

文章编号:1000-4653(2025)03-0001-09

考虑通道阻断的全球原油海运网络评估研究

邱伟维¹, 张哲辉¹, 朱吉双¹, 汲高见², 赵祥¹

(1. 交通运输部水运科学研究院, 北京 100088;

2. 成都师范学院经济与管理学院, 四川 成都 610000)

摘要: 在全球能源运输格局中, 海运承担着超过 70% 的原油运输任务, 其通道可靠性直接影响国家能源安全。当前, 日益加剧的地缘政治风险使得全球关键海运通道的阻断风险空前凸显, 对能源供应链的稳定性构成严峻挑战。为精准评估此风险, 基于复杂网络理论, 融合船舶自动识别系统(AIS)轨迹数据与运力权重, 构建了一个将关键通道本身抽象为网络节点的全球原油海上运输有向加权网络。在此基础上, 通过设计单一通道中断、复合情景失效及最优中断序列三种递进式攻击模拟策略, 系统性地揭示了网络在面临通道阻断时的多维度脆弱性。研究发现: 1) 功能分异。关键通道对网络的影响存在显著差异, 部分通道对全局效率至关重要, 如移除马六甲海峡使网络全局效率降低 1.99%, 而另一部分则表现出结构次优性, 如移除巴拿马运河网络拓扑效率反而提升了 2.57%, 揭示了网络存在可量化的次优路径。2) 脆弱性异步。网络在不同维度下的响应并不同步, 网络宏观连通性对单点或区域性失效表现出极强鲁棒性, 但其核心结构则高度脆弱, 在少量关键节点受攻击后便迅速瓦解, 如在最优序列攻击中移除了 4 个节点, 网络的 K-Core 值出现明显降幅。3) 非线性退化。在最优序列攻击下, 网络全局效率呈现 U 形演化, 先降至最低点, 攻击后期因拓扑重构效应反弹且远超初始值。核心结构崩溃远早于整体传输功能恶化, 揭示了后者在攻击后期出现悖论性恢复现象。揭示了全球原油海运网络在通道阻断下的深层失效机理, 为保障国家能源运输安全、提升全球供应链韧性提供了新的分析范式与决策依据。

关键词: 全球原油海上运输; 航运网络; 递进式攻击; 通道阻断; 复杂网络; 脆弱性

中图分类号: U695

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-4653.2025.03.001

An assessment of the global crude oil maritime transportation network under channel blockade scenarios

QIU Weiwei¹, ZHANG Zhehui¹, ZHU Jishuang¹, JI Gaojian², ZHAO Xiang¹

(1. China Waterborne Transport Research Institute, Beijing 100088, China;

2. Chengdu Normal University, School of Economics and Management, Chengdu 610000, China)

Abstract: In the global energy transportation landscape, maritime transport accounts for over 70% of crude oil shipments, making the reliability of its channels paramount to national energy security. Escalating geopolitical tensions have significantly elevated the risk of disruption to critical maritime channels, posing severe challenges to the stability of energy supply chains. To accurately assess this risk, this study employs complex network theory and integrates Automatic Identification System (AIS) trajectory data with vessel capacity weights to construct a global directed weighted network for crude oil maritime transportation, in which critical channels are abstracted as network nodes. Based on this framework, three progressive attack simulation strategies are designed—single channel disruption, compound scenario failure, and optimal disruption sequence—to systematically investigate the multidimensional vulnerability of the network to channel blockages. The findings indicate: 1) Functional differentiation. critical channels exhibit significant functional differentiation. Some are vital for global efficiency; for instance, removing the Strait of Malacca reduces network efficiency

收稿日期: 2024-08-01

作者简介: 邱伟维(1994—), 男, 助理研究员, 研究方向为交通运输规划与管理。E-mail: qiuweiwei@wti.ac.cn

通信作者: 朱吉双(1976—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为交通运输规划与管理。E-mail: zjs@wti.ac.cn

引用格式: 邱伟维, 张哲辉, 朱吉双, 等. 考虑通道阻断的全球原油海运网络评估研究[J]. 中国航海, 2025, 48(3): 1-9.

QIU W W, ZHANG Z H, ZHU J H, et al. An assessment of the global crude oil maritime transportation network under channel blockade scenarios[J]. Navigation of China, 2025, 48(3): 1-9. (in Chinese)

by 1.99%. Conversely, others demonstrate structural suboptimality, as exemplified by the removal of the Panama Canal, which paradoxically increases topological efficiency by 2.57%, revealing quantifiable suboptimal paths within the network.

2) Asynchronous vulnerability. The network exhibits asynchronous responses across performance dimensions. While macro-connectivity remains highly robust against single-point or regional failures, the core structure is highly fragile. For example, the network's K-Core value plummets after attacks targeting only four optimal nodes. 3) Non-linear degradation. Under optimal sequence attacks, global network efficiency follows a "U-shaped" trajectory—initially declining before rebounding beyond its original value due to topological reconfiguration. Notably, the collapse of the core structure occurs significantly earlier than the deterioration of overall transmission functionality, with the latter even showing a paradoxical recovery in the later stages of the attack. This study elucidates the underlying failure mechanisms of the global crude oil maritime transportation network under channel blockages, offering a new analytical paradigm and decision-making basis for ensuring national energy transportation security and enhancing the resilience of global supply chains.

