文章编号：1003-1421(2026)02-0205-12
引用格式：王宇航，周凌云，梁川，等. 基于复杂网络理论的铁路快捷货物运输网络社团特征及脆弱性研究[J]. 铁道运输与经济，2026，48(2)：205-216.
WANG Yuhang，ZHOU Lingyun，LIANG Chuan，et al. Community Characteristics and Vulnerability of Railway Express Freight Transportation Network Based on Complex Network Theory[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(2)：205-216.

基于复杂网络理论的铁路快捷货物运输网络社团特征及脆弱性研究

王宇航[1]，周凌云[2]，梁　川[3]，吴　昊[4]

(1.中国铁道科学研究院 研究生部，北京　100081；2.中国铁道科学研究院集团有限公司 运输及经济研究所，北京　100081；3.中国铁路哈尔滨局集团有限公司 哈尔滨铁路物流中心，黑龙江 哈尔滨　150001；4.中铁集装箱运输有限责任公司 武汉分公司，湖北 武汉　430071)

摘　要：探究铁路快捷货物运输网络内部交互特征与服务稳定性，以支撑网络布局优化与抗风险能力提升。基于复杂网络理论，构建“通道设施-运输组织-运行径路”网络模型；结合模块度优化准则，提出一种基于改进粒子群优化算法的社团划分方法；并考虑货物价值属性，构建以运输时效与成本为核心的网络性能函数，通过多场景仿真评估网络脆弱性。以中国铁路快捷货物运输网络为例进行研究，结果表明：网络可划分为7个社团，社团分布呈现以区域集聚为主导、跨区域衔接为补充的空间特征。网络整体呈现较高的脆弱性，高脆弱性站点主要分布在东部沿海区域，如乔司站、江村站；高脆弱性区段多为连接东部沿海与内陆的主要铁路干线，如京广线江村—舵落口段。研究成果可为推动铁路快捷货物运输网络规模化发展、支撑铁路监测维护工作提供理论依据。

关键词：铁路运输网络；铁路快捷货物；复杂网络理论；社团划分；网络脆弱性
中图分类号：U294　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250806003

Community Characteristics and Vulnerability of Railway Express Freight Transportation Network Based on Complex Network Theory

WANG Yuhang[1]，ZHOU Lingyun[2]，LIANG Chuan[3]，WU Hao[4]

(1. Postgraduate Department, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China; 2. Transportation & Economics Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China; 3. Harbin Railway Logistics Center of China Railway, China Railway Harbin Group Co., Ltd., Harbin 150001, Heilongjiang, China; 4. Wuhan Branch Company, China Railway Container Transportation Co., Ltd., Wuhan 430071, Hubei, China)

Abstract: This study explored the internal interaction characteristics and service stability of the railway express freight transportation network to support network layout optimization and enhance risk resistance. Based on complex network theory, a “channel facilities-transportation organization-operating route” network model was constructed. Combining modularity optimization criteria, an improved particle swarm optimization algorithm-based community division method was proposed. Additionally,

收稿日期：2025-08-06
通信作者：周凌云(1980—)，男，湖南衡阳人，中国铁道科学研究院集团有限公司运输及经济研究所研究员。
基金项目：国家社会科学基金一般项目(23BGL281)；中国国家铁路集团有限公司科技开发计划课题(P2024X007)

considering the value attributes of goods, a network performance function centered on transportation timeliness and cost was developed. The network vulnerability was evaluated through multi-scenario simulations. Taking China's railway express freight transportation network as a case study, the results indicate that the network can be divided into seven communities, with a spatial distribution characterized primarily by regional clustering and supplemented by inter-regional connections. The network as a whole exhibits relatively high vulnerability. Highly vulnerable nodes are mainly located in the eastern coastal regions, such as Qiaosi Station and Jiangcun Station, while highly vulnerable segments are mostly major railway trunk lines connecting the eastern coast and inland areas, such as the Jiangcun–Duoluokou section of the Beijing–Guangzhou line. The findings provide a theoretical basis for promoting the large-scale development of the railway express freight transportation network and supporting railway monitoring and maintenance operations.

Keywords: Railway Transportation Network; Railway Express Freight; Complex Network Theory; Division of Community; Network Vulnerability

0　引言

随着互联网与电子商务等新业态的快速发展，大量高时效、高附加值产品进入流通市场，带动了快捷货物运输需求的持续增长[1]。铁路运输依托时效性强、成本低、绿色环保等优势，展现出与快捷货物运输需求较强的适配性。2025年第2季度，跨局铁路快捷货运列车运行线达403条[2]，同比增加42条，增幅达12%，有效满足了快捷货物运输需求。然而，随着铁路快捷货物运输网络规模不断扩大，其内部结构复杂性日益凸显；同时，客户对准点率、货损率等服务质量的要求也不断提高。在铁路货运向现代物流转型的背景下，研究铁路快捷货物运输网络社团特征及脆弱性，有助于揭示网络功能模块化特征、量化突发事件对网络服务稳定性的影响，为优化网络布局决策、支撑铁路监测维护工作提供理论依据。

复杂网络理论以图论为基础，将站点抽象为节点，线路抽象为边，能够直观揭示网络结构，为分析网络特性提供框架[3]。已有研究基于度分布[4]、聚类系数[5]等指标研究网络拓扑特征，揭示了铁路运输网络的无标度特性[6]。但相关研究主要关注铁路运输网络的整体特征，对于网络内部节点间的关联结构关注较少。复杂网络理论中社团结构指内部联系紧密、外部联系稀疏的节点集合，为分析网络内部结构与功能模块化提供了方法支撑[7]。目前，社团特征分析已在城市轨道交通网络[8]、集装箱海运网络[9]等交通运输网络中得到了应用。

网络脆弱性指网络遭受突发事件后性能水平的下降程度[10]。目前，国内外学者围绕铁路运输网络脆弱性已开展大量研究，采用可达性[11]、网络效率[12]等拓扑指标量化网络性能，通过模拟仿真随机失效、蓄意失效等场景[13]下的网络性能损失来评估网络脆弱性。然而，多数研究主要关注突发事件引发的网络拓扑性能变化，未能充分结合铁路快捷货物运输网络功能属性，从服务功能层面量化评估网络脆弱性，导致研究成果存在局限。

综上所述，当前针对铁路运输网络拓扑结构特征的研究已取得一定成果，但在网络内部交互特性研究以及基于服务维度的网络脆弱性评估方面存在不足。基于此，本研究以列车开行方案为基础，依据“通道设施–运输组织–运行径路”思路，构建铁路快捷货物运输网络模型；结合模块度优化准则，提出一种基于改进粒子群优化算法的网络社团划分方法；针对快捷货物运输的高时效特征，结合货物价值特性，构建以运输时效与成本为核心的网络性能函数，并从多场景角度评估网络脆弱性。最后，以中国铁路快捷货物运输网络为例进行实例分析，揭示网络社团交互特性，并识别关键站点与区段，为提升铁路快捷货物运输服务质量提供定量决策支撑。

1　铁路快捷货物运输网络模型构建

铁路快捷货物运输网络以铁路通道设施为基础，以客运化模式开行的铁路快捷货运列车为载体，服务于高时效性、高附加值货物。铁路快捷货运列车采用定点、定线、定车次、定时、定价的“五定”模式，运输组织过程包括集运、干线运输及疏运。其中，集运端由一个或多个装车站进行货物集结，随后由始发技术站开行直达列车，经多个途经站

