

考虑供应中断的供应链稳定性和产量决策模型



郝玲珂*

武汉纺织大学管理学院, 湖北武汉 430300

摘要: 随着供应链中断风险的日益暴露, 中断管理作为一个重要的研究课题, 近年来引起了学者们的广泛关注, 而通过回收再制造缓解制造商供应中断问题的有效方法之一却被忽视。对制造商来说, 再制造商可以提供再制造产品、帮助缓解生产压力、赢得优势, 领先同行。消费者作为供应链的需求端和产品的最终体验者, 其是否愿意支付更高的费用帮助制造商渡过难关, 这将影响到制造商是否盈利。基于以上背景, 计划针对上游供应商供应中断的问题, 通过构建供应商和再制造商的博弈模型系统分析了两方主体的最优策略选择。然后通过数值仿真分析, 讨论各主体的最优策略。结果表明, 原制造商需努力提升自身稳定性, 满足市场需求; 再制造商实现盈利后可以发展新产品的开发, 提高自身竞争力的同时实现长久盈利; 对于消费者来说, 支持再制造, 可以减少碳排放, 实现资源的有效利用。

关键词: 供应中断; 供应链稳定性; 产量决策; Stackelberg 博弈

DOI: [10.57237/j.wjmst.2023.03.002](https://doi.org/10.57237/j.wjmst.2023.03.002)

Supply Chain Stability and Output Decision Model Considering Supply Disruption

Hao Lingke*

School of Management, Wuhan Textile University, Wuhan 430200, China

Abstract: With the increasing exposure of supply chain disruption risk, disruption management, as an important research topic, has attracted extensive attention of scholars in recent years, while one of the effective methods to alleviate the supply disruption problem of manufacturers through recycling and remanufacturing has been ignored. For manufacturers, remanufacturing can provide relief of production pressure, win advantages and lead the industry. As the demand-side of the supply chain and the final experience of the product, whether consumers are willing to pay higher fees to help manufacturers overcome difficulties will affect whether manufacturers are profitable. Based on the above background, the plan aims at the problem of supply disruption of upstream suppliers, and systematically analyzes the optimal strategy choice of the two parties by constructing a game model of suppliers and remanufacturers. Then, through numerical simulation analysis, the optimal strategy of each agent is discussed. The results show that the original manufacturers should strive to improve their stability and meet the market demand; Remanufacturers can develop new product development after making profits, improve their competitiveness and achieve long-term profits at the same time; For consumers, supporting remanufacturing can reduce carbon emissions and achieve effective use of resources.

*通信作者: 郝玲珂, 2577622342@qq.com

Keywords: Supply Interruption; Supply Chain Stability; Yield Decision; Stackelberg Game

1 引言

供应链上的任何环节发生中断都会使整个供应链无法正常运行。大规模定制和准时化生产理念开始在全球蔓延, 导致越来越多的企业开始以精益生产为企业的发展目标。2001年“911”事件给汽车行业带来了巨大的冲击, 物流中断、国外采购的零件无法及时运输, 材料紧缺, 导致丰田、福特等汽车制造商停产, 其中, 福田的产量比原计划下降了13%, 严重影响了整个行业的发展。2019年, 美国发布“实体名单”, 将华为及其子公司纳入出口管制, 这一举措引发了华为高端芯片的供应中断, 使得华为手机的价格大幅度提升, 从而造成了市场的供大于求的局面。

为了降低和预防供应中断可能导致的社会问题, 供应链中其它成员会制定策略激励企业尽快恢复生产, 保证市场供应和总体价格平稳, 稳定社会秩序。再制造作为一个高效快速解决供应中断问题的方法越来越受关注, 首先, 再制造品绿色环保, 目前的许多产品还未物尽其用就面临被丢弃, 这样不仅浪费了大量宝贵的物质资源, 同时还加重了社会和生态环境的负担, 再制造的出现就很好的解决了这一问题, 其次, 再制造品在生产过程中所消耗的资源与能源远低于新产品生产所消耗的资源与能源, 据徐滨士所示: 新制造一台汽车的能源损耗是再制造一台汽车能源损耗的6倍, 再制造一台汽车发动机的能耗是新制造的1/11, 再制造一台汽车发电机的能耗是新制造的1/7, 新制造1台洗车发动机关键件的能耗是再制造的2倍, 再制造一台柯达照相机的能源需求不到新制造照相机的2/3 [33]。另, 跟据 Giuntini 等人: 在全球范围内, 每年再制造活动可以节约400万亿BTU热量, 这相当于节约原材料1400万吨, 1600万桶原油和5亿美元的成本。与此同时, 通过再制造可以避免大量的不可再生资源的过度开采, 有助于实现能源的可持续发展和经济的健康发展[34]。

消费者支付意愿成为近年来企业越来越关注的问题之一。Wertenbroich 和 Skiera 将 WTP 一词概念化为“买方愿意为给定数量的商品支付的最高价格”。最近的许多实证研究表明, 消费者会为自己中意的产品支付更多的费用。例如, Kimberly 等确定了消费者愿意为

