**文章编号**：1003-1421(2025)12-0118-11
**引用格式**：田帅辉，焦良超.考虑节点风险的西部陆海新通道国际物流网络脆弱性测度[J].铁道运输与经济，2025，47(12)：118-128，170.
TIAN Shuaihui，JIAO Liangchao. Vulnerability Measurement of International Logistics Network of New Western Land-Sea Corridor Considering Node Risks[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(12)：118-128，170.

# 考虑节点风险的西部陆海新通道国际物流网络脆弱性测度

田帅辉，焦良超

(重庆邮电大学 现代邮政学院，重庆 400065)

**摘 要**：为探究节点失效场景下西部陆海新通道国际物流网络的脆弱性表现，基于改进熵权-灰色关联法评价节点抗风险能力与失效概率，以度中心性、介数中心性、K-Core中心性等结构属性识别不同维度下的节点重要性，并提出了考虑失效概率与重要性的跨境物流网络节点风险评估方法。根据节点风险位序依次且连续攻击节点，选取“网络连通性”“运输效率”与本研究提出的“网络独立路径多样性”指标测度西部陆海新通道国际物流网络在风险视角下的脆弱性。研究表明：基于介数和加权复合中心性的风险攻击策略对网络破坏最强，前8个风险节点失效后，网络连通性、运输效率和独立路径数分别下降43.91%，63.60%和78.76%；从网络的连通性表现来看，西部陆海新通道国际物流网络具备一定抗毁能力，但整体上脆弱性明显。

**关键词**：脆弱性测度；改进熵权法；灰色关联法；西部陆海新通道；节点风险；脆弱性指标

**中图分类号**：U297.9；F259.27 **文献标识码**：A **DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20241018001

# Vulnerability Measurement of International Logistics Network of New Western Land-Sea Corridor Considering Node Risks

TIAN Shuaihui，JIAO Liangchao

(School of Modern Posts, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** To explore the vulnerability performance of the international logistics network of New Western Land-Sea Corridor under node failure scenarios, an improved entropy weight-grey relation analysis method was utilized to evaluate the node's risk resistance and failure probability. The structural attributes, such as degree centrality, betweenness centrality, and K-Core centrality, were utilized to identify the importance of nodes with different focuses. Meanwhile, a risk assessment method for cross-border logistics network nodes that considered both the failure probability and the importance of nodes was proposed. According to the sequential and consecutive attack order of nodes, the network connectivity, transportation efficiency, and the disjoint network path diversity index proposed in this study were selected to measure the vulnerability of the international logistics network of the New Western Land-Sea Corridor from the perspective of risks. The results show that

**收稿日期**：2024-10-18 **修订日期**：2024-12-01
**基金项目**：重庆市教育委员会人文社会科学研究项目(22SKGH127，23SKGH420)；重庆市技术预见与制度创新专项项目(CSTB2024TFII-OIX0036)

the risk attack strategy under the betweenness centrality and weighted composite centrality perspectives has the strongest destructive effect on the network. After the top 8 risky nodes fail, the network connectivity, transportation efficiency, and the number of disjoint paths decrease by 43.91%, 63.60%, and 78.76%, respectively. Under the measurement of the network connectivity, the international logistics network of the New Western Land-Sea Corridor has a certain level of resilience, but overall, its vulnerability is evident.

**Keywords:** Vulnerability Measurement; Improved Entropy Weight Method; Grey Relation Analysis; New Western Land-Sea Corridor; Node Risk; Vulnerability Metric

## 0　引言

加快建设西部陆海新通道是党的二十大提出的重大战略任务，对于深化我国陆海内外联动，促进西部地区高水平开放和高质量发展具有重要意义。西部陆海新通道国际物流网络(以下简称“西部陆海新通道网络”)是以西部陆海新通道为核心，辐射东南亚、南亚地区的跨境物流网络。近年来，随着西部陆海新通道网络持续扩展，其面临的运行风险也日益增大。一旦遭遇贸易摩擦、自然灾害或设施故障等突发事件，节点甚至局部网络都将可能失效，严重影响全局网络的稳定运行，因而亟需建设安全可靠的西部陆海新通道网络。鉴于此，模拟节点失效场景，开展风险视角下的网络脆弱性测度研究，对于推动西部陆海新通道高质量发展，提升网络安全水平具有重要现实意义。

脆弱性的概念起源于灾害学研究，指个体或系统暴露在危险环境中受损害的程度[1]。2002年，Berdica[2]首次将脆弱性应用于交通路网研究，将脆弱性定义为突发事件下网络性能下降的程度。随着经济的不断发展，有关运输网络脆弱性的研究已逐步延伸至城市交通[3-4]、高铁客运[5]、集装箱货运[6-7]等领域。现有成果主要集中于网络结构特征剖析、节点攻击策略设计和脆弱性测度指标创新。如张光远等[8]运用复杂网络拓扑规则对成渝地区城际铁路网络的平均路径长度、聚类系数等特性进行了计算，确定其符合无标度网络；丁锐等[9]选取网络直径、接近中心性等整体和局部网络特征对成渝轨道交通网络社区进行划分，并对其结构的演化特征进行了分析。在节点攻击策略上，随机攻击和蓄意攻击分别模拟非人为和人为因素导致失效，后者主要基于节点度、介数、接近度等[10-11]节点拓扑结构属性实现。如He等[12]运用复杂网络理论，在对机场节点的重要性进行识别后，通过仿真随机攻击和蓄意攻击下脆弱性指标的变化分析区域航空公司网络脆弱性；丁锐等[13]分别采用节点随机、节点度、静态与动态介数等蓄意攻击策略中断节点，分析西部陆海新通道城市关联网络的韧性，实验表明，基于节点度的攻击策略对网络破坏程度最大。根据攻击的目标，李博等[14]分别从节点攻击和边攻击分析高速公路网络脆弱性；根据攻击的顺序，马壮林等[15]基于节点重要性，分别采取单点独立攻击和多点连续攻击来分析地铁网络的脆弱性，实验证实了网络在多点连续攻击下的脆弱性更差。在脆弱性测度指标上，双指标测度较为常见，一般选取网络效率和连通性[15-16]。如张欣等[17]结合了负荷-容量级联失效模型，并以网络效率和连通性作为测度指标测度中欧班列海铁联运网络脆弱性；任新惠等[18]使用网络效率和最大连通子图尺寸来衡量航空货运网络在节点和边失效下的损毁程度。不同的测度指标衡量的侧重不同，指标的类型和数量在很大程度上决定脆弱性测度结果是否全面和准确，因而亟需丰富和拓展。

