

新发展格局下的能源安全：基于能源贸易网络的竞争与冲击分析

张 翔

云南财经大学统计与数学学院，云南 昆明

收稿日期：2023年1月21日；录用日期：2023年2月11日；发布日期：2023年2月23日

摘 要

伴随新冠疫情在全球爆发和俄乌战争局势的影响，国际能源市场的不确定性和不稳定性加剧，国家能源安全问题变得和粮食安全同等重要，特别是中国在双循环新发展格局下和“双碳”目标能源战略下保证自身能源安全的供应是值得关注的问题，除了风险预警机制的构建，将中国放在国际能源贸易体系中进行分析则更加的全面。基于贸易竞争和冲击双重角度，通过国际贸易网络建模方法构造煤炭、石油、天然气一次能源的贸易网络，利用网络指标计算两两国家之间的贸易竞争强度，分析了各国在能源贸易竞争网络中的作用以及各国之间的竞争关系，结果发现中国在石油进口竞争中一直处于主导地位；再用以能源消耗量为判定因素的Bootstrap模型仿真能源供应危机在国家间的动态传播过程，利用该模型并计算影响和脆弱程度指标来检测潜在的能源贸易风险，并观察能源贸易参与者在风险传递过程中的角色，只有个别重要出口国家作为风险源能对现有能源贸易网络产生重大影响，从而表现出全球能源贸易网络呈现“稳健又脆弱”的特征，同时揭示了中国在煤炭、石油、天然气中尽管不是主要出口国，但作为能源贸易网络上的枢纽都有着一定的影响力，由于中国能源贸易模式多样性从而有着很高的抵御能源供应冲击的能力。因此，对其他易受风险冲击的其他能源进口国来说，如何制定合理能源贸易政策保证本国能源安全是亟待解决的问题。

关键词

能源，网络，竞争，供应危机，风险传播

Energy Security in the New Development Pattern: Competition and Impact Analysis Based on Energy Trade Network

Xiang Zhang

School of Statistics and Mathematics, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming Yunnan

Received: Jan. 21st, 2023; accepted: Feb. 11th, 2023; published: Feb. 23rd, 2023

文章引用：张翔. 新发展格局下的能源安全：基于能源贸易网络的竞争与冲击分析[J]. 统计学与应用, 2023, 12(1): 146-163. DOI: 10.12677/sa.2023.121017

Abstract

With the impact of the global outbreak of COVID-19 and the Russia-Ukraine conflict, the uncertainty and instability of the international energy market have intensified, and national energy security has become as important as food security. In particular, it is worth paying attention to China to ensure its own energy security supply under the new dual-cycle development pattern and the “dual-carbon” target energy strategy. In addition to the construction of risk early warning mechanism, the analysis of China in the international energy trading system is more comprehensive. Based on the dual perspectives of trade competition and impact, this paper constructs the primary energy trade network of coal, oil and natural gas through the modeling method of international trade network, calculates the intensity of trade competition between two countries by using the network index, analyzes the role of each country in the energy trade competition network and the competition relationship between countries. The results show that China has been in the leading position in the competition of oil import. Then, the Bootstrap model with energy consumption as the determining factor was used to simulate the dynamic transmission process of energy supply crisis between countries, and the model was used to calculate the impact and vulnerability indicators to detect potential energy trade risks, and to observe the role of energy trade participants in the risk transmission process. Only a few important exporting countries as risk sources can have a significant impact on the existing energy trade network, which shows that the global energy trade network presents the characteristics of “steady and fragile”. Meanwhile, it reveals that although China is not a major exporter of coal, oil and natural gas, it has a certain influence as the hub of the energy trade network. China is highly resilient to energy supply shocks because of its diverse energy trade patterns. Therefore, for other energy importing countries that are vulnerable to risk shocks, how to formulate reasonable energy trade policies to ensure their own energy security is an urgent problem to be solved.

Keywords

Energy, Networks, Competition, Supply Crisis, Spreading of Risk

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

(一) 研究背景及意义

1) 研究背景

2022年初,伴随着新冠肺炎疫情继续在全球蔓延爆发的态势下,世界各国在公共卫生风险、贸易保护主义、全球霸权主义、地缘政治风险、经济金融风险等多因素叠加影响下,全球经济的不确定性和社会的不稳定性加剧,而油价上涨,俄乌冲突、中美贸易战以及中澳贸易战等能源贸易格局,在新冠疫情逐渐常态化的背景下,随着能源需求的迅猛增长和能源市场的剧烈波动国际能源竞争日趋激烈,能源安全也再度成为国际社会热门话题。

一些传统风险预警机制的构建通常遗漏了国家间接贸易联系,而全球能源贸易已经形成一个复杂而庞大的系统,将国家放在这一系统上进行分析更能捕捉和挖掘出一些潜在的信息用于全局或局部分析,煤炭、石油、天然气等作为不可再生资源势必导致市场上国家间的竞争,借用复杂网络理论对贸易系统

建模则能找到隐藏的竞争信息。此外,中国在双循环新发展格局下和“双碳”目标能源战略下首先应保证自身能源安全的供应,通常,供应的中断是由自然灾害、贸易战、战争等突发事件导致的,而通过贸易网络的级联失效则更能将这一过程还原,从而找到中国在能源供应冲击中的反应和其受到的影响。因此,探究全球国家间的竞争模式和格局,评估潜在的全球能源贸易风险和风险传播时各国的表现,以避免供应危机,对能源安全 and 经济稳定具有重要意义。

2) 研究意义

科学意义:本文主要以复杂网络为模型工具,从竞争和冲击的两个角度研究2020年世界三大化石燃料能源贸易格局现状,对认清当前国际能源贸易体系,制订相关的能源政策具有一定的指导意义,切实保障“双循环”新发展格局下我国的能源安全。本文仅以煤炭、石油、天然气为特定商品构建复杂网络进行,代入其他贸易商品构建的网络同样能对其进行对应的分析,故模型具有良好的泛化能力。

此外,能源使用与环境保护密不可分,结合不同国家的化石燃料进出口和二氧化碳排放二者关系还能模型结果产生后续分析,为全球低碳环保相关研究提供指导性帮助。

应用价值:在双循环的新发展和“双碳”目标的能源发展两大格局下,2021年7月16日全国碳排放权交易正式开放,2021年9月~10月全国多地限电等热点问题引发国内外社会各界的关注,除了国内能源市场本身的供需矛盾,我国在国际能源市场上的变化也成为广大学者想要研究的问题,特别是在俄乌冲突后,国际能源市场变得更加不稳定,本课题基于以上经济热点,从复杂网络这一数学工具出发研究能源贸易,不仅能够一定程度上把握住当下我国能源贸易的形势,同时也为我国在能源市场未来发展上提供一定的政策建议。

(二) 文献综述

在国际能源贸易中,除了进出口关系外,参与国之间建立了复杂的贸易联系(直接或间接、贸易协定或关税政策等),形成一个复杂而庞大的体系。复杂网络方法已被众多学者证明可以为定量分析这些复杂的贸易关系及其潜在特征提供强有力的帮助[1]。例如,在分析国际化石能源贸易时,众多学者采用复杂网络的方法,探索了原油[2] [3]、煤炭[4]、天然气[5]等不同类型化石燃料的社团结构、中心性排序和拓扑特征,以上方法都可以算作是对化石燃料贸易网络的静态分析或者动态演变描述。

通常来讲,由于国家之间的战争、经济纠纷或政治冲突等因素,贸易关系有可能破裂。这可以通过贸易渠道传递到其他国家,产生连锁反应,不少学者如Kyu-Min Lee则将电网等其他物理网络上的级联失效模型用来做国际贸易方面的经济危机传播分析,刻画网络上的动态过程[6],也有学者发现贸易的直接联系无法捕捉金融危机通过贸易渠道在全球的传播,网络则能更好地刻画这一过程[7],Peter Klimek构建相关网络对矿产资源的供应冲击对全球和区域的系统性风险影响进行了研究[8],在方法论上,任素婷、樊瑛等将起源于统计物理学中的靴襻渗流模型(Bootstrap)用于国际贸易网络,用以模拟危机在网络上的级联过程[9] [10]。

