

基于小世界网络的供应链中断风险传导过程研究

刘纯霞^{1 2}, 舒彤¹, 汪寿阳^{1 3}

- (1. 湖南大学工商管理学院, 湖南长沙 410082; 2. 湖南财政经济学院工商管理系, 湖南长沙 410205;
3. 中国科学院数学与系统科学研究院, 北京 100190)

摘要: 文章研究了供应链中断风险传导的生命周期过程, 阐述小世界网络研究方法, 并分析了供应链中断风险传导过程的小世界网络特性; 在此基础上通过网络特征路径长度、集聚系数、顶点度和知识交流频率等统计参量对供应链中断风险传导进行分析, 得出在供应链中断风险传导的不同阶段对小世界网络的统计参量要求是不同的结论, 并运用 MATLAB 软件进行了数值模拟和分析, 验证了统计参量分析的正确性, 最后给出了一些有价值的建议。

关键词: 生命周期过程; 小世界网络; 中断风险传导过程; 特征路径长度; 集聚系数

中图分类号: F224.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2154(2015)05-0024-07

DOI: 10.14134/j.cnki.cn33-1336/f.2015.05.003

Research on Conduction Process of Supply Chain Disruption Risk Based on the Small World Network

LIU Chun-xia^{1 2}, SHU Tong¹, WANG Shou-yang^{1 3}

(1. Business School, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Department of Business Administration, Hunan University of Finance and Economics, Changsha 410205, China;

3. Academy of Mathematics and System Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: This paper studies the life cycle of supply chain disruption risk conduction process, elaborates the small world network research methods and analyzes the small world network features of supply chain disruption risk conduction process; based on the statistical parameters of the network characteristic path length, clustering coefficient, degree of vertices and knowledge exchange frequency analysis, the conclusion is made that the statistical parameters of the small world network is different in different stages of supply chain disruption risk conduction process. MATLAB software is adopted for the numerical simulation and analysis and verification of the correctness of the statistical parameter analysis. Finally, some valuable suggestions are given.

Key words: Life cycle process; small world network; disruption risk conduction process; characteristic path length; clustering coefficient

供应链网络是一个开放性的复杂系统, 与外界环境存在物质、信息和能量等多方面的交换。近几十年, 因恐怖袭击、计算机病毒、地震、火灾、冰灾、经济危机、海啸等供应链内外部失调所引起的供应链中断风险事件时有发生, 给节点企业、供应链和社会均带来了巨大损失。因此, 通过供应链中断风险传导过程的研究探索如何保障供应链网络整体的安全性、稳定性、鲁棒性以及优化结构具有十分重要的理论与应用价值。

收稿日期: 2015-03-04

基金项目: 国家自然科学基金项目“供应链中断风险管理与优化”(71172194); 湖南省教育厅科学研究项目“供应链中断风险传导、评估与控制研究”(14C0186); 2014年度湖南财政经济学院青年基金项目“供应链中断风险传导机理与应对策略研究”

作者简介: 刘纯霞, 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事物流工程与供应链管理研究; 舒彤(通讯作者), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事供应链管理和商务智能研究; 汪寿阳, 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事金融管理与物流与供应链管理研究。

一、供应链中断风险传导过程的小世界网络特性

(一) 供应链中断风险传导的生命周期过程

目前关于供应链风险传导过程的研究,是沿着企业层次向网络层次展开的。企业层次方面主要从四个方面展开:一部分学者发现企业风险传导与时间存在着密切关系,如叶厚元和尚永伟(2007)基于不同时期对企业风险传导进行了分类^[1],张剑光(2011)将供应链风险传导要素分为动态和静态两类,并在此基础上对供应链风险传导过程进行了分析^[2];一部分学者关注供应链风险传导过程的动态性和耦合关联性,如邓明然和夏喆(2006)等注重风险在企业传导过程中是否发生耦合,探讨了稳态风险传导和非稳态风险传导的基本特征和传导机理^[3];另一部分学者主要就供应链的某类风险传导进行研究,如叶建木和邓明然(2007)主要以战略风险传导为研究对象^[4],张正益(2010)主要以市场风险传导为研究对象^[5];还有一部分学者主要将风险比作有机体,如叶厚元和洪菲(2010)总结了不同生命周期阶段的风险传导特点^[6]。网络层次方面,是McFarland(2008)拉开供应链风险传导及供应链中断风险传导的复杂性研究序幕的,他指出供应链传导是企业间行为从一个双边节点传播到相邻双边节点的过程^[7];Cheng(2008)对不同结构的供应链网络的风险演化过程的复杂性进行了定性分析^[8];Acuna-Agost等(2011)为了更好地研究供应链风险传导的复杂性,提出了SAPI统计分析方法^[9];Swierczek(2013)指出供应链中断风险传导过程中的实物流和信息流可比为雪球效应,并指出集成维度可减弱实物流和信息流的中断风险传导强度^[10];Feng(2014)指出风险可通过因果链条升级传导,从而导致不同的系统安全风险,并基于此提出了一种安全风险分析模型^[11]。

