

基于碳排放的闭环供应链政府奖惩机制研究

李新军^{1,2} 陈美娜¹

¹(烟台大学经济管理学院,烟台 264005) ²(大连理工大学管理与经济学部,大连 116024)

〔摘要〕温室气体的排放问题已成为国际社会亟待解决的问题,解决这一问题的必由之路就是通过降低产品碳排放量实现从源头上减排。本文研究由一个制造商和一个零售商组成的逆向供应链系统,建立了政府实施回收奖惩机制的动态博弈模型,比较分析了有无政府回收奖惩机制两种情形下零售商的回收比例、供应链参与方的期望利润和产品的碳排放总量。研究表明,政府回收奖惩机制提高了回收比例和碳减排水平;当再制造减排程度较小时,政府回收奖惩机制降低了碳排放总量;基于消费者低碳偏好的政府回收奖惩机制提高了制造商和零售商的利润,更大程度的降低了产品总碳排放量;政府回收奖惩机制下较小的目标回收率能够最大化零售商利润。

〔关键词〕奖惩机制 闭环供应链 碳排放 消费者低碳偏好 回收政策 政府干预

DOI: 10.3969/j.issn.1004-910X.2017.12.006

〔中图分类号〕F274 〔文献标识码〕A

引言

“十三五”计划预测中国煤炭石油碳排放总量将达到4.09亿吨,近似是2015年碳排放总量的4倍,限制全国碳排放量是阻止温室气体产生的根本途径。降低产品碳排放总量,积极应对气候变化,这既是我国实现低碳可持续发展的内在需求,也是作为一个大国应该承担的责任。我国政府通过回收奖惩机制来影响碳排放策略和回收策略,并将结果与无政府干预情况进行比较,分析政府回收奖惩机制对闭环供应链碳排放总量的影响。

近年来,诸多学者研究了制造企业减排问题。Ding等^[1]致力于寻求可持续发展下的最优价格策略,并探索了企业行为和环境政策激励之间的关系。Xu等^[2]针对可持续绿色供应链问题建立了两阶段Stackelberg博弈模型,分析了在限额与贸易管制下可持续发展供应链参与方的决策行为和协调机制。Laroche等^[3]的研究表明,随着消费者低碳偏好的增强,越来越多的消费者愿意为低碳产品支付相对较高的价格。Plambeck^[4]通过实

证研究表明,企业自愿向消费者披露产品的环境信息,如产品碳排放总量信息,可以增加消费者对企业的信任度。Benjaafar等^[5]探究了在不同程度的碳排放限制下,供应链参与方联合减排对其经营成本和碳排放总量的影响,并且提出促进供应链参与方合作减排的相关策略以及库存相关决策对于碳排放总量的影响。周艳菊等^[6]以扩大产品需求为目标,建立了基于减排成本分担契约的Stackelberg模型,对供应链参与方的决策策略、消费者的低碳认知与参与方决策之间的关系进行了研究。

国内外有很多学者致力于逆向供应链的研究。Miao等^[7]设计了在以旧换新政策下的三种回收模式,即集中式回收、制造商负责回收和零售商负责回收,并分析了三种回收模式下最优回收策略和供应链最优利润。Chen等^[8]将碳排放作为限制条件引入到EOQ模型中,设计出最优化的EOQ模型。Savaskan等^[9]与Bandyopadhyay^[10]分别研究了零售商之间和制造商之间存在竞争时,产品的回收再制造策略的选择问题。王文宾和达庆利^[11]

收稿日期:2017-07-16

基金项目:教育部人文社科基金规划项目“基于供应中断的供应链协调机制研究”(项目编号:17YJA630046);国家社科基金项目“基于供应商产能的供应应急策略与设计研究”(项目编号:12CGL042);国家自然科学基金项目“以DC为中枢的农产品冷链库存策略与多温共配优化研究”(项目编号:71372122);国家自然科学基金项目“交易契约视角下基于平台运作的创新授权优化研究”(项目编号:71402158)。

作者简介:李新军,烟台大学经济管理学院副教授,大连理工大学管理与经济学部博士后。研究方向:闭环供应链管理、运作管理。陈美娜,烟台大学经济管理学院硕士研究生。研究方向:闭环供应链、低碳经济。

以及聂佳佳^[12]等都探讨过政府的奖惩机制对产品再制造以及闭环供应链的影响。王文宾和达庆利^[13]讨论了两种奖惩机制——基于回收率和回收量，讨论了两种机制的适用条件。

碳排放约束下的逆向供应链也是研究的热点之一。聂佳佳等^[14]探索在碳排放约束下零售商负责回收的闭环供应链，在有无碳排放约束两种情况下分析了供应链参与方利润、零售商回收比例、产品碳排放总量及其单位碳排放量的变化。王文宾等^[15]主要探讨了碳排放约束下制造商竞争的逆向供应链奖惩机制，建立了5个决策模型，并得出竞争促进回收、回收的制造商单位碳排放量减少、政府的奖惩机制是必要的等结论。Seuring和Mullre^[16]、Testa和Iraldo^[17]和Kumar等^[18]探讨了绿色供应链管理是由政府机制、消费者需求和其他利益相关者的需求控制的。Yang等^[19]从横向和竖直方向探讨了由一个制造商和一个零售商组成的两个竞争性供应链方案的价格和碳减排决策。结果表明，垂直合作导致更高碳减排率和零售价格下降；零售商提供的收入分成合同可以有效地促使厂商放弃横向合作，帮助零售商和制造商实现双赢，且环境减排率较高。Wang^[20]等考虑供应链企业经营与政府政策的关系。在分散供应链中运用三阶段Stackelberg博弈模型，在集中供应链中运用两阶段Stackelberg博弈模型探索政府碳排放税政策，结果表明集中供应链对企业和政府而言比分散供应链更为有利。

