

多层农产品贸易依赖网络供应风险传播研究

——以玉米和猪肉为例

刘 鹏, 邵 琦

江苏科技大学经济管理学院, 江苏 镇江

收稿日期: 2025年10月9日; 录用日期: 2025年10月24日; 发布日期: 2025年11月17日

摘 要

全球化农产品贸易是维系各国农产品安全与优化资源配置的重要途径, 但其高度互联的贸易网络也隐含着系统性连锁灾害风险。尽管学者们针对农产品贸易网络的脆弱性及风险传播展开了广泛探讨, 但主要聚焦于单一农产品贸易网络的分析, 忽视了不同农产品之间的依赖关系, 导致对系统性风险的低估。为此, 本文以玉米和猪肉两种典型的上下游关联农产品为例, 构建相应的贸易依赖网络, 在对其分析的基础上, 建立基于负载-容量的级联失效模型, 模拟并分析了玉米供应短缺情境下双层贸易依赖网络上的风险传播。研究结果表明: (1) 不同风险水平下, 各国的风险波及规模存在显著异质性, 整体呈阶梯式下降趋势, 反映出各国影响力水平的差异; 同时, 随着层间依赖程度增大, 风险逐渐向下游猪肉贸易网络扩散, 跨层传播效应显著增强。(2) 风险传播模式存在主体差异性, 核心玉米出口国发生供应危机时, 会率先在玉米贸易层内引发大规模风险扩散, 进而迅速传导至猪肉贸易网络; 而少数非核心玉米出口国, 其初始玉米层内风险波及规模虽较小, 但能够通过中介国家的放大作用, 最终同样诱发显著的跨层传播。本文为理解多层农产品贸易依赖网络上的风险传播提供了理论依据, 同时对构建更具韧性的农产品贸易体系具有重要的现实意义。

关键词

玉米, 猪肉, 贸易依赖网络, 供应风险, 级联失效模型

Research on Supply Risk Propagation in Multi-Layer Agricultural Product Trade Dependency Networks

—A Case Study of Corn and Pork

Peng Liu, Dang Shao

School of Economics and Management, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang Jiangsu

Received: October 9, 2025; accepted: October 24, 2025; published: November 17, 2025

文章引用: 刘鹏, 邵琦. 多层农产品贸易依赖网络供应风险传播研究[J]. 电子商务评论, 2025, 14(11): 941-954.

DOI: 10.12677/ecl.2025.14113521

Abstract

Global agricultural trade serves as a vital channel for maintaining national food security and optimizing resource allocation. However, its highly interconnected trade network also harbors the potential for systemic cascade risks. While scholars have extensively explored the vulnerability and risk propagation within agricultural trade networks, existing research primarily focuses on single-product trade networks, overlooking the critical dependencies between different agricultural products. This oversight leads to an underestimation of systemic risks. To address this gap, this paper takes corn and pork—two representative products with an upstream-downstream relationship—as examples, based on network analysis, a load-capacity-based cascade failure model is established to simulate and analyze risk propagation across the two-layer trade dependency network under a corn supply shortage scenario. The findings reveal that: (1) Under different risk levels, the scale of risk impact exhibits significant heterogeneity among countries, showing an overall stepwise decline, which reflects variations in national influence. Simultaneously, as the degree of inter-layer dependency increases, risks gradually diffuse to the downstream pork trade network, with cross-layer propagation effects becoming markedly stronger. (2) Risk propagation patterns demonstrate source dependency. When core corn exporters face a supply crisis, they initially trigger large-scale risk diffusion within the corn trade layer, which then rapidly transmits to the pork network. In contrast, for a few non-core corn exporters, while the initial propagation within the corn layer is limited, it can ultimately induce significant cross-layer propagation through the amplification effect of intermediary countries. This research provides a theoretical basis for understanding risk propagation in multi-layer agricultural trade networks and holds practical significance for building a more resilient global agricultural trade system.

Keywords

Corn, Pork, Trade Dependency Network, Supply Risk, Cascade Failure Model

Copyright © 2025 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

全球化农产品贸易作为各国经济与社会发展的基石，其不仅是各国保障农产品安全、调剂余缺的关键手段，也是优化全球农产品资源配置、促进农业技术进步和增进人类福祉的重要途径。据统计，全球约有四分之一供直接消费的农产品是通过国际贸易实现的[1]。通过贸易，资源丰富型国家可以将其农业优势转化为经济收益，而资源匮乏型国家则能获得稳定多样的农产品供应，从而共同维护全球农产品体系的稳定与平衡。

各国之间通过频繁且复杂的农产品贸易建立联系，从而形成了全球农产品贸易网络[2]。一方面，农产品贸易网络对于保障农产品的高效流动与分配起着至关重要的作用。但与此同时，这一高度互联的系统也正日益面临着来自自然灾害、突发公共卫生事件等各类外部冲击的考验[3][4]。且随着网络节点间联系的日益紧密与流动性的显著增强，局部的农产品供应风险极易通过贸易关系迅速放大和扩散，导致网络出现系统性的级联失效[5]-[8]。例如，2008年，极端气候事件导致俄罗斯粮食产量锐减，该国随即紧急颁布谷物出口禁令，受其影响，乌克兰、阿根廷等主要粮食生产国也相继采取了限制性贸易政策，引发了国际粮食市场的广泛动荡。

从复杂性系统视角, 学者们针对农产品贸易网络的脆弱性及风险传播展开了广泛研究。例如, 张琳琛等[9]统计了 HS 六位编码下 698 种农产品的贸易信息, 基于社会网络分析方法, 构建了多维度的贸易网络脆弱性指标, 从国家、产品等方面评估了国际农产品贸易的脆弱性。Ji 等[10]构建了由小麦、玉米等四种主要粮食作物组成的复合农产品贸易网络, 基于度中心性的节点攻击模拟了随机攻击和蓄意攻击两种情形下农产品贸易网络的脆弱性, 研究表明, 农产品贸易网络在面对随机攻击时拥有较好的鲁棒性, 在蓄意攻击下表现出脆弱性[11]。Suweis [12]和 Kumm 等[13]从韧性评估的角度, 研究了国际农产品贸易对于全球农产品系统韧性的影响, 研究发现许多国家在所研究的韧性方面呈现系统性地下降, 增加了它们对未来农产品系统冲击的风险。此外, 不同于上述学者从静态角度分析农产品贸易网络的脆弱性, 一些学者通过构建风险传播动力学模型, 模拟了风险在农产品贸易网络上的动态传播过程。如, Burkholz 等[14]通过构建级联失效模型, 研究了主要农作物贸易网络受到供给冲击的级联影响。高源等[15]基于全球水产品贸易数据, 通过级联失效模型模拟了重要风险源的风险传播路径。

已有研究工作极大地推进了我们对于农产品贸易网络的脆弱性及风险传播的认识, 但在研究的系统性方面还值得进一步深化。具体而言, 现有研究多聚焦于单一或复合农产品贸易网络, 未能充分考虑不同农产品之间因生产、消费联系所形成的实质性依赖关系。事实上, 农产品系统内部存在广泛的供应链关联, 粮食作物作为畜牧养殖的主要饲料来源, 其供应稳定性直接影响到畜牧产品的生产与贸易[16]。例如, 已有实证研究表明, 猪肉作为世界上生产和消费最多的肉类, 其养殖成本中, 被誉为“饲料之王”的玉米占比高达 60%至 70%。由于这种深度的投入产出关联, 上游玉米供应的短缺会迅速对下游猪肉的生产产生实质性冲击, 引发跨产品、跨市场的风险传导[17]。因此, 从单一网络视角出发可能导致对全球农产品贸易网络体系系统性风险的低估, 有必要从多层网络视角展开更进一步的研究。

