

碳税政策下碳减排对原/再制造商决策的影响研究

李春久, 李 芳

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2023年12月12日; 录用日期: 2024年1月2日; 发布日期: 2024年2月29日

摘 要

在政府征收碳税的背景下, 将消费者低碳偏好考虑在内, 针对原制造商无碳减排、实施碳减排两种情形, 分别构建原制造商和再制造商组成的Stackelberg博弈模型, 探讨碳税、消费者低碳偏好和碳减排对两者决策的影响。结果表明: 碳税会损害原制造商的利润, 当再制造减排系数与新产品和再制造品竞争强度的比值大于某一值时, 碳税使再制造商的利润增加; 消费者低碳意识越强对原制造商越有利; 碳减排会使新产品的销售量增加, 原制造商的利润增加; 碳减排不会影响再制造商的逆向供应链, 但当碳税税率与消费者低碳偏好的比值大于某一值时, 再制造品的销售量和再制造商的利润将会减少。

关键词

再制造闭环供应链, 碳税, 碳减排, 消费者低碳偏好

Research on the Effects of Carbon Reduction on the Decisions of Original/Remanufacturers with Carbon Tax Policy

Chunjiu Li, Fang Li

School of Business, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 12th, 2023; accepted: Jan. 2nd, 2024; published: Feb. 29th 2024

Abstract

In the context of government carbon tax collection, taking into account consumer low-carbon pre-

ferences, a Stackelberg game model consisting of original manufacturers and remanufacturers is constructed to explore the impact of carbon tax, consumer low-carbon preferences, and carbon reduction on their decisions in two scenarios: no carbon reduction by original manufacturers and implementation of carbon reduction. The results indicate that carbon tax will harm the profits of original manufacturers. When the ratio of remanufacturing carbon emission reduction coefficient to the competition intensity of new and remanufactured products is greater than a certain value, carbon tax will increase the profits of remanufacturing manufacturers; The stronger the consumer's low-carbon awareness, the more advantageous it is for the original manufacturer; Carbon reduction will increase the sales volume of new products and increase the profits of original manufacturers; Carbon reduction will not affect the reverse supply chain of remanufacturers, but when the ratio of carbon tax rates to consumer low-carbon preferences exceeds a certain value, the sales volume of remanufactured products and the profits of remanufacturers will decrease.

Keywords

Remanufacturing Closed-Loop Supply Chain, Carbon Tax, Carbon Emission Reduction, Consumer Low-Carbon Preferences

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球经济的快速发展, 人类对资源的过度开发和消耗导致了资源短缺和环境恶化, 资源的循环利用和经济可持续发展已经成为全世界关注的重点。在此背景下, 对废弃产品进行回收再制造是企业应对资源短缺的环境恶化的发展战略, 行业实践表明, 再制造可以减少能源消耗, 有利于节约成本, 提高竞争优势, 目前许多已经建立了自己的回收再制造体系, 例如中国一汽、宝马、惠普、苹果、卡特彼勒等。日益增加的废旧产品使一些原始设备制造商没有足够的生产能力进行回收再制造, 而选择将回收再制造的业务授权给第三方再制造商, 同时收取一定的专利许可费来应对再制造商带来的威胁。

政府为了保护环境, 实现双碳目标, 制定了严格的碳排放政策如碳税、碳约束以及碳交易等政策。在政府碳排放政策的压力下, 原制造商往往会进行技术投入来减少生产过程中产生的碳排放量, 目前, 全世界都大力提倡低碳经济, 一部分消费者存在低碳意识, 更加偏好一些进行碳减排的企业产品。

与本文相关的文献主要集中在再制造闭环供应链、政府碳排放政策以及供应链碳减排方面。Chang 等[1]研究了碳限额和交易政策对垄断供应商进行制造和再制造决策的影响; Chai 等[2]考虑在普通市场和绿色市场下, 碳交易相关因素对碳交易量和制造商决策的影响, 认为碳交易政策有利于垄断制造商进行再制造; 熊中楷等[3]首先从管理学视角研究了再制造专利保护下供应链的决策, 并提出了协调机制; 夏西强, 李梦雅[4]研究了碳税、碳交易和碳约束政策对授权再制造的影响; 刘碧玉等[5]在专利授权下, 分析了政府三种碳排放政策对制造商和再制造商运营决策的影响; 王东阳, 李芳[6]在碳交易背景下, 考虑企业进行自主减排和外包减排, 分析不同减排方式下相关因素对企业利润和碳减排量的影响, 最终得出适合企业的减排方式; 田颖卉, 李芳[7]构建了由制造商和零售商组成的双渠道供应链, 分析了碳税税率、碳排放限额对产品碳减排率及定价的影响; 缪文清, 沈炳良[8]在碳交易及补贴机制下, 研究了低碳产品和普通产品竞争的差别定价策略; 刘振宇[9]针对服装类闭环供应链, 分析了碳限额交易政策对供应链及成员企业的影响; Xu 等[10]考虑了消费者低碳偏好, 构建了由制造商和零售商组成的闭环供应链减排决

策模型，研究了供应链系统的决策

综上所述,多数学者的研究集中在碳排放政策对供应链减排和定价决策的影响,较少考虑消费者在再制造供应链中的作用。目前政府的碳排放政策会促使原制造商进行碳减排技术投入,这对原制造商的利润有什么影响?在原制造商将回收再制造的业务授权给再制造商后,两者即合作又竞争,那么,原制造商的碳减排决策是否有利于再制造商?消费者作为供应链的终端,其低碳偏好是否对供应链成员的决策产生影响?这些问题具有重要的研究意义。因此,本文在政府征收碳税的背景下,考虑消费者的低碳偏好,构建原制造商无碳减排、实施碳减排决策模型,研究分析碳税、消费者低碳偏好和碳减排政策对原制造商和再制造商决策的影响。

