



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860,CN 42-1676/TN

## 《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目：红海袭击事件波及的全球战略物资海运网络变化分析  
作者：禹佳宁，方志祥，胡筱渊，余红楚，王中元  
DOI：10.13203/j.whugis20240099  
收稿日期：2024-09-11  
网络首发日期：2024-10-11  
引用格式：禹佳宁，方志祥，胡筱渊，余红楚，王中元. 红海袭击事件波及的全球战略物资海运网络变化分析[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).  
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20240099>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20240099

引用格式：

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, DOI: 10.13203/j.whugis20240099 (YU Jianing, FANG ZhiXiang, HU Xiaoyuan, 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, DOI: 10.13203/j.whugis20240099)

## 红海袭击事件波及的全球战略物资海运网络变化分析

禹佳宁<sup>1</sup>, 方志祥<sup>1</sup>, 胡筱渊<sup>2</sup>, 余红楚<sup>3</sup>, 王中元<sup>4</sup>

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 湖北, 430079

2 中交通信大数据(上海)科技有限公司, 上海, 200000

3 武汉理工大学航运学院, 武汉 湖北, 430079

4 南京工业大学测绘科学与技术学院, 南京 江苏, 210000

**摘要：**海运作为全球贸易的主要运输方式，其安全性对国际交易至关重要。近期红海地区袭击事件严重威胁了该关键航道的通行安全，对全球战略物资供应链产生了较大影响。以全球船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)数据为基础，构建了涉及红海的典型全球战略物资海运网络，并针对该网络从海运航线、战略物资、海运网络等角度，分析了红海袭击事件所波及的战略物资海运网络变化，得出了一些重要结论：在航线变化方面，亚洲和非洲的国家日均航次数量未受到影响，其他大洲均呈数量下降趋势，但所针对国家的平均降幅显著大于其他国家；在战略物资方面，铁矿石、原油和液化石油气(Liquefied Petroleum Gas, LPG)运输量显著减少，液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)的日均运输量未受影响；在海运网络演变层面，不同的战略物资网络呈现出了不同的变化特征，其中铁矿石显示出较高的稳定性，能源类物资(LNG、LPG)呈现出了中等程度的稳定性，粮食海运网络的波动性最强。研究结果有助于理解突发地缘政治事件对国际战略物资流动和全球供应链稳定性的潜在影响，对全球化背景下维护全球贸易流动和供应链稳定具有重要参考价值。

**关键词：**战略物资；海运网络；网络变化；红海海域

## Analysis of Changes in Maritime Transport Networks for Strategic Materials Affected by Attacks in the Red Sea

YU Jianing<sup>1</sup> FANG Zhixiang<sup>1</sup> HU Xiaoyuan<sup>2</sup> YU Hongchu<sup>3</sup> WANG Zhongyuan<sup>4</sup>

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

收稿日期：2024-09-11

基金项目：国家重点研发计划(2023YFB3906703)。

第一作者：禹佳宁，博士生，研究方向为全球海运分析。yujianing@whu.edu.cn

通讯作者：方志祥，博士，教授。zxfang@whu.edu.cn

2 CTTIC Smart Data Co., Ltd., Shanghai 200000, China

3 School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430079, China

4 School of Geomatics Science and Technology, Nanjing University of Technology, Nanjing 210000, China

**Abstract:** As a critical mode of transportation for global trade, the security of maritime shipping is essential to international commerce. Recent armed conflicts in the Red Sea region have significantly endangered the safe passage through this vital shipping lane and have had profound effects on the global supply chain of strategic commodities. Although an increasing volume of research focuses on tracking and analyzing the long-term impacts of the shipping system following major events, there remains an urgent need to swiftly capture and analyze real-time conflicts. Such research is critical for timely responses to the challenges confronting the maritime system, thus helping to mitigate negative impacts. We first analyze changes in the number of shipping routes to assess the impact on countries across different geographic regions and geopolitical relations worldwide. Next, based on material transport changes, we evaluate shifts in the tonnage of five strategic materials and the weighted importance of these materials. Furthermore, by examining alterations in the strategic materials maritime network, we identify the affected nodes and edges in the network. Subsequently, we assess the evolution patterns of five strategic material networks by analyzing changes in network indicators. Experiment results show that: in terms of affected maritime routes, there was no decline in the number of average daily voyages for countries in Asia and Africa, while all other continents experienced a decreasing trend in voyages. The rate of decline among affected countries was notably more significant compared to unaffected ones. From the perspective of strategic materials, iron, crude oil, and LPG shipments dominated the traffic. Except for LNG, which exhibited an increase in average daily traffic, other strategic materials displayed a similar downward trend by the end of the quarter. At the network evolution level, the core nodes of the maritime network remained stable in the face of shocks. Different strategic material networks demonstrated distinct adaptation patterns, with grain and LPG networks showing an increase in the average shortest path compared to the pre-shock period, while crude oil, LPG, and iron ore networks exhibited a more aggregated and short-distance adaptation pattern. Iron ore demonstrated high stability, energy materials (LNG, LPG, and crude oil) exhibited moderate stability, and the food maritime network was the most volatile. In short, we captured and analyzed the impacts of unforeseen events on the maritime transport network in a timely manner by integrating data from various sources and employing a limited time window and geographic scope approach. The assessment reveals significant disruptions in global transport patterns within the Red Sea region, highlighting the importance of maintaining global trade flows and supply chain stability in the context of globalization.

**Keywords:** strategic materials, maritime transport networks, network changes, Red Sea

海洋运输在全球贸易与经济发展中扮演着至关重要的角色<sup>[1]</sup>。作为最经济高效的跨国货物运输方式，它支撑了 90% 的国际贸易量<sup>[2]</sup>。对于能源供应的稳定性至关重要，特别是石油和天然气等能源的国际贸易几乎完全依赖于海上运输。然而，海洋运输也面临诸多挑战，包括环境影响、航运安全和地缘政治风险<sup>[3-6]</sup>，这些因素需要国际社会的共同努力来应对。因此，维持和提升海洋运输的效率与安全性，对于促进全球经济的持续健康发展具有重大意义。

近年来，重大事件对航运影响的研究在国际物流与供应链管理领域受到广泛关注。分别从港口运营、航线效率以及区域航运网络等多个层面，采用了模拟建模、风险评估等多种方法来探究影响的程度和性质<sup>[7-10]</sup>。在港口和航线层面，研究集中于评估由自然灾害、政治冲突或经济危机等重大事件导致的运营中断、效率下降及经济成本<sup>[11-14]</sup>。例如，Cao<sup>[15]</sup>等人研究了风暴造成延误和港口基础设施崩溃，Rosoff<sup>[16]</sup>的风险分析探讨了港口关闭和相关成本，

甚至展示船舶在遇到挑战时如何通过调整航线来减少拥堵和经济损失。在宏观区域网络层面，研究聚焦于航运网络的整体脆弱性和韧性<sup>[17-19]</sup>。如利用复杂网络分析和系统动力学模型，评估外部冲击如何影响整个网络的效率和稳定性<sup>[20-22]</sup>，港口和航运公司采取策略对网络运行保障的重要性<sup>[23]</sup>、面临外部压力时海运网络设计和管理策略在增强韧性方面的作用<sup>[24]</sup>。虽然对全球航运系统在遭遇重大事件之后的长期影响跟踪和分析研究逐渐丰富，但快速捕捉并分析红海袭击等突发事件对全球航运网络系统的影响，仍是当前研究所面临的研究挑战。

