

数字经济背景下农产品电商供应链风险传导与韧性治理研究

徐玉纯

江苏大学管理学院, 江苏 镇江

收稿日期: 2026年6月26日; 录用日期: 2026年7月10日; 发布日期: 2026年8月14日

摘 要

在数字经济与农村电商快速发展的背景下, 农产品电商供应链呈现出网络化、平台化特征, 其稳定性面临更复杂的风险传导问题。本文基于复杂网络理论, 将农产品电商供应链抽象为无标度网络结构, 构建SIR传播模型对供应链中断风险的扩散过程进行仿真分析, 并结合网络指标, 开展动态蓄意攻击下的网络韧性评价。研究发现: 农产品电商供应链具有显著的关键节点依赖特征; 风险传播速度与恢复能力共同决定系统稳定性; 相较随机攻击, 针对高中心性节点的蓄意攻击对网络结构破坏更为显著, 其中接近度中心性节点对网络韧性影响最大。基于此, 应通过强化关键节点管理、构建分级管理框架、提升数字化协同水平及增强替代与恢复能力, 提高农产品电商供应链的整体韧性。

关键词

农产品电商供应链, 风险传导, 复杂网络, SIR模型, 供应链韧性

Risk Transmission and Resilience Governance of Agricultural E-Commerce Supply Chains in the Context of the Digital Economy

Yuchun Xu

School of Management, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu

Received: June 26, 2026; accepted: July 10, 2026; published: August 14, 2026

Abstract

In the context of the rapid development of the digital economy and rural e-commerce, agricultural e-commerce supply chains have evolved toward networked and platform-based structures, making their stability more vulnerable to complex risk transmission. Based on complex network theory, this study models the agricultural e-commerce supply chain as a scale-free network and employs an SIR model to simulate the propagation of supply chain disruption risks. Furthermore, network metrics are applied to evaluate supply chain resilience under dynamic targeted attacks. The results show that the agricultural e-commerce supply chain exhibits a strong dependence on key nodes; the stability of the system is jointly determined by the rate of risk transmission and the recovery capacity. Compared with random attacks, targeted attacks on high-centrality nodes cause more significant structural damage, among which nodes with high closeness centrality have the greatest impact on network resilience. Accordingly, enhancing resilience requires strengthening the management of key nodes, establishing a tiered management framework, improving digital coordination, and increasing redundancy and recovery capabilities.

Keywords

Agricultural E-Commerce Supply Chain, Risk Transmission, Complex Network, SIR Model, Supply Chain Resilience

Copyright © 2026 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

近年来,国家持续加大对农村电商与数字乡村建设的政策支持力度。2025年,中央网信办等四部门印发《2025年数字乡村发展工作要点》¹,明确提出“推动农村电商高质量发展、因地制宜推动农文旅融合发展、运用数字技术促进农民就业增收”;同年,农业农村部等十部门印发《促进农产品消费实施方案》²,强调“引导电商平台结合县域消费需求,发展即时零售、社区电商等业态”“提升农产品上行能力”。在政策引导下,我国农产品电商发展成效显著。据统计,2025年1~7月,农产品网络零售额同比增长7.4%,农村网商数量超过1950万家³。洪涛(2025)指出,生鲜电商已形成前置仓、仓店一体、社区团购等多元化模式并存格局,直播电商、田播、村播等新业态加速涌现,推动农产品流通方式深刻变革[1]。

与工业品供应链相比,农产品电商供应链具有鲜活易腐、季节性强、标准化程度有限和履约时效要求高等特征,因而更容易受到自然灾害、运输中断、产地波动、平台流量变化和订单波动等多重因素的影响[2]。一旦某一关键环节出现扰动,风险不仅会影响单个企业的经营,还可能沿着订单流、物流和信息流在网络中快速扩散,造成履约延迟、品质损耗、客户流失和品牌信任下降等连锁反应。尤其是在数字经济背景下,平台算法分发、即时履约和用户评价机制进一步放大了供应链中断的传导效应,使得农产品电商供应链的韧性问题愈发突出。

当前,供应链韧性、复杂网络和风险传播已成为相关领域的重要议题,但针对农产品电商供应链的

¹https://www.cac.gov.cn/2025-05/13/c_1748760394739054.htm

²https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202507/content_7034022.htm

³https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202508/content_7037395.htm

