arXiv:2601.13210v1 [physics.soc-ph] 19 Jan 2026

合作自适应融资下可行供应网络的建模

Yaniv Proselkov*†、Liming Xu† 和 Alexandra Brintrup

剑桥大学工程系，The Old Schools，Trinity Ln，剑桥，CB21TN，剑桥郡，英国

2026年1月21日

摘要

我们提出一种适用于企业间供应网络的金融流动性政策共享方法，并为可行的复杂自适应供应网络引入一种可扩展的自主控制函数。通过重叠协作集合调和供应链中的合作与竞争，使企业彼此依存，并实现分布式风险治理。我们采用动态复杂自适应系统建模，研究合作范围——即可见性——如何影响生存能力。研究发现，生存能力离不开合作；在无标度供应网络中，可见性与生存能力同步提升；而分布式控制（企业只能掌握有限的合作伙伴信息）优于集中式控制。这表明，旨在提升网络生存能力的政策应实施分布式供应链金融治理，支持企业间协作，从而实现自主控制。

关键词：分布式决策；金融；仿真；多代理系统；供应链管理

1 引言

持续不断的国际动荡意味着，供应风险是现代复杂供应网络面临的持续挑战 [51]。全球环境快速变化加剧了供需波动，使其更难以预测，也导致公司无法准确应对突发变化。这种影响沿供应链逐步累积，引发物料牛鞭效应 [25]。

企业使用供应链融资（SCF）来应对由管理不善造成的流动性缺口。然而，特权市场地位导致供应商与买方之间出现权力失衡，从而触发下游的金融牛鞭效应 [85, 28]。物料牛鞭效应放大风险，对深层供应网络中的中层企业造成双向压力 [81]。这些压力可能限制运营能力，导致资不抵债，并扰乱合作伙伴和竞争对手所处的市场状况 [68, 117, 39, 83, 64]。随着合作伙伴企业失去客户和供应商，由此产生的利润损失会导致更多破产 [31]。由于现代

*通讯作者：yp289@cantab.ac.uk
†这些作者对本研究的贡献相同

供应网络是复杂自适应系统（CASs） [92], ，这些局部效应会以非线性方式在整个系统中传播，导致多向故障级联，即涟漪效应（RE），贯穿整个供应网络 [80, 40, 38]。

供应网络中的持续变异性要求持续监控，并针对新出现的状况采取动态应对措施 [89]。尽管企业之间共享风险相关信息至关重要 [37], ，竞争优势往往促使企业对数据保密 [69]。保护隐私的信息共享框架能够实现动态的去中心化决策。这通过增强应对冲击的适应能力、降低风险并提升整体绩效，增强了网络生存能力 [62], ，且优于集中式控制 [1]。

要定义去中心化决策范式，必须先对其进行建模。去中心化旨在防止的网络崩溃属于涌现现象，源于复杂多智能体动态，因此模型必须真实呈现涌现特性。现实中的供应网络具备这一特性，但摧毁它们并不可行。传统建模会简化系统，从而消除这一特性 [54], ，因此我们采用基于复杂智能体的网络仿真，设计具有自适应非线性主体交互的模型，从而有效仿真涌现风险。

2 文献综述

供应网络基础设施由相互依赖的资产构成，这些资产生产或传递各类单元，以交付物资、产品和服务 [52]。随着多样化需求通过各种解决方案得到满足，现代供应网络（SN）日益复杂 [53], ，使得来自外部参与方的风险传播 [58, 43] 对于特定企业而言难以预测。有关基础设施故障及相关风险缓解策略的案例研究表明，需要运用复杂性方法来加深对系统韧性的理解 [91]。供应网络拓扑结构显著影响风险和供应链稳健性 [93]。大多数供应网络遵循无标度复杂网络分布 [100, 119], ，其度分布在不同尺度下保持不变，这是许多社会系统的常见特征 [9]。随机网络也被采用，主要用作零模型 [41]。

现代的多供应线路供应链具有深层供应链（DTSC）结构 [115], ，戴姆勒-克莱斯勒供应链 [32] 就是一个例子。这条汽车上游供应链始于原材料加工商，终于原始设备制造商，形成了一个韧性生态系统，将非易腐材料重新组合成可上市产品。这类供应链为分析网络风险提供了宝贵的测试案例。

深层供应链中一种常见的结构是钻石型供应拓扑，其特点是只有一个一级成员、多个二级成员，以及一个三级成员。例如，本田供应网络表明，从供应链中心向外围移动时，每家公司的平均供应商数量会减少 [32, 114]。

复杂供应结构建模与分析有助于供应链管理[29, 73, 11], ，尤其有助于了解网络结构如何影响物料流[40]。近期综述强调了用于此目的的先进人工智能技术[72], ，并通过其在供应链管理中的成功应用 [7]展现了其价值。

当企业利用权力失衡来延迟付款时，就会造成流动性缺口，给供应商带来财务压力 [85, 30, 49, 13]。虽然这种做法短期内有利于拖延付款的企业，但随着时间推移，可能会削弱供应商的运营能力 [59]。这些流动性问题往往会沿供应链向上传播，延迟付款也会影响网络深处的供应商 [86]。中小企业（SMEs）尤其容易受到影响，因为它们资源有限、议价能力较弱 [16], ，且在深层供应网络中处于大型企业之间 [90, 42]。

供应链金融解决方案能够应对深层结构中的挑战，在此类结构中，这些方案以深层供应链金融（DTSCF）的形式运作，为远离核心企业的企业提供支持 [95]。尽管已有整合供应链与融资动态的仿真模型 [127], ，但这些模型并未聚焦深层结构。 [107], 通过将权力差异引发的风险纳入深层网络仿真，弥补了这一不足。然而，缓解策略仅限于主体特定信息，无法洞察更广泛的供应链。

企业关系结构塑造相互影响与权力动态，构成枢纽理论的基础 [126]。我们运用这些结构的中心性指标，并借助枢纽理论确定枢纽风险，即企业根据其拓扑重要性对网络构成的风险 [12, 61, 109]。四种关键中心性度量揭示了“枢纽性”的不同方面 [114]:

- **度中心性** 反映企业对其合作伙伴的影响力 [18]。
- **介数中心性** 体现企业作为信息和原材料中介者所发挥的作用[71]。
- **特征向量中心性** 表示企业为关键参与者提供间接连接 [126]。
- **接近中心性** 衡量企业获取网络信息的便利程度 [71]。

在拓扑结构上具有重要性的供应商就是枢纽供应商。这意味着，涟漪效应的影响取决于企业遭受财务挤压的易感程度，因此，枢纽效应表明，风险最高的企业恰恰最缺乏管理风险的能力 [79, 33]。买方迫使供应商陷入财务困境，可能导致供应商违约；这通常表明该供应商并非关键供应商、面临激烈竞争，且议价能力不足以影响付款条件 [84]。

这反映了供应链嵌入程度深、连通性高，使实力薄弱的企业易受市场变化和相关风险影响。这往往会导致枢纽供应商未被识别 [19, 73, 6], ，而这些供应商虽处于关键位置却未受到重视，因此更容易承受财务压力并面临破产风险。这种压力会在网络中传播，引发牛鞭效应 [106]。因此，在风险缓解策略中应对枢纽性问题加以处理，从而同时减少牛鞭效应和涟漪效应。

当产品需求突然变化时，供应商会高估未来需求，从而引发牛鞭效应。为避免错失需求激增的机会，他们会订购过多原材料 [75]。这种放大效应在每个层级不断重复，并逐步向上游传递，导致供应商库存过剩。这些中断会影响整个供应链中的供需动态。企业试图预测生态系统响应，但预测误差会在每个层级累积，加剧牛鞭效应所引发的冲击 [76]。

为避免牛鞭效应、维持流动性并保障供应链，企业会从银行贷款以及专业金融科技公司提供的供应链金融（SCF）等渠道获得融资 [47]。银行贷款通常是首选，具有优惠的条款和简单明了的结构 [35]。银行融资无法获得时，企业会使用供应链金融；中介者通过分析发票数据来了解网络结构，使供应链金融成为获取动态关联信息的一个有前景的来源 [78]。

先前的一项研究 [106]利用网络仿真对现金受限情况下的银行和供应链金融动态进行了建模，但未将关联信息纳入风险缓解。此外，该研究将模型初始化为格结构，限制了研究结果在实践中的适用性。

不恰当的供应链金融政策可能会放大涟漪效应。上游物料牛鞭效应会造成流动性缺口，进而产生融资需求 [27]。基于受牛鞭效应原理影响的现金流预测制定的融资政策，会导致金融牛鞭效应向下游传播 [4, 24, 96, 28]。因此，涟漪一旦开始，便会在风险更高的系统中传播并进一步放大。

已有动态融资方法 [74] ，但缺乏网络集成。网络集成能够提升可见性，而这对于缓解涟漪效应至关重要；涟漪效应是供应链面临的一项重大风险[117]。然而，网络集成融资与利益相关者的隐私要求之间存在冲突，这是一个重大挑战。这些机制往往要求企业向直接合作伙伴关系之外的实体共享专有信息，凸显了对隐私保护解决方案的需求。

隐私保护带来了实际优势，例如能够维持企业之间的竞争，使得破坏保密性变得不可取 [50]。为在尊重隐私的同时实现透明供应链管理，人们提出了去中心化融资方法 [3]。独立性与分布式的价值，体现在“福特主义”垂直整合与以苹果公司为代表的现代垂直再整合之间的对比中。前者将供应链完全纳入企业内部，而苹果公司在维持独立供应商的同时强制推行自身标准；与福特的模式相比，这种做法实现了更高的灵活性和效率，因此在当今情境下更为有效 [88]。在缺乏共享信息的情况下预测供应链动态的努力，包括采用联邦式方法进行隐私保护学习 [2, 129]。然而，这仍然需要将专有信息提交给某个实体；对于可能更倾向于仅共享非专有数据的传统主义管理者而言，这可能会带来问题。

本地策略共享解决方案增强了基础设施网络中的协调，从多个维度提升了功能性 [17]。在供应链中，这要求开展企业间信息共享，以推断扩展合作伙伴结构并实现更高的供应链可视性。然而，由于预算限制、数据标准不一、隐私顾虑、利益冲突、技能要求以及供应链固有的复杂性等挑战，这一点难以实现 [69]。因此，规模较小且受财务限制的企业——也就是最能从此类解决方案中受益的企业——反而最缺乏实施这些方案的能力。

通过将网络分析与网络控制相结合 [15, 70]，本地政策共享可以为预警系统提供信息，从而降低复杂自适应系统中的风险。然而，这一过程面临挑战，因为基础设施网络中的许多主体具有有限的控制范围；在网络复杂性或运行速度较高的情况下，集中式控制会变得难以扩展且效率低下。一种可扩展的替代方案是去中心化控制，即主体充当网络动力学的传感器，并共同参与系统分析 [113]。这种

方法仍能保持计算效率，前提是每个主体限制其传感器范围和控制范围，从而避免任何单个主体承担过高的计算负荷。电信领域已对这一方法进行研究 [55], : 通过将信息限制在相关运行区域内，并使用这些区域节点所持有数据包数量加权的中心性来近似关键性，研究表明，去中心化能够很好地近似系统关键性动力学 [105, 104]。供应链融资领域尚未开展此类研究。

限制可见性有助于交织供应链 [63], ，促进主体之间的合作并增强应对冲击的韧性。基于枢纽的策略共享可能允许在保护专有数据的同时共享不完整信息。贝叶斯网络系统已被用于对相互依赖关系建模，其中节点作为变量，边表示交互概率 [60], ，但这类系统直接对交织关系建模，而非像现实中那样对其从组织结构中涌现的过程建模 [130]。当网络结构未知但动态特性已知时，贝叶斯模型较为适用 [121], ；而对涌现过程建模则需要采用数据范围更广、交互关系更简单的复杂网络动力系统[97, 44, 112]。可以使用基于主体的建模研究涌现属性，通过模拟主体间的交互来分析拓扑演化和动态网络行为 [128,104, 111]。这种方法能够对复杂适应性供应网络（CASN）建模并捕捉涟漪动力学 [107, 80],，但长期生存能力仍未得到测量。

这一背景有助于分析长期行为，并通过生存能力应对系统性风险；生存能力衡量动态适应性与改进情况。对于增长型经济体而言，生存能力是决定长期有效性的关键因素 [67]。这与韧性、稳健性和效率等绩效指标有所不同：效率体现当前的运营绩效；稳健性指抵御冲击的能力；韧性则指冲击发生后恢复到先前状态的能力 [102, 22]。这些衡量指标侧重于事件，并假设存在一个偏离其后的平衡状态，而生存能力则考虑持续适应性。

