

控制与决策

Control and Decision

专利保护下闭环供应链碳减排及协调决策

王娜, 张玉林

引用本文:

王娜,张玉林. 专利保护下闭环供应链碳减排及协调决策[J]. *控制与决策*, 2022, 37(5): 1378–1388.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0814>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

混合碳政策下制造商低碳转型的技术选择策略

Technology selection in low carbon transition of the manufacturer under mixed carbon policy

控制与决策. 2021, 36(7): 1763–1770 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1536>

不同担保模式下考虑零售商公平关切的闭环供应链博弈模型

Game models of closed-loop supply chain under different warranty modes considering retailer's fairness concerns

控制与决策. 2021, 36(6): 1489–1498 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1328>

信息非对称下考虑制造商回收行为的闭环供应链协调

Coordination of closed supply chain under asymmetric information considering manufacturer's recycling behavior

控制与决策. 2021, 36(7): 1723–1731 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1657>

考虑成员企业风险态度的制造商资金约束闭环供应链定价与回收决策

Pricing and recycling decisions of a closed-loop supply chain considering participators' risk attitudes and manufacturer capital constraint

控制与决策. 2021, 36(5): 1239–1248 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1305>

大数据服务商参与下供应链联合减排的动态协调策略

Dynamic coordination strategy of joint emission reduction in supply chain involving big data service provider

控制与决策. 2021, 36(8): 2013–2022 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1560>

专利保护下闭环供应链碳减排及协调决策

王娜^{1,2}, 张玉林^{1†}

(1. 东南大学 经济管理学院, 南京 211189; 2. 西藏民族大学 信息工程学院, 陕西 咸阳 712082)

摘要: 考虑政府征收碳税及再制造专利保护, 建立原制造商和第三方再制造商不同决策情形的博弈模型, 探讨碳税、碳减排对制造/再制造决策的影响. 研究结果表明: 碳税使原制造商收益受损, 当再制造产品接受度大于再制造碳排放比率时, 碳税使再制造商利润增加; 碳减排使新产品产量增加, 原制造商利润增加; 碳减排使再制造专利许可费提高, 不利于废旧产品回收, 再制造商利润不一定增加; 集中决策下废旧产品的回收率和供应链总利润均高于分散决策, 当满足碳税促进再制造的条件时, 集中决策具有更好的环境绩效; 针对分散决策的效率损失, 原制造商收取适当专利许可费, 再制造商分担部分减排成本, 能够实现闭环供应链的协调. 最后, 运用数值仿真验证以上结论, 并进一步分析碳税和碳排放比率对减排率的影响.

关键词: 碳税; 专利保护; 闭环供应链; 碳减排; 协调

中图分类号: F272

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.0814

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 王娜, 张玉林. 专利保护下闭环供应链碳减排及协调决策[J]. 控制与决策, 2022, 37(5): 1378-1388.

Carbon emission reduction and coordination decisions of closed-loop supply chain under patent protection

WANG Na^{1,2}, ZHANG Yu-lin^{1†}

(1. School of Economics and Management, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. School of Information Engineering, Xizang Minzu University, Xianyang 712082, China)

Abstract: Considering the carbon tax policy and remanufacturing patent protection, the game models between an original equipment manufacturer and a third party remanufacturer in different scenarios are established, and the impacts of carbon tax and emission reduction on the manufacturing/remanufacturing decisions are discussed. The results show that the carbon tax reduces the original manufacturer's profit. When the acceptance level of remanufactured products is greater than the emission intensity of remanufactured products, the carbon tax will increase the remanufacturer's profit; emission reduction will increase the quantity of new products and the original manufacturer's profit. However, emission reduction increases the licensing fee, which is not conducive to recycling, so the remanufacturer's profit may not necessarily increase. The recovery rate and total profit in the centralized decision-making are higher than those in the decentralized scenario. When the conditions for carbon tax to promote remanufacturing are met, the centralized decision has better environmental performance. The coordination of closed-loop supply chain can be realized by the original manufacturer charging an appropriate license fee and the remanufacturer sharing part of the emission reduction cost. Finally, the results are verified by numerical simulation, and the effects of carbon tax and emission intensity of remanufactured products on emission reduction rate are further analyzed.

Keywords: carbon tax; patent protection; closed-loop supply chain; carbon emission reduction; coordination

0 引言

全球经济快速发展的同时, 伴随着资源短缺、空气污染和气候异常等环境问题日益严重. 再制造采用废旧产品及零部件进行生产, 减少了资源和能源的消耗^[1], 是实现可持续发展的重要途径. 再制造具

有良好的经济效益和环境效益, 但是, 出于品牌、技术、成本等因素, 很多原制造商通常不选择自行再制造, 而是将其再制造业务委托给第三方^[2], 如路虎公司与卡特彼勒签订协议, 由卡特彼勒负责其再制造业务; 苹果公司将对中国地区废旧 iPhone 手机的再制

收稿日期: 2020-06-21; 录用日期: 2021-03-05.

基金项目: 国家自然科学基金项目(72071040, 71671036).

责任编委: 李勇建.

†通讯作者. E-mail: zhangyl@seu.edu.cn.

造所有权交给富士康. 再制造专利保护下, 原制造商将再制造业务授权给再制造商, 并向其收取专利许可费. 在回收端, 原制造商的废旧产品构成再制造商的生产原材料, 双方存在合作关系; 而在销售端, 再制造商生产的再制造产品与原制造商生产的新产品展开竞争.

为进一步控制碳排放, 各国政府相继出台碳税、碳限额以及碳交易等政策, 其中碳税对控制碳排放最为有效^[3]. 碳税压力下, 制造商往往通过改良技术、革新设备等措施降低碳排放. 在正向供应链中, 上游企业创新有利于提高整个供应链的绩效, 技术溢出也使下游企业收益增加^[4], 通常成本分担契约可以实现供应链的协调^[5]. 再制造专利保护下, 原制造商与再制造商既合作又竞争, 那么, 原制造商减排对废旧产品的回收和再制造会有何影响? 再制造商是否一定受益于原制造商的碳减排决策? 减排成本分担能否实现闭环供应链的协调? 这些问题的研究具有重要的现实意义.

与本文相关的文献主要体现为闭环供应链定价协调、再制造专利保护和供应链碳减排协调. 关于闭环供应链定价, 学者们进行了广泛的研究. Savaskan等^[6]研究了不同回收渠道下闭环供应链的最优决策; Ferrer等^[7]基于新产品和再制造产品的同质需求, 研究制造商多周期的生产定价策略, 随后又基于新产品和再制造产品的异质需求进行分析^[8]; Örsdemir等^[9]探讨再制造商竞争情形下, 原制造商对新产品的质量决策; 在闭环供应链协调方面, 易余胤等^[10]通过改进的两部定价契约实现闭环供应链的协调; 王文宾等^[11]考虑政府奖惩机制, 设计了闭环供应链的成本共担-利润共享契约; Panda等^[12]采用收益共享契约对不同结构的闭环供应链进行协调.

在再制造专利保护方面, 熊中楷等^[13]率先从管理学角度研究专利保护下闭环供应链的最优决策, 并提出收益分享与费用分担的协调机制; Zou等^[14]比较了授权再制造与外包再制造的最优定价决策; 刘志等^[15]同时考虑许可费和产品设计, 研究公平关切对闭环供应链决策的影响, 并提出收益共享契约对闭环供应链进行协调; 易余胤等^[16]构建由再制造商负责回收再制造的闭环供应链模型, 对比分析了固定专利许可费与单位产品专利许可费两种模式; 郑本荣等^[17]构建专利保护下双渠道闭环供应链决策模型, 通过改进的收益共享契约实现双渠道闭环供应链的协调; 孙浩等^[18]探讨了有无专利授权及合作模式下制造商与再制造商的最优决策; 赵俊杰等^[19]比较了

再制造不同专利许可模式下的回收定价决策. 本文主要关注再制造专利保护下碳税和碳减排对闭环供应链决策的影响.

