

控制与决策

Control and Decision

碳交易环境下再制造企业生产及减排投资决策

陈玉玉, 李帮义, 柏庆国, 徐健腾, 王哲

引用本文:

陈玉玉, 李帮义, 柏庆国, 等. 碳交易环境下再制造企业生产及减排投资决策[J]. *控制与决策*, 2020, 35(3): 695–703.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0446>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

面向装配的多agent排产模型研究

Assembly-oriented planning and scheduling framework based on multi-agent
控制与决策. 2020, 35(2): 403–409 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0616>

面向装配的多agent排产模型研究

Assembly-oriented planning and scheduling framework based on multi-agent
控制与决策. 2020, 35(2): 403–409 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0616>

不同政府目标决策下具有奖惩机制的绿色供应链模型

Green supply chain model with premium and penalty mechanism under different government goals
控制与决策. 2020, 35(2): 427–435 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0664>

不同政府目标决策下具有奖惩机制的绿色供应链模型

Green supply chain model with premium and penalty mechanism under different government goals
控制与决策. 2020, 35(2): 427–435 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0664>

绿色车间调度优化研究进展

Advances in green shop scheduling and optimization
控制与决策. 2018, 33(3): 385–391 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0215>

基于回收产品质量水平的闭环供应链渠道选择模型

Reverse channel selection in closed-loop supply chain based on quality of recycled products
控制与决策. 2017, 32(2): 193–202 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0070>

需求依赖减排水平和价格的供应链决策与协调机制

Decision and coordination models for supply chain with carbon emissions reduction level and price dependent demand
控制与决策. 2016(3): 486–492 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1981>

限额与交易下考虑战略顾客行为的供应链决策与协调

Supply chain decisions and coordination with strategic customer behavior under cap-and-trade policy
控制与决策. 2016(3): 477–485 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1909>

碳交易环境下再制造企业生产及减排投资决策

陈玉玉^{1†}, 李帮义¹, 柏庆国², 徐健腾², 王哲¹

(1. 南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 211106; 2. 曲阜师范大学 管理学院, 山东 日照 276826)

摘要: 基于碳限额交易政策,对再制造企业生产和减排投资决策进行研究.在碳交易环境背景下,利用非线性凸优化理论,首先分析不减排投资时再制造企业的最优生产决策,然后研究再制造企业对生产新产品或再制品减排投资时的情形.通过比较,探讨再制造企业进行减排投资时制造/再制造策略的调整,并分析减排投资对社会福利各因素(包括再制造企业利润、消费者剩余和环境影响)的影响.研究表明:对新产品(再制品)减排将导致新产品(再制品)产量的增加和再制品(新产品)产量的降低;减排投资使再制造企业利润和消费者剩余均增加,但是环境影响(碳排放总量)则取决于单位再制造的碳排放量.最后,通过算例分析验证了以上结论.

关键词: 制造/再制造; 碳限额交易政策; 低碳偏好; 生产决策; 减排投资

中图分类号: F253

文献标志码: A

Research on production and emission reduction investment decisions of the remanufacturing enterprise under carbon trading environment

CHEN Yu-yu^{1†}, LI Bang-yi¹, BAI Qing-guo², XU Jian-teng², WANG zhe¹

(1. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China; 2. School of Management, Qufu Normal University, Rizhao 276826, China)

Abstract: Based on the carbon cap-and-trade regulation, the paper studies the production and emission reduction investment decisions of the remanufacturing enterprise. In the context of the carbon trading environment, the paper firstly analyzes the production decision of the remanufacturing company not considering emission reduction investment, and then studies the cases considering emission reduction investment in new or remanufacturing products. Through comparative analysis, we explore the adjustment of production strategies when the remanufacturing company considering emission reduction investment, and analyze the impact of emission reduction investment on social welfare (including the profit of remanufacturing enterprise, consumer surplus and environment impact). Studies show that carbon reduction investments in new products (remanufactured products) will result in the remanufacturing company expanding the production scale of new products (remanufactured products) and reducing the production of remanufactured products (new products). The emission reduction investment increases the profit of the remanufacturing enterprise and the consumer surplus, however, the environmental impact depends on the amount of carbon emissions in the remanufacturing process. Finally, the conclusions are verified by a case study.

Keywords: manufacturing/remanufacturing; cap-and-trade regulation; low carbon preference; production decisions; emission reduction investment

0 引言

近年来,全球气候变暖、空气污染等环境问题日益凸显,减少碳排放已成为一项严峻挑战.我国政府已制定了到2020年实现单位GDP碳排放比相对于2005年降低40%~50%的目标.为实现该目标,一方面,政府颁布了一系列法律法规,比如碳限额交易政策、碳税政策和碳限额政策;另一方面,为响应政府号召,企业在生产过程中进行减排投资,比如引进减排

设备或技术.

对企业而言,再制造不仅实现了资源循环利用,而且具有显著碳减排效益,是生产方式向低碳转型的有效途径.因此,越来越多学者关注了碳政策、减排投资和再制造等问题的研究.与本文相关研究主要有如下4个方面.

1) 碳政策下正向供应链/企业运营管理. Benjaafar等^[1]探究了如何将碳排放纳入采购、生产

收稿日期: 2018-04-11; 修回日期: 2018-10-17.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71771138, 71702087); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(NP2016303, NS2017057); 江苏省普通高校研究生科研计划项目(KYCX18_0236).

†通讯作者. E-mail: chenyyu@nuaa.edu.cn.

和库存管理等业务决策中; Song等^[2]基于3种不同碳政策对经典单周期报童问题进行了研究; Xu等^[3]对碳限额交易政策下两级供应链的生产和定价问题进行了研究; Zhang等^[4]建立了一个利润最大化模型, 将碳限额交易政策应用到具有随机需求的单周期多项目生产计划中; 江文等^[5]研究了零售应对战略顾客行为以及制造商面对碳限额交易政策时的供应链决策与协调问题. 上述文献均只考虑了通过政府政策实现减排并分析对企业决策的影响. 在实践中, 减排技术不仅是一种有效的减排手段, 而且可以提高企业竞争力, 一些学者研究了供应链减排投资的相关问题.

2) 正向供应链减排投资决策. Chen等^[6]基于不同权力结构, 对两个竞争制造商的最优定价和减排决策进行了研究; Swami等^[7]基于Stackelberg博弈和凸优化理论, 对包含单个制造商和单个零售商的可持续供应链协调问题进行了研究; Li等^[8]基于市场需求是减排水平的线性函数, 通过构建产品减排水平竞争的供应链博弈模型, 对两条可持续供应链之间的竞争问题进行了研究. 上述文献均研究的是企业减排技术投资的微观实现机理, 但是没有考虑政策碳政策的宏观调控.