Key words: global crude oil maritime transportation; shipping network; progressive attack strategy; channel blockade; complex network; vulnerability

能源作为经济社会发展的关键基础和驱动力,其重要性不言而喻^[1]。鉴于全球石油资源储量与消费地的地理分布极度不均衡,海上运输凭借其固有的成本效益和巨大运力,已成为原油跨区域流动的主要且不可或缺的方式^[2]。然而,原油运输网络固有的复杂性及其对外部环境的高度敏感性,使其日益面临严峻的脆弱性挑战^[3]。

近年来,国际环境的不稳定性和不确定性显著增加,使得国际海运面临多重严峻威胁。恶劣天气条件、自然灾害、海盗活动、恐怖袭击、监管壁垒以及航运公司政策调整等,不仅可能导致关键航道或节点的中断或失效,也在一定程度上对全球能源运输安全构成深远隐患^[3-4]。例如,2021年“长赐”号货轮搁浅事件导致苏伊士运河中断近一周,近期巴拿马运河持续干旱导致通行量削减近40%、运费严重上涨,以及为应对红海危机船舶绕航好望角等,都揭示了全球原油航运网络在面对多变外部环境下的内在脆弱性及其对全球能源供应链稳定的关键影响。

探究上述复杂原因对贸易运输网络格局的影响,已成为经济地理和交通地理的重要研究议题之一。学术领域中,主要利用复杂网络理论对其进行评估分析,如韧性、脆弱性等。作为全球贸易的主要载体,航运网络的评估分析也逐渐受到了关注,主要集中在几个方面,如有学者运用多层网络视角解析航运网络结构与策略异质性揭示其对国际货流脆弱性的影响^[5],也有聚焦研究中美集装箱航运网络^[6]、“一带一路”倡议背景下的中欧港口航运网络演变^[7]等特定区域航运网络的格局演化与脆弱性。此外,针对突发事件对航运网络的影响,研究已有涉及大规模公共卫生事件^[8]及关键海运通道阻断(如马六甲海峡、苏伊士运河、巴拿马运河等主航道)对全球航运网络韧性和供应链的影响^[9-11]。这些研究为理解航运网络的复杂性与脆弱性奠定了基础。

尽管航运网络脆弱性评估问题在早期已有探讨,但在随后一段时期内,相关研究在广度与深度上均显有限^[12]。随着全球贸易的飞速发展及国际突发事件的频发,航运网络复杂性和脆弱性研究的重要性进一步凸显。部分前沿研究已开始采用多维度视角进行评估分析,如关注节点度、介数、聚类系数等拓扑属性在攻击前后的综合变化^[13-14],以及网络效率^[15-17]和可达性^[14]等性能导向的指标应用。此外,部分研究还从河流功能视角引入暴露度、敏感性、适应性等评估生态脆弱性,为航运水域的健康评估提供了跨领域借鉴^[18]。

与拥有固定船期表的集装箱运输不同,原油运输网络的构建与分析面临独特的挑战。早期研究受限于数据可得性,多依赖国家间的贸易统计数据构建宏观网络^[19],难以精确刻画实际的港口间运输路径与流量^[20]。此外,学术研究焦点多集中于集装箱运输领域,对原油等大宗能源运输的关注则相对不足。近年来,船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)以其海量、实时、高精度的时空数据,为克服上述挑战提供了可能,并逐渐成为现代航运研究的核心基础。AIS数据已被广泛应用于复杂风险识别^[21]、船舶行为分析^[22]、航线规划^[23]以及港口运行效率提升^[24-26]等多个方面,显著提升了航运研究的精度与广度。

随着AIS数据应用的丰富和发展,基于AIS数据的原油海上运输网络研究逐渐成为焦点,其网络可靠性与韧性因能源运输的战略重要性而愈发突出。部分学者已开始利用AIS数据构建“港口—港口”的原油海上运输网络,并开展了结构特征与动态演化分析等^[2,20]。如MOU等^[1]针对“海上丝绸之路”沿线提出了兼顾抗毁性与恢复能力的原油海上运输网络韧性评估框架;WANG等^[3,27]则聚焦于中国原油进口海运网络的时间可靠性、连通性及关

键节点识别。更为前沿的研究开始探索超越预设攻击策略的评估方法,如SU等^[28]通过构建优化模型,以确定在运输效率约束下导致网络性能最大程度退化和最快速度恢复的最优中断与恢复序列,从而客观评估网络的极限韧性。

此外,地缘政治因素对全球能源市场和运输网络的影响日益显著,成为当前研究热点。学术界已对俄乌冲突、红海袭击等事件对燃料市场、船运费率、供应链稳定性和原油贸易流向重塑的具体影响进行了深入分析^[29-32]。

综上所述,当前研究虽在航运网络评估领域取得了显著进展,但仍存在以下局限性:一是研究领域侧重不均,相较于成熟的集装箱网络研究,针对原油运输网络的精细化评估仍显不足;二是网络构建的数据源与方法仍有提升空间,如何更有效地融合AIS轨迹数据与节点间运输强度数据,构建能真实反映运力与流量分布的加权动态网络,是提升模型准确性的关键;三是攻击策略与评估维度的局限性,多数研究依赖于基于节点中心性的预设攻击策略,未能充分考虑现实中更具战略性的威胁情景(如关键通道阻断等),对实际运输的影响量化分析不足。

因此,本研究从实际应用角度出发,针对上述问题,基于复杂网络等理论,创新性地将油轮实际航行数据和船舶载重吨数据相融合,构建了全球原油海上运输网络有向加权拓扑模型,提出了多维度复合网络评估框架,从多个角度对网络进行分析,并针对战略级节点开展递进式连续蓄意攻击,全面评估分析原油海上运输网络,分析网络在面临通道阻断时的多维度脆弱性和复杂响应。本研究为掌握海上能源运输网络韧性、更好地服务国家经济社会发展等具有极为重要的现实意义和战略意义。

1 全球原油海上运输网络构建

1.1 数据来源

本研究的网络构建数据源于2024年全球原油油轮的AIS历史轨迹数据集。通过对海量原始数据执行清洗、航次提取、起止点识别等预处理流程,并与全球船舶静态数据库进行匹配,最终获得了构建网络所需的航线流量与船舶运力数据。

1.2 节点与边的定义

在复杂网络模型中,节点与边的定义是网络拓扑结构和后续分析的基础。本研究将关键海运通道本身抽象为网络中的功能性节点,将复杂的通道阻断问题,转化为一个标准的、可计算的“节点移除”问题。通过移除代表通道的节点,可以精确模拟其

失效对整个网络拓扑结构的系统性影响,包括大量非直接相连节点对之间路径的重构。这种建模方式能更深刻地揭示通道在全球运输网络中的战略价值与脆弱性。

1.3 网络模型构建

基于复杂网络理论,本研究将全球原油海上运输系统抽象为一个有向加权图 $M=(P,S,W)$ 。

1) 节点 P :节点集包含两类实体:1) 区域性枢纽节点,代表全球11个主要的原油产销区域(如北美、东亚、中东等);2) 通道节点,代表12个对全球海运具有战略意义的关键航道(如马六甲海峡、霍尔木兹海峡、苏伊士运河、巴拿马运河、好望角等)。最终,模型共包含23个核心节点。

