文章编号：1003-1421(2026)04-0150-12
引用格式：关高峰，贾文博，孙东颖. 基于多层复杂网络的亚欧公铁海联运韧性研究[J]. 铁道运输与经济，2026，48(4)：150-161.
GUAN Gaofeng，JIA Wenbo，SUN Dongying. Research on Resilience of Asia-Europe Road-Rail-Sea Multimodal Transport Based on Multilayer Complex Networks[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(4)：150-161.

基于多层复杂网络的亚欧公铁海联运韧性研究

关高峰，贾文博，孙东颖

(浙江科技大学 管理学院，浙江 杭州 310023)

摘 要：为了全面动态测度亚欧物流通道网络韧性和维护运输网络安全，通过构建亚欧公铁海运输网络拓扑模型分析其基本网络特征。根据熵权-TOPSIS对网络基本指标进行综合计算，并通过分层网络效率识别网络中的重要节点。结果表明：亚欧公铁海运输网络具有无标度和小世界特性，关键节点识别发现新加坡、深圳、莫斯科等节点的删除对分层网络效率影响较大。按照重新介数删除节点使网络遭受的破坏最大；优先恢复度数较低节点之间的连边使网络恢复较快；介数中心性大小分配负载比平均分配更能减缓网络的级联失效过程。网络冗余系数越大，网络的抗毁性也就越高。研究结果为亚欧物流通道运输网络安全高效运行提供重要参考。

关键词：多层运输网络；分层网络效率；熵权-TOPSIS；韧性三角；负载级联失效
中图分类号：U15 **文献标识码**：A **DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250926002

Research on Resilience of Asia-Europe Road-Rail-Sea Multimodal Transport Based on Multilayer Complex Networks

GUAN Gaofeng，JIA Wenbo，SUN Dongying

(School of Management, Zhejiang University of Science & Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: To comprehensively and dynamically measure the resilience of the Asia-Europe logistics corridor network and maintain the security of the transportation network, a topological model of the Asia-Europe road-rail-sea transportation network was constructed to analyze its basic network characteristics. The basic indicators of the network were comprehensively calculated according to entropy weight-TOPSIS, and important nodes in the network were identified through layered network efficiency. The results show that the Asia-Europe road-rail-sea transportation network has scale-free and small-world properties. The identification of key nodes reveals that the deletion of nodes such as Singapore, Shenzhen, and Moscow has a significant impact on layered network efficiency. Deleting nodes according to recalculated betweenness causes the maximum damage to the network; prioritizing the restoration of edges between nodes with lower degrees enables the network to recover faster; allocating loads based on betweenness centrality mitigates the cascading failure process of the network more effectively than average allocation. A larger network redundancy coefficient means a higher invulnerability of the network. The research results provide an important reference for the secure and efficient operation of the transportation network of the Asia-Europe logistics corridor.

收稿日期：2025-09-26
通信作者：贾文博(1999—)，男，河南商丘人，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)；浙江省社会科学界联合研究课题(2023N060)；教育部人文社会科学研究一般项目(22YJAZH023)

Keywords: Multilayer Transportation Network; Layered Network Efficiency; Entropy Weight-TOPSIS; Resilience Triangle; Load Cascading Failure

0　引言

《“十四五”现代物流发展规划》[1](国办发〔2022〕17号)明确提出建设“两沿十廊”国际物流大通道，强化服务共建“一带一路”的多元化国际物流通道辐射能力。然而，亚欧物流通道运行仍面临一系列挑战，包括重大自然灾害、国际地缘政治变化及供应链不稳定因素等，这些都对物流通道的安全与高效运营带来影响。因此，构建物流通道网络是保障国际物流通道安全高效运行的重要途径。

复杂网络研究起源于20世纪90年代末，标志性事件为Watts等[2]于1998年在《自然》杂志上发表的小世界网络模型，以及Barabasi等[3]于1999年在《科学》杂志上提出的无标度网络模型。亚欧公铁海运输系统作为典型的复杂系统，其多模式、跨地域的特性使其适合运用复杂网络方法进行研究。已有研究在运输网络建模与关键节点识别方面取得了显著进展。张欣等[4]构建了中欧班列与海运集装箱运输网络，建立负荷级联失效脆弱性仿真模型；谢昭易[5]改进PageRank算法以识别中欧班列货运网络中的关键节点；张玉召等[6]构建中欧海铁运输双层网络，结合网络层相对重要性计算节点全局重要度；Zhang等[7]测度了国际集装箱多式联运枢纽的国内连通性、国际陆路连通性、国际铁海联运连通性与综合连通性；He等[8]提出公铁海多式联运货运网络的建模与稳健性评估模型。在风险研究方面，脆弱性分析特别是级联失效模型是评估网络抗毁性的重要手段。马晓雪[9]研究中国海上运输通道的公共安全，有效识别了自然环境、社会经济和人为因素3方面的风险；田帅辉等[10]利用超图理论构建西部陆海新通道物流模型并进行网络动态仿真；齐亚伟等[11]研究我国铁路货运网络在蓄意攻击下的级联失效抗毁性。

韧性研究为理解网络从扰动中恢复的能力提供了动态视角。Martin[12]根据韧性在不同阶段的表现，将其划分为抵御力、恢复能力、重组能力与创新能力4个阶段；Holling[13]提出韧性三角理论作为韧性评估方法；孙野[14]考虑中欧班列换装作业，基于韧性三角理论建立中欧班列运输网络韧性模型；肖红等[15]通过构建客流量加权的网络全局效率指标，为评估与提升地铁网络在突发事件下的韧性提供了有效方法；伍静[16]通过构建韧性-成本分析模型实现灾害影响下集装箱航运网络韧性的定量评价；王直欢等[17]基于复杂网络和韧性三角理论，构建定量评估港口群航运网络韧性的方法。现有韧性研究在恢复策略的对比上仍显不足。大多数研究默认采用某种单一恢复策略，缺乏对不同恢复策略效果的系统性对比分析，特别是针对公铁海复合网络这类复杂系统，何种恢复策略更优尚不明确。

本研究突破了现有研究多聚焦于单层或双层网络的局限[18]，通过构建亚欧公铁海三层复合运输网络模型，创新性地将熵权-TOPSIS法用于节点重要性综合识别，并构建了包含节点“部分失效”状态和基于介数中心性的负载重分配策略的级联失效模型，系统对比了多种蓄意攻击与差异化恢复策略，并引入韧性三角理论进行量化评估，为提升亚欧物流通道的韧性与安全管控提供了新的理论依据和决策支持。

