引文格式: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),2026,51(4):852-865.DOI:10.13203/j.whugis20240099

Citation: 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, 2026, 51(4):852-865. 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[1] 方志祥[1] 胡筱渊[2] 余红楚[3] 王中元[4]

1 武汉大学测绘遥感信息工程全国重点实验室,湖北 武汉,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,湖北 武汉,430079

4 南京工业大学测绘科学与技术学院,江苏 南京,210000

摘 要:海运是全球贸易的主要运输方式,其通行安全对国际贸易体系的稳定运行至关重要。红海海域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,从海运航线、战略物资以及海运网络等角度,分析了红海袭击事件对战略物资海运网络演变的影响。研究结果表明:在航线变化方面,亚洲和非洲国家日均航次数量未受明显影响,其他大洲国家的航次数量普遍呈下降趋势,且受影响国家的平均降幅显著高于未受影响国家;在战略物资方面,铁矿石、原油和液化石油气(liquefied petroleum gas,LPG)的运输量显著减少,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,其中铁矿石运输网络稳定性较高,能源类物资(LNG和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,为全球化背景下保障国际贸易通道安全和提升供应链稳定性提供参考。

关键词:战略物资;海运网络;网络变化;红海

中图分类号:P208 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-09-11

DOI:10.13203/j.whugis20240099 **文章编号**:1671-8860(2026)04-0852-14

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

YU Jianing[1] *FANG Zhixiang*[1] *HU Xiaoyuan*[2] *YU Hongchu*[3] *WANG Zhongyuan*[4]

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

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: **Objectives**: 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 safe passage through this vital shipping lane and have had profound effects on the global supply chain of strategic commodities. Given the Red Sea's strategic position linking Asia, Europe, and Africa, disruptions in this region could rapidly propagate across interconnected maritime networks, triggering cascading effects on global logistics systems and increasing systemic risks in international trade. Moreover, such disruptions could lead to route detours, increased transportation costs, and delays, thereby further exacerbating supply chain instability. Although an increasing volume of research has focused on tracking and analyzing

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

通信作者:方志祥,博士,教授。zxfang@whu.edu.cn

the long-term impacts of the shipping system following major events, there remained an urgent need to capture and analyze real-time conflicts. Such research was critical for enabling timely responses to the challenges confronting the maritime system, thus helping to mitigate negative impacts. In particular, the ability to conduct near-real-time monitoring and short-term impact assessment was essential for identifying early-stage disruptions and supporting rapid operational and policy responses. This shift from ex-post analysis to near-real-time evaluation represented an important advancement in maritime risk analysis. **Methods:** First, changes in the number of shipping routes were analyzed to evaluate the impact on countries across different geographic regions and geopolitical contexts, providing a macroscopic perspective on the redistribution of maritime flows. Second, shifts in the transport volume of five strategic materials were assessed by incorporating material-specific weights, enabling the evaluation of both quantity changes and their relative importance in global trade. Furthermore, changes in the maritime network of strategic materials were examined to identify affected nodes and edges. Network evolution patterns were then analyzed using key indicators, including network connectivity, path efficiency, and node centrality, to evaluate structural robustness and functional performance under external shocks. **Results:** The results showed that, in terms of affected maritime routes, there was no decline in the average daily number of voyages for countries in Asia and Africa, while all other continents experienced a decreasing trend. The rate of decline among affected countries was notably more significant than that among unaffected ones. This suggested that geographic proximity, trade intensity, and reliance on the Red Sea corridor played critical roles in determining the extent of disruption experienced by different regions. From the perspective of strategic materials, iron, crude oil, and liquefied petroleum gas (LPG) shipments dominated the traffic. Except for liquefied natural gas (LNG), which exhibited an increase in average daily traffic, other strategic materials displayed a similar downward trend by the end of the study period. The contrasting trend observed for LNG might have reflected adaptive rerouting strategies, shifts in energy demand structures, or substitution effects within global energy supply chains. At the network evolution level, the core nodes of the maritime network remained stable in the face of shocks. This stability indicated the resilience of major hub ports and their continued central role in sustaining global connectivity despite regional disruptions. Different strategic material networks demonstrated distinct adaptation patterns, with grain and LPG networks showing an increase in the average shortest path length compared to the pre-shock period, while crude oil, LPG, and iron ore networks exhibited a more aggregated and short-distance adaptation pattern. The increase in path length suggested reduced transport efficiency and potential detours, whereas aggregation indicated a tendency toward regionalization under constraints. Iron ore demonstrated high stability, energy materials (LNG, LPG, and crude oil) exhibited moderate stability, and the food maritime network was the most volatile. These differences highlighted the heterogeneous resilience of commodity-specific transport networks and reflected variations in supply chain flexibility and substitution capacity. In summary, we captured and analyzed the impacts of unforeseen events on the maritime transport network in a timely manner by integrating data from multiple sources and employing a limited time window and geographic scope. **Conclusions:** Compared with conventional post-event studies, this approach enabled faster detection of disruptions, improved the responsiveness of analytical frameworks, and provided more actionable insights for policymakers and industry stakeholders. Furthermore, it offered a scalable methodology for assessing similar geopolitical shocks in other critical transport corridors. The assessment revealed significant disruptions in global transport patterns in the Red Sea region, highlighting the importance of maintaining global trade flows and supply chain stability in the context of globalization. Overall, this study contributes to a deeper understanding of maritime network resilience and provides empirical support for enhancing risk management strategies in global shipping systems.

