

综述

基于复杂网络理论的供应链研究*

崔俊英¹⁾ 徐舒琪²⁾ 那旭³⁾ 潘黎明⁴⁾ 吕琳媛^{4)†}

1) (瑞士弗里堡大学物理学系, 弗里堡 CH-1700)

2) (合肥综合性国家科学中心数据空间研究院, 合肥 230088)

3) (电子科技大学基础与前沿研究院, 成都 611731)

4) (中国科学技术大学网络空间安全学院, 合肥 230026)

(2024 年 5 月 17 日收到; 2024 年 8 月 4 日收到修改稿)

供应链是由原材料供应商到最终客户的一系列生产和流通过程所形成的链条结构, 连接上、下游各个企业之间的关系. 供应链包含采购、生产、仓储、分销、客户服务、信息管理和资金管理等不同环节之间的物料、资源、资金和信息等的相互关联流动, 从而形成复杂的网链结构. 高效可靠的供应链对于增强企业的市场竞争力、推动社会和经济持续发展具有重要意义. 近年来, 采用复杂网络的理论和方法对供应链进行建模和分析受到了越来越多学者的关注. 本文系统性地论述基于实证数据和网络模型两种类型的供应链网络构建研究, 在此基础上探讨供应链网络的拓扑结构、脆弱性、关键节点识别、社团检测等结构性性质, 阐明供应链网络的风险传播、竞争博弈等管理特性. 本文综述了基于复杂网络方法的供应链研究内容和前沿热点, 论证了复杂网络理论在供应链网络研究中的有效性和适用性, 分析了供应链网络研究现存的一些问题, 并展望若干未来的重要研究方向. 本文期望为供应链研究提供见解, 并推动复杂网络方法在供应链研究中的发展和应用.

关键词: 供应链网络, 复杂网络, 结构性性质, 管理特性**PACS:** 89.75.-k, 89.90.+n**DOI:** 10.7498/aps.73.20240702**CSTR:** 32037.14.aps.73.20240702

1 引言

供应链指的是产品或服务从原材料生产商到最终消费者的全过程, 包括从原材料采购、生产加工、产品分销、零售直至最终交付给消费者的各个环节, 以及相关的物流、信息流和资金流等方面. 无论是对企业还是国家而言, 供应链都发挥着重大作用, 一方面, 企业与供应链中上下游企业之间的协作和互动是确保企业持续稳定发展的关键, 高效可靠的供应链可以保障企业原材料的及时供应、优化生产过程、控制库存以及准时交付产品, 从而提

升企业的竞争力; 另一方面, 供应链是国家经济增长的重要推动因素, 安全可持续的供应链可以确保资源和物资的流通顺畅, 促进国际贸易, 保障国民经济稳定运行, 对国家安全和经济增长提供重要保障.

近些年, 全球供应链遭遇了前所未有的挑战和变革. 不稳定的全球贸易政策、地缘政治因素、国际关系等都对供应链的稳定性和可靠性产生了冲击, 尤其是新冠疫情的爆发导致了世界范围内的生产和物流中断、原材料短缺、交通阻塞等问题, 充分暴露了供应链的脆弱性和不确定性. 在复杂的国际形势和后疫情全球大变革的时代背景下, 供应链

* 国家自然科学基金重大项目 (批准号: T2293771)、国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 62306191) 和国家留学基金管理委员会 (批准号: 202108410127) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: linyuan.lv@ustc.edu.cn

研究的重要性愈发凸显. 继中国共产党第二十次全国代表大会报告明确提出, 要“着力提升产业链供应链韧性和安全水平”之后, 中国共产党第二十届中央委员会第三次全体会议《决定》再次明确强调, 要“健全提升产业链供应链韧性和安全水平制度”, 研究供应链可以帮助企业 and 国家提高应对风险事件的能力, 制定更加科学有效的供应链管理策略, 提高供应链的适应性和韧性, 为国家经济社会安全和发展提供有力支撑. 因此, 供应链研究对于维护我国经济安全和推动高质量发展具有重大战略意义.

复杂网络由大量的节点及节点间相互连接的边所构成, 复杂网络是复杂系统的高度抽象, 其通过将复杂系统中的个体描述为网络中的节点, 个体之间的关系描述为网络中的边, 来研究网络所对应的复杂系统的结构和功能. 供应链是包括供应商、生产商、分销商、零售商和最终客户等多个参与主体, 各个参与主体相互依存, 彼此之间存在信息传递、资源流动和协同合作等关系的高度复杂的系统性网链结构. Choi 等^[1]开创性地提出, 供应链是一个复杂的自适应系统^[2]. 通过将供应链各个参与主体抽象为节点, 并将主体之间的物流、资金流、信息流等交互关系描述为连边^[3], 可以用复杂网络的形式描述和刻画供应链, 进而研究供应链所对应的复杂网络的结构特征和演化规律, 揭示供应链网络中的关键节点^[4]、关键链路^[5]和信息流动路径, 发现供应链网络的风险传播机制^[6]、系统效应和决策机制^[7], 从而支撑提升供应链的韧性和鲁棒性、安全性和效率^[8]的策略制定.

供应链的复杂性和动态性使得传统的线性和静态分析方法难以有效地刻画和预测其行为特征,

复杂网络理论为供应链研究提供了一种新视角^[9]. 目前, 众多学者基于实证数据或理论模型构建供应链网络^[10], 分析供应链网络的拓扑结构^[11]和组织特征^[12], 发现供应链网络中的关键节点^[13]、脆弱环节和潜在风险, 研究网络的韧性和鲁棒性^[14]、风险传播机制^[15]、博弈策略^[16]等问题. 基于复杂网络理论的研究, 有助于深入理解供应链的结构和动态特征, 提升供应链的韧性和鲁棒性、优化供应链系统功能, 为供应链安全性和效率提供理论支撑和决策依据, 引导企业和组织在面对突发事件和不确定性事件时更好地应对挑战, 帮助企业和组织在全球化和市场变动的背景下保持竞争优势.

本文第 2 节介绍供应链网络的构建, 第 3 节和第 4 节分别梳理了供应链网络的结构性质和管理特性, 第 5 节针对目前研究现状陈述了研究问题和挑战, 第 6 节是结论.

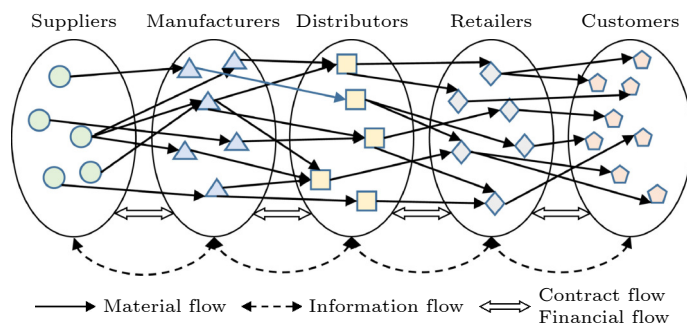
2 供应链网络的构建

2.1 基于实证数据的供应链网络构建

利用实证数据构建供应链网络, 首先需明确数据中的研究对象, 如供应商、制造商、分销商、零售商等, 其次明晰其属性、特征和行为, 将研究对象抽象为网络中的节点, 然后根据供应链中企业或者组织之间的供应、需求、合作、资金流、信息流或物质流等业务关系, 将企业或组织之间的联系转化为网络中节点之间的连边, 由此构建供应链网络. 表 1 总结了供应链网络中常见的类型, 涵盖了物流、信息流、资金流、价值链、合作伙伴、数字化、全球和生态系统网络. 这些类型反映了不同类型供应链网络的内容和特征.

表 1 常见的供应链网络类型
Table 1. Common types of supply chain networks.

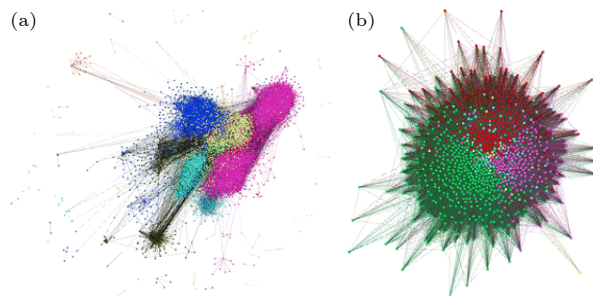
供应链网络类型	内容
物流网络 ^[17]	实际货物的运输、仓储、配送等
信息流网络 ^[18]	订单、库存信息、生产计划等的传递和共享
资金流网络 ^[19,20]	货币和财务信息的流动, 包括支付、结算、融资和资金管理等.
价值链网络 ^[21]	价值在供应链中的创造和传递, 涉及生产、分销、销售等环节
合作网络 ^[22]	各参与方之间的合作和协同关系, 包括供应商、制造商、分销商等
数字化网络 ^[23]	数字技术在供应链中的应用, 如物联网、大数据、人工智能等
全球供应链网络 ^[24]	跨国和全球范围内的供应链关系, 包括国际贸易、全球物流等
生态系统网络 ^[25]	将供应链视为生态系统, 关注各组成部分之间的相互关系和可持续性

图 1 供应链网络的典型结构^[26]Fig. 1. Typical structure of supply chain networks^[26].

目前研究中常用的供应链数据库包括 THE WORLD BANK DATA (<https://data.worldbank.org/>)、UNITED NATIONS COMTRADE (<https://comtradeplus.un.org/>)、中国经济金融研究数据库 (CSMAR) (<https://www.csmar.com/channels/31.html>)、中国研究数据服务平台 (CNRDS) (<https://www.cnrds.com/>) 等. 基于实证数据构建的供应链网络一般为有向含权网络, 网络中的连边方向表示网络节点之间的关系方向, 即信息、物料或资金的流动方向; 连边权重反映了网络节点之间连接的强度, 可以表示交易金额、物流量、合作频次、信息流量等. 连边还可附有属性信息, 如合作模式、交易类型、物流渠道、运输时间等, 记录与供应链运作相关的数据和指标, 以刻画连边的特征. 图 1 描述了典型的复杂供应链网络结构, 其中各类主体之间存在着复杂的流动关系, 即物质流、信息流、合同流和资金流. 此外, 各类主体之间还存在竞争与合作关系, 例如子母公司关系, 或者多个供应商之间的博弈行为.

基于真实数据构建的供应链网络可以直观地表示供应链中各节点之间的关系, 为进一步分析供应链网络的结构和管理特性、揭示其内部运作机制提供了基础. 现有研究涉及汽车、电子、航空、食品、零售等多个行业. 如 Brintrup 等^[27]收集了 2014 年 8—10 月在全球汽车信息平台数据库 (marklines automotive information platform) 被宣传过的企业和相关产品的供应商、客户信息, 分别构建了包含 18943 家企业的供应商网络 (图 2(a)) 和包含 934 种产品的产品网络 (图 2(b)). 其中, 供应商网络表示企业之间的物质流关系, 产品网络则表示产品同时出现在供应商供应清单中的关系. 此外, 作者研究了所构建网络的结构特征以及鲁棒性. Kim

等^[28]则将研究重点放在汽车的一个重要部件 (中控台), 选择了本田雅阁、本田讴歌 CL/TL 和克莱斯勒大切诺基 3 条不同的产品线, 分别作为家庭用车、高端车和吉普车的代表, 分析了它们从原材料供应商到成品的相关企业之间的物料流动关系 (有向) 和合同关系 (无向), 从而构建了 6 个供应链网络, 并研究了不同中心性指标和网络结构指标在不同供应链网络中的意义. 史金艳等^[29]基于国泰安数据库收集了中国制造业 1000 余家上市公司在 2013—2016 年的前五大供应商和前五大客户的供应关系信息构建了供应链网络, 分析了企业在供应链网络中的位置特征对企业绩效的影响.

图 2 (a) 供应商网络; (b) 产品网络, 节点颜色代表节点所属社团^[27]Fig. 2. (a) Supplier network; (b) product network, nodes are colour-coded according to communities^[27].

在供应链网络数据收集的过程中, 常用方法是以一家或多家企业为种子节点, 在数据库中以滚雪球抽样法获取其供应商和客户关系. 例如 Zhao 等^[30]基于 Mergent Horizon 数据库, 以波音公司为种子节点, 依次抽取其一级供应商、二级供应商和三级供应商, 以及波音公司的客户, 波音公司一级供应商和二级供应商的客户, 直至遍历数据集中的所有相关企业以及企业的供应商-客户关系, 最终构建了 2971 家企业之间的供应链网络, 基于该网络, 作者

研究了企业提升抵御供应链中断风险能力的策略.

基于实证数据构建的供应链网络中的连边可附加信息流、贸易流等属性信息. 如 D'Ignazio 和 Giovannetti^[31] 基于 IPv4 Routed/24 AS Links 数据构建了位于 55 个国家的 195 个互联网交换中心之间的全球数字商品交付的信息流供应链网络, 作者对网络的连通性与集群特征进行了实证分析. Tang 等^[32] 基于 2000—2018 年联合国商品贸易统计数据库中涉及 223 个国家/地区的钨贸易流数据构建了有向加权全球钨贸易网络, 网络中的节点是参与国际钨贸易的国家/地区, 边是国家/地区之间的钨贸易关系, 边权重是钨的实物价值, 该研究探讨了各国/地区之间的贸易模式和相互关系, 督促各国/地区采取更多合作行为和针对性的供应链管理策略, 确保钨供应和全球钨循环的可持续性.

部分学者进一步整合不同数据源以构建全面综合的供应链网络. Bellamy 等^[33] 整合了 Electronics Business (EB) 300、Connexiti 和 Thomson Reuters SDC Platinum Database 三个数据库, 以

2007—2008 年间全球 151 家领头电子企业为种子节点挖掘了与其存在供应商和客户关系的不同行业的企业, 最终构建了包含 409 家企业的供应链网络, 基于该网络作者研究了企业在供应链网络中的结构特征与企业创新能力的关系. Mu 等^[34] 整合收集了 Mergent Online、同花顺 iFinD-金融数据终端两个数据库中 2006—2020 年全球电动汽车锂电池企业的供应关系数据, 构建了有向加权全球电动汽车锂电池供应链网络 (图 3), 网络中的节点是锂电池供应链中的相关企业, 边是企业之间的锂电池供应关系, 边权重使用股票价格的定向溢出指数表示供应关系的强度, 该研究分析了单个企业破产和企业间交易崩溃时风险传播的规模和持续性.

