文章编号：1003-1421(2026)03-0141-11
引用格式：王丹，靳雯静，庄雨樵，等.考虑节点失效的港口集疏运网络成本-韧性协同优化[J].铁道运输与经济，2026，48(3)：141-151，203.
WANG Dan，JIN Wenjing，ZHUANG Yuqiao，et al. Cost-Resilience Co-Optimization of Port Collection and Distribution Networks Considering Node Failures[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(3)：141-151，203.

考虑节点失效的港口集疏运网络成本-韧性协同优化

王　丹，靳雯静，庄雨樵，赵　媛

(大连海事大学 交通运输工程学院，辽宁 大连　116026)

摘　要：为确保港口集疏运网络在节点失效情境下依然具备高效运行的能力，构建了考虑节点失效的港口集疏运网络成本-韧性双目标优化模型，设计了双层遗传算法进行求解，并采用长三角港口群的数据进行了实证分析，结果表明：①与不考虑节点失效和不考虑韧性的模型相比，本模型的港口集疏运网络总成本仅增加了2%~5%，网络韧性却提高了77%~162%，且展现出更优的区域均衡性与风险缓冲能力；②港口集疏运网络韧性提升存在边际效益递减现象，决策者应追求投入产出比最优的稳健网络建设方案；③与不考虑节点失效和不考虑韧性的模型相比，本模型求得的港口集疏运结构具有多种运输方式均衡发展的特点，在面对不确定环境时更具稳健性与灵活性。

关键词：港口集疏运网络；节点失效；网络韧性；协同优化；双层遗传算法
中图分类号：U291　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250825001

Cost-Resilience Co-Optimization of Port Collection and Distribution Networks Considering Node Failures

WANG Dan，JIN Wenjing，ZHUANG Yuqiao，ZHAO Yuan

(College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China)

Abstract: To ensure the efficient operational capability of the port collection and distribution network under node failure scenarios, a cost-resilience dual-objective optimization model considering node failures was constructed. A bi-level genetic algorithm was designed to solve the model. An empirical analysis was conducted using data from the Yangtze River Delta port cluster. The results are as follows. ① Compared with models without considering node failures and resilience, this model has seen an increase by only 2%~5% in the total cost, while a rise by 77%~162% in the network resilience. Additionally, the model demonstrates a superior regional balance and risk-buffering capacity. ② A diminishing marginal return exists in the enhancement of resilience in the port collection and distribution network. Decision-makers should pursue robust network construction solutions with optimal cost-effectiveness. ③ Compared with models without considering node failures and resilience, the port collection and distribution structure derived from this model features a balanced development across multiple transportation modes, demonstrating greater robustness and flexibility in uncertain environments.

Keywords: Port Collection and Distribution Network; Node Failure; Network Resilience; Co-Optimization; Bi-Level Genetic Algorithm

收稿日期：2025-08-25
通信作者：赵媛(1981—)，女，辽宁铁岭人，大连海事大学交通运输工程学院讲师。
基金项目：辽宁省社会科学规划基金项目(L25BGL006)

0　引言

集疏运网络作为连接腹地城市、海港与内陆港的重要物流系统，已经成为保障国际物流的重要基础。然而当前自然灾害、公共卫生事件、地缘冲突等不确定性事件频发，使得关键节点的失效风险显著增加，如何在复杂环境下优化网络韧性，提升其抵御风险的能力已成为提高港口集疏运物流效率的关键。

传统的港口集疏运网络优化主要聚焦于内陆港选址与货流分配问题。内陆港选址布局的研究逐渐从基于最短距离或最小运输成本的P-中心和P-中值模型发展为多目标优化，涵盖物流成本、服务水平、运输效率、环境因素等多个维度。Yin等[1]基于“双碳”目标对海港和内陆港的多式联运网络进行优化；李安林等[2]建立了以物流成本最小化为目标的整数规划模型对长江流域的港口集疏运网络进行了优化；Kurtuluş[3]提出了一个优化总运输成本和总碳排放的多目标混合整数规划模型以优化内陆港选址；王蕊等[4]在测算内陆港建设期及运营期经济效益的基础上分析了深圳港内陆港体系的优化问题。

货流分配是港口集疏运网络优化的另外一个关键问题，旨在确定最佳的运输路径和方式，实现物流成本、时间和资源等方面的优化。研究中多采用综合考虑均衡分配状态、货流可拆分、运输成本、碳排放和时效性成本以及运输方式的混合整数规划模型，对港口多式联运网络进行优化，以得到最优的货流分配方案；石学刚等[5]根据旅客出行意愿确定不同运输距离的客运分担率并构建综合考虑运输成本和环境成本的空铁货流分配模型；刘乐星等[6]构建考虑拥堵与环境成本的疏运网络货流分配模型。

由于内陆港选址和货流分配问题相互关联，选址决策影响货流分配，货流的分配结果可能影响内陆港的运营效率，为了实现系统的整体优化，已有研究提出了选址-分配联合优化模型，这些模型通常采用多目标优化、混合整数规划等方法。Alexander等[7]建立多式联运网络中内陆港选址和货流分配的非线性优化模型；赵旭等[8]和Ma等[9]提出基于双层规划的内陆港选址与货流分配模型；李兆进等[10]和Irawan等[11]提出基于内陆港辐射网络的多式联运路径优化与配流模型。

随着港口物流涉及的环节和节点数量的增加，其相互依赖性也越来越强，关键节点失效对网络的冲击也越来越大。如新冠疫情期间的港口封闭、极端气象灾害导致的交通枢纽中断、地缘冲突引起的航道阻塞等给全球物流供应链造成了严重干扰。在这种背景下，如何降低节点失效所带来的物流中断风险已成为重要的研究课题，王清斌等[12]提出改进区间规划方法，对存在不确定需求的内陆集疏运网络进行优化；赵旭等[13]在选址决策中纳入失效惩罚成本，通过冗余节点布局提高网络容错能力；Azizi等[14]在枢纽辐射网络优化模型中引入枢纽失效概率和备用枢纽分配机制，确保主要枢纽发生中断时货流仍能有效重分配；Huang等[15]提出考虑港口中断和拥堵的轴幅网络优化模型。

综上所述，传统的集疏运网络优化侧重于提升物流成本与效率，已有研究开始考虑节点失效风险，但仍是基于成本的单目标优化，未能将“韧性”作为一个独立的目标进行系统提升。为保证在外部冲击下网络能尽快地恢复基本功能和稳定性，应同时考虑成本与韧性的最优。基于此，在引入港口集疏运网络韧性度量方法的基础上提出一种考虑节点失效的网络成本-韧性协同优化模型，并设计能处理内外层耦合关系的双层遗传算法。研究能为政府部门进行港口集疏运网络规划提供决策支持，也可为物流企业在不确定环境下的运输组织与风险管理提供参考。