而在国际能源市场上,贸易联系也是国家能源危机传播的渠道之一[11],特别是像中国或者日本这样在天然气上比较依赖于进口的国家,如果天然气供应陷入困境,可能会受到严重的影响(天然气价格上涨,天然气消费行业的产量下降)。此外,由于天然气贸易国家之间的密切关系,一个地区的供应短缺可能会在其他地区引发同样的问题,这就是所谓的连锁反应现象[12],石油贸易中各国家在整个网络中都具有不同的中心性等评价网络重要程度的指标,有学者则通过按照不同中心性从大到小的顺序删除网络节点来测度网络鲁棒性以表明国家在引起级联失效时扮演的重要角色[13],也有学者在构建网络的基础上,采用顶级网络法和改进的封闭系统投入产出法评估各国在国际石油贸易中的相对重要性[14]。为了模拟能源供应的潜在风险和天然气贸易链条上的连锁反应,我们参考了基于网络的动态模型,如SI(suspect-infection)、SIR(suspect-infection-recovery)流行病模型和bootstrap渗流模型等。SI和SIR模型用于研究具有一定程度

分布的人口结构网络模型中的流行病扩散现象,但也有学者用 SI 模型来分析太阳能电池板在网络上产生的供应和需求冲击[15][16]。bootstrap 渗流模型描述了连通图或网络上的破坏性级联[9][10][17],该模型已被用于金融网络中的风险扩散[18][19][20]。在 SIR 模型中,流行病扩散依赖于一定的感染概率,而在 bootstrap 渗流模型中,节点的状态变化依赖于给定的邻居量阈值。但这些模型只表达了初始条件下的网络结构函数;它们的设置都忽略了个体(网络中的节点)差异。例如,在天然气贸易的研究中,个体差异与国家的天然气行业属性有关,如天然气消费需求、产能、进出口和天然气库存。研究天然气贸易网络的风险扩散需要考虑这些因素,有学者将天然气的能源储备纳入 Bootstrap 模型中模拟天然气冲击传播的动态过程与路径[21]。本文仿照上述学者的思想,将煤炭、石油、天然气的年消耗量作为 Bootstrap 模型中的负荷量来进行能源贸易网络的危机传播分析。

2. 研究思路

(一) 研究方法

网络建模:以能源参与国国家为基本对象和以能源贸易渠道为基本途径的贸易网络是现实中世界贸易系统在拓扑空间的映射,不仅具有复杂系统的拓扑特征,而且凝聚着能源贸易活动的经济属性,因此本文采用了网络建模赋权的方法构建了有向加权的煤炭、石油、天然气三个国际贸易网络。

网络数据构建:用真实数据构建的复杂网络被赋予了现实意义,除了为复杂庞大的系统构建一个统计物理模型,还往往能挖掘出更深层次的数据做进一步的研究,除了评估节点、连边、时序网络的特性指标,如网络节点数、连边数、密度、平均路径长度、聚类系数和互惠性。此外,本文采用简单的找两节点共同指向邻居的方法计算能源贸易网络的竞争强度。

网络危机传播模型:本文除构建能源贸易网络和相关指标外,还主要使用国际贸易网络上的危机传播或级联失效的方法,该方法借助计算机仿真模拟的动态过程实现,在设定好的规则下移除网络上的节点或者断开网络的连边从而展示后续结果和影响,其方法的基本环节具体如下:

① 负荷量:负荷量是指网络中节点或连边当前所承受的最大负载值;

② 分配策略:分配策略是指节点发生故障后,经过一定的途径在全网中或局域环境内负荷量重新计算的过程;

③ 失效规则:失效规则是指剩余节点受到失效影响,当前负载量超过最大负载量的临界值时,也称阈值,则发生相继失效。

这三个基本环节构成了级联动态的主要仿真框架。直到网络中无新增异常态节点时,仿真过程终止。本文基本研究思路框架如图 1 所示。

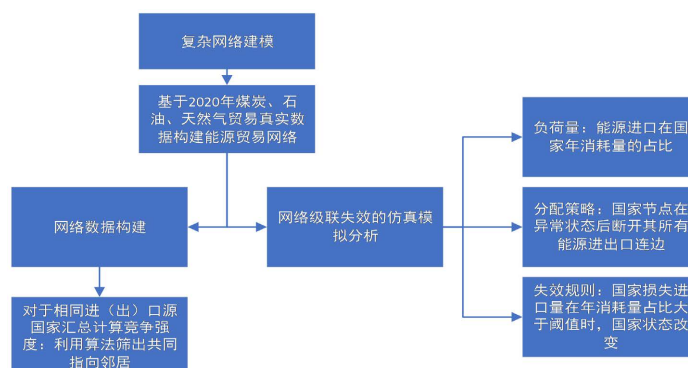


Figure 1. Research framework

图 1. 研究思路框架

(二) 技术路线图

技术路线如图 2 所示。

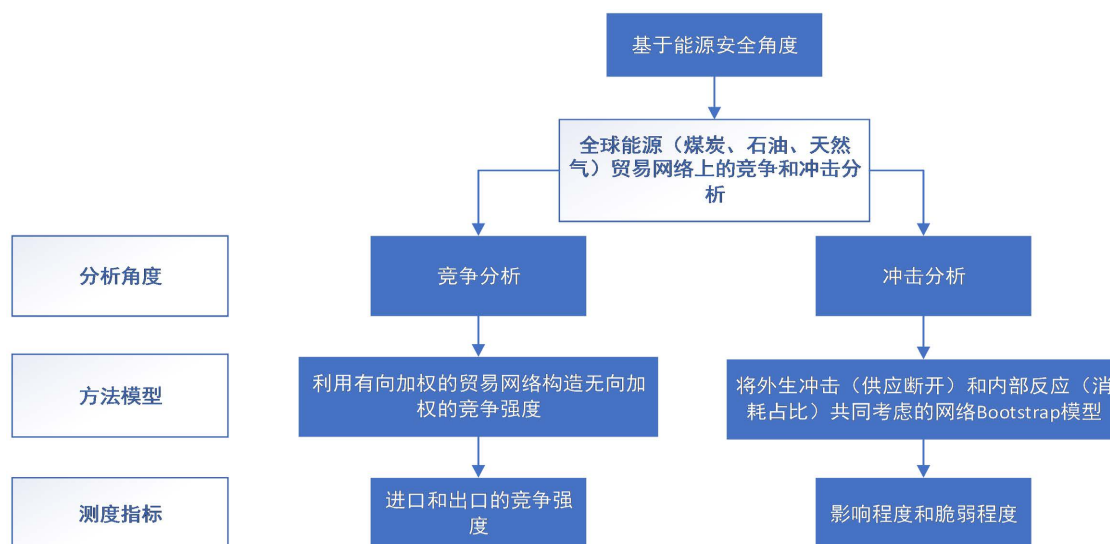


Figure 2. Technology roadmap
图 2. 技术路线图

3. 数据及模型

(一) 数据来源

在本研究中,为了构建全球煤炭、石油、天然气能源贸易网络,需要从联合国贸易数据库 UN Comtrade 官方网站下载大约 190 多个国家和地区的相关数据,考虑数据的可获得性和完整性,样本期为 2001~2020 年共 20 年的数据,不同能源不同年份下个别国家贸易数据有所缺失,总共 20 年的数据主要用以分析三种能源贸易网络指标的演化特征,而采用 2020 年当年数据用以竞争和冲击分析。其中化石燃料的双边贸易流量单位以美元\$ (US dollar)计。由于个别国家在当年的能源进出口额很小,为此每年仅保留贸易额累积占比为前 99%的国家数据。特别地,由于数据库中,进出口中贸易报道国家来源不同,会有 i 国对 j 国进口和 j 国对 i 国出口两条在经济关系中重复的数据,为了保证数据的对称性,采用 i 国对 j 国的进口数据代替 j 国对 i 国的出口数据,这样一来就有了统一的标准。值得注意的是天然气有两种类型的商品贸易,我们将液态天然气(LNG)和气态天然气(CNG)在相同年份相同国别或区域的贸易额进行加总来构建全球天然气贸易网络。

