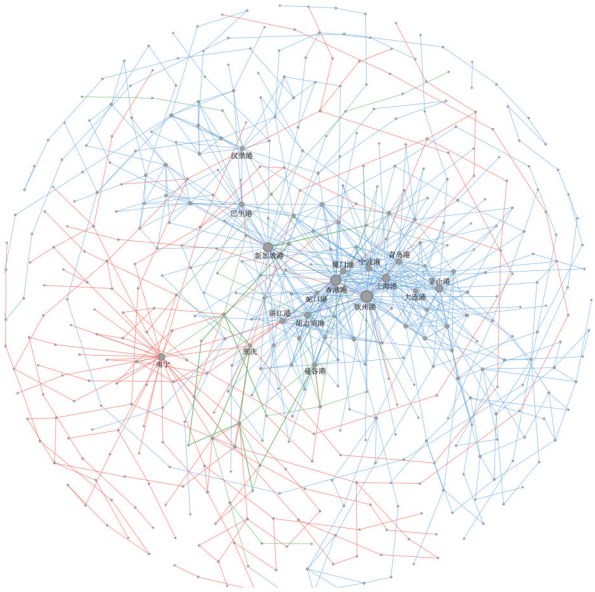

图 3　西部陆海新通道三层运输网络

Fig.3　Three-layer transportation network of western new land-sea corridor

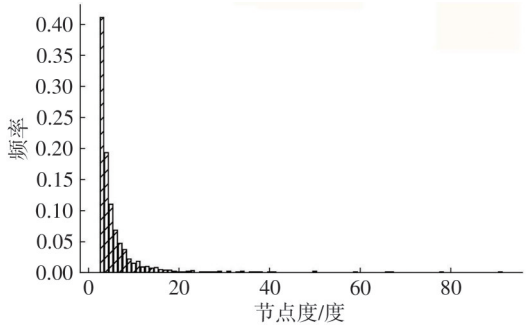

图 4　度分布柱状图

Fig.4　Histogram of degree distribution

3.2.1　参数选择与敏感性分析

MultiRank 算法通过层间影响力权重(a)、层内节点中心性聚合方式(s)和中心性贡献调节因子(γ)3个关键参数来建模多层网络中层的中心性。其中，参数a控制层间影响力的归一化处理($a=0$时归一化，$a=1$时不归一化)；参数s决定层内节点中心性的聚合方式($s=1$倾向于包含更多中心节点的层，$s=-1$奖励精英层)；参数γ在$s=1$时调节低中心性节点贡献($\gamma>1$抑制，$\gamma<1$增强，$\gamma=1$平衡)。西部陆海新通道多式联运网络具有显著的异质性，其公路、铁路和海运层在连接数量上存在巨大差异。研究认为通道是一个“功能型层级”网络，各层的战略价值和影响力应基于其在通道中的实际功能和结构作用，而非简单地由其连接数量决定。因此，算法参数的选择让层中心性和层规模彼此保持独立，没有互相影响，并识别出各层之间均衡且协同的作用。

为评估不同参数组合对系统的影响，对于参数a和s，分别选取$a\in\{0,1\}$，$s\in\{-1,1\}$。对于参数γ，旨在识别各层在通道中的实际功能价值和战略地位，如果选择$\gamma<1$会过度放大低中心性节点的贡献，从而稀释核心节点的影响，不利于识别骨干层和关键枢纽。因此，主要考察$\gamma=1$和$\gamma=3$两种情形，即$\gamma\in\{1,3\}$。对于每种组合，计算了各层的MultiRank中心性得分，并进一步计算了层中心性分布的Gini系数和变异系数，以及层中心性得分与层节点规模之间的Spearman相关系数。不同参数组合下各层MultiRank中心性得分如表1所示。不同参数组合下的层中心性分布与规模相关性指标如表2所示。

表 1　不同参数组合下各层MultiRank中心性得分

Tab.1　MultiRank centrality scores of each layer under different parameter combinations

