

现代物流与供应链管理丛书

供应链弹性管理： 应对与修复

王新平 赵林度/著



科学出版社

现代物流与供应链管理丛书

供应链弹性管理：应对与修复

王新平 赵林度 著

本书得到了国家自然科学基金面上项目“基于生物细胞弹性理论的供应链弹性测度模型研究：以食品安全事件冲击下的食品供应链为例”（71171050）、国家自然科学基金重大项目“面向经济、社会和环境协调发展的现代物流管理研究”——“低碳和安全物流运营管理”课题（71390333）和“十二五”国家科技支撑计划重大项目“物流环节质量安全控制技术与系统”（2013BAD19B05）资助

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书阐述了供应链弹性的概念、生成机理、外在表现、作用机制，并围绕供应链弹性作用机理中的事后应对和恢复措施，介绍了从供应管理角度出发的修复供应链受损企业和不修复供应链受损企业两种情况下的供应链弹性策略，从需求角度出发的针对垄断供应链和竞争供应链的价格再调整弹性策略，以及同时从供应管理和需求管理角度出发的基于订单再分配和价格再调整的供应链联合弹性策略，最后从弹性性能和弹性成本的均衡角度介绍了供应链弹性的优化管理策略。

本书可以作为大专院校物流管理、电子商务及相关专业，特别是管理科学与工程、工商管理等专业教师、学生的教科书和参考书，也可以作为从事物流产业、供应链管理政策研究人员的工具书。

图书在版编目 (CIP) 数据

供应链弹性管理：应对与修复 / 王新平，赵林度著. —北京：科学出版社，2017.10

（现代物流与供应链管理丛书）

ISBN 978-7-03-053344-9

I. ①供… II. ①王… ②赵… III. ①供应链管理-柔性管理-研究 IV. ①F252.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 133880 号

责任编辑：魏如萍 / 责任校对：彭珍珍
责任印制：徐晓晨 / 封面设计：无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 10 月第 一 版 开本：720×1000 1/16

2018 年 1 月第二次印刷 印张：10

字数：200 000

定价：80.00 元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

前 言

随着科学技术的飞速发展和全球一体化的快速推进，供应链在全世界范围内延伸，逐步演化成遍布全球的复杂网络系统。以精益生产（lean production）、全球采购及业务外包等为核心的传统供应链管理理念注重正常运营状态下成本效率的提高，却使得复杂的供应链网络在当今越来越不确定的运营环境中更加容易遭受中断风险的冲击。近年来发生的一系列严重影响供应链的中断事件，迫使企业界和学术界都开始重视供应链安全运营管理问题。供应链弹性（supply chain resilience）的概念正是在这样的背景下进入公众视野，并得到越来越多关注的，供应链弹性管理研究的目的在于增强供应链抵御中断事件影响，并快速从中断事件中恢复到正常运作状态的能力。

本书以供应中断事件影响下的供应链为对象，以提高应对供应中断事件的供应链弹性为目标，从事后应对与修复的视角介绍供应链弹性管理策略。本书共7章，具体内容安排如下。

第1章介绍供应链弹性的概念，分析供应链弹性的机制，包括供应链弹性的形成机理、作用机制和外在表现，并着重从事前缓解和准备以及事后应对和恢复角度对供应链弹性的作用机制进行总结和剖析，有助于读者更加清晰地理解供应链弹性的内涵及管理方法。

第2~3章从供应管理的角度分别介绍修复供应链受损企业和不修复供应链受损企业的两种供应链弹性措施。应对供应中断最直接、有效的方法是从供应本身出发，寻求能够保证持续供应的应对策略。受损企业是供应中断事件的直接影响对象，对受损企业进行修复是从供应角度出发的有效策略之一。但如果修复受损企业需要支付昂贵的代价，则供应链宁愿放弃受损企业，转而通过充分利用供应链中的其他资源来应对供应中断事件。这两章内容为供应链成员从供应管理角度应对不同类型的中断事件提供了决策依据。

第4~5章从需求管理的角度分别介绍垄断和竞争两种情形下基于价格调整的弹性管理策略。正常运营状态下，供应链的供应与需求相匹配。供应中断会导致

产品供不应求，除了从供应本身出发尽量恢复供应，也可以从需求角度出发，考虑通过一定的策略调节市场需求，重新实现需求与供应的匹配，间接弥补供应中断带来的损失。考虑到市场情形的多样化，这两章内容分别为完全垄断和寡头竞争类型的供应链提供了从需求角度应对中断事件的决策依据。

