引文格式：杨紫文,刘东海,喻雪松,等. 国际粮食贸易网络的时空演化与抗毁性分析[J]. 地理空间信息, 2025, 23(9): 27-32. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.09.007

国际粮食贸易网络的时空演化与抗毁性分析

杨紫文[1]，刘东海[1]，喻雪松[1]，周　扬[1]，梁天祺[1]，邢玲丽[1]，李　锴[2]，秦　昆[1*]
（1. 武汉大学 遥感信息工程学院，湖北 武汉 430079；2. 武汉大学 经济与管理学院，湖北 武汉 430072）

摘　要：国际粮食贸易是国际贸易的重要组成部分，对国家的外交政策和经济发展战略制定具有重要影响。利用2011—2022年联合国商品贸易统计数据库的双边贸易数据构建了国际粮食贸易网络，并基于复杂网络理论分析其时空演变特征；采用拉普拉斯中心性挖掘网络中的重要国家节点，提出了经济学意义修正的渗流攻击方法，模拟随机攻击和蓄意攻击，对国际粮食贸易网络的抗毁性进行了研究。结果表明：①国际粮食贸易呈现出贸易伙伴多元化和贸易活力退潮化两大趋势；②粮食贸易网络的抗毁性近年来相对稳定，但应对蓄意攻击的能力较差；③国际粮食贸易呈现出一定的垄断性和地缘聚集性。

关键词：国际粮食贸易网络；演化分析；抗毁性；渗流攻击方法；复杂网络
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）09-0027-06

Spatio-temporal Evolution and Invulnerability Analysis of International Food Trade Network

YANG Ziwen[1], LIU Donghai[1], YU Xuesong[1], ZHOU Yang[1], LIANG Tianqi[1], XING Lingli[1], LI Kai[2], QIN Kun[1]
(1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
2. School of Economics and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: International food trade is an important component of international trade and has a significant impact on the formulation of a country's foreign policy and economic development strategy. We used the bilateral trade data of the United Nations commodity trade statistics database from 2011 to 2022 to construct the international food trade network, and analyzed its spatio-temporal evolution characteristics based on the complex network theory. Then, we adopted the Laplace centrality to excavate the important country nodes in the network, and proposed a modified seepage attack method in the sense of economics. We used this method to simulate random and intentional attacks, in order to study the invulnerability of international food trade network. The results show that ①the international food trade exhibits two major trends, such as diversification of trade partners and ebbing trade dynamics. ②The invulnerability of food trade network has been relatively stable in recent years, but its ability to cope with intentional attacks is poor. ③International food trade exhibits a certain degree of monopoly and geopolitical agglomeration.

Key words: international food trade network, evolutionary analysis, invulnerability, seepage attack method, complex network

在经济全球化背景下，各国间的经贸活动联系紧密，粮食贸易已发展为相互融合、不可分割的整体，影响着全球政治和经济格局[1]。近年来国际粮食贸易受到前所未有的考验，根据联合国粮农组织2016—2022年出版的《作物前景与粮食形势》[2-8]报告，武装冲突一直是世界粮食安全最大的威胁。2020年以来，在新冠疫情、俄乌冲突以及极端天气的影响下[9]，全球粮食贸易受到严重冲击，国际粮食危机引起了国际社会的强烈关注[10]。如何制定粮食贸易策略成为战略性议题，需要对国际粮食贸易的演化历史和现阶段格局进行深入研究。

早期粮食贸易研究大多针对特定的双边贸易关系，将两国或多国之间的粮食贸易视作一个独立的系统，而忽视了该系统与外部世界的关联[11]。随着计算社会科学与社会地理计算分析方法的不断发展[12-14]，从地理和网络视角研究国际粮食贸易，可直观展示国际粮食贸易体系的地理格局[15]，多方位评估地缘政治对粮食贸易的影响力，从而形成对国际粮食多边贸易体系更全局的认知，对制定应对粮食危机的策略具有重要意义[16-17]。目前已有很多学者[18-22]从不同角度研究了国际粮食贸易网络（IFTN）的结构演变趋势。在小麦、稻米、玉米、大豆等具体粮食品类的区域或全球贸易研究中取得了一定进展，但缺乏全球尺度的粮食贸易的整体宏观把控。为提高IFTN抵抗风险的能