后到达技术站，经解编作业，最后运至各卸车站。

基于以上分析，在铁路快捷货物运输过程中，各站点功能属性不同，仅少数关键站点承担货物装车、卸车，列车编组、解编等技术作业，而列车运行径路中多数站点仅为通过站。传统单一网络模型难以同时刻画货物作业过程以及列车运行径路，无法支撑后续网络社团特征分析与脆弱性评估。

因此，本研究将铁路快捷货物运输网络抽象为“通道设施-运输组织-运行径路”3层网络。其中，通道设施网G^a刻画网络物理拓扑结构，运输组织网G^b描述货源地、集散枢纽与消费地之间的货流关联强度，运行径路网G^c刻画货物运输过程中实际路径。铁路快捷货物运输网络模型符号说明如表1所示。

（1）通道设施网。通道设施网是铁路快捷货物运输网络的运输基础，将铁路站点抽象为网络中节点，得到集合N，基于Space L法，将相邻站点间的线路抽象为网络中的连边，得到集合E^a。由于快捷货运列车通常成对开行，故不考虑上下行影响，将通道设施网定义为无向无权图$G^a=(N, E^a)$。

（2）运输组织网。运输组织网基于铁路快捷货运列车开行方案建立，刻画网络中列车运输组织过程，反映货流交互关系，利用二分网描述列车集合T与站点集合N之间的对应关系，运输组织网二分对应关系如图1所示，定义数组B^b描述列车t在站点n_i的作业内容。

$$B^b=\{(t, n_i, s_i^t, z_i^{b,t})|t\in T, n_i\in N\} \tag{1}$$

基于列车与站点间二分图以及Space L法，构建运输组织网$G^b=(N, E^b, W^b)$。其中，E^b表示组织弧e_{hl}^b集合，组织弧e_{hl}^b表示列车集运、运输和疏运3个阶段运输组织过程。

表1　铁路快捷货物运输网络模型符号说明

Tab.1　Symbol explanation of railway express freight transport network model

符号	定义	符号	定义
N	铁路站点集合，$N=\{n_i\|1\leqslant i\leqslant n\}$	s_i^t	列车t在站点n_i作业类型，装车作业、始发技术作业、到达技术作业、卸车作业分别取1，2，3，4
E^a	线路区段集合，$E^a=\{e_{ij}^a\|1\leqslant i, j\leqslant n, i\neq j\}$	$z_i^{b,t}$	列车t在站点n_i的作业量，t
E^b	组织弧集合，$E^b=\{e_{hl}^b\|1\leqslant h, l\leqslant n, h\neq l\}$	t	列车索引
T	列车集合，$T=\{t\|1\leqslant t\leqslant m\}$	n_i	站点索引
$E_J^{b,t}$	列车t集运段组织弧集合，$E_J^{b,t}=\{e_{hl}^{b,t}\|s_h^t=1, s_l^t=2\}$	e_{ij}^a	区段索引
$E_G^{b,t}$	列车t干线运输段组织弧集合，$E_G^{b,t}=\{e_{hl}^{b,t}\|s_h^t=2, s_l^t=3\}$	e_{hl}^b	组织弧索引
$E_S^{b,t}$	列车t疏运段组织弧集合，$E_S^{b,t}=\{e_{hl}^{b,t}\|s_h^t=3, s_l^t=4\}$	$z_{hl}^{b,t}$	列车t在组织弧e_{hl}^b的载运量，t
$E^{b,t}$	列车t组织弧集合，$E^{b,t}\in E^b$	$z_{ij}^{c,t}$	列车t在区段e_{ij}^a的载运量，t
$\Gamma(e_{hl}^t)$	列车t组织弧e_{hl}映射至G^a实际径路	w_{hl}^b	组织弧e_{hl}^b权重
W^b	组织弧权重集合，$W^b=\{w_{hl}^b\|1\leqslant h, l\leqslant n, h\neq l\}$	w_{ij}^c	区段e_{ij}^a权重
W^c	区段权重集合，$W^c=\{w_{ij}^c\|1\leqslant i, j\leqslant n, i\neq j\}$	r^t	列车t开行频次，列/周

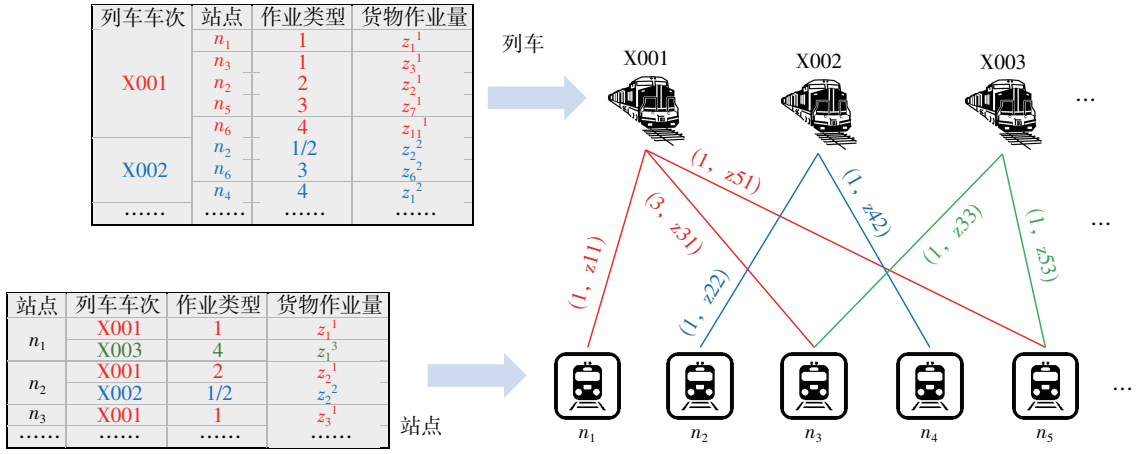


图1　运输组织网二分对应关系

Fig.1　Binary correspondence of transportation organization network

$$E^{b,\,t}=E_J^{b,\,t}\cup E_G^{b,\,t}\cup E_S^{b,\,t} \tag{2}$$

$$E^b=\{e_{hl}^b|e_{hl}^b\in\bigcup_{t=1}^{m}E^{b,\,t}\}\qquad\forall t\in T \tag{3}$$