第6章同时从供应管理和需求管理的角度介绍基于订单再分配和价格再调整的联合弹性策略。供应中断的发生会造成供应和需求的不匹配，为了以最小的成本重新实现供需平衡，可以同时调节供应和需求双方，从两个方面共同作用以使供应和需求更容易匹配，从而更有效地提高供应链弹性以应对供应中断。

第7章介绍供应链的自修复机制，并在弹性能力与弹性构建成本相权衡的框架下，分析中断事件发生后供应链在恢复过程中的最优决策机制，为指导供应链弹性管理决策提供理论基础。

本书内容源自整个研究团队的成果，感谢博士研究生王新平（基于生物细胞弹性理论的供应链弹性测度及管理策略研究，东南大学博士学位论文，2015）、硕士研究生易舒（基于流体控制原理的供应链细胞弹性模型研究，东南大学硕士学位论文，2013）和张语心（基于生物细胞弹性理论的供应链自恢复模型研究，东南大学硕士学位论文，2014）在完成科研项目、从事科研活动过程中共同的努力、付出和贡献。

本书得到了国家自然科学基金面上项目“基于生物细胞弹性理论的供应链弹性测度模型研究：以食品安全事件冲击下的食品供应链为例”（71171050）、国家自然科学基金重大项目“面向经济、社会和环境协调发展的现代物流管理研究”——“低碳和安全物流运营管理”课题（71390333）和“十二五”国家科技支撑计划重大项目“物流环节质量安全控制技术与系统”（2013BAD19B05）资助。

尽管作者为项目研究和书稿撰写倾注了多年的精力和努力，但是面对供应链弹性管理领域的复杂性，还有许许多多无法准确感知和正确理解的问题，还需要持续不断地学习、探索和深入研究，书中的不当之处，恳请读者批评指正。

作者

2017年7月

目 录

第 1 章	供应链弹性管理理论	1
1.1	概述	1
1.2	供应链弹性的形成机制和外在表现	2
1.3	供应链弹性的作用机理	6
1.4	本章小结	15
第 2 章	供应链受损企业修复弹性策略	16
2.1	概述	16
2.2	基于流体控制原理的供应链建模方法	17
2.3	基于存量上限的供应链受损企业修复弹性策略	21
2.4	基于生产能力的供应链受损企业修复弹性策略	30
2.5	本章小结	38
第 3 章	供应链订单再分配弹性策略	39
3.1	概述	39
3.2	供应链建模	40
3.3	中断后订单再分配优化模型	45
3.4	数值分析及弹性管理启示	47
3.5	本章小结	53
第 4 章	垄断供应链价格再调整弹性策略	55
4.1	概述	55
4.2	问题及模型描述	56
4.3	常态价格策略	58
4.4	供应中断情况下价格调整策略	59
4.5	价格调整策略效果分析及其作用下供应链弹性分析	66
4.6	本章小结	74

第 5 章 竞争供应链价格再调整弹性策略	76
5.1 概述	76
5.2 问题描述	77
5.3 常态价格策略	79
5.4 低等级产品供应中断情况下的价格调整策略.....	82
5.5 高等级产品供应中断情况下的价格调整策略.....	88
5.6 数值分析及弹性管理启示	93
5.7 本章小结	99
第 6 章 基于订单再分配和价格再调整的供应链联合弹性策略	100
6.1 概述	100
6.2 问题描述	101
6.3 基于订单再分配和价格再调整的联合弹性策略模型及求解.....	103
6.4 数值分析及弹性管理启示	117
6.5 本章小结	128
第 7 章 供应链自修复弹性优化策略	129
7.1 概述	129
7.2 供应链自修复弹性模型	130
7.3 供应链自修复弹性优化决策	140
7.4 本章小结	147
参考文献	148

第1章 供应链弹性管理理论

随着自然环境的恶化和市场竞争的加剧，低概率高影响的中断事件已经成为以精益生产、全球采购和业务外包等为核心管理策略的供应链运营中面临的最大威胁。如何使供应链网络在不确定环境中更加稳定可靠地运营，降低中断事件造成的损失，并能够在中断事件中快速恢复，已经成为供应链管理亟须解决的关键问题。

1.1 概 述

供应链通常是指由供应商、制造商、分销商、物流服务商、批发商、零售商及最终消费者共同组成的实现商品生产和流通的供需网络。随着科学技术和经济的快速发展，全球一体化的程度越来越高，社会分工日益精细，供应链成员企业越来越多，企业之间的相互依存日益紧密，且地域分布更加广泛，传统意义上的供应链逐步演化成一个遍布全球的复杂网络系统。

