

# 碳税政策下基于回收质量不确定的闭环供应链定价策略\*

张铃铃, 陈淮莉

(上海海事大学 物流科学与工程研究院, 上海 201306)

**摘要:**【目的】通过深入研究回收再制造中回收质量不确定的问题,并结合碳税政策讨论两级闭环供应链的定价决策问题,从而探讨企业如何在此环境背景下获得最大的经济效益。【方法】运用博弈论的方法求出了产品的最优批发价格、最优零售价格,并进一步求得供应链成员的最大利润,讨论了碳税税率和再制造质量门槛对制造商和零售商的产品定价以及市场需求量等的影响,随后利用两部定价契约对闭环供应链进行协调。【结果】通过算例分析验证了模型的正确性,结果表明:当碳税税率高时,企业可适当提高废旧产品的再制造质量门槛;当碳税税率低时,企业应考虑降低再制造质量门槛,以此来兼顾企业的经济效益和环境效益。【结论】政府部门通过对碳税税率的调节与碳税的征收,激励制造商从事再制造产品生产,从而促使各企业在协调机制下展开合作。

**关键词:**碳税;回收质量不确定;闭环供应链;定价策略;博弈论

**中图分类号:**O225;F274

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-6693(2019)05-0042-10

当前,人类正面临一系列全球变化带来的问题,其中较为严重的问题是二氧化碳排放造成的气候变暖。世界上许多国家都在积极采取措施,以便尽可能地减少碳排放量,其中碳税<sup>[1]</sup>是国际上为减少温室气体排放采取的一项重要政策。截至2012年,欧洲已有15个国家实施了碳税政策,美国部分城市以及加拿大等国家相继开征碳税。中国也提出将在2020年实现单位GDP二氧化碳排放强度应相对于2005年降低40%的减排目标。在政府采取一系列政策的同时,回收再制造<sup>[2]</sup>必然是企业生产方式的转变方向。随着理论和实践的不断发展与进步,回收再制造是可以解决碳排放量和绿色生产要求的。那么,闭环供应链的成员需要转变它的生产经营模式,这亦将影响新旧产品的定价与回收。同样,闭环成员如何作出更加合理的定价以及如何制定回收策略是值得研究的课题。

至今为止,国内外学者对闭环供应链定价决策问题做了大量研究。Gaur等人<sup>[3]</sup>指出闭环供应链是通过产品再造来扩大价值的一项举措,阐述了闭环供应链的定义和特征,强调其特征为生产、消费、再生产。而Savaskan等人<sup>[4]</sup>基于前人的研究,讨论了不同模式下闭环供应链的最大收益。孙浩等人<sup>[5]</sup>探讨了集中式决策和3种分散式回收模式下的闭环供应链定价策略。Rabindranath和Alamdard等人<sup>[6-9]</sup>分别研究了关于闭环供应链多阶段再制造以及多级闭环供应链中的回收与定价策略。王玉燕等人<sup>[10]</sup>分析了政府回收政策下电子产品闭环供应链的结构重组,并对该闭环供应链运行模式的修正进行了研究。颜荣芳等人<sup>[11]</sup>讨论了关于再制造闭环供应链的差别定价策略。

在如今倡导低碳与绿色生产的背景下,已有学者开始考虑低碳环境下闭环供应链的生产决策与定价策略问题,并围绕碳限额、碳交易、碳税政策以及碳减排技术进行研究。Drake等人<sup>[12]</sup>分别研究了碳限额与交易和碳税政策对两阶段企业的技术选择和产能决策的影响,结果表明碳交易政策下具有更高的期望利润。Mohammed等人<sup>[13]</sup>提出考虑碳足迹的多周期闭环供应链的设计模型,该模型捕获了供应链总成本和碳排放之间存在的权衡。Tao等人<sup>[14]</sup>研究了制造过程中的两种碳排放约束,建立了闭环供应链均衡模型并验证了该模型的有效性。李浩霖等人<sup>[15]</sup>运用博弈论方法分析了公平关切对供应链定价和碳减排决策的影响。然而上述研究没有涉及回收再制造以及回收产品质量的问题。事实上,企业若同时生产新产品和再制造产品,再制造产品生产碳排放量常常

\* 收稿日期:2018-12-28 修回日期:2019-09-09 网络出版时间:2019-09-26 11:24

资助项目:国家社会科学基金(No. 15BGL084);上海市科学技术委员会科研计划(No. 14DZ2280200)

第一作者简介:张铃铃,女,研究方向为采购与供应链管理、定价策略,Email:963816957@qq.com;通信作者:陈淮莉,女,教授,博士,Email:hlchen@shmtu.edu.cn

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20190926.1124.032.html>

低于新产品,因此这种绿色生产模式是值得倡导的。同时,政府部门通过征收碳税,会对企业新产品和再制造产品的定价决策产生影响,因此考虑闭环供应链再制造生产下的减排及定价策略问题更具有实际意义。王道平等<sup>[16]</sup>考虑了政府对制造商碳排放情况进行奖惩,以此为背景研究了对新产品和再造品进行差别定价下的闭环供应链协调问题。舒彤等人<sup>[17]</sup>和马中华等人<sup>[18]</sup>基于政府部门对再制造产品制造商和消费者的差别权重补贴及自执行旁支付的利润契约机制,运用博弈论建立考虑消费者绿色偏好的闭环供应链定价模型。

上述文献虽研究了碳税政策下考虑回收再制造的企业定价决策问题,但大多假定废旧产品回收质量确定,且再制造过程中产品产生的二氧化碳质量与制造新产品相同,这与现实情景不符。部分学者针对回收质量不确定对制造企业的生产和定价决策的影响进行了探讨<sup>[19-20]</sup>,而鲜有文献详细讨论碳税税率与再制造质量门槛的变化对闭环供应链的影响。

基于上述研究背景,本文考虑碳税政策对闭环供应链定价决策问题进行研究,将回收质量不确定这一指标进行量化,分别构建相应的闭环供应链集中和分散决策模型,并通过设计两部定价契约对闭环供应链的利润进行协调。最后,结合算例和灵敏度分析验证模型的有效性,以期为企业在“绿色”背景下获取最佳效益提供理论指导和实践参考。