现有的文献研究多数将碳排放作为单一的限制条件去分析生产决策、定价决策和企业利润，较少文献从政府干预回收角度研究企业产品总碳排放量的情况。在市场的低碳压力下，政府的回收政策如何设计才能最大限度减少碳排放总量？

激励供应链参与方致力于减排工作？在消费者低碳偏好视角下，以回收率、碳排放水平、回收奖惩力度等为决策变量，建立了有无政府回收奖惩机制情况下的博弈模型，得出政府在市场低碳压力下，应该如何灵活协调自己的回收政策，使得产品碳排放总量减少的最多，供应链参与方在减排方面做出的努力最大。

1 模型描述与基本假设

由一个制造商和一个零售商组成的逆向供应链系统中（如图1），制造商为领导者，零售商为追随者，碳排放来自制造商的制造过程，并且制造商已经采取了减排措施。零售商回收废旧产品、零件，再以价格 ω 销售给制造商并获得相应的报酬；制造商用原材料生产新的产品，同时也可以使用零售商回收的部分零件、废旧产品进行再制造。制造商将新产品以价格 ω 出售给零售商，零售商再以价格 p 出售给市场中的消费者，零售商负责以回收率 τ 从消费者手里回收废旧产品。为了激励零售商积极的进行回收，政府设定了基准回收目标 τ_0 ，若零售商的回收比例高于此基准，政府将奖励零售商，否则，给予相应的惩罚（奖惩力度 b 一样）。模型中考虑了两种情形：（1）没有政府干预的情形，记为模式O；（2）政府回收奖惩机制下的情形，记为模式G。

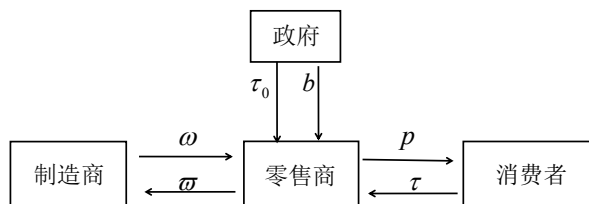


图1 闭环供应链政府回收奖惩机制模型

1.1 符号和变量

如表1所示。

表1

参数/符号	说明
c_m	制造商采用原材料生产新产品的单位成本
p	产品的市场售价、外生变量，由市场均衡决定
Δ	制造商采用原材料生产产品与采用回收旧产品进行再制造生产的单位成本之差。设 c_r 为制造商的再制造生产成本，即 $\Delta = c_m - c_r$
ω	制造商给定的批发价格
ϖ	零售商每回收一单位的废旧产品所获得的单位价格

续 表

参数 / 符号	说明
$D(\theta)$	$D(\theta)$ 为市场需求函数, 具有碳排放敏感性, 受消费者低碳偏好水平的影响, 即 $D(\theta) = D_0 + \beta\theta$, D_0 表示不减排是受价格影响的产品需求; β 表示消费者的低碳偏好水平
e_0	在单周期中使用原材料生产单位产品产生的平均碳排放量
t	再制造的单位产品产生的平均碳排放量同原产品平均碳排放量的比值, $t \in [0,1]$, t 越大表示产品回收再制造对减少碳排放量的作用越小。再制造单位产品产生的平均碳排放量为 te_0
τ_0	回收率下限, 奖惩额度 $h(\tau)$ 是回收率的函数, $h(\tau) = b(\tau - \tau_0)$, $b > 0$
b	表示政府的单位奖惩力度, $b > 0$
e^j	模式 j 下单位产品在生命周期内的平均碳排放量, $j = O, G$ 分别表示有无政府介入两种情形, 有 $e^j = e_0(1 - \tau^j + t\tau^j)$
E^j	模式 j 下全部产品在生命周期内的碳排放总量, $j = O, G$ 分别表示有无政府介入两种情形, 有 $E^j = D(\theta) \cdot e^j$
π_i^j	模式 j 时 i 的利润函数, 其中 $i = M, R$ 分别表示制造商和零售商, $j = O, G$ 分别表示无政府介入和有政府介入
决策变量	说明
θ	单位产品的碳排放减少量
τ	废旧产品的回收率, 零售商的决策变量, $\tau \in [0,1]$, τ 值越大说明零售商回收努力程度越大

1.2 模型假设

(1) 两级供应链模型中, 制造商和零售商的决策过程构成一个单周期 Stackelberg 博弈, 其中制造商为领导者, 零售商为跟随者, 制造商制定最佳的碳减排水平, 而零售商的最优订货量和回收策略受其限制, 进而影响着整个供应链的碳排放量。

(2) 制造商再制造过程中使用原材料生产的单位成本大于使用废旧原料生产的单位成本, 即 $c_m > c_r$, 这说明制造商进行再制造是可以获利的。假设 $\Delta > \omega$, 表示制造商获得的单位利润大于零售商靠回收从制造商获得的单位利润。