关于供应链中断风险传导过程的生命周期特点研究,主要有祝江斌等(2006)对城市重大突发事件扩散进行了微观机理研究,指出城市重大突发事件的扩散周期一般会经历潜伏生成期、显现与爆发期、持续演进期、消解减缓期和解除消失期五个阶段^[12];孙琦和季建华(2012)以快速恢复为目的,将供应链突发事件划分为预防阶段、控制阶段和应对阶段三个阶段^[13]。

这里在相关文献基础上,将供应链中断风险传导过程分为潜伏期、酝酿期、爆发期、消退期和遗留期五个阶段。第一阶段是潜伏期,风险源发出的风险具备隐蔽性,常被忽视。第二阶段是酝酿期,中断风险传导和蔓延速度加快,传导范围更广,中断能量性冲击进一步积聚叠加、交叉传递与变异,风险源到达最终的风险接收者,此时风险传导进入第三阶段,即爆发期。中断风险爆发后,伴随原风险进一步积聚、重叠、交叉、变异与并发,使危害程度大大增加,风险转化为危机,给节点企业带来巨大经济损失、声誉损失和其它损失,原有单一风险可能最终演变成整体性的多风险,严重时甚至会影响到供应链整体的稳定性。风险并发高峰期后,风险能量逐步减少,开始步入第四阶段,中断能量性冲击逐步降低,风险波及范围逐渐缩小,风险控制措施使风险中断节点企业的经济损失逐步降低。第五阶段是遗留期,是供应链中断风险传导的最后一个时期,中断能量性冲击进一步降低,风险波及范围也进一步缩小,中断节点企业的经济损失很少,甚至可达到基本没有的程度,但中断风险缓解后中断事件造成的影响往往会持续一段时间。综上可知,中断风险传导的生命周期过程相互耦合与重叠,使中断风险传导过程出现流动性、耦合性、依附性、变异性等特点,大大增加了中断风险的防范难度。

(二) 供应链中断风险传导过程的小世界特性

Watts和Strogatz(1998)应用网络图解释“六度分离”,并提出了WS小世界网络模型,指出小世界网络特性的统计判定参量主要是平均路径长度和集聚系数^[14]。Newman和Watts(1999)在WS小世界网络模型的基础上进行了方法改进,提出了NW小世界模网络模型,将改变节点连接方式变为在最初无直接联系的节点间建立新联系^[15]。此外,学者们进行了大量研究,并验证了几乎所有领域均存在小世界网络特性。但应用小世界网络理论分析供应链网络的文献相对较少:Christian(2006)对城市物资供应网络进行研究分

析,发现其服从复杂网络的无标度分布,即有少数的核心节点,发挥重要的物资调度和配送作用^[16];王振锋等(2011)通过分析验证了服务供应链具有典型的小世界网络特征^[17];赵炎和王琦(2013)就联盟网络的小世界性对企业创新影响进行了实证研究^[18];范旭和马军海(2006)^[19]、陈晓和张纪会(2008)^[20]及李彬等(2012)^[21]等指出供应链网络除具有一般复杂网络特性外还具有小世界特性。应用小世界网络理论分析供应链网中断风险传导过程的文献还未发现。