红海作为连接亚洲与欧洲的海上关键通道，对于全球贸易尤其是油轮运输具有不可替代的作用<sup>[25]</sup>。苏伊士运河的存在使得红海成为亚洲与欧洲之间最短的海上路线，极大地促进了东西方之间的贸易往来<sup>[26]</sup>。然而，近年来中东区域冲突频发，严重威胁到了航道的安全与畅通，引起了国际社会的广泛关注。新一轮巴以冲突去年 10 月爆发后，红海水域船只被袭击事件频繁发生，对全球经济与物资供给造成了巨大影响。数据显示：袭击造成的船舶绕航使亚洲和欧盟之间的航运时间增加了 10 至 15 天，运输成本增加大约 400%。根据 Kpler 的船舶追踪数据显示：2024 年 1 月从美国到亚洲的原油装载量较 2023 年 12 月骤降逾三分之一。欧盟和黑海地区的粮食经红海出口亚洲和东非的路线受到影响，加剧了市场对全球粮食安全的担忧<sup>[27]</sup>。然而，对于红海袭击事件的综合性影响及其对全球海运网络运行模式可能带来的变化，目前探讨仍显不足。亟需深入分析红海地区的地理政治复杂性及其在全球航运网络中的作用，从而为全球航运业务的稳健规划与决策提供更为全面的理论依据和实践指导。

本研究以红海袭击事件为例，提取事件波及的航线和国家作为研究对象，对事件前、中、后期的海运航线、战略物资以及海运网络的变化进行了深入分析。旨在探讨突发地缘冲突事件下战略物资海运网络模式的变化及其规律，以期获得对红海冲突波及范围、不同国家及区域受影响程度的深入理解。通过集成多源数据，及时捕捉和理解突发事件对海运网络的影响。本文的实证研究揭示了红海地区全球运输格局的扰动，为全球海运网络和供应链稳定性面对地缘政治挑战时的应对提供了可行的理解和分析框架。

## 1 全球重要战略物资运输网络分析方法

### 1.1 研究框架

本研究从波及的航线数量、物资运输、海运网络三个方面对红海袭击事件波及的战略物资海运网络的变化进行了分析（图 1）。首先，本研究基于航线数量变化，分析了全球位于不同地理区位的国家、处于不同地缘关系中国家的变化；其次，基于物资运输变化，分析了 5 种战略物资运输吨位及物资重要性加权吨位的变化；最后，通过研究战略物资海运网络的变化，识别了战略物资网络中波及的国家节点和路径。通过分析网络拓扑结构指标的变化，评估了 5 种战略物资网络的演变模式。综合考虑了运输、结构两方面的影响，从受影响的节点国家、航线、网络结构指标等方面评估了各类战略物资的不稳定性。

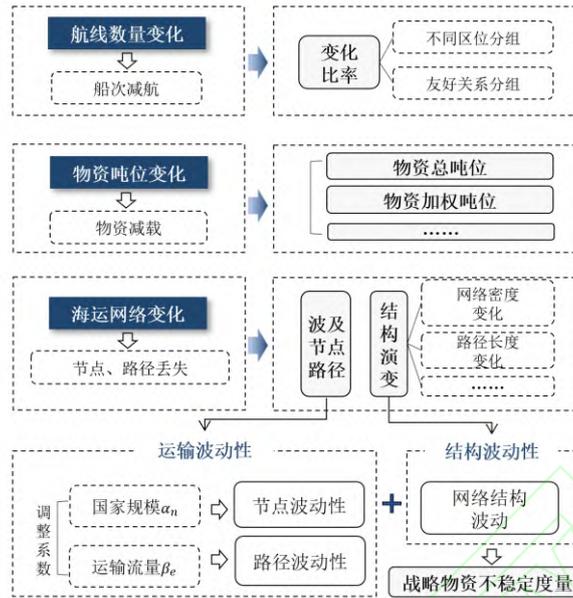


图 1 研究框架  
Fig. 1 Research Framework

## 1.2 数据集与网络构建

船舶和港口装备的自动识别系统 (Automatic Identification System, AIS), 为实时跟踪船舶提供了技术支持<sup>[28]</sup>。本研究所使用的 AIS 数据、全球港口呼叫数据及船舶信息数据 (含携带货种字段) 来自中交通信大数据科技有限公司, 船舶载重吨位信息来自船讯网。此外, 根据袭击行动及船舶响应情况, 研究被划分为 3 个时间段, 季度前期 (2023-10-01 至 2023-11-13) 袭击尚未开始; 季度中期 (2023-11-14 至 2023-12-15), 红海区域持续发生袭击事件; 季度后期 (2023-12-16 至 2024-01-09), 马士基、赫伯罗特、地中海航运公司及达飞海运集团分别于 2023 年 12 月 15 日、16 日宣布调整航线或暂停航行。这 4 家航运公司合计占据了全球航运市场的 53.8% 的份额, 鉴于他们的市场影响力及此决策对全球航运的显著影响, 将 12 月 16 日确定为第三个时间段的开始。

为了准确构建涉及红海的海运网络, 对船舶轨迹进行如下处理和提取: 首先, 根据 AIS 的轨迹定位确定了目标时间内途径红海区域的船舶, 共涵盖了全球 8570 个主要港口的 3583 艘船舶数据。然后基于船舶唯一水上移动通信业务标识码 (Maritime Mobile Service Identify, MMSI) 索引匹配了港口停靠时间, 识别了每艘船舶的挂靠港顺序, 形成港口到港口的起始序列, 经过初步数据清洗, 船舶携带了液化天然气 (Liquefied Natural Gas, LNG)、液化石油气 (Liquefied Petroleum Gas, LPG)、粮食、铁矿石、原油、集装箱、铝矿石、铜矿石和其他 7 类物资信息 (表 1)。本研究提取了战略物资 (LNG、LPG、粮食、铁矿石和原油) 轨迹作为实验对象。

表 1 船舶携带物资种类与数量  
Tab.1 Types and Quantities of Material Carried by Ships

战略种类	物资名称	船舶数量	航线数量
战略物资	LNG	106	75
	LPG	156	135
	粮食	53	43
	铁矿石	1490	1025
	原油	617	453

	集装箱	81	79
其他物资	铝矿石	5	4
	铜矿石	28	26
	其他	1047	863

基于上述船舶轨迹数据构建国家尺度的海运网络及战略物资子网络。参考城市交通流网络建模及分析方法<sup>[29-31]</sup>。首先，提取处理后的包含时间戳的战略物资轨迹信息，每条轨迹代表一艘船在一段时间内的移动路径。其次，进行矩阵构建与降维：（1）构建港口-国家映射矩阵（P-C Matrix）：创建一个映射矩阵  $M$ ，其中行代表港口，列代表国家。如果港口  $i$  属于国家  $j$ ，则  $M_{ij}=1$ ，否则  $M_{ij}=0$ 。（2）构建港口连接矩阵（P-P Matrix）：基于港口间活动时间序列，构建港口连接矩阵  $A$ ，其中  $A_{ij}$  代表港口  $i$  和港口  $j$  之间的连接强度（航程数）。

（3）计算国家连接矩阵（C-C Matrix）：通过矩阵运算  $M^T A M$ ，可以得到国家之间的连接矩阵  $B$ 。 $M^T$  是映射矩阵  $M$  的转置，对于矩阵中的每个元素，计算两个国家之间所有港口对的航运活动强度总和。即将原始矩阵中属于同一国家的港口行和列进行汇总。港口层面的连接强度被聚合到国家层面， $B_{kl}$  表示国家  $k$  和国家  $l$  之间的连接总强度。最后，以国家为节点，国家间的连接强度为边权重，构建了反映国家间海运活动的网络。在国家尺度网络的基础上，识别了五种关键物资类型，构建了战略物资子网络。

### 1.3 航线流向变化分析

计算前、中、后期船只流向变化，包括各国港口纳入船只数量变化  $\Delta Q$  和升降比率  $R$ 。根据目的地将国家分为若干分类，对于每一类  $k$ （如地理区域、地缘关系），计算该类内所有国家船只数量的总变化  $\Delta Q_k$  和该类的平均升降比率  $R_k$ 。其中， $Q_{pre,j}$  和  $Q_{post,j}$  分别代表事件前后特定国家  $j$  接收的战略物资船只数量， $j \in k$  表示属于类别  $k$  的所有国家。

$$\Delta Q_k = \sum_{j \in k} (Q_{post,j} - Q_{pre,j}) \quad (1)$$

$$R_k = \left( \frac{\sum_{j \in k} (Q_{post,j} - Q_{pre,j})}{\sum_{j \in k} Q_{pre,j}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

