

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2025.02.026

韩建军, 崔欣苗, 侯婧祎, 等. 复杂网络视角下世界粮食贸易网络脆弱性研究[J]. 粮油食品科技, 2025, 33(2):198-205.

HAN J J, CUI X M, HOU J Y, et al. Research on the vulnerability of world food trade network from the perspective of complex network[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2025, 33(2):198-205.

复杂网络视角下世界粮食贸易网络脆弱性研究

韩建军, 崔欣苗, 侯婧祎, 程 玉, 张佳豪

(河南工业大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 为探究世界粮食贸易网络的脆弱性, 为国际粮食贸易市场做出合理预判提供参考, 基于1990—2020年的世界粮食贸易数据, 结合复杂网络理论与脆弱性理论, 从模体的角度探究世界粮食贸易网络局部结构脆弱性变化情况, 并模拟世界粮食贸易网络在随机攻击和蓄意攻击模式下的失效过程, 将网络中的节点分级。结果表明: 世界粮食贸易网络的局部结构中, V型结构占比较高, 网络的稳定性较弱, 但这种现象有减缓趋势; 对比真实网络与随机网络, 真实网络的结构更加稳定且贸易关系更复杂; 世界粮食贸易网络在面对随机攻击时具有良好的强韧性, 面对蓄意攻击时表现出较强的脆弱性, 蓄意攻击对网络的破坏力远大于随机攻击; 在蓄意攻击模式下, 世界粮食贸易网络的节点根据失效过程可以分为三个层级, 其中第一层级节点对网络稳定性影响最大。

关键词: 粮食安全; 世界粮食贸易; 复杂网络; 脆弱性; 格局与趋势

中图分类号: F313 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2025)02-0198-08

网络首发时间: 2025-02-19 19:59:12

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20250219.1127.002>

Research on the Vulnerability of World Food Trade Network from the Perspective of Complex Network

HAN Jian-jun, CUI Xin-miao, HOU Jing-yi, CHENG Yu, ZHANG Jia-hao

(College of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: In order to explore the vulnerability of the world food trade network, based on the world food trade data from 1990 to 2020, combined with complex network theory and vulnerability theory, this paper explores the change of local structural vulnerability of the world food trade network from the perspective of motif, simulates the failure process of the world food trade network under random attack and deliberate attack mode, and classifies the nodes in the network. The results show that: In the local structure of the world food trade network, the V-shaped structure accounts for a relatively high proportion, and the stability of the network is weak, but this phenomenon has a slowing trend; Compared with the real network and the random

收稿日期: 2024-07-17; 修回日期: 2024-08-21; 录用日期: 2024-08-23

基金项目: 国家粮食局粮食公益性行业科研专项“基于储粮生态学的不同区域新仓型和配套工艺设备适用性评价与一体化研究”(201513001-03)

Supported by: State Food Administration Food Public Welfare Industry Research Project "Study on Applicability Evaluation and Integration of New Warehouse Types and Supporting Process Equipment in Different Regions Based on Grain Storage Ecology" (No. 201513001-03)

第一作者: 韩建军, 男, 1974年出生, 博士, 教授, 研究方向为粮食贸易及应急管理, E-mail: hanjianjun@haut.edu.cn

network, the structure of the real network is more stable and the trade relationship is more complex; The world food trade network has good robustness in the face of random attacks, and shows strong vulnerability in the face of deliberate attacks. The destructive power of deliberate attacks on the network is much greater than that of random attacks; In the deliberate attack mode, the nodes of the world food trade network can be divided into three levels according to the failure process, and the first level of nodes has the greatest impact on the stability of the network.