考虑到供应链网络上、下游参与主体之间具有多层次、复杂、相互依赖的特征, Hu 等^[35] 基于联合国商品贸易统计数据库中的 1990—2020 年各个年份的全球电动汽车锂离子电池上下游产业链的商品贸易数据, 结合多层网络模型构建了其中包含镍、钴和锂 (矿产资源)、正极和负极材料 (中间组

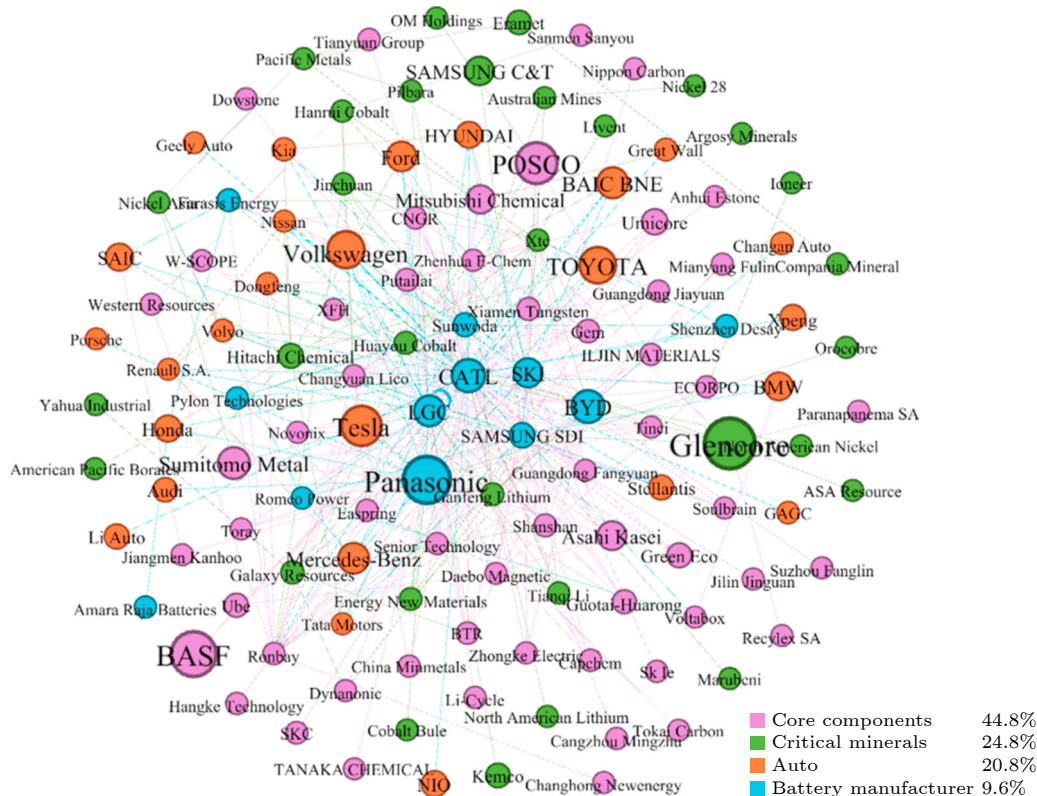


图 3 全球电动汽车锂电池供应链网络, 粉色节点代表供应核心部件的公司, 绿色节点代表供应关键矿物的公司, 橙色节点代表供应汽车的公司, 蓝色节点代表电池制造商, 节点大小与企业规模成正比^[34].

Fig. 3. Visualization of the Electric Vehicle Lithium-ion Battery supply chain network, pink nodes represent supplying core components of firms, green nodes represent supplying critical minerals of firms, orange nodes represent supplying auto of firms, blue nodes represent battery manufacturer, where node size is proportional to company volume^[34].

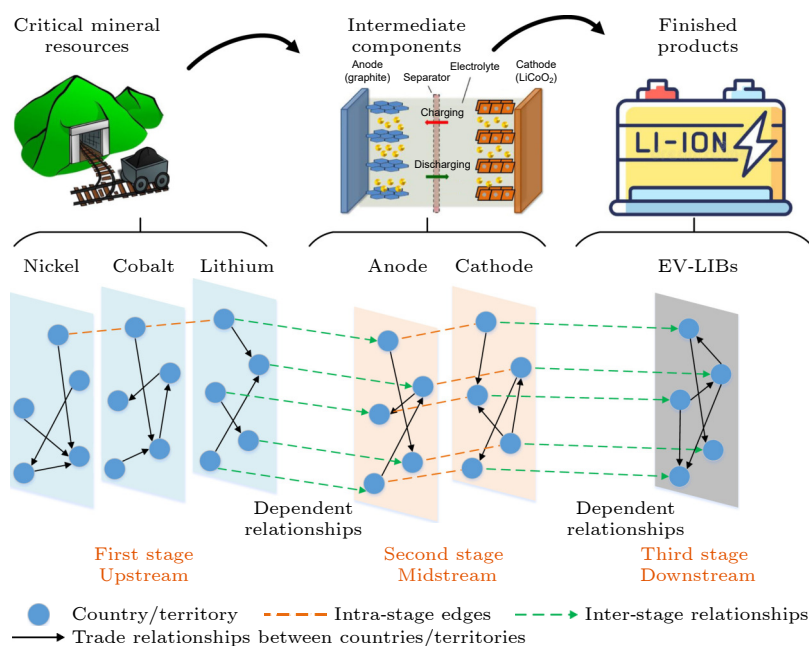
图 4 全球电动汽车锂离子电池上下游产业链相关的供应链网络^[35]

Fig. 4. Supply chain network related to the upstream and downstream industrial chain of global electric vehicle lithium-ion batteries^[35].

件) 以及成品 3 个阶段 6 层的供应链网络 (图 4), 每一层单层网络中的节点、有向边、边权重代表国家/区域、国家/区域之间的贸易关系 (黑色实线)、国家/区域之间的贸易额, 不同单层网络之间表示关系链接的边分为阶段内无向边 (橙色虚线) 和阶段间有向边 (绿色实线) 两种, 同一阶段不同单层网络中的相同节点通过阶段内无向边相连, 阶段内无向边代表了同一阶段产品之间的关联关系, 如在第 1 阶段 (矿产资源) 中, 镍、钴和锂的单层贸易网络中的相同节点之间存在阶段内边, 两个相继阶段单层网络之间的依赖关系由阶段间有向边表示, 阶段间有向边代表了上下游产品之间的供给关系. 此供应链网络深入刻画了全球电动汽车锂离子电池贸易中相关产品国家间的供应关系以及每个国家内部电动汽车锂离子电池生产过程中上下游产品之间的供应关系.

基于实际供应链数据构建供应链网络, 可监测和持续分析供应链运营状况, 从而为发现供应链结构和特征、提升供应链运营效率和韧性、优化供应链运营策略提供坚实的基础. 但目前仍需克服供应链数据可获取性低的挑战, 在确保数据安全性与隐私性的前提下, 运用高效的数据分析技术处理大规模且复杂的供应链数据, 可提高数据处理效率, 确保数据的准确性, 这将推动对供应链的深入分析研究, 增加研究的实用价值.

2.2 基于网络模型的供应链网络构建

供应链网络通常被认为是具有非线性、非均衡性、自相似性、自组织性、涌现性等特征的复杂网络^[2,36], 因此也有学者采用网络模型的方法, 基于预设的网络生成规则构建供应链网络, 该方法不依赖于大量真实的供应链数据, 在没有足够实际数据的情况下也可模拟和探索供应链的网络结构和演化过程, 研究供应链网络的形成机制和演化特征. 目前大多数供应链网络模型基于 BA 网络模型^[37]构建. BA 模型反映了供应链网络动态增长 (growth) 和择优连接 (preferential attachment) 的特点^[38], 动态增长指的是网络会在每个时间步增加一个新节点, 新节点将与网络中的原有节点相连, 连接概率与原有节点的度数成正比, 这种连接机制称为择优连接, 这两点特征充分反映了实际供应链网络中企业数量的逐渐增多和企业之间的强强联合现象.

在 BA 模型的基础上, 也有学者加入节点之间的距离、适应度^[39] 等因素, 以模拟企业更倾向于和距离自身路径长度更短节点建立供应关系, 以及产品质量高的年轻企业被连接的可能性更高等供应链网络演化特性. 如 Chen 等^[40] 鉴于适应度、本地局部优先连接机制构建了包含农户、经销商、批发商、零售商的 4 层内陆生鲜冷链供应链网络演化模型. Wang 等^[41] 考虑区域经济现象和企业之间

的吸引力, 在 BA 网络的基础上构建了引入节点局部性偏好和适应度等因素的供应链网络模型. 该模型假设, 初始时刻网络中有 m_0 个节点和 e_0 条边, 节点将随机设定位置坐标, 节点根据彼此之间的距离连接; 在每个时间步添加一个新节点和 m 条边 $m < m_0$, 新节点根据局部性偏好进入某个区域, 即新节点的位置由区域中节点的度数之和决定, 这表明耦合程度越紧密的区域可以吸引更多新的企业; 新节点连接到选定区域中现存节点的概率与节点的适应度和节点之间的距离有关, 其中节点的适应度服从某一分布 (如均匀分布、指数分布或幂律分布), 作者通过平均场理论分析模型并进行仿真实验, 验证了所提出供应链网络模型的无标度特性.

考虑到边权可更准确地描述供应链网络中各个节点之间的关系和特征, 于海生等^[42]引入加权网络理论, 提出了基于企业间交易量的无向加权供应链网络演化模型, 描述了边权依照交易量进行演化, 新的交易量转化为边权再次驱动网络演化的过程. 另外, 鉴于供应链网络的演化通常历经成长期、成熟期和衰退期 3 个阶段, 其中成长期进入企业较多, 成熟期进入和退出趋于平衡, 而衰退期退出企业较多. 针对这一现象, Tian 等^[43]提出了增长-成熟-衰退和再选择模型, 以考虑不同发展阶段中企业的退出与重新进入情况, 并通过仿真网络进行了鲁棒性分析.

由于供应链网络中边类型的多样化和网络结构复杂化的特征, 部分研究学者开始将超网络应用于供应链网络的构建. Suo 等^[44]假设了一种基于

超图的供应链网络演化模型, 其中节点、超边分别代表企业、不同行业之间的贸易关系, 演化过程包括添加新超边, 重组超边和链接新节点 (图 5), 节点的生成概率服从泊松分布, 研究结果揭示了不同参数条件下网络拓扑结构的演变, 作者采用泊松过程理论和连续介质理论证明了此供应链网络模型的稳态平均超度分布呈现出了漂移幂律分布的特征.

采用网络模型构建供应链网络是在真实数据资源不充足的情况下, 基于系统动力学、复杂系统、网络科学等系统科学理论、并融合供应链管理、物流与采购管理、工商管理、市场营销、电子商务等多个交叉学科的方法, 以捕捉供应链网络的核心特征和动态特性, 模拟仿真真实供应链网络的系统状态. 这一方法为展开供应链网络的研究提供了有力支持.

3 供应链网络的结构研究

3.1 拓扑结构分析

学者通过分析供应链网络的度分布、平均最短路径长度、聚类系数、密度、连通性等拓扑结构特征^[45], 挖掘网络中节点之间的连接关系、层次结构、信息流动路径等, 揭示供应链的组织方式和运作机制.

1) 小世界和无标度结构

研究表明, 多个行业的供应链网络均具有小世界和无标度特征, 其中, 小世界特征反映了网络的平均路径长度较短, 接近随机网络, 而聚类系数较高, 接近规则网络; 无标度特征反映了网络中少数

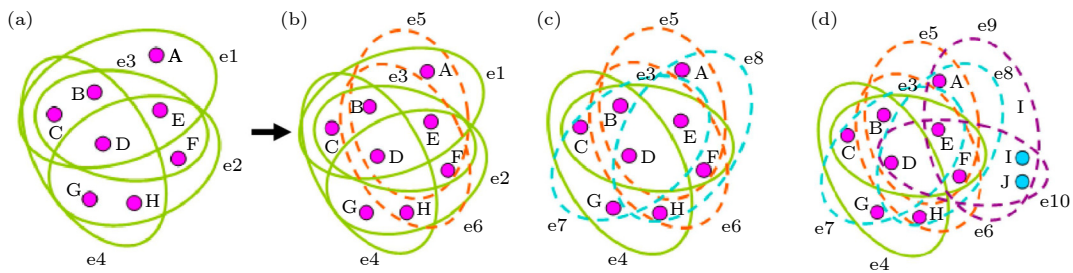


图 5 基于超图模型构建的供应链网络的演化机制 (a) 玫红色圆代表现存节点, 绿色实线代表初始超边; (b) 添加新超边, 在现存节点之间添加新超边, 橙色虚线代表新超边; (c) 重组超边, 删除初始超边, 添加新超边, 蓝色虚线代表重组之后的新超边; (d) 链接新节点, 新增节点根据超边优先链接机制与现存节点连接形成新超边, 天蓝色圆代表新节点, 紫色虚线代表链接新节点的超边^[44]

Fig. 5. Evolution mechanisms of supply chain networks constructed based on hypergraph models: (a) Magenta circles represent existing nodes and green solid lines represent original hyperedges; (b) add new hyperedges, add new hyperedges between existing nodes, orange dashed lines represent new hyperedges; (c) rewire hyperedges, delete original hyperedges and add new hyperedges, blue dashed lines represent new hyperedges by rewired; (d) link new nodes, link newly-added nodes with previously existing nodes according to their hyperedge preferential mechanism, sky blue circles represent new nodes, purple dashed lines represent hyperedges linking the new nodes^[44].

节点的度值很大,而大部分节点的度很小,节点的度分布服从幂律分布.如赵晴^[46]结合实证数据和网络模型构建了包含2604家企业的我国智能手机产业供应链网络,发现该网络具有小世界、无标度特征.石海佳和石磊^[47]、李季明和张宁^[48]分别分析了我国有机化工工业原料供应链网络和汽车零部件供应链网络,同样发现网络具有一定的小世界网络和无标度网络特征.Orenstein^[49]基于实证数据构建零售行业家得宝、劳氏、耐克,食品行业家乐氏、亿滋、通用磨坊6家公司的供应链网络,分析发现每一家公司的供应链网络都具有无标度特征.Wang等^[12]构建了包含84家企业的广州汽车产业供应链网络,揭示了所构建网络的小世界和无标度特征,并进一步发现了该网络的枢纽节点.Basole和Bellamy^[36]对比了电子行业和汽车行业的供应链,发现前者更具有小世界特征,而后者与无标度网络更相似,并发现在风险扩散方面,具有小世界结构的供应链网络优于具有无标度特征的网络.Yang等^[50]基于1988—2013年联合国贸易数据库的全球原油贸易数据构建了26个年度的全球原油贸易网络,分析发现了全球原油贸易网络具有小世界特征,全球原油贸易具有世界扁平化(全球化,资源共享化)的性质.此外,还有研究发现全球集装箱班轮运输网络具有无标度网络特征^[51].

一些研究者结合集聚系数、度分布、平均路径长度等其他拓扑结构指标分析供应链网络的结构特征.孙军艳等^[52]通过2008—2013年我国电商销售额和市场份额等实证数据构建了电商供应链网络,分析发现网络具有无标度特征和集聚性,然而,随着越来越多的传统企业向电子商务转型,网络的平均集聚系数逐渐变小.Bombelli等^[53]分析发现全球航空货运供应链网络具有小世界、无标度网络的特征,其度分布遵循幂律分布,与客运网络相比平均最短路径长度更小.