供应网络在分岔状态附近表现最佳，但只能在有限时间内存在 [94],，这意味着无法实现渐近极限下可达到的稳定性。因此，要衡量系统可行性，就必须根据有限时间仿真推断长期可行性动态。尽管已有研究采用拓扑指标 [82], ，但生存时间被认为是最合适的指标 [65], ，而这需要时间数据或仿真，凸显了基于主体的建模的实用性。

3 知识缺口与研究设计

要缓解涟漪效应风险，关键在于理解可扩展、自主控制的供应网络如何运作。提高深层网络层级的可见性或许能提供一种解决方案，但也带来了一个尚未解决的问题：如何在可扩展的框架内保护隐私。

我们提出一种本地政策信息共享机制，通过图函数基于本地网络拓扑或合作伙伴结构进行聚合匿名化。将信息共享限制在本地企业范围内，可减少专有数据暴露，并降低能够访问信息的实体数量。

这凸显了一个研究空白：如何开发一种大型、基于主体的网络仿真环境，并配备分布式、信息受限的拓扑风险缓解机制，以应对涟漪效应。这样的环境将有助于研究可扩展的自主控制，尤其是深层网络可见性，并帮助解决如何定义可扩展的隐私保护型关联方法这一问题。这需要从复杂网络出发开展仿真，以探索基于关联的风险缓解，同时考虑网络中的非线性。若能有效设计，数据匿名化可弥补这一研究空白，并带来实际效益。

我们提出让企业的风险缓解策略取决于其他企业的政策，以解决上述问题。如果所有簇都至少与另一个簇重叠，从而覆盖整个供应网络，那么所有企业便会隐含地利用全网信息做出决策，因此，这将成为一种有效的涟漪效应风险管理工具。

我们假设，在异构拓扑中，通过使用规模有限的局部簇，可以有效缓解风险并实现可扩展性。为验证这一点，我们分析信息簇直径（称为可见性）与系统可行性之间的关系。

我们在不同的主体可见性情景下，对基于复杂智能体的网络仿真进行多轮迭代。我们采用多种分析技术评估结果空间，并根据仿真结果提出衡量长期可行性和无限期可行性的新方法。

我们的控制函数在有限可见性的条件下生成协作智能，专门用于缓解关键故障。我们采用基于仿真的方法研究生存能力；生存能力受该函数的影响最大，并与生存能力直接相关。这些仿真模型纳入了系统动力学，促使我们开发出以下方法：长期存续能力度量（LTVM）和无限期存续能力度量（IVM）。

我们使用供应链金融 [106]的动态复杂自适应系统模型 [31] ，评估所提出的协同智能控制方法[37] 的有效性。通过在各种复杂网络拓扑、参数化方案和关联度量下进行测试，我们探究由网络结构决定的可见性与生存能力之间的关系，并以长期存续的供应链所占比例衡量生存能力。

我们的目标是构建一个可扩展、能够自主控制的供应网络，以缓解涟漪效应；为此，我们让每家企业掌握数量有限的、主观上与其相关的企业的信息，并通过可见性与生存能力之间的关系来刻画该网络。

4 方法

为开展研究，我们对模拟环境进行了修改： [106], 其中，供应商网络 $G = (V, E)$ 以无环方式相互连接。出度为零的节点连接到原材料节点 r，入度为零的节点则连接到市场节点 m。从 m 开始，每个时间步 t，市场节点根据泊松分布生成一定数量的需求，因此时间步 t 的需求定义为 $d_t^m \sim \text{Poisson}(\lambda)$。随机选取一个位于 m 上游的节点 u ，使得 $(m, u) \in E$，选取依据是该节点的市场份额 μ_u，随后将该需求沿网络向上游传递至 u。图 1 展示了一个示例。 u 的市场份额取决于其规模 $\mathcal{P}_u = \{s', m', l'\}$，即“小型”“中型’

		$\mathcal{P}_u$		
		s'	m'	l'
$\mathcal{P}_v$	s'	60	90	120
	m'	30	60	90
	l'	30	30	60

表 1：发票条款表：买方 u （权力为 $\mathcal{P}_u$ ）在卖方 v （权力为 $\mathcal{P}_v$ ）交付 v 后，恰好延迟 τ_{uv} 天付款。

节点 u 拥有数量为 s_t^u 的可用库存。市场会下达一份数量等于 $p_m^t = \min(d_t^m, s_t^u)$ 的采购订单。

买方 u 根据其与卖方 v 之间的相对权力，确定在 u付款前经过多少个时间步 τ_{uv} 。对于 v ，应付现金金额记录为应收款 $R_v^{t+\tau_{uv}}$；对于 u ，则记录为应付款 $P_u^{t+\tau_{uv}}$。 $\mathcal{P}$ 与 τ 之间的关系如表 1 所示，并遵循发票惯例 [101]。企业与 m 或 r之间没有延迟，因此对于任意 u， $v \in V$,$\tau_{mu} = \tau_{vr} = 0$。

每条边（包括连接到 m 或 r的边）都有一个材料单位价值参数 s_{uv}。因此， u进行销售时，会获得现金 $c_u^t = p_v^t s_{uv}$并计入其应收账款，同时根据$R_v'^{t+\tau_{uv}} = R_v^{t+\tau_{uv}} + c_u^t$进行更新；其库存则按采购订单数量减少。买方企业的现金也会减少相同金额，并根据 $P_v'^{t+\tau_{uv}} = P_v^{t+\tau_{uv}} + c_u^t$计入其应付款。市场节点 m拥有无限现金，而原材料节点 r拥有无限库存。

节点使用现金进行上游采购、支付固定运营费用 o，并按每个时间步每售出一个单位支付固定交付成本 e ，因此成本会随活动水平而变化。在下一个时间步，任何剩余需求都会按照相同规则从 u向上游传递给供应商 v 。节点通过向原材料节点 r下单来采购原材料。

当企业 u 的当前流动现金 $\kappa_u^t = R_u^0 - P_u^0 \leq 0$ 与应收款总额之和少于应付款总额时，该企业将从系统中移除；应收款和应付款计算至未来 120 天，其中 $\sum_{t=0}^{120} R_u^t \leq \sum_{t=0}^{120} P_u^t$。移除企业后，其所有边都会被删除，并根据剩余企业重新计算竞争企业的相对市场份额。每个时间步，我们都会更新应收款和应付款，使得 $R_u'^t = R_u^{t+1}$和 $P_u'^t = P_u^{t+1}$，以模拟一天的流逝。

为向合作伙伴付款并支付运营支出，同时避免破产，企业可能会寻求外部融资，以牺牲长期现金流为代价增加流动性。一种选择是银行融资，其额度受债务 ρ_u^t 以及先前现金余额乘以银行授信额度的限制，而银行授信额度取决于企业实力。当企业获得银行融资 b_u^t 时，该金额会计入 κ_u^t和 ρ_u^t （其中 $\rho_u^0 = 0$），且 b_u^t 受限于

$$\rho_u^t + b_u^t \leq \begin{cases} 2\kappa_u^{t-1}, & s_u = s; \\ 3\kappa_u^{t-1}, & s_u = m; \\ 4\kappa_u^{t-1}, & s_u = l. \end{cases}$$

银行融资会减少未来收益，以增加当前流动现金。这项成本体现为企业偿还贷款，并将利息 β计入应付款 $P_u'^{t+120} = P_u^{t+120} + (1+\beta) b_u^t$。为尽量减少长期现金缩减，企业会寻求所需的最小融资金额，以便

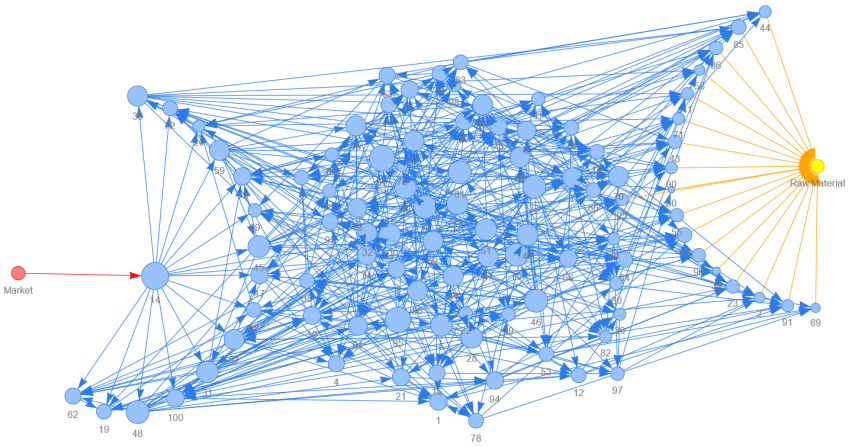


图 1： $E(100,0.1)$ $\delta = 7$ 供应网络：随机 Erdős–Rényi 图拓扑的可视化，并通过结构调整来表示深层级供应链。$n = 100$， $p = 0.1$，以及直径 $\delta = 7$。

使当前现金 κ_u^t 达到阈值 f_u^t ——即安全现金储备。我们采用分布式协同智能控制方法来确定融资阈值。

如果由于债务上限而无法获得足够的银行融资（其中 $\kappa_u^t + b_u^t < f_u^t$），节点便会使用供应链金融。节点会提前固定的一段时间 ι 减少应收账款，从而增加等额的流动现金，并按 γ 的折扣系数折算，其中 $\kappa_u^{'t} = \kappa_u^t + s_u^t$，且 $s_u^t \leq R_u^{t+\iota}(1-\gamma)$ 和$R_u^{'t+\iota} = R_u^{t+\iota} - s_u^t($ $1+\gamma)$。

4.1 复杂网络拓扑

为了研究复杂深层级网络中的网络拓扑，我们采用 $G(N,p)$ Erdős–Rényi (ER) 随机图模型。该模型根据固定的节点数量 N 以及任意两个节点之间存在一条边的固定概率 p，生成 G uv [41],，如图 1 所示。我们将其视为基准情形，呈现具有复杂非结构化设计的长链。

为生成随机网络（图 1），我们使用 Erd˝os–R´enyi（ER）模型；对于无标度结构化网络（图 2），则使用 Barab´asi–Albert（BA）模型。这些模型是各自拓扑结构的经典生成器。无标度网络在所有尺度上都具有一致的度分布，且具有结构性。研究指出，供应网络通常具有无标度拓扑结构 [19, 20, 21, 124, 93, 46, 120]。

为捕捉真实供应链的异质度分布，图 2 对比了 ER（随机复杂）模型和无标度 Barab´asi-Albert（BA）模型（结构化复杂）[9]。BA 模型 BA(N， m) 以 m 个节点初始化。新节点 u 依次连接到 m 个现有节点 v，并按照与 deg(v) 成正比的概率选择这些节点。具体而言，$p_{uv} = \deg(v)\sum_{w\in V}\deg(w)$。

ER 和 BA 模型都会生成无向图，我们将其转换为有向无环图（DAG），以定义买方-供应商关系和现金流方向。为构建该有向无环图，我们根据各节点到其他所有节点的平均距离，对节点进行唯一的全序排列， l_u。无向边（uv） $\in E$ 在满足 $l_v > l_u$ 时会被定向为（uv），否则遵循预先分配的随机索引 if $l_v = l_u$。这既保留了全序，也确保形成有向无环图结构 [118]。

我们将 m 连接到所有入度为 0 的节点，并将 r 连接到所有出度为 0 的节点。Th is

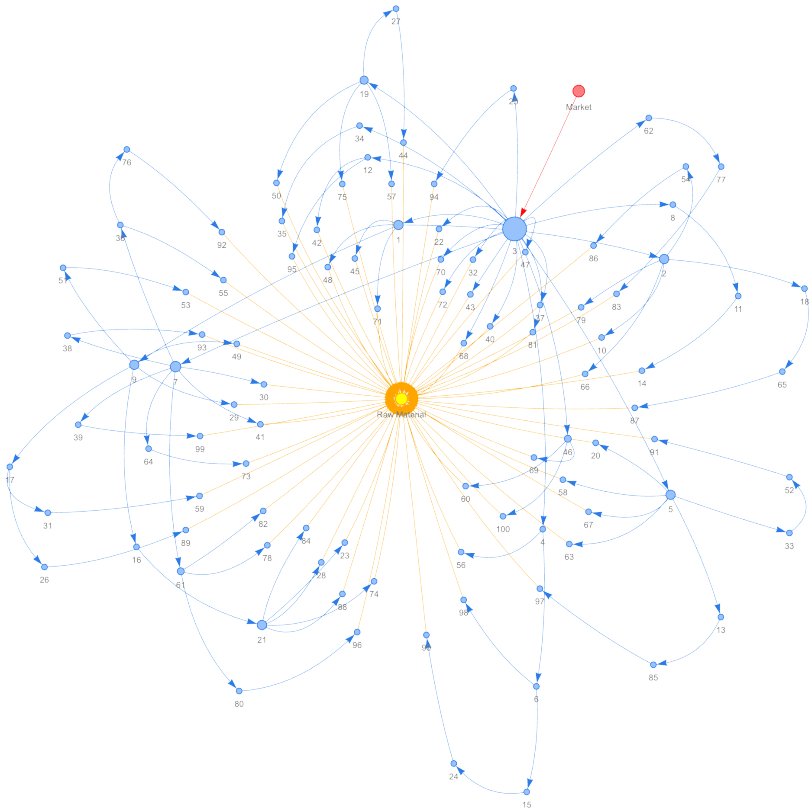


图2：BA(100，3) $\delta = 3$ 供应网络：一种无标度 Barabasi-Albert BA(n， m) 图拓扑结构，并通过结构修改来表示深层级供应链。$n = 100$， $m = 3$， $\delta = 3$。