## 1 模型描述与研究假设

在本文闭环供应链系统中,制造商不仅生产新产品,还会对从零售商手中收回的废旧产品进行再加工,零售商主要是负责从消费者手中回收废旧产品并在之后继续销售新产品与再制造产品。此外,政府部门会对制造商生产过程中产生的二氧化碳进行征税。

针对闭环供应链系统,将复杂的现实情况进行简化并做出如下假设:

1) 回收产品的质量参差不齐,并且制造商拿到的回收产品  $q \in [0, q_0)$  都是从零售商手中获得的。假设回收质量  $q$  是在  $[0, 1]$  上的均匀分布,  $f(q)$  为质量密度函数<sup>[21]</sup>。此外,假设  $q_0$  为再制造质量门槛,这表示如果废旧产品的质量  $q$  在  $q_0$  至 1 之间则可以再制造,如果其质量在 0 至  $q_0$  之间则将进行废弃处理,且处理成本为固定成本  $C_1$ 。

2) 制造商回购废旧产品的价格  $F$  与回收质量  $q$  呈线性关系,表达式为  $F = \theta q$ ,  $\theta$  代表质量价值系数。零售商从消费者手中回收到的废旧产品的价格  $f$  与  $F$  有关,表达式为  $f = (1-r)F = (1-r)\theta q$ , 其中  $r \in (0, 1)$  表示零售商对废旧产品进行回收操作时获得的单位利润率。

3) 废旧产品回收数量与回收价格  $f$  呈线性关系,即  $G = h + kf$ 。其中,  $h$  表示消费者无偿提供废旧产品的数量,而  $k$  表示回收价格敏感系数。此时,可进行再制造的废旧产品数量为  $G_0 = G \int_{q_0}^1 f(q) dq$ 。

4) 产品的市场需求量是销售价格  $p$  的线性减函数,即  $D = a - bp (D > G)$ 。其中,  $a$  为市场潜在需求量,  $b$  为销售价格敏感系数。另外,制造商生产的再制造产品和新产品的数量分别为  $D_r = G_0$  和  $D_n = D - G_0$ , 并将两种产品以价格  $\omega$  全部批发给零售商。

5) 新产品的生产成本为  $C_n$ , 再制造产品的生产成本为  $C_r$ 。另假设再制造产品的生产成本与废旧产品回收质量呈线性关系,即  $C_r = C_n - \vartheta q$ , 其中  $\vartheta$  为质量成本系数。

6) 制造商生产单位新产品和再制造产品的二氧化碳排放量分别为  $e_n$  和  $e_r$ 。假设单位再制造产品生产过程中的二氧化碳排放量是废旧产品回收质量的线性减函数,即  $e_r = (1-q)e_n$ 。政府部门对制造商生产过程中产生的二氧化碳进行征税,税率为每吨二氧化碳  $\lambda$  元。则对单位新产品和再制造产品征收的碳税分别为  $\lambda e_n$  和  $\lambda e_r = \lambda(1-q)e_n$ 。

## 2 闭环供应链分散和集中定价模型构建

从模型描述与研究假设出发,本文分别构建碳税政策下考虑回收质量不确定的闭环供应链分散和集中定价模型,并对两种定价模型进行比较分析,旨在探索碳税政策和废旧产品回收质量对闭环供应链产品定价和成员利润的影响。

### 2.1 闭环供应链分散定价模型构建与分析

在建立闭环供应链分散定价模型时,考虑回收质量不确定并运用 Stackelberg 博弈方法,将制造商视为博弈

的领导者,零售商为跟随者,假设市场信息完全对称,决策者的风险偏好为中性。供应链中的成员均只基于自身利益最大化的出发点进行决策。制造商和零售商分散决策的最优利润分别表示为:

$$\max \pi_m = \omega D - (C_n(D - G_0) + C_r G_0) - FG - C_1 - (\lambda(D - G_0)e_n + \lambda G_0 e_r), \quad (1)$$

$$\max \pi_r = pD + FG - \omega D - fG. \quad (2)$$

其中:(1)式的最优利润是关于  $\omega$  和  $\theta$  的严格联合凹函数,(2)式的最优利润是关于  $p$  和  $r$  的严格联合凹函数,因此模型存在唯一最优解。采用逆向归纳法得到分散决策时产品的最优定价为:

$$\begin{cases} \omega^* = \frac{a + b(C_n + \lambda e_n)}{2b}, \\ F^* = \frac{(1 - q_0^2)(\vartheta + \lambda e_n)}{4} - \frac{h}{2k}, \\ p^* = \frac{3a + b(C_n + \lambda e_n)}{4b}, \\ f^* = \frac{(1 - q_0^2)(\vartheta + \lambda e_n)}{8} - \frac{3h}{4k}. \end{cases} \quad (3)$$

由方程组(3)和假设 4)可得分散决策下新产品和再制造产品的最优需求量分别为:

$$\begin{cases} D_n^* = \frac{2(a - b(C_n + \lambda e_n)) - (1 - q_0)(k(\vartheta + \lambda e_n)(1 - q_0^2) + 2h)}{8}, \\ D_r^* = \frac{(1 - q_0)(k(\vartheta + \lambda e_n)(1 - q_0^2) + 2h)}{8}. \end{cases} \quad (4)$$

由方程组(4)和假设 6)可得分散决策均衡解下制造商碳排放总量为:

$$E^* = \frac{4(a - b(C_n + \lambda e_n)) - (1 - q_0^2)(k(\vartheta + \lambda e_n)(1 - q_0^2) + 2h)}{16} e_n. \quad (5)$$

由方程组(3)和(1),(2)式分别可得分散决策下制造商、零售商和闭环供应链最优利润为:

$$\begin{cases} \pi_m^* = \frac{(a - b(C_n + \lambda e_n))^2}{8b} + \frac{(k(1 - q_0^2)(\vartheta + \lambda e_n) + 2h)^2}{32k} - C_1, \\ \pi_r^* = \frac{(a - b(C_n + \lambda e_n))^2}{16b} + \frac{(k(1 - q_0^2)(\vartheta + \lambda e_n) + 2h)^2}{64k}, \\ \pi^* = \pi_m^* + \pi_r^* = \frac{3(a - b(C_n + \lambda e_n))^2}{16b} + \frac{3(k(1 - q_0^2)(\vartheta + \lambda e_n) + 2h)^2}{64k} - C_1. \end{cases} \quad (6)$$