3) 考虑减排时碳政策下正向供应链运营. Bai等^[9]研究了碳限额交易政策下考虑减排投资的供应链系统协调问题; Drake等^[10]研究了碳税政策和碳限额交易政策对企业减排技术选择的影响; Krass等^[11]基于绿色技术投资, 研究了碳税政策对减少环境污染的作用; Toptal等^[12]扩展经典的EOQ模型, 探究了碳限额、碳交易和碳税政策下的减排投资决策; Xu等^[13]基于碳限额交易政策, 对包含单个供应商和单个制造商(进行减排投资)的两级供应链进行了研究; 陈玉玉等^[14]基于碳额交易政策, 研究了寄售契约对考虑减排技术投资的供应链的协调效果. 上述研究均是对碳政策下的正向供应链运作管理进行研究, 而没有涉及再制造/闭环供应链.

4) 碳政策下闭环供应链/再制造企业决策. Chang等^[15]分别对独立和替代需求市场构建利润最大化模型, 基于非线性凸优化理论, 研究了碳限额交易政策对再制造企业决策的影响; Chen等^[16]研究了碳限额交易政策和回收法规对再制造企业的决策和环境影响; Liu等^[17]针对市场需求不确定性, 研究了3种碳政策下再制造企业的生产决策; Miao等^[18]基于以旧换新, 研究了碳税政策和碳限额交易政策下的再制造企业定价和生产决策; Wang等^[19]研究了存

在基金约束时碳排放约束下制造商的运作决策问题; Yenipazarli^[20]研究了碳税政策对再制造企业生产和定价决策的影响; 聂佳佳等^[21]研究了政府碳排放约束政策对闭环供应链回收再制造决策的影响.

表1 文献梳理

文献	碳政策	减排投资	再制造
文献[1]~文献[5]	✓		
文献[6]~文献[8]		✓	
文献[9]~文献[14]	✓	✓	
文献[15]~文献[21]	✓		✓
本文	✓	✓	✓

现有文献虽然已对碳政策下制造/再制造生产决策进行研究, 但上述研究均没有涉及减排技术投资的选择, 也未对减排投资的影响进行分析. 若考虑减排技术投资, 再制造企业的生产决策将如何调整, 减排投资又会对社会福利各因素有何影响, 这正是本文接下来要解决的问题.

基于上述分析, 本文对碳限额交易政策下再制造企业生产决策和减排投资决策进行研究. 考虑消费者具有低碳偏好, 在环境保护和经济利益的双重驱动下, 再制造企业对新产品或再制品生产时进行减排投资. 通过构建碳限额政策下再制造企业最优生产和减排决策模型, 基于非线性凸优化理论, 分别分析不同情形下的最优生产和减排决策.

1 问题描述和符号介绍

1.1 问题描述

再制造企业生产新产品并对其达到寿命终结时进行回收再制造, 新产品的单位售价和成本均高于再制品, 即 $p_n > p_r, c_n > c_r$. 本文假设市场需求信息确定, 且企业处于成熟期, 故本文研究的是基于确定性环境下的单周期稳定状态模型.

在环境效益和经济效益的双目标驱动下, 再制造企业在新产品或再制品生产时进行减排技术投资. 对新产品和再制品的减排投资费用分别为 $\frac{1}{2}\beta_n s_n^2$ 和 $\frac{1}{2}\beta_r s_r^2$. 其中: s_n 和 s_r 分别为对新产品和再制品的减排水平, β_n 和 β_r 为新产品、再制品减排投资系数. 根据再制造企业是否减排投资, 可以分为3种情形: 1) 对新产品和再制品均不减排, 这是研究基础, 用字母 B (base) 表示; 2) 对新产品减排投资, 用字母 N (new) 表示; 3) 对再制品减排投资, 用字母 R (remanufacturing) 表示.

不进行减排投资时, 生产单位新产品的碳排放量为 e . 生产单位再制品碳排放量小于新产品, 假设单位再制造的碳排放量为新产品的 α 倍(其中 $0 < \alpha < 1$). 随着减排水平提高, 单位新产品的碳排放量

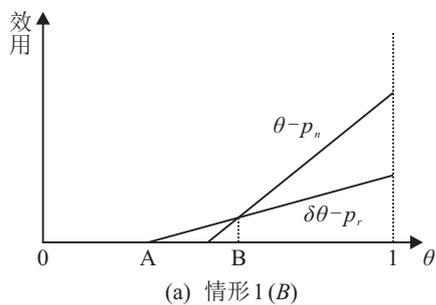
减少,减排之后单位新产品和再制品碳排放量分别为 $e - b_n s_n$ 和 $\alpha e - b_r s_r$, 其中 b_n 和 b_r 分别为新产品、再制品减排系数. 由于减排后的碳排放大于0, 有 $0 \leq s_n < \frac{e}{b_n}$ 和 $0 \leq s_r < \frac{\alpha e}{b_r}$.

为了降低碳排放量和引导再制造企业进行低碳生产, 政府颁布碳限额交易政策. 即, 政府对再制造企业的碳排上限 K 进行规定, 若再制造企业碳排放量 $E^j (j \in \{B, N, R\})$ 低于碳限额 K , 则再制造企业以单价 ε 售出剩余的碳排放权; 反之, 则需要购买超出的部分.

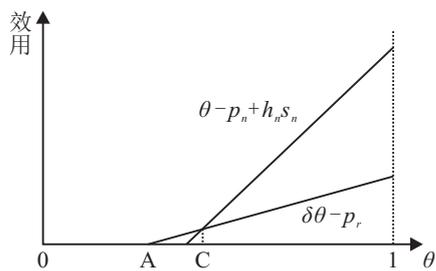
在碳交易环境背景下, 本文分别对新产品和再制品均不减排、对新产品减排以及对再制品减排3种情形进行分析. 通过对各减排方案下的生产、减排决策和社会福利(包括再制造企业利润、消费者剩余以及碳排放量)进行比较, 探究再制造企业减排方案的选择, 然后研究减排决策对各决策方案决策的影响, 以及对社会福利的影响.

1.2 减排约束下的市场结构

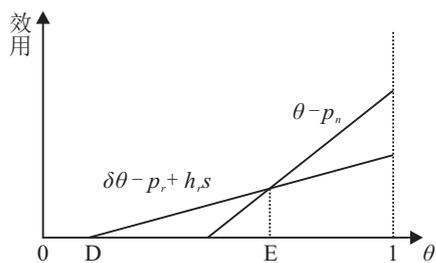
异质性消费者对新产品的价值认定 θ 为 $[0, 1]$ 上的均匀分布, 再制品则是新产品的 δ 倍, $\delta \in (0, 1)$. 消费者的购买行为取决于新产品和再制品效用



(a) 情形1(B)



(b) 情形2(N)



(c) 情形3(R)