基于上述分析, 本文以玉米和猪肉两种典型的上下游关联农产品为例, 通过联合国商品贸易统计数据库收集了 2011~2022 年的全球玉米和猪肉贸易数据, 构建了玉米-猪肉双层贸易依赖网络, 在对两层网络的结构演化及层间关联特征分析的基础上, 建立基于负载-容量的级联失效风险传播模型, 并以 2022 年的贸易数据为基础, 模拟并分析上游玉米供应冲击在玉米-猪肉双层贸易依赖网络中的动态级联传播, 重点考察了不同风险水平与层间依赖程度对风险传播规模和路径的影响。

2. 贸易网络结构演化分析

2.1. 数据收集及网络构建

玉米和猪肉的贸易数据均来源于联合国商品贸易统计数据库(UN Comtrade), 其中玉米的 HS 编码为 100590, 特指非种用玉米, 猪肉的 HS 编码为 0203, 包含新鲜及冷藏猪肉。这些数据详细地记录了国家之间的贸易流向、贸易量及贸易金额等关键信息。由于统计口径的差异, 贸易数据在双边报告中常出现不对称现象[18], 但进口方的海关检查和清关程序通常更为严格, 因此本文使用进口方报告的进口数据。此外, 鉴于报告的贸易额数据相较于贸易量数据更为完整和准确, 因此, 在下文构建网络时, 本文选择使用国家之间的贸易额作为边的权重。收集的数据集的时间跨度为 2011~2022 年。

基于上述贸易数据, 本文构建了玉米-猪肉双层贸易依赖网络。首先, 玉米贸易网络(CTN)构建为一个有向加权网络, 记为 $G_c = (N_c, E_c, W_c)$ 。其中, N_c 为节点集合, 每个节点 n_i 代表参与玉米贸易的国家或地区; E_c 为有向边集合, 边 e_{ij} 表示国家 i 向国家 j 出口玉米; W_c 为边权重矩阵, 元素 w_{ij} 对应国家 i 向 j 出口玉米的贸易额。其次, 猪肉贸易网络(PTN)以相同方式构建为有向加权网络, 记为 $G_p = (N_p, E_p, W_p)$ 。其中, N_p 为猪肉贸易参与国家集合, E_p 表示国家间的猪肉出口流向, W_p 记录相应猪肉贸易额。在此基础上, 本文进一步构建玉米-猪肉双层贸易依赖网络, 通过上述两个单层网络中的共同节点建立层间依赖关系。具体而言, 若某一国家同时参与玉米和猪肉贸易, 即出现在 N_c 与 N_p 的交集中, 则在该国节点上建

立跨层连接。

2.2. 分析方法

为了揭示玉米 - 猪肉双层贸易依赖网络的结构演化特征, 为后续风险传播分析奠定基础, 本文选取了以下拓扑指标, 使用节点总数(nodes)和连边总数(edges)来衡量网络的总体规模; 使用平均聚类系数(C)和平均最短路径长度(L)分别来刻画网络的局部连接的紧密程度和全局的传输效率; 此外, 为了考察两层网络之间的关联关系, 我们计算了两层网络的共同节点数和其对应节点重叠系数(N_O), 以及两层网络的共同连边数和其对应的连边重叠系数(E_O)。相应指标的计算公式及解释如表 1 所示。

Table 1. Network topology metrics and descriptions
表 1. 网络拓扑指标及解释

指标	计算公式	解释	含义
C	$C = \frac{1}{N} \sum_i \frac{n_i}{k_i(k_i - 1)}$	网络中节点的邻居节点之间实际连边与最大可能连边的比例。N 为节点总数, n_i 表示节点 i 的邻居节点间实际连边数, k_i 为节点 i 的度数。	描述网络中节点的邻居节点之间的连接紧密程度
L	$L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij}$	网络中任意两个节点之间最短路径的平均长度。N 为网络中的节点数, d_{ij} 为节点 i 到节点 j 的最短有向路径长度。	描述网络传输的效率
N_O	$N_O = \frac{ N_c \cap N_p }{\min(N_c , N_p)}$	两个网络中共同节点相对于较小网络节点总数的比例。N ₁ 和 N ₂ 分别是两个网络的节点集合。	反映了两个网络在节点组成上的相似性
E_O	$E_O = \frac{ E_c \cap E_p }{\min(E_c , E_p)}$	两个网络中共同连边相对于较小网络边总数的比例。E ₁ 和 E ₂ 分别是两个网络的边集合。	反映了两个网络在连接模式上的相似性

2.3. 玉米 - 猪肉双层贸易依赖网络结构演化分析

表 2 展示了玉米 - 猪肉双层贸易依赖网络的结构及其演化特征, 首先从网络规模来看, 2011~2022 年间, 两层网络的参与国家数量均相对较稳定, 玉米贸易网络维持在 180 个国家, 猪肉贸易网络维持在 170 个国家。其次, 研究期间内, 玉米和猪肉两层贸易网络中的连边数均呈现出稳定增长趋势, 玉米贸易网络从 2011 年的 1520 个贸易关系增长到 2022 年的 2068 个贸易关系, 猪肉贸易网络从 2011 年的 1509 个贸易关系增长到 2022 年的 1748 个贸易关系。结合贸易网络中的节点数量和连边数量演变趋势来看, 两层网络中国家间的贸易联系正日益加强, 贸易往来更加紧密。

从网络整体结构特征来看, 两个网络均表现出较大的平均聚类系数和较短的平均最短路径长度, 凸显出小世界网络的核心特征。此外, 平均聚类系数不断上升, 表明具有贸易联系的国家不仅彼此间贸易频繁, 而且它们的贸易伙伴之间也建立了更紧密的贸易联系, 从而增强了网络的局部聚集性。平均最短路径长度不断下降则意味着网络中任意两个节点间的连接变得更加直接和高效, 即使是不直接相连的国家, 也可以通过较少的中介国家建立联系, 从而提高了网络的全局联通效率。

最后, 从层间关联特征来看, 2011~2022 年间, 两层网络均具有较多的共同节点数, 重叠系数始终维持在 0.95 左右; 而共同连边数相对较少, 重叠系数普遍低于 0.5。这表明两层网络虽在节点组成上高度相似, 但在连边模式上存在明显异质性。这与已有研究文献中提到的全球范围内的主要农作物和牲畜生产热点地区具有显著异质性特征是相印证的[19]。此外, 许多研究也表明, 多层异质网络中, 风险的传播模式会更加复杂[20]。因此, 基于多层网络视角对农产品贸易网络的供应风险传播进行深入探究具有重要的理论与现实意义。