Key words: strategic materials; maritime transport networks; network changes; the 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[1]。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[2],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[3-6],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。研究者分别从港口运营、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[7-10]。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[11-14]。例如,文献[15]研究了风暴造成延误和港口基础设施崩溃,文献[16]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,如利用复杂网络分析和系统动力学模型[17-19]评估外部冲击对整个网络的效率和稳定性的影响[20-22],港口和航运公司采取策略对网络运行保障的重要性[23],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[24]。尽管近年来针对全球航运系统在遭遇重大事件后的长期影响开展了较为丰富的跟踪与分析研究,但如何快速捕捉并系统分析红海袭击等突发事件对全球航运网络运行状态的即时影响,仍是当前研究面临的重要挑战。

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[25]。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贸易往来[26]。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。相关数据显示,由于袭击导致的船舶绕航,亚洲与欧盟之间的航运时间延长了约10~15 d,运输成本增加大约400%。根据Kpler船舶追踪数据,2024-01从美国到亚洲的原油装载量较2023-12骤降超过1/3。欧盟和黑海区域的粮食经红海出口亚洲和东非的航线受阻,加剧了市场对全球粮食安全的担忧[27]。尽管红海袭击事件已引发广泛关注,但其综合性影响及对全球海运网络运行模式可能产生的结构性变化仍缺乏系统研究,亟需深入分析红海海域的地理政治复杂性及其在全球航运网络中的作用,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。

本文以红海袭击事件为例,提取事件波及的航线和相关国家,系统分析事件发生前、中、后不同阶段的海运航线、战略物资以及海运网络的变化特征,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。研究结果有助于深化对红海冲突波及范围及不同国家和区域受影响程度的理解,并为全球海运网络与供应链在应对地缘政治风险时的稳定运行提供可借鉴的分析框架。

1 全球重要战略物资运输网络分析方法

1.1 研究框架

本文从波及的航线数量、物资运输、海运网络3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,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。

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[28]。本文使用的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(上海)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,将研究划分为3个时间段:季度前期(2023-10-01—2023-11-13),袭击尚未开始;季度中期(2023-11-14—2023-12-15),红海区域持续

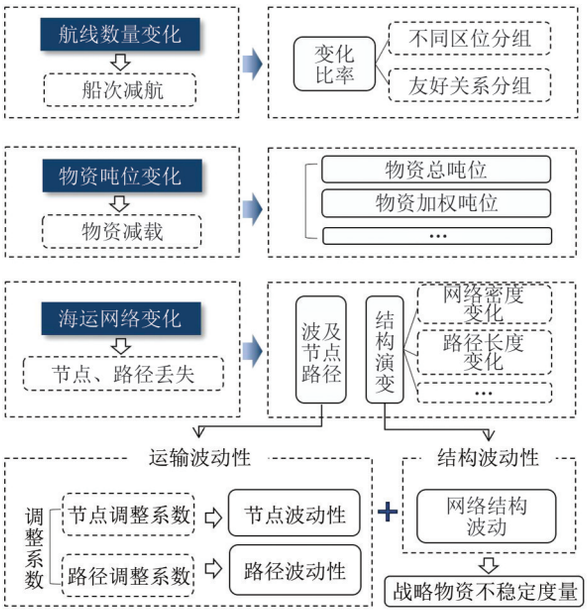


图 1　研究框架

Fig. 1　Research Framework

发生袭击事件;季度后期(2023-12-16—2024-01-09),马士基、赫伯罗特、地中海航运公司及达飞海运集团于2023-12-15和2023-12-16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,鉴于其在全球航运体系中的主导地位及相关决策对航运网络产生的显著影响,将2023-12-16确定为第3个时间段的开始时间。

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经红海区域的船舶,共涵盖了全球8 570个主要港口的3 583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、铜矿石和其他物资信息(表1)。本文提取了战略物资轨迹作为实验对象。

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[29-31],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。创建一个映射矩阵$\boldsymbol{M}$,其中行代表港口,列代表国家。

表 1　船舶携带物资种类与数量

Table 1　Types and Quantities of Material Carried by Ships

战略种类	物资名称	船舶数量/艘	航线数量/条
战略物资	LNG	106	75
	LPG	156	135
	粮食	53	43
	铁矿石	1 490	1 025
	原油	617	453
其他物资	集装箱	81	79
	铝矿石	5	4
	铜矿石	28	26
	其他	1 047	863

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。基于港口间活动时间序列,构建港口连接矩阵$\boldsymbol{A}$,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。通过矩阵运算$\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{M}$,可以得到国家之间的连接矩阵$\boldsymbol{B}$,$\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}}$是映射矩阵$\boldsymbol{M}$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。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。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5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

计算事件发生前、中、后期船只流向变化,包括各国港口纳入船只数量变化ΔQ和升降比率R。根据目的地将国家分为若干类,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ΔQ_k和该类的平均升降比率R_k:

$$\Delta Q_k=\sum_{j\in k}\left(Q_{\mathrm{post},j}-Q_{\mathrm{pre},j}\right) \tag{1}$$

$$R_k=\frac{\Delta Q_k}{\sum_{j\in k}Q_{\mathrm{pre},j}}\times 100\% \tag{2}$$

式中,$Q_{\mathrm{pre},j}$和$Q_{\mathrm{post},j}$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。

1.4　物资运输变化分析

在物资运输变化分析中,首先以吨位变化刻画不同物资在事件前后运输规模的变化。定义第i种战略物资的吨位变化为ΔT_i,$T_{i,\mathrm{pre}}$和$T_{i,\mathrm{post}}$分别表示事件发生前、后该物资的运输吨位,其

计算公式为:

$$\Delta T_i = T_{i,\text{post}} - T_{i,\text{pre}} \tag{3}$$

在此基础上,计算所有战略物资的总吨位变化总吨位ΔT_{total},用于表征整体运输规模的变化情况:

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

考虑到不同战略物资在经济发展和民生保障中的重要性存在显著差异,仅依赖总吨位变化难以全面反映其实际影响程度。为此,引入权重调整机制,对各类物资的吨位变化进行加权处理。针对每种战略物资赋予权重调整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4个关键维度综合确定。上述维度由相关领域专家通过评分方式进行评估,并采用加权平均的方法确定各战略物资的综合权重系数。基于此,计算加权总吨位变化$\Delta T_{\text{weighted}}$:

$$\Delta T_{\text{weighted}} = \sum_{i=1}^{5} w_i \Delta T_i \tag{5}$$

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。

进一步引入战略物资总影响指标I_{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,具体表达式为:

$$I_{\text{country}} = \sum_{i=1}^{5} w_i \Delta T_{i,\text{country}} \tag{6}$$

该指标充分考虑了不同物资对各国影响的差异性,能够较为准确地反映红海袭击事件背景下,各国在战略物资供给层面所承受的综合冲击。

1.5 海运网络变化分析

1.5.1 网络节点与路径变化

为刻画节点在网络中联系强度的变化,引入节点加权度指标。节点加权度反映某一国家节点与其他节点之间航运联系的总强度,能够揭示事件冲击下节点地位和运输功能的变化。对于节点i,其加权度s_i定义为:

$$s_i = \sum_{j \in N_i} w_{ij} \tag{7}$$

式中,N_i表示与节点i相连的邻接节点集合;w_{ij}表示节点i与节点j之间边的权重。根据研究对象不同,边权重可定义为航次数或运输量等指标。

对于网络波及国家和区域范围的影响,通过网络边数量的变化来衡量网络结构的直接扰动程度。定义网络边(航线)数量变化为ΔE,其计算公式为:

$$\Delta E = E_{\text{pre}} - E_{\text{post}} \tag{8}$$

式中,E_{pre}和E_{post}分别代表袭击前后的网络边总数。计算袭击前后涉及的国家数量变化。对比袭击前后的网络,识别在事件发生后不再出现的网络边,定义为丢失边集合E_{lost}:

$$E_{\text{lost}} = \left\{ e \mid e \in E_{\text{pre}}, e \notin E_{\text{post}} \right\} \tag{9}$$

基于丢失边,提取相关国家和战略物资信息,分析受影响的关键国家及主要受冲击的战略物资类型,从而揭示红海袭击事件对海运网络空间联系的直接影响。

1.5.2 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[32],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[17]。

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,反映了网络的稠密程度,即网络中节点间连接的紧密性$D(t)$,其定义如下:

$$D(t) = \frac{2E(t)}{n(t)\left[n(t)-1\right]} \tag{10}$$

式中,$E(t)$是时间t下网络中的边数;$n(t)$是网络中的节点数。

平均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下,聚类系数$C(t)$为:

$$C(t) = \frac{1}{n(t)} \times \sum_{i=1}^{n(t)} \frac{2T_i(t)}{k_i(t)\left[k_i(t)-1\right]} \tag{11}$$

式中,$T_i(t)$是节点i的邻居在时间t存在的边数;$k_i(t)$是节点i的度(即连接数)。

平均最短路径长度是给定时间点t下网络中任意两个节点之间最短路径长度的平均值,反映网络中信息或物资传输的整体效率,其计算公式为:

$$L(t) = \frac{1}{n(t)\left[n(t)-1\right]} \times \sum_{i \neq j} d_{ij}(t) \tag{12}$$

式中,$d_{ij}(t)$表示节点i和j在时间t的最短路径长度。

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,平均偏心率提供了一个衡量网络中节点可达性的指标:

$$E(t)=\frac{1}{n(t)}\times\sum_{i=1}^{n(t)}\epsilon_t(i) \tag{13}$$

式中,$\epsilon_t(i)$是节点i在时间t的偏心率,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。

1.5.3　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)和网络边、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:

$$I=\sum_{i=1}^{5}w_i\left(\frac{\sum_n\alpha_n\Delta N_{i,n}}{N_{i,o}}+\frac{\sum_e\beta_e\Delta E_{i,e}}{E_{i,o}}+\Delta C+\Delta L\right) \tag{14}$$

式中,$\Delta N_{i,n}$和$\Delta E_{i,e}$分别代表与第i种战略物资相关的网络中节点和网络边的变化数量;$N_{i,o}$和$E_{i,o}$表示分别表示第i种战略物资在季度前期相关的网络中节点数量和网络边数量;α_n和β_e分别是节点和边的调整系数,系数α_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β_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,$\frac{\sum_n\alpha_n\Delta N_{i,n}}{N_{i,o}}$和$\frac{\sum_e\beta_e\Delta E_{i,e}}{E_{i,o}}$分别度量了节点、路径的波动性;$\Delta C$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　海运航线变化

表2为通过红海区域的全球航程数据变化情况。在季度前期,中国、美国、印度、西班牙、新加坡、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位降至第7位、第6位降至第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个国家占据了红海53.66%的运输量。

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、意大利以及英国。从整体上的变化来看,其他国家平均航次由18.88次/国下降至14.34次/国,降幅约为24%,降幅明显高于涉事国家(表2、表3)。

从地理分布来看,大洋洲和南美洲国家的航次下降最为明显,降幅分别达到71%和76%。北美洲国家也有27%的下降幅度。相比之下,欧洲整体变化较小(约1%),表明其受冲击程度相对有限。航次下降主要集中在部分对红海航线依赖较高或替代路径有限的区域(表4)。

2.2　战略物资变化

表5给出了通过红海区域的战略物资运输航程数量及吨位的变化。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,加权吨位分别为507 309、98 102和4 850万t。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,LNG的运输日均加权吨位增长了9.71%(表6)。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。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。

从地理分布来看,全球各大洲均出现了战略物资运输的变化(图2),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、5 513.62、17 098.41 t。土耳其、希腊和韩国的原油日均加权运输量增加了2 597.39、1 892.38和482.37 t。中国和韩国的LPG日均加权运输量均增加了2 773.24 t。除上述国家在特定物资上出现了运输量增加,其余国家均表现出战略物资减载情形。

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,其他大洲普遍呈现航次数量下降趋势。这一差异表明红海袭击事件之后,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,反映出全球大宗商品海运体系对关键航道中断的高度敏感性。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