W^b表示组织弧e_{hl}^b权重集合，根据数组B^b构建。

$$z_{hl}^{b,\,t}=\begin{cases}z_h^{b,\,t} & \text{if } e_{hl}^b\in E_J^t(s_h^t=1,\ s_l^t=2)\\ \sum\limits_{h\in N_l^-}z_h^{b,\,t} & \text{if } e_{hl}^b\in E_G^t(s_h^t=2,\ s_l^t=3)\\ z_l^{b,\,t} & \text{if } e_{hl}^b\in E_S^t(s_h^t=3,\ s_l^t=4)\end{cases} \tag{4}$$

$$w_{hl}^b=\sum_{t=1}^{m}z_{hl}^{b,\,t}r^t \tag{5}$$

（3）运行径路网。运行径路网在运输组织网的基础上，刻画列车在通道设施网上的实际运行路径。由于列车开行方案中仅包含装卸车站、到发技术站等关键站点，需将组织弧e_{hl}^b映射为通道设施层中实际径路e_{ij}。结合铁路运输最短路径原则，利用深度优先搜索(Depth First Search，DFS)算法在通道设施网G^a中搜索集运、运输、疏运3个过程中起讫点间最短路径，径路中区段继承原组织弧的属性。

$$\Gamma(e_{hl}^t)=DFS(n_h,\ n_l,\ G^a)=\left\langle e_{h,\,h+1}^t,\ e_{h+1,\,h+2}^t,\ \cdots,\ e_{h+x-2,\,l}^t\right\rangle\quad\forall e_{hl}^t\in E^t,\ e_{hl}\notin E \tag{6}$$

$$z_{ij}^{c,\,t}=z_{hl}^{b,\,t}\qquad e_{ij}\in\Gamma(e_{hl}^b) \tag{7}$$

采用二分图描述列车集合T与区段集合E^a对应关系，运行径路网二分对应关系如图2所示，定义数组B^c描述列车t是否经过区段e_{ij}。

$$B^c=\{(t,\ e_{ij}^a,\ z_{ij}^{c,\,t})|t\in T,\ e_{ij}^a\in E^a\} \tag{8}$$

基于列车与区段间二分关系以及Space L法，构建运行径路网$G^c=(N,\ E^a,\ W^c)$。其中，W^c表示区段权重，根据数组B^c构建。

$$w_{ij}^c=\sum_{t=1}^{m}z_{ij}^{c,\,t}r^t \tag{9}$$

综上，建立铁路快捷货物运输网络模型$G=\{G^a,\ G^b,\ G^c\}$，从通道设施、运输组织、运行径路3个维度刻画网络特征。其中，通道设施网反映支撑铁路快捷货物运输的底层结构，运输组织网反映承担铁路快捷货物作业的核心站点及其关联关系，运行径路网反映承载铁路快捷货物运输的核心通道。此外，采用二分网建立列车与站点、区段间作业关联关系，为后续站点、区段失效场景下的网络脆弱性评估提供数据支撑。

2　研究方法

2.1　网络结构功能指标

结合复杂网络理论，针对3层网络功能定位，分别选取结构及功能指标对铁路快捷货物运输网络结构与功能特征进行分析，结构功能指标及说明如表2所示。

2.2　基于改进粒子群优化算法的网络社团划分

为进一步刻画网络内部模块化特征，引入社团结构分析网络内部特性。铁路快捷货物运输网络中社团结构指高强度快捷货物运输联系的站点集合，体现站点间联系紧密程度，而运输组织网刻画了货源地、集散枢纽与消费地之间的货物联系强度。因此，通过对运输组织网进行社团划分，有助于揭示铁路快捷货物运输的核心单元及覆盖范围，反映不同区域间快捷货物运输联系强度，为进一步优化网络布局、提升网络运营规模提供理论依据，从而支撑全国“123”快货物流圈建立。

目前，社团划分方法主要基于模块度优化法，将社团划分问题转化为无约束优化问题，常用求解算法包括Louvain算法[14]、Infomap算法[15]等。但Louvain算法易陷入局部最优，Infomap算法计算复杂度较高。相比之下，粒子群优化算法具有全局搜

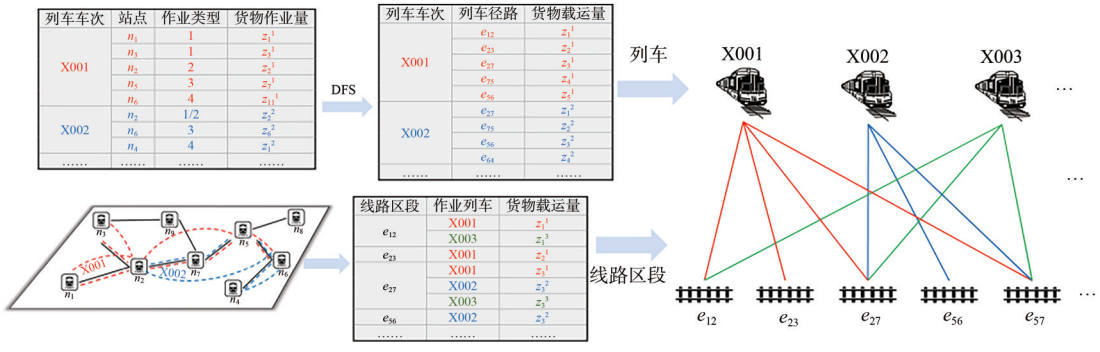


图2　运行径路网二分对应关系

Fig.2　Binary correspondence of operating route network

表2　结构功能指标及说明

Tab.2　Structural functional indicators and descriptions

网络层次	指标名称	计算公式	符号说明	解释说明
通道设施网	度和度分布	$k_i=\sum_{j=1}^{n}e_{ij}^{a}$，$\langle k\rangle=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}k_i$	k_i为站点n_i的度；$\langle k\rangle$为度分布	度反映站点连接能力，度分布体现站点度的分布特征
	聚类系数	$C=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{2E_i}{k_i(k_i-1)}$	C为聚类系数；E_i表示站点n_i实际相连边数	衡量网络局部连接紧密性
	平均路径长度	$L=\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i,\,j\in N,\,i\neq j}d_{ij}$	L为平均路径长度	反映网络连通便捷性
运输组织网	站点作业强度	$q_i^g=\sum_{t=1}^{m}r_i^t\cdot\delta(s_i^t,\,g)$，$q_i=\sum_{g=1}^{4}q_i^g$	$\delta(s_i^t,\,g)$为0–1函数，当$s_i^t=g$时为1，否则为0	反映站点各类型作业繁忙程度
	网络密度	$D=\sum_{h,\,l\in N,\,h\neq l}\frac{e_{hl}^{b}}{n(n-1)}$	D为网络密度	衡量网络中连边的稠密程度
运行径路网	区段权重基尼系数	$G=1-\frac{1}{n_e}(2\sum_{i,\,j\in N,\,i\neq j}w_{ij}^{c}+1)$	G为区段权重基尼系数；n_e为网络连边个数	衡量区段权重分布的均衡性

索能力强、收敛快的特点。因此，本研究采用粒子群优化算法[16]，针对网络社团划分问题特点设计0–1更新策略。

由于运输组织网为有向加权图，定义加权网络模块度Q_w，如式(10)—(11)所示。模块度Q_w范围为[–0.5，1)，模块度越大，划分结果精确度越高。

$$Q_w=\frac{1}{2W^b}\sum_{i,\,j\in N,\,i\neq j}\left(w_{ij}^{b}-\frac{q_iq_j}{W^b}\right)\delta(c_i,\,c_j) \tag{10}$$

$$\delta(c_i,\,c_j)=\begin{cases}0 & c_i\neq c_j\\ 1 & c_i=c_j\end{cases} \tag{11}$$