研究仍相对不足。一方面,已有研究多聚焦于传统农产品流通效率、冷链建设或平台销售模式,对农产品电商供应链作为交汇网络的结构特征关注不够;另一方面,关于供应链风险的研究往往采用静态指标分析或单一主体视角,较少从网络演化和节点传导角度揭示风险扩散机制。与此同时,农产品电商供应链具有明显的网络化特征[3],节点之间的连接并不均匀,部分平台、枢纽仓、核心产地和冷链企业往往处于网络中心位置,其失效可能对整体网络韧性产生更大影响。因此,有必要引入复杂网络分析方法,从结构层面识别农产品电商供应链中的关键节点,并考察风险传播与网络脆弱性的内在联系。

基于此,本文在复杂网络理论和传播理论的基础上,将农产品电商供应链视为一个由多主体构成的无标度网络,采用 SIR 模型对供应链中断风险的传播过程进行仿真分析,并通过度中心性、介数中心性、接近度中心性和 K 核等指标识别网络中的关键节点。随后,进一步引入动态蓄意攻击方法,模拟不同类型关键节点失效对网络韧性的影响,并从最大连通子图、平均距离、全局效率、平均度和平均聚集系数等维度对供应链韧性进行综合评价。原文中对动态攻击、韧性指标及其经济含义的设计,已经为本文转向农产品电商供应链主题提供了完整的方法框架。

本文的研究可能在以下方面形成补充:第一,从数字经济和电商平台视角重新审视农产品供应链韧性问题,拓展传统农产品流通研究的分析边界;第二,基于复杂网络与 SIR 模型刻画农产品电商供应链风险传导路径,对中断传播机制进行解释;第三,通过动态蓄意攻击识别关键节点,为平台治理、冷链协同和供应链备份机制设计提供依据。研究结论有助于为农产品电商供应链的风险防控、韧性提升与数字化治理提供参考,也可对数字乡村建设和农业电商高质量发展提供理论支持。

2. SIR 传播模型仿真分析

2.1. 模型介绍

本文选择 SIR 模型对节点失效过程仿真, SIR 模型最初用于刻画传染病传播过程,是研究风险扩散问题的经典框架之一[4]。该模型将系统中的节点划分为三种状态:易感态(S)、感染态(I)和恢复态(R)。如果处于易感态节点的任何邻居节点处于感染态,则它可能会在下一个周期内也发生感染而中断,其受邻居节点感染的概率为 P_1 。类似地,如果被破坏的节点恢复,它就获得了免疫力,达到恢复态,不再受到原来的中断风险的影响,中断节点在下一个时间段内恢复的概率为 P_2 。图 1 是网络中节点 SIR 三种状态的演变过程示意,其中绿色代表 S 态,红色代表 I 态,蓝色代表 R 态。