这确保核心节点是与网络连接最紧密的节点，而边缘节点则代表基本商品的生产者，就像汽车制造网络中的情况一样。节点层级 $\mathcal{T}_u$ 等于初始配置中从市场节点 m到节点 u 的有向测地距离。初始现金头寸设为 $\kappa_u^0 = 50\mathcal{T}_u$。

接下来， [107], 节点权力取决于同一层级中的节点数量，$|\mathcal{T}_u|$。对于集合 $S \ni s'$， $M \ni m'$， $L \ni l'$，变量 $\hat{}s$， $\hat{}m$， $\hat{}l \in [0, 1]$，其中 $\hat{}s + \hat{}m + \hat{}l = 1$，我们将网络中小型、中型或大型部分的比例固定，使得 $|S| = \hat{}s|V|$， $|M| = \hat{}\hat{}m|V|$， $|L| = l|V|$。随后，我们对所有节点进行排序（u_1，……， u_n），其中 $|T_{u_1}| \leq ... \trianglelefteq T_{u_n}|$。接着，我们固定节点权力，使得 $P_u = l'$ 对所有 $u \in \{u_1, ..., u_{|L|}\}$， $P_v = m'$对所有 $v \in \{u_{|L|+1}, ..., u_{|L|+|M|}\}$，以及 $P_w = s'$ 对所有 $w \in \{u_{|L|+|M|+1}, ..., u_n\}$。这意味着较稀疏层级中的节点拥有更大的权力。材料价格沿边迭代分配，从 r开始。边 s_{ur} 上的价格设为 1。对于前序边，$s_{vu} = \max_{\{w:(uw)\in E\}}(s_{uw}) + 1$，以确保所有销售均具有盈利能力。我们在这些有向无环图上进行了仿真。

4.2 分布式协同金融阈值控制

为确定金融阈值函数，我们采用枢纽理论 [126], ，该理论认为，在同一供应链中，嵌入程度较低的企业影响力也较小。嵌入是从企业视角定义的，存在于其自我网络中；自我网络由与企业共享信息的企业构成，并受可见性限制。根据 [104], ，可见性由测地距离

决定。对于节点 $u \in V$，距离其 i 条边以内的节点集合为 $H_i(u) \in G$，因此，可见性为 i 的节点 u 会通过 $H_i(u)$共享信息。

企业会在其共享的自我网络中向其他企业广播其融资政策 f_u^t 。节点 u将这些数据与当前支出 P_u^0结合起来，并根据各值相对于其自我网络的中心性度量进行加权。中心性用于量化节点在网络中的重要性。为避免对当前状况过度敏感，我们采用时间窗口为 $\hat{w}$ 的移动平均。对于节点 u 和中心性度量 $C(u; H_i(u))$，其表达式如下：

$$\hat{f_u^\tau} = C(u; H_i(u))P_u^0 + \sum_{v \in H_i(u)} C(v; H_i(u)) f_v^\tau$$

$$f_u^t = \frac{\sum_{\tau=t-\hat{w}}^{t} \hat{f_u^\tau}}{\hat{w}}$$

当中心性之和等于 0 时，我们仅使用 H_0 中包含的信息。

在本研究中，我们考察四种中心性度量：度中心性（C_d），即与某个节点相连的边的总数；介数中心性（C_b），即经过某个节点的路径与绕过该节点的路径之比；特征向量中心性（C_e），即节点作为邻接矩阵特征向量一部分所具有的影响力；以及接近中心性（C_c），依据某个节点到其他节点的平均距离 [45, 5]计算。这些度量帮助每个节点 u 确定 f_u^t。我们采用全部四种度量，以避免偏向任何一种基准方法。

通过整合政策广播、基于中心性的图处理、融资阈值设定和平滑函数，我们为供应网络开发了一种分布式控制机制。该机制通过调整融资阈值来降低涟漪效应风险。

4.3 实验与分析流程

我们使用关联融资阈值模型，在所述拓扑结构下测量供应网络仿真的生存时间。我们在多种配置下重复仿真，改变图拓扑结构、可见性、中心性度量、 λ和 e。每个供应网络的直径为 δ，即图中包括市场节点和原材料节点在内的最短测地长度。可见性上限为 δ，因为超过这一数值后，提高可见性不会改变协作网络。为便于比较具有不同 δ的图，我们将可见性除以 δ，归一化为相对可见性（RV）。

由此得到以RV为条件的直方图，我们通过研究系统存活时间的概率分布 [106]来分析其多峰性。我们使用核密度估计（KDE） [110, 99], 以非参数方式估计这些分布。对于仿真中数据集 D 的核密度估计带宽 h_D ，我们采用经过调整的西尔弗曼经验法则 [116]，其表达式为

$$h_D = 0.9 \min\left(\sigma_D, \frac{\mathrm{IQR}_D}{1.34}\right) |D|^{-\frac{1}{5}} \tilde{h},$$

其中，对于 D，IQR$_D$ 为四分位距， σ_D 为标准差， $|D|$为数据集大小。˜对于给定的拓扑类型，调优参数 h在所有 D 中均保持不变。

为研究扩展通信如何缓解故障级联，我们使用二元分割算法 [8] 对 B_D处的单个断点进行断点分析，分析对象为

D的核密度估计。 B_D之前的核密度估计记为 B_D^{pre} ，代表短期存续系统； B_D之后的核密度估计记为 B_D^{post} ，代表长期存续系统。因此，我们区分短期和长期存续系统的系统结果。

我们通过对 B_D^{pre} [106] 进行模态分析并统计显著峰值，来分析具有意义的簇。峰值（x， y）是一个局部最大值，其相邻的局部最小值为（x'， y'），其显著性为 $\bar{x} = y - y'$。当 $\bar{x} > \Xi$ 时，该峰值被视为显著峰值，其中显著性阈值 Ξ 在所有 D 中保持不变。 D 中显著峰值的数量记为 Λ_D。

为拟合每个 D 的核密度估计并最大化模态空间，从而提高存续能力分析的精度˜，我们选择 h 以最大化 Λ_D，并受约束 $\min_D(\Lambda_D) = 1$。˜ h 的值取精确到小数点后 5 位。

随后，我们将数据集中所有生存时间大于 B_D 的元素确定为长期存续者，使得 $D($ B_D^{post} $) = \{t \in D : \ t \geq B_D\}$。如果仿真在达到 $t = 1000$ 时仍未发生断裂，则将仿真上限设为 $t = 1000$ ，并将其记录为生存时间。LTVM 是断点之后的生存时间所占的比例。给定一个仿真空间 X，其定义为 $\mathrm{LTVM}^X = {}^{D}{}_{(B_D^{\mathrm{post}})\ D(0)}$ 。IVM 限定为时间步 $t = 1000$ 时的生存时间所占比例。给定一个仿真空间 X，其~~定义为 IVM~~$^X = {}^{D}{}_{(1000)\ D(0)}$ 。我们还研究 RV 与 Λ_D 的关系，观察随着可见性的变化，存续空间的复杂性如何改变。

———

对每组输出应用多项式回归，选用具有统计显著 P值的最低多项式次数。若关系呈线性，则研究其梯度；同时对拐点和显著点进行详细的曲线分析。

5 结果

我们利用模型考察了供应网络中可见性与生存能力之间的关系。结果展示了供应链相对于直径变化的 RV_D ，并以 LTVM、IVM 和 Λ_D 作为输出指标。

我们在表 2 所列的模型参数空间内进行了实验。模拟在一台 Armari Magnetar 工作站上运行，该工作站配备 3.5GHz Intel Xeon E5-1620 CPU、64GB RAM，使用 Windows 10 Pro。建模和分析使用 Python 3 完成，所用软件包包括：os、pandas、tqdm、numpy、matplotlib、math、sklearn、itertools、pprint、art、networkx、rando m、sys、seaborn、statistics、time 和 tabulate .

我们生成广义曲线，以分析输出对之间的关系，并将其行为投射到形式化程度较低的网络拓扑结构中（图 3、4、5、6）。我们的方法保留不可约非线性，研究可见性（进而影响协作范围）的变化对有限尺度和无限尺度下长期动态的影响。我们对随机和无标度供应网络进行了测试，因为供应网络通常具有无标度特性 [19, 20, 124, 73]„ 而随机拓扑结构则作为零模型。

5.1 无标度网络

无标度网络的参数设置为 $m = 1$ 和 $\delta \in \{4, 5, 6, 7\}$，代表长度各异的稀疏供应链。

参数	取值
运营费用 o	1
平均需求 λ	5, 10, 15
配送费用 e	0.25, 0.75
贷款偿还期限	120
企业电力分配	异质的
融资的	True
范式	主动式
供应链金融年利率 γ	20%
银行年利率 β	10%
发票期限 τ	60
窗口大小 $\hat{}w$	60
中等算力市场份额 $f(m)$	3
大算力市场份额 $f(l)$	10
拓扑结构	ER随机网络，BA无标度网络
网络直径 δ	4, 5, 6, 7
网络规模 n	100

表 2：测试参数表。

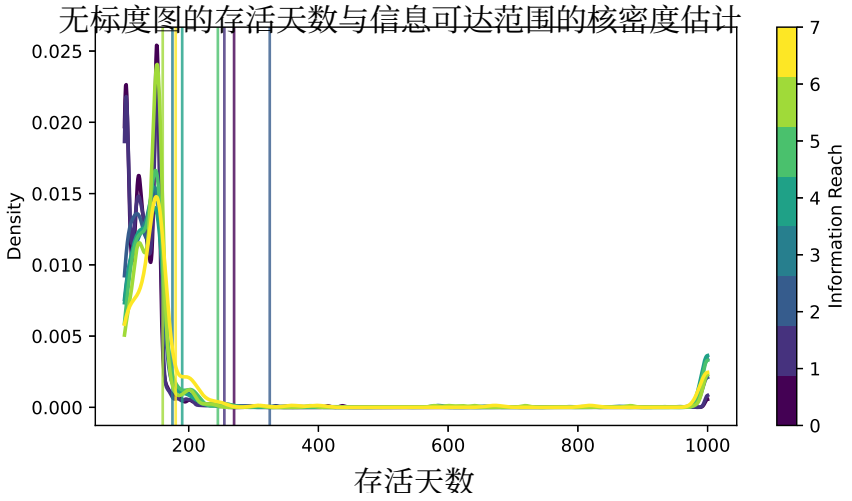


图 3：无标度图中存活天数与信息可达范围的核密度估计：竖线表示区分短期存续与长期存续供应链的断点

图 3 展示了以可见性为条件的无标度图存活时间分布的核密度估计。垂直线表示每条曲线对应的 B_D，并以相应颜色标示。为清晰起见，此处使用可见性曲线，而非相对可见度。

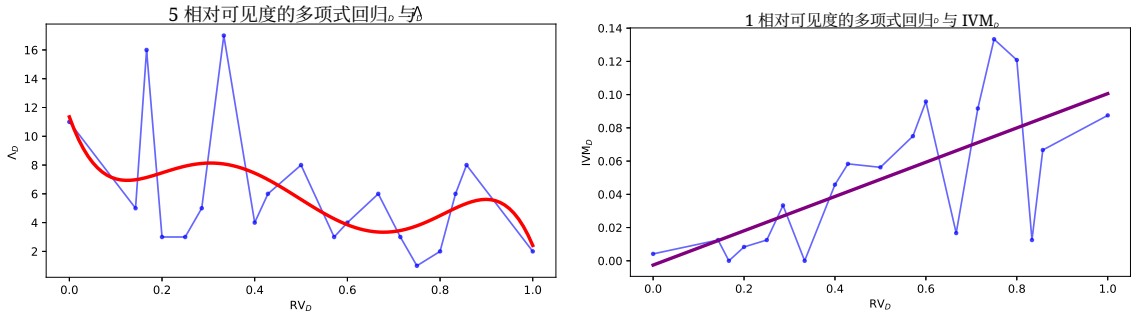
表 3 展示了根据相对可见度$_D$得出的所研究的度量指标结果。相关变量对的多项式回归曲线见图 4，详细说明见附录。