2. 问题描述与基本假设

2.1. 问题描述

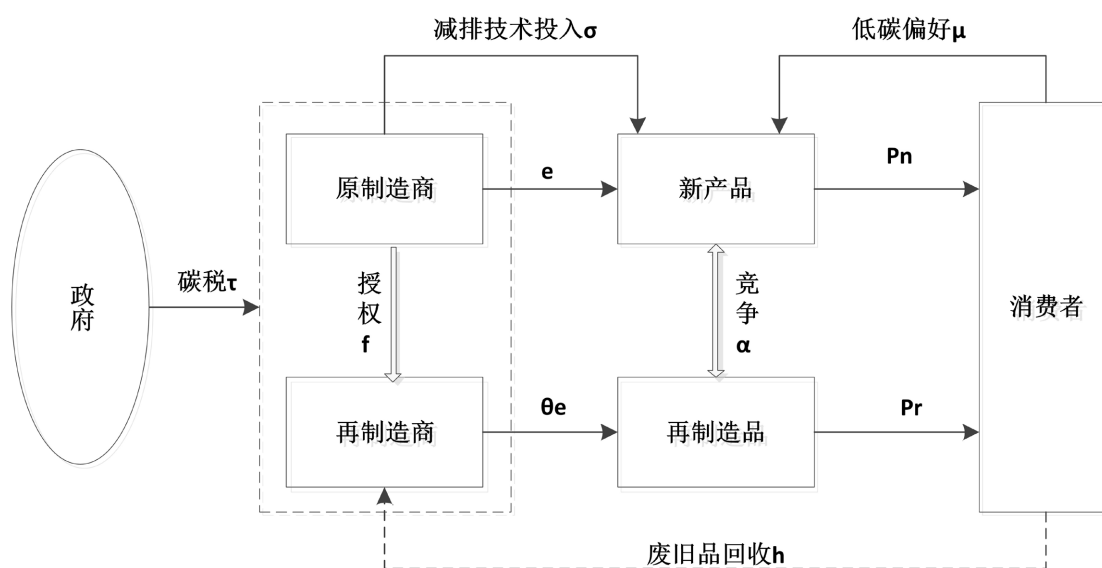


Figure 1. Diagram of the closed loop supply chain structure model

图 1. 闭环供应链结构模型图

如图 1 所示, 本文考虑由政府、原制造商、再制造商和消费者构成的闭环供应链, 其中原制造商与再制造商进行 Stackelberg 博弈, 且原制造商为供应链主导者, 负责生产和销售新产品, 再制造商为跟随者, 负责废旧品的回收与再制造以及销售再制造品, 再制造商每生产单位再制造品, 原制造商就会收取一定的专利费用 f 。原制造商和再制造商生产同类产品, 两种产品在市场上相互替代, 存在竞争关系, 竞争强度为 α 。政府会对原制造商和再制造商生产过程中产生的碳排放量征收碳税 τ , 面对碳税的压力, 原制造商一般会投入碳减排技术以降低生产过程中的碳排放量。消费者对碳减排企业的产品往往会产生一定的低碳偏好 μ 。

2.2. 基本假设

假设 1 假设新产品和再制造品具有相同的质量和性能, 其生产成本分别为 c_n 、 c_r 。考虑到消费者对再制造品的概念比较模糊, 消费者对新产品和再制造品有不同的支付意愿, 且消费者不会对再制造品产生低碳偏好, 新产品和再制造品分别以价格 p_n 、 p_r 在市场中销售, $p_n > p_r$ 。

假设 2 假设单位新产品的碳排放量为 e ，单位再制造品的碳排放量为 θe ，其中 $\theta(0 < \theta < 1)$ 为再制造

减排系数, θ 越小表示再制造的减排效果越大。政府按照税率 τ 对生产过程中产生的碳排放量征收碳税。

假设 3 原制造商的碳减排技术投入成本是单位新产品碳减排量的凸函数, 碳减排技术投入的总成本为 $\gamma\sigma^2/2$, 其中 γ 为碳减排成本系数, $\sigma(0 < \sigma < e)$ 为单位新产品的碳减排量, 表示原制造商的碳减排技术投入水平。

假设 4 假设新产品的需求函数为: $q_n = Q_n - p_n + \alpha p_r$, 再制造品的需求函数为 $q_r = Q_r - p_r + \alpha p_n$, 其中 Q_n 、 Q_r ($Q_n > Q_r$) 分别为新产品和再制造品的市场规模, $\alpha(0 < \alpha < 1)$ 为新产品和再制造品的替代系数, 表示两种产品的竞争强度, $\mu(\mu > 0)$ 表示消费者低碳偏好系数。

假设 5 废旧品的回收量 $G = g + \beta h$, 其中 g 、 $\beta > 0$ 为常量, g 表示消费者无偿提供的废旧品数量, β 表示消费者对回收价格的敏感系数, h 为废旧品回收价格。

假设 6 假设所有回收的废旧品均可用作再制造, 结合实际情况, 再制造品的生产量要高于需求量, 即 $G > q_r$, 再制造商对未销售的再制造品的处理价格为 s , 且有 $s < p_r$ 。

3. 模型的求解与分析。

3.1. 原制造商无碳减排决策模型

为了研究原制造商碳减排决策对原/再制造商决策的影响, 首先以原制造商不进行碳减排技术投入作为基准模型, 分析碳税政策对闭环供应链成员的影响。原制造商与再制造商进行 Stackelberg 博弈, 博弈顺序为: 首先原制造商确定新产品的销售价格和单位专利许可费; 再制造商根据原制造商制定的策略, 确定再制造品的销售价格和废旧品的回收价格。

原制造商和再制造商的利润函数分别为:

$$\max \Pi_m^B = (p_n - c_n)q_n + fG - \tau e q_n \quad (1)$$

$$\max \Pi_r^B = p_r q_r - (h + c_r + f)G - \tau \theta e G + s(G - q_r) \quad (2)$$