1　亚欧物流通道复合网络结构分析

1.1　亚欧物流通道复合网络模型构建

基于超邻接矩阵的数学表达，本研究采用$\boldsymbol{G}=\{\boldsymbol{G}^g,\ \boldsymbol{G}^t,\ \boldsymbol{G}^h,\ \boldsymbol{R}_1,\ \boldsymbol{R}_2,\ \boldsymbol{R}_3\}$表示三层网络之间的连接关系，其中$\boldsymbol{G}^g$，$\boldsymbol{G}^t$，$\boldsymbol{G}^h$分别表示公路层、铁路层、航运层的邻接矩阵，公路网络$\boldsymbol{G}^g=(V^g,\ E^g)$中，$V^g$表示公路节点集合，$E^g$表示公路连边集合，$n_{ij}^{\ g}(n_{ij}^{\ g}=1$或$0)$表示层内连边节点$i$，$j$之间是否存在连边，铁路与海运网络层($\boldsymbol{G}^t$，$\boldsymbol{G}^h$)的定义与此一致，矩阵$\boldsymbol{R}_1$，$\boldsymbol{R}_2$，$\boldsymbol{R}_3$表示网络层间的耦合关系。

$$\boldsymbol{R}_1=\begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1j} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{i1} & \cdots & r_{ij} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中：$r_{ij}(r_{ij}=1$或$0)$表示公路与铁路物流通道层间节点i，j是否为耦合节点。

$\boldsymbol{R}_2$，$\boldsymbol{R}_3$同理，最终构建的超邻接矩阵为

$$G=\begin{bmatrix} G^{g} & R_1 & R_3 \\ R_1 & G^{t} & R_2 \\ R_3 & R_2 & G^{h} \end{bmatrix} \tag{2}$$

本研究采用Space L方法构建亚欧公铁海复合运输网络拓扑模型，将公路枢纽、铁路站点及港口所在城市抽象为网络节点，站点之间的实际连接线路抽象为网络边。铁路数据来源于各中欧班列运营公司发布的运行线路信息，涵盖班列途经及抵达的国内外主要城市，并参考《中欧班列建设发展规划(2016—2020年)》所明确的主要货源地区、铁路枢纽节点、沿海重要港口及沿边陆路口岸。公路数据中亚洲地区数据主要来源于亚洲高速公路网；欧洲地区则选取欧洲公路网南北方向主要道路(编码以5结尾)和东西方向主要道路(编码以0结尾)。海运数据来源于国际知名航运分析机构Alphaliner，根据运力排名选取地中海航运、马士基、达飞、中远海运、赫伯罗特、海洋网联和长荣海运7家全球领先的集装箱班轮公司的航线信息。

基于所采集的亚欧公铁海物流通道复合网络线路与节点数据，构建公路、铁路及海运物流通道，其中公路物流通道层包含246个节点及322条边；铁路物流通道层包含140个节点及186条边；海运物流通道层包含83个节点及270条边。整体复合网络除去重合节点和边共包含344个节点及733条边。亚欧公铁海物流通道复合网络如图1所示，其中蓝色表示海运物流通道，橙色表示公路物流通道，绿色表示铁路物流通道，红色表示涵盖多种运输方式的物流通道。

1.2　节点的基本指标

（1）度和度中心性。节点的度d_i定义为与该节点相连的边的数量，是衡量节点重要性的基础指标。对于包含N个节点的网络，度中心性dc_i是度的标准化形式，计算公式如下。

$$dc_i=\frac{1}{(N-1)}\sum_{i=1}^{N}d_i \tag{3}$$

式中：d_i表示节点i的度数；N表示网络节点数。

（2）介数和介数中心性。介数用于度量节点在网络中充当“桥梁”的程度，即节点位于其他节点对最短路径上的频率。节点介数越高，表明其在信息或资源传递中的枢纽作用越强，介数中心性bc_i是介数的标准化形式，计算公式如下。

$$bc_i=\frac{2}{(N-1)(N-2)}\sum_{s\neq i\neq t}\frac{n_{st}^{(i)}}{n_{st}} \tag{4}$$