(3) 零售商回收废旧产品的固定成本为 I , 假设 $I = m\tau^2$, m 为回收活动的成本系数。由此可以看出, 零售商的回收成本是回收率的凸函数, 这说明加大回收力度是需要支付相应的回收成本的, 因此, 选择一个合适的回收比例是至关重要的。

(4) 假设单位碳减排量即供应链的碳减排水平 θ 与减排成本 $c(\theta)$ 之间满足 $c(\theta) = \frac{1}{2}k\theta^2$, $k(k > 0)$ 为减排成本系数。

(5) 供应链中制造商和零售商之间信息完全对称, 市场信息和碳排放信息在供应链中是完全透明的。另外为了简化模型, 不考虑其他额外的各种附加成本。

2 基于政府回收奖惩机制的闭环供应链运作性能分析

2.1 政府不干预情形

零售商自愿回收再制造废旧产品, 并从制造商那里获得一定的报酬。零售商的回收比例完全靠自己调节, 没有政府规章制度的限制和约束。制造商和零售商的利润函数分别为:

$$\begin{aligned} \Pi_M^O(\theta) &= [w - c_m + \tau(\Delta - \omega)](D_0 + \beta\theta) - \frac{1}{2}k\theta^2 \\ \Pi_R^O(\tau) &= (p - w + \tau\omega)(D_0 + \beta\theta) - m\tau^2 \end{aligned} \quad (1)$$

通过逆向归纳法求解, 可以得到在无政府介入情形下制造商和零售商的最优决策为:

$$\begin{aligned} \omega^o &= \frac{\omega\beta D_0(\Delta - \omega) + mB}{A} \\ \tau^o &= \frac{\omega C}{2A} \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $A = mk - (\Delta - \omega)\omega\beta^2$, $B = \beta(\omega - c_m)$, $C = kD_0 + B\beta$, $D = \beta^2(\Delta - \omega)$, 由假设可知 $B > 0$, $C > 0$, $D > 0$ 。

将上述结果带入式(1)可以得到无政府干预情形下制造商和零售商的最优利润分别为:

$$\begin{aligned} \Pi_M^O &= \frac{2ABCm\beta + mC^2\omega D - k(\omega D_0 D + mB\beta)^2}{2A^2\beta^2} \\ \Pi_R^O &= \frac{mC(p - \omega)}{A} + \frac{\omega^2 mC^2}{4A^2} \end{aligned} \quad (3)$$

制造商产生的碳排放总量和平均单位碳排放量分别为:

$$E^O = \frac{e_0 m C [2A - (1-t)\omega C]}{2A^2}$$

$$e^o = \frac{e_0[2A - (1-t)\omega C]}{2A} \quad (4)$$

2.2 政府奖惩情形

政府对零售商回收率下限做出规定,当零售商回收率高于这一下限值,政府给予其一定奖励,反之,对零售商进行相应惩罚。政府根据零售商实际回收率和目标回收率之间的差额给予奖惩措施。制造商和零售商的决策模型为:

$$\Pi_M^G = [w - c_m + \tau(\Delta - \omega)](D_0 + \beta\theta) - \frac{1}{2}k\theta^2$$

$$\Pi_M^G = \frac{\{4mA\beta + D[2m\omega C + b(mk + A)]\}(2mC + bD) - km(2\omega DD_0 + 2m\beta\beta + bD)^2}{8mA^2\beta^2}$$

$$\Pi_R^G = \frac{8mA(p - \omega)(2mC + bD) + 4m^2\omega^2 C^2 + 4mCD\omega^2 b + b^2(mk + A)(2D\omega + 3A - mk) + 8Am\omega Cb - 16mA^2\tau_0 b}{16mA^2} \quad (7)$$

制造商的总碳排放量和每单位产品的平均碳排放量分别为:

$$E^G = \frac{e_0\{4mA - (1-t)[2m\omega C + b(mk + A)]\}(2mC + bD)}{8mA^2}$$

$$e^G = \frac{e_0\{4mA - (1-t)[2m\omega C + b(mk + A)]\}}{4mA} \quad (8)$$

从最优的决策变量和利润函数中我们可以看出,只有 $A > 0$ 才是符合实际情况的,即:

$$mk - (\Delta - \omega)\omega\beta^2 > 0。本文必须满足 0 \le \tau^o \le 1, 0 \le \tau^G \le 1, 即 0 < b \le \frac{4mA - 2mC\omega}{A + mk}。$$

3 政府回收奖惩机制设计与分析

上一节主要分析了两种闭环供应链的基本模型和各决策变量,本节将对分析政府回收奖惩机制对闭环供应链总碳排放量的影响和如何调节机制使得碳减排水平最大,以及政府制定回收奖惩机制和目标回收率的依据。

定理1: (1) $\tau^G > \tau^o$, 当回收成本系数 m 减少时, $\tau^G - \tau^o$ 是增加的。

$\theta^G > \theta^o$, 当减排成本系数 k 减少 $\theta^G - \theta^o$ 是增加的。

证明: 由 $\tau^G - \tau^o = \frac{b(A + mk)}{4mA}$, $\theta^G - \theta^o = \frac{b\beta(\Delta - \omega)}{2A}$ 易得证。