Key words: food security; world food trade; complex networks; vulnerability; patterns and trends

粮食是居民生活和社会稳定的基本要素，也是经济发展的重要物资^[1]。目前，绝大多数国家（地区）已加入到国际粮食贸易，形成了相互影响的复杂网络^[2]。然而气候变化、疾病灾害、政治经济等多种因素导致世界粮食贸易网络并不稳定，如2019年美国中西部历史性洪灾、澳大利亚大规模森林大火以及2021年印度、泰国等国家遭受的蝗灾严重影响了当地粮食的产量和品质，世界粮食贸易市场产生了较大波动^[3]。从中国的角度来看，自2008年起，中国由净出口国转变为净进口国，并于2014年成为全球最大的粮食进口国，这也增加了中国对粮食贸易的依赖性，世界粮食贸易格局的变化影响了中国的粮食供需^[4]。因此，探究世界粮食贸易的脆弱性，有助于中国预判国际粮食贸易市场及稳定性，有效地保障中国粮食安全。

脆弱性研究起初多运用在气候变化^[5]、生态学^[6]、公共健康^[7]、灾害应急管理^[8]等领域，逐渐扩展到网络领域^[9]。脆弱性网络在遭受攻击或部分区域失效时对其连通性有不同程度的影响。关于复杂网络脆弱性的研究，常涉及城市交通系统（地铁、公交）^[10]、海运集装箱运输系统^[11]、电力系统^[12]等。姚成胜等^[13]运用VSD（Vulnerability scoping diagram）脆弱性分析框架，从暴露性、敏感性和适应能力三个方面构建了我国粮食安全脆弱性评价体系，并采用主成分分析法进行定量分析；陈倬^[14]将粮食供应链的脆弱性分为结构型和胁迫型，提出结构型由主体组织化和一体化程度决定，胁迫型由主体风险承受弹性和风险承受概率决定；夏汉军等^[15]对中国粮食安全脆弱度指数进行测算，明确其时空变化和重心转移途径，为降低粮食安全脆弱性提供参考依据；

殷伟等^[16]构建粮食生产和消费能力脆弱性评价体系，利用重心-标准差椭圆模型和耦合协调模型评价两个系统脆弱性的空间格局与耦合协调演变规律。上述研究推动了复杂网络脆弱性的发展，但未考虑世界粮食贸易的多边性与复杂性，对世界粮食贸易网络脆弱性研究不足。

本研究利用联合国粮农组织（Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO）的统计数据，基于复杂网络的研究方法，从3节点模体的角度探究世界粮食贸易网络的局部结构脆弱性变化，并模拟贸易网络在随机攻击和蓄意攻击模式下的失效过程，识别需要保护的关键节点。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 网络模体分析方法

Mirol^[17]的研究指出模体（Motifs）是网络中反复出现的局部结构，不同结构的模体重复出现构成了复杂网络，复杂网络整体结构会受到局部模体种类和数量的影响，研究模体结构有助于把握复杂网络的局部特征及脆弱性。

本研究先将从事粮食贸易的国家（地区）定义为网络节点，2个节点之间的连线抽象为边，节点之间的贸易量作为边的权重，构建有向加权的全球粮食贸易网络；然后采用3节点模体的研究方法，构建和真实网络规模和度分布一致的随机网络模型；最后计算Z-Score指数研究世界粮食贸易网络局部关系的显著性，其中，Z-Score>0表示在真实网络中出现该模体的概率大于随机网络，反之，则小于随机网络。其表达式为：

$$Z_i = \frac{(N_{reali} - \langle N_{randi} \rangle)}{\sigma_{randi}} \quad \text{式(1)}$$

式中： Z_i 表示不同模体的 *Z-Score* 指数； N_{reali} 表示模体 i 在真实网络中出现的次数； N_{randi} 表示模体 i 在随机网络中出现的次数； σ_{randi} 表示模体 i 在随机网络中出现的标准差。

1.2 网络攻击分析方法

在世界粮食贸易网络中某些贸易节点的失效，可能会对整个网络的连通性造成影响。在实际的贸易过程中，造成贸易节点失效的原因分为随机事件和蓄意事件，随机事件主要包括气候变化和自然灾害，蓄意事件主要包括战争、政策变化、贸易摩擦等。因此，参考上文定义，构建无向加权的世界粮食贸易网络，模拟随机攻击和蓄意攻击的形式分析世界粮食贸易网络的脆弱性。

随机攻击是指以一定的概率攻击世界粮食贸易网络中的节点。本文通过 Matlab 生成随机数列，每次删除 2 个网络节点，由于随机攻击具有较大的不确定性，故采取 10 次模拟结果的平均值进行研究。蓄意攻击是指有针对性的攻击对世界粮食贸易影响力大的节点。本文按照节点度的大小顺序每次删除 2 个网络节点，若出现节点度相同的节点则考虑节点强度的大小。随机攻击和蓄意攻击下世界粮食贸易网络的脆弱性通过网络遭到攻击后特征值的变化来反应。