对上述最优结果进行分析,可得到结论 1~3。

**结论 1** 制造商提供的批发价格和零售商提供的销售价格随碳税税率  $\lambda$  的增加而提高,与再制造质量门槛  $q_0$  无关;废旧产品的最优回收价格和回购价格随碳税税率  $\lambda$  的增加而提高,随再制造质量门槛  $q_0$  的增加而降低。

**证明** 对方程组(3)中的  $\omega^*$ ,  $F^*$ ,  $p^*$ ,  $f^*$  分别求他们关于  $\lambda$  和  $q_0$  的一阶导数:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega^*}{\partial \lambda} = \frac{e_n}{2} > 0, \quad \frac{\partial p^*}{\partial \lambda} = \frac{e_n}{4} > 0, \quad \frac{\partial F^*}{\partial \lambda} = \frac{(1 - q_0^2)e_n}{4} > 0, \quad \frac{\partial f^*}{\partial \lambda} = \frac{(1 - q_0^2)e_n}{8} > 0, \\ \frac{\partial F^*}{\partial q_0} = -\frac{q_0(\vartheta + \lambda e_n)}{2} < 0, \quad \frac{\partial f^*}{\partial q_0} = -\frac{q_0(\vartheta + \lambda e_n)}{4} < 0. \end{aligned} \quad \text{证毕}$$

**结论 2** 新产品的需求量随碳税税率  $\lambda$  的增加而下降,随再制造质量门槛  $q_0$  提高而上升;再制造产品的需求量与新产品需求量情况相反。

**证明** 对方程组(4)中的  $D_n^*$  分别求关于  $\lambda$  和  $q_0$  的一阶导数得:

$$\frac{\partial D_n^*}{\partial \lambda} = -\frac{e_n(2b + k(1 - q_0 - q_0^2 - q_0^3))}{8} < 0, \quad \frac{\partial D_n^*}{\partial q_0} = \frac{2h + k(\vartheta + \lambda e_n)(1 - q_0)(1 + 3q_0)}{8} > 0,$$

即  $D_n^*$  随着  $\lambda$  增大而减小,随着  $q_0$  增大而增大;同理,  $D_r^*$  随着  $\lambda$  增大而增大,随着  $q_0$  增大而减小。证毕

**结论 3** 制造商的碳排放总量随碳税税率  $\lambda$  的增加而下降,随再制造质量门槛  $q_0$  的增加而上升。

**证明** 对(5)式中的  $E^*$  分别求关于  $\lambda$  和  $q_0$  的一阶导数得:

$$\frac{DE^*}{D\lambda} = -\frac{e_n^2(4b + k(1 - 2q_0^2 + q_0^4))}{16} < 0, \quad \frac{DE^*}{Dq_0} = \frac{e_n q_0 (h + k(1 - q_0^2)(\vartheta + \lambda e_n))}{4} > 0,$$

即  $E^*$  随着  $\lambda$  增大而减小,随着  $q_0$  增大而增大。证毕

分析结论 1~3 可知:1) 制造商为了降低碳税带来的利润损失,将提高产品的批发价格,零售商随之提高销售价格,由此达到将碳税成本转嫁给消费者的目的。2) 除此以外,在碳税政策下制造商会考虑扩大再制造产品产量,并提高废旧产品回购价格,同时零售商亦将提高废旧产品回收价格,这将导致目标市场上新产品需求量的下降,再制造产品需求量的上升,最终达到减少碳排放总量的效果。3) 再制造质量门槛提高时,制造商的再制造产品质量会因此提高,但制造商给出的回收废旧产品价格必然升高,实际上制造商进行再制造的利润反而因此降低。4) 在再制造质量门槛提高的前提下,制造商和零售商将尽可能降低废旧产品回购与回收价格,进而回收数量将下降。在市场需求维持稳定的情况下,由于可再制造的废旧产品数量减少,制造商将生产更多的新产品,这必会导致碳排放总量的上升。

## 2.2 集中决策模型构建与分析

考虑碳税政策下回收质量不确定的闭环供应链的集中决策模型,即供应链成员共同决策相关变量以求得整个闭环供应链的利润最大化,一同决定定价策略。供应链的总体利润为销售产品所得的收益与制造成本、回收成本、废旧产品处理成本以及碳排放成本的差,则集中决策下闭环供应链的最优利润表示为:

$$\begin{aligned} \max \pi = & pD - C_n(D - G_0) - C_r G_0 - \lambda e_n G_0 - \lambda e_n(D - G_0) - fG - C_1 = \\ & (p - C_n - \lambda e_n)D + (C_n - C_r + \lambda(e_n - e_r))G_0 - fG - C_1. \end{aligned} \quad (7)$$

与分散决策模型求解方法相同,采用逆向归纳法得到分散决策时产品的最优定价,可得集中决策时最优定价:

$$\begin{cases} p^{**} = \frac{a + b(C_n + \lambda e_n)}{2b}, \\ f^{**} = \frac{(1 - q_0^2)(\vartheta + \lambda e_n)}{4} - \frac{h}{2k}. \end{cases} \quad (8)$$

由方程组(8)和假设 4)可得集中决策下新产品和再制造产品的最优需求量分别为:

$$\begin{cases} D_n^{**} = \frac{2(a - b(C_n + \lambda e_n)) - (1 - q_0)(k(\vartheta + \lambda e_n)(1 - q_0^2) + 2h)}{4}, \\ D_r^{**} = \frac{(1 - q_0)(k(\vartheta + \lambda e_n)(1 - q_0^2) + 2h)}{4}. \end{cases} \quad (9)$$

由方程组(8)和假设 6)可得集中决策均衡解下制造商碳排放总量为:

$$E^{**} = \frac{4(a - b(C_n + \lambda e_n)) - (1 - q_0^2)(k(\vartheta + \lambda e_n)(1 - q_0^2) + 2h)}{8} e_n. \quad (10)$$

由方程组(8)和(7)式可得集中决策下闭环供应链最优利润为:

$$\pi^{**} = \frac{(a - b(C_n + \lambda e_n))^2}{4b} + \frac{(k(1 - q_0^2)(\vartheta + \lambda e_n) + 2h)^2}{16k} - C_1. \quad (11)$$

