doi:10.19920/j.cnki.jmsc.2026.09.001

在竞争中应对关键零部件断供风险的库存策略①

周 宇[1], 李 琴[1], 吴肖乐[2*]
(1. 重庆大学经济与工商管理学院, 重庆 400044; 2. 复旦大学管理学院, 上海 200433)

摘要: 重点行业与企业的关键零部件供应中断风险日益突出. 本研究探讨在竞争中如何运用策略性库存应对关键零部件断供风险. 在由一个供应商和两个竞争性制造商组成的供应链模型中,考虑两周期博弈. 在第二周期,不同的断供风险可能导致一个或者两个制造商的零部件供应中断,因此,制造商有动机在第一周期策略性囤积库存. 分析结论表明,制造商应对断供风险的库存策略与自身以及竞争对手的风险状态密切相关;随着断供发生概率的提高,零部件批发价和企业期望利润会出现非单调的增减变化. 单一制造商面临断供风险的状态可能反而增大供应商的期望利润. 因此,供应商有动机刻意营造针对单一制造商的断供风险,而政府有必要做出可信的制裁威胁以维护供应安全.

关键词: 供应中断; 关键零部件; 库存策略; 市场竞争; 博弈论
中图分类号: F224 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2026)09-0001-17

0 引 言

党的二十大报告提出"着力提升产业链供应链韧性和安全水平". 目前,一些国家出现了逆全球化思潮,贸易保护主义抬头. 欧美发达国家在关键技术领域对于发展中国家的打压力度明显加大,我国产业链供应链在若干领域仍然面临"卡脖子"等威胁. 在一些重点行业和企业,关键零部件依赖进口,我国对于整体供应链的掌控力较弱,供应中断风险一直存在[1]. 如何应对关键零部件的断供风险是我国在产业链供应链韧性与安全领域面临的巨大挑战.

由于局部自然灾害或者工厂安全事故等原因,可能导致单一的制造商出现供应中断的情形. 此外,2020年重大公共卫生安全事件曾经引发了严重的行业性供应中断. 在此背景下,根据供应中断的波及范围,本研究将断供风险划分为两类:"单一断供风险"指只有单一制造商面临供应中断的风险;以及"全面断供风险"指整个行业的所有竞争性制造商均面临供应中断的风险. 断供风险的类型通常属于不可控的外部因素. 然而,在不时发生的贸易摩擦中,政府可能采取针对单一制造商或整个行业的限制性贸易政策,进一步复杂化了供应中断的研究情景. 美国政府自2019年以来先后对两家中国电信设备制造商——中兴通讯公司以及规模更大的华为公司实施制裁[2]. 我国安防领域视频监控的行业龙头企业——大华科技公司与海康威视公司,在2019年也被美国商务部列入了出口管制的"实体清单",导致国内整个安防监控市场面临关键零部件供应中断的风险[3]. 与此同时,美国的高端制造业同样依赖境外矿物供应,中国限制稀土出口的任何举措也将对美国相关行业和企业造成严重的供应短缺[4].

为了应对供应中断的风险,知名咨询公司诸如麦肯锡、毕马威、普华永道等纷纷表示,企业应当通过增加库存水平来提高供应链韧性与安

① 收稿日期: 2023-07-10; 修稿日期: 2024-06-20.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72293560/72293565; 72371040); 教育部哲学社会科学研究重大专项项目(2026JZDZ027).
通讯作者: 吴肖乐(1984—), 女, 浙江乐清人, 博士, 教授, 博士生导师. Email: wuxiaole@fudan.edu.cn

中国知网 https://www.cnki.net

全[5]. 在贸易摩擦的背景下,关键零部件供应中断的风险曾经促使华为公司寻求全渠道采购并且囤积了大量的零部件库存. 在 2020 年 9 月美国政府禁令生效之前,华为公司的最后一次抢购在几天内将芯片的现货价格抬高了 7%[6]. 正是利用充足的零部件库存,华为公司度过了供应中断之后最困难的运营期,逐步实现了业务的成功转型. 有影响力的企业,尤其是关键零部件供应商,可以在一定程度上改变导致供应中断的贸易政策. 比如,在 2023 年 7 月,英特尔、高通和英伟达等多家芯片公司高管向美国国务院表达了对于供应链问题的立场和看法;与此同时,美国半导体行业协会公开呼吁美国政府避免对中国进一步实施芯片销售的限制措施[7]. 而且,中国政府也积极应对断供风险,在 2020 年为了维护国际经贸秩序出台了《不可靠实体清单规定》,对"违反正常的市场交易原则,中断与中国企业、其他组织或者个人的正常交易"等行为采取限制性或者禁止性措施[8].

关键零部件生产技术往往由强势的垄断供应商掌握,而下游制造商存在竞争;人为选择的限制性贸易政策可能波及单一制造商或者竞争性制造商. 为了分析在竞争中制造商如何运用策略性库存应对关键零部件的断供风险,本研究考虑了由上游一个供应商和下游两个竞争性制造商组成的两级供应链,并提出了以下研究问题:供应中断风险如何影响供应商的零部件最优批发价和竞争性制造商的最优库存水平? 不同类型的断供风险对供应商和制造商的期望利润有什么影响?

本研究构建了一个两周期模型,其中,第二周期可能出现供应中断. 考虑到断供风险的波及范围,本研究依次讨论以下三种情形:1)无断供风险的情形;2)单一断供风险的情形;3)全面断供风险的情形. 针对每一种情形,本研究通过逆向归纳法求解两周期模型,首先得到第二周期风险状态实现后的子博弈均衡,然后基于子博弈均衡的理性预期分析企业在第一周期的最优决策,从而为面对断供风险的制造商运营和供应链管理决策提供合理的建议.

1 文献综述

现有关于供应中断风险的文献研究主要聚焦于单个企业的风险管理策略[9,10]. 早期的研究中,Meyer 等[11]、Bielecki 和 Kumar[12]以及 Song 和 Zipkin[13]首次提出将库存管理作为一种风险缓解的有效工具. 后来的文献研究提出了更多的供应风险应对方法,例如多重采购策略[14-16]、营业中断保险[17]、动态应急响应[18,19]、备份灵活性以及生产过程的灵活性[20,21]. 王静和陈希[22]考虑了制造商如何应对供应链中断风险的问题,并以整个供应链的理性预期收益为目标,分析了基于分层决策和综合决策的不同风险管理决策方案. 孙胜楠等[23]研究了决策者分别以降低市场份额损失和降低供应链整体利润损失为目标,通过价格调整策略来应对供应中断的风险. 陈静等[24]考虑到商业保险可能导致供应商对质量问题的轻视,通过建立一个采购合约决策模型来讨论制造商如何利用商业保险来应对和管理供应链质量风险的问题. 最近的研究中,Lucker 等[25]优化了产品多个生产阶段中库存和储备能力的联合使用,并发现下游持有库存的有效性. 以上关于管理供应中断风险的文献主要研究了单一决策者的策略,旨在实现整个供应链的利润最大化或成本最小化. 与现有文献不同的是,本研究存在供应中断风险的情况下由一个供应商和两个制造商组成的分散式供应链.

在有关分散式供应链管理的文献中,企业可以通过不同的供应风险消减策略来优化经济绩效. 然而,这类文献在研究中并未将库存管理作为一种应对风险的手段[26,27]. 例如,在一个分散式供应链中,Babich 等[28]研究了在面临上游供应商违约的供应中断风险下,下游买家采用多源采购策略的利润增益. Tang 等[29]研究了下游买家如何设计有效的机制,来激励有风险的供应商在供应可靠性或供应能力恢复方面的投资决策. 何波和张霞[30]在由一个零售商和两个供应商组成的分散式供应链中,讨论了当主要供应商存在不确定的产出风险时下游零售商的最优采购策略. 牛保庄等[31]考虑了全球芯片发生供应中断的情形下,如何通过本土替代和供应链的结构调整来增加供应链的稳定性. 陈金晓和陈剑[32]提出通过新的供应链绩效测度来应对供应链中断风险,并论证了系统绩效水平的准确评估对于识别断供风险的有效性. 与上述研究不同,本研究考虑了一个存

中国知网 https://www.cnki.net

在供应中断风险的两级分散式供应链，其中，下游两个竞争性的制造商面临相同或者不同的风险状态，并通过持有策略性库存来应对关键零部件的断供风险.

Anand 等[33]在策略性库存研究方面做出了开创性贡献：其研究了由一个供应商和一个零售商构成的供应链，其中下游零售商通过持有库存，引导上游供应商降低未来的批发价. 在后续研究中，Arya 和 Mittendorf[34]发现，当供应链因持有策略性库存而导致效率低下时，供应商直接补贴消费者能够使得所有利益相关者，包括供应商、零售商和消费者均受益. Guan 等[35]研究了上游供应商入侵与下游零售商持有策略性库存之间的相互作用，并确定了供应商和零售商从两种战略的组合中获益的条件. Roy 等[36]证明，策略性库存的可观测性将显著改变均衡的价格和库存，例如上游供应商可能因其无法观测下游库存而获益. Dong 和 Liu[37]发现，当库存水平可观测时，上游制造商可以通过持有策略性库存以降低其在第二周期启动生产的可能性，从而诱使零售商在第一周期以更高的批发价格订购更多的产品.

在策略性库存研究领域，只有本研究和 Wu 等[38]考虑了供应中断风险. 而且，不同于 Wu 等[38]所采用的双边垄断供应链模型，本研究引入了下游制造商的竞争因素. 本研究的动机是在贸易冲突的背景下，深入探讨不同类型的断供风险，无论是针对单一制造商还是针对所有制造商，对企业的影响，以及制定有效的库存策略和提出政策建议以应对断供风险. 这一独特的研究视角不仅填补了现有文献的空白，而且针对当前国际贸易的不稳定性，提供了具体的管理启示和政策建议.