项目来源：国家自然科学基金资助项目（42171448）；中央高校基本科研业务费专项资金资助项目（2042024kf0005）。
第一作者简介：杨紫文（2003—），本科，研究方向为空间数据分析，E-mail：zw.yang@whu.edu.cn。
通信作者：秦昆（1972—），博士，教授，研究方向为空间数据分析，E-mail：qink@whu.edu.cn。

力，为我国提供合理的应对策略，需要深入探究国际粮食贸易的核心运行机制，发掘IFTN的抗毁性。Albert等[23]指出复杂网络面对随机攻击和蓄意攻击时分别表现出鲁棒性和脆弱性。抗毁性测度包括全局抗毁性测度和局部抗毁性测度，较典型的全局抗毁性测度为节点连通度[24]，局部抗毁性测度为节点分解[25]，但粮食贸易抗毁性往往有不同的侧重点。针对粮食贸易网络抗毁性的理论研究和实际应用[26-28]都取得了一定进展，但大多是从复杂网络理论出发，缺乏经济学理论的支持。当从经济物理学的角度考虑IFTN的抗毁性时，急需找到一个全面的测度，更好地解决实际问题。

1 数据来源与研究框架

1.1 数据来源

本文采用的数据来源于联合国商品贸易统计数据库。该数据库涵盖了广泛的商品种类，包括但不限于农产品、工业品、矿产品、化工品、机械设备、电子产品等。数据的时间跨度通常从20世纪50年代至今，包括全球近200个国家和地区的贸易数据。数据分类采用国际通用的商品分类系HS编码，可按照进口和出口进行查询，以便分析贸易平衡和趋势。本文采用其中的谷物双边贸易数据（HS Code=10）进行处理与分析。

1.2 研究框架

本文提出了一个国际粮食贸易网络时空演化和抗毁性的分析框架，首先对数据进行采集和清洗并构建IFTN；再利用复杂网络和地理流分析理论[29]在全球尺度上研究其网络结构的时空演化规律，利用节点数目和连边条数分析国际粮食贸易体系的规模，采用节点的平均度中心性来衡量各国粮食贸易伙伴的多元化程度，利用节点的平均强度来评估国际粮食贸易活力的演化；然后采用能反映节点对网络拓扑完整性贡献大小的拉普拉斯中心性对节点进行排序，以经济学要素改进的渗流攻击方法为IFTN抗毁性测度，分析IFTN抗毁性的演化规律；最后对研究结果进行总结与展望。

2 研究理论与方法

2.1 网络构建

本文收集并整理了联合国商品贸易统计数据库2011—2022年的谷物双边贸易数据，将网络节点定义为国家或地区的集合，若两个国家或地区间存在贸易关系，则在二者之间构建一条无权无向边。贸易网络结构探测与抗毁性分析时，需要考虑进出口国家方向以及贸易流量对拓扑网络的影响，因此以国家为节点，以双边贸易为边，以进出口贸易关系为贸易流方向，以贸易流强度为边的权重，构建有向加权网络。

2.2 IFTN拓扑结构探测方法

2011—2022年IFTN的拓扑结构受国际形势影响在不断变化[16,30]。本文从贸易网络的整体规模和局部节点结构两个角度来挖掘IFTN拓扑结构的时空演化规律，选取贸易网络中节点数量和连边数量作为IFTN规模的衡量指标[31]，选取节点平均度中心性作为局部节点结构指标。与节点直接相连的节点数量为节点的度，节点平均度中心性则是所有节点度的平均值，可反映国家贸易伙伴的多元化程度。在有向加权网络中，与节点直接相连的边的权重之和为节点的强度，节点平均强度则是所有节点强度的平均值，即国家节点与其他节点的平均贸易额[32]，用以评估粮食贸易的活力。