此外，学者们在测度城市交通网络或高铁客运网络脆弱性的过程中，通常将站点作为网络节点，模拟节点因物理故障发生失效，因而设计的蓄意攻击策略多数仅基于节点拓扑结构属性。然而，对于诸如西部陆海新通道网络这类跨境物流网络而言，节点为城市，除了站点物理故障导致失效外，还涉及其他多重因素。同时，城市本身具备一定的抗风险能力，并且抗风险能力的差异会直接影响失效事件发生的概率。因此，节点风险在这类跨境物流网络脆弱性测度过程中不容忽视。

针对以上问题，以西部陆海新通道网络为研究对象，基于改进熵权-灰色关联度法(Entropy Weight & Grey Relational Analysis，EW-GRA)评价节点的抗风险能力和失效概率，结合复杂网络多结构属性识

别节点的重要性，测算节点风险。依据风险排序设计节点攻击策略，从全局网络的连通性、运输效率和独立路径多样性的变化程度测度其风险视角下的脆弱性。最后，基于结论提出对策建议，以期为提升通道安全水平提供参考。

## 1　网络模型构建

根据《西部陆海新通道总体规划》(以下简称《规划》)与《合作共建西部陆海新通道框架协议》，西部陆海新通道覆盖我国西部12个省(区、市)，以及海南省和广东省湛江市、湖南省怀化市，衔接“海上丝绸之路”沿线国家和地区。目前，西部陆海新通道已形成国际铁海联运、跨境公路运输和国际铁路联运3种运输组织方式，开通的线路已延伸到泰国、马来西亚、新加坡等地，形成了覆盖东南亚、南亚等地区的国际物流网络[19]。本研究根据《规划》，同时参考相关文献[20]，进一步明确西部陆海新通道网络研究范围，涵盖我国29个城市节点，以及东南亚和南亚部分国家的12个城市节点。

西部陆海新通道实际开行线路综合参照了国家铁路局，西部陆海新通道物流和运营组织中心，重庆公路运输有限公司等发布的官方数据，并采用Space-L法[21]构建无向拓扑图。西部陆海新通道网络拓扑模型如图1所示。

## 2　节点风险评估方法

节点风险评估过程主要包含3个步骤：首先，基于改进熵权-灰色关联度综合评价法评价西部陆海新通道沿线节点的抗风险能力，并计算出节点的失效概率；其次，基于多种复杂网络结构属性识别网络节点的重要性；最后，构建节点风险评估计量模型，测算节点风险值。节点风险评估流程如图2所示。

### 2.1　基于改进EW-GRA的节点抗风险能力评价

熵权法作为一种客观赋权法，相较于层次分析法等依赖专家经验的主观赋权方法，能避免人为干扰，提升赋权的客观性。同时，该方法在赋权过程中不受指标类型和数据分布限制，因而被广泛应用于风险评估领域。然而，熵权法在进行指标赋权时仅关注单个指标下评价对象之间的数据差异而忽略了指标的相互关系，导致关键但差异性弱的指标被低估，影响评价结果的准确性。灰色关联度评价法(Grey Relational Analysis，GRA)可衡量各指标与理想目标的关联度，强调指标之间的协调性和整体一致性，恰好能弥补熵权法的不足。因此，本研究采用改进EW-GRA评价西部陆海新通道沿线节点的抗风险能力。

在传统熵权法中，当多组指标的熵值趋近于1时，权重分配会过于集中，导致少数指标给予权重过高而忽略其他指标的重要性。例如，当熵值为0.990，0.996，0.998时，计算得出权重0.250，0.125，0.625，从熵值可知三者所含信息量差距小，而权重差距大。此时，由于分式的数学特性，传统方法权重分配失衡。针对此问题，本研究对熵权法

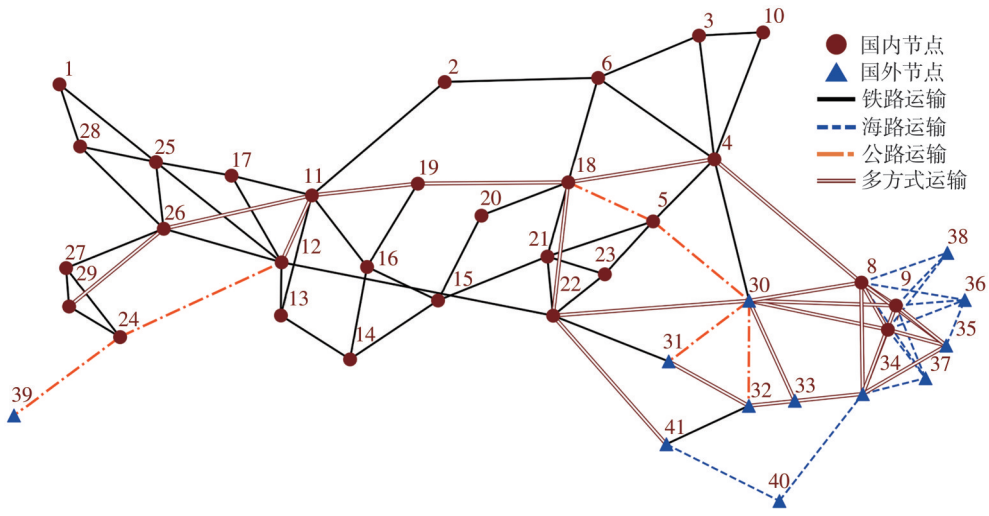



图1　西部陆海新通道网络拓扑模型

Fig.1　Topological model of New Western Land-Sea Corridor network

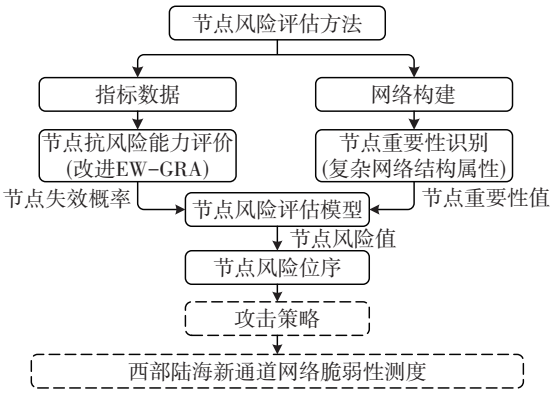



**图2　节点风险评估流程**

Fig.2　Flowchart of node risk assessment

权重公式进行了改进，改进后的公式如下。

$$w_q=\begin{cases}\left(1-\bar{e}_q^{\beta}\right)\dfrac{1-e_q}{\sum_{q=1}^{m}\left(1-e_q\right)}+\bar{e}_q^{\beta}\dfrac{e_q}{\sum_{q=1}^{m}e_q} & e_q\neq 1\\ 0 & e_q=1\end{cases}\tag{1}$$