为简化公式, 设

$$B_0 = 4(2 - \alpha^2)\gamma - [2\mu + (2 - \alpha^2)\tau]^2$$

$$B_1 = 2[\gamma - (2 - \alpha^2)\tau^2]$$

$$B_2 = 2[(2 - \alpha^2)\gamma - 4\mu^2]$$

$$B_3 = 2\mu + (2 - \alpha^2)\tau$$

$$X = s\alpha + 2Q_n + \alpha Q_r$$

其中, B_0 、 B_1 、 B_2 、 B_3 、 $X > 0$ 。

定理 1 在原制造商不进行碳减排技术投入决策模型下, 存在最优的再制造品销售价格 p_r^{B*} 、废旧品回收价格 h^{B*} 使得再制造商的总利润最大; 存在最优的新产品销售价格 p_n^{B*} 、单位专利许可费 f^{B*} 使得原制造商的总利润最大:

$$\text{证明: } \Pi_r^B \text{ 关于 } (p_r, h) \text{ 的海塞矩阵为 } H(\Pi_r^B) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \Pi_r^B}{\partial p_r^2} & \frac{\partial^2 \Pi_r^B}{\partial p_r \partial h} \\ \frac{\partial^2 \Pi_r^B}{\partial h \partial p_r} & \frac{\partial^2 \Pi_r^B}{\partial h^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 & 0 \\ 0 & -2\beta \end{bmatrix}, \text{ 其一阶主子式}$$

$|A_1| = -2 < 0$, 二阶主子式 $|A_2| = 4\beta > 0$, 因此该矩阵为负定矩阵, 函数 Π_r^B 是关于 p_r , h 的联合凹函数,

存在最优的 p_r 和 h 使得 Π_r^B 取得最大值。

采用逆向递推法求解, 首先, 令 $\frac{\partial \Pi_r^B}{\partial p_r} = 0, \frac{\partial \Pi_r^B}{\partial h} = 0$, 联立求解得再制造品的销售价格 p_r 和废旧品的回收价格 h 分别为:

$$p_r^B = \frac{1}{2}(s + \alpha p_n + Q_r) \quad (3)$$

$$h^B = -\frac{g + \beta(f - s + e\theta\tau) + \beta c_r}{2\beta} \quad (4)$$

其次, 将 p_r^B 、 h^B 代入原制造商的利润函数 Π_m^B 中, 求得 Π_m^B 关于 (p_n, f) 的海塞矩阵为

$$H(\Pi_m^B) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \Pi_m^B}{\partial p_n^2} & \frac{\partial^2 \Pi_m^B}{\partial p_n \partial f} \\ \frac{\partial^2 \Pi_m^B}{\partial f \partial p_n} & \frac{\partial^2 \Pi_m^B}{\partial f^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha^2 - 2 & 0 \\ 0 & -\beta \end{bmatrix}, \text{ 其一阶主子式 } |A_1| = \alpha^2 - 2 < 0, \text{ 二阶主子式}$$

$|A_2| = -(\alpha^2 - 2)\beta > 0$, 因此该矩阵为负定矩阵, 函数 Π_m^B 是关于 p_n , f 的联合凹函数, 存在最优的 p_n 和 f 使得 Π_m^B 取得最大值。

令 $\frac{\partial \Pi_m^B}{\partial p_n} = 0, \frac{\partial \Pi_m^B}{\partial f} = 0$, 联立求解得最优的新产品的销售价格 p_n^{B*} 、单位许可费 f^{B*} 分别为:

$$p_n^{B*} = \frac{(2 - \alpha^2)(c_n + e\tau) + X}{2(2 - \alpha^2)} \quad (5)$$

$$f^{B*} = \frac{g + \beta(s - e\theta\tau - c_r)}{2\beta} \quad (6)$$

将 p_n^{B*} 、 f^{B*} 代入式(3)和式(4)中, 得到, 最优的再制造品的销售价格 p_r^{B*} 、单位许可费 h^{B*} 分别为:

$$p_r^{B*} = \frac{s + Q_r}{2} + \frac{\alpha(2 - \alpha^2)(c_n + e\tau) + X}{4(2 - \alpha^2)} \quad (7)$$

$$h^{B*} = \frac{\beta(s - e\theta\tau - c_r) - 3g}{4\beta} \quad (8)$$

再将 p_r^{B*} 、 h^{B*} 分别代入新产品和再制造品的需求函数、废旧品的回收函数中, 得到最优的新产品需求量 q_n^{B*} 、再制造品的需求量 q_r^{B*} 分别为:

$$q_n^{B*} = \frac{1}{4} [X - (2 - \alpha^2)(c_n + e\tau)] \quad (9)$$

$$q_r^{B*} = \frac{\alpha(c_n + e\tau)}{4} + \frac{Q_r - s}{2 - \alpha^2} + \frac{\alpha(3s\alpha + 2Q_n - \alpha Q_r)}{4(2 - \alpha^2)} \quad (10)$$

将上述最优结果代入式(1)和式(2)中, 得到原制造商和再制造商的最优利润分别为 Π_m^{B*} 、 Π_r^{B*} 。

性质 1 碳税政策对原制造商决策的影响: (1) 新产品的价格升高; (2) 新产品的销售量减少; (3) 单位再制造产品的专利许可费降低; (4) 原制造商的利润下降。

证明: 对原制造商的均衡结果求关于碳税的一阶偏导数, 得 $\frac{\partial p_n^{B*}}{\partial \tau} = \frac{e}{2} > 0$, $\frac{\partial q_n^{B*}}{\partial \tau} = -\frac{1}{4}e(2 - \alpha^2) < 0$,

$$\frac{\partial f^{B*}}{\partial \tau} = -\frac{e\theta}{2} < 0,$$

$$\frac{\partial \Pi_m^{B*}}{\partial \tau} = -\frac{1}{4}e\left\{s\alpha + 2Q_n + \alpha Q_r - (2 - \alpha^2)(c_n + e\tau) + \theta[g + \beta(s - e\theta\tau - c_r)]\right\}$$

由 $q_n^{B*} > 0$, $f^{B*} > 0$ 可知, $s\alpha + 2Q_n + \alpha Q_r - (2 - \alpha^2)(c_n + e\tau) > 0$, $g + \beta(s - e\theta\tau - c_r) > 0$ 。所以,
 $\frac{\partial \Pi_m^{B*}}{\partial \tau} = -\frac{1}{4}e\left\{s\alpha + 2Q_n + \alpha Q_r - (2 - \alpha^2)(c_n + e\tau) + \theta[g + \beta(s - e\theta\tau - c_r)]\right\} < 0$, 证毕。