对于无标度拓扑，在 B_D之前存在一个高密度区域，随后是一个带有噪声的长平台期，并在 $t = 1000$附近出现显著拐点（图 3）。因此，为所有供应网络成员赋予具有可变可见性的局部协作功能，可以提升网络可行性。

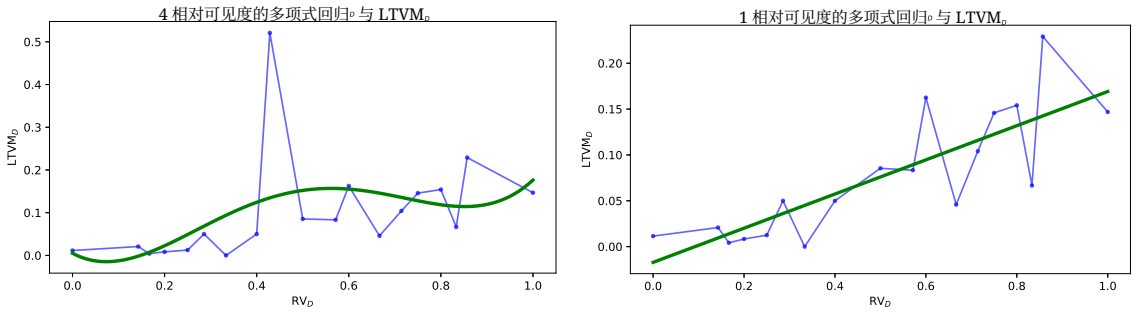
无标度拓扑曲线中的非线性表明，采用较小且更易实现的可见性或许也能达到目标生存能力。$\mathrm{IVM}_D^{\mathrm{S}}$ 接近 14%（图 4b），而 $\mathrm{LTVM}_D^{\mathrm{S}}$ 超过 52%（图 4c）；若排除一个显著值，则为 22%（图 4d）。最优解取决于优先考虑哪种生存能力，因为 $\mathrm{LTVM}_D^{\mathrm{S}}$ 与 $\mathrm{IVM}_D^{\mathrm{S}}$ 的全局最大相对可见度$_D$ 和局部极值各不相同。

$RV_D^{\mathbf{SF}}$	$B_D^{\mathbf{SF}}$	$\Lambda_D^{\mathbf{SF}}$	$\mathbf{IVM}_D^{\mathbf{SF}}$	$\mathbf{LTVM}_D^{\mathbf{SF}}$
0	270	11	0.0042	0.0115
0.1429	230	5	0.0125	0.0208
0.1667	280	16	0	0.0042
0.2	200	3	0.0083	0.0083
0.25	195	3	0.0125	0.0125
0.2857	315	5	0.0333	0.05
0.3333	375	17	0	0
0.4	340	4	0.0458	0.05
0.4286	150	6	0.0583	0.5208
0.5	225	8	0.0563	0.0854
0.5714	375	3	0.075	0.0833
0.6	190	4	0.0958	0.1625
0.6667	190	6	0.0167	0.0458
0.7143	260	3	0.0917	0.1042
0.75	335	1	0.1333	0.1458
0.8	205	2	0.1208	0.1542
0.8333	170	6	0.0125	0.0667
0.8571	160	8	0.0667	0.2292
1	180	2	0.0875	0.1469

表 3：针对无标度拓扑结构考察的所有输出



(a) RV_D 与 Λ_D^{SF}的关系，采用 5th 次多项式；(b) RV_D 与 $\mathrm{IVM}_D^{\mathrm{SF}}$的关系，采用 1st 次多项式回归。回归。



(c) RV_D 与 $\mathrm{LTVM}_D^{\mathrm{SF}}$的关系，采用 4th 次多项式；(d) RV_D 与 $\mathrm{LTVM}_D^{\mathrm{SF}}$的关系，不采用多项式回归。在 (0.4286,0.5208) 处有显著值，采用1^{st} 次多项式回归（0.4286,0.5208）。

图 4：无标度网络中 RV_D 与 Λ_D^{SF}、$\mathrm{IVM}_D^{\mathrm{SF}}$和 $\mathrm{LTVM}_D^{\mathrm{SF}}$的回归分析

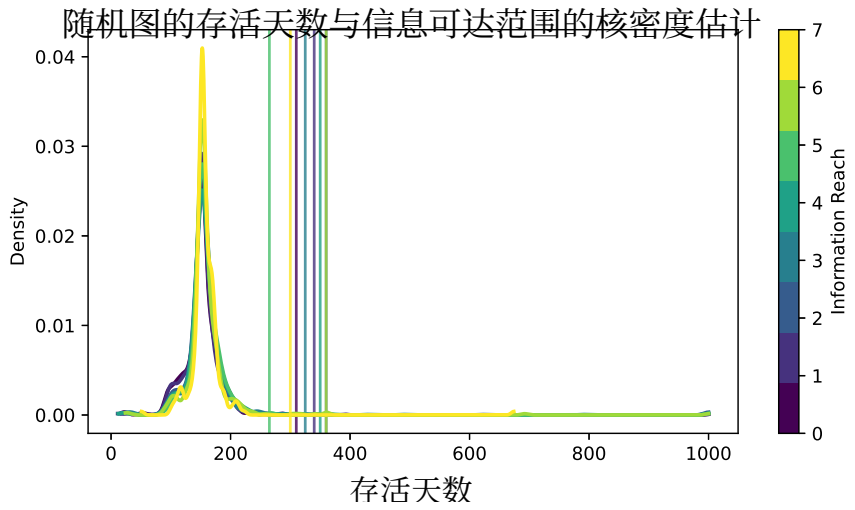


图5：随机图的存活天数与信息可达范围的核密度估计：垂直线表示区分短寿命供应链和长寿命供应链的断点

无标度拓扑中峰值数量的回归Λ_D^{SF}显示出随 RV_D （图 4a）增加而降低的斜率。Λ_D^{SF}中的峰值表示由聚类导致的生存时间局部最大似然，表明变异性较低。随着 RV_D 增加，生存时间的变异性增大，从而降低短寿命网络中的聚类并提高生存能力。

5.2 随机网络

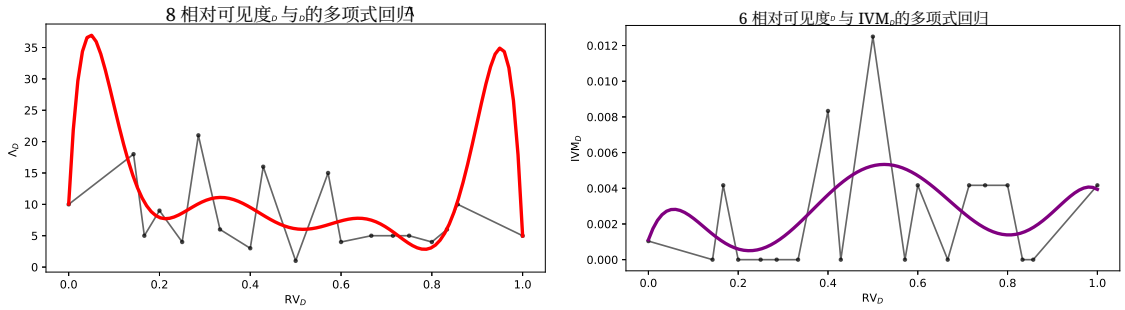
接下来，我们考察随机网络。这些网络的参数设置为（p，δ） $\in$ {（0.1，7），（0.2，6），（0.2，5），（0.3，4）}。此设置探索了一系列直径；由于直径是密度的函数，因此针对不同直径使用了不同的连接概率。

$RV_D^{\mathbf{R}}$	$B_D^{\mathbf{R}}$	$\Lambda_D^{\mathbf{R}}$	$\mathbf{IVM}_D^{\mathbf{R}}$	$\mathbf{LTVM}^{\mathbf{R}}{}_D$
0	310	10	0.001042	0.003125
0.142857	570	18	0	0
0.166667	270	5	0.004167	0.016667
0.2	540	9	0	0
0.25	740	4	0	0
0.285714	395	21	0	0
0.333333	485	6	0	0
0.4	370	3	0.008333	0.008333
0.428571	775	16	0	0
0.5	355	1	0.0125	0.016667
0.571429	430	15	0	0
0.6	315	4	0.004167	0.0125
0.666667	650	5	0	0
0.714286	220	5	0.004167	0.016667
0.75	290	5	0.004167	0.0125
0.8	255	4	0.004167	0.0125
0.833333	565	6	0	0
0.857143	225	10	0	0.008333
1	365	5	0.004167	0.005208

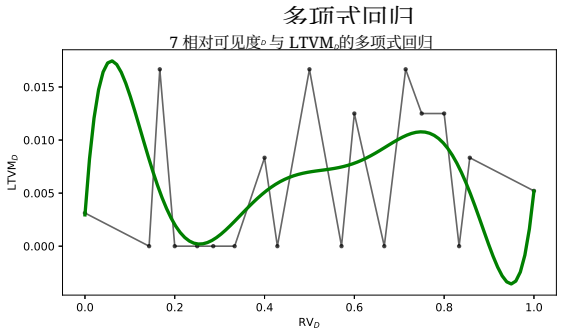
表4：随机拓扑结构的所有研究输出

图5展示了随机图中以可见性为条件的存活时间分布的核密度估计。为评估最低剩余存活能力，我们比较了可存活网络分布（表4），并在图6中将其可视化。更多详情请见附录。

S短寿命网络在单个点周围呈现出强烈的聚类，表明存在瓶 t-



(a) 相对可见度 $_{D}$ 与 $\Lambda_{D}^{\mathrm{SF}}$ 的 6th 次多项式回归。 (b) 相对可见度 $_{D}$ 与 $\mathrm{IVM}_{D}^{\mathrm{SF}}$ 的 6th 次多项式回归。 -regr



(c) RV_{D} 与 $\mathrm{LTVM}_{D}^{\mathrm{R}}$ 的 7th 次多项式回归

图6：随机网络中 RV_{D} 与 $\Lambda_{D}^{\mathrm{SF}}$、$\mathrm{IVM}_{D}^{\mathrm{SF}}$和 $\mathrm{LTVM}_{D}^{\mathrm{SF}}$的回归分析

颈；与无标度图相比，其曲线更平缓、更有序（图 3），且核密度估计两端的峰值小了一个数量级。因此，随机网络最可能在单个点发生故障，无论可见性如何，其生存能力的可能性都接近于零。

随机数据的最大值点为 (0.5,0.0125)，对应最大 $\mathrm{IVM}_{D}^{\mathrm{R}}=0.0125$。我们有，$\frac{\mathrm{maxIVM}_{D}^{\mathrm{SF}}}{\mathrm{maxIVM}_{D}^{\mathrm{R}}}=10.664$，这表明无标度结构显著增强了协作的影响（图 4）。在随机图中，相关性原则失效，这表明相关性取决于具有实际意义的图结构。其他具有类似无标度特性的拓扑结构（例如层级结构或标度）也可能支持生存能力。

在无标度拓扑中（图 4），长期生存能力和无限期可行性在每个 RV_{D}下出现的频率相近，同时考虑了潜在的离群值。正如图 4b、图 4c 和图 4d 中的回归斜率所示，生存能力与可见性呈正相关。在随机网络中，生存能力与可见性呈非线性关系，曲线周围存在较大差异。这种差异不太可能是由噪声造成的，因为该数据集涵盖了多种配置和拓扑结构，从而排除了噪声程度的影响。这表明可见性与生存能力之间存在非线性关系。值得注意的是，$\mathrm{RV}_{D}=1$ 并不能使生存能力最大化，这表明集中式控制无法随网络规模扩展，而协作受限的分布式控制能够实现所有类型中更优的生存能力。

6 讨论

在本研究中，我们探讨了如何构建一个可扩展、可自主控制的供应网络，通过向企业提供少量主观上相关的同行信息，降低涟漪效应风险。我们采用复杂网络基于智能体的仿真

模型来捕捉供应网络动态，以检验我们的假设：有限且及时更新的可见性能够实现可扩展的网络自主性。

为通过可行的隐私保护函数降低涟漪效应风险，企业传达财务政策，以指导分布式现金控制；该控制通过在指定主体周围的局部有限区域（自我网络）内进行实时广播来实现。我们发现，这种做法形成了一个可扩展的网络，能够自主控制涟漪效应，从而实现系统可行性。我们阐明了可见性与生存能力之间的关系，展示了自我网络规模如何影响动态适应性和冲击恢复 [62]。

在我们的仿真中，涟漪效应风险是内生且系统性的，而非外生且源于冲击，因此需要借助可见性形成整体视角 [14]。尽管难以区分稳态和风险源，我们的仿真使我们得以绕过这一问题，并从整体上衡量网络绩效。我们引入了新的可行性指标来衡量长期绩效，并在分析中使用了这些指标。