Table 2. Statistics of network topology metrics**表 2.** 网络拓扑指标统计

年份	网络规模				整体结构特征				层间关联特征	
	CTN		PTN		CTN		PTN		共同节点数(N_O)	共同连边数(E_O)
	nodes	edges	nodes	edges	C	L	C	L		
2011	180	1520	171	1509	0.347	2.890	0.410	2.969	170 (0.971)	595 (0.395)
2012	182	1654	172	1541	0.334	2.765	0.401	2.993	168 (0.981)	654 (0.425)
2013	182	1727	172	1580	0.346	2.840	0.414	2.961	167 (0.971)	691 (0.437)
2014	182	1702	177	1609	0.343	2.886	0.405	2.750	167 (0.949)	687 (0.428)
2015	182	1852	173	1634	0.359	2.795	0.419	2.799	165 (0.959)	716 (0.439)
2016	179	1848	173	1660	0.375	2.665	0.423	2.703	162 (0.942)	720 (0.435)
2017	183	1773	174	1739	0.362	2.675	0.426	2.712	168 (0.960)	712 (0.410)
2018	182	1842	173	1704	0.363	2.687	0.425	2.632	166 (0.965)	731 (0.430)
2019	176	1815	171	1686	0.363	2.656	0.417	2.684	167 (0.954)	726 (0.431)
2020	176	1922	165	1716	0.365	2.525	0.428	2.524	159 (0.964)	739 (0.457)
2021	182	2040	165	1729	0.368	2.534	0.437	2.399	160 (0.970)	747 (0.432)
2022	178	2068	167	1748	0.375	2.458	0.439	2.372	158 (0.946)	806 (0.461)

基于上述对玉米-猪肉双层贸易依赖网络的拓扑结构及其演化特征的深入分析, 可见随着时间的推移, 两层网络上国家之间的联系均愈发紧密, 彼此之间的贸易依赖程度也在不断加深, 网络更加高效且互联互通。然而, 这种趋势同时也带来了潜在的挑战: 网络上发生系统性连锁灾害的风险也随之加剧, 特别是当网络上的核心国家发生危机时, 风险有可能沿着贸易链扩散至全球。此外, 两层网络虽节点构成相似, 但在连边模式上存在一定的异质性, 进一步加剧了风险跨层传播的复杂性。鉴于此, 后续分析将构建风险传播动力学模型以研究玉米-猪肉双层贸易依赖网络上的供应风险传播。

3. 玉米-猪肉双层贸易依赖网络的供应风险传播分析

3.1. 模型构建

面对自然灾害、公共卫生疫情等突发事件, 部分农产品出口国往往会出于稳定国内供需平衡、维护国内市场、防范价格飙升等多重考量, 采取贸易出口管制措施[21]。这种举措直接导致其出口量锐减, 进而波及依赖其作为供应源的进口国, 造成这些国家进口量缩减, 若进口减少量超过其承受能力极限, 就会引发供应短缺危机。尤为值得注意的是, 若这些受到影响的进口国同时也是出口国, 则可能出于保障国内农产品市场的正常供应而采取相似的出口限制措施, 从而触发一系列连锁反应, 使得风险迅速在整个网络中蔓延开来[6]。此外, 当国家的上游玉米出现供应短缺危机时, 由于下游猪肉生产高度依赖上游玉米投入[16], 这将间接影响到下游猪肉的生产, 当其影响程度超出一定范围时, 就会波及到下游猪肉的出口, 进而将风险扩散至下游猪肉贸易网络中, 造成更广泛的系统性影响。

因此, 可以将供应短缺情境下农产品贸易网络上的风险传播视为一个潜在级联失效过程[22], 本文构建了基于负载-容量的欠载级联失效模型, 并设定了模型的初始容量、负载容量及负载重分配策略[23]。在每层网络上, 将国家 j 的初始进口总量 $\text{Sin } j$ 定义为初始容量; 将 $\beta * \text{Sin } j$ 定义为负载容量, 即为节点 j 所能承受的最大负载, 当国家 j 的进口累计减少量超过其负载容量时则发生失效; 针对负载重分配策略, 采取基于最近邻的均匀分配原则, 即当国家 i 发生供应危机而将出口量 $\text{Sout } i$ 减少 $\alpha * \text{Sout } i$ 时, 将国家 i 的所有出口边的权重 w_{ij} 均减少 $\alpha * w_{ij}$ 。同时, 引入层间依赖程度 c 来表征下游猪肉对于上游玉米的依赖程度。模型涉及的参数及含义见表 3。

Table 3. Risk propagation model parameters and definitions
表 3. 风险传播模型参数及含义

模型参数	参数含义
α	供应冲击强度, 即初始风险源发生供应危机时减少出口的比例
β	失效阈值, 即潜在被感染国家抵抗风险的能力
$r = \alpha/\beta$	风险调整系数, 用来调整不同的风险水平
S_i^{out}	国家 i 的初始出口总量
S_j^{in}	国家 j 的初始进口总量
w_{ij}	国家 i 向国家 j 的初始出口量
ΔS_j^{in}	国家 j 的累计进口减少量
c	层间依赖程度, 下游猪肉对于上游玉米的依赖程度
T	级联失效迭代次数

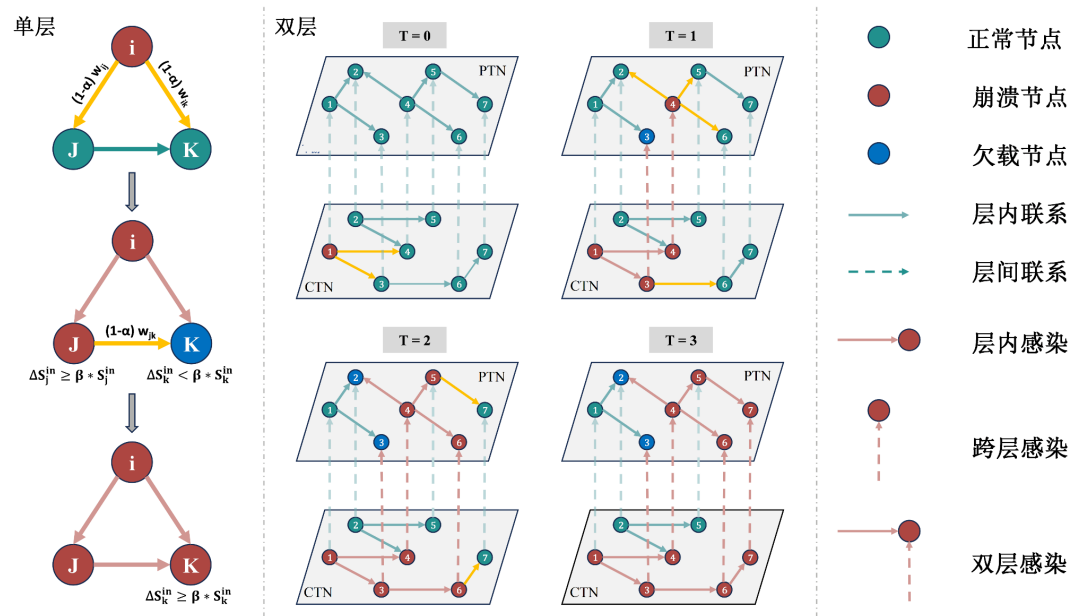


Figure 1. Diagram of risk propagation example
图 1. 风险传播示例图

图 1 进一步给出了风险传播的示例化过程, 具体迭代流程描述如下:

- 1) $T=0$ 时刻, 上游玉米贸易网络中的国家 i 发生供应短缺危机成为初始风险传播源, 其玉米出口量 S_{out}^i 减少 $\alpha \cdot S_{out}^i$, 即将国家 i 在上游玉米贸易网络中的所有出口边的权重 w_{ij} 均减少 $\alpha \cdot w_{ij}$ 。
- 2) 遍历国家 i 在玉米贸易网络中的所有出口贸易伙伴 j , 判断其玉米进口累计减少量 ΔS_{in}^j 是否达到了失效阈值 $\beta \cdot S_{in}^j$, 若是, 则国家 j 成为玉米贸易网络中新的风险传播源。
- 3) 判断国家 j 是否同时位于下游猪肉贸易网络中, 若是, 判断其玉米进口累计减少量 ΔS_{in}^j 乘以层间依赖程度 c 是否也达到了其猪肉进口失效阈值, 若是, 国家 j 成为猪肉贸易网络上新的风险传播源。
- 4) $T=T+1$, 遍历玉米和猪肉贸易网络中的新的风险传播源, 重复步骤 2)、3)。
- 5) 若双层农产品贸易网络中均不再出现新的风险传播源, 级联失效迭代结束。

3.2. 结果及分析

本文基于 2022 年的全球玉米和猪肉贸易数据进行供应风险传播模拟, 为了量化初始风险源的风险传

播能力, 使用级联失效终止时波及到的国家总数作为衡量指标。

3.2.1. 玉米 - 猪肉双层贸易依赖网络

图2首先给出了2022年的玉米-猪肉双层贸易依赖网络, 下层为玉米贸易网络, 上层为猪肉贸易网络, 节点的大小与其出口强度成正比。从图中我们可以得出, 2022年, 玉米贸易网络上, 美国(USA)、阿根廷(ARG)和巴西(BRA)为前三大核心玉米出口国; 猪肉贸易网络上, 西班牙(ESP)、美国(USA)和德国(DEU)为前三大核心猪肉出口国。

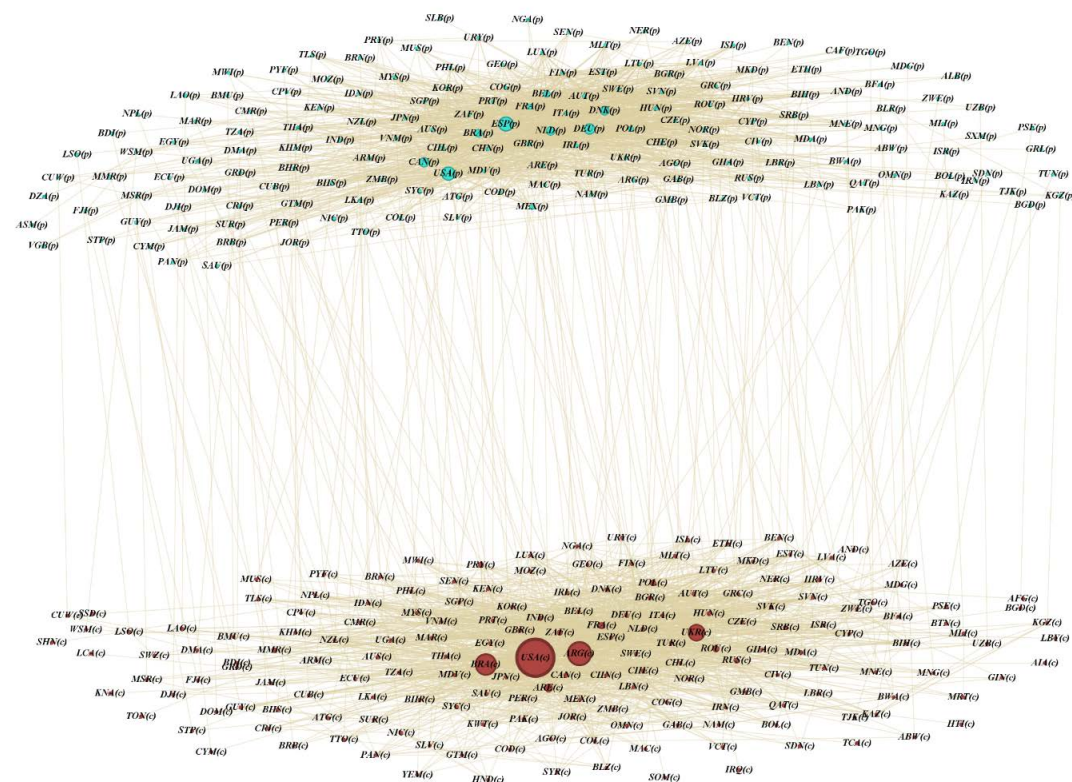


Figure 2. Topological structure of the corn-pork trade dependency network

图2. 玉米 - 猪肉贸易依赖网络拓扑结构图

3.2.2. 玉米 - 猪肉双层贸易依赖网络层内风险传播及分析

基于所构建的风险传播模型, 风险在单层网络上的传播规模主要取决于参数 α 与 β 的比值 r , 将其称为风险调整系数, r 值越大, 风险水平越高, 本文选取了多个 r 值以模拟不同风险水平下的风险传播。

图3显示了供应短缺情境下, 玉米贸易网络(CTN)和猪肉贸易网络(PTN)上的风险源在不同风险调整系数 r 时的层内风险波及规模, 每幅子图中, 纵轴为初始风险源发生风险时波及的国家数量, 横轴为按照国家风险波及规模降序排列后的编号。整体而言, 曲线呈阶梯式下降状, 体现出一定的层次结构, 反映出贸易网络中国家影响力地位的差异, 即大部分国家的风险波及能力相对较弱, 仅有少数国家展现出强大的风险波及能力, 且与其他国家形成了断层。此外, 随着风险调整系数 r 的增大, 具有风险波及能力的国家不断增加, 且发生风险时波及的国家数量也在不断上升。以玉米贸易网络为例, 当 r 为2时, 玉米贸易网络中仅有27个国家发生供应短缺风险时会波及到其他国家, 占比16%, 其中风险波及能力最强的国家所感染的国家数量为71, 占网络中国家总数的42%。而当 r 提升至6时, 具备风险波及能力的