### 1.4 物资运输变化分析

在物资运输变化分析中， $\Delta T_i$  表示物资的吨位变化，其中， $T_{i,pre}$  和  $T_{i,post}$  分别代表事件前后第  $i$  种物资的吨位。总吨位和加权总吨位分别表达为  $\Delta T_{total}$  和  $\Delta T_{weighted}$ 。基于战略物资对民生影响的紧迫程度不同，给定每种物资定义权重调整  $w_i$ ，权重调整基于物资的经济贡献、民生影响、替代品的可用数量及价格波动性四个关键维度综合确定。这些维度的评估由相关领域的专家通过打分方式完成，每个维度的得分进行加权平均，从而得出每种战略物资的综合权重系数。权重调整能够综合反映每种物资的战略价值，并确保研究结果的科学性和实用性。

$$\Delta T_i = T_{i,\text{post}} - T_{i,\text{pre}} \quad (3)$$

$$\Delta T_{\text{total}} = \sum_{i=1}^5 \Delta T_i \quad (4)$$

$$\Delta T_{\text{weighted}} = \sum_{i=1}^5 w_i \cdot \Delta T_i \quad (5)$$

本研究引入了战略物资总影响指标  $Impact_{\text{country}}$ ，该指标通过计算每种物资在特定国家的吨位变化差值  $\Delta T_{i,\text{country}}$ ，并结合相应的权重进行加权累加得出。这一过程充分考虑了不同物资对各国影响的差异性，确保了  $Impact_{\text{country}}$  能够准确反映各国受战略物资变动影响的实际情况。

$$Impact_{\text{country}} = \sum_{i=1}^5 w_i \cdot \Delta T_{i,\text{country}} \quad (6)$$

## 1.5 海运网络变化分析

### (1) 网络节点与路径变化

对于网络波及国家和区域程度，通过网络边减少的数量  $\Delta Edges$  进行计算，其中  $Edges_{\text{pre}}$  和  $Edges_{\text{post}}$  分别代表打击前后的网络边（航线）总数。计算打击前后涉及的国家数量变化。对比袭击前后的网络，识别袭击后不再出现的边  $Edges_{\text{lost}}$ 。其中  $Edges_{\text{lost}} = \{e \in Edges_{\text{pre}} \mid e \notin Edges_{\text{post}}\}$ ，提取丢失连边相关的国家和战略物资信息，分析其受影响的关键国家、主要受影响的物资种类等。

$$\Delta Edges = Edges_{\text{pre}} - Edges_{\text{post}} \quad (7)$$

### (2) 网络结构变化

将地理空间特征信息的内涵延伸到网络空间<sup>[32]</sup>，对于动态网络，涉及时间因素的指标有网络密度、聚类系数、平均路径长度以及平均偏心率。这些时间相关的指标能够揭示网络随时间演化的态势，包括网络连接的紧密程度、局部结构的紧密性和信息流通的效率等方面的动态变化<sup>[17]</sup>。具体如下：

网络密度测量了给定时间点  $t$  上网络中实际连接数与可能的最大连接数之间的比率。它反映了网络的稠密程度，即网络中节点间连接的紧密性。  $E(t)$  是时间  $t$  下网络中的边数，  $n(t)$  是网络中的节点数。

$$D(t) = \frac{2E(t)}{n(t)[n(t)-1]} \quad (8)$$

聚类系数是度量网络中节点倾向于形成紧密连接群体的程度。在时间  $t$ ，聚类系数考

虑了每个节点  $i$  的局部结构，其中  $T_i(t)$  是节点  $i$  的邻居在时间  $t$  存在的边的数量， $k_i(t)$  是节点的度（即连接数）。

$$C(t) = \frac{1}{n(t)} \sum_{i=1}^{n(t)} \frac{2T_i(t)}{k_i(t)[k_i(t)-1]} \quad (9)$$

平均路径长度测量的是给定时间点  $t$  上网络中所有节点对之间最短路径的平均长度。这反映了网络中信息或资源传输的效率， $d_{ij}(t)$  表示节点  $i$  和  $j$  在时间  $t$  的最短路径长度。

$$L(t) = \frac{1}{n(t)[n(t)-1]} \sum_{i \neq j} d_{ij}(t) \quad (10)$$

平均偏心率是网络中所有节点偏心率的平均值。节点的偏心率是指该节点到网络中其他所有节点最短路径中的最大值。在时间  $t$ ，平均偏心率提供了一个衡量网络中节点可达性的指标， $\epsilon_i(i)$  是节点  $i$  在时间  $t$  的偏心率。这个指标反映了从任意节点出发，到达网络中任意其他节点所需的最大路径长度的平均情况。

$$E(t) = \frac{1}{n(t)} \sum_{i=1}^{n(t)} \epsilon_i(i) \quad (11)$$

### (3) 战略物资网络不稳定性

为了评估不同战略物资网络的变化情况，基于网络节点（国家/港口）和边（航线）、网络联通性指标、网络聚集性指标、网络变化值的计算，并考虑国家人口和航线上的流动频次作为调整系数，计算网络波动性指标  $I$ 。

$$I = \sum_{i=1}^5 w_i \left( \frac{\sum_n \alpha_n \cdot \Delta Nodes_{i,n}}{Node_{i,original}} + \frac{\sum_e \beta_e \cdot \Delta Edges_{i,e}}{Edge_{i,original}} + \Delta C + \Delta L \right) \quad (12)$$

其中， $w_i$  是第  $i$  种战略物资的基本重要性权重，反映了其对网络不稳定性的基本贡献。

$\Delta Nodes_{i,n}$  和  $\Delta Edges_{i,e}$  分别代表与第  $i$  种战略物资相关的网络中节点和边的变化数量。 $\alpha_n$  和

$\beta_e$  分别是节点和边的调整系数，系数  $\alpha_n$  由节点对应国家的人口规模确定，反映了国家的社

会规模，系数  $\beta_e$  基于两国之间的航线频次计算，从而衡量了国际航线的重要性。因此，

$\frac{\sum_n \alpha_n \cdot \Delta Nodes_{i,n}}{Node_{i,original}}$  和  $\frac{\sum_e \beta_e \cdot \Delta Edges_{i,e}}{Edge_{i,original}}$  分别度量了节点、路径的波动性。 $\Delta D$ 、和  $\Delta L$  分别为

事件前后聚类系数、平均路径长度的变化量，表示了网络聚集和效率的波动性。

## 2 红海袭击事件波及的全球重要战略物资运输网络变化

### 2.1 波及的海运航线变化

图 3 给出了通过红海区域的全球航程数据变化情况，在季度前期（袭击事件发生之前），

中国、美国、西班牙、新加坡、印度、韩国、土耳其、阿联酋 8 个国家在红海的航行活动中占比达到了 51.23%；在季度中期，中国仍然保持领先的通航量，但美国、新加坡和韩国的位次有所下降（分别由第 2 位降至第 3 位、第 4 位至第 7 位、第 6 位至第 11 位）；在季度后期，沙特阿拉伯、印度、美国、中国、阿联酋、土耳其、俄罗斯、新加坡 8 个国家占据了通过红海 53.66% 的运输量。



Fig.2 Comparison of Daily Average Voyage Numbers of Countries in Three Periods

自红海袭击事件以来，所波及的国家包括：澳大利亚、巴林、巴拿马、比利时、丹麦、德国、荷兰、加拿大、美国、挪威、日本、希腊、新加坡、新西兰、以色列、意大利。所波及的国家前中期到后期日均减幅整体达到了 24.12%，英国、澳大利亚和巴拿马的航程数量减幅尤为显著（图 3）；其他未波及国家的整体幅度相对较小（3.19%）（表 2）。从地理分布来看（表 3），大洋洲与南美洲国家通行红海区域的船舶活动日均减幅较大（62.17%和 61.29%），但非洲和亚洲分别出现了 28.43%和 7.95%的增长。