全球各国在 2020 年煤炭、石油、天然气年消耗量数据来自于美国能源信息署(EIA, Energy Information Administration)官方网站。采取的贸易商品类别如下表 1。

Table 1. UN Comtrade database commodity data query

表 1. 联合国贸易数据库商品数据查询

商品	海关 HS 编码	具体类别名称
煤炭(Coal)	2701	煤、煤球等, 由煤制成
石油(Crude oil)	2709	石油, 从沥青矿物中提炼的油, 原油
天然气(Natural gas)	271,111	液化天然气(LNG)
	271,121	气态天然气(GNG)

(二) 模型说明

在本文中，我们参照了传统国际贸易网络的建模方法[1]，分别构建了全球煤炭、石油和天然气能源贸易网络，然后基于这三种能源贸易网络，通过网络数据进一步挖掘出两个国家关于能源贸易的进口和出口竞争强度，同时危机传播的分析中建立了模拟三种能源供应切断后在整个网络上将危机扩散的模型。最后，基于三种能源贸易网络和各自的供应冲击传播模型构建一个统计分析指标的框架，并将其分为能源网络竞争强度、国家影响程度和国家脆弱程度。

1) 能源贸易网络构建

基于图论，能源贸易网络模型可以抽象为一个有一系列节点和边的图，如图 3 所示，网络集 $G=(V,E)$ 。其中 V 节点为国家， E 边代表国家之间能源贸易的关系，我们以贸易流量为关系的方向，以商品流量的价值(以美元计)为边的权重。能源商品包括煤炭、石油和天然气(液化天然气和气态天然气)，本研究分别以煤炭、石油、天然气的贸易数据构建有向加权的网络模型。在网络模型的指标中，以两个贸易联系国 i 和 j 为例， i 国对 j 国有出口关系，则 $M_{ij}^E(t)$ 为 1，在公式符号上，下角标 ij 代表 i 对 j 的出口关系， t 为具体贸易年份，上角标 E 为能源贸易商品类型， E 代表能源类型， C 则为煤炭、 O 为石油、 G 为天然气，两国无贸易关系则取 0； $W_{ij}^E(t)$ 为两国贸易权重，以贸易流量代替(以美元计)，无关系则此值为 0。

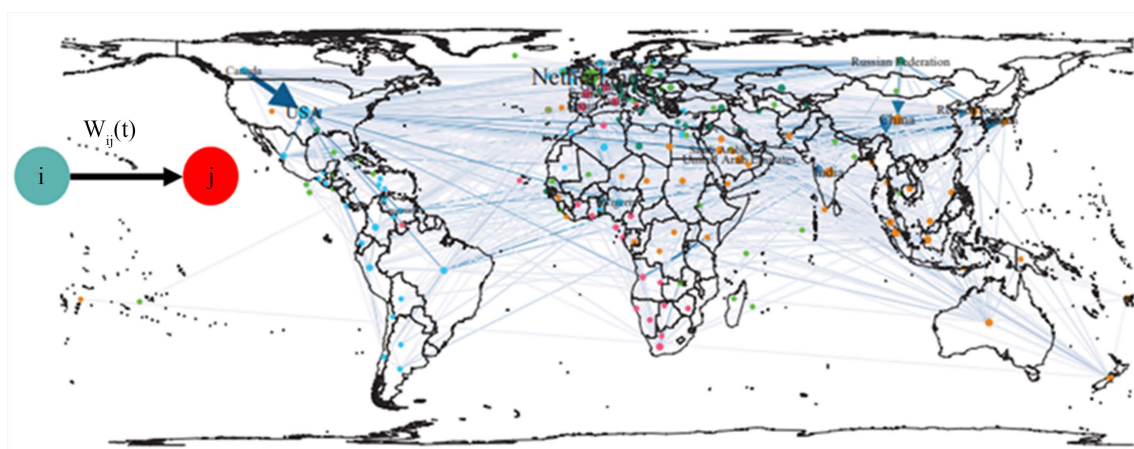


Figure 3. Global energy trade network diagram

图 3. 全球能源贸易网络图示意

2) 网络特征指标

a) 网络节点数

网络上的节点数量可以反映网络上参与互动的个体数量，在本文构建的全球三种能源贸易网络中，节点数代表该年下参与该能源贸易的国家数目。

b) 网络连边数

网络连边数即为网络中两两节点 i 与 j 之间的互动关系数量，在能源贸易网络中网络连边数代表全球该年该种能源的贸易关系(包括所有进出口)总量。

c) 紧密度

紧密度可以表明在贸易网络中国家之间联系的紧密程度。密度是用“实际链接数”除以“网络中可能的最大链接数”来测量的。如果一个国家在贸易网络中有更大的密度，那么这个国家可以与网络中靠近它的国家进行贸易。密度的正式计算方法如下[22]：

$$\text{Density} = \frac{m}{N(N-1)} \quad (1)$$

其中, Density 是对整个网络全局的紧密度刻画, N 是网络包含的总节点个数, m 是实际连边数。

d) 平均路径长度

平均路径长度是网络中另一个重要的特征度量, 他是网络中所有节点对之间的平均最短距离。这里节点间的距离指的是从一个节点要经历的边的最小数目, 其中所有节点之间的最大距离称为网络的直径。平均路径长度和直径衡量的是网络的传输性能与效率。在贸易中可以衡量两个国家之间直接或者间接贸易的路径长短, 平均路径长度的公式[22]为:

$$\bar{L} = \frac{\sum_{ij} L_{ij}}{N(N-1)} \quad (2)$$

\bar{L} 为整个网络全局的平均路径长度, L_{ij} 为 ij 两国之间的最短距离。

e) 平均聚类系数

平均聚类系数可以反映一个国家进行贸易的两个邻居国家是否也互为邻居, 这里引入三元组概念, 封闭的三元组数目/所有三元组数目聚类系数表示节点与其邻居的连接的关联度。一个聚类系数大的国家可能表明其邻国节点之间的紧密联系。为了衡量能源贸易网络中贸易关系的紧密性, 我们还计算了平均聚类系数的值[22] [23]。公式如下:

$$C_i = \frac{e_i}{d_i(d_i-1)} \quad (3)$$

$$\bar{C} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i \quad (4)$$

C_i 是 i 国家节点的聚类系数, e_i 是 i 节点和邻居节点的连边数, \bar{C} 是整个网络全局的平均聚类系数。

f) 互惠性

互惠性系数能反映能源贸易网络中两两国家之间互相选择进行贸易关系的程度, 该值越大, 一方面表明该种能源贸易程度在不断加深, 另一方面表明国家之间贸易信息的传播和流动速度越快, 贸易合作更加有序, 从而使得整个贸易网络结构更趋于稳定。例如 i 国向 j 国出口一种能源, 但 j 国并不向 i 国出口该能源则代表两国之间并不构成该种能源上的贸易互惠关系, 整个网络的互惠性系数计算[22]:

$$\rho = \frac{\sum_{i \neq j} (a_{ij} - \bar{a})(a_{ji} - \bar{a})}{\sum_{i \neq j} (a_{ij} - \bar{a})^2} \quad (5)$$

式中: $\bar{a} = \sum_{i \neq j} \frac{a_{ij}}{n(n-1)}$ 。在有向网络的邻接矩阵中, 如果节点 i 和节点 j 之间有连接, 则 $a_{ij} = 1$, 否则 $a_{ij} = 0$,

n 表示网络中节点的数量。

3) 能源贸易网络竞争强度

根据 Glick 和 Rose 对于竞争强度的定义[23], 由于不同国家能源的集中度和能源消费量的差异, 必然会有多个能源进口商从同一能源出口国进口能源; 这将迫使进口商进行竞争彼此的能源; 同时, 能源出口商也会进行市场竞争。如图 4(a), 节点 i, j 都为能源出口商, 节点 m 为能源进口商, 如果 i 和 j 都向进口商 m 出口煤炭, 贸易流量分别是 W_{im} 和 W_{jm} , 则两者存在出口竞争关系, 反之如图 4(b), 由于共有一个出口商 k , 贸易流量分别是 W_{ki} 和 W_{kj} , 则 i 和 j 存在进口竞争的关系。