2) 边 S :如果存在从节点 i 到节点 j 的规模化、常态化原油运输流,则在它们之间定义一条有向边 (i,j) 。边的方向代表了原油的实际流向。基于2024年的航运数据,模型共构建了172条有向边。

3) 权重 W :为体现不同航线的运输强度差异,本研究采用2024年度航线上实际的原油油轮载重吨作为边的权重。权重越大,代表该航线承载的原油流量越高,在网络中的重要性也越突出。

根据上述定义,本文构建了2024年全球原油海上运输有向加权网络拓扑模型,其空间结构如图1所示。

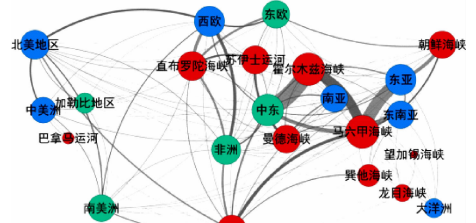


图1 全球原油海上运输网络拓扑图

Fig.1 Global crude oil maritime transportation network topology map

2 全球原油海上运输网络评估方法与特征

2.1 原油海上运输网络评估方法

为定量评估所构建的原油海运网络在不同状态下的拓扑结构与功能特性,本研究借鉴了复杂网络理论和社会网络分析中对运输网络进行评估分析的一系列经典指标^[1-6,9],根据指标特性对指标维度进行划分,构建了包括结构完整性指标、传输功能性指标、局部聚集性指标、宏观连通性指标以及核心结构稳定性指标等多维网络评估框架(见图2),全面刻画全球原油海上运输网络的运行状态。具体评估方

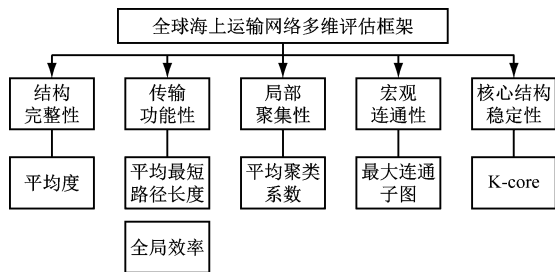


图2 全球原油海上运输网络多维评估框架图

Fig. 2 Multidimensional evaluation framework for the global crude oil maritime transportation network

表1 原油海上运输网络评估方法

Tab. 1 Assessment method of crude oil maritime transportation network

| 指标 | 计算公式 | 说明 |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 平均度 | $V = \frac{1}{N} \left(\sum_N a_i * D_{in} + \sum_N b_i * D_{out} \right)$ | 所有节点度的算术平均值。在海运网络中,节点的度表示其直接连接的航线数量。较高的平均度,说明网络节点间的连接非常紧密。式中, V 代表网络平均度; N 代表网络中的节点总数; a_i 代表节点 i 的入度; b_i 代表节点 i 的出度。 |
| 平均最短路径长度 | $L = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij}$ | 用于刻画网络中节点间连通难易程度,尤其是网络中货物中转节点的平均次数。在航运网络中,以两节点最短路径需经过的边数来表示节点之间的距离。式中, L 代表网络中任意两个节点之间的平均最短路径长度; d_{ij} 代表节点 i 到节点 j 的最短路径长度; N 代表网络中的节点总数。 |
| 平均聚类系数 | $C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)}$ | 衡量网络中节点聚集倾向的指标。单个节点的聚类系数表示其邻居节点之间相互连接的紧密程度。网络的平均聚类系数是所有节点聚类系数的平均值。高聚类系数通常表示网络存在紧密的局部社群结构。式中, C_i 代表节点 i 的聚类系数; E_i 代表节点 i 的邻居之间实际存在的边数; k_i 代表节点 i 的度。 |
| 全局效率 | $E(O) = \frac{\sum_{i \neq j \in O} \frac{1}{\delta}}{N(N-1)}$ | 衡量整个网络的连通效率和要素流通能力。式中, $E(O)$ 代表全局效率; N 代表网络中的节点总数; δ 从节点 i 到节点 j 的最短路径长度,如果节点间没有路径,则为零。 |
| 最大连通子图比例 | $L_{CC} = \frac{ C_{max} }{N}$ | 指网络中包含节点数最多的一个连通部分,是衡量网络完整性和连通性的关键指标。式中, L_{CC} 是最大连通子图比例; $ C_{max} $ 是最大连通分量的节点数; N 代表网络中的节点总数。 |
| K-Core | $k_{core} = \max_{S \in G} \min_{p \in S} \text{degs}(p)$ | 网络的最大 k 值是标识了网络中最核心、最紧密连接的部分。式中, S 是 G 的子图; $\text{degs}(p)$ 是节点 p 在子图 S 中的度。 |

3) 网络局部聚集性。聚类系数为 0.81,表明网络中存在较为紧密的区域性运输社群,有助于在局部冲击下维持网络稳定。

4) 网络宏观连通性。最大连通子图为 1,表明网络整体高度连通且无孤立部分。

5) 网络核心结构稳定性。K-core 为 12,表明网络中存在一个稳固的核心集团,这些节点彼此之间至少有 12 个连接。

法与公式如表 1 所示。

2.2 原油海上运输网络特征分析

1) 网络结构完整性。网络平均度为 14.95,数值较高,表明网络节点间的连接紧密,平均每个节点直接连接约 15 条航线。

2) 网络传输功能性。主要通过平均最短路径和全局效率来衡量。网络平均路径长度为 1.32,表明在全球范围内,原油从任意一个节点到达另一个,平均需 1.3 次中转,网络效率较高。全局效率为 0.84,表明网络整体具有较高的连通性和运输效率。