式中：W^b为所有组织弧权重之和；c_i为站点n_i所在社团编号；δ为0–1函数，当c_i=c_j时，$\delta(c_i,\,c_j)=1$，否则为0。

粒子群优化算法将可能解看作搜索空间的一只“鸟”，称之为“粒子”。每个粒子h具有位置及速度2个属性。其中，位置属性y_h表示社团划分结果，记为$y_h=(y_{h1},\,y_{h2},\,\cdots,\,y_{hn})$；粒子$h$的最优位置，记为$Pb_h$；整个粒子群的最优位置，记为$Gb$。速度属性$v_h$表示迭代中位置属性是否变化，记为$v_h=(v_{h1},\,v_{h2},\,\cdots,\,v_{hn})$，$v_h$更新公式如下。

$$v_{hi}^{u+1}=w_uv_{hi}^{u}+c_1r_1(Pb_h\oplus y_{hi}^{u})+c_2r_2(Gb\oplus y_{hi}^{u}) \tag{12}$$

$$w_u=w_{\max}-(w_{\max}-w_{\min})\times u/U_{\max} \tag{13}$$

式中：w_u为第u次迭代惯性权重，随迭代过程线性衰减；$w_{\max}$为最大惯性权重；$w_{\min}$为最小惯性权重；$U_{\max}$为迭代次数；c_1，c_2为学习因子；r_1，r_2为[0，1]之间的随机值；符号⊕为异或运算，相同取0，否则为1。

在网络社团划分中，由于粒子的位置属性和速度属性均为整数，因此，将速度属性v_{hi}^{u+1}利用Sigmoid函数映射到[0，1]区间，生成[0，1]区间内的随机数，当v_{hi}^{u+1}大于该随机数，取值为1，否则取0。

$$Sig(v_{hi}^{u+1})=\begin{cases}1 & rand(0,\,1)<\dfrac{1}{1+e^{-v_{hi}^{u+1}}}\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{14}$$

根据速度属性更新策略，将位置属性更新规则定义为

$$x_{hi}^{u+1}=\begin{cases}x_{hi}^{u} & v_{hi}=0\\ C(rand(n_{k\in\Omega(i)})) & v_{hi}=1\end{cases} \tag{15}$$

式中：$\Omega(i)$为与站点n_i相邻站点集合；$C(rand(n_{k\in\Omega(i)}))$为站点$n_i$随机加入与之相连站点所属社团。

基于以上定义，基于改进粒子群优化算法进行运输组织网社团划分过程如下。

步骤1：初始化。设置迭代次数$U_{\max}$、粒子群规模H、惯性权重范围[$w_{\min}$，$w_{\max}$]、加速常数c_1和c_2；令迭代次数u=0，随机生成H个粒子的速度属性和位置属性，作为初始粒子种群。

步骤2：适应度评价。将模块度Q_w作为粒子适应度函数，计算粒子的适应度，并更新Pb_h及Gb。

步骤3：更新迭代。按照式(12)—(15)更新粒子的速度属性和位置属性。

步骤4：终止迭代判断。判断u是否大于$U_{\max}$，若是，则转步骤5；否则令u=u+1，并转步骤2。

步骤5：结果输出。输出粒子群最优位置Gb及其对应社团划分结果。

2.3　基于多场景仿真的网络脆弱性评估

我国铁路线路里程长、覆盖广，沿线环境复杂多样，铁路快捷货物运输易受自然灾害、运营故障等突发事件影响，导致网络服务能力下降。铁路快捷货物运输网络脆弱性指网络在遭受突发事件扰动

后服务能力的下降程度。为保障铁路快捷货物运输服务稳定性，有必要从灾前仿真的角度，量化评估站点、区段失效场景对网络性能的影响，识别网络中关键要素，为铁路监测维护工作提供依据。

结合快捷货物时效敏感性，定义运输过程造成的货物价值损失函数Q[17]，运输时间越长，货物价值损失越大。

$$Q = q(1 - e^{-wh}) \tag{16}$$

式中：q为货物初始价值，元；w为货物日均贬值率常数；h为运输时间，d。

在铁路快捷货物运输网络中，快捷货运列车是完成货物流通的基本运输单元，其主要竞争对象为公路长途运输。通过对比同OD对下，铁路快捷货运列车造成货物价值损失Q^t与公路长途运输造成损失Q_g^t，定义差值U^t，表示列车t运输时效增益。同时，计算铁路运输成本C^t与公路运输成本C_g^t，定义差值V^t，表示列车t运输成本降低。考虑到数量级差异，采用min-max归一化得到U_o^t与V_o^t，由此构建融合运输时效与运输成本的网络性能函数F，反映网络整体时效提升与成本降低水平。

$$U^t = Q_g^t - Q^t = q^t z^t (e^{-w^t(h^t + \Delta h^t)} - e^{-w^t h_g^t}) \tag{17}$$

$$V^t = C_g^t - C^t = z^t (p_g l_g^t - p l^t) \tag{18}$$

$$F = \frac{1}{m} \sum_{t \in T_n} U_o^t + V_o^t \tag{19}$$

式中：q^t为列车t中单位货物价值，元/t；z^t列车t载运量，t；w^t为列车t内货物日均贬值率常数；h^t列车t途中运行时间，d；Δh^t为列车t场内作业时间，d；p_g为公路单位周转量运输费用，元/(t·km)；p为铁路单位周转量运输费用，元/(t·km)；l^t为列车t运行距离，km；l_g^t为与列车t同OD的公路运输距离，km；T_n为网络中运行列车集合。

铁路快捷货物运输网络脆弱性受突发事件导致站点或区段的失效位置、数量和范围等因素影响。为探究不同场景下的网络脆弱性，设计单一失效及连续失效2种场景。单一失效场景量化单个站点或区段失效下网络脆弱性，用于识别关键站点与区段。其中，站点失效场景模拟运输组织过程中货运作业站因设备故障丧失作业能力；区段失效场景模拟列车运行途经区段因自然灾害、运营故障等导致区段封锁。定义V_ξ表征单一失效场景下的网络脆弱度，V_ξ取值范围为[0，1]，值越大表示该站点或区段失效后对网络服务水平的影响越大，其在网络中的重要性也越高。

$$V_\xi = \frac{F_0 - F_\xi}{F_0} \tag{20}$$

式中：F_0为正常场景下网络性能；F_ξ为单一失效场景下网络剩余性能。

连续失效场景模拟因设备故障、恶意攻击引发的站点或区段连续失效，反映网络抗连续失效的能力，衡量网络整体的脆弱性。给定失效顺序$Sr[\xi_1, \xi_2, \cdots, \xi_k]$，利用曲线下面积$A_{Sr}$表征网络在连续失效场景脆弱性，$A_{Sr}$取值范围为[0，1]，值越大表示网络在面临连续失效时表现越脆弱，即

$$A_{Sr} = \sum_{\xi_k \in Sr} V_{\xi_k} / |Sr| \tag{21}$$

式中：$|Sr|$表示失效过程中受影响站点或区段数量。

3　实例分析

3.1　研究区域与数据来源

随着铁路现代物流体系建设的深入推进，我国形成以城际班列、多式联运班列、中欧(中亚)班列为主的铁路快捷货运产品谱系。由于中欧(中亚)班列涉及跨境运输，本研究选取城际班列与多式联运班列2类产品，作为中国铁路快捷货物运输网络(不包括香港特别行政区、澳门特别行政区、台湾省)中基本要素进行实例分析。

参照《铁路货运营业里程示意图》与铁路95306网公布的2024年第3季度快捷货运列车开行方案，涉及554条列车运行线。为简化网络，选取列车装卸作业站、到发技术站以及线路交会站，构建包括873个站点、1 077条组织弧、1 061条区段的中国铁路快捷货物运输网络模型，模型中涉及的铁路站点信息如表3所示，列车信息如表4所示，区段及组织弧信息如表5所示。