参数	公路层	铁路层	海运层
$a=0$，$s=-1$，$\gamma=1$	0.009	0.105	0.886
$a=0$，$s=-1$，$\gamma=3$	0.026	0.121	0.853
$a=0$，$s=1$，$\gamma=1$	0.315	0.294	0.392
$a=0$，$s=1$，$\gamma=3$	0.150	0.315	0.535
$a=1$，$s=-1$，$\gamma=1$	0.001	0.036	0.963
$a=1$，$s=-1$，$\gamma=3$	0.004	0.054	0.942
$a=1$，$s=1$，$\gamma=1$	0.037	0.175	0.789
$a=1$，$s=1$，$\gamma=3$	0.015	0.143	0.842

表 2　不同参数组合下的层中心性分布与规模相关性指标

Tab.2　Correlation metrics between layer centrality distribution and scale under different parameter combinations

参数组合	Max	Gini	CV	Spearman Rho
$a=0$，$s=-1$，$\gamma=1$	0.886	0.585	1.178	1.0
$a=0$，$s=-1$，$\gamma=3$	0.853	0.552	1.109	1.0
$a=0$，$s=1$，$\gamma=1$	0.392	0.065	0.127	0.5
$a=0$，$s=1$，$\gamma=3$	0.535	0.257	0.474	1.0
$a=1$，$s=-1$，$\gamma=1$	0.963	0.642	1.337	1.0
$a=1$，$s=-1$，$\gamma=3$	0.942	0.625	1.293	1.0
$a=1$，$s=1$，$\gamma=1$	0.789	0.501	0.981	1.0
$a=1$，$s=1$，$\gamma=3$	0.842	0.551	1.091	1.0

从表1和表2可以看出，当$a=1$时，Gini系数和CV值普遍较高，表明层中心性分布高度不均衡，海运层的得分普遍接近1，占据了压倒性优势。更重要的是，在所有$a=1$的组合中，层中心性得分与层规模之间的Spearman相关系数均为1.0，这明

确指出层中心性排名与层规模排名完全一致，即中心性高低完全由层的连接数量决定。这与西部陆海新通道作为“功能型层级”的特性不符，会掩盖公路和铁路作为关键通道的战略价值。

相比之下，当$a=0$时，层中心性得分经过归一化处理，旨在降低对层规模的直接依赖。在此前提下，进一步考察s和γ参数的影响。相比于$s=-1$，$s=1$能更好地反映通道整体的协同作用，更符合识别通道骨干层和关键枢纽的需求。在$s=1$的基础上，选择$\gamma=1$意味着对低中心性节点的贡献保持平衡，有助于获得更稳健和代表性的结果。

综合来看，参数组合$a=0$，$s=1$，$\gamma=1$在所有测试组合中表现出最优的特性。其Gini系数和CV值均为所有组合中的最低值，表明层中心性分布最为均衡，避免了单一层的过度主导。同时，该组合的层中心性得分与层规模之间的Spearman相关系数为0.5，是所有组合中唯一不为1的，有效解耦了层中心性与层规模的直接依赖关系。这使得MultiRank算法能够更深入地评估各层在通道中的实际功能价值和战略地位，而非简单地由其连接数量决定。尽管参数扰动下层中心性排名一致性为中等水平，但本研究优先考虑层中心性分布的均衡性及与层规模相关性的解耦，这对于准确评估西部陆海新通道的特性至关重要。

综上所述，最终选择$a=0$，$s=1$，$\gamma=1$作为MultiRank算法的参数设置，以确保分析结果能够客观、准确地反映西部陆海新通道多式联运网络各层的真实功能和战略地位。

3.2.2　层中心性

在确定的最优参数组合下，各参数设置为$a=0$，$s=1$，$\gamma=1$，通过MultiRank算法得出西部陆海新通道交通运输网络各层层中心性得分，A层层中心性得分为0.315，B层层中心性得分为0.294，C层层中心性得分为0.392。其中C层(港口航运网络)的中心性得分最高，为0.392，表明港口层在整个多层网络中具有最强的结构影响力和网络控制能力；A层与B层得分分别为0.315与0.292，虽略低于C层，但也具备一定的网络重要性，尤其是在区域内部联通性方面发挥着基础支撑作用。