1.2.1 网络平均度

网络平均度是指网络中所有节点度的平均值。在世界粮食贸易网络遭到攻击后，其平均度会随节点和边的减少发生变化。其表达式为：

$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i \quad \text{式(2)}$$

式中： K 表示网络平均度； N 表示攻击后网络中的节点总数； k_i 表示节点 i 的节点度。

1.2.2 聚类系数

聚类系数是指在网络中与同一个节点连接的 2 个节点之间相互连接的概率，其取值范围为 $[0, 1]$ 。在世界粮食贸易网络遭到攻击后，网络结构会变得松散，聚类系数也会相应发生变化，当聚类系数为 0 时，说明网络中所有的节点都成为了孤立节点，即节点之间没有联系。其表达式为：

$$C_i = \frac{2M_i}{k_i(k_i - 1)} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, N) \quad \text{式(3)}$$

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

式中： C_i 表示节点的簇系数； M_i 表示节点所连接的节点之间相互连接的边数； k_i 表示节点 i 的节点度； \bar{C} 表示网络的聚类系数。

1.2.3 平均路径长度

平均路径长度是指网络中节点对之间经过的最短边数的平均值。在世界粮食贸易网络遭到攻击后，平均路径长度可以衡量网络的分离程度。其表达式为：

$$L = \frac{2}{N(N-1)} \sum_i \sum_{j(j \neq i)}^N d_{ij} \quad \text{式(5)}$$

式中： L 表示平均路径长度； d_{ij} 表示节点 i 和节点 j 之间产生联系需要经过的最短边数。

1.2.4 孤立节点比例

孤立节点比例是指在网络攻击后没有边与其连接的节点占节点总数的比例。在世界粮食贸易网络遭到攻击后，伴随着节点的失效，之前的贸易联系也会失效，可能会导致某些节点成为孤立节点。其表达式为：

$$\Delta N = \left(1 - \frac{N}{N^*}\right) \times 100\% \quad \text{式(6)}$$

式中： ΔN 表示孤立节点比例； N 为攻击后网络中的节点总数； N^* 为攻击前网络中的节点总数。

1.2.5 最大联通子图大小

最大联通子图大小是指网络中最大连通子图的节点数量和节点总数的比值。通过分析最大联通子图在攻击前后的变化，可以直观的反映出网络遭到破坏的程度。其表达式为：

$$G = \frac{N'}{N} \quad \text{式(7)}$$

式中： G 表示最大联通子图大小； N' 表示网络遭到攻击后最大联通子图所连接的节点数量； N 表示攻击后网络中的节点总数。

1.3 数据来源

本文的研究范围为世界粮食贸易，参照 FAO 对粮食的定义标准，选取 1990—2020 年为研究时段，以 FAO 内 194 个国家（地区）之间三大主粮的贸易关系构建世界粮食贸易网络。文中世界粮食贸易数据来源于 FAO 的统计数据，其他数据来源

于国家统计局。

2 世界粮食贸易网络局部结构脆弱性分析

利用 Fanmod 软件对 1990—2020 年贸易网络中反复出现的 3 节点模体进行分析, 共得到 13 种不同的模体结构 (图 1), 并统计不同年份的占比 (图 2)。

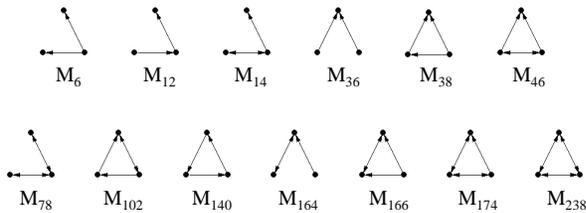


图 1 世界粮食贸易网络中出现的 3 节点模体关系

Fig. 1 3-node modal relationships emerging in the world food trade network

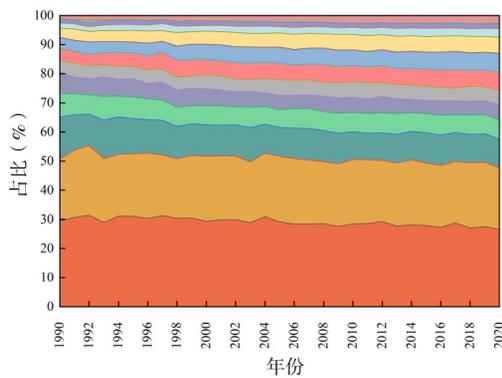


图 2 1990—2020 年世界粮食贸易网络局部贸易关系占比

Fig. 2 Percentage of localized trade relationships in the world food trade network from 1990 to 2020

