第1章

绪 论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

供应链(supply chain,SC)是指一件产品在从生产、流通到提供给最终用户的过程中,以所有上下游企业和用户为节点,以物流、信息流和资金流为链接所形成的复杂网链。进入21世纪,全球产业链供应链呈现网络化、深层次整合、低成本运营、区域化集群、复杂化布局的发展趋势,并形成了结构复杂度高、上下游链条较长、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引起世界各国高度重视[1-2]。美国在2020年发布的《国家反情报战略(2020—2022)》中明确了供应链安全战略目标,并于2021年发布《确保信息和通信技术及服务供应链安全》;欧盟于2021年通过《供应链法》推动欧盟经济竞争力回归,并于2022年发布《欧洲芯片法案》强化自身半导体供应链安全;英国于2021年发布《国防与安全工业战略》强调加强供应链的韧性和生产力,同年日本发布《通商白皮书》重点关注供应链的脆弱性。

我国是世界第一制造业大国,也是全球最大的中间品和资本品进口国,进出口贸易额占全球贸易约12%。复杂供应链网络是我国规模庞大、结构完整的工业体系的基石,保障了生产制造产业、生活服务产业以及国防、交通、能源等基础产业的平稳运行。然而,在当前全球多变局势下,我国供应链体系正遭受国际贸易摩擦、地缘政治冲突、突发公共卫生事件、突发自然灾害等多源不确定风险的冲击,供应链韧性与稳定面临严峻挑战并上升到国家战略高度。2021年7月,中共中央政治局会议提出:“要强化科技创新和产业链供应链韧性,加强基础研究,推动应用研究,开展补链强链专项行动,加快解决‘卡脖子’难题,发展专精特新中小企业。”2022年3月,李克强总理在2022年《政府工作报告》中指出:“促进工业经济平稳

运行，加强原材料、关键零部件等供给保障，实施龙头企业保链稳链工程，维护产业链供应链安全稳定。”2022 年 12 月，中央经济工作会议明确要求“产业政策要发展和安全并举。优化产业政策实施方式，狠抓传统产业改造升级和战略性新兴产业培育壮大，着力补强产业链薄弱环节，在落实碳达峰碳中和目标任务过程中锻造新的产业竞争优势”。此外，2020 年《国家中长期经济社会发展战略若干重大问题》、2023 年 11 月《全球供应链促进报告》、2024 年《政府工作报告》等文件中均强调了“维护产业链供应链安全稳定”议题，党的二十大报告也多次提到需要着力提升产业链供应链韧性和安全水平，以推动中国经济发展和维护国家安全。

了解复杂供应链网络结构是降低复杂供应链网络风险、提高网络韧性的基础。相比于上下游关系清晰、结构明确的简单供应链，复杂供应链网络的节点多、体量大、要素复杂，并呈现出较强的异质性、多主体交互性等新特征。在此背景下，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内容，成为实现供应链网络“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。要维护产业链供应链的韧性和安全，首先应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以及供应链企业的信息共享意愿不足等原因，我们难以全面、准确地收集供应链网络中的所有节点和关系信息。实际上，在通用汽车公司、空客公司、苹果公司、雀巢公司等大型企业供应链中，隐含的二级及以下供应商数量远超于公开披露的一级供应商数量[3]，如图 1.1 所示，这种“信息黑洞”的存在，往往导致无法获知完整的供应链深层信息。而若缺乏对这些供应链深层次结构的了解，将难以发现供应链的脆弱性及潜在风险[4]，进而难以有效保障供应链畅通运转。

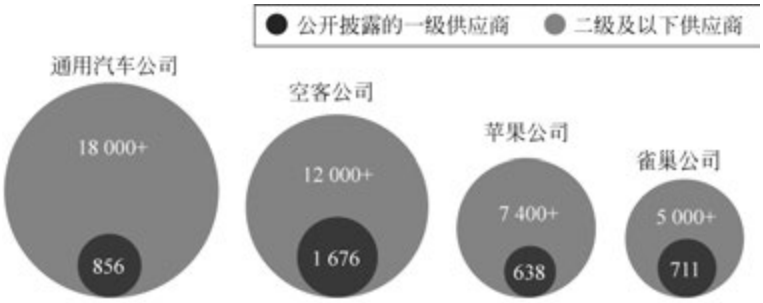


图 1.1　供应链结构中的信息黑洞

明确风险传播机理是降低复杂供应链网络风险、提高网络韧性的关键一环。在单一供应链结构下，供应链成员上下游关系清晰、结构明确。然而，社会经济的发展和分工细化推动产业发展各环节、要素、主体之间深度耦合、融通发展，供应链系统日益庞大，形成了复杂网络体系。相比于简单供应链，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，呈现出节点多、体量大、要素复杂、异质性强、多主体交互明显等特点。一旦危机爆发，风险可能沿着供应链网络迅速