2) 层次结构

供应链网络的拓扑结构研究中也呈现了供应链上下游垂直关系的层次结构.如Yang和Chen^[54]基于联合国商品贸易统计数据库中的全球钴贸易数据构建了2001年、2010年、2015年、2020年的钴贸易网络,揭示了全球钴贸易网络层次结构明显、枢纽国家突出的时空格局.层次性的供应链网络中,存在一个核心节点(轮轴)周围连接着若干个分支节点(轮辐)的轴辐式拓扑结构.Yue等^[55]

研究了2005—2021年薄膜晶体管液晶显示器上下游无向含权供应链网络的拓扑结构的动态演变,发现了供应链网络中的核心企业节点倾向于连接度较小的企业节点,是具有轴辐式结构的异质网络.全球集装箱班轮运输网络中也呈现了度较低的港口分布在核心港口周围的轴辐式结构^[56].

3) “核心-边缘”网络结构

一些研究也凸显了供应链网络中存在“核心-边缘”网络结构,其中核心节点在网络中通常具有更多的连接,而边缘节点仅与少数几个节点相连接或相对独立.如Yuan等^[57]基于2007—2020年联合国贸易数据库的全球原油贸易数据构建了14个年度的全球原油贸易网络,网络中呈现了“核心-边缘”结构(图6),研究表明供需区域地理分布的不均衡是造成“核心-边缘”结构出现的因素之一.Xia等^[58]揭示了全球稀土贸易网络具有“核心-边缘”结构,呈现异质性特征,中国已经取代发达国家成为整个稀土贸易网络的核心节点.Zhao等^[59]发现了2011—2020年全球锑贸易网络具有“核心-边缘”的结构特征.

部分研究也发现供应链网络的“核心-边缘”结构中存在两个或多个核心且它们之间相对独立.谭丹和马顺甜^[60]分析了2001—2019年国际大豆贸易有向加权网络的演化,发现该网络呈现“两心分离”网络格局,巴西、美国是网络中的出口核心国家,中国以及西欧国家是主要的进口国家,加拿大和西欧国家则是核心“中介”国,全球大豆贸易网络规模呈现出先扩张、后收缩、2016年后集聚发展的趋势.

4) 中心性指标描述个体拓扑结构

在供应链网络中采用中心性指标聚焦于刻画网络中的个体结构特征.Yu和Li^[21]以全球金属行业64个经济体1999—2018年的价值流数据构建了全球金属行业价值网络,探讨了网络具有小世界的全局结构特征,采用中心性指标发现核心经济体在网络中分布稳定且集中,美国、德国、中国、英国是全球金属行业价值网络中的核心国家.Zuo等^[61]基于网络密度、度、介数中心性、聚类系数、平均路径长度、互惠性6个指标研究了2005—2020年全球可再生能源贸易网络的拓扑结构,揭示了国际可再生能源贸易网络为无标度网络,上游和下游贸易主要集中在中国、德国、澳大利亚、美国、日本等国家,呈现了上下游贸易一体化,中游贸易欧美国家

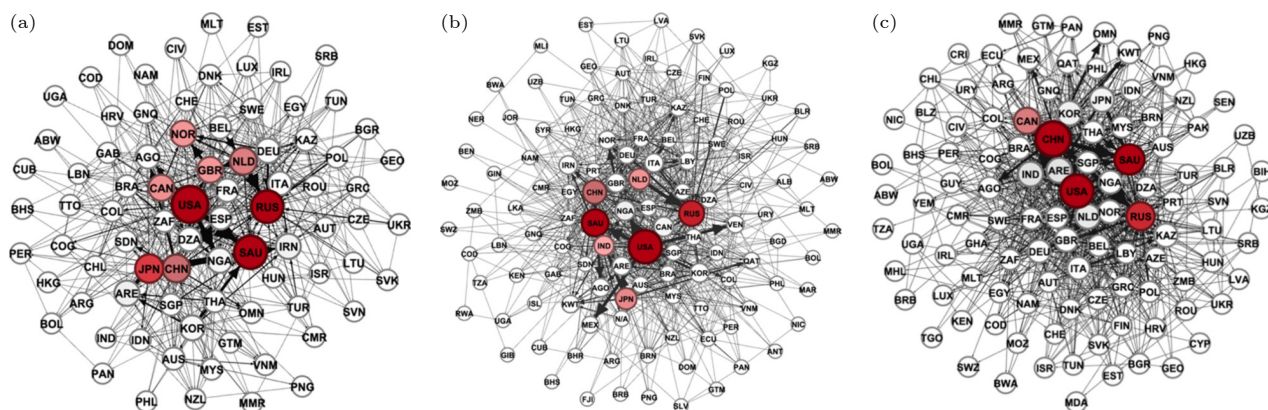


图6 全球原油贸易网络在代表性年份呈现出“核心-边缘”结构,其中深红色和浅红色节点分别代表核心国家和次核心国家,白色节点代表边缘国家,节点越大,颜色越深,说明其在网络中的地位越核心^[57] (a) 2007年; (b) 2010年; (c) 2020年

Fig. 6. Global crude oil trade network exhibits a core-edge structure in representative years, where dark red and light red nodes represent core and sub-core countries, respectively, and white nodes represent marginal countries, the larger node and darker color illustrate the greater the trade influence^[57]: (a) 2007; (b) 2010; (c) 2020.

空心化的动态演化趋势. Xu等^[62]发现了全球集装箱班轮运输网络具有小世界网络的结构特征,基于社团划分提出了门户枢纽中心度指标,刻画一个节点在承担其所属社团的对外连边方面的作用,从宏观网络层面引入了基于门户枢纽的结构核组织模式,探讨了网络结构与国际贸易格局之间的关联机制,发现结构核对网络全局的高效运输至关重要.

拓扑结构分析阐明了供应链网络中各个节点之间的连接方式、流动关系、结构形态、有助于深入了解供应链网络个体以及整体的结构特征、挖掘供应链的运作机制.

3.2 关键节点识别

供应链网络中往往存在具有“牵一发而动全身”特征的节点,若其中的重要环节中断或受到攻击,可能影响整个供应链安全,造成重大损失.在复杂网络研究中,其可以转化为关键节点识别这一科学问题^[63],有效识别供应链网络中的关键节点可以帮助企业或国家评估和预测供应链网络风险,提前做好预防措施.

在相关研究中,学者主要采用网络中心性指标,通过评估节点在网络结构中的位置衡量网络中节点的重要性和影响力,任晓龙等^[64]将常用的中心性指标分为4类:1)基于节点近邻的中心性指标,包括度中心性、入度中心性、出度中心性等;2)基于路径的中心性指标,包括接近中心性、介数中心性等;3)基于特征向量的中心性指标,包括特征向量中心性、PageRank等;4)基于节点移除和

收缩的算法,包括节点删除的最短距离法、节点收缩法等.这些中心性指标从局部或全局结构的视角,为研究者识别供应链网络中的关键节点提供了有效方法.如于明洋等^[65]从CSMAR数据库中收集了2004—2019年中国沪深A股上市公司披露的前五大供应商和客户数据信息,构建了涵盖2656家上市公司的供应链网络,使用度中心性指标衡量企业在供应链网络中的重要性. Perera等^[66]提出使用介数中心性、接近中心性指标识别网络中节点的重要性.

部分研究在应用传统网络中心性指标的基础上结合其他描述节点特征的指标衡量节点的重要性. Guo等^[67]采用特征向量中心性和基于超链接的主题搜索算法(hyperlink-induced topic search, HITS)识别了有向加权“一带一路”沿线天然气贸易网络的重要国家,发现了中国、印度等为主要贸易进口国,而俄罗斯和卡塔尔则凭借其优越的天然气资源储备优势在出口市场上占据关键地位,其扮演着“桥梁”的角色,并与其他国家建立了广泛的贸易关系. Zhu等^[68]提出了一种综合应用中心性指标(度中心性、加权重度中心性、介数中心性、接近中心性)和脆弱性指标(网络效率变化率、网络连通性变化率)评估海上丝绸之路航运网络港口重要性的方法,并使用投影寻踪模型计算每个指标的权重,揭示了航运网络中最有影响力的港口集中在运输走廊和过境区. Mizgier等^[69]指出中心性指标可应用于识别供应链网络中的瓶颈,并针对中断风险事件在供应链网络中传播的动态特性提出了新的

瓶颈节点识别模型, 研究每个节点对核心公司损失的贡献程度, 损失贡献程度最高的节点即为网络中的瓶颈节点.

研究者采用网络中心性指标评估节点重要性, 还进一步分析了企业在供应链网络中的重要性与企业各方面绩效的关系. 如 Basole 等^[70]通过研究 2005—2009 年间全球 114 家电子行业重点企业之间的供应链网络, 发现企业在供应链网络中的 Bonacich 中心性 (即特征向量中心性的扩展)^[71]、企业自我网络 (ego network) 的密度与企业资产利用率、成本绩效和运营绩效存在正相关关系. 于明洋等^[65]也发现处于供应链网络重要位置的上市公司的竞争地位更高. Shi 等^[72]通过分析 2013—2019 年 2115 家企业的有向加权 (权重表示供应商/客户的采购额/销售额占比) 供应链网络, 发现企业含权度与企业的股价崩盘风险呈负相关关系. 刘若曦^[73]构建了 2009—2016 年 6331 家中国沪深 A 股上市公司的供应链网络, 收集各公司的发明专利授权数量作为公司创新绩效指标, 发现公司在网络中的度中心性、结构洞和创新绩效呈正相关关系.

以上研究表明, 企业在供应链网络中处于重要位置有利于企业发展, 但也有学者在研究中发现了供应链网络节点位置重要性指标与企业绩效呈现负相关关系. 如 Lavassani 和 Movahedi^[74]基于 11122 家全球汽车公司供应链网络, 发现企业在网络中的度、介数、Pagerank 和特征向量中心性等中心性指标与企业的财务绩效呈负相关关系, 作者解释为中心性高的企业是汽车产业中成品的零件组装商, 此类型的企业主要提供获利率较低、较简单的标准化产品服务, 因此企业财务绩效较低. Shi 等^[75]基于 CSMAR 数据库并结合部分企业的年度报告, 构建了涵盖 3630 家中国制造业企业之间的供应链网络, 发现入度中心性、结构洞的丰富度与企业绩效 (资产收益率) 呈显著负相关关系, 即处于供应链网络重要位置的公司更容易受到合作伙伴恶劣的商业条件的不利影响, 更可能降低公司的盈利能力; 在供应链网络中占据结构洞越多的公司越有可能由于外部集体治理机制的不完善而表现不佳, 这些机制会使其失去与其他公司合作的有利机会. Huang 等^[76]基于 CSMAR 数据库构建了涵盖 2390 家中国制造业企业之间的供应链网络, 发现企业在网络中的度中心性和介数中心性与企业研发投入 (企业每年的研发支出/销售额) 呈显著负相关关系, 作

者认为, 社会资本水平高的企业更倾向于保持固有的思维和行为模式忽视创新的重要性, 从而降低了投资研发的积极性.

上述工作在采用网络中心性指标进行关键节点识别时并未区分企业的角色. 因此, Lou 等^[77]进一步提出了 MALNS (memetic algorithm with local neighborhood search) 算法识别由制造商和供应商两种企业角色构成的多方供应链网络中的瓶颈供应商, 采用平均产品可用率、制造商运转率两个绩效指标评估供应商中断造成的绩效损失, 并针对基于盖世汽车网 5574 家供应商、47 家制造商之间 27 种汽车产品的供需信息构建了包含 6890 个节点和 28705 条边的供应链网络, 通过此实证网络进行案例研究验证了算法的有效性.

供应链网络关键节点识别通过分析节点在供应链网络中的位置、连接强度、流动路径、中心性等因素衡量了节点的重要性, 此方法侧重于从微观视角确定对整个网络具有重要影响力的节点, 有助于发现供应链中的核心节点、桥梁节点等在网络中发挥不同作用的个体.

3.3 社团检测

在复杂网络中, 由高度依赖、关联且具有相似功能或特征的节点组成的子网络被称为社团. 在同一社团内部节点之间联系紧密, 而不同社团之间的节点联系相对稀疏. 供应链网络通常由供应商、制造商、客户等多个企业参与者组成, 它们之间存在紧密的合作、竞争、交流等关系, 这种复杂的相互作用使得供应链网络中存在社团结构. 深入研究供应链网络中的社团结构有助于理解供应链内部的组织形式和关系模式, 发现合作机会, 识别关键合作伙伴, 优化资源配置和协同管理, 以及制定风险管理策略和应对措施, 从而提升供应链的整体效率和韧性.

在供应链网络的社团研究中, 常用的社团检测算法包括 Louvain 算法^[78]、GN (Girvan-Newman) 算法^[79]、谱聚类算法^[80]、Infomap 算法^[81]等. 其中, Louvain 算法等基于模块度的算法旨在通过最大化网络模块度来识别社区, 模块度衡量了社团内连接相对于社团之间连接的程度, 模块度较高的供应链网络常常包含更为明显的社团结构, 同一社团内公司的业务联系较为集中, 信息资源和物质资源的流通效率更高. 较高的模块度有利于避免供应链网

络中局部中断风险的大规模传播. 相关研究中, 如 Lavassani 和 Movahedi^[74] 基于 Louvain 算法将包含 11122 家企业的全球汽车公司的供应链网络划分为 361 个社团, 发现所处社团规模越大的企业运营越稳定. Zhang 等^[82] 采用 Louvain 算法将全球集装箱运输网络划分为 9 个主要的港口社团, 这些港口社团具有明显的区域集聚特征. Kito 等^[83] 使用有向网络模块度最优化算法^[84] 识别了由 3109 家企业构成的丰田汽车公司供应链网络中的 13 个企业社团, 并进一步分析了每个社团的企业构成和社团之间的关系. Wiedmer 和 Griffis^[85] 基于 Mergent Horizon 数据库的供应商、客户和合作企业的数据构建了美国计算机电子制造业的其中 10 家企业以及其他涉及能源、银行、保险、娱乐等多行业的 11 家企业的 5 层供应链网络模型, 采用 Louvain 算法识别了供应链网络中的层次结构. 相较于传统的 Louvain 算法, Shi 等^[86] 提出了一种基于局部信息的社团检测算法, 通过利用节点及其邻居的局部连接信息进行社团划分, 挖掘复杂网络社团中的层次结构, 具有高效和适应性强的优点, 在大规模和动态供应链网络中具有更广阔的应用前景.

其他社团检测算法中, GN 算法为基于边介数的社团检测算法, 谱聚类方法使用邻接矩阵的特征值和特征向量来识别社区, Infomap 算法是基于层距离编码的无监督社区发现算法. 社团检测将供应链网络划分为多个社团模块, 粗粒度地展现了供应链网络的结构, 可以识别供应链网络中的关键社团, 了解社团内节点之间的合作依赖关系和不同社团之间的交互关系. Ma'arif^[87] 使用谱聚类算法将基于商品流模拟构建的进口食品供应链网络划分为联系紧密的 4 个企业社团. Chakraborty 等^[88] 研究了基于东京商工研究所的调查数据构建的 100 万家企业之间的供应链网络, 发现该网络具有强连通的“核桃”结构 (图 7), 并采用 Infomap 算法揭示了网络中社团结构的层次性.