结合图 1~2 看出, 研究期内出现较多的局部贸易关系为 M_6 和 M_{14} , 这两种结构大约占总体的 50%, 其中 M_6 表示 A 和 B 同时向 C 进口粮食, 而 M_{14} 表示 B 和 C 两者之间出现了相互贸易关系, 这两种结构都体现出了国家 (地区) 之间贸易竞争的关系, 可能与粮食生产不均衡相关, 部分国家 (地区) 由于地域或人口因素, 国内粮食供应不足, 需要从部分产量大的国家 (地区) 进口以满足居民的需求。排名第 3 的 M_{12} 则是体现了贸易中转的关系, 即 B 向 C 出口粮食而 C 向 A 出口粮食, 可能与近年来粮食贸易网络的发展有关, 随着网络连通性的增强, 粮食贸易也更具有多样性。

综合比较可以看出, 排名前三位的局部贸易

关系中边的连接均呈现 V 型结构, 与呈现三角形结构的模体相比, V 型结构的网络稳固性和交互性较弱。通过对比不同年份局部结构的变化情况, 可以看出 M_{164} 、 M_{36} 、 M_{78} 的占比呈下降态势, 而 M_{38} 、 M_{46} 、 M_{174} 的占比呈上升态势, 意味着世界粮食贸易网络的局部关系在由 V 型结构向三角形结构发展, 网络的稳定性在逐渐加强。这可能与许多国家逐渐意识到增加粮食多边贸易、转口贸易与物流通道更有利于应对世界粮食贸易市场动荡, 增强粮食供给稳定性有关。总的来说, 世界粮食贸易网络的局部贸易关系仍存在不平衡现象, 但伴随着贸易网络的发展有减缓趋势。

通过 Fanmod 软件产生与真实网络规模和度分布一致的随机网络, 并与真实网络对比, 通过公式 (1) 得到 1990—2020 年不同模体的 Z-Score 指数变化情况 (图 3)。

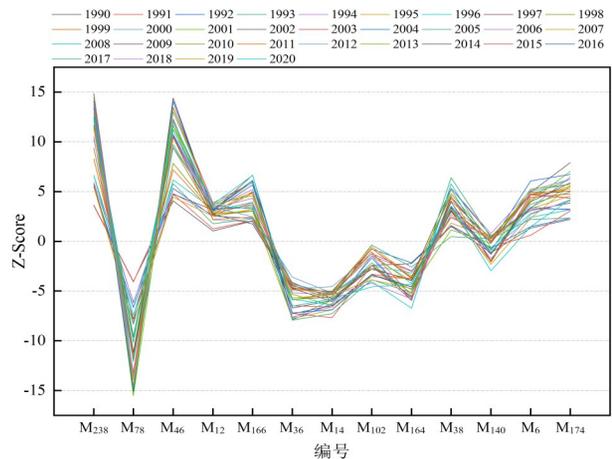


图 3 1990—2020 年世界粮食贸易网络局部贸易关系 Z-Score 值变化

Fig. 3 Changes in Z-Score values of localized trade relationships in the world food trade network from 1990 to 2020

从图 3 中可以看出, 世界粮食贸易网络的局部结构中 Z-Score 大于 0 的有 M_{238} 、 M_{46} 、 M_{12} 、 M_{166} 、 M_{38} 、 M_6 、 M_{174} , 小于 0 的有 M_{78} 、 M_{36} 、 M_{14} 、 M_{102} 、 M_{164} , M_{140} 的 Z-Score 值在研究期内存在正负波动。对比其数值和结构类型可以看出, 在大于 0 的模体结构中只有 M_{12} 和 M_6 呈现出 V 型结构且 Z-Score 值较小, 其余均呈现三角形结构, 表明真实的世界粮食贸易网络中出现三角形结构模体的概率大于随机网络, 真实网络与随机网络相比局部结构更加稳定, 且随着世界粮食贸易网络的发展逐渐加