式中：$w_q$为指标$q$的权重；$m$为指标总数；$e_q$为熵值；$\bar{e}_q$为所有非1熵值的均值；$\beta$为精度参数。

权重改进公式中的精度参数按如下步骤计算。

步骤1：选取5组代表性熵值，用传统熵权法计算除“趋近1型”外每组熵值的权重。

步骤2：以0.01为步长，依次对$\lambda$取值。令$\gamma_z$为第$z$组改进后所得熵权与传统方法所得熵权的均差。

步骤3：利用编程软件，求解最大$\gamma_z\leqslant 1\times 10^{-6}$时的最小$\lambda$值即为$\beta$。

步骤2中的$\gamma_z-\lambda$迭代图如图3所示。由图可知，均差$\gamma_z$随$\lambda$值的增加呈递减趋势，当$\lambda=18.76$时，$\max\left(\gamma_z\right)=9.96\times 10^{-7}$，所有均差$\gamma_z$首次不超过$1\times 10^{-6}$，因此$\beta$取值为18.76。

为了验证本研究改进方法的有效性和精确性，分别运用本研究与其他文献提出的改进方法计算出不同熵值类型下各熵值对应的权重，同时与传统方法所得权重进行对比，计算权重累计偏离值。改进有效性与精确性对比如表1所示，权重累计偏离值如图4所示。

由表1可知，研究提出的改进方法通过引入熵均值，在“趋近1型”熵值中，所得权重为0.359 8，0.325 8，0.314 5，三者差距较小，均占比约1/3，符合信息熵的差距。同时，对比权重计算结果可知，

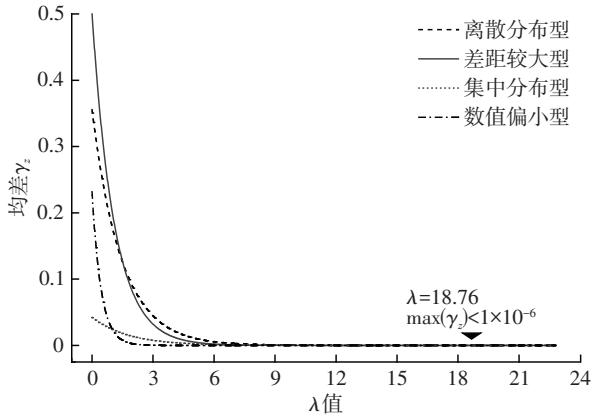



**图3　$\gamma_z-\lambda$迭代图**

Fig.3　$\gamma_z-\lambda$ iteration graph

**表1　改进有效性与精确性对比**

Tab.1　Comparison of the effectiveness and accuracy of improvement methods

| 组序 | 数据类型 | 熵值 | 传统熵权 | 文献[22] | 文献[23] | 本研究 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 离散分布型 | 0.100 | 0.600 0 | 0.533 3 | 0.511 1 | 0.600 0 |
| | | 0.500 | 0.333 3 | 0.333 3 | 0.333 3 | 0.333 3 |
| | | 0.900 | 0.066 7 | 0.133 3 | 0.155 6 | 0.066 7 |
| 2 | 集中分布型 | 0.520 | 0.369 2 | 0.357 7 | 0.353 2 | 0.369 2 |
| | | 0.580 | 0.323 1 | 0.326 4 | 0.327 7 | 0.323 1 |
| | | 0.600 | 0.307 7 | 0.315 9 | 0.319 1 | 0.307 7 |
| 3 | 差距较大型 | 0.050 | 0.527 8 | 0.496 7 | 0.500 0 | 0.527 8 |
| | | 0.200 | 0.444 4 | 0.426 7 | 0.428 6 | 0.444 4 |
| | | 0.950 | 0.027 8 | 0.076 7 | 0.071 4 | 0.027 8 |
| 4 | 数值偏小型 | 0.010 | 0.368 0 | 0.367 7 | 0.389 7 | 0.368 0 |
| | | 0.100 | 0.334 6 | 0.334 6 | 0.335 3 | 0.334 6 |
| | | 0.200 | 0.297 4 | 0.297 8 | 0.274 9 | 0.297 4 |
| 5 | 趋近1型 | 0.990 | 0.625 0 | 0.336 4 | 0.334 9 | 0.359 8 |
| | | 0.996 | 0.250 0 | 0.332 4 | 0.332 9 | 0.325 8 |
| | | 0.998 | 0.125 0 | 0.331 1 | 0.332 2 | 0.314 5 |

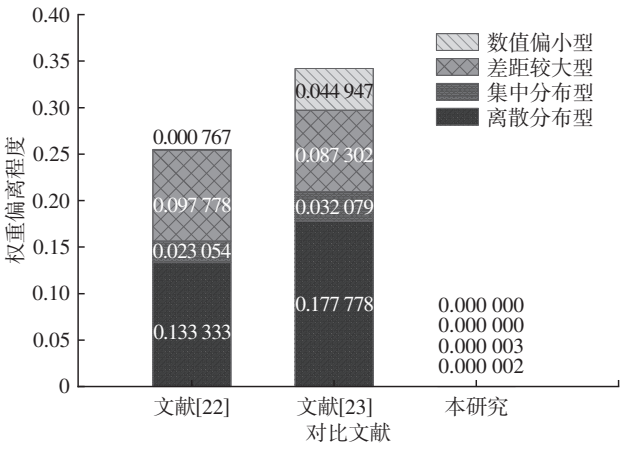



**图4　权重累计偏离值**

Fig.4　Total deviation degree

本研究与其他文献的改进方法均弥补了传统方法在“趋近1型”熵值下权重分配失衡的问题，但其他文献改进方法计算出的权重与传统熵权法存在一定差异，降低了计算的精度。由图4可知，文献[23]的改进方法相比传统熵权法的累计偏离值最高，其次是文献[22]。本研究改进方法计算出的权重与传统熵权法所计算出的权重相比，其偏离值极低，计算更精确。

为了进一步验证$\beta$的取值具有普适性和稳健性，利用编程软件随机生成1 000组熵值，计算改进熵权法相比传统熵权法赋权的累计偏离值，同时测试当$\beta$在±10%范围内发生变化时累计偏离值的变化，精度参数的普遍性验证与敏感度测试如图5所示。经统计，在随机生成的1 000组熵值中，本研究改进的方法与传统方法赋予权重的累计偏离值有96.1%不超过0.01，个别累计偏离值较高是因为随机生成的熵值中包含“趋近1型”。当$\beta$减小时，累计偏离值增加，反之则减小，但变化量较小，说明累计偏离值对精度参数$\beta$的敏感性较低。该实验进一步证明了$\beta$的取值具有普适性和稳健性。

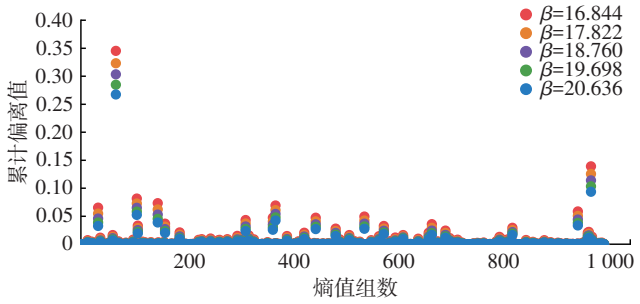



**图5　精度参数的普遍性验证与敏感度测试**

Fig.5　Universal verification and sensitivity testing of precision parameter $\beta$