1　问题描述与模型建立

1.1　问题描述

在各种不确定性事件的扰动下，港口集疏运网络中的关键节点(如内陆港)面临失效风险，此类节点失效会破坏网络连通性，导致供应链中断，引发巨大的经济损失。因此，如何在网络规划阶段优化其设计，使其在节点失效情境下仍能保持高效运行与快速恢复的能力，即提升网络的“韧性”，已成为一个亟待解决的关键问题。

韧性是指系统在遭受冲击后维持核心功能并能

快速恢复到理想状态的能力。对于港口集疏运网络而言，韧性体现为在节点失效后，网络保障货物继续有效流通的程度与稳定性，也就是说，网络韧性的物理含义指的是其在最坏节点失效场景下的功能留存率。基于此，借鉴 Cozzens 等[16]提出的方法对网络韧性进行测度。将港口集疏运网络抽象为图 $G=(V, E)$，其中顶点集 V 由所有腹地城市、内陆港候选点和海港共同构成，边集 E 由连接这些顶点的运输路径构成，代表了公路、铁路、水路等可行的运输线路。在此网络拓扑图 G 的基础上，将港口集疏运网络的韧性定义为公式(1)。

$$T(G)=\min\left\{\frac{|S|+\tau(G-S)}{\omega(G-S)}\middle|\omega(G-S)>1\right\} \tag{1}$$

式中：$\omega(G)$ 为网络最大连通分支数，表示在一个网络(图)中，所有节点之间通过路径互相连通的独立子图的数量；$\tau(G)$ 为最大连通分支阶数，表示在一个网络(图)中，最大连通分支(即最大子图)内包含的节点数；S 为点割集或边割集，若 S 为点割集，则 $S\in V(G)$，若 S 为边割集，则 $S\in E(G)$；$|S|$ 为割集中点或者边的数量，表示割集对网络的破坏能力；$\omega(G-S)$ 为剩余网络连通分支数，表示网络在节点失效后被切割成多少个独立子网络，值越大，说明网络的分割程度越严重，恢复到原有连通状态的难度也越大；$\tau(G-S)$ 为剩余网络最大连通分支阶数，反映网络剩余连通能力，值越大则说明网络的抗破坏能力越强，失效后的连通性保持得越好。

一个高韧性的网络，即使在面临最具破坏性的攻击(即被移除最关键的割集 S)时，也能保持较小的连通分支数 $\omega(G-S)$ 和较大的最大连通分支阶数 $\tau(G-S)$。因此，可以用“最坏情况下”(对网络破坏程度最大时)的 $\frac{|S|+\tau(G-S)}{\omega(G-S)}$ 值来表征网络韧性。

通常，集疏运网络若具备较高韧性，其节点连通性更强，抗毁性能更优，但网络韧性提升往往伴随建设成本增加。因此，研究旨在解决以下关键问题：在给定腹地城市及其货运需求、备选内陆港及其建设成本与失效概率、沿海港口及其吞吐能力、各运输方式单位成本的前提下，研究确定内陆港的选址与规模等级，以及多式联运货流分配方案，使得在满足节点能力约束、运力约束、货流平衡约束及系统可靠性要求的条件下，实现港口集疏运网络总成本最小与综合韧性最大的双目标优化。

1.2　模型建立

1.2.1　模型假设

（1）同一时刻最多一个内陆港失效(因为单个内陆港失效的发生概率远高于多个节点同时失效，而且此假设能有效控制失效场景的数量，以确保模型的可求解性)，且该内陆港为完全失效状态，不能继续提供服务。

（2）当内陆港失效时，对货流进行重新分配，且保持通过其他中转站的货流路径不变。

（3）失效概率是先验的，与规模无关。

（4）各港口之间不存在货流。

（5）等级越高的内陆港的总建设成本越高(等级指的是规模等级，等级越高的内陆港建设规模越大、处理能力越强、相应的建设成本也越高)。

1.2.2　符号说明

模型集合说明如表 1 所示，模型参数如表 2 所示，模型决策变量如表 3 所示。

表 1　模型集合说明

Tab.1　Model collection description

集合	定义
I	腹地城市集合
J	所有内陆港集合
J'	没有失效的内陆港集合；$J'\subseteq J$
K	港口集合
Z	运输方式集合；$Z=\{$公路；铁路；水运$\}$
B	内陆港等级集合
V	集疏运网络图顶点集合
E	集疏运网络图边集合
S_j^1	内陆港 j 失效情境下，网络图中的点割集；$j\in J$
S_j^2	内陆港 j 失效情境下，网络图中的边割集；$j\in J$
S^1	未失效情景下，网络图中的点割集；$S^1\subseteq V$
S^2	未失效情景下，网络图中的边割集；$S^2\subseteq E$

1.2.3　目标函数与约束

（1）内陆港的建设成本。如式(2)所示。

$$C_1=\sum_{j\in J}\sum_{b\in B}C_j^b y_j^b \tag{2}$$

（2）内陆港节点未失效情况下的运输以及中转成本。该项成本包括腹地城市与内陆港、内陆港与海港以及腹地城市与海港之间的双向运输成本和内陆港的中转成本，如式(3)所示。

表2　模型参数

Tab.2　Model parameters

参数	定义
M	一个足够大的正数
G	集疏运网络图
α	规模经济因子
h	内陆港建设数目
d_{ij}^{z}	使用z运输方式从i到j的运输距离，km；$i \in I$；$j \in J$；$z \in Z$
C^{z}	使用z运输方式的单位运输成本，元；$z \in Z$
C_{j}^{b}	在j点建立b级内陆港的建设成本，元；$j \in J$；$b \in B$
C_{j}^{z}	使用z运输方式在j内陆港的中转成本，元；$j \in J$；$z \in Z$
λ_{j}	内陆港j失效的概率；$j \in J$
φ	集疏运网络要求达到的可靠性
Q_{i}	腹地i的货运需求量，TEU；$i \in I$
R_{j}^{b}	在j点建立b级内陆港的中转能力，TEU；$j \in J$；$b \in B$
L_{k}	港口k的吞吐能力，TEU；$k \in K$
F^{z}	使用z运输方式的单位运载工具可装载的集装箱数量，TEU；$z \in Z$
N_{ij}^{z}	从i到j使用z运输方式的可用的运载工具数量，辆/艘；$i \in I$；$j \in J$；$z \in Z$

$$C_{2}=\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{z\in Z}\left(1-\lambda_{j}\right)C^{z}d_{ij}^{z}\left(q_{ij}^{z}+q_{ji}^{z}\right)+\sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{z\in Z}\alpha\left(1-\lambda_{j}\right)C^{z}d_{jk}^{z}\left(q_{jk}^{z}+q_{kj}^{z}\right)+\sum_{i\in I}\sum_{k\in K}\sum_{z\in Z}C^{z}d_{ik}^{z}\left(q_{ik}^{z}+q_{ki}^{z}\right)+\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{z\in Z}C_{j}^{z}\left(1-\lambda_{j}\right)\left(q_{ij}^{z}+q_{kj}^{z}\right)\tag{3}$$