图 3 三个时期国家日均航程数量分布

Fig.3 Distribution of Daily Average Voyage Numbers of Countries in Three Periods

表 2 涉事国家与其他国家平均航次

Tab.2 Average Number of Voyages for the Countries Involved and Other Countries

国家	国家数量 (个)	季度前期 (次/国)	季度中期 (次/国)	季度后期 (次/国)	减幅 (%)	日均减幅 (%)
涉事国家	17	18.88	17.24	9.18	49.17%	24.12%
其他国家	94	7.50	9.01	5.47	33.74%	3.19%

表 3 不同地理位置下国家平均航次

Tab.3 Average Number of National Voyages in Different Geographical Locations

位置	国家数量 (个)	季度前期 (次/国)	季度中期 (次/国)	季度后期 (次/国)	减幅 (%)	日均减幅 (%)
北美洲	14	9.86	6.36	4.43	45.38%	16.19%
大洋洲	3	7.33	3.67	1.33	75.82%	62.17%
非洲	29	3.07	2.93	2.59	13.67%	-28.43%
南美洲	7	4.00	0.86	0.57	76.54%	61.29%
欧洲	27	8.67	12.63	5.59	47.51%	24.43%
亚洲	31	16.61	16.52	12.06	27.20%	-7.95%

## 2.2 波及的战略物资变化

表 4 给出了通过红海区域的战略物资运输航程及吨位的变化,其中,加权吨位是对原始运输吨位数据的调整值,综合经济贡献与民生影响等多重因素,LNG、LPG、原油、粮食和铁矿石的权重调整系数分别为 0.9、0.8、1、1 和 0.73。铁矿石、原油和 LPG 的运输量占据

主导地位，其加权吨位分别为 507309.1、98102、4850.4 万吨。对比季度前中期至后期的变化，LPG 的日均加权吨位减幅最为显著 (22.64%)，LNG 的运输日均加权吨位增长了 9.71%，（表 5）。分析各国的物资运输变化情况，物资变化中约 67% 的国家的变化幅度较小（航次变化在 5 次以下），此部分国家的减载在总体中所占比重较小。此分布说明，尽管许多国家参与了全球供应链，但大部分的物资减载集中在少数几个国家，少数国家的变动显著影响了全球战略物资的流动。

表 4 战略物资运输航程及吨位  
Tab.4 Voyages and Tonnage for Transport of Strategic Materials

战略物资	项目	季度前期	季度中期	季度后期
LNG	航程数量 (次)	33	39	27
	运输吨位 (万吨)	3267	3861	2673
	加权吨位 (万吨)	2940.3	3474.9	2405.7
LPG	航程数量 (次)	43	68	30
	运输吨位 (万吨)	6063	9588	4230
	加权吨位 (万吨)	4850.4	7670.4	3384
原油	航程数量 (次)	181	227	134
	运输吨位 (万吨)	98102	123034	72628
	加权吨位 (万吨)	98102	123034	72628
粮食	航程数量 (次)	14	21	12
	运输吨位 (万吨)	658	987	564
	加权吨位 (万吨)	658	987	564
铁矿石	航程数量 (次)	508	539	321
	运输吨位 (万吨)	694944	737352	439128
	加权吨位 (万吨)	507309.1	538267	320563.4

表 5 战略物资前中期至后期加权吨位减幅  
Tab. 5 Initial-medium to Late Reductions in Weighted Tonnage of Strategic Materials

减幅	LNG	LPG	原油	粮食	铁矿石
总体减幅	12.50%	22.97%	17.16%	15.71%	19.34%
日均减幅	-9.71%	22.64%	4.35%	1.48%	9.54%

从地理分布来看，全球各洲均出现了战略物资运输的变化（图 4），马来西亚、苏丹、加拿大和美国的铁矿石日均加权运输量增加了 867.31、805.36、5513.62、17098.41 万吨。土耳其、希腊和韩国的原油日均加权运输量增加了 2597.39、1892.38 和 482.37 万吨。中国和韩国的 LPG 日均加权运输量均增加了 2773.24 万吨。除上述国家在特定物种上出现了运输增加，其余国家均表现出战略物资减载的情形（图 5）。

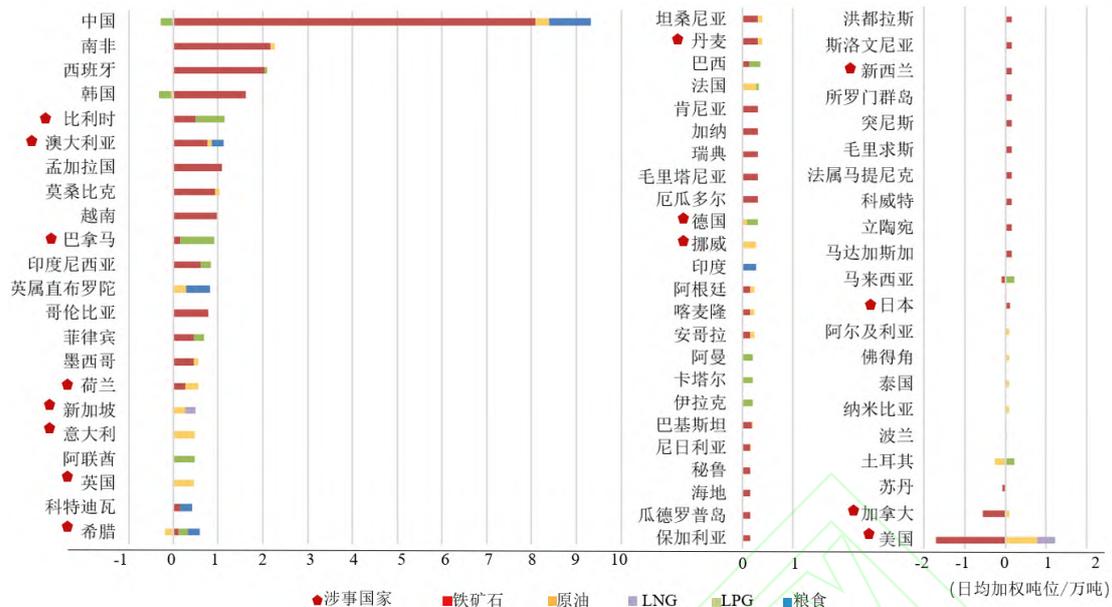


图 4 红海波及的战略物资日均加权吨位前期至后期变化对比

Fig.4 Comparison of Initial to Post Change in Red Sea-Impacted Per Day Weighted Tonnage of Strategic Materials

