



《系统管理学报》网络首发论文

题目：复杂供应链网络建模：研究进展与展望
作者：蔡梦思，魏婉莹，谭索怡，郑慧君，吕欣
收稿日期：2024-07-02
网络首发日期：2025-04-29
引用格式：蔡梦思，魏婉莹，谭索怡，郑慧君，吕欣. 复杂供应链网络建模：研究进展与展望[J/OL]. 系统管理学报.
<https://link.cnki.net/urlid/31.1977.N.20250429.1035.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

复杂供应链网络建模：研究进展与展望

蔡梦思，魏婉莹，谭索怡，郑慧君，吕欣

(国防科技大学 系统工程学院，长沙 410073)

【摘要】当前全球产业链供应链竞争日益激烈，重塑高价值强韧性的供应链网络已成为重要国家战略。复杂供应链网络建模方法是提升供应链网络深层次结构可见性、增强潜在供应链风险感知能力的关键技术。基于大数据与复杂网络理论，系统梳理复杂供应链网络建模研究现状，旨在面向国家重大需求探索理论前沿。首先，结合供应链发展历程，阐明复杂供应链网络的演进过程与概念内涵；其次，整合国内外理论与模型发展脉络，对复杂供应链网络的建模方法进行分类总结；最后，指出复杂供应链网络建模研究的既有局限及前沿趋势，为我国供应链管理领域的技术创新和突破瞄准方向，为多变全球局势下发展新质生产力布局产业链提供理论参考。

关键词：复杂供应链网络；供应链建模；供应链风险；复杂网络

中图分类号：N949

文献标志码：A

Modeling of Complex Supply Chain Networks:

Research Progress and Prospects

CAI Mengsi, WEI Wanying, TAN Suoyi, ZHENG Huijun, LÜ Xin

(School of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

【Abstract】 The current global industrial and supply chain competition landscape has become increasingly tense, making the reconstruction of high-value and resilient supply chain networks a critical national strategy. Complex supply chain network modeling is a pivotal technology for enhancing deep structural visibility in supply chain networks and strengthening potential supply chain risk perception capabilities. This article systematically reviews and summarizes the current state of complex supply chain network modeling research by combining big data and complex network theory, aiming to explore theoretical frontiers in response to major national demands. First, it refines and elaborates on the evolutionary process and conceptual essence of complex supply chain networks through an analysis of supply chain development history. Second, on the basis of comprehensively synthesizing domestic and foreign theory and model development trajectories, it categorizes and summarizes existing modeling methods of complex supply chain networks. Finally, it identifies existing limitations and outlines cutting-edge trends in complex supply chain network modeling research. It can provide inspiration for frontier exploration and research innovation in China's supply chain management domain, and offer theoretical references for developing new quality

收稿日期：2024-07-02 **修订日期：**2025-01-15

基金项目：国家自然科学基金资助项目(92467302, 72301285, 72301288, 72474223); 湖南省自然科学基金资助项目(2023JJ40685, 2024JJ6069); 湖南省科技创新计划资助项目(2024RC3133); 国家博士后创新人才支持计划资助项目(BX20230475); 中国工程院重大咨询项目(2022-JB-01); 国防科技大学基石基金计划资助项目(JS24-04); 湖南省研究生科研创新项目(XJXC2023163)

作者简介：蔡梦思(1992—)，女，助理研究员。研究方向为大数据与复杂网络分析。

通信作者：吕欣(1984—)，男，教授。E-mail: xin.lu.lab@outlook.com

productive forces and optimizing industrial chain layouts amidst volatile global dynamics.

Keywords: complex supply chain networks; supply chain network modeling; supply chain risk; complex networks

进入 21 世纪, 全球产业链供应链呈现网络化、深层次、低成本、区域化集群、复杂化布局的发展趋势, 形成了结构复杂度高、上下游链条长、多主体交互增强的复杂供应链网络。近年来, 全球竞争格局日趋复杂、供应链中断风险陡增, 复杂供应链网络安全与稳定发展逐步上升至国家战略高度^[1-2]。美国在 2020 年发布《国家反情报战略》明确供应链安全战略目标, 2021 年发布《美国供应链安全规则》; 欧盟 2021 年通过《供应链法》推动欧盟经济竞争力回归, 2022 年发布《芯片法案》强化半导体供应链安全; 英国 2021 年发布《国防与安全工业战略》强调供应链韧性和生产力, 同年日本发布《通商白皮书》关注供应链脆弱性。我国高度重视供应链韧性与安全, 在 2020 年《国家中长期经济社会发展战略若干重大问题》、2021 年 7 月中共中央政治局会议、2021 年 10 月 G20 峰会、2022 年 3 月《政府工作报告》、2022 年 12 月中央经济工作会议、2023 年 11 月《全球供应链促进报告》、2024 年 3 月《政府工作报告》等会议或文件中均强调“维护产业链供应链安全稳定”, 党的二十大报告也多次提到着力提升产业链供应链韧性和安全水平, 推动中国经济发展和维护国家安全。

复杂供应链网络由分布在不同行业和地区的众多相互联系的企业构成, 产业发展各环节、要素、主体之间深度耦合、融通发展。复杂供应链网络建模研究是供应链问题研究的基础, 维护产业链供应链韧性和安全需要先解耦复杂供应链网络的结构和功能。然而, 由于供应链系统的复杂性及企业信息共享意愿不足, 难以全面准确收集供应链网络中的所有节点和关系信息。例如, 通用汽车、空客、苹果、雀巢等大型企业的二级及以下供应商数量远超公开披露的一级供应商数量^[3], 若缺乏对供应链深层次结构的了解, 将难以发现供应链脆弱性及潜在风险^[4], 进而影响保障供应链畅通运转。当前全球多变局势下, 复杂供应链网络面临重大传染病疫情、突发自然灾害、边缘政治冲突、国际贸易摩擦等多源不确定性风险冲击, 若对供应链网络全局结构及复杂关联关系认识不清, 将难以识别和防范复杂供应链网络中多源不确定性风险间的关联及传导现象。复杂供应链网络建模作为分析供应链网络结构、了解供应链组分关系、寻找供应链网络内部规律的重要手段, 是实现供应链网络“全链”分析、提升深层次结构可见性、增强网络风险感知能力的关键技术, 其重大应用价值在于: ① 通过精准建模分析, 清晰表示网络结构中的要素及关系, 实现供应链“全链”网络贯通, 打破供应链网络数据孤岛; ② 借助复杂供应链网络模型, 明确网络中的非线性机制、涌现、突变、高阶间接依赖关系, 揭示复杂供应链网络的风险传播特征及机理, 提升风险预警能力; ③ 通过建模研究揭示现实供应链网络的结构和功能, 为提升产业链供应链网络韧性奠定理论基础。

为此, 本文系统梳理复杂供应链网络的发展历程, 重点综述复杂供应链网络建模方法研究文献, 并针对日渐复杂的供应链系统及多源不确定性风险挑战, 探讨未来可能的研究方向。

本文主要贡献如下:

- (1) 梳理供应链网络概念演进, 明确大数据时代复杂供应链网络的内涵特征。
- (2) 系统总结复杂供应链网络建模方法, 为全局供应链图谱构建和产业链供应链韧性分析提供理论支撑。
- (3) 结合多变全球局势, 从全局供应链图谱建设、多尺度拓扑结构解耦、隐含供应链

关系预测和风险智能预警等方面提出复杂供应链网络建模与分析的未来研究重点。

1 复杂供应链网络的概念演进

随着社会的发展，供应链认知经历了从“线性结构”^[5]到“网络结构”^[6]，再到“复杂自适应系统”^[7]直至供应链生态系统^[8]的演进过程，如图 1 所示。在这一演进过程中，“复杂供应链网络”一词被广泛使用并贯穿整个研究脉络。

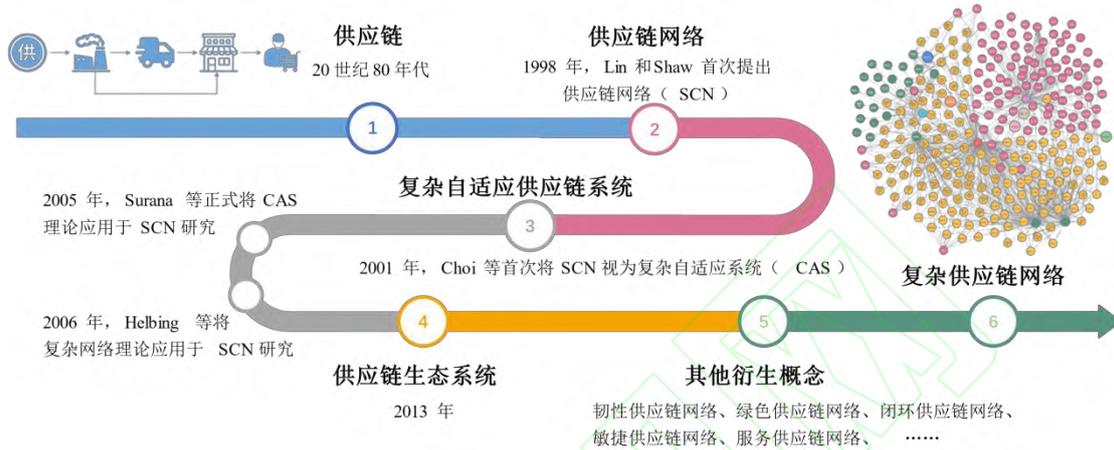


图 1 复杂供应链网络概念演进

Fig. 1 Conceptual evolution of complex supply chain networks

1.1 供应链

供应链 (supply chain, SC) 是指产品从生产、流通到最终用户的全过程中，由上下游企业和用户构成的节点，通过物流、信息流和资金流等链接形成的复杂网链系统。供应链由直接或间接履行客户需求的各方组成，典型供应链包含制造商、供应商、分销商、运输商、仓储商、零售商及客户本身等参与主体，各参与方为最终客户采购、生产、分销和销售产品^[9]。供应链通常被视为简单的线性系统，由通过二元关系相互作用的一系列与供应链事件相关的公司来表示^[10]，相关研究主要聚焦于线性规划、库存调度、博弈协调等领域。

1.2 供应链网络

1998 年，Lin 等^[11]首次提出“供应链网络” (supply chain network, SCN) 的概念，将其定义为由原料供应商、制造商、分销商、零售商和服务商交互构成的多条供应链，在战略、业务和资源方面协同作用而形成的异构分布式系统。基于供应链网络概念，国内外学者相继提出韧性供应链网络 (Resilient SCN)^[12-13]、绿色供应链网络 (Green SCN)^[14]、闭环供应链网络 (Closed-loop SCN)^[15]、敏捷供应链网络 (Agile SCN)^[16]和服务供应链网络 (Service SCN)^[17]等概念。针对多条供应链相互交叉形成的网络系统，复杂网络理论与方法已被广泛应用于供应链网络研究，但现有研究多聚焦于微观行为层面考察运营及供应链中企业成员间的协调机制，缺少从系统和宏观角度对供应链网络的结构、功能和动力学行为的深入探究。

1.3 复杂自适应供应链系统

2001 年，Choi 等^[7]首次提出供应链是具有自组织、自适应、非稳态和非线性变化特征的“复杂自适应系统” (complex adaptive system, CAS)，强调供应链企业在选择供应商和销售商时具有完全自主决策权，因此需要从复杂自适应系统角度认识和管理供应链网络。随后，Surana 等^[18]正式将 CAS 理论用于供应链研究，提出供应链网络的仿真模型、系统动力

学模型和非线性模型等；Helbing 等^[19]基于复杂网络理论与方法，研究发现，供应链网络具有复杂自适应系统的特征，其拓扑结构和运作模式中普遍存在牛鞭效应；Pathak 等^[20]和 Wycisk 等^[21]进一步论证了 CAS 理论在供应链建模中的必要性和有用性，指出供应链系统的正常运行易受动态性和非线性因素的影响。国内学者 Li 等^[22]通过构建复杂自适应的供应链网络演化模型揭示了系统演化的通用规则，并深入研究了环境因素对供应链系统形成过程的影响机制^[23]。