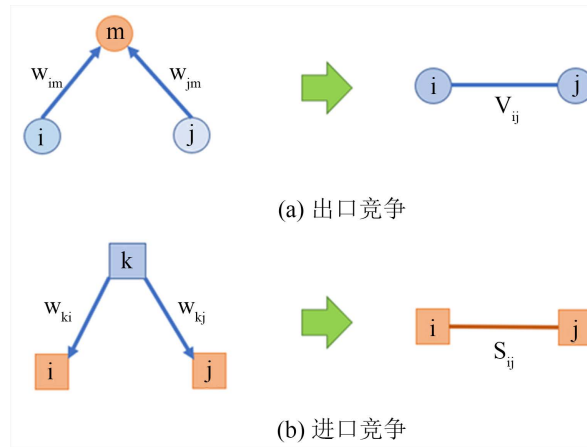


Figure 4. Competition diagram
图 4. 竞争关系示意图

出口(供应)竞争强度定义为:

$$V_{ij} = \sum_m \left\{ \frac{W_{im} + W_{jm}}{W_w^{out}} * \left[1 - \frac{\left| \frac{W_{im}}{W_i^{out}} - \frac{W_{jm}}{W_j^{out}} \right|}{\frac{W_{im}}{W_i^{out}} + \frac{W_{jm}}{W_j^{out}}} \right] \right\} * 100 \quad (6)$$

进口(需求)竞争强度定义为:

$$S_{ij} = \sum_k \left\{ \frac{W_{ki} + W_{kj}}{W_w^{in}} * \left[1 - \frac{\left| \frac{W_{ki}}{W_i^{in}} - \frac{W_{kj}}{W_j^{in}} \right|}{\frac{W_{ki}}{W_i^{in}} + \frac{W_{kj}}{W_j^{in}}} \right] \right\} * 100 \quad (7)$$

通过对能源国际贸易竞争结构和竞争强度的分析,我们可以更好地理解能源国际贸易中贸易国家之间的竞争、竞争关系以及竞争格局。

4) 能源贸易网络危机传播模型

在能源贸易网络上,能源出口国可能会由于各种原因而禁止或减少出口,这里只考虑极端情况,即在重大自然灾害、国家战争、封锁、贸易冲突、制裁、或禁令等情况下,作为风险源的国家完全断开能源供应。这将对其贸易伙伴进口国产生进口损失,进行能源进口的国家除了本国在经济发展上进行消耗以外,可能会作为中转国家将进口的能源商品转售给别国,损失程度是与该国家的能源消耗量分不开的,如果损失的进口量占该进口国家的能源消耗比值很大,则会对该国家产生重大影响,该国同时也可能中断自己对别国的能源出口来先保证本国能源供应安全,这样的供应危机不会只在上述两国间进行,而是从风险源国家出口中断开始向整个能源贸易系统蔓延。针对上述真实背景,我们在之前所构建的三种能源贸易网络基础上,参照樊瑛的 Bootstrap 模型[10],进而分别将各国的煤炭、石油、天然气年消耗量这一实际参数纳入模型中,该模型用于模拟潜在在能源供应中断的扩散,从而评估当前能源贸易网络中的贸易风险。如图 5,详细的建模过程可以分为以下几个步骤:

a) 第一步:定义每个国家在能源贸易网络中的状态

在天然气贸易网络中,所有国家被赋予两种状态:正常(Normal)和异常(Abnormal)。正常状态是指该

国正常从事当前的能源贸易活动。异常状态说明通过进口渠道的中断而产生能源进口损失，进而造成该国能源供应的明显短缺。开始时，网络上的所有国家状态均为正常。

b) 第二步：确定国家状态变化的条件及其反应

各国的状态变化情况及相应的反应如图 5 所示。首先，由于地区争端或其他政治、经济原因，选择天然气出口国 i 由正常状态向异常状态过渡。 i 国是网络中可以被指定的贸易风险源国家， j 国作为 i 国的出口国之一势必受到风险波及，但 j 国的状态改变条件是由下列公式决定的：

$$k_j = \frac{W_{ij}}{C_j^t} > t \quad (8)$$

式中， W_{ij} 是 i 国对 j 国的能源贸易年出口量， C_j 是 j 国在该年的能源消费量， k_j 是二者比值，刻画了由于 i 国异常， j 国损失的进口能源量在年消耗中占比，该值越大证明 i 国异常对 j 国造成的影响越大，即 j 国在能源的供应使用中过度依赖于 i 国对其出口。

进一步， j 国状态变化的判定条件为 k_j 和阈值参数 t 的大小，当 $k_j > t$ 时，表示因 i 国异常， j 国能源供应受到影响， j 国状态也由正常变为异常，在仿真模拟中，阈值 t 分别取 0.3、0.5、0.7 和 0.9，代表当 j 国进口占能耗比大于 t 时变为异常状态。当 $k_j < t$ 时，说明因为国家 i 状态的改变，国家 j 损失的能源进口量占能耗的比值未达到判定阈值 t ，国家 j 维持自身原有状态。上述所有过程在网络中会继而蔓延开来，直到没有新的异常状态国家产生为止。

i 是初始异常节点，设定阈值参数 t 为 0.3、0.5、0.7、0.9； W 是因为 i 国异常 j 国的进口损失的贸易量， C 是 j 国该资源在 t 年的消费量，判定条件是两者比值 k 和 t 作比：

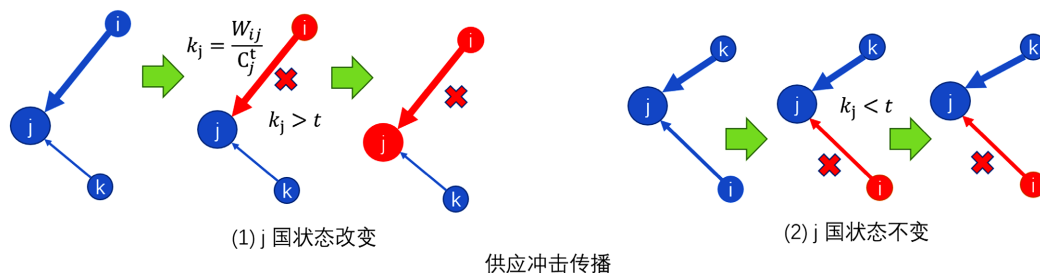


Figure 5. Supply shock propagation diagram

图 5. 供应冲击传播示意

c) 第三步：对上述模型进行计算机数值仿真模拟

根据第一步和第二步的设置，模型将进行多轮。在每一轮中，都会选择煤炭、石油、天然气中每个出口国作为模拟的起始国家，直到没有新的国家可以达到异常状态，整个仿真模拟过程才会停止。

(三) 网络危机传播模型统计指标

1) 国家影响程度

参照 Kyu-Min L 网络级联失效的过程[6]，为了衡量不同国家在危机传播过程中造成的不同影响力，我们将能源贸易网络中初始异常状态国家 i 造成的影响程度大小定为 A (Avalanche)，即引起的危机传播过程中异常节点的总数量(不包括本身)。该值越大，不仅说明国家 i 不仅主导着全球能源贸易的出口供应，而且其在全球能源危机传播中扮演着重要的角色。

2) 国家脆弱程度

在网络危机传播中，另一个关注的问题是如何测度出每个国家的隐藏风险，国家通常关注自身能源对进口的依赖程度、这样只是对直接能源贸易伙伴国的一种测度。但是在网络中，尽管两个国家间没有

直接的能源贸易，但是风险往往会顺着现有的贸易链路在整个贸易体系中传播，这是一种类似于传染病的间接传播，网络脆弱程度 V (Vulnerability)，也可以说是受影响程度，衡量贸易网络中多少个作为初始异常国家会在传播过程中影响到国家 j ，或者说，在对能源贸易网络选取每一个国家作为初始异常状态国家进行仿真模拟过程中，看有多少次模拟会使国家 j 在结束时变为异常状态。网络中任何国家(不包括国家 j)作为初始异常节点都会影响到国家 j ，说明 j 国有很高的脆弱程度。