国家	铁矿石	原油	LPG	LNG	粮食	国家	铁矿石	原油	LPG	LNG	粮食
中国	80969.66	2968.44	-2773.24	0.00	9327.65	印度	0.00	0.00	0.00	0.00	2717.99
南非	21682.77	927.64	0.00	0.00	0.00	阿根廷	1548.77	927.64	0.00	0.00	0.00
西班牙	20381.81	0.00	519.98	0.00	0.00	喀麦隆	1548.77	927.64	0.00	0.00	0.00
韩国	16169.15	-482.37	-2773.24	0.00	0.00	安哥拉	1548.77	927.64	0.00	0.00	0.00
比利时	5018.01	0.00	6499.77	0.00	0.00	阿曼	0.00	0.00	2166.59	0.00	0.00
澳大利亚	7681.90	927.64	0.00	0.00	2717.99	卡塔尔	0.00	0.00	2166.59	0.00	0.00
孟加拉国	10841.39	0.00	0.00	0.00	0.00	伊拉克	0.00	0.00	2166.59	0.00	0.00
莫桑比克	9292.62	927.64	0.00	0.00	0.00	巴基斯坦	1920.47	222.63	0.00	0.00	0.00
越南	9664.32	0.00	0.00	0.00	0.00	尼日利亚	1548.77	222.63	0.00	0.00	0.00
巴拿马	1548.77	0.00	7539.74	0.00	0.00	秘鲁	1548.77	0.00	0.00	0.00	0.00
印度尼西亚	6133.13	0.00	2166.59	0.00	0.00	海地	1548.77	0.00	0.00	0.00	0.00
英属直布罗陀	0.00	2782.92	0.00	0.00	5435.98	瓜德罗普岛	1548.77	0.00	0.00	0.00	0.00
哥伦比亚	7743.85	0.00	0.00	0.00	0.00	保加利亚	1548.77	0.00	0.00	0.00	0.00
菲律宾	4646.31	0.00	2166.59	0.00	0.00	洪都拉斯	1548.77	0.00	0.00	0.00	0.00
墨西哥	4646.31	927.64	0.00	0.00	0.00	斯洛文尼亚	1548.77	0.00	0.00	0.00	0.00
荷兰	2601.93	2968.44	0.00	0.00	0.00	新西兰	1548.77	0.00	0.00	0.00	0.00
新加坡	0.00	2708.70	0.00	2168.39	0.00	所罗门群岛	1548.77	0.00	0.00	0.00	0.00
意大利	0.00	4860.83	0.00	0.00	0.00	突尼斯	1548.77	0.00	0.00	0.00	0.00
阿联酋	0.00	0.00	4853.16	0.00	0.00	毛里求斯	1548.77	0.00	0.00	0.00	0.00
英国	0.00	4638.19	0.00	0.00	0.00	法属马提尼克	1548.77	0.00	0.00	0.00	0.00
科特迪瓦	1548.77	0.00	0.00	0.00	2717.99	科威特	1548.77	0.00	0.00	0.00	0.00
希腊	1115.11	-1892.38	2166.59	0.00	2717.99	立陶宛	1548.77	0.00	0.00	0.00	0.00
坦桑尼亚	3097.54	927.64	0.00	0.00	0.00	马达加斯加	1548.77	0.00	0.00	0.00	0.00
丹麦	3097.54	927.64	0.00	0.00	0.00	马来西亚	-867.31	0.00	2166.59	0.00	0.00
巴西	1486.82	0.00	2166.59	0.00	0.00	日本	1053.16	0.00	0.00	0.00	0.00
法国	0.00	2782.92	519.98	0.00	0.00	阿尔及利亚	0.00	927.64	0.00	0.00	0.00
肯尼亚	3097.54	0.00	0.00	0.00	0.00	佛得角	0.00	927.64	0.00	0.00	0.00
加纳	3097.54	0.00	0.00	0.00	0.00	泰国	0.00	927.64	0.00	0.00	0.00
瑞典	3097.54	0.00	0.00	0.00	0.00	纳米比亚	0.00	927.64	0.00	0.00	0.00
毛里塔尼亚	3097.54	0.00	0.00	0.00	0.00	波兰	371.70	0.00	0.00	0.00	0.00
厄瓜多尔	3097.54	0.00	0.00	0.00	0.00	土耳其	0.00	-2597.39	2166.59	0.00	0.00
德国	0.00	927.64	2166.59	0.00	0.00	苏丹	-805.36	0.00	0.00	0.00	0.00
挪威	0.00	2782.92	0.00	0.00	0.00	加拿大	-5513.62	927.64	0.00	0.00	0.00
						美国	-17098.41	7829.27	0.00	4336.78	0.00

图 5 红海波及的战略物资日均加权吨位前期至后期变化分布

Fig.5 Distribution of Initial to Post Change in Red Sea-Impacted Per Day Weighted Tonnage of Strategic Materials

综合波及的海运航线及战略物资的变化情况发现：亚洲和非洲的国家平均日航次数量没有减少，其他大洲均呈数量下降趋势。红海袭击事件之后，战略物资的运输在全球受到广泛影响，除了 LNG 之外，其他物资运输均出现下降。涉及红海的全球贸易活动分布在全球，亚洲和欧洲的经济活动高度依赖于红海所连接的苏伊士运河航道，亚洲和欧洲对于通过红海传输的原油和天然气极为依赖。苏伊士运河的阻塞或关闭会迫使船只绕行非洲的好望角，大

幅增加运输成本和时间。美国及其他南美洲国家虽然在红海的直接依赖较低，但其船舶运输和战略物资运输需求量较高，特别是对中东石油的依赖。这种依赖关系强化了红海地区的战略重要性。

## 2.3 波及的海运网络分析

### 2.3.1 波及国家和区域程度

以国家为节点，航线为连边构建了涉及红海的海运网络（图 6），在流量分布上，亚洲与欧洲的国家表现尤为突出，其中中国、美国、新加坡、印度、西班牙、阿联酋、土耳其、沙特阿拉伯等国家的节点加权重度持续保持高位（图 7）。此外，季度后期共减少航线 438 条，覆盖了 101 个国家，航线权重为该航线承担的航程次数，减少航线中，权重为 1 的航线占比最高 78.10%，权重最高航线为中国至土耳其，该航线权重为 8（图 8）。

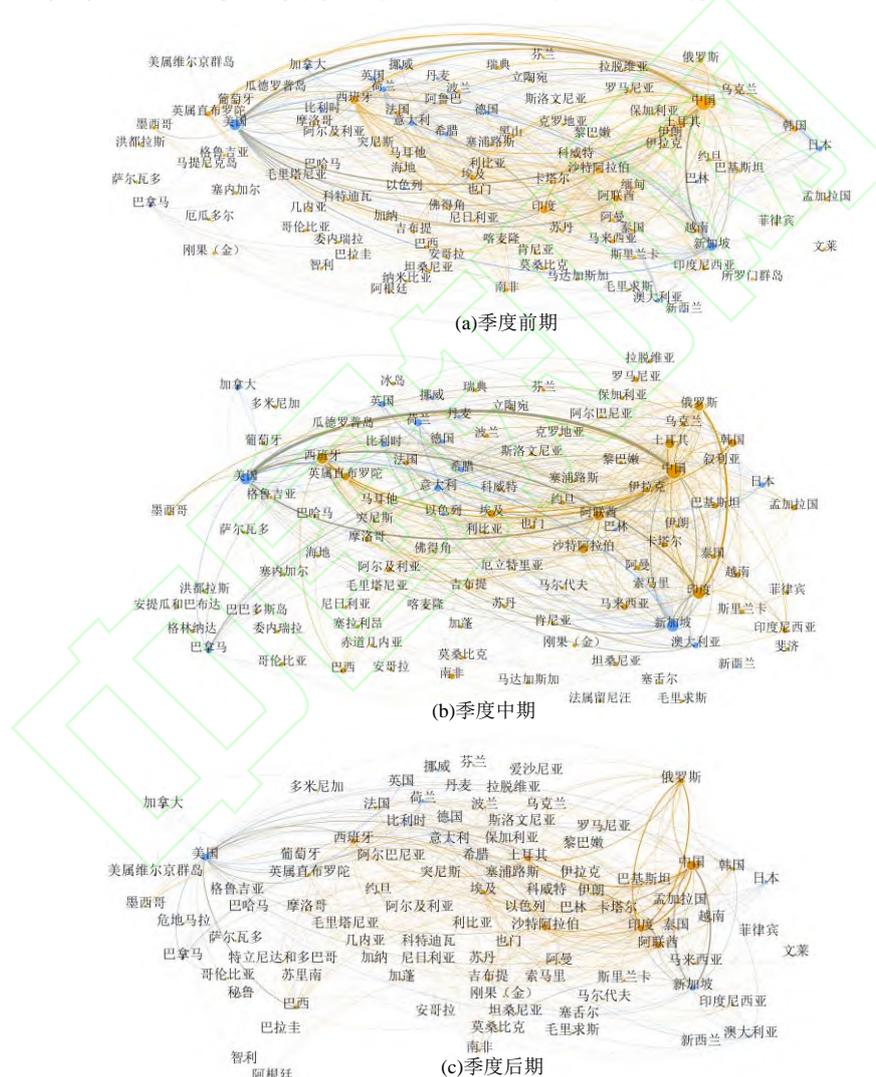


图 6 季度前期、中期、后期涉及红海的海运网络

Fig.6 Maritime Transport Networks Involving the Red Sea in the Early, Middle and Late Seasons