3 不同攻击策略下的全球原油海上运输网络变化分析

评估全球原油海上运输网络韧性对海上能源顺利运输至关重要。航运网络对攻击是脆弱的,港口或航道在一段时间内无法恢复工作,甚至大范围的崩溃^[3-4]。为探究网络在面临持续、蓄意攻击时的系统性失效路径,本研究采用了一种基于网络功能的迭代攻击策略,旨在模拟最大化即时功能损伤攻

击。通过设计由单一到复合、再到最优序列的递进式中断情景,本研究能够揭示网络拓扑结构中最关键的薄弱环节及其序次,并量化网络在逐步瓦解过程中的结构完整性、局部聚集性、传输功能性、宏观连通性以及核心结构稳定性等多个维度性能的演化。

3.1 单一通道中断的独立效应评估

本节通过对 11 个关键通道节点进行独立的、逐

一的移除模拟,旨在量化每个通道节点对网络各项性能指标的独立影响。

3.1.1 网络传输功能的影响分析

网络的传输功能主要由全局效率和平均最短路径长度两个指标进行度量。表 2 记录了移除单一通道后这两项指标的数值变化。

表 2 单一通道中断对网络全局效率与平均最短路径长度的影响

Tab.2 The effects of single channel interruption on global network efficiency and average shortest path length

| 被中断的通道节点 | 全局效率 | 全局效率变化率/% | 平均最短路径 | 平均最短路径变化率/% |
|----------|-------|-----------|--------|-------------|
| 初始值 | 0.840 | — | 1.320 | — |
| 马六甲海峡 | 0.823 | -1.99 | 1.359 | 2.97 |
| 好望角 | 0.829 | -1.30 | 1.342 | 1.65 |
| 霍尔木兹海峡 | 0.835 | -0.53 | 1.329 | 0.67 |
| 直布罗陀海峡 | 0.835 | -0.53 | 1.329 | 0.67 |
| 朝鲜海峡 | 0.838 | -0.27 | 1.325 | 0.34 |
| 巽他海峡 | 0.840 | -0.01 | 1.320 | 0.01 |
| 曼德海峡 | 0.844 | 0.50 | 1.312 | -0.64 |
| 苏伊士运河 | 0.846 | 0.76 | 1.307 | -0.97 |
| 龙目海峡 | 0.853 | 1.54 | 1.294 | -1.95 |
| 望加锡海峡 | 0.857 | 2.05 | 1.286 | -2.61 |
| 巴拿马运河 | 0.861 | 2.57 | 1.277 | -3.26 |

表 2 的数据表明,不同通道节点对网络传输功能的影响存在两种相异的模式。

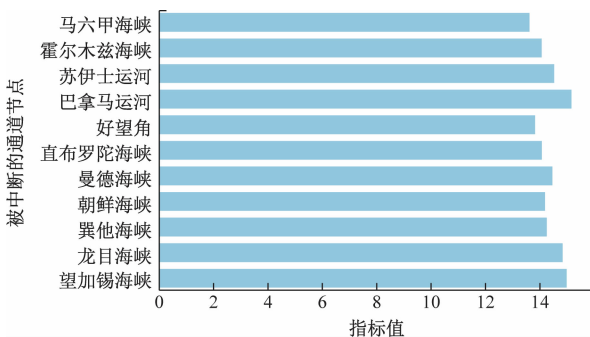
1) 第一类通道:包括马六甲海峡、好望角等六个通道为网络中众多油轮航行的最短路径,承载大量运输任务,其移除会导致网络全局效率的下降和平均最短路径长度的增加。从而降低了网络的整体拓扑传输性能。其中,马六甲海峡的移除所引发的负面影响最为显著。

2) 第二类通道:包括巴拿马运河、苏伊士运河等五个通道,其移除反而导致了网络全局效率的上

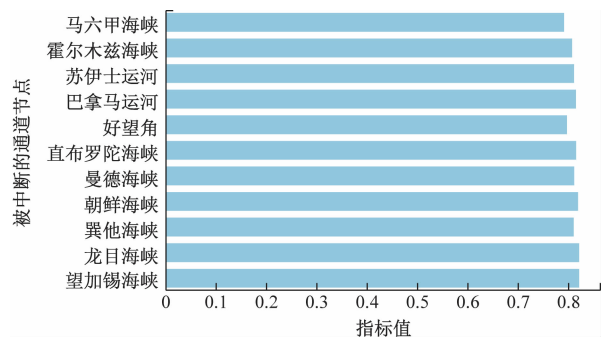
升和平均最短路径长度的缩短。这表明网络结构中存在次优性特征。这类通道引入了部分冗余或非优化的连接,其移除反而在拓扑层面上减少了节点对间的平均距离,使得全局效率得以提升。

3.1.2 网络结构与稳定性的影响分析

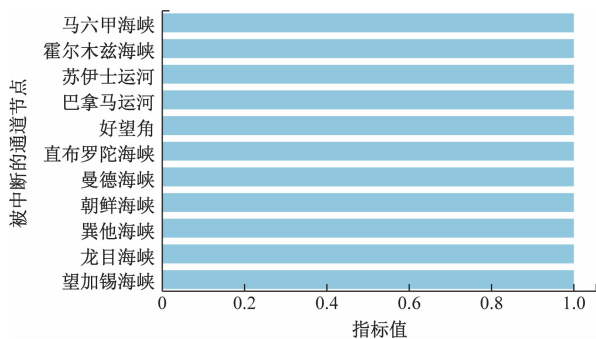
图 3 通过四个关键维度,即平均度、平均聚类系数、最大连通子图相对大小以及 K-Core 值,深入且直观地揭示了单一通道中断对网络结构及其稳定性所造成的具体影响。



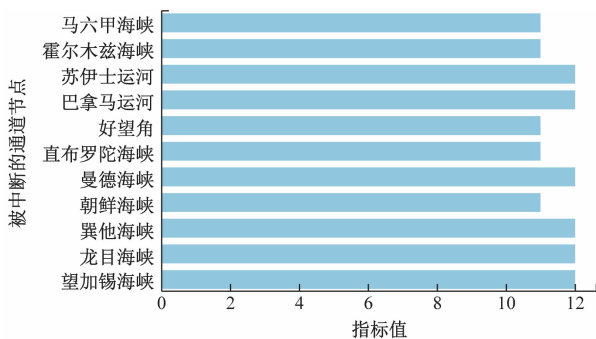
(a) 平均度



(b) 平均聚类系数



(c) 最大连通子图相对大小



(d) K-Core 值

图3 单一通道中断对网络结构与稳定性影响分析

Fig.3 Analysis diagram of the impact of single channel failure on network structure and stability