供应链网络是一个开放性的复杂系统,与外界环境存在物质、信息和能量等多方面的交换。供应链网络自身结构的复杂性是导致供应链中断风险传导过程复杂性的主要原因之一。与此同时,供应链中断风险传导过程也具有复杂性:多中断风险源的并存与复杂是导致中断风险传导过程复杂的前提条件;中断风险传导过程的多影响因素之间的高度相关与交叉影响增强了中断风险传导过程的复杂性;中断风险传导过程的五个阶段之间相互耦合与重叠,使中断风险传导过程出现流动性、耦合性、依附性、变异性等,大大增加了中断风险的防范难度。鉴于供应链网络结构的复杂性和供应链中断风险传导过程的复杂性,故可应用小世界网络方法分析供应链中断风险传导过程的演化机制。

正是基于此,文章第二部分,主要分析供应链中断风险传导的生命周期过程和供应链中断风险传导过程的小世界特性,为分析供应链中断风险传导过程引入小世界网络这一独特视角。文章第三部分主要通过网络特征路径长度、集聚系数、顶点度和知识交流频率等统计参量分析,得出在供应链中断风险传导的不同阶段对小世界网络的统计参量要求是不同的这一独特结论。文章第四部分,运用 MATLAB 软件进行了数值模拟和分析,验证了供应链中断风险传导过程的小世界特性及统计参量要求的正确性。文章第五部分,给出了一些有价值的建议,并进行了展望。

二、应用小世界网络分析供应链中断风险传导过程

这里主要通过网络特征路径长度、集聚系数、顶点度和知识交流频率等统计参量分析,揭示供应链中断风险传导过程的内在机理和规律。

(一) 特征路径长度

用 G 表示供应链网络的连通图,用 N 表示供应链网络中各节点企业数目,用 M 表示供应链网络中各节点企业间的边,即各节点企业间的产品流动、资金流动、信息与技术流动等交流关系,用 d_{ij} 表示供应链网络中 i 节点企业与 j 节点企业间的最短距离,即 i 节点企业与 j 节点企业要进行交流必须与其它节点企业进行联系的边数最小值,这种联系可表示为节点企业间的空间距离,还可以表示为节点企业间的社会距离。用 D 表示 i 节点企业与 j 节点企业间的距离最大值,则 $D = \max_{i,j \in G} d_{ij}$ 。用 $L(G)$ 表示 i 节点企业与 j 节点企业间的最短距离的平均值,即可定义为供应链网络的特征路径长度,则供应链网络的特征路径长度为:

$$L(G) = \frac{1}{N(N+1)/2} \sum d_{ij} \quad (1)$$

假设各节点企业均与其左右相邻的 $\frac{k}{2}$ 个节点企业联系(k 为偶数),各节点企业以概率 p 与新节点企业建立直接交流,故通过 NW 小世界模型的规则网络随机加边,并通过重正化群方法,得到修正后的特征路径 $L(p)$ ^[22],则供应链网络的特征路径长度可表示为:

$$L(p) = \frac{2N}{k} f(Nkp/2) \quad (2)$$

其中 $f(Nkp/2)$ 为普适标度函数,满足:

$$f(Nkp/2) = \begin{cases} \text{常数}, & Nkp \ll 1 \\ \frac{(\ln(Nkp/2))}{Nkp/2}, & Nkp \gg 1 \end{cases} \quad (3)$$

特征路径长度的变化速度与供应链网络的节点数 N 成正比,故节点企业间较短的特征路径长度表明

节点企业间存在较紧密的交流。当出现供应链中断风险时,较短的特征路径长度对应较快的中断风险传导速度。供应链网络的特征路径长度若能较短,在酝酿期,各节点企业通过建立供应链网络平台,向供应链网络传导中断风险信息,提升供应链网络整体的共享信息量,应对部分消息失真和变形;在爆发期和缓解期,各节点企业就能有效提升协作能力和风险承受能力。