我们的假设得到了验证；在构建模型时，我们定义了一种运用协作智能的风险缓解方法 [37]。我们开发了一种双向风险缓解函数，以及一种可调的、通过供应链金融（SCF）实现的分布式自主控制形式，提出了一种推动供应网络迈向真正自主化的方法 [125, 124]。

我们提出了一种新颖的控制方法，用于最大限度地提升深层级企业间上游供应网络的生存能力。该方法利用有限的可见性和由枢纽理论驱动的协作，自主生成融资阈值，通过供应链金融调整现金头寸，从而确保整个网络的最佳流动性。

由于供应网络中的每家企业仅凭有限信息便实现了生存能力，这表明企业的数据收集支出和投入不必随着供应网络的增长而以相同速率扩大。由此，我们得出结论：针对我们的风险案例，我们已经定义了可扩展自主性。每家企业仅凭有限信息便实现生存能力，说明数据收集投入无需随网络增长同步扩大，从而为我们的风险案例定义了可扩展自主性。此外，由于不存在监督控制代理，这体现了一种分布式的本地去中心化控制形式。这表明，此类控制能够实现可扩展自主性，展示了分布式协作在生产型经济中的潜力。

之所以设定阈值以保护隐私，是因为政策信息依赖于合作伙伴企业，并通过本地中心性函数实现。这使风险信息能够在网络中快速传播，可能有助于风险缓解。因此，企业间隐私不仅支持有效的风险缓解，还可能是实现有效风险缓解的关键。进一步研究可见性与风险及信息传播速率之间的关系，或许能够证实这一点。

无标度网络的结果表明，可见性对生存能力的影响分阶段呈现，某些可见性水平能够更有效地优化生存能力。我们认为，这是控制响应中冲击与信息传播同步所致。进一步研究这些影响的网络理论表示，或可实现真正的可行性优化，为商业网络管理带来新的机遇 [36]。

可见性与生存能力之间的正向关系凸显了协作的重要性，而非线性阶段则表明，应重点关注相关合作伙伴。这与库存管理研究 [130] 及主动融资研究相符

[66], 这表明其在运营风险缓解方面具有更广泛的适用性。

我们的测试环境是复杂的深层供应网络拓扑，由理论复杂网络衍生而来，并经过修改以表示无环企业间上游供应网络。我们引入了一种测试方法，利用新颖的基于仿真的生存能力指标分析动态网络数据。这些指标将生存能力衡量为：超过数据推导的有限生存能力阈值（LTVM）或预先选定的仿真终止阈值（IVM）仍存活的仿真所占比例。之所以区分 LTVM 和 IVM，是因为 $t = 1000$处的生存时间既包括合理的故障，也包括因仿真时间上限而被截断的企业。在实际应用中，长期可行性（LTVM）适用于临时措施，而无限期可行性（IVM）更适合永久性机构链。

仿真环境中的生存时间分布呈现多峰性 [107], ，因此需要采用数据推导的阈值来区分长期和短期存续空间。通过生成核密度估计（KDE），得出仿真生存时间分布；选择带宽时，力求扩大短期模态中的簇数量分布，同时确保至少有一个分布仅包含一个簇。我们分析了峰值分布和生存能力阈值，发现可见性提高会减少簇的数量，但与阈值之间不存在明确的线性关系（图 4a、图6a）。

供应链内部的竞争会淘汰次优配置，从而促进存活、改进和高质量交付 [50]。虽然可见性不会延长短寿命供应网络的寿命，但它通过减少峰值数量，增加了故障的多样性，这表明可见性保留并增强了竞争的益处。这些发现表明，分布式协作如果以整体方式实施，其负面影响很小。未来的研究应更深入地探讨可见性与竞争力之间的关系，重点关注非对称可见性，并开展丰富的统计分析，以评估协作形式减少所带来的影响。

请注意图 4c 中的“离群值”。在图 4d 中排除该数据点后，可以看出一条线性的可见性与生存能力的关系。然而，由于每个数据点都汇总了多次仿真的结果，将其视为离群值可能并不恰当。基于这一点，我们证明了有限可见性可能大幅优于完全可见性。在不同条件下，这两个结论都成立。

这些是模拟环境。在实证研究或供应链管理中，统计显著性用于推断某一观测效应是否可能由偶然因素导致，或是否代表总体中的真实现象 [103]。在不涉及抽样变异的情况下对整个系统进行建模时，统计显著性的概念可能并不直接适用，也并非必要 [48], ，因为即使没有它，意义依然存在 [34]。与面临信息限制的供应链管理者不同，仿真能够揭示全系统动态，从而无需依赖统计显著性即可得出有效结论 [123]。

我们的回归分析与结果之间的差异表明存在两种范式：统计范式和仿真范式。统计范式假设在数据不完整情景下可显著发挥作用，这意味着，对于不了解供应网络演化情景的政策制定者而言，假设生存能力会随着可见性提高而增强，或许是恰当的 [23]。相反，在对整个系统行为进行建模的仿真范式下，我们得出结论：由于输出数据集中存在峰谷，最大化可见性并非最优选择。尽管两种范式存在差异，但它们可以相互借鉴 [87]。

对于政策制定者而言，要对仿真范式充满信心，就需要透彻理解供应网络演化情景。我们建议采取包容性策略：根据其风险缓解策略，在提高可见性的同时加深对情景的理解。一旦建立了足够的信心，就应选择能够满足多变量供应链风险管理目标（包括生存能力）的可见性水平。特定配置的卓越绩效（图 4、图6）凸显了利用本研究所构建的研究环境，对供应网络拓扑进行精密工程设计以最大化生存能力的潜力。

随机拓扑的回归分析均未显示出普遍的上升趋势，不过，$\mathrm{IVM}_D^{\mathrm{R}}$在$\mathrm{RV}_D = 0.5$时表现最佳（图6）。ER图本身没有固有的标度或层级结构，但将其转换为有向无环图后，市场和原材料节点会引入结构m 和 r。在随机图中观察到的可见性与无限期可行性之间的关联，可能是因为在$\mathrm{RV}_D = 0.5$时，大多数节点都能看到 m 和 r 。还需要进一步研究节点无法看到 m 或 r的情形。

总体而言，结果表明，无标度拓扑能显著提升生存能力：与随机拓扑相比，IVM提高了一个数量级，LTVM提高了两个数量级。相比之下，随机拓扑会严重限制生存能力。在这两种拓扑中，可见性与生存能力之间均呈非线性关系；不过，在无标度拓扑中，两类生存能力往往都会随着可见性的提高而增强。

在无标度供应网络中，提高可见性能够减少瓶颈，从而减少短暂存在的生存集群（图3），并扩大结果范围，提升生存能力。我们的研究发现，不可生存空间中的聚类与可生存网络规模呈负相关；聚类程度越低，对关键风险的依赖也越小。这种受可见性影响的多样性，使企业能够针对冲击采取更多样的应对措施，从而提升长期存活能力。为最大限度提升生存能力，供应链管理者应推动动态网络配置，并让关键参与者参与政策决策，以反映全球金融风险的互联性 [77, 26]。然而，后新冠疫情趋势正推动供应链区域化 [10, 51]，这可能因覆盖范围受限、金融风险传播加剧而削弱生存能力。因此，我们建议重新整合供应链，并采取区域协作政策来应对这一问题。

本研究扩展了先前的研究 [106], ：其中，财务阈值基于企业的历史行为。我们则采用其他企业当前行为的函数。先前研究表明，在风险缓解方面，关联方法优于时间方法；我们在此基础上进一步论证其生存能力。这支持采用点对点通信或交易平台 [122, 98], ，而不是优化焦点企业的可见性。未来研究应结合时间与关联信息[108, 56, 57, 59]。

本文概述的方法为进一步研究奠定了基础。将仿真应用于实证供应链并根据其动态特征进行调校后，可开展有意义的扰动分析，以评估供应链质量。这有助于设计有限的可视性信息共享方案，从而提升特定供应生态系统中的财务生存能力。

7 致谢

本研究得到英国工程与自然科学研究委员会（EPSRC）和 BT繁荣合作伙伴关系项目“下一代融合数字基础设施”的支持，项目资助编号为 EP/R004935/1；同时还得到英国工程与自然科学研究委员会（EPSRC）剑桥大学博士培训伙伴关系奖的支持，资助编号为 EP/R513180/1。

8 数据可用性声明

支持本研究结论的数据可在合理请求后向通讯作者 Y. P. 索取。

A 附录

以下部分详细介绍了我们的分析，以及对分析中各种参数之间关系的多项式回归曲线的描述。

A.1 多项式回归曲线

本小节介绍表 3 中相关配对的多项式回归曲线，这些曲线以图 4 可视化呈现，以便进一步了解所有元素。

A.1.1 无标度图

相对可见度$_D$ 与 $\Lambda_D^{\mathbf{SF}}$首先，对于无标度图，我们研究相对可见性（RV_D ）与断点之前的峰值数量 Λ_D 之间的关系。这是一个 5^{th}次多项式，精度为 $P = 0.027$ ，标准误差为 $\sigma_{\bar{D}} = 0.414$。回归曲线（图 4a）定义如下：

$$\begin{aligned}\widehat{\Lambda_D^{\mathrm{SF}}}(\mathrm{RV}_D) = &-780.0891\mathrm{RV}_D^5 + 1956.8451\mathrm{RV}_D^4 \\ &- 1723.1095\mathrm{RV}_D^3 + 627.9353\mathrm{RV}_D^2 \\ &- 90.5196\mathrm{RV}_D + 11.3497.\end{aligned}$$

相对可见度$_D$ 与 IVM$_D^{\mathbf{SF}}$对于无标度图，以故障总数的比例 $t = 1000$（$\mathrm{IVM}_D^{\mathrm{SF}}$）来衡量相对可见性（$\mathrm{RV}_D$），我们得到一个 1st 次多项式回归，精度为 $P = 0.001$ ，但标准误差为 $\sigma_{\bar{D}} = 0.255$。回归曲线（图 4b）定义如下

$$\widehat{\mathrm{IVM}^{\mathrm{SF}}}(\mathrm{RV}_D) = 0.1032\mathrm{RV}_D - 0.0026,$$

其中 $\mathrm{IVM}_D^{\mathrm{SF}}(1) = 0.1006$。

相对可见度$_D$ 与 LTVM 的关系$_D^{\mathbf{SF}}$对于无标度图，通过测量超过断点的数值比例 $\mathrm{LTVM}_D^{\mathrm{SF}}$，我们得到具有统计显著性的结果，其中 $P = 0.041$ 和 $\sigma_{\hat{D}} = 0.451$，对应一个 4th 阶多项式回归。曲线（图 4c）定义为

$$\widehat{\mathrm{LTVM}_D^{\mathrm{SF}}}(\mathrm{RV}_D) = 0.0051 - 0.5797\mathrm{RV}_D + 4.8083\mathrm{RV}_D^2 - 8.1847\mathrm{RV}_D^3 + 4.1274\mathrm{RV}_D^4.$$

(**相对可见度**$_D$；**相对可见度**$_D \neq 0.4286$) **与 LTVM 的关系**$^{\mathbf{SF}}_D$回归图（4d）定义为 。

$$\widehat{\mathrm{LTVM}}^{\mathrm{SF}}_D(\mathrm{RV}_D; \mathrm{RV}_D \neq 0.4286) = -0.0172 + 0.1863\mathrm{RV}_D,$$

以及 $P = 0$ 以及 $\sigma_{\hat{D}} = 0.017$。

A.1.2 随机网络

以下内容包含对本表中相关配对进行的多项式回归分析，以便进一步了解所有元素。

相对可见度$_D$ **与** Λ^{R}_D 我们对随机图重复分析，将Λ^{R}_D 与 RV_D进行比较。多项式回归（图6a）得出一个 8th 次多项式，其精度为 $P = 0.031$，且 $\sigma_{\bar{D}} = 0.425$。其定义如下：

$$\begin{aligned}\widehat{\Lambda^{\mathrm{R}}_D}(\mathrm{RV}_D) = \\ &- 207895.4284\mathrm{RV}^8_D + 828388.3627\mathrm{RV}^7_D \\ &- 1358506.6894\mathrm{RV}^6_D + 1182795.9815\mathrm{RV}^5_D \\ &- 586913.5003\mathrm{RV}^4_D + 164780.6428\mathrm{RV}^3_D \\ &- 24049.5475\mathrm{RV}^2_D + 1395.0947\mathrm{RV}_D \\ &+ 10.0570.\end{aligned}$$