图1 消费者行为导向的市场结构

$U_n(\theta)$ 和 $U_r(\theta)$ 的大小. 理性的消费者基于效用最大化作出购买决策, 消费者行为导向的市场结构如图1所示, 各交点坐标分别为

$$\begin{aligned} A &: \left(\frac{p_r}{\delta}, 0\right); B: \left(\frac{p_n - p_r}{1 - \delta}, 0\right); \\ C &: \left(\frac{p_n - p_r - h_n s_n}{1 - \delta}, 0\right); \\ D &: \left(\frac{p_r - h_r s_r}{\delta}, 0\right); \\ E &: \left(\frac{p_n - p_r + h_r s_r}{1 - \delta}, 0\right). \end{aligned}$$

情形1(B) 不进行减排投资. 此时, $U_n(\theta) = \theta - p_n$, $U_r(\theta) = \delta\theta - p_r$. 当 $\frac{p_n - p_r}{1 - \delta} \leq \theta \leq 1$ 时, $U_n \geq \max\{0, U_r\}$, 购买新产品, 需求量为

$$q_n = \int_{\frac{p_n - p_r}{1 - \delta}}^1 d\theta = \frac{1 - \delta - p_n + p_r}{1 - \delta};$$

当 $\frac{p_r}{\delta} \leq \theta < \frac{p_n - p_r}{1 - \delta}$ 时, $U_r > \max\{0, U_n\}$, 购买再制品, 需求量为

$$q_r = \int_{\frac{p_r}{\delta}}^{\frac{p_n - p_r}{1 - \delta}} d\theta = \frac{\delta p_n - p_r}{\delta(1 - \delta)}.$$

对应的逆需求函数为 $p_n = 1 - q_n - \delta q_r$ 和 $p_r = \delta(1 - q_n - q_r)$.

情形2(N) 对新产品减排投资. 此时, $U_n(\theta) = \theta - p_n + h_n s_n$, $U_r(\theta) = \delta\theta - p_r$. 当 $\frac{p_n - p_r - h_n s_n}{1 - \delta} \leq \theta \leq 1$ 时, $U_n \geq \max\{0, U_r\}$, 购买新产品, 需求量为

$$q_n = \int_{\frac{p_n - p_r - h_n s_n}{1 - \delta}}^1 d\theta = \frac{1 - \delta - p_n + p_r + h_n s_n}{1 - \delta};$$

当 $\frac{p_r}{\delta} \leq \theta < \frac{p_n - p_r - h_n s_n}{1 - \delta}$ 时, $U_r > \max\{0, U_n\}$, 购买再制品, 需求量为

$$q_r = \int_{\frac{p_r}{\delta}}^{\frac{p_n - p_r - h_n s_n}{1 - \delta}} d\theta = \frac{\delta p_n - p_r - \delta h_n s_n}{\delta(1 - \delta)}.$$

对应的逆需求函数为 $p_n = 1 - q_n - \delta q_r + h_n s_n$ 和 $p_r = \delta(1 - q_n - q_r)$.

情形3(R) 对再制品减排投资. 此时, $U_n(\theta) = \theta - p_n$, $U_r(\theta) = \delta\theta - p_r + h_r s_r$. 当 $\frac{p_n - p_r + h_r s_r}{1 - \delta} \leq \theta \leq 1$ 时, $U_n \geq \max\{0, U_r\}$, 购买新产品, 需求量为

$$q_n = \frac{1 - \delta - p_n + p_r - h_r s_r}{1 - \delta};$$

当 $\frac{p_r - h_r s_r}{\delta} \leq \theta < \frac{p_n - p_r + h_r s_r}{1 - \delta}$ 时, $U_r > \max\{0, U_n\}$, 购买再制品, 需求量为

$$q_r = \frac{\delta p_n - p_r + h_r s_r}{\delta(1 - \delta)}.$$

对应的逆需求函数为 $p_n = 1 - q_n - \delta q_r$ 和 $p_r = \delta(1 - q_n - q_r) + h_r s_r$.

1.3 符号介绍

文中符号说明如表2所示, 其中上标 $j \in \{B, N, R\}$ 分别表示3种情形.

表2 模型中的符号及其含义

符号	含义
q_n, q_r	新产品、再制造品的产量(决策变量)
s_n, s_r	新产品、再制造品的减排水平(决策变量)
p_n, p_r	新产品、再制造品的单价
c_n, c_r	新产品、再制造品的成本
θ	消费者对新产品的支付意愿
$\delta\theta$	消费者对再制造品的支付意愿
e	不减排时单位新产品的碳排放量
α	再制造品的碳排放量占新产品的比率
K	碳排放限额
E^j	总的实际碳排放量
ε	单位碳排放权交易价格
β_n, β_r	新产品、再制造品减排投资系数
h_n, h_r	新产品、再制造品减排投资对效用的影响系数
b_n, b_r	新产品、再制造品的减排系数
Π^j	再制造企业的利润

2 模型构建与求解

为了研究减排技术的引入对再制造企业决策的影响,首先分析对新产品和再制造品均不减排投资时再制造企业的最优生产决策.为简化表示,定义 $\gamma_1 = 1 - c_n - e\varepsilon$ 和 $\gamma_2 = \delta - c_r - \alpha e\varepsilon$,其中 γ_1 和 γ_2 为考虑碳排放时新产品和再制造品的附加值,且满足 $\gamma_1 > \gamma_2 > \delta\gamma_1 > 0$.

2.1 不进行减排决策模型(B)

当不进行减排时,基于利润最大化,再制造企业的决策为

$$\max_{\{q_n, q_r\}} \Pi^B = (p_n - c_n)q_n + (p_r - c_r)q_r - \varepsilon(E^B - K). \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} E^B &= eq_n + \alpha eq_r, \\ p_n &= 1 - q_n - \delta q_r, \\ p_r &= \delta(1 - q_n - q_r). \end{aligned}$$

$(p_n - c_n)q_n$ 和 $(p_r - c_r)q_r$ 为新产品和再制造品的销售收益.当 $E^N < K$ 时,实际碳排放量小于碳限额, $-\varepsilon(E^N - K)$ 表示再制造企业销售剩余碳排放权获得的收益;反之则表示购买超出碳排放权的成本.

命题1 当不进行减排投资时,再制造企业确定的唯一最优生产决策为 $q_n^{B*} = \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{2(1 - \delta)}$ 和 $q_r^{B*} = \frac{\gamma_2 - \gamma_1\delta}{2(1 - \delta)\delta}$.