（3）内陆港节点失效情况下的运输以及中转成本。该项成本为内陆港失效情况下的货流重分配成本，包括腹地到替代内陆港的运输成本、替代内陆港到海港的运输成本、在替代内陆港的中转成本，以及海港到腹地的运输成本、海港到替代内陆港的运输成本、替代内陆港到腹地的运输成本。如式(4)所示。

$$C_{3}=\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{p\in J'}\sum_{z\in Z}\lambda_{j}C^{z}d_{ip}^{z}\left(x_{ijp}^{z}+x_{pji}^{z}\right)+\sum_{j\in J}\sum_{p\in J'}\sum_{k\in K}\sum_{z\in Z}\alpha\lambda_{j}C^{z}d_{pk}^{z}\left(x_{kjp}^{z}+x_{pjk}^{z}\right)+\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{z\in Z}\lambda_{j}C^{z}d_{ik}^{z}\left(x_{ijk}^{z}+x_{kji}^{z}\right)+\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{p\in J'}\sum_{k\in K}\sum_{z\in Z}\lambda_{j}C_{p}^{z}\left(x_{ijp}^{z}+x_{kjp}^{z}\right)\tag{4}$$

（4）综合韧性度。设$E(G)$为所构建港口集疏运网络图G的综合韧性度，基于各种可能场景(即不同节点失效与未失效情况)下的网络韧性度计算得到。具体而言，首先计算每个场景(即单个节点失效时)下的网络韧性度(由式(1)求得)，并结合该场景的发生概率，最终求得整个网络的综合韧性度。综合韧性度反映了港口集疏运网络在不同失效情境下的总体抗风险能力，能帮助决策者评估不同节点失效对整个系统的影响。在所有场景下，网络韧性度仅考虑内陆港节点失效对网络的影响，即点割集仅包含内陆港节点。综合韧性度的计算如式(5)所示。该指标的核心目的是为了比较不同选址方案的优劣，一个方案的综合韧性越高，意味着在各种潜在的单一节点失效场景下，其总体韧性(以概率加权的)水平越高。概率在这里的主要作用是区分不同

表3　模型决策变量

Tab.3　Model decision variables

变量	定义
q_{ij}^{z}	使用z运输方式从i到j的集装箱运量，TEU；$i \in I$；$j \in J$；$z \in Z$
q_{ji}^{z}	使用z运输方式从j到i的集装箱运量，TEU；$i \in I$；$j \in J$；$z \in Z$
q_{ik}^{z}	使用z运输方式从i到k的集装箱运量，TEU；$i \in I$；$k \in K$；$z \in Z$
q_{ki}^{z}	使用z运输方式从k到i的集装箱运量，TEU；$i \in I$；$k \in K$；$z \in Z$
q_{jk}^{z}	使用z运输方式从j到k的集装箱运量，TEU；$j \in J$；$k \in K$；$z \in Z$
q_{kj}^{z}	使用z运输方式从k到j的集装箱运量，TEU；$j \in J$；$k \in K$；$z \in Z$
x_{ijp}^{z}	在j失效后，原本从i到j选择从i到p使用z运输方式的集装箱运量，TEU；$i \in I$；$j \in J$；$p \in J'$；$z \in Z$
x_{pji}^{z}	在j失效后，原本从j到i选择从p到i使用z运输方式的集装箱运量，TEU；$i \in I$；$j \in J$；$p \in J'$；$z \in Z$
x_{ijk}^{z}	在j失效后，原本从i到j选择从i直接到k使用z运输方式的集装箱运量，TEU；$i \in I$；$j \in J$；$k \in K$；$z \in Z$
x_{kji}^{z}	在j失效后，原本从j到i选择从k到i使用z运输方式的集装箱运量，TEU；$i \in I$；$j \in J$；$k \in K$；$z \in Z$
x_{kjp}^{z}	在j失效后，原本从k到j选择到p使用z运输方式的集装箱运量，TEU；$i \in I$；$j \in J$；$k \in K$；$p \in J'$；$z \in Z$
x_{pjk}^{z}	在j失效后，原本从j选择从p直接到k使用z运输方式的集装箱运量，TEU；$j \in J$；$p \in J'$；$k \in K$
y_{j}^{b}	0-1变量，当在j点建立b级内陆港时为1；否则为0。$j \in J$；$b \in B$

节点失效的重要性。一个高失效概率的节点，其韧性表现在总体评分中占有更大的权重，这将引导优化模型优先保障高风险节点的替代路径。

$$E(G)=\sum_{j\in J}\frac{\lambda_j}{2}\left\{\min\left[\frac{\left|S_j^1\right|+\tau\left(G-S_j^1\right)}{W\left(G-S_j^1\right)}\right]+\min\left[\frac{\left|S_j^2\right|+\tau\left(G-S_j^2\right)}{W\left(G-S_j^2\right)}\right]\right\}+\frac{\sum(1-\lambda_j)}{2}\left\{\min\left[\frac{\left|S^1\right|+\tau\left(G-S^1\right)}{W\left(G-S^1\right)}\right]+\min\left[\frac{\left|S^2\right|+\tau\left(G-S^2\right)}{W\left(G-S^2\right)}\right]\right\} \tag{5}$$

基于上述设定，考虑内陆港失效的港口集疏运网络成本–韧性协同优化模型为

$$\min C=C_1+C_2+C_3 \tag{6}$$

$$\max E(G) \tag{7}$$

$$G=(V,\ E) \tag{8}$$

$$V=I\cup J\cup K\qquad \forall j\in\left\{j\middle|y_j^b=1\right\} \tag{9}$$

$$E=\left\{(i,\ j)\cup(j,\ k)\cup(i,\ k)\cup(k,\ j)\cup(j,\ i)\cup(k,\ i)\right\}\qquad \forall j\in\left\{j\middle|y_j^b=1\right\} \tag{10}$$

$$\sum_{b\in B}y_j^b\leqslant 1\qquad \forall j\in J \tag{11}$$

$$\sum_{j\in J}\sum_{b\in B}y_j^b=h \tag{12}$$

$$\sum_{i\in I}\sum_{z\in Z}q_{ij}^z+\sum_{k\in K}\sum_{z\in Z}q_{kj}^z\leqslant\sum_{b\in B}R_j^by_j^b\qquad \forall j\in J \tag{13}$$