当地生产的硬苹果酒支付溢价, 并考察影响这种溢价的因素[27]; 通过二元 Logistic 回归模型分析并测度消费者对生鲜猪肉可追溯体系的支付意愿及其影响因素 [16]。

基于上述背景, 我们计划构建考虑供应中断和消费者支付意愿的供应链模型, 研究当发生供应中断时, 消费者支付意愿对供应链中成员的决策的影响, 探究如何进一步实现企业资金的有效利用和社会资源的有效配置, 为企业的发展和资金的有效利用提供理论参考。

2 文献综述

2.1 关于供应中断的研究

物流流的中断会给供应链合作伙伴造成严重的财务损害, 甚至危及其生存。为了应对这种风险, 供应链风险管理的研究文献中提出了几种主动和反应的缓解策略。Kazi 等提出了基于库存的中断风险缓解模型, 为原制造商提供了供应中断下的一种解决方案[6]; 孔进等对时间敏感性供应链进行研究, 分析了市场中有两个原制造商和两个供应商的情况, 提出了由原制造商援助供应商的方法来解决供应中断的问题[7]; 王海军等建立了以零售商为领导者、供应商为追随者的博弈模型, 博弈方法是 Stackelberg 博弈, 研究了零售商对供应商的可靠性建设成本、备用生产成本分别进行补贴或同时进行补贴时, 对整个供应链的可靠性影响 [1]; Huang 等探讨了由零售商领导的, 原制造商追随的两级供应链系统, 分析了不同政府补贴措施和协调策略下供应链的定价决策、防疫努力水平和成本分担率[4]; Tsao 等研究考察了不同的补贴模式(可再生能源信贷、供应商补贴和零售商补贴), 寻找扰动风险下可持续能源供应的双赢补贴模式[8]; Xiao 等考察了信息共享与非信息共享两种策略下的 CCLCs 与政府(行政与非行政两种策略下的行为空间)之间的相互作用, 防止冷链断裂事件发生时的社会损失和恢复成本, 研究中用到了演化博弈的理论[9]; Sammi 等指出供应中断后买方可向其首选供应商提供激励以提高其

流程可靠性，这些激励可以是直接的（投资补贴），也可以是间接的（夸大的订货量）[14]；Saurabh 等通过对企业韧性的运作来理解供应链中断导向的企业如何发展对供应链中断的韧性[15]。

2.2 关于消费者支付意愿的研究

消费者支付意愿成为近年来企业越来越关注的问题之一。Wertenbroich 和 Skiera 等将 WTP 一词概念化为“买方愿意为给定数量的商品支付的最高价格”。最近的许多实证研究表明，消费者会为自己中意的产品支付更多的费用。例如，Kimberly 等确定了消费者愿意为当地生产的硬苹果酒支付溢价，并考察影响这种溢价的因素[27]；崔春晓等通过二元 Logisitc 回归模型分析并测度消费者对生鲜猪肉可追溯体系的支付意愿及其影响因素[16]；Alsubhi 等探讨了消费者是否愿意为更健康的食品支付更多的费用，并确定了影响支付意愿的关键因素[18]；Zhang 等探讨了消费者对人工智能设计的看法，以及消费者是否更愿意为人工智能设计的产品买单[19]；Smetana 等使用元回归分析来研究对养殖海产品和水产养殖产品的支付意愿（WTP）的变化[20]；Hossain 等分析了孟加拉国的消费者是否愿意为更高质量的帕伽修斯付出更多的代价[21]；Nascimento 等对巴西北部居民进行了一项横断面研究，调查他们对 70% 有效的 HIV 假想疫苗的支付意愿[22]；Canarslan 等研究在线大规模定制中，产品设计过程中的感知产品价值和心流体验对支付意愿和购买概率的影响[23]；Zhang 等研究中国消费者是否愿意为生态标签付费，以及他们的支付意愿（WTP）如何确定[24]；Oluoch 等研究了社区居民对太阳能的支付意愿[25]；Morone 等证明了存在“绿色溢价”，即消费者对生物基产品的支付意愿高于传统产品[26]；Athie 等研究了巴西北方地区居民是否愿意支付一种针对查加斯病的假想疫苗（有效保护 80%）[28]；Lai 等研究了消费者是否愿意为动物福利属性支付溢价[29]；Zhan 等探讨了消费者对强化转基因食品标签偏好的异质性，消费者偏好如何受到标签信息的影响，以及这些偏好不同消费者中的差异[31]；Otieno 等研究了发展中国家情境下消费者对福利属性的偏好[32]。

综上所述，虽然已有较多的文献对供应中断和消费者支付意愿这两个问题进行了较为深刻的研究与探讨，但是均相对独立，在考虑供应中断下、采取再制造商帮助的方式恢复生产，并同时探讨消费者支付意

愿的文献比较少见。例如，大量文献研究了面临或已经出现供应中断风险时，制造商或供应链中其他成员参与帮助制造商应对难题，但没有结合消费者支付意愿的研究[1-15]；许多文献针对消费者进行研究，分析消费者不同态度或行为对企业利润带来的影响，但鲜有文献涉及到企业努力程度对消费者支付意愿的影响[16-32]。因此，本文计划将供应中断与消费者支付意愿相结合，研究供应链中成员的决策问题，为企业的发展提供建议、为企业资金合理利用提供理论参考。

