

国际小麦贸易网络中断的级联失效效应分析

谢婉莹

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2024年10月19日; 录用日期: 2024年11月12日; 发布日期: 2024年11月19日

摘要

在保障全球粮食安全方面, 全球小麦贸易网络扮演着至关重要的角色。然而, 该网络对于少数重要贸易国的供应稳定性具有依赖性。俄乌冲突之类的突发事件可能导致供应链中断, 并通过贸易网络引发级联效应, 进而影响多个国家的小麦供应。本研究旨在探讨在国际小麦贸易网络中, 主要贸易国的供应中断如何传播, 并评估不同国家在供应危机中的作用及其影响。本研究基于2020年联合国商品贸易数据库中的小麦贸易数据, 构建国际小麦贸易网络模型, 并通过构建级联失效模型, 模拟俄罗斯、美国、加拿大、法国、德国、阿根廷和澳大利亚等主要小麦贸易国在出口减少情况下的危机传播效应。研究结果揭示了少数重要贸易国在全球贸易网络中的核心地位, 其供应中断能够迅速对全球小麦流通产生广泛影响。本文为各国政府和国际组织提供了应对小麦供应危机的政策建议, 强调了分散进口来源、增强抗风险能力以及加强全球粮食安全合作的重要性。

关键词

复杂网络, 级联失效, 小麦贸易网络, 粮食安全

Analysis of Cascade Failure Effect of Disruption of International Wheat Trade Network

Wanying Xie

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Oct. 19th, 2024; accepted: Nov. 12th, 2024; published: Nov. 19th, 2024

Abstract

The global wheat trading network plays a crucial role in guaranteeing global food security. However,

文章引用: 谢婉莹. 国际小麦贸易网络中断的级联失效效应分析[J]. 建模与仿真, 2024, 13(6): 6065-6074.

DOI: 10.12677/mos.2024.136556

the network is dependent on the stability of supply from a few key trading countries. Unforeseen events such as the Russian-Ukrainian conflict may lead to disruptions in the supply chain and trigger a cascading effect through the trade network, which in turn affects the wheat supply of multiple countries. This study aims to explore how supply disruptions in key trading countries propagate in international wheat trade networks and to assess the role of different countries in supply crises and their impacts. This study models the international wheat trade network based on wheat trade data from the United Nations Commodity Trade Database (UN Comtrade) in 2020 and simulates the propagation effects of the crisis in major wheat trading countries such as Russia, the United States, Canada, France, Germany, Argentina and Australia in the event of export reductions by constructing a cascade failure model. The results of the study reveal the central position of a few important trading countries in the global trading network, and their supply disruptions can quickly have a wide impact on global wheat flows. The paper provides policy recommendations for governments and international organizations to respond to wheat supply crises, emphasizing the importance of diversifying import sources, building resilience to risks and strengthening global cooperation for food security.

Keywords

Complex Networks, Cascading Failures, Wheat Trade, Food Security

Copyright © 2024 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

小麦是世界上食用人口最多、分布范围最广、栽培面积最大、总产量最高的谷物粮食，也是各国保障粮食安全的重要战略物资之一[1]，截止 2019 年，小麦食品供应量占人均每日膳食能量摄入的 18% 以上，占全球每人每日蛋白质摄入量的近 20% [2]。但在全球许多国家，国内生产无法满足国内需求，每个国家或多或少地依赖国际贸易来满足总体小麦需求[3] [4]，小麦贸易网络保障了各国之间小麦的流通。然而，流行病、气候变化、战争等因素对小麦贸易网络的稳定性产生了冲击，当某一个国家或多个国家大量减少出口时，供应链的脆弱性往往会通过贸易网络迅速传播，导致全球多个国家的小麦供应受到冲击，且在粮食短缺期间，各国为了保证国内供应常常停止出口粮食[5] [6]。在过去研究中发现，俄罗斯和乌克兰小麦出口减少 50% 会引起小麦消费和膳食能量摄入量减少至少 60% [7]。一些粮食主产区的出口禁令将使多达 2 亿人处于贫困线以下[8]。随机攻击和定向攻击下小麦贸易网络中核心国家的中心性指标发生较大变化[9]。由于各国间的贸易依赖关系，特定国家粮食生产或需求受到外生冲击时各国会受到级联影响[10]。这些都说明重要贸易国家在维持全球粮食网络的运作和稳定方面发挥着至关重要的作用。在动荡的国际环境下，理解一些主要的小麦贸易国在全球小麦贸易网络中的角色，以及供应中断如何通过网络传导，是研究全球供应韧性的关键问题，也是预防供应冲击的关键路径。

