

考虑企业异质性的供应链网络中断 风险传播与韧性研究

蔡锦生, 李 真*, 孟庆峰

江苏大学管理学院, 江苏 镇江

收稿日期: 2025年3月5日; 录用日期: 2025年3月24日; 发布日期: 2025年4月18日

摘 要

现代供应链作为一个紧密耦合的复杂系统, 极易受到中断风险的影响, 构建安全稳定、富有韧性的供应链网络具有重要意义。为探究影响中断风险传播及韧性的关键因素, 本研究结合复杂网络理论与传染病模型, 综合考虑现实供应链网络的复杂性特征及企业风险能力的异质性, 构建复杂供应链网络中断风险传播模型。同时, 基于多维度韧性度量框架, 评估不同实验情景下的供应链韧性。研究发现具有无标度属性的供应链网络表现出更好的风险抵御能力, 且中断风险在“枢纽”位置扩散速度更快, 保护“枢纽”企业对韧性提升具有显著影响。

关键词

供应链韧性, 风险传播, 复杂网络, 传染病模型, 计算实验

Incorporating Firm Heterogeneity: A Study on Supply Chain Disruption Risk Propagation and Network Resilience

Jinsheng Cai, Zhen Li*, Qingfeng Meng

School of Management, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu

Received: Mar. 5th, 2025; accepted: Mar. 24th, 2025; published: Apr. 18th, 2025

Abstract

As a tightly coupled and complex system, modern supply chain is highly susceptible to interruption

*通讯作者。

文章引用: 蔡锦生, 李真, 孟庆峰. 考虑企业异质性的供应链网络中断风险传播与韧性研究[J]. 电子商务评论, 2025, 14(4): 1275-1285. DOI: 10.12677/ec.2025.1441009

risks, and building a secure, stable, and resilient supply chain network is of great significance. To explore the key factors of the disruption propagation and resilience of supply chain network, this article combines complex network theory and epidemic model, comprehensively considers the complexity characteristics of real supply chain network and the heterogeneity of enterprise risk capabilities, to construct a disruption propagation model of complex supply chain network. Meanwhile, based on a multidimensional resilience measurement framework, we evaluate the supply chain resilience under different experimental scenarios. Research has found that supply chain network with scale-free attributes exhibits better resistance ability, disruption risks spread faster in the “hub” location, and protecting “hub” enterprises has a significant impact on resilience enhancement.

Keywords

Supply Chain Resilience, Risk Transmission, Complex Network, Epidemic Model, Computational Experiment

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

在经济全球化和新一轮信息技术革命背景下,供应链企业间的合作日趋密切,进而形成了节点异构、动态交互、高度复杂的网络结构[1]。这种日益增加的复杂性给供应链带来了越来越多的不稳定性,使得供应链较易受到内外部因素的干扰。特别是,各种突发事件使得供应链频繁受到冲击。例如疫情期间,东南亚地区大量半导体封测工厂关停,导致汽车供应链出现明显的芯片短缺,全球汽车业因此减产了 1000 多万辆。在后疫情时代,全球供应链仍面临严峻挑战:极端气候、自然灾害频发、能源供应短缺增加了供应链的脆弱性,大国竞争和地缘政治因素也推动了供应链重塑,进一步加剧了供应链中断风险[2]。由此可见,研究供应链网络风险传播的机制和影响因素,提升供应链应对风险的韧性能力,显得十分必要。

供应链中断是指由各种不确定因素导致供应链某一部分或多个环节无法正常运作,其中断风险通过业务联系扩散到供应链网络中的其他企业,进而产生涟漪效应,造成更大规模的破坏,甚至导致整个供应链系统的崩溃[3]。忽视中断传播效应可能导致无法了解中断风险的全貌,低估供应链所面临的真实风险。由于病毒传播与供应链中断风险传播在形式和过程上极为相似,学者们通常采用经典传染病模型模拟供应链网络的风险传播过程[4]。如 Berger 等[5]将 SIS 模型应用于 21 个现实世界的供应链网络,探究质量问题在供应链中的传播。Wang 等[6]构建了装配式建筑供应链风险传播模型,分析了传播过程中的关键风险类型特征和初始感染节点的风险传播能力。Lou 等[7]采用 SIR 模型来模拟中断,以评估中断严重程度和节点风险能力对供应链弹性的影响。尽管传染病模型在刻画风险传播方面展现出显著优势,但现有文献往往简化了传播过程,并对企业的风险抵御能力做出同质化假设,忽略了供应链企业间能力差异的影响。