$$\sum_{i\in I}\sum_{z\in Z}q_{ij}^z+\sum_{i\in I}\sum_{z\in Z}x_{ijp}^z+\sum_{k\in K}\sum_{z\in Z}q_{kj}^z+\sum_{k\in K}\sum_{z\in Z}x_{kjp}^z\leqslant\sum_{b\in B}R_j^by_j^b\qquad \forall j\in J,\ p\in J' \tag{14}$$

$$\sum_{j\in J}\sum_{z\in Z}q_{ij}^z+\sum_{k\in K}\sum_{z\in Z}q_{ik}^z\geqslant Q_i\qquad \forall i\in I \tag{15}$$

$$\sum_{p\in J'}\sum_{z\in Z}q_{ip}^z+\sum_{k\in K}\sum_{z\in Z}q_{ik}^z+\sum_{p\in J'}\sum_{z\in Z}x_{ijp}^z+\sum_{k\in K}\sum_{z\in Z}x_{ijk}^z\geqslant Q_i\qquad \forall i\in I,\ p\in J' \tag{16}$$

$$\sum_{j\in J}\sum_{z\in Z}q_{ji}^z+\sum_{k\in K}\sum_{z\in Z}q_{ki}^z\geqslant D_i\qquad \forall i\in I \tag{17}$$

$$\sum_{p\in J'}\sum_{z\in Z}q_{pi}^z+\sum_{k\in K}\sum_{z\in Z}q_{ki}^z+\sum_{p\in J'}\sum_{z\in Z}x_{pji}^z+\sum_{k\in K}\sum_{z\in Z}x_{kji}^z\geqslant D_i\qquad \forall i\in I,\ p\in J' \tag{18}$$

$$\sum_{i\in I}\sum_{z\in Z}q_{ij}^z=\sum_{i\in I}\sum_{p\in J'}\sum_{z\in Z}x_{ijp}^z+\sum_{i\in I}\sum_{k\in K}\sum_{z\in Z}x_{ijk}^z\qquad \forall j\in J \tag{19}$$

$$\sum_{k\in K}\sum_{z\in Z}q_{kj}^z=\sum_{p\in J'}\sum_{k\in K}\sum_{z\in Z}x_{kjp}^z+\sum_{i\in I}\sum_{k\in K}\sum_{z\in Z}x_{kji}^z\qquad \forall j\in J \tag{20}$$

$$q_{ij}^z\leqslant\sum_{b\in B}y_j^bM\qquad \forall i\in I,\ j\in J,\ z\in Z \tag{21}$$

$$q_{ji}^z\leqslant\sum_{b\in B}y_j^bM\qquad \forall i\in I,\ j\in J,\ z\in Z \tag{22}$$

$$q_{kj}^z\leqslant\sum_{b\in B}y_j^bM\qquad \forall k\in K,\ j\in J,\ z\in Z \tag{23}$$

$$q_{jk}^z\leqslant\sum_{b\in B}y_j^bM\qquad \forall j\in J,\ k\in K,\ z\in Z \tag{24}$$

$$x_{ijp}^z\leqslant\sum_{b\in B}y_p^bM\qquad \forall i\in I,\ j\in J,\ p\in J',\ z\in Z \tag{25}$$

$$x_{pji}^z\leqslant\sum_{b\in B}y_p^bM\qquad \forall i\in I,\ j\in J,\ p\in J',\ z\in Z \tag{26}$$

$$x_{pjk}^z\leqslant\sum_{b\in B}y_p^bM\qquad \forall k\in K,\ j\in J,\ p\in J',\ z\in Z \tag{27}$$

$$x_{kjp}^z\leqslant\sum_{b\in B}y_p^bM\qquad \forall k\in K,\ j\in J,\ p\in J',\ z\in Z \tag{28}$$

$$\varphi\leqslant\prod_{j\in J}(1-\lambda_j) \tag{29}$$

$$\sum_{j\in J}\sum_{z\in Z}\left(q_{jk}^z+q_{kj}^z\right)+\sum_{i\in I}\sum_{z\in Z}\left(q_{ik}^z+q_{ki}^z\right)\leqslant L_k\qquad \forall k\in K \tag{30}$$

$$\sum_{p\in J'}\sum_{z\in Z}\left(q_{pk}^z+q_{kp}^z\right)+\sum_{i\in I}\sum_{z\in Z}\left(q_{ik}^z+q_{ki}^z\right)+\sum_{p\in J'}\sum_{z\in Z}\left(x_{pjk}^z+x_{kjp}^z\right)+\sum_{i\in I}\sum_{z\in Z}\left(x_{ijk}^z+x_{kji}^z\right)\leqslant L_k\qquad \forall k\in K,\ j\in J \tag{31}$$

$$q_{ij}^z+q_{ji}^z\leqslant F^zN_{ij}^z\qquad \forall i\in I,\ j\in J,\ z\in Z \tag{32}$$

$$q_{jk}^z+q_{kj}^z\leqslant F^zN_{jk}^z\qquad \forall j\in J,\ k\in K,\ z\in Z \tag{33}$$

$$q_{ik}^z+q_{ki}^z\leqslant F^zN_{ik}^z\qquad \forall i\in I,\ k\in K,\ z\in Z \tag{34}$$

$$q_{ip}^z+q_{pi}^z+x_{ijp}^z+x_{pji}^z\leqslant F^zN_{ij}^z\qquad \forall i\in I,\ j\in J,\ z\in Z,\ p\in J' \tag{35}$$

$$q_{pk}^z+q_{kp}^z+x_{pjk}^z+x_{kjp}^z\leqslant F^zN_{jk}^z\qquad \forall j\in J,\ k\in K,\ z\in Z,\ p\in J' \tag{36}$$

$$q_{ik}^z+q_{ki}^z+x_{ijk}^z+x_{kji}^z\leqslant F^zN_{ik}^z\qquad \forall i\in I,\ k\in K,\ j\in J,\ z\in Z \tag{37}$$

$$\sum_{i\in I}\sum_{z\in Z}q_{ij}^{z}=\sum_{k\in K}\sum_{z\in Z}q_{jk}^{z}\qquad \forall j\in J \tag{38}$$

$$\sum_{k\in K}\sum_{z\in Z}q_{kj}^{z}=\sum_{i\in I}\sum_{z\in Z}q_{ji}^{z}\qquad \forall j\in J \tag{39}$$

$$\sum_{i\in I}\sum_{z\in Z}q_{ip}^{z}+\sum_{i\in I}\sum_{p\in J'}\sum_{z\in Z}x_{ijp}^{z}=\sum_{k\in K}\sum_{z\in Z}q_{pk}^{z}+\sum_{p\in J'}\sum_{k\in K}\sum_{z\in Z}x_{pjk}^{z}$$
$$\forall j\in J,\ p\in J' \tag{40}$$

