

文章编号: 1000-5862(2015)05-0536-09

碳减排背景下闭环供应链生产与回收策略研究

曾剑锋^{1,2} 柳 键²

(1. 江西师范大学学报杂志社, 江西 南昌 330027; 2. 江西财经大学信息管理学院, 江西 南昌 330032)

摘要: 在碳税政策和消费者减排偏好的背景下, 针对由制造商、零售商和回收商构成的闭环供应链, 分别建立了无减排和减排两种情形下制造商主导的 Stackelberg 博弈模型, 得到了闭环供应链的生产和回收策略, 比较分析了2种情形下的均衡策略和供应链成员利润, 并通过数值模拟讨论了碳税对生产和回收策略的影响。研究表明, 制造商采取减排策略是应对碳税政策的有效措施; 当碳税水平低于消费者减排偏好系数时, 制造商减排后零售商的订购量并没有因产品的批发价格提高而减少, 反而是增多; 消费者减排偏好系数的增大和减排投资规模系数的减小会使供应链多减排、多生产和多回收; 随着碳税水平的增大, 产品的单位碳减排量提高, 废旧产品的回收率上升, 但制造商的利润和闭环供应链系统的效益却下降。

关键词: 闭环供应链; 碳减排; Stackelberg 博弈; 碳税

中图分类号: F 224.32 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2015.05.20

0 引言

随着工业化、城镇化进程加快和消费结构升级, 我国能源需求呈刚性增长, 受国内资源保障能力和环境容量制约, 我国经济社会发展面临的资源环境瓶颈约束更加突出, 节能减排工作难度不断加大。作为实现节能减排的有效措施之一, 征收碳税在一些发达国家已经开始实施。碳税政策的推出将提高企业对 CO₂ 减排的重视, 促进企业采取措施降低 CO₂ 的排放量, 进而实现产业升级、产品结构调整和技术水平提升, 我国实行碳税政策将是大势所趋。与此同时, 随着消费者的环保意识逐渐增强, 越来越多的顾客愿意为低碳排放的产品支付更高的价格^[1], 企业可以从低碳产品中获得更多的收益。碳税政策和消费者环保意识2种因素改变了企业与供应链的成本结构和盈利模式, 迫使企业采取减排策略。因此, 在碳税政策和消费者减排偏好的背景下, 以碳减排为视角研究企业和供应链的决策具有重要的现实意义。

目前, 利用博弈论研究碳减排背景下供应链运营策略的文献越来越多, 得到了许多丰富的成果^[2-7]。然而, 在碳税政策和消费者减排偏好的基础

上, 现有文献多数侧重于碳减排对生产和销售中供应链决策的影响, 而忽视碳减排对回收再制造过程所产生的效应, 或仅从碳排放量作为外生变量的角度分析碳税政策对再制造策略的影响。在考虑政府征收碳税和市场需求受产品的碳减排量影响的条件下, 本文将产品的碳减排量纳入自身的决策过程中, 利用博弈论方法研究闭环供应链的订购、回收和定价决策, 比较分析制造商无减排和减排2种情形下企业的均衡策略, 并探讨消费者减排偏好系数、碳减排投资规模系数和碳税对供应链绩效的影响。更重要的是, 回答了2个问题: 1) 在碳税政策和消费者减排偏好的背景下, 制造商碳减排后产品的批发价格提高, 其订购量是否一定会降低; 2) 制造商减排会增加企业的边际成本, 这是否一定使制造商的利润下降。

1 问题描述与基本假设

在闭环供应链系统中, 制造商既购买原材料生产新产品, 又通过回收废旧产品进行处理加工生产再制造产品, 其生产过程中会排放一定数量的 CO₂ 等温室气体, 造成环境污染^[8]。为达到企业碳减排的目的, 政府通过采取征收碳税的措施作为制约

收稿日期: 2015-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(71261006), 江西省自然科学基金(20151BAB207030)和江西省教育厅科技课题(GJJ14244)资助项目。

作者简介: 曾剑锋(1977-), 男, 江西南康人, 讲师, 博士, 主要从事运营与供应链管理的研究。

机制,对制造商的单位碳排放量征收碳税 f_e 。随着消费者环保意识的不断增强,制造商采取减排策略不仅可以减少税收成本,而且能够影响产品的销售价格;制造商的碳减排量越大,消费者愿意支付的价格越高。在政府碳税和消费者环保意识的双重影响下,制造商将采取如购买先进设备、改进生产等方式降低生产过程中产品的碳排放量。在碳减排背景下,考虑由制造商、零售商和回收商组成的闭环供应链系统,其中,制造商在销售环节中以批发价格 w_e 将产品销售给零售商,零售商则制定产品的订购量 q_e 并全部卖给消费者;同时制造商在回收环节中以收购价格 h_e 委托回收商回收废旧产品,用于再制造。

为便于研究,将复杂问题进行一些简化,给出如下假设。

假设1 碳税是政府依据在生产过程中产品的碳排放量向制造商征收一定的排放税的政策,制造商每生产一件产品需要缴纳碳税 f_e 。政府建立碳税机制以促使制造商减排,假设产品的单位减排量为 v_e ,它是制造商的决策变量。为达到一定的减排规模,制造商需要付出一定的减排投入成本 I_m 。借鉴C. D' Aspremont等^[9]给出的经典模型中投入成本函数的假设:产出成果与投入成本具有平方关系,设减排投入成本与产品的单位碳减排量成2次关系,即 $I_m = \beta_e v_e^2$,其中 β_e 为碳减排投资规模系数,其越大表明制造商碳减排越困难。