3 模型描述与模型假设

3.1 模型描述

本文构建的 Stackelberg 博弈模型如图 1 所示，本文考虑分散决策下一个不可靠的原制造商（不可靠原因是原制造商生产时所需要的必要零件由其上游供应商供应）和一个再制造商组成的供应链系统。供应中断前，原制造商生产的产品可满足市场需求，中断发生后，原制造商的生产线上不会有任何产品输出，原制造商可通过自主研发恢复生产，同时，再制造商帮助原制造商恢复生产而进入市场，再制造商通过回收二手产品再制造新产品实现盈利，由于再制造商所能回收的二手产品数量有限，故再制造产品的数量小于或等于原市场中存在的产品数量。

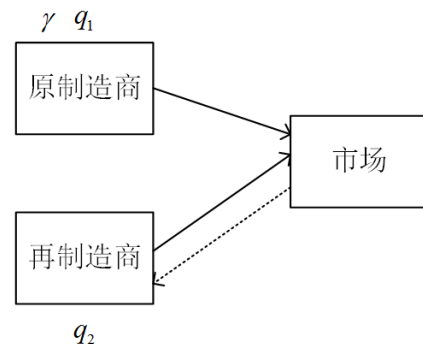


图 1 原制造商和再制造商博弈模型

在这个模型中，原制造商及再制造商面临的市场需求是连续变化的函数，根据经济学基本需求法则，市场需求与市场价格负相关。为数学计算简便，假设产品的价格与零售商投放到市场中的数量是线性关系，即 $p = d - q$ ， p 是市场价格， d 为产品的市场需求规模， q 为原制造商及再制造商共同投放到市场中的数量。

原制造商恢复生产的投入成本为 $C = \frac{1}{2} \beta \gamma^2$, β 为备用生产成本系数, γ 为原制造商在中断情况的概率。投入成本由原制造商承担。 p_1 为供应中断后原制造商与再制造商的销售价格。由市场需求函数可知, 市场价格与原制造商及再制造商共同投放到市场中的数量有关, 因此供应中断后原制造商售价与再制造商售价相等。 q_1 为供应中断后原制造商产量, 是原制造商的决策变量。当发生供应链中断时, 原制造商不能满足市场的需求, 再制造商为帮助原制造商满足市场需求而加入供应链, 原制造商努力恢复供应链满足生产需求, 恢复后的产量为 q_1 。

本文中的符号说明如表 1 所示:

表 1 模型参数

参数	含义
p	供应中断前原制造商出售产品的价格
c_0	原制造商的单位生产成本
c_m	再制造商的单位回收成本
c_r	再制造商的单位生产成本
q	供应中断前原制造商产量
β	为备用生产成本系数
z	消费者购买再制造产品的概率
决策变量	含义
γ	原制造商的稳定性水平 ($0 \leq \gamma < 1$)
q_1	供应中断后原制造商产量
q_2	供应中断后再制造商产量

3.2 模型假设

1. 假设供应中断发生后, 原制造商将在原有生产线不会有任何产品输出。
2. 假设 $c_m + c_r \leq c_0$ 。
3. 假设原制造商可以通过自身创新, 研发新产品来增强供应链可靠性, 减小供应发生中断的概率, 同时会产生一定的投入成本。

4 模型建立与求解

4.1 模型的建立

在这个模型中, 我们假设再制造商的再制造率为 100%, 再制造商以价格 c_m 向市场回收二手产品, 再制造商的单位再制造成本为 c_r , 根据上文的价格需求函数, 原制造商及再制造商均以 p_1 向市场出售商品, 消

费者对于再制造产品会有愿意购买和不愿意购买两种态度, 我们假设消费者会购买再制造产品的概率为 z 。

决策顺序: 原制造商努力恢复生产并确定自身的可靠性 γ 及恢复后的产量 q_1 , 再制造商根据原制造商的可靠性 γ 及恢复后的产量 q_1 来确定自己的产量 q_2 。

供应中断前, 原制造商的利润函数是单价和单位成本的差值乘以销量, 即:

$$\pi_m = (p - c_0) q \tag{1}$$

中断发生后, 原制造商的利润函数是供应中断前的单价和单位成本的差值乘以销量加供应中断后的单价和单位成本的差值乘以销量减去恢复成本, 即:

$$\pi_m = \gamma q (p - c_0) + q_1 (1 - \gamma) (p_1 - c_0) - \frac{\beta \gamma^2}{2} \tag{2}$$