1.4 供应链生态系统

自 2013 年以来，供应链生态系统的概念在学术界逐渐引起重视。Viswanadham 等^[24]从风险分类的角度界定了供应链生态系统的构成要素，包括供应链各组成部分以及影响和流经供应链的商品、信息与资金；Ketchen 等^[25]从竞争和绩效的角度将供应链生态系统（Supply Ecosystem）视为一组共享挑战、共同发展的相互依赖和协调的组织；Stolze 等^[26]从服务和营销角度提出购物者服务生态系统（Shopper Service Ecosystem），指出生态系统中的成员相互依赖、协调活动，面临共同的适应性挑战，并为购物者提供服务。国内学者陈剑等^[8]认为数智化环境下的供应链生态系统是由相互依赖、共生共存的供应链群落中各类主体交互关联而形成的生态系统，其中供应链群落包括外部服务商（如供应商种群、制造商种群、零售商种群）、数智设备以及交付客户的数字-服务-产品包。目前为止，针对供应链生态系统的研究尚处于起步阶段且大多为理论探讨，对其尚未有统一的定义。

1.5 复杂供应链网络

当前，随着社会经济的快速发展和移动互联网、云计算、大数据、物联网等技术与现代制造业、服务业的深度融合，生产模式和营销模式正经历重大变革，供应链网络的结构也从简单链式结构演变为由多条供应链交互形成的大规模、非线性、高维度特征的复杂供应链网络^[27-28]。本文认为，复杂供应链网络是由供应链系统内外部要素构成的复杂系统，各要素在物资、信息、资金、战略、业务及风险应对等方面交互关联、协同作用（见图 2）。一方面，作为一种复杂网络，它具有复杂自适应性和复杂网络特性^[29-31]，包括网络规模大、结构复杂、演化过程复杂、连接多样性和节点多样性等；另一方面，从全球多变局势下的供应链系统全局视角看，复杂供应链网络涉及供应链系统内外部多种要素，其中，内部要素涵盖原料供应商、制造商、分销商、零售商、服务提供商、消费者等供应链体系内的市场主体及相关原材料、中间产品和最终产品，外部要素则包括环境、技术、风险事件、政策法规和国际形势等外部条件。



图2 复杂供应链网络组成要素示意图

Fig. 2 Components of a complex supply chain network

2 基于复杂网络的复杂供应链网络建模方法

供应链网络的复杂网络特性使得传统针对单一企业或简单供应链建模的数学规划模型^[32-36]不再适用。考虑到供应链上企业间的相互作用，同时又受其他供应链实体和外界环境的影响，从复杂网络视角研究供应链网络的内在结构和演化机制对供应链管理具有重要理论价值和现实意义^[37-39]。为此，学者们运用复杂网络模型开展复杂供应链网络建模研究。Wiedmer等^[40]将现有模型分为随机网络（见图3（a））、小世界网络（见图3（b））和无标度网络（见图3（c））3类。本文在此基础上进一步梳理出分层网络、多层局域世界网络和超网络3种建模方式，并将其整合为层级网络（见图3（d））。同时，国内外学者也对现实供应链网络进行了大量实证研究^[41-43]。

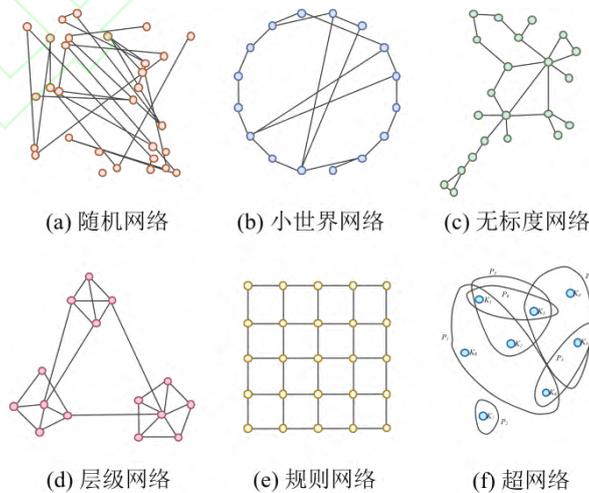


图3 复杂网络模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of complex network models

2.1 随机网络

随机网络 (Random Network) 也称为 ER 随机图, 记为 $G(N,p)$, 其中 N 为节点数量, 任意两个不同节点间以概率 p 产生连边^[44-45]。在复杂供应链网络研究的早期, 由于难以获取供应链网络中企业间的所有关系来构建完整的网络结构^[46], 研究者们普遍认为供应链网络是随机的、自发进化的^[47], 因此采用随机网络模型对其进行建模分析 (见图 3 (a))。Nair 等^[48]分别构建并分析了包含 1 个工厂、5 个中间商和 12 个零售商的随机网络模型和无标度网络模型, 研究发现, 从库存的角度来看, 无标度网络相对更稳健, 而从延期订单和总成本的角度来看, 随机网络更具鲁棒性。

随机网络模型的提出使得研究者们可以更好地理解复杂供应链网络的随机性和不确定性, 通过概率 p 可以调整随机网络连边的稠密程度, 从而在一定程度上模拟真实网络中的随机连边关系并进一步探索网络的复杂性, 但随机网络只是真实世界系统的一种简化模型^[49], 现实世界中的复杂供应链网络往往处于随机与规则之间。

2.2 小世界网络

小世界网络 (Small-world Network) 是通过在完全规则网络 (Regular Network, 即节点之间有序连接构成的规则拓扑, 见图 3 (e)) 中以概率 p 随机重新连接网络中原有的每条边而产生的具有小世界特性的网络模型, 常被称为 WS 小世界模型^[50-51] (见图 3 (b))。随机重连时每条边的一个端点固定不变, 以概率 p 随机选择网络中任一节点作为该条边的另一端点, 且不得出现重连边和自环。小世界网络既具备规则网络的高集聚性 (即 3 个连接节点形成三角形的概率较高), 又具备随机网络的较短平均路径长度 (即网络节点对之间的平均链路数量较小)^[52-53], 使得 WS 模型中的信息能够快速传递, 相比于随机网络和规则网络能够更好地表示高效供应链网络的结构, 有效平衡维持长距离连接的高成本与整个供应链系统中流量高效传输之间的矛盾^[54]。例如, 企业可以通过特定行业或地理区域进行连接 (即高集群系数), 也可以通过物流、信息流、资金流等交换关系与集群中的其他企业进行连接 (即短平均距离和高全球连通性)^[55]。

小世界网络模型的提出使得研究者们可以更好地理解和解释供应链系统中的企业行为, 通过灵活调整重连概率参数 p , WS 模型能够在高度规则和高度随机之间灵活变化, 从而为探索各种实际供应链系统的网络拓扑结构提供了有力工具。众多研究发现, 当今企业之间高度互联, 虽然各企业的专业化程度很高, 但供应链的全球化程度也很高^[56-57], 这也证实了复杂供应链网络中“小世界”拓扑的相关性^[46,58]。然而, WS 模型将供应链视为一个历史性的、非增长的系统, 网络中每个节点的连接数分布接近正态分布或泊松分布, 其随机重连机制难以较好解释供应链网络中各类交换关系的形成。

2.3 无标度网络

无标度网络 (Scale-free Network) 是通过节点数量增长和优先连接特性来解释网络结构形成、统计特征和鲁棒性能的一种模型^[59], 也被称为 BA 模型。在该模型中, 初始网络包含 N 个节点, 随着时间推移会逐步添加新节点; 这些新节点在选择网络中已存在的节点时, 节点被选中的概率与自身的度 (节点连边数量) 成正比^[60]。由于网络的节点增长和连接是非均匀的, 新加入节点更倾向于连接度较高的节点, 从而形成具有幂律度分布的网络结构^[49], 其中大多数节点仅拥有少量连边, 而少部分中心节点 (Hub 节点) 则集聚了大量连边^[61] (见图 3 (c))。在供应链领域, 这类 Hub 节点被称为“枢纽”或核心企业。研究表明, 它们在库

存管理和分销网络中发挥着关键作用^[62]。许多学者认为,现实中的高效供应链网络具有类似无标度网络的特征,表现为高集聚系数、短特征路径长度和幂律连接分布^[63]。为验证这一观点,现有研究主要基于 BA 无标度网络的节点增长、择优连接以及节点退出方式来构建复杂供应链网络模型。

考虑供应链网络节点的增长机制(即网络中加入新企业节点或建立新业务关系的情况),国内外学者主要将节点度^[64-65]、节点相关度^[66]、边权值(如交易成本)^[67]、节点间距离^[68]、吸引力^[69]等指标作为优先连接的依据^[70]。其中, Thadakamalla 等^[65]基于 BA 网络率先提出了供应链网络的结构模型,该模型将军事供应链网络划分为军营、前方支援营和主要支援营 3 类节点,规定同类节点间无连边,不同类节点间采用节点度优先规则选择性产生连边。张纪会等^[66]进一步构建基于节点相关度的复杂供应链网络模型,新节点根据节点间的相关度进行选取并遵从择优连接规则,在仿真和实证网络中均发现网络的无标度特征。赵志刚等^[69]则提出基于节点度与节点强度的复杂供应链网络演化模型,相比于仅考虑节点度的优先连接方式,进一步考虑了企业节点间的位置吸引力。特别地, Xuan 等^[71]基于节点之间随机连接、偏好连接和依据产品相似度连接规则构建供应链结构,发现该供应链网络在灵活性、效率及对目标攻击鲁棒性方面具有内在优势。

考虑现实供应链网络演化过程中旧节点退出供应链网络或旧节点间断开业务关系的情况,国内外学者不仅考虑了新节点加入及择优连接机制,还对旧节点的退出行为进行了建模。现有研究主要采用随机退出^[72]和有选择退出^[73]两种退出机制。其中,有选择退出的测度指标包括企业间交易成本^[74]、边效益^[75]和反择优概率^[76-77]等。Dorogovtsev 等^[72]构建了旧节点等概率退出条件下的供应链网络模型,发现相比新节点加入,旧节点的永久退出会导致网络结构发生更本质的变化; Huang 等^[78]综合考虑新企业进入、建立新关系和重组企业间关系 3 种企业行为,通过分析复杂供应网络演化动力学的统计特征,发现节点度分布服从幂律分布且网络中存在 Hub 节点。Sarshar 等^[79]在以一定概率随机删除旧节点及其所有连边的基础上引入消失边的补偿机制,即当旧节点丢失连边时,可以通过优先连接产生新边进行补偿,验证了供应链网络的无标度性;高蕾等^[80]和丁飞等^[81]通过设置节点进入、退出及补偿机制,也证实了供应链网络的无标度性。

此外, BA 模型还被进一步扩展至有向供应链网络^[82]、加权供应链网络和层级供应链网络^[77]等,也有学者基于 BA 模型建立了参数可调的供应链网络演化模型^[83-84]。大量基于 BA 模型的供应链网络解析或仿真研究表明,供应链网络具备无标度性和小世界性^[85-87]。

2.4 层级网络

当网络中的无标度性和社区结构同时出现时,便形成了分层网络(Hierarchical Network)(见图 3(d))。这类网络中的 Hub 节点连接着不同社区(即内部联系密切而外部联系稀疏的社团),在保证网络集聚性的同时,更准确地反映了供应链网络自上而下的组织结构特征^[88]。

针对供应链节点企业的不同类型,学者们对复杂供应链网络的层级结构开展了建模研究^[89-96](见表 1)。柳红等^[91]构建了包含供应链、制造商、分销商和零售商的层级供应链网络模型,同层节点间通过节点度优先连接,而不同层节点间无连边,揭示了供应链网络的复杂性和自组织性;张毅^[97]建立了考虑相似度的分层供应链网络模型,提出同层节点连边和邻层节点连边不同的概率公式,证实了供应链网络具有无标度特性和小世界网络特性。此外,

相关研究还涉及多层复杂供应链网络的多准则决策问题^[98]、随机故障与蓄意攻击下的脆弱性及抗毁性问题^[99]以及鲁棒性问题^[100]等。

表 1 基于分层网络的复杂供应链网络建模研究示例

Tab. 1 Examples of complex supply chain network modeling research based on hierarchical networks

年份	模型名称	各层级内容	参考文献
2010	五级再制造闭环供应链网络均衡模型	供应商、制造商、零售商、需求市场、回收商	[89]
2012	四级供应链网络模型	供应商、制造商、零售商、需求市场	[90]
2013	四层供应链网络模型	供应商、制造商、分销商、零售商	[91]
2016	五级供应链网络模型	供应商、制造商、分销商、零售商、客户	[92]
2017	四层农产品供应链网络模型	农户、收购商、批发商、零售商	[93]
2020	四级供应链网络演化模型	供应商、制造商、分销商、零售商	[94]
2021	四层协同研制供应链网络	零件供应商、部件供应商、一级供应商、主制造商	[95]
2022	五级新鲜农产品供应链网络模型	农场主、装配工、加工商、批发商、零售商	[96]