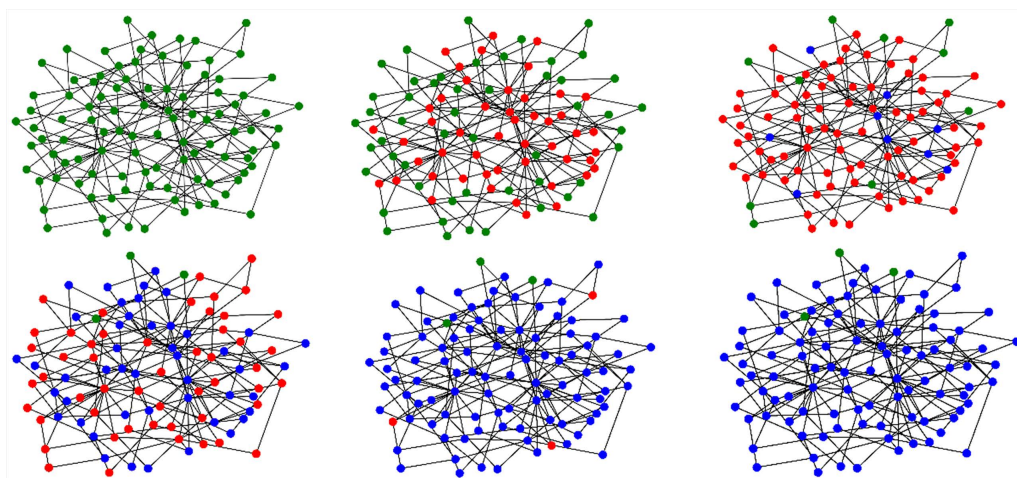


Figure 1. Evolution of node status

图 1. 节点状态演变

在供应链网络语境下，易感态表示尚未受到中断冲击但可能受到影响的节点，感染态表示已发生中断的节点，恢复态表示已从中断状态中恢复并具备一定免疫能力的节点。结合农产品电商供应链的现实情境，节点“感染”可理解为供应链中断状态，即节点因自然灾害、产地减产、冷链失效、物流延误、平台流量波动或订单激增等因素而出现履约受阻；节点“恢复”则表示企业通过库存补充、备用供应商切换、冷链修复、运输路线调整或平台协调等方式重新恢复正常运行。因此，感染率可近似反映风险在网络中的扩散速度，恢复率则可表征供应链系统的修复能力与应急响应效率。基于上述设定，本文利用python对风险传播过程进行模拟，并结合网络结构分析不同参数条件下供应链网络状态的演化规律。

2.2. 模型参数设置

基于 SIR 传播框架，本文将农产品电商供应链抽象为一个具有明显分工结构的复杂网络。网络节点主要包括产地生产主体、农民合作社、分拣加工企业、冷链物流企业、区域仓配中心、电商平台、商家、直播主体以及终端消费者；网络连边则表示订单流、物流、信息流和资金流在各类主体之间的传递关系。考虑到农产品电商供应链具有鲜活易腐、季节性强、履约时效要求高和平台依赖度高等特征，本文采用有向无标度网络对其现实结构进行刻画，以反映农产品电商网络中“少数核心节点连接大量边缘主体”的典型拓扑特征[5]。

在网络规模设定方面，本文构建了节点数为 500 的无标度网络。该规模既能够覆盖农产品电商供应链中不同层级主体的结构特征，又能够在计算复杂度与仿真精度之间保持相对平衡。

在网络生成机制上，本文采用 BA (Barabási-Albert)模型构建无标度网络[6]，用以刻画农产品电商供应链中普遍存在的优先连接机制。即新进入节点，如新商家、新合作社或新物流主体，通常更倾向于与已有连接度较高的节点建立合作关系，例如头部电商平台、核心冷链企业或区域枢纽仓，从而形成具有较高集聚度和明显中心节点的网络结构。这一设定与农产品电商供应链的现实演化逻辑相一致。

2.3. 仿真结果

基于上述参数设定，本文对农产品电商供应链中的风险传播过程进行了仿真分析，以考察不同传播能力与恢复能力条件下系统状态的演化特征。图 2~4 展示了不同参数组合下的仿真结果。