式中：$n_{st}^{(i)}$为节点s与节点t之间通过节点i的最短路径数目；n_{st}为节点s与节点t之间的所有最短路径数目。

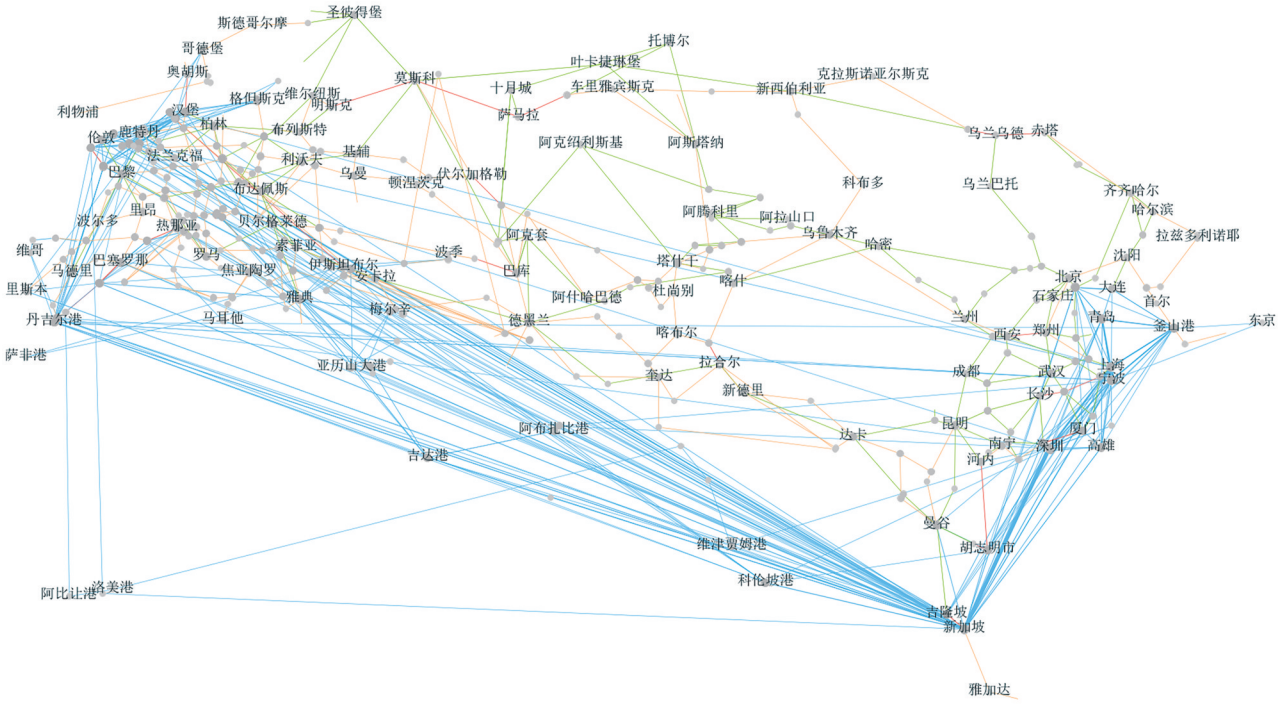

图1　亚欧公铁海物流通道复合网络

Fig.1　Composite network of Asia-Europe road-rail-sea logistics corridor

（3）接近中心性。接近中心性r_i反映某一节点到网络中所有其他节点的接近程度，其值越小表示该节点处于网络的核心位置，计算公式如下。

$$r_i = \frac{N}{\sum_{j=1}^{N} l_{ij}} \tag{5}$$

式中：l_{ij}为节点i和j之间的最短路径长度。

（4）特征向量中心性。特征向量中心性x_i不仅考虑节点自身的连接数量，还考虑其邻居节点的重要性，计算公式如下。

$$x_i = \frac{1}{\lambda} \sum_{j \in N(i)} x_j \tag{6}$$

式中：$N(i)$为节点i的邻居节点集合；x_j为邻居节点j的介数；λ为邻接矩阵的最大特征值。

1.3　边的基本指标

（1）边度数。边的度数d_{ij}定义为其两端节点的度数的乘积，计算公式如下。

$$d_{ij} = d_i d_j \tag{7}$$

式中：d_i表示其中一端节点i的度数；d_j表示另一端节点j的度数。

（2）边介数中心性。边介数中心性B_i与节点介数中心性的定义类似，衡量一条边出现在所有节点对最短路径中的频率，反映边在网络连通中的关键程度，计算公式如下。

$$B_i = \frac{2}{(N-1)(N-2)} \sum_{s \neq i \neq t} \frac{g_{st}^{(i)}}{g_{st}} \tag{8}$$

式中：$g_{st}^{(i)}$表示经过边i的节点s与节点t之间的最短路径数目；g_{st}为两点之间的全部最短路径数目。

1.4　整体性指标

（1）集聚系数。节点集聚系数C_i用于衡量节点i的各邻居节点之间实际存在的边数与可能的最大边数之比，是刻画网络局部聚类特性的重要指标。该系数反映了节点邻域内的连接紧密程度，计算公式如下。

$$C_i = \frac{2T_i}{d_i(d_i - 1)} \tag{9}$$

式中：T_i表示节点i的邻居节点之间实际存在的边数；d_i表示节点i的度数。

（2）平均距离。平均路径长度L定义为网络中所有节点对之间最短路径长度的平均值，是衡量网络全局连通效率的重要指标。该值越小，表示信息或资源在网络中传播的效率越高。对于非全连通网络，通常以最大连通子图或采用调和平均距离进行计算，以避免不连通节点对的影响，计算公式如下。

$$L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} l_{ij} \tag{10}$$

式中：l_{ij}为节点i和j之间的最短路径长度。

对构建的复合网络进行基本统计特征分析，节点度分布和拟合曲线如图2所示，节点度分布经拟合符合幂律分布$y = 62.39x^{-0.6}$，表明网络具有无标度特性，即少数节点拥有极高的度值；网络平均路径长度为5.92，符合“六度分离”理论，体现出小世界特征。节点集聚系数分布如图3所示，复合网络整体集聚系数为0.173，其中海运网络、铁路网络和公路网络的集聚系数分别为0.448，0.054和0.046，说明海运网络局部连接最为紧密。

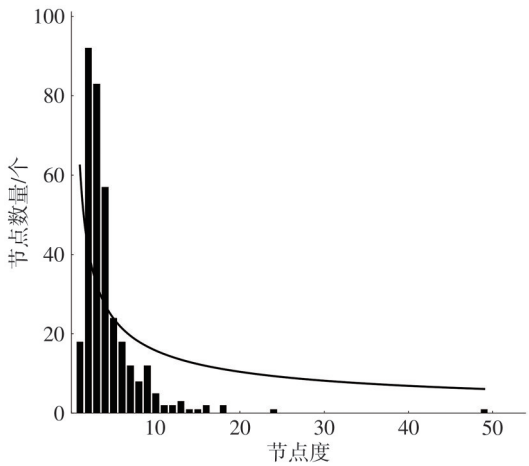

图2　节点度分布和拟合曲线

Fig.2　Node degree distribution and fitting curve

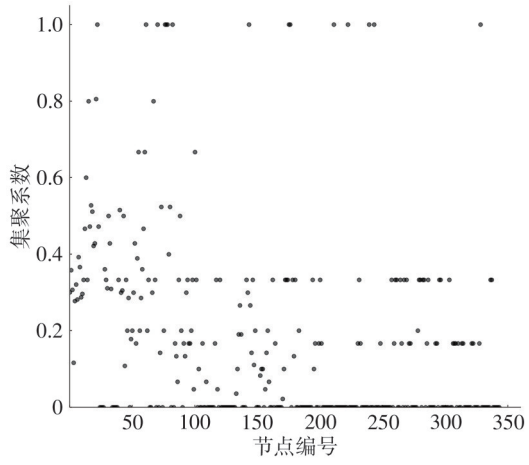

图3　节点集聚系数分布

Fig.3　Distribution of node clustering coefficient

此外，通过计算各中心性指标排名前5的节点与边，发现新加坡在所有节点中心性指标中均居首位，且在边度数中心性前五的连边中均作为端点出现，进一步凸显了新加坡作为亚洲门户和东西方贸易枢纽的重要地位，中心性排序前5的节点如表1所示，中心性排序前5的边如表2所示。

表1　中心性排序前5的节点

Tab.1　Top five nodes in centrality ranking

排名	度中心性	介数中心性	接近中心性	特征向量中心性
1	新加坡	新加坡	新加坡	新加坡
2	雅典	德黑兰	雅典	深圳
3	宁波	伊斯坦布尔	伊斯坦布尔	宁波
4	深圳	安卡拉	吉隆坡	上海
5	上海	雅典	安特卫普	吉隆坡

表2　中心性排序前5的边

Tab.2　Top five edges in centrality ranking

排名	边介数中心性	边度数
1	德黑兰—安卡拉	新加坡—雅典
2	伊斯坦布尔—安卡拉	宁波—新加坡
3	新加坡—伊斯坦布尔	深圳—新加坡
4	新加坡—天津	上海—新加坡
5	巴库—德黑兰	新加坡—鹿特丹

通过分层网络效率和熵权-TOPSIS对网络中重要节点进行识别，最后对网络进行包括熵权-TOPSIS策略在内的蓄意和随机攻击，并根据网络最大连通子图对网络进行级联失效分析，研究方法逻辑图如图4所示。

