

考虑回收产品质量的闭环供应链协调研究

谢萍萍¹, 李芳²

1. 新疆财经大学工商管理学院, 乌鲁木齐 830012

2. 上海理工大学管理学院, 上海 200090

摘要:目的 研究制造商委托第三方回收商回收废旧产品模式的闭环供应链决策问题。方法 考虑第三方回收的产品质量, 并运用 Stackelberg 博弈模型对成员决策进行分析, 其次运用二部定价契约对闭环供应链进行协调, 并对比供应链协调后与协调前的总利润以及质量水平的关系。结果 研究显示: 集中决策下闭环供应链的总利润大于分散决策下闭环供应链的总利润, 而二部定价契约可以有效协调闭环供应链, 当再制造能够节省的最大成本等于制造商愿意为回收产品支付的最大转移价格时, 协调后的闭环供应链整体利润与集中决策情况的闭环供应链整体利润相同。同时, 二部定价契约可以提高回收产品的质量水平, 有效清除分散决策情况下造成的双重边际效应。结论 对于现实企业管理中的启示为: 如果企业选择第三方回收模式, 该情况下若需考虑回收产品质量, 如果外界环境复杂多变, 为了提高生产效率需考虑回收产品质量, 企业由于实际成本等原因需选择第三方回收, 各企业之间进行分散决策, 可以运用二部定价契约进行协调。

关键词: 闭环供应链; 委托回收; Stackelberg 博弈; 双重边际效应; 二部定价契约

中图分类号: F274 **文献标识码:** A **doi:** 10.16055/j.issn.1672-058X.2024.0001.013

Research on Closed-loop Supply Chain Coordination Considering Recycled Product Quality

XIE Pingping¹, LI Fang²

1. School of Business Administration, Xinjiang University of Finance & Economics, Urumchi 830012, China

2. Management School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200090, China

Abstract: Objective The decision-making problem of closed-loop supply chain in which manufacturers entrust a third party to recycle waste products was studied. **Methods** The product quality of third-party recycling was considered and the member decisions were analyzed using the Stackelberg game model. Next, the closed-loop supply chain was coordinated using a two-part pricing contract, and the total profits and the quality levels after and before supply chain coordination were compared. **Results** The study showed that the total profit of the closed-loop supply chain under centralized decision-making was greater than the total profit of the closed-loop supply chain under decentralized decision-making, and the two-part pricing contract could effectively coordinate the closed-loop supply chain. When the maximum cost saving from remanufacturing was equal to the maximum transfer price the manufacturer was willing to pay for the recycled product, the overall profit of the coordinated closed-loop supply chain was the same as the overall profit of the closed-loop supply chain in the centralized decision case. Meanwhile, the two-part pricing contract could improve the quality level of recycled products and effectively remove the double marginalization caused in the case of decentralized decision-making.

Conclusion The implications for real enterprise management are as follows. If enterprises choose the third-party recycling

收稿日期: 2023-01-11 修回日期: 2023-03-01 文章编号: 1672-058X(2024)01-0098-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72271164), 上海市软科学研究重点项目(19692104000).

作者简介: 谢萍萍(1993—), 女, 河南开封人, 硕士, 从事闭环供应链、供应链管理、物流系统建模与仿真等研究。

通讯作者: 李芳(1966—), 女, 陕西西安人, 博士, 从事供应链管理、工业工程、生产运作管理等研究。Email: lifang2502@126.com.

引用格式: 谢萍萍, 李芳. 考虑回收产品质量的闭环供应链协调研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2024, 41(1): 98—105.

XIE Pingping, LI Fang. Research on closed-loop supply chain coordination considering recycled product quality[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2024, 41(1): 98—105.

mode, the quality of the recycled products should be considered. If the external environment is complex and changeable, in order to improve production efficiency and consider the quality of recycled products, enterprises need to choose third-party recycling for various practical reasons such as cost. In this case, enterprises make decentralized decisions, and the two-part pricing contract can be used to coordinate decentralized decisions.

Keywords: closed-loop supply chain; entrusted recycling; Stackelberg game; double marginalization; two-part pricing contract

1 引言

随着资源的短缺,世界的经济发展模式逐渐由“资源—生产—消费—废弃”的开环作业形态渐渐向“资源—生产—消费—再生资源”的闭环式作业形态过渡。由此,闭环供应链管理的研究逐步被广泛重视。闭环供应链是一种先进的新型物流管理模式,一直以来流传垃圾是放错了地方的资源,这种模式让消费者废弃的商品再次被回收再利用,同时以更少的资源消耗和更低的成本最大化地满足客户的需求,从而赢得了众多企业的青睐,大众、IBM、通用等知名公司的成功再制造更加印证了再制造产品的成本远不及新产品的成本,这些著名企业通过再制造节约了原材料成本,获得了显著的效益,再制造技术的不断完善和改进,使得再制造商品的质量也会更加趋近于新商品的质量,通过再制造的方式,让消费者的废弃商品得到更多的利用,对这一课题的研究,其现实意义是不言而喻的。

传统正向供应链是指所有环节的企业共同构成一个网状的结构,整个过程中发生了各种活动,商品从原材料供应商经制造商、经销商、零售商到最终消费者之间的传递过程。逆向供应链起源于逆向回收网络,Guide 等^[1]定义了逆向供应链的概念,同时给出了闭环供应链的说法,闭环供应链是正向供应链与逆向供应链的有效结合,所构成的闭环系统可以提高系统的环境和经济效益,另外 Guide 等也认为目前的物流系统已经从原来的开环过程(物流从“资源—制造—消费”的过程)逐渐转向了闭环循环模式(“资源—制造—消费—再制造—再消费”的过程),这样不仅可以提高资源的有效利用率,增加企业的经济效益,同时也增强了企业的综合实力,这也大大体现了环保理念——环境优化、节约资源。