随着低碳经济的发展, 很多学者开始关注低碳政策对制造/再制造决策的影响. Yenipazarli^[20]研究碳税政策下垄断制造商的再制造策略, 并从政府角度分析了如何合理设定碳税; Chang等^[21]分析了碳限额和碳交易对垄断制造商制造/再制造决策的影响; Chai等^[22]认为碳限额和碳交易有利于再制造, 但是长远看, 制造商应投资低碳生产技术; 在供应链碳减排及协调方面, Ghosh等^[5]研究了成本分担对制造商最优努力水平的影响, 发现制造商总能从成本分担中获益; Wang等^[23]发现在零售商主导和权力均衡结构下, 成本分担能够实现供应链协调; 赵道致等^[24]考虑供应链联合减排和低碳宣传, 分别构建了有无成本分担和集中决策模式下的微分博弈模型, 发现成本分担契约能够实现供应链成员利润的Pareto改善; Xu等^[25]考虑消费者低碳偏好, 构建由单一制造商和单一零售商组成的闭环供应链减排模型, 研究了系统的最优决策. 在正向供应链碳减排中, 成本分担契约能够有效协调供应链. 与上述文献不同, 本文考虑专利保护下闭环供应链碳减排, 原制造商与再制造商既合作又竞争, 因此成本分担契约的有效性有待检验.

综上所述, 国内外针对闭环供应链定价协调及供应链碳减排已有较多研究, 并取得丰富的成果. 然而, 以往考虑碳约束的再制造定价研究, 大多数不单独考虑废旧产品的回收成本; 而关于碳减排的研究主要集中于正向供应链和原制造商自行再制造的情形. 本文在再制造专利许可模式下, 研究闭环供应链的碳减排及协调策略, 主要贡献在于: 1) 在模型构建时, 考虑废旧产品的回收成本, 分析碳减排对废旧产品回收和再制造的影响, 进而确定能够促进回收和再制造的边界条件; 2) 通过对比原制造商减排与不减排情形的均衡决策, 探析减排对专利许可费、产量、利润和环境绩效的影响; 3) 针对减排的技术溢出效应和分散决策的效率损失, 提出有效的协调机制, 为原制造商与再制造商的合作提供决策依据.

1 问题描述与假设

1.1 问题描述与符号说明

考虑由一个原制造商和一个第三方再制造商构成的闭环供应链, 原制造商作为领导者, 只负责生产并销售新产品, 而将回收再制造业务授权给再制造商, 并向其收取专利许可费. 再制造商得到专利许可后, 负责废旧产品的回收再制造以及再制造产品的

销售. 原制造商的决策变量为再制造专利许可费和新产品产量, 再制造商的决策变量为废旧产品的回收率, 根据 $q_r = \tau q_n$ 确定再制造产品的产量. 政府对生产过程的碳排放征收碳税, 原制造商和再制造商均负担碳排放成本. 碳税压力下, 原制造商通过减排投资降低碳排放.

本文涉及到的符号如表1所示. 其中: $i \in \{M, R, T\}$, 分别代表原制造商、再制造商和供应链整体; $j \in \{A, B, C, D\}$, 分别代表原制造商不减排、原制造商减排、集中决策和协调决策.

表1 符号说明

符号	含义	符号	含义
p_n	新产品售价	ε	减排率
p_r	再制造产品售价	e_0	单位新产品的碳排放
p_b	单位再制造专利许可费	β	再制造产品的接受度
q_n	新产品产量	λ	再制造与新产品碳排放比率
q_r	再制造产品产量	f	碳税税率
c_n	单位新产品生产成本	Q	市场潜在需求
c_r	单位再制造产品生产成本	E	总的碳排放
τ	废旧产品的回收率	Π_i^j	利润

1.2 基本假设

本文设定如下假设.

假设1 随着废旧产品回收数量的增多, 回收难度增大, 回收努力成本可表示为 $k(\tau q_n)^2/2$, 其中 $k > 0$, 体现回收的难易程度. 回收的废旧产品均可用于再制造, 即 $q_r = \tau q_n$.

假设2 单位新产品的碳排放为 e_0 , 单位再制造产品的碳排放为 λe_0 , 其中 $0 < \lambda < 1$. λ 越大表示再制造产品的碳排放越高, 即再制造的减排效果越弱; 反之, λ 越小表示再制造的减排效果越强. 根据文献[24], 减排成本为 $h\varepsilon^2/2$, 其中 $h (h > 0)$ 为减排系数, $0 < \varepsilon < 1$. 原制造商减排后, 单位新产品的碳排放为 $e_0(1 - \varepsilon)$, 单位再制造产品的碳排放为 $\lambda e_0(1 - \varepsilon)$.

假设3 采用单周期模型, 当产品处于生命周期的成熟阶段时, 其销售价格、产量都相对稳定, 此时, 废旧产品的回收也较稳定.

假设4 消费者对新产品的支付意愿为 V , 对再制造产品的支付意愿为 βV , 其中 V 服从 $[0, Q]$ 均匀分布. 消费者购买新产品和再制造产品的效用分别为 $U_n = V - p_n, U_r = \beta V - p_r$, 进一步可以得到逆需求函数为 $p_n = Q - q_n - \beta q_r, p_r = \beta(Q - q_n - q_r)$.

2 分散决策

2.1 原制造商不减排

为了探讨原制造商减排对闭环供应链决策的影响, 首先以原制造商不减排作为基准模式, 分析碳税对再制造专利保护下闭环供应链决策的影响.

分散决策下, 原制造商与再制造商的博弈顺序

为: 1) 原制造商确定新产品的产量和单位再制造产品的专利许可费; 2) 再制造商根据专利许可费确定废旧产品的回收率. 原制造商和再制造商的利润函数分别为

$$\begin{aligned} \max_{q_n, p_b} \Pi_M^A &= p_n q_n + p_b q_r - c_n q_n - f e_0 q_n; \quad (1) \\ \text{s.t. } \max_{\tau} \Pi_R^A &= p_r q_r - p_b q_r - c_r q_r - \frac{1}{2} k (\tau q_n)^2 - \\ &\quad \lambda f e_0 q_r. \quad (2) \end{aligned}$$

其中: 式(1)前2项分别为新产品的销售收入和再制造专利许可收入, 第3、4项分别为生产成本和碳排放成本; 式(2)第1项为再制造产品的销售收入, 第2、3项分别为再制造专利许可费和生产成本, 第4、5项分别为回收成本和碳排放成本.

供应链总的碳排放为

$$E^A = e_0 q_n^A + \lambda e_0 q_r^A. \quad (3)$$

下文为简化公式, 设

$$\begin{aligned} X &= (k + \beta)(Q - c_n - f e_0) + \beta(Q - c_n - \\ &\quad f e_0 - \beta Q + c_r + \lambda f e_0), \\ X' &= k(Q - c_n - f e_0) + 2\beta(Q - c_n - \\ &\quad f e_0 - \beta Q + c_r + \lambda f e_0), \\ Y &= \beta c_n + \beta f e_0 - \lambda f e_0 - c_r, \\ Z &= 2h(2\beta - \beta^2 + k) - f^2 e_0^2 (\lambda^2 + 2\beta - \\ &\quad 2\beta\lambda + k), \\ Z' &= 2h(2\beta - 2\beta^2 + k) - f^2 e_0^2 (2\lambda^2 + 2\beta - \\ &\quad 4\beta\lambda + k). \end{aligned}$$

采用逆向求解, 得到最优再制造专利许可费、新产品产量和回收率为

$$\begin{aligned} p_b^{A*} &= \frac{\beta Q - c_r - \lambda f e_0}{2}, \\ q_n^{A*} &= \frac{X}{2(2\beta - \beta^2 + k)}, \\ \tau^{A*} &= \frac{Y}{X}. \end{aligned}$$

由 $q_r = \tau q_n$ 得

$$q_r^{A*} = \frac{Y}{2(2\beta - \beta^2 + k)}.$$

原制造商和再制造商的最优利润分别为

$$\begin{aligned} \Pi_M^{A*} &= \frac{(2\beta + k - \beta^2)(Q - c_n - f e_0)^2 + Y^2}{4(2\beta - \beta^2 + k)}, \\ \Pi_R^{A*} &= \frac{(2\beta + k)Y^2}{8(2\beta + k - \beta^2)^2}. \end{aligned}$$

总的碳排放为

$$E^{A*} = \frac{(X + \lambda Y)e_0}{2(2\beta - \beta^2 + k)}.$$

命题1 碳税对原制造商决策的影响: 1) 新产品产量减少; 2) 再制造专利许可费降低; 3) 原制造商利润减少.