深。在小于0的模体结构中，只有 M_{102} 呈三角形结构，表明世界粮食贸易网络的局部贸易关系在向复杂化、稳定化发展。

总体而言，世界粮食贸易网络的局部结构与其网络规模和度分布一致的随机网络相比，真实网络的结构和贸易关系更加稳定，但从自身结构的角度来看，V型结构的占比仍保持在50%以上，世界粮食贸易网络局部的贸易关系存在不平衡现象。

3 世界粮食贸易网络攻击结果分析

3.1 网络特征值变化趋势分析

根据1.2中设定的攻击策略对2020年世界粮食贸易网络进行随机攻击和蓄意攻击，其中网络的节点数量为162个，相互之间构成了1136条贸易联系，攻击次数为81次，基于此得到网络特征值变化图（图4）。

根据图4可以看出，在随机攻击下，世界粮食贸易网络的网络平均度、聚类系数、最大联通子图等特征值缓慢下降，平均路径长度先波动变化后减小，而孤立节点比例逐渐增加。表明在随机攻击下，世界粮食贸易网络的拓扑结构变化不明显，但稳健性逐渐降低，随着节点攻击次数的增加，脆弱性也会随之增加，最终导致网络崩溃；随着随机攻击停止，世界粮食贸易网络的拓扑结构会迅速恢复。如苏伊士运河堵塞事件，随着苏伊士运河恢复畅通，世界贸易市场也逐渐恢复。

在蓄意攻击下，世界粮食贸易网络的网络平均度、聚类系数、最大联通子图等特征值先骤降到较低水平，后逐渐减小至0，平均路径长度在攻击次数较少时先上升至较高水平，再骤降至较低水平，最后逐渐减少为0，孤立节点比例急剧上升后缓慢增加至100%。表明蓄意攻击会对世界粮食贸易网络造成更严重的破坏，关键节点遭到攻击会导致网络的拓扑结构迅速被破坏，稳定性和鲁棒性急剧降低，直至网络完全崩溃。这与现实世界基本吻合，如持续至今的俄乌战争已深刻地改变了世界粮食贸易网络格局。

3.2 网络节点失效过程及分级

3.2.1 网络失效过程

聚类系数、平均路径长度和最大联通子图大小可以反映网络内部的集聚情况，根据公式（4）、（5）、（7）可以得到2020年世界粮食贸易网络的这三个特征值分别为0.47、4.62、1。通过网络失效过程分析，蓄意攻击比随机攻击表现出更强的脆弱性。结合图4，可以将世界粮食贸易网络在蓄意攻击下的失效过程分为三个阶段：

第一阶段（攻击0~18次）聚类系数下降较快，攻击每增加一次，聚类系数相对大小平均减少5.14%，表明网络中重要节点的失效会导致网络的聚集性迅速下降；平均路径长度急剧上升，最大达到9.70，相对大小平均增加了6.70%，是由于网络中节点度值较大的节点对网络连通性影响也更大，蓄意攻击对这些节点破坏后，网络连通性变差，导致平均路径长度增加；最大联通子图下降相对缓慢，攻击每增加一次，平均减少3.90%。在此阶段，世界粮食贸易网络中的节点失效对主体结构影响最大，但由于网络的复杂性，剩余节点基本保持连通。

第二阶段（攻击19~40次）聚类系数下降速度开始减慢，攻击每增加一次，平均减少3.36%，是由于随着重要节点的失效，剩余节点所构成的网络规模变小，从而导致聚集性变化速度相对第一阶段减慢；平均路径长度在达到峰值后开始减小，可以看出由于网络连接规模的减小，导致区域之间的传播效率有所提高；最大联通子图出现断崖式下降，攻击每增加一次，平均减小11.44%。在此阶段，世界粮食贸易网络节点间联系迅速破坏，连通性受到阻碍。

第三阶段（攻击41~81次）聚类系数、平均路径长度和最大联通子图的下降速度都开始减缓，初始时最大联通子图大小仅为0.024，表明世界粮食贸易网络的主体难以连通，剩余的子网络逐渐失效，网络连通功能丧失。