表3　铁路站点信息

Tab.3　Railway station information

站点编号	铁路站点	站点编号	铁路站点
1	北安	……	……
2	富裕	871	条子场
3	冯屯	872	东川
4	白山乡	873	哈尔盖
……	……	873	饮马峡

表4　列车信息

Tab.4　Train information

序号	列车车次t	组织弧集合$E^{b,\,t}$	运行径路集合$E^{c,\,t}$	开行频率r^t/(列/周)	载运量/t	速度v^t/(km/h)
1	X8743/4	{双桥—丰台西，大红门—丰台西，……，江村—大朗}	{双桥—大红门，丰台西—黄村，……，江高镇—大朗}	5	2 500	120
2	X111/4/1	{黄村—闵行}	{黄村—固安，固安—霸州，……，新桥—闵行}	7	460	160
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
553	X9587/8	{小南垭—兴隆场，兴隆场—钦州港}	{小南垭—团结村，团结村—兴隆场，……，钦州东—钦州港}	7	3 650	80
554	X9632/1	{杨浦—南翔，芦潮港—南翔，……，成都北—城厢}	{杨浦—何家湾，何家湾—北郊，……，成都北—城厢}	2	4 500	80

表5　区段及组织弧信息

Tab.5　Section and organizational arc information

区段编号	区段e^a_{ij}	经过列车t	区段权重w^a_{ij}	组织弧编号	组织弧e^b_{hl}	经过列车t	组织弧权重w^b_{hl}
1	张维屯—绥化	X9504	3.5	1	高台子—三间房	X9502，X9506，X9510	11
2	高台子—白山乡	X9502，X9506，……，X9515	7	2	公主岭—鲅鱼圈北	80257，80258	7
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1060	协荣—拉萨西	X392/3，81208/7	6	1076	钦州港东—兴隆场	X9578，X9590，……，X9587/8	32
1061	哈尔盖—饮马峡	X392/3，81208/7，……，81891/3	13	1077	小南垭—兴隆场	X9677/8，X9790/89，……，80608	42

3.2　网络结构功能特征

（1）通道设施网。利用Arcgis pro对通道设施网空间布局可视化，通道设施网布局如图3所示，通道设施网拓扑指标数据分布图如图4所示。

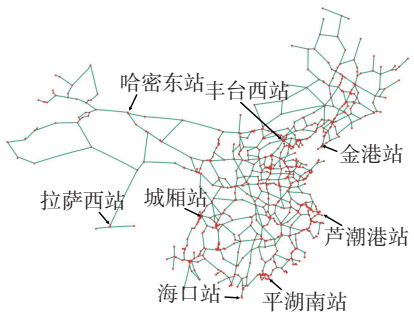


图3　通道设施网布局

Fig.3　Layout of channel facility network

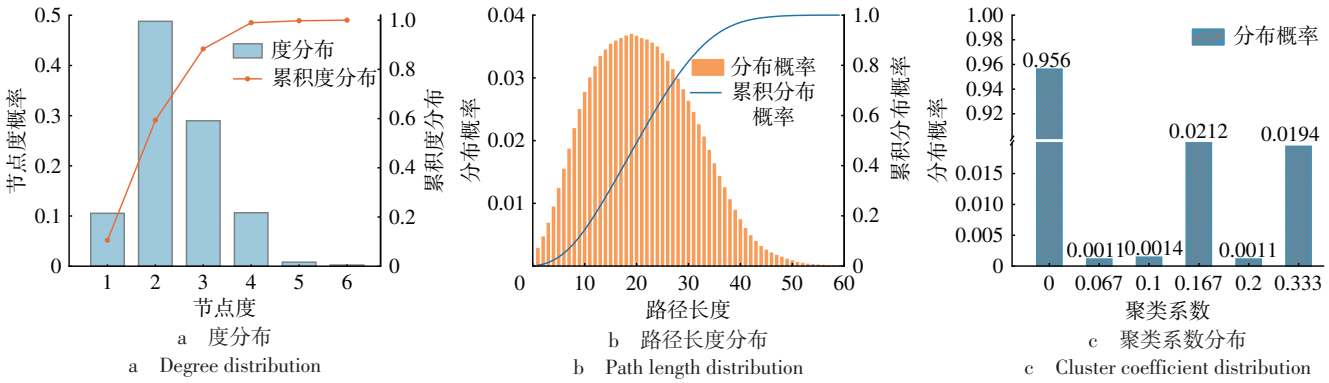
由图3可知，我国铁路基础设施建设呈现“东密西疏”特征，东部区域站点与区段交织密集。图4a中接近50%的站点度为2，即为单条线路的中间站；度为3的站点占比近30%，与网络中只保留关键站点有关。图4b中最短路径呈左偏分布，80%站点最短路径长度小于40；网络平均最短路径长度为21.28，表明任意站点到达其他站点平均需经过21.28个站点。图4c中聚类系数为0的站点占比高达95.67%，说明通道设施网中3个站点互连情况较少；平均聚类系数为0.010 3，表明通道设施网局部聚集效应较弱，线路更倾向线性延伸而非网状交织。

（2）运输组织网。站点作业强度反映站点承担快捷货物不同类型作业量，运输组织网站点特征分布如图5所示。

由图5可知，各站点间作业强度差异较大。其中，办理铁路快捷货运作业的站点共485个，占网络中全部站点数量的55.56%。在已办理相关作业站点中，约85%的站点各类作业强度均小于10，而强度超过30的站点仅占3.51%，反映出站点强度分布呈现不均衡性，作业强度最大站点为黄岛站。此外，计算运输组织网的网络密度为0.004 6，表明当前各站点间铁路快捷货物交互关系相对稀疏，网络结构较为松散。

（3）运行径路网。区段强度反映区段经过列车流量，利用Arcgis pro可视化，区段强度空间分布如图6所示。

由图6可知，目前铁路快捷货运列车繁忙区段包括京广线江村—汉阳、沪昆线乔司—向塘等主要干线通道，主要集中于长三角、珠三角区域，对应我国经济活跃区和货运核心走廊。计算区段强度基尼系数为0.605，前10%区段强度占比为41.92%，表明区段流量高度集中。



a　度分布
a　Degree distribution
b　路径长度分布
b　Path length distribution
c　聚类系数分布
c　Cluster coefficient distribution