供应链管理是对供应链中的物流、资金流、信息流等进行管理，以实现供应链经营目标的活动或过程。为了在日益激烈的市场竞争中取胜，企业大力推行精益生产、准时化生产（just in time）及非核心业务外包等供应链管理思想，减少供应商数量，降低供应链中的冗余库存，从而大大降低供应链成本，提高产品质量和供应链运营效率。然而，这些供应链管理思想在为供应链企业注入活力的同时，也给供应链的安全运营埋下了隐患。

与此同时，供应链的经营环境日益变得复杂和不确定。近年来，自然灾害、重大公共卫生事件、国际政治事件等导致全球范围内灾难频发，并波及较大范围内的经济活动，给世界范围内的供应链造成巨大的损害。供应链网络的复杂化和精益化加剧了供应链系统面对外部突发事件冲击的脆弱性，使供应链网络在中断事件冲击下运营成本大幅上升，业务持续能力及顾客服务水平持续下降，最终可

能引起整个供应链失效或崩溃。此类案例近年来屡见不鲜。

2001年发生于美国纽约的“9·11”事件，使空中运输受阻，许多美国企业因此发生原材料供应短缺问题，而库存商品则由于运输不畅而大量积压。2002年，美国西海岸港口工人罢工，来自亚洲的200多艘巨型货轮无法卸货，企业因此遭受巨额经济损失。2003年非典期间，中国的交通运输业、批发零售业、制造业等行业遭受了巨大损失，大量原材料和零部件滞留在海关，导致大量企业生产能力严重不足，给中国当年经济造成的损失达0.8%。2005年，卡特里娜飓风横扫美国墨西哥湾沿岸地区，160多家位于密西西比的新奥尔良、比利奥西等地的印刷企业被迫停业。2006年中国宁波万华的液氯供应商——宁波东港电化有限责任公司发生氯气泄漏，引发当地居民围堵工厂，致使宁波万华的原料供应及生产经营遭受重大影响。2008年5月，中国四川汶川地区发生大地震，使得什邡多家化肥厂丧失生产能力，致使供应短缺，给下游生产带来不利影响。2008年，席卷全球的金融危机致使许多企业投资失败，工厂破产，进而影响到实体生产，大量中国外向加工型企业纷纷破产倒闭。2009年，甲型H1N1流感在全球迅速蔓延，导致相关药物及医疗物资的需求狂升。2011年发生的双汇瘦肉精、西瓜膨大剂、台湾饮料塑化剂等事件，对食品供应链造成了严重影响。2013年“8·2中荣”特大爆炸事故中断了中荣公司对下游客户中信戴卡的轮毂供应，进而影响到通用汽车的生产 and 供货，更严重的是很多消费者因此对通用汽车的诚信产生了质疑，这些都对通用的汽车供应链造成了难以磨灭的负面影响。这一系列严重影响供应链正常运营的突发中断事件迫使企业和学者不得不重新审视之前的供应链管理理论，促使其对供应链网络在不确定环境中的安全运营问题高度重视，研究如何使供应链网络更加稳定可靠，降低风险事件对供应链网络运营造成的损失。

供应链弹性是供应链面对冲击时所表现出的自适应能力和自修复能力。供应链弹性研究的目的在于掌握供应链弹性的内在机理，研究如何提高供应链弹性，减小突发事件对供应链系统的危害，并使供应链在突发事件发生后尽快恢复到原来的状态，或者演变到一个更理想的状态。因此，理解供应链弹性并进行科学的管理，对提高供应链抗风险能力及受风险冲击后的恢复能力具有非常重要的意义。

1.2 供应链弹性的形成机制和外在表现

供应链风险伴随供应链的产生而产生，虽然供应链管理这一研究领域的发展已经有四十多年的历史，但供应链风险管理近二十年才成为供应链管理的研究热

点。近年来经济环境的全球化和企业经营的精益化使供应链在面对各种不确定事件时表现得越来越脆弱，因而引起了来自运营管理、金融财务和企业战略管理等领域研究人员的高度关注。