针对供应链网络的层级结构特征，部分学者基于 BA 模型引入多局域世界网络模型，刻画具有层次特性的复杂供应链网络，通过理论推导证明了供应链网络具有无标度特性^[101]。Li 等^[87]提出具有局部世界连通性的新型演化网络模型，在保持无标度网络鲁棒性的同时，又提高了网络对故意攻击的依赖，从而解决了大多数无标度网络固有的脆弱性；孙军艳等^[102]构建了“二级供应商-一级供应商-制造商-分销商-零售商”五级局域世界网络模型，结合现实网络中节点生成与退出机制，通过仿真分析验证了网络的无标度性和高集聚性；陈晓等^[103]通过引入节点相关度确定新节点的局域世界范围，建立了复杂供应链网络的局域演化生长模型，解析发现该网络模型具备无标度、小世界等特性。

此外，也有学者引入超网络（Supernetwork）模型来研究供应链网络的层级结构。超网络是多个嵌套网络的组合（内心图 3（f）），通常用于研究以节点众多和网络嵌套为特征的复杂系统。Nagurney 等^[104]首次从超网络视角提出供应链网络均衡模型，分析了包含制造商、零售商、需求市场的供应链层次网络结构；Yamada 等^[105]证实供应链运输网络的效率在其转变为超网络后显著提高；刘雪娇等^[106]基于超网络理论构建了供应链形成过程的最优化模型，充分考虑了供应商、生产商和零售商各自的决策目标；Lu 等^[107]则针对跨区域应急调度的石油超网络模型，研究发现，跨区域应急调度在达到最大应急能力后将失效，单一区域紧急派遣适用于脆弱性较小的地区。

2.5 实证网络

随着互联网与大数据技术的发展，基于实际运营数据的供应链网络实证研究已成为探索网络结构及运行机制的主流方向。Zhao 等^[41]构建了由波音公司及其供应商与客户组成的供应链网络（见图 4（a）），涵盖 2971 家企业，涉及 90 多个行业；Kosasih 等^[42]分别以 Marklines 汽车公司（见图 4（b））和 Achilles Information Ltd 能源公司（见图 4（c））为例，构建了相应的上下游供应链网络；Hidalgo 等^[43]基于国际贸易数据，根据产品间的相关性构建了产品空间网络（见图 4（d））；闻少博等^[108]利用全球 423 个铜矿山数据，构建了铜矿资源供应链无向加权网络（见图 4（e））。在国内研究中，Cai 等^[109]基于国家重要产品追溯系统中第一批试点城市的 686175 条猪肉交易数据，构建了包含 17582 个节点和 49554 条连边的三

层（农场-屠宰场-零售商）供应链网络（见图 4（f））；Lu 等^[110]进一步分析了各试点城市内的供应链网络结构（见图 4（g））；赵炳新等^[111]基于山东省 2007 年 42 部门的投入产出数据，构建了以产业为节点、产业间关系为有向边的产业供给实证网络。表 2 显示，现有复杂供应链网络研究的节点规模从几十到数十万不等，主要集中于供应网络^[41,112]、产品网络^[113]、企业竞争网络^[114]等领域，涉及汽车、农产品和电商等多个行业。

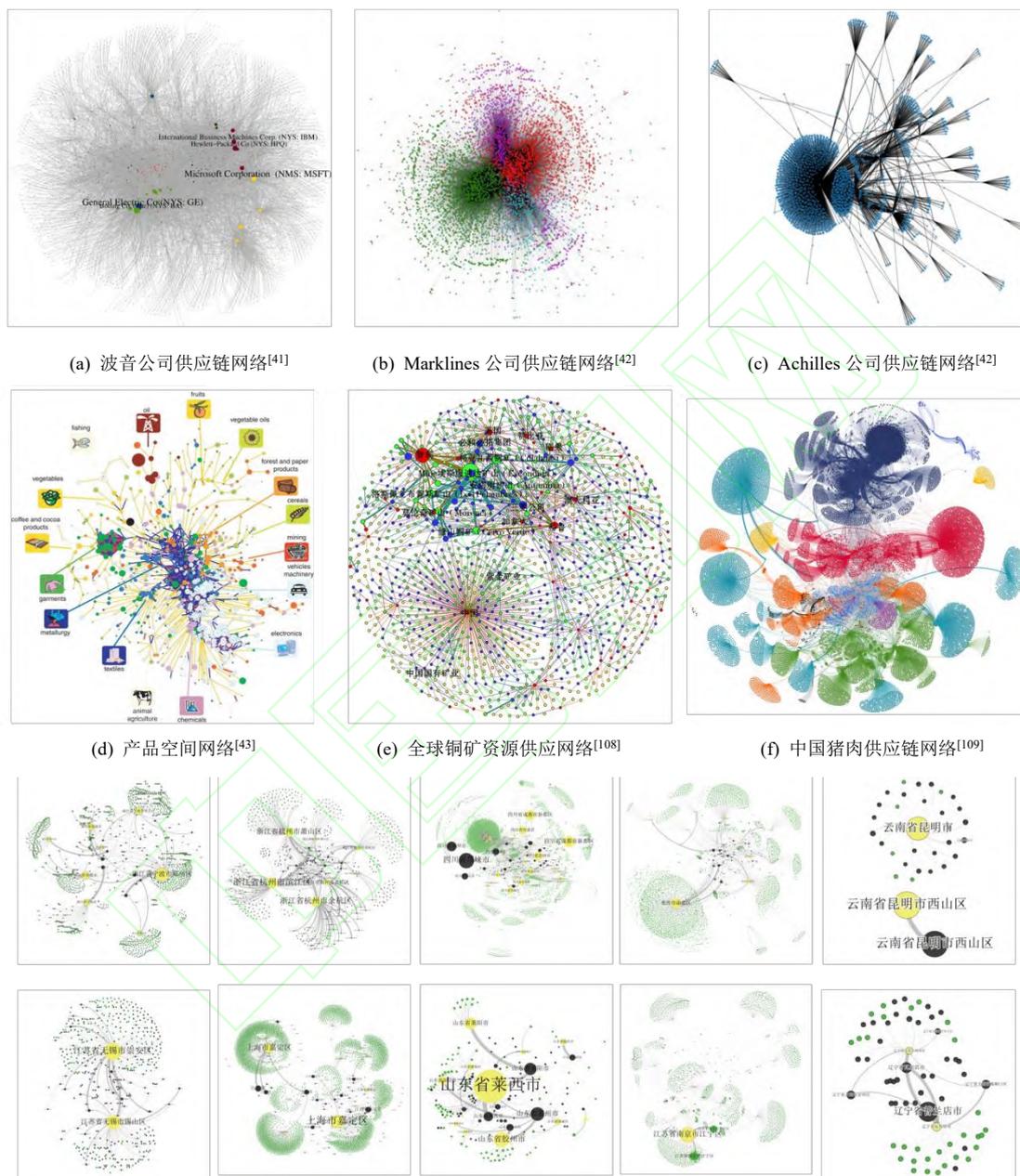


图 4 复杂供应链实证网络示例

Fig. 4 Examples of empirical complex supply chain networks

表 2 复杂供应链网络实证研究示例

Tab. 2 Examples of empirical research on complex supply chain networks

年份	网络类型	节点类型	网络规模		参考 文献
			节点数	边数	
2002	Honda 汽车供应网络	Honda 公司的一级、二级、三级、四级、五级 供应商	50	/	[117]
2002	Acura 汽车供应网络	Acura 公司的一级、二级、三级、四级、五级、 六级供应商	76	/	[117]
2002	DaimlerChrysler 汽车供应网络	DaimlerChrysler 公司的一级、二级、三级、四 级供应商	41	/	[117]
2005	供应链网络	上级分销企业、下级分销企业	561256	480000	[112]
2007	产品空间网络	产品	775	/	[43]
2008	零部件企业竞争网	零部件生产企业	9298	1123870	[114]
2010	企业间网络	客户、供应商	500-5000	4000-40000	[125]
2015	B2C 电商网络	供应商、网购平台、用户	>25000	/	[126]
2015	三层汽车制造业供应链网络	零部件供应商、生产商、销售商	296	2377	[127]
2016	汽车供应网络	供应商、装配工	18943	103632	[113]
2016	汽车产品网络	汽车产品	934	/	[113]
2019	波音公司供应链网络	波音公司的一级、二级、三级供应商以及波音 公司一级、二级供应商的客户	2971	9535	[41]
2020	三层猪肉供应链网络	农场、屠宰场、零售商	17582	49554	[109]
2021	生鲜农产品供应链网络	物流配送中心、零售店、住宅区	170	/	[124]
2021	Toyota 公司供应链网络	Toyota 一级供应商、二级供应商及其客户	2120	4756	[128]

基于供应链实证网络, 社会网络分析的理论与方法被广泛应用于分析供应链网络的度分布、节点中心性、层次结构、三角形结构、平均路径长度、聚类系数、模块度和同配性等网络结构特征^[115]。Choi 等^[116-117]基于企业访谈和存档数据, 根据“供应商-供应商”关系构建了 3 个汽车供应网络, 并从采购公司及其供应商角度探讨了不同类型的“供应商-供应商”关系的管理含义, 进一步分析了供应网络的形式化、集中化和复杂性等特征。在此基础上, Kim 等^[118]与 Potter 等^[119]采用社交网络分析方法, 分析了汽车供应网络的密度、平均度、度中心性、接近中心性和中介中心性等特征。此外, Nuss 等^[120]将物资流动和合同关系作为供应链网络中的连边, 提出了产品复杂度、生产商多样性、潜在瓶颈等指标来评估整体供应链网络。实证研究发现, 各类供应链网络存在幂律分布和 Hub 节点^[121], 并具有网络社区结构^[122]; 供应链网络表现出一定的无标度特性和小世界特性^[112,114,123-124]。

3 基于系统仿真的复杂供应链网络建模方法

由于供应链网络具有动态性、决策自主性和不确定性等特征, 且供应链管理需要在众多不同实体之间有效协调, 现有研究通常将供应链网络视为复杂自适应系统, 并采用系统仿真建模方法模拟不同实体间的交互行为和影响^[18,38,129]。常用的供应链系统仿真建模方法主要

包括 Agent 仿真和系统动力学；此外，集中式、分布式、离散事件仿真^[130-131]、HLA（High Level Architecture）及 HAS（HLA-Agent-SCOR）^[132]等多种仿真方法也被用于供应链系统建模与分析。系统仿真建模方法能够更快速、高效地模拟现实供应链，更好地刻画大型复杂的供应链过程，并对过程进行绩效评估及优化，从而制定相关管理策略。

3.1 Agent 仿真

Agent 是具有自治性、反应性、适应性、交互性、主动性等特征的智能体，可以基于一定的行为规则与外界进行交互。Agent 仿真建模（agent-based modeling, ABM）将供应链系统建模为多智能体系统（multi-agent systems, MAS），采用自下而上的思路，将供应链系统分解为零售商、制造商等具有决策逻辑和行为特征的 Agent，通过模拟 Agent 之间以及 Agent 与环境之间的相互作用和行为规则，来研究各类供应链问题，包括供应链网络结构演化问题^[133-136]、供应链网络鲁棒性问题^[48,133]以及供应链管理决策问题^[137-138]等。

在基于 Agent 仿真的供应链系统建模过程中，通常将供应链网络中的实体划分为供应商、产品集成商、零售商及客户等 Agent 类型，各 Agent 之间存在生产、销售、采购等基本业务，能够进行通信，并可做出投资、技术选择与采纳、合作、销售、产品运输、生产计划等决策^[139]。Lu 等^[140]构建了网络经济的拓扑结构，利用多 Agent 仿真研究了网络经济中的供应链框架，通过简单案例说明了供应链运作与网络经济结构的关系；Piao 等^[141]针对民用飞机和汽车制造等大型制造业供应链，提出基于多 Agent 强化学习的供应链库存管理方法，显著提高了供应链参与者的整体信息利用率及协调效率；Shi 等^[142]在三层随机多 Agent 供应链系统的基础上，提出一种非线性反馈固定时间控制协议，通过数值模拟验证了该协议对供应链系统稳定的有效性；潘潇雄^[143]通过设置通信 Agent、协调 Agent、监控 Agent、包装 Agent 和中断管理 Agent，模拟中断风险应急流程，建立了结合多 Agent 和离散事件的分销网络仿真模型，分析了节点失效和需求波动对分销网络方案性能的影响。