图4　通道设施网拓扑指标数据分布图

Fig.4　Distribution of topology index data for channel facility network

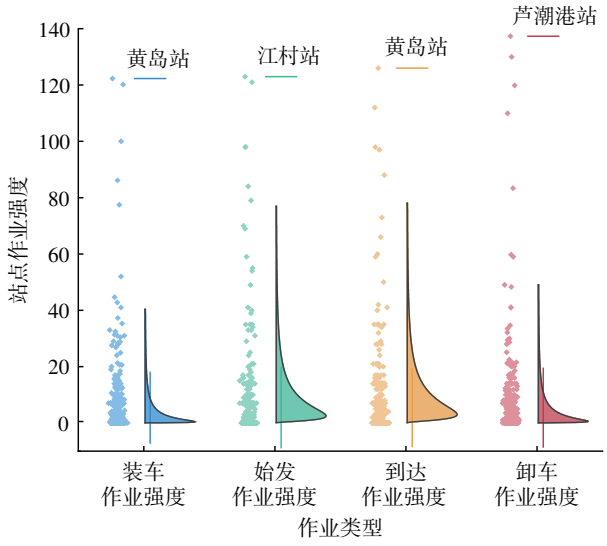


图5　运输组织网站点强度分布

Fig.5　Site strength distribution of transportation organization network

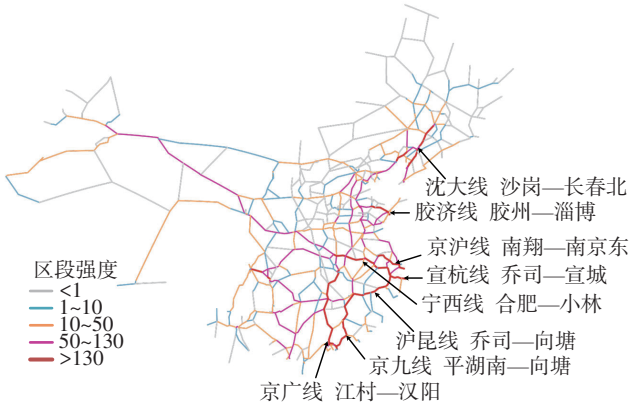


图6　区段强度空间分布

Fig.6　Spatial distribution of segment strength

3.3　网络社团特征分析

基于改进粒子群优化算法的社团划分方法，设置种群规模N=50，迭代次数U_{max}=100，惯性系数范围为[0.35，0.7]，c_1=1.5，c_2=2.0。使用编程软件求解，将铁路快捷货物运输组织网划分为7个社团，网络模块度为0.374，大于0.3[7]，说明铁路快捷货物运输组织网具有明显的社团结构，社团划分结果空间分布如图7所示，社团拓扑参数如表6所示。

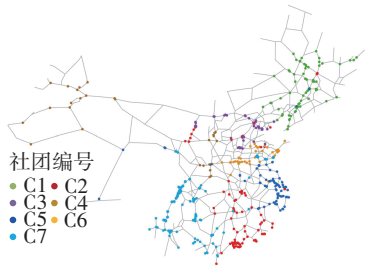


图7　社团划分结果空间分布

Fig.7　Spatial distribution of community division results

表6　社团拓扑参数

Tab.6　Community topology parameters

社团编号	站点数	组织弧数	网络密度	核心铁路局集团公司	附属站点
C1	80	96	0.030	哈尔滨、沈阳	—
C2	95	148	0.033	广州、南昌、武汉	黄村、石家庄西、闵行、蒲河等
C3	45	52	0.052	北京、太原、呼和浩特	—
C4	47	67	0.053	西安、乌鲁木齐	—
C5	80	176	0.055	上海	长春北、信阳、西宁、拉萨西等
C6	39	49	0.046	济南、郑州	—
C7	99	129	0.026	成都、昆明、南宁	湘潭、日照、兰州、临沂东等

由图7可知，从空间分布来看，铁路快捷货物运输网社团分布呈现明显的地理集群特征，以若干核心铁路局集团公司为中心，少数站点间交互关系突破地理限制，表现出远距离相互作用。其成因在于运输组织网反映站点间货流联系强度，地理位置邻近的站点因其快捷货物联系密切，更易集聚为同一

社团。例如，以中国铁路上海局集团有限公司(以下简称“上海局集团公司”)为核心的C5社团中，上海局集团公司管内铁路快捷货运列车运行线达96条，占总运行线条数的17.3%，主要服务于宁波港、芦潮港等港口的集疏运需求，反映港口后方运输需求是推动该社团地理集聚的重要成因。此外，少数站点因承担跨区域运输组织作业被纳入空间距离较远的社团，例如中国铁路北京局集团有限公司管内的黄村站，因每日承担“黄村—江村”特快货运列车的技术作业，被划分至以中国铁路广州局集团有限公司(以下简称“广州局集团公司”)为核心的C2社团。

结合表6结果，7个社团网络密度均大于全局网络，表明各社团内部站点之间连接更为紧密，验证了社团划分的有效性。从站点规模和网络密度上看，不同社团存在明显差异。例如，C5社团站点数量居中但网络密度最高，反映其内部快捷货物联系强度最大；相比之下，C7社团规模最大而网络密度最低，表明其空间覆盖广泛，但内部连接相对稀疏。C7社团以中国铁路成都局集团有限公司(以下简称“成都局集团公司”)、中国铁路昆明局集团有限公司、中国铁路南宁局集团有限公司(以下简称“南宁局集团公司”)为核心，主要开行陆海新通道班列，但由于西部地区经济总量较小、产业集中度较低等问题，目前陆海新通道班列运行线条数仅为22条。未来可进一步统筹安排陆海新通道班列方案，培育物流市场需求，以提高班列开行规模和网络密度。为进一步分析社团间货物交互关系，社团之间交互弦图如图8所示。

由图8可知，铁路快捷货物交互主要以社团内部为主。其中，C5社团内部交互关系最强，C4社团内部交互关系最弱，表明长三角区域快捷货物交互强度远高于西北地区，反映区域经济发展水平对快捷货物运输需求的直接驱动作用。从社团间交互关系来看，社团C2，C5，C7之间存在较强联系，表明上海局集团公司、广州局集团公司、成都局集团公司之间快捷货物运输联系紧密，构成了跨区域快捷货物运输的骨干通道。未来可进一步强化基础设施互联互通，提升跨局班列运输组织能力，以拓展跨区域快捷货物运输服务范围。

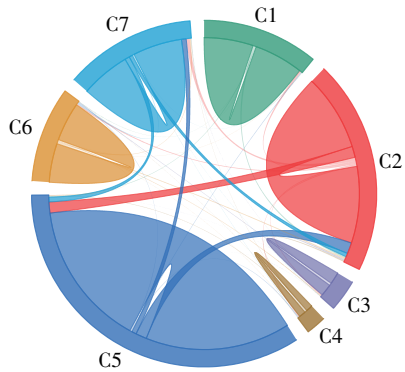


图8　社团之间交互弦图

Fig.8　Interactive string diagram between communities

3.4　网络脆弱性评估

从单一失效、连续失效2个场景量化评估网络脆弱性。公路运输平均速度取90km/h，单位周转量运输成本p_g取1.08元/(t·km)，货物价值特性参数取值[17]如表7所示。

表7　货物价值特性参数

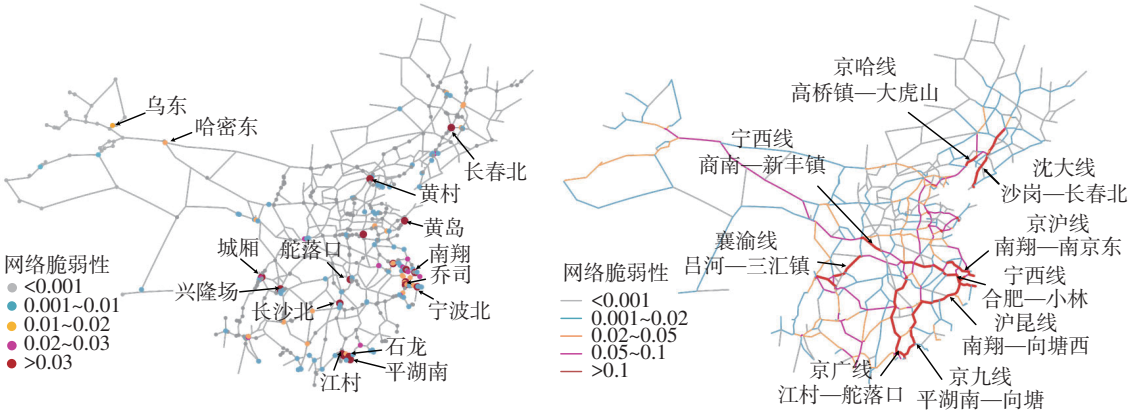
Tab.7　Value characteristic parameters of freight