(二) 集聚系数

用 G 继续表示供应链网络的连通图,用 m_i 表示 i 节点企业与其相邻节点企业实际对应的边数,用 M_i 表示 i 节点企业与其相邻节点企业理论上对应的最大边数。用 k_i 表示 i 节点企业的介数,即 i 节点企业相邻的节点企业数,则有 $M_i = \frac{k_i(k_i - 1)}{2}$ 。用 $C_i(G)$ 表示 i 节点企业局部的平均集聚程度和稳定程度,即为实际存在的边数 m_i 和理论最大边数 M_i 的比值,即为:

$$C_i(G) = \frac{m_i}{M_i} = \frac{m_i}{k_i(k_i - 1)/2} \quad (4)$$

当供应链网络规模不变时,若 i 节点企业想增大该节点企业的集聚系数,则该节点企业需与更多的节点企业断键重链,进而建立更稳定紧密的联系;当供应链网络规模发生变化时,若 i 节点企业想增大该节点企业的集聚系数,则需综合考虑 m_i 和 M_i 。

供应链网络整体的聚类系数 $C(G)$ 即为所有节点企业局部聚类系数 $C_i(G)$ 的算术平均值,即:

$$C(G) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i(G) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{k_i(k_i - 1)/2} \quad (5)$$

其中 $0 \leq C \leq 1$ 。当 $C = 0$ 时,表示所有节点企业均未与其它节点企业有任何联系;当 $C = 1$ 表示所有节点企业均与其它节点企业建立了直接联系。但是,现实中的供应链网络一般不会出现这两种极端情况,即供应链网络既不是完全随机的,也不是完全规则的,而是呈现小世界网络特性。

根据文献,可得到修正后的供应链网络聚类系数 $C(p)$ [15],则供应链网络聚类系数可表示为:

$$C(p) = \frac{3(k - 2)}{4(k - 1) + 4kp(p + 2)} \quad (6)$$

较大的供应链网络聚类系数对应较稳定紧密的空间联系和社会联系。空间联系是各节点企业地理位置上的联系,而社会联系是各节点企业由于企业文化的相似性、平时的业务合作的默契性和电子商务的可操作性等非空间联系方面的联系。当出现供应链中断风险时,各节点企业除了关注空间联系,更要关注社会联系。在供应链中断风险传导的潜伏期、酝酿期、爆发期和缓解期,较大的供应链网络聚类系数能较快地控制中断风险的传播速度,加快信息共享,减少不必要的猜疑和恐慌,促进各节点企业的协同合作,保持供应链网络整体的稳定性,并通过新的强联系和弱联系,增强各节点企业的中断风险承受能力。在供应链中断风险传导的遗留期,各节点企业要降低与其它节点企业间的过分依赖关系和局部聚类系数,并从组织内部结构着手修复本节点企业。故供应链网络整体的集聚系数的大小要根据供应链中断风险传导的不同阶段进行调整。

(三) 顶点度与平均度

用 I_i 表示 i 节点企业的顶点度,指的是 i 节点企业在供应链网络中的重要程度,则 i 节点企业的顶点度可表示为:

$$I_i = \frac{k_i}{\sum_{i=1}^N k_i} \quad (k_i \text{ 为节点企业 } i \text{ 的介数}) \quad (7)$$

某节点企业的顶点度越大,意味其在供应链网络中的重要程度越高,该企业很有可能就是关键节点企业。正常情况的供应链网络往往是由少量关键节点企业和大量非关键节点企业组成,这与各节点企业的顶点度存在差异密不可分,此时正好说明供应链网络具有良好的小世界网络特性。各节点企业的顶点度分布情况还可以用分布函数 $P(k)$ 来描述,所有节点企业 i 的介数 k_i 的平均值称为供应链网络的平均度,记为 $[k]$ 。在

NW 小世界模型中,每个节点企业至少与 K 个企业相连,则随机选取某节点企业的介数为 k 的概率为:

$$\begin{cases} 0 & k < \frac{K}{2} \\ \binom{N}{k-K} \left(\frac{Kp}{N}\right)^{k-K} \left(1 - \frac{Kp}{n}\right)^{N-K+k} & k \gg K \end{cases} \quad (8)$$

在供应链网络中,关键节点企业的稳定性对供应链网络整体的畅通性是至关重要的。供应链网络中任何一个或几个关键节点企业的中断,会导致供应链网络整体的失衡甚至瘫痪。故在供应链中断风险传导的各个时期,要关注关键节点企业。尤其是在爆发期和缓解期,关键节点企业应担负起“中断风险领袖”的责任,通过协同合作,引导非关键节点企业一起抵御中断风险,保障供应链网络整体的稳定性。

