考虑诱导机制的供应链双风险耦合传播研究

祁 宁，朱云飞，荆 浩

（沈阳航空航天大学经济与管理学院，沈阳 110136）

摘要： 在复杂外部环境冲击下，供应链风险往往呈现多源并发、相互诱导和网络扩散特征。针对单一风险传播研究难以刻画复合风险演化过程的问题，从复杂网络视角出发，结合风险传染性与恢复率两个维度，对供应链中的产品风险、人员风险、经济风险和环境风险进行分类，并在 SIS(susceptible-infected-susceptible)模型基础上构建考虑诱导机制的双风险耦合传播模型。通过数值仿真分析不同风险参数组合、诱导系数及初始感染源选择对风险传播的影响。结果表明：诱导机制会显著加快风险传播并扩大双风险感染范围；恢复率对风险传播规模的影响强于感染率；高节点度和高介数中心度企业更易成为风险扩散的关节点。可为供应链关键节点识别、风险耦合防控及韧性提升提供理论参考。

关键词： 供应链风险；风险耦合；风险传播；诱导机制；复杂网络

中图分类号： F274 **文献标志码：** A **文章编号：** 1671－1807(2026)14－0154－09

党的二十届三中全会提出，健全提升产业链供应链韧性和安全水平制度，建立产业链供应链安全风险评估和应对机制。随着全球分工不断深化，供应链已由传统链式结构演化为由多主体、多层级和多关系构成的复杂网络，其稳定性和安全性直接关系到产业持续运行和企业竞争能力。石建勋和卢丹宁[1]指出，提升产业链供应链韧性与安全水平，是建设现代化产业体系、应对外部环境冲击和构建新发展格局的重要举措。在此背景下，识别和控制供应链中的风险传播过程，已成为供应链管理研究的重要议题。

近年来，新冠肺炎疫情、苏伊士运河堵塞、地缘政治冲突及技术封锁等事件频繁发生，使供应链面临更强的不确定性和更复杂的风险冲击。风险往往不再局限于单一节点或单一环节，而沿着企业间的采购、生产、物流和信息联系迅速扩散，并可能进一步演化为系统性风险。尤其是在芯片等关键产业链中，上下游依赖程度高、技术门槛高、替代性弱，风险更容易在网络中传导和放大。因此，从网络传播视角研究供应链风险扩散规律，具有较强的现实意义。

已有研究表明，现代供应链具有典型的复杂网络特征。Wagner 和 Neshat[2]从图论视角分析供应链脆弱性，认为节点关系结构显著影响系统对冲击的敏感性。Kim 等[3]进一步指出，供应网络结构与中断传播及恢复韧性密切相关。基于此，复杂网络理论逐渐成为研究供应链风险传播的重要工具。与此同时，传染病模型由于能够较好地刻画风险在节点间的动态扩散过程，也被广泛应用于供应链风险研究。杨康和张仲义[4]、刘潇琦[5]较早将复杂网络与 SIS 模型引入供应链风险传播分析，揭示了网络结构和参数变化对风险扩散速度与范围的影响。此后，刘慧等[6]将企业风险感知纳入传播模型，姜林和梁竞心[7]将政府干预引入供应链风险传播研究，进一步增强了模型对现实场景的解释能力。

尽管如此，现有研究大多仍以单一风险为分析对象，主要关注中断风险、信用风险、研发风险等在网络中的传播过程，而对多风险并存条件下的交互传播关注不足。事实上，现实中的供应链风险往往具有明显的耦合特征。一类风险的发生可能诱发另一类风险，并在相互强化中扩大影响。例如，关键技术人员流失会削弱研发能力并诱发产品风险，产品问题又可能导致订单减少和收益下滑，进一步引发经济风险。任秀梅和郑贵廷[8]指出，风险耦合的核心在于不同风险因素之间的相互依赖和反馈作用。王天宇等[9]对芯片供应链的研究也表明，上游技术缺失风险与中游相关风险之间存在显著关联。Wang 等[10]关于复杂网络中耦合传播的研究进

收稿日期： 2026-03-31

基金项目： 辽宁省科学技术计划项目(2025JH4/10100039)

作者简介： 祁宁(1981—)，女，辽宁沈阳人，博士，副教授，研究方向为复杂网络、供应链管理；朱云飞(2000—)，男，安徽合肥人，硕士研究生，研究方向为复杂网络供应链、供应链风险传播；通信作者荆浩(1978—)，男，辽宁辽阳人，博士，教授，研究方向为企业战略、供应链管理、数字化转型。

一步说明,不同传播过程之间的相互作用会显著改变系统的传播强度和扩散边界。

基于此,本文从复杂网络视角出发,借鉴易感者-感染者-易感者模型(susceptible-infected-susceptible model,SIS 模型)思想,结合风险传染性与恢复率两个维度,对供应链中的产品风险、人员风险、经济风险和环境风险进行分类,并引入诱导机制刻画不同风险之间的内部耦合关系,构建双风险耦合传播模型。在此基础上,通过数值仿真分析不同风险参数组合、诱导系数及初始感染源选择对风险传播过程的影响,从而揭示供应链双风险耦合传播的演化特征,并为关键节点识别和风险防控提供参考。

1　问题描述与建模

1.1　问题描述

芯片供应链是典型的高技术、高关联和高不确定性供应链,其运行涉及原材料供应、设备支持、芯片设计、晶圆制造、封装测试及终端应用等多个环节,各环节联系紧密,风险易在上下游之间传导扩散。近年来,受国际技术封锁、关键设备受限、人才流动加剧及市场需求波动等因素影响,中国芯片供应链面临较强的复合风险冲击。不同类型风险并非孤立存在,而是在企业内部资源配置和供应链外部业务关联的共同作用下相互影响、耦合演化。