3.2.3　关键节点排名

通过对西部陆海新通道交通运输网络多层赋权层中心性得分的计算，得到了各个节点多层赋权层中心性得分排名，关键节点排名如表3所示。

表3　关键节点排名

Tab.3　Ranking of key nodes

排名	节点	多层赋权层中心性得分	层
1	北部湾港	0.391 8	*C*
2	新加坡港	0.264 8	*C*
3	香港港	0.244 9	*C*
4	南宁	0.206 9	*B*
5	上海港	0.153 0	*C*
6	釜山港	0.134 9	*C*
7	宁波港	0.110 5	*C*
8	曼谷港	0.101 0	*C*
9	胡志明港	0.086 5	*C*
10	重庆	0.086 4	*B*

北部湾港以0.391 8的得分位列首位，显示其作为西部陆海新通道战略性门户枢纽的重要地位，2024年北部湾港集装箱吞吐量高达901.52万TEU，同比增长12.4%，紧随其后的新加坡港和香港港在国际贸易与区域转运中占据核心地位，反映出西部陆海新通道不仅具有区域连接功能，更在全球航运网络中嵌入度较高。釜山港作为东北亚代表性港口，以多层赋权层中心性得分0.134 9位列第6，体现了在西部陆海新通道整体网络中的显著枢纽地位。从现实运行层面分析，釜山港不仅是东亚地区最繁忙的集装箱港口之一，同时也是《区域全面经济伙伴关系协定》(RCEP)的核心成员国节点。随着西部陆海新通道与日韩航线日益密切，钦州港等节点通过铁海联运方式，已实现与釜山港的常态化航运联系，这种联通关系推动了中韩之间的贸易便利化和多式联运效率提升。

在排名前十的节点中新加坡港、曼谷港、胡志明港为东盟国家港口，这表明在当前西部陆海新通道的多层交通网络中，东盟主要港口在网络结构中的中心性较高，显示出在区域互联互通体系中的枢纽地位。这些节点通过与我国沿海和内陆节点的航运连接，形成了“南向通道”上的关键通达口岸，其他东盟各国在这些节点上有着紧密的连接；此外，这一结果从网络结构的视角佐证了“中国–东盟”互联

互通合作的现实紧密性。新加坡港作为全球主要转口港之一，其在西部陆海新通道中的高排名体现出在国际航运网络与区域物流节点中的双重核心作用；曼谷和胡志明则作为东南亚大陆的关键港口，与我国西南地区海运路线高度耦合，说明西部陆海新通道已形成较强的“海上南向支点–陆上内陆门户”协同格局。

排名前十的节点中有8个位于*C*层，表明港口节点在当前通道体系中具有显著的枢纽属性和连接作用。除港口外，南宁和重庆分别以0.206 9和0.086 4的得分位列第4和第10位，作为陆上枢纽城市，他们在区域联通与铁海联运衔接中发挥桥梁作用，反映了*B*层节点在多式联运体系中的支撑性作用。从整体而言，西部陆海新通道的关键节点呈现出“海港为主、陆路为辅”的格局，*C*层港口节点的主导地位表明海上通道在提升整体网络效率与全球连接性方面具有不可替代的作用。同时，*B*层的核心节点则承担着内陆与港口之间的联通与转运职能，是实现区域物流高效协同的关键环节。

3.3　基于级联失效的通道脆弱性仿真

为定量评估西部陆海新通道多层网络在不同扰动情景下的脆弱性水平，基于前述级联失效模型，分别从网络效率与最大连通子图占比2个维度开展测度分析。前者反映系统整体传输性能的退化程度，后者刻画网络结构的稳健性变化。通过对比不同攻击策略下测度指标的变化趋势，可揭示通道在不同关键节点失效情境下的结构弱点与脆弱性特征。

3.3.1　基于网络效率的脆弱性测度

研究采取8类蓄意攻击情景及1类随机攻击，其中基于多层赋权中心性法排名攻击中的容量系数设置为0.2，由于随机攻击具有很强的随机性，因此进行20次随机攻击取平均值，来保证结果的稳定性。网络效率对比如图5所示。其中，网络效率的下降幅度可直观反映通道在性能层面的脆弱性水平，降幅越大，表示网络对功能扰动越敏感。