蔓延，通过节点路径不断放大，并引发级联效应导致风险事件的二次升级，造成灾难性后果。同时，在当前国际政治经济新格局下，复杂供应链网络所呈现的逆全球化趋势、区域化集群以及复杂化布局都对网络中的节点关系有着重要影响。为确保国家产业链供应链在面临断链压力情况下仍然保持足够的韧性与安全，应在紧密结合当前复杂供应链网络特点的基础上进一步明确供应链风险传播过程和机理，从而有效阻断风险扩散。

因此，本书立足于维护产业链供应链畅通稳定，开展复杂供应链网络建模与风险分析研究，在广泛获取供应链相关多源异构数据的基础上，利用自然语言处理和人工智能技术自动化提取供应链相关实体及其之间的关系，构建复杂供应链网络知识图谱，并在此基础上开展复杂供应链网络结构的多尺度分析以及供应链风险传播分析，以实现对复杂供应链网络拓扑结构特征的精准刻画、深度挖掘与系统解析，揭示不同风险扰动背景下复杂供应链网络中企业应对行为对供应链风险传播的影响机制，从而为复杂多变全球局势下国家产业链供应链的畅通运转和韧性发展提供理论指导。

1.1.2 研究意义

本书基于多源异构数据研究复杂供应链网络的知识图谱构建方法、结构分析方法以及风险分析方法，以实现对复杂供应链网络拓扑结构特征的精准刻画和深度挖掘，并针对疫苗供应链、车载智能芯片供应链开展典型应用研究，为我国相关行业提升供应链韧性和安全提供科学决策依据与智能支持。这对于丰富网络科学和复杂性科学理论与方法，提高复杂供应链网络结构的可见性，推动国家产业链供应链韧性和稳定发展具有重要的理论价值和创新意义。本研究积极响应国家推动供应链安全的号召，研究内容与“十四五”规划目标紧密呼应，可为复杂多变全球局势下我国供应链安全运行提供重要参考，其研究意义主要在于以下两点。

(1) 在理论方面，本书结合网络科学、管理科学、信息科学、系统科学、人工智能等多学科交叉理论，以及自然语言处理、数据挖掘、知识图谱、机器学习与深度学习等技术，基于供应链相关的多源异构数据，提出基于知识图谱的复杂供应链网络建模方法，实现了从开源数据和专业数据库中自动化提取供应链实体及其关系，通过结构化图谱的方式清晰表示网络结构中的要素与关系，有助于打破供应链网络数据孤岛。在此基础上，通过构建供应链风险传播的交互中断模型进行供应链网络风险模拟与分析，揭示了风险扰动下企业不同应对策略对供应链风险传播的影响，有助于理解供应链风险传播特征，从而为提升供应链网络韧性奠定理论基础。

(2) 在应用方面，本书针对现代供应链网络的复杂性、异质性、多主体交互性等特征，采用知识图谱技术对复杂供应链网络进行建模并对缺失供应链关系进行补全，有助于还原复杂供应链网络的真实面貌，解决深层供应商信息缺失、深层次供应网络结构信息缺失等现实问题。本书设计了“点—链—团—网”多尺度复杂供

应链网络结构分析方法，为从微观到中观再到宏观的供应链网络结构特征挖掘提供了整体解决方案，为揭示供应链网络中的关键节点、重要链路、合作联盟等重要供应链结构提供了技术指导。最后，本书以疫苗供应链、车载智能芯片供应链为例开展实证分析及应用实践，研究结果将有助于提高深层供应链可见性，明晰供应链风险传播机理，并为有效控制供应链风险传播、推动供应链韧性发展等提供实践参考。