性质 1 表明, 碳税政策会使原制造商的利润受损, 因此原制造商有足够的动机进行碳减排。面对碳税政策的压力, 原制造商为了保证自己的利润一方面会缩减新产品的产量来减少碳排放量, 但会提高新产品的价格; 另一方面会降低向再制造商收取的单位专利许可费, 来激励再制造商提高回收量, 获取更多的专利许可费。

性质 2 碳税政策对再制造商决策的影响: (1) 再制造品的销售价格升高; (2) 再制造品的销售量增加; (3) 再制造品的回收价格和回收量降低; (4) 令 $k = \frac{\alpha(2 - \alpha^2)(c_n + e\tau) + 4(Q_r - s) + \alpha(3s\alpha + 2Q_n - \alpha Q_r)}{(2 - \alpha^2)[g + \beta(s - e\theta\tau - c_r)]}$,

当 $\frac{\theta}{\alpha} < k$ 时, 再制造商的利润增加; 当 $\frac{\theta}{\alpha} > k$ 时, 再制造商的利润下降。

证明: 对再制造商的均衡结果求关于碳税的一阶偏导数, 得

$$\frac{\partial p_r^{B*}}{\partial \tau} = \frac{e\alpha}{4} > 0, \quad \frac{\partial q_r^{B*}}{\partial \tau} = \frac{e\alpha}{4} > 0, \quad \frac{\partial h^{B*}}{\partial \tau} = -\frac{e\theta}{4} < 0$$

$\frac{\partial \Pi_r^{B*}}{\partial \tau} = \frac{e}{8(2 - \alpha^2)}\left\{\alpha[\alpha(2 - \alpha^2)(c_n + e\tau) + 4(Q_r - s) + \alpha(3s\alpha + 2Q_n - \alpha Q_r)] - (2 - \alpha^2)\theta[g + \beta(s - e\theta\tau - c_r)]\right\}$ 由
 $f^{B*} > 0$, $q_r^{B*} > 0$, 可得, $g + \beta(s - e\theta\tau - c_r) > 0$, $\alpha(2 - \alpha^2)(c_n + e\tau) + 4(Q_r - s) + \alpha(3s\alpha + 2Q_n - \alpha Q_r) > 0$,
 所以当 $\frac{\theta}{\alpha} < k$ 时, $\frac{\partial \Pi_r}{\partial \tau} > 0$; 当 $\frac{\theta}{\alpha} > k$ 时, $\frac{\partial \Pi_r}{\partial \tau} < 0$ 。证毕

性质 2 表明, 再制造具有成本优势和低碳优势, 因此, 碳税政策对再制造商决策的影响较为复杂。碳税是通过影响新产品的价格和销量决策来间接影响再制造品的销量。结合性质 1 可以看出, 在碳税政策下, 即使原制造商会降低专利费来激励再制造商进行回收再制造, 但再制造商还是会通过降低回收价来降低废旧品回收量进而减少碳排放量。随着新产品的销售量降低, 再制造品的市场份额将会增加, 但回收量的减少会导致用于残值处理的再制造品数量减少, 再制造商的利润将会受到影响, 因此再制造商会提高再制造品的销售价格。再制造商的利润大小与再制造减排系数、新产品和再制造品的竞争强度密切相关, 在面对碳税政策时, 再制造商一方面可以选择降低再造品的销售价格来增加销售量, 从而保证自己的利润; 另一方面可以降低再制造过程中的碳排放量, 来减少碳排放成本。因此在碳税政策的影响下, 当再制造减排系数和两种产品竞争强度的比值小于某一阈值时, 再制造商的利润将会增加; 当再制造减排系数和两种产品竞争强度的比值大于某一阈值时, 再制造商的利润将会减少。

3.2. 原制造商实施碳减排决策模型

原制造商进行碳减排技术投入, 并分析消费低碳偏好对其决策的影响, 双方的博弈顺序为, 首先原制造商确定新产品的销售价格、单位专利许可费以及单位新产品碳减排量; 再制造商根据原制造商制定的策略, 确定再制造品的销售价格和废旧品的回收价格。

原制造商投入碳减排技术降低了新产品生产过程中的碳排放量, 考虑到消费者的低碳偏好后, 新产

品需求函数为 $q_n = Q_n - p_n + \alpha p_r + \mu \sigma$ 。

原制造商和再制造商的利润函数分别为:

$$\max \Pi_m^E = (p_n - c_n)q_n + fG - \tau(e - \sigma)q_n - \frac{1}{2}\gamma\sigma^2 \quad (11)$$

$$\max \Pi_r^E = p_r q_r - (h + c_r + f)G - \tau\theta eG + s(G - q_r) \quad (12)$$

定理 2 在原制造商实施碳减排决策模型下, 存在最优的再制造品销售价格 p_r^{B*} 、废旧品回收价格 h^{B*}

使得再制造商的总利润最大; 当 $\gamma > \frac{[-2\mu + (-2 + \alpha^2)\tau]^2}{4(2 - \alpha^2)}$ 时, 存在最优的新产品销售价格 p_n^{B*} 、单位专利

许可费 f^{B*} 以及单位新产品碳减排量 σ^{E*} 使得原制造商的总利润最大;

证明过程与定理 1 证明同理。

最优的新产品的销售价格 p_n 、单位许可费 f 以及单位新产品的碳减排量 σ^{E*} 分别为:

$$p_n^{E*} = \frac{B_1 X + B_2(c_n + e\tau)}{B_0} \quad (13)$$

$$f^{E*} = \frac{g + \beta(s - e\theta\tau - c_r)}{2\beta} \quad (14)$$

$$\sigma^{E*} = \frac{B_3[X - (2 - \alpha^2)(c_n + e\tau)]}{B_0} \quad (15)$$

最优的再制造品的销售价格 p_r^{E*} 、单位许可费 h^{E*} 分别为:

$$p_r^{E*} = \frac{s + Q_r}{2} + \frac{a[B_1 X + B_2(c_n + e\tau)]}{2B_0} \quad (16)$$

$$h^{E*} = \frac{\beta(s - e\theta\tau - c_r) - 3g}{4\beta} \quad (17)$$

得到最优的新产品需求量 q_n^{E*} 、再制造品的需求量 q_r^{E*} 分别为

$$q_n^{E*} = \frac{(2 - \alpha^2)\gamma[X - (2 - \alpha^2)(c_n + e\tau)]}{B_0} \quad (18)$$

$$q_r^{E*} = \frac{\alpha[B_1 X + B_2(c_n + e\tau)] + B_0(Q_r - s)}{2B_0} \quad (19)$$