$$\sum_{k\in K}\sum_{z\in Z}q_{kp}^{z}+\sum_{p\in J'}\sum_{k\in K}\sum_{z\in Z}x_{kjp}^{z}=\sum_{i\in I}\sum_{z\in Z}q_{pi}^{z}+\sum_{i\in I}\sum_{p\in J'}\sum_{z\in Z}x_{pji}^{z}$$
$$\forall j\in J,\ p\in J' \tag{41}$$

$$\sum_{p\in J'}\sum_{z\in Z}x_{ijp}^{z}+\sum_{k\in K}\sum_{z\in Z}x_{ijk}^{z}=\sum_{z\in Z}q_{ij}^{z}\qquad \forall i\in I,\ j\in J \tag{42}$$

$$\sum_{p\in J'}\sum_{z\in Z}x_{kjp}^{z}+\sum_{i\in I}\sum_{z\in Z}x_{kji}^{z}=\sum_{z\in Z}q_{kj}^{z}\qquad \forall j\in J,\ k\in K \tag{43}$$

$$q_{ij}^{z},\ q_{ji}^{z},\ q_{ik}^{z},\ q_{ki}^{z},\ q_{jk}^{z},\ q_{kj}^{z},\ x_{ijp}^{z},\ x_{ijk}^{z}\geqslant 0,\ y_{j}^{b}\in\{0,\ 1\}$$
$$\forall i\in I,\ j\in J,\ p\in J',\ k\in K,\ z\in Z,\ b\in B \tag{44}$$

式(6)—(7)为模型的目标函数值，即网络成本最小、网络综合韧性度最大；式(8)—(10)是对集疏运网络图及其节点和边的界定；式(11)表示备选内陆港只能选择一个通过能力等级；式(12)为待建内陆港个数要求；式(13)—(14)表示内陆港未失效前后通过内陆港的货流之和不能超过内陆港的最大通过能力；式(15)—(16)表示失效前后集运货运量等于腹地集装箱供给量；式(17)—(18)表示失效前后疏运集装箱量等于腹地集装箱供给量；式(19)—(20)为内陆港失效前后货流守恒约束；式(21)—(24)表示进行中转的必须是已经建立的内陆港；式(25)—(28)表示只有已经建成的内陆港才能中转因内陆港失效而重新分配的货物；式(29)为系统的可靠性约束，即港口集疏运网络中所有内陆港均正常运行的概率不低于预设阈值；式(30)为内陆港未失效时港口吞吐能力约束；式(31)为内陆港失效后港口吞吐能力约束；式(32)—(34)为内陆港未失效时各运输方式运输能力的约束；式(35)—(37)为内陆港失效后各运输方式运输能力的约束；式(38)—(39)为内陆港未失效时内陆港中转流量平衡约束；式(40)—(41)为内陆港失效时内陆港中转流量平衡约束；式(42)—(43)为内陆港未失效时经过内陆港中转的货流与失效后重新分配的货流保持一致；式(44)为决策变量的约束。

2　求解算法

构建的双目标优化模型包含一个层次结构：外层决策确定网络的物理配置(内陆港选址与等级)，而评估该配置的韧性则需要一个内层优化过程。具体而言，对于一个由外层决策固定下来的网络图，其韧性并非直接计算可得，而是需要通过寻找使网络连通性降至最低的“最关键割集”。因此，设计了能够处理内外层问题耦合关系的双层遗传算法进行求解，外层采用非支配排序遗传算法求解帕累托最优解，内层用遗传算法计算韧性。具体求解思路为：外层生成选址方案，然后传递给内层，内层基于这个方案搭建网络，计算其在不同失效场景下的综合韧性度，并将该韧性度值作为外层解的一个目标函数值返回。

2.1　非支配排序遗传算法(NSGA-Ⅱ)

(1) 编码。外层问题为多目标优化，采用NSGA-Ⅱ求解。内陆港选址与等级规划采用(0，1)实数编码，染色体包含节点选址段和建设等级段，总长度为候选节点数和选定内陆港数之和。选址段由(0，1)均匀分布初始化，数值越大优先级越高，选取前h个最大值对应索引作为选址结果。等级段为每个选定节点分配(0，1)随机数，根据$G_j=\left|x_j^g\cdot B\right|(B=3)$转换为整数等级{1，2，3}。假设备选内陆港节点数$|J|=10$，需从中选择5个建设，容量等级数$G=3$。外层初始化编码如表4所示。

前10个基因值为选址编码，降序选取节点1，4，5，7，8作为内陆港；第11—15个基因值映射至等级{1，2，3}，得到方案：节点1和5为3级，节点4和7为1级，节点8为2级。每条染色体对应一个选址与等级方案，通过Gurobi求解货流分配，然后传递至内层算法计算韧性度，最终以式(6)计算总成本。

(2) 选择。采用轮盘赌选择方法，基于非支配层级和拥挤距离构造混合适应度函数。

表4　外层初始化编码
Tab.4　Outer initial coding

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
基因值	0.82	0.15	0.35	0.91	0.68	0.27	0.44	0.53	0.07	0.39	0.32	0.87	0.71	0.62	0.28

$$f_i = (L_i + 1) \cdot 2 + (2 - D_i) \tag{45}$$

$$P_i = \mathrm{e}^{-\beta f_i} / \sum \mathrm{e}^{-\beta f_i} \tag{46}$$

式中：L_i为个体i的非支配层级，$L = 0$为最优前沿；D_i为拥挤距离。

通过轮盘赌算法按式(46)计算出的概率筛选候选父代池。

（3）交叉。采用线性交叉算子生成子代种群y_1和y_2。该操作通过以下方式进行：在交叉概率作用下，每个基因对根据式(45)计算其新值，从而生成新的子代个体，其中a为交叉因子，是控制交叉过程的参数。

$$\begin{cases} y_1 = a \cdot x_1 + (1 - a) \cdot x_2 \\ y_2 = (1 - a) \cdot x_1 + a \cdot x_2 \end{cases} \tag{47}$$

（4）变异操作。采用高斯近似变异，按设定变异概率对个体基因进行正态分布扰动。

（5）合并排序。为增强种群多样性与全局搜索能力，合并父代与子代形成$2n$个种群规模，并用NSGA–Ⅱ按帕累托层级和拥挤距离选出前n个个体进入下一代，平衡搜索与多样性。

（6）循环迭代。当算法达到最大迭代次数时，终止优化并提取最终代中的非支配前沿解集。这些解构成Pareto最优边界。

2.2　内层遗传算法

（1）编码。基于外层编码生成的选址方案构建网络，并按式(7)计算韧性度。染色体含2部分：①正常场景割点选择，基因值越大优先级越高；②失效场景割点选择，节点失效后，剩余节点按基因值排序选割点，确保连通性。假设待建设内陆港数目h为4，需要从中选择一个点作为割点放在割集里，内层初始化编码如表5所示。