通过将 ABM 与离散事件仿真相结合，Sun 等^[144]建立了消费者驱动的汽车供应链动态演化仿真模型，该模型不仅能从宏观上揭示汽车供应链网络的结构复杂性和动态演化特征，还能从微观层面详细反映各主体的业务流程；Ivanov 等^[145-146]构建了考虑制造工厂产能中断的多级供应链仿真模型，并测试了供应链中断期间及恢复后的生产-订货应急策略；Ivanov^[147]与 Burgos 等^[148]则通过仿真分析了流行病暴发对供应链性能的影响及预测。在 ABM 与博弈论相结合方面，Tan 等^[149]研究了供应链网络企业间的信息共享行为在惩罚和共享风险成本共担时的演化过程；Jia 等^[150]针对由一个再制造商和两个相互竞争的回收商构成的逆向供应链，采用双形式博弈结合行为经济学因素，通过理论和数值分析探讨了具有回收公平性的多 Agent 逆向供应链决策问题。此外，部分研究构建了基于多 Agent 的供应链仿真平台^[48,151]以支撑用户快速建立多级供应链网络仿真模型。张冉等^[151]构建了基于 Agent 的通用智能仿真建模平台，其包含管理与决策、任务单、生产与运作 3 类通用基本业务 Agent 类。

3.2 系统动力学

系统动力学（system dynamics, SD）从复杂系统反馈结构、因果关系和非线性行为的角度，分析供应链系统的内部结构以及各主体间的动态行为关系，进而分析系统整体运行和演化过程，由此研究供应链中的牛鞭效应^[152]、库存管理^[5]、质量控制^[153]和风险管理^[154-155]等问题，最终实现供应链流程再造、成本控制和质量管控等。

在基于系统动力学的供应链建模过程中，通常根据供应链系统中制造商、零售商、库房、

工厂等实体间的因果关系构建动态模型,通过仿真分析系统的动态变化过程来评估决策因素对供应链的影响。Oliveres-aguila 等^[156]构建了包含原材料库存、生产线、成本和贸易 4 个模块的系统动力学仿真模型,分析供应链的生产、下单、催货等行为,并研究 8 种中断场景下风险事件对供应链库存水平、服务水平、成本和利润的影响;Esteso 等^[157]通过系统动力学建模方法,分析“农场-包装厂-仓库-配送中心-市场”五级新鲜农产品供应链在需求、供应、运输和节点运营等中断下的鲁棒性;Langroodi 等^[158]建立“供应商-材料分销商-制造商-最终产品分销商-零售商”五级供应链网络的系统动力学模型,研究需求不确定条件下最小化下单和运输成本的策略;Taghikhah 等^[159]以由农民、食品加工商、零售商和消费者组成的农业食品供应链为例,结合 Agent 仿真、离散事件仿真和系统动力学方法,模拟消费者偏好与农业和粮食生产相关社会环境问题之间的相互作用;李卓群等^[160]基于“需求方-制造商-原材料供应商”三层供应链系统动力学模型,分析决策者个体差异对供应链绩效的影响;王宇奇等^[161]运用系统动力学方法模拟进口原油供应链网络在采用契约前后环境扰动对供应链系统的影响,发现契约协调能提高供应链的成本柔性和时间柔性。

系统动力学模型被广泛应用于服务供应链^[162]、绿色供应链^[163]、闭环供应链及供应链金融系统^[164]等管理实践路径的探索。朱雪春等^[162]构建了服务供应链知识共创系统的动力学模型,研究服务提供商、服务集成商和顾客等多行为主体间的知识共创动态发展机制;张玉春等^[165]基于再制造视角,针对闭环供应链回收品质量控制问题,建立了由一个供应商、一个制造商和一个销售商组成的系统动力学模型;成琼文等^[166]以中国电解铝行业为例,构建了绿色供应链管理的系统动力学模型;Song 等^[163]将土地绿色供应链划分为技术、能源、环境和经济等子系统,通过系统动力学方法模拟 2003~2020 年山东省技术、能源、环境和经济的发展趋势;魏晓彤等^[167]则从供应链金融信息生态系统出发,利用系统动力学模型研究系统演进的动力要素及其作用机制。

4 基于知识图谱的复杂供应链网络建模方法

知识图谱 (knowledge graph, KG) 是一种基于可视化图形描述客观世界中实体及其关系的网络建模方法,由 Google 公司于 2012 年提出^[168]。知识图谱的本质是具有语义信息的网络结构,由“实体-关系-实体”三元组构成,并能反映实体的属性特征。在知识图谱中,实体表现为网络节点,而实体间的语义关系则形成节点间的连边^[169]。知识图谱可通过可视化方式呈现复杂知识及其关联关系,近年来被应用于供应链数据集成、知识检索与数据可视化分析,以提升供应链可见性,并支持供应链风险监控(如供应中断、运输中断、供应商失信等)、预警和决策支持。

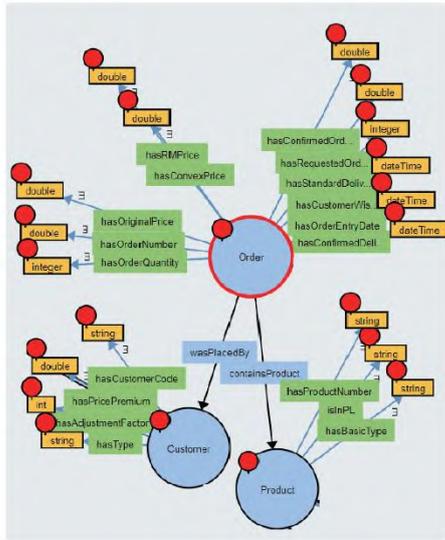
基于知识图谱的复杂供应链网络建模研究中,图谱实体可涵盖企业^[42,170]、产品^[42]、合同^[171]、客户^[172]、订单^[172]、供应商^[173]及行业^[174]等(见表 3),连边则用于表征企业或产品属性,以及企业间的信息、资金与物资流动。此外,知识图谱本体被广泛用于多源数据集成、领域知识提取和数据动态更新等^[171,175]。Ramzy 等^[172]以某国际半导体制造公司为例,基于订单数据(包含交货期、产品及相应顾客等)和客户个人信息(包含客户类别、位置等),构建了包含产品、订单、客户 3 类实体及其属性与关系的领域本体(见图 5(a)),并设计知识图谱定价模型以缓解牛鞭效应;Li 等^[173]针对中国轨道交通供应链,基于 10424 条多源异构数据,构建了涵盖列车编组、车辆、系统、供应商、模块 A、模块 B/C 共 6 类实体与 4 种

关系的知识图谱（见图 5（b）），实现了供应链数据的重组、存储、查询与管理；Li 等^[174]面向中小企业供应链，构建了含企业、法人和行业 3 类实体及 23 种关系的金融知识图谱（含 67526 万个实体与 138771 万条关系），支持大规模供应链知识的实时存储与查询。

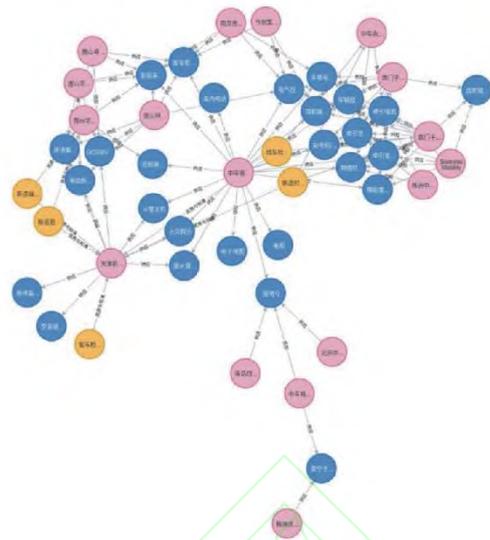
供应链知识图谱中蕴含丰富的企业基本信息及其依赖关系，结合知识图谱推理等人工智能技术，可支持供应链风险推断、信用风险评估等研究，从而提升供应链网络的韧性和可靠性^[176-177]。Palmer 等^[178]提出供应链网络的多层级本体，用于预测不同实体间的互操作性风险；Zhang 等^[171]基于中国 201 家企业的 1046 条贸易活动数据以及企业基本信息，构建了包含公司和合同两类实体的中小型规模企业供应链金融网络知识图谱（见图 5（c）），通过提供各企业的关联链，为信用风险评估、企业影响力排序等上层应用提供参考；Kosasih 等^[42]以 Marklines 汽车公司和 Achilles 能源公司为例，分别构建了包含公司、所属国和产品等实体的汽车供应链知识图谱（见图 5（d））和能源供应链知识图谱，并整合神经网络模型推断供应链网络中的隐性风险；Yang 等^[179]考虑中断的严重性，提出基于知识图谱的供应链风险管理框架，构建包含 250 多万个实体和 11 种关系的产品供应链知识图谱，实现知识检索、风险监控与决策支持；Zhang 等^[180]建立包含风险源、风险、后果和商业活动 4 类实体（含 405 条关系）的风险知识图谱，通过图搜索方法实现节点风险匹配与预警。

知识图谱将供应链网络表示为机器可读且人类可理解的图结构，结合链路预测方法，可支持隐性供应关系挖掘和潜在商业伙伴推荐等研究，从而提升供应链网络的可见性并支撑风险冲击下的网络重构^[181]。Kosasih 等^[182-183]基于 Marklines 汽车供应链知识图谱，利用图表示学习技术预测供应链网络中的隐含关系，增强对未知供应商的识别；Brockmann 等^[184]整合 13770 家公司的供应链信息，构建包含公司、所属国、行业集团、商业部门、经济部门共 5 类实体（含 6 类关系）的知识图谱，运用图神经网络预测图谱中的不确定关系；Li 等^[185]针对制造业和零售业中小型企业供应链金融网络，结合供应关系的时序依赖与合作关系，提出时空知识图谱的联合关系协同进化表示学习方法，实现供应链关系的准确预测。

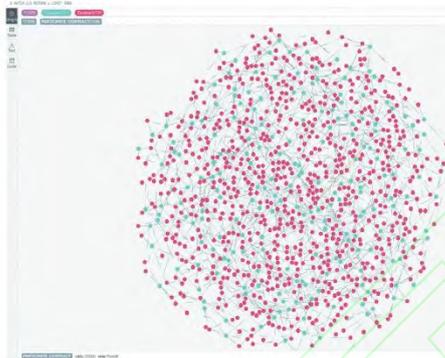
上述研究为知识图谱在供应链领域的应用奠定了基础并指明了方向，但目前相关研究仍处于初步探索阶段。作为一种基于可视化图形描述客观世界中实体及其关系的网络建模方法，知识图谱在刻画节点的多重属性以及节点间的多元关系方面，显著优于数学规划模型、演化博弈模型、复杂网络模型等建模方法。然而，现有研究主要聚焦于单一企业的供应链网络建模，存在图谱规模有限、实体种类较少且实体间关系单一等问题，对供应链复杂性上的刻画仍有待深化。



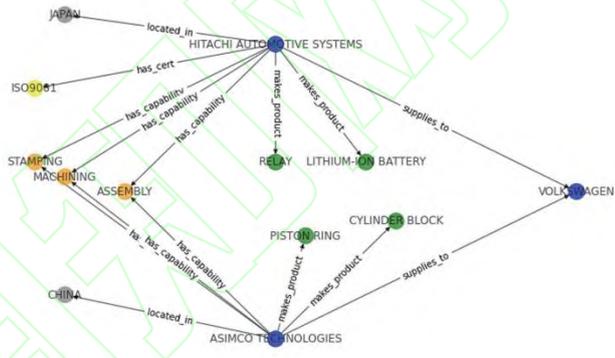
(a) 半导体制造供应链领域本体^[172]



(b) 轨道交通供应链知识图谱^[173]



(c) 中小企业供应链金融知识图谱^[171]



(d) Marklines 汽车供应链知识图谱^[42]

图 5 复杂供应链知识图谱示例

Fig. 5 Examples of complex supply chain knowledge graphs

表 3 基于知识图谱的复杂供应链网络建模研究示例

Tab. 3 Examples of complex supply chain network modeling research based on knowledge graphs

年份	图谱类型	实体类型	图谱规模		参考
			实体数量	关系数量	
2019	中小企业供应链金融图谱	公司、合同	1000	1598	[171]
2021	半导体制造供应链本体	产品、订单、客户	/	/	[172]
2021	轨道交通供应链图谱	列车编组、车辆、系统、供应商、模块 A、模块 B/C	/	/	[173]
2021	供应链风险知识图谱	风险源、风险、后果、商业活动	103	405	[180]
2022	某真实供应链图谱	公司、所属国、行业集团、商业部门、经济部门	14056	93106	[184]
2023	产品供应链图谱	/	250 万	65 万	[179]
2024	Marklines 汽车供应链图谱	公司、所属国、资质、产品、产能	42992	331715	[42]
2024	Achilles 能源供应链图谱	公司、所属国、产品	7424	50527	[42]