性质 3 消费者低碳偏好对原制造商决策的影响: (1) 新产品的价格和销售量增加; (2) 单位新产品的碳减排量增加; (3) 原制造商的利润增加。

证明: 对原制造商的均衡结果求关于消费者低碳偏好的一阶偏导数, 得

$$\frac{\partial p_n^{E*}}{\partial \mu} = \frac{2(8\gamma\mu - B_3^2)[X - (2 - \alpha^2)(c_n + e\tau)]}{B_0^2}, \quad \text{由 } 4(2 - \alpha^2)\gamma - [2\mu + (2 - \alpha^2)\tau]^2 > 0, \quad \text{可得}$$

$$4(2 - \alpha^2)\gamma > [2\mu + (2 - \alpha^2)\tau]^2, \quad \text{因为 } 2\mu > 2 - \alpha^2, \quad \text{所以 } 8\gamma\mu > 4(2 - \alpha^2)\gamma, \quad \text{所以 } 8\gamma\mu > [2\mu + (2 - \alpha^2)\tau]^2,$$

所以 $\frac{\partial p_n^{E*}}{\partial \mu} > 0$ 。

$$\frac{\partial \sigma^{E*}}{\partial \mu} = \frac{2[4(2-\alpha^2)\gamma + B_3^2][X - (2-\alpha^2)(c_n + e\tau)]}{B_0^2} > 0, \quad \frac{\partial q_n^{E*}}{\partial \mu} = \frac{4(2-\alpha^2)\gamma B_3[X - (2-\alpha^2)(c_n + e\tau)]}{B_0^2} > 0$$

$$\frac{\partial \Pi_m^{E*}}{\partial \mu} = \frac{2\gamma B_3[X - (2-\alpha^2)(c_n + e\tau)]^2}{B_0^2} > 0$$

证毕。

性质 3 表明, 消费者低碳偏好系数越大, 对原制造商越有利。现实中, 随着消费者低碳意识的增强, 原制造商会加大碳减排技术的投入, 来增加新产品的低碳属性, 碳减排技术投入的成本增加会促使原制造商提高新产品的价格, 进而导致新产品的需求下降, 原制造商的利润受损。但通过研究我们发现, 随着消费者低碳意识的增强, 新产品价格的提高并不会导致新产品的销售量减少, 反而消费者更愿意购买具有低碳属性的产品, 扩大了产品市场, 原制造商也获得了更大的利润。

4. 均衡结果对比分析

4.1. 碳减排决策对原制造商决策的影响分析

性质 4 $f^{E*} = f^{B*}$, $q_n^{E*} > q_n^{B*}$, $\Pi_m^{E*} > \Pi_m^{B*}$; 当 $\frac{\tau}{\mu} > \frac{2-\alpha^2}{2}$ 时, $p_n^{E*} < p_n^{B*}$; 当 $\frac{\tau}{\mu} < \frac{2-\alpha^2}{2}$ 时, $p_n^{E*} > p_n^{B*}$ 。

证明: 对原制造商减排技术投入前后的均衡结果进行对比, 得

$$f^{E*} - f^{B*} = 0, \quad q_n^{E*} - q_n^{B*} = \frac{B_3^2[X - (2-\alpha^2)(c_n + e\tau)]}{4B_0} > 0,$$

$$\Pi_m^{E*} - \Pi_m^{B*} = \frac{B_3^2[X - (2-\alpha^2)(c_n + e\tau)]^2}{8(2-\alpha^2)B_0} > 0$$

$$p_n^{E*} - p_n^{B*} = -\frac{[(2-\alpha^2)\tau + 2\mu][(2-\alpha^2)\tau - 2\mu][X - (2-\alpha^2)(c_n + e\tau)]}{2(2-\alpha^2)B_0}$$

当 $(2-\alpha^2)\tau - 2\mu > 0$, 即 $\frac{\tau}{\mu} > \frac{2-\alpha^2}{2}$ 时, $p_n^{E*} < p_n^{B*}$; 当 $(2-\alpha^2)\tau - 2\mu < 0$, 即 $\frac{\tau}{\mu} < \frac{2-\alpha^2}{2}$ 时, $p_n^{E*} > p_n^{B*}$, 证毕。

性质 4 表明, 原制造商进行减排技术投入后, 新产品的销售量增加, 原制造商的利润增加, 单位再制造产品的专利许可费不变, 新产品的价格变动取决于碳税税率与消费者低碳偏好之间的关系。原制造商的利润来源于新产品的销售收入和向再制造商收取的专利许可收入, 原制造商在投入高额的碳减排技术成本后, 并没有提高向再制造商收取的专利许可费, 结合性质 1 和性质 2 可以看到, 在碳税政策下, 即使原制造商降低了单位专利许可费, 再制造品的产量也没有增加, 同时原制造商的专利许可收入降低, 如果原制造商提高单位专利许可费, 那么原制造商的专利许可收入将会进一步降低。原制造商减排后, 消费者的低碳意识将会促进新产品的销量增加, 新产品的销售收入将会增加, 因此原制造商的总利润也会增加。

4.2. 碳减排决策对再制造商决策的影响分析

性质 5 $h^{B*} = h^{E*}$, $G^{B*} = G^{E*}$; 当 $\frac{\tau}{\mu} > \frac{2-\alpha^2}{2}$ 时, $p_r^{E*} < p_r^{B*}$, $q_r^{E*} < q_r^{B*}$, $\Pi_r^{E*} < \Pi_r^{B*}$; 当 $\frac{\tau}{\mu} < \frac{2-\alpha^2}{2}$ 时, $p_r^{E*} > p_r^{B*}$, $q_r^{E*} > q_r^{B*}$, $\Pi_r^{E*} > \Pi_r^{B*}$ 。