2.3 IFTN抗毁性分析方法

1）拉普拉斯中心性。网络节点的重要性分析是网络抗毁性分析的重要基础。常用的衡量网络节点重要性的方法包括度中心性[33]、K-Shell分解[34]、接近中心性[35]、介数中心性[36]等，但这些方法不能兼顾节点的本地信息和全局信息，且主要关注网络的连通性，较少关注权重。IFTN是一个经济物理学概念[37]，其节点的重要性不仅取决于连通性，还取决于国家之间的贸易额。

本文采用兼顾连通性和权重的拉普拉斯中心性对IFTN节点的重要性进行评估。拉普拉斯中心性（l_i）、拉普拉斯矩阵 $\boldsymbol{L}(\boldsymbol{G})$ 和拉普拉斯能量 $E(G)$ 的计算公式为：

$$l_i=\frac{E_L(G)-E_L(G_i)}{E_L(G)} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{L}(\boldsymbol{G})=\boldsymbol{X}(\boldsymbol{G})-\boldsymbol{W}(\boldsymbol{G}) \tag{2}$$

$$E(G)=\sum_{i=1}^{n}\lambda_i^2 \tag{3}$$

式中，$E_L(G)$ 为全部节点的网络拉普拉斯能量；$E_L(G_i)$ 为移除节点 G_i 后的网络拉普拉斯能量；$\boldsymbol{X}(\boldsymbol{G})$ 为以总贸易额为权重的节点强度序列对角矩阵；$\boldsymbol{W}(\boldsymbol{G})$ 为网络的加权邻接矩阵，反映节点之间的连通性；λ_i 为 $\boldsymbol{L}(\boldsymbol{G})$ 的特征值。

2）基于经济学要素改进的渗流攻击方法。从网络科学角度出发，抗毁性是指在网络遭受破坏时，网络结构的完整性；但从经济学角度上看，抗毁性还需考虑网络的贸易额减损程度。如果网络在遭受攻击后，总强度仍保持相对稳定，那么它就具有较高的抗毁性。本文选取网络遭受攻击后的巨型连通分量

（GCC）内节点总强度占未受攻击时网络总强度的比例作为抗毁性测度，基于渗流的思想[38]在IFTN中不断移除节点，导致GCC内的总贸易额不断改变，从而评价IFTN的抗毁性。

3　实验与结果分析

3.1　IFTN的结构演化分析

为使各国的政策制定者清晰认识IFTN的发展演化历史，本文从贸易网络的整体规模和局部节点结构两个角度来挖掘IFTN拓扑结构的时空演化规律。

3.1.1　IFTN的整体规模演化

2011—2022年IFTN中节点和连边数量的演化情况见图1，2011—2022年节点数量虽有波动，但整体水平较稳定，保持在195~220个。2016年之前连边数量快速增加，由4 829条增至5 655条，说明IFTN中的国家正在积极建立贸易关系；2017年美联储加息使得美元指数达到103点以上，这是时隔14年后美元强周期的最高点，引起了强大的经济溢出效应[39]，使得2016—2018年IFTN中连边数量小幅下降；2019年由于部分国家暂未向联合国上报粮食贸易数据，IFTN中节点和连边数量均出现较大幅度下降；2020年IFTN格局恢复正常；2021年IFTN中连边数量达到顶峰（5 787条）；2022年可能受俄乌战争影响，IFTN中贸易关系迅速减少；从整体上看，除2019年的大量贸易数据缺失和2022年战争的影响外，IFTN内部结构复杂。