由于中断事件难以预料且难以避免,韧性成为供应链建设必须考虑的问题[8]。供应链韧性是供应链对中断风险的抵御能力以及从风险中恢复的能力。针对供应链韧性的研究,学者们大都从静态的角度出发,使用随机规划、目标规划等数理建模方法,在满足约束条件下优化供应链的韧性[9][10],或使用基于 agent 的仿真和离散事件仿真等模拟的方法,用来刻画供应链成员之间的交互作用对供应链韧性的影响[11]。在韧性度量方面,学者们提出了供应链核心能力指标、供应链绩效评价指标、网络拓扑指标等单一维度指标[12]。此外,现代供应链已不再是简单的链式结构,而是由相互作用的企业组成的复杂网络,因此迫切需要研究供应链网络的韧性[13]。大多学者使用无标度网络或小世界网络等常见的拓扑结构来

表征供应链网络[14],然而现实供应链网络可能不属于任何一种网络类型,应基于实际特征构建网络模型。

综上所述,学者们对供应链中断风险及韧性进行了大量研究,但仍存在一些值得探索和改善的空间。鉴于此,本文结合复杂网络理论和计算实验方法,综合考虑现实供应链网络结构复杂性特征和企业风险应对能力的异质性,对传统传染病模型进行改进,构建复杂供应链网络中断风险传播模型,同时提出多维度的韧性度量框架,探究中断风险传播机理以及供应链网络韧性的影响因素,以期为供应链管理者提供一定的决策参考。

2. 供应链网络中断风险传播模型与韧性度量框架

2.1. 复杂供应链网络模型构建

现代供应链是由相互作用的企业组成的复杂网络系统,网络中的节点通过物流、资金流、信息流等复杂的连接关系构成了不同的网络结构。本节根据现实供应链网络的复杂性特征,构建 SCNE 供应链网络演化模型。

2.1.1. 供应链网络演化规则

(1) 增长规则。供应链网络具有集群效应,会不断吸引新的企业加入,并与网络中的旧企业建立合作关系,使得供应链网络呈动态增长趋势。

(2) 双重择优连接规则。当新的企业进入网络后,遵循双重择优连接规则建立合作。传统的 BA 模型依据节点的度进行连接,新节点优先附着在度值较大的旧节点,即新企业更愿意与拥有较多业务关系的企业进行合作。然而,当一个新兴企业拥有高新技术或大量资源时,许多企业仍然愿意与之建立合作。故本文在依据度值择优连接的基础上引入吸引度来衡量企业的异质吸引力,使新企业获得更多的机会。

(3) 退出规则。供应链企业间存在竞争关系,且受外部环境影响,企业会选择解除彼此间的合作关系,进而退出供应网络。企业的退出不是直接脱离该网络,而是逐渐解除与其他企业的合作,故本文以边断裂的形式表示企业退出的过程。

(4) 补偿规则。企业退出网络或者企业间联系断裂后,其业务需求仍然存在,这些企业将重新在供应网络内寻找节点进行补偿,建立新的连接。

2.1.2. 供应链网络演化算法

Step1 (初始状态): $t = 0$ 时刻,网络开始演化。此刻网络内有 m_0 ($m_0 > 1$) 个节点,且节点的度之和为 km_0 。

Step2 (双重择优增长): 传统的 BA 网络中节点择优连接的概率 $P_i = k_i / \sum_j k_j$ 。本文参考 Wang 等人 [15] 的设定,假设企业的吸引度服从正态分布 $\rho(\eta) \sim N(\mu, \sigma^2)$ 。在每个时间步,一个具有吸引度 η_i 的新企业将与网络中 m ($m < m_0$) 个旧企业进行连接,连接到旧企业 i 的概率与度值 k_i 和吸引度 η_i 成正比,即双重择优概率为:

$$\Pi_i = \frac{\eta_i k_i}{\sum_j \eta_j k_j} \quad (1)$$

Step3(连边断裂): 每个时间步从网络中断开 c 条边,断开的边的两个端点均以反择优概率 Π_i^* 被选取,旧节点 i 成为断开的边的一端点的概率为:

$$\Pi_i^* = \frac{1 - \Pi_i}{N(t) - 1} \quad (2)$$

Step4 (择优补偿): 如果网络中失去 c 条边,那么将立即产生 n 条新边进行补偿,新的连接仍遵循择

优连接规则。为确保供应链网络的规模持续增长,在每个时间网络中生成新边的数量要比删除的边数要多,即 $m + n > c$ 。

Step5: 重复步骤 2~4 的演化过程,达到网络设定的规模,仿真过程结束。

2.2. 供应链网络中断风险传播模型构建

2.2.1. 模型适用性分析

传染病模型作为经典的传播动力学模型,已广泛应用于风险传播的研究中。在风险传播的过程中,存在许多与病毒传播机制相似的特征:

(1) 传播环境。病毒传播的环境通常是社交网络,其中个体作为节点,而人与人之间的社会互动构成了网络的边。类似地,供应链风险的传播同样发生在一个复杂的网络环境中。节点代表供应链中的各个企业,而网络的边则表示企业间的合作和联系。