从经济学机理看,供应链风险的相互诱导主要源于资源约束、跨环节依赖和收益反馈。首先,企业在研发、生产、质量控制和人才保障等方面的资源有限,一类风险发生后往往会挤占其他环节的投入,从而诱发新的风险。例如,产品风险会增加返工、召回和客户补偿成本,压缩研发和人才投入,进而加剧人员风险。其次,芯片供应链具有较强的技术关联和流程依赖,关键人才流失会削弱设计开发、工艺调试和质量控制能力,并进一步演化为产品风险;反过来,产品缺陷和交付异常也会通过经营压力上升和组织负荷加重反向诱发人员风险。最后,风险冲击还会通过利润下降、声誉受损和市场预期恶化形成反馈闭环,使不同风险在企业内部持续强化并向供应链网络扩散。

由此可见,芯片供应链中的风险传播不仅具有网络化特征,也具有明显的耦合特征。基于此,本文从复杂网络视角出发,将供应链中的企业抽象为网络节点,将企业之间的业务联系抽象为网络连边,并在 SIS 传播模型基础上引入双风险状态划分和风险诱导机制,以刻画风险在芯片供应链网络中的传播与演化过程。

1.2　供应链网络构建

已有研究表明,供应链网络通常具有无标度特征,即少数核心企业与大量普通企业共同构成网络结构。为刻画这一特征,采用 BA(Barabási-Albert)生长模型构建供应链网络。设初始网络包含 $n_0 = 50$ 个节点企业,且节点之间相互连接形成初始网络;随后,网络每经过一个演化步长增加一个新节点,并与原网络中的 m 个节点建立连接,其中 $m \leqslant n_0$。

新节点与已有节点企业 i 的连接遵循择优连接原则,其连接概率为

$$\pi_i = \frac{k_i}{\sum_j k_j} \tag{1}$$

式中:k_i 为节点企业 i 的度。随着网络不断演化,最终形成规模为 $N = 300$ 的供应链网络,并保持网络总规模不再变化。该网络能够较好地反映现实供应链中“少数核心企业连接大量上下游企业”的结构特征,为后续风险传播分析提供网络基础。

1.3　供应链风险传播模型的构建

在供应链风险传播过程中,不同类型风险之间往往并非相互独立,而是存在显著的诱导与耦合关系。基于已有研究,并结合芯片供应链运行特征,以产品风险 r_1 和人员风险 r_2 作为两类代表性风险,构建供应链网络双风险耦合传播模型。

设供应链网络包含 N 个节点企业,网络的邻接矩阵记为 $\boldsymbol{A} = (a_{ij})_{N\times N}$。若企业 i 与企业 j 之间存在业务联系,则 $a_{ij} = 1$;否则 $a_{ij} = 0$。由于本文构建的是无向供应链网络,因此有 $a_{ij} = a_{ji}$,且 $a_{ii} = 0$。

设产品风险 r_1 在企业间的传播概率为 β_1,恢复概率为 μ_1;人员风险 r_2 在企业间的传播概率为 β_2,恢复概率为 μ_2。同时,考虑两类风险在同一企业内部的诱导效应。引入参数 γ 刻画风险之间的协同溢出强度,即企业已受到一类风险冲击后,另一类风险被进一步触发的可能性。γ 越大,说明企业内部不同风险之间的联动越强,一类风险越容易通过资源挤占、能力削弱和流程依赖诱发另一类风险;γ 越小,则说明企业风险隔离能力较强,风险间传导较弱。具体而言,当企业 i 感染产品风险 r_1 时,可能因质量补救成本上升、交付压力加大和利润压缩,挤占研发与人才保障投入,从而以概率 γ 诱导出人员风险 r_2;当企业 i 感染人员风险 r_2 时,可能因关键人员流失、知识传承中断和协同效率下降,削弱产品研发与质量控制能力,从而以概率 γ 诱导出产品风险 r_1。

为刻画节点企业的风险状态,采用二维状态变量 (x,y) 表示企业是否感染两类风险。其中,$x=1$

表示企业感染产品风险 r_1，$x=0$ 表示未感染产品风险；$y=1$ 表示企业感染人员风险 r_2，$y=0$ 表示未感染人员风险。因此，任一节点企业在任意时刻仅可能处于以下四种状态之一：