国家占比跃升至 31%，且风险波及能力最强的国家所影响的国家数量也占到了网络中国家总数的 56%。

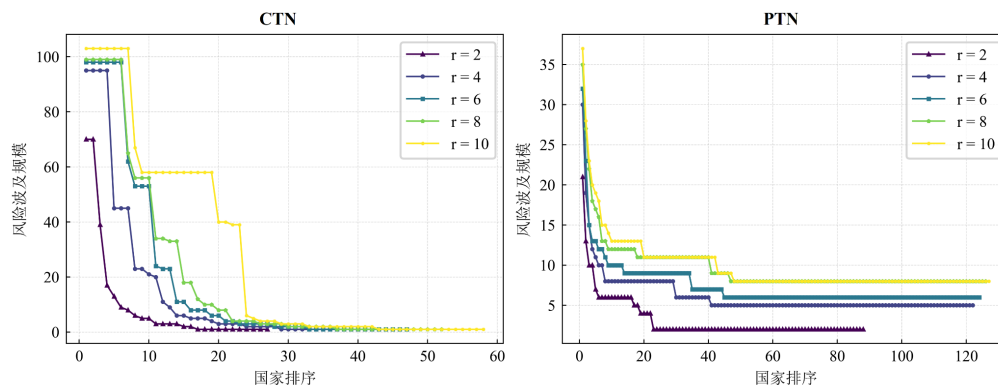


Figure 3. Scale of within-layer risk propagation

图 3. 层内风险波及规模

3.2.3. 玉米-猪肉双层贸易依赖网络层间风险传播及分析

当上游玉米贸易网络发生供应短缺危机时，风险不仅局限于单一的层内传播，而是因猪肉生产对玉米供应的深刻依赖，迅速跨越层级界限，扩散至下游猪肉贸易网络。对于风险的跨层传播，需要确定层间依赖程度 c ，即下游猪肉对于上游玉米的依赖程度，参考已有研究工作[16]，本文将 c 设定为 0.5。

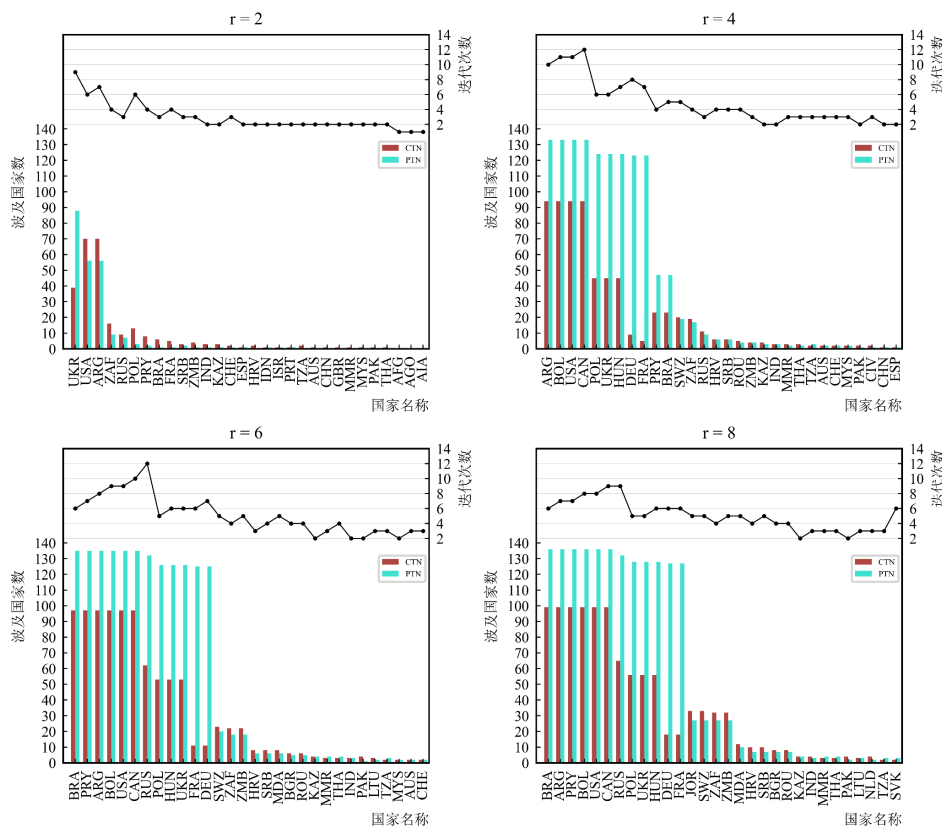


Figure 4. Scale of cross-layer risk propagation (with fixed c and simulated r)

图 4. 跨层风险波及规模(固定 c , 模拟 r)

在层间依赖程度 c 为 0.5 的条件下, 图 4 展示了在不同风险调整系数 r 下, 国家发生玉米供应短缺危机时, 在玉米-猪肉双层贸易依赖网络上引起的风险波及规模及所需的迭代步数, 横坐标为按照风险波及规模降序排列后给出的前三十名国家的 ISO 代码。如图所示, 当风险调整系数 r 为 2 时, 仅乌克兰(UKR)、美国(USA)和阿根廷(ARG)三个国家发生玉米供应危机时, 在猪肉贸易网络中引发了显著的跨层风险波及规模, 反映出这些国家在网络中处于核心的地位, 即使风险水平较低, 也能对整个系统产生较大影响。随着 r 提升至 4, 核心风险源的数量及其引发的跨层风险波及规模均大幅增加, 并且由于下游猪肉贸易网络同时受到双层产品的叠加冲击, 其跨层风险波及规模往往要大于在初始玉米贸易网络上的风险波及规模。此外, 更为值得注意的是, 初始风险源在下游猪肉贸易网络中引发的跨层风险波及规模, 并不总是与其在上游玉米贸易网络中引起的层内风险波及规模成正比。例如, 尽管德国(DEU)和法国(FRA)在初始玉米贸易网络中引发的层内风险波及规模很小, 但它们却能诱发下游猪肉贸易网络上的大规模跨层风险传播。随着 r 继续增大, 初始风险源引起的风险波及规模逐渐趋于稳定, 并且可以明显观察到初始风险源引发的风险波及规模呈现出分层和分组的现象。分层体现了国家影响力地位的不同, 分组则源于这些国家在玉米贸易网络中的相互感染性, 进而导致它们在关联的下游猪肉贸易网络中也展现出相同的风险波及规模, 如美国(USA)作为第一大玉米出口国, 在第一步级联中可以直接影响到阿根廷(ARG)、玻利维亚(POL)和加拿大(CAN), 在第二步迭代中可以间接影响到巴拉圭(PRY), 第三步中可以间接影响到巴西(BRA)。