(2) 传播过程。病毒的传播是感染者通过直接接触将病毒传播给接触者,接触者再次传播给其他未感染个体。供应链中风险的传播与此具有相似之处,受风险影响的企业有一定的概率将风险传递给与其存在直接业务联系的企业。随之,这些被感染的企业会将风险传播给相邻的企业,最终可能导致整个供应链网络的风险蔓延。

(3) 传播阶段。传染病的传播通常经历爆发期、传播期和恢复期三个阶段。相似地,供应链风险的传播过程也可以划分为三个主要阶段:风险的爆发、风险的传播及风险的恢复。

2.2.2. 风险传播模型基本假设

传染病模型在刻画供应链风险动态传播及恢复过程方面具有极大的优势,本文基于经典 SIR 模型进行改进,综合考虑供应链网络中风险传播的实际特征,其传播机制如图 1 所示,模型的基本假设如下:

H1: 节点企业分为健康(S)、感染(I)、恢复(Rc)、免疫(Rs)以及死亡(C)五种状态。一个健康的节点可以在下一个时间段内被破坏,同样,被感染的节点可以在随后的时间段内恢复到正常状态。

H2: 企业在恢复后有一定几率获得“免疫力”,对风险产生适应性。假设一家公司可以获得足够的经验和能力,以避免在公司恢复后再次受到同样的破坏性事件的影响。而未获得免疫的企业则可能再次转化为易感状态。

H3: 感染企业分为重度风险企业(Is)和轻度风险企业(Im),轻度风险企业更有可能从风险中恢复,而重度风险企业有一定几率因无法承受风险而倒闭,即死亡状态。

H4: 异质性节点风险容量。节点抗风险能力是指节点抵御中断并快速恢复的能力,即单个节点的韧性。由于节点企业的自身能力和管理水平不同,其被感染的概率和恢复的概率也各不相同。

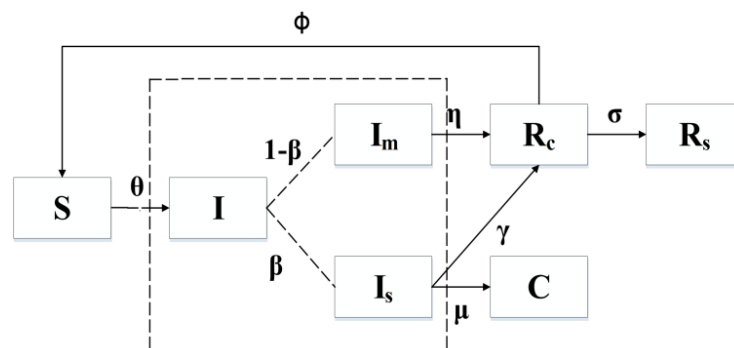


Figure 1. The mechanism of disruption propagation in supply chain network
图 1. 供应链网络中断风险传播机制

供应链网络中断风险传播模型主要参数及含义如表 1 所示:

Table 1. Definition of relevant parameters

表 1. 相关参数定义

符号	参数	定义
θ	感染率	健康企业转变为风险企业的概率
ϕ	免疫丧失率	恢复企业未能免疫风险, 转变为易感状态的概率
η	轻度恢复率	轻度风险企业脱离风险完全恢复的概率
γ	重度恢复率	重度风险企业脱离风险完全恢复的概率
μ	死亡率	重度风险企业倒闭的概率
σ	免疫率	恢复企业达到免疫状态, 免受风险影响的概率
β	重度风险率	重度风险企业在风险企业所占比例

2.2.3. 风险传播模型构建

根据以上建模思路, 假设供应链网络中共有 N 个企业, 且网络规模保持不变, 则在任意时刻的不同类型企业的总和应该等于企业的总量 N , 即满足关系式:

$$S(t) + I(t) + R_c(t) + R_s(t) + C(t) = N \quad (3)$$

相应地, 各类企业数量在供应链网络中的比例分别为 $s(t)$ 、 $i(t)$ 、 $c(t)$ 、 $r_c(t)$ 、 $r_s(t)$ 且满足:

$$s(t) + i(t) + r_c(t) + r_s(t) + c(t) = 1 \quad (4)$$

根据上文及图 1 所示的风险传染机制分析, 供应链网络风险传染的动力学特征可以用以下微分方程组来描述:

$$\begin{cases} \frac{ds(t)}{dt} = -\theta s(t)i(t) + \phi r_c(t) \\ \frac{di(t)}{dt} = \theta s(t)i(t) - \eta \beta i(t) - (\mu + \gamma)(1 - \beta)i(t) \\ \frac{dr_c(t)}{dt} = \eta \beta i(t) + \gamma(1 - \beta)i(t) - \phi r_c(t) - \sigma r_c(t) \\ \frac{dr_s(t)}{dt} = \sigma r_c(t) \\ \frac{dc(t)}{dt} = \mu(1 - \beta)i(t) \end{cases} \quad (5)$$