目前,虽然我国还未开始执行碳税政策,但从国家环境保护的政策导向以及一些发达国家的实施经验可以看出,政府对生产企业征收碳税将是未来我国节能减排的重要举措之一。文献[10]研究表明,中国如果现阶段实施碳税政策,则征税的水平不宜过高。因此,假定政府制定的碳税 f_e 处于一个较低的合理水平,且其值能够确保博弈均衡解的存在。

假设2 在实际经济问题中,随着消费者环保意识的增强,产品的销售价格不仅与市场需求量(即零售商的订购量)负相关,而且还与产品的减排量正相关,即消费者愿意为低碳排放量的产品支付更高的价格^[11]。因此,假设产品的逆需求函数(即价格函数)为 $p_e = \varphi_e - \delta_e q_e + \lambda_e v_e$,其中 p_e 为产品的销售价格, $\varphi_e (> 0)$ 为产品的基本价格, q_e 为零售商的订购量(零售商的决策变量), $\delta_e (> 0)$ 为产品的销售价格对订购量的敏感程度(简称为价格的订购敏感系数), $\lambda_e (> 0)$ 为单位碳减排量下产品的销售价格变化率,其越大表明消费者愿意对碳减排产品支付的价格越高,即消费者减排偏好系数,它是消

费者环保意识的一种体现。类似的逆需求函数已经在供应链运营管理中被广泛采用^[12-13]。

假设3 废旧产品的回收率为 τ_e 。为了达到一定的回收规模,回收商需要进行投资(如购买设备、投入人力资源等),它与回收率的大小有关,参照文献[14]提出的方式:投资成本与废旧产品的回收率成2次关系,假设回收商的投资成本 $I_{3p} = l_e \tau_e^2$,其中 l_e 为回收投资规模系数,它是足够大的常数。为表述简洁,后续内容不再对参数 l_e 进行讨论,总是假设 l_e 的取值能够保证产品的回收率 τ_e 小于1且最优解存在。

假设4 新产品是指完全利用新的原材料生产的产品;再制造产品是指对回收的废旧产品进行加工处理后生产的产品。新产品的单位生产成本为 c_m ,再制造产品的单位生产成本为 c_r ,所有再制造产品的单位生产成本 c_r 相同,即不考虑废旧产品的差异性。假设再制造产品的单位生产成本低于新产品的单位生产成本,即 $c_r < c_m$ 。由于再制造而节约的单位生产成本记为 Δ_e (简称为再制造节约成本),即 $\Delta_e = c_m - c_r$ 。产品的平均单位生产成本为 $\bar{c} = c_m(1 - \tau_e) + c_r \tau_e = c_m - \Delta_e \tau_e$ 。

假设5 再制造产品和新产品在功能、质量和效用无差别,消费者对两者的接受程度完全相同,它们在市场上具有相同的批发价格和销售价格^[15-18]。为描述简便,在不混淆的情况下,将再制造产品和新产品统称为产品。制造商生产产品会排放大量的CO₂等温室气体,其中新产品和再制造产品的碳排放量存在差异,假设新产品的原始单位碳排放量为 v_0 ,再制造产品的单位碳排放量与新产品的单位碳排放量的比值为 θ_e (简称为产品的碳排放比值),即再制造产品的原始单位碳排放量为 $\theta_e v_0$ 。由于产品在再制造过程中节省能源和节约材料,所以假设再制造产品的原始单位碳排放量低于新产品的原始单位碳排放量^[19-20],这意味着 $0 < \theta_e < 1$ 。 θ_e 越小表示产品回收再制造对碳减排的作用越大。为确保供应链的有效运营,假定新产品的单位生产成本与新产品的单位碳税成本之和低于产品的基本价格,即 $c_m + f_e v_0 < \varphi_e$ 。

假设6 产品的单位批发价格为 w_e ,废旧产品的单位回收价格为 h_e ,它们均是制造商的决策变量;回收商对每件废旧产品支付的单位回收成本为 A_e (它包含回收商回收废旧产品的运输成本、库存成本及收购成本等),且 $0 < A_e < \Delta_e$ 。

假设7 在闭环供应链系统中,制造商、零售商和回收商是理性的决策者,均以实现各自利润最大

化为目标 3 者建立了制造商主导的双重 Stackelberg 博弈关系: 制造商与零售商之间的订购定价策略 Stackelberg 博弈关系和制造商与回收商之间的回收策略 Stackelberg 博弈关系。

基于上述假设, 制造商的利润函数为

$$\Pi_M = w_e q_e - (c_m - \Delta_e \tau_e) q_e - h_e \tau_e q_e - I_m - f_e [(1 - \tau_e) v_0 + \theta_e \tau_e v_0 - v_e] q_e = \{w_e - c_m - f_e(v_0 - v_e) + [\Delta_e - h_e + f_e(1 - \theta_e) v_0] \tau_e\} q_e - \beta_e v_e^2, \quad (1)$$