尽管闭环式供应链的研究起步较晚,但随着闭环式供应链系统的快速发展,到目前为止在这方面已经有了非常大的进步,在商品协调定价策略、库存订货监控、回收模式筛选、回收网络设计以及再制造市场策略等方面,目前已经有多篇文献分析,硕果累累。参考已有的研究并联系自身研究,重点从 4 个角度的研究成果出发来研究闭环供应链,相关文献梳理如下:

(1) 从不同权利结构来分析闭环供应链。Gao

等^[2]在考虑销售人员的努力程度分别对闭环供应链产生的影响的同时,研究了废旧品在不同权力结构下的回收和产品的定价策略;Zheng 等^[3]讨论了基于不同主导权利下的双渠道定价策略。王文宾等^[4]探讨了不同主导力量下的闭环供应链的定价问题,并分别进行分析以及比较不同点。

(2) 闭环供应链回收模式问题分析。Shulman 等^[5]构建模型来验证不同回收组合方式对最优收益选择的影响,同时提出一些适用于实际企业管理的措施;Millet^[6]经过分析提出了一个总体框架,其能够对不同的逆向物流渠道结构进行评估,并将该总体框架应用到产品的再制造再生产中,通过对现如今的逆向物流渠道结构形式进行评估分析之后,并提出该渠道结构的替代结构,并且发现这种替代结构既可以减少对环境的污染,又可以获得比较高的经济效益;Hong 等^[7]构建了第三方分包的回收模型,并分别考虑是否销售商负责回收两种情况,通过比较分析回收率、生产商收益和渠道成员总收益,发现在回收生产过程中,第三方是负责加工回收的非盈利性组织的情况下,零售商回收模型效果更好;Atasu 等^[8]建立了以回收率和回收量为基础的回收成本函数,研究显示,以成本结构为主导的制造商可以对零售商的商品销售和废旧品的回收产生影响,进而对最佳的回收渠道选择产生影响。

(3) 闭环供应链协调问题分析。闭环供应链在运作过程中,由于信息不对称仍有可能造成双重边际效应,采用集中式决策与去中心化决策的最明显区别在于信息不对称问题。目前已有多位学者就去中心化决策问题展开相关讨论。高举红等^[9]研究了包含竞争再制造者和不确定市场需求两个影响因素的闭环供应链定价策略,建立了竞争再制造者集中与分散定价模型,总结了相关价格波动规律,以及企业预期利润与该规律之间的联系。姚锋敏等^[10]研究公平关切行为对选择闭环供应链最优策略的影响,其分析的闭环供应链包括在两个竞争卖家公平关切和公平中立的情况下,由一家厂商、两家有竞争关系的卖家和一家第三方回收商共同建立决策模型,并对结果进行对比研究;谢萍萍等^[11]基于制造商与销售商之间有互惠偏好的情景下,对闭环供应链相关企业的定价策略、系统利润以及主观效用等问题进行了研究;韩梅等^[12]搭建了回收废旧

品数量未知的双重竞争闭环供应链定价分析模型。

(4) 兼顾回收产品质量的闭环供应链策略分析。Chen 等^[13]研究针对消费者不同的购买偏好,设计了市场规模不同、回收质量不同、回收数量不确定的决策模型。徐静等^[14]分析了政府补贴这一利好的政策情形下考虑顾客具有低碳偏好价值理念的闭环供应链网络均衡决策模型。聂佳佳等^[15]研究考虑再制造商品质量的回收策略,同时构建了制造商回收以及销售商回收的两种模式下的模型;董乾东等^[16]分析了包含有不同的商品品质的闭环供应链,其次构建了几种相异的混合回收模型,并推导出最优商品品质、销售价格和回收商的利润;韩梅等^[17]通过构建双重竞争下回收产品质量不确定的定价决策模型,分析企业在双重竞争下回收质量不确定时,回收价格的变化规律、再制造成本的变化规律、政府财政补贴的变化规律、供应链节点企业的利润和社会福利的变化规律、回收利用率的变化规律等。

在对国内外相关文献进行筛选和梳理后发现,虽然目前围绕闭环供应链的商品协调定价策略、库存订货监控、回收模式筛选、回收网络设计和再制造市场策略等方面进行了大量的讨论。前人的研究从多样化的角度丰富了闭环供应链的理论,促进了闭环供应链的发展,从而解决实际企业管理中面临的多样化的问题,但随着现实问题的交叉与发展,闭环供应链也逐渐变得复杂和多样,由此理论研究还可继续深入,以此来填补研究中的空白,使得理论的研究更加契合实际企业管理中的需要。在闭环供应链中由于信息不对称而产生牛鞭效应的问题层出不穷,同时由于回收产品质量不同,造成实际生活中回收难、分类难以及生产难的现象比比皆是,由此考虑回收产品质量这一问题迫在眉睫,考虑回收产品质量会进一步提高闭环供应链的有效性,已有研究为回收产品质量的考量奠定了理论基础,然而目前的文献中较少在考虑回收产品的质量的情况下同时为消除信息不对称进行的研究,现在已有文献的基础上对该内容进行了进一步探讨,并对相关企业给出一些参考建议。