此外，由于传统GRA的关联度计算公式为加权求和，无论关联度如何波动或分布，评价值相等，则评价对象排序将会并列。在西部陆海新通道沿线节点抗风险能力评价过程中应综合考虑到城市发展的均衡性，一般认为各项指标发展相对均衡的节点抗风险能力更强。因此本研究通过引入方差，修正GRA的关联度计算公式，以提升评价结果的准确性，修正后的公式如下。

$$\varphi_i=\sum_{q}^{m}\left[\xi_{iq}\cdot w_q-\left(\xi_{iq}-\frac{\sum_{q}^{m}\xi_{iq}}{m}\right)^2\cdot w_q\right] \tag{2}$$

式中：$\varphi_i$为修正后的评价值，即节点$i$的抗风险能力值；$\xi_{iq}$为关联度；$q$为评价指标。

## 2.2　基于多结构属性的节点重要性识别

网络结构属性不仅能揭示节点的中心地位以及与其他节点间的连接关系，还能评估节点在网络结构中的影响力。同时，节点重要性排序能为网络节点的风险评估、重要节点防护和网络中节点的风险处置优先级排序提供依据。本研究运用复杂网络理论，采用节点度中心性、介数中心性、特征向量中心性、K-Core中心性计算节点的重要性。其中，K-Core中心性基于K-Core分解的概念提出，揭示节点在网络中的分层位置。由于不同属性侧重的维度不同，比如，度中心性和介数中心性分别侧重反映节点的辐射能力和中转能力。因此本研究在单一属性的基础上，进一步复合以上4种属性构建“加权复合中心性”，以全面反映节点在网络中的综合影响力。网络结构属性如表2所示。

**表2　网络结构属性**

Tab.2　Network structure attributes

| 结构属性 | 符号 | 侧重维度 | 公式 | 参数说明 |
|---|---|---|---|---|
| 度中心性 | $D$ | 辐射能力 | $D=\frac{L}{N-1}$ | $L$为邻接节点数<br>$N$为网络节点总数 |
| 介数中心性 | $B$ | 中转能力 | $B=\frac{\sum_{i,j\in V\wedge i\neq j}n_{ij}^{(v)}}{\sum_{i,j\in V\wedge i\neq j}n_{ij}}$ | $n_{ij}^{(v)}$为节点$i$与$j$之间经节点$v$的最短路径数<br>$n_{ij}$为节点$i$与$j$之间最短路径条数 |
| 特征向量中心性 | $E$ | 关系能力 | $\boldsymbol{x}=c\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}$<br>$E=\boldsymbol{x}$ | $\boldsymbol{A}$为网络运输线路的邻接矩阵<br>$\boldsymbol{x}$为矩阵$\boldsymbol{A}$最大特征值$c^{-1}$对应的特征向量 |
| K-Core中心性 | $K$ | 核心位置 | $K=\frac{k}{N-1}$ | $k$为节点的核层 |
| 加权复合中心性 | $C$ | 综合影响力 | $C=\alpha DE+\beta DK+\gamma B$ | $\alpha$，$\beta$和$\gamma$为权重因子，采用熵权法计算得出，取值分别为0.32，0.37和0.31 |

### 2.3　节点风险评估模型

根据ISO31000国际风险管理标准中对风险的阐述，本研究将节点风险定义为考虑失效概率与重要性的中断损失风险，并构建测算跨境物流网络节点风险的评估模型。该模型考虑事件发生的概率与事件发生对主体的影响。本研究将节点重要性值视作节点中断对网络的影响程度，节点重要程度越高，失效对网络影响越大。风险评估模型如下。

$$\begin{cases} R_i^{(T)} = P_i \times I_i^{(T)} \\ P_i = 1 - \varphi_i \end{cases} \tag{3}$$

式中：$R_i^{(T)}$和$I_i^{(T)}$分别表示节点$i$在结构属性$T$下的节点风险和节点重要性值；$P_i$为节点$i$的失效概率。

根据2.2对节点重要性识别方法的阐述，公式(3)中的$T$有5种结构属性，分别是度中心性、介数中心性、特征向量中心性、K-Core中心性、加权复合中心性，因此计算出的节点风险$R_i^{(T)}$也同样包含5种，如$R_i^{(D)}$表示度重要性$I_i^{(D)}$下节点$i$的风险值；$R_i^{(B)}$表示介数重要性$I_i^{(B)}$下节点$i$的风险值；$R_i^{(C)}$则表示加权复合重要性$I_i^{(C)}$下节点$i$的风险值。$P_i$由节点抗风险能力评价值$\varphi_i$计算得出。

## 3　西部陆海新通道网络脆弱性测度

为测度西部陆海新通道网络脆弱性，根据不同重要类型下的节点风险排序设计攻击策略，模拟节点遭遇蓄意袭击、严重灾害、军事冲突等突发事件导致节点失效后网络性能衰减的程度。

### 3.1　脆弱性测度指标

脆弱性测度指标主要反映节点失效后整体网络的性能变化，因而指标应具有全局性。对复杂网络而言，节点失效对网络性能的影响包括多个方面，如网络连通性下降，运输效率降低等。此外，节点失效也必将导致节点间可选择的运输路径减少。基于此，提出“网络独立路径多样性”测度指标，衡量独立路径减少导致网络可达性的下降程度，并将网络性能下降至初始值的20%以下定义为网络彻底瘫痪。

（1）网络连通性。单个网络节点失效时可能同时引发与之相连的其他节点脱离原有网络，从而导致网络连通性降低。本研究以网络最大连通子图节点数占比反映节点连续失效后网络连通性的变化，其计算公式如下。

$$C^* = \frac{N_{\max}}{N} \tag{4}$$

式中：$C^*$为网络连通性值；$N_{\max}$为最大连通子图的节点数；$N$为初始网络节点数。

（2）网络运输效率。节点失效还可能造成其他节点间的最短运输路线发生改变，增加运输距离或中转次数，从而降低网络运输效率。本研究以网络最短路径倒数的均值反映节点失效后网络运输效率的变化，其计算公式如下。

$$E^* = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i>j} \frac{1}{d_{ij}} \tag{5}$$

式中：$E^*$为网络运输效率值；$d_{ij}$为节点$i$和$j$之间最短路径的边数，若节点$i$和$j$不可达，$d_{ij}$为∞。

（3）网络独立路径多样性。独立路径是指节点之间所有不经过相同路段或节点的路径，即相互不存在交集。所有节点间的独立路径条数总和为网络独立路径多样性。节点失效导致线路中断，而多条独立路径保障了网络的可达性，该指标本质上衡量的是网络冗余度，其计算公式如下。

$$D^* = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i>j} p_{ij} \tag{6}$$