$S=(0,0)$：未感染任何风险；

$I_1=(1,0)$：仅感染产品风险 r_1；

$I_2=(0,1)$：仅感染人员风险 r_2；

$I_{12}=(1,1)$：同时感染产品风险 r_1 和人员风险 r_2。

传播流程如图 1 所示。

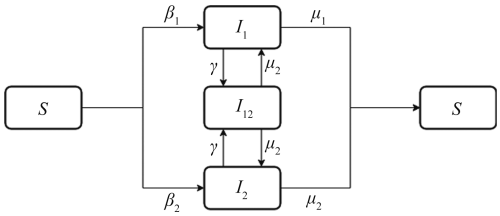


图 1　双风险诱导下供应链网络风险传播模型

在风险传播过程中，将 $p_i^{(x,y)}(t)$ 记为时刻 t 节点企业 i 处于状态 (x,y) 的概率，则有

$$p_i^{(0,0)}(t)+p_i^{(1,0)}(t)+p_i^{(0,1)}(t)+p_i^{(1,1)}(t)=1 \quad (2)$$

在风险传播过程中，假设节点企业在每个离散时间步内至多发生一次状态变化。因此，状态(0,0)不会在一个时间步内直接转化为(1,1)，状态(1,0)与状态(0,1)之间也不会直接互转，处于(1,1)状态的节点同样不会在单个时间步内直接恢复为(0,0)。这一设定是对现实风险演化过程的简化，之所以采用该假设，一方面是因为若允许同一时间步内发生多次状态变化，将显著增加转移路径数量，降低模型的可解性与结果解释性；另一方面，本文将单个时间步视为较短的风险观察窗口，在这一尺度下，企业状态可近似表现为一次主导变化。同时，不同风险的治理路径和恢复周期通常并不一致，在双风险状态下企业往往先缓解一种风险，再逐步修复另一种风险，因此该设定也体现了企业风险修复的阶段性特征。

在此基础上，节点企业的状态转移规则如下。

$S\to I_1$：处于状态(0,0)的节点企业，在与其相连的感染产品风险节点(1,0)或(1,1)的影响下，以概率 β_1 感染风险 r_1；

$S\to I_2$：处于状态(0,0)的节点企业，在与其相连的感染人员风险节点(0,1)或(1,1)的影响下，以概率 β_2 感染风险 r_2；

$I_1\to I_{12}$：处于状态(1,0)的节点企业，在相邻节点传播风险 r_2 的作用下，或在自身已感染风险 r_1 的基础上经内部诱导，以概率 γ 进一步感染风险 r_2；

$I_2\to I_{12}$：处于状态(0,1)的节点企业，在相邻节点传播风险 r_1 的作用下，或在自身已感染风险 r_2 的基础上经内部诱导，以概率 γ 进一步感染风险 r_1；

$I_1\to S$、$I_2\to S$：单一风险节点分别以恢复概率 μ_1、μ_2 恢复为正常状态；

$I_{12}\to I_1$、$I_{12}\to I_2$：双风险节点在单个时间步内至多恢复一种风险，因此分别以概率 μ_2、μ_1 转化为单一风险状态；

$I_{12}\to I_{12}$：若双风险节点在当前时间步内两类风险均未恢复，则保持双风险状态。

为便于表述，定义节点企业 i 在时刻 t 不受邻居传播而感染风险 r_1 和不受邻居传播而感染风险 r_2 的概率分别为

$$q_i^1(t)=\prod_{j=1}^{N}\{1-\beta_1 a_{ij}[p_j^{(1,0)}(t)+p_j^{(1,1)}(t)]\} \quad (3)$$

$$q_i^2(t)=\prod_{j=1}^{N}\{1-\beta_2 a_{ij}[p_j^{(0,1)}(t)+p_j^{(1,1)}(t)]\} \quad (4)$$

式中：$q_i^1(t)$ 为节点 i 在时刻 t 的一个传播步内未从其相邻节点获得风险 r_1 的概率；$q_i^2(t)$ 为节点 i 未从其相邻节点获得风险 r_2 的概率。

进一步地，对于已感染单一风险的节点，还需考虑内部诱导机制。

对于处于 $I_1=(1,0)$ 状态的节点，其在时刻 t 的一个传播步内既未被邻居传播感染风险 r_2，也未被内部诱导产生风险 r_2 的概率为

$$\tilde{q}_i^2(t)=(1-\gamma)\,q_i^2(t) \quad (5)$$

对于处于 $I_2=(0,1)$ 状态的节点，其在时刻 t 的一个传播步内既未被邻居传播感染风险 r_1，也未被内部诱导产生风险 r_1 的概率为

$$\tilde{q}_i^1(t)=(1-\gamma)\,q_i^1(t) \quad (6)$$

基于上述状态转移规则，可采用离散时间马尔科夫链刻画网络中节点企业的状态演化过程。各状态概率满足如下转移方程。

$$p_i^{(0,0)}(t+1)=p_i^{(0,0)}(t)\,q_i^1(t)\,q_i^2(t)+p_i^{(1,0)}(t)\,\mu_1+p_i^{(0,1)}(t) \quad (7)$$

$$p_i^{(1,0)}(t+1)=p_i^{(0,0)}(t)[1-q_i^1(t)]\,q_i^2(t)+p_i^{(1,0)}(t)(1-\mu_1)\tilde{q}_i^2(t)+p_i^{(1,1)}(t)\,\mu_2 \quad (8)$$

$$p_i^{(0,1)}(t+1)=p_i^{(0,0)}(t)[1-q_i^2(t)]\,q_i^1(t)+p_i^{(0,1)}(t)(1-\mu_2)\tilde{q}_i^1(t)+p_i^{(1,1)}(t)\,\mu_1 \quad (9)$$

$$p_i^{(1,1)}(t+1)=p_i^{(1,1)}(t)(1-\mu_1-\mu_2)+p_i^{(1,0)}(t)\times(1-\mu_1)[1-q_i^{*}(t)]+p_i^{(0,1)}(t)\times(1-\mu_2)[1-q_i^{\dagger}(t)] \quad (10)$$

式(7)～式(10)共同刻画了双风险在供应链网络中的传播、恢复及诱导演化过程。其中,式(7)描述正常节点保持正常状态或由单一风险恢复为正常状态的情形;式(8)与式(9)分别描述节点仅感染产品风险或仅感染人员风险的情形;式(10)描述双风险共感染状态的形成与维持机制。