1.2.1 供应链弹性的概念和机制

供应链弹性是供应链面对冲击时所表现出来的自适应能力和自修复能力，它直接影响着整个供应链的核心竞争力（赵林度和王新平，2016）。

Tang(2006)将供应链上的风险分为两类：第一类风险称运作风险（operational risks）；第二类风险称中断风险（disruption risks）。第一类风险指的是发生频率较高但影响相对较小的风险，如供应和需求的不确定性变化。这类风险发生后，企业可以通过简单的生产调整或者库存和生产缓冲区来适当缓解。第二类风险的特点是发生频率较低但影响相对较大。这类风险往往使整个生产受到影响而不能继续工作，对企业造成巨大的影响，甚至通过供应链进一步扩散到其他的企业，最终导致整个供应链的断裂，造成不可挽回的损失，如天灾、恐怖袭击等。传统的供应链风险管理体系已经不足以使供应链应对此类中断风险所产生的冲击，而构造更有弹性的供应链将有助于确保供应链在遭遇突发中断事件时，仍能保持网络的持续运转，这就是供应链弹性追求的主要目标，也是研究供应链弹性的初始动力。

面对供应链中断风险，供应链成员最需要的就是供应链弹性。然而，有关供应链弹性的理论研究才刚刚起步，系统研究非常缺乏。不同学者对供应链弹性有不同的理解，还没有形成统一的认识，但是均强调了供应链从中断中恢复的能力。因此，可以将供应链弹性定义为供应链在中断事件冲击下维持运营并恢复到正常状态的能力。针对这个概念，需要做以下几点说明。

第一，供应链弹性是供应链的内在属性，与中断事件无关。也就是说，无论中断事件是否发生，供应链弹性始终存在，但是在正常运营情况下没有具体体现；中断事件发生后，供应链弹性的效果则会显现出来。

第二，供应链弹性研究一般针对小概率大影响中断事件，这是研究供应链弹性的初衷。

第三，供应链在弹性作用下会在中断事件后慢慢恢复，如果供应链完全不能恢复，则系统弹性为零。

第四，供应链恢复到正常状态可以是中断事件发生前的原始状态，也可以是供应链在新环境下的理想运营状态，虽然第二种状态不同于原始状态，但并没有发生永久性的结构改变或重组，仍然保持与原始状态相近的结构和功能。

可以认为：供应链弹性是供应链成员企业为了实现供应链利润和价值的创造，

在中断事件发生前后，通过针对供应链结构和运营的各种预防和准备以及应对和恢复措施维持供应链在中断事件冲击下的运营，降低中断带来的损失，并从中断事件中恢复的一种能力（王新平，2015）。最终供应链弹性能力反映在供应链绩效在中断事件发生前后的变化中。图 1-1 描述了供应链弹性机制的本质。

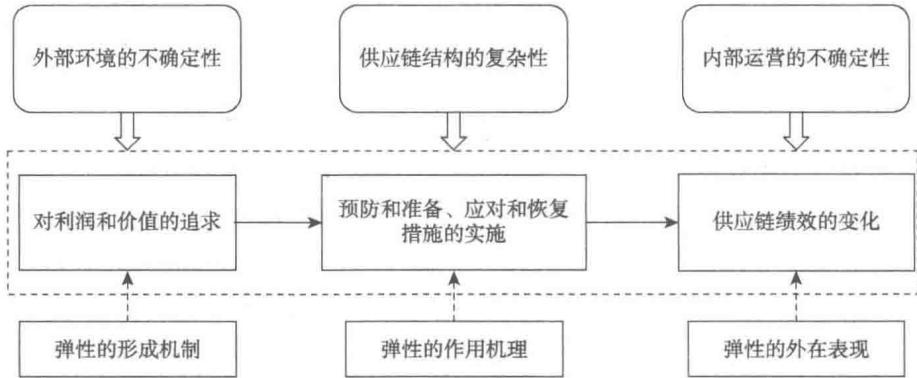


图 1-1 供应链弹性机制的本质

1.2.2 供应链弹性的形成机制

供应链作为一个具有竞合关系的战略联盟，核心思想在于“利益共享，风险共担”。随着供应链管理理论和实践的发展，供应链管理逐渐向着精益生产和准时化生产发展。精益生产和准时化生产都强调尽可能地消除“浪费”（如冗余库存）、降低供应链上的运作成本、最优化资源配置、缩短制造与物流耗时等，以保证成本的最小化，实现效率的最大化。这种思想关注的核心是企业利润和价值的创造。

近年来，随着科学技术的发展和经济的全球化，一方面，供应链网络自身在全球范围内不断延伸，其地域分布更加广泛，结构变得更为复杂；另一方面，供应链的外部环境也发生了巨大的变化，各种自然的、人为的不确定因素不断增多。内外因素的共同作用使供应链面临着各种类型中断风险的考验。供应链中断事件不仅对供应链日常运营造成困扰，还会对供应链造成深远的经济损失影响。Hendricks 和 Singhal（2003，2005a，2005b）总结分析了《华尔街日报》和道琼斯通讯社报道的数百个供应链中断案例发现，即使是一个微小的中断事件都会导致企业销售额、股票收益率、股东财富的下降，并且这种负面影响会持续数年。因此，在新的经济环境下，片面地强调精益化和准时化生产的供应链管理理念，只能使供应链变得相当脆弱，有可能给供应链带来难以预料的风险和不利影响，从而违背创造利润和价值的核心观念。