考虑到供应链网络具有随着时间、空间、外部环境变化动态调整参与主体之间社团关系的特性. 如 Hu 等^[89] 基于 Infomap 算法分析了 2012—2019 年的国际锂离子电池贸易网络中社团结构的动态演化. Wang 等^[90] 采用 Louvain 算法分析了基于点互信息方法 (point-wise mutual information, PMI) 构建的 1998 年、2002 年、2007 年、2012 年和 2017

年 5 个年份的全球煤炭、原油和天然气的依存关系的有向加权贸易网络中社团结构的演变, 研究发现了中国、澳大利亚、英国、俄罗斯联邦和德国等国家在社团中的重要地位.

一些研究中将模块度算法与表示网络中两个社团之间相似性的归一化互信息 (normalized mutual information, NMI) 指标结合, 用以衡量供应链网络社团结构的动态演化模式. 如 Chen 等^[91] 基于 1990—2017 年联合国商品贸易统计数据库中的碳酸锂和氢氧化锂国际贸易数据构建了全球锂贸易网络, 研究了全球锂贸易网络社团的演变. Zhong 等^[92] 基于 2002—2011 年联合国商品贸易统计数据库中的国际石油贸易数据构建了含权和不含权的石油贸易网络模型, 对比分析了两种石油贸易网络的社团演化特征和稳定性. 文献^[93] 基于 2000—2013 年联合国商品贸易统计数据库中的煤炭、原油和天然气的国际贸易数据构建了全球化石燃料贸易网络, 揭示了社团演化与 3 种化石燃料贸易模式的潜在关系, 对比发现了天然气贸易社团的数量更多也更具稳定性, 天然气贸易局限于区域贸易且重要性程度不断提升. Zheng 等^[94] 分析了 2000—2020 年全球高岭土贸易网络的社团演变趋势 (图 7), 发现了全球高岭土贸易有明显的区域化现象, 贸易国之间存在很大的贸易偏好, 且高岭土贸易社团的演变与全球经济形势密切相关.

社团检测通过分析节点之间的位置结构、合作关系、交互模式、依赖程度等因素, 将供应链网络划分成具有模块化组织结构的部分. 这种方法能够识别不同结构部分之间的关联性, 从而深入挖掘供应链网络内部的复杂关系. 通过对社团结构的识别, 研究者能够深入理解供应链网络中节点之间的相互作用, 进而为优化供应链协同合作、提高效率以及降低潜在风险提供更全面的见解.

3.4 脆弱性分析

当前, 多变的全球局势显著增加了供应链体系的风险性和不确定性. 供应链的稳定与安全事关行业发展和国家安全, 已成为我国的重大战略需求. 在这一背景下, 复杂网络方法为研究供应链体系的脆弱性提供了理论基础和关键技术, 现有研究主要从韧性分析和鲁棒性分析两方面展开供应链网络的脆弱性分析, 其中, 鲁棒性则关注供应链网络遭

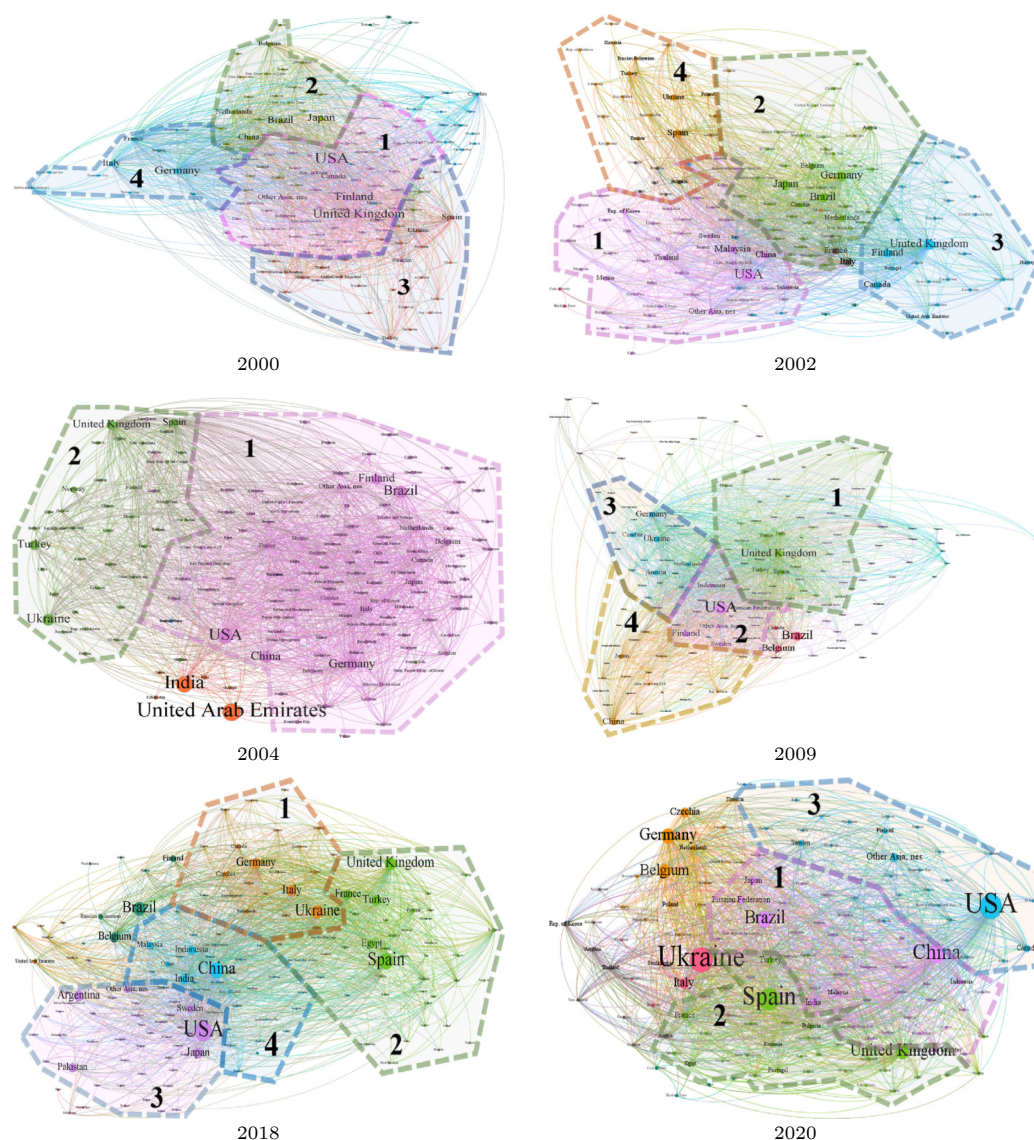


图 7 2000, 2002, 2004, 2009, 2018 和 2020 年全球高岭土贸易网络的社团演变, 不同的颜色代表不同的社团, 节点的大小代表贸易国家的加权重度^[94]

Fig. 7. Evolution of communities in the global kaolin trade network in 2000, 2002, 2004, 2009, 2018, and 2020, different colours represent different associations, size of the nodes in the network represents the weighted degree of the trading country^[94].

受不确定性风险事件时的稳定性和抗打击性, 韧性表示供应链网络遭受不确定性风险事件后的适应和快速恢复的能力^[95](图 8)。

在研究中, 通常将供应链网络遭受不确定性风险事件的攻击方式分为两类: 随机攻击和蓄意攻击。随机攻击代表突发性的偶然事件, 如地震、洪水、火灾等, 此时每个节点或连边被攻击的概率相同; 而蓄意攻击则代表经济制裁、黑客攻击等目的性事件, 这种情况下, 重要的节点或连边更有可能被针对性攻击^[96]。研究中一般通过移除供应链网络中的节点或连边来模拟特定的攻击方式, 不同类型的攻击模拟为研究者提供了评估供应链系统在

面对不确定性风险时的脆弱性的方法。

3.4.1 鲁棒性分析

在供应链网络中, 鲁棒性关注的是系统面对攻击或突发风险事件的抵抗力, 具有高鲁棒性的供应链网络能够在面对各种不可预测的变化时保持相对的稳定性, 不易受到严重的干扰。

相关研究通常通过计算供应链网络在模拟攻击下的结构和特征变化衡量网络的鲁棒性大小。常用的鲁棒性衡量指标包括网络中最大连通子图的大小、网络连通子图的平均规模、网络效率、平均最短路径长度等^[97]。如 Li 等^[95]采用最大联通子图的相对规模和正常企业节点数量量化了供应链

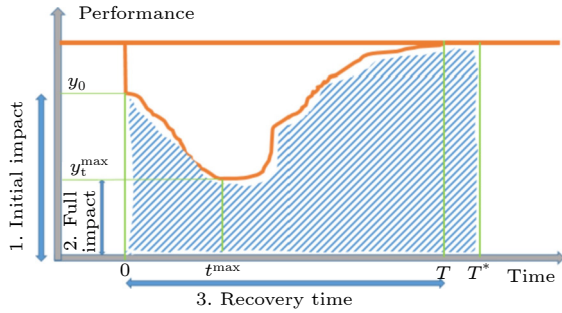


图8 供应链网络的脆弱性随时间的状态转换^[95], 其中 $\text{TIME} = 0$ 时, y_0 表示中断事件的初始影响, $\text{TIME} = t^{\max}$ 时, $y_t^{\max}$ 表示中断事件的全部影响, T 表示网络从中断中恢复的时间速度. y_0 和 $y_t^{\max}$ 刻画了网络的鲁棒性, 而 T 则描述了网络的可恢复能力

Fig. 8. State transitions of supply chain network vulnerability over time^[95], where $\text{TIME} = 0$, y_0 represents the initial impact of the disruption event, $\text{TIME} = t^{\max}$, $y_t^{\max}$ represents the complete impact of the disruption event, and T denotes the speed at which the network recovers from the disruption. y_0 and $y_t^{\max}$ characterize the robustness of the network, while T describes the network's recoverability.

网络鲁棒性, 并通过风险传播仿真揭示了供应链网络特征与供应链网络鲁棒性之间的关系. 赵志刚等^[98]基于 BA 模型构建了加权供应链网络, 定义了最大联通子图的相对规模、网络效率为鲁棒性指标, 通过仿真实验发现, 针对节点攻击而言, 基于节点度和介数的混合攻击方法的破坏性较强; 针对连边攻击而言, 基于连边两端节点介数的攻击破坏性较强, 此外节点攻击对网络的破坏性要大于边攻击. Wang 等^[99]基于 BA 网络模型构建无向供应链网络, 采用随机选择、度中心性、介数中心性、紧密中心性、K-core、集体影响力 6 种节点攻击策略模拟中断事件下网络的最大联通子图相对规模和网络效率指标的变化. 研究表明, 集体影响力、随机选择的策略分别是对网络冲击最强和最弱的节点攻击策略. 谢廷宇等^[100]以能源供应链网络为研究对象, 引入了平均路径长度、聚类系数、网络密度为鲁棒性指标, 分析了随机攻击和蓄意攻击下供应链网络的鲁棒性, 结果表明当以最大度和最大介数为节点攻击指标时, 该网络将迅速瓦解. Zhao 等^[101]提出了一种决策支持系统, 采用最大联通子图的规模、聚类系数和特征路径长度等拓扑指标以及供应节点交付到需求节点的商品的总体单位总数、单位商品的交付成本等运营指标来衡量供应链网络抗干扰的鲁棒性, 发现了供应链网络的拓扑结构对其鲁棒性具有相当大的影响.

也有研究者探究了不同类型网络的鲁棒性表现. 如徐翔斌和李恒^[102]分别基于随机网络模型、层次网络模型和无标度网络模型构建了 3 类的供应链网络, 并提出了企业从上游企业获取资源的能力的节点供应率指标衡量网络鲁棒性, 发现了相对于随机网络和层次网络, 无标度网络在蓄意攻击下的鲁棒性最差, 说明针对核心企业的蓄意攻击往往是供应链失效的关键. Nair 和 Vidal^[103]基于 BA 和 ER 模型生成了 20 种不同的供应链网络拓扑, 研究了网络鲁棒性与网络平均路径长度、聚类系数、最大连通子图的规模以及最大连通子图内的节点间最大距离之间的关系, 发现较长的平均路径长度将不利于提高网络鲁棒性, 这是由于平均路径长度长会阻碍产品和信息在网络中的传播, 因此降低了供应链网络在遇到中断时的响应能力.

一些研究着重于探索影响供应链网络鲁棒性的关键因素. Wei 等^[104]通过构建国际石油贸易网络攻击模型揭示出区域聚集是造成石油贸易网络脆弱性的重要原因, 重点关注网络中具有更大影响力的经济体有助于维护石油贸易的稳定和安全. 考虑到影响供应链网络鲁棒性因素的多样性和复杂性, Sun 等^[105]提出了包含连通鲁棒性 (最大连通子图的节点数目/(初始网络最大连通子图的节点数目-网络中删除的节点数目))、结构鲁棒性 (最大连通子图的节点数目/初始网络最大连通子图的节点数目)、性能鲁棒性 (最大连通子图的平均度/初始网络的平均度、最大连通子图的平均路径长度/初始网络最大连通子图的平均路径长度) 3 个维度的多维度综合性评价供应链网络鲁棒性的指标. Shahnazi 等^[106]基于 2018 年联合国商品贸易统计数据库中涉及 178 个国家的原油进出口量数据构建了全球原油贸易网络, 应用中心性指标探讨了各国在网络中的实力地位, 提出了基于多样性原则的原油出口国稳定性指标 (表示该出口国对全球原油出口的贡献程度) 和原油进口国稳定性指标 (表示该进口国对全球原油进口的贡献程度)、有效进口\出口份额指标 (各国的进口\出口份额 $\times$ 其在贸易网络中的局部效率, 局部效率衡量了该节点 (国家) 在贸易网络中遭遇中断事件时, 对其邻居节点 (国家) 可访问性的影响程度, 若在网络中删除此节点 (国家) 不影响其他节点 (国家) 的可访问性, 则局部效率为 1, 反之则为 0. 局部效率介于 0—1 之间, 局部效率越接近于 1 表示删除节点对邻居节

点(国家)的破坏性越小),结合稳定性指标和有效份额指标分析了各国在贸易网络中的鲁棒性。

部分学者专注于研究提升供应链网络鲁棒性的策略. Wen 等^[107]充分考虑网络的拓扑结构特征,采用基于节点近邻的中心性(K-core),基于重力定律的中心性(结合度和最短路径长度指标)、PageRank 三个中心性指标识别港口的重要性,并通过联合熵和多尺度因子探讨了网络的脆弱性,应用亚欧海上运输网络实证了方法论的有效性和适用性,表明了海事网络的性能与连通格局的异质性密切相关,去中心化过程可以提高海事网络的鲁棒性.而 Tan 等^[108]提出了一个自上而下的结构冗余的供应链网络的概念模型,发现增加供应链网络的冗余结构可提高网络的抗干扰能力。