4. 模型结果分析

(一) 网络演化特征分析

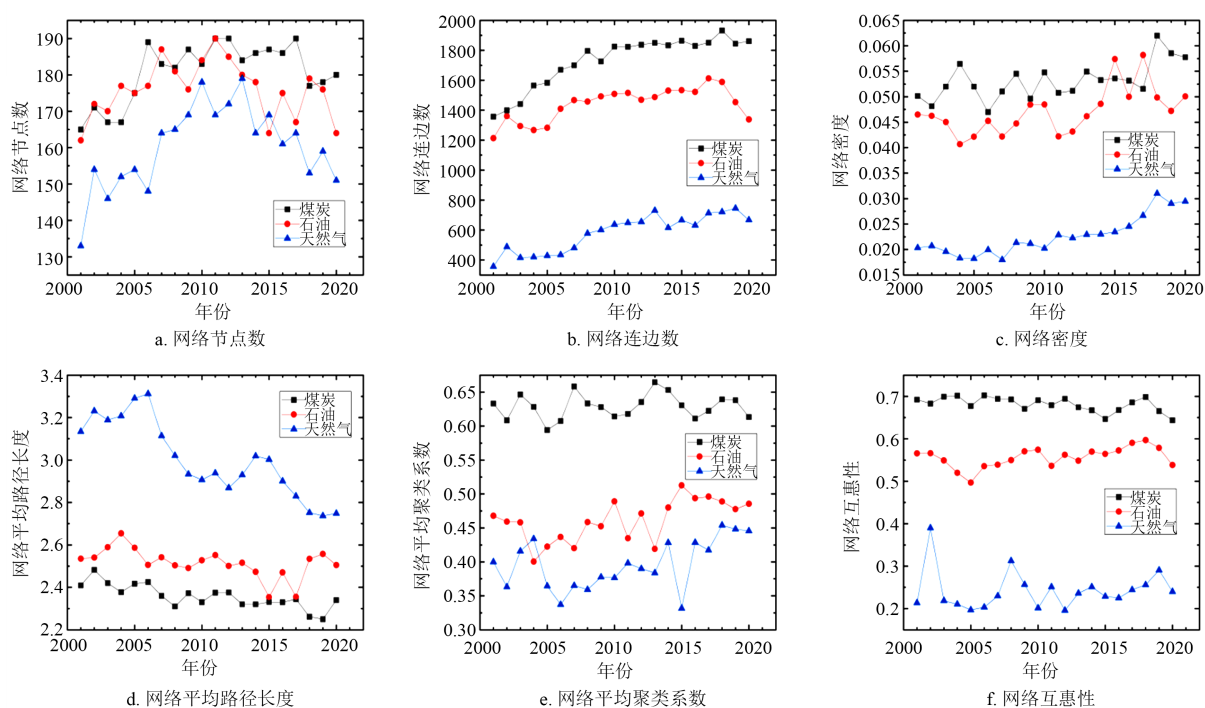


Figure 6. Evolution trend of energy trade network characteristics from 2001 to 2020

图 6. 2001~2020 年能源贸易网络特征演化趋势

如图 6 所示，六个折线图分别刻画了煤炭(黑色方形)，石油(红色圆形)，天然气(蓝色三角形)三种能源 2001~2020 年间网络节点数、连边数、密度、平均路径长度、平均聚类系数和网络互惠性系数六种网络指标的演化特征，横坐标表示年份，纵坐标表示具体的数值，具体结果根据 R 语言 igraph 包计算得到。可以从结果分析得知，20 年间，参与煤炭和石油贸易的国家数量明显高于天然气贸易的参与国数量，天然气作为较为清洁和质优的能源，在世界一次能源构成中的份额从上世纪 50 初的不到 10% 一度上升，并在未来可能成为仅次于煤炭的世界第二大能源，当然这一结果在网络连边数和网络密度的趋势演化中能够明显看到。通过网络平均路径长度可以看出煤炭和石油的平均路径长度在近 20 年来在 2.2~2.7 范围能波动，即在该网络中任选一个国家平均要经过 2.2~2.7 的路径步长到达网络上其他任意伙伴国家。而相比煤炭和石油，天然气贸易网络尽管体现出更长的平均路径，但这一数值在明显的逐年下降，并从起初 3.2~3.4 的水平下降至 2.8 左右，说明近几年来，全球天然气贸易格局日渐紧密，两两国家之间的天然气贸易关系由间接变为直接，距离也逐渐在拉近。一个国家有 1 个甚至多个贸易伙伴，而它的两个伙伴之间也可能互为伙伴，平均聚类系数作为评价网络联系紧密的又一指标刻画的就是这一关系，可以看到，

煤炭作为国际第一主要能源，其贸易网络呈现出更高的平均聚类系数，这也与其已经形成成熟的全球贸易体系是分不开的，而石油和天然气的平均聚类系数波动变化较大且保持在较低水平。同样的，煤炭和石油贸易网络也体现出较高且稳定的互惠性，即两个能源的贸易并不仅仅表现为国家之间的单向流动，而是更多的体现出资源的互补和交换，这也与煤炭和石油在全球国家的资源分布集中度相关，天然气由于其稀缺和开采成本的原因，贸易的互惠性较低，且波动较为明显。

(二) 竞争分析结果

表 2 显示了 2020 年煤炭、石油、天然气进口竞争最激烈的前 10 个国家组合，可以看到在煤炭进口竞争中，挪威在前 10 名中出现了 5 次，尽管其作为世界第三大天然气出口国，第八大石油出口国，但在煤炭这一资源的空缺是显而易见的，除了和欧洲一些国家在进口上竞争煤炭资源以外，也会和一些亚洲国家(如缅甸、尼泊尔)进行竞争。而在石油进口竞争上，前十名国家组合中都包含了中国，这正符合中国“贫油”的能源储备特征，同时也间接表明了中国在石油上对进口的依赖，与中国进行石油贸易竞争的国家除了是一些东亚东南亚邻近国以外，还有一些欧洲国家。天然气进口竞争关系前十的国家组合几乎都分布在亚洲，集中在东亚和东南亚，中国则出现了 4 次，“少气”的能源现状和天然气作为清洁能源对“双碳”目标的推动使得中国未来在天然气上的进口竞争只会更加激烈，此外，日本作为液化天然气的第一进口大国在进口竞争前 10 名中与 7 个亚洲国家都有大量的共同进口源，甚至也和远在欧洲的英国竞争。

Table 2. Import competition analysis

表 2. 进口竞争分析

排名	进口竞争						
	煤炭		石油		天然气		
1	挪威	芬兰	中国	印度	中国	日本	
2	挪威	法国	中国	韩国	韩国	日本	
3	挪威	瑙鲁	中国	意大利	中国	韩国	
4	芬兰	法国	中国	西班牙	日本	泰国	
5	挪威	缅甸	中国	泰国	新加坡	日本	
6	芬兰	瑙鲁	中国	新加坡	中国	新加坡	
7	芬兰	缅甸	中国	法国	中国	日本	
8	法国	缅甸	中国	荷兰	韩国	日本	
9	法国	瑙鲁	中国	日本	印度	韩国	
10	挪威	尼泊尔	中国	马来西亚	英国	日本	

表 3 显示了 2020 年煤炭、石油、天然气出口竞争最激烈的前 10 个国家组合，整体来看，大部分国家都是能源的主要出口国，但表格还额外揭示两个主要出口国家是否有大量相同出口源，并向相同的出口源国家同时进行大量的能源出口，如在煤炭出口上，澳大利亚作为煤炭的主要出口国和其他欧美国家进行出口上的竞争，中国与澳大利亚在 2021 年发生贸易冲突后，不再进口澳大利亚的煤炭，中国作为以前澳大利亚的主要煤炭出口国损失了大量的出口订单，不得不将造成的出口缺口补齐，澳大利亚需要寻找新的贸易伙伴国家出口煤炭，但可以看到前 10 名组合中，有 7 个竞争对手与澳大利亚抢夺煤炭市场份额，可见形势对其是不容乐观的。石油出口贸易竞争则深度揭示了中东国家在石油储备和市场上的巨大优势，沙特阿拉伯一直都有“石油王国”著称，是世界上石油储量、产量和销售量最多的国家之一，在