碳税对再制造商决策的影响: 1) 当 $\beta > \lambda + (c_r - \lambda c_n)/Q$ 时, 废旧产品的回收率提高; 2) 当 $\beta > \lambda$ 时, 再制造产品产量增加, 再制造商利润增加.

证明 对原制造商和再制造商的均衡解分别求关于碳税的一阶偏导, 得

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_b^{A*}}{\partial f} &= -\frac{\lambda e_0}{2} < 0, \\ \frac{\partial q_n^{A*}}{\partial f} &= -\frac{e_0(k + 2\beta - \lambda\beta)}{2(2\beta - \beta^2 + k)} < 0, \\ \frac{\partial \Pi_M^{A*}}{\partial f} &= -\frac{e_0(X + \lambda Y)}{2(2\beta - \beta^2 + k)}, \\ \frac{\partial \tau^{A*}}{\partial f} &= \frac{e_0(2\beta - \beta^2 + k)(\beta Q - \lambda Q + \lambda c_n - c_r)}{X^2}, \\ \frac{\partial q_r^{A*}}{\partial f} &= \frac{e_0(\beta - \lambda)}{2(2\beta - \beta^2 + k)}, \\ \frac{\partial \Pi_R^{A*}}{\partial f} &= \frac{e_0(\beta - \lambda)(k + 2\beta)Y}{4(2\beta - \beta^2 + k)^2}. \end{aligned}$$

由 $q_n^{A*} > 0$ 可知

$$X = (k + \beta)(Q - c_n - fe_0) + \beta(Q - c_n - fe_0 - \beta Q + c_r + \lambda fe_0) > 0,$$

因此, $\partial \Pi_M^{A*}/\partial f < 0$. 若 $\partial \tau^{A*}/\partial f > 0$, 则 $\beta > \lambda + (c_r - \lambda c_n)/Q$; 由 $q_r^{A*} > 0$ 可知

$$Y = \beta fe_0 + \beta c_n - c_r - \lambda fe_0 > 0.$$

因此, 碳税对 q_r^{A*} 和 Π_R^{A*} 的影响取决于 β 与 λ 的关系. 当 $\beta > \lambda$ 时, $\partial q_r^{A*}/\partial f > 0$, $\partial \Pi_R^{A*}/\partial f > 0$, 即随着碳税增加, 再制造产品产量增加, 再制造商利润增加; 反之, 当 $\beta < \lambda$ 时, $\partial q_r^{A*}/\partial f < 0$, $\partial \Pi_R^{A*}/\partial f < 0$. \square

命题1表明, 碳税使原制造商收益受损, 因此, 原制造商有减排的需求和动力. 再制造兼具低成本和低排放优势, 因此, 碳税对废旧产品回收和再制造的影响比较复杂. 废旧产品回收率的大小与再制造产品的接受度、再制造产品与新产品碳排放比率以及再制造成本优势密切相关. 当 $\beta > \lambda + (c_r - \lambda c_n)/Q$ 时, 尽管碳税增加了再制造的碳排放成本, 但是, 再制造产品的优势更加明显, 故废旧产品的回收率提高; 当 $\beta < \lambda + (c_r - \lambda c_n)/Q$ 时, 消费者对再制造产品的接受度不高, 且再制造产品的成本优势和减排效果不够明显, 碳排放压力下, 废旧产品的回收率降低.

再制造商的回收决策领先于再制造决策, 与碳税促进回收的边界条件不同, 碳税对再制造的促进/抑制作用取决于 β 与 λ 的关系, 当 $\beta > \lambda$ 时, 碳税对再制造表现为促进作用; 当 $\beta < \lambda$ 时, 碳税对再制造表现为抑制作用. 因此, 碳税政策下, 再制造商的利润不一定减少.

命题2 再制造产品与新产品碳排放比率 λ 对原制造商决策的影响: 随着 λ 增加, 新产品产量增加, 再制造专利许可费降低, 原制造商利润减少. λ 对再制造商决策的影响: 随着 λ 增加, 废旧产品的回收率降低, 再制造产品产量减少, 再制造商利润减少.

证明 对原制造商和再制造商的均衡解分别求关于再制造碳排放比率的一阶偏导, 得

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_b^{A*}}{\partial \lambda} &= -\frac{fe_0}{2} < 0, \\ \frac{\partial q_n^{A*}}{\partial \lambda} &= \frac{\beta fe_0}{2(2\beta - \beta^2 + k)} > 0, \\ \frac{\partial \Pi_M^{A*}}{\partial \lambda} &= -\frac{fe_0(\beta fe_0 + \beta c_n - c_r - \lambda fe_0)}{2(2\beta - \beta^2 + k)}, \\ \frac{\partial \tau^{A*}}{\partial \lambda} &= -\frac{fe_0(2\beta - \beta^2 + k)(Q - c_n - fe_{0r})}{X^2}, \\ \frac{\partial q_r^{A*}}{\partial \lambda} &= -\frac{fe_0}{2(2\beta - \beta^2 + k)} < 0, \\ \frac{\partial \Pi_R^{A*}}{\partial \lambda} &= -\frac{fe_0(k + 2\beta)Y}{4(2\beta - \beta^2 + k)^2}. \end{aligned}$$

由 $q_r^{A*} > 0$ 可知

$$Y = \beta fe_0 + \beta c_n - c_r - \lambda fe_0 > 0.$$

因此, $\partial \Pi_M^{A*}/\partial \lambda < 0$, $\partial \tau^{A*}/\partial \lambda < 0$, $\partial \Pi_R^{A*}/\partial \lambda < 0$. \square

再制造产品的碳排放越高, 相应的碳排放成本越高, 再制造的获利空间越小. 因此, 废旧产品的回收率、再制造产品的产量和再制造商的利润越低. 此外, 碳排放比率也关系到原制造商的收益, 这是因为当再制造产品的碳排放较高时, 为确保再制造商有利可图, 原制造商会收取较低的专利许可费; 相反, 当再制造产品的碳排放较低时, 再制造的碳排放成本较低, 再制造的获利性较强, 原制造商会提高专利许可费以增加自身收益. 可见, 降低再制造产品的碳排放可使原制造商和再制造商同时受益.

2.2 原制造商减排

原制造商投资减排, 双方的博弈过程分为3个阶段: 1) 原制造商确定减排率; 2) 原制造商确定新产品产量和单位再制造产品的专利许可费; 3) 再制造商确定回收率. 双方的利润函数分别为

$$\begin{aligned} \max_{\varepsilon, q_n, p_b} \Pi_M^B &= p_n q_n + p_b q_r - c_n q_n - fe_0 q_n (1 - \varepsilon) - \frac{1}{2} h \varepsilon^2; \\ \text{s.t. } \max_{\tau} \Pi_R^B &= p_r q_r - p_b q_r - c_r q_r - \frac{1}{2} k (\tau q_n)^2 - \lambda fe_0 q_r (1 - \varepsilon). \end{aligned} \quad (4)$$

其中: 式(4)前2项分别为新产品的销售收入和再制造专利许可收入, 后3项分别为生产成本、碳排放成本和碳减排成本; 式(5)第1项为再制造产品的销售收入, 第2、3项分别为专利许可费和生产成本, 第4、

5项分别为回收成本和碳排放成本.

减排后供应链总的碳排放为

$$E^B = e_0(1 - \varepsilon^B)(q_n^B + \lambda q_r^B). \quad (6)$$

采用逆向求解,当 $2h(2\beta - \beta^2 + k) - f^2 e_0^2(\lambda^2 + \beta - 2\beta\lambda + k) > 0$ 时, $\partial^2 \Pi_M^B / \partial \varepsilon^2 < 0$,即存在使原制造商利润最大的减排率.