如图3所示,单一通道中断(即移除任一通道节点)对网络结构和传输性产生影响,即引起网络平均度和平均聚类系数的下降,削弱了局部连接密度。其中,马六甲海峡的移除对这两项指标的削弱幅度最大(分别下降8.8%和2.1%),与其在网络中具有较高的节点度相一致;从宏观连通性来看,在11个单一通道中断情景下,最大连通子图的相对大小始终为1.0。表明网络对单一节点的移除表现出高度的连通鲁棒性。任何单一通道的失效,均不会导致网络发生分裂,所有节点之间仍能保持相互连通;从网络核心结构稳定性来看,网络初始K-Core值为12。在移除马六甲海峡、好望角、霍尔木兹海峡、直布罗陀海峡和朝鲜海峡时,K-Core值从12下降至11。而其余节点移除则无变化。这表明,前述五个通道节点不仅是高流量通道,更是维持网络核心结构完整性的关键组成部分,其失效或中断更能预示网络实质性的“损伤”。

3.2 复合型失效情景下的网络响应

尽管单一通道中断模拟可精确量化节点独立作用,但实际航运风险常呈区域性和系统性特征。为更贴近现实地模拟此类复杂风险,本研究基于明确的地缘政治与航运安全背景,设计了三种复合型失效情景,旨在更全面地理解和评估航运网络在复杂威胁下的表现。

情景一:模拟中东地区地缘政治冲突加剧,导致霍尔木兹海峡与曼德海峡同时中断。

情景二:设定为因区域性突发事件,导致马六甲海峡及其主要替代航线巽他海峡和龙目海峡同时无法通航。

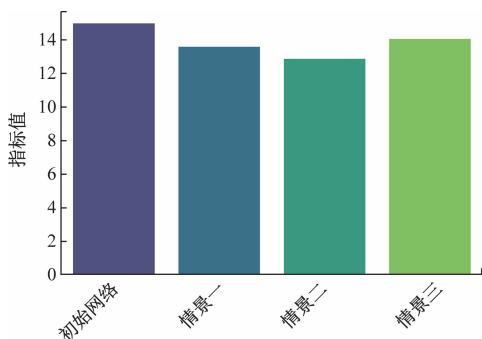
情景三:模拟红海地区安全局势的进一步恶化,导致连接地中海与印度洋的苏伊士运河与曼德海峡同时中断。

在上述三种情景下,图4对比了网络各项指标的响应状态。

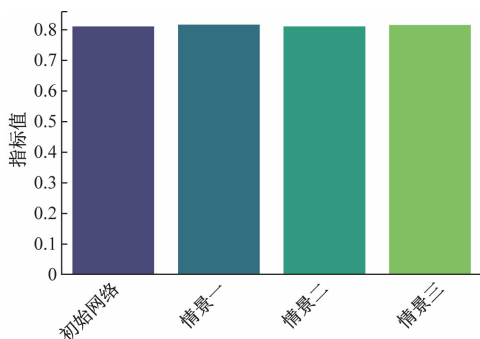
从结构完整性分析,情景二移除了三个关键节点,导致网络结构的平均度显著降低了13.8%(最为明显的削弱效应)。相比之下,情景三降幅约在5.8%对平均度影响较小。而在聚类系数方面,多种情景模拟对平均聚类系数的变化波动相对较小。

从传输功能性分析,在情景三移除苏伊士运河与曼德海峡后,全局效率上升约1.4%,而平均最短路径下降约1.9%。表明情景三对网络拓扑效率的提升作用最为显著。

从连通性与核心稳定性分析,所有复合情景均未改变最大连通子图数值大小。在核心稳定性方面,情景一、情景二使K-Core值从12降至11,显示区域性、多节点失效对核心结构有显著削弱作用。相比之下,情景三K-Core值保持12,虽网络拓扑指



(a) 平均度



(b) 平均聚类系数

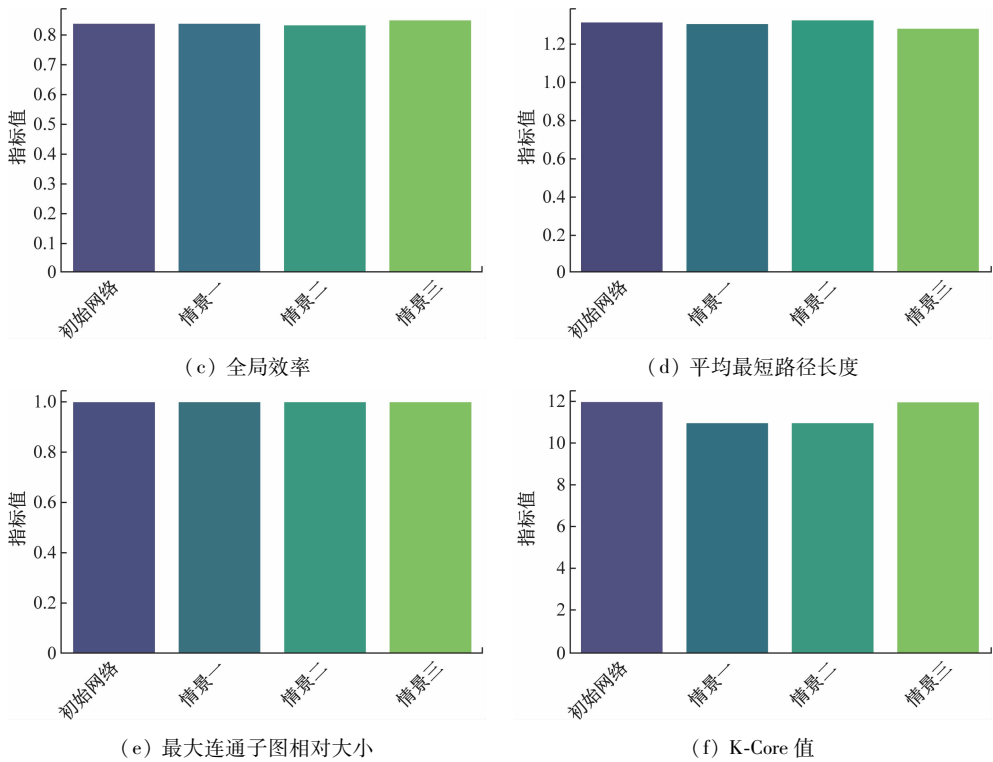


图4 复合失效情景对网络多维度指标的影响分析

Fig. 4 Analysis diagram of the impact of compound failure scenarios on multidimensional network indicators