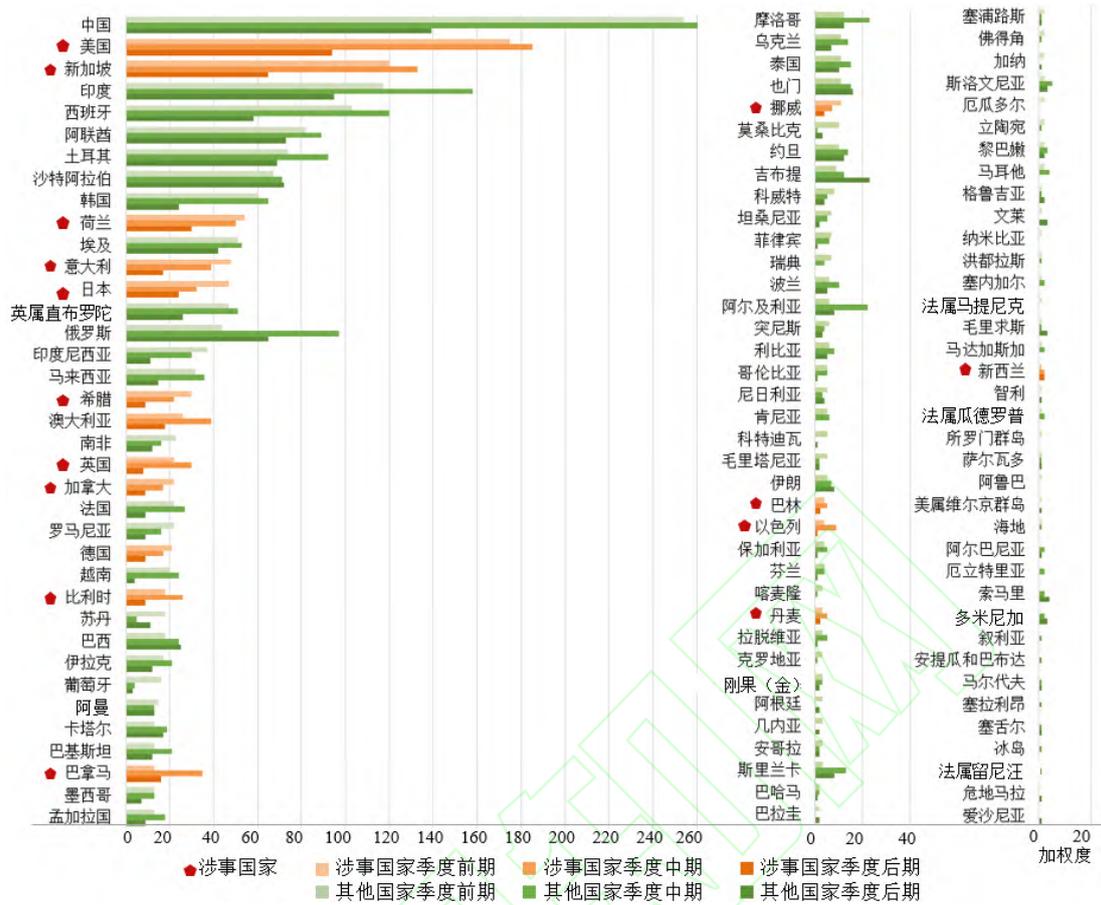


图 7 三个时期国家节点加权度

Fig. 7 Weighted degree of country nodes for Three Periods

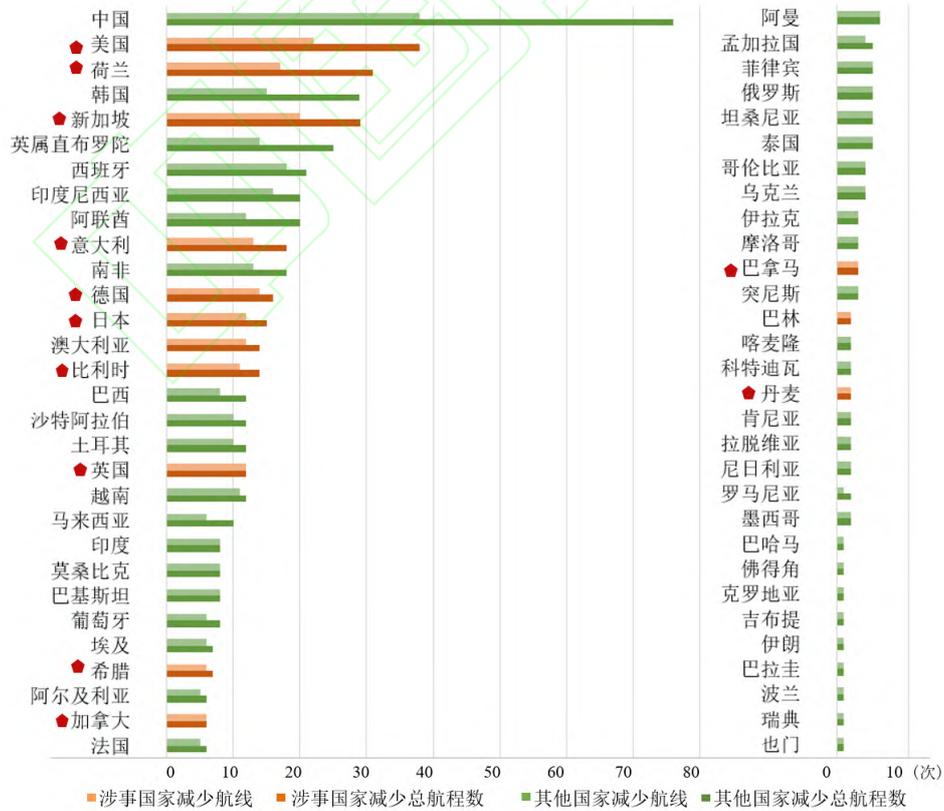


图 8 受影响的国家航线及航程数量

Fig. 8 Number of Affected Routes and Voyages

### 2.3.2 战略物资海运网络的结构适应分析

为了探讨袭击事件对途径红海地区海运网络格局的潜在影响，本研究通过网络密度、平均聚类系数、平均最短路径长度以及平均偏心率对其变化进行了综合评估（表 6）。红海区域的通行受阻并未造成明显的全球网络密度的变化。平均最短路径长度的变化揭示了网络在冲突环境下对停靠行为的适应性调整。粮食和 LPG 的平均最短路径长度的增加，表明了冲突后船舶选择了更长的航线。相反，铁矿石、LNG 和原油的平均最短路径长度减少，则反映了航行过程中相较之前缩短了航线，可能是减少了长途的运输，以应对长途运输路径的不稳定。这些调整直接影响了航线的选择与规划，进而对网络中的航线平均长度及整体运输效率产生了影响。此外，冲突还可能促成了周边海域及港口成为船舶更频繁聚集的地点，导致局部聚集性的增强，尤其是在铁矿石、LNG、原油等物资的海运网络中显著。所有类别物资在平均偏心率上的波动进一步表明，冲突对网络中关键节点地位产生了不同程度的影响。

综上，海运网络在遭遇外部扰动后所展现出了多样的变化。粮食和 LPG 海运网络呈现长途型运营模式。在这种模式下，平均最短路径长度增加，航线趋向长途。原油、LNG 及铁矿石海运网络则展现出了高聚集-短途型的适应模式，这种模式下，网络通过缩短路径来应对外部扰动，聚类系数的保持或提升表明网络内部节点间的联系不受影响或更加紧密，特别是在局部区域内。这些不同的适应模式反映了战略物资运输网络在应对外部扰动时的多样化策略和调整路径。这些策略的选择往往受到物资运输需求、市场特性以及风险承受能力的影响。例如，粮食和 LPG 等物资可能因市场需求波动较大或对运输成本敏感，而更倾向于采取延长航线模式。而原油和 LNG 等能源物资，由于其对全球经济的重要性及需求的稳定性，其运输网络则更倾向于缩短路径和加强节点间联系来确保供应安全。