其中第 1 项 $w_e q_e$ 为产品的销售收益, 第 2 项 $(c_m - \Delta_e \tau_e) q_e$ 为产品的生产成本, 第 3 项 $h_e \tau_e q_e$ 为废旧产品的收购成本, 第 4 项 I_m 为产品的碳减排投入成本和第 5 项 $f_e [(1 - \tau_e) v_0 + \theta_e \tau_e v_0 - v_e] q_e$ 为产品的碳税成本。

零售商的利润函数为

$$\Pi_R = (\varphi_e - \delta_e q_e + \lambda_e v_e) q_e - w_e q_e = (\varphi_e - \delta_e q_e + \lambda_e v_e - w_e) q_e, \quad (2)$$

其中第 1 项 $(\varphi_e - \delta_e q_e + \lambda_e v_e) q_e$ 为产品的销售收益和第 2 项 $w_e q_e$ 为产品的订购成本。

回收商的利润函数为

$$\Pi_{3P} = h_e \tau_e q_e - A_e \tau_e q_e - I_{3P} = (h_e - A_e) \tau_e q_e - l_e \tau_e^2, \quad (3)$$

其中第 1 项 $h_e \tau_e q_e$ 为废旧产品的转让收益, 第 2 项 $A_e \tau_e q_e$ 为废旧产品的回收成本和第 3 项 I_{3P} 为废旧产品的回收投资成本。

2 制造商无碳减排时闭环供应链的生产与回收决策模型

在碳税推出的初期阶段, 一些生产企业出于成本的考虑, 对减排关键技术和工艺研发的投入积极性不高, 为追求短期利益, 企业往往会忽视环境保护而选择采取不减排策略。基于此, 本节分析当制造商没有进行碳减排时企业和供应链的决策模型, 即产品的单位碳减排量 $v_e = 0$ 。相应地, 制造商的碳减排投入成本 $I_m = 0$, 产品的销售价格 p_e 仅与零售商的订购量 q_e 相关, 政府仅根据产品的原始单位排放量征收碳税。为表述方便, 将该模型简称为 CE-模型。

由 (1) 式 ~ (3) 式可知, 在 CE-模型中制造商的利润函数为

$$\Pi_M = \{w_e - c_m - f_e v_0 + [\Delta_e - h_e + f_e(1 - \theta_e) v_0] \tau_e\} q_e, \quad (4)$$

零售商的利润函数为

$$\Pi_R = (\varphi_e - \delta_e q_e - w_e) q_e, \quad (5)$$

回收商的利润函数为

$$\Pi_{3P} = (h_e - A_e) \tau_e q_e - l_e \tau_e^2. \quad (6)$$

在 CE-模型中, 制造商、零售商和回收商 3 方进行制造商主导的 Stackelberg 博弈。在该博弈过程中, 第 1 阶段, 制造商从自身利益最大化角度, 先确定产品的批发价格 w_e 和废旧产品的回收价格 h_e ; 第 2 阶段, 根据制造商决定的产品批发价格, 零售商选择产品的订购量 q_e , 同时, 根据制造商决定的废旧产品回收价格, 回收商确定废旧产品的回收率 τ_e , 以追求各自利润最大化。

下面采用逆向归纳法来求博弈的均衡解。先分析第 2 阶段中零售商和回收商的优化决策。由 (5) 式和 (6) 式得

$$\begin{aligned} \partial \Pi_R / \partial q_e &= -2\delta_e q_e + \varphi_e - w_e, \\ \partial^2 \Pi_R / \partial q_e^2 &= -2\delta_e < 0, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \partial \Pi_{3P} / \partial \tau_e &= -2l_e \tau_e + (h_e - A_e) q_e, \\ \partial^2 \Pi_{3P} / \partial \tau_e^2 &= -2l_e < 0. \end{aligned} \quad (8)$$

因此, 零售商的利润 Π_R 和回收商的利润 Π_{3P} 均存在最大值。由 (7) 式和 (8) 式, 并联立方程组 $\partial \Pi_R / \partial q_e = 0$, $\partial \Pi_{3P} / \partial \tau_e = 0$ 可得零售商和回收商关于产品批发价格 w_e 和废旧产品回收价格 h_e 的反应函数:

$$q_e = \frac{\varphi_e - w_e}{2\delta_e}, \tau_e = \frac{(h_e - A_e)(\varphi_e - w_e)}{4l_e \delta_e}. \quad (9)$$

然后分析第 1 阶段中制造商的最优决策。将反应函数 (9) 代入制造商的利润函数 (4) 可以得到

$$\Pi_M = \frac{(\varphi_e - w_e)}{2\delta_e} \left\{ w_e - c_m - f_e v_0 + \frac{S_e(\varphi_e - w_e)}{4l_e \delta_e} \right\}, \quad (10)$$

其中 $S_e = [\Delta_e - h_e + f_e(1 - \theta_e) v_0] (h_e - A_e)$ 。

由 (10) 式可得

$$\partial \Pi_M / \partial h_e = (\varphi_e - w_e)^2 [\Delta_e + A_e + f_e(1 - \theta_e) v_0 - 2h_n] / (8l_e \delta_e^2), \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \partial \Pi_M / \partial w_e &= - (4l_e \delta_e - S_e) w_e / (4l_e \delta_e^2) + \\ &[2l_e \delta_e (c_m + f_e v_0) + \varphi_e (2l_e \delta_e - S_e)] / (4l_e \delta_e^2). \end{aligned} \quad (12)$$