3.2.2 网络节点分级

根据对蓄意攻击下世界粮食贸易网络失效过程的分析，可以将网络中的节点分为三个层级。

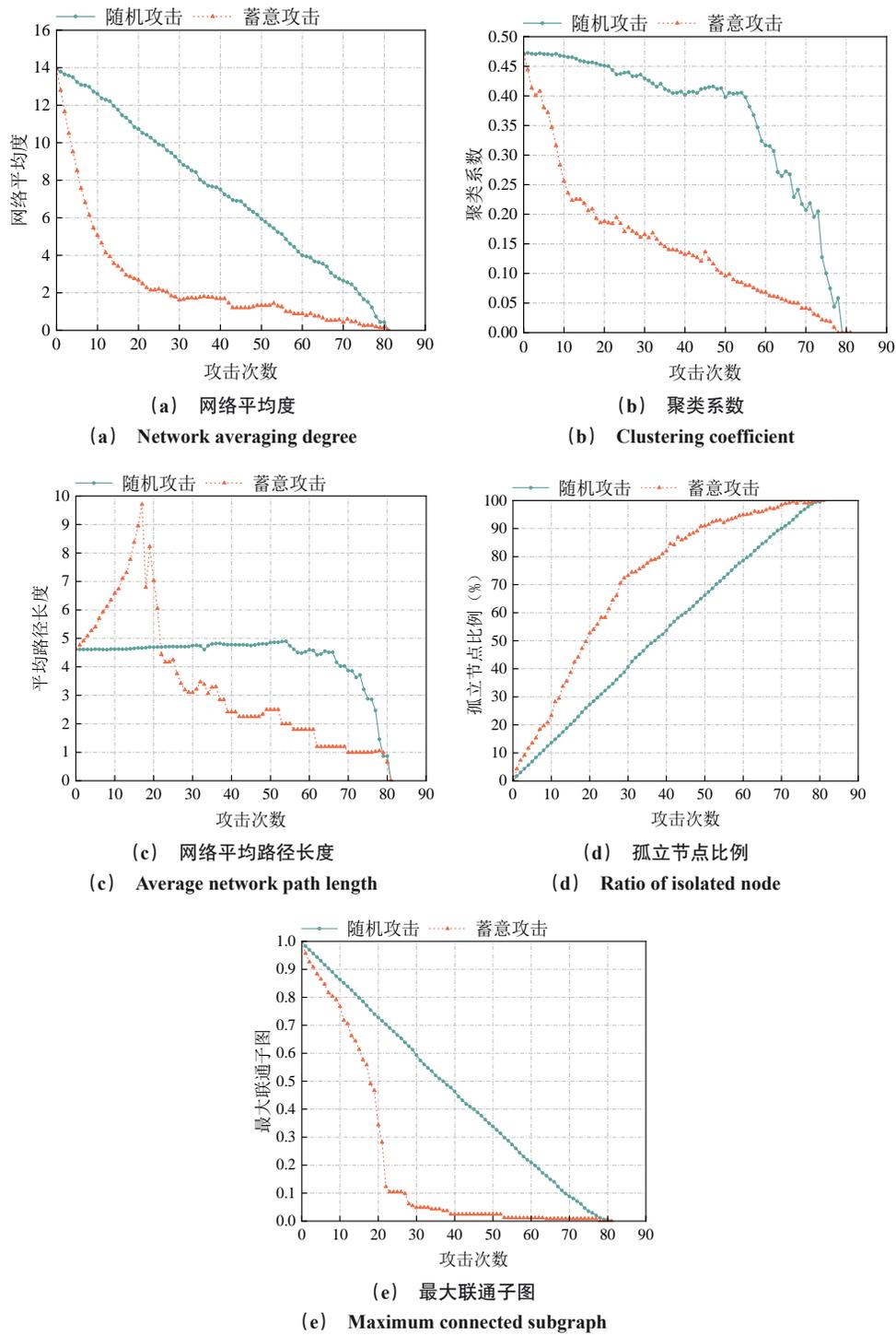


图 4 2020 年蓄意攻击下特征值变化图

Fig. 4 Change in characteristic value under deliberate attacks in 2020

第一层级是核心节点（表 1），网络节点度较高，是世界粮食贸易的主要参与者，其稳定性和发展状况对整个网络具有重要影响；第二层级是次级节点，网络中节点度低于核心节点，但仍具有一定的影响力，在维系局部网络的连通性中具有重要作用；第三层级为边缘节点，具有的贸易伙伴