表 6 打击前后不同物资网络结构  
Tab. 6 Structure of the Network for Different Materials Before and After Strikes

物资	时期	网络密度 (D)	平均聚类系数 (C)	平均最短路径长度 (L)	平均偏心率 (E)
铁矿石	季度前期	0.01	0.05	3.36	5.24
	季度中期	0.01	0.05	3.40	5.28
	季度后期	0.01	0.06	3.18	5.17
粮食	季度前期	0.04	0.03	4.45	8.21
	季度中期	0.02	0.02	5.77	10.47
	季度后期	0.02	0.00	6.63	13.47
LNG	季度前期	0.04	0.05	3.30	5.44
	季度中期	0.04	0.04	3.72	7.98
	季度后期	0.04	0.10	3.08	5.42
LPG	季度前期	0.02	0.05	3.49	5.70
	季度中期	0.02	0.08	3.66	6.43
	季度后期	0.02	0.05	3.73	6.26
原油	季度前期	0.01	0.07	3.29	5.84
	季度中期	0.01	0.11	3.17	5.35
	季度后期	0.01	0.14	2.92	5.02

### 2.3.3 战略物资海运网络的稳定性分析

本研究通过节点、路径和网络结构的变化，对五种战略物资运输网络的稳定性进行了评估（表 7）。结果表明，粮食海运网络由于承运国家（节点）、航线（路径）和效率的波动表现出了最为显著的不稳定性。这种不稳定可能与粮食运输通常依赖于固定的航线有关，面对

冲击时，固定的航线调整灵活性较小，且粮食货物性质难以长时间在途，这可能是导致节点和航线均发生了较大波动，运输效率和网络规模也发生了调整的原因，增强了网络的不稳定性。相比之下，铁矿石海运网络则展现出了较高的稳定性，这可能与铁矿石对运输船舶的要求较低，运输方式表现出较高的灵活性，且参与贸易国家分布广泛有关，这种特性使其在面临外部扰动时，能够灵活调整运输路径，有效分散风险，从而保持整体网络的稳定。能源类物资 LNG、LPG 和原油的海运网络稳定性则介于粮食和铁矿石之间，它们的稳定性受到网络结构的多样性、关键节点的影响力以及航线多元化等多重因素的共同制约，这些因素共同构成了网络在面对复杂地缘政治环境时的稳定性基础。

表 7 战略物资海运不稳定性

Tab. 7 Strategic Materials Maritime Transport Instability

战略物资	节点波动	路径波动	聚集波动	效率波动	整体不稳定性
铁矿石	0.10	0.23	0.14	0.00	0.47
粮食	1.00	1.00	0.43	1.00	3.43
LNG	0.06	0.15	0.71	0.02	0.93
LPG	0.00	0.80	0.00	0.03	0.83
原油	0.08	0.00	1.00	0.10	1.18

从战略物资海运网络变化来看，尽管面临冲突的直接冲击，中国、美国、新加坡、印度等仍保持了其在全球运输网络中的稳定地位。一方面，上述多数国家是世界上体量较大的经济体，国家经济规划和对外贸易活动体量极大，从而在全球海运网络中形成了重要的枢纽和节点。另一方面，上述国家在地理上处于交通要地，中国和新加坡位于亚洲的中心位置，靠近中国南海和马六甲海峡等关键航道，西班牙、土耳其和埃及则位于连接亚洲、非洲和欧洲的战略位置，如地中海和苏伊士运河。在红海袭击事件后，各类物资海运网络的稳定性显示出不同模式。食品（粮食）稳定性最差，能源（原油、LPG、LNG）稳定性中等，矿产（铁矿石）表现相对稳定。

这一现象展示了全球战略物资海运网络的韧性和集中化特征。尽管面临地缘政治冲突的直接挑战，关键节点国家仍由于其庞大的经济体量和战略地理位置，保持在全球运输网络中的核心地位。这突显了在当前的全球化经济架构中，这些大型经济体不仅是国际贸易的主要参与者，还是确保全球贸易流通与稳定的关键力量。此外，这种情况进一步强调了全球物流和供应链网络对这些战略节点的深度依赖，即便在外部压力和不稳定因素的影响下，全球海运网络中核心国家的战略位置仍对全球贸易网络具有决定性的影响。

### 3 结语

本文从海运航线、战略物资、海运网络变化等角度，分析了红海袭击事件所波及的海运网络变化，开展了突发地缘冲突下海运网络的变化模式和规律实证分析。主要结论如下：（1）在受影响的海运航线方面，发现亚洲和非洲的国家平均日航次数量上没有减少，其他大洲均呈数量下降趋势。且所针对国家的降幅相较于其他国家更为显著。（2）从战略物资的角度来看，铁矿石、原油和 LPG 的运输占比占据主导地位。除了 LNG 的日均运输量呈上升，其他战略物资运输量在季度后期呈现出类似的下降趋势。（3）在海运网络演变层面，面对冲击，网络核心节点组成国稳定，不同的战略物资网络呈现出了不同的变化，粮食和 LPG 网络呈现平均最短路径相较冲击前有所延长的状态，原油、LPG 和铁矿石呈现出聚集且短途的适应模式。铁矿石显示出较高的稳定性，能源类物资 LNG、LPG 和原油呈现出了中等程度的稳定性，粮食海运网络的波动性最强。本研究对于区域波及网络、短期窗口数据的处理，有助于对突发地缘事件影响进行即时评估，但未能深入揭示所有潜在的复杂交互和影响。在未

来的研究中,期望能够进一步开发海洋地缘环境实时监测系统,接入实时数据,考虑多源扰动耦合作用与海运周期趋势,优化评估模型,帮助决策者在面对复杂的国际事件时做出更快速、更精准的响应。