5 其他复杂供应链网络建模方法

除上述复杂网络、系统仿真和知识图谱等建模方法外，数学规划模型、Petri 网络模型、供应链运作参考（supply chain operation reference, SCOR）模型、投入产出模型等也被用于复杂供应链网络建模。

基于数学规划模型的建模方法通过变量和函数准确表达供应链问题的约束、目标、逻辑条件、成本关系和重要决策选择，并采用线性规划法、混合整数规划法等进行求解。该方法较多用于供应链网络优化研究：魏海燕等^[186]在供应链鲁棒性评估与优化研究中引入非正常投入产出模型（inoperability input-output model, IIM），通过量化网络间相互依赖关系导致的扰动连锁传播形成的间接影响，识别供应链系统中的脆弱环节；Fang 等^[187]在绿色闭环供应链背景下提出多目标数学规划模型，研究经济、环境和质量等因素对利润、生产水平及质量水平等多目标的影响，采用 LP-metrics 方法将多目标函数转化为单目标函数，实现绿色闭环供应链网络的多目标管理。Leng 等^[188]针对传统线性数学规划模型难以适应多源互联网大数据下的动态供应链网络模型求解问题，提出基于协同矩阵分解的半实例模式检测方法，通过电子商务供应链网络数据验证了该方法的有效性。

Petri 网络模型从过程角度描述具有随机性、分布式、并行和异步等特征的复杂系统，主要用于业务流程或供应链运作过程的建模。周庆等^[189]结合 Petri 网和复杂适应系统框架，构建了供应链多主体聚集模型，可准确分析供应链配送渠道系统中的个人机制与共享机制，进而实现供应链复杂系统的有效管理；Wang 等^[190]提出网络制造系统的离散-连续混合 Petri 网模型，其中连续部分刻画系统内部的生产过程动力学，离散部分描述每两个系统间的订购与交付过程动力学。王文利等^[191]建立的供应链网络混合 Petri 网模型，相比单纯的离散 Petri 网仿真，能更有效地指导供应链的生产、存储及配送活动。

此外，Laumanns 等^[192]将供应链网络视为复杂网络，将物流描述为物资在网络中的流动过程，并将每个企业抽象为节点，通过一阶微分方程模拟物料在节点间的转换；满运超^[194]分析了原油供应链网络的构成因素，结合系统动力学、因果关系图和流程图等方法，解析了网络中各要素间的逻辑关系；Perera 等^[195]引入马尔科夫链构建供应链网络演化模型，评估了局部中断对网络的影响。

6 结论

综上所述，经过 20 余年的发展，国内外学者从复杂网络、系统仿真、知识图谱等不同角度对复杂供应链网络进行建模，充分体现了供应链节点的属性与行为的异质性，针对复杂供应链网络的结构与功能分析、运行与演化机制、绩效评价与优化、风险评估与韧性管理等问题取得了丰富的研究成果^[195]。

如表 4 所示，复杂网络建模方法有效揭示了供应链系统的结构功能特性及演化过程；系统仿真建模方法通过动态交互式的方式分析了供应链系统各部分之间的相互作用机理，能够有效度量不同环节中断对供应链系统的影响程度，促进了复杂供应链运作过程的绩效评估与优化；知识图谱建模方法则有效刻画了供应链实体的多重属性信息以及实体间的多元交互和高阶依赖关系，进一步提高了深层供应链结构的可见性，并支撑了供应链关系预测和风险推

断。

表 4 常用复杂供应链网络建模方法总结

Tab. 4 Summary of commonly used complex supply chain network modeling methods

方法类型	特点及优势	已有研究的局限性
复杂网络建模方法	可模拟节点进入/退出的网络演化过程	侧重局部上下游关系而非全局关系
	可刻画网络的层次结构等特性	网络分析的尺度较为单一
	适用于大规模网络建模与分析	较少考虑节点间的异质行为和高阶关系
系统仿真建模方法	高效模拟供应链节点之间的交互行为	较少关注复杂供应链行为
	可刻画网络运行的动态特性	难以分析不确定性风险的影响
	可量化扰动对系统的影响程度	与真实的供应链情况仍有差距
知识图谱建模方法	可刻画节点的多重属性	尚处于初步探索阶段
	可刻画跨层级节点间的多元交互关系	供应链关系提取的准确性有待提高
	可对不确定关系进行建模	较少考虑供应链外部环境因素

然而，在当前多变的全球局势下，供应链网络呈现出逆全球化、区域集群化和复杂化布局发展，供应链韧性和安全所涉及的政策、环境等影响因素逐渐增多。供应链风险的不确定性、深层供应链结构的不可见性进一步加深，现有研究在高效刻画供应链节点间的多元和间接关系、充分解释复杂供应链网络的非线性机制、深入探索现实供应链网络的复杂行为和规律等方面仍面临挑战（见表 4），亟须结合大数据与人工智能技术，实现产业链供应链的结构精准建模、风险智能发现与网络韧性提升。基于此，本文认为未来复杂供应链网络建模与分析应重点关注以下方向：全局供应链图谱建设、多尺度拓扑结构解耦、隐含供应链关系预测以及供应链风险智能预警等方面。

(1) 基于知识图谱的全局供应链网络建模。供应链节点处于动态、复杂的市场环境中，并与其他节点存在较强的交互作用，基于复杂网络和 Agent 仿真的建模方法大多仅考虑上下游节点间的单一交互关系形成的网络结构，难以刻画供应链节点的多重属性信息以及跨层级节点间的多元交互过程。尽管部分学者应用知识图谱对供应链节点间的多重关系进行了建模分析，但针对大型供应链网络的建模与分析研究仍较少，且未考虑环境、技术、风险事件、政策法规及国际形势等供应链系统外部要素的影响。对此，未来研究可通过整合供应链系统相关的数据、信息和知识，打通数据孤岛，实现供应链“全链”知识关联，并将供应链体系内外要素纳入建模范畴，从而精准构建全局供应链网络知识图谱。

(2) 基于复杂网络的多尺度拓扑结构解耦。剖析复杂供应链网络结构是分析网络特性、掌握风险传播规律的基础。现有研究多采用关键节点识别、社团发现、链路预测等复杂网络分析方法探索供应链网络拓扑结构特征，并通过网络演化模型、Agent 仿真、系统动力学仿真等方法分析供应链网络风险传播影响。然而，相关研究主要侧重于贸易网络、供应链金融网络等单一类型网络，较少关注复杂供应链网络的异质性和多主体交互性等特征。对此，未来研究可从产品关系、贸易关系、金融关系、技术关系、合作与竞争关系等多维度出发，开展基于异质网络的供应链拓扑结构多尺度分析与挖掘，进一步完善供应链网络中的关键节点挖掘、薄弱环节发现等方法，最终实现“链主”和“专精特新”企业的精准识别，达到补链强链的目的。

(3) 基于链路预测的隐含供应链关系挖掘。跨层级供应链关系中往往隐含供应链节点间的深层次潜在依赖和影响,但现有供应链结构分析仅关注节点的上下游信息,忽略了网络中的间接依赖和高阶关联关系。对此,未来研究应充分考虑供应链节点间的跨层级连接关系,结合知识推理、链路预测和图神经网络等方法,对供应链网络中的缺失或隐含关系进行推断预测。在此基础上,可挖掘并超前管理高阶供应链结构引致的“远端”风险,进而实现面向供应链中断的供应商风险评估与替代供应商推荐。

(4) 基于仿真推演的供应链风险智能预警。在供应链多方主体交互过程中,风险会沿节点间的关联关系传导并放大,形成级联传播效应。现有研究利用网络传播模型、Agent 仿真模型和系统动力学模型等方法分析了供应链风险在网络中的传播过程,并评估了风险对整体供应链系统的影响,但主要面向层级结构简单、节点类型单一的供应链网络。对此,未来研究应考虑异质供应链网络中跨层级、多类型主体间的动态交互行为和高阶依赖关系,构建风险传播的仿真推演模型,结合风险规则与图计算方法分析风险在复杂网络中的传播路径,从而揭示风险传播特征及机理,实现潜在风险的智能分析与预警,提升我国产业链供应链的自主性、可控性和可持续性。

参考文献:

- [1] 吴建军, 吕莹. 全球变局下的管理科学与工程研究[J]. 中国管理科学, 2022, 30(5): 21-26.
WU J J, LV Y. Research on management science and engineering under global changes[J]. Chinese Journal of Management Science, 2022, 30(5): 21-26.
- [2] 盛昭瀚, 王海燕, 胡志华. 供应链韧性: 适应复杂性——基于复杂系统管理视角[J]. 中国管理科学, 2022, 30 (11): 1-7.
SHENG Z H, WANG H Y, HU Z H. Supply chain resilience: Adapting to complexity—based on the perspective of complex system thinking[J]. Chinese Journal of Management Science, 2022, 30 (11): 1-7.
- [3] McKinsey Global Institute. Risk, resilience, and rebalancing in global value chains[EB/OL]. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/risk-resilience-and-rebalancing-in-global-value-chains>, 2020, August 6.
- [4] 吴军, 李健, 汪寿阳. 供应链风险管理中的几个重要问题[J]. 管理科学学报, 2006 (6): 1-12.
WU J, LI J, WANG S Y. Some key problems in supply chain risk management[J]. Journal of Management Sciences in China, 2006 (6): 1-12.
- [5] STERMAN J D. Modeling managerial behavior: Misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiment[J]. Management Science, 1989, 35(3): 321-339.
- [6] LAMBERT D M, COOPER M C, PUGH J D. Supply chain management: implementation issues and research opportunities[J]. The International Journal of Logistics Management, 1998, 9(2): 1-20.
- [7] CHOI T Y, DOOLEY K J, RUNG TUSANATHAM M. Supply networks and complex adaptive systems: Control versus emergence[J]. Journal of Operations Management, 2001, 19(3): 351-66.
- [8] 陈剑, 刘运辉. 数智化使能运营管理变革: 从供应链到供应链生态系统[J]. 管理世界, 2021, 37(11): 227-240.
CHEN J, LIU Y H. Operations management innovation enabled by digitalization and intellectualization: From supply chain to supply chain ecosystem[J]. Journal of Management World, 2021, 37(11): 227-240.

- [9] MENTZER J T, DEWITT W, KEEBLER J S, *et al.* Defining supply chain management[J]. *Journal of Business Logistics*, 2001, 22(2): 1-25.
- [10] COX A, SANDERSON J, WATSON G. Supply chains and power regimes: toward an analytic framework for managing extended networks of buyer and supplier relationships[J]. *Journal of Supply Chain Management*, 2001, 37(2): 28-35.
- [11] LIN F R, SHAW M J. Reengineering the order fulfillment process in supply chain networks[J]. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 1998, 10: 197-229.
- [12] HASANI A, MOKHTARI H, FATTAHI M. A multi-objective optimization approach for green and resilient supply chain network design: a real-life case study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 123199.
- [13] KLIBI W, MARTEI A. Modeling approaches for the design of resilient supply networks under disruptions[J]. *International Journal of Production Economics*, 2012, 135(2): 882-898.
- [14] WANG F, LAI X, SHI N. A multi-objective optimization for green supply chain network design[J]. *Decision Support Systems*, 2011, 51(2), 262-269.
- [15] YANG G, WANG Z, LI X. The optimization of the closed-loop supply chain network[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2009, 45(1): 16-28.
- [16] XU N, LIU J, LI D, *et al.* Research on evolutionary mechanism of agile supply chain network via complex network theory[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016 (1): 1-9.
- [17] MAULL R, GERALDI J, JOHNSTON R. Service supply chains: A customer perspective[J]. *Journal of Supply Chain Management*, 2012, 48(4): 72-86.
- [18] SURANA A, WKUMARA S, GREAVES M, *et al.* Supply chain networks: A complex adaptive systems perspective[J]. *International Journal of Production Research*, 2005, 43(20): 4235-4265.
- [19] HELBING D, ARMBRUSTER D, MIKHAILOV A S, *et al.* Information and material flows in complex networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2006, 363(1): xi-xvi.
- [20] PATHAK S D, DILTS D M, BISWAS G. On the evolutionary dynamics of supply network topologies[J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2007, 54(4): 662-672.
- [21] WYCISK C, MCKELVEY B, HÜLSMANN M. “Smart parts” supply networks as complex adaptive systems: analysis and implications[J]. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 2008, 38(2): 108-125.
- [22] LI G, SUN L, JI P, *et al.* Self-organization evolution of supply networks: System modeling and simulation based on multi-agent[C]//*International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS)*, Xi'an, China: Springer, 2005: 405-409.
- [23] LI G, JI P, SUN L Y, *et al.* Modeling and simulation of supply network evolution based on complex adaptive system and fitness landscape[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2009, 56(3), 839-853.
- [24] VISWANADHAM N, SAMVEDI A. Supplier selection based on supply chain ecosystem, performance and risk criteria[J]. *International Journal of Production Research*, 2013, 51(21): 6484-6498.
- [25] KETCHEN D J, CROOK T R, CRAIGHEAD C W. From supply chains to supply ecosystems: Implications for strategic sourcing research and practice[J]. *Journal of Business Logistics*, 2014, 35(3): 165-171.
- [26] STOLZE H J, MOLLENKOPF D A, FLINT D J. What is the right supply chain for your shopper? Exploring the shopper service ecosystem[J]. *Journal of Business Logistics*, 2016, 37(2): 185-197.