再制造商的利润函数为供应中断后的单位售价和单位成本的差值乘以销量:

$$\pi_r = q_2 (-c_m - c_r + p_1) z \tag{3}$$

$$s.t. \quad q_2 \leq q$$

整个供应链的利润为:

$$\pi = \pi_m + \pi_r \tag{4}$$

4.2 模型求解

通过逆向归纳法对模型进行求解。原制造商及再制造商的决策构成古诺博弈。根据上文的需求函数可得 $p_1 = d - q_1 - q_2$, 将 p_1 带入公式(9)中, 得到关于 q_2 的一元二次函数:

$$\pi_r = q_2 (d - q_1 - q_2 - c_m - c_r) z \tag{5}$$

对公式(5)求一阶导得到:

$$q_2 = \frac{1}{2} (-c_r + d - c_m - q_1)$$

将 q_2 的值带入需求函数 $p_1 = d - q_1 - q_2$ 中可得:

$$p_1 = d - q_1 - \frac{1}{2} (-c_r + d - c_m - q_1)$$

将 p_1 带入公式(2)中, 得到关于 q_1 的一元二次函数:

$$\pi_m = \gamma q(p - c_0) + q_1(1 - \gamma) \left(d - q_1 - \frac{1}{2}(-c_r + d - c_m - q_1) - c_0 \right) - \frac{\beta \gamma^2}{2} \quad (6)$$

对公式(6)求一阶导得到以下三组解:

$$\begin{cases} q_1 = \frac{1}{2}(c_r + d + c_m - 2c_0) \\ \gamma = \frac{-(c_r + d + c_m)^2 + 8pq + 4(c_r + d + c_m - 2q - c_0)c_0}{8\beta} \end{cases}$$

$$\begin{cases} q_1 = \frac{1}{2} \left(c_r + d + c_m - 2c_0 - \sqrt{(-c_r - d - c_m + 2c_0)^2 - 4(2pq - 2\beta - 2qc_0)} \right) \\ \gamma = 1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} q_1 = \frac{1}{2} \left(c_r + d + c_m - 2c_0 + \sqrt{(-c_r - d - c_m + 2c_0)^2 - 4(2pq - 2\beta - 2qc_0)} \right) \\ \gamma = 1 \end{cases}$$

当 $\begin{cases} q_1 = \frac{1}{2}(c_r + d + c_m - 2c_0) \\ \gamma = \frac{-(c_r + d + c_m)^2 + 8pq + 4(c_r + d + c_m - 2q - c_0)c_0}{8\beta} \end{cases}$ 时, $q_2 = \frac{1}{4}(-3c_r + d - 3c_m + 2c_0)$, 此时:

$$\pi_m = \frac{1}{128\beta} \left(\begin{aligned} & 2(d - 2c_0 + c_m + c_r)^2 \left(\frac{d^2 - 8pq + 8\beta + 4c_0^2 + (c_m + c_r)(2d + c_m + c_r)}{-4c_0(d - 2q + c_m + c_r)} \right) \\ & - \left(-8pq + (d + c_m + c_r)^2 - 4c_0(d - 2q - c_0 + c_m + c_r) \right)^2 \\ & + 16q[p - c_0] \left(8pq - (d + c_m + c_r)^2 + 4c_0(d - 2q - c_0 + c_m + c_r) \right) \end{aligned} \right)$$

$$\pi_r = -\frac{1}{16} z(3c_r - d + 3c_m - 2c_0)(d - 3c_m + 2c_0 - 3c_r)$$

$$\begin{aligned} \pi = & \frac{1}{128} \left(\frac{1}{\beta} (2(d - 2c_0 + c_m + c_r))^2 \left(\frac{d^2 - 8pq + 8\beta + 4c_0^2 + (c_m + c_r)(2d + c_m + c_r)}{(c_m + c_r)(2d + c_m + c_r) - 4c_0(d - 2q + c_m + c_r)} \right) \right. \\ & \left. - \left(-8pq + (d + c_m + c_r)^2 - 4c_0(d - 2q - c_0 + c_m + c_r) \right)^2 + 16q[p - c_0] \left(8pq - (d + c_m + c_r)^2 + 4c_0(d - 2q - c_0 + c_m + c_r) \right) \right) \\ & - 8(d + 2c_0 - 3c_m - 3c_r)z[-d - 2c_0 + 3c_m + 3c_r] \end{aligned}$$

当 $\begin{cases} q_1 = \frac{1}{2} \left(c_r + d + c_m - 2c_0 - \sqrt{(-c_r - d - c_m + 2c_0)^2 - 4(2pq - 2\beta - 2qc_0)} \right) \\ \gamma = 1 \end{cases}$ 时, ,

$$q_2 = \frac{1}{4} \left(-3c_r + d - 3c_m + 2c_0 + \sqrt{(c_r + d + c_m - 2c_0)^2 + 8(-pq + \beta + qc_0)} \right), \text{ 此时:}$$

$$\pi_m = q(p - c_0) - \frac{\beta}{2}$$

命题 1 原制造商不会选择自身稳定性达到 1 的情况。这是因为, 当原制造商为了维持供应链稳定时, 必然需要投入大量的成本, 因此会造成原制造商的利

润相较于恢复生产之前还要低, 这样下去会使原制造商利润受损, 故为了追求自身利润的最大化, 原制造商不会选择自身稳定性达到 1 的情况 (证明过程见上

文)。

命题 2 供应链系统的最优策略集为 (q_2, γ, q_1) (证明过程见上文)。

$$q_1 = \frac{1}{2}(c_r + d + c_m - 2c_0)$$

$$\gamma = \frac{-(c_r + d + c_m)^2 + 8pq + 4(c_r + d + c_m - 2q - c_0)c_0}{8\beta}$$

$$q_2 = \frac{1}{4}(-3c_r + d - 3c_m + 2c_0)$$

命题 3 由最优策略集可知,随着市场规模的扩大,原制造商产量和再制造商产量都呈增大趋势。这是因为,市场需求规模的扩大会刺激原制造商生产,同时,市场中对于再制造产品的需求也会增大,从而进一步刺激再制造商生产。