在模拟西部陆海新通道三层交通网络的级联失效过程中，以网络效率作为衡量指标，评估在不同攻击策略下的网络鲁棒性变化情况。该网络在未受到攻击时的初始全局效率为0.203。随着节点被逐步移除，网络效率整体呈现下降趋势，且不同攻击策略对网络造成的破坏程度存在显著差异。其中，

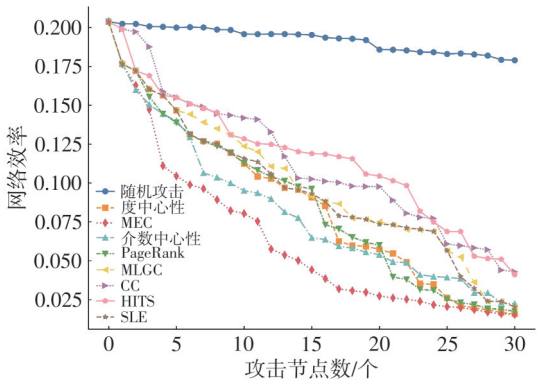

图5　网络效率对比

Fig.5　Comparison chart of network efficiency

MEC的攻击表现出最强的破坏能力，在节点移除初期便引发网络效率快速坍塌。这表明该算法所识别出的高危节点往往在多层网络结构中具有更高的重要性，其失效会直接破坏关键路径和跨层通达性，从而极大地削弱网络的整体传输能力。其次是基于网络的介数中心性进行攻击，这些节点失效会迅速使得多个节点的最短路径被中断，迅速破坏网络的整体结构，使得效率大大下降。相比之下，其他攻击方式虽亦对网络稳定性构成威胁，但其破坏速率相对较低。而随机攻击呈现出最为缓慢的效率衰减曲线，说明节点随机失效对网络整体运行能力的冲击相对有限。

3.3.2　基于最大连通度的脆弱性测度

选取最大连通子图占比作为另一项重要的网络脆弱性指标，该指标反映通道在连通性能层面脆弱性水平，体现节点连续失效过程中，网络中仍保持连接的最大子图所占比重，能够较为直观地揭示网络的整体可达性与结构完整性。级联失效下的最大连通子图对比如图6所示。

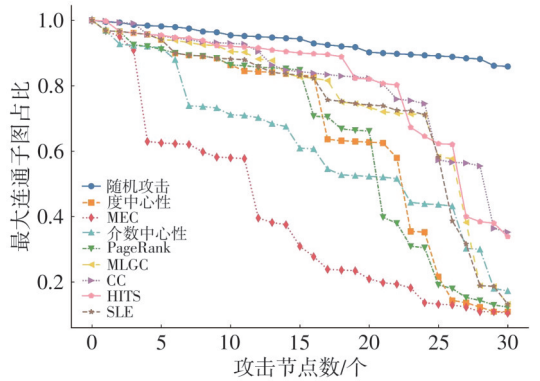

图6　级联失效下的最大连通子图对比

Fig.6　Comparison of largest connected component under cascading failure

MEC攻击与介数中心性攻击在最大连通子图的变化趋势上均表现出较强的破坏力，但其破坏路径与结构影响机制存在显著差异。在攻击节点数小于5时，2种策略均快速降低网络连通性，前期移除的节点包括MEC排名前五的北部湾港、新加坡港、香港港、南宁、上海港，以及介数中心性攻击中的钦州港、南宁港、新加坡港、香港港、贵阳。这些节点多数位于港口层或铁路层的关键交汇点，具有较强的跨层连接能力，其失效使得原本集中连通的网络开始出现断裂。