标未变,但从保障运输通道角度看,其造成的绕航和延误不可忽略。情景二直接从结构上影响网络,风险等级最高。所以评估复合风险时,要结合多维度指标综合判断,避免被单一指标升降误导。

3.3 最优中断序列下的网络系统性退化路径

为探究网络在面临持续、蓄意攻击时的系统性失效路径,本研究采用了一种基于网络功能的迭代攻击策略。该策略旨在模拟一个以最大化即时功能损伤为目标的攻击者,从而揭示网络拓扑结构中最关键的薄弱环节及其次序,并量化网络在逐步瓦解过程中的多维度性能演化。

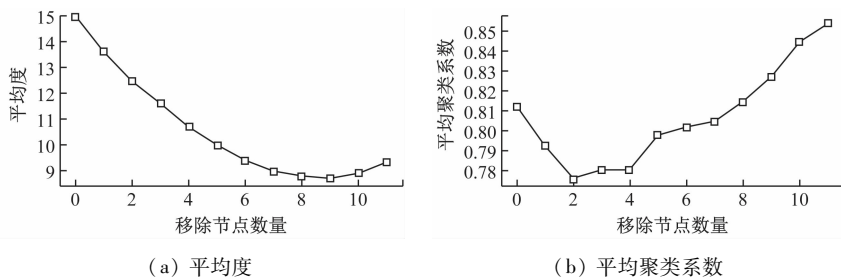
该策略采用了基于全局效率的迭代贪心算法,其核心是在每一步移除能使当前网络全局效率降幅最大的候选节点。

该算法生成的 11 步最优中断序列包括:1. 马六甲海峡→2. 好望角→3. 直布罗陀海峡→4. 霍尔木兹海峡→5. 朝鲜海峡→6. 巽他海峡→7. 曼德海

峡→8. 苏伊士运河→9. 龙目海峡→10. 望加锡海峡→11. 巴拿马运河。

此中断序列揭示了一个关键的结构性特征,即其前六个节点均为第 3.1.1 节中识别出的第一类通道,而其后五个节点则均为第二类通道。这一序列的内在构成,决定了网络在退化过程中呈现出高度非线性动态演化的,如图 5 所示。

如图 5 所示,网络拓扑的退化过程表现出显著的异步性,全局效率指标呈现 U 形曲线,在移除第 6 个节点(巽他海峡)时达到谷底 0.789,随后在攻击后期不降反升。与之相反,平均最短路径则呈现倒 U 形,这是由于攻击序列的前半段(1-6)移除了对网络效率起正面作用的第一类通道,而后半段(7-11)则清除了起次优作用的第二类通道,从而优化了剩余网络的拓扑结构。然而,更值得注意的是核心结构稳定性指标 K-Core 的演化。该指标在攻击的前 4 步就从初始值 12 迅速降低至 8,远早于全局效率的



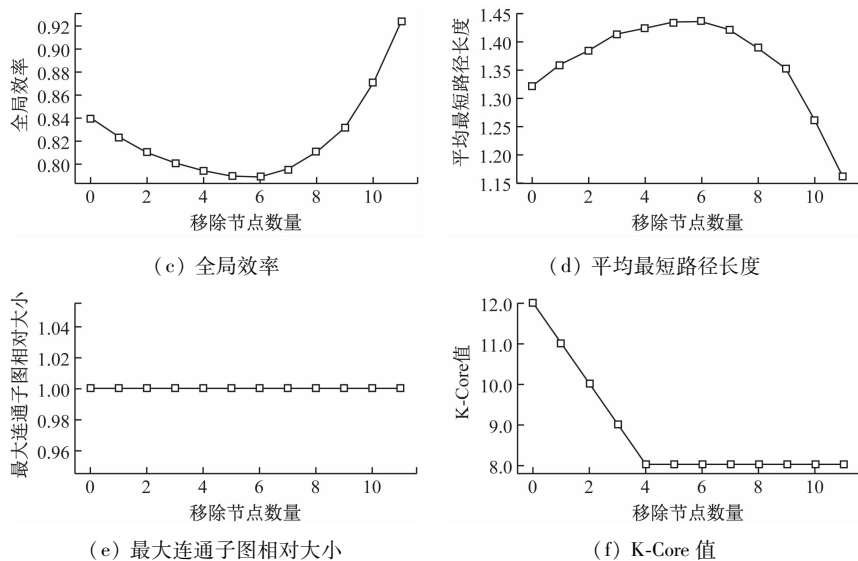


图5 最优中断序列下网络多维指标的连续演化分析

Fig. 5 Continuous evolution analysis of multidimensional network indicators under optimal interruption sequences

恶化。这表明,功能性指标的后期恢复可能掩盖了网络核心连接已被严重破坏的情况。因此,K-Core等结构稳定性指标是比全局效率更敏感、更有效的早期预警信号,对于在现实世界中评估网络是否遭受实质性损害具有重要的决策参考价值。

4 结束语

1) 从单一通道中断效应看,全球原油海上运输网络呈现功能分异与结构次优性并存的拓扑特征。单一通道中断分析显示,网络关键通道节点对整体传输功能的影响有两种模式:一是以马六甲海峡为代表,其移除会显著降低网络全局效率;二是以巴拿马运河为代表,其移除会因切断冗余或非优化路径,使全局效率计算值提升,证明该网络存在可量化的结构性冗余与次优路径。