由 (11) 式和 (12) 式可得 Π_M 的 Hessian 矩阵为

$$H_M^{CE} = \begin{pmatrix} -\frac{(\varphi_e - w_e)^2}{4l_e \delta_e^2} & -\frac{(\varphi_e - w_e) U_e}{4l_e \delta_e^2} \\ -\frac{(\varphi_e - w_e) U_e}{4l_e \delta_e^2} & -\frac{4l_e \delta_e - S_e}{4l_e \delta_e^2} \end{pmatrix},$$

其中 $U_e = \Delta_e + A_e + f_e(1 - \theta_e) v_0 - 2h_n$ 。从而有, 当回收投资规模系数 l_e 足够大和碳税 f_e 较低时, 矩阵 H_M^{CE} 满足 1 阶顺序主子式 $|^1 H_M^{CE}| < 0$, 2 阶顺序主子式 $|H_M^{CE}| > 0$, 所以, 制造商的利润 Π_M 存在最大值。结合 (11) 式和 (12) 式, 并由 1 阶条件 $\partial \Pi_M / \partial w_e = 0$, $\partial \Pi_M / \partial h_e = 0$ 可得产品的批发价格和废旧

产品的回收价格分别为

$$\begin{aligned} w_e^{CE*} &= c_m + f_e v_0 + (\varphi_e - c_m - f_e v_0) G_e / D_e, \\ h_e^{CE*} &= [\Delta_e + A_e + f_e(1 - \theta_e) v_0] / 2, \end{aligned} \quad (13)$$

其中 $D_e = 16l_e \delta_e - [\Delta_e - A_e + f_e(1 - \theta_e) v_0]^2$, $G_e = 8l_e \delta_e - [\Delta_e - A_e + f_e(1 - \theta_e) v_0]^2$.

最后逆向求解零售商和回收商的均衡策略. 将产品批发价格 w_e^{CE*} 和废旧产品回收价格 h_e^{CE*} 代入(9)式可得最优的产品订购量和废旧产品回收率分别为

$$q_e^{CE*} = 4l_e(\varphi_e - c_m - f_e v_0) / D_e, \tau_e^{CE*} = (\varphi_e - c_m - f_e v_0) [\Delta_e - A_e + f_e(1 - \theta_e) v_0] / D_e. \quad (14)$$

进一步地,制造商的利润、零售商的利润和回收商的利润分别为

$$\Pi_M^{CE*} = 2l_e(\varphi_e - c_m - f_e v_0)^2 / D_e, \quad (15)$$

$$\Pi_R^{CE*} = 16\delta_e l_e^2(\varphi_e - c_m - f_e v_0)^2 / D_e^2, \quad (16)$$

$$\Pi_{3P}^{CE*} = l_e(\varphi_e - c_m - f_e v_0)^2 [\Delta_e - A_e + f_e(1 - \theta_e) v_0]^2 / D_e^2. \quad (17)$$

根据(13)式易得结论1.

结论1 当制造商无碳减排时,随着政府征收单位产品的碳税标准增大,产品的批发价格和废旧产品的回收价格均得到提高.这意味着,制造商在无碳减排的情形下应对碳税政策的策略是在销售渠道中通过提高价格将增加的税收成本转嫁给下游零售商,并在回收渠道中通过提高价格来回收更多的废旧产品用于再制造以被动地降低税收成本.

基于(14)式易得结论2.

结论2 当制造商无碳减排时,政府征收单位产品的碳税标准与零售商的订购量呈负相关,而政府征收单位产品的碳税标准与废旧产品的回收率呈正相关.这意味着,在碳税政策实施的前提下,当制造商没有减少产品的碳排放量时零售商将减少产品的订购量以降低市场风险,而回收商则会提高废旧产品的回收率以满足再制造产品的生产需求.

由(15)式~(17)式易得结论3.

结论3 当制造商无碳减排时,政府征收单位产品的碳税标准越高,制造商的利润和零售商的利润均越低,而回收商的利润越高.这意味着,碳税政策下制造商不进行碳减排,由于回收再制造所带来收益的增加不足以抵消税收成本增加所造成利益的损失,制造商的利润有所降低,这不利于供应链在销售渠道中的有效运营.

从结论1~结论3可以看出,在政府征收碳税的条件下,制造商不进行碳减排,则产品的批发价格提高,零售商的订购量减少,制造商的利润下降,即采取不减排策略使制造商的销售运营较为被动.这

也说明碳税政策会迫使制造商加大碳减排的主动性和积极性.

3 制造商碳减排时闭环供应链的生产与回收决策模型

由结论3可知,碳税政策下采取不减排策略并不是制造商的有利选择.那么,制造商采取减排策略会对自身及供应链带来怎样的影响?下面即对制造商碳减排时企业和供应链的决策模型进行研究.为了表述方便,将该模型简称为RE-模型.当制造商进行碳减排时,减排投入成本 I_m 为产品单位碳减排量 v_e 的2次函数,产品销售价格 p_e 由产品的订购量 q_e 和产品的单位碳减排量 v_e 决定,政府将根据减排后产品的单位排放量征收碳税.