(四) 交流频率

邓丹等(2005)研究发现,NPD 团队成员间的相似程度越高,他们之间的交流频率越大,交流频率 δ_{ij} 与最短路径长度 d_{ij} 之间成反比例关系^[23],即:

$$\delta_{ij} = \frac{k}{d_{ij}} \quad (k \text{ 为不确定性常数}) \quad (9)$$

供应链网络中,由于企业规模大小、文化差异等原因,各节点企业间产品流动、资金流动、技术交流和信息交流的难易程度可能会不同,故各节点企业可根据自身情况,给连接边赋予不同的 k 值。 k 值越大,交流越容易,交流频率就越大。当出现供应链中断风险时,供应链网络中各节点企业间可能会建立新的强联系或弱联系,使节点企业间的最短路径长度 d_{ij} 不断缩短。因此,当出现供应链中断风险时,最短路径长度会随时间而不断减小,此时(9)式可修正为:

$$\delta_{ij} = \frac{k}{\min d_{ij}} \quad (10)$$

综合(1)式和(9)式,供应链网络的特征路径长度可表示为:

$$L(G) = \frac{1}{N(N+1)/2} \sum \frac{k}{\delta_{ij}} \quad (k \text{ 为不定性常数}) \quad (11)$$

由此可见,供应链网络的交流频率与特征路径长度成反比,即出现供应链中断风险时,在供应链中断风险传导的潜伏期、酝酿期、爆发期和缓解期,供应链网络特征路径长度较短的各节点企业间的业务联系会更频繁,中断风险传导能力也越强。因此,各节点企业应更多地选择与空间距离或社会距离较近的节点企业建立新的联系。

三、数值分析

基于小世界网络的供应链中断风险传导特性的数值分析,主要是运用 MATLAB 软件进行数值模拟和分析。

这里不妨假定供应链网络中某节点企业的介数 $k = 12$,当供应链网络的节点企业数目 $N = 50, 500, 5000$ 时,出现中断风险时的特征路径长度 $L(p)$ 及该节点企业与其他企业建立新联系的概率 P 的关系如图 1 所示。

由图 1 可知,供应链网络中,当 P 大于 0.1 时 $L(p)$ 随 P 的增加不断趋向于零,这表明当供应链网络出现中断风险时,各节点企业若要与其他企业建立新联系,则要满足概率 P 在 0.1 附近,才能保证中断后的供应链网络呈现明显的小世界特性。由图 1 还可知,随着节点数目 N 的增大 $L(p)$ 曲线不断上移,即特征路径长度不断变大,这表明节点数 N 与特征路径长度 $L(p)$ 呈正相关关系,当供应链网络出现中断风险时,较大的供应链网络节点数目和较长的特征路径长度会极大减缓供应链网络内部的中断风险传导速度,造成中断风险传导信息迟滞。

当出现供应链中断风险时,若供应链网络的节点企业 $N = 500$,供应链网络中某节点企业的介数 $k = 4, 12, 20$,特征路径长度 $L(p)$ 、该节点企业与其他企业建立新联系的概率 P 的关系如图 2 所示。