1.4　模型求解

当双风险在供应链网络中的传播达到稳定状态时,各节点企业处于不同状态的概率将不再随时间变化。记稳态下节点企业 i 处于四种状态的概率分别为 $p_i^{(0,0)}$、$p_i^{(1,0)}$、$p_i^{(0,1)}$、$p_i^{(1,1)}$,则有

$$p_i^{(0,0)}(t+1)=p_i^{(0,0)}(t)=p_i^{(0,0)} \quad (11)$$

$$p_i^{(1,0)}(t+1)=p_i^{(1,0)}(t)=p_i^{(1,0)} \quad (12)$$

$$p_i^{(0,1)}(t+1)=p_i^{(0,1)}(t)=p_i^{(0,1)} \quad (13)$$

$$p_i^{(1,1)}(t+1)=p_i^{(1,1)}(t)=p_i^{(1,1)} \quad (14)$$

且任意节点在稳态下的四种状态概率之和仍满足归一化条件。

$$p_i^{(0,0)}+p_i^{(1,0)}+p_i^{(0,1)}+p_i^{(1,1)}=1 \quad (15)$$

相应地,稳态下节点 i 不受邻居传播感染的两类风险概率分别为

$$q_i^1=\prod_{j=1}^{N}[1-\beta_1 a_{ij}(p_j^{(1,0)}+p_j^{(1,1)})] \quad (16)$$

$$q_i^2=\prod_{j=1}^{N}[1-\beta_2 a_{ij}(p_j^{(0,1)}+p_j^{(1,1)})] \quad (17)$$

同时,考虑诱导机制后,单一风险节点在稳态下不获得另一类风险的概率分别为

$$\tilde{q}_i^1=(1-\gamma)q_i^1 \quad (18)$$

$$\tilde{q}_i^2=(1-\gamma)q_i^2 \quad (19)$$

将式(11)～式(19)代入到式(7)～式(10),可得稳态下各节点企业状态概率满足:

$$p_i^{(0,0)}=p_i^{(0,0)}q_i^1q_i^2+p_i^{(1,0)}\mu_1+p_i^{(0,1)}\mu_2 \quad (20)$$

$$p_i^{(1,0)}=p_i^{(0,0)}(1-q_i^1)q_i^2+p_i^{(1,0)}(1-\mu_1)\tilde{q}_i^2+p_i^{(1,1)}\mu_2 \quad (21)$$

$$p_i^{(0,1)}=p_i^{(0,0)}(1-q_i^2)q_i^1+p_i^{(0,1)}(1-\mu_2)\tilde{q}_i^1+p_i^{(1,1)}\mu_1 \quad (22)$$

$$p_i^{(1,1)}=p_i^{(1,1)}(1-\mu_1-\mu_2)+p_i^{(1,0)}(1-\mu_1)(1-\tilde{q}_i^2)+p_i^{(0,1)}(1-\mu_2)(1-\tilde{q}_i^1) \quad (23)$$

式(11)～式(23)构成双风险耦合传播模型的稳态方程组。由于其具有明显的非线性特征,接下来采用数值仿真的方式求解节点状态比例的动态演化过程,并据此分析不同风险参数组合、诱导系数及初始感染源选择对供应链风险传播的影响。

2　仿真分析

2.1　风险分类

在供应链风险识别研究中,依据业务流程可将风险概括为经济风险、产品风险、人员风险和环境风险四类。已有研究多从发生频率或影响程度等角度对风险进行划分,主要从传播动力学角度出发,结合风险的传染性与恢复率两个维度,对上述风险进行进一步分类,如图 2 所示。

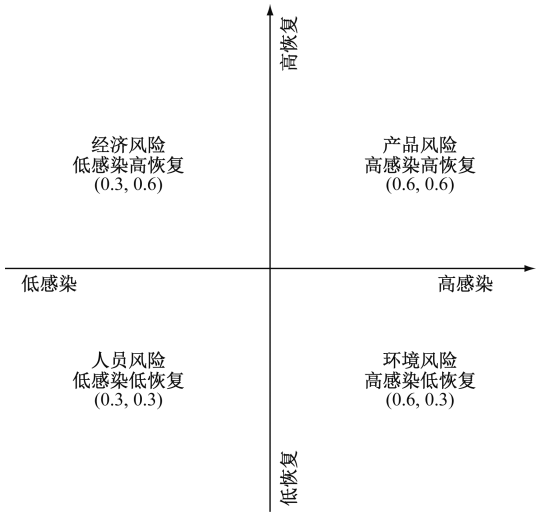


图 2　供应链风险分类

其中,环境风险可视为高传染、低恢复类型风险。这类风险一旦发生,通常会在较短时间内影响供应链多个环节,并由于修复成本高、恢复周期长而造成持续冲击。产品风险属于高传染、高恢复类型风险,其传播范围通常较广,但企业可通过质量改进、召回或工艺调整等方式相对较快地实现恢复。人员风险可归为低传染、低恢复类型风险,其影响往往集中于特定岗位或关键环节,传播速度相对较慢,但恢复通常依赖人才补充、技能培养和组织调整,因此恢复周期较长。经济风险则表现为低传染、高恢复,其传播性相对有限,但在市场环境改善、政策支持或经营调整下,恢复速度通常较快。

上述分类并不意味着各类风险彼此独立。相反,不同风险之间往往存在显著的耦合关系。例如,2025 年 9 月,迫于美国施压及本土技术保护,荷兰政府依据相关法案干预安世半导体(全球车规级芯片龙头,2019 年被中国闻泰科技全资收购),罢免全部中方管理层、冻结资产并切断荷兰总部向中国东莞封测厂(全球 70%封测产能)的晶圆供应,且未及时制定应急与沟通方案。初始人员风险快速传