该染色体表示割点选择：基因1—4选节点4，基因5—7、8—10、11—13、14—16分别选节点2，1，2，3作为失效场景割点。确定割集后，按式(1)计算网络韧性度，并结合场景概率计算综合韧性度。

（2）选择。采用轮盘赌方式选择子代，在种群中随机选择2个个体，以韧性度作为适应度函数。

（3）交叉、变异。交叉方式与外层算法相同，生成子代种群；变异操作亦同外层算法，生成新子代种群。

（4）合并。每代循环中，交叉与变异生成子代。为增强多样性并保留优质基因，父代与变异子代合并扩展种群，再从中筛选最优个体进入下一代。

（5）循环迭代。每代记录最优目标值，迭代至最大次数后终止，并提取最终代排序种群的首个个体作为全局最优解。

3　实证分析

选取长三角港口群的2大沿海港口以及位于我国内陆的44个主要城市及地区作为研究对象。沿海港口是上海港、宁波舟山港，根据国务院印发的《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》和《国家物流枢纽布局和建设规划》，选取全国性综合交通枢纽及陆港型国家物流枢纽承载城市作为备选内陆港，即南京、济南、昆明、南宁、呼和浩特、合肥、郑州、武汉、南昌、长沙、重庆、成都、贵阳、西安、兰州、乌鲁木齐为备选内陆港。

3.1　数据收集与说明

根据每个腹地城市的进出口总额计算其运输需求；铁路运输距离和公路运输距离分别通过查询12306网站和高德地图获得，水路运输距离通过NetpasDistance软件和HiFleet网站查询获得；各种运输方式的单位运输成本(公路为9.185元/(TEU·km)，铁路为3.185元/(TEU·km)，水路为1.785元/(TEU·km))、单位中转成本通过调研和国际海运网查询取得；备选内陆港的建设规模及相应建设成本基于所在城市的GDP、地价水平、人均收入等经济指标计算得到；港口吞吐能力(上海港为4 730万TEU，舟山港为3 335万TEU)通过官网查询得到；各内陆港的年失效概率根据其2022年实际中断天数计算得到。单位中转成本如表6所示。内陆港建设规模及成本如表7所示。备选内陆港失效概率如表8所示。

表5　内层初始化编码

Tab.5　Inner initial coding

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
基因值	0.29	0.15	0.55	0.82	0.57	0.02	0.24	0.64	0.08	0.04	0.34	0.88	0.18	0.77	0.82	0.88

表6　单位中转成本　　元/TEU

Tab.6　Unit transfer cost

城市	公路	铁路	水路	城市	公路	铁路	水路
南京	200	150	80	长沙	240	200	160
济南	250	200	—	重庆	210	160	90
昆明	300	250	—	成都	250	200	—
南宁	280	220	150	西安	260	180	—
合肥	220	180	100	兰州	280	220	—
郑州	180	120	—	乌鲁木齐	320	250	—
武汉	200	150	100	呼和浩特	270	200	—
南昌	230	190	150	贵阳	290	240	—

3.2　模型求解

将实证分析的参数代入模型进行求解。通过参考类似复杂选址–路径问题的文献，并基于问题的规模进行了测试，最终选定种群规模为100，最大迭代次数为100，交叉概率为0.8，变异概率为0.1。算法使用Python语言编程实现，并调用Gurobi优化器求解线性规划部分，在一台配备Intel Core i7–12700H处理器和16 GB内存的计算机上运行，求解时间约为5 h。上层目标收敛图如图1所示，下层目标收敛图如图2所示，Pareto最优解分布图如图3所示。

从图3中可以看出，经过双层遗传算法的迭代求解，Pareto前沿解集形成了一条均衡的Pareto前沿曲线。总成本与网络韧性度呈正相关，但韧性度提升随投资增加而趋缓，体现边际效益递减。例如，解1成本最低，但韧性度也最低；解3在低成本区间中展现出良好的韧性水平。相比之下，解2成本比解3低0.3%，但韧性度低1.5%；解4成本较解3增长约0.61%，韧性度提高0.76%；解5成本增加0.74%，韧性度提高1.92%；解6成本增加1.9%，韧性度增加2.6%。随着成本的继续增加，网络韧性度增长幅度逐渐变小乃至不变：解10成本增加了6.9%，韧性度仅提高2.6%；解13成本增加了11%，韧性度提高2.7%；解14成本增加了14%，韧性度提高2.7%。由此可见，应在成本与韧性度之间权衡，追求投入产出比最优的稳健网络建设方案。以解3作为最优解，内陆港选址方案如表9所示，集运货流分配如表10所示。

3.3　模型对比

为验证考虑节点失效的成本–韧性协同优化模型(模型1)求解结果的有效性，对考虑节点失效的成本最小化模型(模型2)，以及不考虑节点失效的成本最小化模型(模型3)进行了求解，然后从内陆港选址、总成本与网络综合韧性度衡量、集疏运方式3个方面对比分析了3类模型的优化结果。

（1）选址方案对比。考虑模型1的选址方案表现出良好的区域均衡性，分布在华东、华中和西南等多个区域，这种均衡分布可以提高网络的韧性，

表7　内陆港建设规模及成本

Tab.7　Construction scale and costs of inland ports

城市	等级1		等级2		等级3	
	中转能力/万TEU	建设成本/亿元	中转能力/万TEU	建设成本/亿元	中转能力/万TEU	建设成本/亿元
南京	70	4.2	210	10.5	560	22.0
济南	44	2.8	146	7.0	380	15.0
昆明	34	2.0	120	5.5	300	12.0
南宁	30	1.7	90	4.2	250	9.0
合肥	48	3.0	166	8.0	440	18.0
郑州	58	3.5	190	9.5	520	20.0
武汉	70	4.5	240	12.0	640	25.0
南昌	36	2.2	126	6.0	330	13.0
长沙	54	3.3	176	8.5	490	19.0
重庆	44	2.8	150	7.5	410	16.0
成都	56	3.5	186	9.0	490	19.0
西安	42	2.5	136	6.5	360	14.0
兰州	26	1.5	86	4.0	220	8.5
乌鲁木齐	24	1.4	78	3.8	200	8.0
呼和浩特	26	1.6	88	4.2	240	9.0
贵阳	32	1.8	98	4.5	270	10.0

表8　备选内陆港失效概率

Tab.8　Failure probability of alternative inland ports

城市	失效天数/d	失效概率	城市	失效天数/d	失效概率
南京	9	0.025	长沙	14	0.038
济南	7	0.019	重庆	22	0.060
昆明	12	0.033	成都	21	0.058
南宁	4	0.011	西安	20	0.055
合肥	11	0.030	兰州	27	0.074
郑州	19	0.052	乌鲁木齐	35	0.096
武汉	15	0.041	呼和浩特	30	0.082
南昌	6	0.016	贵阳	17	0.047