原制造商的最优减排率为

$$\varepsilon_B^* = \frac{(X + \lambda Y) f e_0}{Z}.$$

最优专利许可费、新产品产量和回收率分别为

$$p_b^{B*} = \frac{2h(2\beta - \beta^2 + k)(\beta Q - c_r - \lambda f e_0)}{2Z} - \frac{f^2 e_0^2(2\beta - \beta\lambda + k)(\beta Q - \lambda Q + \lambda c_n - c_r)}{2Z},$$

$$q_n^{B*} = \frac{2hX + \lambda f^2 e_0^2(\beta Q - \lambda Q + \lambda c_n - c_r)}{2Z},$$

$$\tau^{B*} = \frac{2hY - f^2 e_0^2(\beta Q - \lambda Q + \lambda c_n - c_r)}{2hX + \lambda f^2 e_0^2(\beta Q - \lambda Q + \lambda c_n - c_r)}.$$

最优再制造产品产量为

$$q_r^{B*} = \frac{2hY - f^2 e_0^2(\beta Q - \lambda Q + \lambda c_n - c_r)}{2Z}.$$

原制造商和再制造商的最优利润分别为

$$\Pi_M^{B*} = \frac{2h[(Q - c_n - f e_0)X + (\beta Q - c_r - \lambda f e_0)Y]}{4Z} - \frac{f^2 e_0^2(\beta Q + \lambda c_n - \lambda Q - c_r)^2}{4Z},$$

$$\Pi_R^{B*} = \frac{(k + 2\beta)}{8Z^2} \times \frac{[2hY - f^2 e_0^2(\beta Q - \lambda Q + \lambda c_n - c_r)]^2}{8Z^2}.$$

供应链总的碳排放为

$$E^{B*} = \frac{h e_0(X + \lambda Y)}{Z^2} \times \{2h(2\beta - \beta^2 + k) - f e_0[(k + 2\beta)(Q - c_n) - \beta^2 Q + \beta \lambda c_n + \beta c_r - \lambda c_r]\}.$$

命题3 原制造商减排对其决策的影响:1) 新产品产量增加;2) 再制造专利许可费提高;3) 原制造商利润增加.

证明 对比减排前后制造商的均衡解,有

$$p_b^{B*} - p_b^{A*} = \frac{\lambda f^2 e_0^2(X + \lambda Y)}{2Z},$$

$$q_n^{B*} - q_n^{A*} = \frac{f^2 e_0^2(2\beta - \beta\lambda + k)(X + \lambda Y)}{2(2\beta - \beta^2 + k)Z},$$

$$\Pi_M^{B*} - \Pi_M^{A*} = \frac{f^2 e_0^2(X + \lambda Y)^2}{4(2\beta - \beta^2 + k)Z}.$$

由 $q_n^{A*} > 0$ 得 $X > 0$, 由 $q_r^{A*} > 0$ 得 $Y > 0$. 因此, $p_b^{B*} - p_b^{A*} > 0$, $q_n^{B*} - q_n^{A*} > 0$, $\Pi_M^{B*} - \Pi_M^{A*} > 0$. \square

再制造专利保护下,市场中新产品的数量由原制造商决定,再制造产品的数量由再制造商决定. 原制造商的利润源自新产品的销售收入和再制造专利许

可收入,尽管不能控制再制造产品的数量,但是原制造商可以通过专利许可费调整自身收益. 原制造商投资减排使新产品产量增加;另一方面,原制造商减排所负担的高额成本使其收取的再制造专利许可费提高. 因此,原制造商减排后其利润增加.

命题4 原制造商减排对再制造商决策的影响:1) 当 $\beta > \lambda + (c_r - \lambda c_n)/Q$ 时,废旧产品回收率降低;2) 当 $\beta > \lambda$ 时,再制造产品产量减少;3) 当 $\beta > \lambda$ 时,再制造商利润减少.

证明 对比减排前后再制造商的均衡解,有

$$\tau^{B*} - \tau^{A*} = - (f^2 e_0^2(\beta Q - \lambda Q + \lambda c_n - c_r)(X + \lambda Y)) / \{ [2hX + \lambda f^2 e_0^2(\beta Q - \lambda Q + \lambda c_n - c_r)] X \},$$

若 $\tau^{B*} - \tau^{A*} > 0$, 则 $\beta < \lambda + (c_r - \lambda c_n)/Q$. 有

$$q_r^{B*} - q_r^{A*} = \frac{f^2 e_0^2(\lambda - \beta)(X + \lambda Y)}{2(2\beta - \beta^2 + k)Z}.$$

$$\Pi_R^{B*} - \Pi_R^{A*} = \frac{(\lambda - \beta)(2\beta + k)f^2 e_0^2(X + \lambda Y)}{8(2\beta - \beta^2 + k)^2 Z^2} \times \{ ZY + (2\beta - \beta^2 + k)[2hY - f^2 e_0^2(\beta Q - \lambda Q + \lambda c_n - c_r)] \}.$$

命题2中已证明 $X > 0, Y > 0$. 由 $\partial^2 \Pi_M^B / \partial \varepsilon^2 < 0$ 可知 $Z > 0$. 由 $q_r^{B*} > 0$ 得

$$2hY - f^2 e_0^2(\beta Q - \lambda Q + \lambda c_n - c_r) > 0.$$

因此,碳减排对再制造产品产量和再制造商利润的影响取决于 β 与 λ 的关系. 当 $\beta > \lambda$ 时, $q_r^{B*} < q_r^{A*}$, $\Pi_R^{B*} < \Pi_R^{A*}$, 即原制造商碳减排使再制造产品产量减少,再制造商利润减少;反之,当 $\beta < \lambda$ 时,再制造产品产量增加,再制造商利润增加. \square

由命题1可知,当 $\beta > \lambda + (c_r - \lambda c_n)/Q$ 时,碳税对废旧产品回收有促进作用. 然而,同等条件下,原制造商减排使回收率降低,这是因为原制造商减排使再制造专利许可费提高,单位再制造产品的获利减少,因此,再制造商的回收积极性减弱. 当 $\beta < \lambda + (c_r - \lambda c_n)/Q$ 时,碳税对废旧产品回收有抑制作用,但原制造商减排使再制造产品碳排放成本降低,单位再制造产品的获利增加,再制造商的回收积极性增强.

当 $\beta > \lambda$ 时,碳税对再制造具有促进作用. 然而,同等条件下,原制造商减排使再制造产品数量和再制造商利润减少,即减排对再制造表现为抑制作用. 当 $\beta < \lambda$ 时,若原制造商减排,而再制造采用废旧产品生产,则再制造产品碳排放随之减少,再制造的碳排放成本降低. 因此,再制造产品产量增加,此时,减排对再制造表现为促进作用.

减排对再制造的促进/抑制作用取决于 β 与 λ 的关系: 当 $\beta > \lambda$ 时,减排对再制造表现为抑制作用; 当 $\beta < \lambda$ 时,减排对再制造表现为促进作用. 因此,当原

制造商减排时,再制造商利润不一定增加。

在正向供应链中,上游企业投资减排,会使供应链的整体收益增加,而减排的溢出效应使下游企业收益增加;通常下游企业分担部分减排成本,可以实现供应链的协调。然而,再制造专利保护下,原制造商进行碳减排,再制造商收益不一定增加。因此,简单的成本分担不能实现闭环供应链的协调。

3 集中决策

集中决策下,原制造商和再制造商共同决定减排率、新产品产量以及废旧产品的回收率,使整个供应链系统最优,此时决策问题为

$$\begin{aligned} \max_{\varepsilon, q_n, \tau} \Pi_T^C = & [p_n - c_n - fe_0(1 - \varepsilon)]q_n + \\ & [p_r - c_r - \lambda fe_0(1 - \varepsilon)]q_r - \\ & \frac{1}{2}k(\tau q_n)^2 - \frac{1}{2}h\varepsilon^2. \end{aligned} \quad (7)$$

总的碳排放为

$$E^C = e_0(1 - \varepsilon^C)(q_n^C + \lambda q_r^C). \quad (8)$$

采用逆向求解,当 $2h(2\beta - 2\beta^2 + k) - f^2e_0^2(2\lambda^2 + 2\beta - 4\beta\lambda + k) > 0$ 时, $\partial^2 \Pi_T^C / \partial \varepsilon^2 < 0$,即存在使闭环供应链系统利润最大的减排率。

系统的均衡解为

$$\begin{aligned} \varepsilon^{C*} &= \frac{(X' + 2\lambda Y)fe_0}{Z'}, \\ q_n^{C*} &= \frac{hX' + \lambda f^2e_0^2(\beta Q - \lambda Q + \lambda c_n - c_r)}{Z'}, \\ \tau^{C*} &= \frac{2hY - f^2e_0^2(\beta Q - \lambda Q + \lambda c_n - c_r)}{hX' + \lambda f^2e_0^2(\beta Q - \lambda Q + \lambda c_n - c_r)}. \end{aligned}$$