导，直接引发产品风险，全球车规级芯片断供、价格暴涨；进而延伸为经济风险，欧洲车企减产、安世及闻泰科技巨额损失，推高全球通胀；最终次生环境风险，导致物料报废、能耗与碳排放激增。各风险形成闭环传导，初始单一风险因延误处置升级为全球半导体供应链系统性危机，印证了供应链风险的传导性与单一依赖模式的脆弱性。由此可见，供应链风险传播往往伴随着风险之间的相互诱导和叠加放大，因此有必要从双风险耦合视角分析其传播规律。

2.2　不同风险参数组合下的双风险诱导传播分析

为考查不同类型风险组合下双风险耦合传播的演化特征，将产品风险、环境风险、人员风险和经济风险两两组合，共形成 6 种不同的双风险情形。各类风险参数设定为产品风险（β,μ）=（0.6，0.6）、环境风险（0.6，0.3）、人员风险（0.3，0.3），经济风险（0.3，0.6），诱导系数取 $\gamma=0.3$。依据前文 BA 模型生成规模为 $N=300$ 的无标度供应链网络，并随机选取网络中 5% 的节点作为初始感染源，其中包含（1，0）、（0，1）和（1，1）三类感染状态节点。仿真结果如图 3 所示。

不同风险组合下的双风险传播均具有明显阶段性，可分为初始触发期、耦合演化期和稳态形成期。初始阶段，正常状态（0，0）节点迅速减少，单风险状态（1，0）和（0，1）节点增加，表明风险借助网络连接迅速由局部扩散至整体。随后进入耦合演化期，单风险节点既可能恢复正常，也可能在传播与诱导作用下转化为双风险状态（1，1），使双风险节点持续上升，且在低恢复率风险组合中，这一趋势更显著。稳态阶段，各类节点比例趋于稳定；若两类风险恢复率均较低，双风险节点占比更高、风险滞留更明显；若包含高恢复率风险，正常节点占比相对较高。

2.3　诱导系数对双风险传播的影响

为进一步分析诱导机制在双风险传播中的作

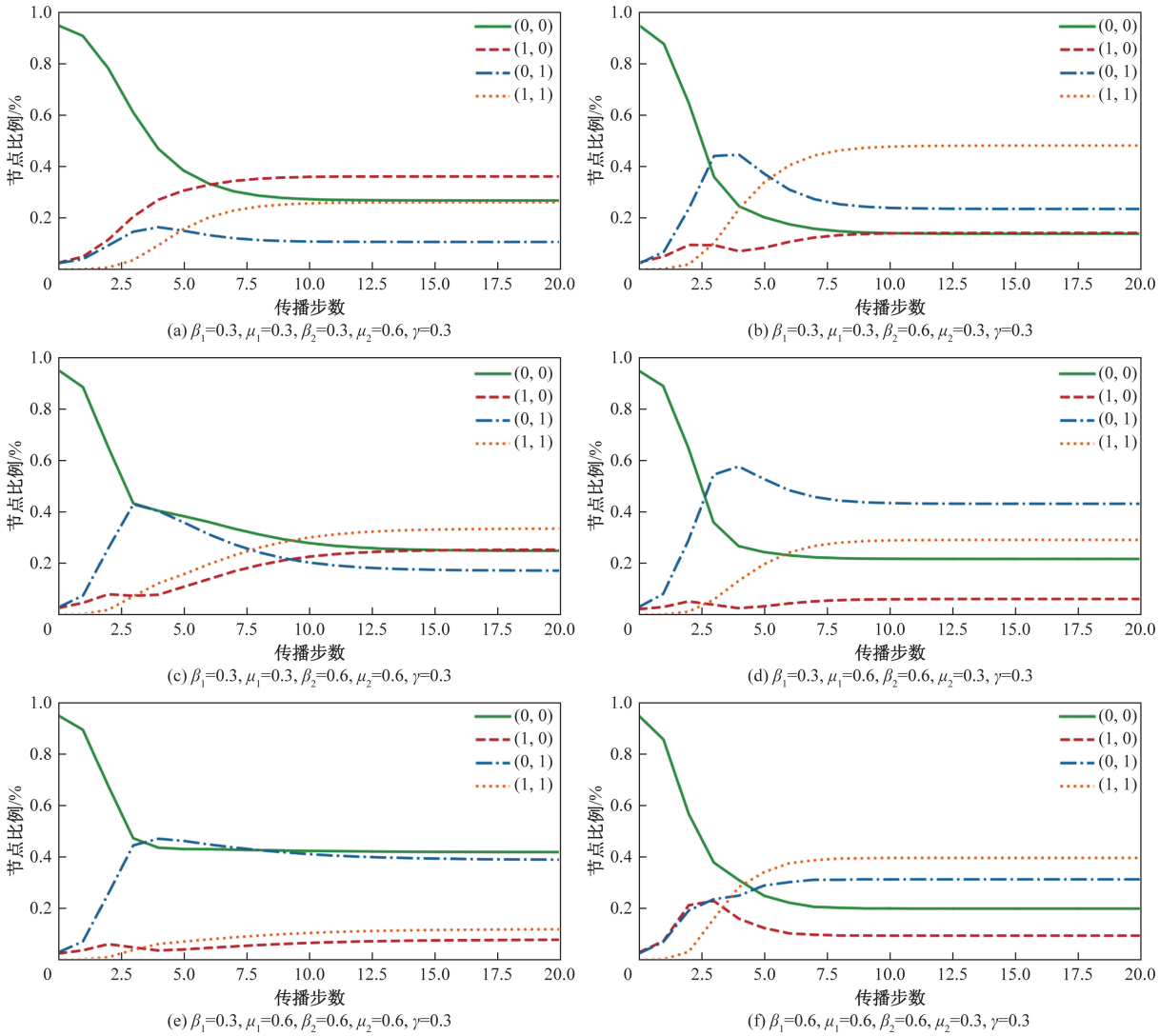


图 3　不同风险组合下感染状态节点企业比例变化

用,对不同风险组合下诱导系数 γ 的变化进行仿真分析。设 $\gamma \in [0,1]$,每隔 0.1 取一个观测值,其余参数保持不变,得到不同组合下节点状态比例的变化热图如图 4 所示。