一些文献针对全球集装箱班轮运输网络进行了一系列讨论.如 Xu 等^[109]基于全球集装箱班轮运输网络的四节点模体静态结构特征,引入了 MLL (motif-based low degree preferred link), MLDF (motif-based low degree first link) 两个加边策略,发现在尚未连接的港口之间添加少量连边,不仅可以有效提升网络整体的结构脆弱性近似下界,还可以有效提升各国在全球集装箱班轮运输网络中的海运连接鲁棒性.考虑到全球集装箱班轮运输网络存在在时间和空间上的微观演化的动态结构,以及港口节点在单位时间内船舶处理能力有限的容量限制特征,文献^[110]针对全球集装箱班轮运输网络提出了基于“容量-负载”的级联失效模型,发现了当原停靠港口发生拥堵后选择停靠替代港口的策略并不能缓解全球集装箱班轮运输网络的大规模拥堵情况,从扩大枢纽港口集装箱的容量、尽量避免将枢纽港口作为替代港口两方面维持枢纽港口正常运营的策略可有效缓解港口拥堵情况的蔓延.文献^[111]针对全球集装箱班轮运输网络提出了一个综合框架评估其在面对单个港口或国家/地区、多个港口或国家/地区遭受中断事件时的效率和脆弱性.这一工作引入了一个考虑拓扑连通性、地理距离和链路容量 3 个重要因素的效率指标量化港口之间集装箱货物运输的性能,研究发现了单个港口或国家/地区遭受中断时网络鲁棒性相对较高,但对不同港口或国家/地区的破坏性存在极大的异质性,当按照已识别的最重要港口或国家/地区从网络中逐个移除的方式对网络进行拆解时,网络的脆弱性呈非线性增大,揭示了保护重要港口或

国家/地区对维护全球集装箱班轮运输网络安全与稳定至关重要。

文献研究发现供应商位置隔离^[112]、库存控制^[113]、多源采购^[114]、保护供应商设施的安全^[115]等策略均可提升供应链网络的抵抗能力.研究供应链网络的鲁棒性可识别中断风险事件发生的因素,减少其对外部干扰的敏感性,提高其抗风险能力、优化路径和资源配置改善供应链网络结构,提升其保持基本结构和系统功能稳定性的能力。

3.4.2 韧性分析

供应链网络的韧性指的是系统在面对不确定性风险事件时的适应性和恢复到正常状态的能力,具有高韧性的供应链网络能够更好地应对突发性的风险,减小损失,并迅速恢复到正常运作状态.现有研究主要关注供应链网络韧性的量化评估以及提升策略。

中断发生时的适应能力是供应链网络面对中断风险事件时能够自我调整维持正常运营尽量减少不利影响的能力^[116].如 Bai 等^[117]从静态和动态两方面评估网络的韧性则提出了基于团渗流方法 (clique percolation method, CPM) 的网络拆解模型和考虑风险事件后港口交通流量再分配规则的级联效应模型的网络韧性分析框架,考虑了社团结构对港口拥堵传播的影响,预测了潜在全球中断(如 COVID-19 大流行)和关键海事基础设施故障(如苏伊士运河阻塞)对航运网络的影响. Zhao 等^[30]基于以波音公司为种子节点构建的 2971 家企业之间的供应链网络,利用基于代理的模型 (agent-based model) 模拟了企业应对供应链中断的反应和企业如何利用主动和被动两种适应性策略来提高抵御供应链中断风险的能力. Turnquist 和 Vugrin^[113]研究发现在客户和配电中心之间建立备用通道是提升配电网络中断适应能力的有效策略。

中断后的恢复能力是供应链网络在中断风险事件发生后快速高效恢复正常状态的能力^[116].如 Jin 等^[118]基于 2017—2021 年中国进出口贸易统计数据构建了中国锂供应链网络以及中国锂供应链进、出口子网络,引入三维网络韧性指数 (three-dimensional network resilience index, TNRI) 宏观评估了网络韧性以及三维网络韧性指数变化值 (three-dimensional network resilience index-change value, TNRI-CV) 微观度量了网络韧性的

变化, 阐明了相较边攻击而言, 节点攻击对网络韧性的影响更为显著, 有效地确定了对中国锂供应链网络整体韧性产生重大影响的关键因素. Yu 等^[119]收集了联合国商品贸易统计数据库和国际贸易中心 (international trade centre, ITC) 中钴的四大供应链产品 (钴矿石、氧化钴和氢氧化物、钴废料、钴及其产品) 数据构建了 4 类有向加权钴贸易网络, 基于三维框架结合网络的层次结构、匹配关联度、平均聚类系数提出了一种评估静态网络结构韧性演化的模型, 并模拟了仿真随机攻击和蓄意攻击对钴贸易网络韧性的影响, 研究结果表明, 当发生中断风险事件时, 钴矿石网络和钴废料网络更容易受到冲击, 韧性较差, 受影响的主要国家是美国、德国、英国、中国和印度.

也有研究中提出了更为综合的韧性评估指标. 如 Yu 等^[120]收集了 Trade Map 数据库和联合国商品贸易统计数据库中 2001—2021 年的镍贸易数据构建了有向加权镍贸易网络, 提出了考虑响应能力、缓冲能力、恢复能力 3 个指标的综合评估韧性的指标 (integrated resilience, IR), 并采用了 IR 指标评估网络中特定关键节点遭受蓄意攻击时的网络韧性. 研究结果表明, 当网络中 10%—20% 的节点受到蓄意攻击时, 网络将几乎完全崩溃, 揭示了镍贸易网络的无标度特征.

考虑到供应链网络难以避免中断风险事件的实际情况, 厘清中断后韧性的影响因素、作用机制、制定最大限度减轻中断影响的有效策略, 对保障网络系统功能的连续性和稳定性至关重要. 如 Kim 等^[121]统计了供应链网络中被删除的节点或边的数目 (A) 以及被删除的节点或边中不会造成供应链网络中断的节点或边的数目 (B), 将 B/A 定义为供应链网络韧性的量化指标, 比较研究了 Block-diagonal、Scale-free、Centralized、Diagonal 四种基本供应链网络结构面对中断风险事件时的韧性, 结果表明供应链网络度分布遵循幂律分布可提高网络的韧性. Azad 和 Hassini^[122]提出了遭受不可预测中断且实现最佳恢复状态的供应链网络模型, 将库存、开发新的运输路线、外包生产以及动态定价 4 种恢复策略应用于单一和多源采购供应链网络恢复模型, 研究发现了多重恢复策略与单一回收策略相比显著提高了供应链网络恢复期间的总利润, 动态定价恢复策略在单一采购供应链网络中比多源采购供应链网络中更有效. Li 等^[123]构

建了农产品供应链网络, 研究发现了多源采购只能在有限程度上提高农产品供应链网络的韧性; 提高企业在风险出现早期的快速修复能力, 发展潜在合作伙伴关系等有效策略可提高供应链网络的韧性.

综上, 针对供应链韧性的研究主要聚焦于提出韧性评估指标, 以量化供应链网络的韧性表现, 系列研究不仅揭示了供应链网络韧性的演化趋势, 也深入剖析了影响供应链网络韧性的关键因素. 这将有助于采取预防性和缓解性策略, 提高供应链网络的适应性和恢复力, 减轻风险事件对供应链网络的影响.

4 供应链网络的管理特性

4.1 风险传播

Ponomarov 和 Holcomb^[124]指出现代供应链是暴露于各种风险的复杂网络. 当供应链网络中的一个环节发生问题时, 这个问题会通过供应链向上下游企业传导, 这种级联效应将导致风险在供应链网络中传播, 影响整个供应链. 风险传播是供应链网络管理特性研究中的关键问题, 研究者主要构建风险传播模型, 模拟中断风险的传播过程, 分析供应链网络中风险传播的机制、途径和影响范围来制定预防和缓解风险的策略. 根据研究方法的不同, 相关工作可分为基于传染病模型、基于级联效应、基于主体建模的供应链网络风险传播研究三大类.

1) 基于传染病模型的供应链网络风险传播研究

由于风险在供应链网络中的传播与病毒在人群中的传染过程很相似, 因此传染病模型^[125]是供应链网络风险传播研究中最常用的方法论. 如杨康和张仲义^[126]引入易感-感染-易感 (susceptible-infected-susceptible, SIS) 传染病模型, 设置每个企业具有受风险干扰和未受风险干扰两种状态 (分别用 1 和 0 表示), 在 t 时刻处于 1 状态的企业将以概率 λ 干扰其邻居节点, 受风险干扰的企业经过时间 t_d 调整后以概率 β 消除风险的影响, 变为 0 状态. 作者以小世界网络为例, 分析了概率参数和时间参数对网络中风险传播范围和传播速度的影响. 易慧妮^[127]引入易感-感染-康复 (susceptible-infected-recovered, SIR) 模型研究了围绕整机组装构建的汽车供应链网络中的风险传播机理, 并针对性提出了风险控制策略.

应用传染病模型关注于探究供应链网络风险传播的波及程度和影响因素. Berger 等^[128]在 21 个制药、电子、航空等多行业的实证供应链网络中应用易感-感染-易感模型评估了网络结构对产品质量问题在网络中传播的影响, 探究了基于识别关键节点、产品质量问题的原因以及恢复概率(节点识别和解决产品质量问题的能力)、网络结构的风险管理策略遏制质量问题传播的有效性. Wang 等^[129]基于易感-感染(susceptible-Infected, SI)模型提出了贸易网络风险传播(trade network shock propagation, TNSP)模型, 提出了雪崩规模(风险传播影响的国家数量)和雪崩率(风险传播影响的国家数量/G-PVcT 网络中的国家总数)衡量 COVID-19 疫情事件的波及范围 and 影响程度, 分析了 COVID-19 疫情对全球光伏电池贸易网络的影响, 结果表明全球光伏电池贸易网络呈现“稳健但脆弱”的特征, 网络能够抵抗随机传播, 但当关键枢纽节点遭受中断风险传播时, 网络脆弱性增强, 网络在面对需求减少风险事件时的鲁棒性比供应减少风险事件的鲁棒性更强.

在现实的供应链中, 由于企业文化背景不同, 经营者的管理理念不同, 则企业面对风险的态度和行为选择往往不同, 据此可将企业分为保守型和激进型两种风险偏好类型, Wang 等^[26]利用易感-传染-免疫-易感(susceptible-infectious-immune-susceptible, SIRS)传染病模型研究了供应链网络风险传播的演化机制, 深入探讨了包含企业的风险偏好、突发情况下企业运营的稳健性和灵活性、企业收集到的市场信息的完整性和网络拓扑结构(网络连通性和网络异质性)在内的多个因素对供应链网络风险传播的影响, 并提出了建立信息共享机制、

提高运营稳健性和灵活性、关注弱连接合作关系的风险控制策略.

考虑到风险事件发生时, 企业经营者也可能因缺乏经验而受到从众心理的影响, 而模仿周边企业的决策行为. 文献^[130]基于感染-易感-康复(infected-susceptible-recovered, ISR)模型结合平均场理论, 通过数值模拟揭示了从众心理和风险偏好对供应链网络风险传播阈值和规模的影响.

鉴于针对风险的预警信息也可以在供应链网络中传播, 企业收到预警信息后可能采取适当的防范措施, 降低风险的影响. 故 Guo 等^[131]将企业是否掌握风险预警信息考虑在内, 并结合从众心理和风险偏好影响因素提出了双层供应链网络风险传播模型, 其中一层是预警信息传播网络, 企业具有无预警信息(unaware)或有预警信息(aware)两种状态, 另一层是基于 SIR 的风险传播网络. 结果表明, 预警信息扩散下的风险传播阈值与网络拓扑结构、从众心理和风险偏好等因素相关.

2) 基于级联效应的供应链网络风险传播研究

当供应链网络中的一个节点或环节受到风险影响时, 这种影响可能通过网络中的相互依赖关系波及到其他节点, 进而引发级联效应, 影响整个供应链网络. 如 Kang 等^[132]基于供应链视角和级联失效模型构建了铜贸易多层网络风险传播模型(图 9), 仿真模拟了发生贸易风险事件对整个供应链网络的影响, 并探讨了风险传播路径, 发现随着风险冲击加剧, 风险波及范围逐渐向下游转移, 波及的国家数量逐渐增加, 秘鲁、中国、美国是铜供应链网络风险传播中的重要节点, 原材料的可靠供应是保障供应链稳定运营的关键因素. Zheng 等^[133]基于 2020 年的全球化石能源贸易网络采用级联失

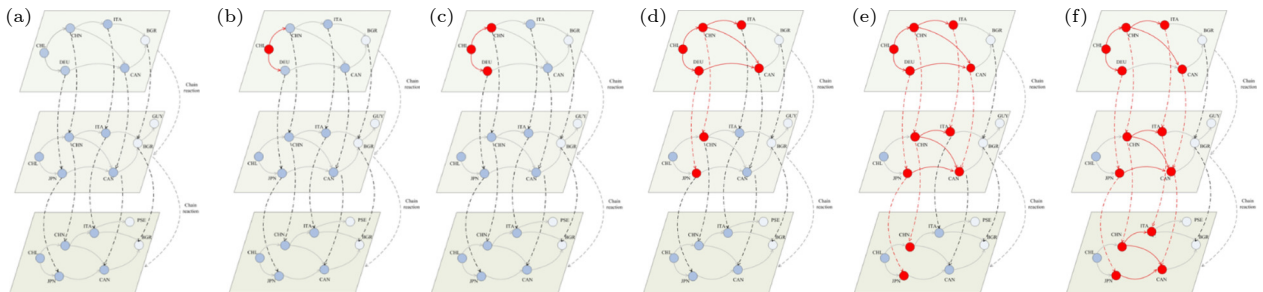


图 9 节点中断条件下铜贸易多层网络风险传播模型, 网络中的节点代表国家, 边代表贸易关系, 红色节点代表受风险冲击影响的国家, 红色边代表受风险冲击的边, 虚线表示产业链的层间关系^[132]

Fig. 9. Risk propagation model of copper trade multilayer networks under node interruption conditions, nodes in the network represent countries, the edges represent trade relations, red nodes represent countries affected by the shock, the red edge indicates the edge affected by the shock, the dotted line represents the inter-layer relationship of the industrial chain^[132].

效模型模拟仿真了制裁对全球化石能源贸易格局的影响, 研究发现, 制裁重塑了全球化石能源贸易格局, 提高了欧洲国家的贸易效率和能源抗控能力, 促进了能源控制中心从欧洲向亚洲的转移. Tang 等^[134] 构建了包含物理层与网络层相互依赖的双层供应链网络, 应用失效载荷传播的时变级联失效模型分析相互依赖的供应链网络中的级联故障过程, 发现当增加供应链网络中节点删除数量时, 其鲁棒性会经历一阶不连续相变, 即使删除少量节点也会导致其崩溃.