供应链弹性的提出正是为了在新的经济环境下能够继续实现创造利润和价值

的核心观念。虽然供应链弹性的获取需要投入相应的成本,但只有具备一定的弹性能力,供应链才能够在中断事件的冲击下得以生存和发展。因此,在风险因素逐渐增多的生存环境下,合理的弹性能力已经成为供应链实现利润和价值的前提,而任何有关弹性的决策也将以此核心观念为原则。

1.2.3 供应链弹性的外在表现

供应链弹性是供应链的内在属性。供应链在弹性措施作用的过程中通过供应链绩效的变化来反映弹性的作用效果,因此需要建立弹性措施与供应链绩效变化之间的联系,才能更好地理解供应链的弹性。

根据朗曼词典中对绩效的解释,绩效是指正在进行的某种活动或者已经完成的某种活动取得的成绩。在管理绩效的分析评价中,绩效是一个量化的过程,即对过程和过程中活动的相关效果的一种量化。史文利(2008)认为供应链的绩效是供应链的运作过程和运作效果。陈科(2009)综合供应链的特点和绩效的定义指出供应链绩效是对一段时间内供应链运行情况(包括过程和结果)的度量,反映了供应链战略的执行效果,并且可以通过对供应链绩效的分析发现供应链管理存在的问题,为供应链优化改善提供依据。

目前关于供应链绩效建模分析的研究主要集中在供应链绩效评价方面,包括评价指标体系的构建和评价方法的研究。Beamon(1999)和Felix等(2003)将供应链绩效评价指标体系分为定性指标(包括顾客满意度、供应链柔性、信息和物流流通整合度、风险有效管理程度及供应商绩效水平)和定量指标(包括成本度量指标、顾客响应程度度量指标及生产率度量指标)两类。Gunasekaran等(2001)从订单计划、供应链伙伴关系、生产水平、物流、顾客服务满意度、财务等角度来考虑,将这些指标划分成战略、战术及操作三个层面来衡量供应链绩效。中国供应链协会结合中国实际,提出了中国企业供应链管理绩效水平评价参考模型(supply chain performance metrics reference models, SCPR)。SCPR由五大类指标组成,包括订单反应能力、客户满意程度、业务标准协同指标、节点网络效应指标、系统适应性指标(中国电子商务协会供应链管理委员会,2003)。供应链绩效评价常用的方法包括定性方法(如专家打分法、指标体系法及标杆企业对比法)和定量方法(如数据包络法、模糊评价法及BP神经网络等)。

基于供应链绩效分析的供应链弹性策略研究,要求以供应链弹性与供应链绩效为研究对象,通过某种理论与方法建立供应链弹性的描述性模型,确定弹性策略中的关键决策因素,并应用相关理论与方法分析关键决策因素与供应链绩效之间的关系,建立相应的模型,科学客观地反映正常状况下及中断风险冲击状况下供应链系统的运营状况,得出有关供应链弹性状况的结论或对供应链弹性性能的

度和评价，从而为弹性优化和改善措施的实施提供理论依据。

1.3 供应链弹性的作用机理

供应链弹性的大小与供应链本身的结构以及供应链参与者的行为决策紧密相关，供应链弹性的作用过程即各弹性措施发挥效果的过程。按照实施的时间顺序，供应链弹性措施主要分为两类：一类是事前措施（pre-event measures），即缓解和准备措施（mitigation and preparedness measures）；另一类是事后措施（post-event measures），即应对和恢复措施（response and recovery measures）。

1.3.1 缓解和准备措施

事前措施，即缓解和准备措施，主要针对供应链结构的设计和优化。由于供应链结构的大规模调整需要较多的时间和资金，在供应链中断事件发生后的短期内难以实现，因此在供应链规划阶段就要考虑中断风险，将弹性的思想寓于供应链的规划设计中。而对于已经存在的供应链来说，则需要通过有效的防御性保护措施提高现有供应链结构的可靠性和稳定性。具体来说，事前的缓解和准备措施主要通过两种作用方式来提高供应链网络的弹性设计：能有效应对中断风险的鲁棒系统；通过对供应链网络进行攻击性分析，辨别供应链网络的关键节点和关键路径，将有限的资源合理分配用于加固某些关键设施，从而加强系统整体的弹性。