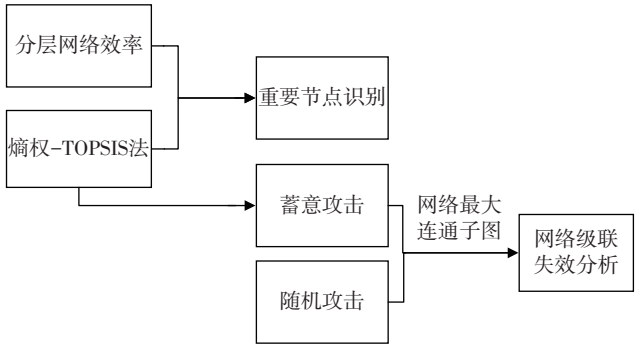

图4　研究方法逻辑图

Fig.4　Logic diagram of research method

2　复合网络指标综合测度方法与重要节点识别

为客观评估亚欧公铁海复合运输网络节点重要性，采用熵权法与TOPSIS法相结合的综合评价指标。节点重要性评估本质是多属性决策问题，TOPSIS法通过计算各方案与正理想解和负理想解的相对贴近度进行排序。方案越接近正理想解且越远离负理想解，则越优。但传统TOPSIS法假设各指标权重相等，不符合实际网络中不同指标贡献度各异的现实。为此引入熵权法确定指标权重。该客观赋权法基于指标数据变异程度计算权重：指标值变异程度越大，提供信息越多，权重越大。这有效避免了主观偏差，使权重分配更具数学依据。最终，将熵权法确定的权重融入TOPSIS法的距离计算中，构建加权规范化决策矩阵，从而科学计算节点重要度综合评价值，并作为对亚欧公铁海复合运输网络进行蓄意攻击的一种方法。

2.1　熵权法

（1）构建样本的原始数据矩阵。

（2）对所有数据构成的矩阵进行统一的标准化处理得到矩阵$\boldsymbol{X}$。

正向指标进行如下公式的处理。

$$\boldsymbol{X}=\frac{\boldsymbol{X}_{ij}-\min(\boldsymbol{X}_j)}{\max(\boldsymbol{X}_j)-\min(\boldsymbol{X}_j)} \tag{11}$$

式中：$\boldsymbol{X}_{ij}$表示节点i的j项指标数据x_{ij}构成的矩阵；$\boldsymbol{X}_j$表示指标j的所有数据x_j构成的矩阵。

负向指标进行如下公式的处理。

$$\boldsymbol{X}=\frac{\max(\boldsymbol{X}_j)-\boldsymbol{X}_{ij}}{\max(\boldsymbol{X}_j)-\min(\boldsymbol{X}_j)} \tag{12}$$

（3）计算p_{ij}构成的规范化矩阵$\boldsymbol{P}$。

$$p_{ij}=\frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}x_{ij}^2}} \tag{13}$$

式中：x_{ij}表示第i个节点的第j个指标分值，$i=1,2,\cdots,n$；$j=1,2,\cdots,m$。

（4）计算熵值e_j。

$$e_j=-k\sum_{i=1}^{n}p_{ij}\ln p_{ij} \tag{14}$$

式中：k与样本数量n有关，常取$k=1/\ln n$。

（5）计算各指标的权重w_j构成的权重矩阵$\boldsymbol{W}$。

$$w_j=\frac{1-e_j}{\sum_{j=1}^{m}1-e_j} \tag{15}$$

$$\boldsymbol{W}=\begin{bmatrix}w_1 & \cdots & 0\\ \vdots & & \vdots\\ 0 & \cdots & w_j\end{bmatrix} \tag{16}$$

2.2　TOPSIS 法

本研究对 TOPSIS 法的应用主要通过与熵权法得出的权重矩阵 $\boldsymbol{W}$ 相结合构造加权规范化矩阵 $\boldsymbol{R}$，并确定正负理想解进而得出接近度 c_i。

（1）构造加权规范化矩阵 $\boldsymbol{R}$。

$$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{PW} \tag{17}$$

（2）确定指标 j 的正理想解 R_j^+ 和负理想解 R_j^-。

$$R_j^+ = \max(r_{1j},\ r_{2j},\ \cdots,\ r_{ij}) \tag{18}$$

$$R_j^- = \min(r_{1j},\ r_{2j},\ \cdots,\ r_{ij}) \tag{19}$$

式中：r_{ij} 为加权规范化矩阵 $\boldsymbol{R}$ 中节点 i 的指标 j 的数值。

（3）分别计算出各评判对象与正理想解、负理想解的距离 d_i^+ 和 d_i^-。

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}(r_{ij} - R_j^+)^2} \tag{20}$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}(r_{ij} - R_j^-)^2} \tag{21}$$

（4）对评判对象进行分析，计算接近度 c_i，值越高且越接近 1 时越接近正理想解。

$$c_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \tag{22}$$

对节点的多个指标进行熵权–TOPSIS 计算，节点熵权–TOPSIS 得分前 10 排名如表 3 所示。

2.3　重要节点识别

网络整体性能的分析常采用网络效率与网络最大连通子图比例等指标。由于最大连通子图比例在识别重要节点方面敏感性较低，本研究选用网络效率作为评估复合网络节点关键性的指标。具体通过移除某一节点后网络效率的下降幅度来识别其重要性，下降幅度越大，表明该节点越关键。

网络效率(E_{uw})定义为网络中所有节点对之间最短距离倒数的平均值，是刻画网络整体传输效率的重要拓扑指标，计算公式如下。

$$E_{uw} = \frac{1}{N(N-1)}\sum_{i\neq j}^{N}\frac{1}{l_{ij}} \tag{23}$$

式中：l_{ij} 为节点 i 和 j 之间的最短路径长度；N 为网络节点总数。

加权网络效率(E_w)进一步考虑了节点间连边在不同运输层中的出现频次，计算公式如下。

$$E_w = \frac{1}{N(N-1)}\sum_{i\neq j}\frac{1}{\sum\dfrac{1}{\eta_{ij}}} \tag{24}$$

式中：η_{ij} 表示节点 i 和 j 之间的连边在运输层中出现的次数，由于本研究涉及 3 层网络，因此 $1 \leqslant \eta_{ij} \leqslant 3$。

分层网络效率(LE)则通过分别计算各层网络效率并求和得到，计算公式如下。

$$LE = \frac{1}{N(N-1)}\sum_{l=1}^{3}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\frac{1}{l_{ij}} \tag{25}$$

攻击节点后分层网络效率下降比例前 10 排名如表 4 所示，可以看出枢纽节点的脆弱性及其对多层网络的差异化影响是核心特征。具体而言，排名第 1 的新加坡在海运层遭受攻击时，导致整个分层网络效率下降了 31.85%，其中绝大部分(33.54%)来自海运层，这凸显了其作为全球海运关键枢纽的重要性，同时也表明攻击其核心功能层会对整个系统造成致命打击。相比之下，莫斯科(排名第 3)和叶卡捷琳堡(排名第 7)等城市的影响则主要集中在铁路层，体现了其在陆路运输网络中的核心地位。此