证明：对原制造商减排技术投入前后的均衡结果进行对比，得

$$h^{E^*} - h^{B^*} = 0, \quad G^{E^*} - G^{B^*} = 0$$

$$p_r^{E^*} - p_r^{B^*} = -\frac{\alpha[(2-\alpha^2)\tau + 2\mu][(2-\alpha^2)\tau - 2\mu][X - (2-\alpha^2)(c_n + e\tau)]}{4(2-\alpha^2)B_0}$$

$$q_r^{E^*} - q_r^{B^*} = -\frac{\alpha[(2-\alpha^2)\tau + 2\mu][(2-\alpha^2)\tau - 2\mu][X - (2-\alpha^2)(c_n + e\tau)]}{4(2-\alpha^2)B_0}$$

$$\begin{aligned} \Pi_r^{E^*} - \Pi_r^{B^*} &= p_r^{E^*} q_r^{E^*} - (h^{E^*} + c_r + f^{E^*})G^{E^*} - \tau\theta eG^{E^*} + s(G^{E^*} - q_r^{E^*}) - [p_r^{B^*} q_r^{B^*} - (h^{B^*} + c_r + f^{B^*})G^{B^*} - \tau\theta eG^{B^*} + s(G^{B^*} - q_r^{B^*})] \\ &= p_r^{E^*} q_r^{E^*} + s(G^{E^*} - q_r^{E^*}) - p_r^{B^*} q_r^{B^*} - s(G^{B^*} - q_r^{B^*}) \\ &= (p_r^{E^*} - s)q_r^{E^*} - (p_r^{B^*} - s)q_r^{B^*} \end{aligned}$$

当 $(2-\alpha^2)\tau - 2\mu > 0$ ，即 $\frac{\tau}{\mu} > \frac{2-\alpha^2}{2}$ 时， $p_r^{E^*} < p_r^{B^*}$ ， $q_r^{E^*} < q_r^{B^*}$ ，因此， $(p_r^{E^*} - s)q_r^{E^*} < (p_r^{B^*} - s)q_r^{B^*}$ ，即

$\Pi_r^{E^*} < \Pi_r^{B^*}$ ；当 $(2-\alpha^2)\tau - 2\mu < 0$ 时，即 $\frac{\tau}{\mu} < \frac{2-\alpha^2}{2}$ 时， $p_r^{E^*} > p_r^{B^*}$ ， $q_r^{E^*} > q_r^{B^*}$ ，因此， $(p_r^{E^*} - s)q_r^{E^*} > (p_r^{B^*} - s)q_r^{B^*}$ ，即 $\Pi_r^{E^*} > \Pi_r^{B^*}$ 。

性质 5 表明，原制造商碳减排决策不会影响再制造商的逆向供应链，对再制造商正向供应链的影响取决于碳税税率和消费者低碳偏好之间的关系。再制造商在面对碳税政策时，选择减少回收量来降低碳排放量，但这种做法会导致自身的货源不足，从而导致利润下降。原制造商投入碳减排成本后，并没有提高单位专利许可费，因此再制造商会保持回收价格和回收量不变。原制造商进行碳减排后，新产品的销量增加，当碳税税率和消费者低碳偏好的比值大于某一值时，新产品的销售价格降低，再制造品的价格优势将会被削弱，再制造品的市场份额将会进一步减少，原制造商只能降低再制造品的价格来提高竞争力，最终再制造商的利润减低；当碳税税率和消费者低碳偏好的比值小于某一阈值时，新产品的销售价格增加，再制造品的竞争压力降低，其销售量将会增加，此时再制造商会选择提高再制造品的产品价格，来进一步扩大自身的利润。

当 $\frac{\tau}{\mu} > \frac{2-\alpha^2}{2}$ 时，原制造商的减排决策对再制造商表现为促进作用；当 $\frac{\tau}{\mu} < \frac{2-\alpha^2}{2}$ 时，原制造商的

减排决策对再制造商表现为抑制作用。因此，原制造商进行减排技术投入时，再制造商的利润不一定会增加。

5. 数值分析

为验证上述结论，本节利用 MATLAB 对上述模型进行数值分析。在满足相关假设基础上，对参数赋值 $c_n = 50$ ， $c_r = 25$ ， $Q_n = 200$ ， $Q_r = 100$ ， $\beta = 4$ ， $g = 10$ ， $s = 180$ ， $e = 5$ ， $\theta = 0.4$ ， $\gamma = 2000$ ， $\mu = 9$ ， $\alpha = 0.6$ ，碳税税率 τ 在 $[0, 30]$ 取值。根据各参数假设，可确定

$$\frac{\theta}{\alpha} > \frac{\alpha(2-\alpha^2)(c_n + e\tau) + 4(Q_r - s) + \alpha(3s\alpha + 2Q_n - \alpha Q_r)}{(2-\alpha^2)[g + \beta(s - e\theta\tau - c_r)]}$$

即碳税政策对再制造商是不利的。

由图 2 可以看出，无论原制造商是否进行碳减排，新产品的价格都会随着碳税税率的增加而升高，并且当碳税税率 τ 大于 7.38 时，原制造商碳减排前的新产品价格要高于碳减排后的价格。

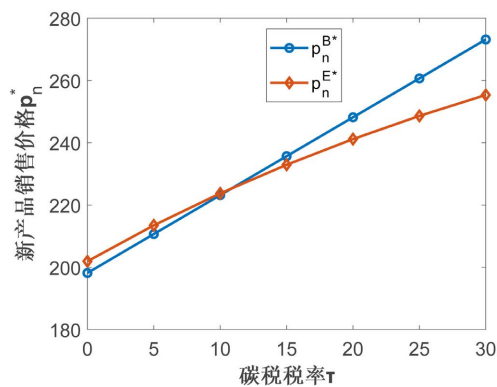


Figure 2. The impact of carbon tax rate and carbon reduction on the price of new products
图 2. 碳税税率、碳减排对新产品价格的影响

由图 3 可以看出, 原制造商碳减排前后的新产品销售量都会随着碳税税率的增加而下降。原制造商进行碳减排技术投入后新产品的销售量增加, 碳税税率越高, 新产品的销售量比碳减排前的增加量越明显。