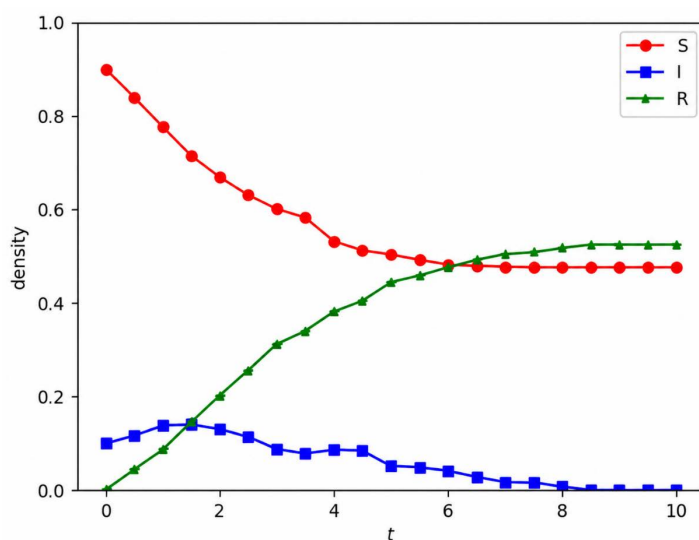


Figure 2. $P_1 = 0.2, P_2 = 0.8$

图 2. $P_1 = 0.2, P_2 = 0.8$

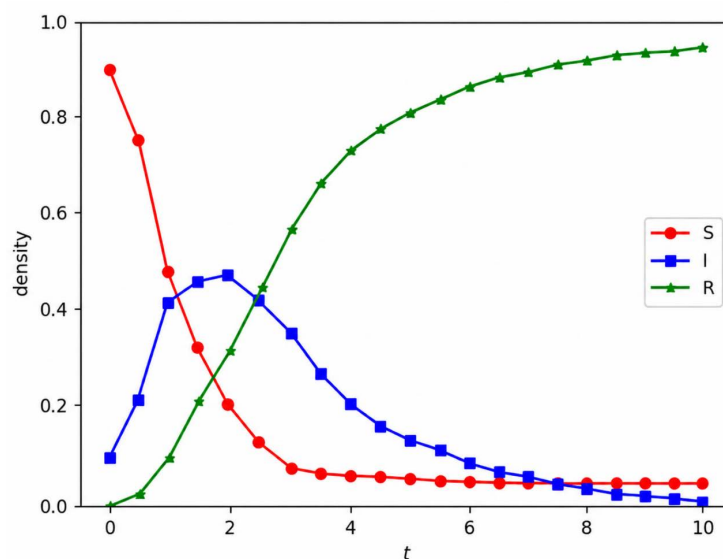


Figure 3. $P_1 = 0.5, P_2 = 0.5$

图 3. $P_1 = 0.55, P_2 = 0.5$

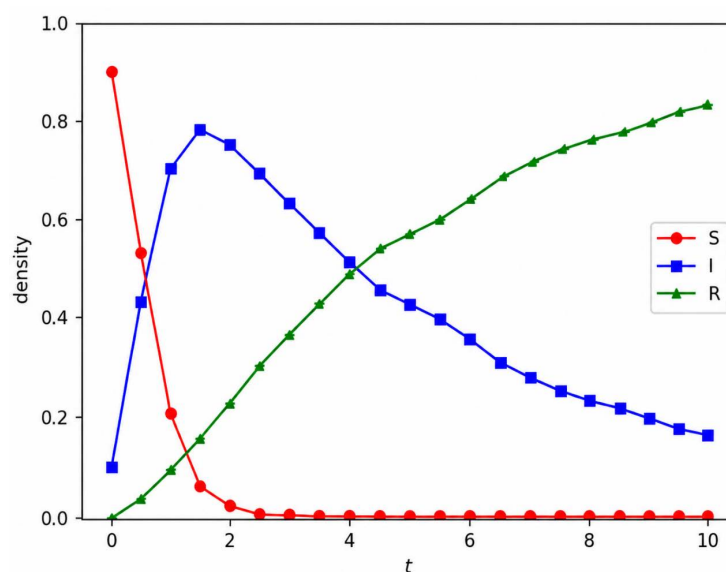


Figure 4. $P_1 = 0.8, P_2 = 0.2$

图 4. $P_1 = 0.8, P_2 = 0.22$

由以上仿真结果，当 $P_1 = 0.2, P_2 = 0.8$ ，即传播率较低，恢复率较高时，平衡后供应链内企业仍有半数未达到中断或免疫状态，受到影响的感染状态节点占比低于 20%且较快趋于稳定；当 $P_1 = 0.2, P_2 = 0.8$ ，即传播率与恢复率接近时， $t = 4$ 时供应链中全部企业均受到感染为中断状态或已完成免疫， $t = 6$ 后 80% 企业达到免疫状态；当 $P_1 = 0.8, P_2 = 0.2$ ，即传播率较高，恢复率较低时， $t = 2$ 时供应链中全部企业均受到感染为中断状态或已完成免疫， $t = 10$ 后 80% 企业达到免疫状态。比较三种参数设置，低传播率高恢复率下系统始终较为稳定，趋于平稳状态后仍有较多企业未经历中断风险；高传播率低恢复率下，系统内的企业较快完成中断，但免疫时间较长。总体而言，传播率越高、恢复率越低，供应链网络的中断风险越容易扩散，系统韧性也越弱。

3. 动态蓄意攻击下的网络韧性评价

为进一步识别农产品电商供应链中影响网络稳定性的关键节点, 本文在前述网络结构基础上开展动态蓄意攻击分析。与随机攻击不同, 蓄意攻击是依据节点的重要性指标优先移除关键节点, 从而考察网络在遭受定向冲击后的结构变化与韧性损失。本文选取度中心性、介数中心性、接近度中心性和 K 核值作为攻击依据, 并采用动态攻击方式, 即在每一轮节点移除后重新计算网络指标并调整攻击顺序, 以更贴近现实中供应链系统受冲击后的动态演化过程。结合供应链网络的现实意义, 对各项指标含义以及计算公式做出以下说明:

(1) **节点的度(DC)**表示节点的临边数量, 即供应链网络中与该企业有贸易往来的企业数量之和。

(2) **介数中心性(BC)**反映了节点的中介能力, 即货物运输速度。节点 i 的介数中心性 $c_B(v_i)$ 定义为:

$$c_B(v_i) = \frac{2B_i}{[(N-1)(N-2)]} \quad (1)$$

其中 N 表示网络中节点数量, 介数 $B_i = \frac{n_{st}^i}{g_{st}}$ 。

n_{st}^i 表示经过节点 i 的最短路径数量。

g_{st} 表示连接 s 和 t 的最短路径数量。

(3) **接近度中心性(CC)**用于衡量节点重要性, 接近度中心性可以反映该企业中断后影响供应链中其他企业的速度。节点 i 的接近中心性 CC_i 为:

$$CC_i = \frac{1}{d_i} \quad (2)$$

其中 $d_i = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N d_{ij}$, 表示节点 i 到其余各点的平均距离。

(4) **K 核(KS)**是指反复去掉度值小于 K 的节点及其连线后所剩余的子图, 该子图的节点数就是该核的大小。

本文采用的韧性评价指标主要包括最大连通子图的相对大小、剩余网络的平均距离、剩余网络的全局效率、剩余网络的平均度以及平均集聚系数[7][8]。这些指标能够从连通性、可达性、传输效率和局部聚合程度等多个维度刻画网络在遭受节点攻击后的结构恢复能力与稳定性。对各项韧性评价指标含义以及计算公式做出以下说明:

(1) 最大连通子图的相对大小(S), 描述整个网络的连通性, 对其归一化, 计算公式为:

$$S = \frac{\text{当前网络最大连通子图规模}}{\text{初始网络规模}} \quad (3)$$

(2) 网络的平均距离(L), 表示网络中所有节点对的最短路径的平均值, 描述了网络中节点的平均分离程度, 计算公式为:

$$L = \frac{1}{N^2} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N d_{ij} \quad (4)$$

其中 d_{ij} 表示两节点之间的距离。

(3) 网络的全局效率(E)

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \varepsilon_{ij} \quad (5)$$

其中 ε 表示节点距离的倒数。

(4) 网络的平均度(K)表示网络中所有节点度的平均值。

(5) 网络的平均集聚系数(C)反映网络中连接到同一节点的两个节点之间可能存在的连接, 用于衡量节点的聚集程度。计算公式为:

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)} \quad (6)$$

其中 E_i 表示网络中实际连边数, k_i 表示节点 i 的连边数。

在仿真过程中, 本文以 500 个节点的无标度网络为基础, 每轮移除 10 个节点, 即约占网络总规模的 10%, 并逐步提高移除比例, 比较不同攻击方式下网络韧性指标的变化情况, 分析按照不同节点度量指标(度值大小、介数中心性大小、接近度中心性大小、K 核大小)移除节点时韧性(最大连通子图的相对大小, 剩余网络的平均距离, 剩余网络的全局效率, 剩余网络的平均度, 剩余网络的平均集聚系数)的变化情况, 仿真结果如图 5。