最优再制造产品产量为

$$q_r^{C*} = \frac{2hY - f^2e_0^2(\beta Q - \lambda Q + \lambda c_n - c_r)}{Z'}.$$

闭环供应链的总利润为

$$\begin{aligned} \Pi_T^{C*} = & \frac{h[(2\beta + k - 2\beta^2)(Q - c_n - fe_0)^2 + 2Y^2]}{2Z'} - \\ & \frac{f^2e_0^2(\beta Q + \lambda c_n - \lambda Q - c_r)^2}{2Z'}. \end{aligned}$$

总的碳排放为

$$\begin{aligned} E^{C*} = & \frac{he_0(X' + 2\lambda Y)}{4Z'^2} \times \{2h(2\beta - 2\beta^2 + k) - \\ & fe_0[k(Q - c_n) + 2(\beta Q - \beta^2 Q + \beta\lambda c_n - \\ & \beta c_n + \beta c_r - \lambda c_r)]\}. \end{aligned}$$

命题5 对比集中决策与分散决策下的均衡解,可以得到集中决策下:1)当 $\beta > \lambda$ 时,最优减排率降低;2)废旧产品回收率提高;3)新产品产量减少,再制造产品产量增加。

证明 对比集中与分散决策的均衡解,有

$$\varepsilon^{C*} - \varepsilon^{B*} = \frac{(\lambda - \beta)(2\beta + k)fe_0}{ZZ'} \times$$

$$\begin{aligned} & [2hY - f^2e_0^2(\beta Q - \lambda Q + \\ & \lambda c_n - c_r)], \\ \tau^{C*} - \tau^{B*} = & \frac{h(2\beta + k)(Q - c_n - fe_0)}{2XX'} \times \\ & [2hY - f^2e_0^2(\beta Q - \lambda Q + \\ & \lambda c_n - c_r)], \\ q_n^{C*} - q_n^{B*} = & -\frac{(2\beta + k)(2\beta h - \lambda f^2e_0^2)}{2ZZ'} \times \\ & [2hY - f^2e_0^2(\beta Q - \lambda Q + \\ & \lambda c_n - c_r)], \\ q_r^{C*} - q_r^{B*} = & \frac{(2\beta + k)(2h - f^2e_0^2)}{2ZZ'} \times \\ & [2hY - f^2e_0^2(\beta Q - \lambda Q + \\ & \lambda c_n - c_r)], \end{aligned}$$

由 $q_r^{B*} > 0$ 得

$$2hY - f^2e_0^2(\beta Q - \lambda Q + \lambda c_n - c_r) > 0.$$

由 $\partial^2 \Pi_T^C / \partial \varepsilon^2 < 0$ 可知 $Z' > 0$ 。因此, $\tau^{C*} > \tau^{B*}$, $q_n^{C*} < q_n^{B*}$, $q_r^{C*} > q_r^{B*}$ 。当 $\beta > \lambda$ 时,有 $\varepsilon^{C*} < \varepsilon^{B*}$ 。□

与分散决策相比,当 $\beta > \lambda$ 时,集中决策下,最优减排率降低,原因是若再制造产品减排效果明显,或再制造产品接受度较高,集中决策下,企业将重点销售再制造产品,新产品产量减少,原制造商面临的碳减排压力减小,所付出的减排努力水平降低;当 $\beta < \lambda$ 时,再制造减排效果不理想,或再制造产品接受度较低,集中决策下,企业将重点销售新产品,新产品产量增加,需要付出更高的减排努力水平。因此,集中决策的减排率高于分散决策。分散决策下,原制造商减排支付了高额的减排成本,为保障自身利益,原制造商会提高专利许可费,这在一定程度上抑制了回收再制造。当双方统一决策时,废旧产品回收率和再制造产品数量均高于分散决策。

命题6 集中决策下,原制造商减排使供应链总利润增加。当 $\beta > \lambda$ 时,减排后总的碳排放降低。

证明 对比集中与分散决策的总利润,有

$$\begin{aligned} \Pi_T^{C*} - \Pi_T^{B*} = & \frac{(2\beta + k)^2(2h - f^2e_0^2)}{8Z^2Z'} \times \\ & [2hY - f^2e_0^2(\beta Q - \lambda Q + \\ & \lambda c_n - c_r)]^2, \end{aligned}$$

对比集中与分散决策的总碳排放,有

$$\begin{aligned} E^{B*} - E^{C*} = & \frac{e_0h(\beta - \lambda)(2\beta + k)}{Z^2Z'^2} \times \\ & [2hY - f^2e_0^2(\beta Q - \lambda Q + \\ & \lambda c_n - c_r)]W, \end{aligned}$$

其中 $W > 0$ 。由 $q_r^{B*} > 0$ 得

$$2hY - f^2e_0^2(\beta Q - \lambda Q + \lambda c_n - c_r) > 0,$$

故 $\Pi_T^{C^*} > \Pi_T^{B^*}$. 当 $\beta > \lambda$ 时, 有 $E^{C^*} < E^{B^*}$. \square

原制造商和再制造商统一决策, 避免了“双重边际效应”, 有利于废旧产品的回收, 增加了供应链整体收益. 当满足碳税促进再制造的条件时 ($\beta > \lambda$), 集中决策具有更好的环境绩效. 因此, 原制造商和再制造商均有动力进行协调决策.

4 协调决策

原制造商减排使其自身利润增加, 但是, 减排导致再制造专利许可费提高, 不利于废旧产品的回收再制造. 因此, 可设计契约进行协调, 具体实施如下: 原制造商提供契约 $(p_b^{D^*}, \varphi)$, 即再制造商以专利许可费 $p_b^{D^*}$ 进行再制造, 同时要分担部分减排成本. 协调后各成员利润应不低于协调前, 即 $\Pi_M^{D^*} \geq \Pi_M^{B^*}, \Pi_R^{D^*} \geq \Pi_R^{B^*}$. 再制造商根据分担比例的多少, 考虑是否接受该契约. 此时, 原制造商和再制造商的利润函数为

$$\max \Pi_M^D = p_n q_n + p_b q_r - c_n q_n - f e_0 q_n (1 - \varepsilon) - \frac{1}{2} (1 - \varphi) h \varepsilon^2; \tag{9}$$

$$\text{s.t. } \max \Pi_R^D = p_r q_r - p_b q_r - c_r q_r - \frac{1}{2} k (\tau q_n)^2 - \lambda f e_0 q_r (1 - \varepsilon) - \frac{1}{2} \varphi h \varepsilon^2. \tag{10}$$

命题7 原制造商提供契约 $(p_b^{D^*}, \varphi), \varphi \in [\varphi_1, \varphi_2]$, 专利保护下的闭环供应链能够实现协调, 其中

$$p_b^{D^*} = \frac{\beta [hX' - \lambda f^2 e_0^2 (\beta Q - \lambda Q + \lambda c_n - c_r)]}{Z'}$$

$$\varphi_1 = (2\beta + k)^2 (2h - f^2 e_0^2) [2hY - f^2 e_0^2 (\beta Q - \lambda Q + \lambda c_n - c_r)]^2 / [2hZ f^2 e_0^2 (X' + 2\lambda Y)^2],$$

$$\varphi_2 = (2\beta + k)^2 (2h - f^2 e_0^2) [2hY - f^2 e_0^2 (\beta Q - \lambda Q + \lambda c_n - c_r)]^2 [2h(3k + 6\beta - 4\beta^2) - f^2 e_0^2 (4\lambda^2 + 6\beta + 3k - 8\beta\lambda)] / [4h f^2 e_0^2 Z \times (X' + 2\lambda Y)^2].$$

证明 由式(10)一阶条件可得

$$\tau^{D^*} = \frac{\beta Q - \beta q_n - \lambda f e_0 + \varepsilon \lambda f e_0 - c_r - p_b}{q_n (2\beta + k)},$$

要使协调决策下闭环供应链的利润与集中决策一致, 需满足 $q_n^{D^*} = q_n^{C^*}, \tau^{D^*} = \tau^{C^*}, \varepsilon^{D^*} = \varepsilon^{C^*}$, 可得

$$p_b^{D^*} = \frac{\beta \{hX' - \lambda f^2 e_0^2 (\beta Q - \lambda Q + \lambda c_n - c_r)\}}{Z'}$$