在这个背景下，本文研究重点在于分析全球小麦贸易网络中多个关键出口国的供应冲击对整个网络的影响。通过构建基于复杂网络理论的国际小麦贸易网络模型，本文探讨了 2020 年全球小麦贸易中的网络结构及其中心性特征，并通过网络的中心性指标分析了各国的贸易影响力。为了进一步分析供应冲击的传播过程，本文应用了复杂网络中的级联失效模型，通过模拟不同国家的小麦出口减少情景，探讨了网络中各国的供应危机传播范围和影响时间。

本文的研究结果表明，少数几个国家在全球小麦贸易网络中扮演着极其重要的角色。这些国家的供应中断会迅速导致全球小麦供应链的级联效应传播。当俄罗斯和乌克兰减少 60% 及以上的小麦出口时，几乎所有的贸易国都会受到影响。当美国、加拿大等国完全停止小麦出口时，全球小麦贸易网络中的所有国家也将受到供应冲击的影响。基于以上分析，本文进一步提出了提高全球小麦贸易网络韧性的政策建议。首先，作为主要小麦出口国，俄罗斯、美国等国应当在突发事件发生时，确保对主要进口国的小麦供应流通。其次，依赖进口的小麦消费国应当分散进口来源，减少对某一出口国的高度依赖，增强自身的粮食安全保障能力。最后，国际组织应当加强对全球小麦贸易网络的监管与协调，特别是在突发事件发生时，为受影响最严重的国家提供援助，确保全球粮食供应的稳定性。

2. 模型

2.1. 小麦国际贸易网络模型

小麦国际贸易网络是以地区为节点，地区之间小麦贸易关系为边，地区间小麦贸易量为边权的加权有向网络，用 $G(V, E, W)$ 表示小麦国际贸易网络，其中 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 为网络节点集合， n 为网络中节点总数， $E = \{e_{ij}\}$ 为节点间的有向边集合， $i \neq j = 1, 2, \dots, n$ ，若 $e_{ij} = 1$ 表示地区 i 向地区 j 出口小麦，若 $e_{ij} = 0$ 则表示地区 i 不向地区 j 出口小麦， $W = \{w_{ij}\}$ 为有向边上的边权， w_{ij} 表示地区 i 向地区 j 出口的小麦量，本文 $i \neq j = 1, 2, \dots, n$ 。本文数据来源于 UN Comtrade，贸易量单位为千吨。

为确定各贸易国在小麦国际贸易网络中的地位和小麦国际贸易格局，本文采用网络结构性指标、中心性特征指标进行分析，各指标计算方法如下：

1) 网络整体结构特征指标

平均最短路径长度：平均最短路径表示网络中任意两个节点之间的最短路径长度的平均值。它用于衡量网络的紧密程度，即贸易流动在网络中的效率。如果平均最短路径长度较小，则意味着网络中的节点彼此之间的联系较为紧密，贸易流动速度较快。

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

其中 d_{ij} 是节点 i 和节点 j 之间的最短路径长度， $\sum_{i \neq j} d_{ij}$ 是所有节点对之间的最短路径长度之和。

聚类系数：聚类系数反映了网络中节点聚集成团的程度，它衡量了一个节点的邻居们彼此之间也相互连接的可能性。聚类系数越高表示网络中存在很多局部团体(群体)，即某一节点的邻居之间互相连接形成“团状结构”。

2) 网络节点中心性特征指标

度中心性：度中心性是通过与其他节点的直接连接总数来度量，节点的度中心性越大表示其影响力越强，即该节点能影响多数的相邻节点。 DC 表示节点 i 的度中心性， x_{ij} 的加和表示与节点 i 直接相连的节点数量， n 表示复杂网络中节点的总数。

$$DC_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{(n-1)(n-2)} (i \neq j) \quad (2)$$

强度中心性：强度中心性是通过与其他节点连边的权重来度量，节点的强度 S_i 包括出强度 S_i^{out} 和入强度 S_i^{in} ，分别表示一个贸易国的出口量和进口量。一个节点的强度中心性越高表示这个节点的小麦贸易量越高。

$$S_i = S_i^{in} + S_i^{out} \quad (3)$$

$$S_i^{in} = \sum_{j=1}^n w_{ji} \quad (4)$$

$$S_i^{out} = \sum_{j=1}^n w_{ij} \quad (5)$$

其中, w_{ij} 表示贸易国 i 出口至贸易国 j 的小麦贸易量, w_{ji} 表示贸易国 i 从贸易国 j 进口的小麦贸易量。

接近中心性: 接近中心性是通过一个节点到另一个节点的距离和来度量, 如果节点 i 与网络中其他节点的最短路径的长度很小, 那节点 i 具有较高的接近中心性。一个节点的接近中心性越高表示该节点对于信息的流动有最佳的观察视野。

$$CC_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^n d_{ij}}$$

其中 d_{ij} 表示节点 i 和节点 j 之间的最短路径。

介数中心性: 介数中心性是用于衡量一个节点在网络中扮演中介角色的指标, 如果任何一个节点到其他节点的最短路径必然经过某一节点, 则该节点具有很高的介数中心性。介数中心性刻画节点对于网络中其他节点对之间沿最短路径传输信息的控制能力。

$$BC_i = \frac{2}{(n-1)(n-2)} \sum_{i \neq j, j \neq k, i \neq k} \frac{p_{jk}(i)}{p_{jk}} \quad (6)$$