证明: q_1, q_2 均为关于 d 的一次函数,当 d 增大时, q_1 增大, q_2 增大。

5 数值分析

考虑供应中断环境下原制造商及再制造商组成的供应链系统,参考相关文献,具体设置参数如表 2 所示。相关参数设置满足文章基本假设。

表 2 相关参数取值

p	q	z	β	c_m	c_r	c_0
5	10	1	1	1	2	4

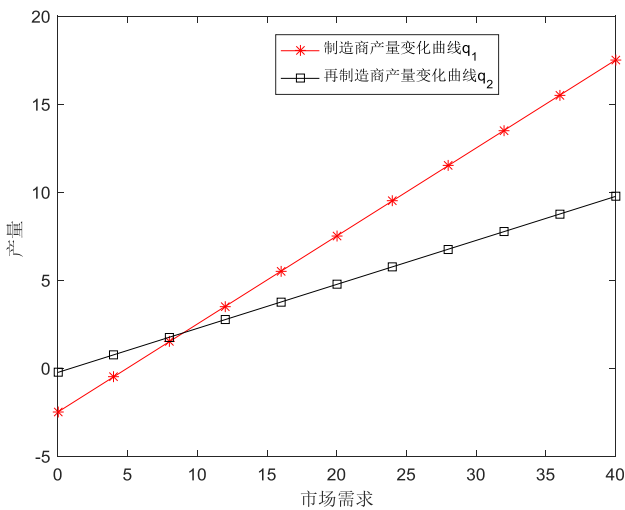


图 2 制造商和再制造商的产量变化曲线

从图片中可以看出,随着市场需求的增大,制造

商产量随之增大,这是因为,随着市场需求的增大,会刺激制造商进行生产。与此同时,再制造商的产量也随之增大,原因有二,首先,随着市场需求的增大,会刺激制造商增大产量,随之市场中的二手产品数量也会增大,再制造商可以从市场中回收更多的二手产品用于再制造。其次,市场需求增大会刺激制造商生产,但制造商恢复后的生产能力有限,所以需要再制造商帮助满足市场需求。当市场需求 $d < 9$ 时,再制造商产量大于制造商产量,这是因为,当市场需求较小时,再制造商可以满足市场需求,且此时制造商的生产链处于刚刚恢复的状态,无法进行大规模生产活动,当市场需求 $d = 9$ 时,再制造商产量等于制造商产量,当市场需求 $d > 9$ 时,再制造商产量小于制造商产量,这是因为,随着市场需求的增大,会刺激再制造商生产,但市场中的二手产品数量有限,故再制造商的生产会受到限制,但随着市场需求的增大,对新产品的需求增大,因此制造商的产量会随之增大,以此同时,随着生产活动的进行,制造商的生产线逐渐向稳健、成熟发展。综上所述,再制造商在制造商生产线中断时可以帮助生产,满足市场需求,但随着市场需求的增大,再制造商不能满足市场需求,市场中生产活动的顺利进行还需要制造商来保证。

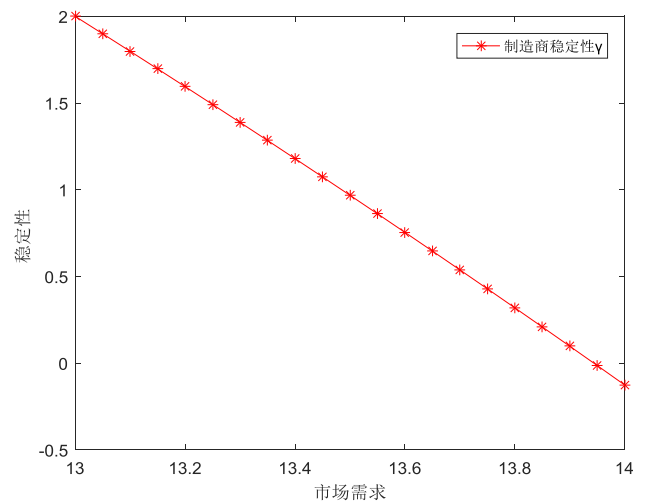


图 3 制造商的稳定性变化曲线

根据图 3 可知,随着市场需求的增大,制造商的稳定性下降,这是因为,随着市场需求的增大,用于生产新产品的原材料,人力等需求也会同时增大,而这些因素都会影响供应商生产线的稳定性,故而,随着市场规模的增大,制造商的稳定性会下降。