由此可见,政府回收奖惩机制对零售商的回收具有正向激励作用,与无政府干预情形相比,政府回收机制会促使零售商更踊跃进行回收活

$$(2) E^o - E^G = \frac{e_0[(1-t)D(mk + A)b^2 + 2mC(1-t)(mk + A)b + 2Dm\omega C(1-t)b - 4mADb]}{8mA^2} \quad (9)$$

可以看出式(9)是关于奖惩力度 b 的开口向上的二次函数,令式(9)的结果为零,可以得到

$$\Pi_R^G = (p - w + \omega)(D_0 + \beta\theta) + b(\tau - \tau_0) - m\tau^2 \quad (5)$$

由逆向归纳方法,政府回收奖惩机制下,制造商和零售商的最优决策为:

$$\theta^G = \frac{2(\Delta - \omega)\omega\beta D_0 + 2m\beta + b\beta(\Delta - \omega)}{2A}$$

$$\tau^G = \frac{2m\omega C + b(mk + A)}{4mA}$$

$$D(\theta)^G = \frac{2mC + bD}{2A} \quad (6)$$

制造商和零售商的最优利润分别为:

动;政府回收奖惩机制对制造商碳排放水平的提高具有促进作用,这是因为政府的干预提高了回收率,进而减少了制造商制造过程中碳的排放,市场需求是碳排放水平的线性增函数,所以相应的也增加了产品的市场需求量;制造企业制定的减排成本系数较小时,政府对回收活动的干预促使制造商增加低碳产品的投入和生产,进而提高了碳减排水平,即逆向供应链的政府回收奖惩机制不仅提高了零售商的回收率,而且也提高了制造商的碳减排水平。定理1表明政府的干预达到了双重环保效应,废旧产品的回收提高了资源利用率。

定理2: (1) 政府回收奖惩机制减少了产品的平均单位碳排放量,当再制造减排系数 t 较小时,再制造创造的环境效益较高,即政府回收奖惩机制给供应链带来了额外利润。

当 $b_1 > 0$ 且 $b_1 < b < b_2$ 时,政府回收奖惩机制能够有效的减少供应链产品总碳排放量;反之($b_2 < b_1$),政府回收干预增加了产品总碳排放量;当 $b_1 < 0$ 时,政府回收奖惩机制系数 b 越大越有利于减少总碳排放量。

考虑消费者低碳偏好时,存在政府回收奖惩机制情况下产品总碳排量减少的更多。

$$\text{证明: (1) } e^G - e^o = \frac{-e_0(1-t)b(mk + A)}{4Am} < 0$$

两个解 $b_0 = 0$, $b_1 = \frac{4mA}{(1-t)(mk + A)} - \frac{2m\omega C}{mk + A} - \frac{2mC}{D}$ 。当 $t > 1 - \frac{2AD}{\omega CD + C(A + mk)}$ 时, $b_1 > 0$, 又因为 $0 < b \leq \frac{4mA - 2mC\omega}{A + mk}$

$$\text{令 } b_2 = \frac{4mA - 2mC\omega}{A + mk}$$

①当 $b_2 \geq b_1$ 时, 即

$$1 - \frac{2AD}{\omega CD + C(A + mk)} < t \leq 1 - \frac{2AD}{2AD + C(A + mk)}$$

取 $b_1 < b < b_2$, 此时得出, $E^G < E^O$, 反之 $b_1 < b_2$, 则

$$\frac{\partial(E^O - E^G)}{\partial\beta^2} = \frac{2(1-t)(\Delta - \omega)b^2mk^2 + 4m(1-t)bk(\omega - c_m)(\Delta - \omega)\omega\beta^2 + 8m(1-t)bk^2(\omega - c_m)(\Delta - \omega)D_0 + 4(\omega - c_m)(\Delta - \omega)^2(1-t)b\omega^2\beta^4 + 4m^2(1-t)bk^2(\omega - c_m) - 4m^2bk^2(\Delta - \omega)}{8A^3}$$

易得 $\frac{\partial(E^O - E^G)}{\partial\beta^2} > 0$, 得证。

定理2给出了碳排放总量随两个重要参数的变化趋势。分析了在考虑政府干预前后制造商产品的碳排放情况。可以看出, 政府干预后, 产品平均单位碳排放量降低了; 在适当范围内的政府回收奖惩机制下, 全部产品碳排放总量减少了, 针对不同范围内的制造商再制造减排系数(t), 即再制造创造的环境效益, 政府应该采取灵活奖惩措施, 以达到全部产品碳总排放量的最低, 从根本上减少温室气体的排放, 同时又提高了废旧产品回收率。

消费者低碳偏好水平可以促进碳减排, 制造商的碳减排成本就会提高, 政府回收奖惩机制激励零售商的回收, 间接降低制造商的原材料成本, 增加制造商利润。相反, 无政府约束时, 制造商

$$\Pi_R^G - \Pi_R^O = \frac{8mA(p - \omega)bD + 4mCD\omega^2b + b^2(mk + A)(D\omega + 2A) + 8Am\omega Cb - 16mA^2\tau_0b}{16mA^2} \quad (10)$$

$$\text{令式(10)为零, 得 } b_0 = 0, b_3 = \frac{16mA^2\tau_0 - 8Am\omega C - 4mCD\omega^2 - 8mA(p - \omega)D}{(mk + A)(D\omega + 2A)}$$