通过对集中和分散定价决策方式进行比较分析,可以得到结论 4。

**结论 4** 集中决策的新产品以及再制造产品的销售价格相较于分散决策的销售价格要低;废旧产品的回收价格相较于分散决策时的回收价格要高;新产品和再制造产品的需求量高于分散决策时的需求量;碳排放量比分散决策时低。

**证明** 将集中决策和分散决策模型中求得的最优销售价格、回收价格与新产品和再制造产品的结果分别作差,有:

$$\begin{aligned} p^{**} - p^* &= \frac{a + b(C_n + \lambda e_n)}{2b} - \frac{3a + b(C_n + \lambda e_n)}{4b} = \frac{b(C_n + \lambda e_n) - a}{4b} < 0, \\ f^{**} - f^* &= \frac{(1 - q_0^2)(\vartheta + \lambda e_n)}{4} - \frac{h}{2k} - \left[ \frac{(1 - q_0^2)(\vartheta + \lambda e_n)}{8} - \frac{3h}{4k} \right] = \frac{k(1 - q_0^2)(\vartheta + \lambda e_n) + 2h}{8k} > 0, \\ D_n^{**} - D_n^* &= \frac{2(a - b(C_n + \lambda e_n)) - (1 - q_0)(k(\vartheta + \lambda e_n)(1 - q_0^2) + 2h)}{4} - \\ & \quad \frac{2(a - b(C_n + \lambda e_n)) - (1 - q_0)(k(\vartheta + \lambda e_n)(1 - q_0^2) + 2h)}{8} = D_n^* > 0, \\ D_r^{**} - D_r^* &= \frac{(1 - q_0)(k(\vartheta + \lambda e_n)(1 - q_0^2) + 2h)}{4} - \frac{(1 - q_0)(k(\vartheta + \lambda e_n)(1 - q_0^2) + 2h)}{8} = D_r^* > 0. \end{aligned} \quad \text{证毕}$$

**结论 5** 在集中决策时,闭环供应链的总利润高于分散决策时的总利润。

**证明**

$$\pi^{**} - \pi^* = \frac{(a-b(C_n + \lambda e_n))^2}{4b} + \frac{(k(1-q_0^2)(\vartheta + \lambda e_n) + 2h)^2}{16k} - C_1 -$$

$$\left[ \frac{3(a-b(C_n + \lambda e_n))^2}{16b} + \frac{3(k(1-q_0^2)(\vartheta + \lambda e_n) + 2h)^2}{64k} - C_1 \right] =$$

$$\frac{(a-b(C_n + \lambda e_n))^2}{16b} + \frac{(k(1-q_0^2)(\vartheta + \lambda e_n) + 2h)^2}{64k} > 0. \quad \text{证毕}$$

分析结论 4 和 5 可知:1) 当制造商和零售商采取集中决策时,制造商给出的回收价格提高,看似无利可寻,但是产品质量却随之提高、回收数量随之增加,这导致再制造产品数量增多且质量有所保障,这将提升闭环供应链的整体利润;2) 产品的销售价格会下降,这在某种程度上增加了市场需求量,为供应链成员获得更大的收益。事实上,此时消费者的利益也达到最大化,即在碳税政策下回收质量不确定的集中决策会使得制造商、零售商以及消费者的利益均达到最大。

### 3 闭环供应链契约协调机制设计

基于上述讨论可以看出,在碳税政策下回收质量不确定的闭环供应链中,进行分散决策的供应链利润比采取集中决策的供应链利润要低。则此时,有必要引入两部定价契约对碳税政策下回收质量不确定的闭环供应链进行协调。两部定价契约的形式可表示为 $(\omega^c, F^c, H)$ ,其中 $\omega^c$ 是制造商提供给零售商的批发价格, $F^c$ 是制造商提供给零售商废旧产品的回购价格, $H$ 是制造商向零售商收取的固定费用。由此,两部定价契约下制造商和零售商的利润分别为:

$$\pi_m = \omega^c D - (C_n(D - G_0) + C_r G_0) - F^c G - C_1 - (\lambda(D - G_0)e_n + \lambda G_0 e_r) + H, \quad (12)$$

$$\pi_r = pD + F^c G - \omega^c D - fG - H. \quad (13)$$

对(13)式求解关于 $p$ 和 $f$ 的一阶导数可得:

$$\begin{cases} p^c = \frac{a + b\omega^c}{2b}, \\ f^c = \frac{F^c}{2} - \frac{h}{2k}. \end{cases} \quad (14)$$

为了使协调机制中闭环供应链的利润能够达到集中决策时闭环供应链的利润水平,需要满足两部定价契约中的销售价格与集中决策中的新产品和再制造产品销售价格相等,即 $p^c = p^{**}$ ,两部定价契约中的回收价格与集中决策中的废旧产品回收价格相等,即 $f^c = f^{**}$ 。由此可得两部定价契约中新产品和再制造产品最优批发价格 $\omega^c$ 和废旧产品最优回购价格 $F^c$ :

$$\begin{cases} \omega^c = C_n + \lambda e_n, \\ F^c = \frac{(1-q_0^2)(\vartheta + \lambda e_n)}{2}. \end{cases} \quad (15)$$

此时,制造商和零售商的利润分别为:

$$\begin{cases} \pi_m^c = \frac{h(1-q_0^2)(\vartheta + \lambda e_n)}{4} + \frac{k((1-q_0^2)(\vartheta + \lambda e_n))^2}{8} + H - C_1, \\ \pi_r^c = \frac{(a-b(C_n + \lambda e_n))^2}{4b} + \frac{(k(1-q_0^2)(\vartheta + \lambda e_n) + 2h)^2}{16k} - H. \end{cases} \quad (16)$$

要证明使用两部定价契约时,供应链成员的利润不低于分散决策下的利润,则必须满足 $\pi_m^c \geq \pi_m^*$ ,由此可得到固定支付 $H$ 满足:

$$\begin{cases} H \geq \frac{(a-b(C_n + \lambda e_n))^2}{8b} - \frac{3k((1-q_0^2)(\vartheta + \lambda e_n))^2}{32} - \frac{h(1-q_0^2)(\vartheta + \lambda e_n)}{8} + \frac{h^2}{16k} - C_1, \\ H \leq \frac{3(a-b(C_n + \lambda e_n))^2}{16b} + \frac{3(k(1-q_0^2)(\vartheta + \lambda e_n) + 2h)^2}{64}. \end{cases} \quad (17)$$