相对可见度$_D$ **与 IVM**$^{\mathbf{R}}_D$ 我们测量相对可见性 RV_D与$t = 1000$处所有故障的比例 $\mathrm{IVM}^{\mathrm{R}}_D$，得到了一个 6th 次多项式回归（图6b），其准确度为$P = 0.05$，但标准误差为 $\sigma_{\bar{D}} = 0.473$。该曲线定义如下：

$$\begin{aligned}\widehat{\mathrm{IVM}^{\mathrm{R}}_D}(\mathrm{RV}_D) = &- 2.2411\mathrm{RV}^6_D + 6.9729\mathrm{RV}^5_D \\ &- 8.0382\mathrm{RV}^4_D + 4.1713\mathrm{RV}^3_D \\ &- 0.9332\mathrm{RV}^2_D + 0.0711\mathrm{RV}_D \\ &+ 0.0011.\end{aligned}$$

相对可见度$_D$ **与 LTVM**$^{\mathbf{R}}_D$ 最后，我们讨论 RV_D 与 $\mathrm{LTVM}^{\mathrm{R}}_D$的关系。在这种情况下，我们得到一个 7th 次多项式（图6c），其 $P = 0.040$，且 $\sigma_{\bar{D}} = 0.449$，定义如下：

$$\begin{aligned}\widehat{\mathrm{LTVM}^{\mathrm{R}}_D}(\mathrm{RV}_D) =&28.7872\mathrm{RV}^7_D - 102.8713\mathrm{RV}^6_D \\ &+ 147.1856\mathrm{RV}^5_D - 107.4140\mathrm{RV}^4_D \\ &+ 41.8254\mathrm{RV}^3_D - 8.1099\mathrm{RV}^2_D \\ &+ 0.5993\mathrm{RV}_D + 0.0029.\end{aligned}$$

A.2 比较回归分析

为考虑回归分析中的非线性，我们将各部分划分为不同区域，具体包括低（L）、中低（ML）、中（M）、中高（MH）和高（H）区域，

其中 $d \in D$ 定义为，

$$
\begin{aligned}
L &:= [0, 0.1667] \\
\mathrm{ML} &:= (0.1667, 0.3333] \\
M &:= (0.3333, 0.6667] \\
\mathrm{MH} &:= (0.6667, 0.8333] \\
H &:= (0.8333, 1].
\end{aligned}
$$

A.2.1 无标度网络

图 3 展示了无标度图中以可见性为条件的各生存时间分布的核密度估计。我们可以看到，短寿命供应网络最为常见：给定相对可见度下，平均有 0.8999 次仿真在 B_D之前终止。除此之外，给定相对可见度下，平均有 0.0511 次仿真属于长期但有限的情况，分布在每个 B_D 之后那段漫长、平坦且接近零的区域。最后，给定相对可见度下，平均有 0.0490 次仿真会无限期持续，从而在核密度估计末端形成峰值。

相对可见度$_D$ 与 Λ_D^{SF}回归（图 4a）呈现明显的下降趋势，标准误差为$\sigma_{\bar{D}} = 0.414$，这可能是由于数据呈三角形模式，以及 (0.2857,21) 和 (0.1429,18) 这两个异常高点所致，影响了其与平滑近似的相似性。由于 $\Lambda_D^{\mathrm{SF}}(0) = 11.3497$ 和 $\Lambda_D^{\mathrm{SF}}(1) = 2.4119$，其梯度为 -8.9378，呈现出强烈的下降趋势 Λ_D^{SF}。

相对可见度$_D$ 与 IVM 的比较$_D^{\mathrm{SF}}$回归（图 4b）显示，相对可见度$_D$ 与 $\mathrm{IVM}_D^{\mathrm{SF}}$之间存在很强的正线性关系，这表明在实现完全系统性合作的情况下，$\sim 10\%$ 的运行可以无限期存续。然而，实际结果表明，即使可见性较低，绩效也有可能大幅提升。最高点为 (0。75，0。1333)，此处 $\max \mathrm{IVM}_D^{\mathrm{SF}}$(相对可见度$_D$) $= 0.1333$ 且 $\operatorname{argmax}^{\mathrm{RV}_D}\mathrm{IVM}_D^{\mathrm{SF}} = 0.75$，但 $\mathrm{IVM}_D^{\mathrm{SF}}$(0。75) $= 0.0748$，高估了 0.0585。其两侧分别有一对局部极小值，坐标为 (0。6667，0。0167) 和 (0。8333，0。0125)，分别高估了 0.0495 和 0.0709。在此之前，坐标为 (0。6000，0。0958) 处还有一个局部最大值，该处低估了 0.0392；在它之前还有一系列相邻取值，同样被低估。

我们可以看到，$\mathrm{IVM}_D^{\mathrm{SF}}$可在 M、MH 和 H 中优化，其中 M 将可见性降至最低，从而节省支出；同时，通过降低可见性，即使网络直径的调节不够精确（这是可以预期的），也能实现优化。降低可见性是一项节省成本措施，因此颇具吸引力。MH 能达到真正的最大值，但生存能力的双向容错范围很窄，因此存在风险。 H 可带来高回报，且置信度高，生存能力也接近估计范围，但要求完全合作，这可能难以实现。

因此，根据 IVM，将可见性上限设为 0.6，或许是兼顾可见性代价、生存能力及其可靠性的理想选择。

相对可见度$_D$ 与 LTVM 的关系$_D^{\mathrm{SF}}$在此回归中（图 4c），$\mathrm{LTVM}_D^{\mathrm{SF}}(1) = 0.1764$。从 (0，0.0051) 到 (1，0.1764) 画一条直线，斜率为 0.1713，表明可见性与变点后的存活之间存在很强的关系

。不过，曲线并非单调变化。在 (0.0733， -0.0147) 和 (0.8519，0.1144) 处可见局部极小值，在 (0.5620，0.1569) 处可见局部最大值。采用 M、MH、 H 分离方法，我们还可以看到 MH 区域相对缩小，而 M 和 H的取值较高，其中数据的全局最大值位于 M中的 (0.4286，0.5208)。由此可以解释该图相较于 ITVM^{SF} 图的曲率变化，因为 M 有所增加，MH 有所减少，而 H 有所增加。

虽然 (0.4286,0.5208) 是从各种网络和仿真中收集到的数据点，但它的最大值异常突出。现在，我们研究去除该数据点后的数据回归。

(相对可见度$_D$;相对可见度$_D \neq 0.4286$) 与 LTVM 对比$^{\mathbf{SF}}_D$该回归（图 4d）呈线性，在无标度图的所有指标中，其$\widehat{\sigma}_D$最低，而 LTVM$^{\mathrm{SF}}_D$(1;相对可见度$_D \neq 0.4286$) $= 0.1691$。去除 (0.4286,0.5208) 后，回归变为一次回归，但与 LTVM$^{\mathrm{SF}}_D$相比，MH 相对于 M 和 H 的优势仍然较小。在这种情况下，$\langle M\rangle = 0.0854 < \langle \mathrm{MH}\rangle = 0.1177 < \langle H\rangle = 0.1880$，这表明应最大化可见性。不过，每组数据都受最小值限制，而 M 覆盖的范围最广，因此最具可预测性。然而，这些最小值并不像 LTVM^{SF} 图中的那么小，而且也会随相对可见度增加。因此我们可以看到，排除 (0.4286,0.5208) 后，提高可见性很可能会提升生存能力，包括长期存续以及无限期存续的供应网络；但实现完全合作所需的风险和支出，或许更能证明在 M 和 MH 的上限范围内提高可见性的合理性，因为这两个范围分别包含各自的最大值。

由于对于（RV$_D$；RV$_D \neq 0.4286$）与 LTVM$^{\mathrm{SF}}_D$，$\widehat{\sigma}_D$达到最小值，这可能表明我们系统中的非线性源于供应网络的特定配置。为进一步研究这一点，我们对基于 Erd˝os-R´enyi 随机图生成的供应网络重复进行此项分析。

A.2.2 随机网络

对于随机图，短寿命供应网络几乎完全占主导地位：给定 RV 的仿真中，平均有 0.9941 次在 B_D 之前终止。此后，给定 RV 的仿真平均有 0.0035 次属于长期但有限的情况，占据每个 B_D 之后那段漫长、平坦且接近零的区域。

我们还观察到，相较于无标度图，其显著的峰值分布更紧密地聚集在 150 到 200 之间。

RV$_D$ 与 $\Lambda^{\mathbf{R}}_D$ 在此情况下，短时模拟紧密聚集在单个区域附近。噪声程度也几乎没有变化。我们针对每个已识别的 RV$_D$ 区域考察回归（图 4a）。

$\widehat{\Lambda^{\mathrm{R}}_D}$峰值，与 $IVM^{\mathrm{R}}_D\widehat{\ }$ $\widehat{L}$ 在 (0.04766, 37.0053) 处有一个和 $LTVM_{\mathrm{R}D}$中的峰值相吻合。随后，ML 在 (0.2136, 7.7134) 处出现一个谷值，与 $IVM^{\mathrm{R}}_D\widehat{\ }$和 $LTVM^{\mathrm{R}}_D$中的谷值相吻合。 M包含三个拐点：在 (0.3351, 11.103) 处有一个峰值，在 (0.5156, 6.0183) 处有一个谷值，并在 (0.6403,7.7858) 处再次出现峰值。这种模式对应于 IVM^{R}_D的 M中的$\widehat{\ }$奇异峰，相较于 IVM$^{\mathrm{R}}_D$中较高的 (0.5, 0.0125) 点呈反向变化。$\widehat{\ }$随后，MH 在 (0.7826, 2.8318) 处出现一个谷值，对应于 IVM^{R}_D中的谷值

以及 $LTVM_D^{\mathrm{R}}$中的峰值。最后， H在 (0.9518, 34.9296) 处出现一个峰值，对应于 IVM_D^{R}中的峰值以及 $LTVM_{\mathrm{R}D}$中的谷值。

相对可见度$_D$ 与 IVM 的比较$^{\mathrm{R}}_D$ 从所展示的数值细节来看，存在显著差异。曲线（图6b）没有总体上升趋势，但有三个局部最大值，分别位于 (0.0567,0.0028)、(0.5254, 0.0053) 和 (0.9822,0.0040)，以及两个局部最小值，分别位于 (0.2249, 0.0005) 和 (0.8036, 0.0014)。在这种情况下， M 使 IVM 最大化$^{\mathrm{R}}_D$，MH 使其最小化，而 H 达到局部最大值。如果我们也考虑 L 和 ML，就会发现 ML 包含一个局部最小值，而 L 包含一个局部最大值；二者的高度都与 MH 和 H中的对应极值大致相同，偏度也仅有名义上的差异。这表明该分布以 $\mathrm{RV}_D = 0.5$为中心呈镜像对称。

因此，有 3 种最优策略：将可见性限制在非零的 L、 M 的中心或 H 的最大值，同时避开 LM 或 MH。网络覆盖率为零时仍有非零绩效，可能是因为该网络具有完全随机的结构。 M范围覆盖表现最佳，是因为系统中的主体在相对可见度边界为 0.5 时获得了最相关的信息，从而促进合作。完整网络覆盖效果良好，则是因为它涵盖了整个系统。结果表明，随机图的结果本身并非随机。我们认为，这是因为仿真中的破产操作包含系统性的修剪行为。这一点或许值得进一步研究。

$\mathrm{RV}_D = 0.5$ 处的最大值也表明，根据 IVM$^{\mathrm{R}}_D$，在完整的随机系统中，主体应具备一半的网络可见性（若要具备任何可见性），或者以最低限度的可见性达到局部最优水平。随机图的无结构特性可能导致信息相关性不会随可见性线性增长。第一个峰值表明局部区域具有相关性，第三个峰值则表明整个网络的动态具有相关性；而中间的峰值说明，局部相关性与系统相关性之间的平衡能够带来最高的生存能力。然而，随机图中出现的取值仍然非常低，几乎没有供应网络能够无限期保持生存能力。

根据图6b，第一个峰值出现在 L的邻域分别对 m 和 r 可见时。对于 M中的第二个峰值，尽管随机网络的直径为其一半——而 Erd˝os R´enyi 随机图的平均路径长度会随规模呈对数增长，但对调整后的随机图进行遍历的情况尚不明确。

每个峰值旁边都有一个谷值，此处节点可见性尚未与 m和 r协调一致，而是对网络中的节点赋予了更高权重；由于随机性，这些节点在其内部预测函数中起到噪声的作用。 H中的峰值同时也是所有节点都能看到 m 和 r 的时候。

相对可见度$_D$ 与 LTVM 对比$^{\mathrm{R}}_D$ 该曲线（图6c）没有明显的方向性，不过可以根据拐点及其与 L、ML、 M、MH和 H之间的关系来描述。

曲线的第一个峰值出现在 L，位于 (0.0589,0.0174)，可能受到 (0.1667, 0.0167) 的偏移影响；这与 IVM^{R} 回归十分吻合，但峰值放大至全局最大值。第一个谷值位于 (0.2554,0.0002)，处于 ML 中，与跨越该区间的零值相符。另一个峰值出现在 (0.7488, 0.0108)，位于 MH 中，此前 M一直稳步增长。最后，还有一个谷值