①当 $\tau_0 > \frac{8Am\omega C + 4mCD\omega^2 + 8mA(p - \omega)D}{16mA^2}$ 时, $b_3 > 0$ 当 $b_2 \geq b_3$ 时, 即:

$$\frac{8Am\omega C + 4mCD\omega^2 + 8mA(p - \omega)D}{16mA^2} < \tau_0 \leq \frac{1}{2} + \frac{\omega(C + D)}{4A} + \frac{(p - \omega)D}{2A} + \frac{\omega^2CD}{8A^2}, \text{ 有 } b_3 < b < b_2, \text{ 此时可以}$$

得到 $\Pi_R^G > \Pi_R^O$; 有 $b_0 < b < b_3$ 时, $\Pi_R^G < \Pi_R^O$; 当 $\frac{1}{2} + \frac{\omega(C + D)}{4A} + \frac{(p - \omega)D}{2A} + \frac{\omega^2CD}{8A^2} < \tau_0 < 1$ 时, 即 $b_2 < b_3$ 时, 有 $\Pi_R^G < \Pi_R^O$ 。

②当 $0 < \tau_0 < \frac{8Am\omega C + 4mCD\omega^2 + 8mA(p - \omega)D}{16mA^2}$, $b_3 < 0$, 由于 $b > 0$, 即此时 $\Pi_R^G > \Pi_R^O$ 是政府奖惩机制

系数 ($b > 0$) 的严格增函数。

(2) 式(10)对 β^2 求导

$$\frac{\partial(\Pi_R^G - \Pi_R^O)}{\partial\beta^2} = \frac{8m^2b(p - \omega)k(\Delta - \omega)A + 4m^2k^2(\Delta - \omega)\omega b^2 + 8m^3\omega bk^2(\omega - c_m) - 2(\Delta - \omega)^2\omega^2mkb^2\beta^2}{16mA^3} > 0$$

即 $\Pi_R^G - \Pi_R^O$ 是 β^2 的增函数。

定理3分析了政府回收奖惩机制系数(b)变化

$E^G > E^O$ 。

②当 $t < 1 - \frac{2AD}{\omega CD + C(A + mk)}$ 时, $b_1 < 0$, 因为 $b > 0$,

此时 $E^O - E^G$ 是关于 b 的严格增函数, 即政府奖惩机制系数 b 越大越有利于减少总碳排放量。

(3) 式(9)对 β^2 求导数。

可能会降低减排积极性。结合定理1可知, 此时政府也同时达到了促进废旧产品回收的目的, 零售商的回收程度也较高; 此外, 在一定范围内的政府回收奖惩机制约束下, 适量消费者偏好水平可以让政府干预达到碳减排最优化, 发挥政府促进碳减排的最大效用。

定理3: (1) 当 $b_3 > 0$ 且 $b_3 < b < b_2$ 时, 政府干预情形下零售商最优利润值大于无政府干预情形下最优利润值; 当 $b_2 < b_3$ 时, 政府干预情形下零售商最优利润值小于无政府介入情形下最优利润值; 当 $b_3 < 0$ 时, 政府回收奖惩机制系数越大越能够增加零售商利润。

(2) 当消费者低碳意识增强时, 政府回收奖惩机制下零售商利润值增长的更快。

证明: (1) 将两种情况下的零售商的最优利润做差比较, 有:

对零售商利润的影响, 政府目标回收率和回收奖惩机制需相互协调、动态平衡, 盲目制定目标回

收率和回收奖惩机制不是明智之举。政府需综合考虑供应链参与方利润来进行决策,发挥其回收奖惩机制的最大效用。结果表明:(1)政府制定合适的目标回收率使得零售商的利润值增加,有利于激励零售商回收,反之,政府如果制定过高的目标回收率,致使零售商利润小于无政府干预时利润值,会严重打击零售商的回收积极性;(2)政府制定的回收奖惩机制系数较大时,零售商利润高于无政府干预时利润值;相反,较小的政府回收奖惩机制系数致使零售商利润值小于无政府参与利润值,此时,零售商回收积极性严重下降,造成资源的浪费,不利于环境保护。政

府需合理制定目标回收率和奖惩机制系数 b , 以实现经济利益和社会利益的共赢。

消费者低碳意识的增强更加促进零售商利润增加,这是因为消费者愿意为低碳产品支付更高的价格,减少产品总碳排放量的同时也增加了零售商利润。

定理4:(1)制造商利润与政府回收奖惩力度成正相关关系。

(2)制造商的利润差 $(\Pi_M^G - \Pi_M^O)$ 随减排系数的增加而减少。

证明:(1)将两种情况下的制造商的最优利润做差比较分析

$$\Pi_M^G - \Pi_M^O = \frac{AD^2b^2 + 4mBDA\beta b + 2mCD(mk + A)b + 2m\omega CD^2b - (4mD^2k\omega D_0 + 4m^2BD\beta k)b}{8m^4\beta^2} \quad (11)$$

将式(11)对奖惩机制系数 b 求导得:

$$\frac{\partial(\Pi_M^G - \Pi_M^O)}{\partial b} = \frac{bD^2 + 4mBD\beta + 4mDD_0k}{8m^4\beta^2}$$