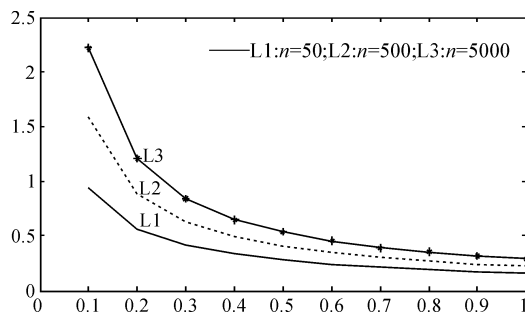


图 1 $k = 12, N = 50, 500, 5000$ 时 $L(p)$ 随 p 的变化趋势图

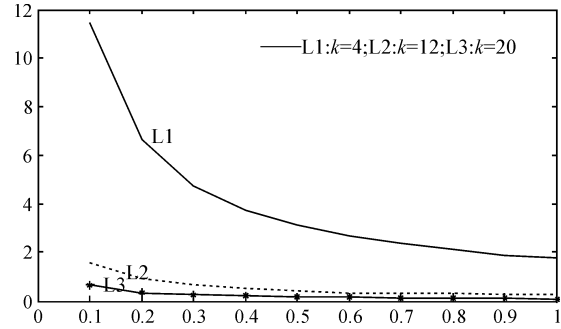


图 2 $N = 500, k = 4, 12, 20$ 时 $L(p)$ 随 p 的变化趋势图

由图 2 可知, 单条 $L(p)$ 曲线的变化趋势与图 1 非常相似, 当 p 在 0.1 附近时, 中断重建的供应链网络的特征路径长度较小, 各节点企业间中断风险扩散速度较快, 能呈现较明显的小世界特性。由图 2 还可知, 随着介数 k 的增大, 特征路径长度 $L(p)$ 向左下方移动, 这表明较大介数能缩短供应链网络的特征路径长度。当供应链网络出现中断风险时, 各节点企业若能建立新的强联系或是弱联系, 由于这些新联系缩短了中断风险传导所经历的平均路径长度, 故能加快中断风险的传导速度, 较好应对供应链中断风险。

当出现供应链中断风险时, 若供应链网络中某节点企业的介数 $k = 4, 12, 20$, 供应链网络集聚系数 $C(p)$ 与其他企业建立新联系的概率 p 的关系如图 3 所示。

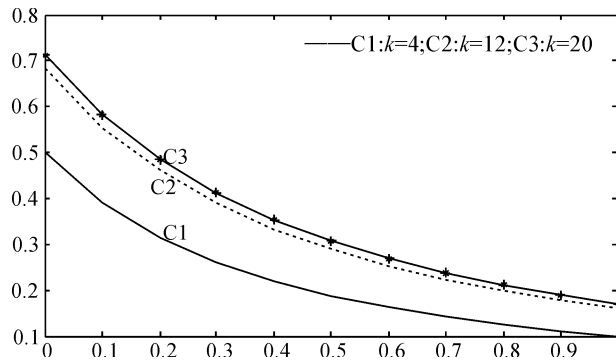


图 3 $k = 4, 12, 20$ 时 $C(p)$ 随 p 的变化趋势图

由图 3 可知, 当介数一定时, 供应链网络的集聚系数 $C(p)$ 随该节点企业与其他企业所建立的新联系概率 p 的增加而逐渐减小, 可见集聚系数 $C(p)$ 与概率 p 呈反比例关系。当出现供应链中断风险时, 较大的集聚系数 $C(p)$ 有利于供应链网络中断风险的传导, 并提升整条供应链网络的中断风险传导信息强度。由图 3 还可得知, 随着介数 k 的增大, $C(p)$ 曲线逐渐向右上方移动, 表明较大的介数能提高供应链网络的集聚系数, 因此当出现供应链中断风险时, 可通过增大介数 k 来提升供应链网络的中断风险传导速度和范围, 因为此时各节点企业间能更频繁地交流、共享与传导中断信息, 促进供应链中断风险信息的共享。

四、研究结论与展望

在供应链中断风险传导的不同阶段, 对小世界网络的统计参量要求是不同的。在供应链中断风险传导的潜伏期, 可采取有效的预警机制, 制定应急准备措施, 削弱中断风险的猛烈程度; 在酝酿期, 较短的特征路径长度与较大的供应链网络聚类系数能降低中断风险传导时滞, 提升供应链网络整体的共享信息量, 减少不必要的猜疑和恐慌; 在爆发期和缓解期, 顶点度大的节点企业应担负起所谓中断风险领袖, 较大的供应链网络聚类系数能促进各节点企业协同合作, 较短的特征路径长度能使中断风险信息在更短时间里共享, 增强共享中断风险信息的真实性, 减少猜疑和恐慌, 各节点企业应通过选择与空间距离或社会距离较近的节点企业建立新的强联系或弱联系, 供应链也可建立联合应急互助资金, 增强供应链网络整体的风险承受能力, 降低供应链网络整体的中断风险和损失; 在遗留期, 各节点企业要降低与其它节点企业间的过