在RE-模型中,制造商、零售商和回收商之间Stackelberg博弈决策过程为:第1阶段,制造商结合碳税政策和消费者低碳偏好程度制定产品的单位碳减排量 v_e ;第2阶段,根据产品的碳减排量,制造商决定给零售商的产品批发价格 w_e 以及确定给回收商的废旧产品回收价格 h_e ,实现自身利润最大化;第3阶段,回收商和零售商观察到制造商的决策后同时行动,决定废旧产品的回收率 τ_e 和产品的订购量 q_e ,以最大化各自的利润.这里,由于产品的单位碳减排量一般是制造商在早期就需要确定的长期决策,所以其决策次序先于产品的批发价格和废旧产品的回收价格^[21].

下面采用逆向归纳法求制造商、零售商和回收商3方博弈的均衡解.

先分析第3阶段,零售商的订购策略和回收商的回收策略.由(2)式和(3)式可得

$$\begin{aligned} \partial \Pi_R / \partial q_e &= -2\delta_e q_e + \varphi_e + \lambda_e v_e - w_e, \\ \partial^2 \Pi_R / \partial q_e^2 &= -2\delta_e < 0, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \partial \Pi_{3P} / \partial \tau_e &= -2l_e \tau_e + (h_e - A_e) q_e, \\ \partial^2 \Pi_{3P} / \partial \tau_e^2 &= -2l_e < 0. \end{aligned} \quad (19)$$

因此,零售商的利润 Π_R 和回收商的利润 Π_{3P} 均存在最大值.由(18)式和(19)式,并联立方程组 $\partial \Pi_R / \partial q_e = 0$, $\partial \Pi_{3P} / \partial \tau_e = 0$ 可得零售商的产品订购量和回收商的废旧产品回收率 τ_e 分别为

$$\begin{aligned} q_e &= (\varphi_e + \lambda_e v_e - w_e) / (2\delta_e), \\ \tau_e &= (h_e - A_e)(\varphi_e + \lambda_e v_e - w_e) / (4l_e \delta_e). \end{aligned} \quad (20)$$

再分析第2阶段,制造商的定价策略.将(20)式代入(1)式得

$$\Pi_M = \frac{(\varphi_e + \lambda_e v_e - w_e)}{2\delta_e} \left\{ w_e - c_m - f_e(v_0 - v_e) + \right.$$

$$\frac{S_e(\varphi_e + \lambda_e v_e - w_e)}{4l_e \delta_e} \} - \beta_e v_e^2. \quad (21)$$

由(21)式可得

$$\partial \Pi_M / \partial h_e = (\varphi_e + \lambda_e v_e - w_e)^2 [\Delta_e + A_e + f_e(1 - \theta_e) v_0 - 2h_n] / (8l_e \delta_e^2), \quad (22)$$

$$\partial \Pi_M / \partial w_e = -(4l_e \delta_e - S_e) w_e / (4l_e \delta_e^2) + \{2l_e \delta_e [c_m + f_e(v_0 - v_e)] + (\varphi_e + \lambda_e v_e)(2l_e \delta_e - S_e)\} / (4l_e \delta_e^2), \quad (23)$$

由(22)式和(23)式可得 Π_M 的 Hessian 矩阵为

$$\mathbf{H}_M^{RE} = \begin{pmatrix} -\frac{(\varphi_e + \lambda_e v_e - w_e)^2}{4l_e \delta_e^2} & -\frac{(\varphi_e + \lambda_e v_e - w_e) U_e}{4l_e \delta_e^2} \\ -\frac{(\varphi_e + \lambda_e v_e - w_e) U_e}{4l_e \delta_e^2} & -\frac{4l_e \delta_e - S_e}{4l_e \delta_e^2} \end{pmatrix},$$

从而有, 矩阵 \mathbf{H}_M^{RE} 满足 1 阶顺序主子式 $|\mathbf{H}_M^{RE}| < 0$, 2 阶顺序主子式 $|\mathbf{H}_M^{RE}| > 0$, 所以, 对于给定的碳减排量 v_e , 制造商的利润 Π_M 存在最大值. 结合(22)式和(23)式, 并由 1 阶条件 $\partial \Pi_M / \partial w_e = 0$, $\partial \Pi_M / \partial h_e = 0$ 可得产品的批发价格和废旧产品的回收价格分别为

$$\begin{aligned} w_e &= c_m + f_e(v_0 - v_e) + \\ &[\varphi_e + (\lambda_e + f_e) v_e - c_m - f_e v_0] G_e / D_e, \\ h_e^{RE*} &= [\Delta_e + A_e + f_e(1 - \theta_e) v_0] / 2. \end{aligned} \quad (24)$$

然后分析第 1 阶段, 制造商的减排策略. 将(24)式代入(21)式得

$$\begin{aligned} \Pi_M &= 2l_e [\varphi_e + (\lambda_e + f_e) v_e - \\ &c_m - f_e v_0]^2 / D_e - \beta_e v_e^2. \end{aligned} \quad (25)$$