随着攻击节点数增加到10个，MEC攻击进一步移除釜山港、宁波港、曼谷港、胡志明港、重庆等国际与区域核心节点，网络的最大连通子图迅速跌破0.62，占比下降最为迅猛。相比之下，介数中心性攻击移除重庆、昆明、曼谷港、上海港后，虽也导致结构性断裂，但下降速度略缓，表现出更强的“路径导向型”破坏特征。而在攻击节点数>20时，PageRank攻击与度中心性攻击稳定地成为仅次于MEC的最高效策略，其破坏效果显著优于所有其他攻击算法。

MEC算法融合了节点的局部连接特征、全局结构特征以及跨层属性，更全面地揭示出网络中具有耦合影响力的关键节点，因此在攻击初期便造成严重破坏。而介数中心性攻击侧重于切断路径中介节点，其在网络路径冗余尚存时破坏效率稍低，但对运输走廊的“桥梁节点”识别能力强，尤其适合刻画连通性的通道脆弱性。

从整体而言，MEC攻击和介数中心性攻击策略在前5次攻击内均可快速击溃西部陆海新通道的主干结构，但MEC攻击更能体现多层耦合结构中的“系统性脆弱点”。在实际交通网络规划中，既要重点关注高频枢纽节点的通达性保障，也应加强多模式运输接口的容错能力与跨层通道的冗余建设，从而有效缓解不同类型攻击下的级联失效风险。

3.3.3　基于攻击模式的边失效脆弱性对比

为了进一步评估西部陆海新通道三层交通网络在节点失效过程中的连通性变化，基于陆海联运通道边失效仿真，对网络进行30次随机边攻击并取平均，和基于网络边权重分别进行静态和动态攻击。基于边攻击的最大连通子图比例变化对比如图7所示，基于边攻击的网络效率对比如图8所示。

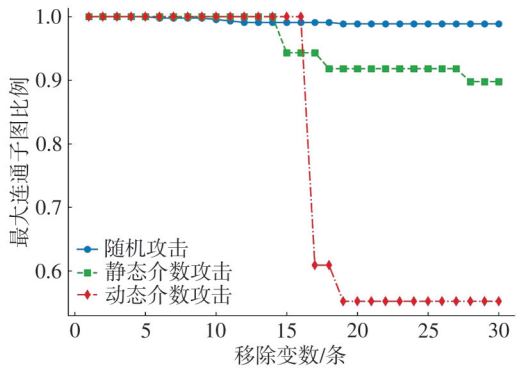

图7　基于边攻击的最大连通子图比例变化对比

Fig.7　Comparison of change in proportion of largest connected component based on edge attack

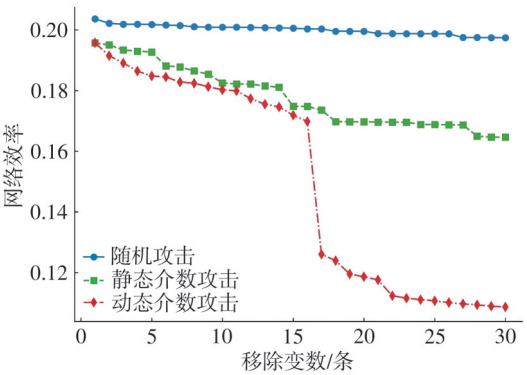

图8　基于边攻击的网络效率对比

Fig.8　Comparison of network efficiency based on edge attack

如图7所示，在移除边数<15时，3种策略下的最大连通子图比例均保持稳定。然而，当攻击持续进行，动态介数攻击的破坏力凸显，在移除约15至17条边后，网络连通性发生雪崩式崩溃，最大连通子图比例急剧降至约0.6。这一临界点是动态攻击策略通过实时重计算，精准且连续地移除了以“南宁—钦州”“昆明—曼谷”为代表的中国–东南亚国际走廊关键边。此举系统性削弱了该走廊的连通性，直至第17步移除边“仰光—槟城”时，触发了东南亚模块从主网络的彻底剥离，导致结构性瓦解。相比之下，静态攻击因无法动态调整目标，其攻击序列分散于全球枢纽，故只能引起网络的缓慢退化；随机攻击则几乎无效。