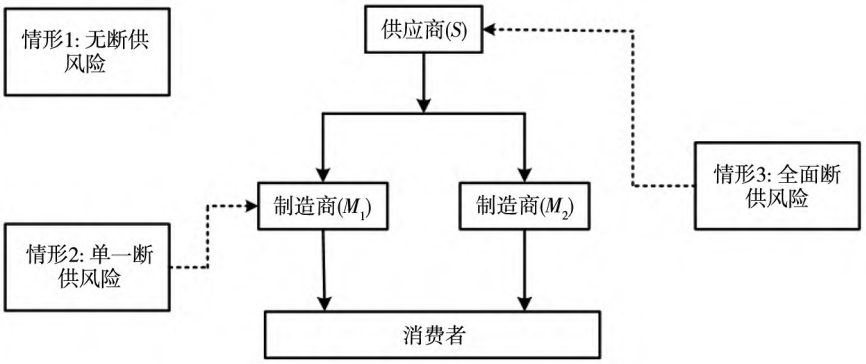

图 1　供应链结构图

Fig. 1 Supply chain structure

2　模型

本研究在不同的断供风险情形中考虑由一个关键零部件供应商 S 和两个竞争性制造商 M_1、M_2 组成的两级供应链，如图 1 所示.

本研究构建一个两周期博弈模型研究竞争性制造商如何运用库存策略来应对关键零部件的供应中断风险. 在第一周期，供应商的供应能力不受限制，能够按照下游制造商的要求提供任意数量的零部件. 然而，在第二周期，供应商和制造商会受到诸如自然灾害、贸易摩擦、军事冲突等各种突发意外事件的影响，因而有可能出现供应中断. 整个博弈事件的过程如图 2 所示. 在第一周期：首先，供应商决策关键零部件的单位批发价格 w_1；其次，两个制造商同时决定订购量 Q_{11} 和 Q_{21}；再次，两个制造商同时决定库存量 I_1 和 I_2，每个制造商在市场上的销售数量可由订购量减去库存量得到. 考虑到采购和生产的提前期，每个制造商的可销售产品数量在短期内无法改变. 因此，本研究假定两个制造商进行古诺竞争，并且用市场出清机制得出零售价格[35, 38, 39]. 为了简化表达式，假定两个制造商的产品的可替代性为 $\delta = 1$. 考虑产品的可替代性 $\delta < 1$ 并不会在本质上改变本研究的主要结论.

在第二周期期初，关键零部件的供应状态得到实现；出现断供的概率记作 $\alpha \in [0, 1]$. 在单一断供风险情形中，不失一般性，假定只有制造商 M_1 可能出现供应中断；在全面断供风险情形中，此时两个制造商都可能出现供应中断. 基于制造

中国知网　https://www.cnki.net

商的公开披露(比如,上市公司年报)或者第三方行业报告等信息,第一周期的市场销量成为公共信息. 供应商根据第一周期的市场销量可推算两个制造商的库存量,进而决定新的批发价格 w_2 . 继而,制造商决定新的订购量 Q_{12} 和 Q_{22} . 假定期末库存的残值为 0,没有制造商愿意继续持有库存. 那么,每个制造商在第二周期期末的销售数量可由订购量加上库存量得到.

不失一般性,本研究假设所有的企业都是风险中性,追求利润最大化. 简化固定成本、生产成本和销售成本都为 0,可以确保最优产量大于等于 0;而且,利润最大化的目标设定可以保证均衡价格必然大于等于 0. 单位库存的持有成本记作 h,当库存持有成本过高时,企业不会选择持有库存;而本研究探讨竞争性制造商的库存策略,因此假设库存成本 h 足够小,即 $h \leqslant 1/12$ 使得所有的均衡库存水平大于 0 . 本研究用 Π_j, $j \in \{s, m1, m2\}$ 表示供应商和两个制造商在两个周期的总利润,用 π_j 表示企业在第二周期的利润.

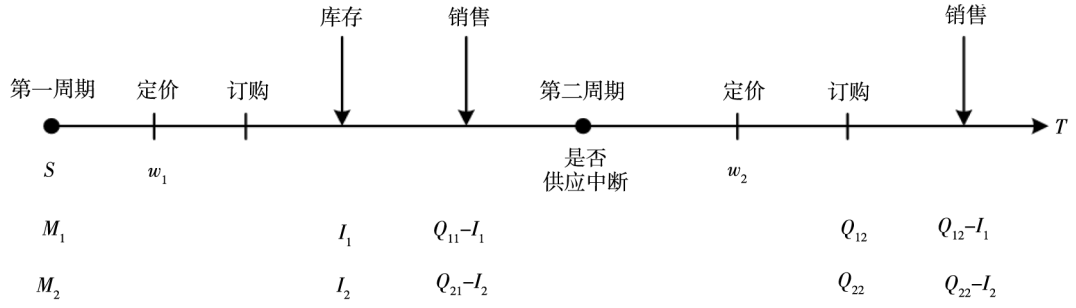

图 2 两周期博弈的事件顺序

Fig. 2 Sequence of events in the two-period game

3 分析

本研究采用逆向归纳法求解上述两周期模型,首先讨论第二周期供应状态实现之后供应商和制造商的子博弈均衡,然后基于对子博弈均衡的理性预期分析企业在第一周期的最优决策. 考虑竞争性制造商面临不同的供应中断风险,本研究依次分析三种情形.

3.1 无断供风险

作为全文分析的基准,考虑一种无断供风险的情形,即 $\alpha = 0$,用上标 N 标识. 在此种情形下,两个制造商都不发生断供;在第二周期,供应商可以向制造商提供任何数量的产品. 两个制造商在终端市场的逆需求函数为

$$p_2^N(Q_{12}, Q_{22}) = 1 - (Q_{12} + I_1) - (Q_{22} + I_2) \quad (1)$$

注意,本研究为了简化最优解的表达式,假设产品的可替代性 $\delta = 1$,因此在一个周期内只存在单一的市场出清价格. 制造商 M_i 的最优化问题为

$$\max_{Q_{i2}^N} \pi_{mi}^N = p_2^N \times (Q_{i2}^N + I_i^N) - w_2^N \times Q_{i2}^N \quad (2)$$

基于利润最大化的条件,联立求解,可得制造商 M_i 在第二周期的最优订购量为

$$Q_{i2}^N = \frac{1 - 3I_i^N - w_2^N}{3} \quad (3)$$

供应商在第二周期的最优化问题为

$$\max_{w_2^N} \pi_s^N = w_2^N \times (Q_{12}^N + Q_{22}^N) \quad (4)$$

将式(3)中的最优订购量代入式(4),可得供应商的最优批发价格

$$w_2^{N*} = \frac{2 - 3I_1^N - 3I_2^N}{4} \quad (5)$$

将式(5)代入式(3),可得制造商的最优订购量

$$Q_{i2}^{N*} = \frac{2 - 9I_i^N + 3I_{3-i}^N}{12} \quad (6)$$

基于式(6),可得制造商的最优销量

$$Q_{i2}^{N*} + I_i^N = \frac{2 + 3I_i^N + 3I_{3-i}^N}{12} \quad (7)$$

因此,在无断供风险时,供应商在第二周期的批发价格随库存的上升而下降;制造商在第二周期的订购量随自身库存的上升而下降,随竞争对手库存的上升而上升;制造商的销量随着库存的上升而上升.

把第二周期的均衡决策代入供应商和两个制造商的利润函数,可得第二周期无断供风险时的

中国知网 https://www.cnki.net

均衡利润，记作 π_j^{N*}，$j \in \{s, m1, m2\}$，分别为

$$\pi_s^{N*} = \frac{(3I_1^N + 3I_2^N - 2)^2}{24} \tag{8}$$

$$\pi_{mi}^{N*} = \frac{7}{12}I_i^N + \frac{1}{36} + \frac{1}{12}I_{3-i}^N - \frac{11}{16}(I_i^N)^2 - \frac{5}{8}I_i^N I_{3-i}^N + \frac{1}{16}(I_{3-i}^N)^2 \tag{9}$$

继续使用逆向归纳的方法，可得第一周期的最优决策和均衡利润. 制造商在终端市场的逆需求函数为

$$p_1^N(Q_{11}, Q_{21}) = 1 - (Q_{11} - I_1) - (Q_{21} - I_2) \tag{10}$$

制造商 M_i 在第一周期的最优化问题可以表示为

$$\max_{Q_{i1}^N, I_i^N} \Pi_{mi}^N = p_1^N \times (Q_{i1}^N - I_i^N) - w_1^N \times Q_{i1}^N - h \times I_i^N + \pi_{mi}^{N*} \tag{11}$$

基于利润最大化的条件，联立求解，可得制造商的最优订购量和库存的表达式分别为

$$Q_{i1}^N = \frac{15 - 20w_1^N - 12h}{24} \tag{12}$$

$$I_i^N = \frac{7 - 12w_1^N - 12h}{24} \tag{13}$$

供应商在第一周期的最优化问题可以表示为

$$\max_{w_1^N} \Pi_s^N = w_1^N \times (Q_{11}^N + Q_{21}^N) + \pi_s^{N*} \tag{14}$$

将式(12)代入式(14)，基于利润最大化的条件求解，可得供应商的最优批发价格

$$w_1^{N*} = \frac{63 - 12h}{124} \tag{15}$$

将式(15)代入表达式(12)得到制造商的最优订购量为

$$Q_{i1}^{N*} = \frac{25 - 52h}{124} \tag{16}$$

将式(15)代入表达式(13)得到制造商的最优库存量为

$$I_i^{N*} = \frac{7 - 84h}{186} \tag{17}$$

则制造商的最优销量为 $Q_{i1}^{N*} - I_i^{N*} = \frac{61 + 12h}{372}$.