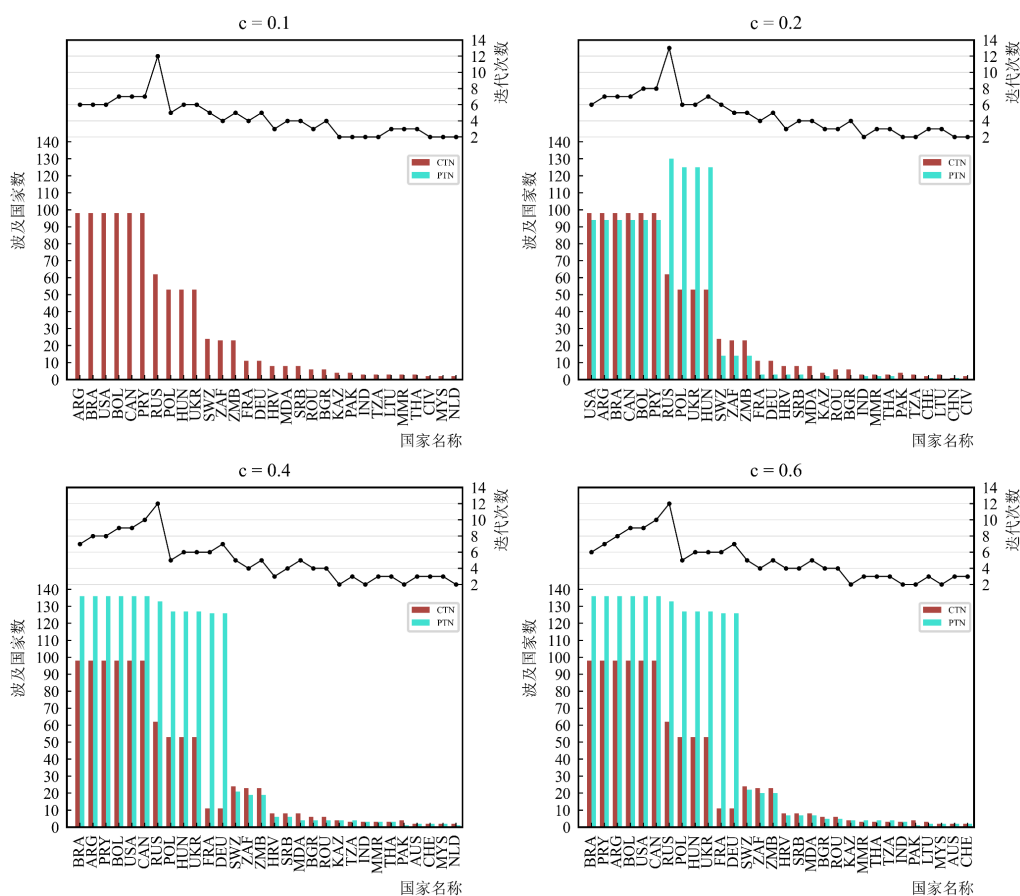


Figure 5. Scale of cross-layer risk propagation (with fixed r and simulated c)

图 5. 跨层风险波及规模(固定 r , 模拟 c)

鉴于政策法规,用途比例及替代品等因素的影响[24],不同年份的层间依赖程度 c 可能存在差异,同时基于上述模拟结果,可以发现当风险调整系数 r 大于 6 时,初始风险源引起的风险波及规模已相对较为稳定,因此,本文进一步在固定风险调整系数 r 为 6 的情景下,模拟了不同层间依赖程度 c 对风险跨层传播的影响,如图 5 所示,当层间依赖程度 c 为 0.1 时,上游玉米贸易网络中的初始风险源发生供应短缺危机时,并未波及下游猪肉贸易网络。而当 c 增加至 0.2 时,多个初始风险源已经可以在下游猪肉贸易网络上引发较大的跨层风险波及规模,这表明层间依赖程度 c 存在一个阈值,当 c 超过此阈值时,风险才会产生跨层传播。并且同样可以观察到跨层风险波及规模并不一定与其层内风险波及规模成比例。随着 c 继续增大,初始风险源引起的跨层风险波及规模进一步扩大,而当 c 超过 0.4 时,初始风险源引起的跨层风险波及规模已逐渐趋于稳定。这一结果揭示出跨层风险传播具有非线性突增特性,即使层间依赖程度较低,一旦超过临界水平,也足以在下游猪肉网络中引发系统性、大规模的跨层传播。

3.2.4. 典型国家的风险传播模式分析

在上述分析中,我们得知,诸如美国(USA)这样的玉米出口大国,其发生玉米供应短缺危机时,将引发下游猪肉贸易网络上的大规模跨层风险传播,同时,虽然少数非玉米出口大国在上游玉米贸易网络上引起的风险波及规模很小,但却由此引发了下游猪肉贸易网络上的大规模跨层风险传播,如德国(DEU)。因此,在本小节中,我们选取了美国和德国,重点分析它们风险传播模式的差异。

图 6 首先给出了在不同风险调整系数 r 及不同层间依赖程度 c 下,美国和德国发生玉米供应危机时在玉米和猪肉两层贸易网络中风险波及规模,主对角线下方为层内风险波及规模,主对角线上方为跨层风险波及规模。从图中可以看出,随着风险调整系数 r 的增大,美国在首先玉米层内引发了大规模的风险波及,同时,随着层间依赖程度 c 的增大,风险逐渐波及至下游猪肉贸易网络,引发较大规模的跨层风险波及规模。而德国在玉米贸易网络层内的风险波及规模始终较小,最大仅为 11,但是一旦两个参数超过一定阈值后,将会引发下游猪肉贸易网络上大规模跨层风险传播,最大规模为 126。

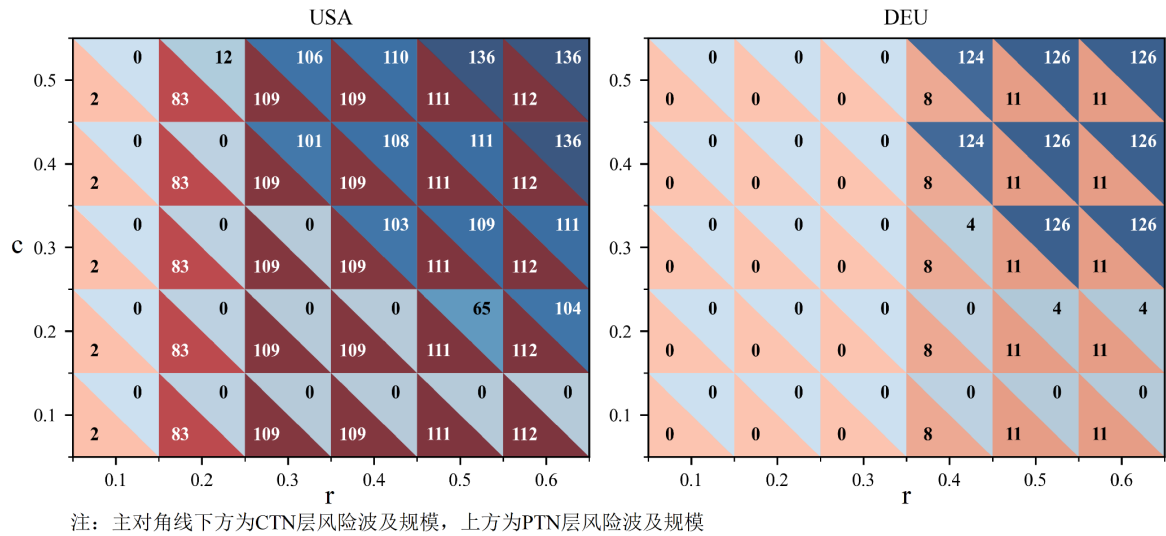
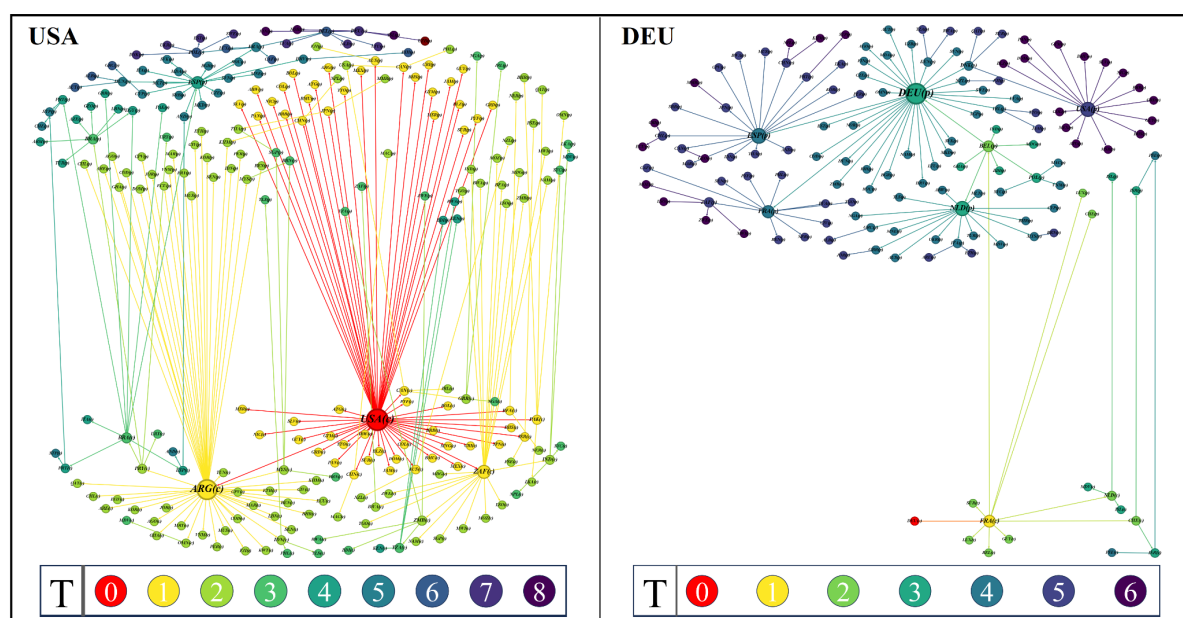