式中：$D^*$为网络独立路径条数；$p_{ij}$为节点$i$与$j$之间的独立路径条数。

### 3.2　节点风险评估结果

（1）抗风险能力。本研究在对跨境物流网络风险、城市物流发展水平评价等相关文献[24-26]研究分析的基础上，结合西部陆海新通道网络发展的实际情况，遵循科学性、系统性与可操作性原则，从节点的交通与物流发展，自然与人文环境2个属性构建西部陆海新通道网络节点抗风险能力评价指标体系。西部陆海新通道网络节点抗风险能力评价指标体系如表3所示。

需要说明的是，由于目前西部陆海新通道通过铁海联运和铁路运输的货运量远超公路运输，同时受限于综合指标数据的可获取性，因而货运数据主要参考铁路运输。表3中评价指标的数据来源于2018—2022年国际和国内统计年鉴、各城市经济统计公报、交通运输统计年鉴，以及世界银行、中国-东盟中心、经济与和平研究所、应急管理部等部门或机构。其中，个别节点的少量指标数据缺

**表 3　西部陆海新通道网络节点抗风险能力评价指标体系**

Tab.3　Node resilience evaluation index system of New Western Land-Sea Corridor network

| 属性 | 准则层 | 指标层 | 指标类型 |
|---|---|---|---|
| 交通与物流发展 | 投入与产出 | 物流年均财政支出/亿元 | 正向 |
| | | 交通与物流从业人数/万人 | 正向 |
| | | 铁路货物周转量/(亿t·km) | 正向 |
| | | 物流业产值占比/万亿元 | 正向 |
| | 设施建设 | 铁路营业里程/万km | 正向 |
| | | 区域仓储面积/$km^2$ | 正向 |
| | 物流信息化 | 互联网普及率/% | 正向 |
| | | 移动电话普及率/% | 正向 |
| | 通道可替代性 | 通道运输方式/种 | 正向 |
| | | 通道冗余路径/条 | 正向 |
| | 应急物流建设 | 应急救援队伍/支 | 正向 |
| | | 应急管理政策/项 | 正向 |
| 自然与人文环境 | 经济发展 | 生产总值/万亿元 | 正向 |
| | | 人均生产总值/万元 | 正向 |
| | 社会安全 | 公共安全指数 | 正向 |
| | | 国家和平指数 | 正向 |
| | | 城镇调查失业率/% | 负向 |
| | | 城市基尼系数 | 负向 |
| | 交通安全 | 交通事故死亡率/% | 负向 |
| | | 交通道路拥堵指数 | 负向 |
| | 自然灾害 | 强烈地震年均次数/次 | 负向 |
| | | 滑坡灾害发生起数/次 | 负向 |
| | | 灾害风险指数 | 负向 |

失，则以全国数据为基础，该节点城市对全国GDP贡献的比例等比换算得出，换算过程如公式(7)所示。

$$y_i = Y\frac{g_i}{G} \tag{7}$$

式中：$y_i$表示节点$i$某一指标的值；$Y$为该节点某一指标的全国统计值；$g_i$表示节点$i$的城市生产总值，万亿元；$G$为该节点所在国家的GDP，万亿元。

西部陆海新通道网络节点的抗风险能力采用改进EW-GRA综合评价法评价得出。节点抗风险能力评价结果如表4所示。

由表4可知，重庆、成都、西安、新加坡市和泰国曼谷位居前列，抗风险能力较强。这些节点普遍具备显著的区位优势，是区域性或国际性交通与物流枢纽。例如，重庆作为衔接中欧班列、长江黄金水道和西部陆海新通道的纽带，是全国首个“陆港型、港口型、空港型、生产服务型、商贸服务型”国家物流枢纽承载地，其在物流业的投入明显

**表4　节点抗风险能力评价结果**

Tab.4　Resistance capability evaluation of nodes

| 位序 | 节点 | 抗风险能力值 | 位序 | 节点 | 抗风险能力值 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 重庆 | 0.708 1 | 22 | 百色 | 0.407 2 |
| 2 | 成都 | 0.596 7 | 23 | 柳州 | 0.407 0 |
| 3 | 西安 | 0.566 9 | 24 | 北海 | 0.406 4 |
| 4 | 新加坡市 | 0.521 6 | 25 | 湛江 | 0.406 2 |
| 5 | 泰国曼谷 | 0.483 0 | 26 | 银川 | 0.403 2 |
| 6 | 乌鲁木齐 | 0.470 2 | 27 | 曲靖 | 0.400 6 |
| 7 | 兰州 | 0.465 9 | 28 | 宜宾 | 0.400 6 |
| 8 | 昆明 | 0.459 4 | 29 | 六盘水 | 0.392 6 |
| 9 | 呼和浩特 | 0.447 9 | 30 | 毕节 | 0.392 6 |
| 10 | 南宁 | 0.446 8 | 31 | 怀化 | 0.391 6 |
| 11 | 越南河内 | 0.439 4 | 32 | 文莱斯里巴加湾 | 0.389 5 |
| 12 | 马来西亚吉隆坡 | 0.433 5 | 33 | 泸州 | 0.387 3 |
| 13 | 贵阳 | 0.428 8 | 34 | 自贡 | 0.387 0 |
| 14 | 印尼雅加达 | 0.428 8 | 35 | 内江 | 0.386 9 |
| 15 | 西宁 | 0.425 4 | 36 | 达州 | 0.386 2 |
| 16 | 拉萨 | 0.425 4 | 37 | 柬埔寨金边 | 0.386 1 |
| 17 | 印度新德里 | 0.424 4 | 38 | 尼泊尔加德满都 | 0.383 9 |
| 18 | 遵义 | 0.420 1 | 39 | 老挝万象 | 0.380 6 |
| 19 | 防城港 | 0.407 9 | 40 | 缅甸仰光 | 0.377 0 |
| 20 | 钦州 | 0.407 8 | 41 | 菲律宾马尼拉 | 0.376 6 |
| 21 | 海口 | 0.407 6 | — | — | — |

高于其他节点，物流发展水平较高；成都和西安作为西部地区重要中心城市，则依托完善的对外通道体系和高新技术产业基础，是西部地区的对外门户和经济中心；新加坡市作为国际港口枢纽和全球金融中心，其物流与经济发展水平较高且自然灾害发生频率低，因而抗风险能力高于尼泊尔加德满都、老挝万象、缅甸仰光、菲律宾马尼拉等国外节点。

（2）节点重要性。基于度中心性、介数中心性、特征向量中心性、K-Core中心性及加权复合中心性识别不同结构属性下的节点重要性值，并进行排序。不同结构属性下的重要节点TOP10如表5所示。