将式(17)代入第二周期供应商和制造商最优利润的表达式，可以得到

$$\pi_s^{N*} = \frac{(55 + 84h)^2}{23\,064} \tag{18}$$

$$\pi_{mi}^{N*} = \frac{2\,357}{46\,128} - \frac{497}{1\,922}h - \frac{245}{961}h^2 \tag{19}$$

把第一周期的均衡决策代入供应商和两个制造商的利润函数，可得无断供时两周期的总均衡利润，记作 Π_j^{N*}，$j \in \{s, m1, m2\}$，分别为

$$\Pi_s^{N*} = \frac{125}{372} - \frac{2}{31}h + \frac{12}{31}h^2 \tag{20}$$

$$\Pi_{mi}^{N*} = \frac{4\,073}{69\,192} - \frac{101}{1\,922}h + \frac{148}{961}h^2 \tag{21}$$

基于企业在第二周期的利润和总利润可以得到企业在第一周期的利润为 $\Pi_j^{N*} - \pi_j^{N*}$，$j \in \{s, m1, m2\}$.

供应商和制造商的最优决策和利润关于单位库存成本 h 的敏感性分析总结于表 1；其中 ↓ 表示递减，↑ 表示递增，× 表示敏感性分析不适用.

基于表 1，可得如下结论. 第一，最优库存水平以及所有企业的总利润总是随单位库存成本 h 递减. Anand 等[33]在无断供风险的双边垄断供应链情景中，提出并论证了策略性库存的存在价值；本研究的基准模型在考虑了下游竞争的情景中验证了这一结论，即策略性库存的存在能够增大供应商和竞争性制造商的利润. 这是因为策略性库存的存在减弱了供应链内部“双重边际效应”对供应链利润的负面作用，能够实现上下游的双赢.

表 1　无风险下库存成本对最优决策和利润的影响

Table 1 Impact of inventory cost on optimal decisions and profits under no risk

参与方	第一(二)周期决策				利润		
	批发价	订购量	销量	库存	第一周期	第二周期	总利润
供应商	↓(↑)	×(×)	×(×)	×(×)	↓	↑	↓
制造商 1	×(×)	↓(↑)	↑(↓)	↓(×)	↑	↓	↓
制造商 2	×(×)	↓(↑)	↑(↓)	↓(×)	↑	↓	↓

中国知网　https://www.cnki.net

第二,单位库存成本 h 在两个周期对于企业的最优决策存在完全相反的影响;即在第二周期,最优批发价和订购量随 h 递增,最优销量随 h 递减;而在第一周期,最优批发价和订购量随 h 递减,最优销量随 h 递增. 这是因为,策略性库存的存在改变了两个周期供应链内部的供需关系,即竞争性制造商对于供应商的第二周期的需求因为策略性库存而转移到成为第一周期的需求. 因此,制造商持有策略性库存的动机增大了其对于供应商的第一周期的需求,即第一周期的最优批发价随策略性库存递增;由于最优库存水平随 h 递减,因此第一周期的最优批发价也随 h 递减. 与之类似,由于策略性库存减少了制造商对于供应商的第二周期的需求,第二周期的最优批发价随 h 递增. 同理可以解释单位库存成本 h 对于两个周期的其它最优决策的不同影响.

3.2 单一断供风险

其次,考虑单一断供风险的情形,其中供应商对制造商 M_1 的零部件供应在第二周期以概率 α 出现中断,用上标 M 标识. 在第二周期,如果没有出现断供,所有决策过程与章节 3.1 的分析内容完全相同,相关均衡利润已被记作 π_j^{N*} ,会在后文分析中被使用.

如果出现断供,供应商不能向 M_1 销售产品,因此 M_1 只能销售库存量. 在终端市场的逆需求函数变为

$$p_2^M(0,Q_{22}) = 1 - I_1 - (Q_{22} + I_2) \tag{22}$$

基于 M_2 的利润最大化的条件,可得最优订购量的表达式为

$$Q_{22}^M = \frac{1 - I_1^M - 2I_2^M - w_2^M}{2} \tag{23}$$

供应商在第二周期的最优化问题为

$$\max_{w_2^M} \pi_s^M = w_2^M \times Q_{22}^M \tag{24}$$

同理可得供应商的最优批发价格

$$w_2^{M*} = \frac{1 - I_1^M - 2I_2^M}{2} \tag{25}$$

将式(25)代入式(23),可得制造商 M_2 的最优订购量和销量为

$$Q_{22}^{M*} = \frac{1 - I_1^M - 2I_2^M}{4} \tag{26}$$

$$Q_{22}^{M*} + I_2^M = \frac{1 - I_1^M + 2I_2^M}{4} \tag{27}$$

把第二周期的均衡决策代入供应商和两个制造商的利润函数,可得第二周期单一制造商断供时的均衡利润记作 π_j^{M*}, $j \in \{s, m1, m2\}$,分别为

$$\pi_s^{M*} = \frac{(I_1^M + 2I_2^M - 1)^2}{8} \tag{28}$$

$$\pi_{m1}^{M*} = \frac{(3 - 3I_1^M - 2I_2^M) I_1^M}{4} \tag{29}$$

$$\pi_{m2}^{M*} = \frac{1}{16}(I_1^M)^2 - \frac{3}{4}I_1^M I_2^M - \frac{1}{8}I_1^M - \frac{3}{4}(I_2^M)^2 + \frac{3}{4}I_2^M + \frac{1}{16} \tag{30}$$

按照逆向归纳法,继续分析第一周期的决策. 制造商在终端市场的逆需求函数为

$$p_1^M(Q_{11}, Q_{21}) = 1 - (Q_{11} - I_1) - (Q_{21} - I_2) \tag{31}$$

制造商 M_i 在第一周期的最优化问题可以表示为

$$\max_{Q_{i1}^M, I_i^M} \Pi_{mi}^M = p_1^M \times (Q_{i1}^M - I_i^M) - w_1^M \times Q_{i1}^M - h \times I_i^M + (\alpha \times \pi_{mi}^{M*} + (1 - \alpha) \times \pi_{mi}^{N*}) \tag{32}$$

基于利润最大化的条件,联立求解,可得制造商的最优订购量和库存

$$Q_{11}^M = \frac{\begin{pmatrix}(5 - w_1^M)\alpha^2 + \\ (37 - 24h - 35w_1^M)\alpha - \\ 72h - 120w_1^M + 90\end{pmatrix}}{3\alpha^2 + 33\alpha + 144} \tag{33}$$

$$Q_{21}^M = \frac{\begin{pmatrix}(1 - w_1^M)\alpha^2 + (23 - 11w_1^M)\alpha - \\ 72h - 120w_1^M + 90\end{pmatrix}}{3\alpha^2 + 33\alpha + 144} \tag{34}$$

$$I_1^M = \frac{2(2\alpha - 12h - 12w_1^M + 7)(\alpha + 3)}{3\alpha^2 + 33\alpha + 144} \tag{35}$$

$$I_2^M = \frac{2(2\alpha - 12h - 12w_1^M + 7)}{\alpha^2 + 11\alpha + 48} \tag{36}$$

供应商在第一周期的最优化问题可以表示为

$$\max_{w_1^M} \Pi_s^M = w_1^M \times (Q_{11}^M + Q_{21}^M) + (\alpha \times \pi_s^{M*} + (1 - \alpha) \times \pi_s^{N*}) \tag{37}$$

供应商和两个制造商的总利润分别由其第一周期利润和第二周期的期望利润组成. 将式(33)~式(36)代入式(37),联立求解得到供应商的最优

中国知网 https://www.cnki.net

批发价格为

$$w_1^{M*}=\frac{\begin{pmatrix}8\alpha^4-60\alpha^3h+115\alpha^3-564\alpha^2h+597\alpha^2-\\1\ 152\alpha h+2\ 124\alpha-864h+4\ 536\end{pmatrix}}{2\begin{pmatrix}\alpha^4+58\alpha^3+601\alpha^2+\\2\ 316\alpha+4\ 464\end{pmatrix}} \tag{38}$$

代入式(33)和式(34)得到制造商的最优订购量为

$$Q_{11}^{M*}=\frac{\begin{pmatrix}5\ 400+2\alpha^4+(12h+237)\alpha^3+\\(2\ 197-396h)\alpha^2+\\(5\ 712-5\ 328h)\alpha-11\ 232h\end{pmatrix}}{\begin{pmatrix}6\alpha^4+348\alpha^3+3\ 606\alpha^2+\\13\ 896\alpha+26\ 784\end{pmatrix}} \tag{39}$$

$$Q_{21}^{M*}=\frac{\begin{pmatrix}5\ 400-6\alpha^4+(60h+25)\alpha^3+\\(1\ 241+420h)\alpha^2+\\(5\ 376-1\ 296h)\alpha-11\ 232h\end{pmatrix}}{\begin{pmatrix}6\alpha^4+348\alpha^3+3\ 606\alpha^2+\\13\ 896\alpha+26\ 784\end{pmatrix}} \tag{40}$$

代入式(35)和式(36)得到制造商的最优库存量为

$$I_1^{M*}=\frac{2(\alpha+3)\begin{pmatrix}2\alpha^3+(53-12h)\alpha^2+\\(239-204h)\alpha-\\1\ 008h+84\end{pmatrix}}{3\begin{pmatrix}\alpha^4+58\alpha^3+601\alpha^2+\\2\ 316\alpha+4\ 464\end{pmatrix}} \tag{41}$$

$$I_2^{M*}=\frac{\begin{pmatrix}4\alpha^3+(106-24h)\alpha^2+\\(478-408h)\alpha-\\2\ 016h+168\end{pmatrix}}{\begin{pmatrix}\alpha^4+58\alpha^3+601\alpha^2+\\2\ 316\alpha+4\ 464\end{pmatrix}} \tag{42}$$

则制造商的最优销量为

$$Q_{i1}^{M*}-I_i^{M*}=\frac{\begin{pmatrix}4\ 392+864h-6\alpha^4+\\(60h+1)\alpha^3+(564h+605)\alpha^2+\\(1\ 152h+250\ 8)\alpha\end{pmatrix}}{\begin{pmatrix}6\alpha^4+348\alpha^3+3\ 606\alpha^2+\\13\ 896\alpha+26\ 784\end{pmatrix}} \tag{43}$$

将第一周期制造商的最优库存决策代入第二周期制造商和供应商最优利润的表达式(28)~式(30),得到供应商和制造商在第二周期的最优利润 π_s^{M*}、π_{m1}^{M*} 和 π_{m2}^{M*}. 同理,将第一周期的均衡决策代入供应商和制造商的期望总利润函数表达式(32)和式(37),可得供应商和制造商的期望总利润,记作 Π_j^{M*}. 基于企业在第二周期的利润和期望总利润可以得到企业在第一周期的利润为 $\Pi_j^{M*}-\pi_j^{M*}$.