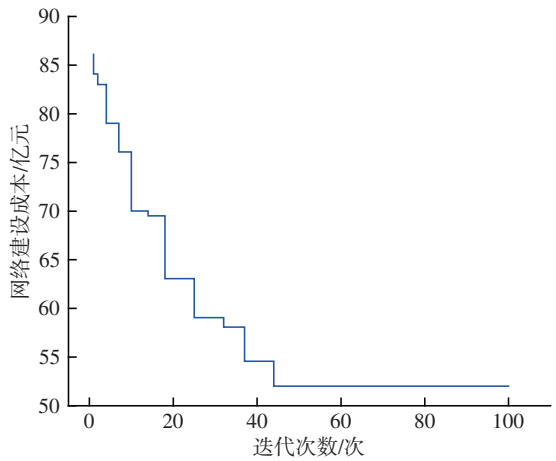

图1　上层目标收敛图

Fig.1　Upper-level object convergence

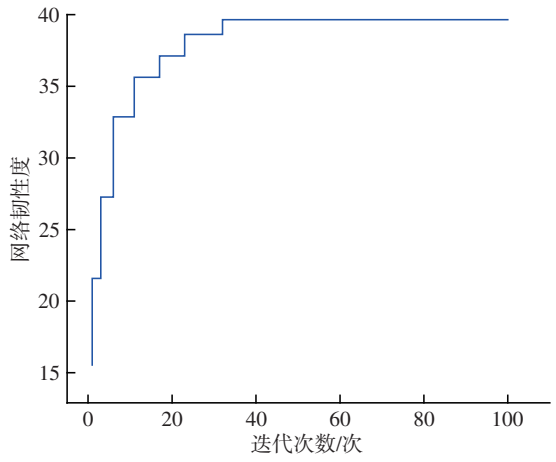

图2　下层目标收敛图

Fig.2　Lower-level object convergence

减少对单一节点或路径的依赖。模型2的选址偏向于在成本较低的西部和中部地区选址，分布相对集中。而模型3的选址倾向于中东部交通便利的区域，布局偏保守，易形成对少数关键节点的依赖，抗毁能力偏弱。选址方案对比如表11所示。

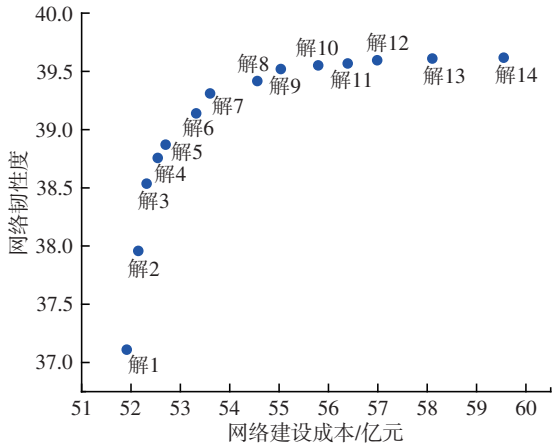

图3　Pareto最优解分布图

Fig.3　Pareto optimum solution distribution

表9　内陆港选址方案

Tab.9　Site selection schemes for inland ports

内陆港	等级	中转能力/万TEU	失效概率
南京	1	70	0.025
南宁	1	30	0.011
武汉	1	70	0.041
成都	1	56	0.058
西安	1	42	0.055
呼和浩特	1	26	0.082
贵阳	1	32	0.047

（2）不同模型的成本与韧性对比。在模型1下，网络总成本较模型2高出2.2%，较模型3高出约5.6%；但韧性度比模型2提升了77.7%，比模型3提升了162%。表明研究所建立的模型在轻度增加成本的基础上，显著增强了系统的抗风险能力与运行稳定性，具备良好的“成本–韧性”协同优化。不同模型的成本与韧性对比如表12所示。

（3）集疏运结构对比。在模型1下，集疏运体现出较为均衡的多式联运结构，各种运输方式占比较为均衡，呈现出水–铁–公协同共存的格局。在这种集疏运结构下，面对内陆港失效时，货流可以通过其他港口或不同的运输模式进行重新分配，从而在节点失效时最大程度地减少货流中断的时间，保持货物流通的稳定性。模型2的铁路占比高达57.4%，模型3的公路占比高达44.3%，这种集疏运结构对某一种运输方式的依赖性较强，一旦这种运输方式的关键节点失效，大量货流将面临有限的替代路径选择，网络重分配货物的灵活性不足。由此可见，成本、韧性与集疏运结构之间存在“效益

表 10　集运货流分配　　万 TEU

Tab.10　Freight flow distribution for collection

路径	运输组合	货运量	路径	运输组合	货运量
昆明→南宁→宁波	铁+水	110 673	新乡→宁波	铁路	26 837
昆明→贵阳→上海	铁路	94 741	洛阳→宁波	铁路	37 606
成都→宁波	铁路	504 000	襄阳→宁波	铁路	74 225
西安→南京→上海	铁+水	42 958	上饶→宁波	铁路	94 777
西安→上海	铁路	378 000	成都→宁波	铁路	569 713
兰州→呼和浩特→上海	铁路	14 008	绵阳→宁波	铁路	36 952
白银→呼和浩特→上海	公+铁	864	宜宾→宁波	铁路	43 765
乌鲁木齐→呼和浩特→上海	铁路	83 402	西安→宁波	铁路	180 030
昌吉→呼和浩特→上海	公+铁	11 691	咸阳→宁波	铁路	19 146
包头→呼和浩特→上海	公+铁	24 370	贵阳→宁波	铁路	111 511
呼和浩特→上海	铁路	19 951	杭州→宁波	水路	7 358 166
乌兰察布→呼和浩特→上海	公+铁	4 269	常州→上海	水路	154 693
南宁→宁波	水路	159 327	合肥→上海	公路	493 799
株洲→武汉→上海	公+水	33 745	芜湖→上海	水路	136 491
湘潭→武汉→上海	公+水	58 055	蚌埠→上海	水路	26 043
重庆→南京→上海	公+水	587 042	青岛→上海	水路	1 150 084
重庆→武汉→上海	公+水	538 200	武汉→上海	水路	461 870
温州→宁波	铁路	536 738	宜昌→上海	水路	76 564
绍兴→宁波	铁路	731 311	九江→上海	水路	171 641
苏州→上海	铁路	3 319 756	南昌→上海	水路	204 849
昆山→上海	铁路	1 006 173	长沙→上海	水路	1 105 785
徐州→上海	铁路	238 542	南京→上海	水路	1 066 462
济南→上海	铁路	307 155	上海→上海	公路	9 766 684
淄博→上海	铁路	156 946	宁波→宁波	公路	1 765 659
郑州→宁波	铁路	771 492		—	