由表5可知，钦州、防城港和北海在度中心性、特征向量中心性、K-Core中心性以及加权复合中心性识别出的重要节点中排名处于前列。其中，钦州在多个结构属性识别出的重要节点中排名第一，重要性远高于其他节点。其次，越南河内紧邻我国广西和云南，连通东南亚地区其他节点，其区位优势

明显，在多个结构属性识别中属于最重要的国外节点。昆明作为我国通往东南亚的门户，在介数中心性和加权复合中心性下位列第一，在网络中的桥梁作用突出。成都和重庆作为我国内陆核心枢纽，连接西北部节点，同样在网络中发挥着重要作用。

（3）节点风险。将节点失效概率与不同属性下的节点重要性值代入到节点风险评估模型中，计算不同属性下的节点风险值，并根据节点风险大小排序，得到西部陆海新通道网络节点风险位序热力图如图6所示。

由图6可知，由于不同结构属性下识别的节点重要性不相同，因而$R_i^{(D)}$，$R_i^{(B)}$，$R_i^{(E)}$，$R_i^{(K)}$，$R_i^{(C)}$风险下的排序有所差异。其中，钦州在$R_i^{(D)}$，$R_i^{(E)}$，$R_i^{(K)}$，$R_i^{(C)}$风险排序中位列前五，越南河内在$R_i^{(D)}$，$R_i^{(B)}$，$R_i^{(E)}$，$R_i^{(C)}$风险排序中位列前五，防城港和北海在$R_i^{(D)}$，$R_i^{(E)}$，$R_i^{(K)}$风险排序位列前五。在多个风险排序中靠前的节点还有昆明、贵阳、南宁、吉隆坡(马来西亚)和成都，这些节点抗风险能力较强，失效概率较低，但由于节点重要性极高，因而潜在的损失风险高。尼泊尔加德满都、呼和浩特、海口等节点风险相对较低。其中，呼和浩特为失效概率和重要性双低节点，尼泊尔加德满都虽然失效概率较高，但网络影响力小，损失风险低。总体上，国内节点的抗风险能力虽然比国外节点强，失效概率更低，但由于节点重要性高，因此部分节点存在较高的潜在风险。

### 3.3　网络脆弱性测度

基于$R_i^{(D)}$，$R_i^{(B)}$，$R_i^{(E)}$，$R_i^{(K)}$，$R_i^{(C)}$共5种风险设计节点攻击策略，根据风险位序依次且连续攻击西部陆海新通道网络节点，通过网络连通性、网络运输效率和网络独立路径多样性脆弱性测度指标测度其在节点失效情况下性能衰减的程度。不同攻击策略下的网络性能变化如图7所示。

由图7a可知，在$R_i^{(B)}$和$R_i^{(C)}$攻击策略下，昆明、

**表5　不同结构属性下的重要节点TOP10**

Tab.5　TOP10 important nodes under different structural attributes

| 位序 | 度中心性 | 介数中心性 | 特征向量中心性 | K-Core中心性 | 加权复合中心性 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 钦州 | 昆明 | 钦州 | 钦州 | 昆明 |
| 2 | 越南河内 | 成都 | 防城港 | 防城港 | 越南河内 |
| 3 | 防城港 | 越南河内 | 北海 | 北海 | 成都 |
| 4 | 北海 | 南宁 | 越南河内 | 马来西亚吉隆坡 | 钦州 |
| 5 | 重庆 | 贵阳 | 马来西亚吉隆坡 | 新加坡市 | 南宁 |
| 6 | 成都 | 钦州 | 新加坡市 | 印尼雅加达 | 贵阳 |
| 7 | 南宁 | 重庆 | 文莱斯里巴加湾 | 文莱斯里巴加湾 | 重庆 |
| 8 | 贵阳 | 兰州 | 印尼雅加达 | 重庆 | 防城港 |
| 9 | 昆明 | 拉萨 | 南宁 | 成都 | 北海 |
| 10 | 马来西亚吉隆坡 | 西安 | 菲律宾马尼拉 | 南宁 | 兰州 |

注：K-Core中心性排名前七的节点$k$值相等，重要性排序不分先后。

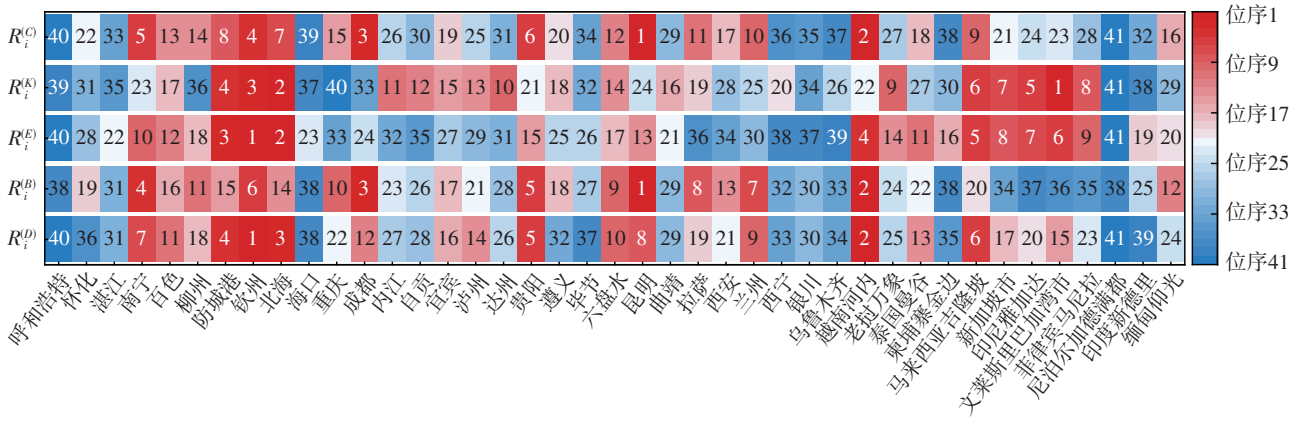
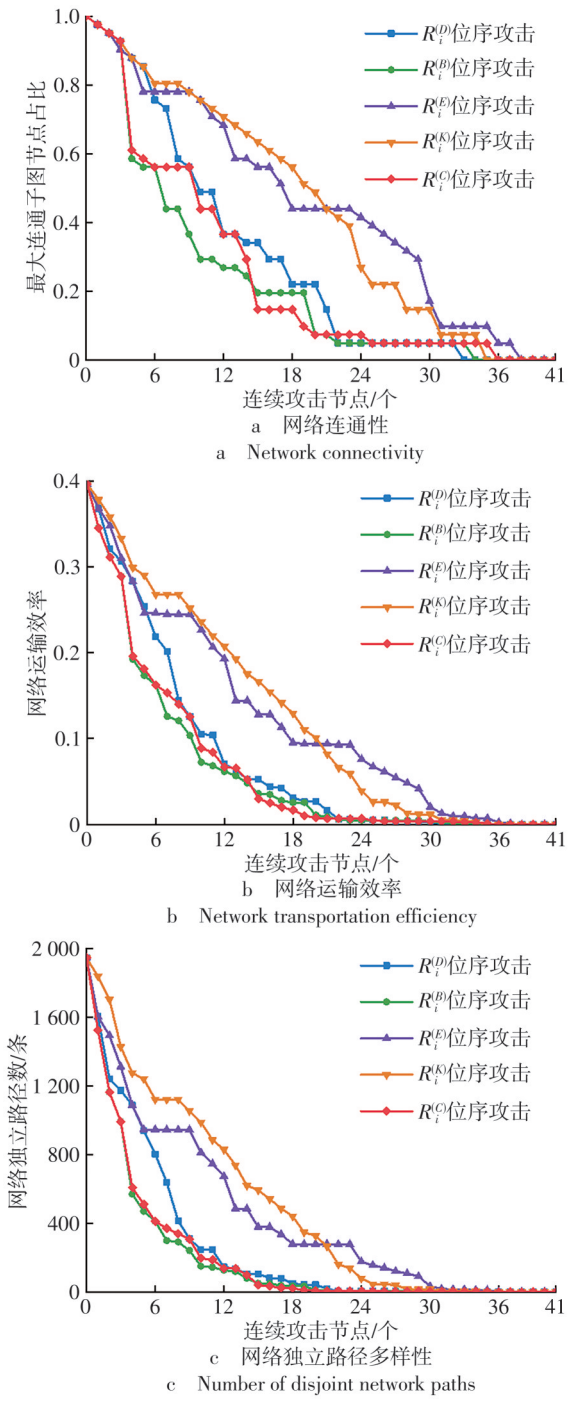