2.2.4. 异质性风险传播参数设定

(1) 风险感染率。供应链企业被风险感染的概率受到初始感染强度 α 、风险接触情况以及自身风险控制能力的影响。企业合作关系越多, 即度值 k_i 越大, 越容易接触到风险。同时, 我们参考了 Long [16] 等人提出的适应行为概念, 企业在风险传播过程中会形成一定适应性, 从而减轻风险的影响。适应度 δ 越高, 企业的风险控制能力就越好。但随着网络中累计感染密度不断增大, 企业的防控措施逐渐失效, 其风险控制能力也随之下降。以此得到企业风险感染率表达式:

$$\lambda = \left(\frac{k_i}{k_{\max}} \right)^\kappa \quad (6)$$

$$\tau = \frac{1}{1 + \delta * i^2(t)} \tag{7}$$

$$\theta_i = \alpha * \lambda * \tau = \alpha * \left(\frac{k_i}{k_{\max}}\right)^{\kappa} * \frac{1}{1 + \delta * i^2(t)} \tag{8}$$

式中， λ 表示风险接触系数， τ 表示企业自身的风险控制能力 $k_{\max}$ 表示最大度值， κ 为可调参数， $i(t)$ 为 t 时刻累计被感染过的节点密度。

(2) 风险恢复率。企业的恢复概率不仅与企业自身的能力有关，还受到联盟企业助力程度的影响。当企业遭受风险时，与其有合作关系的企业也易受到波及，合作企业会选择对其进行帮扶，共同应对风险 [17]。当网络中的风险程度较高时，其他企业疲于应对自身困境难以顾及伙伴企业，故助力程度会随着网络中感染企业数量的增大而减小。以此得到企业风险恢复概率表达式：

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{N_i^I(t) + N_i^C(t)}{k_i}\right) * h \tag{9}$$

$$\gamma = r_0 * \varepsilon = r_0 * \left(1 - \frac{N_i^I(t) + N_i^C(t)}{k_i}\right) * h \tag{10}$$

$$\eta = r_0 * \varepsilon * \nu = r_0 * \left(1 - \frac{N_i^I(t) + N_i^C(t)}{k_i}\right) * h * \nu \tag{11}$$

式中， h 为合作企业助力程度， r_0 为企业节点的初始恢复率， ε 为供应链企业助力系数， ν 为重度风险恢复调节参数， $N_i^I(t)$ 和 $N_i^C(t)$ 分别表示 t 时刻节点 i 邻居节点中的感染数和死亡数。

2.3. 供应链网络韧性度量指标

供应链网络韧性是供应链系统在应对风险过程中展现的多维能力，为准确刻画供应链的韧性，本文基于现有文献，将供应链的韧性能力划分为抵御能力、适应能力和恢复能力三个维度[18]。同时，本文参考 Habibi [19]等人提出的度量方法，选取合适的指标度量各个维度的韧性能力，如表 2 所示：

Table 2. The metrics of supply chain network resilience
表 2. 供应链网络韧性度量指标

韧性能力	度量指标	符号	含义
抵御能力	免疫状态企业密度	ρ^R	被风险感染后达到免疫状态的节点比例
适应能力	最大连通分量损失净值	LCC_{nw}	中断开始到中断最大程度期间最大连通分量减小值
恢复能力	恢复时间	RT	中断开始到网络完全恢复的时间

(1) 抵御能力。抵御能力为供应链网络在面对突发中断时，能够有效隔离并减缓风险传播的能力，使用免疫状态企业密度 ρ^R 来度量。免疫状态企业密度反映了供应链网络风险的扩散程度， ρ^R 值越小，累计遭受风险的企业数量越少，对风险扩散的抑制作用就越强，其表达式为：

$$\rho^R(t) = \frac{N^R(t)}{N} \tag{12}$$

式中， $N^R(t)$ 表示 t 时刻免疫状态节点数量， N 表示网络节点总数。

(2) 适应能力。适应能力体现了供应链在遭受风险时的应变能力，能够通过系列措施减少网络绩效损

失的能力，使用最大连通分量损失净值 LCC_{nw} 度量。最大连通分量损失净值是网络遭受中断后，功能完好的最大子网络的减小量，反应网络绩效的损失程度，其表达式为：

$$LCC_{nw} = \frac{1}{N}(LCC_{II} - LCC_{FI}) * 100 \tag{13}$$

式中， LCC_{II} 和 LCC_{FI} 分别表示中断开始和中断最大程度的 LCC 值。
(3) 恢复能力。恢复能力代表供应链系统从发生中断至恢复到正常状态的能力，恢复时间 RT 越短，供应链网络的恢复能力越好。