图8基于边攻击的网络效率对比，网络的功能性脆弱性呈现出更为敏感的特性。动态介数攻击下的网络效率退化曲线清晰地呈现出2个典型阶段。在第一阶段移除边数<17，尽管网络在结构上保持完整，但网络效率已呈现急剧的线性下降趋势。在

第二阶段移除边数≥17，效率曲线在低水平，进入一个新的、变化缓慢的平衡平台。静态介数攻击导致的效率下降虽优于随机攻击，但曲线平滑，缺乏明显的阶段性特征。这是因为静态攻击序列基于网络的最初排名，无法感知攻击过程中路径绕行导致的流量重分布，因而其破坏是一次性和非适应性的。而随机攻击的效率下降最为缓慢，也进一步印证了网络对非针对性故障的固有韧性。

4　结论及建议

4.1　结论

研究提出了一种多层复杂网络视角下的脆弱性测度方法，通过多层网络建模与关键节点识别，从不同网络结构视角识别出西部陆海新通道中的关键节点，测度结果揭示了通道网络在不同层次和节点类型上的薄弱环节，研究结论如下。

（1）多层网络结构与枢纽核心地位显著。通道展现出明显的无标度网络特性。北部湾港等港口节点在中心性指标上居于核心地位，2023年台风“泰利”导致的网络波动充分验证了核心港口受损对铁海联运效率的剧烈冲击。相比之下，铁路与公路枢纽虽中心性较低，但在保障跨层衔接与腹地集散方面具备关键的冗余价值。

（2）多层赋权中心性攻击对网络破坏性最强。通过与不同攻击策略进行对比，证明网络在多层赋权中心性攻击策略下，网络的连通程度和通行效率下降最快，验证了基于多层赋权中心性进行网络关键节点识别方法的有效性。这解释了突发事件引发的连锁反应，明确了对关键运输走廊进行冗余路径规划的紧迫性。

（3）级联失效下节点脆弱性呈现差异化特征。北部湾、重庆等高耦合节点在海陆转换中起路径控制作用；新加坡港、香港港、南宁等高介数节点则是提升整体网络效率的关键。

4.2　建议

研究识别了西部陆海新通道交通网络中的关键节点与关键通道，并揭示了其潜在脆弱性。基于研究结论，提出如下对策建议。

（1）加强关键节点与核心通道的韧性建设。针对识别出的关键节点和重要运输通道，应强化基础设施保障能力与冗余布局，提升核心枢纽在突发冲击下的运行稳定性。同时，可通过拓展替代运输线路，降低对单一主干通道的依赖，提高网络整体抗风险能力。

（2）建立关键节点与通道的动态监测与预警机制。依托物联网和北斗定位等技术手段，加强对关键节点和运输通道运行状态的实时监测，构建覆盖节点与通道的风险预警体系。当出现负载异常或拥堵风险时，及时启动应急调度与路径分流机制，降低网络级联失效风险。

（3）完善跨区域协同治理机制。加强沿线地区及相关部门之间的信息共享与协同管理，推动建立跨区域应急联动机制，并定期开展联合演练，以提升西部陆海新通道整体运行的协同保障能力。

参考文献：

[1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.“十四五”推进西部陆海新通道高质量建设实施方案[EB/OL]. (2021-08-17)[2025-03-11]. https：//www. gov. cn/zhengce/zhengceku/2021-09/02/content_5634939. htm.

[2] CHENG J N, CHEN J Z, YANG Z Z, et al. Resilience Analysis of the Sino-European Trade Transportation Networks: The Role of the New Western Land-Sea Corridor[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2025(201): 104284.

[3] 张　扬，杨成超，王兴平，等. 西部陆海新通道陆路物流网络格局演变模拟与比较分析[J]. 地理科学进展，2025，44(1)：34-48.
ZHANG Yang, YANG Chengchao, WANG Xingping, et al. Simulation and Comparative Analysis of the Change of Land Logistics Network Configuration in the New Western Land-Sea Corridor[J]. Progress in Geography, 2025, 44(1): 34-48.