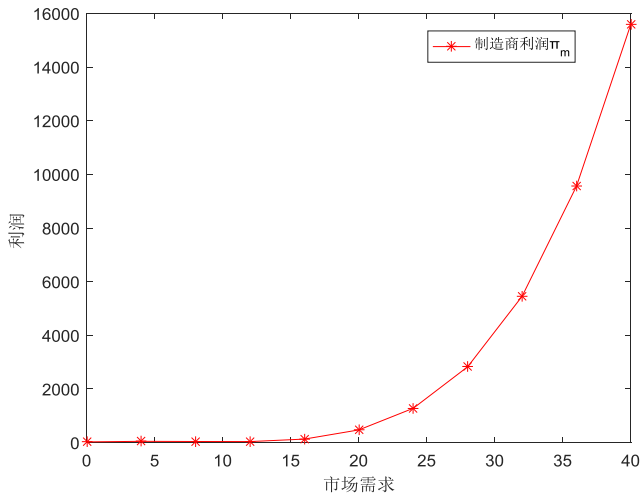


图 4 制造商的利润变化曲线

从图 4 可以看出，随着市场需求的增大，制造商利润由平稳状态变为急剧增长的态势。当市场需求 $d < 20$ 时，制造商利润增速缓慢，当市场需求 $d > 20$ 后，制造商利润急剧增长。这是因为，当市场需求较小时，市场需求对制造商的刺激作用较小，且此时制造商刚恢复生产，前期投入较大，还未实现盈利，但随着市场需求的增大，一方面市场需求刺激制造商进行生产，另一方面制造商拥有了健全的生产线，可以生产大量的产品满足市场需求。

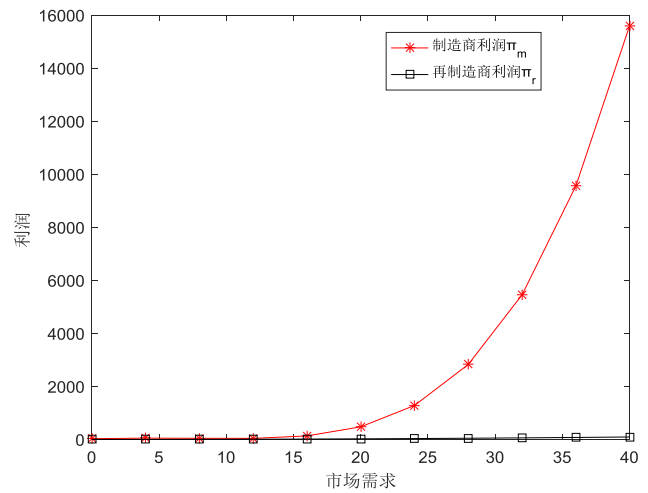


图 6 制造商与再制造商的利润变化曲线对比图

图 6 为制造商与再制造商的利润变化曲线对比图，从图中可以看出，随着市场需求的增大，制造商的盈利情况远远好于再制造商，这是因为，再制造商需要回收市场中的二手产品用于再制造，受很多情况的限制，如市场中二手产品的数量、消费者对于二手产品的偏好等，相比之下制造商只需要考虑原材料的问题，所以在市场中制造商盈利情况远远好于再制造商。

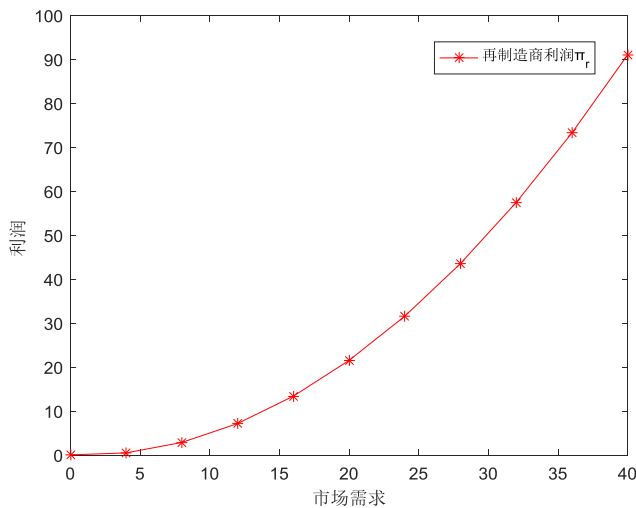


图 5 再制造商的利润变化曲线

从图 5 可以看出，随着市场需求的增大，再制造商的利润也是增大的，这是因为，再制造商再制造成本低，且市场中对于再制品总是有需求的，所以结合目前情况来看，若再制造率为 100%，那么再制造商总会盈利的。

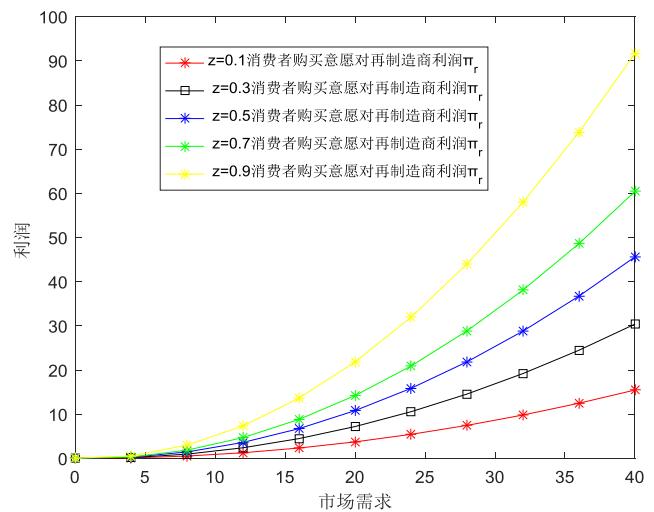


图 7 消费者购买意愿对再制造商的利润影响曲线

从图 7 可以看出，随着消费者对再制造产品的支付意愿的增大，再制造商的盈利情况越来越可观，这也与现实情况相符合，随着消费者对二手产品支付意愿的增大，再制造商越来越容易盈利。