3. 系统仿真与分析

本文基于 Netlogo 平台构建供应链网络中断风险传播模型并进行仿真实验。为保证结果的稳定性和可靠性，每次实验运行 50 次。由于中断风险具有突发性和不可预测性，企业的恢复也受到一系列因素影响，缺乏有效的历史经验数据，本文对中断风险传播模型相关参数进行设定。为保证仿真结果具有一定代表性，本研究经过多次试凑实验，并参考了白世贞[4]和 Lou [7]等人的参数设定，详见表 3：

Table 3. The value of simulation parameters
表 3. 仿真参数设定

参数	N	K	α	δ	ϕ	h	μ	σ	β
取值	300	3	0.2	0.5	0.8	0.1	0.02	0.2	0.2

3.1. 不同网络结构下的供应链网络韧性分析

供应链网络的结构可以显著影响其准备，反应和从中断中恢复的能力，而现实世界的供应链网络通常类似于某种网络类型。例如，电子行业网络与小世界类型的网络相关，而汽车行业更类似于无标度类型的网络。为探究供应链网络拓扑结构对其韧性的影响，本文以 1.1 节中构建的 SCNE 模型以及 WS 小世界网络和 BA 无标度网络进行实验，网络节点数均设置为 300，度值均为 3。实验结果如图 2 所示：

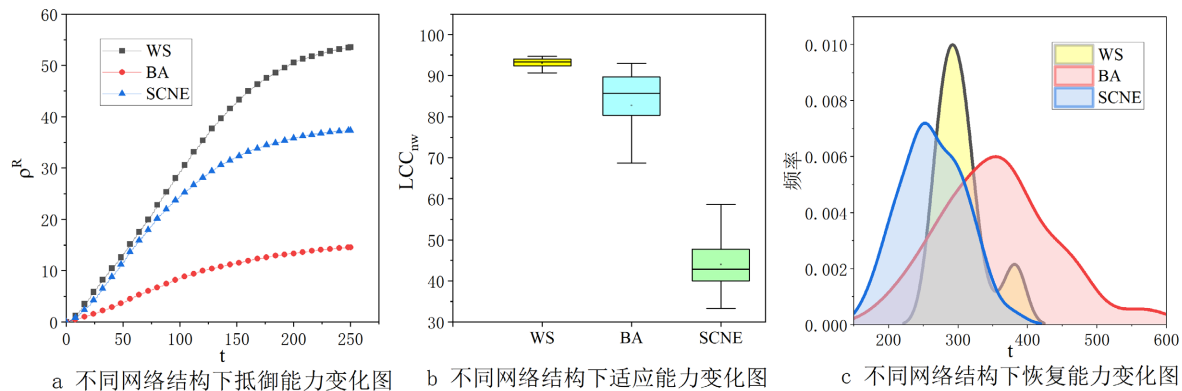


Figure 2. Supply chain network resilience in different network structure
图 2. 不同网络结构下的供应链网络韧性

根据图 2 结果可知，供应链网络的拓扑结构对其韧性有着显著影响，且不同的网络结构在各个韧性指标下的表现也有所不同。从抵御能力来看，BA 模型的效果最好，风险扩散程度最低。而 WS 模型的表现最差，风险扩散率达到了近 60%。这是由于 BA 模型存在一些度值较大的“枢纽”节点，相当于现实

供应链中的核心企业,当这些企业节点获得“免疫力”后,将不会再次感染风险,从而阻止风险在网络中进一步传播。而 WS 模型由于高聚类系数、低平均路径长度的“小世界特性”,企业节点间联系密切,风险更易在网络中传播。从适应能力来看,本文构建的 SCNE 模型性能最优,其最大连通分量损失净值 LCC_{nw} 远低于 WS 模型和 BA 模型。而 WS 模型表现最差,且网络性能下降程度最高,这表明小世界网络特性的供应链网络在遇到风险时会遭受更严重的破坏,风险会沿着紧密联系的节点迅速波及整个供应链。在恢复能力方面,从恢复时间分布图看,SCNE 模型整体上优于其他两类模型。BA 模型多次实验的随机性较大,恢复时间分布较广。这是 BA 模型中枢纽节点和边缘节点在风险传播过程中的差异造成的,当供应链网络中较多的核心企业遭受风险时,网络整体的恢复能力将显著下降。

3.2. 不同中断情景下的供应链网络韧性分析

本节模拟了初始风险在不同位置爆发时的风险传播特征和供应链网络韧性情况,共设置三种中断情景,即随机中断(初始风险在随机位置爆发)、中介中断(初始风险在供应链网络的中介位置爆发)和目标中断(初始风险在网络的核心位置爆发),实验结果如图 3 所示:

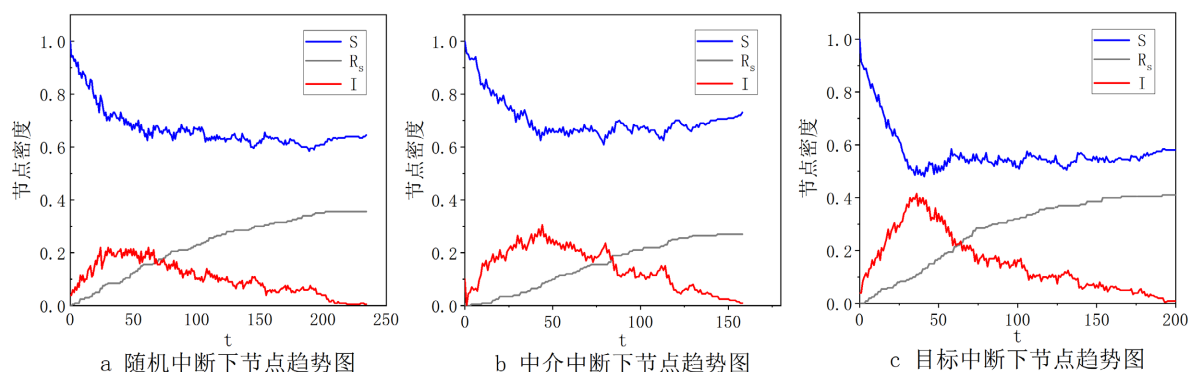


Figure 3. Risk propagation trend of supply chain network in different disruption scenarios

图 3. 不同中断情景下的供应链网络风险传播趋势图

从供应链网络风险传播趋势图可知,当初始风险在核心企业爆发时,感染状态节点密度最大,风险将沿着密切连接的合作伙伴迅速向供应链上下游扩散,其峰值超过 40%,且易感状态节点下降趋势最快。中介位置相当供应链中连接核心企业和一般企业的“中间人”,当该位置发生风险时,风险也会通过链接扩散到核心企业,其感染节点密度也相对较高。图中免疫状态节点密度反映风险扩散程度,即本文刻画抵御能力的指标。从该指标来看,目标中断情景下的供应链网络韧性最差,而中介中断情况下的抵御能力最优。这是由于中介位置率先恢复后将阻碍风险向核心企业和下游企业传播,提高整体抵御能力。

根据图 4 可知,初始风险爆发位置对供应链网络的适应能力和恢复能力影响较小。无论在何种中断情景下,风险都将随着时间扩散到整个供应链网络,其完全恢复到正常状态的时间也大致相同。但在风险爆发初期,供应链网络整体风险程度较低,感染企业容易调动网络资源,逐步恢复。故当初始风险在核心企业位置爆发时,这些企业将更快一步脱离风险达到免疫状态,从而对与其有直接合作的企业形成保护作用,阻碍风险在周边企业扩散,其适应能力略好于其他两种情况。

3.3. 不同风险适应策略下的供应链网络韧性分析

风险适应策略是指在风险传播过程中,企业通过整合内外部资源,提高自身风险适应能力,将风险造成的损失降到最低。本文设定两种适应策略,即提高企业风险适应度和供应链企业助力程度,参数均