2 模型描述与基本假设

模型主要分析闭环供应链的决策问题,其是由单一制造商,单一销售商以及一个第三方回收商构成。模型系统框架为:首先建立一个集中决策模型,模型考虑回收物品的质量,制造商为唯一的决策者,求解并得到最优的定价决策。二是在第三方回收模式下建立决策模型,考虑回收产品的质量,并分别利用 Stackelberg 博弈理论求解得出最优定价决策。接着通过分析第三方回收模式情形由于各主体企业分散决策导致双重边际效应,并由此利用二部定价契约机制对闭环供应链

进行协调,并推理得出相关命题结论,最后运用数值模拟与分析,对命题与结论的正确性进行深入论证。

本文中的新产品是指用全新的原材料和零部件生产的商品,再制造品是将接收到的废旧物品经过加工再制造生产出的商品,设在这个闭环供应链上,各个层级的成员都以自身利益最大化为目标,都是风险中立的,同时均是独立的决策者,各方信息完全共享,没有延迟信息的情况,制造和再制造原材料和废旧产品。

销售商依据价格 p 将商品卖向市场,同时按照价格 w 从制造商处批发产品, $D(p)$ 是关于产品的价格函数,表示产品的市场需求量,假设 $D(p) = a - bp$, $a, b > 0$, 且 a, b 为常量, a 为总的市场体量, b 为市场需求对价格的灵敏度。 τ 表示废旧物品的回收比例,是回收的旧物品与产品的总需求之比, $\tau \in [0, 1]$, 当 $\tau = 0$ 时,说明生产商不对废旧物品进行回收,完全使用原材料生产,在这个模型中是一个外生变量, $\tau = 1$ 表示废旧物品完全被回收利用,即生产厂家只利用废旧物品进行再生产的情况。根据文献^[15]中的表达方法,将回收的废旧物品的不同质量等级用 q 表示,在回收废旧物品时,废旧物品的损坏程度越低,表示回收的废旧物品质量越好,物品的再利用水平越高, $0 < q < 1$, 承担回收废旧物品责任的企业,通常想要提高回收产品的质量等级,就需要耗费许多心血,设付出的辛苦成本为 I , 以此来表示相应的投入(该投入是为了提高回收产品质量水平)。由于付出的努力越多,回收的废旧物品品质等级就越好,因此单位质量水平的提高也会随着废旧物品回收质量水平的提高而变得更加困难,相应的努力成本也会变得更高,于是令 $I(q) = kq^2$, k 代表努力成本参数, $k > 0$ 。设生产商使用回收品来重新再制造的单位成本为 $c_r(q)$, 它是回收产品质量水平的函数,制造新商品的单位成本为 c_m , $c_r(q) < c_m$, 对于生产再制造的产品来说,回收的废旧物品质量越好,相应的它的再制造成本就会越低,这样 $c_r(q) = c_m - c_s q$, c_s 就是再制造可以节约的最高成本。模型由第三方回收商负责回收废旧物品,生产商将其回收的废旧物品以转移支付的价格进行回购,同时将所回购的全部用于再制造。 $A(q)$ 代表第三方回收商从客户手中回收废旧物品的单位回收成本,是回收物品质量等级的函数,说明从客户手中接收到质量越好的废旧物品的费用越高。 $B(q)$ 代表厂家接收第三方回收商的废旧物品的单位转移价格,质量越好的废旧物品,从第三方回收商手中回收的成本越高,这也是废旧物品质量水平的函数。令 $A(q) = uq$, u 为第三方回收商愿意支付的最大回收价, $u > 0$, 令 $B(q) = vq$, v 为厂商愿意支付的最大转让价, $v > u > 0$ 。

Π_j^i 表示闭环供应链模型 i 中渠道企业 j 的利润, i 取 $C, 3P$, 表示集中决策模型(模型 C) 和第三方回收模

型(模型 3p), j 取 m, r 以及 $3p$, 表示制造商、销售商以及第三方回收商。本文探讨制造商为领导者, 销售商以及第三方回收商作为追随者, 利用 Stackelberg 博弈模型进行分析。

由以上分析可得, 制造商的单位制造成本记为 $c(q) = c_m(1-\tau) + c_r(q)\tau$, 化简得 $c(q) = c_m - \tau qc_s$, 再制造产品所节约的单位制造成本为 qc_s , 同时需 $qc_s > A(q)$, 即 $u < c_s$. 将总的回收成本记为 $C(q) = I + \tau D(q)A(q)$, $\tau D(q)$ 为回收产品的数量, 根据产品的需求大于 0, 有 $a > bp > bc_m$ 。

3 第三方回收模式下的回收体系

由 stackelberg 理论可以得出, 制造方和销售方与第三方回收商之间组成两阶段博弈情形, 制造商是领导方, 销售商与第三方回收商是跟随方。

其博弈顺序为: 第一阶段, 制造商作为领导者, 首先根据消费市场需求情况来决定生产数量以及回收预期, 并制定出批发价格 w ; 第二阶段, 零售商和第三方回收机构作为跟随者依据制造商的策略采取相应的策略, 制定出销售价格 p 以及回收产品质量水平 q , 接着, 制造商再根据追随者的最优策略改进自身初始策略, 从而得出最优批发价格 w 。

制造商、销售商及第三方回收商的决策函数, 如式(1)一式(3)所示:

$$\Pi_m^{3p} = [w - (c_m - \tau c_s q)](a - bp) - vq\tau(a - bp) \quad (1)$$

$$\Pi_r^{3p} = (p - w)(a - bp) \quad (2)$$

$$\Pi_{3p}^{3p} = vq\tau(a - bp) - kq^2 - uq\tau(a - bp) \quad (3)$$

其中: Π_m^{3p} 代表第三方回收形式的制造方利润, Π_r^{3p} 表示第三方回收形式的销售方利润, Π_{3p}^{3p} 表示第三方回收形式下第三方回收商利润。