其中 p_{jk} 表示节点 j 和节点 k 之间所有最短路径的数量, $p_{jk}(i)$ 表示节点 j 和节点 k 之间最短路径中经过节点 i 的路径数量。

特征向量中心性: 特征向量中心性是衡量一个节点在网络中影响力的指标, 在特征向量中心性中不仅考虑了相邻节点的总数量还考虑了节点的重要性。

$$EC_i = \lambda^{-1} \sum_{j=1}^n A x_j \quad (7)$$

其中, λ 是一个特征值, A 是邻接矩阵, x_j 是矩阵 A 的特征值 λ^{-1} 对应的特征向量。

2.2. 级联失效模型

复杂网络中的级联失效是一个风险扩散过程[11], 小麦国际贸易网络中的某些贸易国或贸易关系受到影响时, 会导致许多其他贸易国、贸易关系甚至整个网络遭受危机, 这个过程被称作级联失效过程或雪崩过程。在小麦国际贸易网络中, 某个重要贸易国的进出口变化会改变网络贸易量的流动, 这可能会由于贸易国的最低需求而导致更多的贸易国或贸易关系受到影响。当一个贸易国(地区)小麦出口减少时, 令其作为危机的传播源, 若出口减少量超过其直接贸易伙伴的最大负载量时, 则认为该国伙伴国受到了小麦出口减少的影响, 成为被感染贸易国和新的危机传播源, 这个过程中被感染的贸易国数量称为雪崩规模, 其在小麦国际贸易网络贸易国总数的占比成为雪崩比重。危机传播过程中, 级联失效模型涉及的主要参数含义及符号见表 1, 级联失效过程如图 1 所示, 具体流程说明如下:

a) 设定所有贸易国的国内小麦进口量为 I_i ($i \neq j \neq k = 1, 2, \dots, n$), 最大负载量是 βI_i ($0 < \beta < 1$), 表示其抵御危机的最大能力。

b) 贸易国 i 减少 α 倍小麦出口, 以其直接贸易国 j 为例, j 的进口减少量为 $\Delta I_j = \alpha w_{ij}$, 若 $\Delta I_j > \beta I_j$, 则贸易国 j 受到 i 出口减少的影响, 成为新的危机传播源, 减少 α 倍小麦出口; 若 $\Delta I_j < \beta I_j$, 则贸易国 j

不受到 i 出口减少的影响, 不会减少小麦出口。依此遍历所有贸易国 i 的直接贸易国, 将所有新增危机传播源放至传播源集合 Q 中, 参与下一轮迭代, 此时迭代步数 $t=1$;

c) 针对传播源集合 Q 中的所有传播源, 对比其所有直接贸易国的进口减少量和最大负载, 若 $\Delta I_k > \beta I_k$, 则直接贸易国 k 成为下一步迭代的危机传播源, 放至传播源集合 Q 中, 此时迭代步数 $t=2$;

d) 重复步骤 b)、c), 直到网络中无新增危机传播源, 级联失效过程结束。

Table 1. Main parameters and meanings of cascading failure model

表 1. 级联失效模型主要参数及含义

参数	含义
α	供应冲击, 表示传播源贸易国小麦出口减少的百分比
β	感染阈值, 表示被感染贸易国的抗风险能力
$\frac{\alpha}{\beta}$	供应冲击系数, 表示被感染贸易国的风险调整能力
I_i	贸易国 i 的加权入度, 表示 i 的小麦进口总量, 即经济体的初始负载
βI_i	贸易国 i 的最大负载量
w_{ij}	单边出口减少量, 表示贸易国 i 对贸易国 j 的出口减少量
$\Delta I_j = \alpha w_{ij}$	总进口减少量, 表示贸易国 j 从多个感染源减少的进口总量
Q	传播源集合
t	迭代步数, 表示供应冲击的传播轮次