表2 3个时期国家日均航程数量

Table 2 Daily Average Voyage Numbers of Countries in Three Periods

国家	日均航程数量/次			减幅/%	国家	日均航程数量/次			减幅/%	国家	日均航程数量/次			减幅/%
	季度前期	季度中期	季度后期			季度前期	季度中期	季度后期			季度前期	季度中期	季度后期	
中国	3.55	3.78	2.94	17	苏丹	0.02	0.06	0.50	−2 100	孟加拉国	0.16	0.28	0.00	100
美国*	2.20	2.25	3.19	−45	葡萄牙	0.14	0.03	0.19	−38	斯里兰卡	0.02	0.28	0.31	−1 275
印度	1.07	3.31	3.44	−222	斯洛文尼亚	0.05	0.13	0.19	−313	波兰	0.09	0.19	0.19	−106
西班牙	1.27	2.38	1.88	−47	科威特	0.07	0.09	0.13	−83	墨西哥	0.25	0.03	0.00	100
新加坡*	1.18	2.00	2.13	−80	莫桑比克	0.16	0.00	0.00	100	也门	0.02	0.06	0.56	−2 375
土耳其	0.84	1.59	2.50	−197	瑞典	0.11	0.06	0.00	100	挪威*	0.14	0.09	0.19	−38
阿联酋	0.80	1.53	2.69	−238	哥伦比亚	0.09	0.06	0.06	31	多米尼加	0.00	0.00	0.13	—
沙特阿拉伯	0.34	1.13	3.38	−890	拉脱维亚	0.07	0.09	0.06	8	智利	0.02	0.00	0.00	100
俄罗斯	0.43	1.44	2.25	−421	丹麦*	0.07	0.06	0.13	−83	克罗地亚	0.02	0.00	0.00	100
韩国	1.02	0.81	0.56	45	菲律宾	0.14	0.00	0.00	100	萨尔瓦多	0.02	0.00	0.00	100
埃及	0.32	0.75	1.88	−489	尼日利亚	0.09	0.03	0.06	31	洪都拉斯	0.02	0.00	0.00	100
荷兰*	0.70	0.75	0.81	−15	伊朗	0.05	0.06	0.13	−175	毛里求斯	0.02	0.00	0.00	100
日本*	0.73	0.50	0.69	5	利比亚	0.02	0.09	0.13	−450	纳米比亚	0.02	0.00	0.00	100
意大利*	0.27	0.69	0.75	−175	科特迪瓦	0.11	0.00	0.00	100	塞浦路斯	0.00	0.03	0.06	—
马来西亚	0.48	0.47	0.56	−18	坦桑尼亚	0.09	0.03	0.00	100	塞舌尔	0.00	0.03	0.06	—
印度尼西亚	0.36	0.59	0.13	66	突尼斯	0.07	0.03	0.06	8	索马里	0.00	0.03	0.06	—
澳大利亚*	0.45	0.34	0.25	45	肯尼亚	0.05	0.09	0.00	100	黎巴嫩	0.00	0.00	0.13	—
希腊*	0.27	0.47	0.50	−83	刚果(金)	0.05	0.06	0.06	−38	所罗门群岛	0.02	0.00	0.00	100
比利时*	0.25	0.56	0.19	25	毛里塔尼亚	0.05	0.03	0.06	−38	安提瓜和巴布达	0.00	0.03	0.00	—
法国	0.23	0.53	0.25	−10	保加利亚	0.02	0.09	0.00	100	厄立特里亚	0.00	0.03	0.00	—
英国*	0.25	0.56	0.13	50	巴哈马	0.02	0.06	0.06	−175	冰岛	0.00	0.03	0.00	—
乌克兰	0.23	0.44	0.38	−65	马耳他	0.00	0.13	0.00	—	马尔代夫	0.00	0.03	0.00	—
南非	0.50	0.19	0.00	100	巴林*	0.00	0.09	0.06	—	塞拉利昂	0.00	0.03	0.00	—
越南	0.25	0.50	0.06	75	以色列*	0.02	0.06	0.06	−175	叙利亚	0.00	0.03	0.00	—
摩洛哥	0.05	0.50	0.50	−1 000	安哥拉	0.07	0.00	0.00	100	阿尔巴尼亚	0.00	0.00	0.06	—
卡塔尔	0.14	0.28	0.50	−267	阿根廷	0.07	0.00	0.00	100	文莱	0.00	0.00	0.06	—
德国*	0.23	0.31	0.19	17	喀麦隆	0.07	0.00	0.00	100	爱沙尼亚	0.00	0.00	0.06	—
加拿大*	0.20	0.25	0.38	−83	佛得角	0.05	0.03	0.00	100	新西兰*	0.02	0.00	0.00	100
巴基斯坦	0.16	0.25	0.44	−175	塞内加尔	0.05	0.03	0.00	100	吉布提	0.02	0.06	1.00	−4 300
巴西	0.34	0.09	0.19	45	芬兰	0.02	0.06	0.00	100	罗马尼亚	0.07	0.25	0.44	−542
泰国	0.14	0.31	0.31	−129	马达加斯加	0.02	0.06	0.00	100	约旦	0.00	0.31	0.50	—
阿曼	0.11	0.25	0.50	−340	厄瓜多尔	0.05	0.00	0.00	100	立陶宛	0.02	0.03	0.00	100
阿尔及利亚	0.07	0.44	0.25	−267	加纳	0.05	0.00	0.00	100	委内瑞拉	0.02	0.03	0.00	100
伊拉克	0.05	0.31	0.56	−1 138	格鲁吉亚	0.02	0.03	0.00	100					
巴拿马*	0.30	0.16	0.13	58	几内亚	0.02	0.00	0.06	−175					

注:*表示涉事国家。

表3 涉事国家与其他国家平均航次

Table 3 Average Number of Voyages for the Countries Involved and Other Countries

类别	国家数量/个	平均航次/(次·国$^{-1}$)			日均减幅/%
		季度前期	季度中期	季度后期	
涉事国家	17	7.93	9.36	9.16	−15
其他国家	86	18.88	17.24	14.34	24