3.1 分散决策模式(模型 d)

由逆向归纳法, 第一步求得销售商以及第三方回收商的最佳策略, 先对(2)分析, 得出

$$p^{*3p}(w) = \frac{(a + bw)}{2b}, \text{ 将其代入式(3)并求解得出}$$

$$q^{*3p}(w) = \frac{\tau(v-u)(a-bw)}{4k}, \text{ 将得出的 } p^{*3p}(w), q^{*3p}(w) \text{ 代}$$

入式(1)中, 得到分散决策商品的最优销售价、批发价和回收质量水平, 如式(4)一式(6)所示:

$$q^{*3p} = \frac{\tau(v-u)(a-bc_m)}{8k-2b\tau^2(v-u)(c_s-v)} \quad (4)$$

$$p^{*3p} = \frac{3ak-b[a\tau^2(v-u)(c_s-v)-kc_m]}{b[4k-b\tau^2(v-u)(c_s-v)]} \quad (5)$$

$$w^{*3p} = \frac{2ak-b[a\tau^2(v-u)(c_s-v)-2kc_m]}{b[4k-b\tau^2(v-u)(c_s-v)]} \quad (6)$$

将式(4)一式(6)代入式(1)一式(3)得出制造商、零售商和第三方的均衡利润, 如式(7)一式(10)所示:

$$\Pi_m^{*3p} = \frac{k(a-bc_m)^2}{2b[4k-b\tau^2(v-u)(c_s-v)]} \quad (7)$$

$$\Pi_r^{*3p} = \frac{k^2(a-bc_m)^2}{b[4k-b\tau^2(v-u)(c_s-v)]^2} \quad (8)$$

$$\Pi_{3p}^{*3p} = \frac{k\tau^2(v-u)^2(a-bc_m)^2}{4[4k-b\tau^2(v-u)(c_s-v)]^2} \quad (9)$$

$$\Pi^{*3p} = \frac{k[12k+b\tau^2(v-u)(3v-u-2c_s)](a-bc_m)^2}{4b[4k-b\tau^2(v-u)(c_s-v)]^2} \quad (10)$$

3.2 集中决策模式(模型 c)

集中决策也可称为合作博弈, 是指在闭环供应链体系内的决策方, 为了寻求使整体利润最大化的策略, 在链条上的各个企业相互协作, 从而得出作为整体共同决策的最优策略。由此集中策略情形的供应链的决策变量是销售价 p 以及接收质量水平 q , 此时批发价只在系统内部交流, 对系统整体利益没有影响, 由此得出, 如式(11)所示决策模型:

$$\Pi^c = (a-bp)(p-c_m+\tau c_s q) - kq^2 - uq\tau(a-bp) \quad (11)$$

对式(11)求解, 得出最佳销售价以及回收质量水平, 如式(12)一式(13)所示:

$$p^{*c} = \frac{2ak-b[a\tau^2(c_s-u)^2-2kc_m]}{b[4k-b\tau^2(c_s-u)^2]} \quad (12)$$

$$q^{*c} = \frac{\tau(a-bc_m)(c_s-u)}{4k-b\tau^2(c_s-u)^2} \quad (13)$$

将 p^{*c}, q^{*c} 代入式(11)得出如式(14)所示。

$$\Pi^{*c} = \frac{k(a-bc_m)^2}{b[4k-b\tau^2(c_s-u)^2]} \quad (14)$$

这种情况对于集中决策虽然有利, 但缺乏对市场的快速反应, 很可能造成资金风险, 也可称为“纵向一体化”的企业组织模式。

命题 1 闭环供应链系统中的企业集中决策时所产生的总利润大于分散决策时所产生的总利润之和。

证明:

$$\begin{aligned} \Pi^{*c} - \Pi^{*3p} &= \frac{k(a-bc_m)^2}{b[4k-b\tau^2(c_s-u)^2]} - \\ &= \frac{k[12k+b\tau^2(v-u)(3v-u-2c_s)](a-bc_m)^2}{4b[4k-b\tau^2(v-u)(c_s-v)]^2} - \\ &= \frac{k(a-bc_m)^2 4b[4k-b\tau^2(v-u)(c_s-v)]^2}{4b[4k-b\tau^2(c_s-u)^2][4k-b\tau^2(v-u)(c_s-v)]^2} - \\ &= \frac{k[12k+b\tau^2(v-u)(3v-u-2c_s)]}{4b[4k-b\tau^2(c_s-u)^2][4k-b\tau^2(v-u)(c_s-v)]^2} \times \\ &= \frac{(a-bc_m)^2 b[4k-b\tau^2(c_s-u)^2]}{4b[4k-b\tau^2(c_s-u)^2][4k-b\tau^2(v-u)(c_s-v)]^2} > 0 \end{aligned}$$

这是因为在集中决策时, 由于没有存在双重边际

效应,使得闭环供应链的总利润最大,而在分散状态下进行决策的过程中,节点企业只会考虑自己的利益最优,而不会考虑其他企业的收益,使得供应链的总利润减少,双重边际效应的出现使得供应链的总利润减少,从而影响到全局的最优。集中决策是一种理想的决策模式,在实际企业间的合作模式中,出于商业秘密等一系列因素的考虑,往往企业会选择分散决策,但分散决策却会造成供应链总利润减少,从而影响企业长远的发展,这时就需要一些契约等相关方式增强企业间的联系,从而化解由于信息不对称等原因产生的各种问题。