供应商和制造商的最优决策和利润关于单位库存成本 h 的敏感性分析总结于表 2. 其中,对于第二周期的所有决策,如果没有出现断供,分析结论与表 1 一致;因此,后续表格仅展示出现断供时的分析结论.

表 2　单一断供风险下库存成本对最优决策和利润的影响

Table 2 Impact of inventory cost on optimal decisions and expected profits under the single-manufacturer risk

参与方	第一(二)周期决策				利润		
	批发价	订购量	销量	库存	第一周期	第二周期	总利润
供应商	↓(↑)	×(×)	×(×)	×(×)	↓	↑	↓
制造商 1	×(×)	↓(×)	↑(↓)	↓(×)	↑	↓	↓
制造商 2	×(×)	↓(↑)	↑(↓)	↓(×)	↑	↓	↓↑

对比表 1 和表 2 可知,当存在单一断供风险时,定性而言,单位库存成本 h 对于所有企业在两个周期的最优决策及其利润的影响几乎没有发生变化. 唯一的变化在于 h 对于无风险的制造商 M_2 的总利润的影响,如命题 1.

命题 1　在单一断供风险的情形中,即只有制造商 M_1 存在断供风险时,随着单位库存成本 h 上升,无风险的制造商 M_2 的总利润增大当且仅当

$$h>\frac{\begin{pmatrix}3\ 141\ 504-5\alpha^8-324\alpha^7-8\ 536\alpha^6-\\107\ 632\alpha^5-693\ 887\alpha^4-2\ 286\ 360\alpha^3-\\3\ 289\ 464\alpha^2+400\ 032\alpha\end{pmatrix}}{24\begin{pmatrix}26\alpha^6+519\alpha^5+4\ 244\alpha^4+23\ 127\alpha^3+\\115\ 236\alpha^2+428\ 112\alpha+767\ 232\end{pmatrix}}.$$

对于无断供风险情形的讨论已经表明,策略

中国知网　https://www.cnki.net

性库存的存在能够提升供应链内所有企业的利润水平,因此单位库存成本的上升总是导致企业利润的下降. 但是,在单一断供风险情形中,命题 1 表明对于无风险的制造商 M_2 而言,此时如果 h 已经足够大, h 的继续上升可能反而导致期望利润的上涨. 这是因为,随着 h 上升,最优的库存水平下降;那么,在第二周期制造商 M_1 出现断供时, M_1 只能销售少量的库存产品,而制造商 M_2 获得近似垄断者的市场地位. 假若考虑 h 极端大的情景,如果最优库存水平降为 0 ,则制造商 M_2 必然在制造商 M_1 断供时垄断市场. 也就是说,在 h 足够大时,无风险的制造商 M_2 垄断市场的潜在利益超过了策略性库存减少的潜在损失,因此制造商 M_2 的期望利润随 h 递增.

供应商和制造商的最优决策和利润关于断供发生概率 α 的敏感性分析总结于表 3. 基于表 3 可得如下重要的结论.

命题 2　在单一断供风险的情形中,即只有制造商 M_1 存在断供风险时,随着断供发生概率 α 提高.

1)无论是否面临断供风险,两个制造商的最优库存水平总是上升;

2)存在阈值 t_1^{α} ,供应商的最优批发价下降当且仅当 $\alpha < t_1^{\alpha}$.

对于制造商 M_1 而言,当断供发生时,只能销售库存产品,因此随着断供发生概率 α 提高, M_1 必然有动机持有更多的库存. 然而,命题 2 表明无风险的制造商 M_2 此时也有动机持有更多的库存. 这是一个有趣的发现,在解释 M_2 持有更多库存的动机之前,先解释供应商在第一周期的最优批发价. 随着 α 提高,两个制造商都持有更多的库存,供应商在第二周期的需求减少,因此第二周期的最优批发价必然降低,这与直觉相符. 但是,尽管制造商持有更多库存的动机增强了供应商在第一周期的需求,有趣的是,命题 2 表明只要断供发生概率不是极端高,即 $\alpha < t_1^{\alpha}$,供应商的最优批发价随 α 递减. 这是因为,在第二周期断供发生时,供应商无法向制造商 M_1 销售.

表 3　单一制造商的供应中断风险对最优决策和利润的影响

Table 3 Impact of a single-manufacturer's supply disruption risk on optimal decisions and expected profits information

参与方	第一(二)周期决策				利润		
	批发价	订购量	销量	库存	第一周期	第二周期	总利润
供应商	↓↑(↓)	×(×)	×(×)	×(×)	↑	↓	↓↑
制造商 1	×(×)	↑(×)	↑↓(↑)	↑(×)	↓	↑	↓
制造商 2	×(×)	↑(↓)	↑↓(↑↓)	↑(×)	↓↑↓	↑	↑

换言之,断供风险对于第一周期的关键零部件的供需存在两方面的影响:一方面,断供风险激励制造商持有更多的库存,增强了第一周期对于供应商的需求;另一方面,断供风险同样意味着供应商在第二周期销售机会的减少,激励供应商在第一周期向制造商促销. 断供风险激励供应商促销的直接作用强于增强供应商需求的间接作用. 因此,供应商有动机降低批发价格,在断供未发生之前,向制造商销售更多的关键零部件.

正是由于第一周期最优批发价的下降,无风险的制造商 M_2 也有动机持有更多的库存. 然而,随着 α 提高,第一周期批发价足够低之后,叠加 M_2 加大订购量对于供应商需求的影响,来自两个制造商的需求增强的间接作用在最优批发价决策中占据主导地位,此时供应商反而开始抬高批发价. 两个制造商在第一周期的最优销量随最优批发价变化,也是随着 α 提高而先增加后减少.

命题 3　在单一断供风险的情形中,即只有制造商 M_1 存在断供风险时,随着断供发生概率 α 提高.

1)面临断供风险的制造商 M_1 的期望总利润下降,无风险的制造商 M_2 的期望总利润上升;

2)存在阈值 $t_2^{\alpha} < t_1^{\alpha}$,供应商的期望总利润下降当且仅当 $\alpha < t_2^{\alpha}$.

由于第一周期最优批发价、订购量、库存和销

中国知网　https://www.cnki.net

量的复杂相互作用，当 α 极小和极大的时候，无风险的制造商在第一周期的利润都是递减的；而当 α 的取值处于中间范围的时候，无风险的制造商在第一周期的利润可能递增，也可能递减. 但是，从下游两个竞争性制造商的期望总利润的角度，制造商 M_1 所单独面临的断供风险的影响符合直觉，即面临风险的制造商 M_1 的期望总利润总是随 α 递减，无风险的竞争对手 M_2 的期望总利润总是随 α 递增.

单一制造商的低断供风险（即 $\alpha < t_2^{\alpha}$）会降低供应商的期望总利润. 这与直觉相符，因为断供风险减少了供应商的销售机会，供应商不得不降低零部件批发价格. 但是，供应商的期望总利润并不总是随断供发生概率 α 单调递减. 值得注意的是，策略性库存的存在使得制造商对于零部件的一部分需求从第二周期转移至第一周期；在终端市场需求不变的前提下，第一周期的批发价格高于第二周期的批发价格. 也就是说，断供风险使得两个制造商以相对更高的第一周期的批发价囤积了更多的库存，这对于供应商的期望总利润而言是有利的. 尤其是当 $\alpha > t_1^{\alpha}$ 时，随着 α 提高，供应商可以进一步提高第一周期的批发价同时销售更多的关键零部件，此时供应商的期望总利润肯定增加. 而当 $\alpha < t_1^{\alpha}$ 时，随着 α 提高，第一周期批发价不断降低，但是制造商囤积更多库存的需求增大了关键零部件的销售量，此时供应商的期望总利润出现非单调的变化. 与前面分析类似，当 α 足够小时，即 $\alpha < t_2^{\alpha}$，批发价格下降的直接作用占据主要影响，供应商的期望总利润下降. 否则，$t_2^{\alpha} < \alpha < t_1^{\alpha}$，两个制造商需求增强叠加之后的间接作用占据主要影响，供应商的期望总利润上升.

3.3　全面断供风险

最后，考虑一种全面断供风险，其中供应商对两个制造商的零部件供应在第二周期以概率 α 出现中断，用上标 S 标识. 在第二周期，如果没有出现断供，相关均衡利润已被记作 π_j^{N*}.