表 3　节点熵权–TOPSIS 得分前 10 排名

Tab.3　Top 10 rankings of node entropy weight–TOPSIS score

排名	节点	度中心性	介数中心性	接近中心性	特征向量	熵权–TOPSIS 得分
1	新加坡	0.142 9	0.386 5	0.274 6	0.458 2	1.000 0
2	深圳	0.052 5	0.023 9	0.232 5	0.229 3	0.387 5
3	宁波	0.052 5	0.033 4	0.235 3	0.225 8	0.387 0
4	上海	0.046 6	0.069 3	0.240 0	0.213 7	0.386 2
5	吉隆坡	0.040 8	0.038 7	0.245 4	0.198 9	0.347 8
6	雅典	0.070 0	0.133 9	0.256 2	0.151 0	0.347 3
7	鹿特丹	0.046 6	0.052 9	0.238 4	0.184 8	0.335 6
8	安特卫普	0.043 7	0.039 8	0.240 9	0.187 3	0.332 3
9	天津	0.037 9	0.107 9	0.234 9	0.148 9	0.311 2
10	釜山港	0.035 0	0.006 5	0.227 6	0.173 2	0.295 7

表4　攻击节点后分层网络效率下降比例前10排名　%

Tab.4　Top 10 rankings of decline proportion of layered network efficiency after attacking nodes

排名	节点	海运层	铁路层	公路层	分层网络效率
1	新加坡	33.54	−0.49	−1.19	31.85
2	深圳	12.35	0.00	0.00	12.35
3	莫斯科	0.00	8.20	0.63	8.83
4	鹿特丹	7.52	−0.29	0.00	7.23
5	上海	7.30	−0.16	0.00	7.14
6	宁波	5.93	0.00	0.00	5.93
7	叶卡捷琳堡	0.00	5.21	0.00	5.21
8	哈密	0.00	5.02	0.00	5.02
9	巴库	0.00	1.21	3.67	4.88
10	布加勒斯特	0.00	−0.12	4.91	4.79

外，部分运输层在节点遭到攻击后出现了效率“负下降”，这是因为当前节点在部分运输层处于边缘位置，节点删除后反而优化网络结构导致分层网络效率提升。综上所述，分层网络效率揭示了不同节点在不同运输层中的影响力，为识别和保护不同运输层中的关键枢纽提供了重要依据。

3　负载-容量级联失效模型构建

3.1　仿真实验流程设计

本研究对网络进行负载级联失效仿真分析，重点考察节点容量、初始负载及负载重分配策略对系统的影响。仿真流程如下：首先，根据节点的度值或介数中心性确定其容量；随后，结合容量系数与随机初始负载设置网络初始状态；接着，对节点或边施加攻击(包括随机攻击与蓄意攻击)；当节点负载超过其设计容量时节点完全失效，并进行负载重分配。重分配策略包括按邻居节点重要性(介数中心性)分配和平均分配2种方式，过程中动态更新节点负载与状态；最终，通过最大连通子图比例的变化，对比分析复合网络的级联失效过程。级联失效仿真过程如图5所示。

3.2　节点状态分析

（1）节点初始容量。节点初始容量Q_i^0定义为复合网络初始状态下节点i的理论负载能力，如果一个节点是许多最短路径必须经过的节点，该节点理应具备与之相匹配的负载能力，本研究用该节点的介数中心性b_i表示，计算公式如下。

$$Q_i^0 = b_i \tag{26}$$

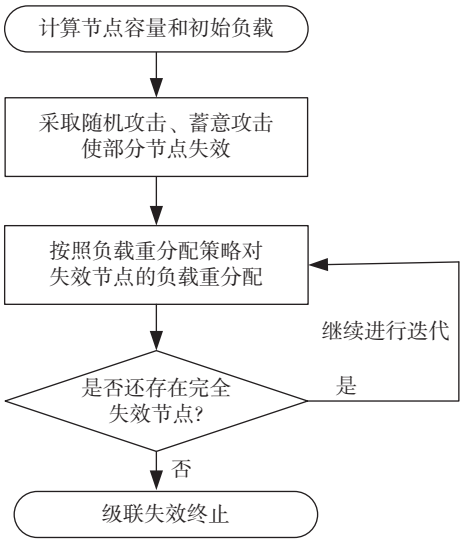

图5　级联失效仿真过程

Fig.5　Simulation process of cascading failure

（2）节点设计容量。节点设计容量Q_i表示节点在设计与建设阶段所设定的最大理论处理能力，反映了其在理想条件下可承受的极限负载，计算公式如下。

$$Q_i = (1 + \alpha)Q_i^0 \tag{27}$$

式中：α为容量系数，用于调节节点的冗余能力；Q_i^0为节点初始容量。

（3）节点初始负载。节点初始负载L_i^0表示仿真开始时节点实际承担的负载大小，通过节点设计容量Q_i乘以一个在区间[0，0.8]内均匀分布的随机数U_i得到，计算公式如下。

$$L_i^0 = Q_i U_i \tag{28}$$

3.3　节点状态定义

在亚欧公铁海物流通道复合网络中，节点负载水平直接影响其运行状态。为更精细地描述节点行为，引入以下3状态划分，其中部分失效状态主要受节点设计容量限制与容量系数α相关，在后文仿真中的容量系数分析中可以体现出其作用。

（1）正常状态：当$L_i \leqslant Q_i^0$时，节点完全正常运行。

（2）部分失效状态：当$Q_i^0 < L_i \leqslant Q_i$时，节点仍部分工作但功能受损。

（3）完全失效状态：当$L_i > Q_i$时，节点彻底失效，丧失全部功能。

3.4　负载重分配方法

当节点负载超过其设计容量($L_i > Q_i$)时，节点失

效，其负载将重新分配给邻居节点。研究采用2种负载分配策略。

（1）平均分配：将失效节点的负载均匀分配给所有处于正常状态的邻居节点，计算公式如下。

$$\Delta L_j = \frac{L_i}{n_{nb}} \tag{29}$$

式中：n_{nb}为正常邻居节点的数量；ΔL_j为每个正常邻居节点分配的负载大小。

（2）介数分配：根据邻居节点的介数中心性占其总和的比例分配负载。若某邻居节点因接收额外负载而失效，则该节点将继续将其负载分配给自身的邻居节点，从而可能引发级联失效。

$$\Delta L_j = \frac{b_j}{\sum b_j} L_i \tag{30}$$

式中：$\sum b_j$为所有正常邻居节点的介数之和。

3.5　网络最大连通子图比例

网络最大连通子图比例G用于衡量网络在遭受攻击或发生故障后保持连通性的能力，定义为攻击后最大连通子图包含的节点数N_e与原始网络最大连通子图节点数N_0的比值。G值越高，表明网络在干扰下维持整体连通性的能力越强，是评估网络韧性的重要参数。

$$G = \frac{N_e}{N_0} \tag{31}$$

3.6　韧性三角理论

本研究对韧性三角理论的应用主要是通过计算最大连通子图比例变化曲线下图形面积来对网络韧性大小进行测度，网络韧性变化阶段如图6所示，处于破坏阶段时R_a值越大说明网络在该攻击策略下保持连通性的能力越强，处于恢复阶段时R_r值越大说明网络在该攻击策略下保持连通性的能力越强。