1.2 国内外研究现状

本节通过对相关领域文献的综述与回顾，系统梳理复杂供应链网络概念的演进历程，并对复杂供应链网络的建模、结构分析以及风险分析方法进行重点综述。

1.2.1 复杂供应链网络概念演进

随着社会的不断发展，人们对供应链的理解经历了从“线性结构”[5]到“网络结构”[6]，再到“复杂自适应系统”[7]以及供应链生态系统[8]的演变，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，如图 1.2 所示。

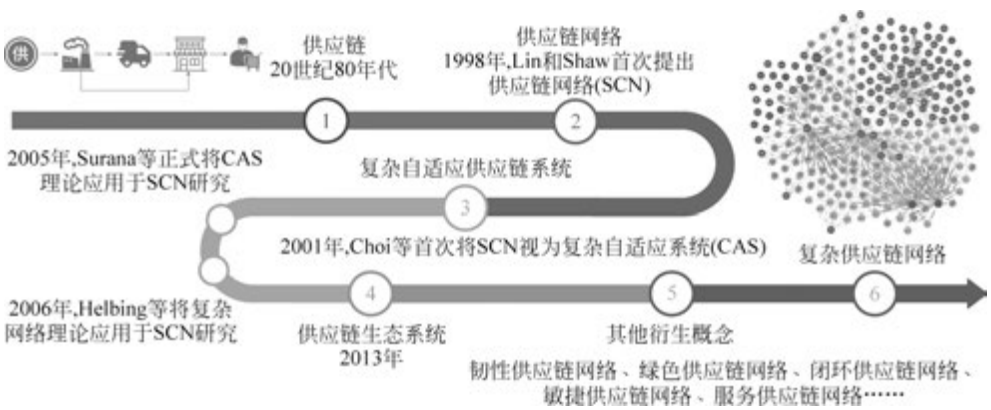


图 1.2 复杂供应链网络概念演进（见文后彩图）

1. 供应链

供应链指一件产品在从生产、流通到提供给最终用户的过程中，以所有上下游企业和用户为节点，以物流、信息流和资金流等为链接所形成的复杂网链。供应链由直接或间接履行客户需求的各方组成，因此一条典型的供应链包括制造商、供应商、分销商、运输商、仓储商、零售商以及客户本身，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]，相关研究主要集中在线性规划、库存调度、博弈协调等方面。

2. 供应链网络

1998年，Lin和Shaw[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。在供应链网络概念的基础上，国内外学者进一步引申出韧性供应链网络(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]、服务供应链网络(service SCN)[17]等概念。针对由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被广泛应用于供应链网络研究，但现有研究多是从微观行为角度考察运营及供应链中企业成员之间的协调机制，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研究。

3. 复杂自适应系统

2001年，Choi等[7]首次指出供应链是一个具有自组织、自适应、非稳态、非线性变化等特点的复杂自适应系统(complex adaptive system，CAS)，供应链上的企业在选择供应商和销售商时是完全自主决策的，因此需要从复杂自适应系统的角度去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，并提出了供应链网络的仿真模型、系统动力学(system dynamics，SD)模型、非线性模型等；Helbing等[19]基于复杂网络理论与方法，发现供应链网络具有一系列复杂自适应系统的特征，其拓扑结构和运作管理模式中普遍存在牛鞭效应；Pathak等[20]和Wycisk等[21]进一步阐述了CAS理论在供应链建模中的必要性和有用性，并指出供应链系统的正常运行容易受一些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，并进一步研究了环境因素对供应链系统形成过程的影响机制[23]。

4. 供应链生态系统

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和Samvedi[24]从风险分类的角度，提出供应链生态系统的组成包括供应链的要素，以及影响和流经供应链的商品、信息及资金；Ketchen等[25]从竞争和绩效的角度，将供应生态系统(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。国内学者陈剑和刘运辉[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。截至目前，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，尚未形成统一的定义。

5. 复杂供应链网络

当前，随着社会经济的飞速发展以及移动互联网、云计算、大数据、物联网等技术与现代制造业和服务业的融合，生产模式和营销模式等都在经历重大变革，供应链网络的结构也正在经历前所未有的演变，从简单链式结构发展为由多条供应链交互形成的具有大规模、非线性、高维度特征的复杂供应链网络（complex supply chain network，CSCN）[27-28]。本书认为，复杂供应链网络是由供应链系统内部和外部要素构成的，在物资、信息、资金、战略、业务、风险应对等方面交互关联、协同交互而形成的复杂系统，如图 1.3 所示。一方面，复杂供应链网络作为一种复杂网络，具有复杂自适应性以及复杂网络特性[29-31]，其中复杂网络特性包括网络规模大、结构复杂、演化过程复杂、连接多样性、节点多样性等；另一方面，侧重于多变全球局势下供应链系统的全局视角考察，复杂供应链网络涉及供应链系统内部和外部的多种要素。其中，内部要素包括原料供应商、制造商、分销商、零售商、服务提供商和消费者等供应链体系内的市场主体以及相关的原材料、中间产品和最终产品；外部要素则包括地理环境、技术、风险事件、政策法规、国际形势等。