如果出现断供，供应商不能向两个制造商销售零部件，因此两个制造商都只能销售库存量. 在终端市场的逆需求函数变为

$$p_2^S(0,0) = 1 - I_1 - I_2 \tag{44}$$

此时，在第二周期，不存在订购量决策与批发价格决策. 因为没有任何零部件销售，供应商的均衡利润 $\pi_s^{S*}=0$；制造商的均衡利润为 $\pi_{mi}^{S*} = (1 - I_1 - I_2) \times I_i$.

在第一周期，制造商在终端市场的逆需求函数如式(10)所示. 制造商 M_i 在第一周期的最优化问题可以表示为

$$\begin{aligned}\max_{Q_{i1}^S, I_i^S} \Pi_{mi}^S = {} & p_1^S \times (Q_{i1}^S - I_i^S) - \\ & w_1^S \times Q_{i1}^S - h \times I_i^S + \\ & (\alpha \times \pi_{mi}^{S*} + (1-\alpha) \times \pi_{mi}^{N*})\end{aligned} \tag{45}$$

基于利润最大化的条件，得制造商的最优订购量和库存为

$$Q_{i1}^S = \frac{15 - 4\alpha w_1^S + 9\alpha - 12h - 20w_1^S}{12(\alpha + 2)} \tag{46}$$

$$I_i^S = \frac{5\alpha - 12h - 12w_1^S + 7}{12(\alpha + 2)} \tag{47}$$

供应商在第一周期的最优化问题可以表示为

$$\begin{aligned}\max_{w_1^S} \Pi_s^S = {} & w_1^S \times (Q_{11}^S + Q_{21}^S) + \\ & (1 - \alpha) \times \pi_s^{N*}\end{aligned} \tag{48}$$

将式(46)代入式(48)，求解得供应商的最优批发价格为

$$w_1^{S*} = \frac{3(7\alpha^2 + 20\alpha(1 - h) - 4h + 21)}{4(4\alpha^2 + 37\alpha + 31)} \tag{49}$$

代入式(46)和式(47)得制造商的最优订购量、库存为

$$Q_{i1}^{S*} = \frac{5\alpha^2 + (66 + 4h)\alpha - 52h + 25}{16\alpha^2 + 148\alpha + 124} \tag{50}$$

$$I_i^{S*} = \frac{10\alpha^2 + (55 - 24h)\alpha - 84h + 7}{24\alpha^2 + 222\alpha + 186} \tag{51}$$

则制造商的最优销量为

$$Q_{i1}^{S*} - I_i^{S*} = \frac{(60h + 88)\alpha - 5\alpha^2 + 12h + 61}{48\alpha^2 + 444\alpha + 372} \tag{52}$$

将第一和第二周期的均衡决策代入企业的利润表达式，得到供应商和制造商的最优决策和利润关于单位库存成本 h 的敏感性分析总结于表 4.

研究发现，在全面断供风险下，单位库存成本 h 对企业最优决策与利润的影响，与其在无断供风险下的影响无差异. 尤其是所有企业的期望总利润都随 h 递减. 这是因为，在无断供风险下，h

中国知网　https://www.cnki.net

的上升抑制了企业使用有利可图的策略性库存，因此利润下降. 在全面断供风险下，下游持有的库存进一步帮助抵御断供风险的不利影响. 因此，h 的上升进一步抑制了企业使用抵御风险的预防性库存. 总体而言，单位库存成本 h 的上升使得供应商和竞争性制造商的利润都下降；而且相对于无风险的情形，全面断供风险使得企业利润下降更多.

供应商和制造商的最优决策和利润关于断供发生概率 α 的敏感性分析总结于表 5.

表 4　全面断供风险下库存成本对最优决策和利润的影响

Table 4 Impact of inventory cost on optimal decisions and expected profits under the full-scale risk

参与方	第一(二)周期决策				利润		
	批发价	订购量	销量	库存	第一周期	第二周期	总利润
供应商	↓ (×)	× (×)	× (×)	× (×)	↓	×	↓
制造商 1	× (×)	↓ (×)	↑ (↓)	↓ (×)	↑	↓	↓
制造商 2	× (×)	↓ (×)	↑ (↓)	↓ (×)	↑	↓	↓

表 5　全面的供应中断风险对最优决策和利润的影响

Table 5 Impact of the full-scale supply disruption risk on optimal decisions and expected profits

参与方	第一(二)周期决策				利润		
	批发价	订购量	销量	库存	第一周期	第二周期	总利润
供应商	↓↑(×)	×(×)	×(×)	×(×)	↓↑	×	↓↑
制造商 1	×(×)	↑(×)	↑↓(↑)	↑(×)	↓	↑	↑↓
制造商 2	×(×)	↑(×)	↑↓(↑)	↑(×)	↓	↑	↑↓

基于表 5 可知，在全面断供风险下，断供发生概率 α 对于企业最优决策的影响，与其在单一断供风险下基本上一致. 由于断供风险的存在，制造商可能失去在第二周期新增订货的机会，而供应商同样可能失去在第二周期销售零部件的机会. 因此，随着 α 提高，关键零部件的供需双方都有动机在第一周期实现更高的库存水平. 当第一周期批发价较高时，供应商促销的动机发挥主要影响，此时最优批发价随 α 递减；而当第一周期批发价较低时，制造商囤货的动机发挥主要影响，此时最优批发价随 α 递增. 因此，总体而言，第一周期最优批发价随 α 先减后增.

断供风险类型变化之后，断供发生概率 α 对于供应商的期望总利润的影响没有出现变化. 一方面，断供风险的存在不利于供应商的零部件销售，因此相对于无风险的情形，断供风险降低了供应商的期望总利润. 另一方面，与单一断供风险情形相同，在全面断供风险下，由于最优批发价在 α 足够高时随 α 递增，因此供应商的期望总利润并不是随 α 单调递减.

然而，在全面断供风险下，α 对制造商的期望总利润的影响发生了改变.

命题 4　在全面断供风险的情形中，即两个制造商都存在断供风险时，随着断供发生概率 α 提高，存在阈值 t_3^{α}，两个制造商的期望利润都上升当且仅当 $\alpha < t_3^{\alpha}$.

对于下游的竞争性制造商而言，一个有趣的发现在于，全面断供风险并不总是会降低它们的期望总利润. 这是因为，由于断供风险的存在，供应商有在第一周期降价促销的动机，这削弱了供应链内众所周知的“双重边际效应”对于供应链利润的不利影响. 制造商可以从此得利进而获得更高的期望总利润. 此外，在第二周期断供发生之后，两个制造商都没有足够的产品在市场上销售，产品出清价格因此而上涨；这在某种意义上实现了竞争性制造商的“共谋”，减少了竞争压力导致的额外销量.

值得注意的是，本研究为了简化表述，在模型中假设了完美的产品可替代性，因此制造商的竞争极端激烈. 考虑产品的不完美替代性，即 $\delta < 1$，会显著降低激烈竞争对于制造商期望总利润的影响；此时，断供发生概率 α 提高并不总是能够导致期望总利润增加.

3.4　对比分析

在完成对于三种不同的断供风险情形的分析之后，本部分对比其中的关键决策与期望总利润

中国知网 https://www.cnki.net

进一步揭示断供风险的影响.

在第二周期断供状态实现之后的决策不再受到断供风险的影响,因此本部分专注于对比分析第一周期关键决策最优批发价和最优库存水平的变化. 在以下结论的证明过程中定义了阈值 t_4^{α} 、t_5^{α} 、t_6^{α} ②.

命题 5　断供风险对于第一周期最优批发价的影响.

1) $w_1^{N*} > \max\{w_1^{M*}, w_1^{S*}\}$;

2) $w_1^{M*} > w_1^{S*}$ 当且仅当 $\alpha < t_4^{\alpha}$.

如图 3 所示,在第一周期,断供风险的存在会降低供应商的最优批发价,也就是说,供应商总是在无断供风险时制定最高的批发价格. 这是由于担心断供风险导致第二周期销售机会的缺失,供应商不得不在第一周期断供未发生时降价促销.

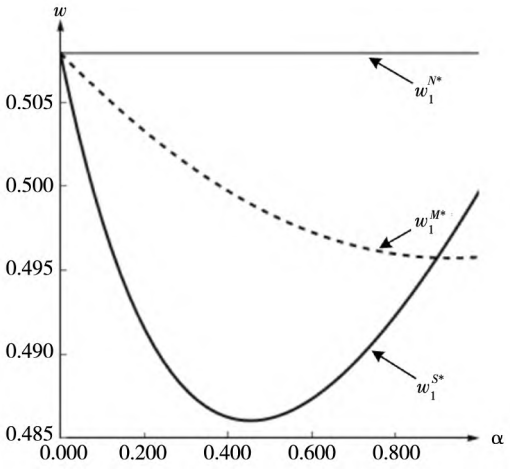

图 3　**供应中断风险对第一周期最优批发价的影响** ($h = 0.001$)

Fig. 3 Impact of the supply disruption risk on optimal wholesale price decisions in the first period ($h = 0.001$)

但是,对于供应商而言,并不是断供程度越严重,第一周期的最优批发价就越低,即相对于单一断供风险的情形,供应商可能在全面断供风险下,制定更高的批发价. 这是因为,断供风险的存在也必然激励制造商在第一周期囤积库存,随着断供发生概率 α 提高,由于库存囤积导致的需求增强效应使得供应商的最优批发价反而上涨,而且在两个制造商都面临断供风险时上涨得更快.

命题 6　断供风险对于最优库存水平的影响: $I_i^{S*} > I_1^{M*} > I_2^{M*} > I_i^{N*}$.

图 4 展示了断供风险对于最优库存水平的影响. 对于任意制造商而言,无论竞争对手是否面临断供风险,自身面临断供风险时总是会持有更多的库存. 而且,研究还发现竞争对手是否面临断供风险的状态,对于制造商的最优库存水平有显著的影响. 即,制造商无论自身是否面临断供风险,总是会在竞争对手面临风险时持有更多的库存. 这里分两种情况解释这个结论.