2) 从不同维度指标响应看,网络脆弱性具有高度非同步性。宏观连通性鲁棒性极强,核心结构稳定性相对脆弱。单一通道、复合情景或最优序列攻击均未使网络分裂,最大连通子图维持较高水平,显示网络维持节点可达性的鲁棒性极高。但K-Core分析显示,攻击马六甲海峡、霍尔木兹海峡等少数关键节点,能迅速显著削弱网络核心结构,揭示了网络核心稳定性层面的内在脆弱性。

3) 从系统性退化演化路径看,网络非线性特征揭示功能指标悖论性恢复现象,核心结构崩溃是更早发生的关键事件。在最优中断序列攻击下,网络全局效率呈U形演化,K-Core值在攻击早期急剧跌落并稳定于低位。这表明,功能性指标后期恢复并非网络韧性增强,而是拓扑重构效应,可能掩盖网络

核心结构被严重削弱的事实。所以K-Core等结构稳定性指标可作为识别网络遭受实质性损害的更敏感早期预警信号。

尽管本研究取得了上述结论,但仍存在可拓展的空间。未来的研究可从以下方面展开:首先,可引入时间维度,构建动态网络模型,以探究网络脆弱性随季节、地缘政治事件等因素的演化规律;其次,可将经济成本(如运费、绕航成本、时间延误成本)纳入模型,使脆弱性评估的结果更具经济性;最后,可以结合博弈论与优化算法,研究在面临不同攻击策略时的最优防御与恢复策略,从而为提升网络韧性提供更具操作性的方案。

参 考 文 献

- [1] MOU N, SUN S, YANG T, et al. Assessment of the resilience of a complex network for crude oil transportation on the Maritime Silk Road [J]. IEEE Access, 2020, 8: 181311-181325.
- [2] YAN Z, HE R, YANG H. The small world of global marine crude oil trade based on crude oil tanker flows [J]. Regional Studies in Marine Science, 2022, 51: 102215.
- [3] WANG J, WANG X, FENG Y, et al. Assessing the connectivity reliability of a maritime transport network: a case of imported crude oil in China [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(8): 1597.
- [4] EARNEST D C, YETIV S, CARMEL S M. Contagion in the transpacific shipping network: international networks and vulnerability interdependence [J]. International Interactions, 2012, 38(5): 571-596.
- [5] CALATAYUD A, MANGAN J, PALACIN R.

- Vulnerability of international freight flows to shipping network disruptions: a multiplex network perspective [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2017, 108: 195-208.
- [6] 王列辉, 叶斐, 郑渊博. 中美集装箱航运网络格局演化与脆弱性评估[J]. *经济地理*, 2020, 40(5): 136-144.
- WANG L, YE F, ZHENG Y. The assessment of Sino-US container shipping network evolution and vulnerability [J]. *Economic Geography*, 2020, 40(5): 136-144.
- [7] GUO J, HOU Y, HE Y. Characteristics of change of the China-Europe port shipping network under the Belt and Road Initiative[J]. *Progress in Geography*, 2020, 39(5): 716-726.
- [8] WU D, YU C, ZHAO Y, et al. Changes in vulnerability of global container shipping networks before and after the COVID-19 pandemic [J]. *Journal of Transport Geography*, 2024, 114: 103783.
- [9] 吴迪, 王诺, 吴暖, 等. 主航道中断背景下集装箱海运网络的脆弱性及其对中国的影响[J]. *地理研究*, 2017, 36(4): 719-730.
- WU D, WANG N, WU N, et al. The impact of main channel interruption on vulnerability of container shipping network and China container shipping [J]. *Geographical Research*, 2017, 36(4): 719-730. (in Chinese)
- [10] 李邓宇卉, 焦建彬, 汪寿阳, 等. 全球关键航运通道受阻对供应链的影响——“长赐号”在苏伊士运河搁浅案例分析[J]. *管理评论*, 2025, 37(2): 237-248.
- LI D Y H, JIAO J B, WANG S Y, et al. The impact of disruptions to key global shipping channels on supply chains: a case analysis of the ever given running aground in the Suez canal[J]. *Management Review*, 2025, 37(2): 237-248. (in Chinese)
- [11] 薄艾, 谢永顺, 何兆阳, 等. 战略矿产海运通道安全研究——以铁矿石为例[J]. *中国工程科学*, 2024, 26(3): 142-151.
- BO A, XIE Y S, HE Z Y, et al. Maritime transportation security of strategic minerals: a case study of iron ore [J]. *Chinese Engineering Science*, 2024, 26(3): 142-151. (in Chinese)
- [12] 袁佳祺, 蒋柳鹏, 翁艳君, 等. 海运网络脆弱性研究综述[J]. *现代交通与冶金材料*, 2024, 4(6): 31-39.
- YUAN J Q, JIANG L P, WENG Y J, et al. A review of maritime network vulnerability research [J]. *Modern Transportation and Metallurgical Materials*, 2024, 4(6): 31-39. (in Chinese)
- [13] 夏新海, 杨舒英, 唐宋元. 粤港澳大湾区港口群航运网络拓扑特征及脆弱性分析[J]. *珠江水运*, 2024(2): 111-115.
- XIA X H, YANG S Y, TANG S Y. Topological characteristics and vulnerability analysis of the shipping network in the port cluster of the Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area [J]. *Pearl River Water Transport*, 2024(2): 111-115. (in Chinese)
- [14] 黎宇豪, 王家汉, 高瑞. 基于可达性模型的煤炭海上运输链脆弱性研究[J]. *水运管理*, 2023, 45(6): 27-33.
- LI Y H, WANG J H, GAO R. Research on the vulnerability of coal maritime transport chain based on accessibility model [J]. *Shipping Management*, 2023, 45(6): 27-33. (in Chinese)
- [15] 胡岳, 黄丽娜, 任福. 21世纪海上丝绸之路”有向复杂航运网络抗毁性研究[J]. *地理信息世界*, 2020, 27(1): 26-33.
- HU Y, HUANG L N, REN F. Research on the Invulnerability of the Directional Complex Shipping Network of the 21st Century Maritime Silk Road [J]. *Geomatics World*, 2020, 27(1): 26-33. (in Chinese)
- [16] 张琴苒. 集装箱航运网络脆弱性评价[D]. 大连: 大连海事大学, 2024.
- ZHANG Q R. Vulnerability evaluation of container shipping network [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2024. (in Chinese)
- [17] 李亮. 综合运输视角下的重庆航运网络脆弱性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
- LI L. Research on the vulnerability of Chongqing's shipping network from the perspective of integrated transport [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [18] 牟茜. 基于河流功能的脆弱性模型构建与应用——以嘉陵江重庆段为例[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
- MOU Q. Construction and application of vulnerability model based on river function——taking the Chongqing section of the Jialing River as an example [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2024. (in Chinese)
- [19] DU R, WANG Y, DONG G, et al. A complex network perspective on interrelations and evolution features of international oil trade, 2002-2013[J]. *Applied Energy*, 2017, 196: 142-151.
- [20] PENG P, YANG Y, CHENG S, et al. Hub-and-spoke structure: characterizing the global crude oil transport network with mass vessel trajectories [J]. *Energy*, 2019, 168: 966-974.