1. 供应链结构设计

在供应链结构设计方面，Bundschuh 等（2003）通过设置期望可靠性条件实现系统的可靠性，将鲁棒性加入供应链网络设计中，并通过设置每个供应商的供应能力限制及应急供应能力（包括应急库存和期权）实现系统的鲁棒性。Snyder 等（2006）研究了考虑中断风险情况下的供应链网络设计问题，在网络设计中主要考虑三个方面的因素：一是可利用的资源；二是决策者的风险态度；三是所考虑的供应链类型。Snyder 和 Daskin（2006）提出了一个新的鲁棒性度量标准，以每个情景下允许的遗憾值为约束条件，建立了以 p -robust^① 为约束条件的最小化期望总成本优化模型。

Konak 和 Bartolacci（2007）提出了以弹性最大化为目标的一种网络设计方法，并给出了一个随机混合遗传算法求解该问题。Lim 等（2010）将供应网络中的设施分为可靠（成本较高）和不可靠（成本较低）两类，研究了如何在供应链网络

① p -robust 表示“每种情形下的后悔值均不超过 p ”。

中设计安排设施的分布。Cui 等 (2010) 建立了一个混合整数规划 (mixed integer program, MIP) 模型和一个连续近似 (continuum approximation, CA) 模型, 研究了可靠无容量约束固定费用选址问题 (reliable unexpected fixed charge location problem, RUFL), 以最小化初始的构建成本以及正常或失效状态下的期望运输成本。

Qi 等 (2010) 研究了在集成供应链设计问题中如何考虑供应中断 (包括供应商和零售商的中断) 风险的影响来决定零售商的选址及零售商与服务顾客之间的指派决策, 使期望的建设费用、运输费用及库存费用最小; 最后通过与常规供应链设计问题的比较表明在供应链设计阶段考虑供应中断风险有利于系统节省总的运营成本, 特别是在风险发生概率较高或恢复时间较长的情况下。Yi 和 Ouyang (2010) 研究了 RUFL 问题, 其有两个特点: 首先, 考虑了各中断设施之间存在空间相关性, 如地震等灾害会引起相邻设施的同时中断; 其次, 由于考虑了设施中断之间的相关性, 建立离散模型解决此类问题时需要考虑很多种情景分析, 计算复杂度非常高。研究结果表明, 当设施失效的概率和惩罚成本很高的时候, 设施中断的相关性对系统成本 (包括一次性的设施构建成本及运营过程中的运输成本) 具有非常显著的影响。

Peng 等 (2011) 以最小化名义成本 (即不发生中断事件时的运营成本) 为目标, 引入 p -鲁棒准则 (某一情景 S 下的可行解与最优解的偏差率不超过阈值 p) 作为约束条件, 基于蒙特卡罗模拟方法, 建立了多情景模式下的混合整数规划问题, 研究了可靠多级供应链网络的设计问题。研究结果指出, 通过较少的成本投资可以换取较大幅度的弹性增强 (鲁棒性增强)。Lim 等 (2013) 与 Yi 和 Ouyang (2010) 建立了连续选址模型, 研究了存在随机中断风险的鲁棒设施选址问题, 并针对以往的文献中断概率已知的假设在现实中很难实现的问题, 研究了中断概率估计的偏差对整个系统设计的影响。

Sawik (2011a) 研究了同时存在中断风险和延迟风险情况下, 按订单生产 (没有库存) 型供应链的多周期供应商选择及订单分配问题。研究结果表明, 供应商的选择及订单的分配依赖于各供应商的价格、质量及可靠性, 供应中断的发生概率是影响决策的关键因素, 在风险厌恶型模型中, 决策者更倾向于选择中断概率较小的供应商, 在风险中性环境下决策者较不愿意选择成本较高的供应商, 并且订单在整个决策时域内、不同的供应商之间分配很不均匀, 其订货量比风险厌恶的情况也高出很多。

Dacarzani 等 (2011) 研究了在生产单种产品的供应链中, 当存在一个不可靠但质量有保障的供应商以及可靠但质量存在问题的其他供应商时的供应商数量选择, 以及订单在各供应商之间的分配问题。若采用单源采购策略, 容易使制造商在发生供应中断后因没有备选供应商发生供应链中断; 若采用双源采购策略, 容