从而由(25)式得

$$\begin{aligned} \partial \Pi_M / \partial v_e &= -[2\beta_e - 4l_e(\lambda_e + f_e)^2 / D_e] v_e + \\ &4l_e(\lambda_e + f_e)(\varphi_e - c_m - f_e v_0) / D_e, \\ \partial^2 \Pi_M / \partial v_e^2 &= -[2\beta_e - 4l_e(\lambda_e + f_e)^2 / D_e] < 0, \end{aligned}$$

故制造商的利润 Π_M 是关于碳减排量 v_e 的凹函数. 由 1 阶条件 $\partial \Pi_M / \partial v_e = 0$ 得到产品的单位碳减排量为

$$v_e^{RE*} = \frac{2l_e(\lambda_e + f_e)(\varphi_e - c_m - f_e v_0)}{\beta_e D_e - 2l_e(\lambda_e + f_e)^2}. \quad (26)$$

最后逆向求解. 将(26)式代入(24)式可得产品的批发价格为

$$\begin{aligned} w_e^{RE*} &= c_m + f_e v_0 + \\ &(\varphi_e - c_m - f_e v_0) [\beta_e G_e - 2l_e f_e(\lambda_e + f_e)] / \\ &[\beta_e D_e - 2l_e(\lambda_e + f_e)^2]. \end{aligned} \quad (27)$$

再将废旧产品的回收价格 h_e^{RE*} , (26) 式和(27)式代入(20)式可得产品的订购量和废旧产品的回收率分别为

$$\begin{aligned} q_e^{RE*} &= 4l_e \beta_e (\varphi_e - c_m - f_e v_0) / [\beta_e D_e - 2l_e(\lambda_e + f_e)^2], \\ \tau_e^{RE*} &= \beta_e (\varphi_e - c_m - f_e v_0) [\Delta_e - A_e + f_e(1 - \theta_e) v_0] / [\beta_e D_e - 2l_e(\lambda_e + f_e)^2]. \end{aligned} \quad (28)$$

进一步地, 制造商的利润、零售商的利润和回收商的利润分别为

$$\Pi_M^{RE*} = \frac{2l_e \beta_e (\varphi_e - c_m - f_e v_0)^2}{\beta_e D_e - 2l_e(\lambda_e + f_e)^2}, \quad (29)$$

$$\Pi_R^{RE*} = \frac{16\delta_e l_e^2 \beta_e^2 (\varphi_e - c_m - f_e v_0)^2}{[\beta_e D_e - 2l_e(\lambda_e + f_e)^2]^2}, \quad (30)$$

$$\Pi_{3P}^{RE*} = \frac{l_e \beta_e^2 (\varphi_e - c_m - f_e v_0)^2 [\Delta_e - A_e + f_e(1 - \theta_e) v_0]^2}{[\beta_e D_e - 2l_e(\lambda_e + f_e)^2]^2}. \quad (31)$$

4 制造商碳减排的效果与相关参数的敏感性分析

4.1 CE-模型与 RE-模型的均衡策略比较

本节将对 CE-模型和 RE-模型的均衡结果进行对比分析, 其重点集中在产品的批发价格、废旧产品的回收率、产品的订购量以及供应链成员的利润, 以期得到一些有益结论.

命题 1 制造商碳减排后, 废旧产品的回收率 τ_e 提升, 产品的订购量 q_e 增多, 产品的批发价格 w_e 的变化与 f_e/λ_e (碳税与消费者减排偏好系数的比值) 的大小有关; 当 $0 < f_e/\lambda_e < 1$ 时, 产品的批发价格 w_e 提高, 当 $f_e/\lambda_e \geq 1$ 时, 产品的批发价格 w_e 降低.

证 由(14)式和(28)式可得

$$q_e^{RE*} - q_e^{CE*} = \frac{8l_e^2 (\lambda_e + f_e)^2 (\varphi_e - c_m - f_e v_0)}{D_e [\beta_e D_e - 2l_e(\lambda_e + f_e)^2]} > 0,$$

$$\begin{aligned} \tau_e^{RE*} - \tau_e^{CE*} &= 2l_e(\lambda_e + f_e)^2 (\varphi_e - c_m - f_e v_0) \\ &[\Delta_e - A_e + f_e(1 - \theta_e) v_0] / (D_e [\beta_e D_e - 2l_e(\lambda_e + f_e)^2]) > 0. \end{aligned}$$

又由(13)式和(27)式可得

$$\begin{aligned} w_e^{RE*} - w_e^{CE*} &= (2l_e \lambda_e (\lambda_e + f_e) (\varphi_e - c_m - \\ &f_e v_0) \{8l_e \delta_e (1 - f_e/\lambda_e) - [\Delta_e - A_e + f_e(1 - \theta_e) v_0]^2\}) / (D_e [\beta_e D_e - 2l_e(\lambda_e + f_e)^2]), \end{aligned}$$

显然有, 当 $f_e/\lambda_e \geq 1$ 时, $w_e^{RE*} < w_e^{CE*}$; 又由于回收投资规模系数 l_e 足够大, 因此, 当 $0 < f_e/\lambda_e < 1$ 时, $w_e^{RE*} > w_e^{CE*}$.