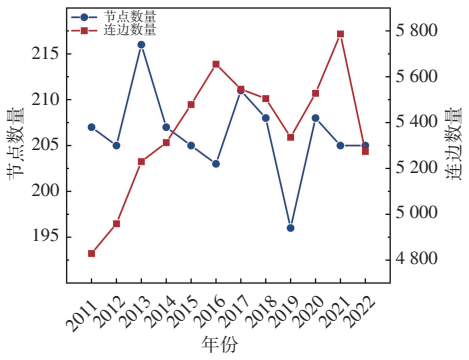


图1　2011—2022年IFTN规模演化图

3.1.2　IFTN的局部节点结构演化

1）IFTN的平均度中心性演化。本文采用节点的平均度中心性度量国家贸易伙伴的多元化水平。IFTN中节点平均度中心性演化见图2，2011—2021年IFTN中节点平均度中心性由46.66升至56.46，表明该时期各个国家的粮食贸易伙伴趋于多元化，体现了粮食贸易全球化进程仍然方兴未艾的局面；2022年节点平均度中心性降至51.45，这与IFTN的整体规模演化基本一致。

2）IFTN的节点平均强度演化。IFTN的节点平均强度演化见图3，2011—2016年国际粮食贸易活力总体呈下降趋势，特别是从2014年开始，节点平均强度呈断崖式下跌，说明国际粮食贸易活力开始走向低迷，这与世界各国对小麦和粗谷物（主要是玉米）进口量的大幅减少有关[40]，而其背后的诱因可能是俄罗斯和乌克兰两个世界粮食出口大国之间爆发的冲突；2016—2018年由于国际粮价出现较大幅度的上涨，节点平均强度出现了不容忽视的增长；2019年以来，由于中美贸易摩擦的剧烈化，粮食贸易大国之间的贸易壁垒不断加强，世界经贸关系复杂多变，地缘政治风险集聚，导致粮食市场供求略紧，节点平均强度小幅下降；2020年受新冠疫情影响，全球45个国家需要外部食品援助，国际粮价上涨，节点平均强度开始回升；2021年东非部分地区冲突和干旱严重，粮食市场供不应求，节点平均强度迅速上升；2022年俄乌战争全面打响，对全球粮食贸易产生剧烈冲击，国际粮价进一步提高，节点平均强度达到顶峰。

由图2、3可知，贸易伙伴的多元化并不意味着贸易活力的增强和贸易壁垒影响力的削弱，反之亦然；受粮食产量变化、国际大事件等多因素影响，节点平均度中心性和节点平均强度的变化方向和幅度均不一定相同。

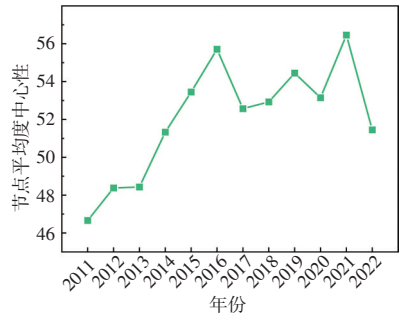


图2　IFTN节点平均度中心性演化图

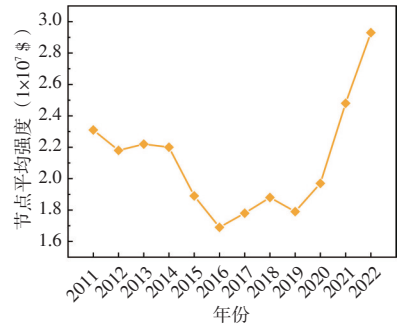


图3　IFTN节点平均强度演化图

3.2　IFTN的抗毁性分析

IFTN的拓扑结构受国际形势的影响不断变化，这对各国经济政策和外交政策的制定带来了重大考验。因此，本文进行了IFTN的抗毁性分析，从重要节点出发，挖掘IFTN的抗毁性演变规律，为各国的政策