基于上述讨论,在碳税政策下,当两部定价契约 $(\omega^c, F^c, H)$ 满足(15),(17)式时,即可促成碳税政策下回收质量不确定的闭环供应链集中决策方式的实施,并且实现闭环供应链的协调。

### 4 算例分析

为了说明上述结论的有效性,现结合实际运作情况和研究经验对本文模型进行验证,并通过算例分析和参数的灵敏度分析,为碳税政策的制定和企业定价决策提供理论依据。在碳税政策下考虑回收质量不确定的闭环供应链中:碳税税率  $\lambda=15$ ,再制造质量门槛  $q_0=0.3$ ,单位新产品生产碳排放量  $e_n=2$ ,市场固定的需求量  $a=1\ 000$ ,消费者无偿提供的废旧品数量  $h=40$ ,回收价格敏感系数  $k=2.5$ ,销售价格敏感系数  $b=2.5$ ,再制造质量成本系数  $\vartheta=160$ ,新产品制造成本  $C_n=200$ ,不可再制造废旧产品固定废弃处理成本为  $C_1=200$ 。

#### 4.1 不同定价决策方式最优结果比较

综合上述结果可以得到最终各情况下的决策变量最优解。表 1 清晰地表示出两种定价策略模型各自的最优情况。

表 1 不同定价决策方式的最优解

Tab.1 Optimal results of the different decision-making methods

变量	分散决策	集中决策
$p$	$\frac{3a+b(C_n+\lambda e_n)}{4b}$	$\frac{a+b(C_n+\lambda e_n)}{2b}$
$f$	$\frac{(1-q_0^2)(\vartheta+\lambda e_n)}{8}-\frac{3h}{4k}$	$\frac{(1-q_0^2)(\vartheta+\lambda e_n)}{4}-\frac{h}{2k}$
$\omega$	$\frac{a+b(C_n+\lambda e_n)}{2b}$	—
$F$	$\frac{(1-q_0^2)(\vartheta+\lambda e_n)}{4}-\frac{h}{2k}$	—
$D_n$	$\frac{2(a-b(C_n+\lambda e_n))-(1-q_0)(k(\vartheta+\lambda e_n)(1-q_0^2)+2h)}{8}$	$\frac{2(a-b(C_n+\lambda e_n))-(1-q_0)(k(\vartheta+\lambda e_n)(1-q_0^2)+2h)}{4}$
$D_r$	$\frac{(1-q_0)(k(\vartheta+\lambda e_n)(1-q_0^2)+2h)}{8}$	$\frac{(1-q_0)(k(\vartheta+\lambda e_n)(1-q_0^2)+2h)}{4}$
$\pi$	$\frac{3(a-b(C_n+\lambda e_n))^2}{16b} + \frac{3(k(1-q_0^2)(\vartheta+\lambda e_n)+2h)^2}{64k} - C_1$	$\frac{(a-b(C_n+\lambda e_n))^2}{4b} + \frac{(k(1-q_0^2)(\vartheta+\lambda e_n)+2h)^2}{16k} - C_1$

进一步根据模型及参数设定,对碳税政策下考虑回收质量不确定的闭环供应链分散决策、集中决策和协调机制的最优结果比较如表 2 所示。

由表 2 及模型部分所得结论可以看出:1)集中决策时,新产品和再制造产品销售价格相较于分散决策时的销售价格要低;而废旧产品回购价格和回收价格相较于分散决策时的价格要高;2)产品的需求量以及闭环供应链的整体利润在进行集中决策和协调机制下要更高;3)闭环供应链协调机制中的销售价格、废旧产品回收价

格和闭环供应链整体利润与集中决策时的结果相同,表明设计的协调机制能够达到集中决策时的效果,从而使闭环供应链利润最优。

#### 4.2 灵敏度分析

为了探讨本文中两个重要参数碳税税率  $\lambda$  和再制造质量门槛  $q_0$  对企业决策的影响,利用 Matlab 进行仿真及分析,并以函数图像进行直观表述。以下将对两个参数进行详细地分析。

表 2 不同决策方式的最优结果比较

Tab.2 Comparison of the different decision-making methods' optimal results

变量	分散决策	集中决策	两部定价契约	结果比较
$p$	357.5	315	315	$p^c = p^{**} < p^*$
$f$	9.61	35.23	35.23	$f^c = f^{**} > f^*$
$\omega$	315	—	230	$\omega^* > \omega^c$
$F$	35.23	—	86.45	$F^* < F^c$
$D_n$	61.43	122.86	122.86	$D_n^c = D_n^{**} > D_n^*$
$D_r$	44.82	89.64	89.64	$D_r^c = D_r^{**} > D_r^*$
$\pi$	18 269.2	24 425.7	24 425.7	$\pi^c = \pi^{**} > \pi^*$

4.2.1 碳税税率灵敏度分析 在对碳税税率 $\lambda$ 进行灵敏度分析时,设定碳税税率的变化范围为 $\lambda \in (0, 30)$ ,其他参数固定不变,并得到图 1。

1) 3 种模式中,新产品和再制造产品批发价格、废旧产品回购价格均随碳税税率增加而增加。而在集中决策和分散决策中,新产品和再制造产品的销售价格随碳税税率的增加而增加,新产品需求量随碳税税率增加而下降,再制造产品需求量反之。闭环供应链的利润随碳税税率增加而减少,制造商碳排放量随碳税税率增加而下降。