证明 由 $\gamma_1 = 1 - c_n - e\varepsilon$ 和 $\gamma_2 = \delta - c_r - \alpha e\varepsilon$,根据一阶最优性条件 $\frac{\partial \Pi^B(q_n, q_r)}{\partial q_n} = \gamma_1 - 2q_n - 2\delta q_r = 0$ 和 $\frac{\partial \Pi^B(q_n, q_r)}{\partial q_r} = \gamma_2 - 2\delta q_n - 2\delta q_r = 0$ 得最优决策 q_n^{B*} 和 q_r^{B*} . $\Pi^B(q_n, q_r)$ 的海塞矩阵为

$$H^B = \begin{bmatrix} -2 & -2\delta \\ -2\delta & -2\delta \end{bmatrix},$$

根据 $|H_1^B| = -2 < 0$ 和 $|H_2^B| = 4(2 - \delta) > 0$,可知 $\Pi^B(q_n, q_r)$ 是关于 q_n 和 q_r 的严格凹函数.□

将 q_n^{B*} 和 q_r^{B*} 代入情形1中的逆需求函数,可得再制造企业的最优定价为 $p_n^{B*} = 1 - \frac{\gamma_1}{2}$ 和 $p_r^{B*} = \delta - \frac{\gamma_2}{2}$.将 q_n^{B*} 、 q_r^{B*} 、 p_n^{B*} 和 p_r^{B*} 代入式(1),可得再制造企业最优利润为

$$\Pi^{B*} = \frac{\gamma_2^2 + \gamma_1\delta(\gamma_1 - 2\gamma_2)}{4(1 - \delta)\delta} + \varepsilon K. \quad (2)$$

当再制造企业不进行减排时,碳排放总量为

$$E^{B*} = \frac{e\delta(1 - \alpha)\gamma_1 + e(\alpha - \delta)\gamma_2}{2(1 - \delta)\delta}. \quad (3)$$

消费者剩余(consumer surplus, CS)总额为购买新产品与购买再制造产品的消费者剩余之和,即

$$\begin{aligned} CS^{B*} &= \int_{\frac{p_n - p_r}{1 - \delta}}^1 (\theta - p_n)d\theta + \int_{\frac{p_r}{\delta}}^{\frac{p_n - p_r}{1 - \delta}} (\delta\theta - p_r)d\theta = \\ &= \frac{q_n^2 + \delta q_r^2 + 2\delta q_n q_r}{2} = \frac{\gamma_2^2 + \gamma_1^2\delta - 2\gamma_1\gamma_2\delta}{8\delta - 8\delta^2}. \quad (4) \end{aligned}$$

2.2 对新产品减排模型(N)

对新产品减排时的碳排放总量为

$$E^N = (e - b_n s_n)q_n + \alpha eq_r,$$

再制造企业的决策为

$$\begin{aligned} \max_{\{q_n, q_r, s_n\}} \Pi^N &= \\ &= (p_n - c_n)q_n + (p_r - c_r)q_r - \varepsilon(E^N - K) - \frac{1}{2}\beta_n s_n^2. \quad (5) \end{aligned}$$

此时, $p_n = 1 - q_n - \delta q_r + h_n s_n$, $p_r = \delta(1 - q_n - q_r)$. $\frac{1}{2}\beta_n s_n^2$ 表示新产品生产过程中的减排投资费用,减排投资一方面使得单位新产品的碳排放量减少 $b_n s_n$,另一方面导致单位新产品的定价提高 $h_n s_n$.为保证产量和利润的非负性,需满足 $2\beta_n(1 - \delta) - (h_n + b_n\varepsilon)^2 > 0$ 恒成立.

命题2 对新产品进行减排投资时,再制造企业的唯一最优决策为

$$\begin{aligned} q_n^{N*} &= \frac{\beta_n(\gamma_1 - \gamma_2)}{2\beta_n(1 - \delta) - (h_n + b_n\varepsilon)^2}, \\ q_r^{N*} &= \frac{\gamma_2}{2\delta} - \frac{\beta_n(\gamma_1 - \gamma_2)}{2\beta_n(1 - \delta) - (h_n + b_n\varepsilon)^2}, \\ s_n^{N*} &= \frac{(h_n + b_n\varepsilon)(\gamma_1 - \gamma_2)}{2\beta_n(1 - \delta) - (h_n + b_n\varepsilon)^2}. \end{aligned}$$

证明 由一阶最优条件

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Pi^N(q_n, q_r, s_n)}{\partial q_n} &= \\ \gamma_1 - 2q_n - 2\delta q_r + (h_n + b_n\varepsilon)s_n &= 0, \\ \frac{\partial \Pi^N(q_n, q_r, s_n)}{\partial q_r} &= \gamma_2 - 2\delta q_n - 2\delta q_r = 0, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \Pi^N(q_n, q_r, s_n)}{\partial s_n} = (h_n + b_n \varepsilon)q_n - \beta_n s_n = 0,$$

可得最优决策 q_n^{N*} 、 q_r^{N*} 和 s_n^{N*} . $\Pi^N(q_n, q_r, s_n)$ 的海塞矩阵为

$$H^N = \begin{bmatrix} -2 & -2\delta & h_n + b_n \varepsilon \\ -2\delta & -2\delta & 0 \\ h_n + b_n \varepsilon & 0 & -\beta_n \end{bmatrix},$$

根据 $|H_1^N| = -2 < 0$, $|H_2^N| = 4(2 - \delta) > 0$ 和 $|H_3^N| = -2\delta(2\beta_n(1 - \delta) - (h_n + b_n \varepsilon)^2) < 0$, 可知 $\Pi^N(q_n, q_r, s_n)$ 是关于 q_n 、 q_r 和 s_n 的严格凹函数. \square

将 q_n^{N*} 、 q_r^{N*} 和 s_n^{N*} 代入情形2中的逆需求函数, 可得最优定价

$$p_n^{N*} = \frac{2\beta_n(2 - \gamma_1)(1 - \delta) - h_n^2(2 - 2\gamma_1 + \gamma_2) - 2(2\beta_n(1 - \delta) - 2b_n h_n \varepsilon(2 - \gamma_1) - b_n^2 \varepsilon^2(2 - \gamma_2))}{(h_n + b_n \varepsilon)^2} \rightarrow \delta - \frac{\gamma_2}{2}.$$

通过与不减排投资时的定价比较发现, $p_n^{N*} > p_n^{B*}$, $p_r^{N*} = p_r^{B*}$, 即对新产品减排投资会导致新产品定价提高, 但再制品定价保持不变. 将最优生产、减排和定价决策代入式(5), 可得再制造企业的最优利润为

$$\Pi^{N*} = \frac{1}{4} \left(\frac{\gamma_2^2}{\delta} + \frac{2\beta_n(\gamma_1 - \gamma_2)^2}{2\beta_n(1 - \delta) - (h_n + b_n \varepsilon)^2} \right) + \varepsilon K. \quad (6)$$

当再制造企业对新产品进行减排投资时, 生产过程中碳排放总量为

$$E^{N*} = (e - b_n s_n)q_n + \alpha e q_r = \frac{e\alpha\gamma_2}{2\delta} + \frac{e(1 - \alpha)\beta_n(\gamma_1 - \gamma_2)}{2\beta_n(1 - \delta) - (h_n + b_n \varepsilon)^2} - \frac{b_n\beta_n(\gamma_1 - \gamma_2)^2(h_n + b_n \varepsilon)}{(2\beta_n(1 - \delta) - (h_n + b_n \varepsilon)^2)^2}. \quad (7)$$

再制造企业对新产品减排时的消费者剩余为

$$CS^{N*} = \frac{\gamma_2^2}{8\delta} + \frac{\beta_n^2(\gamma_1 - \gamma_2)^2(1 - \delta)}{2(2\beta_n(1 - \delta) - (h_n + b_n \varepsilon)^2)^2}. \quad (8)$$

推论1 再制造企业对新产品减排时的最优决策随参数 α 、 h_n 、 β_n 和 b_n 的变化趋势如表3所示, 其中符号“ \uparrow ”和“ \downarrow ”分别表示递增和递减.