制定提供参考。

3.2.1 IFTN的节点重要性挖掘

本文基于拉普拉斯中心性对IFTN中节点重要性进行评估，得到每年各节点拉普拉斯中心性排名前20的国家（表1）。在IFTN中，较为重要的美洲国家是美国、阿根廷、加拿大、巴西等，美国在粮食贸易中始终占据首要地位，阿根廷、加拿大和巴西均为著名的农业强国，在粮食贸易中大多占据前10位置；较为重要的东亚国家是日本、中国和韩国，日本国土面积小人口众多，是粮食贸易中的进口大国，且其海运发达也是重要的贸易中转站，在粮食贸易中常年占据重要地位，中国的重要性不断提高，目前已稳居世界前5，韩国的重要性则稍差一些，但仍占据第10位左右的位置；在东南亚国家中，越南和印度尼西亚的发展势头最强；在中东和南亚国家中，沙特阿拉伯和印度在榜；以法国、乌克兰和俄罗斯为代表的欧洲国家始终占据重要地位；在太平洋国家中，澳大利亚的地位举足轻重；而以尼日利亚、阿尔及利亚为代表的非洲国家自2015年起已完全从前20位中消失了。综上所述，目前国际粮食贸易的主要市场仍集中在美、欧、亚洲，其中欧洲国家和美洲国家作为供给市场，亚洲国家多为进口消费国，这种地缘上的集中化愈发严重；而非洲拥有大量人口，正是粮食短缺问题的高发区域，却没有一个非洲国家可以在全球粮食贸易中占据重要地位，国际粮食贸易体系存在一定的不平衡。

3.2.2 IFTN的抗毁性分析

影响IFTN稳定性的自然因素主要为大型自然灾害或大规模的流行疾病等，人为风险因素则是武装冲突和贸易壁垒，这些事件对贸易关系造成的影响通过经济溢出效应辐射到世界各国[41-42]。本文将对网络的攻击方式分为随机攻击和蓄意攻击两种，随机攻击即网络中每个节点被移除的可能性是相同的；蓄意攻击则根据每个节点的重要性，依次移除相应节点[26]。以2011—2022年的IFTN为基础，根据改进的渗流攻击方法计算抗毁性（R）。由于随机攻击具有一定的偶然性，因此将实验重复10次，取10次的均值和标准差，形成2011—2022年的抗毁性演化图（图4）。12年间IFTN的抗毁性保持相对稳定，约为0.36，但分别在2015年、2018年、2020年出现了小幅波动，结合表1可知，这些年份均为IFTN排名前20位国家变化较剧烈的时期，波动幅度最大的2015年是非洲国家退出重要国家的时间节点，此时的非洲形势动荡，很多国家出现了一定程度的粮食危机，进而影响世界的粮食贸易，其余几年IFTN的抗毁性虽略有波动但整体保持稳定。

为进一步探索重要国家在IFTN中的作用，本文依次对网络进行随机攻击和蓄意攻击（为控制变量，被攻击的节点数量设定为20个），形成2011—2022年IFTN受随机和蓄意攻击后的抗毁性演化对比图（图5）。不同年份的IFTN应对随机攻击的抗毁性基本维持在0.90左右，而蓄意攻击使网络的抗毁性迅速下降，只能维持在0.40左右。考虑所有强度攻击的IFTN抗毁性为0.36，因此当前20位重要国家被移除后IFTN已发生了严重的崩溃，整个IFTN是受重要国家主导的。蓄意攻击导致抗毁性下降的数值是随机攻击的6倍，表明蓄意攻击会在更大程度上影响IFTN的稳定性，IFTN对蓄意攻击表现出明显的脆弱性。