4 基于二部定价契约的供应链协调机制

在二部定价契约中,制造商给予销售商的批发价格与制造方生产的边际成本相同,此时销售方需要给制造商缴纳一定比例特许经营费。二部定价契约模型,是指某种合约收费系统,该系统需缴纳不变费用和从量费用。不变费用是与数目多少无关的费用,而从量费用则是指依据具体使用数量来缴纳的相关费用。

由于无论利用情况怎样都需支付固定不变的基础费用,因此二部定价契约对维持企业基础的平稳运行是有利的,而从量费用的支付是基于顾客利用数量的边际成本。已有文献显示,二部定价合约在很好地协调闭环供应链,提高系统效益的同时,能够处理企业间存在的双重边际效应的弊端。所以本文选择二部定价契约来调和闭环供应链。

根据前文中的研究,假设制造方分别给予销售方以及第三方回收商二部定价合约 $F_r = (w, T_r)$ 和 $F_{3p} = (b, T_{3p})$, Π_r^d 和 Π_{3p}^d 分别表示分散决策情形的销售方以及回收商的保留利润,则该情况可以阐述为:制造商的决策变量是 w, b , 制造商提供给第三方回收商转移支付价格 b , 给销售商批发价 w , 同时向销售商以及第三方回收商分别收取固定费 T_r 和 T_{3p} , 该费用的详细取值是制造商、销售商以及第三方回收商三者共同确定。模型博弈顺序仍然遵守 Stackelberg 博弈理论。引入二部定价契约的闭环供应链节点各企业利润函数为制造商利润函数,如式(15)所示:

$$\Pi_m^{3p} = [w - (c_m - \tau c_s q)](a - bp) \downarrow -vq\tau(a - bp) + T_r + T_{3p} \quad (15)$$

零售商利润函数,如式(16)所示:

$$\Pi_r^{3p} = (p - w)(a - bp) - T_r \quad (16)$$

第三方利润函数,如式(17)所示:

$$\Pi_{3p}^{3p} = vq\tau(a - bp) - kq^2 - uq\tau(a - bp) \downarrow -T_{3p} \quad (17)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \Pi_r^{3p} \geq \Pi_r^{3p} \\ \Pi_{3p}^{3p} \geq \Pi_{3p}^{3p} \end{cases}$$

式(17)约束条件表示,制造商制定的契约需要确保销售商与第三商回收商接受合约时所取得的最小利益大于或等于未接受此合约时所能取得的最大利益,否则另两方是不会认同该机制的,只有在这种情况下,制造商才能寻求利益最大化机制。由此依据逆向归纳法,第一步处理销售商以及第三方回收商的最佳策略,先对式(16)分析,得出 $p^{*3p'}(w)$, 将其代入式(17)并求解得出 $q^{*3p'}(w)$, 得出的 $p^{*3p'}(w), q^{*3p'}(w)$, 如式(18)、式(19)所示:

$$p^{*3p'}(w) = \frac{a + bw}{2b} \quad (18)$$

$$q^{*3p'}(w) = -\frac{\tau(u - v)(a - bw)}{4k} \quad (19)$$

在博弈过程内制造商需确保销售商和第三方回收商的期望利润最少要等于分散决策时的二者的利润的情况下此合约才可以达成,由此得出,如式(20)、式(21)所示:

$$\text{零售商收益 } \Pi_r^{3p'} = \Pi_r^{3p} \\ (p - w)(a - bp) - T_r = \frac{k^2(a - bc_m)^2}{b[4k - b\tau^2(v - u)(c_s - v)]^2} \quad (20)$$

$$\text{第三方收益 } \Pi_{3p}^{3p'} = \Pi_{3p}^{3p} \\ vq\tau(a - bp) - kq^2 - uq\tau(a - bp) - T_{3p} = \\ \frac{k\tau^2(v - u)^2(a - bc_m)^2}{4[4k - b\tau^2(v - u)(c_s - v)]^2} \quad (21)$$

由此可得出,制造方向零售商与第三方回收商索取的不变费用如下,如式(22)、式(23)所示:

$$T_r = \frac{(a - bw)^2}{4b} - \frac{k^2(a - bc_m)^2}{b[4k - b\tau^2(v - u)(c_s - v)]^2} \quad (22)$$

$$T_{3p} = \frac{t^2(u - v)^2(a - bw)^2}{16k} \downarrow - \frac{k\tau^2(v - u)^2(a - bc_m)^2}{4[4k - b\tau^2(v - u)(c_s - v)]^2} \quad (23)$$

把上述相关参数代入制造方的利润函数式(15)内,得到分散决策产品的最佳零售价格、批发价格和回收质量水平,如式(24)一式(26)所示:

$$q^{*3p'} = \frac{\tau(u - v)(a - bc_m)}{-(-b\tau^2 u^2 + 2bc_s \tau^2 u + b\tau^2 v^2 - 2bc_s \tau^2 v + 4k)} \quad (24)$$

$$w^{*3p'} = \frac{-a\tau^2 u^2 + 2ac_s \tau^2 u + a\tau^2 v^2 - 2ac_s \tau^2 v + 4c_m k}{(-b\tau^2 u^2 + 2bc_s \tau^2 u + b\tau^2 v^2 - 2bc_s \tau^2 v + 4k)} \quad (25)$$

$$p^{*3p'} = \frac{-ab\tau^2 u^2 + 2abc_s \tau^2 u + ab\tau^2 v^2 - 2abc_s \tau^2 v \downarrow + 2ak + 2bc_m k}{b(-b\tau^2 u^2 + 2bc_s \tau^2 u + b\tau^2 v^2 - 2bc_s \tau^2 v + 4k)} \quad (26)$$