出口竞争的前 10 个国家组合中出现了 8 次, 除此外, 得益于页岩油的发现和开采, 美国也成为了沙特阿拉伯在石油出口上的强劲对手, 其余石油贸易市场上的份额则被中东、南美等国家占据。作为煤炭主要出口国的澳大利亚在国际天然气市场上也十分有实力, 在俄罗斯遭受贸易制裁后, 其在天然气出口的大部分伙伴国因天然气断供后转而向其他天然气主要出口国寻求帮助, 这势必会对全球天然气贸易竞争格局产生重大影响。

Table 3. Export competition analysis
表 3. 出口竞争分析

排名	出口竞争					
	煤炭		石油		天然气	
1	澳大利亚	莫桑比克	沙特阿拉伯	阿联酋	澳大利亚	马来西亚
2	澳大利亚	丹麦	沙特阿拉伯	科威特	澳大利亚	印度尼西亚
3	澳大利亚	加拿大	沙特阿拉伯	伊拉克	澳大利亚	巴布亚新几内亚
4	英国	美国	沙特阿拉伯	俄罗斯	卡塔尔	美国
5	澳大利亚	斯洛伐克	沙特阿拉伯	卡塔尔	俄罗斯	美国
6	澳大利亚	波兰	俄罗斯	伊拉克	澳大利亚	卡塔尔
7	澳大利亚	卢森堡	沙特阿拉伯	巴西	卡塔尔	俄罗斯
8	澳大利亚	塞尔维亚	沙特阿拉伯	马来西亚	马来西亚	卡塔尔
9	马来西亚	马拉维	美国	沙特阿拉伯	澳大利亚	美国
10	马来西亚	摩尔多瓦	沙特阿拉伯	厄瓜多尔	澳大利亚	俄罗斯

(三) 危机传播分析结果

不同于竞争分析的角度, 我们在危机传播中重点关注三种能源的供应安全, 要考虑出口伙伴国家在能源断供后造成的影响, 这里的结果是对所有国家在进口占能耗比值 t 在取 0.3、0.5、0.7 和 0.9 情况下, 煤炭、石油和天然气影响程度排名前 10 名国家和脆弱程度前 10 名的国家。

1) 煤炭供应危机传播分析

在煤炭贸易中, 我们考虑到的数据可获得性, 尽管有 170 个国家参与到煤炭贸易中来, 但只获得到共 131 个国家的煤炭年消费数据, 在具体仿真模拟过程分析中剔除了缺失消费数据的 39 个国家, 只考虑这 131 个国家的危机传播情况。

如表 4, 可以看到, 不管阈值取多少, 美国和澳大利亚的位置一直都稳居前两名, 随着阈值 t 的升高, 受影响国家抵御风险冲击的能力随之也升高, 这两个国家能影响的国家数目也在减少, 当 $t = 0.3$ 时, 即在整个煤炭贸易网络中, 美国作为风险源国家断开其所有进出口连边时, 对所有网络上能造成其进口损失占自身消费比超过 30% 的国家数达到了 40 个, 这 40 个国家并不全是美国的煤炭直接出口国家, 但由于经济全球化在网络体系上将这一系统性风险放大, 所有直接和间接与美国产生煤炭贸易的国家都不得不考虑自身是否受到其影响, 具体会受多大影响。

当 $t = 0.5$ 时, 风险源国家美国对整个网络上国家的影响显著降低, 与在 $t = 0.3$ 时排在第二名的澳大利亚差距明显缩小很多, 证明不管是美国还是澳大利亚作为风险源国家, 都能对煤炭贸易网络上 20 多个国家造成大于 50% 的进口占本国煤炭消耗量的损失, 可能这 20 多个国家成分都是不同的, 这可以为我们后续研究提供新的思路。

Table 4. Coal trade network supply crisis propagation degree
表 4. 煤炭贸易网络供应危机传播影响程度

阈值	0.3		0.5		0.7		0.9	
排名	风险源国家	影响程度	风险源国家	影响程度	风险源国家	影响程度	风险源国家	影响程度
1	美国	40	美国	25	美国	19	美国	11
2	澳大利亚	26	澳大利亚	23	澳大利亚	18	澳大利亚	8
3	莫桑比克	14	莫桑比克	8	莫桑比克	6	德国	4
4	德国	11	德国	7	德国	5	英国	4
5	马来西亚	10	芬兰	7	英国	5	法国	3
6	芬兰	8	中国	7	法国	4	马来西亚	3
7	英国	8	英国	7	马来西亚	4	德国	3
8	中国	8	法国	5	中国	4	比利时	3
9	法国	5	马来西亚	5	南非	4	波兰	3
10	南非	4	南非	4	墨西哥	3	莫桑比克	2

如表 5，而对于煤炭供应冲击反应的被影响国家，也按照脆弱程度由大到小排名整理出了前 10 名的结果，其中大部分都是煤炭进口依存度很高的国家，国家自身煤炭消耗量强烈依赖于进口，比如在 $t = 0.3$ 时，对于像爱尔兰、也门和立陶宛这些国家，6 个不同的风险源国家在网络上作为初始风险源节点断开进出口连边都会直接或间接影响到这 3 个国家的 30% 以上的煤炭消耗，具体的网络危机传播路径是怎样的可以在后续工作中深入研究。但相比于影响程度表中国家排名的变化，在阈值 t 取不同值时，脆弱程度的国家排名会出现大程度的改变，这说明，国家脆弱程度指标不仅依赖于自身对该能源进口量的反应，更与国家进口量对能源消耗量反应的敏感程度有着密切的关系，将能源消耗量纳入网络级联失效过程中阈值参数进行考量是非常有说服力的。

Table 5. Coal trade network supply crisis spread vulnerability
表 5. 煤炭贸易网络供应危机传播脆弱程度

阈值	0.3		0.5		0.7		0.9	
排名	被影响国家	脆弱程度	被影响国家	脆弱程度	被影响国家	脆弱程度	被影响国家	脆弱程度
1	爱尔兰	6	阿联酋	4	阿联酋	4	摩尔多瓦	4
2	立陶宛	6	纳米比亚	4	纳米比亚	4	日本	3
3	也门	6	摩尔多瓦	4	摩尔多瓦	4	白俄罗斯	3
4	突尼斯	5	巴基斯坦	4	黎巴嫩	4	塞舌尔	3
5	土耳其	4	黎巴嫩	4	马来西亚	3	挪威	2
6	阿联酋	4	埃及	4	日本	3	瑙鲁	2
7	新西兰	4	马来西亚	3	拉脱维亚	3	哥斯达黎加	2
8	纳米比亚	4	比利时	3	白俄罗斯	3	塞内加尔	2
9	拉脱维亚	4	日本	3	摩洛哥	3	萨尔瓦多	2
10	科威特	4	巴西	3	卢森堡	3	肯尼亚	2

2) 石油供应危机传播分析

在石油贸易中,由于数据可获得性,网络中共有 165 个国家节点参与进来,但在美国能源信息署(EIA)网站只获得到共 87 个国家的石油年消费数据,在具体仿真模拟过程分析中剔除了缺失消费数据的 78 个国家,只考虑这有消费数据的 87 个国家的危机传播情况。

相比于煤炭危机传播的情况,表 6 中,影响程度排前 10 个国家在石油供应上产生的冲击要小很多,这可能也与石油消耗数据的缺失有着很大的关系。享有“石油王国”美誉的沙特阿拉伯王国作为世界上的石油出口大国并不是在全球供应上影响很大的国家,反而是俄罗斯、美国和南非等这些作为石油进口和出口上的枢纽国家影响程度更大一些,此外尽管中国不是主要出口石油的国家,但是中国的在石油贸易网络上的位置和自身能源贸易格局也使得自身在能源贸易网络上扮演着越来越重要的角色。