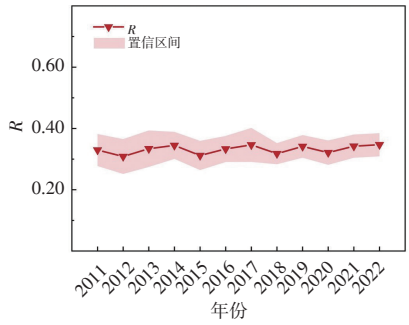


图4 2011—2012年IFTN考虑所有攻击强度的抗毁性演化图

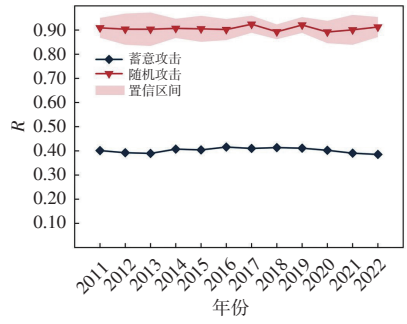


图5 2011—2022年随机和蓄意攻击20个节点后网络的抗毁性

由上述实验可知，IFTN呈现出明显的大国垄断性，当粮食大国之间关系不稳定时将导致IFTN产生巨大动荡，从而威胁全球粮食安全。近年发生的俄乌冲突导致不同地区产生了不同程度的粮食危机印证了这一观点。根据全球抗击粮食危机网络于2023年5月3日正式发布的2023年《全球粮食危机报告》，冲突因素是导致19个国家的1.1亿人口陷入饥荒的关键因素。乌克兰和俄罗斯同属IFTN中的重要国家，以乌克兰危机为标志的重大地缘政治动荡使得国际粮食贸易雪上加霜，更充分证明了IFTN面对蓄意攻击的脆弱性和网络被大国垄断的事实。俄乌两国谷物出口量占全球的1/3，很多中低收入国家和发展中国家都严重依赖从两国进口。2022—2023年由于战争对农业生产的破坏以及出口海港关闭，乌克兰农业部数据显示

表1　国际粮食贸易网络中拉普拉斯中心性排名前20的国家

排序	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年
1	美国	美国	美国	美国	美国	美国	美国	美国	美国
2	日本	日本	中国	日本	日本	日本	日本	中国	中国
3	巴西	加拿大	日本	中国	中国	俄罗斯	阿根廷	日本	阿根廷
4	法国	中国	法国	巴西	澳大利亚	中国	巴西	阿根廷	乌克兰
5	阿根廷	法国	加拿大	法国	阿根廷	加拿大	乌克兰	乌克兰	日本
6	加拿大	印度	澳大利亚	阿根廷	加拿大	乌克兰	法国	加拿大	加拿大
7	中国	韩国	乌克兰	加拿大	乌克兰	埃及	中国	法国	澳大利亚
8	印度	巴西	巴西	乌克兰	印度	越南	越南	俄罗斯	法国
9	沙特	澳大利亚	韩国	俄罗斯	俄罗斯	阿根廷	韩国	巴西	越南
10	澳大利亚	埃及	沙特	韩国	巴西	韩国	加拿大	越南	巴西
11	韩国	沙特	泰国	埃及	法国	法国	俄罗斯	埃及	韩国
12	德国	乌克兰	印度	越南	埃及	巴西	土耳其	韩国	俄罗斯
13	埃及	德国	埃及	泰国	韩国	印度	爱尔兰	泰国	印度
14	荷兰	爱尔兰	阿根廷	沙特	越南	澳大利亚	西班牙	印度	爱尔兰
15	爱尔兰	泰国	俄罗斯	澳大利亚	沙特	西班牙	荷兰	德国	埃及
16	乌克兰	俄罗斯	德国	印度	泰国	印度尼西亚	印度	土耳其	土耳其
17	阿尔及利亚	意大利	越南	德国	德国	荷兰	印度尼西亚	荷兰	印度尼西亚
18	印度尼西亚	印度尼西亚	意大利	印度尼西亚	印度尼西亚	泰国	德国	意大利	沙特
19	意大利	荷兰	阿尔及利亚	意大利	荷兰	沙特	菲律宾	爱尔兰	泰国
20	西班牙	阿根廷	荷兰	哥伦比亚	意大利	德国	意大利	印度尼西亚	哥伦比亚

小麦出口量减少39%，且出口结构因战争重新调整，流向欧洲的小麦增加了10多倍，对亚洲和非洲的出口量下降了75%~80%，玉米出口下降，葵花籽油出口量接近5年低点[9]。

4　结　语

IFTN是对仅考虑双边性的贸易分析视角的改进[43]。基于最大连通子图规模衡量网络抗毁性的方法[26]仅能考虑网络的连通性而无法反映IFTN的经济学含义。本文利用代表经济学要素的最大连通子图贸易量来修正网络的抗毁性测度，将改进的渗流攻击方法作为IFTN的抗毁性测度，不仅能模拟不同强度的攻击，而且能反映经济意义上的网络功能完整性，全面考虑了IFTN经济物理学的含义，为未来贸易网络的抗毁性研究提供了新视角。