将其代入式(22)、式(23)中,得到式(27)、式(28):

$$T_r = \frac{4k^2(a-bc_m)^2}{b(-b\tau^2u^2+2bc_s\tau^2u+b\tau^2v^2-2bc_s\tau^2v+4k)^2} - \frac{k^2(a-bc_m)^2}{b(b(c_s-v)(u-v)\tau^2+4k)^2} \quad (27)$$

$$T_{3p} = -(k\tau^2(u-v)^2(a-bc_m)^2(b\tau^2u^2-2b\tau^2uv+b\tau^2v^2+4k)(-b\tau^2u^2-2b\tau^2uv+4bc_s\tau^2u \downarrow + 3b\tau^2v^2-4bc_s\tau^2v+12k))/(4(-2b^2c_s^2\tau^4u^2 \downarrow + 4b^2c_s^2\tau^4uw-2b^2c_s^2\tau^4v^2+b^2c_s\tau^4u^3+b^2c_s\tau^4u^2v \downarrow - 5b^2c_s\tau^4v^2u+3b^2c_s\tau^4v^3-b^2\tau^4u^3v+b^2\tau^4u^2v^2+b^2\tau^4uv^3-b^2\tau^4v^4-12bc_s k\tau^2u+12bc_s k\tau^2v \downarrow + 4bk\tau^2u^2+4bk\tau^2uv-8bk\tau^2v^2-16k^2)^2) \quad (28)$$

将以上求得的各个参数代入计算,最终得到闭环供应链整体利润,如式(29)所示:

$$\Pi^{*3p'} = \frac{k(a-bc_m)^2}{b[4k-b\tau^2u^2+2bc_s\tau^2u+b\tau^2v^2-2bc_s\tau^2v]} \quad (29)$$

命题 2 当 $c_s = v$ 时,该二部定价契约能够化解双重边际效应,很好的协调了闭环供应链,制造商能够最大化自身收益,同时确保销售商和回收商可以获利,使得供应链总效益与集中决策水平相当。

$$q^{*3p'} - q^{*3p} = \frac{\tau(u-v)(a-bc_m)}{-(-b\tau^2u^2+2bc_s\tau^2u+b\tau^2v^2-2bc_s\tau^2v+4k)} \downarrow - \frac{\tau(v-u)(a-bc_m)}{8k-2b\tau^2(v-u)(c_s-v)} = \frac{\tau(u-v)(a-bc_m)(8k-2b\tau^2(v-u)(c_s-v)) \downarrow + \tau(v-u)(a-bc_m)(-b\tau^2u^2+2bc_s\tau^2u+b\tau^2v^2 \downarrow -2bc_s\tau^2v+4k)}{-(-b\tau^2u^2+2bc_s\tau^2u+b\tau^2v^2-2bc_s\tau^2v+4k) \downarrow (8k-2b\tau^2(v-u)(c_s-v))} > 0$$

此命题充分证明该二部定价契约是有效的,当考虑回收产品质量水平这一影响因素时,既提高了回收效率,使得回收工作更加有序,又贴合了实际生活中废旧品多样化这一现象,因此考虑回收产品质量水平是非常有必要的。但同时,增加了回收产品质量水平这一影响因素时,还需要相应的契约来规范该闭环供应链的运作,由此该命题为实际企业合作模式提了新的思路,即利用二部定价契约来协调考虑回收产品质量水平的闭环供应链企业之间的合作。

对于未进行二部定价契约协调制造商的批发价、零售商商品销售价格及回收废旧品的质量水平,以及二部定价契约协调后的制造商的批发价、零售商商品售价由于受多方面因素的影响,通过解析式无法推断出其中的相互关系,因此在数值仿真部分进行讨论。

5 数值分析

为了更好地对模型进行比较分析,研究参考文献把相关参数进行下列设置:

$$a=3, b=0.1, \tau=0.6, k=1, u=1, v=3, c_m=6, 3 < c_s < 6$$

观察 c_s 的变化对制造商、销售商、第三商回收商利润,供应链整体利润大小的影响, c_s 为再制造能够节省

证明:

若 $\Pi^{*3p'} = \Pi^{*c}$, 得出:

$$\frac{k(a-bc_m)^2}{b[4k-b\tau^2u^2+2bc_s\tau^2u+b\tau^2v^2-2bc_s\tau^2v]} \downarrow = \frac{k(a-bc_m)^2}{b[4k-b\tau^2(c_s-u)^2]}$$

则

$$4k-b\tau^2u^2+2bc_s\tau^2u+b\tau^2v^2-2bc_s\tau^2v = 4k-b\tau^2(c_s-u)^2 \quad 4k-b\tau^2u^2+2bc_s\tau^2u+b\tau^2v^2-2bc_s\tau^2v - [4k-b\tau^2(c_s-u)^2] = 0$$

得, $c_s = v$

c_s 是再制造可以节约的最高成本, v 为厂商愿意支付的最大转让价,也就是实际中的定价环节,制造商愿意支付的最大转让价等于再制造节约的最高成本时,可以采用该二部定价契约,同时可以使闭环供应链的总利润最大,等于集中决策时的总利润。

命题 3 二部定价契约能够使得第三方回收商回收质量水平大于分散情况。

证明:

的最高成本,结果如图 1 所示。

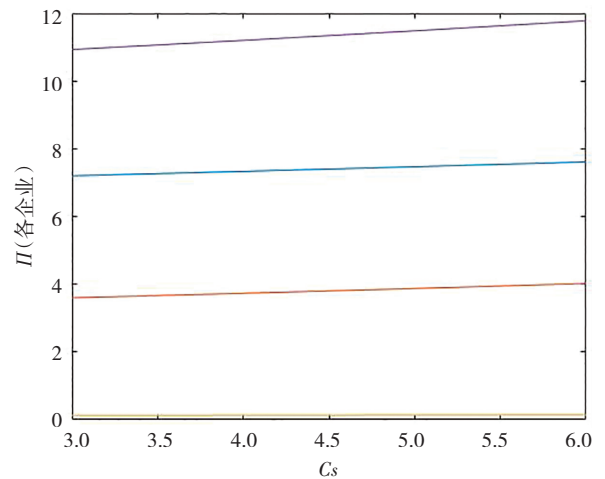


图 1 c_s 的改变对应闭环供应链上各企业利润的变化
Fig. 1 The change of c_s corresponds to the change of profits of enterprises in the closed-loop supply chain

图 1 反映了 c_s 的变化对各企业的利润的影响,从图 1 能够发现,闭环供应链系统的总利润是各节点企业(包含第三方回收商、销售商、制造商)的利润之和。同时也可以看到,利润最少的是处于底层的第三方回收商,在实际企业合作中,作为闭环供应链的一环,第

三方回收商在整个闭环供应链体系中所获得的利润是最少的,其他节点企业需尽量扶持第三方回收商,如给予一定的优惠政策或者让利等,以提高其积极性;其次为销售商,处于第三层;利润最大的为制造商,处于第二层,作为闭环供应链的重点节点,制造商获取最高利润,分散决策时,制造商受利益驱动主导的回收,可在回收转移定价方面提高相应回收价格以提高其他企业的积极性,该制造商回收价格与再制造能够节约的最大成本相当时,闭环供应链整体利润最大,制造商能够获取最大收益。总利润表现为上升的态势,可见随着再制造节约最大成本的增加,整体利润逐渐增加,再制造对于整个供应链节点企业来说是有盈利空间的,考虑回收产品质量最终对节点企业是有利的。

若 $c_s = 6$, 则可得分散决策模式第三方回收商负责回收与二部定价契约下第三方回收商负责回收的闭环供应链下均衡值比较,如表 1 所示。

表 1 不同决策模型下的均衡值比较

Table 1 Comparison of equilibrium values under different decision models

	分散决策模式	二部定价契约机制
p	11 190/473 (23.658)	1 710/107 (15.981)
w	8 190/473 (17.315)	210/107 (1.963)
q	180/473 (0.381)	90/107 (0.841)
Π_m	3 600/473 (7.611)	302 945 400/23 939 003 (12.655)
Π_r	900 000/223 729 (4.023)	900 000/223 729 (4.023)
Π_{3p}	32 400/223 729 (0.145)	32 400/223 729 (0.145)
Π	2 635 200/223 729 (11.779)	1 800/107 (16.822)

此分析结果对命题做了进一步的验证,制造商凭借与销售商以及第三方回收商签订二部定价契约,能够帮助提高供应链的收益,同时能够保证较低的零售价格以及较高的回收产品质量水平,由此可得,其能够协调双重边际效应。

6 结论与讨论

6.1 结论

研究在考虑第三方回收质量水平的情景下针对分散决策相较于集中决策产生的双重边际效应,利用二部定价契约对闭环供应链进行协调,协调后的闭环供应链利润与集中决策情形时相当,由此证明此二部定价契约有效,对实际中企业之间合作方式有一定借鉴意义。

重点得出结论:(1) 第三方回收考虑回收物品质量水平,集中决策时闭环供应链总利润优于分散情况的总利润。(2) 二部定价契约能够有效协调闭环供应链,并解决由于分散决策造成的双重边际效应的问题。

(3) 当 $c_s = v$ (再制造能够节约的最大成本与制造商愿意为回收产品支付的最大转移价相当)时,二部定价契约能够令分散决策时的闭环供应链总收益等于集中策略时的闭环供应链总收益。(4) 二部定价契约使得第三方回收物品的质量性能优于原始分散决策下第三方回收物品的质量性能。

6.2 讨论

对于现实企业管理中的启示为:如果企业选择第三方回收模式,该情况下若需考虑回收产品质量,如果外界环境复杂多变,企业由于成本等各种实际原因需要选择第三方回收,此时各节点企业进行分散决策,为了提高生产效率,考虑回收产品质量,可以运用二部定价契约;当今时代,各行各业发展日新月异,环境复杂多变,企业之间逐渐谋求长期稳定合作发展,因此分散决策是各企业的必然选择,但分散决策会形成双重边际效应,使得闭环供应链整体效率降低,因此利用二部定价契约进行协调是可选择的方法之一,由此可以避免由于缺乏对市场的快速反应而造成的资金风险,同时提高闭环供应链整体收益。

研究还存在一定局限性,只研究了制造商委托第三方回收商进行废旧品的回收,后续研究可深入分析双渠道回收模式下闭环供应链的协调问题,以及第三方回收商具有规模效应的情形下具体的定价决策。同时本文还可以从既考虑回收产品质量又研究企业非理性的角度出发,研究闭环供应链相关定价问题。

参考文献(References):

- [1] GUIDE V D R, ARRISON T P, VAN WASSENHOVE L N. The challenge of closed-loop supply chains [J]. Interfaces, 2003, 33(6): 3—6.
- [2] JUHONG GAO, HONGSHUAI HAN, LITING HOU, et al. Pricing and effort decisions in a closed-loop supply chain under different channel power structures [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112(Pt 3).
- [3] BENRONG ZHENG, CHAO YANG, JUN YANG, et al. Dual-channel closed loop supply chains: Forward channel competition, power structures and coordination [J]. International Journal of Production Research, 2017, 55(12): 3510—3527.
- [4] 王文宾, 达庆利, 聂锐. 考虑渠道权力结构的闭环供应链定价与协调[J]. 中国管理科学, 2011, 19(5): 29—36. WANG Wen-bin, DA Qing-li, NIE Rui. Pricing and coordination of closed-loop supply chain considering channel power structure [J]. China Management Science, 2011, 19(5): 29—36.
- [5] SHULMAN J D, COUGHLAN A T, SAVASKAN R C.