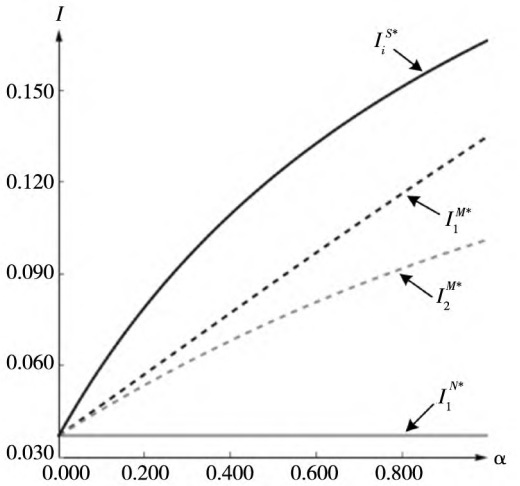

图 4　**供应中断风险对最优库存决策的影响** ($h = 0.001$)

Fig. 4 Impact of the supply disruption risk on optimal inventory decisions ($h = 0.001$)

第一,在制造商 M_2 自身不面临风险时, $I_2^{M*} > I_i^{N*}$,这是因为竞争对手面临的断供风险导致供应商的最优批发价下降,这使得制造商 M_2 的最优库存水平上升.

第二,在制造商 M_1 自身面临风险时, $I_i^{S*} > I_1^{M*}$. 尽管此时无论制造商 M_2 是否面临风险,供应商的最优批发价随断供发生概率 α 先减后增;在 α 足够大时,在全面断供风险下,供应商的最优批发价更高,为什么制造商 M_1 还是会持有更多的库存呢? 这是因为,如果竞争对手制造商 M_2 不面临断供风险,其总是可以在第二周期新增订货,制造商 M_1 的库存在第二周期的市场出清价格会因此而下降;但是当 M_2 也面临风险时,由于第二周期可能没有任何新增的订货, M_1 的库存价值上升. 也就是说,在制造商自身面临风险时,竞争对手面临的断供风险提高了库存的市场价值,因此制造商愿意持有更多的库存,即使高的市场价值

② 此部分省略,如需证明过程, 请联系作者索取.

中国知网　https://www.cnki.net

推高了最优批发价.

命题 7　断供风险对于期望总利润的影响.

1) 对于制造商而言, $\Pi_{m2}^{M*} > \max\{\Pi_{mi}^{S*}, \Pi_{mi}^{N*}\} > \Pi_{m1}^{M*}$, 其中 $\Pi_{mi}^{S*} > \Pi_{mi}^{N*}$ 当且仅当 $\alpha < t_5^{\alpha}$;

2) 对于供应商而言, $\min\{\Pi_s^{N*}, \Pi_s^{M*}\} > \Pi_s^{S*}$, 其中 $\Pi_s^{N*} < \Pi_s^{M*}$ 当且仅当 $\alpha > t_6^{\alpha}$.

此分析揭示了不同断供风险情形对于供应链上下游企业期望总利润的影响, 如图 5 和图 6 所示.

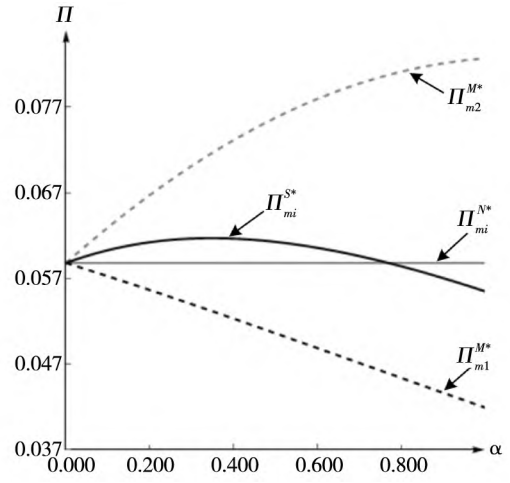

图 5　供应中断风险对制造商期望总利润的影响 ($h = 0.001$)

Fig. 5 Impact of the supply disruption risk on the manufacturers' expected total profits ($h = 0.001$)

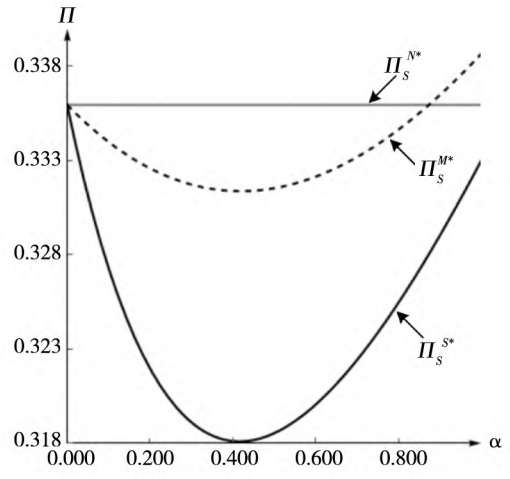

图 6　供应中断风险对供应商期望总利润的影响 ($h = 0.001$)

Fig. 6 Impact of the supply disruption risk on the supplier's expected total profit ($h = 0.001$)

对于竞争性制造商而言, 显然, 最为有利的情形是自身不面临断供风险而且竞争对手面临断供风险; 与之相反则是最为不利的情形. 在前文对于全面断供风险情形的分析已知, 由于随断供发生概率递增的最优库存水平可以抑制制造商之间的过度竞争, 因此制造商在全面断供风险下可能获得超过无风险情形的期望总利润. 但是, 值得注意的是, 这个解析结论的前提是本研究模型假设了竞争性制造商产品的完美可替代性, 随着产品可替代性降低, 为应对断供风险而增加的库存在抑制过度竞争方面的效果大打折扣, 制造商并不能从断供风险中受益.

对于供应商而言, 全面断供风险是最为不利的情形. 尽管在大部分情况下, 无断供风险是最优情形; 然而, 研究发现单一断供可能在断供发生概率极高时成为供应商视角下的最优情形. 这是由于两方面的原因在起作用. 第一, 单一制造商断供并不会完全消除供应商在第二周期的零部件销售机会, 也就是说, 单一制造商断供风险确实对供应商造成了不利影响, 但是相对于全面断供风险来说, 不利的影响是非常有限的; 第二, 由于策略性库存的存在迫使供应商在第二周期降低批发价, 而断供风险可以刺激制造商在第一周期以相对更高的批发价提前采购, 这有助于提升供应商的期望总利润. 随着断供发生概率提高, 竞争性制造商在第一周期的采购量和库存水平上升. 因此, 当断供风险足够高时, 单一断供风险可能增大供应商的期望总利润.

4　模型拓展与分析

4.1　供应商产能约束

在产业实践中, 供应商的产能并非无限. 因此, 本研究的拓展模型引入供应商产能限制参数 K. 而且, 拓展部分假设在“无断供风险”的情形中, 供应商产能可以满足制造商的正常需求, 即 $K \geqslant (25 - 52h)/62$. 然而, 由于断供风险的存在, 制造商有囤积库存的动机, 导致第一周期的订货量增加, 可能出现供应商产能不足的情况.

为了解析供应商产能的影响, 拓展部份在“单一断供风险”和“全面断供风险”两种情形的供应商最优化问题中引入新的约束条件

中国知网　https://www.cnki.net

$$Q_{11} + Q_{21} \leqslant K \tag{53}$$

并且得到如下结论. 在命题 8 的证明过程中定义了阈值 t_K^M 和 t_K^S ③.

命题 8　供应商产能约束的影响.

1)在“单一断供风险”情形中当 $K \geqslant t_K^M$,或者在“全面断供风险”情形中当 $K \geqslant t_K^S$,供应商产能约束不起作用,所有的最优决策和均衡利润与 K 无关;

2)否则,在第一周期,供应商的最优批发价格随 K 递减,而制造商的最优订购量及其最优库存水平随 K 递增;所有企业的总利润随 K 递增.

上述结论表明供应商产能的影响符合直觉. 如果产能足够大,供应商的最优决策不受产能约束的影响,所有的均衡结果保持不变. 如果产能足够小,在第一周期,关键零部件供不应求的状态促使供应商提高批发价格,也就是说,随着供应商产能 K 的减少,最优批发价格上升. 另一方面,由于零部件价格的上升,所有制造商的最优订购量及其最优库存水平下降. 所有企业的总利润都因为产能约束受损,也就是说,随着供应商产能 K 的减少,总利润减少.

上述结论揭示了供应商产能对供应链各方决策及其利润的影响. 当供应商产能足够大,产能约束对供应商的最优决策无影响,供应链系统能够保持原有的均衡状态. 然而,当供应商产能受限,均衡发生了显著变化. 供应商为了最大化其利润,会选择提高批发价格以平衡有限的供应和超量的需求. 制造商不得不面对更高的采购成本,进而减少订购量和库存水平. 此外,产能约束导致的供不应求状态会降低整个供应链的总体效率,所有企业因此而利润受损.

进一步的数值分析表明,由于产能约束对于企业总利润的负面影响,相对于基准模型中的均衡结果,所有企业都更加偏好“无断供风险”的情形.

4.2　不确定断供风险

在产业实践中,断供风险难以准确估计,这促使研究对断供风险的不确定性进行更深入的探讨. 为了在模型中体现这种不确定性,研究引入了一个扩展假设,即断供发生概率表示为 $\alpha + \varepsilon$,其中 α 表示断供风险的确定性部分,而新增参数 ε 刻画断供风险的不确定性部分. 不失一般性,假设参数 ε 的均值为 0 ,标准差为 σ .