值得注意的是,当阈值 $t = 0.9$ 时,除俄罗斯、南非和荷兰仅能影响 2~3 个石油进口依存度高的国家以外,其余个别国家中断自身石油出口仅会影响到 1 个贸易伙伴的石油消耗。

Table 6. Oil trade network supply crisis propagation degree
表 6. 石油贸易网络供应危机传播影响程度

阈值	0.3		0.5		0.7		0.9	
排名	风险源国家	影响程度	风险源国家	影响程度	风险源国家	影响程度	风险源国家	影响程度
1	俄罗斯	14	俄罗斯	7	俄罗斯	5	俄罗斯	3
2	美国	8	南非	4	南非	4	南非	3
3	南非	6	美国	3	美国	2	荷兰	2
4	伊拉克	4	荷兰	2	荷兰	2	美国	1
5	中国	3	阿联酋	2	阿联酋	2	中国	1
6	沙特阿拉伯	3	中国	1	中国	1	印度	1
7	荷兰	3	伊拉克	1	印度	1	阿联酋	1
8	阿联酋	3	印度	1	比利时	1	比利时	1
9	哈萨克斯坦	3	比利时	1	挪威	1	尼日利亚	1
10	比利时	2	挪威	1	哈萨克斯坦	1	西班牙	1

在表 7 中,大部分欧洲国家在石油供应冲击中都表现出相同和相近的脆弱程度,当 $t = 0.3$ 时,3~4 个国家分别作为风险源中断石油供应时,都会对这些国家造成占其石油消耗量大于 30% 的进口损失,在整个石油贸易网络中,当所有被影响国家的阈值 $t = 0.5$ 、0.7 或 0.9 时造成的结果并没有像煤炭贸易被影响国家的情况那样多变,这些脆弱程度较高的国家也只受 2~3 个出口国家的石油供应。

Table 7. Oil trade network supply crisis spread vulnerability
表 7. 石油贸易网络供应危机传播脆弱程度

阈值	0.3		0.5		0.7		0.9	
排名	被影响国家	脆弱程度	被影响国家	脆弱程度	被影响国家	脆弱程度	被影响国家	脆弱程度
1	克罗地亚	4	立陶宛	3	立陶宛	3	白俄罗斯	2
2	斯洛文尼亚	4	布隆迪	3	比利时	2	斯洛伐克	2
3	布隆迪	4	比利时	2	斯洛伐克	2	立陶宛	2

Continued

4	比利时	3	波兰	2	瑞典	2	以色列	2
5	哥伦比亚	3	瑞典	2	白俄罗斯	2	蒙古	2
6	厄瓜多尔	3	白俄罗斯	2	芬兰	2	土库曼斯坦	2
7	希腊	3	芬兰	2	匈牙利	2	埃塞俄比亚	2
8	立陶宛	3	希腊	2	保加利亚	2	莱索托	2
9	伯利兹	3	斯洛伐克	2	圭亚那	2	摩洛哥	2
10	波黑	3	匈牙利	2	以色列	2	肯尼亚	2

3) 天然气供应危机传播分析

在天然气贸易中,我们将国家间分开统计的液化天然气(LNG)和气态天然气(CNG)贸易额加总起来统计天然气年贸易量的情况,共有 150 个国家或地区都在进行或是以液化天然气密封罐运输的贸易,又或是以建成的国家间的天然气管道进行气态运输,但在美国能源信息署网站只获得到共 86 个国家的煤炭年消费数据,在具体仿真模拟过程分析中剔除了缺失天然气消费数据的 64 个国家,只考虑这 86 个国家的天然气贸易危机传播情况。

可以看出在表 8 中,俄罗斯作为世界天然气出口大国的地位得以彰显,在阈值较小的情况下,俄罗斯中断现有已建立的天然气出口运输都会造成不小的影响,有些国家不一定是俄罗斯的直接输气国家,但是在已构建的全球天然气贸易输配管网和液态天然气运输管网上,只要少了俄罗斯这一关键的国家节点,那么现有的天然气贸易体系就会遭受重大破坏,俄乌战争冲突爆发后,欧美多国发起了对俄罗斯多方面的制裁,2021 年基本完成的“北溪-2 号”出现的运营商大规模的支付困难情况,这对俄罗斯向欧洲的稳定供气产生了很大影响。其次,美国作为俄罗斯之后第二大影响全球天然气贸易的国家,尤其在 $t=0.9$ 时,一度超过俄罗斯能够影响到 7 个国家在天然气上的大量供应。

中国尽管不是天然气出口的主要国家,但中国作为俄罗斯邻近国,且在全球地理位置处在亚洲的中心位置上,成为天然气贸易的桥梁和枢纽,在一定程度上,断开中国天然气贸易进出口也能造成不小的影响。

Table 8. Gas trade network supply crisis propagation degree

表 8. 天然气贸易网络供应危机传播影响程度

阈值	0.3		0.5		0.7		0.9	
排名	风险源 国家	影响 程度	风险源 国家	影响 程度	风险源 国家	影响 程度	风险源 国家	影响 程度
1	俄罗斯	26	俄罗斯	15	俄罗斯	14	美国	7
2	美国	17	美国	13	美国	8	南非	6
3	挪威	16	南非	9	南非	8	俄罗斯	4
4	南非	9	莫桑比克	9	莫桑比克	8	中国	4
5	莫桑比克	9	中国	5	中国	4	新加坡	2
6	荷兰	7	阿联酋	3	新加坡	2	坦桑尼亚	2
7	比利时	7	坦桑尼亚	3	阿联酋	2	西班牙	1
8	中国	6	匈牙利	3	坦桑尼亚	2	英国	1
9	阿联酋	6	奥地利	3	新西兰	2	印度	1
10	加拿大	4	西班牙	2	西班牙	1	意大利	1

如表 9，在天然气贸易网络中暴露出脆弱程度较高的国家多是像冰岛这样自然资源匮乏，能源大量依赖进口的国家，又或是刚果这样在石油等其他能源上丰富，但天然气资源匮乏的国家，欧洲一些直接需要俄罗斯或是美国供气的国家极少出现在这张表格之中，这可能侧面说明这些欧洲国家在天然气贸易模式上的单一性和对俄或美等国的强依赖性，这次俄乌冲突导致的欧洲多国的供气危机以及气价暴涨就是此类问题的直接体现。

Table 9. Gas trade network supply crisis transmission vulnerability
表 9. 天然气贸易网络供应危机传播脆弱程度

阈值	0.3		0.5		0.7		0.9	
排名	被影响国家	脆弱程度	被影响国家	脆弱程度	被影响国家	脆弱程度	被影响国家	脆弱程度
1	冰岛	6	斯洛文尼亚	4	马拉维	3	巴拿马	2
2	刚果	6	克罗地亚	4	奥地利	3	多米尼克	2
3	瑞士	5	马拉维	3	莱索托	3	巴哈马	2
4	瑞典	5	斯威士兰	3	纳米比亚	3	阿鲁巴岛	2
5	直布罗陀	5	匈牙利	3	博茨瓦纳	3	伯利兹	2
6	黑山	5	奥地利	3	津巴布韦	3	尼日尔	2
7	法国	4	莱索托	3	塞舌尔	3	卢旺达	2
8	立陶宛	4	纳米比亚	3	刚果(金)	2	布隆迪	2
9	斯洛文尼亚	4	博茨瓦纳	3	塔吉克斯坦	2	玻利维亚	2
10	克罗地亚	4	津巴布韦	3	巴拿马	2	也门	2

5. 结论及启示

本文通过建立贸易网络竞争强度指标和将纳入能源年消耗量的 Bootstrap 模型来从竞争和冲击两个角度来研究 2020 年国际煤炭、石油、天然气能源市场格局，在竞争分析中，我们分别从进口和出口两个角度来剖析三种能源在国家之间竞争强度排名，发现很多国家都有相同的进(出)口源，且都从相同的进(出)口源中进行大量的进(出)口，且竞争的激烈程度也从一定程度上反映了国家对该资源的依赖程度，特别是在油价飙升的当下，加快改变本国能源结构，制订合理的能源发展战略，寻求安全、低碳、环保的能源发展模式是所有国家特别是发达国家、高水平发展国家亟待考虑的问题。