表3 对新产品减排时最优决策随参数的变化趋势

参数	q_n^{N*}	q_r^{N*}	s_r^{N*}
$\alpha \uparrow$	\uparrow	\downarrow	\uparrow
$\beta_n \uparrow$	\downarrow	\uparrow	\downarrow
$h_n, b_n \uparrow$	\uparrow	\downarrow	\uparrow

由推论1可知: 新产品的产量 q_n^{N*} 和减排水平 s_n^{N*} 随 α 、 h_n 和 b_n 的增大而增加, 随 β_n 的增大而降低;

再制品产量 q_r^{N*} 的变化趋势与之相反.

2.3 对再制品减排模型(R)

对再制品减排投资时的碳排放总量为

$$E^R = e q_n + (\alpha e - b_r s_r) q_r,$$

再制造企业的决策为

$$\max_{\{q_n, q_r, s_r\}} \Pi^R = (p_n - c_n)q_n + (p_r - c_r)q_r - \varepsilon(E^R - K) - \frac{1}{2}\beta_r s_r^2. \quad (9)$$

此时, $p_n = 1 - q_n - \delta q_r$, $p_r = \delta(1 - q_n - q_r) + h_r s_r$. $\frac{1}{2}\beta_r s_r^2$ 表示对再制品减排投资的费用, 减排投资一方面使得单位再制品的碳排放量减少 $b_r s_r$, 另一方面导致再制品的单价提高 $h_r s_r$. 为保证产量和利润的非负性, 需满足 $2\beta_r \delta(1 - \delta) - (h_r + b_r \varepsilon)^2 > 0$ 恒成立.

命题3 对再制品进行减排投资时, 再制造企业的唯一最优决策为

$$q_n^{R*} = \frac{\gamma_1}{2} - \frac{\beta_r \delta(\gamma_2 - \gamma_1 \delta)}{2\beta_r(1 - \delta)\delta - (h_r + b_r \varepsilon)^2},$$

$$q_r^{R*} = \frac{\beta_r(\gamma_2 - \gamma_1 \delta)}{2\beta_r(1 - \delta)\delta - (h_r + b_r \varepsilon)^2},$$

$$s_r^{R*} = \frac{(h_r + b_r \varepsilon)(\gamma_2 - \gamma_1 \delta)}{2\beta_r(1 - \delta)\delta - (h_r + b_r \varepsilon)^2}.$$

证明 由一阶最优条件

$$\frac{\partial \Pi^R(q_n, q_r, s_r)}{\partial q_n} = \gamma_1 - 2q_n - 2\delta q_r = 0,$$

$$\frac{\partial \Pi^R(q_n, q_r, s_r)}{\partial q_r} =$$

$$\gamma_2 - 2\delta q_n - 2\delta q_r + (h_r + b_r \varepsilon)s_r = 0,$$

$$\frac{\partial \Pi^R(q_n, q_r, s_r)}{\partial s_r} = (h_r + b_r \varepsilon)q_r - \beta_r s_r = 0,$$

可得 q_n^{R*} 、 q_r^{R*} 和 s_r^{R*} . $\Pi^R(q_n, q_r, s_r)$ 的海塞矩阵为

$$H^R = \begin{bmatrix} -2 & -2\delta & 0 \\ -2\delta & -2\delta & h_r + b_r \varepsilon \\ 0 & h_r + b_r \varepsilon & -\beta_r \end{bmatrix}.$$

根据 $|H_1^R| = -2 < 0$, $|H_2^R| = 4(2 - \delta) > 0$ 和 $|H_3^R| = -2(2\beta_r \delta(1 - \delta) - (h_r + b_r \varepsilon)^2) < 0$, 可知 $\Pi^R(q_n, q_r, s_r)$ 是关于 q_n 、 q_r 和 s_r 的严格凹函数. \square

将 q_n^{R*} 、 q_r^{R*} 和 s_r^{R*} 代入情形3中的逆需求函数, 可得新产品和再制品的最优定价分别为

$$p_n^{R*} = 1 - \frac{\gamma_1}{2},$$

$$p_r^{R*} = \frac{2\beta_r(2\delta - \gamma_2)(1 - \delta)\delta - h_r^2((2 + \gamma_1)\delta - 2(2\beta_r(1 - \delta)\delta - 2b_r h_r(2\delta - \gamma_2)\varepsilon - b_r^2 \delta \varepsilon^2(2 - \gamma_1))}{(h_r + b_r \varepsilon)^2} \rightarrow$$

与不减排投资时的定价比较发现, $p_n^{R*} = p_n^{B*}$, $p_r^{R*} > p_r^{B*}$, 即对再制造品减排投资会导致再制造品的价格提高, 但新产品的价格保持不变. 将最优生产、减排和定价决策代入式(9), 可得再制造企业的最优利润为

$$\Pi^{R*} = \frac{1}{4} \left(\gamma_1^2 + \frac{2\beta_r(\gamma_2 - \gamma_1\delta)^2}{2\beta_r(1-\delta)\delta - b_r^2\varepsilon^2} \right) + \varepsilon K. \quad (10)$$

当再制造企业再对再制造品减排时, 碳排放总量为

$$E^{R*} = eq_n + (\alpha\varepsilon - b_r s_r)q_r = \frac{e\gamma_1}{2} + \frac{e(\alpha - \delta)\beta_r(\gamma_2 - \gamma_1\delta)}{(2\beta_r(1-\delta)\delta - (h_r + b_r\varepsilon)^2)} - \frac{b_r\beta_r(\gamma_2 - \gamma_1\delta)^2(h_r + b_r\varepsilon)}{(2\beta_r(1-\delta)\delta - (h_r + b_r\varepsilon)^2)^2}. \quad (11)$$

再制造品进行减排投资时的消费者剩余为

$$CS^{R*} = \frac{\gamma_1^2}{8} + \frac{\beta_r^2(1-\delta)\delta(\gamma_2 - \gamma_1\delta)^2}{2(2\beta_r(1-\delta)\delta - (h_r + b_r\varepsilon)^2)^2}. \quad (12)$$

推论2 再制造企业对新产品减排时的最优决策随参数 α 、 h_r 、 β_r 和 b_r 的变化趋势如表4所示, 其中符号“ \uparrow ”和“ \downarrow ”分别表示递增和递减.