**图6　节点风险位序热力图**

Fig.6　Heatmap of node risk ranking




a　网络连通性

a　Network connectivity

b　网络运输效率

b　Network transportation efficiency

c　网络独立路径多样性

c　Number of disjoint network paths

**图7　不同攻击策略下的网络性能变化**

Fig.7　Variation of network performance following different attack strategies

越南河内、成都3个节点失效后网络连通性仅下降了0.07。当前，西部陆海新通道货物运输主要经广西实现铁海联运出海，其次是通过云南边境铁路或公路出境，当昆明节点失效后，大量货物仍可经广西钦州出海，或经过南宁和钦州到达防城港和北海实现铁海联运，因此网络连通性受影响程度较低，但昆明、越南河内、成都3个节点以及南宁或钦州相继被攻击后，由于进出口通道被全部切断，网络连通性断崖式下降，约40%的节点脱离最大连通子图，分裂成独立的局部网络或孤立的节点。当前8个风险节点被连续攻击失效后，网络的连通性严重受损，分别下降了56.10%和43.91%，当失效节点超过14个时，连通性低于初始网络的20%，网络运输陷入瘫痪。对比不同攻击策略下网络连通性的下降趋势可以看出，不同策略对网络的破坏程度存在的差异较大。在$R_i^{(D)}$，$R_i^{(E)}$，$R_i^{(K)}$攻击策略下，风险排名前四的节点失效后，网络连通性下降率约12%，性能损失远低于$R_i^{(B)}$和$R_i^{(C)}$攻击，网络瘫痪的临界失效节点数量分别为20个，29个和27个，存在如此差距的主要原因是$R_i^{(B)}$和$R_i^{(C)}$攻击策略识别出了起关键中转作用的风险节点，即昆明、南宁和钦州，并首先攻击了关键节点。由此可见，仅从连通性视角来看，西部陆海新通道网络在面临$R_i^{(D)}$，$R_i^{(E)}$，$R_i^{(K)}$攻击时具备一定抗毁能力，但面对$R_i^{(B)}$和$R_i^{(C)}$攻击时表现较为脆弱。

由图7b和图7c可知，网络性能下降趋势基本一致，且在$R_i^{(E)}$和$R_i^{(K)}$策略攻击下性能下降幅度相对稳定，而面对其余3种策略攻击时无论是网络运输效率还是网络独立路径多样性，性能急剧下降，下降趋势先急后缓，表明风险排名靠前的节点对网络起关键支撑作用。其中，在$R_i^{(D)}$，$R_i^{(B)}$，$R_i^{(C)}$风险中，前8个头部风险节点失效导致网络运输效率下降率63.60%及以上，表明这些节点在网络最短路径中起“桥梁”作用，一旦失效将导致大量节点间运输路径变更并存在绕路现象。同时，这部分节点失效导致网络独立路径条数从1 945条下降至413条、291条、339条，最低下降率达78.76%，可见这部分风险节点失效对网络复杂性影响程度同样巨大，且此时的网络已基本瘫痪。相比而言，在$R_i^{(E)}$和$R_i^{(K)}$策略攻击下，网络运输效率和独立路径多样性的下降幅度更低，但性能损失明显高于网络连通性，失效节点数量分别超过23个和21个时，网络也将处于瘫痪状态。根据以上2种脆弱性指标下的测度结果，无论在哪种攻击策略下，西部陆海新通道网络均呈现出较高的脆弱性。

综合以上分析，不同攻击策略对网络的破坏程

度存在差距，其中，$R_i^{(B)}$和$R_i^{(C)}$风险位序攻击策略的破坏能力最强，网络在$R_i^{(E)}$和$R_i^{(K)}$策略攻击下表现相对坚挺，但连续攻击下的节点失效在整体上对西部陆海新通道网络连通性、运输效率、独立路径多样性的影响均比较明显，网络呈现出较高的脆弱性。

## 4　结论

本研究基于改进EW-GRA综合评价法与节点的网络结构属性，综合考虑失效概率与结构重要性评估节点风险，建立了测度风险视角下跨境物流网络脆弱性的方法。利用上述方法，模拟西部陆海新通道网络风险节点发生失效，从网络连通性、运输效率、独立路径多样性的变化程度对其脆弱性进行了测度，主要结论如下。

（1）西部陆海新通道网络节点中，国内节点的抗风险能力普遍高于国外节点，失效概率较低。为提升西部陆海新通道网络中国外节点的风险防范能力，应完善重大突发事件下的跨国应急联动机制。针对失效概率高但重要性低的国外节点，加强国际合作，推动当地基础设施升级和风险管理能力建设，确保失效后能够迅速启动应急恢复工作。

（2）钦州、越南河内、昆明、防城港、北海、南宁、成都均为西部陆海新通道网络的重要节点。其中，钦州、防城港、北海承担物流枢纽和港口连接的双重功能，在海运网络中起着关键连接作用；越南河内是西部陆海新通道网络最重要的国外节点；昆明在网络中的桥梁作用突出。同时，钦州、越南河内、防城港、吉隆坡、成都、南宁的潜在风险同样较高。因此，在西部陆海新通道建设过程中，应持续强化钦州、防城港、北海等海上枢纽、陆上联结点的建设，重点提升节点风险防范和运营维护能力。如实施系统监测技术，对设施状态实时监控和预警。