图 1.3 复杂供应链网络组成要素示意图

1.2.2 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的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彼此之间相互作用，同时又受其他供应链实体和外界环境的影响，从复杂网络视角探索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的理论和现实意义[37-39]。对此，大量学者将复杂网络模型应用于复杂供应链网络建模研究，Wiedmer 和 Griffis[40]将现有供应链网络模型分为随机网络（见图 1.4(a)）、小世界网络（见图 1.4(b)）和无标度网络（见图 1.4(c)）三大类。本书在此基础上拓展梳理出分层网络、多层局域世界网络和超网络三种复杂网络建模方式，并将其合并归类为层级网络（见图 1.4(d)）。此外，国内外学者也对现实世界的供应链网络进行了大量实证研究[41-43]。与此同时，考虑到供应链网络的复杂自适应性，系统仿真建模方法通过动态的交互式方式分析供应链系统各部分之间的相互作用机理，以促进复杂供应链运作过程的绩效评估与优化。近年来，随着自然语言处理技术以及语义网络的发展，基于知识图谱的建模方法也逐渐应用于复杂供应链网络建模，以提升深层供应链结构的可见性。

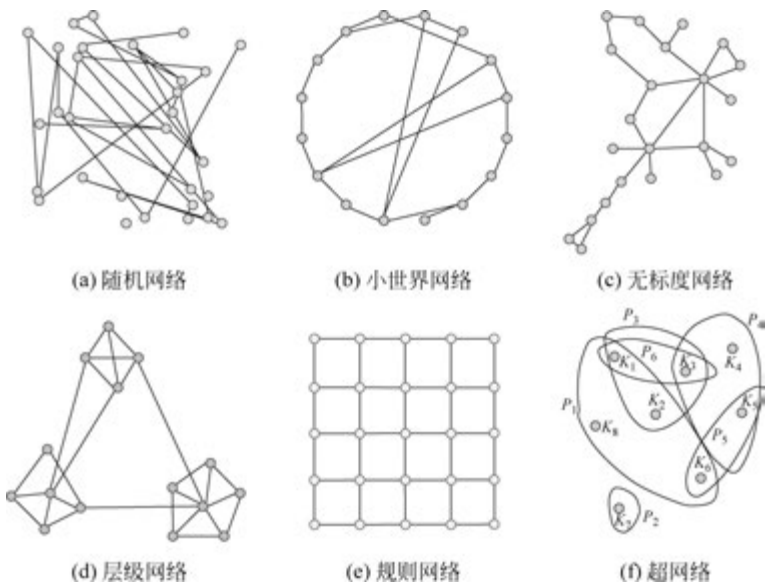


图 1.4 复杂网络模型示意图

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，任意两个不同的节点之间以概率 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之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，如图 1.4(a)所示。例如，Nair 和 Vidal[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，其研究发现，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世界供应链网络中的随机连边关系，并进一步探索网络的复杂性。但是，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. 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，如图 1.4(e)所示)中，以概率 p 随机地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(Watts-Strogatz small-world model)[50-51]，如图 1.4(b)所示。随机重连时，每条边的一个端点固定不变，以概率 p 随机选择网络中的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]。这些特征使得 WS 小世界模型中的信息能够快速传递，因此它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，有效地平衡了维持长距离连接的高成本与整个供应链系统中流量的高效传输之间的矛盾[54]。例如，企业可以通过特定的行业或地理区域进行连接(高集群系数)，也可以通过一些交换关系(如物流、信息流、资金流等)与集群中的其他企业进行连接(短平均距离和高全球连通性)[55]。

WS 小世界模型有助于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 小世界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。许多研究发现，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]，这证实了复杂供应链网络中“小世界”拓扑的相关性[46,58]。但是，WS 小世界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。