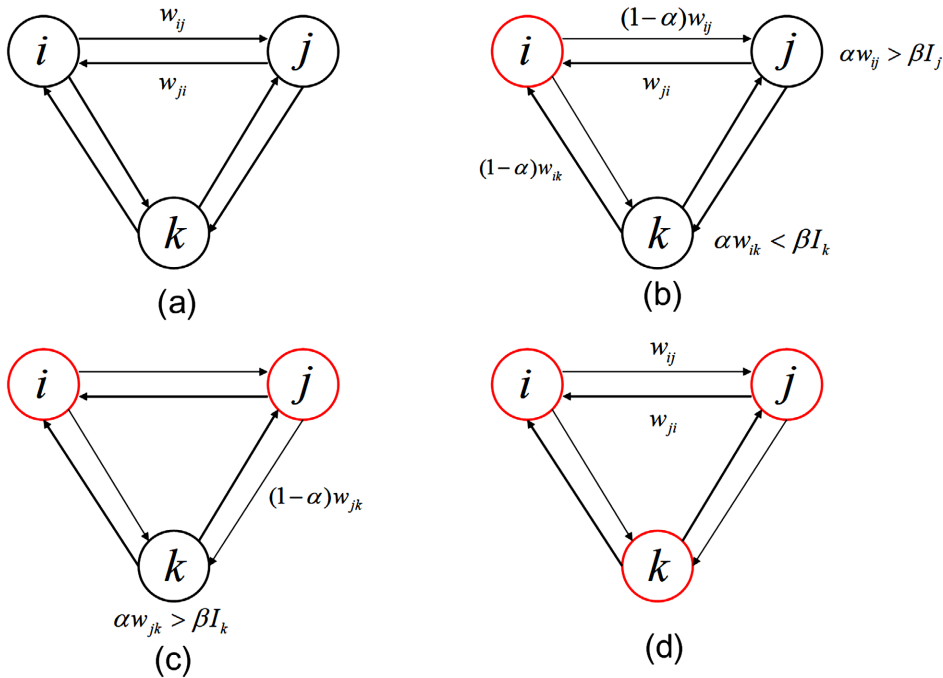


Figure 1. Cascading failure process
图 1. 级联失效示意图

3. 国际小麦贸易网络拓扑结构特征分析

3.1. 国际小麦贸易网络整体结构特征

2020 年小麦国际贸易网络中的贸易国有 166 个，全球贸易关系总数为 6826。该网络的平均路径长度为 1.76，小于对应 1000 个同等规模随机图的平均路径长度均值 1.97；聚类系数为 0.63，高于 1000 个同等规模随机图的最大聚类系数 0.51。因此，2022 年小麦国际贸易网络中节点之间的连接紧密，国家间小麦贸易流动迅速。由图 2 的 2020 年小麦国际贸易网络节点的度分布图所示，节点度的频数在度值处于 0~50 之间最高，整体呈现出随着度值增加而降低的趋势。说明少量节点拥有较多的边，大量节点拥有较少的连边，表明在国际小麦贸易网络中有一些贸易国起着关键作用，而一旦某个关键国家或某些关键国家同时出现危机，其他各国也会受到一定影响和冲击。

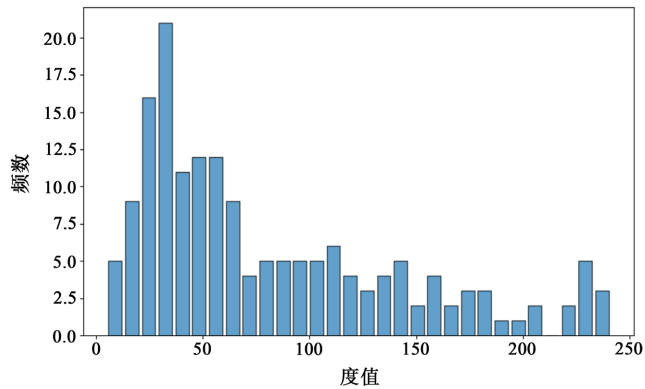


Figure 2. Node degree distribution map of wheat international trade network in 2020
图 2. 2020 年小麦国际贸易网络节点度分布图

根据各国之间的小麦贸易流量，本文建立小麦贸易网络图如图 3 所示，各国名称大小与出口量成正比，其中俄罗斯、加拿大、美国、法国、乌克兰、德国、阿根廷、澳大利亚等国家是小麦贸易网络中的主要国家。