- [27] 于永海, 吕福新. 企业网络的演化趋势[J]. 管理世界, 2014, (1): 180-181.
YU Y H, LÜ F X. Evolutionary trends of enterprise networks[J]. Journal of Management World, 2014 (1): 180-181.
- [28] 胡海青, 薛萌, 张琅, 等. 复杂供应链网络视域下关系资本对供应链融资作用机制研究——有调节的多重中介效应模型构建与检验[J]. 管理评论, 2020, 32(1): 262-274.
HU H Q, XUE M, ZHANG L, *et al.* Mechanism of how relational capital affects supply chain financing in complex supply chain network—examining a moderated multi-mediation model[J]. Management Review, 2020, 32(1): 262-274.
- [29] 燕晨屹, 王喜富, 员丽芬. 复杂供应链网络中牛鞭效应的评估[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(1): 208-213.
YAN Chenyi, WANG Xifu, YUAN Lifan. Assessing bullwhip effect in complex supply chain networks[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(1): 208-213.
- [30] 赵志刚. 复杂供应链网络演化及风险控制研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.
ZHAO Z G. Research on complex supply chain network evolution and risk control[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2020.
- [31] WIEDMER R, GRIFFIS S E. Structural characteristics of complex supply chain networks[J]. Journal of Business Logistics, 2021, 42(2): 264-290.
- [32] LAWRENCE V S, MARIA P S, MARK S D, *et al.* Planning for disruptions in supply chain networks[J]. INFORMS Tutorials in Operations Research. 2007. DOI: 10.1287/educ.1063.0025.
- [33] FANG H, JIANG D, YANG T, *et al.* Network evolution model for supply chain with manufactures as the core[J]. PLoS ONE, 2018, 13(1): 1-28.
- [34] ANG E, LANCU D A, SWINNEY R. Disruption risk and optimal sourcing in multitier supply networks[J]. Management Science, 2017, 63(8): 2397-2419.
- [35] BIMPIKIS K, CANDOGAN O, EHSANI S. Supply disruptions and optimal network structures[J]. Management Science, 2019, 65(12): 5504-5517.
- [36] BIDHANDI H M, YUSUFF R M, AHMAD M M H M, *et al.* Development of a new approach for deterministic supply chain network design[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 198(1): 121-128.
- [37] ZHENG J. A modelling framework for the planning of strategic supply chain viewed from complex networks[J]. Journal of Service Science and Management, 2009, 2(2): 129-135.
- [38] PATHAK S D, DAY J M, NAIR A, *et al.* Complexity and adaptivity in supply chain networks: building supply network theory using a complex adaptive systems perspective[J]. Decision Sciences, 2007, 38(4): 547-562.
- [39] 范旭, 马军海, 修妍. 复杂供应链网络中的不确定性分析[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2006, 3(3): 20-25.
FAN X, MA J H, XIU Y. Analysis of uncertainty in complex supply chain networks[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2006, 3(3): 20-25.
- [40] WIEDMER R, GRIFFIS S E. Structural characteristics of complex supply chain networks[J]. Journal of Business Logistics, 2021, 42(2): 264-290.
- [41] ZHAO K, ZUO Z, BLACKHURST J V. Modelling supply chain adaptation for disruptions: An empirically grounded complex adaptive systems approach[J]. Journal of Operations Management, 2019, 65(2): 190-212.
- [42] KOSASIH E E, MARGAROLI F, GELLI S, *et al.* Towards knowledge graph reasoning for supply chain risk

- management using graph neural networks[J]. *International Journal of Production Research*, 2024, 62(15): 5596-5612.
- [43] HIDALGO C A, KLINGER B, BARABÁSI A L. The product space conditions the development of nations[J]. *Science*, 2007, 317(5837): 482-487.
- [44] BARABÁSI A L. *Linked: The new science of networks*[M]. Cambridge, MA: Perseus, 2002.
- [45] ERDŐS P, RÉNYI A. On the evolution of random graphs[J]. *Publication of the Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Sciences*, 1960, 5(1): 17-60.
- [46] BASOLE R C, MARCUS A B. Supply network structure, visibility, and risk diffusion: A computational approach[J]. *Decision Sciences*, 2014, 45(4): 753-789.
- [47] HARLAND C M, RICHARD C L, ZHENG J, *et al.* A taxonomy of supply networks[J]. *Journal of Supply Chain Management*, 2001, 37(3): 21-27.
- [48] NAIR A, VIDAL J M. Supply network topology and robustness against disruptions—an investigation using multi-agent model[J]. *International Journal of Production Research*, 2011, 49(5): 1391-1404.
- [49] BARABÁSI A L. *Network science*, 1st ed[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2016.
- [50] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of ‘small-world’ networks[J]. *Nature*, 1998, 393(6684): 440-442.
- [51] WATTS D J. *Small worlds: The dynamics of networks between order and randomness*[M]. Princeton: Oxford: Princeton University Press, 1999.
- [52] BARRAT A, MARTIN W. On the properties of small-world network models[J]. *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, 2000, 13(3): 547-560.
- [53] WATTS D J. The ‘new’ science of networks[J]. *Annual Review of Sociology*, 2004, 30: 243-70.
- [54] BARAHONA M, PECORA L M. Synchronization in small-world systems[J]. *Physical Review Letter*, 2002, 89(5): 054101.
- [55] HSU C, SHIH H. Transmission and control of an emerging influenza pandemic in a small-world airline network[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2010, 42(1): 93-100.
- [56] BRINTRUP A, Anna L. Supply network science: Emergence of a new perspective on a classical field[J]. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2018, 28(3): 033120.
- [57] XU M, BRAD R A, JOHN C C. Interconnectedness and resilience of the US economy[J]. *Advances in Complex Systems*, 2011, 14(5): 649-672.
- [58] POTTER A, MIRIAM W. Exploring supplier-supplier innovations within the Toyota supply network: A supply network perspective[J]. *Journal of Operations Management*, 2020, 66(7-8): 797-819.
- [59] BARABÁSI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. *Science*, 1999, 286(5439): 509-512.
- [60] BARABÁSI A L, ALBERT R, JEONG H. Mean-field theory for scale-free random networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 1999, 272(1-2): 173-187.
- [61] ALBERT R, HAWOONG J, BARABÁSI A L. Error and attack tolerance of complex networks[J]. *Nature*, 2000, 406(6794): 378-382.
- [62] CHOPRA S. Designing the distribution network in a supply chain[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2003, 39(2): 123-140.

- [63] HEARNshaw E J, WILSON M M. A complex network approach to supply chain network theory[J]. *International Journal of Operations & Production Management*, 2013, 33(4): 442-469.
- [64] 傅培华, 李进, 刘燕楚. 基于度与路径优先连接的集聚型供应链网络演化模型[J]. *运筹与管理*, 2013, 22(01): 120-125.
FU P H, LI J, LIU Y C. Cluster supply chain network evolving model based on degree and path preferential attachment[J]. *Operations Research and Management Science*, 2013, 22(01): 120-125.
- [65] THADAKAMAILA H P, RAGHAVAN U N, KUMARA S, *et al.* Survivability of multiagent-based supply networks: A topological perspective[J]. *IEEE Intelligent Systems*, 2004, 19(5): 24-31.
- [66] 张纪会, 徐军芹. 适应性供应链的复杂网络模型研究[J]. *中国管理科学*, 2009, 17(2): 76-79.
ZHANG J H, XU J Q. Study on complex network model for adaptive supply chains[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2009, 17(2): 76-79.
- [67] KWOK J J M, LEE D Y. Coopetitive supply chain relationship model: Application to the smartphone manufacturing network[J]. *PLoS ONE*, 2015, 10(7): e0132844.
- [68] ZHAO D. The research of supply chain modeling based on the improved complex network theory[C]//*International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence*, Shanghai, China: IEEE, 2009: 172-175.
- [69] 赵志刚, 周根贵, 潘瑞芳. 基于位置吸引力的加权复杂供应链网络局域世界演化模型研究[J]. *计算机科学*, 2018, 45(12): 71-76.
ZHAO Z G, ZHOU G G, PAN R F. Study on local world evolution model of weighted complex supply chain network based on location attraction[J]. *Computer Science*, 2018, 45(12): 71-76.
- [70] DUI H, MENG X, XIAO H, *et al.* Analysis of the cascading failure for scale-free networks based on a multi-strategy evolutionary game[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020, 199: 106919.
- [71] XUAN Q, DU F, LI Y, *et al.* A framework to model the topological structure of supply networks[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2010, 8(2): 442-446.
- [72] DOROGOVTSSEV S N, MENDES J F F. Scaling behaviour of developing and decaying networks[J]. *Europhysics Letters*, 2000, 52(1): 33.
- [73] 杨琴, 姚娟. 基于 TDE 模型的供应链有向含权网络[J]. *系统管理学报*, 2013(5): 640-646.
YANG Q, YAO J. Weighted directed supply chain network based on TDE model[J]. *Journal of Systems & Management*, 2013(5): 640-646.
- [74] 丁青艳. 复杂网络结构下供应链企业间合作关系研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
DING Q Y. Research on cooperation relationship between supply chain partners based on complex network structure[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [75] 曹文彬, 熊曦. 边效益因素下复杂供应链网络局域演化机制[J]. *计算机应用研究*, 2016, 33(1): 75-77.
CAO W B, XIONG X. Local-world evolution model of complex supply chain network under edge benefit[J]. *Application Research of Computers*, 2016, 33(1): 75-77.
- [76] 丁飞, 陈红. 复杂网络视角下供应链网络模型研究[J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(02): 120-127.
DING F, CHEN H. Supply chain network modeling research from perspective of complex network[J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2018, 39(2): 120-127.

- [77] 谢珊珊. 基于演化模型的供应链网络脆弱性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
XIE S S. Vulnerability study of supply chain network based on evolutionary model[D]. Wuhan: HuaZhong University of Science & Technology, 2015.
- [78] HUANG J, XIAO T, SHENG Z, *et al.* Modeling an evolving complex supply network[J]. *Journal of Systems Science & Information*, 2007, 5(4): 327-338.
- [79] SARSHAR N, ROYCHOWDHURY V. Scale-free and stable structures in complex ad hoc networks[J]. *Physical Review E*, 2004, 69(2): 026101.
- [80] 高蕾, 郭进利, 贾洪岩. 基于退出机制的供应链建模与分析[J]. *商业研究*, 2011(1): 43-47.
GAO L, GUO J L, JIA H Y. Supply chain model with deletion mechanism[J]. *Commercial Research*, 2011(1): 43-47.
- [81] 丁飞, 陈红, 杨冀豫. 基于复杂网络的供应链网络演化模型研究[J]. *计算机与数字工程*, 2018, 46(2): 343-347.
DING F, CHEN H, YANG J Y. Research on the evolution model of supply chain network based on the complex networks[J]. *Computer & Digital Engineering*, 2018, 46(2): 343-347.
- [82] 郭进利. 供应链型网络中双幂律分布模型[J]. *物理学报*, 2006 (8): 3916-3921.
GUO J L. The bilateral power-law distribution model of supply chain networks[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006,(8): 3916-3921.
- [83] ZHAO K, KUMAR A, HARRISON T P, *et al.* Analyzing the resilience of complex supply network topologies against random and targeted disruptions[J]. *IEEE Systems Journal*, 2011, 5(1): 28-39.
- [84] 张怡, 熊杰, 冯春. 基于复杂网络的供应链网络鲁棒性分析[J]. *计算机仿真*, 2012, 29(11): 370-373.
ZHANG Y, XIONG J, FENG C. Robustness analysis of supply chain network based on complex networks[J]. *Computer Simulation*, 2012, 29(11): 370-373.
- [85] 张轶, 钱晓东. 基于复杂网络的供应链建模及仿真研究[J]. *科技管理研究*, 2014, 34(22): 183-186.
ZHANG Y, QIAN X D. Supply chain modeling and simulation research based on complex network[J]. *Science and Technology Management Research*, 2014, 34(22): 183-186.
- [86] FU P H, LIU Y C. The security analysis of supply chain network based on the complex network[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 143: 1218-1222.
- [87] LI X, CHEN G. A local-world evolving network model[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2003, 328(1-2): 274-286.
- [88] RAVASZ E, BARABÁSI A L. Hierarchical organization in complex networks[J]. *Physical Review E*, 2003, 67(2): 026112.
- [89] 王文宾, 达庆利, 胡天兵, 等. 基于惩罚与补贴的再制造闭环供应链网络均衡模型[J]. *运筹与管理*, 2010, 19(1): 65-72.
WANG W B, DA Q L, HU T B, *et al.* Remanufacturing closed-loop supply chain network equilibrium model based on allowance and penalty[J]. *Operations Research and Management Science*, 2010, 19(1): 65-72.
- [90] 张桂涛, 孙浩, 胡劲松, 等. 考虑风险的随机需求供应链网络均衡研究[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2012, 9(4): 55-62.
ZHANG G T, SUN H, HU J S, *et al.* Study on supply chain network equilibrium with random demand considering risk[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2012, 9(4): 55-62.