列车类型	速度v^t/(km/h)	日均贬值率w^t	货物初始价值q^t/(元/t)	单位周转量运输成本p^t/(元/(t·km))
特快货物列车	160	0.001 001	90 900	0.7
快速货物列车	120	0.000 433	57 300	0.5
普快货物列车	80	0.000 012	36 300	0.4

3.4.1　单一失效场景

单一失效场景模拟单一站点或区段中断运行，通过二分数组B^b、B^c获取站点或区段失效后受影响列车，利用式(17)—(20)计算网络脆弱性，利用Arcgis pro可视化单一失效场景下网络脆弱性分布如图9所示。

由图9可知，我国铁路快捷货物运输网络脆弱性具有明显的空间差异，网络中高脆弱性站点和区段呈现出“东—中—西”梯度递减特征，其中东部沿海地区最为密集，中部地区次之，西部地区相对较少。图9a中，乔司站、南翔站、江村站等东部沿海地区枢纽站失效后网络脆弱性最高。这些站点承担大量快捷货运列车到达、发送作业，一旦丧失货运作业能力，将会对网络的服务能力造成较大影响。图9b中，高脆弱性区段主要位于连接东部沿海与内陆地区的主要铁路干线，如京广线江村—舵落口段、宁西线合肥—小林段。这些区段为铁路快捷货物关键运输通道，一旦因自然灾害或运营故障封锁，将严重影响东西方向货物运输，引发大规模网络中断。因此，在铁路日常运维中需重点关注对



a　单一站点失效场景　　b　单一区段失效场景

a　Single site failure scenario　　b　Single section failure scenario

图9　单一失效场景下网络脆弱性分布

Fig.9　Distribution of network vulnerability under a single failure scenario

铁路快捷货物运输网络服务水平影响最大的关键站点和区段。网络脆弱性排名前10的关键站点及区段如表8所示。

由表8可知，相比于站点失效，区段失效对网络脆弱性影响更大。原因在于通道设施网聚集系数较低，列车运行路径有限，一旦某一区段发生中断，易引发大面积列车运行中断。此外，关键站点及区段的强度值普遍较高，但其对网络脆弱性的影响程度与强度值并非完全正相关。以黄村站为例，其强度排名第47位，但对网络脆弱性影响排名前5。原因在于黄村站每日开行2列特快列车，所承担的列车作业等级较高，因此失效后对网络服务水平影响较大。因此，对于站点及区段重要性的分析，不能仅依据快捷货物作业量，还需综合考虑所处理货物的价值等级及其在网络中的功能属性。

3.4.2　连续失效场景

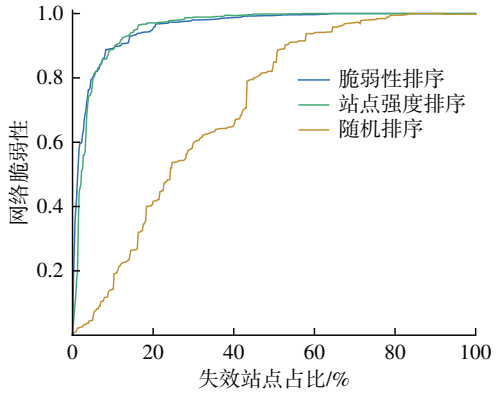
连续失效场景模拟由设备故障或恶意攻击等引发的站点或区段连续失效过程。针对失效顺序，设计随机失效和蓄意失效2种典型场景。其中，随机失效下顺序随机排列，蓄意失效下分别按照强度、对网络脆弱性影响降序排列。不同连续失效场景下网络脆弱性曲线如图10所示，不同连续失效场景下A_{S_r}取值如表9所示。

由图10可知，连续失效场景下，铁路快捷货物运输网络均表现出较高的脆弱性。例如，按强度排序失效场景下，当10%的站点、区段失效时，网络脆弱性分别达到0.892，0.902，表明网络已基本丧失服务能力。结合表9结果，在站点连续失效场景下，蓄意失效与随机失效场景下网络脆弱性差异显著；而区段连续失效场景下，蓄意失效与随机失效场景下网络脆弱性均在0.950左右。原因在于列

表8　网络脆弱性排名前10的关键站点及区段

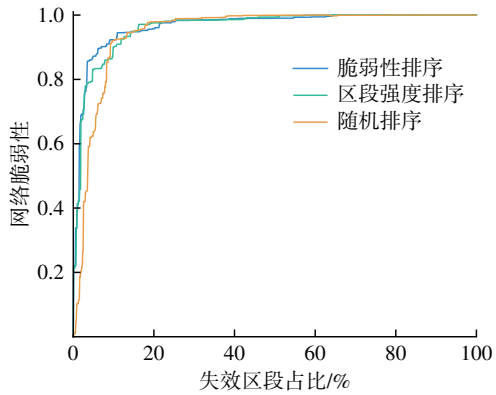
Tab.8　Network vulnerability under critical site and section failure scenarios

排名	失效站点(编号)	站点强度	网络脆弱性	排名	失效区段(编号)	区段强度	网络脆弱性
1	石龙(559)	175.71	0.174	1	北仑港—上虞(661)	453.96	0.322
2	江村(538)	211.00	0.168	2	上虞—萧山(659)	427.38	0.307
3	闵行(823)	98.61	0.150	3	南翔—新桥(646)	372.52	0.252
4	乔司(463)	114.00	0.142	4	乔司—萧山(656)	364.57	0.241
5	黄村(161)	59.00	0.125	5	萧山—义乌西(667)	336.65	0.226
6	南京东(438)	71.00	0.089	6	南翔—安亭(646)	326.27	0.223
7	大朗(540)	112.92	0.083	7	大朗—江村(765)	221.44	0.219
8	南翔(455)	135.00	0.064	8	石龙—东莞东(790)	249.65	0.201
9	兴隆场(656)	115.00	0.060	9	广州—天河东(782)	139.86	0.190
10	城厢(594)	125.04	0.057	10	长兴南—湖州西(636)	306.24	0.189



a　多站点连续失效

a　Continuous failure of multiple sites



b　多区段连续失效

b　Continuous failure of multiple segments

图10　连续失效场景下网络脆弱性曲线

Fig.10　Network vulnerability curves under continuous failure scenarios

表9　不同连续失效场景下A_{Sr}取值

Tab.9　A_{Sr} values under different continuous failure scenarios

多站点连续失效	曲线下面积A_{Sr}	多区段连续失效	曲线下面积A_{Sr}
站点强度排序	0.961	区段强度排序	0.962
脆弱性排序	0.958	脆弱性排序	0.966
随机排序	0.709	随机排序	0.947

车运行的连续性特征，运行径路中任意区段失效均导致列车运行中断。因此，在实际运营中需重视应急预案的完善，特别是突发事件下快捷货运列车运行径路迂回方案的制定，以保障网络的服务稳定性。