6 结论

本文研究了供应中断下原制造商与再制造商组成的二级供应链系统，着重于探讨各个成员最优策略。利用 Stackelberg 博弈、古诺博弈刻画了供应中断下的供应链系统。根据原制造商与再制造商利润的构成，构建了追求利润最大化的原制造商和再制造商的利润，得到了以下结论：

- (1) 对于原制造商来说，再制造商的加入不仅可以帮助原制造商缓解一部分生产压力，及时满足市场需求，另一方面，再制造商的加入还可以实现资源的有效利用，市场上许多二手产品内部配件完好，仍可以投入使用，因此再制造商回收二手产品用于再制造可以实现资源的有效利用，虽然再制造商加入可以帮助原制造商缓解一部分生产压力，但由于市场中二手产品数量的有限性，再制造商帮助原制造商缓解生产压力也是短期的，长远来看，原制造商需努力提升自身稳定性，满足市场需求。
- (2) 对于再制造商来说，在原制造商发生供应中断后，再制造商进入市场可以获利，但长远来看，对于再制造商来说，想要获得长久的发展，在前期获利后可以考虑制造新产品，提高自己在市场上的竞争力。
- (3) 对于消费者来说，市场上许多二手产品的内部配件完好，不影响使用，消费者可以根据需求支持再制造品，这样不仅可以帮助再制造商发展，也可以间接帮助制造商恢复生产活动，还可以实现资源的有效利用，帮助减少碳排放，保护环境。
- (4) 对于政府部门来说，再制造帮助减少碳排放，政府可提供一些补贴，同时，还应该加大对再制造品的宣传力度，消除消费者对再制造品的偏见，形成政府助力，企业努力的良好局面。

当然，本文的研究也存在一些局限性和不足之处，存在许多能够进一步完善及深入的研究问题。首先，本文只考虑了由制造商主导的，再制造商追随的二级供应链，因此，未来可以考虑研究多级供应链，从更加全面的角度分析供应中断下的应对策略。其次，本文为了方便研究，只考虑了原制造商及再制造商三个供应链成员，但在现实生活中的供应链中往往存在多个成员，且供应链中成员的决策方式多为动态决策，因此，未来可以研究供应链中

多阶段动态决策问题。另外，本文没有研究政府混合补贴原制造商及再制造商对恢复供应链的影响，在未来研究中可以尝试加入混合补贴模式。供应链中断分为三类：供应中断、市场需求中断、物流网络中断，本文仅仅从供应中断的角度研究了供应中断问题，未来可以从需求端的中断和物流网络的中断角度出发去探讨供应中断问题。

参考文献

- [1] 王海军, 张瑞娜, 郭羽洪, 杨明. 零售商补贴对供应链可靠性协调策略影响研究 [J]. 管理工程学报, 2021, 35(04): 190-201.
- [2] 曹柬, 张梅美, 许佳阳, 朱晨波, 周根贵. 竞争环境下针对双寡头回收处理商的政府激励机制设计 [J]. 管理工程学报, 2020, 34(05): 114-121.
- [3] 楼振凯, 楼旭明, 侯福均. 考虑政府补贴的新产品与再制造产品定价模型 [J]. 控制与决策, 2022, 37(01): 196-204.
- [4] Huang Y, Liang Y. Exploring the strategies of online and offline recycling channels in closed-loop supply chain under government subsidy [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2021, 29(15): 21591-21602.
- [5] Li J M, Qiang Q, Zu Q H, Bao Y Z, Yu X Y. Optimal Pricing Strategy and Government Consumption Subsidy Policy in Closed-Loop Supply Chain with Third-Party Remanufacturer [J]. Sustainability, 2020, 12(6): 2411.
- [6] Kazi S S, Abdullahil A, Syed M A, M d, Abdul M. A supply chain disruption risk mitigation model to manage COVID-19 pandemic risk [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021: 1-16.
- [7] 孔进, 李芳. 供应中断风险下原制造商应对策略研究 [J]. 上海理工大学学报, 2021, 43(04): 409-420.
- [8] Tsao Y C, Thanh V V, Chang Y Y, Wei H H. COVID-19: Government subsidy models for sustainable energy supply with disruption risks [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 150: 111425-111425.
- [9] Xiao H, Zhi H, Wen P. Using evolutionary game theory to study governments and logistics companies' strategies for avoiding broken cold chains [J]. Annals of Operations Research, 2020: 1-29.
- [10] Milad B, Christopher W. Zobel. Assessing the extended impacts of supply chain disruptions on firms: An empirical study [J]. International Journal of Production Economics, 2021, 231: 107862.