表 11　选址方案对比

Tab.11　Comparative analysis of site selection schemes

指标	模型 1	模型 2	模型 3
选址内陆港	南京、南宁、武汉、成都、西安、呼和浩特、贵阳	昆明、武汉、南昌、西安、兰州、乌鲁木齐、呼和浩特	南宁、合肥、武汉、南昌、西安、乌鲁木齐、呼和浩特
共同节点	武汉、西安、呼和浩特		
选址偏好	兼顾东中西部，选址均衡	偏向中西部，分布相对集中	偏向中东部低风险区域，布局更偏保守型

表 12　不同模型的成本与韧性对比

Tab.12　Cost and resilience comparison of different models

目标	模型 1	模型 2	模型 3
成本/亿元	523.16	511.45	495.64
韧性度	38.54	21.69	14.68

背反”关系，单纯追求成本最低会导致结构单一和韧性低下；而适度增加成本以换取运输方式的多样化与均衡化，能显著增强集疏运网络的稳健性。不同模型运输方式占比如图 4 所示。

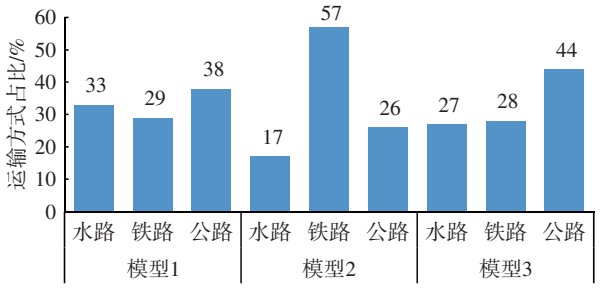

图 4　不同模型运输方式占比

Fig.4　Transportation mode proportion of different models

综上所述，考虑节点失效的成本–韧性协同优化模型相比于考虑节点失效的成本优化模型和不考虑节点失效的成本优化模型，在选址策略上展现出更优的区域均衡性，能够减少对单一区域或节点的依赖。在成本与韧性权衡方面，成本–韧性协同优化模型在成本轻微提升的基础上显著提高了网络韧性；

在集疏运方式方面，成本–韧性优化模型实现了水–铁–公协同的多式联运结构，表现出更高的灵活性和适应性，能够在节点失效时保持网络的稳定性。

4　结论及建议

针对港口集疏运网络中关键节点失效的风险，突破了传统仅以成本为核心的优化范式，将“韧性”作为与“成本”并列的优化目标，构建了成本–韧性双目标优化模型，并设计了相应的求解算法。主要研究结论如下。①考虑节点失效的成本–韧性协同优化模型相比于仅考虑成本的优化模型，显著提高了港口集疏运网络的韧性。②港口集疏运网络的韧性提升随投资增加而趋缓，即存在边际效益递减规律。③多种运输方式均衡发展的网络结构(包括公路、铁路和水路的协同运作)在面对节点失效时展现出了更强的适应性和韧性。

基于以上结论，提出以下建议。①在规划内陆港时，应考虑节点失效的风险，并选择多个分布合理的内陆港来分散风险，避免过度集中，以确保集疏运网络能够在某些节点失效时仍能保持较高的稳定性。②网络韧性的提升是边际递减的，应根据具体的应用场景，在网络规划中平衡成本与韧性，选择适当的优化方案，以实现港口集疏运网络的长期可持续发展。③在港口集疏运网络的规划和建设中，应支持铁路、公路、水路等运输方式的协同发展，并推动不同运输方式的互联互通，以增强网络的抗损毁能力。

研究提出的考虑节点失效的成本–韧性协同优化模型在成本轻微提升的基础上显著提高了网络韧性，可为不确定环境下的港口集疏运网络规划提供决策支撑。受制于数据可得性，对于失效情景的假设较为简化，对于网络韧性的刻画也仅局限于结构韧性方面，未来可以将研究进一步拓展至多个节点同时失效或者级联失效场景，以及功能韧性优化等方面。

参考文献：

[1] YIN C Z，KE Y D，CHEN J H，et al. Interrelations between Sea Hub Ports and Inland Hinterlands：Perspectives of Multimodal Freight Transport Organization and Low Carbon Emissions[J]. Ocean & Coastal Management，2021，214：105919.

[2] 李安林，魏海蕊. 长江流域海铁联运模式下港口集疏运物流网络研究[J]. 铁道运输与经济，2022，44(1)：52–58，66.
LI Anlin，WEI Hairui. Port Collection and Distribution Logistics Network under Sea-Rail Combined Transport Mode in Yangtze River Basin[J]. Railway Transport and Economy，2022，44(1)：52–58，66.

[3] KURTULUŞ E. Optimizing Inland Container Logistics and Dry Port Location-Allocation from an Environmental Perspective[J]. Research in Transportation Business & Management，2023，48：100839.

[4] 王　蕊，靳廉洁，冯　云. 深圳港近距离内陆港体系建设经济社会效益分析[J]. 铁道运输与经济，2023，45(4)：92–97.
WANG Rui，JIN Lianjie，FENG Yun. Economic and Social Benefit Analysis of the Construction of Shenzhen Port Close Inland Port System[J]. Railway Transport and Economy，2023，45(4)：92–97.

[5] 石学刚，邬林江. 低碳下考虑客运需求的空铁货流分配方案优化[J]. 北京交通大学学报，2025，49(2)：25–35.
SHI Xuegang，WU Linjiang. Optimization of Air-Rail Freight Flow Allocation Scheme Considering Passenger Transport Demand under Low-Carbon Background[J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2025，49(2)：25–35.

[6] 刘乐星，梁红艳. 考虑拥堵与环境成本的疏运网络货流分配研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版)，2023，47(1)：197–202.
LIU Lexing，LIANG Hongyan. Research on Cargo Flow Distribution in Transportation Network Considering Congestion and Environmental Cost[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)，2023，47(1)：197–202.

[7] ALEXANDER Y K，RAEVSKAYA A P. Freight Flow Assignment in the Intermodal Logistics Network[J]. Transportation Research Procedia，2023，68：492–498.

[8] 赵　旭，张　瑶，张汇妍. 基于双层规划的港口集疏运网络优化模型[J]. 工业工程与管理，2023，28(3)：1–8.
ZHAO Xu，ZHANG Yao，ZHANG Huiyan. Optimal Model of Port Gathering and Distribution Network Based on Bi-Level Programming[J]. Industrial Engineering and Management，2023，28(3)：1–8.

[9] MA J C，WANG X F，YANG K，et al. Optimizing Inland Port Scale and Function Decisions：A Bilevel Programming

（下转第203页）