## 参考文献

- [1] Valentine V. F., Benamara H., Hoffmann J. Maritime transport and international seaborne trade[J/OL]. *Maritime Policy & Management*, 2013, 40(3): 226-242. DOI:10.1080/03088839.2013.782964.
- [2] Rousset L., Ducruet C. Disruptions in Spatial Networks: a Comparative Study of Major Shocks Affecting Ports and Shipping Patterns[J/OL]. *Networks and Spatial Economics*, 2020, 20(2): 423-447. DOI:10.1007/s11067-019-09482-5.
- [3] Jarumaneroj P., Ramudhin A., Barnett Lawton J. A connectivity-based approach to evaluating port importance in the global container shipping network[J/OL]. *Maritime Economics & Logistics*, 2023, 25(3): 602-622. DOI:10.1057/s41278-022-00243-9.
- [4] Saito T., Shibasaki R., Murakami S., et al. Global Maritime Container Shipping Networks 1969 - 1981: Emergence of Container Shipping and Reopening of the Suez Canal[J/OL]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(5): 602. DOI:10.3390/jmse10050602.
- [5] Fang Z., Yu H., Lu F., et al. Maritime network dynamics before and after international events[J/OL]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(7): 937-956. DOI:10.1007/s11442-018-1514-9.
- [6] Ye S., Luo X., Nan Y., et al. An improved star-borne GNSS-R convolutional neural network method for sea ice detection[J/OL]. *Journal of Wuhan University (Information Science Edition)*, 2024, 49(1): 90-99. DOI:10.13203/j.whugis20220585. (叶世榕, 罗歆琪, 南阳, 等. 一种改进的星载 GNSS-R 卷积神经网络海冰检测方法[J/OL]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, 49(1): 90-99. DOI:10.13203/j.whugis20220585.)
- [7] Wan C., Yan X., Zhang D., et al. Analysis of risk factors influencing the safety of maritime container supply chains[J/OL]. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 2019, 11(6): 476-507. DOI:10.1504/IJSTL.2019.103872.
- [8] Oliva S., Lazzaretto L. Adaptation, adaptability and resilience: the recovery of Kobe after the Great Hanshin Earthquake of 1995[J/OL]. *European Planning Studies*, 2017, 25(1): 67-87. DOI:10.1080/09654313.2016.1260093.
- [9] Paul J. A., Maloni M. J. Modeling the effects of port disasters[J/OL]. *Maritime Economics & Logistics*, 2010, 12(2): 127-146. DOI:10.1057/mel.2010.2.
- [10] Gao T., Lu J. The impacts of strait and canal blockages on the transportation costs of the Chinese fleet in the shipping network[J/OL]. *Maritime Policy & Management*, 2019, 46(6): 669-686. DOI:10.1080/03088839.2019.1594423.
- [11] Godoy L. A. Performance of Storage Tanks in Oil Facilities Damaged by Hurricanes Katrina and Rita[J/OL]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2007, 21(6): 441-449. DOI:10.1061/(ASCE)0887-3828(2007)21:6(441).
- [12] Wachtendorf T., Brown B., Holguin-Veras J. Catastrophe Characteristics and their Impact on Critical Supply Chains: Problematizing Materiel Convergence and Management Following Hurricane Katrina[J/OL]. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 2013, 10(2): 497-520. DOI:10.1515/jhsem-2012-0069.
- [13] Shen Z., Xu X., Li J., et al. Vulnerability of the Maritime Network to Tropical Cyclones in the Northwest Pacific and the Northern Indian Ocean[J/OL]. *Sustainability*, 2019, 11(21): 6176. DOI:10.3390/su11216176.
- [14] Xu H., Itoh H. Density economies and transport geography: Evidence from the container shipping industry[J/OL]. *Journal of Urban Economics*, 2018, 105: 121-132. DOI:10.1016/j.jue.2017.09.002.
- [15] Cao X., Lam J. S. L. Simulation-based catastrophe-induced port loss estimation[J/OL]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2018, 175: 1-12. DOI:10.1016/j.res.2018.02.008.
- [16] Rose A., Wei D. Estimating the Economic Consequences of a Port Shutdown: The Special Role of Resilience[J/OL]. *Economic Systems Research*, 2013, 25(2): 212-232. DOI:10.1080/09535314.2012.731379.
- [17] Wu D., Wang N., Yu A., et al. Vulnerability analysis of global container shipping liner network based on main channel disruption[J/OL]. *Maritime Policy & Management*, 2019, 46(4): 394-409. DOI:10.1080/03088839.2019.1571643.
- [18] Viljoen N. M., Joubert J. W. The vulnerability of the global container shipping network to targeted link disruption[J/OL]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2016, 462: 396-409. DOI:10.1016/j.physa.2016.06.111.
- [19] Guo J., Wang S., Wang D., et al. Spatial structural pattern and vulnerability of China-Japan-Korea shipping network[J/OL]. *Chinese Geographical Science*, 2017, 27(5): 697-708. DOI:10.1007/s11769-017-0903-9.
- [20] Wang N., Wu N., Dong L. L., et al. A study of the temporal robustness of the growing global container-shipping network[J/OL]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 34217. DOI:10.1038/srep34217.
- [21] Ducruet C., Notteboom T. The worldwide maritime network of container shipping: spatial structure and regional dynamics[J/OL]. *Global Networks*, 2012, 12(3): 395-423. DOI:10.1111/j.1471-0374.2011.00355.x.
- [22] Yang Z. L., Qu Z. Quantitative maritime security assessment: a 2020 vision[J/OL]. *IMA Journal of Management Mathematics*, 2016, 27(4): 453-470. DOI:10.1093/imaman/dpw005.
- [23] Shaw D. R., Grainger A., Achuthan K. Multi-level port resilience planning in the UK: How can information sharing be made easier?[J/OL]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2017, 121: 126-138. DOI:10.1016/j.techfore.2016.10.065.
- [24] Asadabadi A., Miller-Hooks E. Co-opetition in enhancing global port network resiliency: A multi-leader, common-follower game

- theoretic approach[J/OL]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 108: 281-298. DOI:10.1016/j.trb.2018.01.004.
- [25] Yang Y, Guo Y, Ju X, et al. Remote exploration of an important offshore channel: the Mandalay Channel[J]. China Mining Industry, 2023, 32(S1): 99-102. (杨怡, 郭雅, 鞠星, 等. 遥探境外重要海峡通道: 曼德海峡[J]. 中国矿业, 2023, 32(S1): 99-102.)
- [26] Guo J., Guo S., Lv J. Potential spatial effects of opening Arctic shipping routes on the shipping network of ports between China and Europe[J/OL]. Marine Policy, 2022, 136: 104885. DOI:10.1016/j.marpol.2021.104885.
- [27] Continued tensions in the Red Sea heighten risks to the global supply chain [EB/OL]. [2024-03-04]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1791465405832074169&wfr=spider&for=pc>. (红海局势持续紧张 全球供应链风险加剧 [EB/OL].)
- [28] Guo N., Xiong W., Ouyang X, et al. A multi-level similar sub-segment matching method for spatio-temporal trajectories[J/OL]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2022, 47(9): 1390-1397. DOI:10.13203/j.whugis20200170. (郭宁, 熊伟, 欧阳雪, 等. 时空轨迹多层次相似子段匹配方法 [J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(9): 1390-1397. DOI:10.13203/j.whugis20200170.)
- [29] Sheng Y, Bi S, Fan J, et al. Analysis of spatial and temporal patterns of traffic hotspots using traffic operation status indicators[J/OL]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2021, 46(5): 746-754. DOI:10.13203/j.whugis20190357. (盛宇裕, 毕硕本, 范京津, 等. 运用交通运行状况指标分析交通热点时空模式[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(5): 746-754. DOI:10.13203/j.whugis20190357.)
- [30] Li Z, Wang J, Hu Y, et al. Rapid assessment of transportation network damage under the impact of widespread flooding[J/OL]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2023, 48(7): 1039-1049+990. DOI:10.13203/j.whugis20220512. (李振洪, 王建伟, 胡羽丰, 等. 大范围洪涝灾害影响下的交通网受损快速评估[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 1039-1049+990. DOI:10.13203/j.whugis20220512.)
- [31] Wan Y, Liu Y. A network community discovery algorithm based on geographically weighted center node distance[J/OL]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2019, 44(10): 1545-1552. DOI:10.13203/j.whugis20180025. (万幼, 刘耀林. 基于地理加权中心节点距离的网络社区发现算法[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(10): 1545-1552. DOI:10.13203/j.whugis20180025.)
- [32] Wang Y, Li S, Ren L, et al. A feature-oriented method for automatic synthesis of cyberspace point group elements[J/OL]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2021, 46(3): 427-433. DOI:10.13203/j.whugis20200002. (王映雪, 李少梅, 任丽秋, 等. 面向特征的网络空间点群要素自动综合方法[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(3): 427-433. DOI:10.13203/j.whugis20200002.)

### 网络首发:

标题: 红海袭击事件波及的全球战略物资海运网络变化分析

作者: 禹佳宁, 方志祥, 胡筱渊, 余红楚, 王中元

收稿日期: 2024-09-11

DOI:10.13203/j.whugis20240099

### 引用格式:

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, DOI: 10.13203/j.whugis20240099 (YU Jianing, FANG ZhiXiang, HU Xiaoyuan, 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, DOI: 10.13203/j.whugis20240099)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

### 您感兴趣的其他相关论文:

#### ICESat-2 高程信息辅助下的北极冰区航线规划

赵羲, 霍瑞, 陈亦卓, 马跃, 季青, 庞小平

武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(9): 1610-1620.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20210012>

#### 最大可航窗口序列约束贝塞尔曲线的无人船自主航行航线规划方法

周寅飞, 张立华, 贾帅东, 戴泽源, 董箭, 马梦锴  
武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(7): 1224-1236.  
<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220058>