表 4　3个时期不同大洲国家日均航程

Table 4　Daily Average of Voyages by Countries Across Continents in Three Periods

大洲	国家数量/个	日均航程/(次·国$^{-1}$)			减幅/%
		季度前期	季度中期	季度后期	
北美洲	9	14.72	9.88	10.81	27
大洋洲	3	7.19	3.63	2.08	71
非洲	28	3.21	2.97	4.18	−30
南美洲	6	4.33	0.96	1.04	76
欧洲	26	8.38	11.53	8.50	−1
亚洲	31	16.63	19.57	18.86	−13

表 5　战略物资运输航程数量及吨位

Table 5　Voyages and Tonnage for Transport of Strategic Materials

战略物资	季度前期			季度中期			季度后期		
	航程数量/次	运输吨位/万 t	加权吨位/万 t	航程数量/次	运输吨位/万 t	加权吨位/万 t	航程数量/次	运输吨位/万 t	加权吨位/万 t
LNG	33	3 267	2 940	39	3 861	3 475	27	2 673	2 406
LPG	43	6 063	4 850	68	9 588	7 670	30	4 230	3 384
原油	181	98 102	98 102	227	123 034	123 034	134	72 628	72 628
粮食	14	658	658	21	987	987	12	564	564
铁矿石	508	694 944	507 309	539	737 352	538 267	321	439 128	320 563

表 6　战略物资加权吨位减幅/%

Table 6　Weighted Tonnage Reduction of Strategic Materials/%

物资类别	总体减幅	日均减幅
LNG	12.50	−9.71
LPG	22.97	22.64
原油	17.16	4.35
粮食	15.71	1.48
铁矿石	19.34	9.54

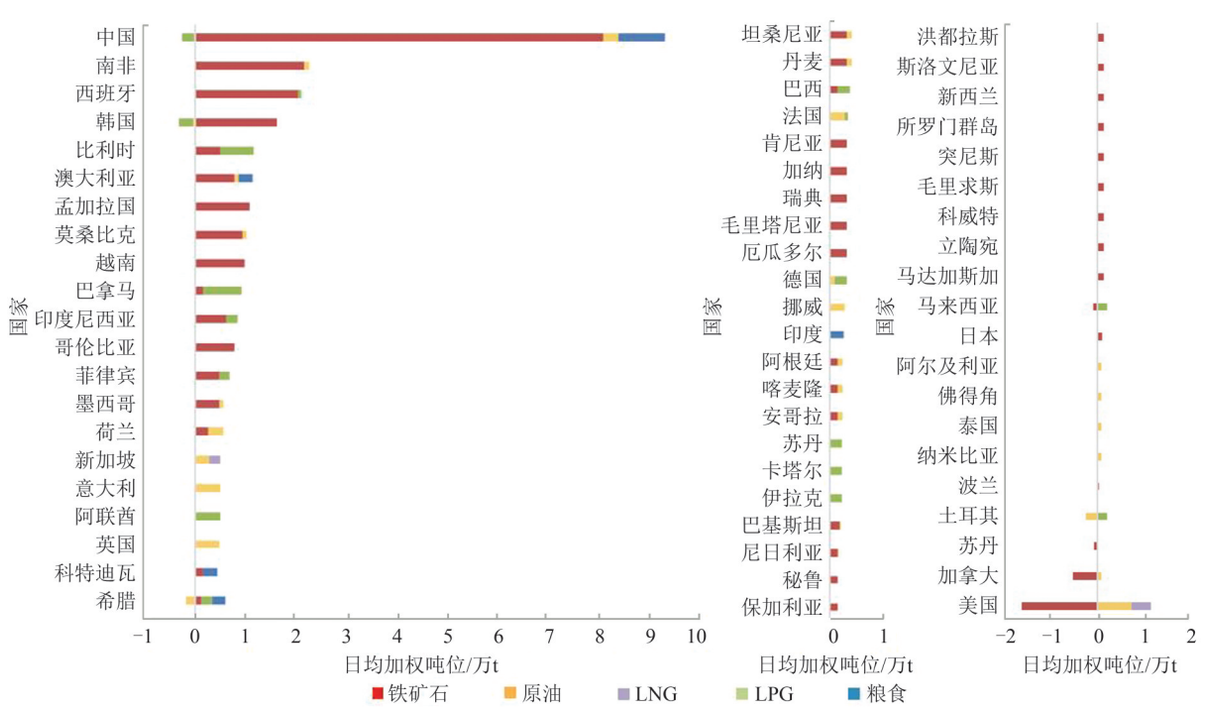


图 2　战略物资日均加权吨位前期至后期变化对比

Fig. 2　Comparison of Initial to Post Change in the Red Sea-Impacted Per Day Weighted Tonnage of Strategic Materials

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对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,特别是对中东地区石油的依赖。这种依赖关系强化了红海地区的战略重要性。

2.3 海运网络分析

2.3.1 波及国家和区域程度

以国家为节点、航线为连接边构建了涉及红海的海运网络(图3)。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度持续保持高位(图4)。中国在航线与航程减少数量上均居首位,分别减少38条航线和76次航程;美国(22条、38次)和荷兰(17条、31次)紧随其后,表明主要航运大国受到的冲击最为显著。整体来看,大多数国家航线减少数量不足10条、航程减少低于15次,呈现出明显的长尾分布,说明航线收缩主要集中在少数核心航运国家(图5)。

2.3.2 战略物资海运网络的结构适应性分析

为了探讨袭击事件对途经红海海运网络格局的潜在影响,本文通过网络密度、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7)。

从表7可以看出,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在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。