表4 对新产品减排时最优决策随参数的变化趋势

参数	q_n^{R*}	q_r^{R*}	s_r^{R*}
$\alpha \uparrow$	\uparrow	\downarrow	\downarrow
$\beta_r \uparrow$	\uparrow	\downarrow	\downarrow
$h_r, b_r \uparrow$	\downarrow	\uparrow	\uparrow

3 减排投资的影响分析

从再制造企业的角度, 减排投资引入后生产方案将做何调整? 从政府角度, 社会福利又将有何变化? 为了回答上述问题, 首先探究减排决策对再制造企业生产决策的影响, 然后分析减排投资对社会福利各因素的影响作用.

3.1 减排投资对再制造企业决策的影响

命题4 1) $q_n^{N*} > q_n^{B*}$, $q_r^{N*} < q_r^{B*}$, 且 $q_n^{N*} + q_r^{N*} = q_n^{B*} + q_r^{B*}$; 2) $q_n^{R*} < q_n^{B*}$, $q_r^{R*} > q_r^{B*}$, 且 $q_n^{R*} + q_r^{R*} > q_n^{B*} + q_r^{B*}$.

证明 1) 由命题1和命题2可得

$$q_n^{N*} - q_n^{B*} = \frac{(\gamma_1 - \gamma_2)(h_n + b_n\varepsilon)^2}{2(1-\delta)(2\beta_n(1-\delta) - (h_n + b_n\varepsilon)^2)} > 0,$$

$$q_r^{N*} - q_r^{B*} = -\frac{(\gamma_1 - \gamma_2)(h_n + b_n\varepsilon)^2}{2(1-\delta)(2\beta_n(1-\delta) - (h_n + b_n\varepsilon)^2)} < 0,$$

$$q_n^{N*} + q_r^{N*} = q_n^{B*} + q_r^{B*} = \frac{\gamma_2}{2\delta}.$$

2) 由命题1和命题3可得

$$q_n^{R*} - q_n^{B*} =$$

$$-\frac{(\gamma_2 - \gamma_1\delta)(h_r + b_r\varepsilon)^2}{2(1-\delta)(2\beta_r(1-\delta)\delta - (h_r + b_r\varepsilon)^2)} < 0,$$

$$q_r^{R*} - q_r^{B*} =$$

$$\frac{(\gamma_2 - \gamma_1\delta)(h_r + b_r\varepsilon)^2}{2(1-\delta)\delta(2\beta_r(1-\delta)\delta - (h_r + b_r\varepsilon)^2)} > 0,$$

$$q_n^{R*} + q_r^{R*} - (q_n^{B*} + q_r^{B*}) =$$

$$\frac{(\gamma_2 - \gamma_1\delta)(h_r + b_r\varepsilon)^2}{2\delta(2\beta_r(1-\delta)\delta - (h_r + b_r\varepsilon)^2)} > 0. \quad \square$$

命题4的第1)条表明, 与不进行减排相比, 对新产品减排时, 新产品产量增加, 再制造品产量降低, 而总产量保持不变. 命题4的第3)条表明, 与不进行减排时相比, 对再制造品减排时, 新产品产量减少, 而再制造品产量和总产量均增加. 这是由于减排投资使得新产品(再制造品)的碳排放量减少, 消费者对新产品(再制造品)的需求量增加, 而市场蚕食作用使得再制造品(新产品)的市场需求减少.

3.2 减排投资对社会福利的影响

政府颁布碳限额交易政策的目的是通过法律手段鼓励企业进行低碳生产, 对碳排放较高(低)的企业给予一定惩罚(奖励), 最终实现环境友好型发展, 即碳排放量的减少. 但是, 由于再制造企业以自身利润最大化为目标进行决策, 导致减排技术的引入并不一定实现碳排放总量的降低. 此外, 在制定一项决策的评判标准时, 不能片面地追求环境绩效, 还应兼顾经济绩效, 因此需要对社会福利(包括再制造企业的利润、环境影响和消费者剩余)的变化情况进行分析.

命题5 1) $\Pi^{N*} > \Pi^{B*}$, $CS^{N*} > CS^{B*}$; 2) $\Pi^{R*} > \Pi^{B*}$, $CS^{R*} > CS^{B*}$.

证明 1) 由式(2)和(6)可得, 对新产品减排和不减排时的利润差为

$$\Pi^{N*} - \Pi^{B*} = \frac{(\gamma_1 - \gamma_2)^2(h_n + b_n\varepsilon)^2}{4(1-\delta)(2\beta_n(1-\delta) - (h_n + b_n\varepsilon)^2)} > 0;$$

由式(4)和(8)可得, 消费者剩余之差为

$$CS^{N*} - CS^{B*} = \frac{(\gamma_1 - \gamma_2)^2(h_n + b_n\varepsilon)^2(4\beta_n(1-\delta) - (h_n + b_n\varepsilon)^2)}{8(1-\delta)(2\beta_n(1-\delta) - (h_n + b_n\varepsilon)^2)^2} > 0.$$

2) 由式(2)和(10)可得, 对再制造品减排和不减排时的利润差为

$$\Pi^{R*} - \Pi^{B*} = \frac{(\gamma_2 - \gamma_1\delta)^2(h_r + b_r\varepsilon)^2}{4(1-\delta)\delta(2\beta_r(1-\delta)\delta - (h_r + b_r\varepsilon)^2)} > 0;$$

由式(4)和(12)可得,消费者剩余之差为

$$CS^{R*} - CS^{B*} = \frac{(\gamma_2 - \gamma_1\delta)^2(h_r + b_r\varepsilon)^2(4\beta_r(1-\delta) - 8(1-\delta)\delta(2\beta_r(1-\delta)\delta - (h_r + b_r\varepsilon)^2))}{8(1-\delta)\delta(2\beta_r(1-\delta)\delta - (h_r + b_r\varepsilon)^2)^2} > 0. \quad \square$$

命题5表明,对新产品或再制造品进行减排投资虽然导致了投资成本的增加,但是再制造企业的整体利润增加. 这是因为再制造企业进行减排投资,一方面是通过碳交易市场获得收益,另一方面是基于消费者的低碳偏好,通过定价和产量的调整,最终使得再制造企业获益.