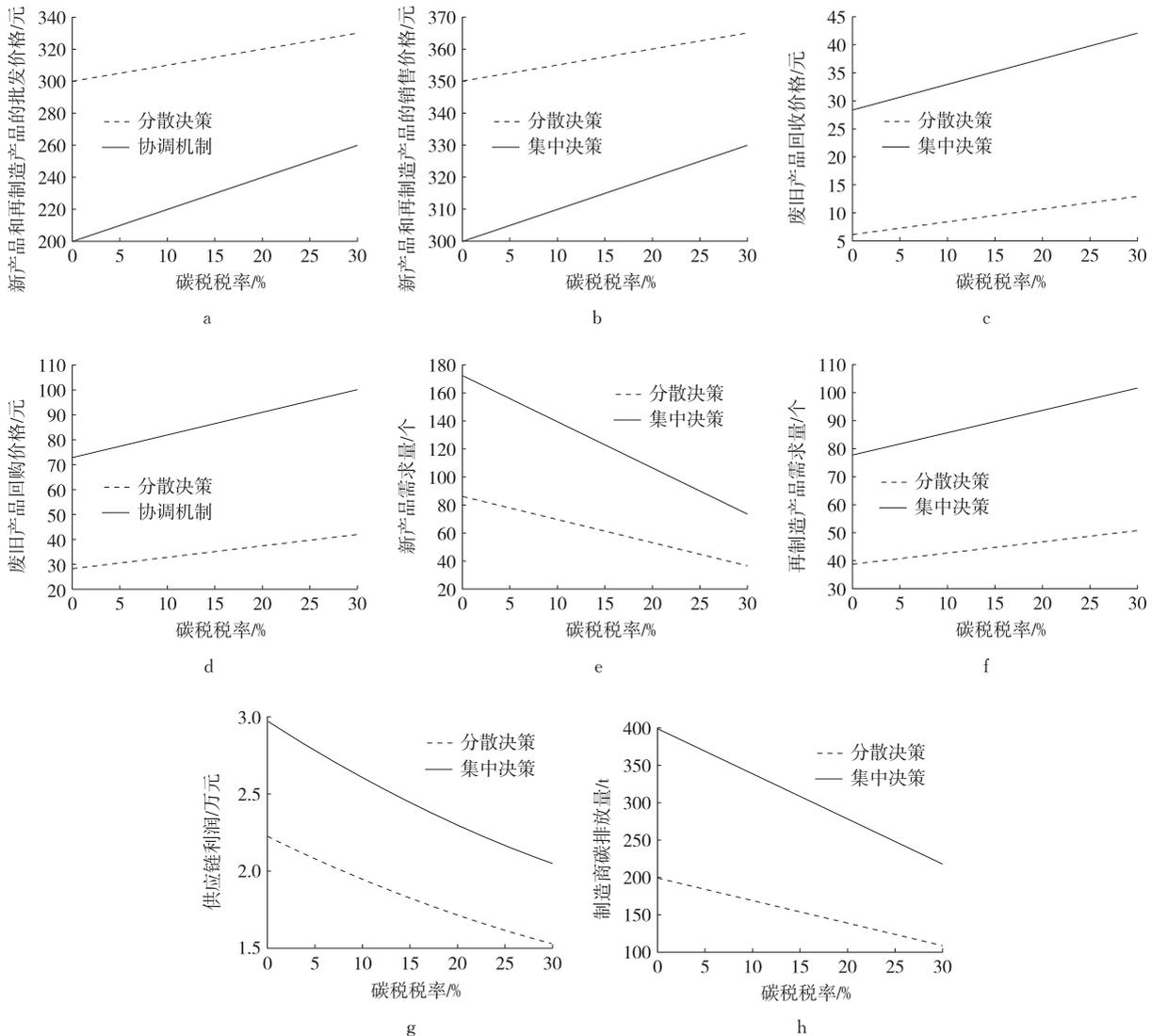


图 1 碳税税率 $\lambda$ 对不同决策方式下相关变量的影响

Fig. 1 Effect of carbon tax rate on related variables under different decision-making methods

2) 分散决策使得闭环供应链的效益降低,而集中决策能够使新产品和再制造产品的销售价格降低、废旧产品的回收价格提高,新产品和再制造产品的市场需求量和废旧产品的回收数量将会随之增加,闭环供应链的最优利润相较于分散决策的利润要高。

3) 在碳税政策下,一方面制造商为了减少碳排放量将增加再制造产品的产量,尽量减少制造新产品;另一方面,若制造商提高了废旧产品的回收价格,那么将影响的是回收质量和回收的数量——质量提升、数量增加,进而再制造产品数量增多,从总体上降低了碳排放量。

4.2.2 再制造质量门槛灵敏度分析 在对再制造质量门槛 $q_0$ 进行灵敏度分析时,首先应考虑的是 $q_0$ 的取值范围,由假设可知 $q_0$ 可取 0 至 1 中的任意数,但实际上,若 $q_0$ 趋于 0,说明设定再制造质量门槛这一指标没有设置的必要,即制造商将再制造所有回购的废旧产品;若 $q_0$ 接近于 1,则说明再制造的质量标准过于严格,即大部分乃至所有废旧产品无法进行再制造。

本文中,在其他参数固定不变的前提下,考虑  $q_0$  取值时可以从闭环供应链的基本利益考虑,最基本的条件应满足废旧产品回收和回购价格、新产品和再制造产品需求量以及供应链的总体利润大于 0。结合上文结论 4,即以下各式应成立:

$$f^* = \frac{(1-q_0^2)(\vartheta + \lambda e_n)}{8} - \frac{3h}{4k} > 0, F^* = \frac{(1-q_0^2)(\vartheta + \lambda e_n)}{4} - \frac{h}{2k} > 0,$$

$$D_n^* = \frac{2(a-b(C_n + \lambda e_n)) - (1-q_0)(k(\vartheta + \lambda e_n)(1-q_0^2) + 2h)}{8} > 0,$$

$$D_r^* = \frac{(1-q_0)(k(\vartheta + \lambda e_n)(1-q_0^2) + 2h)}{8} > 0,$$

$$\pi^* = \frac{3(a-b(C_n + \lambda e_n))^2}{16b} + \frac{3(k(1-q_0^2)(\vartheta + \lambda e_n) + 2h)^2}{64k} - C_1 > 0.$$

将上文设定的参数带入其中,又因为  $q_0 \in (0, 1)$ ,最终求得  $q_0$  的取值范围为  $(0, 0.703)$ 。在本章节中选取再制造质量门槛  $q_0 \in (0, 0.7)$ ,利用 Matlab 仿真分析可以得到图 2。