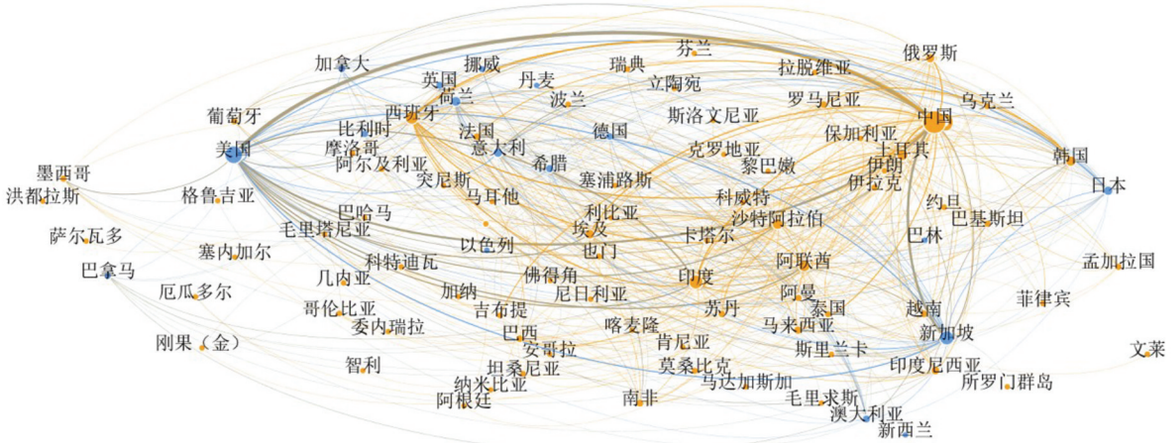
综上,海运网络在遭遇外部扰动后展现出了多样的变化。粮食和LPG海运网络呈现长途型运营模式。在这种模式下,平均最短路径长度增加,航线趋向长途。原油、LNG及铁矿石海运网络则展现出了高聚集-短途型的适应模式,这种模式下,网络通过缩短路径来应对外部扰动,聚类系数的保持或提升表明网络内部节点间的联系不受影响或更加紧密,特别是在局部区域内。

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。

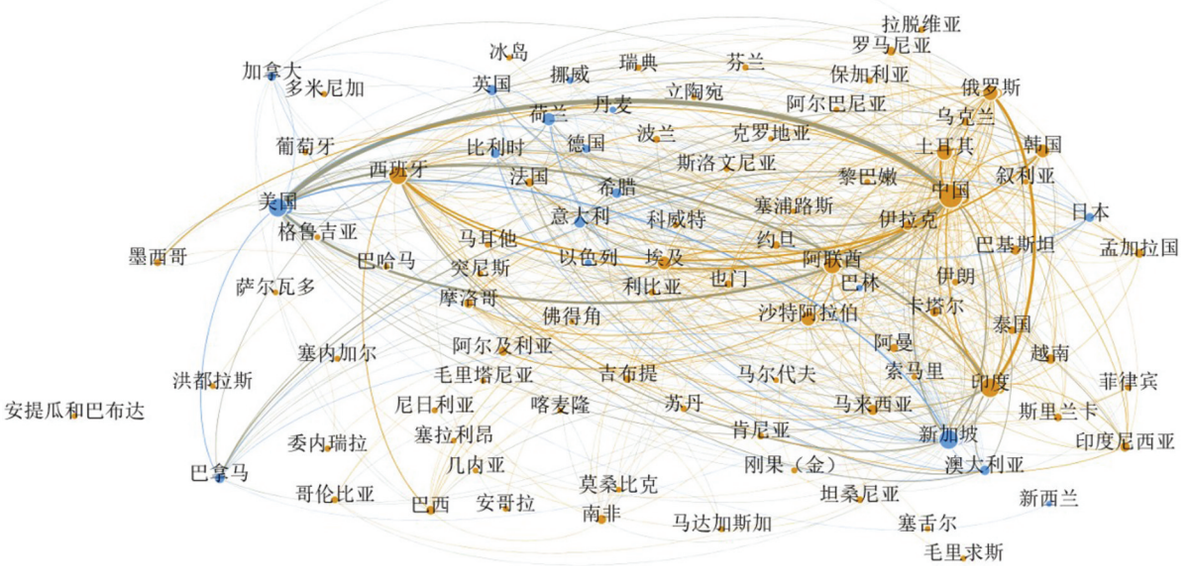
2.3.3 战略物资海运网络的稳定性分析

本文通过节点、路径和网络结构的变化,对5种战略物资运输网络的稳定性进行了评估(表8)。表8结果表明,粮食海运网络由于承运节点(国家)、路径(航线)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较大波动,运输效率和网络规模也发生调整的原因,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。

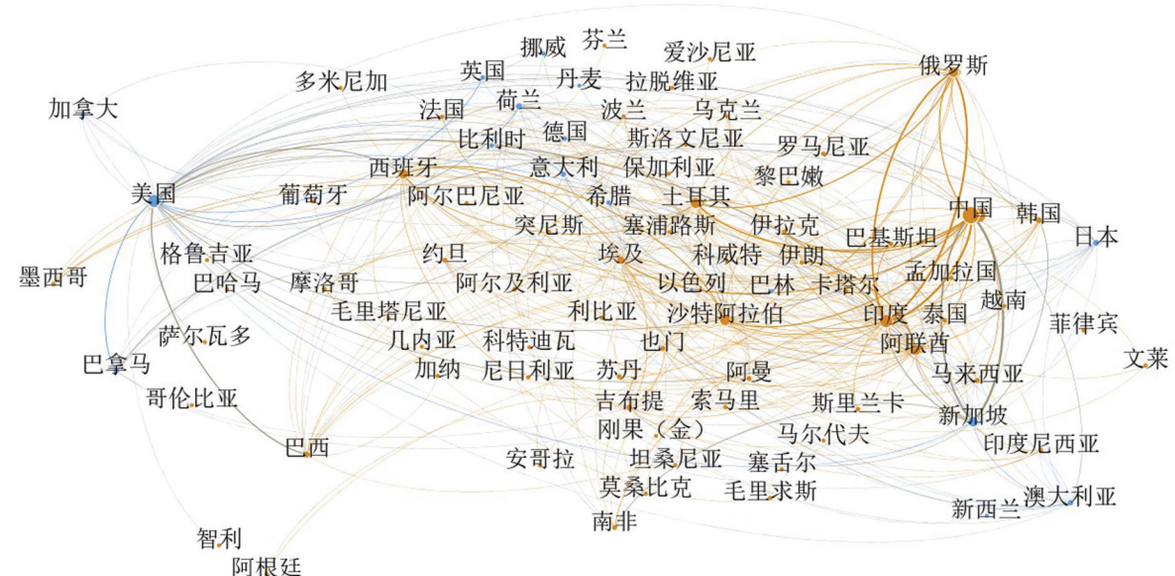
从战略物资海运网络变化来看,尽管面临冲突的直接冲击,中国、美国、新加坡、印度等仍保持了其在全球运输网络中的稳定地位。一方面,上述多数国家是世界上体量较大的经济体,国家经济规划和对外贸易活动体量极大,从而在全球海运网络中形成了重要的枢纽和节点。另一方面,上述国家在地理上处于交通要地,中国和新加坡位于亚洲的中心位置,靠近中国南海和马六