学者研讨网络结构对基于级联效应的供应链网络的风险传播的影响. 马靖莲^[135] 从网络结构角度研究突发风险在供应链网络中的级联传播过程, 模拟仿真发现风险在无标度供应链网络上传播速度最快, 且最终失效的企业节点数也最多, 重要性越高的节点或边作为初始风险节点, 突发风险的影响规模和传播速度也相应越大. Yue 等^[136] 从静态结构和动态传播视角出发, 提出了研究全球供应链网络在需求、供应、国家间合作 3 种中断驱动条件下的级联失效的风险传播模型, 发现了网络对随机中断具有鲁棒性, 但容易受到蓄意中断的影响, 揭示了全球供应链网络的关键风险.

在基于“物质流”的供应链网络中, 当一家企业出现故障时, 其上游企业因产品需求减少而停产, 下游企业因材料供应的减少而倒闭, 这种故障在供应链网络中被称为欠载级联故障. 部分学者应用欠载级联故障模型研究了供应链网络的风险传播. 如在 Wang 和 Zhang^[137] 提出的欠载级联故障模型中, 每个节点都具有容量上限和下限, 其中节点容量上限参数 α 与企业规模有关, α 越大意味着企业产能过剩, α 与级联故障规模呈负相关关系, α 有助于减轻级联传播的破坏性; 节点容量下限参数 β 与企业的运营成本、核心能力等有关, β 越小意味着企业竞争力越强, β 与级联故障规模呈正相关关系, 级联故障规模主要与 β 相关, 此模型解释了级联故障过程中供应链网络的动态演化. Liu 等^[138] 应用欠载级联故障模型探讨由于 COVID-19 爆发引发的供应链网络需求和供应减少的负面影响, 研究发现节点的初始负载与级联故障规模呈正相关、容量下限与级联故障规模呈负相关关系.

3) 基于主体建模方法的供应链网络风险传播研究

主体建模方法 (agent-based model, ABM) 旨

在把供应链网络转化为由一系列相互作用的主体构成的演化系统, 通过简单的规则假设来模拟现实中企业之间的互动和风险事件对企业的影响, 从而帮助研究者理解风险的作用过程、传播机理以及影响因素. 如 Proselkov 等^[139] 构建了一个基于 ABM 方法的供应链融资网络, 分析供应链网络中的金融压力如何通过企业间的票据融资关系传播, 融资网络中的公司具有不同的议价能力, 实力雄厚的公司通过谈判延长还款期限和降低融资成本使资金流动性最大化, 从而将金融压力传播到实力较弱的公司, 研究分析了供应链网络金融风险传播的结构性条件和连锁反应. Inoue 和 Todo^[140] 将基于 ABM 方法的风险传播模型应用于包含日本近 100 万家公司供应商-客户关系的供应链网络, 深入分析了由 2011 年日本大地震引发的风险事件对供应链网络的直接和间接影响, 并使用相同模型预测由南海地震引发的风险事件对供应链网络的冲击, 实际与预测研究相结合表明, 中断风险的间接影响损失远远高于其直接影响, 供应链网络的无标度性质、公司生产的产品难以被替代性、网络中巨型强联通分量的复杂特征影响了风险传播的速度和持续性.

部分学者探讨供应链网络中风险传播的影响因素. 石霞虹^[141] 构建了包含供应商、制造商、分销商、零售商 4 类企业类型的基于多主体建模方法的层次结构风险传播动力学模型, 仿真模拟分析随机、目标和混合攻击情况下的风险传播与网络结构稳定性的关系, 发现网络结构稳定性较强的网络能有效阻止风险传播. Sytch 等^[142] 采用 ABM 建模方法结合实证分析研究 COVID-19 疫情基于相邻的陆地边界和航空旅行两种风险传播方式对全球三大汽车制造商供应链网络鲁棒性的影响, 研究结果表明买家选择就近区域的新供应商可提高供应链网络的鲁棒性. Basole 和 Bellamy^[36] 基于主体建模的方法和经典的 SIR 传播动力学模型, 对全球供应链网络中的风险传播进行建模分析, 研究网络结构对风险传播的影响, 探索供应链网络结构如何减轻并缓解潜在风险事件对供应链网络的影响.

鉴于供应链网络本身包含物质、资金、信息等要素的有向流动和传播. Li 等^[143] 采用 ABM 方法探讨了前向 (沿着物质流方向从供应商到买方) 和后向 (逆着物质流方向从买方到供应商) 风险传播对网络健康状况和节点脆弱性的影响, 研究结果表明区分前向和后向风险传播具有重要的现实意义,

前向风险传播通常对从事组装的企业和供应/组装网络的影响更大, 可通过备份供应源来缓解风险传播; 而后向风险传播对从事分销的企业和分销网络的影响更大, 可通过灵活的运营和分销策略来缓解风险传播. 文献 [123] 构建了农产品供应链网络, 创新地将参与主体之间弱关系 (当前没有直接的供需关系但在未来可能建立直接供需关系) 的合作方式引入到农产品供应链网络的中断传播中, 研究加强现有业务关系和建立新业务关系两种恢复策略对农产品供应链网络风险传播的影响.

基于复杂网络方法论研究供应链网络的风险传播, 有助于了解风险在供应链网络中的传播路径与机制, 揭示了风险传播的连锁反应, 可提前预警、优化资源配置、降低风险损失、制定有效策略减轻潜在的风险影响.

4.2 博 弈

供应链网络是具有多方参与、策略互动、竞争与合作、不完全信息等特征的复杂系统. 博弈论本身是研究多个自主体在利益相关情形下的决策行为的理论, 因此应用博弈论研究供应链网络中企业之间的合作竞争博弈、资源分配、策略选择等问题, 有助于帮助企业减少成本和控制风险, 制定实现自身利益最大化的策略, 提升整个供应链网络的效率.

根据行为的时间序列性, 博弈分为静态博弈和动态博弈两类. 静态博弈是指在博弈中参与主体同时执行策略或虽非同时执行策略但后执行策略者并不知道前执行策略者的策略. 纳什均衡 (Nash equilibrium)^[144], 又称为非合作博弈均衡, 在博弈过程中, 当事人一方无论对方如何选择策略, 都会选择某个确定的策略, 该策略即被称为支配性策略. 若在其他所有参与者的策略确定的情况下, 任一参与者选择的策略都是最优的, 这个组合被定义为纳什均衡.

变分不等式 (variational inequality) 理论被广泛应用于求解供应链网络的均衡态, 如 Peng 等^[145] 构建了包含原材料供应商、服务提供商、制造服务集成商和需求市场的产品服务供应链网络, 研究了 COVID-19 相关风险影响下网络的均衡决策问题, 基于纳什均衡理论, 利用变分不等式求解考虑风险管理的产品服务供应链网络的均衡解并验证了模型的合理性. 研究表明, 上下游企业的风

险管理会相互影响. Chen 等^[146] 构建了包含多个制造商和零售商的供应链网络模型, 其中制造商参与同质产品的生产, 而零售商则购买产品并将其出售给终端市场的消费者. 利用微分变分不等式推导出模型的微分纳什均衡解, 并证明了其唯一性.

有学者将供应链网络中不同层次参与者之间产品流动数量相互一致、产品流动数量和价格满足最优条件的状态称为均衡态, 采用修正投影法求解模型处于均衡态时的均衡解. 如 Nagurney 等^[147] 采用变分不等式模型分析了电子商务供应链网络的均衡态问题, 文献^[148,149] 构建包含制造商、零售商、消费者 3 种参与主体的非合作性层次供应链网络的博弈模型并求解均衡解. Dong 等^[150] 构建了涵盖制造商和具有随机需求的零售商两种主体的非合作性层次供应链网络的博弈模型并求解均衡解. 文献^[151] 引入了涉及制造商、分销商和零售商 3 种主体的考虑随机需求和多标准决策的供应链网络模型, 求利润最大化、产量最大化、高服务水平 and 最短运输时间约束条件下的均衡解. Feyzian-Tary 等^[152] 构建涵盖原材料供应商、制造商、零售商和客户 4 种参与主体, 多产品非合作性包含新进入和现有两个供应链网络的博弈模型, 求均衡解, 确定产品的最优流动量和最优价格.

针对供应链网络中连续变量的均衡优化问题, He 和 Cui^[153] 以供应链链路均衡态为优化目标, 流量守恒为主要约束条件创新性地构建了一个变分不等式模型, 刻画包含原材料供应商、制造商、零售商和客户 4 种参与主体的多层供应链网络中的决策过程, 引入了考虑学习阶段内的搜索和学习周期开始时的放大搜索空间两个基本操作的基于群体启发式的多尺度模型学习算法 (multiscale model learning algorithm, MMLA), 将变分不等式模型 (variational inequality model, VIM) 转化为一系列等价的非线性规划模型 (non-linear programming models, NLPs), 有效求解了供应链网络的最优均衡态, 发现多层供应链网络可存在多个最优均衡态.

斯塔克伯格博弈 (Stackelberg game)^[154] 也是非合作性博弈的一种类型. 在斯塔克伯格博弈中, 先由领导者做出决策, 跟随者根据领导者的策略进行决策, 然后领导者再根据跟随者的策略调整自己的决策, 如此往复双方都保证自己在对方策略下利益最大化. 可广泛应用于其于供应链网络中的产业组

织、市场竞争、资源分配等领域. Wang 等^[155]构建了包含作为领导者的产品族架构和涉及供应商、制造商、装配商和分销中心 4 种参与主体的作为跟随者的供应链网络架构的双层联合优化的 1-Leader-4-Follower 的 Stackelberg 博弈论模型, 采用嵌套遗传算法求解其均衡解.

动态博弈是指在博弈中参与主体的策略执行有先后顺序, 且后执行者根据先执行者的策略执行策略, 强调的是个体如何随着时间的推移在不断重复的博弈过程中实现收益最大化. 房艳君和吴梦娜^[156]基于动态博弈理论构建了涵盖制造商、零售商、消费者 3 种参与主体的供应链网络模型, 分析了制造商和零售商同时采取合作或者各自采取背叛策略下的收益情况, 研究供应链网络达到均衡状态的决策条件.

演化博弈论不同于动态博弈, 着重研究的是群体层面的演化过程, 可以用来研究供应链中参与者策略的传播和演化. Tan 等^[157]基于 ABM 方法构建演化博弈模型, 引入惩罚机制和风险成本模拟供应链网络中的企业之间信息共享行为的演化过程, 分析其均衡态和稳定性.

为了深入探讨博弈论在具有多层次、多环节、多类型节点、高复杂性和高异质性的供应链网络中的应用, Daniele^[158]构建了具有制造商、零售商和消费者 3 个类型的决策者, 考虑价格和出货量随时间演变的多层供应链网络模型, 假设存在商品生产过剩和需求过剩情况, 采用无限维对偶理论提供了多层网络每个层次决策者的均衡条件以及控制整个多层供应链网络的时变变分公式.

考虑到供应链网络的博弈场景中涉及多个参与者的复杂程度, 研究者引入了广义纳什均衡的概念. 广义纳什均衡中博弈强调了不同博弈参与者之间的相互依赖性, 参与者的策略不仅取决于其他参与者当前的策略, 还可能受到其他博弈参与者的影响. Nagurney^[159]构建了一个考虑不同场景下劳动力约束的供应链网络博弈论模型, 该模型是在劳动力约束的情况下, 多个企业在差异化产品的生产、储存和最终分配方面进行非合作竞争追求利润最大化, 鉴于不同的劳动力约束情况将纳什均衡和广义纳什均衡应用于供应链网络中劳动力的竞争, 结合 COVID-19 大流行背景下美国采摘新鲜农产品 (蓝莓) 的移民劳动力短缺的案例验证了此模型的有效性.

供应链网络是包含多个如供应商、制造商、分销商等策略制定者, 且其彼此之间相互作用的动态复杂系统. 博弈论能够有效地分析策略制定者之间的相互作用、决策过程, 能够深入理解供应链网络中的合作与竞争关系, 探讨策略制定者在面对劳动力短缺、原材料价格变动不确定性事件时的策略选择, 研究博弈过程中策略制定者策略的演化和变化, 理解供应链网络中各策略制定者之间的均衡态, 为提高整个供应链网络的系统效率提供有力支持.

5 问题与挑战

针对大规模实证供应链网络的研究, 通常会受到数据质量、数据可用性、数据安全、数据隐私性等各种因素的制约. 首先, 如何获取准确、全面、有时效性的供应链网络数据, 采用高效的标准化的数据清洗处理方法, 确定节点属性和关系强度, 解决数据的不一致和不完整性问题是目前研究仍然面临的关键挑战.

实际供应链网络是具有多层次、多环节、高复杂性、高异质性等特点的动态演化系统, 利用合适的复杂网络理论、动态网络模型构建演化模型, 是更好地模拟仿真供应链网络复杂性和动态性的关键, 是深入研究供应链网络的重要前提. 构建供应链网络的动态网络模型描述网络结构随时间的演变, 例如结合长短期记忆网络方法处理时序数据中的长期依赖关系, 分析网络结构的演化趋势以及预测未来的网络状态. 供应链系统中不仅包含节点对之间的二元关系, 还涵盖以群体、组织的形式出现的高阶相互作用. 应用高阶网络理论构建高阶网络模型, 捕捉节点集合之间的相互作用, 为描述供应链网络中的多体相互作用的动力学过程提供了研究思路.

当前关于供应链网络结构的研究尚未充分考虑供应链网络自身的独特性. 大规模网络结构的复杂性和实际数据的不准确性, 都为采用高效算法正确分析其拓扑结构带来了巨大的挑战. 研究者可借鉴高阶网络结构的概念, 探讨高阶拓扑特征在供应链网络中的出现原理和作用机制, 揭示供应链网络中更深层次的结构特征. 供应链网络中的关键节点、关键连边识别需要更多地关注网络中节点、连边属性以及节点、连边之间关系的多样性、复杂性、动态性等特点, 结合实际应用背景提出新的评

价节点、连边重要性的指标. 高阶网络理论使关键节点、关键连边识别不再局限于刻画单个节点重要性、单条连边的重要性, 而是考虑由多个节点、多条连边组合成的结构单元在网络中重要性和影响力, 提高关键节点、关键连边识别的准确性和可靠性. 研究者针对供应链网络提出充分考虑社团模糊性、重叠性、动态性、局部性, 以及网络规模等因素的社团检测算法, 为有效准确地洞察网络结构和管理特性提供坚实支撑. 在高阶网络的视角下, 学者可探索基于多体相互作用的社团检测算法, 以更深入的洞察供应链网络中的社团结构, 推动供应链网络的优化和协同发展. 图嵌入方法可将图中的节点、边及其结构信息转换为低维向量表示, 向量表示可以应用于如节点分类、链接预测和聚类分析等下游任务, 有助于识别供应链网络中的关键节点、潜在瓶颈以及优化路径选择.