R_a计算公式如下。

$$R_a = \frac{\int_{t_0}^{t_1} P(t)\,\mathrm{d}t}{\int_{t_0}^{t_1} R_0\,\mathrm{d}t} \tag{32}$$

式中：$P(t)$代表攻击策略下最大连通子图变化曲线；R_0表示网络始终保持最大连通性。

R_r计算公式如下。

$$R_r = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P(t)\,\mathrm{d}t}{\int_{t_1}^{t_2} R_0\,\mathrm{d}t} \tag{33}$$

式中：$P(t)$代表恢复策略下最大连通子图变化曲线；R_0表示网络始终保持最大连通性。

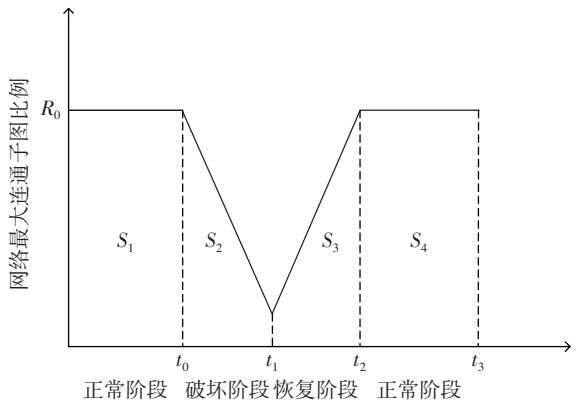

图6　网络韧性变化阶段

Fig.6　Change stages of network resilience

4　亚欧物流通道复合网络韧性仿真分析

4.1　随机攻击和蓄意攻击

针对节点和边的攻击分为以下2种模式。①随机攻击：模拟自然灾害等非人为因素导致的枢纽城市、港口或车站停运，在仿真中表现为随机选择节点或边进行删除。②蓄意攻击：模拟战争、海盗袭击等人为破坏行为，针对枢纽城市和关键线路进行攻击。仿真中分别基于初始或重新计算的节点度值与介数中心性，有选择地删除节点或边，并评估网络最大连通子图的变化。

节点和边蓄意攻击具体包括以下策略。

（1）初始度删除：按照节点开始时的度数排名进行节点的删除。

（2）初始介数删除：按照节点开始时的介数排名进行节点的删除。

（3）重新度删除：删除节点后重新计算剩余节点度值，并删除当前度数最高节点。

（4）重新介数删除：删除节点后重新计算剩余节点介数，并删除当前介数最高节点。

（5）TOPSIS删除：按照节点开始时根据熵权-TOPSIS的排名进行节点的删除。

在节点攻击模式下，随机攻击导致的最大连通子图规模下降最为平缓，因为随机攻击无视网络拓扑结构，其目标节点在统计上以低中心性的节点为主。在典型的复杂网络(如无标度网络)中，大部分节点的度和介数都很低，他们处于网络的边缘；初

始度和初始介数攻击对最大连通子图影响较为平缓，因为其主要基于网络的初始状态制定攻击节点序列，是一种静态的蓄意攻击。然而，在攻击开始后，网络拓扑结构发生剧变，节点的中心性排名也会随之改变。初始的关键节点被移除后，攻击后续目标可能已不再是当前状态下最关键的节点，导致攻击效率随着攻击进程而逐渐钝化。重新度攻击能持续找到并攻击当前网络中的核心节点，有效瓦解网络的中心结构，对最大连通子图影响较为显著。TOPSIS 删除作为综合指标是一种有效的重要节点识别方法，相比于重新度删除对最大连通子图影响更大。而按照重新介数删除的蓄意攻击是一种动态的、路径优先的攻击，其破坏性最强的核心原因在于能够持续、精准地破坏网络全局连通性所依赖的最短路径，这种攻击策略使得网络始终无法形成稳定的主要连边，对最大连通子图影响最大。当失效节点数达到200时，蓄意攻击下的最大连通子图比例接近零，而随机攻击下仍能维持约20%的连通节点，点攻击下最大连通子图比例变化如图7所示。

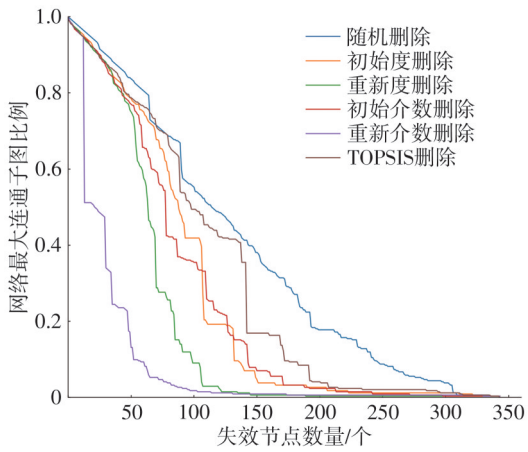

图7　点攻击下最大连通子图比例变化

Fig.7　Change in proportion of largest connected subgraph under node attack

在边攻击模式下，仿真前期发现前450条边失效时，基于度值的蓄意攻击包括初始度和重新度删除对最大连通子图影响较小。这是由于高度数节点之间通常存在大量冗余连接，部分边的删除对整体连通性影响有限。然而在仿真后期约400条边失效时，最大连通子图出现断崖式下降，一旦这些关键的、连接不同网络层的边被大量移除，网络的整体结构就会到达一个临界状态。此时，再移除少数几条关键的层间边，就会导致整个连通网络分裂成几个部分，在最大连通子图规模的曲线上，就表现为从一个较高的值瞬间下降到较低值附近，即“断崖式下降”。这揭示了网络连通性对少数关键连边的高度依赖性，边攻击下最大连通子图比例变化如图8所示。