易使制造商在发生供应中断后由于单个供应商垄断而失去谈判的能力；若采用三源采购策略，虽然能使不可靠供应商失效后，仍然存在两个竞争供应商，不至于使采购价格提高太多，但又会导致建设成本的增加。研究建立了不同情景下的供应链成本函数，并通过一个实例进行了比较，结果表明，中断事件发生的概率及建设成本是影响制造商决策的关键因素，如果建设成本太高，制造商宁愿选择单源采购；若中断事件发生概率较高，制造商比较倾向于双源或三源采购策略。

2. 供应链网络攻击性分析

在供应链网络攻击性分析方面，Church 和 Scaparra (2007a) 基于 p -中值最优选址问题和 r -阻断最优攻击问题提出了可靠性区域 (reliability envelope) 的概念。 p -中值最优选址问题确定某些设施受到攻击的情况下系统效率下降的最小值 (或者说是 $p-r$ 个设施时的最高系统效率)，即可靠性区域的上边界； r -阻断最优攻击问题确定设施受到攻击的情况下系统效率下降的最大值 (或者说是 $p-r$ 个设施时的最低系统效率)，即可靠性区域的下边界。该文章建立了确定攻击 (受攻击的设施一定会失效) 和不确定攻击 (受攻击的设施以一定概率失效) 两种情况下的可靠性区域。

Murray 等 (2007) 研究的问题与 Church 和 Scaparra (2007a) 类似，不同的是 Murray 等 (2007) 以网络中某些节点失效时最大 (最小) 需求点和供应点 (O-D pair) 之间被中断的产品流量为目标，建立了 FIM (flow interdiction model, 即流量阻断模型)，研究了不同数量的节点受到中断影响时，系统产品流量下降程度的最大和最小值，从而得出了上界曲线和下界曲线构成的影响区间。Lim 和 Smith (2007) 分别针对离散型攻击 (受攻击的边的功能要么是 1 要么下降到 0) 和连续型攻击 (受攻击的边的功能在 0~1 连续取值) 研究了一个多产品流网络中的受攻击问题。

Losada 等 (2010a) 考虑了给定设施恢复时间和中断频率下的 p -中值系统的中断问题，从攻击者的角度研究了使系统影响最大 (服务运输的距离最长) 的攻击方式；研究中将中断事件类型分成两类，即小概率大影响事件 (如自然灾害、恐怖袭击等) 和大概率小影响事件 (如机器故障等)，并建立了三种模型，即 r -阻断中值 (r interdiction median, RIM) 一般模型、RIMT (r interdiction median problem with facility recovery time, 即考虑设施恢复时间的 r -阻断中值问题) (Non-Freq) 考虑设施恢复时间的单次中断模型、RIMT (Freq) 考虑设施恢复时间的多次中断模型。研究表明，RIM 解是考虑设施恢复时间和多次中断可能情况下的次优解；RIMT (Non-Freq) 模型是 RIMT (Freq) 模型的特殊情形；RIMT (Freq) 模型与 RIMT (Non-Freq) 模型相比的缺点是其计算复杂度较高。对于小概率大影响事件来说，采用 RIMT (Freq) 模型与 RIMT (Non-Freq) 模型可以获得同样的最

优解,但对于大概率小影响事件来说,RIMT(Freq)可以比RIMT(Non-Freq)更合适。研究成果也从反面验证了系统的弹性,受影响较大的系统弹性较弱,受影响较小的系统弹性较强。

3. 分配有限资源加固系统关键设施

在分配有限资源加固系统关键设施研究方面,Losada等(2010b)在Losada等(2010a)研究的阻断模型基础上,研究了如何分配有限的保护资源使阻断给整个系统带来的影响最小;建立了一个混合整数双层线性规划问题(mixed integer bi-level linear problem, MIBLP),上层问题是系统设计者(leader)的保护决策,下层问题是攻击者(follower)针对特定系统设计的攻击决策。Losada等(2012)研究了随机中断风险情况下,如何事先将有限的资源分配给不同的供应点,使得在某些供应点中断时某一服务时间周期内的最大服务成本(正比于距离和需求量)最小(风险厌恶型)。资源的事先分配能够减少该供应点的恢复时间,从而降低最大服务成本。本书分析了用于事先加固各供应链的资源量对目标函数的边际效益的影响,发现存在一个阈值,在小于该阈值的范围内增加资源供给能够快速降低最大服务成本,在大于该阈值的范围内增加资源供给则对提高目标函数的边际效益作用不大,从而给出了一个较优的资源供给量。