(a) 季度前期



(b) 季度中期



(c) 季度后期

图 3　不同时期红海相关海运网络

Fig. 3　The Red Sea Maritime Networks Across Stages

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。粮食稳定性

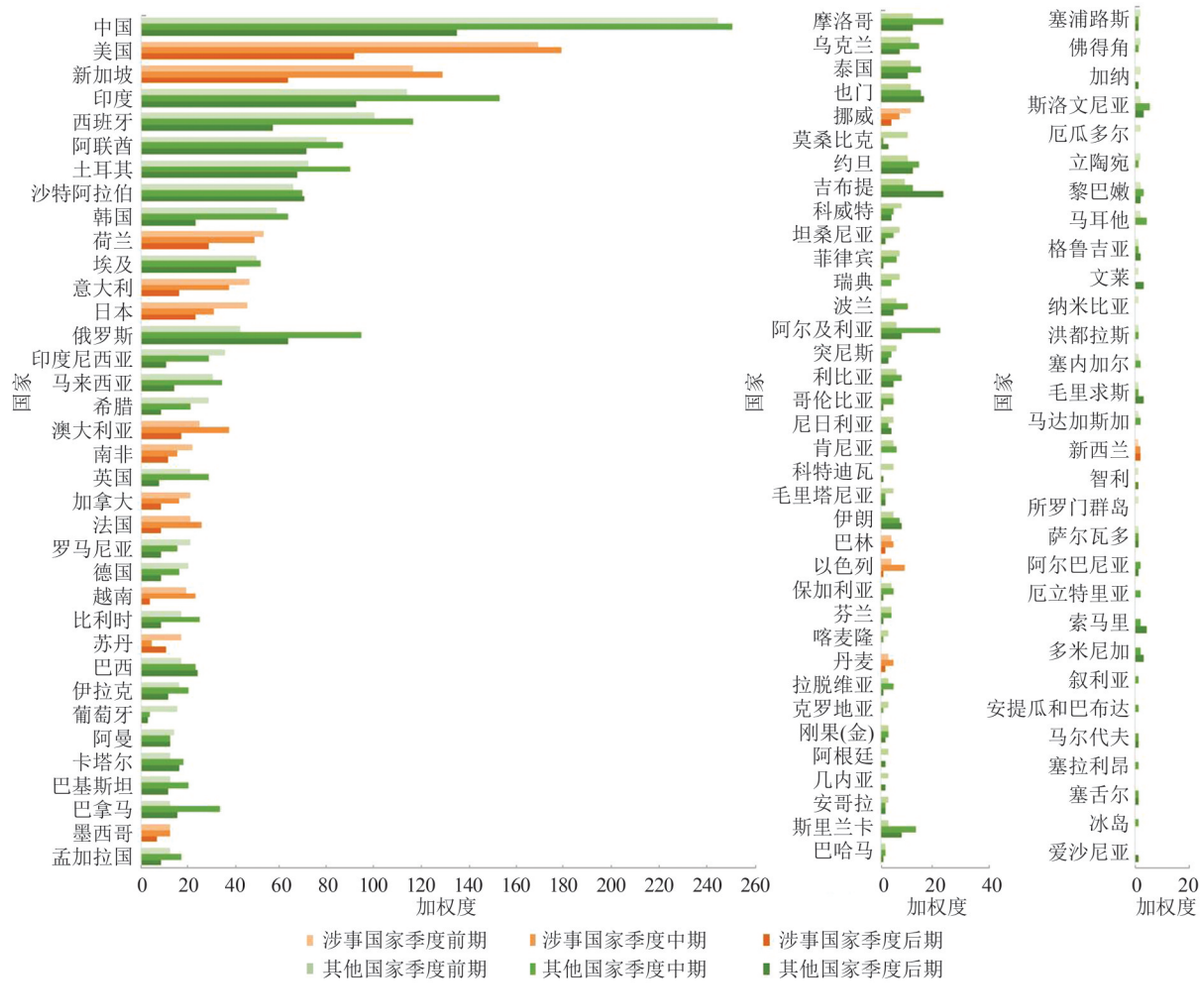


图4 3个时期国家节点加权度

Fig. 4 Weighted Degree of Country Nodes for Three Periods

最差,原油、LPG和LNG的稳定性中等,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,大洋洲、南美洲和北美洲均出现较为显著的下降趋势,其中大洋洲和南美洲降幅最大。

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趋势外,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。



图 5　受影响航线及总航程数

Fig. 5　Number of Affected Routes and Voyages

表 7　不同时期物资网络结构

Table 6　Structure of the Network for Different Materials Across Periods

物资类别	时期	网络密度	平均聚类系数	平均最短路径长度	平均偏心率
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

表 8　战略物资海运的不稳定性

Table 7　Strategic Materials Maritime Transport Instability

物资类别	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

本文对于区域波及网络、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, HOFF-

MANN J. Maritime Transport and International Seaborne Trade[J]. *Maritime Policy & Management*, 2013, 40(3): 226-242.