$\frown$在 H 处为负 LTVM$_D^{\mathrm{R}}$(相对可见度$_D$)，位于 $(0.9492, -0.0035)$，可能是由于过冲，尽管仍然$\frown$具有 LTVM$_D^{\mathrm{R}}(1) = 0.0052 =$ LTVM$_D^{\mathrm{R}}(1)$。

讨论这些取值时，我们首先注意到，max$^{\mathrm{RV}}{}_D$LTVM$_D^{\mathrm{R}} = 0.0167$，且LTVM$_D^{\mathrm{R}}$ 生存能力的比例与IVM$_D^{\mathrm{R}}$处于同一数量级，并且根据相对可见度，只有2%的可能网络被限制为具有生存能力。在结构化无标度情形下，LTVM$_D^{\mathrm{SF}}$比IVM$_D^{\mathrm{SF}}$大一个数量级。因此，随机图模拟中相对可见度为 M的网络如果具有生存能力，则是无限期的且很少见；而相对可见度为 L 或MH的网络如果具有生存能力，则是长期但有限的，出现频率也相同。

这一点可以从图6c所呈现的拓扑结构与图6b明显不同看出：垂直比例大致相同，但对于极端RV，仍存在一些长期生存能力的情况。

参考文献

[1] M. Abbasi 和 L. Varga. 从复杂系统视角引导供应链。《欧洲管理研究杂志》，27(1):5–38，2022年9月。[2]M. M. Ali、M. Z. Babai、J. E. Boylan 和 A. A. Syntetos. 信息未共享时的供应链预测。*European Journal of Operational Research*，260(3):984–994，2017年8月。[3] M. Alirezaie、W. Hoffman、P. Zabihi、H. Rahnama 和 A. Pentland. 面向透明、高效的中小企业贸易融资的去中心化数据与人工智能编排。《金融机构风险管理杂志》，17(1):38，2024年1月。[4] F. Allen 和 D. Gale. 金融传染。《政治经济学杂志》，108(1):1–33，2000年2月。[5] W. N. Anderson 和 T. D. Morley. 图的拉普拉斯矩阵的特征值。《线性与多重线性代数》，18(2):141–145，1985年3月。[6] S. Arora 和 A. Brintrup. 企业在供应链中的位置如何影响其绩效？一项实证研究。《应用网络科学》，6(1)，2021年12月。[7] M. H. Ashraf 和 M. G. Yalcin. 供应链“流”管理。载于《帕尔格雷夫供应链管理手册》，第341–362页。帕尔格雷夫·麦克米伦，2024年。[8] J. Bai. 逐次估计多个结构突变。《计量经济学理论》，13(3):315–352，1997年。[9] A.-L. Barab´asi 和 R. Albert. 随机网络中标度的涌现。《科学》，286(5439):509，1999年10月。[10] G. Barthe-Dejean. 范式转变：区域化与后新冠疫情风险矩阵。《金融机构风险管理杂志》，14:355–366，2021年。

[11] S. Battiston、D. Delli Gatti、M. Gallegati、B. Greenwald 和 J. E. Stiglitz. 生产网络中的信贷链与破产传播。《经济动力学与控制杂志》，31(6):2061–2084，2007年。[12] G. Beaumier 和 M. Cartwright. 半导体供应链中的跨网络武器化。《国际研究季刊》，68(1)，2023年12月。[13] L. Benveniste、D. R. Capozza 和 P. J. Seguin. 流动性的价值。《房地产经济学》，29(4):633–660，2001年。[14] K. Bimpikis、D. Fearing 和 A. Tahbaz-Salehi. 供应链网络中的多源采购与协调失灵。《运筹学》，66(4):1023–1039，2018年7月。[15] J. R. Birge、A. Capponi 和 P. C. Chen. 供应链网络中的中断与改道。《运筹学》，71(2):750–767，2023年3月。[16] P. N. Bloom 和 V. G. Perry. 零售商势力与供应商福利。《零售学杂志》，77(3):379–396，2001年。[17] B. Bod´o、J. K. Brekke 和 J.-H. Hoepman. 去中心化：多学科视角。《互联网政策评论》，10(2)，2021年6月。[18] S. P. Borgatti 和 X. Li. 供应链背景下的社会网络分析。《供应链管理学报》，45(2):5–22，2009年。[19] A. Brintrup 和 A. Ledwoch. 供应网络科学：经典领域中一种新视角的兴起。《混沌：非线性科学跨学科期刊》，28(3):033120，2018年3月。[20] A. Brintrup、A. Ledwoch 和 J. Barros. 全球汽车行业的拓扑鲁棒性。《物流研究》，9(1):1，2016年11月。[21] A. Brintrup、Y. Wang 和 A. Tiwari. 作为复杂系统的供应网络：基于网络科学的刻画。《*IEEE*系统杂志》，11(4):2170–2181，2017年11月。[22] D. S. Callaway、M. E. J. Newman、S. H. Strogatz 和 D. J. Watts. 网络鲁棒性与脆弱性：随机图上的渗流。《物理评论快报》，85(25):5468–5471，2000年4月。[23] M. Caridi、A. Moretto、A. Perego 和 A. Tumino. 供应链可见性的益处：一种价值评估模型。《国际生产经济学杂志》，151:1–19，2014年。[24] A. Cassar 和 N. Duffy. 局部网络与全局网络下的金融危机传染。载于 F. Luna 和 A. Perrone 编，《经济与金融中的基于智能体方法》，第17卷，第5章，第111–131页。Springer，纽约，第1版，2002年。[25] F. Chen、J. K. Ryan 和 D. Simchi-Levi. 指数平滑预测对牛鞭效应的影响。《海军研究后勤学》，47(4):269–286，2000年。

[26] N. Chen、S. Li 和 S. Lu。全球金融体系的极端风险关联性：七国集团和金砖国家的证据。《跨国金融管理杂志》，69，2023年9月。[27] N. Chen、X. Liu 和 D. D. Yao。金融系统性风险建模的优化视角：网络效应与市场流动性效应。《运筹学》，64(5):1089–1108，2016年9月。[28] T. K. Chen、H. H. Liao 和 H. J. Kuo。内部流动性风险、金融牛鞭效应与公司债券收益率利差：供应链视角。《银行与金融杂志》，37(7):2434–2456，2013年。[29] Y. Cheng、D. L. Olson 和 A. Dolgui。通过优惠信贷融资以协调资本约束型供应链。《国际生产研究杂志》，2021年。[30] W. Cho、J. y. F. Ke 和 C. Han。对议价能力的运用及其对供应链财务绩效影响的实证考察。《采购与供应管理杂志》，25(4)，2019年10月。[31] T. Y. Choi、K. J. Dooley 和 M. Rungtusanatham。供应网络与复杂自适应系统：控制还是涌现。《运营管理杂志》，19(3):351–366，2001年。[32] T. Y. Choi 和 Y. Hong。揭示供应网络结构：本田、讴歌和戴姆勒-克莱斯勒的案例研究。《运营管理杂志》，20(5):469–493，2002年。[33] T. Y. Choi、S. Narayanan、D. Novak、J. Olhager、J. B. Sheu 和 F. Wiengarten。管理扩展供应链。*Journal of Business Logistics*，第200–206页，2021年。[34] J. Cohen。地球是圆的（p¡. 05）。《美国心理学家》，49(12)，1994年。[35] V. Cu˜nat。贸易信贷：供应商作为债务催收者和保险提供者。《金融研究评论》，20(2):491–527，2007年3月。[36] M. M. Dekker、R. D. Schram、J. Ou 和 D. Panja。传播脆弱性对拓扑复杂性的隐性依赖。《物理评论*E*》，105(5)，2022年5月。[37] P. Devadasan、H. Zhong 和 S. Y. Nof。基于知识的服务规划中的协作智能。《专家系统及其应用》，40(17):6778–6787，2013年。[38] A. Dolgui 和 D. Ivanov。涟漪效应与供应链中断管理：新趋势与研究方向，2021年。[39] A. Dolgui、D. Ivanov 和 M. Rozhkov。涟漪效应会影响牛鞭效应吗？对供应链结构与运营动态的综合分析。《国际生产研究杂志》，58(5):1285–1301，2020年3月。

[40] A. Dolgui、D. Ivanov 和 B. Sokolov。供应链中的涟漪效应：分析与近期文献综述。《国际生产研究杂志》，56(1-2):414–430，2018年。[41] P. Erd˝os 和 A. R´enyi。关于随机图 I。《数学出版物》（德布勒森），6:290–297，1959年。[42]E. Fern´andez、S. Iglesias-Antelo、V. L´opez-L´opez、M. Rodr´ıguez-Rey 和 C. M. Fernandez-Jardon。企业和行业效应对小型、中型和大型企业绩效的影响。《*BRQ*商业研究季刊》，22(1):25–35，2019年1月。[43] A. Ferraris、G. Santoro 和 L. Dezi。跨国公司的子公司如何提升创新绩效？外部来源与知识管理能力的作用。《知识管理杂志》，21(3)，2017年。[44] H. R. Feyzmahdavian、M. Johansson 和 T. Charalambous。压缩干扰函数与分布式功率控制律的收敛速率。载于*2012*年*IEEE*国际通信会议（*ICC*），第4395–4399页。IEEE，2012年6月。[45] L. C. Freeman。基于中介性的中心性度量。《社会计量学》，40(1):35，1977年3月。[46] V. Gafiychuk、I. Lubashevsky 和 A. Stosyk。关于层级组织的供应网络系统固有标度性质的几点说明。*arXiv*预印本，2000年。[47] D. D. Gatti、C. Di Guilmi、E. Gaffeo、G. Giulioni、M. Gallegati 和 A. Palestrini。商业波动研究的新方法：异质交互主体、尺度律与金融脆弱性。《经济行为与组织杂志》，56(4 SPEC. ISS.):489–512，2005年。[48] A. Gelman 和 H. Stern。“显著”与“不显著”之间的差异本身并无统计显著性。《美国统计学家》，60(4):328–331，2006年11月。[49] L. M. Gelsomino、R. Mangiaracina、A. Perego 和 A. Tumino。供应链金融：文献综述。《国际实体分销与物流管理杂志》，46(4):348–366，2016年5月。[50] M. Gofman、G. Segal、Y. Wu、S. Giglio、R. Gutierrez、B. Herskovic、B. Julio、R. Kaniel、M. Kilic、L. Kogan、P. Konermann、R. Novy-Marx、A. Moreira、A. Savov、I. Shalias-tovich、J. Tu、S. Tuzel、A. Yaron 和 H. Zhang。生产网络与股票回报：垂直创造性破坏的作用。《金融研究评论》，33(12):5856–5905，2020年。[51] P. Goldberg 和 T. Reed。全球经济正在去全球化吗？载于*BPEA*会议论文初稿，第1–51页，2023年。[52] D. R. Grafius、L. Varga 和 S. Jude。基础设施相互依存关系：复杂性带来的机遇。《基础设施系统杂志》，26(4)，2020年12月。

[53] C. Harland、R. Brenchley 和 H. Walker。供应网络风险。《采购与供应管理杂志》，9(2):51–62，2003年。[54] S. Hasan 和 G. Foliente。极端事件中基础设施系统相互依赖性及失效社会经济影响的建模：新兴研发挑战。《自然灾害》，78(3):2143–2168，9 2015。[55] M. Herrera、Y. Proselkov、M. Perez-Hernandez 和 A. K. Parlikad。用于核心网络和城域网络互联网流量异常检测的图傅里叶变换时间序列挖掘。*IEEE Access*，9:8997–9011，2021年。[56] E. Hofmann。金融资源流：供应链不可或缺的一部分。《战略供应链设计》，第173–201页，2007年。[57] E. Hofmann、D. Maucher、S. Piesker 和 P. Richter。利用现金转换周期优化增强内部融资能力。载于《摆脱营运资金陷阱》，第13–20页。Springer Berlin Heidelberg，2011年。[58] E. Hofmann 和 E. Rutschmann。供应链中的大数据分析与需求预测：概念分析。《国际物流管理杂志》，29(2):739–766，2018年。[59] E. Hofmann、S. Templar、D. S. Rogers、T. Y. Choi、R. Leuschner 和 R. Y. Korde。供应链融资与大流行病：管理现金流以保持企业及其价值网络的健康。《罗格斯商学院评论》，6(1):1–23，2021年。[60] S. Hosseini 和 K. Barker。利用贝叶斯网络对基础设施韧性进行建模：以内河港口为例。《计算机与工业工程》，93:252–266，3 2016。[61] S. Inomata 和 T. Hanaka。衡量全球供应链面临的网络集中风险：数量与频率。《结构变化与经济动态》，68:177–193，3 2024。[62] D. Ivanov。可生存供应链模型：整合敏捷性、韧性和可持续性视角——COVID-19疫情带来的启示与超越。《运筹学年鉴》，2020年。[63] D. Ivanov。供应链存续能力与COVID-19疫情：四大适应策略的概念性和形式化概括。《国际生产研究杂志》，59(12):3535–3552，6 2021。[64] D. Ivanov。停电与供应链：跨结构涟漪效应、绩效、韧性和生存能力影响分析。《运筹学年鉴》，2022年。[65] D. Ivanov。用于供应链压力测试、韧性和生存能力的智能数字孪生（iDT）。《国际生产经济学杂志》，263，9 2023年。[66] D. Ivanov。中断期间及之后供应链中的现金流动态。《交通运输研究*E*辑：物流与运输评论》，185，5 2024年。