- [11] 熊峰, 彭健, 金鹏等. 生鲜农产品供应链关系契约稳定性影响研究——以冷链设施补贴模式为视角 [J]. 中国管理科学, 2015, 23(8): 102-111.
- [12] Lou Z K, Lou X M, Dai X Z. Game-theoretic models of green products in a two-echelon dual-channel supply chain under government subsidies [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2425401.
- [13] Veysey S. Majority of companies suffered supply chain disruption in 2011: Survey [J]. *Business Insurance*, 2011, 8(3): 20-29.
- [14] Sammi Y. T, Haresh G, Diwakar G. Managing disruptions in decentralized supply chains with endogenous supply process reliability [J]. *Production and Operations Management*, 2014, 23(7): 1198-1211.
- [15] Saurabh A, Jennifer B, Scott G. Firm's resilience to supply chain disruptions: Scale development and empirical examination [J]. *Journal of Operations Management*, 2015, 33(4): 111-122.
- [16] 崔春晓, 王凯, 王学真. 消费者对可追溯猪肉支付意愿的影响因素研究 [J]. *统计与决策*, 2016(12): 98-101.
- [17] Lu C, Huang W, Cheng H. Comparative analysis of government subsidy policies in a dynamic green supply chain considering consumers preference [J]. *Sustainability*, 2021, 13(21): 11601-11601.
- [18] Alsubhi M, Blake M, Nguyen T, Majmudar I, Moodie M, Ananthapavan J. Consumer willingness to pay for healthier food products: A systematic review [J]. *Obesity reviews*, 2022: 13525-13525.
- [19] Zhang H, Bai X F, Ma Z G. Consumer reactions to AI design: Exploring consumer willingness to pay for AI-designed products [J]. *Psychology & Marketing*, 2022, 39(11): 2171-2183.
- [20] Smetana K, Melstrom R T., Malone T. A Meta-Regression Analysis of Consumer Willingness to Pay for Aquaculture Products [J]. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 2022, 54(3): 480-495.
- [21] Hossain A, Badiuzzaman, Nielsen M, Roth Eva. Consumer willingness to pay for quality attributes of pangasius in Bangladesh: A hedonic price analysis [J]. *Aquaculture*, 2022, 555.
- [22] Nascimento G C, da C M J L, Athie T S, Silva J d S, Reis E A, Almeida B C C, Godman B, God I P D. Acceptability and Consumer Willingness to pay for a hypothetical HIV vaccine in Northern Brazil: A cross-sectional study and the implications [J]. *Journal of HIV/AIDS & Social Services*, 2022, 21(2): 145-166.
- [23] Canarslan  N, Barıř G. Flow Experience and Consumer Willingness to Pay in Online Mass Customization Processes [J]. *International Journal of Online Marketing (IJOM)*, 2021, 12(1): 1-21.
- [24] Zhang X M, Yin H T, Zhao R. Consumer willingness to pay for eco-labels in China: A choice experiment approach [J]. *Journal of Management Analytics*, 2021, 8(4): 673-692.
- [25] Oluoch Sydney, Lal Pankaj, Bevacqua Anthony, Wolde Bernabas. Consumer willingness to pay for community solar in New Jersey [J]. *The Electricity Journal*, 2021, 34(8).
- [26] Morone P, Caferra R, D'Adamo I, Falcone P M, Imbert E, Morone A. Consumer willingness to pay for bio-based products: Do certifications matter? [J]. *International Journal of Production Economics*, 2021: 108248-108248.
- [27] Kimberly L J, Karen L D, Mackenzie B G, David W H. Consumer willingness to pay for locally produced hard cider in the USA [J]. *International Journal of Wine Business Research*, 2021, 33(3): 411-431.
- [28] Athie T S, Nascimento G C, Labis d C M J, Sales S J d, Reis E A, Martin A P, Godman B, Dias G I P. Consumer willingness to pay for a hypothetical Chagas disease vaccine in Brazil: a cross-sectional study and the implications [J]. *Journal of Comparative Effectiveness Research*, 2021, 0(0).
- [29] Lai Y F, Yue C Y. Consumer Willingness to Pay for Organic and Animal Welfare Product Attributes: Do Experimental Results Align with Market Data? [J]. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 2020, 45(3): 462-483.
- [30] 张旭梅, 李梦丽, 但斌等. 考虑异质消费者的线下到线上供应链合作广告契约设计 [J]. *管理工程学报*, 2021(1): 1-11.
- [31] Zhan J T, Ma Y B, Deng P C, Li Y Q, Xu M, Xiong H. Designing enhanced labeling information to increase consumer willingness to pay for genetically modified foods [J]. *British Food Journal*, 2020, 123(1): 405-418.
- [32] Otieno D J, Ogutu S O. Consumer willingness to pay for chicken welfare attributes in Kenya [J]. *Journal of International Food & Agribusiness Marketing*, 2020, 32(4): 379-402.
- [33] 徐滨士. 再制造与循环经济 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [34] Giuntini R, Gaudette K. Remanufacturing: The next great opportunity for boosting US productivity [J]. *Business Horizons*, 2003(6): 41-48.