仿真结果表明,随着诱导系数提高,正常状态(0,0)节点比例持续下降,双风险状态(1,1)节点比例明显上升,说明风险间诱导机制会促进单风险节点向双风险节点转化,从而扩大传播范围并强化风

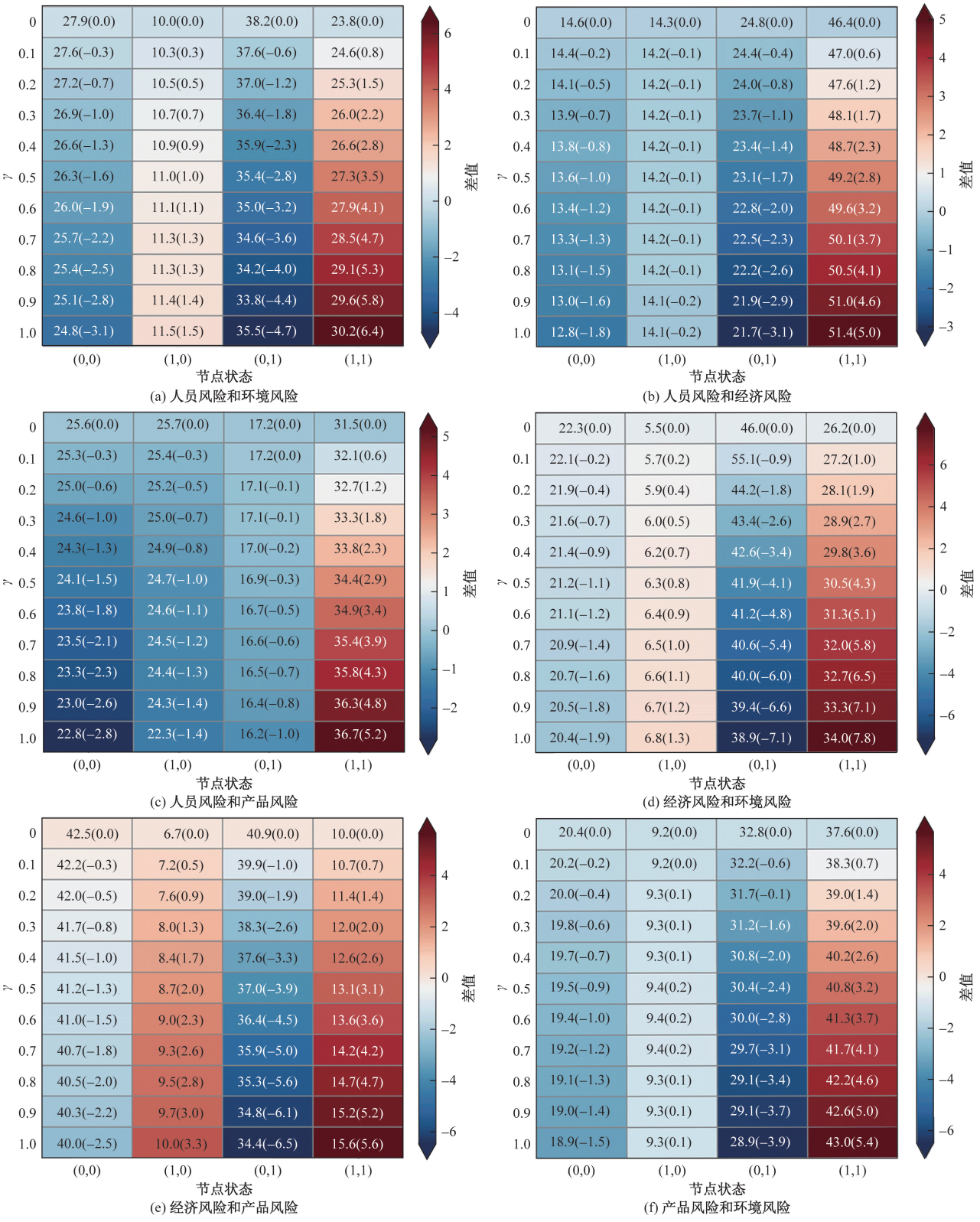


图 4　双风险耦合传播热图

险累积效应。相比之下，(1,0)和(0,1)状态节点比例变化并不一致，而是受风险组合特征和状态转化路径共同影响，呈现一定波动。

进一步比较不同风险组合可发现，当组合中包含环境风险时，诱导系数增加引起的双风险节点比例上升更为明显，表明高传染、低恢复风险参与时，风险耦合放大效应更强，网络更易形成高比例双风险感染状态。相较之下，包含高恢复率风险的组合虽然也会因诱导系数提升而增强传播，但边际影响相对较弱，说明较强恢复能力能够在一定程度上缓解诱导机制的放大作用。