若要双方均接受此契约, 需满足 $\Pi_M^{D^*} \geq \Pi_M^{B^*}, \Pi_R^{D^*} \geq \Pi_R^{B^*}$. 由 $\Pi_M^{D^*} \geq \Pi_M^{B^*}$ 得

$$\varphi \geq (2\beta + k)^2 (2h - f^2 e_0^2) [2hY - f^2 e_0^2 (\beta Q - \lambda Q + \lambda c_n - c_r)]^2 / [2hZ f^2 e_0^2 (X' + 2\lambda Y)^2].$$

由 $\Pi_R^{D^*} \geq \Pi_R^{B^*}$ 得

$$\varphi \leq (2\beta + k)^2 (2h - f^2 e_0^2) [2hY -$$

$$f^2 e_0^2 (\beta Q - \lambda Q + \lambda c_n -$$

$$c_r)]^2 [2h(3k + 6\beta - 4\beta^2) -$$

$$f^2 e_0^2 (4\lambda^2 + 6\beta + 3k -$$

$$8\beta\lambda)] / [4h f^2 e_0^2 Z (X' + 2\lambda Y)^2]. \square$$

命题7表明, 在专利许可费基础上附加减排成本分担, 即改进的成本分担契约, 可以使原制造商和再制造商的利润增加, 此时, 供应链总利润最大. 随着减排成本分担比例增加, 原制造商获利增加, 而再制造商获利减少, 成本分担比例取决于双方的谈判能力.

命题8 协调决策下, 有: 1) 当 $\beta > \lambda$ 时, 再制造专利许可费低于协调前; 2) 供应链总利润高于协调前, 且与集中决策下供应链总利润相同; 3) 当 $\beta > \lambda$ 时, 总碳排放低于协调前, 且与集中决策下总碳排放相同.

证明 对比协调后再制造专利许可费, 有

$$p_b^{D^*} - p_b^{B^*} = (\lambda - \beta) (2\beta + k) [2hY - f^2 e_0^2 (\beta Q - \lambda Q + \lambda c_n - c_r)] / (2Z Z'),$$

因为 $Z > 0, Z' > 0, 2hY - f^2 e_0^2 (\beta Q - \lambda Q + \lambda c_n - c_r) > 0$, 协调后再制造专利许可费的高低取决于 β 与 λ 的关系. 当 $\beta > \lambda$ 时, $p_b^{D^*} < p_b^{B^*}$. 由 $q_n^{D^*} = q_n^{C^*}, \tau^{D^*} = \tau^{C^*}, \varepsilon^{D^*} = \varepsilon^{C^*}$, 可得 $\Pi_T^{D^*} = \Pi_T^{C^*}, E^{D^*} = E^{C^*}$. 由命题6可知 $\Pi_T^{C^*} > \Pi_T^{B^*}$. 当 $\beta > \lambda$ 时, $E^{C^*} < E^{B^*}, \Pi_T^{D^*} > \Pi_T^{B^*}$; 当 $\beta > \lambda$ 时, 有 $E^{D^*} < E^{B^*}$. \square

当满足碳税促进再制造的条件时 ($\beta > \lambda$), 再制造商分担部分减排成本, 原制造商收取的专利许可费降低. 因此, 再制造商进行回收的积极性增强, 回收率提高, 进而使再制造产品产量增加. 协调后供应链成员利润高于协调前, 供应链总利润达到集中决策下的最优利润.

5 数值仿真

本节结合数值仿真对上文中命题的有效性进行验证, 对参数赋值如下: $Q = 1000, c_n = 600, c_r = 300, \beta = 0.7, \lambda = 0.6, e_0 = 5, k = 10, h = 100\ 000$.

5.1 碳税、碳减排对制造/再制造决策的影响

当 f 在 $[0, 60]$ 取值时, 随着碳税增加, 原制造商的减排率呈先增后减趋势, 如图1所示. 在一定范围内, 碳税能够有效推动企业减排, 但是, 碳税过高会过度牺牲企业的经济利益, 且不能实现良好的环境效益. 在给定数值下, 有 $\beta > \lambda$, 集中决策下企业重点生产再制造产品, 新产品产量减少, 因此需要付出的减排努力水平降低.

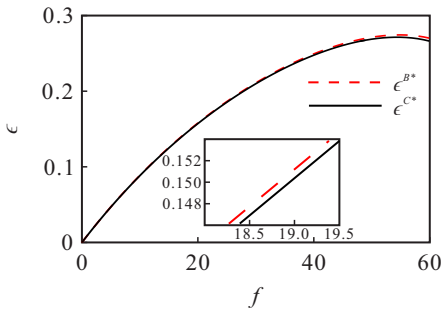


图1 碳税对减排率的影响

随着碳税增加,再制造专利许可费降低,如图2所示.与原制造商不减排相比,减排后专利许可费提高;协调决策下,专利许可费降低.随着碳税增加,废旧产品回收率提高,此处有 $\beta > \lambda + (c_r - \lambda c_n)/Q$,碳税体现为对废旧产品回收的促进作用.然而,减排后废旧产品回收率降低,此时减排体现为对回收的抑制作用.而集中决策下,废旧产品回收率有所提高,如图3所示.

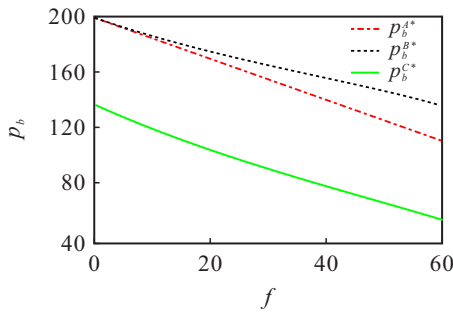


图2 碳税、碳减排对专利许可费的影响

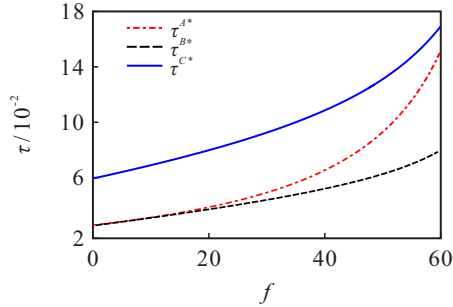


图3 碳税、碳减排对回收率的影响

随着碳税增加,新产品数量减少,减排使新产品数量增加,由于 $\beta > \lambda$,集中决策下,新产品数量减少,如图4所示.随着碳税增加,再制造产品数量增加,碳

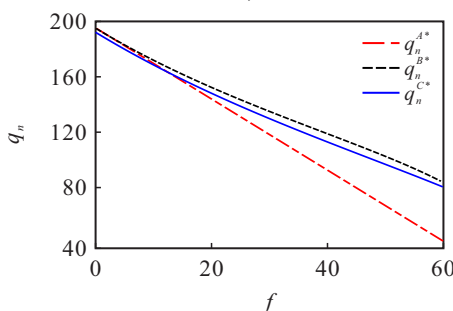


图4 碳税、碳减排对新产品数量的影响

税体现为对再制造的促进作用,减排使再制造产品数量减少.而集中决策下,再制造产品数量增加,如图5所示.

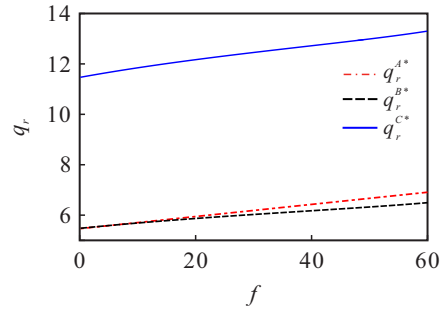


图5 碳税、碳减排对再制造产品数量的影响

碳税、碳减排对原制造商和再制造商利润的影响如图6和图7所示.原制造商利润随着碳税增加而减少,碳减排后,原制造商利润增加.此处 $\beta > \lambda$,再制造商利润随着碳税增加而增加,而原制造商减排后,再制造商利润减少.