命题 1 表明, 在碳税政策和消费者减排偏好的背景下, (i) 制造商采取碳减排策略能够提高回收商参与废旧产品回收的积极性, 以及提升零售商进行产品销售的积极性, 废旧产品的回收率和产品的订购量均有所上升; (ii) 制造商采取碳减排策略对产品批发价格的影响取决于碳税水平和消费者减排偏好系数, 当碳税水平低于消费者减排偏好系数, 减排后产品批发价格提高, 反之, 则减排后产品批发价

格降低。

这是一个有趣的结果。按常理,产品的批发价格越高其订购量越少;但在碳税水平低于消费者减排偏好系数的条件下,减排后产品的订购量却没有因其批发价格提高而减少,反而呈现增多的现象。其原因可能在于制造商的碳税成本较低,减排所吸引零售商订购产品的增加数量已经超过碳税所导致零售商订购产品的减少数量,制造商具备提高产品批发价格的空间以获取更多的利润。

目前,我国的消费者环保意识还较为薄弱,若政府征收的碳税水平较高,则制造企业减排后产品的价格将出现下降的状况,企业的边际利润减少,这在短期内会抑制减排的积极性,因此,政府在碳税政策实施初期采取低税率水平方案较为适宜,而随着低碳消费逐渐深入人心,可以逐步提高税率的征收标准。

命题2 制造商碳减排后,制造商的利润、零售商的利润和回收商的利润均得到增大。

证 由(15)式和(29)式可得

$$\Pi_M^{RE*} - \Pi_M^{CE*} = \frac{4l_e^2(\lambda_e + f_e)^2(\varphi_e - c_m - f_e v_0)^2}{[\beta_e D_e - 2l_e(\lambda_e + f_e)^2]} > 0,$$

由(16)式和(30)式可得

$$\Pi_R^{RE*} - \Pi_R^{CE*} = [64\delta_e l_e^3(\lambda_e + f_e)^2[\beta_e D_e - l_e(\lambda_e + f_e)^2](\varphi_e - c_m - f_e v_0)^2 / [\beta_e D_e - 2l_e(\lambda_e + f_e)^2]^2 > 0,$$

由(17)式(31)式和命题1可得

$$\Pi_{3P}^{RE*} - \Pi_{3P}^{CE*} = l_e(\tau_e^{RE*} - \tau_e^{CE*})(\tau_e^{RE*} + \tau_e^{CE*}) > 0.$$

命题2表明,在政府碳税政策和消费者行为的双重压力影响下,制造商能够从投资碳减排中获取更多的利润,零售商和回收商也都可以在“搭便车”中获益,即制造商采取碳减排策略无论对企业自身,还是对整个供应链均是有利的。

从命题1和命题2可以看出,碳税政策下采取减排策略是制造商较为有效的应对措施。减少了产品的碳排放量,提高了废旧产品的回收率,既节约资源又减少排放污染,且扩大市场需求量,增加了供应链成员的收益,从而取得环境保护和经济效用共赢的良好效果。

下面进行在制造商碳减排的情形下相关参数的敏感性分析。与减排密切相关的内在因素主要是消费者减排偏好系数 λ_e 、减排投资规模系数 β_e ,探讨它们对产品的单位碳减排量、废旧产品的回收率、零售商的订购量以及制造商的利润的影响。这里对于供应链成员的收益,仅分析制造商的利润的原因是制造商是碳减排的实施者,其利润的变化对碳减排策略能否执行起决定性作用。

4.2 消费者减排偏好系数 λ_e 变化的影响分析

命题3 随着消费者减排偏好系数 λ_e 的增大,

产品的单位减排量 v_e^{RE*} 、废旧产品的回收率 τ_e^{RE*} 和零售商的订购量 q_e^{RE*} 均将增大。

证 由于 $\beta_e D_e - 2l_e(\lambda_e + f_e)^2$ 随 λ_e 的增大而减小, $\lambda_e + f_e$ 随 λ_e 的增大而增大,所以,结合(26)式和(28)式易得, $\partial v_e^{RE*} / \partial \lambda_e > 0$, $\partial \tau_e^{RE*} / \partial \lambda_e > 0$, $\partial q_e^{RE*} / \partial \lambda_e > 0$ 。

命题3意味着,当消费者的减排偏好程度越大,即消费者愿意为碳减排多的产品支付的价格越高,则制造商对产品的单位碳排放量降低得越多,回收商对废旧产品的回收率提高得越多,零售商也对产品的订购量增加得越多。这也说明,消费者的减排偏好行为能够促进供应链多减排、多回收和多生产。

命题4 消费者减排偏好系数 λ_e 与制造商的利润 Π_M^{RE*} 呈正相关。

证 由于 $\beta_e D_e - 2l_e(\lambda_e + f_e)^2$ 随 β_e 的增大而增大,从而据(29)式可得 $\partial \Pi_M^{RE*} / \partial \lambda_e > 0$ 。

命题4意味着,消费者的减排偏好程度的增大会使制造商的利润增多。因此,制造商可以借助广告等媒体加大绿色消费的宣传力度以提高消费者的环保意识,这能够使自身从中获益,进而更有动力实施碳减排行为。

4.3 减排投资规模系数 β_e 变化的影响分析

命题5 随着减排投资规模系数 β_e 的减小,产品的单位减排量 v_e^{RE*} 、废旧产品的回收率 τ_e^{RE*} 和零售商的订购量 q_e^{RE*} 均将增大。