[2] ROUSSET L, DUCRUET C. Disruptions in Spatial Networks: A Comparative Study of Major Shocks Affecting Ports and Shipping Patterns[J]. *Networks and Spatial Economics*, 2020, 20(2): 423-447.

[3] JARUMANEEROJ P, RAMUDHIN A, BARNETT LAWTON J. A Connectivity-Based Approach to Evaluating Port Importance in the Global Container Shipping Network[J]. *Maritime Economics & Logistics*, 2023, 25(3): 602-622.

[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]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(5): 602.

[5] FANG Z X, YU H C, LU F, et al. Maritime Network Dynamics Before and After International Events[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(7): 937-956.

[6] 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]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(1): 90-99.
YE Shirong, LUO Xinqi, NAN Yang, et al. An Improved Sea Ice Detection Method Based on Spaceborne GNSS-R Using CNN[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(1): 90-99.

[7] WAN C P, YAN X P, ZHANG D, et al. Analysis of Risk Factors Influencing the Safety of Maritime Container Supply Chains[J]. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 2019, 11(6): 476.

[8] OLIVA S, LAZZERETTI L. Adaptation, Adaptability and Resilience: The Recovery of Kobe After the Great Hanshin Earthquake of 1995[J]. *European Planning Studies*, 2017, 25(1): 67-87.

[9] PAUL J A, MALONI M J. Modeling the Effects of Port Disasters[J]. *Maritime Economics & Logistics*, 2010, 12(2): 127-146.

[10] GAO T H, LU J. The Impacts of Strait and Canal Blockages on the Transportation Costs of the Chinese Fleet in the Shipping Network[J]. *Maritime Policy & Management*, 2019, 46(6): 669-686.

[11] GODOY L A. Performance of Storage Tanks in Oil Facilities Damaged by Hurricanes Katrina and Rita[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2007, 21(6): 441-449.

[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]. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 2013, 10(2): 497-520.

[13] SHEN Z C, XU X L, LI J H, et al. Vulnerability of the Maritime Network to Tropical Cyclones in the Northwest Pacific and the Northern Indian Ocean[J]. *Sustainability*, 2019, 11(21): 6176.

[14] XU H T, ITOH H. Density Economies and Transport Geography: Evidence from the Container Shipping Industry[J]. *Journal of Urban Economics*, 2018, 105: 121-132.

[15] CAO X H, LAM J S L. Simulation-Based Catastrophe-Induced Port Loss Estimation[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2018, 175: 1-12.

[16] ROSE A, WEI D. Estimating the Economic Consequences of a Port Shutdown: The Special Role of Resilience[J]. *Economic Systems Research*, 2013, 25(2): 212-232.

[17] WU D, WANG N, YU A Q, et al. Vulnerability Analysis of Global Container Shipping Liner Network Based on Main Channel Disruption[J]. *Maritime Policy & Management*, 2019, 46(4): 394-409.

[18] VILJOEN N M, JOUBERT J W. The Vulnerability of the Global Container Shipping Network to Targeted Link Disruption[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2016, 462: 396-409.

[19] GUO J K, WANG S B, WANG D D, et al. Spatial Structural Pattern and Vulnerability of China-Japan-Korea Shipping Network[J]. *Chinese Geographical Science*, 2017, 27(5): 697-708.

[20] WANG N, WU N, DONG L L, et al. A Study of the Temporal Robustness of the Growing Global Container-Shipping Network[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 34217.

[21] DUCRUET C, NOTTEBOOM T. The Worldwide Maritime Network of Container Shipping: Spatial Structure and Regional Dynamics[J]. *Global Networks*, 2012, 12(3): 395-423.

[22] YANG Z L, QU Z. Quantitative Maritime Security Assessment: A 2020 Vision[J]. *IMA Journal of Management Mathematics*, 2016, 27(4): 453-470.

[23] SHAW D R, GRAINGER A, ACHUTHAN K. Multi-level Port Resilience Planning in the UK: How Can Information Sharing Be Made Easier?[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2017, 121: 126-138.

[24] ASADABADI A, MILLER-HOOKS E. Co-Ope-

tition in Enhancing Global Port Network Resiliency: A Multi-leader, Common-Follower Game Theoretic Approach [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2018, 108: 281-298.

[25] 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.
YANG Yi, GUO Ya, JU Xing, et al. Remote Exploration of the Important Overseas Channel: Mande Strait[J]. *China Mining Magazine*, 2023, 32(S1): 99-102.

[26] GUO J K, GUO S, LÜ J. Potential Spatial Effects of Opening Arctic Shipping Routes on the Shipping Network of Ports Between China and Europe[J]. *Marine Policy*, 2022, 136: 104885.

[27] 红海局势持续紧张 全球供应链风险加剧[EB/OL]. [2024-03-04]. https://baijiahao.baidu.com/s?id=1791465405832074169&wfr=spider&for=pc.
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.

[28] 郭宁, 熊伟, 欧阳雪, 等. 时空轨迹多层级相似子段匹配方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(9): 1390-1397.
GUO Ning, XIONG Wei, OUYANG Xue, et al. Multi-level Similarity Sub-Segment Matching Method for Spatiotemporal Trajectory[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(9): 1390-1397.

[29] 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]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(5): 746-754.
SHENG Yuyu, BI Shuoben, FAN Jingjin, et al. Analyzing Spatiotemporal Patterns of Traffic Hotspots Using Traffic Operation Indicators[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(5): 746-754.

[30] 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]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 1039-1049.
LI Zhenhong, WANG Jianwei, HU Yufeng, et al. Rapid Assessment of Traffic Inefficiency Under Flood Scenarios over Wide Regions[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(7): 1039-1049.

[31] 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]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(10): 1545-1552.
WAN You, LIU Yaolin. Community Detection Algorithm Based on Geographical Weighted Central Node Distance[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(10): 1545-1552.

[32] 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]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(3): 427-433.
WANG Yingxue, LI Shaomei, REN Liqiu, et al. Automatic Generalization Methods of Cyberspace Point Cluster Features Considering Characteristics [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(3): 427-433.