供应链网络的脆弱性从韧性和鲁棒性两方面展开研究, 韧性研究关注供应链网络的恢复能力和适应能力, 而鲁棒性分析则需要注重网络在面对未知风险时的稳健性和抗打击能力. 供应链网络的多样性、层次性、动态复杂性等特点使得对其脆弱性进行明确界定和量化变得困难. 供应链网络遭受如市场波动、自然灾害和政治不稳定等因素的影响, 这些因素的多样性、多发性和不确定性增加了脆弱性研究的复杂性. 目前的脆弱性研究模型和方法常常未充分考虑供应链网络随时间和环境变化的动态性和非线性特征, 从而限制了对脆弱性的准确评估和全面理解. 研究者未来可重点关注于构建综合的脆弱性评估框架分析供应链网络的韧性和鲁棒性, 采用复杂系统理论、仿真模拟等方法深入研究供应链网络的动态行为和演化规律, 揭示其脆弱性形成因素和演化机制, 以推动对供应链网络脆弱性的深入理解和有效调控. 应用强化学习算法调整网络结构和策略, 以适应环境和需求的变化, 这种方法可使供应链网络具备自适应能力, 提高对突发事件(如供应中断)的响应速度.

风险源头的多样性、风险传播路径的复杂性是识别风险传播路径和量化风险传播影响程度的重要因素, 与制定有效的危机管理策略息息相关. 供应链网络中节点群体之间的互动影响供应链的风险传播路径和机制. 应用高阶网络理论识别和量化风险传播的潜在路径和影响因素的方法, 为应对和管理风险提供更有效的策略支持.

供应链网络中包含多个不同角色的参与主体, 如何建模和分析不同背景下多方利益最大化的复杂动态博弈是一个需要深入研究的方向. 高阶网络理论可揭示供应链网络中多方群体之间的合作、竞争关系, 有利于决策者制定更有效的博弈策略. 供应链网络中信息的不对称性和不完全性, 以及多种不确定因素的存在, 给多方决策行为的预测和探讨带来了挑战.

6 结 论

本文系统整理了基于复杂网络理论的供应链的相关研究, 从供应链网络的构建、结构和管理特性 3 个方面展开了对供应链网络的深入分析, 概述了有关供应链网络的构建模型、评价指标、研究方法、分析维度, 厘清了关键概念, 梳理了基本理论和方法, 提供了清晰的研究脉络和框架. 通过分析当前的研究进展, 分类总结了现有的主要研究方向和热点问题, 评估和比较了当前的研究方法, 揭示了研究空白, 并提出了未来的研究方向.

尽管复杂网络理论在具体应用中仍然面临一些方法和数据方面的挑战, 但总体而言日益丰富的研究成果已经验证了基于复杂网络理论的供应链研究方法在实际应用背景中的有效性. 随着相关研究已日趋成熟, 不断引入创新性的理论方法进行全面透彻的分析, 不仅能够深入了解供应链网络中的各种关系和相互影响, 洞察供应链网络的运作机制, 还为提高供应链的运行效率、韧性和鲁棒性提供理论和策略指导.

参考文献

- [1] Choi T Y, Dooley K J, Rungtusanatham M 2001 *J. Oper. Manag.* **19** 351
- [2] Surana A, Kumara S, Greaves M, Raghavan U N 2005 *Int. J. Prod. Res.* **43** 4235
- [3] Helbing D, Armbruster D, Mikhailov A S, Lefebvre E 2006 *Physica A* **363** xi
- [4] Cao W G, Xie S L, Qiao X D 2008 *Eighth International Conference of Chinese Logistics and Transportation Professionals* Chengdu, China, July 31–August 3, 2008 p1949
- [5] Zhang H M, Feng T T, Yang Y S 2022 *Resour. Policy* **75** 102492
- [6] Dolgui A, Ivanov D, Sokolov B 2018 *Int. J. Prod. Res.* **56** 414
- [7] Cruz J M 2008 *Eur. J. Oper. Res.* **184** 1005
- [8] Hearnshaw E J, Wilson M M 2013 *Int. J. Oper. Prod. Man.* **33** 442

- [9] Pathak S D, Day J M, Nair A, Sawaya W J, Kristal M M 2007 *Decision Sci.* **38** 547
- [10] Borgatti S P, Li X 2009 *J. Supply Chain Manag.* **45** 5
- [11] Ledwoch A, Yasarcan H, Brintrup A 2018 *Int. J. Prod. Econ.* **197** 13
- [12] Wang K Q, Zeng Z F, Sun D C 2008 *Fourth International Conference on Semantics, Knowledge and Grid* Beijing, China, December 3–5, 2008 p493
- [13] Ou C Y, Pan F B, Lin S J 2024 *Sustainability* **16** 5514
- [14] Xu M J, Wang X P, Zhao L D 2014 *Int. J. Syst. Sci. Oper. Logist.* **1** 105
- [15] Liang D, Bhamra R, Liu Z Y, Pan Y C 2022 *Mathematics* **10** 3008
- [16] Chan C K, Zhou Y, Wong K H 2019 *Eur. J. Oper. Res.* **275** 514
- [17] Gedik R, Medal H, Rainwater C, Pohl E A, Mason S J 2014 *Transp. Res. E Logist. Transp. Rev.* **71** 45
- [18] Carvalho H, Naghshineh B, Govindan K, Cruz-Machado V 2022 *Comput. Ind. Eng.* **171** 108375
- [19] Carnovale S, Rogers D S, Yeniyurt S 2019 *J. Purch. Supply Manag.* **25** 134
- [20] Wuttke D A, Blome C, Henke M 2013 *Int. J. Prod. Econ.* **145** 773
- [21] Yu H, Li H R 2023 *Resour. Policy* **85** 104055
- [22] Rezapour S, Farahani R Z, Pourakbar M 2017 *Eur. J. Oper. Res.* **259** 1017
- [23] Ivanov D 2023 *Int. J. Prod. Res.* **61** 1683
- [24] Van den Brink S, Kleijn R, Sprecher B, Tukker A 2020 *Resour. Conserv. Recycl.* **156** 104743
- [25] Sloane A, O'reilly S 2013 *Prod. Plan. Control* **24** 621
- [26] Wang J P, Zhou H, Jin X D 2021 *Chaos Soliton. Fract.* **143** 110259
- [27] Brintrup A, Ledwoch A, Barros J 2016 *Logist. Res.* **9** 1
- [28] Kim Y, Choi T Y, Yan T, Dooley K 2011 *J. Oper. Manag.* **29** 194
- [29] Shi J Y, Yang J H, Li Y X, Zhang Q W 2019 *Chin. Ind. Econ.* **9** 136 (in Chinese) [史金艳, 杨健亨, 李延喜, 张启望 2019 *中国工业经济* **9** 136]
- [30] Zhao K, Zuo Z, Blackhurst J V 2019 *J. Oper. Manag.* **65** 190
- [31] D'Ignazio A, Giovannetti E 2014 *Int. J. Prod. Econ.* **147** 486
- [32] Tang L B, Wang P, Ma Z J, Pauliuk S, Chen W Q, Dai T, Lin Z P 2023 *J. Ind. Ecol.* **27** 323
- [33] Bellamy M A, Ghosh S, Hora M 2014 *J. Oper. Manag.* **32** 357
- [34] Mu D, Ren H Y, Wang C, Yue X P, Du J B, Ghadimi P 2023 *Resour. Policy* **80** 103225
- [35] Hu X Q, Wang C, Lim M K, Chen W Q, Teng L M, Wang P, Wang H M, Zhang C, Yao C Y, Ghadimi P 2023 *Renew. Sust. Energ. Rev.* **173** 113083
- [36] Basole R C, Bellamy M A 2014 *Decision Sci.* **45** 753
- [37] Barabási A L, Albert R 1999 *Science* **286** 509
- [38] Albert R, Barabási A L 2002 *Rev. Mod. Phys.* **74** 47
- [39] Bell M, Perera S, Piraveenan M, Bliemer M, Latty T, Reid C 2017 *Sci. Rep.* **7** 42431
- [40] Chen H W, Chen G P, Zhang Q N, Zhang X X 2023 *PLoS One* **18** e0278697
- [41] Wang J P, Zhou H, Sun X L, Yuan Y F 2023 *Chaos Soliton. Fract.* **170** 113371
- [42] Yu H S, Zhao L D, Lai X H 2009 *Chin. J. Manag.* **6** 187 (in Chinese) [于海生, 赵林度, 来向红 2009 *管理学报* **6** 187]
- [43] Tian Y Z, Shi Y Q, Shi X Q, Li M H, Zhang M 2021 *IEEE Access* **9** 91265
- [44] Suo Q, Guo J L, Sun S W, Liu H 2018 *Physica A* **489** 141
- [45] Wang X F, Li X, Chen G R 2012 *Network Science: An Introduction* (Beijing: High Education Press) p397 (in Chinese) [汪小帆, 李翔, 陈关荣 2012 *网络科学导论* (北京: 高等教育出版社) p397]
- [46] Zhao Q 2021 *M. S. Thesis* (Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications) (in Chinese) [赵晴 2021 硕士学位论文 (北京: 北京邮电大学)]
- [47] Shi H J, Shi L 2009 *CIESC J.* **60** 1500 (in Chinese) [石海佳, 石磊 2009 *化工学报* **60** 1500]
- [48] Li J M, Zhang N 2008 *Cmplx. Syst. Complex. Sci.* **5** 72 (in Chinese) [李季明, 张宁 2008 *复杂系统与复杂性科学* **5** 72]
- [49] Orenstein P 2016 *Second International Symposium on Stochastic Models in Reliability Engineering, Life Science and Operations Management* Beer Sheva, Israel, February 15–18, 2016 p562
- [50] Yang Y, Poon J P, Liu Y, Bagchi-Sen S 2015 *Energy* **93** 534
- [51] Kang L, Wu W Z, Yu H, Su F Z 2022 *Sensors* **22** 5889
- [52] Sun J Y, Wei P F, Wang W 2015 *J. Xi'an Univ. Technol.* **31** 391 (in Chinese) [孙军艳, 傅卫平, 王雯 2015 *西安理工大学学报* **31** 391]
- [53] Bombelli A, Santos B F, Tavasszy L 2020 *Transp. Res. E Logist. Transp. Rev.* **138** 101959
- [54] Yang J L, Chen W 2023 *Resour. Policy* **86** 104277
- [55] Yue X P, Mu D, Wang C, Ren H Y, Ghadimi P 2023 *Int. J. Prod. Res.* **61** 2758
- [56] Li Z F, Li H W, Zhang Q Q, Qi X L 2024 *Ocean Coast. Manag.* **248** 106969
- [57] Yuan X J, Ge C B, Liu Y P, Li N, Wang Y 2022 *Sustainability* **14** 16059
- [58] Xia Q F, Du D B, Cao W P, Li X Y 2023 *Resour. Policy* **82** 103532
- [59] Zhao G M, Li W X, Geng Y, Bleischwitz R 2023 *Resour. Policy* **85** 103815
- [60] Tan D, Ma S T 2022 *Econ. Geography* **42** 110 (in Chinese) [谭丹, 马顺甜 2022 *经济地理* **42** 110]
- [61] Zuo Z L, McLellan B C, Li Y L, Guo H X, Cheng J H 2022 *Resour. Policy* **78** 102912
- [62] Xu M Q, Pan Q, Muscoloni A, Xia H X, Cannistraci C V 2020 *Nat. Commun.* **11** 2849
- [63] Lü L Y, Chen D B, Ren X L, Zhang Q M, Zhang Y C, Zhou T 2016 *Phys. Rep.* **650** 1
- [64] Ren X L, Lü L Y 2014 *Chin. Sci. Bull.* **59** 1175 (in Chinese) [任晓龙, 吕琳媛 2014 *科学通报* **59** 1175]
- [65] Yu M Y, Lü K F, Ruan Y P 2022 *System Eng. Theor. Prac.* **42** 1796 (in Chinese) [于明洋, 吕可夫, 阮永平 2022 *系统工程理论与实践* **42** 1796]
- [66] Perera S, Bell M G, Bliemer M C 2017 *Appl. Netw. Sci.* **2** 1
- [67] Guo Y Q, Zhao B Y, Zhang H W 2023 *Energy* **263** 125912
- [68] Zhu J F, Liu W, Yang Y B 2023 *J. Mar. Sci. Eng.* **11** 724
- [69] Mizgier K J, Jüttner M P, Wagner S M 2013 *Int. J. Prod. Res.* **51** 1477
- [70] Basole R C, Ghosh S, Hora M S 2017 *IEEE T. Eng. Manag.* **65** 141
- [71] Bonacich P 1987 *Am. J. Sociol.* **92** 1170
- [72] Shi J Y, Liu X, Li Y X, Yu C H, Han Y S 2022 *Int. Rev. Financ. Anal.* **80** 102040
- [73] Liu R X 2022 *M. S. Thesis* (Chengdu: Southwestern University of Finance and Economics) (in Chinese) [刘若曦 2022 硕士学位论文 (成都: 西南财经大学)]
- [74] Lavassani K M, Movahedi B 2021 *Int. J. Glob. Bus.* **16** 86
- [75] Shi J Y, Yang J H, Li Y X 2019 *J. Bus. Econ. Manag.* **20** 1258
- [76] Huang H S, Zhang J P, Yan J, Gong Y, Wang L K 2024