[4] 唐红祥，夏惟怡，黄　跃. 西部陆海新通道制造业与物流业协同集聚的影响因素识别及突破路径研究[J]. 中国软科学，2022(8)：131-139.
TANG Hongxiang, XIA Weiyi, HUANG Yue. Research on the Influencing Factors and Breakthrough Path of the Synergistic Agglomeration of Manufacturing and Logistics in New Western Land-Sea Corridor[J]. China Soft Science, 2022(8):

131-139.

[5] 王景敏，崔利刚. 西部陆海新通道沿线省份物流效率的时空演进及影响因素：基于沿线省份面板数据的实证分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学)，2021，35(12)：243-255.
WANG Jingmin，CUI Ligang. Spatial-Temporal Evolution and Influencing Factors on Logistics Efficiency of the Provinces along the New Western Land-Sea Corridor：Empirical Analysis Based on Panel Data of the Provinces along the New Western Land-Sea Corridor[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)，2021，35(12)：243-255.

[6] 马永腾，蒋　瑛，鲍洪杰. 交通基础设施、数字经济与贸易增长：基于西部陆海新通道沿线区域的实证分析[J]. 改革，2023(6)：142-155.
MA Yongteng，JIANG Ying，BAO Hongjie. Transportation Infrastructure，Digital Economy and Trade Growth：A Research on the Regions along the New Western Land-Sea Route[J]. Reform，2023(6)：142-155.

[7] 尹　婷，王朝静，周　旋，等. 大风灾害下高速铁路网络脆弱性评价研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(8)：192-200.
YIN Ting，WANG Zhaojing，ZHOU Xuan，et al. Vulnerability Assessment of High Speed Railway Networks under Wind Disasters[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(8)：192-200.

[8] GAO T，TIAN J，HUANG C. The Impact of New Western Land and Sea Corridor Development on Port Deep Hinterland Transport Service and Route Selection [J]. Ocean & Coastal Management，2024，247：106910.

[9] 冯芬玲，董开云，张　泽，等. 基于级联失效的西部陆海新通道网络脆弱性分析[J]. 交通运输系统工程与信息，2024，24(6)：15-29.
FENG Fenling，DONG Kaiyun，ZHANG Ze，et al. Analysis of Vulnerability for New Western Land-Sea Corridor Network Based on Cascading Failures[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2024，24(6)：15-29.

[10] 郑文萍，吴志康，杨　贵. 一种基于局部中心性的网络关键节点识别算法[J]. 计算机研究与发展，2019，56(9)：1872-1880.
ZHENG Wenping，WU Zhikang，YANG Gui. A Novel Algorithm for Identifying Critical Nodes in Networks Based on Local Centrality[J]. Journal of Computer Research and Development，2019，56(9)：1872-1880.

[11] 严　开，李　玲，秦永彬. 道路交通网络中的关键节点识别方法研究[J]. 计算机工程与科学，2018，40(11)：1983-1990.
YAN Kai，LI Ling，QIN Yongbin. Key Node Identification Methods Based on Road Traffic Networks[J]. Computer Engineering and Science，2018，40(11)：1983-1990.

[12] 李　博，李治政，刘慧甜. 基于复杂网络的陕西省高速公路网络脆弱性分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版)，2023，42(8)：86-95，124.
LI Bo，LI Zhizheng，LIU Huitian. Vulnerability Analysis of Highway Network in Shaanxi Province Based on Complex Network[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences)，2023，42(8)：86-95，124.

[13] 杜佳昕，张　丰，杜震洪，等. 基于加权流量介数中心性的路网脆弱性分析：以无锡市为例[J]. 浙江大学学报(理学版)，2020，47(2)：223-230，243.
DU Jiaxin，ZHANG Feng，DU Zhenhong，et al. Assessing Vulnerability of Road Networks Based on Traffic Flow Betweenness Centrality：A Case Study in Wuxi[J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition)，2020，47(2)：223-230，243.

[14] 徐　凤，朱金福，陈　丹. 东航空铁联运双层加权网络的关键节点识别与抗毁性分析[J]. 铁道运输与经济，2023，45(1)：93-100.
XU Feng，ZHU Jinfu，CHEN Dan. Identification of Key Nodes and Invulnerability Analysis of Double-Layer Weighted Network of Air-Rail Inter-Modal Transport by China Eastern Airlines[J]. Railway Transport and Economy，2023，45(1)：93-100.