Figure 6. Risk propagation scale of representative countries

图 6. 典型国家的风险波及规模

图 7 进一步给出了在层间依赖程度 c 为 0.5, 风险调整系数 r 为 6 的情景下, 美国和德国发生玉米供应短缺危机而引发的玉米 - 猪肉双层贸易依赖网络上的风险传播路径, 下层为玉米贸易网络, 上层为猪

肉贸易网络。在玉米贸易网络上,美国作为初始风险源,共历经5次级联迭代,最终波及到98个国家。相比之下,德国作为玉米贸易网络中的非核心出口国家,其影响力相对有限,仅通过影响到中介国家法国(FRA),间接波及到了玉米贸易网络上的少数几个国家。对于美国发生玉米供应短缺危机而引发的下游猪肉贸易网络上的跨层风险传播,由于下游猪肉贸易网络受到上游玉米供应和本层猪肉供应的叠加冲击,其风险持续时间更长,波及范围更广,共历经8次迭代,最终波及到136个国家。相比之下,德国虽然在玉米贸易网络上引发的风险波及规模很小,但却通过中介国家法国(FRA)间接影响到了比利时(BEL)的玉米供应,进而影响到比利时的猪肉供应致使其在猪肉贸易网络上发生失效,而作为猪肉贸易网络上的出口大国,比利时的失效最终触发了整个猪肉贸易网络上的大规模连锁反应。这表明风险跨层传播具有非线性和复杂性特征,即使局部扰动规模较小,也可能通过关键中介国家的放大效应,在更广泛的网络中引发灾难性的后果。



注: T代表风险波及所需的迭代次数, T=0表示初始风险源。

Figure 7. Risk propagation paths of representative countries

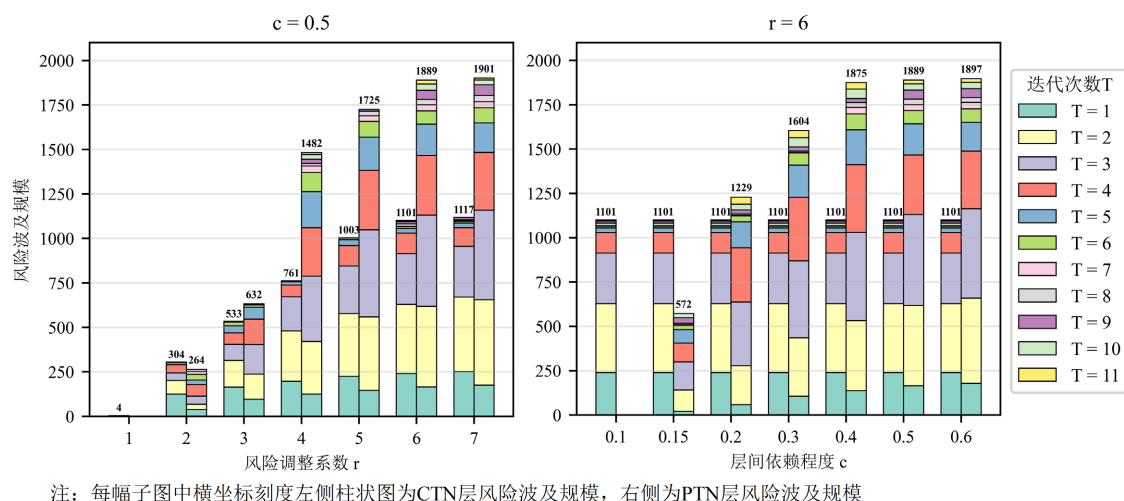
图 7. 典型国家的风险传播路径

3.2.5. 敏感性分析

对于上述构建的模型,风险的传播范围主要受到风险调整系数 r 和层间依赖程度 c 的影响,为了更加明确参数发挥作用的范围,以便更好地给出指导建议,本小节针对上述两个参数进行了更进一步的敏感性分析,如图 8 所示。

图 8 展示了在不同 r 和 c 时,风险分别在两层网络中的级联迭代步数及其在每个迭代步数中影响到的国家数量,图中结果基于对所有国家分别进行模拟后的数据汇总得出。对于每一横坐标刻度,左侧柱状图为玉米贸易网络层风险波及规模,右侧为猪肉贸易网络层风险波及规模。当 c 固定时:在 r 为 1 的情景下,风险影响有限且尚未引起跨层风险传播。随着 r 的增大,跨层风险波及规模随着层内风险波及规模的增大而增大,并且风险迭代次数也在不断增加,具体而言,在 r 由 1 增至 2 时,层内及跨层风险波及规模均迅速扩大,呈现出突增现象;当 r 由 3 增至 4 时,跨层风险波及规模再次出现明显跃升;而当 r 达到 6 时,风险波及规模已相对较为稳定,风险迭代次数也达到了最大值 11。当 r 固定时:在 c 为

0.1 的情景下, 同样未引起跨层风险传播。随着 c 的增大, 跨层风险波及规模迅速扩大, 并且在 c 由 1 增至 0.15 的过程中, 跨层风险传播出现突增现象, 而当 c 达到 0.4 时, 跨层风险传播已呈现相对稳定状态。



注: 每幅子图中横坐标刻度左侧柱状图为CTN层风险波及规模, 右侧为PTN层风险波及规模

Figure 8. Sensitivity analysis

图 8. 敏感性分析

4. 结论及建议

4.1. 研究结论

以玉米和猪肉两种代表性的上下游关联农产品为例, 首先构建了玉米-猪肉双层贸易依赖网络, 在对两层网络的结构演化及其关联特征分析的基础上, 通过建立基于负载-容量的级联失效模型, 研究了玉米供应短缺情景下风险在玉米-猪肉双层贸易依赖网络上的动态级联传播, 主要研究结论如下:

总体而言, 不同风险调整系数 r 下, 无论是层内风险波及规模还是层间风险波及规模, 国家之间均存在显著的差异性, 整体呈现出阶梯式下降状, 体现出国家在网络中影响力地位的不同。同时, 随着层间依赖程度 c 的增大, 风险逐渐向下游猪肉贸易网络扩散, 引发较大的跨层风险传播, 且模拟发现层间依赖程度 c 存在一个阈值, 当低于此阈值时, 跨层风险传播效应尚未显现。

此外, 在双层贸易依赖网络上, 风险传播模式具有主体差异性, 具体而言, 美国、阿根廷和巴西等少数几个玉米核心出口国发生供应危机时, 会首先在玉米贸易层引发大规模的风险传播, 并迅速传导至猪肉贸易网络, 造成广泛的跨层影响; 而德国、法国等国家尽管在上游玉米贸易层引发的风险波及规模有限, 但能够通过少数中介国家的放大作用, 在下游猪肉贸易网络中同样诱发较大规模的跨层风险传播。

最后, 本研究尚存在一些局限性。首先, 研究所使用的贸易数据来源于联合国商品贸易统计数据库, 受限于数据更新速度与部分国家报告完整性, 可能对网络结构的准确刻画产生一定影响。其次, 在模拟过程中, 我们假设所有国家具有相同的抗风险能力, 这与现实情况存在差距。未来, 我们将结合各国经济指标、储备体系等实际因素构建模型, 以更贴近真实世界的风险传播。

4.2. 对策建议

基于上述研究结论, 我们提出了以下建议: (1) 应依据国家在双层网络中的影响力实施差异化防控。重点保障美国、阿根廷和巴西等上游核心出口国的供应稳定, 从源头上减少供应中断的发生概率。同时, 需关注跨层风险传播中的“隐性枢纽”国家, 如德国和法国等, 采取有针对性的监测与预防性阻断措施,

以实现对其跨层传播路径的有效管控。(2) 应通过推动供应多元化和替代方案开发, 将上下游农产品间的实际依赖程度控制在较低水平, 从而可以有效抑制风险的跨层传播效应。

此外, 本文的研究结果揭示, 在具有上下游依存关系的多层网络中, 上游局部的供应冲击可通过网络依存关系产生跨层、跨区域的系统性影响。当前, 这种高度依赖的复杂供应链体系在诸多领域普遍存在, 因此, 本研究构建的模型与分析框架, 为理解和应对各类复杂供应链的系统性风险提供了普适性的分析工具与管理启示。

参考文献

- [1] D'Odorico, P., Carr, J.A., Laio, F., Ridolfi, L. and Vandoni, S. (2014) Feeding Humanity through Global Food Trade. *Earth's Future*, **2**, 458-469. <https://doi.org/10.1002/2014ef000250>
- [2] 蔡宏波, 宋媛媛, 樊瑛, 等. 国际农产品贸易: 基于复杂网络的分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(2): 191-197.
- [3] Xu, H., Niu, N., Li, D. and Wang, C. (2024) A Dynamic Evolutionary Analysis of the Vulnerability of Global Food Trade Networks. *Sustainability*, **16**, Article 3998. <https://doi.org/10.3390/su16103998>
- [4] Laborde, D., Martin, W., Swinnen, J. and Vos, R. (2020) COVID-19 Risks to Global Food Security. *Science*, **369**, 500-502. <https://doi.org/10.1126/science.abc4765>
- [5] Bernard de Raymond, A., Alpha, A., Ben-Ari, T., Daviron, B., Nesme, T. and Tétart, G. (2021) Systemic Risk and Food Security. Emerging Trends and Future Avenues for Research. *Global Food Security*, **29**, Article ID: 100547. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100547>
- [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] 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>
- [8] Abay, K.A., Breisinger, C., Glauber, J., Kurdi, S., Laborde, D. and Siddig, K. (2023) The Russia-Ukraine War: Implications for Global and Regional Food Security and Potential Policy Responses. *Global Food Security*, **36**, Article ID: 100675. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2023.100675>
- [9] 张琳琛, 王悦, 董银果. 国际农产品贸易网络的脆弱性研究[J]. 农业经济问题, 2023(12): 130-144.
- [10] 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>
- [11] 董志良, 杨巧然. 国际粮食贸易网络鲁棒性分析[J]. 当代经济管理, 2021, 43(6): 73-78.
- [12] Suweis, S., Carr, J.A., Maritan, A., Rinaldo, A. and D'Odorico, P. (2015) Resilience and Reactivity of Global Food Security. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **112**, 6902-6907. <https://doi.org/10.1073/pnas.1507366112>
- [13] Kummu, M., Kinnunen, P., Lehtikoinen, E., Porkka, M., Queiroz, C., Röö, E., et al. (2020) Interplay of Trade and Food System Resilience: Gains on Supply Diversity over Time at the Cost of Trade Interdependency. *Global Food Security*, **24**, Article ID: 100360. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100360>
- [14] 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>
- [15] 高源, 陈嘉浩. 全球水产品贸易网络的供应风险传播研究[J]. 中国渔业经济, 2025, 43(1): 71-81.
- [16] Laber, M., Klimek, P., Bruckner, M., Yang, L. and Thurner, S. (2023) Shock Propagation from the Russia-Ukraine Conflict on International Multilayer Food Production Network Determines Global Food Availability. *Nature Food*, **4**, 508-517. <https://doi.org/10.1038/s43016-023-00771-4>
- [17] 程国强, 胡冰川, 徐雪高. 新一轮农产品价格上涨的影响分析[J]. 管理世界, 2008(1): 57-62, 81, 187-188.
- [18] Chen, C., Jiang, Z., Li, N., Wang, H., Wang, P., Zhang, Z., et al. (2022) Advancing UN Comtrade for Physical Trade Flow Analysis: Review of Data Quality Issues and Solutions. *Resources, Conservation and Recycling*, **186**, Article ID: 106526. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106526>
- [19] Sun, Z., Scherer, L., Tukker, A. and Behrens, P. (2020) Linking Global Crop and Livestock Consumption to Local Production Hotspots. *Global Food Security*, **25**, Article ID: 100323. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.09.008>

-
- [20] 贾春晓, 李明, 刘润然. 多层复杂网络上的渗流与级联失效动力学[J]. 电子科技大学学报, 2022, 51(1): 148-160.
 - [21] Falkendal, T., Otto, C., Schewe, J., Jägermeyr, J., Konar, M., Kumm, M., *et al.* (2021) Grain Export Restrictions during COVID-19 Risk Food Insecurity in Many Low- and Middle-Income Countries. *Nature Food*, **2**, 11-14. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00211-7>
 - [22] Lee, K., Yang, J., Kim, G., Lee, J., Goh, K. and Kim, I. (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>
 - [23] 段东立, 吴俊, 邓宏钟, 等. 基于可调负载重分配的复杂网络级联失效模型[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(1): 203-208.
 - [24] Erenstein, O., Jaleta, M., Sonder, K., Mottaleb, K. and Prasanna, B.M. (2022) Global Maize Production, Consumption and Trade: Trends and R&D Implications. *Food Security*, **14**, 1295-1319. <https://doi.org/10.1007/s12571-022-01288-7>