设置为(0, 1], 以免疫状态企业密度作为韧性指标, 探究不同初始风险传播率下适应策略对供应链韧性的影响。

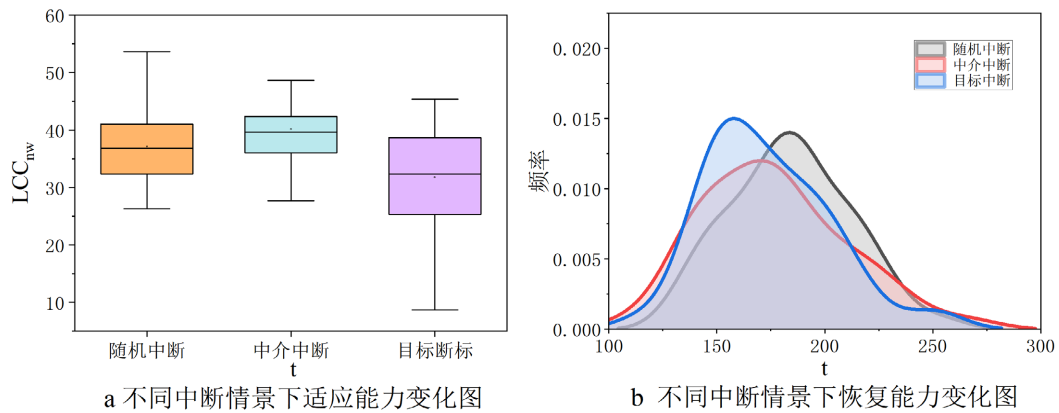


Figure 4. Supply chain network resilience in different disruption scenarios

图 4. 不同中断情景下的供应链网络韧性

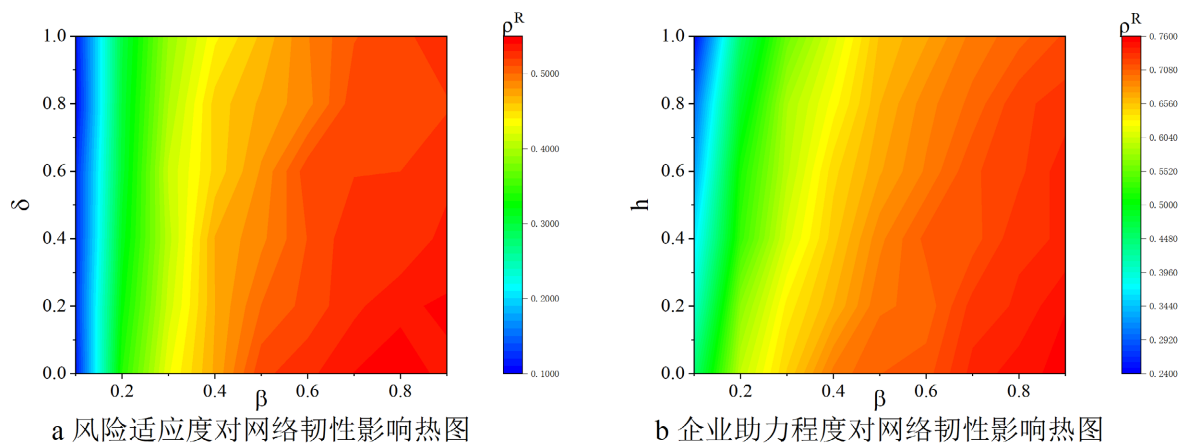


Figure 5. Supply chain network resilience under different adaptive strategies

图 5. 不同适应策略对供应链网络韧性的影响热图

根据图 5(a), 当 $\beta \in (0, 0.3]$ 时, 企业风险适应度 δ 对 ρ^R 值几乎没有影响, 此时供应链网络中感染状态企业密度较小, 即使风险适应能力较低, 企业也能较快地从风险中恢复。随着感染概率的增加, 企业风险适应能力逐步对供应链网络风险扩散产生抑制作用。当 β 达到 0.5 之后, 企业风险适应度 δ 的增大能够降低 ρ^R 值, 但较低的适应度对韧性的影响并不明显, ρ^R 值变化程度较小。这表明供应链网络处于高风险状态时, 企业的风险适应度才会对韧性产生较为明显的影响, 适应能力越强, 供应链网络的韧性越好。

根据图 5(b), 供应链企业助力程度 h 对网络韧性的影响较为显著。当 $\beta \in (0, 0.2]$ 时, 合作企业的助力效果最为明显, h 值达到 0.8 后, ρ^R 值降至 25% 左右, 供应链韧性能力得到显著提升。当 β 值超过 0.6, 供应链企业的助力效果逐渐减小。这是由于此时供应链网络内的感染状态企业密度较大, 外部企业疲于应对自身所遇到的问题和风险, 在有限的资源下难以顾及对合作企业的助力。

4. 结论

本文结合传染病模型与复杂网络理论, 综合考虑了现实供应链网络的复杂性特征以及企业风险应对

能力的异质性, 构建了供应链网络中断风险传播模型, 并基于计算实验方法进行仿真实验, 主要得出以下结论: ① 供应链网络的拓扑结构对风险传播和韧性能力具有显著影响。BA 模型由于“枢纽”企业的存在表现出较好的抵御能力, WS 模型由于节点的高聚集性, 风险传播速度较快。而 SCNE 模型具有无标度属性, 韧性能力较好。供应链管理者应充分了解供应链网络的整体结构, 加强对供应链网络中“枢纽”企业及其联盟关系的保护。② 当初始风险爆发在核心位置时, 供应链网络风险传播的速度更快, 短期内造成大量破坏。故当风险发生后, 供应链管理者应将资源优先利用于受影响的核心位置企业, 有利于提高供应链网络的长期韧性能力。③ 在风险传播过程中, 邻居企业可通过协作帮助节点企业减轻风险。供应链企业成员应当加强合作, 构建利益共享、风险共担的共同体, 以形成网络整体的韧性。本研究在一定程度上揭示了供应链网络风险传播机制及演化规律, 阐释了供应链网络不同维度韧性能力的主要特征和影响因素, 为供应链管理者制定有效的风险应对策略, 构建安全稳定、富有韧性的供应链网络提供一定的决策参考。