本文基于联合国商品贸易统计数据库2011—2022年的谷物双边贸易数据，利用复杂网络理论与方法，挖掘IFTN结构的时空演变特征，并利用拉普拉斯中心性和改进的渗流攻击方法分析了IFTN的抗毁性，主要研究结论为：

1）2011—2022年IFTN发生了一系列的变化，但整体规模相对稳定。平均度中心性由46.66升至56.46，说明各国粮食贸易合作呈多元化趋势。节点平均强度虽然有所波动，但总体呈上升趋势，说明国际粮食贸易活力总体得到了增强。

2）分析2011—2022年IFTN重要节点的演化发现，国际粮食贸易主要集中在美洲、欧洲和亚洲，呈现出明显的地域集中性。非洲缺乏能够在国际粮食贸易中发挥主导作用的重要节点国家。

3）IFTN整体的抗毁性保持相对稳定，约为0.36。对IFTN进行随机攻击和蓄意攻击模拟发现，随机攻击后的抗毁性为0.90，而蓄意攻击后陡降至0.40，说明IFTN在应对蓄意攻击时表现出明显的脆弱性。

粮食贸易是世界贸易的重要组成部分，也是影响世界各国经济和政治的重要因素，通过本文研究可以得到以下启示：当前全球的粮食贸易正在稳步向多元化发展，贸易全球化仍是大势所趋；非洲国家已逐渐远离粮食贸易中心，但其贫困人口众多，是粮食问题的高发区域，为提高IFTN的抗毁性，农业强国应主动吸纳非洲国家进入贸易体系，加强与非洲之间的粮食贸易；中国在IFTN中的地位极其重要，应提高对核心节点的关注度；世界各国应共同努力，推动IFTN朝着更加稳定、开放、共赢的方向发展，从而实现共建全球粮食安全命运共同体的目标。

未来进一步的研究方向包括：对IFTN的各种中心性测度进行空间相关性、空间异质性分析等，探索其空间格局和模式；从网络空间格局的角度进行社区识别方法的探索；不断丰富实验数据，进行更长时间

序列的抗毁性分析，构建预测模型，探索国际粮食贸易网络的未来发展趋势。

参考文献

[1] 陈六君,高远,刘艳,等. 粮食国际贸易网络的演化博弈模型[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2023,59(5):763-768

[2] FAO. Crop Prospects and Food Situation: Quarterly Global Report No.4,December 2016[R]. Rome: FAO,2016

[3] FAO. Crop Prospects and Food Situation: Quarterly Global Report No.4,December 2017[R]. Rome: FAO,2017

[4] FAO. Crop Prospects and Food Situation: Quarterly Global Report No.4,December 2018[R]. Rome: FAO,2018

[5] FAO. Crop Prospects and Food Situation: Quarterly Global Report No.4,December 2019[R]. Rome: FAO,2019

[6] FAO. Crop Prospects and Food Situation: Quarterly Global Report No.4,December 2020[R]. Rome: FAO,2020

[7] FAO. Crop Prospects and Food Situation: Quarterly Global Report No.4,December 2021[R]. Rome: FAO,2021

[8] FAO. Crop Prospects and Food Situation: Quarterly Global Report No.4,December 2022[R]. Rome: FAO,2022

[9] 徐刚. 国际粮食安全态势与中国应对[J]. 国家安全研究,2023(3):91-117

[10] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Global Report on Food Crises 2023[R]. Food Security Information Network: FSIN Workstream,2023

[11] Opsomer J D,Jensen H H,Pan S. An Evaluation of the US Department of Agriculture Food Security Measure with Generalized Linear Mixed Models[J]. The Journal of Nutrition,2003,133(2):421-427