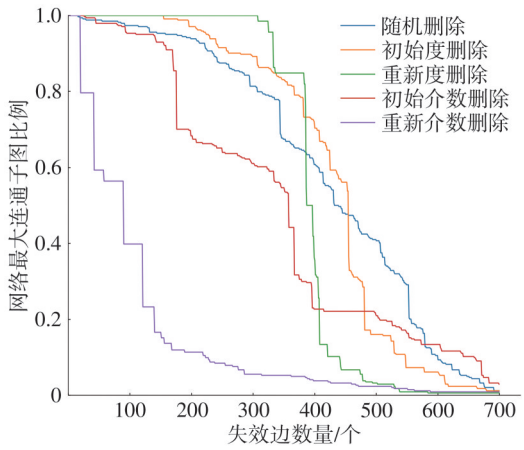

图8　边攻击下最大连通子图比例变化

Fig.8　Change in proportion of largest connected subgraph under edge attack

4.2　不同恢复方式差异分析

为研究网络受损后的恢复能力，首先根据节点介数中心性大小删除前30个关键节点，随后采用不同的边恢复策略对剩余网络进行修复。采用的恢复方法如下。

（1）随机重连边：随机移除一条边，并随机添加一条新边。

（2）偏好重连边：选择当前度数最高的节点，随机移除其一条邻接边，并将断开的邻居节点随机连接到另一节点。

（3）偏好随机重连边：随机选择一条边，比较其两端节点的度数，断开度数较高的一端并随机重连至其他节点。

（4）随机添加边：在不移除原有边的情况下，随机添加一条新边。

（5）添加低度数边：添加一条连接当前网络中度数最低的2个节点的边。

（6）添加高度数边：添加一条连接度数最高的2个节点的边。

在恢复初期，侧重于高度数节点的策略(2)和(6)对网络最大连通子图的恢复效果最差。这是由于高度数节点之间已存在大量连接，新增或重连此类边

对提升整体连通性贡献有限。相反，主动连接低度数节点的策略(5)显著加快了网络恢复速度，该策略主动寻找网络中连接最薄弱、最可能处于网络边缘或孤立状态的节点，连接2个低度数节点，有极高概率是在2个原本分离的不同网络层之间架起一座桥梁，或者将一个孤立节点直接接入核心网络。每一次这样的操作，都能实实在在地将新的节点纳入最大连通子图，从而线性甚至超线性地扩大其规模。偏好随机重连边的策略(3)在初期表现出最快的恢复速率，因其在一定程度上增加了低度数节点之间的连接机会。通过随机选择一条边，但断开度数较高的一端，有机会拆除高度数节点之间可能存在的冗余连接，将断开的一端随机重连到其他节点，有很大概率连接到当前网络中的“非核心”区域，从而起到与策略(5)类似的效果。对于另外2个策略，其中随机添加边的策略(4)效果通常介于高低效策略之间。因为有一定的概率连接边缘节点，但也有概率在核心节点之间添加冗余连边，其效率取决于随机性。随机重连边的策略(1)由于包含随机的“破坏”环节，可能会误删关键的接边，因此其恢复效率通常不稳定且偏低，边恢复下最大连通子图比例变化如图9所示。

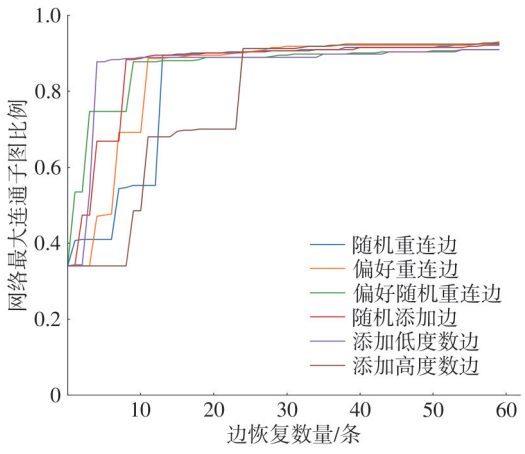

图9　边恢复下最大连通子图比例变化

Fig.9　Change in proportion of largest connected subgraph under edge restoration

4.3　不同负载分配方式差异分析

（1）平均分配的级联失效过程。节点容量系数α直接影响节点的最大负载能力，α值越大，节点冗余容量越高，网络抵抗级联失效的能力越强。在蓄意攻击模式下(按节点度值大小删除前50个节点)，仿真结果表明，随着α增大，级联失效的传播速度显著减缓，网络崩溃所需的迭代次数增加，不同容量系数下平均分配负载如图10所示。

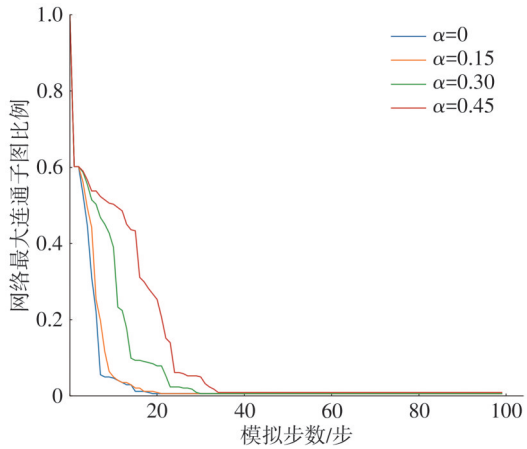

图10　不同容量系数下平均分配负载

Fig.10　Average load allocation under different capacity coefficients

（2）介数分配的级联失效过程。介数分配策略依据邻居节点的介数中心性比例分配失效节点的负载，即介数越高的邻居节点承担越多的额外负载。采用与上述相同的攻击方式(按节点度值大小删除前50个节点)并比较不同α值下的失效过程，发现同样存在α值越大，级联失效进程越慢的趋势。

与平均分配策略相比，介数分配进一步延缓了级联失效的进程。这是因为介数较高的节点通常具有更强的负载承载和疏导能力，将更多负载分配给这些节点有助于利用网络的固有结构韧性，从而抑制失效的持续扩散，提升整体网络的鲁棒性，不同容量系数下根据介数分配负载如图11所示。

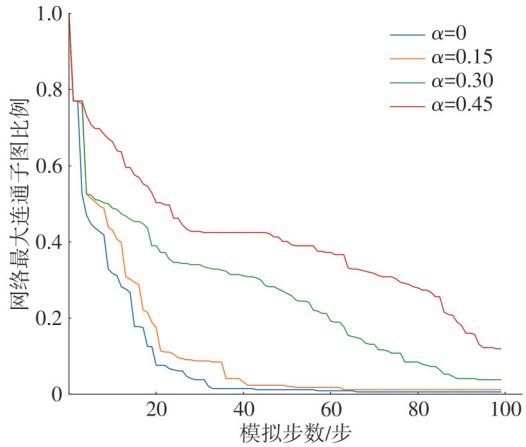

图11　不同容量系数下根据介数分配负载

Fig.11　Load allocation based on betweenness under different capacity coefficients

4.4　网络韧性大小测度

根据前文介绍的韧性三角理论对不同攻击和恢复方法下的网络最大连通子图比例的变化，对韧性三角大小进行量化研究。

韧性三角的值越大说明此攻击方式对网络的伤害越小(此恢复方式对网络的恢复效果越好)，可以看出不同攻击方式下，随机删除对网络的伤害最小，重新介数删除对网络的伤害最大。边恢复方式下，添加低度数之间的连边对网络的恢复作用最大，添加高度数之间的连边对网络的恢复作用最小。总体上看节点攻击对网络韧性的影响最为显著，其次为边攻击；而在恢复阶段，通过添加低度节点之间的边能够最大程度提升网络的稳定性与抗干扰能力。进一步验证了前述级联失效仿真分析的结论，为亚欧公铁海物流通道复合网络在应对外部冲击与优化恢复策略方面提供了科学依据与数据支撑，使研究结果更具严谨性与可解释性，不同攻击或恢复方式下韧性三角大小排序如表5所示。