- [8] 胡健波,朱建华,彭士涛,等.嗅探法:通过监测尾气估算船用燃油硫含量的技术[J].水道港口,2018,39(5):619-625.
HU J B, ZHU J H, PENG S T, et al. Sniffing method a technique to estimate sulfur content in marine fuel through in situ measurements of ship emissions [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2018, 39 (5) : 619-625. (in Chinese)
- [9] 胡健波,张铁军,彭士涛.船舶大气污染物排放控制区遥测监管技术[J].中国海事,2020(1):24-26.
HU J B, ZHANG T J, PENG S T. Remote monitoring and regulation technology for ship air pollutant emission control areas [J]. China Maritime Safety, 2020 (1) : 24-26. (in Chinese)
- [10] 李亚军.无人机搭载嗅探设备监测船舶尾气研究[J].中国海事,2022(4):29-32.
LI Y J. Research on monitoring ship exhaust emissions using drone-mounted sniffer devices [J]. China Maritime Safety, 2022 (4) : 29-32. (in Chinese)
- [11] 交通运输部天津水运工程科学研究所.一种燃油硫含量的自动识别算法:CN202010041516.6[P].2021-02-02.
Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering. M. O. T. An automatic recognition algorithm for fuel sulfur content; CN202010041516.6 [P]. 2021-02-02. (in Chinese)
- [12] QI Z Y, PENG S T, HU J B, et al. Surveillance practice and automatic data algorithm of sniffing telemetry for SO₂ emissions from ship exhaust in Tianjin Port[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 409:10.
- [13] 邓孟涛,向元京,胡豪杰,等.船舶尾气监测无人机系统设计与应用[J].中国航海,2024,47(1):139-144.
DENG M T, XIANG Y J, HU H J, et al. Design and application of UAV system for ship exhaust monitoring [J]. Navigation of China, 2024, 47(1) : 139-144. (in Chinese)
- [14] 引航调派中的应用研究[J].天津航海,2025(1):9-12.
YAN B, SUN S C, LI Z Q. Research on the application of automatic identification system (AIS) for ships in pilotage and dispatch [J]. Tianjin Navigation, 2025 (1) : 9-12. (in Chinese)
- [15] WANG S, LU J, JIANG L. Time reliability of the maritime transportation network for China's crude oil imports[J]. Sustainability, 2019, 12(1) : 198.
- [16] SU W, ZHANG L, LU J, et al. Crude oil maritime transportation network resilience assessment based on optimal strategies[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2025, 142: 104659.
- [17] KALOGIANNIDIS S, CHATZITHEODORIDIS F, KALFAS D, et al. The economic impact of Russia's Ukraine conflict on the EU fuel markets [J]. International Journal of Energy Economics and Policy, 2022, 12(6) : 37-49.
- [18] MICHAEL N A, MELAS K D. Geopolitical risk and the LNG-LPG trade[J]. Peace Economics, Peace Science and Public Policy, 2022, 28(3) : 243-265.
- [19] 禹佳宁,方志祥,胡筱渊,等.红海袭击事件波及的全球战略物资海运网络变化分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(9):1610-1620.
YU J N, FANG Z X, HU X Y, et al. Analysis of changes in maritime transport networks for strategic materials affected by attacks in the Red Sea [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(9) : 1610-1620. (in Chinese)
- [20] ZHU J, LU J, SU W. Empirical analysis of global crude oil transportation network amid the Russia-Ukraine conflict [J]. Journal of Transport Geography, 2025, 127: 104305.
- (上接第9页)
- [21] 李东阳. AIS 数据驱动下海底管道面临的船舶交通风险检测模型[D].上海:上海海事大学,2021.
LI D Y. Ship traffic risk detection model for submarine pipelines driven by AIS data [D]. Shanghai: Shanghai Maritime University, 2021. (in Chinese)
- [22] 江龙晖,刘通,王旭升,等. AIS 数据中船舶避碰行为提取方法[J].舰船科学技术,2025,47(3):141-147.
JIANG L H, LIU T, WANG X S, et al. Method for extracting ship collision avoidance behavior in AIS data [J]. Ship Science and Technology, 2025, 47(3) : 141-147. (in Chinese)
- [23] 潘荣友,韦扬,李超,等.基于 AIS 大数据的内河船舶航线推荐方法[J].西部交通科技,2024(4):210-212.
PAN R Y, WEI Y, LI C, et al. Inland waterway vessel route recommendation method based on AIS big data [J]. Western China Communication Science & Technology, 2024(4) : 210-212. (in Chinese)
- [24] 陈宁.基于 AIS 数据的港口服务作业效率评价研究[D].大连:大连海事大学,2023.
CHEN N. Research on efficiency evaluation of port service operation based on AIS data [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2023. (in Chinese)
- [25] 白响恩,李博翰,徐笑锋,等.基于 AIS 数据的航运物流港口调度优化研究[J].包装工程,2023,44(5):211-221.
BAI X E, LI B H, XU X F, et al. Scheduling optimization of shipping logistics port based on AIS data [J]. Packaging Engineering, 2023, 44(5) : 211-221. (in Chinese)
- [26] 闫博,孙世成,李祖权.船舶自动识别系统(AIS)在