（3）在网络连通性指标测度下，西部陆海新通道网络在面对$R_i^{(D)}$，$R_i^{(E)}$，$R_i^{(K)}$攻击时具备一定抗毁能力，但面对$R_i^{(B)}$和$R_i^{(C)}$攻击时表现脆弱，同时在网络运输效率和独立路径多样性指标测度下，无论哪种攻击策略，西部陆海新通道网络的脆弱性均比较明显。为降低网络脆弱性，可通过推动构建多元化运输方式和线路，如合理扩展兰州、贵阳、南宁、柳州、曼谷(泰国)等沿线重要节点间的直达线路或物流运输方式以增加网络冗余，使网络面临单一节点失效后，其他线路或运输方式仍可保障网络的基本功能。

本研究在西部陆海新通道网络脆弱性测度过程中引入了节点风险，且丰富了脆弱性测度的指标，但测度结果主要针对网络的结构脆弱性。下一步研究将围绕风险视角下网络运营层面的脆弱性，考虑进出口货运量、节点容量等约束，测度节点级联失效场景下的网络脆弱性。

**参考文献：**

[1] TURNER B L，KASPERSON R E，MATSON P A，et al. A Framework for Vulnerability Analysis in Sustainability Science[J]. PNAS2003，100(14)：8074-8079.

[2] BERDICA K. An Introduction to Road Vulnerability：What has been Done，is Done and should be Done[J]. Transport Policy，2002，9(2)：117-127.

[3] 张英贵，陆　强，高　全，等. 基于关键站点识别的区域轨道交通路网抗干扰性研究[J]. 铁道科学与工程学报，2022，19(7)：1845-1853.
ZHANG Yinggui，LU Qiang，GAO Quan，et al. Anti-Interference Performance of Regional Rail Transit Network Based on Identification of Key Stations[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2022，19(7)：1845-1853.

[4] ZHAO J Q，LIANG Q H，GUO J A，et al. Vulnerability Assessment and Evolution Analysis of Beijing's Urban Rail Transit Network[J]. Physica A：Statistical Mechanics and Its Applications，2024，653：130078.

[5] 吴　鹏，李得伟. 时空视角下城市群铁路客运网络抵抗韧性[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2024，64(11)：1860-1869.
WU Peng，LI Dewei. Resistance Resilience of Railway Passenger Transport Networks in Urban Agglomerations from a Spatiotemporal Perspective[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology)，2024，64(11)：1860-1869.

[6] 吴　迪，王宇鹏，盛世杰，等. “21世纪海上丝绸之路”集装箱海运网络的脆弱性变化[J]. 地理学报，2022，77(8)：2067-2082.
WU Di，WANG Yupeng，SHENG Shijie，et al. Vulnerability Changes of the Maritime Silk Road Container Shipping Network under Intentional Attacks[J]. Acta Geographica Sinica，2022，77(8)：2067-2082.

[7] JING C，YONG Z，LEI L. Vulnerability Analysis of Multimodal Transport Networks Based on Complex Network

Theory[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2021, 37(2): 209-215.

[8] 张光远，张　帆，刘泳博. 成渝地区城际铁路网络特性与脆弱性分析[J]. 铁道运输与经济，2021，43(7)：36-42.
ZHANG Guangyuan, ZHANG Fan, LIU Yongbo. Characteristics and Vulnerabilities of Intercity Railway Network in Chengdu-Chongqing Region[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(7): 36-42.

[9] 丁　锐，彭丽娜，杜琳钰，等. 成渝轨道交通网络演化及对综合交通复杂网络特性的影响研究[J]. 铁道运输与经济，2024，46(9)：144-153.
DING Rui, PENG Li'na, DU Linyu, et al. Evolution of Rail Transit Network and Its Influence on Complex Network Characteristics of Integrated Transportation in Chengdu-Chongqing Area[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(9): 144-153.

[10] WANG N, GAO Y, HE J T, et al. Robustness Evaluation of the Air Cargo Network Considering Node Importance and Attack Cost[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 217: 108026.

[11] 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.

[12] HE H, LIU W G, ZHAO Z H, et al. Vulnerability of Regional Aviation Networks Based on DBSCAN and Complex Networks[J]. Computer Systems Science and Engineering, 2022, 43(2): 643-655.

[13] 丁　锐，张　婷，尹　剑，等. 西部陆海新通道城市网络结构特性及其韧性研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版)，2021，57(6)：794-802.
DING Rui, ZHANG Ting, YIN Jian, et al. Structural Characteristics and Resilience of City Network in the New Western Land-Sea Corridor[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2021, 57(6): 794-802.

[14] 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 Science), 2023, 42(8): 86-95, 124.

[15] 马壮林，邵逸恒，舒　兰，等. 多层网络视角下地铁网络脆弱性分析[J]. 中国安全科学学报，2023，33(8)：164-172.
MA Zhuanglin, SHAO Yiheng, SHU Lan, et al. Vulnerability Analysis of Metro Network from Perspective of Multi-Layer Network[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(8): 164-172.

[16] 牟能冶，康秋萍，贾程方. 突发事件影响下的城市快递网络脆弱性评估[J]. 中国安全科学学报，2020，30(12)：125-132.
MU Nengye, KANG Qiuping, JIA Chengfang. Vulnerability Assessment of Urban Express Networks under Influence of Emergencies[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(12): 125-132.

[17] 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.

[18] 任新惠，杨　丽. 中国航空货运网络脆弱性分析[J]. 安全与环境学报，2020，20(3)：840-848.
REN Xinhui, YANG Li. Vulnerability Analysis of China Air Cargo Transportation Network[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(3): 840-848.

[19] 杜　瑜，宗会明. “一带一路”建设背景下重庆与东盟国家贸易格局演变和影响因素分析[J]. 世界地理研究，2020，29(4)：697-707.
DU Yu, ZONG Huiming. The Evolution and Influencing Factors of Spatial Pattern of Trade between Chongqing and ASEAN Countries under the Background of “the Belt and Road Initiative”[J]. World Regional Studies, 2020, 29(4): 697-707.

[20] 黄伟新，何秋蓉，李　源. 西部陆海新通道沿线枢纽城市物流业高质量发展水平测评：区域差异与动态演进[J]. 铁道运输与经济，2024，46(5)：61-70.
HUANG Weixin, HE Qiurong, LI Yuan. Evaluation of High-Quality Development Level of Logistics Industry in Hub Cities along New Western Land-Sea Corridor: Regional Differences and Dynamic Evolution[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(5): 61-70.

[21] XU X P, HU J H, LIU F, et al. Scaling and Correlations in Three Bus-Transport Networks of China[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2007, 374(1): 441-448.

（下转第 170 页）