[67] D. Ivanov 和 A. Dolgui。交织供应网络的生存能力：将供应链韧性视角扩展至生存能力。由COVID-19疫情暴发引发的立场论文。《国际生产研究杂志》，58(10):2904–2915，5 2020年。[68] D. Ivanov、B. Sokolov 和 A. Dolgui。供应链中的涟漪效应：中断管理中“效率—灵活性—韧性”的权衡。《国际生产研究杂志》，52(7):2154–2172，2014年。[69] R. Kalaiarasan、J. Olhager、T. K. Agrawal 和 M. Wiktorsson。供应链可视性的ABCDE：系统性文献综述与框架。《国际生产经济学杂志》，248，6 2022年。[70]M. N. Katehakis、J. Yang 和 T. Zhou。涉及离散非易腐商品未知需求的动态库存与价格控制。《运筹学》，68(5):1333–1355，9 2020年。[71] Y. Kim、T. Y. Choi、T. Yan 和 K. Dooley。供应网络的结构性研究：社会网络分析方法。《运营管理杂志》，29(3):194–211，2011年。[72] E. E. Kosasih、E. Papadakis、G. Baryannis 和 A. Brintrup。利用神经符号方法对供应链管理中的可解释人工智能进行综述。《国际生产研究杂志》，62(4):1510–1540，2 2024年。[73] A. Ledwoch、H. Yasarcan 和 A. Brintrup。供应网络拓扑对风险管理有效性的调节影响。《国际生产经济学杂志》，197:13–26，11 2018年。[74] H. Lee、C. Tang、S. A. Yang 和 Y. Zhang。信息摩擦和金融科技存在下的动态贸易融资。《制造与服务运营管理》，25(6):2038–2055，11 2023年。[75] H. L. Lee、V. Padmanabhan 和 S. Whang。供应链中的牛鞭效应。《斯隆管理评论》，第93–102页，1997年。[76] H. L. Lee、V. Padmanabhan 和 S. Whang。供应链中的信息失真：牛鞭效应，12 2004年。[77] M. Leibrock。互联性再探。技术报告，DTCC，2022年。[78] R. Leuschner、T. Y. Choi、D. S. Rogers、E. Hofmann 和 S. Templar。“融资”作为供应链管理的新目的：为供应链融资提出论证。《采购与供应管理杂志》，29(5)，12 2023年。[79] M. Li、Z. Alam、E. Bernardes、I. Giannoccaro、P. F. Skilton、M. S. Rahman 和 P. Bari。眼不见，心不烦？扩展供应链网络中财务挤压影响的建模。*Journal of Business Logistics*，42(2):233–263，2021年。

[80] Y. Li、K. Chen、S. Collignon 和 D. Ivanov。供应链网络中的涟漪效应：中断的正向与反向传播、网络健康和企业脆弱性。*European Journal of Operational Research*，291(3):1117–1131，2021年6月。[81] Y. Li 和 C. W. Zobel。探讨涟漪效应存在时的供应链网络韧性。《国际生产经济学杂志》，228，2020年10月。[82] H. Liu、Y. Han 和 A. Zhu。COVID-19疫情期间应对负载不足级联故障的供应链存续能力与适应性建模。*Nonlinear Dynamics*，110(3):2931–2947，2022年11月。[83] J. Lohmer、N. Bugert 和 R. Lasch。区块链协调的供应链中的韧性策略与涟漪效应分析：一项基于主体的仿真研究。《国际生产经济学杂志》，228，2020年10月。[84] A. Malak-Rawlikowska、D. Milczarek-Andrzejewska 和 J. Falkowski。农民的议价能力与投入品价格：我们能从自我报告的评估中了解到什么？*Social Sciences*，8(2)，2019年。[85] M. Maloni 和 W. C. Benton。供应链中的权力影响。*Journal ofBusiness Logistics*，21:16–36，2000年。[86] T. Miller 和 S. Wongsaroj。多米诺效应：延迟付款的影响。技术报告，Sage，2017年。[87] M. S. Morgan。实验与模型：新现象、推断与意外发现。*Journal of Economic Methodology*，12(2):317–329，2005年6月。[88] Y. Moriahra。纵向解体与纵向再整合：现代生产体系的局限。*Japanese Political Economy*，46(2-3):176–199，2020年。[89] J. Moura 和 D. Hutchison。信息物理系统韧性：研究现状、研究问题与未来趋势。*arXiv*，第42页，2019年。[90] J. Murfin。大型零售商通过向较小型供应商借款来挤压他们，2014年。[91] S. N. Naghshbandi、L. Varga 和 T. Dolan。综述与基础设施系统相当的系统的涌现行为，以及可用于分析基础设施系统的分析方法。技术报告，National Infrastructure Commission，2020年。[92] S. N. Naghshbandi、L. Varga、A. Purvis、R. McWilliam、E. Minisci、M. Vasile、M. Troff aes、T. Sedighi、W. Guo、E. Manley 和 D. H. Jones。复杂工程系统与工程化系统韧性研究方法综述。*IEEE Access*，8:87775–87799，2020年。[93] A. Nair 和 J. M. Vidal。供应网络拓扑及其抵御中断的稳健性——基于多智能体模型的研究。《国际生产研究杂志》，49(5):1391–1404，2011年3月。

[94] D. Nawrocki 和 T. Vaga。市场收益的分岔模型。*QuantitativeFinance*, 14(3):509–528，2014年3月。[95] K. Ogawa、O. Tashiro、T. Kito、L. Yin、J. Chong 和 K. Yamauchi。日本供应链金融的发展。技术报告，日本金融科技协会，2020 年。.[96] E. C. Ozelkan 和 M. C¸akanyildirim。定价中的反向牛鞭效应。*EuropeanJournal of Operational Research*，192(1):302–312，2009年。[97] A. Pagani、G. Mosquera、A. Alturki、S. Johnson、S. Jarvis、A. Wilson、W. Guo 和 L. Varga。韧性还是稳健性：识别铁路网络中的拓扑脆弱性。*Royal Society Open Science*，6(2):181301，2019年2月。[98] X. Pan、S. Guo 和 J. Chu。P2P供应链融资、研发投资与公司的创新效率，2021年。[99] E. Parzen。概率密度函数与众数的估计。*Ann.Math. Statist*，33:1065–1076，1962年。[100] S. D. Pathak、J. M. Day、A. Nair、W. J. Sawaya 和 M. Murat Kristal。供应网络的复杂性与适应性：运用复杂自适应系统视角构建供应网络理论。*Decision Sciences*, 38(4):547–580，2007年。[101] I. Perko。基于行为的短期发票违约概率评估。*European Journal of Operational Research*，257(3):1045–1054，2017年3月。[102] T. J. Pettit、J. Fiksel 和 K. L. Croxton。确保供应链韧性：概念框架的构建。*Journal of Business Logistics*，31(1):1–21，2010年3月。[103] J. Pfeffer 和 R. I. Sutton。循证管理。*Harvard Business Review*，84(1):62–74，2006年1月。[104]Y. Proselkov、M. Herrera、M. P. Hernandez、A. K. Parlikad 和 A. Brintrup。动态分散式关键性计算的信息价值。*IFAC-PapersOnLine*，55(2):408–413，2022年。[105] Y. Proselkov、M. Herrera、A. K. Parlikad 和 A. Brintrup。电信网络关键性的分布式动态度量。载于面向未来工业的服务导向、全息与多智能体制造系统，第1–12页，法国巴黎，2020年。Springer。[106] Y. Proselkov、J. Zhang、L. Xu、E. Hofmann、T. Y. Choi、D. Rogers 和 A. Brintrup。复杂适应性供应网络中的金融涟漪效应：基于代理的模型。《国际生产研究杂志》，第1–23页，2023年2月。[107] Y. Proselkov、J. Zhang、L. Xu、E. Hofmann、T. Y. Choi、D. Rogers 和 A. Brintrup。复杂适应性供应网络中的金融涟漪效应：基于代理的模型。《国际生产研究杂志》，62(3):823–845，2024年2月。

[108] W. S. Randall 和 M. T. Farris。供应链融资：利用现金到现金变量强化供应链。《国际实体分销与物流管理杂志》，39(8):669–689，8 2009年。[109] C. Rivera-Gonzalez、J. Holguin-Veras 和 O. Calderon。以供应链为重点的大都市区中心性与扩散度量。交通地理学期刊，107:103553，2 2023年。[110] M. Rosenblatt。关于密度函数的某些非参数估计的评论。数学统计年鉴，27(3):832–837，1956年。[111] A. Salvador Palau、M. H. Dhada 和 A. K. Parlikad。用于协同预测的多智能体系统架构。智能制造期刊，30(8):2999–3013，2019年。[112] B. Sch¨afer、D. Witthaut、M. Timme 和 V. Latora。电网中动态诱发的级联故障。自然通讯，9(1):1975，5 2018年。[113] A. J. Schmitt、S. A. Sun、L. V. Snyder 和 Z. J. M. Shen。集中化与去集中化：风险池化、风险多元化和供应链中断。*Omega*（英国），52:201–212，4 2015年。[114] B. B. Shao、Z. M. Shi、T. Y. Choi 和 S. Chae。识别供应网络中隐藏的关键供应商的数据分析方法：枢纽供应商指数的开发。决策支持系统，114:37–48，10 2018年。[115] B. Shen、Y. Cao 和 X. Xu。供应链中绿色产品与非绿色产品的产品线设计和质量差异化。《国际生产研究杂志》，58(1):148–164，1 2020年。[116] B. W. Silverman。《统计与数据分析的密度估计》。劳特利奇，伦敦，1986年。[117] B. Sokolov、D. Ivanov、A. Dolgui 和 A. Pavlov。供应链中涟漪效应的结构量化。《国际生产研究杂志》，54(1):152–169，1 2016年。[118] R. P. Stanley。图的无环定向。离散数学，5(2):171–178，1973年。[119] A. Surana、S. Kumara、M. Greaves 和 U. N. Raghavan。供应链网络：复杂自适应系统视角。《国际生产研究杂志》，43(20):4235–4265，10 2005年。[120] H. P. Thadakamalla、U. N. Raghavan、S. Kumara 和 R. Albert。基于多智能体的供应网络的生存能力：拓扑视角。*IEEE*智能系统，19(5)，2004年。[121] M. C. Troffaes、G. Walter 和 D. Kelly。针对共因失效模型中认知不确定性建模的稳健贝叶斯方法。可靠性工程与系统安全，125:13–21，5 2014年。

[122] Q. Wei 和 Q. Zhang。基于复杂网络模型的P2P借贷风险传染分析。《自然与社会中的离散动力学》，2016:8，2016年。[123] E. Winsberg。《计算机模拟时代的科学》。芝加哥大学出版社，2010年。[124] L. Xu、S. Mak、Y. Proselkov 和 A. Brintrup。自主供应链：定义、特征、概念框架和自主性级别。提交发表，2023年。[125] L. Xu、S. Mak、Y. Proselkov 和 A. Brintrup。迈向自主供应链：定义、特征、概念框架和自主性级别。《工业信息集成学报》，42，2024年。[126] T. Yan、T. Y. Choi、Y. Kim 和 Y. Yang。枢纽供应商理论：网络视角下的关键供应商。《供应链管理学报》，51(1):52–66，2015年。[127] Y. Yang、X. Que、Q. Qian 和 H. Fang。供应链融资的基于代理的模型：代理策略、绩效和风险传染。《仿真学报》，第1–18页，5 2023年。[128] W. Yu、G. Wen、G. Chen 和 J. Cao。多代理系统的分布式协同控制。Wiley，9 2016年。[129] G. Zheng、L. Kong 和 A. Brintrup。用于隐私保护和集体供应链风险预测的联邦机器学习。《国际生产研究杂志》，2023年。[130] A. Zhu、Y. Han 和 H. Liu。在后COVID-19时代波动需求下，自适应协作对异质制造商供应链生存能力的影响：基于代理的仿真。《国际生产研究杂志》，62(4):1162–1188，2 2024年。