易得当 $b > 0$ 时,上式的导数为正,即

$\Pi_M^G - \Pi_M^O$ 是奖惩力度 b 的增函数。

(3)将式(11)对减排系数 k 求导可得:

$$\frac{\partial(\Pi_M^G - \Pi_M^O)}{\partial k} = \frac{-D^2b^2mk - 8mD^2D_0\omega bk - 4m^2DBb\beta k + 4D^3\omega^2D_0b + 4mB\beta D^2\omega b + D^3b^2\omega}{8A^3\beta^2}$$

$$-D^2b^2mk - 8mD^2D_0\omega bk - 4m^2DBb\beta k + 4D^3\omega^2D_0b + 4mB\beta D^2\omega b < 0,$$

即 $\frac{\partial(\Pi_M^G - \Pi_M^O)}{\partial k} < 0$ 成立。

定理4分析了政府回收奖惩机制对制造商利润的影响。结果表明,政府制定回收奖惩机制对制造商利润具有积极正向作用,政府干预情形下制造商利润值高于无政府参与情形下的利润值。虽然政府回收奖惩机制的直接对象是零售商,但通过奖惩机制可以间接影响到上游的制造商,回收奖惩机制系数能够间接提高制造商利润。

制造商不能够随心所欲的制定企业的碳减排系数,应从制造商、零售商和整个供应链的利润角度出发,需考虑多方面的因素,配合政府的相应政策。结果显示当减排系数较小时,制造商的利润上升的较快,对于制造商来说,较小的减排系数可以降低制造商的减排成本,增加碳减排技术的投资,降低产品碳排放量。但是较小减排成本系数也可能导致较小的碳排放,所以制造商的减排系数应与政府的碳减排政策相互配合,这样才能实现利润和碳减排的双赢。

4 算例分析

参数设定为 $D_0 = 100, \omega = 60, p = 100, c_m = 50, e_0 = 10, \Delta = 10, \tau = 5, m = 300$ 。

4.1 政府回收奖惩机制系数变化的影响分析 ($k=1, \tau_0=0.5, \beta=0.1$)

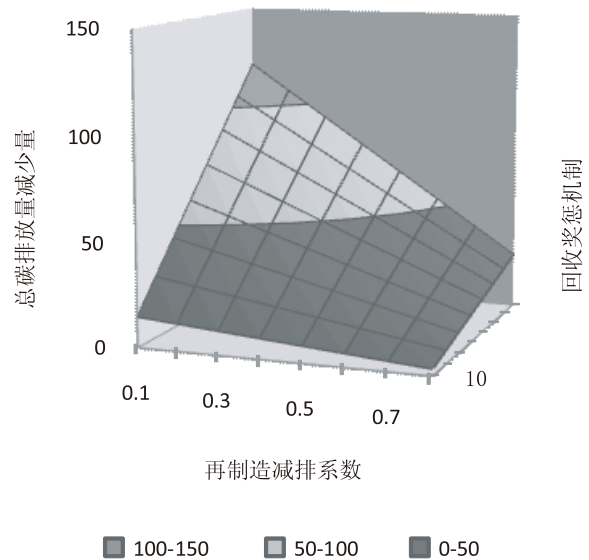


图2 回收奖惩机制和再制造减排系数对总碳排放量减少量的影响

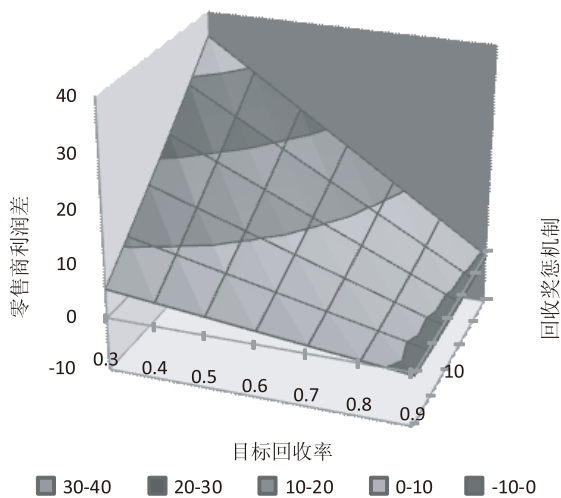


图3 回收奖惩力度与回收目标率对零售商利润的影响

由图2可知,政府回收奖惩机制系数和企业再制造减排系数是相互制约的。再制造创造的环境效益越小(t 越接近1),政府越应该采取较高的奖惩机制系数,才能最大化减少产品总碳排放量,否则越小的奖惩机制系数越有可能导致总碳排放量的增加;当政府给定奖惩机制系数,制造商可以通过投资再制造碳减排技术,降低再制造碳减排系数以达到总产品碳减排减少量的最优值;对于我国大多企业来说,政府的回收奖惩机制都会促进产品碳减排,只是不同强度的奖惩机制针对不同大小的再制造碳减排系数产品碳减排总量是不同的。就政府回收奖惩机制来看,较大的回收奖惩机制比较有利于提高产品碳减排水平,降低产品总碳排放量。

由图3可知,零售商的利润受到回收奖惩力度和政府目标回收率双重作用。当政府回收奖惩力度一定时,政府制定较小的目标回收率可以激励零售商踊跃回收废旧产品;当政府制定较大的目标回收率时,为激励零售商对废旧产品的回收,政府需同时制定较大的回收奖惩机制,这意味着零售商可以通过回收活动获得额外利润。从图3中还可以看出,政府政策之间的相互协调、动态平衡可以提高零售商的回收热情,进而减少产品总碳排放量;政府不宜制定过大的奖惩机制和目标回收率,否则政府政策会导致相反的效果。