- [91] 柳虹, 周根贵, 傅培华. 分层供应链复杂网络局部演化模型研究[J]. 计算机科学, 2013, 40(2): 270-273.
LIU H, ZHOU G G, FU P H. Local evolving model research of layered supply chains complex networks[J]. Computer Science, 2013, 40(2): 270-273.
- [92] TANG L, JING K, HE J, *et al.* Complex interdependent supply chain networks: Cascading failure and robustness[J]. Physica A-Statistical Mechanics and Its Applications, 2016, 443: 58-69.
- [93] 王杏. 基于复杂网络的农产品供应链建模与网络风险传播研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
WANG X. Agri-food supply chain modeling and risk propagation based on complex network theory[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [94] SUN J, TANG J, FU W, *et al.* Construction of a multi-echelon supply chain complex network evolution model and robustness analysis of cascading failure[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 144, 106457.
- [95] 汪金洲, 陈洪转. 基于复杂网络的复杂产品供应链风险传播模型[J]. 统计与决策, 2021, 37(4): 176-180.
WANG J Z, CHEN H Z. Complex product supply chain risk propagation model based on complex network[J]. Statistics & Decision, 2021, 37(4): 176-180.
- [96] LIU Y, XU S, LIU J, *et al.* Analytical bi-level multi-local-world complex network model on fresh agricultural products supply chain[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(1): 208-215.
- [97] 张毅. 考虑相似度的供应链网络建模和级联失效研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
ZHANG Y. Research on modeling and cascading failure of supply chain network considering similarity[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [98] DONG J, ZHANG D, NAGURNEY A. A supply chain network equilibrium model with random demands[J]. European Journal of Operational Research, 2004, 156(1): 194-212.
- [99] CHEN H, LIN A. Complex network characteristics and invulnerability simulating analysis of supply chain[J]. Journal of Networks, 2012, 7(3): 591-597.
- [100] CELLAI D, BIANCONI G. Multiplex networks with heterogeneous activities of the nodes[J]. Physical Review E, 2016, 93(3): 032302.
- [101] 廖治东, 郑国华. 考虑不同节点行为要素特征的供应链演化规律研究[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(6): 1679-1682.
LIAO Z D, ZHENG G H. Study on evolution law of supply chain considering characteristics of behavior factors of different nodes[J]. Journal of Computer Applications, 2020, 37(6): 1679-1682.
- [102] 孙军艳, 傅卫平, 王雯. 以制造商为核心的复杂供应链网络多级局域世界演化模型[J]. 计算机应用, 2015(2): 560-565.
SUN J Y, FU W P, WANG Wen. Evolving model of multi-local world based on supply chain network with core of manufacturers[J]. Journal of Computer Applications, 2015(2): 560-565.
- [103] 陈晓, 张纪会. 复杂供需网络的局域生长演化模型[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2008, 5(1): 54-60.
CHEN X, ZHANG J H. A local-world evolving growth model of the complex supply chain network[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2008, 5(1): 54-60.
- [104] NAGURNEY A, DONG J, ZHANG D. A supply chain network equilibrium model[J]. Transportation Research, Part E: Logistics & Transportation Review, 2002, 38(5): 281-303.
- [105] YAMADA T, IMAI K, NAKAMURA T, *et al.* A supply chain-transport supernetwork equilibrium model with

- the behaviour of freight carriers[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2011;47(6): 887-907.
- [106] 刘雪娇, 郭进利. 基于超网络理论的供应链网络形成过程研究[J]. *技术与创新管理*, 2012, 33(3): 274-277.
- LIU X J, GUO J L. Supply chain network formation based on supernetwork[J]. *Technology and Innovation Management*, 2012, 33(3): 274-277.
- [107] LV T, NIE Y, WANG C L, *et al.* Cross-regional emergency scheduling planning for petroleum based on the supernetwork model[J]. *Petroleum Science*, 2018, 15: 666-679.
- [108] 闻少博, 陈甲斌, 郝晓晴. 基于复杂网络视角的全球铜资源供应链风险研究[J]. *矿业研究与开发*, 2021, 41(9): 171-178.
- WEN S B, CHEN J B, HAO X Q. Research on the supply chain risk of global copper resources from the perspective of complex network[J]. *Mining Research and Development*, 2021, 41(9): 171-178.
- [109] CAI M, HUANG G, TAN Y, *et al.* Decoding the complexity of large-scale pork supply chain networks in China[J]. *Industrial Management & Data Systems*, 2020, 120(8): 1483-1500.
- [110] LU X, HORN A L, SU J, *et al.* A Universal Measure for Network Traceability[J]. *Omega*, 2019, 87: 191-204.
- [111] 赵炳新, 尹翀, 张江华. 产业复杂网络及其建模——基于山东省实例的研究[J]. *经济管理*, 2011, 33(7): 139-148.
- ZHAO Bi X, YIN C, ZHANG J H. A study on industry complex network and its modeling—on the example of Shandong province[J]. *Business and Management Journal*, 2011, 33(7): 139-148.
- [112] SUN H J, WU J J. Scale-free characteristics of supply chain distribution networks[J]. *Modern Physics Letters B*, 2005, 19(17): 841-850.
- [113] BRINTRUP A, ANNA L, JOSE B. Topological robustness of the global automotive industry[J]. *Logistics Research*, 2016, 9(1): 1-17.
- [114] 李季明, 张宁. 中国汽车零部件企业竞争网拓扑结构分析[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2008(2): 72-79.
- LI J M, ZHANG N. Analysis to competition network topological structure of automotive components enterprises in China[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2008 (2): 72-79.
- [115] BORGATTI S P, LI X. On social network analysis in a supply chain context[J]. *Journal of Supply Chain Management*, 2009, 45(2): 5-22.
- [116] CHOI T Y, WU Z, LISA E, *et al.* Supplier-supplier relationships and their implications for buyer-supplier relationships[J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2002, 49(2): 119-130.
- [117] CHOI T Y, HONG Y. Unveiling the structure of supply networks: case studies in Honda, Acura, and DaimlerChrysler[J]. *Journal of Operations Management*, 2002, 20(5): 469-493.
- [118] KIM Y, CHOI T Y, YAN T, *et al.* Structural investigation of supply networks: A social network analysis approach[J]. *Journal of Operations Management*, 2011, 29(3): 194-211.
- [119] POTTER A, WILHELM M. Exploring supplier-supplier innovations within the Toyota supply network: A supply network perspective[J]. *Journal of Operations Management*, 2020, 66(7-8): 797-819.
- [120] NUSS P, GRAEDEL T E, ALONSO E, *et al.* Mapping supply chain risk by network analysis of product platforms[J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2016, 10: 14-22.
- [121] WANG J, DE WILDE P, WANG H. Topological analysis of a two coupled evolving networks model for

- business systems[J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(5): 9548-9556.
- [122] DOOLEY K J, PATHAK S D, KULL T J, *et al.* Process network modularity, commonality, and greenhouse gas emissions[J]. *Journal of Operations Management*, 2019, 65(2): 93-113.
- [123] KÜHNERT C, HELBING D, WEST G B. Scaling laws in urban supply networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2006, 363(1): 96-103.
- [124] 宋燕茹. 生鲜农产品供应链网络级联失效及抗毁性分析[D]. 上海: 东华大学, 2021.
SONG Y R. The cascade failure and invulnerability analysis of fresh agricultural products supply chain network[D]. Shanghai: Donghua University, 2021.
- [125] KAJIKAWA Y, TAKEDA Y, SAKATA I, *et al.* Multiscale analysis of interfirm networks in regional clusters[J]. *Technovation*, 2010, 30: 168-80.
- [126] 孙军艳, 傅卫平, 王雯. 基于复杂网络理论的 B2C 商供应链网络分析[J]. *西安理工大学学报*, 2015(4): 391-399.
SUN J Y, FU W P, WANG Wen. Analysis of the B2C electronic commerce supply chain network based on complex network theory[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2015(4): 391-399.
- [127] 张轶. 基于复杂网络的供应链建模及特性研究——以我国汽车制造业为例[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
ZHANG Y. Supply chain modeling and characteristics research based on complex network—take China's automobile manufacturing for example[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2015.
- [128] ARORA S, BRINTRUP A. How does the position of firms in the supply chain affect their performance? An empirical study[J]. *Applied Network Science*, 2021, 6(1): 1-31.
- [129] SWAMINATHAN J M, SMITH S F, SADEH N M. Modeling supply chain dynamics: A multiagent approach[J]. *Decision Sciences*, 1998, 29(3): 607-632.
- [130] GIANESELO P, IVANOV D, BATTINI D. Closed-loop supply chain simulation with disruption considerations: a case-study on Tesla[J]. *Inventory Research*, 2017, 4(4): 257-280.
- [131] TAKO AA, ROBINSON S. The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context[J]. *Decision support systems*, 2012, 52(4): 802-815.
- [132] 王剑, 黄洋. 基于 HAS 的分布式供应链仿真建模方法研究[J]. *系统仿真学报*, 2017, 29(7): 1387-1396.
WANG J, HUANG Y. Simulation modeling method of distributed supply chain based on HAS[J]. *Journal of System Simulation*, 2017, 29(7): 1387-1396.
- [133] 刘小峰, 陈国华. 基于复杂网络的供应链鲁棒性分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2007(S2): 237-242.
LIU X F, CHEN G H. Robustness analysis of supply chain based on complex networks[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2007 (S2): 237-242.
- [134] LONG Q. Three-dimensional-flow model of agent-based computational experiment for complex supply network evolution[J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(5): 2525-2537.
- [135] SURANA A, KUMARA S, GREAVES M, *et al.* Supply-chain networks: A complex adaptive systems perspective[J]. *International Journal of Production Research*, 2015, 43(20): 4235-4265.
- [136] ZHANG F, LIU J. Evolution modeling of degree preference supply chain network[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2013, 13(21): 4428-4434.