命题6 1) 若 $\alpha > \bar{\alpha}$, 则 $E^{N*} < E^{B*}$; 反之, 则 $E^{N*} \geq E^{B*}$. 其中

$$\bar{\alpha} = 1 - \frac{2b_n\beta_n(1-\delta)(\gamma_1 - \gamma_2)}{e(h_n + b_n\varepsilon)(2\beta_n(1-\delta) - (h_n + b_n\varepsilon)^2)}.$$

2) 若 $\alpha < \bar{\alpha}$, 则 $E^{R*} < E^{B*}$; 反之, 则 $E^{R*} \geq E^{B*}$. 其中

$$\bar{\alpha} = \delta + \frac{2b_r\beta_r\delta(1-\delta)(\gamma_2 - \gamma_1\delta)}{e(h_r + b_r\varepsilon)(2\beta_r(1-\delta)\delta - (h_r + b_r\varepsilon)^2)}.$$

证明 由式(3)和(7)可得,对新产品减排和不进行减排时的碳排放总量之差为

$$E^{N*} - E^{B*} = \frac{(\gamma_1 - \gamma_2)(h_n + b_n\varepsilon)e(1-\alpha)(h_n + b_n\varepsilon)}{2(1-\delta)(2\beta_n(1-\delta) - (h_n + b_n\varepsilon)^2)} - \frac{b_n\varepsilon(2\beta_n(1-\delta) - (h_n + b_n\varepsilon)^2)}{\delta - (h_n + b_n\varepsilon)^2} - \frac{2(\gamma_1 - \gamma_2)(h_n + b_n\varepsilon)b_n\beta_n(1-\delta)(\gamma_1 - \gamma_2)}{2(1-\delta)(2\beta_n(1-\delta)\delta - (h_n + b_n\varepsilon)^2)}.$$

由 $E^{N*} - E^{B*} < 0$, 可得 $\alpha > \bar{\alpha}$.

由式(3)和(11)可得,对再制造品减排和不行进行减排时的碳排放总量之差为

$$E^{R*} - E^{B*} = \frac{(\gamma_2 - \gamma_1\delta)(h_r + b_r\varepsilon)(\alpha - \delta)e(h_r + b_r\varepsilon)}{2\delta(1-\delta)(2\beta_r(1-\delta)\delta - (h_r + b_r\varepsilon)^2)} - \frac{b_r\varepsilon(2\beta_r(1-\delta)\delta - (h_r + b_r\varepsilon)^2)}{\delta\delta - (h_r + b_r\varepsilon)^2} - \frac{2(\gamma_2 - \gamma_1\delta)(h_r + b_r\varepsilon)b_r\beta_r\delta(1-\delta)(\gamma_2 - \gamma_1\delta)}{2\delta(1-\delta)(2\beta_r(1-\delta)\delta - (h_r + b_r\varepsilon)^2)}.$$

由 $E^{R*} - E^{B*} < 0$, 可得 $\alpha < \bar{\alpha}$. \square

命题6表明,引入减排技术并非一定会减小对环境的影响(碳排放量): 1) 当再制造品的碳排放较高,即 $\alpha > \bar{\alpha}$ 时,对新产品减排投资,使得新产品产量增加,再制造品产量减少. 由于提高新产品生产导致碳排放的增加量小于减少再制造品生产实现的碳排放的降低量,最终碳排放总量减少. 2) 当再制造品的碳

排放较低,即 $\alpha < \bar{\alpha}$ 时,对再制造品减排投资,使得新产品产量减少,再制造品产量增加. 由于减少新产品生产导致碳排放降低量大于提高再制造品生产实现的碳排放增加量,最终碳排放总量减少. 除上述情况,减排技术的引入反而导致环境影响的加剧.

4 数值分析

本节将通过数值仿真,对上述结论进行验证和进一步分析. 设定相关参数: $\delta = 0.3, c_n = 0.3, c_r = 0.1, h_n = 0.6, h_r = 0.4, b_n = 1, b_r = 0.6, e = 1, \varepsilon = 0.3, K = 0.2$. 为了验证不同取值对结果的影响,对减排投资系数分别取值 $\beta_n = 4, \beta_n = 5$ 和 $\beta_r = 4, \beta_r = 5$. 通过数值分析,一方面探究再制造企业最优决策和社会福利随 α, β_n 和 β_r 的变化趋势;另一方面,分析与不减排相比,减排投资对最优决策和社会福利的影响.

图2和图3表明: 1) 新产品产量随 α 增大而增加,再制造品产量随 α 增大而减少,即随着再制造品碳排放量的增大,再制造企业会扩大新产品和减少再制造品生产. 2) 对新产品(再制造)减排时,随着减排投资系数 $\beta_n(\beta_r)$ 增大,新产品(再制造)产量降低,而再制造品(新产品)产量增加. 即,由于新产品(再制造)减排费用的提高,再制造企业将扩大再制造品(新产品)生产而降低新产品(再制造)生产,即验证了推论1和推论2. 3) 与不进行减排相比,对新产品(再制造)减排时,新产品产量增加(减少),而再制造品产量减少(增加),该结论与命题4一致.

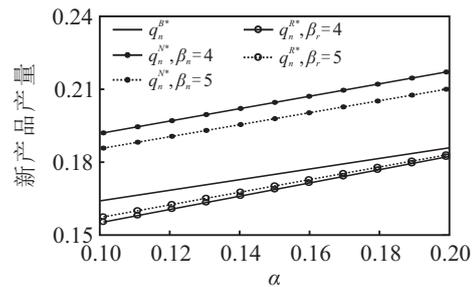


图2 新产品产量比较

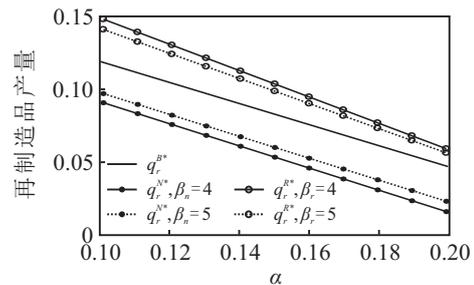


图3 再制造品产量比较

图4表明,随着 α 增大,新产品减排水平提高,而再制造品减排水平降低. 此外,新产品和再制造品最

优减排水平随减排投资系数增大而降低,这是由于减排费用的提高使得再制造企业减排积极性降低。

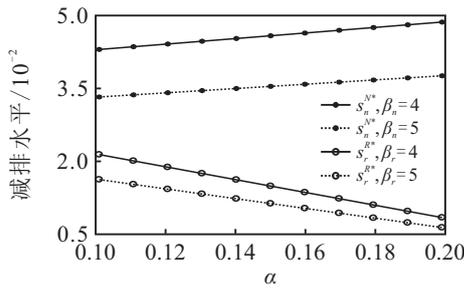


图4 减排水平随 α 和 β 的变化趋势

图5和图6表明,再制造企业的利润和消费者剩余均随 α 和减排投资系数的增大而减少。此外,与不进行减排投资相比,对新产品或再制造品减排投资均使得再制造企业的利润和消费者剩余增加,该结论与命题5一致。

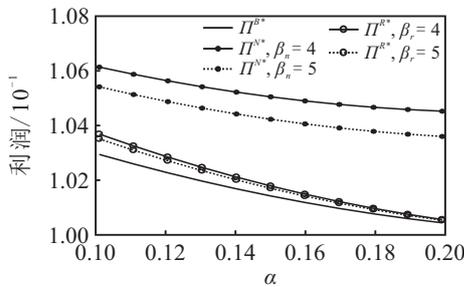


图5 再制造企业利润比较

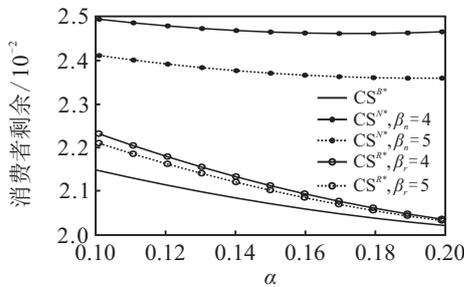


图6 消费者剩余比较

图7为不同情形下碳排放总量随 α 的变化趋势,可以发现,再制造品碳排放量的增大将导致碳排放总量的提高,即对环境的影响加剧。此外还表明,减排投资技术的引入未必一定会减少对环境的影响。