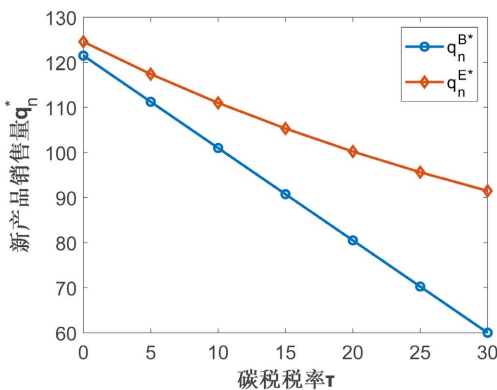


Figure 3. The impact of carbon tax rates and carbon reduction on the sales volume of new products
图 3. 碳税税率、碳减排对新产品销量的影响

由图 4 可以看出, 随着碳税税率的增加, 单位新产品的碳减排量随之增加, 但增加的幅度越来越小。适当的碳税可以很好的促进原制造商进行碳减排, 但当碳税税率过高时, 会过度牺牲原制造商的经济效益, 此时原制造商在碳减排投入的成本将会趋于平缓。

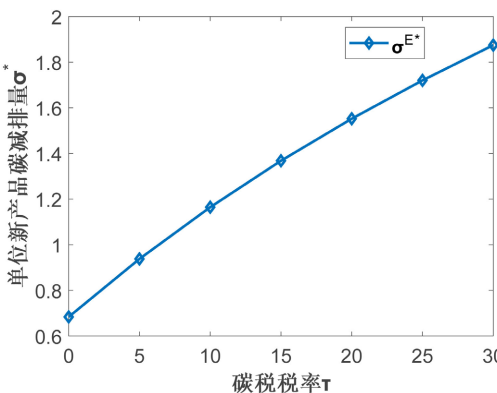


Figure 4. The impact of carbon tax rate on the carbon emission reduction of new products per unit
图 4. 碳税税率对单位新产品碳减排量的影响

由图 5 可以看出, 随着碳税税率的增加, 原制造商碳减排前后的利润都会随之降低, 且下降的幅度逐渐变小。原制造商进行碳减排技术投入后原制造商的利润增加, 并且碳税税率越高, 原制造商碳减排所带来的收益越明显。

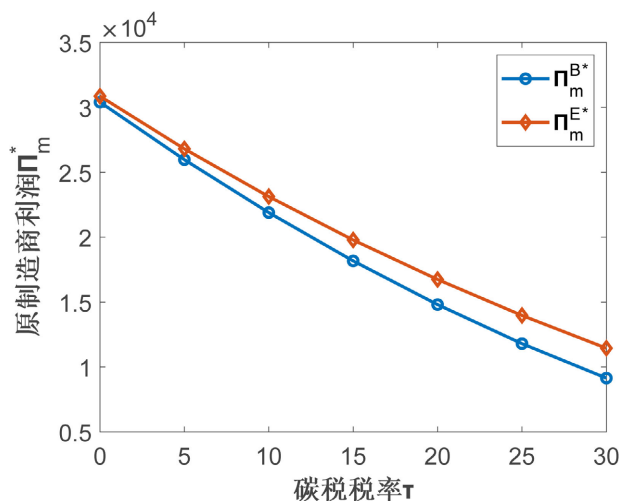


Figure 5. The impact of carbon tax rates and carbon emissions reduction on the profits of original manufacturers

图 5. 碳税税率、碳减排对原制造商利润的影响

由图 6 可以看出, 无论原制造商是否进行碳减排, 再制造品的价格都会随着碳税税率的增加而升高, 并且当碳税税率 τ 大于 7.38 时, 原制造商碳减排前的再制造品价格要高于碳减排后的价格。

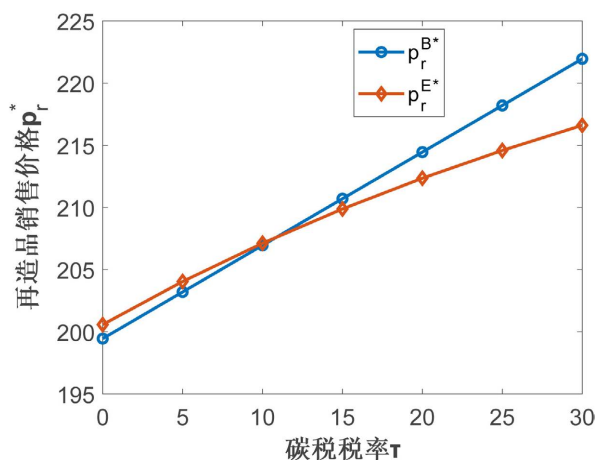


Figure 6. The impact of carbon tax rates and carbon emissions reduction on the prices of remanufactured products

图 6. 碳税税率、碳减排对再制造品价格的影响

由图 7、图 8 可以看出, 原制造商碳减排前后的再制造品销售量随着碳税税率的增加而增加, 再制造商的利润随着碳税税率的增加而降低。当碳税税率 τ 小于 7.38 时, 原制造商碳减排技术投入后, 再制造品的销售量和再制造商利润都要高于原制造商不进行碳减排时的, 此时, 碳减排对再制造商为促进作用; 当碳税税率 τ 大于 7.38 时, 原制造商碳减排技术投入后, 再制造品的销售量和再制造商利润都要低于原制造商不进行碳减排时的, 此时, 碳减排对再制造商为抑制作用。

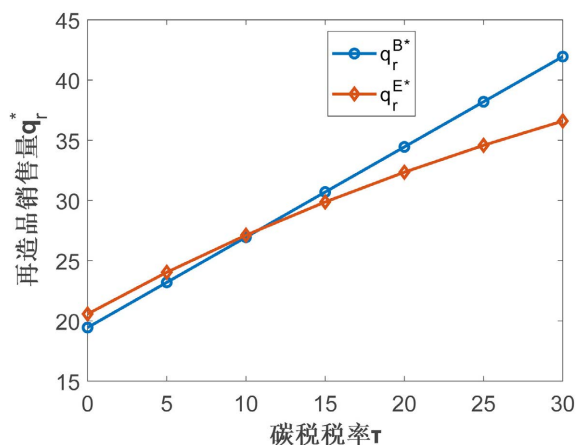


Figure 7. The impact of carbon tax rate and carbon reduction on the sales volume of remanufactured products