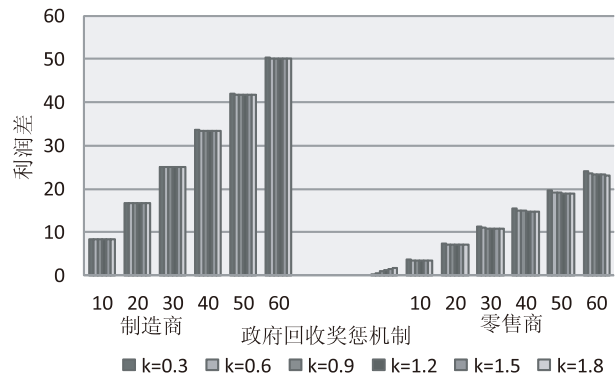


图4 回收奖惩机制和碳减排成本系数对制造商、零售商利润差比较研究

由图4可知,政府实施回收奖惩机制来控制产品总碳排放量的政策极易得到制造商和零售商的支持。政府回收奖惩机制降低了制造商的碳减排成本系数,当减排因子下降时,制造商会增加低碳产品的投入和生产,进而减少产品总碳排放量,同时降低制造企业的碳减排成本,继而增加制造商的利润;零售商可以通过回收活动从政府和制造商处获得利润,制造商、零售商利润差均与政府奖惩机制呈正相关关系;通过比较,我们发现在同一碳减排成本系数下,政府回收奖惩机制下制造商利润上升趋势要大于零售商,政府回收奖惩机制的实施促使制造商、零售商获得更大利润同时降低碳排放总量,达到经济发展与环境保护的“双赢”。

4.2 制造商、零售商利润影响因素分析 ($b=60, \tau_0=0.5$)

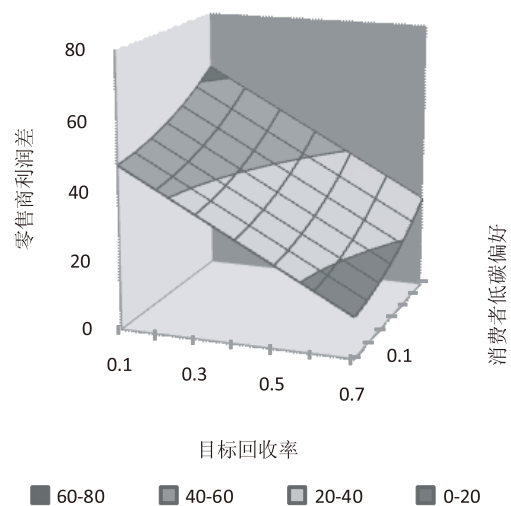


图5 消费者低碳偏好和目标回收率变化对零售商利润的影响

图5中当消费者有产品低碳偏好或环保意识较高时,政府制定较低目标回收率更能够激励零售商对废旧产品的回收,政府需时刻关注消费者动态,与消费者行为相互协调,最大限度降低产品碳排放量;当消费者低碳意识增强,越来越多的消费者愿意购买碳排放量较低的产品,迫使制造商提高减排努力水平,进而减少产品总碳排放量。消费者愿意为低碳产品支付更高的价格,将提高制造商和零售商的利润。当政府目标回收率一定时,消费者环保意识越高越有利于零售商利润的提高。

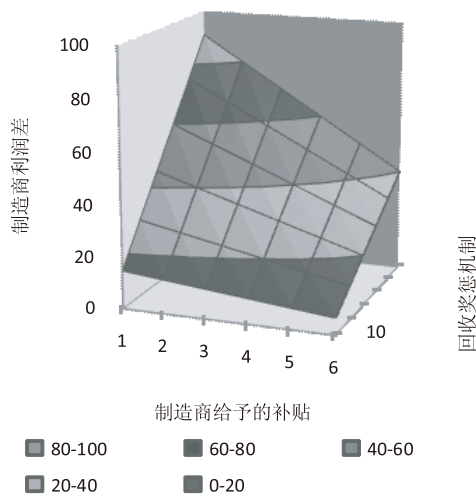


图6 制造商补贴和回收奖惩机制对制造商利润的影响

零售商进行回收活动可以从制造商处获得利润。图6表明政府回收奖惩机制存在的情况下,制造商给予零售商的补贴越少越有利于制造商利润的增加,但是补贴需要适宜,补贴过低会抑制零售商的回收积极性,间接影响制造商利润。

5 结论

本文研究了政府回收奖惩机制对产品总碳排放量的影响情况,建立了一个存在政府回收奖惩机制的闭环供应链模型,分析了政府节能减排回收政策对碳排放决策的影响,在考虑消费者低碳偏好下,将政府回收政策下的闭环供应链模型与无政府干预情形进行了比较分析。结果发现,基于政府回收奖惩机制的回收政策带来的节能减排效果明显高于无政府干预情况;再制造创造的环境效益越小(t 越接近1),政府越应该采取较高

的奖惩机制系数来创造最高的效益。政府回收奖惩力度与目标回收率之间的动态平衡,促使零售商利润的最大化。当消费者低碳意识不断增强时,政府回收奖惩机制对产品总碳排放量及制造商、零售商具有正向作用,以期实现经济发展和环境效益的双赢。

本文假定市场总需求是确定的,市场价格是由市场均衡决定的,但是在现实生活中,这两者往往是不可控的。针对不确定市场需求的研究更为复杂。除此之外,本文是在信息对称下建立的博弈模型,在信息不对称下可能会有不同的结论。