较少，影响力较小，同时脆弱性较强，网络一旦遭到破坏，这些国家（地区）的粮食安全可能会面临挑战。

综上所述，第一层级的节点对世界粮食贸易网络的脆弱性影响最大，因此要对这些国家（地区）的粮食贸易政策、进出口情况、气候变化等

表 1 2020 年世界粮食贸易网络国家(地区)分级
Table 1 Ranking of countries (regions) in the world food trade network in 2020

层级	国家(地区)
第一层级	俄罗斯、美国、泰国、印度、加拿大、巴西、乌克兰、阿根廷、德国、法国、土耳其、中国、巴基斯坦、意大利、西班牙、波兰、罗马尼亚、英国、荷兰、南非、立陶宛、澳大利亚、匈牙利、拉脱维亚、缅甸、摩洛哥、韩国、肯尼亚、葡萄牙、沙特阿拉伯、塞尔维亚、保加利亚、印度尼西亚、越南、阿联酋、比利时
第二层级	马来西亚、塞内加尔、埃及、阿尔及利亚、菲律宾、乌拉圭、墨西哥、坦桑尼亚、黎巴嫩、日本、也门、以色列、科特迪瓦、加纳、柬埔寨、瑞典、刚果、巴拉圭、捷克、奥地利、突尼斯、爱尔兰、希腊、津巴布韦、乌干达、尼日利亚、阿曼、丹麦、新加坡、中国台湾、斯里兰卡、摩尔多瓦、孟加拉国、约旦、喀麦隆、克罗地亚、圭亚那、毛利塔尼亚、利比亚、叙利亚、爱沙尼亚、哈萨克斯坦、卡塔尔、瑞士

予以持续关注。

4 结论与建议

4.1 结论

世界粮食贸易网络的局部结构中，V型结构占比较高，网络的稳定性和交互性较弱，但伴随着贸易网络的发展，这种现象有减缓的趋势。对比真实网络与随机网络，真实网络的结构更加稳定且贸易关系更加复杂。

世界粮食贸易网络在面对随机攻击时具有良好的强韧性，网络的拓扑结构不会发生明显的变化，仍可以维持较好的连通性；当网络面对蓄意攻击时表现出较强的脆弱性，在攻击初期网络结构相对完整，但随着攻击次数的增加，网络的连通性迅速下降，蓄意攻击对网络的破坏力远大于随机攻击。

在蓄意攻击模式下，世界粮食贸易网络形成了明显的分层结构，第一层级的节点对网络的稳定性影响最大，当这类节点受到破坏时，网络的结构会发生较大的变化。因此，在现实生活中，应该对第一层级的节点提高关注度。

4.2 建议

充分认识到世界粮食贸易网络脆弱性，提高对核心节点的关注度。如持续关注美国、俄罗斯、巴西、乌克兰等国家近年来的粮食贸易政策和进出口情况变动，尤其关注与中国密切相关的核心节点国家，如“一带一路”沿线国家。持续倡导与推动世界粮食贸易网络多元化，贸易网络多元化可以有效促进网络的稳定性与强韧性，提升中国在世界粮食贸易网络的地位与影响力。