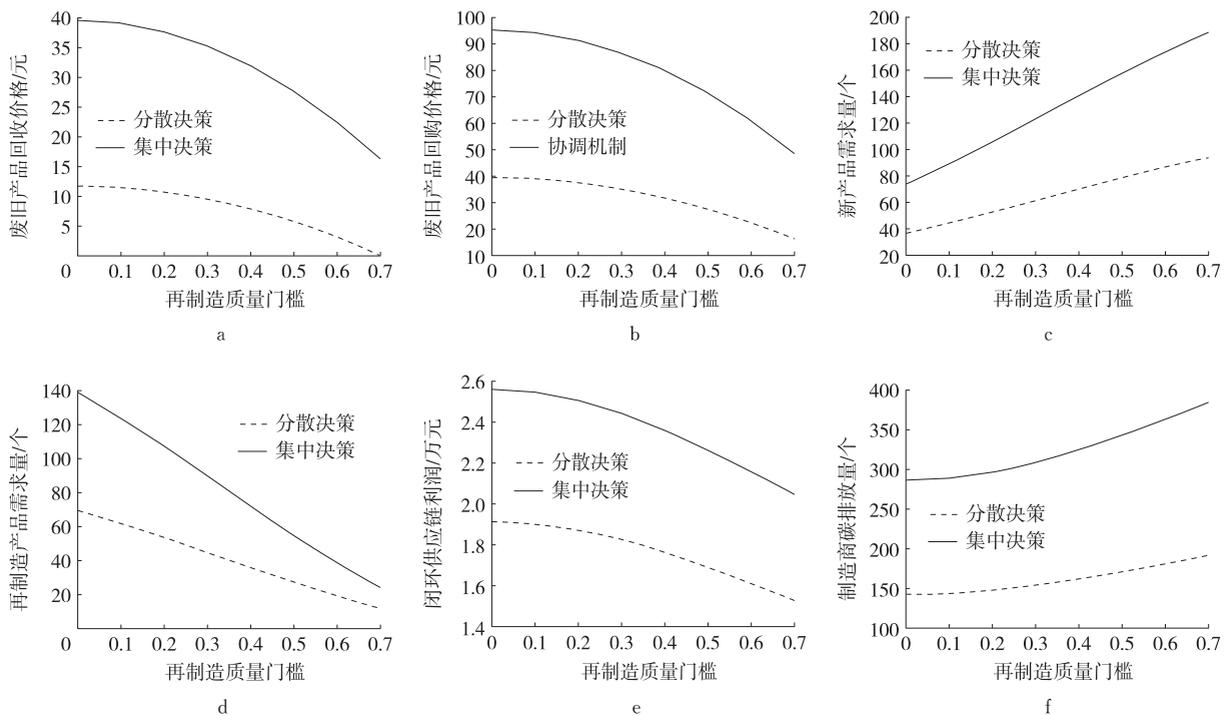


图 2 再制造质量门槛  $q_0$  对不同决策方式下相关变量的影响

Fig. 2 Effect of remanufacturing quality threshold on related variables under different decision-making methods

1) 当供应链进行集中决策和分散决策时,若再制造质量门槛提高,废旧产品的回收价格会随之降低,并且闭环供应链的整体利润也将降低。最终导致新产品的需求量增加,而再制造产品的需求量减少,此时制造商碳排放量将增加。

2) 供应链运用协调机制时,若再制造质量门槛提高,反而压制了废旧产品的回收价格。供应链在进行分散决策时有同样的情况,并且协调机制下的废旧产品回购价格大于分散决策的结果。

3) 再制造质量门槛的提高,导致制造商进行再制造的利润降低,此时制造商会选择降低废旧产品回购价格,零售商废旧产品回收价格亦将降低。同时,可再制造的废旧产品数量减少,制造商将生产更多的新产品,这将导致目标市场上新产品需求量增加,再制造产品需求量降低,致使碳排放总量上升。

4) 在企业的生产运营中,需求不仅仅只是废旧产品回收和回购价格、新产品和再制造产品需求量以及供应链的总体利润大于零,还要做到的是碳排放量尽可能低、利润尽可能高。在本文中暂不考虑,但为将来的深入研究提供了方向。

## 5 结束语

本文研究基于废旧产品回收质量的不确定性,探讨了碳税政策对闭环供应链定价决策的影响。分别对此状

态下的闭环供应链进行集中和分散决策,并通过改进两部定价契约对闭环供应链进行了协调。得到具体结论如下:

1) 政府部门对制造商征收碳税会导致闭环供应链利润降低,但会激励制造商从事再制造产品生产。制造商会通过提高新产品和再制造产品定价的方式降低碳税带来的利润损失,此外,制造商将生产重心转移到再制造产品也会导致新产品需求量下降,再制造产品需求量上升,从而达到减少碳排放的目的。

2) 如果再制造质量门槛不断提高,从表面来看会提高再制造产品的质量,但实际上并不会对闭环供应链的利润有积极的影响,反而制造商生产的再制造产品不会给自身带来额外的收益。制造商会通过压制废旧产品回购价格来节约再制造成本,此外,再制造质量门槛的提高致使可再制造的废旧产品数量减少,这将促使制造商生产新产品,减少再制造生产,最终导致碳排放量不降反升。

3) 分散决策造成了闭环供应链的效益损失,而运用两部定价契约与集中决策可达到同样的效果,实现闭环供应链的协调,使闭环供应链利润最优。

因此,闭环供应链上各节点企业应努力在协调机制下展开合作。同时,为了降低企业生产碳排放,政府部门应考虑按不同产品的不同质量水平向制造商征收碳税;制造企业也要根据政府部门碳税政策设定合理的再制造质量门槛,当碳税税率高时,企业可适当提高废旧产品的再制造质量门槛,当碳税税率低时,企业应考虑降低再制造质量门槛,以此来兼顾企业的经济效益和环境效益。