[15] HUANG Z S，ZHOU Y，LIN Y，et al. Resilience Evaluation and Enhancing for China's Electric Vehicle Supply Chain in the Presence of Attacks：A Complex Network Analysis Approach[J]. Computers & Industrial Engineering，2024，195：110416.

[16] RAHMEDE C，IACOVACCI J，ARENAS A，et al. Centralities of Nodes and Influences of Layers in Large Multiplex Networks[J]. Journal of Complex Networks，2018，6(5)：733-752.

[17] SU Y Q，YI Y F，QIN J. The Attack Efficiency of PageRank and HITS Algorithms on Complex Networks[J]. International

Journal of Embedded Systems，2019，11(3)：306.

[18] LIN W，ZHOU S M，LI M，et al. Identifying Key Nodes in Interdependent Networks Based on Supra-Laplacian Energy[J]. Journal of Computational Science，2022(61)：101657.

[19] HUANG Y J，LYU L S，LIU Y Q，et al. An Improved Gravity Model Based on Supra-Laplacian Energy for Identifying Key Nodes in Multilayer Networks[J]. Physics Letters A，2025(551)：130647.

[20] 庄汝龙，张晶晶，职梦露，等. 基于2000—2023年CNKI和WOS期刊文献的海铁联运研究综述[J]. 铁道运输与经济，2025，47(3)：66-83.
ZHUANG Rulong，ZHANG Jingjing，ZHI Menglu，et al. Review of Research on Sea-Rail Intermodal Transport：A Comprehensive Analysis Based on CNKI and WOS Journal Literature from 2000 to 2023[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(3)：66-83.

[21] 李　欢. 复杂网络级联故障负荷分配策略的研究[D]. 沈阳：东北大学，2021.

[22] 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[J]. China Journal of Highway and Transport，2022，35(4)：215-229.

(责任编辑　金　晶)

（上接第137页）

Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology，2022，61(1)：43-52.

[10] 朱惜勤. 基于心理健康研究的动车组司机安全管理[D]. 北京：北京交通大学，2014.

[11] 魏海明，赵青河，王　科，等. 机车乘务员心理健康状况调研与分析[J]. 铁路节能环保与安全卫生，2023，13(5)：43-47.
WEI Haiming，ZHAO Qinghe，WANG Ke，et al. Investigation and Analysis on Mental Health Status of Train Drivers[J]. Railway Energy Saving & Environmental Protection & Occupational Safety and Health，2023，13(5)：43-47.

[12] 姚汤伟，朱建昌，陈跃年. 机车乘务员超劳问题与对策[J]. 铁道运输与经济，2006，28(8)：84-85.

[13] 杜海宾，田长安，王　瑞，等. 铁路机车智能避障技术及系统研究[J]. 铁路物流，2026，44(2)：51-56.
DU Haibin，TIAN Chang'an，WANG Rui，et al. Research on Intelligent Obstacle Avoidance Technology and Systems for Railway Locomotives[J]. Railway Logistics，2026，44(2)：51-56.

[14] 刘国桐，张惟皎，喻冰春，等. 铁路司机电子手册设计及应用研究[J]. 铁道运输与经济，2022，44(3)：67-72.

[15] 张俊伟. 利用技防手段提高机车乘务员防错纠错能力的研究[J]. 交通科技与管理，2021，2(27)：243-244.

[16] 王　强，王春雨，张　哲，等. 关于单元万吨重载列车操纵全风险分析及对策[J]. 铁道货运，2020，38(4)：38-42.
WANG Qiang，WANG Chunyu，ZHANG Zhe，et al. A Study on the Operation Safety Risk Analysis and Strategies for Unit-Ton Heavy-Load Trains[J]. Railway Freight Transport，2020，38(4)：38-42.

[17] 张予生. 加强机务系统运用车间管理的探索[J]. 铁道运输与经济，2008，30(4)：51-52.

(责任编辑　刘宁馨)