2.4　感染率与恢复率对双风险传播的影响比较

为比较感染率和恢复率对双风险传播结果的影响，在固定诱导系数 $\gamma = 0.5$ 的条件下，依据控制变量法筛选不同风险参数组合进行对照分析。以稳态下正常节点(0,0)比例的变化幅度作为衡量指标，分别考察感染率变化 0.3 和恢复率变化 0.3 时系统状态的响应程度，结果如图 5 所示。

由图 5 可知，当恢复率变化值为 0.3 时，平均正常节点比例的变化幅度明显大于感染率变化值为 0.3 时的结果，表明恢复率对传播结果的影响强于感染率。也就是说，在双风险耦合传播情境下，单纯降低风险传播概率虽然能够在一定程度上减缓扩散速度，但提升风险恢复能力对压缩感染范围、提高稳态下正常节点留存比例的作用更为显著。

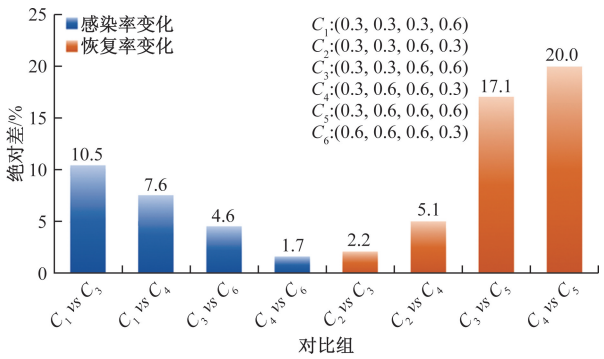


图 5　参数变化对比

这一结果说明，相较于单纯依赖风险隔离和传播阻断，提高恢复能力更有助于从根本上削弱风险在网络中的持续滞留和耦合扩散。

2.5　不同初始感染源对风险传播的影响

除了风险参数，初始感染源的结构位置同样会影响双风险传播过程。为考察不同类型节点作为初始感染源时的传播差异，设计四种节点选取方式：随机选取网络中 5%的节点作为初始感染源；按节点度降序选取前 5%的节点；按介数中心度降序选取前 5%的节点；按聚类系数降序选取前 5%的节点。其中，参数设置为 $\gamma = 0.3$、$\beta_1 = 0.4$、$\mu_1 = 0.3$、$\beta_2 = 0.5$、$\mu_2 = 0.3$，仿真结果如图 6 所示。

由图 6 可知，不同初始感染源条件下系统最终都会趋于稳定，但传播速度差异明显。随机选取节

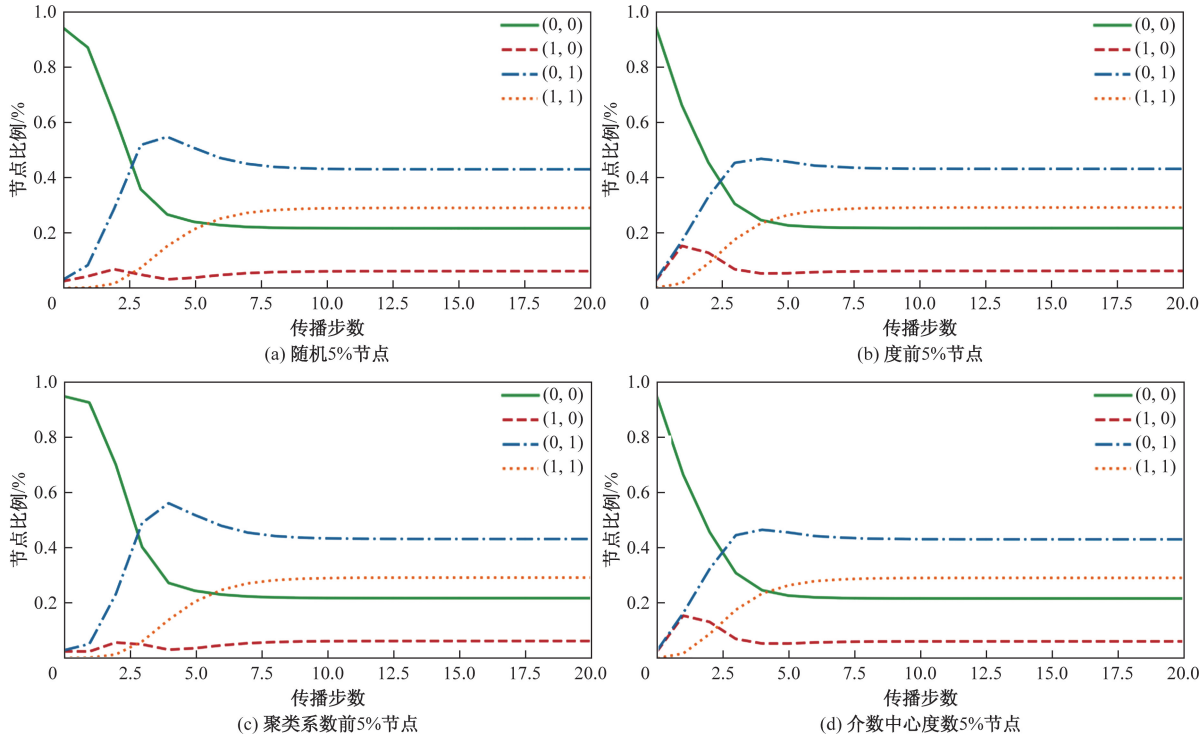


图 6　不同初始感染源情况下的风险传播

点时,风险扩散较缓,达到稳态所需时间较长,说明普通节点因连接分散,传播能力有限。以高节点度节点为初始感染源时,正常节点比例下降更快,系统更早进入稳态,表明核心节点更易将风险扩散至更广范围。高介数中心度节点作为感染源时,风险同样能在较短时间内沿关键路径迅速传播,说明桥梁型节点在连接不同企业群体和传播通道中作用突出。相比之下,高聚类系数节点引发的扩散速度较慢,其风险往往先在局部集聚,再逐步向外扩散,对全局传播的推动作用相对较弱。总体来看,节点结构位置显著影响双风险耦合传播过程,其中高节点度和高介数中心度节点具有更强的传播放大效应,应成为供应链风险监测与防控的重点。