由于模型拓展导致的复杂性,完整的解析方法无法用于揭示断供风险不确定性的具体影响. 为了克服这一挑战,研究转向数值分析方法. 通过构建一系列的数值模拟,本研究能够定量观察到断供风险不确定性在不同情形中对企业关键决策及其利润的影响. 首先,为了分析断供风险的不确定性 ε 对制造商库存决策的影响,本研究进行了特殊值取值分析和绘图. 对于库存成本系数 $h \leqslant 1/12$,本研究分别取值 $h = 0.02, 0.07, 0.12$,对于断供风险概率 $\alpha \in [0, 1]$,本研究分别取值 $\alpha = 0.2, 0.5, 0.8$. 基于库存成本系数 h 、断供风险概率 α 的特殊值以及前文单一断供风险、全面断供风险下得到的制造商最优库存策略,可得到最优库存对于不确定性 ε 的敏感性分析. 图 7 展示了断供风险的不确定性 ε 对制造商库存决策的单调影响,其中 $h = 0.02$ 、$\alpha = 0.5$. 同理,可得到断供风险的不确定性 ε 对供应商和制造商最优利润的影响.

首先,如图 7 所示,随着断供风险不确定性的增加,制造商倾向于增加库存水平,以此来应对潜在的供应中断. 值得强调的是,这一趋势与具体断供风险类型(单一断供或者全面断供)无关. 这个结论符合直觉,因为囤积库存正是制造商为了应对供应不确定性而采取的措施.

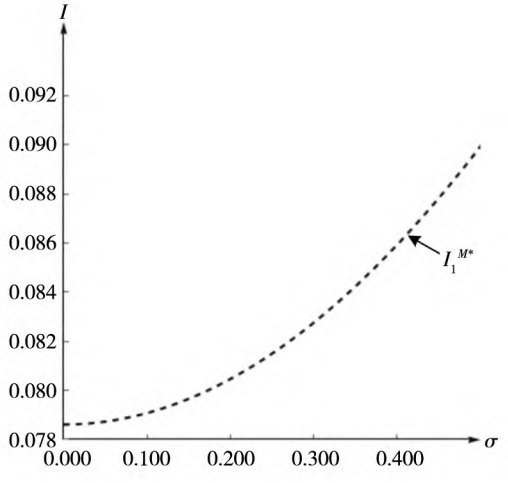

图 7　供应中断风险不确定性对库存的影响

Fig. 7 Impact of the supply disruption risk uncertainty on the inventory

③　此部分省略,如需证明过程, 请联系作者索取.

中国知网　https://www.cnki.net

其次，如图 8 所示，在单一断供风险情形中，断供风险不确定性的增加导致有风险的制造商 M_1 的期望总利润持续下降，而无风险的制造商 M_2 的期望总利润表现出先上升后下降的趋势.

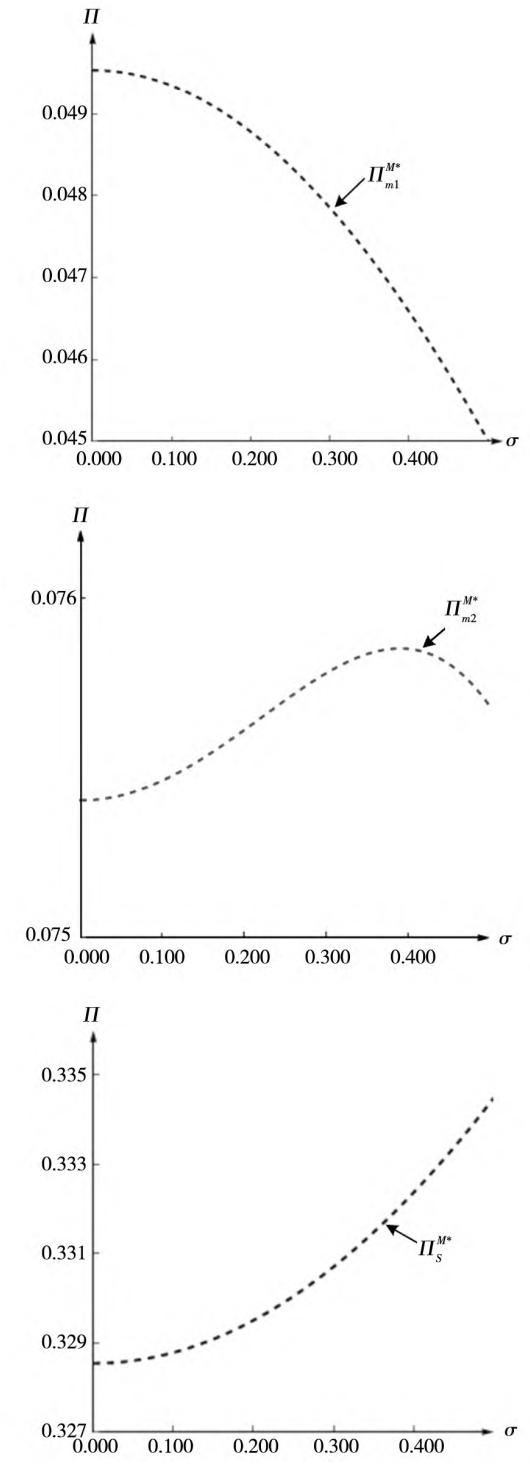

图 8　供应中断风险不确定性对企业期望总利润的影响（$h=0.02$，$\alpha=0.5$）

Fig. 8 Impact of the supply disruption risk uncertainty on the firms' expected total profit ($h=0.02$, $\alpha=0.5$)

同时，供应商的期望总利润总是上升. 这表明，在此情形中，不确定性可以反转断供风险对于企业利润的影响. 尤其是对于供应商而言，期望总利润随断供发生概率的期望值（α）递减，但是随断供发生概率的标准差（σ）递增. 这种现象的背后逻辑在于，断供风险的不确定性进一步刺激了制造商对于库存的需求，进而使得供应商能够在第一周期以相对更高的批发价格销售更多的关键零部件. 因此，不难理解，断供风险不确定性的增加虽然对制造商不利，但却有利于供应商.

最后，与直觉相符，在全面断供风险情形中，断供风险不确定性的增加总是导致供应商的期望总利润上升，而制造商的期望总利润下降.

5　结束语

全球范围内的一些顶尖技术被少量的关键零部件供应商掌握，由于自然灾害、贸易摩擦、军事冲突等突发意外事件的影响，下游制造商的供应有可能发生中断. 华为公司在遭受美国政府行政禁令之前大量囤积芯片的行为表明了企业有动机通过持有库存应对供应中断的风险. 而且，在贸易摩擦背景下出台的限制性政策可能波及我国特定行业中单一制造商或全部（竞争性）制造商. 这给我国的企业和政府带来了前所未有的挑战；面对这些挑战，制定合理的应对策略时必须要考虑到竞争因素的影响. 本研究在一个两级供应链中，考虑了不同的供应中断情形，研究了下游的竞争性制造商如何运用库存策略及其对于供应链上下游企业期望利润的影响. 本研究的主要结论与管理启示如下.

第一，制造商应对断供风险的库存策略与自身以及竞争对手的风险状态密切相关. 具体而言，无论竞争对手是否面临风险，制造商的最优库存水平总是随自身断供发生概率递增；无论自身是否面临风险，制造商的最优库存水平也总是随竞争对手断供发生概率递增. 这个结论表明在存在断供风险的不确定行业中，制造商不但应当密切关注自身的风险变化，而且必须密切关注竞争对手的风险变化，以便做出最优的库存决策.

第二，本研究探讨竞争性企业应对断供风险的最优库存水平，单位库存成本和断供发生概率

中国知网　https://www.cnki.net

是关键影响因素. 单位库存成本的影响非常直观，但是断供发生概率对于最优批发价会出现复杂的非单调的影响. 在供应中断发生之前(即第一周期)，随着单位库存成本的上升，最优库存水平、最优批发价、最优采购量都会下降；随着断供发生概率的提高，尽管最优库存水平和最优采购量会上升，最优批发价会先下降再上升. 这个结论提醒了制造商必须警惕关键零部件供应商在“最后时刻”敲竹杠的投机行为，密切关注断供风险的变化趋势，以便在供应商借机涨价之前，调整采购量和库存水平.

第三，竞争性制造商总是有强烈的动机维护自身的供应安全，但是关键零部件供应商未必有动机维护所有制造商的供应安全. 对于单一的制造商而言，最为有利的情形肯定是自身不面临断供风险而竞争对手面临断供风险. 但是，对于供应商而言，针对单一制造商的高断供风险能够带来最大化的期望总利润. 这个结论有着非常重要的政策启示，我国的企业管理者和政策制定者不能以为关键供应商为了销售零部件就一定会帮助维护供应链韧性与安全；恰恰相反，关键零部件供应商有动机刻意营造针对单一制造商的断供风险.

本研究为供应商和制造商利用库存策略应对关键零部件断供风险提供了思路. 一些可能的未来研究方向如下. 一方面，本研究的两周期模型可以拓展为多周期模型，用以检验主要结论是否依旧成立. 另一方面，未来研究还可以考虑不确定的市场需求、不对称的信息结构等复杂因素的影响.

参 考 文 献：

[1] Economic Daily. Strive to improve the resilience and security level of the industrial chain and supply chain[EB/OL]. http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588134/c26961805/content.html, 2023.

[2] Financial Times. China strives to achieve “independent and controllable” chips[EB/OL]. https://www.ftchinese.com/story/001083011/ce? ccode = LanguageSwitch&archive, 2019.

[3] Sohu.com. Under the ban, security giants Hikvision and Dahua responded[EB/OL]. https://www.sohu.com/a/346112179_128469, 2019.

[4] Financial Times. US: China's suspension of rare earth exports will cause a “major shock”[EB/OL]. http://www.ftchinese.com/story/001083091/ce? ccode = LanguageSwitch&exclusive&archive, 2019.