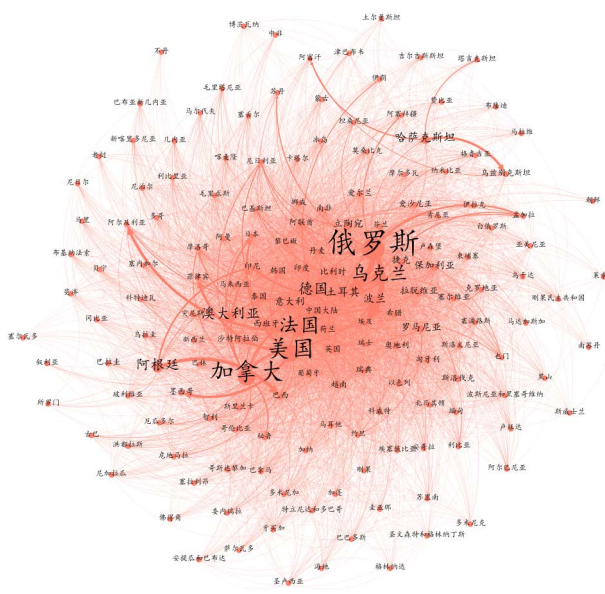


Figure 3. Global wheat trade network
图 3. 国际小麦贸易网络图

3.2. 国际小麦贸易网络节点中心性特征

在全球小麦贸易网络中，不同国家在进出口和贸易中介上扮演了不同的角色。通过分析网络的各中心性指标(如表 2 所示)，我们确定了不同国家在贸易网络中的地位和作用。首先，土耳其出度排名第一，表明其与多个国家保持密切的贸易联系，与意大利、荷兰等国同为小麦贸易网络中的重要国家。在入度排名中美国为第一，说明其从多个国家进口小麦，表明其对外部供应的依赖性。出强度反映了贸易量的规模，俄罗斯作为出口量最多的国家，成为全球小麦供应的核心来源之一，加拿大、美国、法国等国家在出口量上同样占据较高优势，进一步巩固了其在国际小麦贸易中的支配地位。从入强度来看，埃及是全球小麦贸易中进口量最大的国家，展现了埃及对外界小麦需求的依赖度，同样，土耳其也是进口量最大的国家之一，这表明其作为一个同时承担大量出口与进口活动的节点，连接了全球小麦供需网络的重要部分。中国大陆、印尼等国也在该指标中位列前茅，显示了对小麦进口的高度依赖，尤其是在粮食安全方面的需求进一步加深了其在全球市场中的影响力。而从中心性指标上来看，土耳其在整个小麦贸易网络中的位置使其能够以最短的路径与其他国家进行交易；美国在网络中起到了首要的桥梁和中介作用，其在网络中占据着不仅是直接连接的重要位置，其贸易伙伴也同样是网络中的重要节点，进一步加强了美国在全球小麦贸易网络中的影响力。

Table 2. The top 10 countries in the centrality of wheat international trade network
表 2. 小麦国际贸易网络中心性排名前 10 的国家

排名	出度	入度	出强度	入强度	接近中心性	中介中心性	特征向量中心性
1	土耳其	美国	俄罗斯	埃及	土耳其	美国	美国
2	意大利	加拿大	加拿大	中国大陆	意大利	法国	英国
3	荷兰	英国	美国	土耳其	德国	英国	加拿大
4	德国	法国	法国	印尼	荷兰	中国大陆	德国
5	中国大陆	荷兰	乌克兰	阿尔及利亚	中国大陆	荷兰	中国大陆
6	法国	德国	德国	意大利	法国	意大利	法国
7	印度	意大利	阿根廷	菲律宾	印度	加拿大	荷兰
8	西班牙	阿联酋	澳大利亚	巴西	西班牙	德国	阿联酋
9	比利时	澳大利亚	哈萨克斯坦	德国	比利时	阿联酋	澳大利亚
10	英国	中国大陆	波兰	孟加拉国	英国	土耳其	意大利

综上，土耳其、美国、俄罗斯等国家在小麦国际贸易网络中展现出显著的中心性特征，它们分别在出口、进口及中介功能方面扮演了不可或缺的角色。而正是这些国家的重要性，给小麦贸易网络带来了潜在的危机与风险，一旦任意一个或几个重要国家的小麦贸易受到影响，其影响将会通过贸易网络传导至其他国家，网络结构和中心性特征能帮助我们识别关键节点和潜在危机。为了更进一步确定这种潜在危机对小麦贸易网络的影响，下文将基于级联失效模型分析小麦供应冲击在小麦贸易网络中的传导。

4. 小麦贸易网络中的供应危机传播

4.1. 俄乌战争对小麦贸易网络供应的影响

供应危机代表突发事件下的中心国家减少小麦出口的比重，而感染阈值代表受突发事件影响国家抵

御供应危机的能力,为探究小麦贸易网络中各国在突发事件下受到的影响如何,本节以俄乌战争为背景,探究在俄乌减少小麦出口的现实背景下,各国小麦供应危机传播的影响范围及动态影响过程。俄乌两国是全球主要的小麦出口国家,俄乌战争导致乌克兰小麦出口港口——黑海被迫封锁,而俄罗斯为保证国内供应宣布停止对部分国家出口小麦,俄乌两国小麦出口量的减少将对全球小麦贸易网络产生较大影响,为评估这一影响,本节根据 2.2 节级联失效模型算法,设定多种俄乌减少出口情景(改变供应冲击大小),得到不同供应危机下全球小麦贸易网络的危机传播雪崩规模变化图和雪崩规模占比图,如图 4(a)和图 4(b)所示。