[12] 裴韬,舒华,郭思慧,等. 地理流的空间模式:概念与分类[J]. 地球信息科学学报,2020,22(1):30-40

[13] 秦昆,喻雪松,周扬,等. 全球尺度地理多元流的网络化挖掘及关联分析研究[J]. 地球信息科学学报,2022,24(10):1 911-1 924

[14] 秦昆,王其新,李爽,等. 计算社会科学与社会地理计算的空间交互网络分析方法[J]. 社会学刊,2020(1):64-76

[15] Sartori M,Schiavo S. Connected We Stand: A Network Perspective on Trade and Global Food Security[J]. Food Policy,2015,57:114-127

[16] Cai H,Song Y. The State's Position in International Agricultural Commodity Trade: A Complex Network[J]. China Agricultural Economic Review,2016,8(3):430-442

[17] Shutters S T,Muneepeerakul R. Agricultural Trade Networks and Patterns of Economic Development[J]. PloS One,2012,7(7): e39756

[18] 封志明,赵霞,杨艳昭. 近50年全球粮食贸易的时空格局与地域差异[J]. 资源科学,2010,32(1):2-10

[19] Dong C,Yin Q,Lane K J,et al. Competition and Transmission Evolution of Global Food Trade: A Case Study of Wheat[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications,2018,509:998-1 008

[20] 王介勇,戴纯,周墨竹,等. 全球粮食贸易网络格局及其影响因素[J]. 自然资源学报,2021,36(6):1 545-1 556

[21] Duan J,Nie C,Wang Y,et al. Research on Global Grain Trade Network Pattern and Its Driving Factors[J]. Sustainability,2021,14(1):245

[22] 聂常乐,姜海宁,段健. 21世纪以来全球粮食贸易网络空间格局演化[J]. 经济地理,2021,41(7):119-127

[23] Albert R,Jeong H,Barabasi A L. Error and Attack Tolerance of Complex Networks[J]. Nature,2000,406(6 794):378-382

[24] 徐凯. 基于网格索引的几何匹配算法研究[D]. 长沙:中南大学,2009

[25] Newport K T,Varshney P K. Design of Survivable Communications Networks Under Performance Constraints[J]. IEEE Transactions on Reliability,1991,40(4):433-440

[26] 刘建刚,陈芦霞. 突发事件下粮食股市的抗毁性及预警研究[J]. 复杂系统与复杂性科学,2024,21(2):52-59

[27] 姚成胜,殷伟,李政通. 中国粮食安全系统脆弱性评价及其驱动机制分析[J]. 自然资源学报,2019,34(8):1 720-1 734

[28] 陈倬. 粮食供应链脆弱性分析与整合研究[J]. 财经论丛,2011(6):105-110

[29] 秦昆,许凯,吴涛,等. 智能空间信息处理与时空大数据分析探索[J]. 地理空间信息,2022,20(12):1-11

[30] Qiang W,Niu S,Wang X,et al. Evolution of the Global Agricultural Trade Network and Policy Implications for China[J]. Sustainability,2019,12(1):192

[31] 黄祖南,郑正喜. 复杂产业网络度中心性研究[J]. 统计研究,2021,38(5):147-160

[32] 侯纯光,杜德斌,刘承良,等. 全球人才流动网络复杂性的时空演化:基于全球高校留学生流动数据[J]. 地理研究,2019,38(8):1 862-1 876

[33] 任晓龙,吕琳媛. 网络重要节点排序方法综述[J]. 科学通报,2014,59(13):1 175-1 197

[34] 顾亦然,王兵,孟繁荣. 一种基于K-Shell的复杂网络重要节点发现算法[J]. 计算机技术与发展,2015,25(9):70-74

[35] 平亮,宗利永. 基于社会网络中心性分析的微博信息传播研究:以Sina微博为例[J]. 图书情报知识,2010,27(6):92-97

[36] 于会,刘尊,李勇军. 基于多属性决策的复杂网络节点重要性综合评价方法[J]. 物理学报,2013,62(2):54-62

[37] Bardoscia M,Barucca P,Battiston S,et al. The Physics of Financial Networks[J]. Nature Reviews Physics,2021,3(7):490-507

[38] Havlin S,Stanley H E,Bashan A,et al. Percolation of Interdependent Network of Networks[J]. Chaos, Solitons and

（下转第110页）