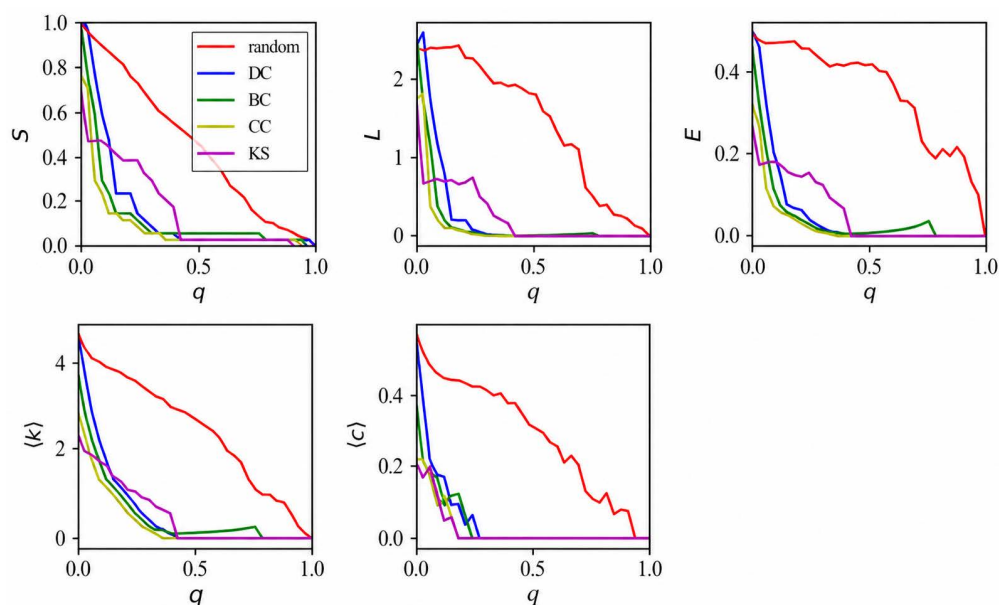


Figure 5. Changes in network resilience indicators

图 5. 网络韧性指标的变化情况

根据仿真结果, 随机攻击对网络造成的破坏程度整体较低, 而蓄意攻击能够显著削弱网络韧性。其中, 按照接近度中心性进行攻击时, 网络韧性下降最为迅速, 最大连通子图的相对规模、剩余网络的平均距离、全局效率、平均度和平均集聚系数均表现出更明显的恶化趋势。根源在于其在信息流、物流与资金流传递中的“速度枢纽”角色。接近度中心性衡量的是节点到网络中所有其他节点的平均距离, 数值越高, 意味着该节点与整个系统的信息交互和资源传递效率越高。在现实中, 这类节点通常对应价格发现中心, 如头部电商平台的竞价系统、关键信息发布平台以及核心调度枢纽, 如区域级冷链分拨中心。当此类节点发生中断时, 一方面, 其失效会迅速拉长网络中其余节点之间的信息传递路径, 导致订单响应延迟、库存调配失灵; 另一方面, 由于农产品具有鲜活易腐和强时效特征, 信息传递效率的下降会直接转化为品质损耗和履约失败, 进而通过平台评价机制和订单流迅速放大风险传导范围。

进一步结合 SIR 模型的仿真结果可以发现, 风险传播速度越快、恢复能力越弱, 系统越容易陷入中

断扩散状态；而在动态攻击情境下，接近度中心性较高的节点被移除后，网络结构更容易发生断裂，说明这类节点在风险传导与系统稳定中具有关键作用。由此可见，农产品电商供应链韧性提升的重点，不仅在于识别高连接度节点，更在于关注其在网络中的传播效率与路径控制能力，通过降低风险扩散速度、增强应急响应能力和提升替代供给水平，增强网络的整体抗冲击能力。

4. 结论与管理启示

4.1. 研究结论

本文基于复杂网络理论与 SIR 传播模型，构建了农产品电商供应链网络，并从风险传导与动态蓄意攻击两个视角对其韧性进行了系统分析。研究结果表明，农产品电商供应链在数字平台、冷链物流与多主体协同作用下，呈现出典型的无标度网络特征，即少数核心节点连接大量边缘节点，网络结构具有明显的异质性与层级性。这一结构一方面有助于提升资源配置效率和市场响应能力，另一方面也使得系统对关键节点高度依赖，从而在受到冲击时更易产生结构性脆弱。

SIR 模型仿真结果显示，风险传播过程显著受到传播率与恢复率的共同影响。当传播率较高且恢复率较低时，风险在网络中扩散速度明显加快，感染节点比例迅速上升，系统恢复周期显著延长；反之，当恢复能力增强时，网络能够在较短时间内抑制风险扩散并恢复稳定状态。这表明农产品电商供应链韧性不仅取决于风险冲击强度，还高度依赖于系统的应急响应与恢复能力。

动态蓄意攻击分析进一步表明，不同类型关键节点对网络韧性的影响存在显著差异。相较于随机攻击，基于中心性指标的蓄意攻击对网络结构的破坏更为明显，其中按照接近度中心性进行攻击时，网络连通性与效率下降最为迅速。这说明，在农产品电商供应链中，处于“路径枢纽”和“信息传导核心”的节点在维系系统稳定方面具有更为关键的作用。一旦此类节点发生失效，风险更容易沿最短路径快速扩散，并对整个网络产生放大效应。