基金项目

国家自然科学基金项目(72071096, 71971100); 江苏高校哲学社会科学研究重大项目(2024SJZD048); 江苏高校“青蓝工程”项目。

参考文献

- [1] Fu, X., Xu, X. and Li, W. (2024) Cascading Failure Resilience Analysis and Recovery of Automotive Manufacturing Supply Chain Networks Considering Enterprise Roles. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **634**, Article ID: 129478. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2023.129478>
- [2] 洪流, 赵晓波, 汪寿阳, 等. 供应链韧性与安全中的关键科学问题[J]. 中国科学基金, 2023, 37(3): 418-428.
- [3] Li, Y., Zobel, C.W., Seref, O. and Chatfield, D. (2020) Network Characteristics and Supply Chain Resilience under Conditions of Risk Propagation. *International Journal of Production Economics*, **223**, Article ID: 107529. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107529>
- [4] 白世贞, 吴文姬, 鄢章华, 等. 基于马尔可夫与传染病模型的供应链网络中断风险传播研究[J]. 管理工程学报, 2023, 37(4): 206-221.
- [5] Berger, N., Schulze-Schwering, S., Long, E. and Spinler, S. (2023) Risk Management of Supply Chain Disruptions: An Epidemic Modeling Approach. *European Journal of Operational Research*, **304**, 1036-1051. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.05.018>
- [6] Wang, L., Cheng, Y. and Zhang, Y. (2023) Exploring the Risk Propagation Mechanisms of Supply Chain for Prefabricated Building Projects. *Journal of Building Engineering*, **74**, Article ID: 106771. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106771>
- [7] Lou, G., Wang, H., Tu, X., Lai, Z., Ma, H. and Ying, S. (2025) Resilience Assessment of the Electric Vehicle Lithium-Ion Battery Supply Chain under Supply Shortages of Upstream Mineral Enterprises. *Resources, Conservation and Recycling*, **215**, Article ID: 108161. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108161>
- [8] 吕文栋, 赵杨, 韦远. 论弹性风险管理——应对不确定情境的组织管理技术[J]. 管理世界, 2019, 35(9): 116-132.
- [9] Kumar, D., Soni, G., Mangla, S.K., Liao, J., Rathore, A.P.S. and Kazancoglu, Y. (2024) Integrating Resilience and Reliability in Semiconductor Supply Chains during Disruptions. *International Journal of Production Economics*, **276**, Article ID: 109376. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.109376>
- [10] 李珠月, 赵培忻. 供应及需求中断下农产品批发商弹性供应链设计研究[J]. 系统工程理论与实践, 2024, 44(2): 595-611.
- [11] Ren, H., Wang, C., Mu, D., Lim, M.K., Yue, X., Hu, X., et al. (2024) Resilience Strategies in an Intertwined Supply Network: Mitigating the Vulnerability under Disruption Ripple Effects. *International Journal of Production Economics*, **278**, Article ID: 109419. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.109419>
- [12] Huang, Z., Zhou, Y., Lin, Y. and Zhao, Y. (2024) Resilience Evaluation and Enhancing for China's Electric Vehicle Supply Chain in the Presence of Attacks: A Complex Network Analysis Approach. *Computers & Industrial Engineering*, **195**, Article ID: 110416. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110416>
- [13] 崔俊英, 徐舒琪, 那旭, 等. 基于复杂网络理论的供应链研究[J]. 物理学报, 2024, 73(19): 161-183.

-
- [14] Wiedmer, R. and Griffis, S.E. (2021) Structural Characteristics of Complex Supply Chain Networks. *Journal of Business Logistics*, **42**, 264-290. <https://doi.org/10.1111/jbl.12283>
 - [15] Wang, J., Zhou, H., Sun, X. and Yuan, Y. (2023) A Novel Supply Chain Network Evolving Model under Random and Targeted Disruptions. *Chaos, Solitons & Fractals*, **170**, Article ID: 113371. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2023.113371>
 - [16] Long, E.F., Nohdurft, E. and Spinler, S. (2018) Spatial Resource Allocation for Emerging Epidemics: A Comparison of Greedy, Myopic, and Dynamic Policies. *Manufacturing & Service Operations Management*, **20**, 181-198. <https://doi.org/10.1287/msom.2017.0681>
 - [17] Bruckler, M., Wietschel, L., Messmann, L., Thorenz, A. and Tuma, A. (2024) Review of Metrics to Assess Resilience Capacities and Actions for Supply Chain Resilience. *Computers & Industrial Engineering*, **192**, Article ID: 110176. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110176>
 - [18] 朱永光, 张伍丰, 王迪, 等. 中国铜资源产业链供应链韧性评价[J]. 资源科学, 2023, 45(9): 1761-1777.
 - [19] Habibi, F., Chakraborty, R.K. and Abbasi, A. (2023) Evaluating Supply Chain Network Resilience Considering Disruption Propagation. *Computers & Industrial Engineering*, **183**, Article ID: 109531. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109531>