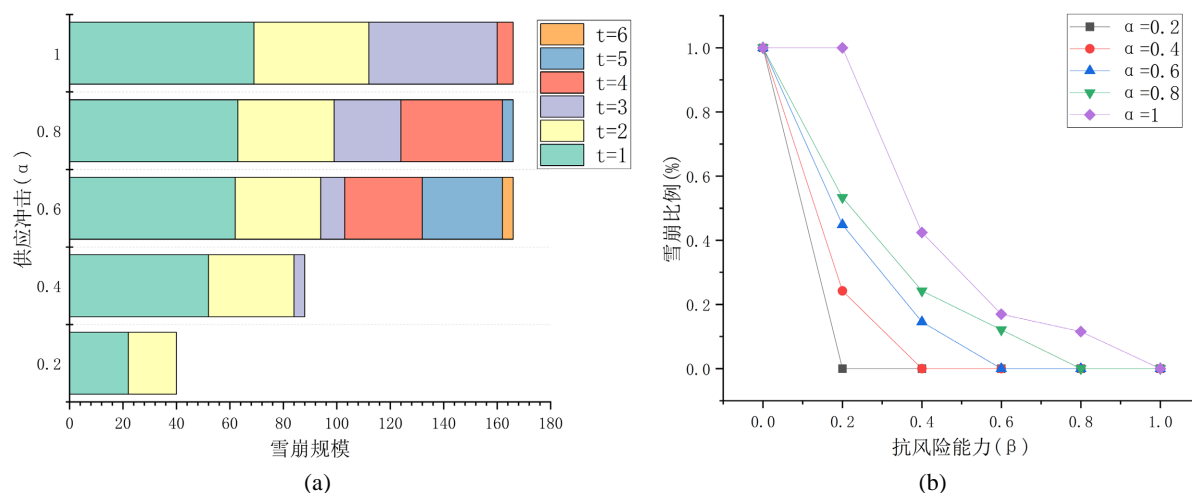


Figure 4. Temporal variation trend and avalanche scale of different supply shocks in wheat trade networks

图 4. 小麦贸易网络中不同供应冲击传播的时间变化趋势及雪崩规模

图 4(a)展示了当各国抵御供应危机的能力 $\beta = 0.1$ 时,不同的供应冲击 α 下国际小麦贸易网络危机传播雪崩规模随着时间变化的情况。当供应冲击不断增大,雪崩的传播时间也越长,受到影响的国家总数也越多,且当供应冲击 $\alpha \geq 0.6$ 时,小麦贸易网络中的所有国家都会受到影响,且影响传至所有国家所需时间越来越短。从各时刻受到影响的国家数量来看,在 $t=1$ 时刻受到影响的国家数量最多,分别是:埃及、苏丹、突尼斯、阿曼、坦桑尼亚、亚美尼亚、卢旺达、孟加拉、利比亚、黎巴嫩、白俄罗斯、刚果、阿尔巴尼亚、哈萨克斯坦、蒙古、土耳其、摩尔多瓦、吉尔吉斯斯坦、马拉维、巴基斯坦、格鲁吉亚、阿塞拜疆。这些国家对俄罗斯和乌克兰的小麦进口依赖度高,俄乌减少小麦出口会首先给这些国家带来影响。若俄乌完全停止出口,50%以上的国家会在 $t=2$ 时刻后受到影响。

图 4(b)展示了不同抗风险能力和供应冲击下全球小麦贸易网络中的国家雪崩比例。随着供应冲击越强,网络中的雪崩比例越大,即受到影响的国家数量越多;随着各国抗风险能力的增强,网络中雪崩比重逐渐减小,且当 $\beta \geq \alpha$,即各国承受冲击能力大于等于供应冲击程度时,网络的雪崩比例最小,即受到影响的国家最少

4.2. 其他出口国对小麦贸易网络供应的影响

从出强度来看,除了俄罗斯和乌克兰以外,加拿大、美国、法国、德国、阿根廷和澳大利亚也占据全球小麦出口的较大份额,这些国家在贸易网络中有重要地位,如果除俄罗斯和乌克兰以外,加拿大、美国、法国、德国、阿根廷和澳大利亚的供应也发生较大冲击,这将对小麦贸易网络产生怎样的影响?因此,本文除了解俄乌战争带来的影响之外,将进一步探究在贸易重要国家作为传染源情况下小麦贸易网