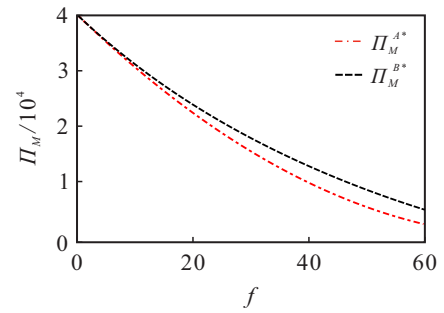


图6 碳税、碳减排对原制造商利润的影响

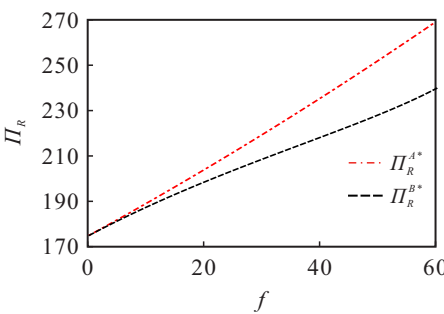


图7 碳税、碳减排对再制造商利润的影响

5.2 再制造产品与新产品碳排放比率对决策的影响

假设 $f = 20$, λ 在 $(0, 1)$ 变化,其他参数赋值同上, λ 对减排率的影响如图8所示.随着 λ 增加,原制造商的减排率提高,可见 λ 关系到原制造商的减排压力.再制造产品碳排放越低,与新产品相比越具竞争力,新产品数量的减少缓解了原制造商的减排压力;反之,再制造产品碳排放越高,其竞争力越弱,新产品产量增加使原制造商减排压力增大.当 $\lambda < 0.7$ 时,有 $\beta > \lambda$,集中决策下,企业重点生产再制造产品,新产品产量减少,面临的碳减排压力减小,所要付出的减排努力水平降低;当 $\lambda > 0.7$ 时, $\beta < \lambda$,集中决策下,企业

重点生产新产品,面临的碳减排压力增大,所要付出的减排努力水平提高。

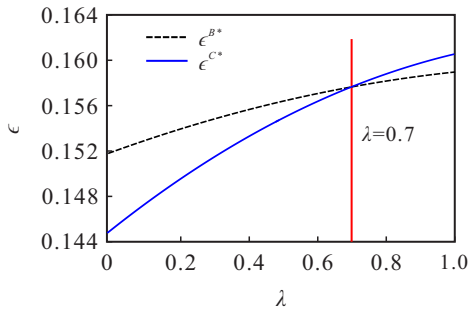


图8 λ 对减排率的影响

λ 对废旧产品回收率的影响如图9所示.随着 λ 增加,再制造产品的碳排放增加,碳排放成本增加使得再制造获利空间减小,回收率降低.此处, $\beta > \lambda + (c_r - \lambda c_n)/Q$,减排后回收率降低.集中决策下,由于再制造产品接受度较高,竞争优势明显,回收率明显提高。

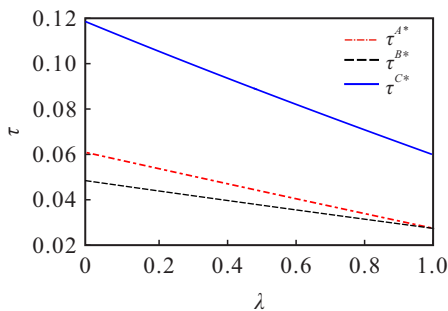


图9 λ 对回收率的影响

λ 对原制造商和再制造商利润的影响如图10和图11所示.原制造商利润随着 λ 增加而减少,减排后,原制造商利润增加.再制造商利润随着 λ 增加而减少。

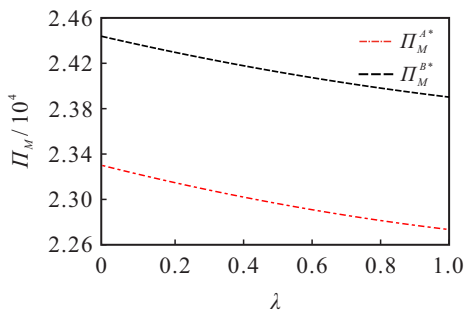


图10 λ 对原制造商利润的影响

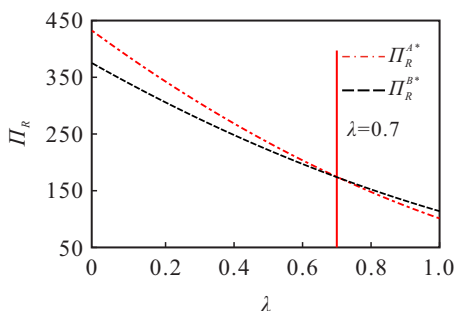


图11 λ 对再制造商利润的影响

少,当 $\lambda < 0.7$ 时,有 $\beta > \lambda$,减排后再制造商利润减少,减排表现为对再制造的抑制作用;当 $\lambda > 0.7$ 时,有 $\beta < \lambda$,减排后再制造商利润增加,减排表现为对再制造的促进作用。

5.3 减排的经济和环境效益

假设 $f = 20$, β 和 λ 在 $(0, 1)$ 取值,其他参数赋值同上,且满足相关约束条件,原制造商减排对闭环供应链总利润的影响如图12所示.可以看出,减排使闭环供应链总利润增加,且集中决策下总利润进一步增加.减排对供应链总碳排放的影响如图13所示.减排使总碳排放降低,当 $\beta > \lambda$ 时,集中决策下,总碳排放进一步降低.可见,当满足碳税促进再制造的条件时,减排能够实现经济绩效和环境绩效同时改善。

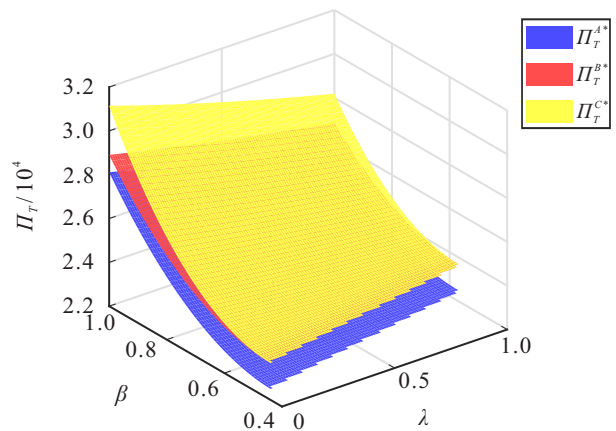


图12 减排对总利润的影响

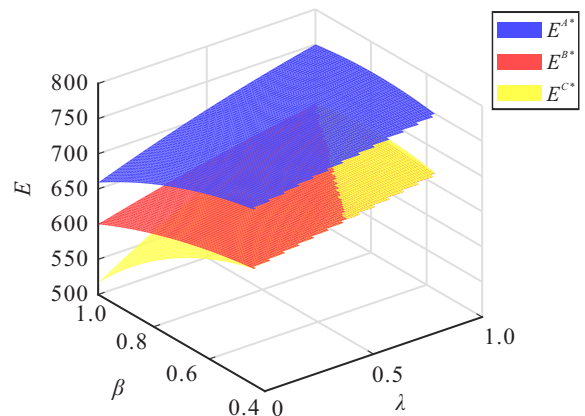


图13 减排对总碳排放的影响

5.4 契约协调

假设 $f = 20$,其他参数赋值同上,可求得成本分担比例 $\varphi_1 = 0.369$, $\varphi_2 = 0.545$,不同决策情形的均衡结果如表2所示.可以看出,协调后再制造专利许可费降低,而废旧产品回收率和再制造产品数量均高于协调前.随着 φ 增大,原制造商利润增加,再制造商利润减少,但均高于分散决策情形.此处有 $\beta > \lambda$,集中决策下总的碳排放量降低,协调决策与集中决策的产量相同,故碳排放也相同.通过契约协调,供应链系统的经济绩效和环境绩效均得到改善。

表2 不同决策情形下原制造商减排的均衡结果

变量	集中决策	分散决策	协调决策			
			$\varphi = 0.38$	$\varphi = 0.42$	$\varphi = 0.46$	$\varphi = 0.50$
p_b	—	174.72	104.44	104.44	104.44	104.44
τ	0.08	0.04	0.08	0.08	0.08	0.08
ε	0.1565	0.1573	0.1565	0.1565	0.1565	0.1565
q_n	149.20	153.74	149.20	149.20	149.20	149.20
q_r	12.33	5.89	12.33	12.33	12.33	12.33
Π_M	—	24062.14	24075.62	24124.67	24173.71	24222.76
Π_R	—	197.46	400.03	350.98	301.94	252.89
Π_T	24475.65	24259.60	24475.65	24475.65	24475.65	24475.65
E	660.37	662.70	660.37	660.37	660.37	660.37

6 结论

本文基于再制造专利保护,考虑政府征收碳税和原制造商减排投资,建立了原制造商和第三方再制造商不同决策情形的博弈模型,通过比较分析,得到以下结论:

1) 碳税使原制造商收益受损,原制造商有减排的需求和动力;减排后,再制造专利许可费提高,原制造商利润增加.此外,再制造产品与新产品的碳排放比率也关系到原制造商的收益.