- Optimal reverse channel structure for consumer product returns [J]. *Marketing Science*, 2010, 29(6): 1071—1085.
- [6] MILLET D. Designing a sustainable reverse logistics channel: The 18 generic structures framework [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2011, 19(6): 588—597.
- [7] ATASU A, TOKTAY L B, VAN WASSENHOVE L N. How collection cost structure drives a manufacturer's reverse channel choice [J]. *Production and Operations Management*, 2013, 22(5): 1089—1102.
- [8] ATASU A, TOKTAY L B, VAN WASSENHOVE L N. How collection cost structure drives a manufacturer's reverse channel choice [J]. *Production and Operations Management*, 2013, 22(5): 1089—1102.
- [9] 高举红,滕金辉,侯丽婷,等.需求不确定下考虑竞争的闭环供应链定价研究[J].*系统工程学报*,2017,32(1):78—88.
GAO Ju-hong, TENG Jin-hui, HOU Li-ting, et al. A study on the pricing of closed-loop supply chain considering competition based on uncertain demand [J]. *Journal of Systems Engineering*, 2017, 32(1): 78—88.
- [10] 姚锋敏,滕春贤.公平关切下的两零售商竞争闭环供应链决策模型[J].*计算机集成制造系统*,2017,23(8):1731—1738.
YAO Feng-min, TENG Chun-xian. A closed-loop supply chain decision model of competition between two retailers under the concern of fairness [J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2017, 23(8): 1731—1738.
- [11] 谢萍萍,李芳.基于第三方回收模式考虑互惠偏好的闭环供应链决策分析[J/OL].*计算机应用研究*,2019(8):1-6 [2018-09-25].
XIE Ping-ping, LI Fang. Decision analysis of closed-loop supply chain based on third-party recovery model considering reciprocity preference [J/OL]. *Research in Computer Applications*, 2019(8): 1-6 [2018-09-25].
- [12] 韩梅,康凯.回收数量不确定的双重竞争闭环供应链定价研究[J].*计算机工程与应用*,2019,55(12):230-236+244.
HAN Mei, KANG Kai. Research on the pricing of dual-competition closed-loop supply chain with uncertain recovery quantity [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(12): 230-236, 244.
- [13] WENYI CHEN, Beste Kucukyazici, Vedat Verter, María Jesús Sáenz. Supply chain design for unlocking the value of remanufacturing under uncertainty [J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 247(3): 57—66.
- [14] 徐静,程发新,刘吉林.政府补贴下考虑消费者低碳偏好的闭环供应链网络均衡决策[J].*科技管理研究*,2019,39(13):266—274.
XU Jing, CHENG Fa-xin, LIU Jin-lin. A closed-loop supply chain network equilibrium decision making under government subsidies that takes into account consumers' low-carbon preferences [J]. *Science and Technology Management Research*, 2019, 39(13): 266—274.
- [15] 聂佳佳,邓东方.再制造产品质量对闭环供应链回收渠道的影响[J].*工业工程与管理*,2014,19(1):1—7.
NIE Jia-jia, DENG Dong-fang. Influence of remanufactured product quality on the recovery channel of closed-loop supply chain [J]. *Industrial Engineering and Management*, 2014, 19(1): 1—7.
- [16] 董乾东,李敏,姜素红.基于产品质量差异的闭环供应链混合回收模式[J].*系统工程*,2017,35(2):116—121.
DONG Gan-dong, LI Min, JIANG Su-hong. Mixed recovery model of closed-loop supply chain based on product quality difference [J]. *Systems Engineering*, 2017, 35(2): 116—121.
- [17] 韩梅,康凯.回收质量不确定下的双重竞争闭环供应链定价研究[J].*技术经济与管理研究*,2019(5):14—20.
HAN Mei, KANG Kai. Research on the pricing of dual-competition closed-loop supply chain based on uncertain recovery quality [J]. *Technical Economics and Management Research*, 2019(5): 14—20.
- [18] 周雄伟,熊花纬,陈晓红.基于回收产品质量水平的闭环供应链渠道选择模型[J].*控制与决策*,2017,32(2):193—202.
ZHOU Xiong-wei, XIONG Hua-wei, CHEN Xiao-hong. Channel selection model of closed-loop supply chain based on recycled product quality level [J]. *Control and Decision-making*, 2017, 32(2): 193—202.
- [19] 黄祖庆,邵伟,孟丽君.回收量不确定下考虑技术授权的闭环供应链产品定价研究[J].*运筹与管理*,2022,31(12):69—75.
HUANG Zu-qing, SHAO Wei, MENG Li-jun. Research on closed-loop supply chain product pricing considering technology licensing under the uncertainty of recovery volume [J]. *Operation Research and Management*, 2022, 31(12): 69—75.
- [20] 焦建玲,潘正涛,李晶晶.考虑再利用的经济效益与排放效率的动力电池回收模式选择[J/OL].*中国管理科学*:1-16 [2023-02-21].
JIAO Jian-ling, PAN Zheng-tao, LI Jing-jing. Selection of power battery recovery mode considering the economic benefits and emission efficiency of reuse [J/OL]. *China Management Science*: 1-16 [2013-02-21].