络供应危机的传播情况。为了模拟各国在不同抗风险能力下的被感染情况，假设各贸易重要国家完全停止出口，即供应冲击 $\alpha=1$ ，根据第二节级联失效模型算法得到在不同抗风险能力下网络整体的雪崩比重大小，如图 5(a)所示，同样为探究危机传播速度，本节设置各国抗风险能力 $\beta=0.1$ ，得到各贸易重要国供应冲击下不同时刻的雪崩规模，如图 5(b)所示。

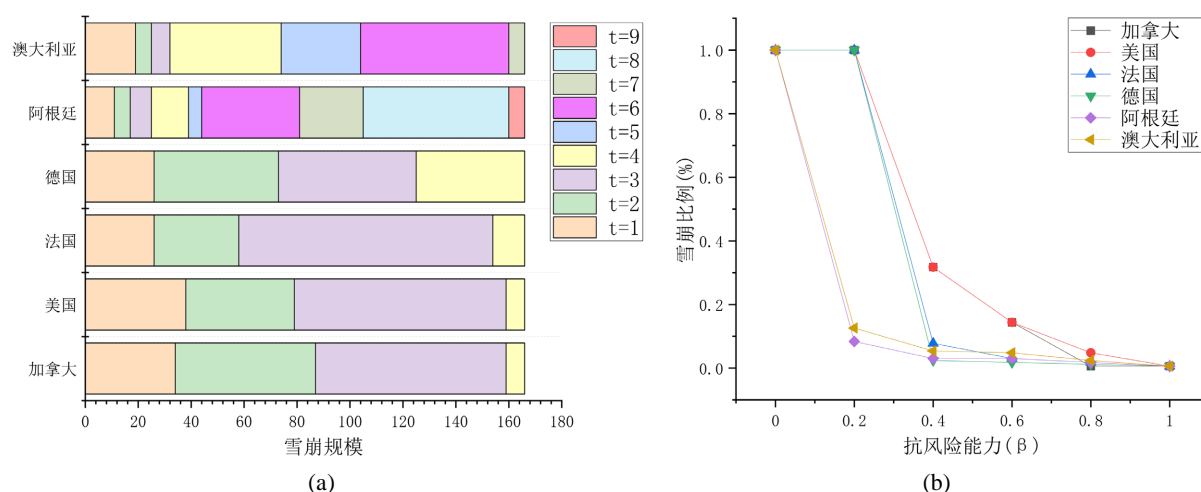


Figure 5. Time variation trend and avalanche scale of shock propagation in different trade important countries

图 5. 不同贸易重要国冲击传播的时间变化趋势及雪崩规模

图 5(a)展示了抗风险能力 $\beta=0.1$ 时，不同贸易重要国家停止小麦出口时国际小麦贸易网络危机传播雪崩规模的时间演变情况，上述 6 个贸易重要国家作为冲击传播源头时，所有小麦贸易国均受到影响。当加拿大、美国、法国、德国停止小麦出口时，仅迭代 4 步就将影响传至网络中所有国家，而当澳大利亚和阿根廷停止小麦出口时，则分别需要 7、9 步传播影响至所有国家。且美国和加拿大在第一步迭代中影响的国家超过 22%，说明对于小麦贸易网络而言，美国、加拿大、法国、德国、澳大利亚、阿根廷的影响力依次下降。

图 5(b)展示了当不同贸易重要国家完全停止小麦出口时，在不同抗风险能力下网络中雪崩国家的比例变化。当加拿大、美国、法国、德国、阿根廷、澳大利亚停止出口时，随着各国的抗风险能力提升，网络中受到影响的国家的比例降低，当阿根廷和澳大利亚停止出口时，抗风险能力提升至 20% 便有 90% 左右的国家能抵御停止出口带来的影响，提升至 40% 时 95% 以上的国家能抵御停止出口带来的影响。而当所有国家抵御风险能力在 20% 时，也无法抵御加拿大、美国、法国、德国停止出口带来的影响，若要 90% 国家都能抵御美国停止小麦出口的影响，各国的抗风险能力需高于 60%，同理，为抵御加拿大、法国和德国的风险，抗风险能力需分别高于 60%、20%、20%。

综上发现，在出强度较高的国家中，美国、加拿大重要程度比法国、德国、阿根廷和澳大利亚高，与出强度排名相一致，且小麦贸易网络的相互连通性质导致任意贸易重要国家停止出口都会引起全球所有国家受到影响，仅时间长短有别。