表5　不同攻击或恢复方式下韧性三角大小排序

Tab.5　Size sorting of resilience triangle under different attack or recovery methods

排名	攻击、恢复方法		值
1	点攻击	随机删除	0.376 1
2		TOPSIS删除	0.308 5
3		初始度删除	0.256 1
4		初始介数删除	0.246 2
5		重新度删除	0.184 7
6		重新介数删除	0.087 6
1	边攻击	随机删除	0.619 2
2		初始度删除	0.616 7
3		重新度删除	0.565 2
4		初始介数删除	0.502 9
5		重新介数删除	0.159 6
1	边恢复	添加低度数边	0.856 8
2		偏好随机重连边	0.854 7
3		随机添加边	0.850 6
4		偏好重连边	0.824 3
5		随机重连边	0.797 3
6		添加高度数边	0.741 3

5　结束语

研究发现亚欧公铁海物流通道复合网络具有典型的无标度特征和小世界特性。不同运输子网集聚系数对比表明，海运网络的集聚性最高。分析进一步揭示了网络的海陆双重结构：海运层通过新加坡等枢纽实现全球连通，而陆路层在亚欧大陆内部承担中转与衔接功能。动态仿真结果表明，蓄意攻击对网络连通性的破坏远大于随机攻击，尤其是按重新计算节点介数的攻击方式造成的破坏最大。因此，应加强对亚欧沿线介数较高的枢纽节点和线路的保护。在恢复策略中，优先修复低度数节点之间的连接能更有效地加速网络恢复。这表明除核心节点枢纽外，也需关注次级节点间的替代线路建设。对不同负载分配方式的比较发现，基于邻居节点介数中心性的负载分配策略较平均分配更能延缓级联失效进程。因此，在实际运营中，核心节点枢纽失效后应根据相邻节点的承载能力按比例转移负载。同时，建议在枢纽规划建设中预留适当的冗余容量，以提升网络应对突发事件的能力。研究存在以下局限性。首先，在数据与模型层面，受限于现有国际运输统计口径与公开数据的时效性，所构建的网络主要基于静态结构描述，未能充分反映运输网络的动态演化特征。未来研究可结合AIS航运数据构建动态演化网络模型，从而实现从静态结构韧性到动态功能韧性的拓展。其次，在方法与算法层面，论文采用熵权-TOPSIS法与负载级联失效模型对节点重要性与系统韧性进行量化分析，但仍以基础网络指标为主，后续研究可引入图神经网络等智能计算方法。

参考文献：

[1] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于印发“十四五”现代物流发展规划的通知[A]. 北京：国务院办公厅，2022.

[2] WATTS D J，STROGATZ S H. Collective Dynamics of “Small-World” Networks[J]. Nature，1998，393(6684)：440-442.

[3] BARABASI A，ALBERT R. Emergence of Scaling in Random Networks[J]. Science，1999，286(5439)：509-512.

[4] 张　欣，李双菲，孙代源. 中欧集装箱海铁复合运输网络脆弱性分析[J]. 交通信息与安全，2023，41(3)：48-58.
ZHANG Xin，LI Shuangfei，SUN Daiyuan. Vulnerability Analysis of China-Europe Container Sea-Rail Intermodal Transport Network[J]. Journal of Transport Information and Safety，2023，41(3)：48-58.

[5] 谢昭易. 突发事件下中欧班列货运网络脆弱性研究[D]. 成

都：西南交通大学，2021.

[6] 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.

[7] ZHANG X F，LIU C L，PENG Y，et al. Connectivity-Based Spatial Patterns and Factors Influencing International Container Multimodal Hubs in China under the Belt and Road Initiative[J]. Transport Policy，2023(143)：10-24.

[8] HE Z D，NAVNEET K，VAN DAM W，et al. Robustness Assessment of Multimodal Freight Transport Networks[J]. Reliability Engineering & System Safety，2021(207)：107315.

[9] 马晓雪．中国海上运输通道安全脆弱性演化机理论析[J]. 世界经济与政治，2017(11)：108-129，159.
MA Xiaoxue. Analysis of the Evolution Mechanism about Safety Vulnerability of China's Marine Transport Lanes[J]. World Economics and Politics，2017(11)：108-129，159.

[10] 田帅辉，张恒博．基于超图理论的西部陆海新通道物流网络鲁棒性研究[J]. 中国安全生产科学技术，2025，21(2)：160-167.
TIAN Shuaihui，ZHANG Hengbo. Study on Robustness of Logistics Network in New International Land-Sea Trade Corridor Based on Hypergraph Theory[J]. Journal of Safety Science and Technology，2025，21(2)：160-167.

[11] 齐亚伟，卢思凡．我国铁路货运网络的级联失效抗毁性研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(7)：182-190.
QI Yawei，LU Sifan. Research on Cascade Failure Invulnerability in China's Railway Freight Networks[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(7)：182-190.

[12] MARTIN R. Regional Economic Resilience，Hysteresis and Recessionary Shocks[J]. Journal of Economic Geography，2012，12(1)：1-32.

[13] HOLLING C S. Resilience and Stability of Ecological Systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics，1973，4(1973)：1-23.

[14] 孙　野．基于复杂网络的中欧班列运输网络韧性分析[D]. 北京：北京交通大学，2022.

[15] 肖　红，刘书君，王孝坤．突发事件下地铁网络韧性评估及恢复策略研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(2)：161-171.
XIAO Hong，LIU Shujun，WANG Xiaokun. Resilience Assessment and Recovery Strategy of Metro Network under Emergencies[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(2)：161-171.

[16] 伍　静．海上丝绸之路航运网络韧性的评价研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2020.

[17] 王直欢，胡炜琴，王逸文．基于复杂网络的长三角和粤港澳航运网络韧性评估[J]. 交通运输系统工程与信息，2023，23(5)：184-193.
WANG Zhihuan，HU Weiqin，WANG Yiwen. Resilience Assessment of Yangtze River Delta and Guangdong-Hong Kong-Macao Shipping Networks Based on Complex Network[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2023，23(5)：184-193.

[18] 吴云云，王　进，王伟鹏，等．基于铁公联运出口模式的跨境运输和通关便利化创新与实践[J]. 铁路物流，2025，43(7)：1-5，14.
WU Yunyun，WANG Jin，WANG Weipeng，et al. Innovation and Practice of Cross-Border Transportation and Customs Clearance Facilitation by Rail-Road Intermodal Transport Export Mode[J]. Railway Logistics，2025，43(7)：1-5，14.

(责任编辑　金　晶)