3　结论与启示

3.1　结论

(1)双风险在供应链网络中的传播具有明显的阶段性特征,通常经历初始扩散、耦合演化和稳态形成三个阶段。在传播过程中,单一风险不仅会沿企业联系向外扩散,还会在诱导机制作用下向双风险状态转化,从而提升风险传播速度并扩大感染范围。

(2)诱导机制会显著放大风险传播效应。随着诱导系数提高,正常节点比例持续下降,双风险节点比例明显上升,说明风险之间的相互诱发是推动复合风险形成和扩散的重要因素。

(3)恢复率对风险传播的影响强于感染率。相比于单纯降低风险传播概率,提高风险恢复能力更有助于减少感染节点规模、提升稳态下正常节点比例,从而增强供应链韧性。

(4)节点结构位置会显著影响传播过程。节点度高的核心企业和介数中心度高的桥梁企业更容易成为风险扩散的关键节点,应作为重点防控对象。

3.2　启示

基于上述结论,本文提出以下管理建议。

(1)削弱风险之间的耦合关系,降低单一风险向复合风险升级的概率。政府和企业协同推进风险治理,通过政策支持、质量管理、研发管理和人才保障等措施,从源头减少产品风险、人员风险和经济风险之间的相互诱发。

(2)强化供应链恢复能力建设。企业通过完善应急预案、配置安全库存、建立多元供应商体系和关键岗位替代机制,提高节点受冲击后的恢复效率,并借助数字化平台提升风险识别、响应和修复能力。

(3)聚焦关键节点实施精准防控。对于节点度高的核心企业,加强日常监测和冗余资源配置;对于介数中心度高的桥梁型节点,重点强化关键路径保护和应急替代方案建设,以降低风险沿核心通道快速扩散的可能性。

总体来看,本文从双风险耦合视角揭示了供应链风险传播的基本规律,为关键节点识别和风险防控提供了理论参考。未来可进一步结合多风险耦合、异质节点行为及动态干预机制开展拓展研究,以提升模型对现实供应链场景的解释能力。

参考文献

[1] 石建勋,卢丹宁. 健全提升产业链供应链韧性和安全水平制度研究[J]. 财经问题研究,2024(11):3-17.

[2] WAGNER M S, NESHAT N. Assessing the vulnerability of supply chains using graph theory[J]. International Journal of Production Economics, 2009, 126(1): 121-129.

[3] KIM Y, CHEN Y, LINDERMAN K. Supply network disruption and resilience: a network structural perspective[J]. Journal of Operations Management, 2015(1): 43-59.

[4] 杨康,张仲义. 基于复杂网络理论的供应链网络风险传播机理研究[J]. 系统科学与数学,2013,33(10):1224-1232.

[5] 刘潇琦. 基于复杂网络理论的供应链网络模型及风险传播研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2016.

[6] 刘慧,杨乃定,张延禄,等. 考虑企业风险感知的R&D网络风险传播建模与仿真[J]. 系统管理学报,2020,29(3):494-501.

[7] 姜林,梁竞心. 突发公共事件下复杂供应链网络风险传播与干预[J]. 计算机工程与应用,2024,60(8):296-308.

[8] 任秀梅,郑贵廷. 国有企业资本运营风险耦合理论探析[J]. 哈尔滨商业大学学报(社会科学版),2006(5):3-5.

[9] 王天宇,窦永香,温浩宇. 一种基于PAM模型的芯片供应链风险识别方法[J]. 情报理论与实践,2022,45(11):126-135.

[10] WANG Z S, XIA C Y, CHEN Z Q, et al. Epidemic propagation with positive and negative preventive information in multiplex networks[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2020, 51(3): 1454-1462.

Research on Dual-risk Coupled Propagation in Supply Chains Considering the Induction Mechanism

QI Ning, ZHU Yunfei, JING Hao

(School of Economics and Management, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: Under external shocks and growing uncertainty, supply chain risks often exhibit multi-source concurrence, mutual induction and network-based diffusion. To address the limitation of single-risk studies in explaining the evolution of compound risks, supply chain risks were classified including product risk, personnel risk, economic risk and environmental risk, according to two dimensions such as transmissibility and recovery rate. Based on complex network theory and the SIS framework, a dual-risk coupled propagation model with an induction mechanism was constructed. Numerical simulations were conducted to examine the effects of different risk parameter combinations, induction coefficients and initial infection sources on the propagation process. The results show that the induction mechanism significantly accelerates risk propagation and enlarges the proportion of dual-risk infected nodes. The recovery rate has a stronger impact on propagation outcomes than the transmission rate, and enterprises with high degree or high betweenness centrality are more likely to become key nodes in risk diffusion. Theoretical support are provided for key-node identification, coupled-risk control and supply chain resilience improvement.

Keywords: supply chain risk; risk coupling; risk propagation; induction mechanism; complex network