4　结论及建议

4.1　结论

本研究基于铁路快捷货物列车开行方案，融合Space L法与二分网络建模方法，构建通道设施–运输组织–运行径路3层网络模型。基于改进粒子群优化算法实现社团划分，结合快捷货物时效敏感性，从单一失效与连续失效2个场景评估网络脆弱性。主要结论如下。

（1）通道设施网聚类系数为0.010 3，表明物理基础设施连接稀疏，网络局部聚集效应较弱。运输组织网密度为0.004 6，反映站点间快捷货物交互强度较低，且各站点作业强度差异较大，最大站点为黄岛站。运行径路网区段强度基尼系数达0.605，表征货流在通道设施网上的高度集中性，繁忙区段集中于长三角、珠三角核心走廊，如京广线江村—汉阳、沪昆线乔司—向塘。

（2）基于运输组织网中货源地、集散枢纽与消费地之间的关联强度，网络可划分为7个社团，社团分布呈现以区域集聚为主导、跨区域衔接为补充的空间特征。从社团间交互关系来看，社团C2，C5，C7之间存在较强联系，反映上海局集团公司、广州局集团公司、成都局集团公司之间快捷货物运输联系紧密，构成跨区域快捷货物运输的骨干通道。

（3）铁路快捷货物运输网络脆弱性具有明显的空间分布差异性，高脆弱性站点和区段呈现“东—中—西”梯度递减的分布格局，且相比于站点失效，区段失效场景下网络脆弱性更高。当10%的站点或区段连续失效后，网络脆弱性分别达到0.892，0.902，表明铁路快捷货物运输网络在连续扰动下整体表现出很高的脆弱性。

4.2　建议

（1）推进路网结构优化与关键通道扩容。合理推进支线铁路建设，优化干线与支线衔接效率，促进重点区域连通；重点提升长三角、珠三角等货流密集区域线路质量与通道能力，以缓解铁路快捷货物运输主要通道的运输压力。

（2）强化区域协同与班列组织，拓展班列服务范围。当前，各站点间快捷货物交互强度较弱，尤其是以成都局集团公司、南宁局集团公司为核心的C7社团，空间覆盖广但内部连接稀疏。建议进一步强化陆海新通道、多联快车等班列运输组织过程管理，扩大班列运输快捷货物品类，以拓展铁路快捷货运的服务范围与运营规模。

（3）加强关键站点与区段监测防护，制定应急调度预案。加强对乔司站、江村站、黄村站等关键节点，以及京广线江村—舵落口段、宁西线合肥—

小林段等重要区段的实时状态监测与风险预警；系统制定突发事件下的列车迂回预案，建立健全快速响应与运行调整机制，保障网络的服务稳定性。

参考文献：

[1] 陈　诚，洪宇鹏，叶　飞，等. 铁路货物班列产品谱系设计[J]. 铁道货运，2020，38(12)：26-31，43.
CHEN Cheng，HONG Yupeng，YE Fei，et al. Design of Product Portfolio of Railway Freight Block Train[J]. Railway Freight Transport，2020，38(12)：26-31，43.

[2] 中国政府网. 全国铁路实行新的货物列车运行图[EB/OL]. (2025-04-09) [2025-06-27]. https：//www. gov. cn/yaowen/liebiao/202504/content_7017793. htm.

[3] GU Y，FU X，LIU Z Y，et al. Performance of Transportation Network under Perturbations：Reliability，Vulnerability，and Resilience[J]. Transportation Research Part E：Logistics and Transportation Review，2020，133：101809.

[4] 李杲岭，韩明琪，狄　帅. 河南省铁路-航道货运多层复合网络鲁棒性研究[J]. 铁道运输与经济，2024，46(2)：205-214.
LI Gaoling，HAN Mingqi，DI Shuai. Research on Robustness of Rail-Water Freight Transport Multi-Layer Composite Network in Henan Province[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(2)：205-214.

[5] ILALOKHOIN O，PANT R，HALL J W. A Model and Methodology for Resilience Assessment of Interdependent Rail Networks：Case Study of Great Britain's Rail Network[J]. Reliability Engineering & System Safety，2023，229：108895.

[6] CAO W W，FENG X N，ZHANG H. The Structural and Spatial Properties of the High Speed Railway Network in China：A Complex Network Perspective[J]. Journal of Rail Transport Planning & Management，2019，9：46-56.

[7] 薛　锋，王朝阳，曾　与. 成渝城市群铁路客运网特性研究[J]. 北京交通大学学报，2025，49(1)：17-27.
XUE Feng，WANG Zhaoyang，ZENG Yu. Research on Characteristics of the Railway Passenger Transport Network in Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration[J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2025，49(1)：17-27.

[8] ZHANG Y F，NG S T. Unveiling the Rich-Club Phenomenon in Urban Mobility Networks through the Spatiotemporal Characteristics of Passenger Flow[J]. Physica A：Statistical Mechanics and Its Applications，2021，584：126377.

[9] LI W Y，YOU Z J，CAI Z Z，et al. Club Convergence and Allometry in Chinese Mainland Coastal Container Ports[J]. Ocean & Coastal Management，2022，230：106376.

[10] 李　涛. 多层次视角下高铁网络脆弱性评估方法研究[D]. 大连：大连理工大学，2022.

[11] 吴　鹏，李得伟. 高速铁路新线开通对城市群铁路客运交通网络时空可达性的影响[J]. 铁道运输与经济，2025，47(6)：119-127.
WU Peng，LI Dewei. Impact of Opening of New High Speed Railway Line on Spatiotemporal Accessibility of Railway Passenger Transport Networks for Urban Agglomerations[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(6)：119-127.

[12] WANDELT S，SHI X，SUN X Q. Estimation and Improvement of Transportation Network Robustness by Exploiting Communities[J]. Reliability Engineering & System Safety，2021，206：107307.

[13] LI T，RONG L L. A Comprehensive Method for the Robustness Assessment of High Speed Rail Network with Operation Data：A Case in China[J]. Transportation Research Part A：Policy and Practice，2020，132：666-681.

[14] YILDIRIMOGLU M，KIM J. Identification of Communities in Urban Mobility Networks Using Multi-Layer Graphs of Network Traffic[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2018，89：254-267.

[15] 林鹏飞，翁剑成，付　宇，等. 基于刷卡数据的轨道交通加权网络结构特征[J]. 吉林大学学报(工学版)，2020，50(3)：956-962.
LIN Pengfei，WENG Jiancheng，FU Yu，et al. Structure Characteristics of Rail Transit Weighted Network Based on Smart Card Data[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)，2020，50(3)：956-962.

[16] 于　琳，孙　莹，徐　然，等. 改进粒子群优化算法及其在电网无功分区中的应用[J]. 电力系统自动化，2017，41(3)：89-95，128.
YU Lin，SUN Ying，XU Ran，et al. Improved Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Application in Reactive Power Partitioning of Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems，2017，41(3)：89-95，128.

[17] 唐　力，周凌云，赵明佶，等. 基于货物价值特性的集装箱公铁联运竞争力分析[J]. 铁道运输与经济，2021，43(10)：75-81.
TANG Li，ZHOU Lingyun，ZHAO Mingji，et al. Competitiveness Analysis of Road-Rail Intermodal Container Transport Based on Value Characteristics of Goods[J]. Railway Transport and Economy，2021，43(10)：75-81.

(责任编辑　汪沁萱)