5. 结论

本文选取小麦和小麦贸易国作为研究对象，使用联合国贸易数据库 2020 年小麦贸易数据，在复杂网络理论上建立全球小麦贸易网络，并分析其网络拓扑结构特征。构建级联失效模型，探究俄罗斯、乌克兰、美国、加拿大、德国、法国、阿根廷、澳大利亚减少小麦出口时小麦贸易国受到的级联影响和影

响传播范围。主要结论如下：

1) 在小麦贸易网络中，少数国家拥有较多的贸易关系，多数国家拥有较少的贸易关系，其中，以俄罗斯、加拿大、美国、法国、乌克兰、德国、阿根廷、澳大利亚为主的国家在小麦贸易网络中担当着重要的出口角色。

2) 当俄罗斯和乌克兰作为供应冲击传播源时：网络雪崩时间随着供应冲击增大而变长，受到影响的国家也越多，当俄罗斯和乌克兰减少 60% 及以上小麦出口时，所有国家都受到影响。而当各国抗风险能力高于冲击强度时，网络中受到影响的国家最少。

3) 当美国、加拿大、德国、法国、阿根廷、澳大利亚中任意国停止出口时，所有国家均受到影响，且美国、加拿大、法国和德国比澳大利亚与阿根廷对贸易网络的影响时间短；所有国家抗风险能力提升至 20% 以上时大部分国家能抵御阿根廷、澳大利亚、法国和德国的冲击，而抵御加拿大和美国的供应冲击需要至少 60% 的抗风险能力。

根据本文研究结果，有如下政策建议和启示：第一，以俄罗斯、美国为主的重要贸易国家应当保证小麦出口的正常流通，维护国际贸易正常秩序。第二，严重依赖进口的国家应当分散进口来源，降低对主要出口国的高度依赖，抵御重大突发事件的强烈供应冲击。第三，国际组织应当维护全球小麦贸易秩序，当重要贸易国减少出口影响较大时，应重点关注和援助依赖进口的国家和贫穷地区国家，维护全球小麦贸易稳定性。

参考文献

- [1] 王溶花. 基于复杂网络分析法的小麦国际贸易格局及演变[J]. 农业经济, 2024(6): 136-138.
- [2] Mottaleb, K.A. and Govindan, V. (2023) How the Ongoing Armed Conflict between Russia and Ukraine Can Affect the Global Wheat Food Security? *Frontiers in Food Science and Technology*, **3**, Article 1072872. <https://doi.org/10.3389/frfst.2023.1072872>
- [3] Mukhtar, Z. (2023) The Impact of the Ukraine-Russia War on Food Security and Countries Exposed to Food Supply Shock. *European Journal of Business and Management Research*, **8**, 38-43. <https://doi.org/10.24018/ejbmr.2023.8.2.1861>
- [4] Porkka, M., Kumm, M., Siebert, S. and Varis, O. (2013) From Food Insufficiency Towards Trade Dependency: A Historical Analysis of Global Food Availability. *PLOS ONE*, **8**, e82714. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0082714>
- [5] Fellmann, T., Hélaine, S. and Nekhay, O. (2014) Harvest Failures, Temporary Export Restrictions and Global Food Security: The Example of Limited Grain Exports from Russia, Ukraine and Kazakhstan. *Food Security*, **6**, 727-742. <https://doi.org/10.1007/s12571-014-0372-2>
- [6] Puma, M.J., Bose, S., Chon, S.Y. and Cook, B.I. (2015) Assessing the Evolving Fragility of the Global Food System. *Environmental Research Letters*, **10**, Article ID: 024007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/2/024007>
- [7] Lin, F., Li, X., Jia, N., Feng, F., Huang, H., Huang, J., et al. (2023) The Impact of Russia-Ukraine Conflict on Global Food Security. *Global Food Security*, **36**, Article ID: 100661. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2022.100661>
- [8] Bren d'Amour, C., Wenz, L., Kalkuhl, M., Christoph Steckel, J. and Creutzig, F. (2016) Teleconnected Food Supply Shocks. *Environmental Research Letters*, **11**, Article ID: 035007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/035007>
- [9] Ji, G., Zhong, H., Feukam Nzudie, H.L., Wang, P. and Tian, P. (2024) The Structure, Dynamics, and Vulnerability of the Global Food Trade Network. *Journal of Cleaner Production*, **434**, Article ID: 140439. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140439>
- [10] Burkholz, R. and Schweitzer, F. (2019) International Crop Trade Networks: The Impact of Shocks and Cascades. *Environmental Research Letters*, **14**, Article ID: 114013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4864>
- [11] 尹潇潇, 陶业伟, 赵晓倩, 等. 基于级联失效模型的国际贸易网络危机传播效应研究——以半导体为例[J]. 系统科学与数学, 2024, 44(5): 1389-1411.