图 7. 碳税税率、碳减排对再制造品销售量的影响

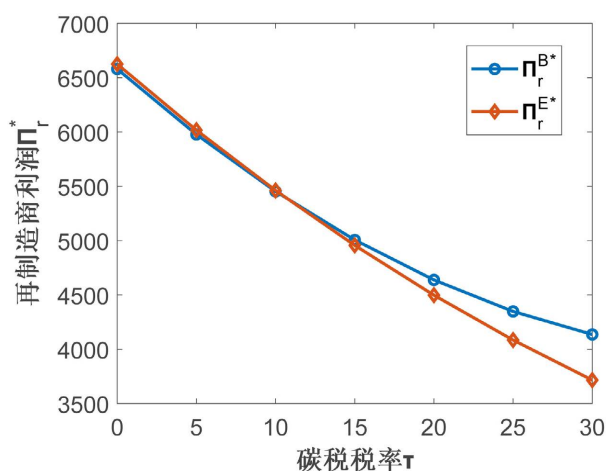


Figure 8. The impact of carbon tax rates and carbon emissions reduction on the profits of remanufacturers

图 8. 碳税税率、碳减排对再制造商利润的影响

6. 结论

本章以政府、原制造商、再制造商和消费者组成的闭环供应链为研究对象, 构建原制造商无碳减排和实施碳减排供应链决策模型, 利用主从博弈和逆向归纳法的原理求解出两种决策下闭环供应链的最优决策, 并分析碳税税率、消费者低碳偏好和碳减排决策对供应链成员最优决策的影响, 得到的主要结论如下:

(1) 碳税政策会损害原制造商的利润, 原制造商有足够的动力进行减排, 且碳税税率越高, 碳减排所带来的收益越明显, 碳税政策对再制造商利润的影响取决于再制造减排系数和两种产品的竞争强度, 当再制造减排系数和两种产品的竞争强度的比值小于某一阈值时, 再制造商的利润将会增加; 当再制造减排系数和两种产品竞争强度的比值大于某一阈值时, 再制造商的利润将会减少。

(2) 随着消费者低碳偏好系数的增大, 新产品的销售价格和销售量、原制造商的利润以及单位新产品的碳减排量也随之增加。消费者的低碳意识越强, 对原制造商的经济效益和环境效益越有利。

(3) 原制造商的碳减排决策会使新产品的销售量增加, 使自身的利润增加; 原制造商的碳减排决策不

会影响原制造商的逆向供应链, 但再制造商的利润不一定会增加, 当碳税税率和消费者低碳偏好的比值小于某一阈值时, 新产品的销售价和销售量升高, 原制造商的利润增加, 此时碳减排决策对再制造商表现为促进作用; 当碳税税率和消费者低碳偏好的比值大于某一阈值时, 新产品的销售价和销售量降低, 原制造商的利润减少, 此时碳减排决策对再制造商表现为抑制作用。

通过以上分析, 得到的管理启示如下。

政府对企业征收碳税, 可以激励企业进行碳减排, 但税率过高会严重损害企业的经济效益, 政府应将碳税税率设置在一个合理水平, 使企业的经济效益和环境效益达到平衡。原制造商应积极进行碳减排, 虽然增加了碳减排成本, 但降低了碳税造成的成本损失, 增加了利润。此外, 原制造商应结合政府开展一系列的宣传活动、讲座等来培养消费者的低碳意识。再制造商应改进再制造技术, 减少再制造过程中产生的碳排放量, 降低生产成本, 提高再制造品的竞争力, 同时要向大众普及再制造的概念, 提高消费者对再制造品的认可度。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(72271164)产品智能化趋势下多维场景驱动的产品服务系统适应性方案设计方法研究; 上海市软科学研究重点项目(19692104000)“基于闭环供应链的城市生活垃圾回收再利用模式研究”。

参考文献

- [1] Chang, X.Y., Xia, H.Y., Zhu, H.Y., *et al.* (2015) Production Decisions in a Hybrid Manufacturing-Remanufacturing System with Carbon Cap and Trade Mechanism. *International Journal of Production Economics*, **162**, 160-173. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.01.020>
- [2] Chai, Q.F., Xiao, Z.D., Lai, K.H., *et al.* (2018) Can Carbon Cap and Trade Mechanism Be Beneficial for Remanufacturing? *International Journal of Production Economics*, **203**, 311-321. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.07.004>
- [3] 熊中楷, 申成然, 彭志强. 专利保护下再制造闭环供应链协调机制研究[J]. 管理科学学报, 2011, 14(6): 76-85.
- [4] 夏西强, 李梦雅, 路梦圆. 碳减排政策对授权再制造影响的对比研究[J]. 系统工程理论与实践, 2023, 43(5): 1380-1394.
- [5] 刘碧玉, 杨海东, 柯迪. 专利授权下碳排放政策对制造商/再制造商运营决策的影响[J]. 中国管理科学, 2023, 31(5): 198-208.
- [6] 王东阳, 李芳, 施可可. 碳交易下考虑产品替代性的供应链减排决策研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2023, 40(5): 55-63.
- [7] 田颖卉, 李芳. 混合碳政策对双渠道供应链定价与减排决策的影响研究[J]. 科技与经济, 2023, 36(4): 6-10.
- [8] 缪文清, 沈炳良. 碳交易及补贴机制下供应链差别定价研究[J]. 技术经济, 2020, 39(9): 51-60.
- [9] 刘镇宇. 碳限额交易对服装闭环供应链运作决策影响研究[J]. 物流工程与管理, 2023, 45(9): 88-92.
- [10] Xu, L. and Wang, C.X. (2018) Sustainable Manufacturing in a Closed-Loop Supply Chain Considering Emission Reduction and Remanufacturing. *Resources Conservation and Recycling*, **131**, 297-304. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.012>