参考文献

- [1] Ding H P, Zhao Q L, An Z R, etc. Pricing Strategy of Environmental Supply Chain with Internalizing Externalities [J]. International Journal of Production Economics, 2015, (170): 563 ~ 575.
- [2] Xu J T, Chen Y Y, Bai Q G. A Two-Echelon Sustainable Supply Chain Coordination Under Cap-And-Trade Regulation [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, (135): 42 ~ 56.
- [3] Laroche M, Bergeron J, Barbaro-Forleo G. Targeting Consumers Who Are Willing to Pay More for Environmentally-Friendly Products [J]. Journal of Consumer Marketing, 2001, 18 (6): 503 ~ 520.
- [4] Plambeck E L. Reducing Greenhouse Gas Emission Through Operations and Supply Chain Management [J]. Energy Economics, 2012, 34 (S1): 64 ~ 74.
- [5] Benjaafar S, Li Y, Daskin M. Carbon Footprint and the Management of Supply Chain: Insights from Simple Models [J]. IEEE Transaction on Automation Science and Engineering, 2013, 10(1): 99 ~ 116.
- [6] 周艳菊, 黄雨晴, 陈晓红, 等. 促进低碳产品需求的供应链减排成本分担模型 [J]. 中国管理科学, 2015, 23 (7): 85 ~ 93.
- [7] Miao Z W, Fu K, Xia Z Q, Wang Y. Models for Closed-Loop Supply Chain with Trade-Ins [J]. Omega, 2017, (66): 308 ~ 326.
- [8] Chen X, Benjaafar S, Elomri A. The Carbon-Constrained EOQ [J]. Operational Research Letter, 2013, 41 (2): 172 ~ 179.
- [9] Savakan R C, Wassenhove LN. Reverse Channel Design: The Case of Competing Retailers [J]. Management Science, 2006, 52 (1): 1 ~ 14.
- [10] Bandyopadhyay S, Paul AA. Equilibrium Returns Policies in The Presence of Supplier Competition [J]. Marketing Science, 2010, 29 (5): 846 ~ 867.

- [11] 王文宾, 达庆利, 孙浩. 再制造逆向供应链协调的奖励与奖惩机制设计分析 [J]. 中国管理科学, 2009, 17 (5): 46~52.
- [12] 最佳佳, 王文宾, 吴庆. 奖惩机制对零售商负责回收闭环供应链的影响 [J]. 工业工程与管理, 2011, 16 (2): 52~59.
- [13] 王文宾, 达庆利. 奖惩机制下闭环供应链的决策与协调 [J]. 中国管理科学, 2011, 19 (1): 36~41.
- [14] 最佳佳, 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): 249~257.
- [15] 王文宾, 邓雯雯, 白拓等. 碳排放约束下制造商竞争的逆向供应链政府奖惩机制研究 [J]. 管理工程学报, 2016, 30 (2): 188~194.
- [16] Seuring, S, Muller, M. From a literature Review to a Conceptual Framework for Sustainable Supply Chain Management [J]. Journal of Cleaner Production, 2008, 16 (15): 1699~1710.
- [17] Testa F, Iraldo F. Shadows and Lights of GSCM (Green Supply Chain Management): Determinants and Effects of These Practices Based on a Multinational Study [J]. Journal of Cleaner Production, 2010, 18 (10~11): 953~962.
- [18] Kumar S, Teichman S, Timpernagel T. A Green Supply Chain is a Requirement for Profitability [J]. International Journal of Production Research, 2012, 50 (5): 1278~1296.
- [19] Yang L, Zhang Q, Ji J N. Pricing and Carbon Emission Reduction Decisions in Supply Chains with Vertical and Horizontal Cooperation [J]. International Journal of Production Economics, 2017, (191): 286~297.
- [20] Wang C, Wang W, Huang R. Supply Chain Enterprise Operations and Government Carbon Tax Decisions Considering Carbon Emissions [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, (152): 271~280.

Research on Government Reward and Punishment Mechanism in Closed-Loop Supply Chain Based on Carbon Emission

Li Xinjun^{1,2} Chen Meina¹

(1. School of Economics and management, Yantai University, Yantai 264005, China;

2. Faculty of Management and Economics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

[**Abstract**] The issue of greenhouse gas emissions has become an urgent problem to be solved by the international community. The only way to solve this problem is to reduce emissions from the source by reducing product carbon emissions. This paper studies the reverse supply chain system composed of a manufacturer and a retailer, and it establishes the dynamic game model of the government to implement the reward and punishment mechanism, it compares and analyzes the proportion of the retailer's recovery, the supply chain profit and the total amount of carbon emissions. The results show that the government recycling reward and punishment mechanism has improved the rate of recycling and the level of carbon emissions; when the degree of re-manufacturing reduction is smaller, the government recycling reward and punishment mechanism reduces the total amount of carbon emissions; the government recruiting incentives based on low-carbon preferences improves the profits of manufacturers and retailers, and it reduces the total product carbon emissions at a large extent; the smaller target recovery rate based on government recycling reward and punishment mechanism can maximize the profits of retailer.

[**Key words**] reward and punishment mechanism; closed-loop supply chain; carbon emissions; low-carbon preference of consumer; recycling policy; government intervention

(责任编辑: 王平)