#### 参考文献:

- [1] European Environment Agency (EEA). Environmental taxes implementation and environmental effectiveness [M]. Copenhagen: EEA, 1996.
- [2] ÖSTLIN J, SUNDIN E, BJORKMAN M. Importance of closed-loop supply chain relationships for product remanufacturing[J]. International Journal of Production Economics, 2008, 115(2): 336-348.
- [3] GAUR J, MANI V. Antecedents of closed-loop supply chain in emerging economies: a conceptual framework using stakeholder's perspective[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 139: 219-227.
- [4] SAVASKAN R C, BHATTACHARYA S, Van WASSENHOVE L N. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing[J]. Management Science, 2004, 50(2): 239-252.
- [5] 孙浩, 胡劲松, 王磊, 等. 考虑参考效应的两期闭环供应链定价策略与回收模式比较[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(12): 2875-2886.  
SUN H, HU J S, WANG L, et al. Pricing strategies and collection mode of two-period closed-loop supply chain based on price reference effect[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2016, 22(12): 2875-2886.
- [6] BHATTACHARYA R, KAUR A, AMIT R K. Price optimization of multi-stage remanufacturing in a closed loop supply chain[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 186: 943-962.
- [7] XIE J P, ZHANG W S, LIANG L, et al. The revenue and cost sharing contract of pricing and servicing policies in a dual-channel closed-loop supply chain[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 191: 361-383.
- [8] ALAMDAR S F, RABBANI M, HEYDARI J, et al. Pricing, collection, and effort decisions with coordination contracts in a fuzzy, three-level closed-loop supply chain[J]. Expert Systems with Applications, 2018, 104: 261-276.
- [9] 冯章伟, 肖条军, 柴彩春. 第三方回收商领导型两级闭环供应链的回收与定价策略[J]. 中国管理科学, 2018, 26(1): 118-127.  
FENG Z W, XIAO T J, CHAI C C. Recycling and pricing strategies of closed-loop supply chain by the leader of third-party recycler[J]. Chinese Journal of Management Science, 2018, 26(1): 118-127.
- [10] 王玉燕, 申亮. 回收处理基金下闭环供应链的多元化主导模式[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(10): 2526-2541.  
WANG Y Y, SHEN L. Diversified dominant modes of closed-loop supply chain under the recycling fund[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2018, 38(10): 2526-2541.
- [11] 颜荣芳, 程永宏, 王彩霞. 再制造闭环供应链最优差别定价模型[J]. 中国管理科学, 2013, 21(1): 90-97.  
YAN R F, CHEN Y H, WANG C X. Strategy analysis on differential pricing in closed-loop supply chain with remanufacturing[J]. Chinese Management Science, 2013, 21(1): 90-97.
- [12] DRAKE D. F, KLEINDORFER P R, LUK B, et al. Technology choice and capacity investment under emissions regulation[J]. Production and Operations Management Society, 2016, 25(6): 1006-1025.
- [13] MOHAMMED F, SELIM S Z, HASSAN A, et al. Multi-period planning of closed-loop supply chain with carbon policies under uncertainty[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 51: 146-172.
- [14] TAO Z G, GUANG Z Y, HAO S, et al. Multi-period

- closed-loop supply chain network equilibrium with carbon emission constraints[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, 104(Part B): 354-365.
- [15] 李浩霖, 王传旭, 李梦鸽. 考虑公平关切的闭环供应链定价和碳减排决策[J]. *上海海事大学学报*, 2018, 39(3): 27-33.  
LI H L, WANG C X, LI M G. Pricing and carbon emission reduction decisions of closed-loop supply chain considering fairness concern[J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2018, 39(3): 27-33.
- [16] 王道平, 李小燕, 张搏卿. 考虑政府碳排放奖惩的差别定价闭环供应链协调策略研究[J]. *管理过程学报*, 2019, 33(1): 189-191.  
WANG D P, LI X Y, ZHANG B Q. Study on coordination strategy of differential price closed-loop supply chain considering the premium and penalty of government on carbon emission[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2019, 33(1): 189-191.
- [17] 舒彤, 肖雨晴, 陈收. 政府补贴对再制造闭环供应链的影响研究[J]. *工业技术经济*, 2017(8): 68-73.  
SHU T, XIAO Y Q, CHEN S. Research on the effect of government subsidies on remanufacturing in closed-loop supply chains[J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2017(8): 68-73.
- [18] 马中华, 周诗宇, 徐朗. 不同权利结构下基于自执行旁支付契约的低碳供应链合作减排策略[J]. *重庆理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 33(6): 128-138.  
MA Z H, ZHOU S Y, XU L. Under the different leading structures, cooperative emission reduction strategy of low carbon supply chain based on contract with self-executing and payment by others[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2019, 33(6): 128-138.
- [19] 杨小宁. 低碳环境下回收不确定的制造/再制造生产决策研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.  
YANG X N. Research on uncertain manufacturing/re-manufacturing production decision of recycling in low carbon environment[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [20] 马方星, 程发新, 邵汉青. 不同补贴方式下考虑回收质量不确定的闭环供应链差别定价模型[J]. *统计与决策*, 2018, 19: 58-61.  
MA F X, CHEN F X, SHAO H Q. Closed-loop supply chain's differential pricing model considering recovery quality uncertainty under different subsidy methods[J]. *Statistics & Decision*, 2018, 19: 58-61.
- [21] 刘慧慧, 黄涛, 雷明. 废旧电器电子产品双渠道回收模型及政府补贴作用研究[J]. *中国管理科学*, 2013, 21(2): 123-131.  
LIU H H, HUANG T, LEI M. Dual-channel recycling model of waste electrical and electronic equipment and research on effects of government subsidy[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2013, 21(2): 123-131.

## Operations Research and Cybernetics

### Price Strategy of Closed-Loop Supply Chain Based on Return Uncertainty Under Carbon Tax Policy

ZHANG Lingling, CHEN Huaili

(Logistics Research Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** [Purposes] Through in-depth study of the practical problems of recycling and remanufacturing -- uncertainty of recycling quality and the carbon tax policy, the pricing decisions of the two-echelon closed-loop supply chain is discussed here, in order to explore how companies can achieve maximum economic benefits in this context. [Methods] The game theory is used to obtain the optimal wholesale price of the manufacturer, the optimal retail price of the retailer and the benefits of the members of the supply chain separately. The influences of the carbon tax rate and the quality threshold of remanufacturing on the manufacturer and retailer's price, profit and market demand are discussed. And then the two-part tariff is introduced to achieve the closed-loop supply chain coordination. [Findings] Finally, an example is given to verify the models. The results show that: when the carbon tax rate is high, the enterprises can raise the quality threshold of remanufacturing products; when the carbon tax rate is low, the enterprises should lower the quality threshold of remanufacturing products. This can help the enterprises give consideration to economic benefit and ecological benefit. [Conclusions] The government department encourages manufacturers to engage in the remanufacturing production, through the adjustment of the carbon tax rate or the collection of carbon taxes, thereby prompting enterprises to cooperate under the coordination mechanism.

**Keywords:** carbon tax; quality of the core uncertainty; closed-loop supply chain; pricing decision; game theory

(责任编辑 黄颖)