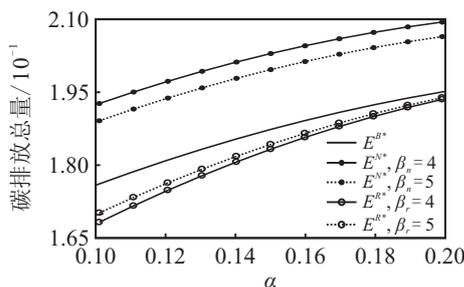


图7 碳排放量随 α 的变化趋势

5 结论

基于再制造企业利润最大化,考虑消费者低碳偏好,构建集成碳限额交易的再制造企业最优生产和减排决策模型,利用非线性凸优化理论,探究再制造企业不同情形下的最优生产和减排决策,并分析减排投资对再制造企业决策和社会福利各因素的影响。

研究发现:与不进行减排相比,对新产品减排投资时的新产品产量增加,再制造品的产量降低,而总产量保持不变;对再制造品减排投资时新产品产量减少,而再制造品产量和总产量均增加;减排投资使再制造企业利润和消费者剩余均增加,但是环境影响则取决于再制造过程的碳排放量大小。

本文研究基于完全信息、需求确定和可再利用资源充足的假设,若考虑对非对称信息、市场需求随机或者可利用资源受限的情况,问题将更加复杂,笔者将对此做进一步研究。

参考文献(References)

- [1] Benjaafar S, Li Y, Daskin M. Carbon footprint and the management of supply chains: Insights from simple models[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2013, 10(1): 99-116.
- [2] Song J, Leng M. Analysis of the single-period problem under carbon emissions policies[M]. New York: Springer, 2012: 297-313.
- [3] Xu X, Zhang W, He P, et al. Production and pricing problems in make-to-order supply chain with cap-and-trade regulation[J]. Omega, 2017, 66: 248-257.
- [4] Zhang B, Xu L. Multi-item production planning with carbon cap and trade mechanism[J]. International Journal of Production Economics, 2013, 144(1): 118-127.
- [5] 江文, 陈旭. 限额与交易下考虑战略顾客行为的供应链决策与协调[J]. 控制与决策, 2016, 31(3): 477-485. (Jiang W, Chen X. Supply chain decisions and coordination with strategic customer behavior under cap-and-trade policy[J]. Control and Decision, 2016, 31(3): 477-485.)
- [6] Chen X, Luo Z, Wang X. Impact of efficiency, investment, and competition on low carbon manufacturing[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 143: 388-400.
- [7] Swami S, Shah J. Channel coordination in green supply chain management[J]. Journal of the Operational Research Society, 2013, 64(3): 336-351.
- [8] Li X, Li Y. Chain-to-chain competition on product sustainability[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 2058-2065.
- [9] Bai Q, Chen M, Xu L. Revenue and promotional cost-sharing contract versus two-part tariff contract

- in coordinating sustainable supply chain systems with deteriorating items[J]. *International Journal of Production Economics*, 2017, 187(C): 85-101.
- [10] Drake D F, Kleindorfer P R, Van Wassenhove L N. Technology choice and capacity portfolios under emissions regulation[J]. *Production and Operations Management*, 2016, 25(6): 1006-1025.
- [11] Krass D, Nedorezov T, Ovchinnikov A. Environmental taxes and the choice of green technology[J]. *Production and Operations Management*, 2013, 22(5): 1035-1055.
- [12] Toptal A E, Zlü H I, Konur D E. Joint decisions on inventory replenishment and emission reduction investment under different emission regulations[J]. *International Journal of Production Research*, 2014, 52(1): 243-269.
- [13] Xu J, Chen Y, Bai Q. A two-echelon sustainable supply chain coordination under cap-and-trade regulation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 135(C): 42-56.
- [14] 陈玉玉, 李帮义, 徐健腾, 等. 碳限额交易政策下寄售契约对两级可持续供应链的协调[J]. *控制与决策*, 2019, 34(5): 1085-1093.
(Chen Y Y, Li B Y, Xu J T, et al. A two-echelon sustainable supply chain coordination with consignment contract under cap-and-trade regulation[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(5): 1085-1093.)
- [15] Chang X, Xia H, Zhu H, et al. Production decisions in a hybrid manufacturing-remanufacturing system with carbon cap and trade mechanism[J]. *International Journal of Production Economics*, 2015, 162(C): 160-173.
- [16] Chen Y, Li B, Bai Q, et al. Decision-making and environmental implications under cap-and-trade and take-back regulations[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(4): 678-702.
- [17] Liu B, Holmbom M, Segerstedt A, et al. Effects of carbon emission regulations on remanufacturing decisions with limited information of demand distribution[J]. *International Journal of Production Research*, 2015, 53(2): 532-548.
- [18] Miao Z, Mao H, Fu K, et al. Remanufacturing with trade-ins under carbon regulations[J]. *Computers and Operations Research*, 2018, 89(C): 253-268.
- [19] Wang Y, Chen W, Liu B. Manufacturing/remanufacturing decisions for a capital-constrained manufacturer considering carbon emission cap and trade regulation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 140: 1118-1128.
- [20] Yenipazarli A. Managing new and remanufactured products to mitigate environmental damage under emissions regulation[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 249(1): 117-130.
- [21] 聂佳佳, 王拓, 赵映雪, 等. 碳排放约束下再制造闭环供应链回收策略[J]. *管理工程学报*, 2015, 29(3): 249-256.
(Nie J J, Wang T, Zhao Y X, et al. Collecting strategies for the closed-loop supply chain with remanufacturing in the constraint of carbon emission[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2015, 29(3): 249-256.)

作者简介

陈玉玉(1990—), 女, 博士, 从事低碳供应链、生产者责任延伸的研究, E-mail: chenyyu@nuaa.edu.cn;

李帮义(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事供应链建模与优化、生产者责任延伸等研究, E-mail: libangyi@nuaa.edu.cn;

柏庆国(1979—), 男, 副教授, 从事运作管理、物流与供应链管理的研究, E-mail: hustbaiqg@hust.edu.cn;

徐建腾(1981—), 女, 副教授, 从事运作管理、物流与供应链管理的研究, E-mail: jiantengxu@163.com;

王哲(1990—), 男, 博士, 从事生产运作与管理、供应链建模与优化的研究, E-mail: wangzhe9012@126.com.

(责任编辑: 齐 霁)