3. 无标度网络

无标度网络(scale-free network)模型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(Barabási-

Albert)无标度网络模型。在该模型中,初始网络包含 N 个节点,随着时间的推移逐步添加新的节点,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],其中大多数节点具有相对较少的连边,而少部分中心节点(Hub 节点)集聚了大量连边[61],如图 1.4(c)所示。在供应链领域,Hub 节点被称为"枢纽"或核心企业,其作用在库存管理和分销网络中被广泛提出[62],大量学者认为现实世界中高效的供应链网络类似无标度网络,具有高集聚系数、短特征路径长度、幂律连接分布特征[63]。为验证该观点,大量研究基于 BA 无标度网络的节点增长、择优连接以及节点退出方式对复杂供应链网络进行建模分析。

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,国内外学者主要考虑将节点度[64-65]、节点间相关度[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,Thadakamaila 等[65]基于 BA 无标度网络率先提出了供应链网络的结构模型,该模型划分了军事供应链网络中的三类节点,包括军营、前方支援营和主要支援营,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。进一步,张纪会和徐军芹[66]构建了基于节点间相关度的复杂供应链网络模型,新加入节点根据节点间的相关度进行选取并遵从择优连接规则,在仿真网络和实证网络中均发现了网络的无标度特征。赵志刚等[69]构建了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之间的位置吸引力。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来构造供应链结构,发现供应链网络可能受益于其在灵活性、效率和对目标攻击的鲁棒性等方面的内在机制。

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,国内外学者在考虑新节点加入及择优连接的基础上,还对旧节点的退出行为进行建模,主要考虑随机退出[72]、有选择退出等退出机制[73],其中有选择退出的测度包括企业间交易成本[74]、边效益[75]、反择优概率[76-77]等。例如,Dorogovtsev 和 Mendes[72]构建了旧节点等概率退出条件下的供应链网络模型,发现相比于新节点加入,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]考虑新企业的进入、建立新的关系和重组企业之间的关系这三种企业行为,通过分析复杂供应网络演化动力学的统计特征,发现了节点度分布服从幂律分布,且网络中存在 Hub 节点;进一步,Sarshar 和 Roychowdhury[79]在以一定概率随机删除旧节点及其所有连边的基础上,增设了消失边的补偿机制,即当旧节点丢失连边时通过优先连接产生新边进行补偿,发现了供应链网络的无标度性;类似地,高蕾等[80]、丁飞等[81]通过设置节点进入、退出和补偿机制,也发现了供应链网络的无标度性。

此外，BA 无标度网络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、层级供应链网络[77]等，也有学者基于 BA 无标度网络模型建立了参数可调的供应链网络演化模型[83-84]。已有大量基于 BA 无标度网络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]。

4. 层级网络

当网络中的无标度性和社区结构同时出现时就形成了分层网络（hierarchical network），如图 1.4(d)所示，分层网络中的 Hub 节点连接着不同社区（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贴切地反映了供应链网络自上而下的组织结构[88]。

针对供应链节点企业的不同类型，许多学者对复杂供应链网络进行了层级结构建模研究[89-96]，如表 1.1 所示。例如，柳虹等[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，不同层节点间无连边，发现供应链网络具有复杂性和自组织性。也有学者研究了多层复杂供应链网络的多准则决策问题[97]，随机故障和蓄意攻击下的脆弱性和抗毁性问题[98]，以及鲁棒性问题[99]等。

表 1.1 基于分层网络的复杂供应链网络建模研究示例

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

针对供应链网络的层级结构，部分学者在 BA 无标度网络模型的基础上，引入多局域世界网络模型来刻画具有层次特性的复杂供应链网络，并解析推导论证了供应链网络具有无标度特性[100]。例如，Li 和 Chen[87]提出了具有局部世界连通性的新型演化网络模型，既保持了无标度网络的鲁棒性，又提高了网络对故意攻击的防范，从而解决了大多数无标度网络固有的脆弱性；孙军艳等[101]结合现实网络中节点生成与退出机制，构建了以供应商为核心的五级局域世界网络模型，即“二级供应商—一级供应商—制造商—分销商—零售商”，并通过仿真分析发现了该网络的无标度性和高集聚性；陈晓和张纪会[102]应用节点间相关度的概念来确定每一个新加入节点的局域世界，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复杂网络的无标度、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