2) 当再制造产品接受度大于碳排放比率时,碳税对再制造表现为促进作用,而碳减排对再制造表现为抑制作用;反之,碳税对再制造表现为抑制作用,而碳减排对再制造表现为促进作用.原制造商减排使废旧产品回收率降低,再制造商利润不一定增加.

3) 从闭环供应链整体看,减排后总的利润增加,总的碳排放降低;集中决策下,废旧产品回收率和供应链总利润均高于分散决策情形.当满足碳税促进再制造的条件时,集中决策具有更好的环境绩效.

4) 原制造商向再制造商收取适当的专利许可费,再制造商分担一定比例的减排成本,能够实现闭环供应链的协调.

通过对专利保护下闭环供应链的碳减排决策分析,得到以下管理启示:

1) 原制造商减排虽然增加了成本,但长远来看,减排能够实现经济和环境效益双赢,因此,碳税政策下,原制造商应积极减排.此外,再制造产品的接受度和碳排放比率关系到原制造商的减排压力,原制造商也应积极推动再制造产品宣传.

2) 尽管原制造商减排不一定使再制造商利润增加,但是,减排使供应链整体的经济绩效和环境绩效得到改善,而协调决策下,再制造商的收益也能得到改善.再制造产品的接受度和碳排放比率直接关系到再制造商的收益.因此,再制造商一方面应加强环保宣传,提升再制造产品的接受度;另一方面,应不断

改进技术,降低再制造产品的碳排放.

3) 政府征收碳税可以有效推动企业碳减排,但是,碳税过高会过度牺牲企业的经济利益,不利于企业的发展,亦达不到良好的环境效益,因此,政府应设置合理的碳税税率.

本文仅考虑生产阶段的碳排放,并假设回收和再制造业务均由再制造商承担,未来可综合考虑生产和销售阶段的碳排放,研究回收和再制造业务由不同主体承担的闭环供应链碳减排及协调.此外,考虑回收产品的质量差异更具实际意义.

参考文献(References)

- [1] Atasu A, Sarvary M, Wassenhove L N V. Remanufacturing as a marketing strategy[J]. *Management Science*, 2008, 54(10): 1731-1746.
- [2] Karakayali I, Emir-Farinas H, Akcali E. An analysis of decentralized collection and processing of end-of-life products[J]. *Journal of Operations Management*, 2007, 25(6): 1161-1183.
- [3] Liu B Y, 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.
- [4] Isaksson O H D, Simeth M, Seifert R W. Knowledge spillovers in the supply chain: Evidence from the high tech sectors[J]. *Research Policy*, 2016, 45(3): 699-706.
- [5] Ghosh D, Shah J. Supply chain analysis under green sensitive consumer demand and cost sharing contract[J]. *International Journal of Production Economics*, 2015, 164: 319-329.
- [6] Savaskan R C, Bhattacharya S, Wassenhove L N V. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing[J]. *Management Science*, 2004, 50(2): 239-252.
- [7] Ferrer G, Swaminathan J M. Managing new and remanufactured products[J]. *Management Science*, 2006, 52(1): 15-26.
- [8] Ferrer G, Swaminathan J M. Managing new and differentiated remanufactured products[J]. *European*

- Journal of Operational Research, 2010, 203(2): 370-379.
- [9] Örsdemir A, Ziya E K, Parlaktürk A K. Competitive quality choice and remanufacturing[J]. Production and Operations Management, 2014, 23(1): 48-64.
- [10] 易余胤, 袁江. 渠道冲突环境下的闭环供应链协调定价模型[J]. 管理科学学报, 2012, 15(1): 54-65.
(Yi Y Y, Yuan J. Pricing coordination of closed-loop supply chain in channel conflicts environment[J]. Journal of Management Science in China, 2012, 15(1): 54-65.)
- [11] 王文宾, 丁军飞, 达庆利. 奖惩机制下闭环供应链的成本共担-利润共享契约[J]. 控制与决策, 2019, 34(4): 843-850.
(Wang W B, Ding J F, Da Q L. Cost-profit sharing contract for a closed-loop supply chain under reward-penalty mechanism[J]. Control and Decision, 2019, 34(4): 843-850.)
- [12] Panda S, Modak N M, Cárdenas-Barrón L E. Coordinating a socially responsible closed-loop supply chain with product recycling[J]. International Journal of Production Economics, 2017, 188: 11-21.
- [13] 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.
(Xiong Z K, Shen C R, Peng Z Q. Closed-loop supply chain coordination research with remanufacturing under patent protection[J]. Journal of Management Sciences in China, 2011, 14(6): 76-85.)
- [14] Zou Z B, Wang J J, Deng G S, et al. Third-party remanufacturing mode selection: Outsourcing or authorization?[J]. Transportation Research—Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 87: 1-19.
- [15] 刘志, 李帮义, 龚本刚, 等. 再制造商公平关切下闭环供应链生产设计决策与协调[J]. 控制与决策, 2016, 31(9): 1615-1622.
(Liu Z, Li B Y, Gong B G, et al. Production design decision and coordination of closed-loop supply chain considering remanufacturer's fairness concern[J]. Control and Decision, 2016, 31(9): 1615-1622.)
- [16] 易余胤, 阳小栋. 不同专利许可模式下的再制造闭环供应链模型[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(9): 2305-2312.
(Yi Y Y, Yang X D. Remanufacturing closed-loop supply chain model under different patent licensing mode[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(9): 2305-2312.)
- [17] 郑本荣, 杨超, 杨珺. 专利保护下双渠道闭环供应链的定价与协调决策[J]. 系统工程学报, 2017, 32(1): 103-113.
(Zheng B R, Yang C, Yang J. Pricing and coordination strategy of dual-channel closed-loop supply chain under patent protection[J]. Journal of Systems Engineering, 2017, 32(1): 103-113.)
- [18] 孙浩, 叶俊, 胡劲松, 等. 不同决策模式下制造商与再制造商的博弈策略研究[J]. 中国管理科学, 2017, 25(1): 160-169.
(Sun H, Ye J, Hu J S, et al. Research on the game strategies for the OEM and the remanufacturer under different decision structures[J]. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(1): 160-169.)
- [19] 赵俊杰, 汪传旭, 徐朗. 专利保护下基于第三方回收的再制造决策[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(10): 2631-2642.
(Zhao J J, Wang C X, Xu L. Remanufacturing decisions research based on third-party recycling under patent licensing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(10): 2631-2642.)
- [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] Chang X Y, Xia H Y, Zhu H Y, et al. Production decisions in a hybrid manufacturing-remanufacturing system with carbon cap and trade mechanism[J]. International Journal of Production Economics, 2015, 162: 160-173.
- [22] Chai Q F, Xiao Z D, Lai K H, et al. Can carbon cap and trade mechanism be beneficial for remanufacturing?[J]. International Journal of Production Economics, 2018, 203: 311-321.
- [23] Wang Q P, Zhao D Z, He L F. Contracting emission reduction for supply chains considering market low-carbon preference[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 120: 72-84.
- [24] 赵道致, 徐春秋, 王芹鹏. 考虑零售商竞争的联合减排与低碳宣传微分对策[J]. 控制与决策, 2014, 29(10): 1809-1815.
(Zhao D Z, Xu C Q, Wang Q P. Differential strategies of joint emission reductions and low-carbon promotion considering competing retailers[J]. Control and Decision, 2014, 29(10): 1809-1815.)
- [25] Xu L, Wang C X. Sustainable manufacturing in a closed-loop supply chain considering emission reduction and remanufacturing[J]. Resources Conservation and Recycling, 2018, 131: 297-304.

作者简介

王娜(1987—), 女, 讲师, 博士生, 从事闭环供应链管理、再制造运作管理等研究, E-mail: xywn2005@163.com;
张玉林(1964—), 男, 教授, 博士, 从事收益管理、供应链管理研究, E-mail: zhangyl@seu.edu.cn.

(责任编辑: 魏冰)