分依赖关系,降低本节点企业的局部聚类系数,并从组织内部结构着手修复本节点企业,总结经验教训,应对供应链网络存在的遗留问题。故供应链网络整体的集聚系数的大小要根据供应链中断风险传导的不同阶段进行调整。

基于小世界网络的供应链中断风险传导过程研究,拓展了现有供应链中断风险的分析方法,能揭示供应链中断风险传导过程的部分规律,并对供应链网络内部各节点企业的结构优化、协作与中断风险传导机理的厘清等有一定帮助。但由于验证小世界网络适用性过程复杂,故在供应链中断风险传导过程中,仅进行了定性说明。同时,在供应链中断风险传导过程中,各节点企业应如何把握现有的强联系或弱联系及如何建立新的强联系或弱联系,论文没有详细展开,也是未来有价值的研究点。

参考文献:

- [1]叶厚元,尚永伟.基于不同时期的企业风险传导分类研究[J].企业经济,2007(9):5-7.
- [2]张剑光.供应链风险传导的要素及过程研究[J].物流工程与管理,2011(11):139-141.
- [3]邓明然,夏喆.基于耦合的企业传导模型探讨[J].经济与管理研究,2006(3):66-68.
- [4]叶建木,邓明然.战略风险传导及其效应分析[J].科学学与科学技术管理,2007(2):127-130.
- [5]张正益.企业市场风险传导现象的形成原因影响与管理策略研究[J].学术探索,2010(4):75-79.
- [6]叶厚元,洪菲.不同生命周期阶段的企业风险传导强度模型[J].武汉理工大学学报:信息与管理工程版,2010(3):437-441.
- [7]MCFARLAND R, BLOODGOOD J, PAYAN J. Supply Chain Contagion[J]. Journal of Marketing, 2008(2):63-79.
- [8]CHENG S, KAM B. A Conceptual Framework for Analysing Risk in Supply Networks[J]. Journal of Information Management, 2008(4):345-360.
- [9]ACUNA A R, MICHELON P, FEILLET D, et al. SAPI: Statistical Analysis of Propagation of Incidents. A New Approach for Rescheduling Trains after Disruptions[J]. European Journal of Operational Research, 2011(1):227-243.
- [10]ŚWIERCZEK A. The Impact of Supply Chain Integration on the “Snowball Effect” in the Transmission of Disruptions: An Empirical Evaluation of the Model[J]. International Journal of Production Economics, 2013(11):63-79.
- [11]FENG N, WANG H, LI M. A Security Risk Analysis Model for Information Systems: Causal Relationships of Risk Factors and Vulnerability Propagation Analysis[J]. Information Sciences, 2014(20):57-73.
- [12]祝江斌,王超,冯斌.城市重大突发事件扩散的微观机理研究[J].武汉理工大学学报:社会科学版,2006(5):710-713.
- [13]孙琦,季建华.基于快速恢复的供应链突发事件演化过程分析[J].软科学,2012(11):58-62.
- [14]WATTS D, STROGATZ S. Collective Dynamics of “Small Worlds” Networks[J]. Nature, 1998(4):440-442.
- [15]NEWMAN M, WATTS D. Renormalizations Group Analysis of the Small World Network Model[J]. Physics Letters A, 1999(6):341-346.
- [16]KUHNERT C, HELBING D. Scaling Laws in Urban Supply Networks[J]. Physica A, 2006(1):89-95.
- [17]王振锋,王旭,徐广印.基于小世界网络的服务供应链研究[J].上海管理科学,2011(5):46-48.
- [18]赵炎,王琦.联盟网络的小世界性对企业创新影响的实证研究[J].中国软科学,2013(4):108-116.
- [19]范旭,马军海.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):20-26.
- [20]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(1):54-60.
- [21]李彬,季建华,陈娟,等.基于复杂网络视角的供应链脆弱性预防和应对策略[J].上海管理科学,2012(3):53-56.
- [22]汪小帆,李翔,陈关荣.复杂网络理论及其应用[M].北京:清华大学出版社,2006:15-18.
- [23]邓丹,李南,田慧敏.基于小世界网络的NPD团队交流网络分析[J].研究与发展管理,2005(4):83-86.

(责任编辑 郑英龙)