- [137] 侯新培, 王要武, 王海. 基于多 Agent 系统的建设供应链协同决策[J]. 系统管理学报, 2008(5): 548-552.
HOU X P, WANG Y W, WANG H. Research on coordination decision of CSCM based on multi-agent system[J]. Journal of Systems & Management, 2008 (5): 548-552.
- [138] CORREA-MARTINEZ Y C, SECK M. A generic representation of supply network resilience using simulation based experimentation[J]. Journal of Simulation, 2023, 17(3): 326-359.
- [139] UTOMO D S, ONGGO B S, ELDRIDGE S. Applications of agent-based modelling and simulation in the agri-food supply chains[J]. European Journal of Operational Research, 2018, 269(3): 794-805.
- [140] LU L, WANG G. A study on multi-agent supply chain framework based on network economy[J]. Computers & Industrial Engineering, 2008, 54 (2): 288-300.
- [141] PIAO M, ZHANG D, LU H, *et al.* A supply chain inventory management method for civil aircraft manufacturing based on multi-agent reinforcement learning[J]. Applied Sciences-Basel, 2023, 13(13): 7510.
- [142] SHI L, GUO W, WANG L, *et al.* Stochastic fixed-time tracking control for the chaotic multi-agent-based supply chain networks with nonlinear communication[J]. Electronics, 2023, 12(1): 83.
- [143] 潘潇雄. 制造企业两级分销网络设计及其风险应对能力研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.
PAN X X. Research on bi-level distribution network design and risk coping ability of manufacturing enterprises[D]. Xi'an: Chang'an University, 2022.
- [144] SUN J, TANG J, FU W, *et al.* Hybrid modeling and empirical analysis of automobile supply chain network[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2017, 473: 377-389.
- [145] IVANOV D. Simulation-based ripple effect modelling in the supply chain[J]. International Journal of Production Research, 2016, 55(7): 2083-2101.
- [146] IVANOV D, ROZHKOVA M. Coordination of production and ordering policies under capacity disruption and product write-off risk: An analytical study with real-data based simulations of a fast moving consumer goods company[J]. Annals of Operations Research, 2017, 291(4): 387-407.
- [147] IVANOV D. Predicting the impacts of epidemic outbreaks on global supply chains: A simulation-based analysis on the coronavirus outbreak (COVID-19/SARS-CoV-2) case[J]. Transportation Research Part E, 2020, 136: 1-14.
- [148] BURGOS D, IVANOV D. Food retail supply chain resilience and the COVID-19 pandemic: A digital twin-based impact analysis and improvement directions[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2021, 152: 1-20.
- [149] TAN J, JIANG G, WANG Z. Evolutionary game model of information sharing behavior in supply chain network with agent-based simulation[J]. International Journal of Intelligent Information Technologies, 2019, 15(2): 54-68.
- [150] JIA F, ZHANG S, ZHENG X, *et al.* A novel coordination mechanism to coordinate the multi-agent reverse supply chain with fairness concerns[J]. International Journal of Production Economics, 2023, 265: 108973.
- [151] 张冉, 林杰. 供应链网络的 Agent 仿真建模与其知识库构建研究[J]. 工业工程与管理, 2015, 20(3): 21-27.
ZHANG R, LIN J. Agent-based modeling and simulation of supply chain network with development of agent knowledge base[J]. Industrial Engineering and Management, 2015, 20(3): 21-27.
- [152] FORRESTER J W. Industrial dynamics: A major breakthrough for decision makers [J]. Harvard Business

Review, 1958, 36(4): 37-66.

- [153] 周金华, 朱建军, 张玉春. 基于系统动力学的大型客机供应链质量管控契约优化[J]. 控制与决策, 2020, 35(1): 215-227.
- ZHOU J H, ZHU J J, ZHANG Y C. Contracts and optimization to quality control in supply chain of large-scale passenger aircraft based on system dynamic[J]. Control and Decision, 2020, 35(1): 215-227.
- [154] LI C, REN J, WANG H. A system dynamics simulation model of chemical supply chain transportation risk management systems[J]. Computers & Chemical Engineering, 2016, 89: 71-83.
- [155] KEILHACKER M L, MINNER S. Supply chain risk management for critical commodities: A system dynamics model for the case of the rare earth elements[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017, 125: 349-362.
- [156] OLIVARES-AGUILA J, ELMARAGHY W. System dynamics modelling for supply chain disruptions[J]. International Journal of Production Research, 2021, 59(6): 1757-1775.
- [157] ESTESO A, Alemany M M E, Ottati F, *et al.* System dynamics model for improving the robustness of a fresh agri-food supply chain to disruptions[J]. Operational Research, 2023, 23(2): 28.
- [158] LANGROODI R R P, AMIRI M. A system dynamics modeling approach for a multi-level, multi-product, multi-region supply chain under demand uncertainty[J]. Expert Systems with Applications, 2016, 51: 231-244.
- [159] TAGHIKHAH F, VOINOV A, SHUKLA N, *et al.* Integrated modeling of extended agro-food supply chains: A systems approach[J]. European Journal of Operational Research, 2021, 288(3): 852-868.
- [160] 李卓群, 严广乐. JIT 供货约束下差异化订货决策行为的供应链系统动力学分析[J]. 系统管理学报, 2017, 26(5): 957-963.
- LI Z Q, YAN G L. The supply chain system dynamics analysis on heterogeneous individual ordering decision behaviors under providing JIT services[J]. Journal of Systems & Management, 2017, 26(5): 957-963.
- [161] 王宇奇, 曲云玉. 环境扰动下进口原油供应链网络柔性的系统动力学仿真[J]. 系统管理学报, 2019, 28(5): 983-990.
- WANG Y Q, QU Y Y. SD simulation of flexibility of imported crude oil supply chain network under environment disruption[J]. Journal of Systems & Management, 2019, 28(5): 983-990.
- [162] 朱雪春, 赵欣然, 贡文伟. 服务供应链知识共创的系统动力学建模与仿真研究[J]. 运筹与管理, 2023, 32(9): 50-56.
- ZHU X C, ZHAO X R, GONG W W. Modeling and simulation study of system dynamics for knowledge co-creation of service supply chain[J]. Operation Research and Management Science, 2023, 32(9): 50-56.
- [163] SONG M, CUI X, WANG S. Simulation of land green supply chain based on system dynamics and policy optimization[J]. International Journal of Production Economics, 2019, 217: 317-327.
- [164] 张诚. 中小企业供应链金融风险测控的研究——基于系统动力学仿真模型[J]. 系统科学学报, 2018, 26(3): 76-80.
- ZHANG C. A study of supply chain finance risks of small and medium enterprises—based on dynamics simulation of system[J]. Journal of Systems Science, 2018, 26(3): 76-80.
- [165] 张玉春, 冯昱. 非对称信息下闭环供应链回收品质量控制系统动力学分析[J]. 统计与决策, 2019, 35(1): 67-72.
- ZHANG Y C, FENG Y. System dynamics analysis on recycled product quality control in closed-loop supply

- chain under asymmetric information[J]. *Statistics & Decision*, 2019, 35(1): 67-72.
- [166] 成琼文, 周璐. 基于系统动力学的绿色供应链管理实践路径仿真[J]. *科技管理研究*, 2016, 36(23): 226-231.
- CHENG Q W, ZHOU L. A path analysis on performance upgrading for green supply chain management based on system dynamics[J]. *Science and Technology Management Research*, 2016, 36(23): 226-231.
- [167] 魏晓彤, 冯鲍. 供应链金融信息生态系统演进动力研究[J]. *武汉理工大学学报(信息与管理工程版)*, 2024, 46(1): 117-123.
- WEI X T, FENG B. Research on evolution dynamics of supply chain finance information ecosystem[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering)*, 2024, 46(1): 117-123.
- [168] GUAN S, JIN X, JIA Y. Knowledge reasoning over knowledge graph: A survey[J]. *Journal of Software*, 2018, 29(10): 2966-2994.
- [169] 王越群. 基于知识图谱的深度推荐系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- WANG Y Q. Research on deep recommendation system based on knowledge graph[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [170] FENG J, CAI M, DAI F, *et al.* Data-driven supply chains mapping and disruption analysis: The case of automotive SoC enterprises in China[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2025, 201: 110897.
- [171] ZHANG W, LIU Y, JIANG L, *et al.* The construction of a domain knowledge graph and its application in supply chain risk analysis[C]// *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, Springer, 2020: 464-478.
- [172] RAMZY N, AUER S, CHAMANARA J, *et al.* KnowGraph-PM: A knowledge graph based pricing model for semiconductor supply chains[C]// *International Conference on Intelligence Science*, 2021: 61-74.
- [173] LI S, ZHANG Y, HUANG M, *et al.* Building and using a supply chain knowledge graph applied to the rail transit industry[C]// *Asian Conference on Artificial Intelligence Technology (ACAIT)*, Haikou, China: IEEE, 2021: 742-746.
- [174] LI Y, ZHU Z, CHEN L, *et al.* Exploring large-scale financial knowledge graph for SMEs supply chain mining[J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2024, 36(5): 1979-1990.
- [175] GEERTS G L, O'LEARY D E. A supply chain of things: The EAGLET ontology for highly visible supply chains[J]. *Decision Support Systems*, 2014, 63: 3-22.
- [176] DÜGGELIN W, EMANUELE L. A knowledge graph-based decision support system for resilient supply chain networks[C]// *International Conference on Research Challenges in Information Science*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024.
- [177] BRINTRUP A, KOSASIH E E, SCHAFFER P, *et al.* Digital supply chain surveillance using artificial intelligence: definitions, opportunities and risks[J]. *International Journal of Production Research*, 2024, 62(13): 4674-4695.
- [178] PALMER C, URWIN E N, NIKNEJAD A, *et al.* An ontology supported risk assessment approach for the intelligent configuration of supply networks[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2018, 29: 1005-1030.
- [179] YANG Y, PENG C, CAO E Z, *et al.* Building resilience in supply chains: A knowledge graph-based risk management framework[J]. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2023, 11(3): 3873-3881.
- [180] ZHANG Q, MU W: Research on search method of knowledge graph of supply chain risk based on cascading

- effect[C]// International Conference on Management Science and Industrial Engineering, 2021, 111-119.
- [181] ROLF B, MEBARKI N, LANG S, *et al.* Using knowledge graphs and human-centric artificial intelligence for reconfigurable supply chains: A research framework[J]. IFAC-PapersOnLine, 2022, 55(10): 1693-1698.
- [182] KOSASIH E E, BRINTRUP A. Towards trustworthy AI for link prediction in supply chain knowledge graph: A neurosymbolic reasoning approach[J]. International Journal of Production Research, 2024, 1-23.
- [183] AZIZ A, KOSASIH E E, GRIFFITHS R R, *et al.* Data considerations in graph representation learning for supply chain networks [C]// 2021 Workshop on Machine Learning for Data. 2021.
- [184] BROCKMANN N, KOSASIH E E, BRINTRUP A. Supply chain link prediction on uncertain knowledge graph[J]. ACM SIGKDD Explorations Newsletter, 2022, 24(2): 124-130.
- [185] LI Y, ZHU Z, GUO X, *et al.* Learning joint relational co-evolution in spatial-temporal knowledge graph for SMEs supply chain prediction[C]// ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2023: 4426-4436.
- [186] 魏海蕊, 盛昭瀚. 基于不可运作性输入输出模型的供应链冲击级联影响研究[J]. 软科学, 2017, 31(6): 120-124.
- WEI H R, SHENG Z H. The ripple effects evaluation of disrupted supply chain network based on inoperability input-output model[J]. Soft Science, 2017, 31(6): 120-124.
- [187] FANG H, JIANG D, YANG T, *et al.* Network evolution model for supply chain with manufactures as the core[J]. PLoS ONE, 2018, 13(1): 1-28.
- [188] LENG K, JING L, LIN I, *et al.* Research on mining collaborative behaviour patterns of dynamic supply chain network from the perspective of big data[J]. Neural Computing & Applications, 2019, 31(1): 113-121.
- [189] 周庆, 陈剑. 基于 Swarm 的供应链多主体聚集模型及其仿真[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(6): 1308-1313.
- ZHOU Q, CHEN J. Swarm-based aggregation model and simulation of multi-agent in supply chain[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(6): 1308-1313.
- [190] WANG Z, ZHANG J, CHAN F T. A hybrid Petri nets model of networked manufacturing systems and its control system architecture[J]. Journal of Manufacturing Technology Management, 2005, 16(1): 36-52.
- [191] 王文利, 白世贞. 基于离散-连续联合建模的供应链混合 Petri 网仿真研究[J]. 科学技术与工程, 2006, 6(15): 2402-2406.
- WANG W L, BAI S Z. Research on supply chain hybrid petri nets simulation based on discrete-continuous combined modeling[J]. Science Technology and Engineering, 2006, 6(15): 2402-2406.
- [192] LAUMANN S M, LEFEBER E. Robust optimal control of material flows in demand-driven supply networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2006, 363(1): 24-31.
- [193] 满运超. 我国原油供应链网络的系统分析与建模[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
- MAN Y C. Systems analysis and modeling of China's crude oil supply chain network[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015.
- [194] PERERA S, BELL M G, KURAUCHI F, *et al.* Absorbing Markov chain approach to modelling disruptions in supply chain networks[C]//Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon), Moratuwa, Sri Lanka: IEEE, 2019: 515-520.
- [195] WU Z, CHOI T Y. Supplier-supplier relationships in the buyer-supplier triad: Building theories from eight case studies[J]. Journal of Operations Management, 2005, 24(1): 27-52.