- Eur. J. Innov. Manag.* **27** 551
- [77] Lou P, Chen Y T, Yan J W 2020 *IEEE Access* **8** 148827
- [78] Blondel V D, Guillaume J L, Lambiotte R, Lefebvre E 2008 *J. Stat. Mech. : Theory Exp.* **2008** P10008
- [79] Newman M E, Girvan M 2004 *Phys. Rev. E* **69** 026113
- [80] Ng A, Jordan M, Weiss Y 2001 *Advances in Neural Information Processing Systems* Vancouver, British Columbia, Canada, December 3–8, 2001 p849
- [81] Rosvall M, Bergstrom C T 2007 arXiv: 0707.0609 [physics. soc-ph]
- [82] Zhang Q, Pu S H, Yin M 2023 *J. Mar. Sci. Eng.* **11** 1585
- [83] Kito T, Brintrup A, New S, Reed-Tsochas F 2014 *Saïd Business School WP* **3**
- [84] Leicht E A, Newman M E 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 118703
- [85] Wiedmer R, Griffis S E 2021 *J. Bus. Logist.* **42** 264
- [86] Shi D Y, Shang F, Chen B S, Expert P, Lü L Y, Stanley H E, Lambiotte R, Evans T S, Li R Q 2024 *Commun. Phys.* **7** 170
- [87] Ma'arif M R 2016 *Sixth International Annual Engineering Seminar* Yogyakarta, Indonesia, August 1–3, 2016 p206
- [88] Chakraborty T, Chauhan S S, Ouhimmou M 2020 *Int. J. Prod. Res.* **58** 3618
- [89] Hu X Q, Wang C, Zhu X Y, Yao C Y, Ghadimi P 2021 *Resour. , Conserv. Recycl.* **170** 105591
- [90] Wang W Y, Fan L W, Zhou P 2022 *Energy* **238** 121924
- [91] Chen G, Kong R, Wang Y X 2020 *Physica A* **540** 123002
- [92] Zhong W Q, An H Z, Gao X Y, Sun X Q 2014 *Physica A* **413** 42
- [93] Zhong W Q, An H Z, Shen L, Dai T, Fang W, Gao X Y, Dong D 2017 *Energy* **123** 260
- [94] Zheng S X, Zhou X R, Xing W L, Zhao P 2022 *Resour. Policy* **77** 102783
- [95] Li Y H, Zobel C W, Seref O, Chatfield D 2020 *Int. J. Prod. Econ.* **223** 107529
- [96] Shi X Q, Long W, Li Y Y, Deng D S 2022 *Physica A* **586** 126518
- [97] Li Y H, Zobel C W 2020 *Int. J. Prod. Econ.* **228** 107693
- [98] Zhao Z G, Zhou G G, Li H X 2019 *Comput. Sci.* **46** 138 (in Chinese) [赵志刚, 周根贵, 李虎雄 2019 *计算机科学* **46** 138]
- [99] Wang J P, Zhou H, Zhao Z, Sun X L 2023 *Fourth International Conference on Computer Engineering and Application* Hangzhou, China, April 7–9, 2023 p61
- [100] Xie T Y, Kang K, Wang J J, Zhang X L 2018 *J. Math. Prac. Theor.* **48** 40 (in Chinese) [谢廷宇, 康凯, 王军进, 张学龙 2018 *数学的实践与认识* **48** 40]
- [101] Zhao K, Scheibe K, Blackhurst J, Kumar A 2018 *IEEE T. Eng. Manag.* **66** 127
- [102] Xu X B, Li H 2015 *Syst. Eng.* **33** 17 (in Chinese) [徐翔斌, 李恒 2015 *系统工程* **33** 17]
- [103] Nair A, Vidal J M 2011 *Int. J. Prod. Res.* **49** 1391
- [104] Wei N, Xie W J, Zhou W X 2022 *Energy* **251** 123939
- [105] Sun J Y, Tang J M, Fu W P, Chen Z R, Niu Y R 2020 *Comput. Ind. Eng.* **144** 106457
- [106] Shahnazi R, Sajedianfard N, Melatos M 2023 *Energy Rep.* **10** 2017
- [107] Wen T, Gao Q Y, Chen Y W, Cheong K H 2022 *Reliab. Eng. Syst. Safe.* **226** 108578
- [108] Tan W J, Zhang A N, Cai W 2019 *Int. J. Prod. Res.* **57** 6385
- [109] Xu M Q, Deng W H, Zhu Y F, Linyuan L 2023 *Reliab. Eng. Syst. Safe.* **240** 109576
- [110] Xu X J, Zhu Y F, Xu M Q, Deng W H, Zuo Y Q 2022 *Ocean Coast. Manag.* **229** 106325
- [111] Xu M Q, Zhu Y F, Deng W H, Shen Y H, Li T 2024 *Global Netw.* **24** e12445
- [112] Vugrin E D, Warren D E, Ehlen M A 2011 *Process Saf. Prog.* **30** 280
- [113] Turnquist M, Vugrin E 2013 *Environ. Syst. Decis.* **33** 104
- [114] Yildiz H, Yoon J, Talluri S, Ho W 2016 *Decision Sci.* **47** 661
- [115] Hosseini S, Barker K 2016 *Comput. Ind. Eng.* **93** 252
- [116] Hosseini S, Barker K 2016 *Int. J. Prod. Econ.* **180** 68
- [117] Bai X W, Ma Z J, Zhou Y M 2023 *Transp. Res. E Logist. Transp. Rev.* **170** 103016
- [118] Jin P F, Wang S G, Meng Z, Chen B 2023 *Resour. Policy* **87** 104339
- [119] Yu Y, Ma D P, Zhu W W 2023 *Resour. Policy* **83** 103636
- [120] Yu Y, Ma D P, Qian Y M 2023 *Resour. Policy* **86** 104296
- [121] Kim Y, Chen Y S, Linderman K 2015 *J. Oper. Manag.* **33** 43
- [122] Azad N, Hassini E 2019 *Eur. J. Oper. Res.* **275** 481
- [123] Li Z Y, Zhao P X, Han X 2022 *Physica A* **589** 126611
- [124] Ponomarov S Y, Holcomb M C 2009 *Int. J. Logist. Manag.* **20** 124
- [125] Hethcote H W 2000 *SIAM Rev.* **42** 599
- [126] Yang K, Zhang Z Y 2013 *J. Syst. Sci. Math. Sci.* **33** 1224 (in Chinese) [杨康, 张仲义 2013 *系统科学与数学* **33** 1224]
- [127] Yi H N 2015 *M. S. Thesis* (Chengdu: Southwest Jiaotong University) (in Chinese) [易慧妮 2015 硕士学位论文 (成都: 西南交通大学)]
- [128] Berger N, Schulze-Schwering S, Long E, Spinler S 2023 *Eur. J. Oper. Res.* **304** 1036
- [129] Wang C, Huang X, Hu X Q, Zhao L F, Liu C, Ghadimi P 2021 *Appl. Energy* **290** 116744
- [130] Guo H Y, Cheng Y Y 2019 *Physica A* **529** 121400
- [131] Guo H Y, Cheng Y Y, Xie X X 2020 *Physica A* **545** 123506
- [132] Kang X Y, Wang M X, Chen L, Li X 2023 *Resour. Policy* **85** 103797
- [133] Zheng S X, Zhou X R, Tan Z L, Zhang H, Liu C, Hao H C, Hu H, Cai X M, Yang H S, Luo W B 2022 *Energy Sustain. Dev.* **71** 517
- [134] Tang L, Jing K, He J, Stanley H E 2016 *Physica A* **443** 58
- [135] Ma J L 2016 *Ph. D. Dissertation* (Sian: Chang'an University) (in Chinese) [马靖莲 2016 博士学位论文 (西安: 长安大学)]
- [136] Yue X P, Mu D, Wang C, Ren H Y, Peng R, Du J B 2024 *Reliab. Eng. Syst. Safe.* **242** 109728
- [137] Wang Y, Zhang F 2018 *Nonlinear Dynam.* **92** 1403
- [138] Liu H, Han Y Y, Ni J L, Zhu A D 2022 *Math. Probl. Eng.* **2022** 1
- [139] Proselkov Y, Zhang J, Xu L, Hofmann E, Choi T Y, Rogers D, Brintrup A 2024 *Int. J. Prod. Res.* **62** 823
- [140] Inoue H, Todo Y 2019 *Nat. Sustain.* **2** 841
- [141] Shi X H 2012 *M. S. Thesis* (Hangzhou: Hangzhou Dianzi University) (in Chinese) [石霞虹 2012 硕士学位论文 (杭州: 杭州电子科技大学)]
- [142] Sytch M, Kim Y, Page S 2022 *Calif. Manage. Rev.* **64** 119
- [143] Li Y H, Chen K D, Collignon S, Ivanov D 2021 *Eur. J. Oper. Res.* **291** 1117
- [144] Nash Jr J F 1950 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **36** 48
- [145] Peng Y T, Xu D, Veglianti E, Magnaghi E 2023 *J. Ind. Manag. Optim.* **19** 3459
- [146] Chen Z B, Tian C Y, Zhang D, Chen D Y 2020 *Oper. Res.* **20** 649
- [147] Nagurney A, Loo J, Dong J, Zhang D 2002 *Netnomics* **4** 187
- [148] Nagurney A, Dong J, Zhang D 2002 *Transp. Res. E Logist. Transp. Rev.* **38** 281
- [149] Dong J, Zhang D 2002 *Transportation and Traffic Theory in*

- the 21st Century* Adelaide, Australia, July 16–18, 2002 p179
- [150] Dong J, Zhang D, Nagurney A 2004 *Eur. J. Oper. Res.* **156** 194
- [151] Dong J, Zhang D, Yan H, Nagurney A 2005 *Ann. Oper. Res.* **135** 155
- [152] Feyzian-Tary I, Razmi J, Sangari M S 2018 *Ann. Oper. Res.* **264** 89
- [153] He S X, Cui Y T 2023 *Supply Chain Anal.* **4** 100039
- [154] Von Stackelberg H, Peacock A T, Schneider E, Hutchison T W 1953 *Economica* **20** 384
- [155] Wang D P, Du G, Jiao R J, Wu R, Yu J P, Yang D 2016 *Int. J. Prod. Econ.* **172** 1
- [156] Fang Y J, Wu M N 2016 *Stat. Decis.* **17** 49 (in Chinese) [房艳君, 吴梦娜 2016 *统计与决策* **17** 49]
- [157] Tan J, Jiang G Q, Wang Z G 2019 *Int. J. Intell. Inf. Technol.* **15** 54
- [158] Daniele P 2010 *Transp. Res. E Logist. Transp. Rev.* **46** 855
- [159] Nagurney A 2021 *Eur. J. Oper. Res.* **293** 880

REVIEW

Supply chain research based on complex network theory*

Cui Jun-Ying¹⁾ Xu Shu-Qi²⁾ Na Xu³⁾ Pan Li-Ming⁴⁾ Lü Lin-Yuan^{4)†}

1) (*Department of Physics, University of Fribourg, Fribourg CH-1700, Switzerland*)

2) (*Institute of Dataspace, Hefei Comprehensive National Science Center, Hefei 230088, China*)

3) (*Institute of Fundamental and Frontier Sciences, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China*)

4) (*School of Cyber Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

(Received 17 May 2024; revised manuscript received 4 August 2024)

Abstract

Supply chain is a chain structure formed by the sequential processes of production and distribution, spanning from raw material suppliers to end customers. An efficient and reliable supply chain is of great significance in enhancing enterprise's market competitiveness and promoting sustainable social and economic development. The supply chain includes the interconnected flows of materials, resources, capital, and information across various stages, including procurement, production, warehousing, distribution, customer service, information management, and financial management. By representing the various participants in the supply chain as nodes and their interactions—such as the logistics, capital flow, information flow, and other interactions—as edges, the supply chain can be described and characterized as a complex network. In recent years, using complex network theory and methods to model and analyze supply chains has attracted increasing attention from researchers. This paper systematically reviews the supply chain research based on complex network theory, providing an in-depth analysis of supply chain networks in terms of network construction, structural properties, and management characteristics. First, this paper reviews two kinds of approaches to constructing supply chain network: empirical data-based approach and network model-based approach. In the empirical data-based research, scholars use common supply chain databases or integrate multiple data sources to identify the supply chain participants and clarify their attributes, behaviors, and interactions. Alternatively, the research based on network models employs the Barabási–Albert (BA) model, incorporating factors such as node distance, fitness, and edge weights, or uses hypergraph models to construct supply chain networks. Next, this paper summarizes the research on the structural properties of supply chain networks, focusing on their topological structure, key node identification, community detection, and vulnerability analysis. Relevant studies

* Project supported by the Major Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. T2293771), the National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China (Grant No. 62306191), and the China Scholarship Council of China (Grant No. 202108410127).

† Corresponding author. E-mail: linyuan.lv@ustc.edu.cn

explore the topological structure of supply chain networks, uncovering the connections between nodes, hierarchical structures, and information flow paths between nodes. By analyzing factors such as node centrality, connection strength, and flow paths, the key nodes within the supply chain network are identified. Community detection algorithms are used to investigate the relationships between different structural parts and to analyze the positional structure, cooperative relationships, and interaction modes. Furthermore, quantitative evaluation indicators and management strategies are proposed for the robustness and resilience of supply chain networks. Further research has explored the management characteristics of supply chain networks, including risk propagation and competition game. Relevant studies have employed three main methods—epidemic model, cascading failure model, and agent-based model—to construct risk propagation models, simulate the spread of disruption risks, and analyze the mechanisms, paths, and extent of risk propagation within supply chain networks. These studies provide valuable insights for developing risk prevention and mitigation strategies. In addition, the game theory has been used to investigate the cooperative competition, resource allocation, and strategy selection among enterprises within the supply chain network. This paper reviews the research contents and emerging trends in supply chain studies based on complex network methods. It demonstrates the effectiveness and applicability of complex network theory in supply chain network research, discusses key challenges, such as how to obtain accurate, comprehensive, and timely supply chain network data, proposes standardized data processing methods, and determines the attributes of supply chain network nodes and the strength of their relationships. Furthermore, research on the structure of supply chain network has not yet fully captured the unique characteristics of supply chain networks. Existing models and methods for vulnerability assessment often fail to consider the dynamic and nonlinear characteristics of supply chain networks. Research on risk propagation in supply chains has not sufficiently integrated empirical data, overlooking the diversity of risk sources and the complexity of propagation paths. The asymmetry and incompleteness of information in supply chain networks, as well as multiple sources of uncertainty, make the prediction and analysis of multi-party decision-making behavior more complex. This paper also outlines several key directions for future research. One direction involves using high-order network theory to model interactions among multiple nodes and to describe the dynamics of multi-agent interactions within supply chain networks. Furthermore, integrating long short-term memory (LSTM) methods to process long-term dependence in time-series data can enhance the analysis of network structure evolution and improve the prediction of future states. The application of reinforcement learning algorithms can also adaptively adjust network structures and strategies according to changing conditions and demands, thereby improving the adaptability and response speed of supply chain networks in emergency situations. This paper aims to provide valuable insights for supplying chain research and promoting the development and application of complex network methods in this field.

Keywords: supply chain network, complex networks, structural properties, management characteristics

PACS: 89.75.-k, 89.90.+n

DOI: [10.7498/aps.73.20240702](https://doi.org/10.7498/aps.73.20240702)

CSTR: [32037.14.aps.73.20240702](https://cstr.cn/32037.14/aps.73.20240702)

基于复杂网络理论的供应链研究

崔俊英 徐舒琪 那旭 潘黎明 吕琳媛

Supply chain research based on complex network theory

Cui Jun-Ying Xu Shu-Qi Na Xu Pan Li-Ming Lü Lin-Yuan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 198901 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240702

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240702>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于引力方法的复杂网络节点重要度评估方法

Node importance ranking method in complex network based on gravity method

物理学报. 2022, 71(17): 176401 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220565>

基于信息熵与迭代因子的复杂网络节点重要性评价方法

Importance evaluation method of complex network nodes based on information entropy and iteration factor

物理学报. 2023, 72(4): 048901 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221878>

复杂网络链路可预测性: 基于特征谱视角

Link predictability of complex network from spectrum perspective

物理学报. 2020, 69(8): 088901 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191817>

基于通信序列熵的复杂网络传输容量

Quantifying complex network traffic capacity based on communicability sequence entropy

物理学报. 2021, 70(7): 078902 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201300>

一类任意 $m \times n$ 阶矩形网络的电特性

Electrical properties of an arbitrary $m \times n$ rectangular network

物理学报. 2020, 69(2): 020502 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191303>

一种基于离散数据从局部到全局的网络重构算法

Discrete data based local-to-global network reconstruction algorithm

物理学报. 2021, 70(8): 088901 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201756>