Schmitt等(2015)研究比较了OWMS(one-warehouse multiple-retailer,即一个仓库多个零售商)系统中集中式库存管理策略和分散式库存管理策略在需求不确定和供应中断两种情况下成本(缺货+库存)的期望和方差。结果表明,在需求确定的情况下,分散式库存管理策略通过风险分散效应能够降低成本的方差,这和传统的供应确定需求随机情况下集中式库存管理策略的风险池效应相反;在供应中断和随机需求同时存在的条件下,风险厌恶型企业将会选择分散式库存系统设计。

Sawik(2013)在Sawik(2011a)的基础上,不仅考虑了供应商的选择及订单分配,还考虑了供应商的防御,即选择哪些供应商设防、如何分配应急库存,以使供应商防御、应急库存设置、产品订货、购买、运输及缺货的总成本最小,以及以最小化和潜在的最坏情况成本所表示的中断影响消除能力为目标,建立了风险中性、风险厌恶及平均风险(风险中性和风险厌恶情况下成本的权重和)三种情况下的混合整数规划模型。研究表明,在风险中性情况下,决策者更在乎的是期望成本,因此对中断风险的控制不是很关注,但如果顾客缺货成本较高,中断概率会成为供应商选择的一个关键影响因素;在风险厌恶情况下,决策者更倾向于供应商防御行为,以提高供应链的弹性,并且防御供应商的数量随置信水平的提高而增加,但同时被选择的满足顾客需求的供应商数量在减少,与Sawik(2011a)采用多供应商分散风险策略不同,决策者会选择将资源投入有限的几个防御供应

商上，并选择其为顾客提供产品，而不是选择较多的未防御供应商分散中断风险；在平均风险情况下，决策者的决策介于风险中性和风险厌恶两者之间，其权重系数反映了决策者的偏好。

4. 集成研究

还有一些学者将上面的三个问题进行了集成。O'Hanley 和 Church (2011) 以综合最大化初始的选址和受阻断后最坏情况下的覆盖范围为目标，建立了 MCLIP (maximum covering location-interdiction problem, 即最大覆盖选址-阻断问题) 模型，研究了选址 (p -中值) 和阻断 (r -阻断) 的综合问题。MCLIP 可以看成有先后决策顺序的两个决策者之间的 Stackberg 博弈问题，网络设计者首先决定 p 个设施的选址使整个系统的覆盖范围最大，阻断者根据设计者的决策决定阻断系统的哪 r 个设施使系统在遭受阻断后覆盖范围下降最多。设计者在决策的初期就了解到阻断者会阻断系统中的 r 个设施，因此在决定设施选址的初期就考虑了阻断者的阻断问题，从而在初期设计的时候一方面要考虑使系统初始的覆盖范围最大，另一方面也要考虑使系统 r 个设施受到阻断后的最坏情况下的覆盖范围最大。在初始设计阶段就考虑了阻断问题，会使系统对任何阻断具有较好的鲁棒性。Church 和 Scaparra (2007b) 在 RIM 模型的基础上建立了 IMF (interdictim median problem with fortification, 即带有防御措施的阻断中值问题) 模型，主要研究如何将有限的资源分配到网络中的某些设施 (节点)，使顾客的最短服务距离在系统受到阻断的时候受影响最小。Cappanera 和 Scaparra (2011) 研究了最短路径网络的阻断和保护问题 (shortest-path interdiction problem with fortification, SPIF)，以网络中的边 (也可以推广到网络中的节点) 为研究对象，建立了三层“防御者-攻击者-使用者”模型，研究将有限的防御资源分配给哪些边，才能使网络在受到阻断后，从起点 s 到终点 t 的最短路径增加的值最小。

此外，除了供应链网络结构设计和优化，要有效地应对供应链风险，还需要引起供应链中所有人对风险管理的关注和意识。首先，和任何组织内部改变管理文化的案例一样，组织水平的任何改变都离不开领导者的直接参与。企业的领导者要充分认识到弹性供应网络的重要性，再把这种理念向整个组织推广，使弹性成为组织文化的一部分并成为一种信念。这可以通过对安全和弹性的培训获得，并将弹性管理的思想同日常运营和决策的流程结合起来，使弹性思想深入企业管理的每一个细节。其次，建立供应链风险管理团队，负责日常的供应链风险管理。这个团队需要跨越职能部门，最好有企业高层的直接领导，这样能通过日常的风险管理及早发现可能的风险，并在突发事件发生后及时采取措施，尽可能“大事化小，小事化了”。最后，将风险管理的权利授予每一个员工。每个工作人员发现风险的苗头都有权做出决策以及及时遏制其发展，减小中断事件发生的概率。这