参考文献：

- [1] 杜志雄, 肖卫东. 全方位夯实粮食安全根基:意义、内涵及重点任务[J]. 中州学刊, 2022, 312(12): 32-39.
DU Z X, XIAO W D. Consolidating the foundation of food security in an all round way: significance, connotation and key tasks[J]. Academic Journal of Zhongzhou, 2022, 312(12): 32-39.
- [2] 韩建军, 侯婧祎, 郭志涛, 等. 复杂网络视角下的世界主粮贸易格局与趋势分析[J]. 河南农业大学学报, 2023, 57(2): 342-351.
HAN J J, HOU J Y, GUO Z T, et al. Analysis of world staple grain trade pattern and trend from the perspective of complex network[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2023, 57(2): 342-351.
- [3] 韩建军, 邹亚丽. 区域粮食储备的地区差异与规模确定分析[J]. 自然资源学报, 2019, 34(3): 464-472.
HAN J J, ZOU Y L. Spatial differences and scale determination of regional grain reserves[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(3): 464-472.
- [4] 邓远建, 汤彪, 屈志光. 农业经济“双循环”新发展格局的内在逻辑与实现路径[J]. 西北农林科技大学学报(社会科学版), 2022, 22(1): 106-114.
DENG Y J, TANG B, QU Z G. Internal logic and realization path of the new development pattern of dual circulation of agricultural economy[J]. Journal of Northwest A&F University (Social Science Edition), 2022, 22(1): 106-114.
- [5] KUWORNUNU J. Climate change and sub-saharan Africa: the vulnerability and adaptation of food supply chain actors[J]. Vernon Press Titles in Economics, 2019.
- [6] ZHANG Y, YANG N, LALL U. Modeling and simulation of the vulnerability of interdependent power-water infrastructure networks to cascading failures[J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2016, 25(1): 102-118.
- [7] SUAZO-ORTUÑO I, BENÍTEZ-MALVIDO J, MARROQUÍN-PÁRAMO J, et al. Resilience and vulnerability of herpetofaunal functional groups to natural and human disturbances in a tropical dry forest[J]. Forest Ecology & Management, 2018.
- [8] SONG L, LI Q, LIST G, et al. Using an ahp-ism based method to study the vulnerability factors of urban rail transit system[J]. Sustainability, 2017.

- [9] 段佳勇, 郑宏达. 基于节点重要度的复杂网络脆弱性分析方法[J]. 控制工程, 2020, 27(4): 692-696.
 DUAN J Y, ZHENG H D. Vulnerability analysis method for complex networks based on node importance[J]. Control Engineering of China, 2020, 27(4): 692-696.
- [10] CHEN H, ZHANG L, RAN L. Vulnerability modeling and assessment in urban transit systems considering disaster chains: a weighted complex network approach[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2021, 54: 102033.
- [11] 王诺, 董玲玲, 吴暖, 等. 蓄意攻击下全球集装箱海运网络脆弱性变化[J]. 地理学报, 2016, 71(2): 293-303.
 WANG N, DONG L L, WU N, et al. The change of global container shipping network vulnerability under intentional attack [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(2): 293-303.
- [12] 陈志鹏, 谢宁, 王承民, 等. 基于分形机理的复杂电力网络脆弱性评估及鲁棒性提升策略研究[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 657-665.
 CHEN Z P, XIE N, WANG C M, et al. Vulnerability evaluation and robustness improvement strategy of complex power network based on fractal mechanism[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 657-665.
- [13] 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): 1720-1734.
 YAO C S, YIN W, LI Z T. The vulnerability assessment and driving mechanism analysis of China's food security system[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(8): 1720-1734.
- [14] 陈卓. 粮食供应链脆弱性分析与整合研究[J]. 财经论丛, 2011, 161(6): 105-110.
 CHEN Z. Research on grain supply chain vulnerability and integration[J]. Collected Essays on Finance and Economics, 2011, 161(6): 105-110.
- [15] 夏汉军, 李聪媛, 赵迪. 我国粮食安全脆弱性时空变化分析[J]. 南方农业学报, 2020, 51(8): 2044-2050.
 XIA H J, LI C Y, ZHAO D. Spatial and temporal changes of China's food security vulnerability[J]. Journal of Southern Agriculture, 2020, 51(8): 2044-2050.
- [16] 姚成胜, 殷伟, 黄琳, 等. 中国粮食生产与消费能力脆弱性的时空格局及耦合协调性演变[J]. 经济地理, 2019, 39(12): 147-156.
 YAO C S, YIN W, HUANG L, et al. Spatial-temporal pattern and coupling coordination evolution of the vulnerability of food production and consumption ability in China[J]. Economic Geography, 2019, 39(12): 147-156.
- [17] MILO R, SHEN-ORR S, ITZKOVITZ S, et al. Network motifs: simple building blocks of complex networks[J]. Science, 2002. 

备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。