[5] McKinsey & Company. COVID-19: Implications for business[EB/OL]. https://www.mckinsey.com/capabilities/risk-and-resilience/our-insights/covid-19-implications-for-business, 2022.

[6] Nikkei Asia. Japanese chipmakers scramble to replace Huawei sales after US ban[EB/OL]. https://asia.nikkei.com/Spotlight/Huawei-crackdown/Japanese-chipmakers-scramble-to-replace-Huawei-sales-after-US-ban, 2020.

[7] 高　雅. 美国顶尖芯片企业高管呼吁拜登政府避免进一步出口限制，成效如何？[EB/OL]. https://www.yicai.com/news/101811569.html, 2023.
Gao Ya. US leading chip-company executives call on the Biden administration to avoid further export restrictions: How effective? [EB/OL]. https://www.yicai.com/news/101811569.html, 2023. (in Chinese)

[8] 中华人民共和国商务部. 不可靠实体清单规定：商务部令 2020 年第 4 号[EB/OL]. http://www.mofcom.gov.cn/article/b/fwzl/202009/20200903002593.shtml, 2020.
Ministry of Commerce of the People's Republic of China. Provisions on the Unreliable Entity List: MOFCOM Order No. 4 of 2020[EB/OL]. http://www.mofcom.gov.cn/article/b/fwzl/202009/20200903002593.shtml, 2020. (in Chinese)

[9] 潘　伟. 基于供应中断风险的模糊多目标订单分配模型[J]. 管理科学学报, 2015, 18(3): 45 - 51.
Pan Wei. Fuzzy multi-objective order allocation model with supply disruption[J]. Journal of Management Sciences in China, 2015, 18(3): 45 - 51. (in Chinese)

[10] Bo H, Chen Y, Li H, et al. Time-sensitive supply chain disruption recovery and resource sharing incentive strategy[J]. Journal of Management Science and Engineering, 2021, 2(6): 165 - 176.

[11] Meyer R, Rothkopf M, Smith S. Reliability and inventory in a production-storage system[J]. Management Science, 1979, 25(8): 799 - 807.

中国知网　https://www.cnki.net

[12]Bielecki T, Kumar P. Optimality of zero-inventory policies for unreliable manufacturing systems[J]. Operations Research, 1988, 36(4): 532 – 541.

[13]Song J, Zipkin P. Inventory control with information about supply conditions[J]. Management Science, 1996, 42(10): 1409 – 1419.

[14]Tomlin B. On the value of mitigation and contingency strategies for managing supply chain disruption risks[J]. Management Science, 2006, 52(5): 639 – 657.

[15]Ang E, Lancu D, Swinney R. Disruption risk and optimal sourcing in multitier supply networks[J]. Management Science, 2017, 63(8): 2397 – 2419.

[16]Hou J, Zhao S, Wang H M, et al. Sourcing decisions with capacity reservations under supply disruptions[J]. Journal of Management Science and Engineering, 2019, 2(2): 132 – 159.

[17]Dong L, Tomlin B. Managing disruption risk: The interplay between operations and insurance[J]. Management Science, 2012, 58(10): 1898 – 1915.

[18]Kouvelis P, Li J. Contingency strategies in managing supply systems with uncertain lead-times[J]. Production and Operations Management, 2012, 21(1): 161 – 176.

[19]Xua J P, Feng G Z, Chin K S, et al. Supply chain decisions and coordination in the presence of an imperfect spot market [J]. Journal of Management Science and Engineering, 2021, 1(8): 32 – 48.

[20]Saghafian S, Van Oyen M. Compensating for dynamic supply disruptions: Backup flexibility design[J]. Operations Research, 2016, 64(2): 390 – 405.

[21]Simchi-Levi D, Wang H, Wei Y H. Increasing supply chain robustness through process flexibility and inventory[J]. Production and Operations Management, 2018, 27(8): 1476 – 1491.

[22]王 静, 陈 希. 考虑供应链中断风险的制造商风险应对方案研究[J]. 工业工程与管理, 2019, 24(3): 27 – 34.
Wang Jing, Chen Xi. Manufacturer's risk response under supply chain disruption risk[J]. Industrial Engineering and Management, 2019, 24(3): 27 – 34. (in Chinese)

[23]孙胜楠, 王新平, 薛巍立, 等. 纵向产品差异化下基于价格调整的供应中断管理策略研究[J]. 管理工程学报, 2019, 33(3): 80 – 93.
Sun Shengnan, Wang Xinping, Xue Weili, et al. Price adjustment against supply disruption under vertical product differentiation[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2019, 33(3): 80 – 93. (in Chinese)

[24]陈 静, 魏 航, 谢 磊. 商业保险在供应链质量风险管理中的应用研究[J]. 管理科学学报, 2019, 22(1): 80 – 93.
Chen Jing, Wei Hang, Xie Lei. The application of business insurance into the management of quality risks in supply chain [J]. Journal of Management Sciences in China, 2019, 22(1): 80 – 93. (in Chinese)

[25]Lucker F, Chopra S, Seifert R. Mitigating product shortages due to disruptions in multi-stage supply chains[J]. Production and Operations Management, 2021, 30(4): 941 – 964.

[26]Hu X, Gurnani H, Wang L. Managing risk of supply disruptions: Incentives for capacity restoration[J]. Production and Operations Management, 2013, 22(1): 137 – 150.

[27]曾能民, 曾冬玲, 任延海. 考虑供应风险的竞合供应链决策研究[J]. 管理科学学报, 2023, 26(4): 175 – 192.
Zeng Nengmin, Zeng Dongling, Ren Yanhai. Equilibrium decisions for co-opetition supply chains with supply risk[J]. Journal of Management Sciences in China, 2023, 26(4): 175 – 192. (in Chinese)

[28]Babich V, Burnetas A, Ritchken P. Competition and diversification effects in supply chains with supplier default risk[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2007, 9(2): 123 – 146.

[29]Tang S, Gurnani H, Gupta D. Managing disruptions in decentralized supply chains with endogenous supply process reliability[J]. Production and Operations Management, 2014, 23(7): 1198 – 1211.

[30]何 波, 张 霞. 管理供应风险: 基于数量柔性采购的视角[J]. 系统工程学报, 2017, 32(6): 855 – 864.
He Bo, Zhang Xia. Managing supply risks: A perspective from quantity flexibility procurement[J]. Journal of Systems Engineering, 2017, 32(6): 855 – 864. (in Chinese)

[31]牛保庄, 许浩涛, 李启洋, 等. 考虑供应中断的关键进口零部件本土替代及采购策略调整[J]. 系统工程理论与实

中国知网 https://www.cnki.net

践，2022，42(11)：2881 – 2890.
Niu Baozhuang，Xu Haotao，Li Qiyang，et al. Procurement strategy adjustment and local substitution of imported key component considering supply disruption[J]. Systems Engineering—Theory & Practice，2022，42(11)：2881 – 2890.（in Chinese）
[32]陈金晓，陈　剑. 考虑断链风险的供应链绩效测度与 Nash 谈判[J]. 管理科学学报，2023，26(1)：1 – 18.
Chen Jinxiao，Chen Jian. Supply chain performance measurement and Nash bargaining considering the risk of chain break[J]. Journal of Management Sciences in China，2023，26(1)：1 – 18.（in Chinese）
[33]Anand K，Anupindi R，Bassok Y. Strategic inventories in vertical contracts[J]. Management Science，2008，54(10)：1792 – 1804.
[34]Arya A，Mittendorf B. Managing strategic inventories via manufacturer-to-consumer rebates[J]. Management Science，2013，59(4)：813 – 818.
[35]Guan H，Gurnani H，Geng X，et al. Strategic inventory and supplier encroachment[J]. Manufacturing & Service Operations Management，2019，21(3)：536 – 555.
[36]Roy A，Gilbert S，Lai G. The implications of visibility on the use of strategic inventory in a supply chain[J]. Management Science，2019，65(4)：1752 – 1767.
[37]Dong C，Liu Q. Who carries strategic inventory? Manufacturer or retailer[J]. Naval Research Logistics，2022，69(3)：390 – 402.
[38]Wu L，Wu X，Zhou Y. Commitment strategies and inventory decisions under supply disruption risk[J]. Production and Operations Management，2023，32(8)：2619 – 2637.
[39]Liu Z，Zhang D，Zhang F. Information sharing on retail platforms[J]. Manufacturing & Service Operations Management，2021，23(3)：606 – 619.

Inventory strategies for mitigating disruption risk of critical components in competitive supply chains

ZHOU Yu[1]，*LI Qin*[1]，*WU Xiao-le*[2]*

1. School of Economics and Business Administration，Chongqing University，Chongqing 400044，China；
2. School of Management，Fudan University，Shanghai 200433，China

Abstract：Supply chain disruptions for critical components have become increasingly prominent，posing significant risks to key industries and manufacturers. This paper investigates strategic inventory management as a means to address disruption risks for critical components in a competitive environment. Considering a supply chain model consisting of one supplier and two competitive manufacturers，this paper analyzes a two-period game. In the second period，one or both manufacturers may face supply disruptions due to various reasons. Consequently，manufacturers have an incentive to strategically stockpile inventory in the first period. This analysis reveals that optimal inventory strategies are heavily influenced by the disruption risks faced by both the focal manufacturer and its competitor. As disruption risks increase，the optimal wholesale price of critical components and the expected profits of all firms exhibit non-monotonic changes. Interestingly，the disruption risk faced by a single manufacturer can enhance the supplier's expected profit. This finding suggests that suppliers might deliberately create disruption risks for one manufacturer，necessitating a governmental response with credible threats of sanctions to improve supply security.

Key words：supply disruption；critical components；inventory strategies；market competition；game theory

中国知网　https://www.cnki.net