在冲击分析中，把能源在国家的年消耗量纳入模型中考虑使其比传统的 Bootstrap 模型在贸易网络上应用更加具有现实意义，综合煤炭、石油、天然气能源贸易网络冲击影响程度的排名结果，只有少数几个能源重要出口国作为风险源国家才能对整个能源贸易网络体系产生重大影响，这表明现有的能源贸易网络是“稳健但又脆弱”的，即在网络攻击中，只有对关键节点的产生的蓄意攻击才能引起网络的大面积崩溃，而随机挑选节点的攻击依旧使网络功能维持稳健，经济全球化和能源市场一体化尽管拉进了能源贸易网络上各参与国之间的距离，促进了能源从出口国家向资源稀缺国转移，但是这给各国带来机遇的同时，也不可忽视要面临重大挑战：过度依赖能源进口进行经济发展和进口渠道单一的国家暴露出更大的风险，战争、贸易冲突等不确定性事件看似只影响到国家间贸易，实则将这一风险在网络上传播并不断放大，能源安全逐渐和粮食安全一样成为双循环发展格局中要考虑的两大问题，网络级联失效模型测度了三种能源在每个参与国作为风险源国家产生的影响力和每个国家在危机中暴露出的脆弱程度。危机传播模拟得出的结果更能说明，国家应将能源贸易的渠道拓宽，而不是单一依赖少数贸易伙伴进行能

源供应,而且对于能源储备匮乏的国家尽管不能改变经济发展对能源的依赖的程度,但是能通过找寻更多贸易进口国,并将国家能源总进口量更分散更均匀的分配给这些伙伴才能提升抵御能源风险冲击的能力。

最后,在新冠疫情爆发和俄乌冲突影响后的全球能源贸易市场中,能源风险管理应谨慎。面临动荡的全球能源市场格局,新冠肺炎疫情正在使其加速“去全球化”走向“区域化”。在这个“强健但脆弱”的能源贸易网络中,大部分国家都是能源贸易网络上不可或缺的枢纽,尽管大部分国家不都是资源稀缺的国家(可能只在煤炭、石油、天然气单方面资源匮乏),但个别区域社团如欧洲在三种能源上具有互补性,具备形成区域经济的潜力,区域贸易一体化成为许多国家在贸易形式上的选择,对于亚洲大部分国家则更好的体现在由中国提出建设“一带一路”合作倡议和由东盟发起的《区域全面经济伙伴关系协定》(RCEP)上。此外,根据世界卫生组织(WHO)的数据,COVID-19大流行可能需要5年时间才能得到控制。因此,现阶段不可能直接研究新冠疫情大流行对能源贸易特征和网络竞争的实际影响。相反,本文分析了冲击在能源贸易网络中的传播机制,揭示了其中隐藏的风险,这对构建更具弹性的贸易体系具有重要意义。期待能在后续工作中研究一些突发事件对能源贸易网络上的长期影响,并做相关的动态分析。

参考文献

- [1] De Benedictis, L. and Tajoli, L. (2011) The World Trade Network. *World Economy*, **34**, 1417-1454. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9701.2011.01360.x>
- [2] Xi, X., Zhou, J., Gao, X., et al. (2019) Impact of Changes in Crude Oil Trade Network Patterns on National Economy. *Energy Economics*, **84**, Article ID: 104490. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.104490>
- [3] Yang, Y., Poonet, J.P.H., Liu, Y. and Bagchi-Sen, S. (2015) Small and Flat Worlds: A Complex Network Analysis of International Trade in Crude Oil. *Energy*, **93**, 534-543. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.079>
- [4] Wang, W., Li, Z. and Cheng, X. (2019) Evolution of the Global Coal Trade Network: A Complex Network Analysis. *Resources Policy*, **62**, 496-506. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.10.005>
- [5] Geng, J.-B., Ji, Q. and Fan, Y. (2014) A Dynamic Analysis on Global Natural Gas Trade Network. *Applied Energy*, **132**, 23-33. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.064>
- [6] Lee, K.-M., Yang, J.-S., Kim, G., Lee, J., Goh, K.-I. and Kim, I.-M. (2011) Impact of the Topology of Global Macroeconomic Network on the Spreading of Economic Crises. *PLOS ONE*, **6**, e18443. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0018443>
- [7] Cheewatrakoolpong, K. and Manprasert, S. (2014) Trade Linkages and Crisis Spillovers. *Asian Economic Papers*, **13**, 84-103. https://doi.org/10.1162/ASEP_a_00253
- [8] Klimek, P., Obersteiner, M. and Thurner, S. (2015) Systemic Trade-Risk of Critical Resources. *Science Advances*, **1**, e1500522. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500522>
- [9] 任素婷, 崔雪锋, 樊瑛. 国际贸易网络中的靴襻渗流模型[J]. 电子科技大学学报, 2015, 44(2): 178-182.
- [10] Ying, F., Ren, S., Cai, H. and Cui, X. (2014) The State's Role and Position in International Trade: A Complex Network Perspective. *Economic Modelling*, **39**, 71-81. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2014.02.027>
- [11] Ruediger, M. (2014) The 1973 Oil Crisis and the Designing of a Danish Energy Policy. *Historical Social Research*, **39**, 94-112.
- [12] Tuerk, H. (2014) The Oil Crisis of 1973 as a Challenge to Multilateral Energy Cooperation among Western Industrialized Countries. *Historical Social Research*, **39**, 209-230.
- [13] Wei, N., Xie, W.-J. and Zhou, W.-X. (2021) Robustness of the International Oil Trade Network under Targeted Attacks to Economies. *Energy*, **251**, Article ID: 123939. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123939>
- [14] Du, R., Wang, Y., Dong, G., et al. (2017) A Complex Network Perspective on Interrelations and Evolution Features of International Oil Trade, 2002-2013. *Applied Energy*, **196**, 142-151. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.042>
- [15] Ball, F., Sirl, D. and Trapman, P. (2010) Analysis of a Stochastic SIR Epidemic on a Random Network Incorporating Household Structure. *Mathematical Biosciences*, **224**, 53-73. <https://doi.org/10.1016/j.mbs.2009.12.003>
- [16] Wang, C., Huang, X., Hu, X., et al. (2021) Trade Characteristics, Competition Patterns and COVID-19 Related Shock Propagation in the Global Solar Photovoltaic Cell Trade. *Applied Energy*, **290**, Article ID: 116744. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116744>

-
- [17] Baxter, G.J., Dorogovtsev, S.N., Goltsev, A.V. and Mendes, J.F.F. (2010) Bootstrap Percolation on Complex Networks. *Physical Review E*, **82**, Article ID: 011103. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.82.011103>
- [18] Goltsev, A.V., Dorogovtsev, S.N. and Mendes, J.F.F. (2010) k -Core (Bootstrap) Percolation on Complex Networks: Critical Phenomena and Nonlocal Effects. *Physical Review E*, **73**, Article ID: 056101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.73.056101>
- [19] Tlusty, T. and Eckmann, J.P. (2009) Remarks on Bootstrap Percolation in Metric Networks. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, **42**, 769-778. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/42/20/205004>
- [20] 万宝惠, 张鹏, 张晶, 狄增如, 樊瑛. 二分网上的靴襻渗流[J]. 物理学报, 2012, 61(16): 369-374.
- [21] Chen, Z., An, H., An, F., Guan, Q. and Hao, X. (2018) Structural Risk Evaluation of Global Gas Trade by a Network-Based Dynamics Simulation Model. *Energy*, **159**, 457-471. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.166>
- [22] Newman, M.E.J. (2003) The Structure and Function of Complex Networks. *SIAM Review*, **45**, 167-256. <https://doi.org/10.1137/S003614450342480>
- [23] Glick, R. and Rose, A.K. (1999) Contagion and Trade: Why Are Currency Crises Regional? *Journal of International Money and Finance*, **18**, 603-617. [https://doi.org/10.1016/S0261-5606\(99\)00023-6](https://doi.org/10.1016/S0261-5606(99)00023-6)