综合来看，农产品电商供应链的风险具有显著的网络传导特征，其结构性脆弱性主要源于关键节点的集中分布与高依赖性。提升供应链韧性，需要从“单点防御”转向“网络治理”，通过优化结构、分散风险与提升恢复能力，增强系统整体抗冲击水平。

4.2. 管理启示

基于上述研究结论，本文从农产品电商供应链的实际运行出发，提出如下管理启示：

(1) 应强化关键节点的识别与分级管理。电商平台、核心冷链物流企业、区域仓配中心以及头部供应商等节点在网络中具有较高的连接度与传播能力，是影响供应链稳定性的关键主体。相关企业与管理部门应建立关键节点识别机制，对其运行状态进行重点监测，并通过提升其基础设施水平、履约能力与应急能力，降低系统性风险。

(2) 应构建基于多中心性指标的关键节点分级管理框架。研究显示，不同类型的节点对网络韧性的影响机制存在显著差异，应据此制定差异化的治理策略：① 针对高度中心性节点，应采取产能与订单监控策略，建立动态库存预警和产能冗余机制，防止单点过载引发大面积中断；② 针对高介数中心性节点，应采取路径备份与多式联运策略，设计至少两条以上替代物流通道，并在节点内部配置快速切换设备或备用运力；③ 针对高接近度中心性节点，应实施信息系统与决策机制冗余设计，包括部署分布式数据备份、建立去中心化的应急调度协议，以及赋予下游节点在极端情况下的自主决策权限。

(2) 应提升供应链的数字化协同与风险预警能力。依托电商平台与供应链管理系统，整合订单、库存、运输与销售等多维数据，构建实时监测与预警机制，实现对异常波动的快速识别与响应。通过数据驱动的方式提升信息透明度，有助于降低信息不对称带来的风险扩散效应，并增强各节点之间的协同效率。

(3) 应增强供应链的冗余性与替代能力。针对农产品供应链对单一产地、单一物流路径或单一平台依赖较强的问题,应通过多元化采购、备用供应商配置以及多路径物流布局,降低关键节点失效带来的冲击。同时,可通过建设区域性仓配网络和前置仓体系,提高系统在局部中断情况下的快速恢复能力。

(4) 应完善多主体协同治理机制。农产品电商供应链涉及农户、合作社、电商平台、物流企业及政府部门等多方主体,其稳定运行依赖于各方的协同配合。应推动信息共享与协同决策机制建设,强化平台企业与地方政府在应急调度、资源配置与风险应对中的协调作用,从而提升整个供应链系统的协同韧性。

参考文献

- [1] 洪涛,洪勇. 2025 上半年中国农产品电商发展现状及高质量发展对策研究[J]. 大数据时代, 2025(10): 66-80.
- [2] 翟雪玲,聂赞彬,炎天尧. 乡村振兴背景下我国农产品流通现状、问题与对策——基于对四类农产品全程跟踪调研数据的综合研判[J]. 农村经济, 2025(4): 121-128.
- [3] 周文超,李英毅. 乡村振兴背景下农村电商对农产品供应链整合的影响[J]. 商业经济研究, 2024(17): 91-94.
- [4] Brauer, F. (2005) The Kermack-Mckendrick Epidemic Model Revisited. *Mathematical Biosciences*, **198**, 119-131. <https://doi.org/10.1016/j.mbs.2005.07.006>
- [5] 李坚飞,唐昆,王泓略,等. 重要农产品价格异常波动扩散的调控策略优化——基于耦合网络级联失效的收储行为[J]. 系统工程理论与实践, 2025, 45(8): 2735-2752.
- [6] Barabási, A. (2009) Scale-Free Networks: A Decade and Beyond. *Science*, **325**, 412-413. <https://doi.org/10.1126/science.1173299>
- [7] 丁存振,纪祥宇. 全球粮食供应链网络格局及韧性评估[J]. 资源科学, 2025, 47(11): 2480-2492.
- [8] 颜文涛,卢江林,李子豪,等. 城市街道网络的韧性测度与空间解析——五大全球城市比较研究[J]. 国际城市规划, 2021, 36(5): 1-12, 137.