证 由于 $\beta_e D_e - 2l_e(\lambda_e + f_e)^2$ 和 $D_e - 2l_e(\lambda_e + f_e)^2 / \beta_e$ 均随 β_e 的增大而增大,所以,结合(26)式和(28)式易得, $\partial v_e^{RE*} / \partial \beta_e < 0$, $\partial \tau_e^{RE*} / \partial \beta_e < 0$, $\partial q_e^{RE*} / \partial \beta_e < 0$ 。

命题5说明,在制造商进行碳减排时,碳减排难度越小,减排投入成本越低,制造商投入到回收再制造中的资金越多,则产品的碳排放量降低得越多,废旧产品的回收率提升得越大,传递到需求市场,零售商愿意订购产品的数量增加得越多。即随着减排投入成本的降低,制造商将加大碳减排的力度,提高废旧产品的再利用效率和增加低碳产品的生产,这有助于减少污染、节约资源以及扩大需求,进而改善环境和推动低碳消费。

命题6 减排投资规模系数 β_e 与制造商的利润 Π_M^{RE*} 呈负相关。

证 由于 $\beta_e D_e - 2l_e(\lambda_e + f_e)^2$ 随 β_e 的增大而增大,从而据(29)式可得 $\partial \Pi_M^{RE*} / \partial \beta_e < 0$ 。

命题6意味着,当减排投资规模系数下降,减排需要投入的成本降低,制造商的利润将上升。因此,

制造商有动机在减排投入方面采取技术创新等措施以降低成本,提高利润。

由命题 1、命题 5 和命题 6 可以看出,现阶段我国制造企业参与碳减排的积极性不高的原因之一是:在消费者减排偏好程度较低的国内现状下,政府征收碳税后,短期内企业减排大幅度地提高了自身的边际成本,并降低了产品的批发价格,以至于企业利润微薄甚至出现亏损。因此,政府在碳税政策实施初期应该对减排企业采取一些减税、补贴等激励手段以抵消减排投入所增加的成本。

5 算例分析

为更直观地了解其他一些关键因素对减排前后闭环供应链生产和回收策略的影响,下面围绕着政府征收的碳税 f_e 进行分析,以期对供应链运作和政府行为决策提供理论依据。

假设在碳税政策和消费者减排偏好的背景下,某钢铁制造企业与其零售商及废钢回收商建立了一个闭环供应链系统。根据企业以往的运营管理经验和调研得出主要参数数据如下:产品的基本价格 $\varphi_e = 6000$ 元/t,新产品的单位生产成本 $c_m = 3200$ 元/t,再制造产品的单位生产成本 $c_r = 1500$ 元/t,产品的碳排放比值 $\theta_e = 0.4$,消费者的减排偏好系数 $\lambda_e = 30$ 元/t,回收投资规模系数 $l_e = 8000$,减排投资规模系数 $\beta_e = 400$,新产品的原始单位碳排放量 $v_0 = 2.5$ t。取价格订购敏感系数 $\delta_e = 80$ 元/t 和废旧产品的单位回收成本 $A_e = 1200$ 元/t,政府征收的碳税 f_e (单位:元/t) 在 $[10, 50]$ 内变化,计算制造商无碳减排和进行碳减排时的产品单位碳减排量 v_e 、废旧产品回收率 τ_e 、零售商订购量 q_e 、制造商利润 Π_M 以及供应链系统效益 $\Pi_T (= \Pi_M + \Pi_R + \Pi_{3P})$,如图 1~图 5 所示。

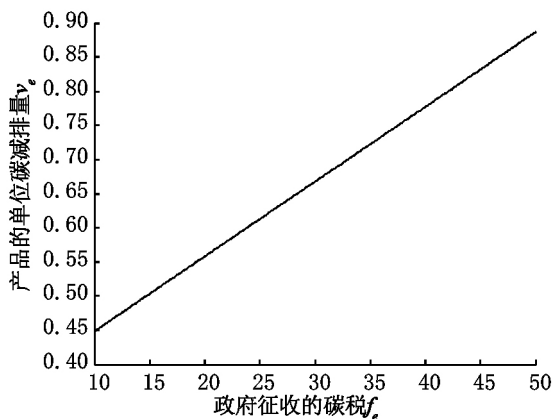


图1 碳税对产品单位碳减排量的影响

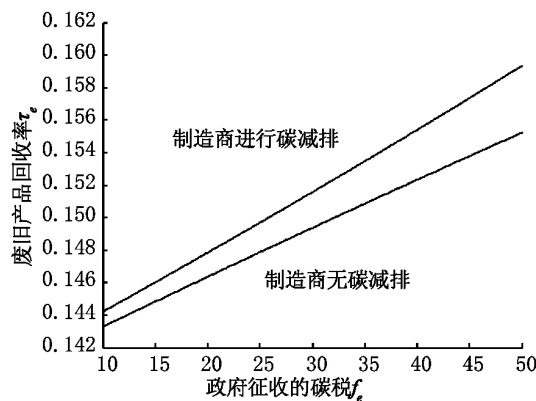


图2 碳税对废旧产品回收率的影响

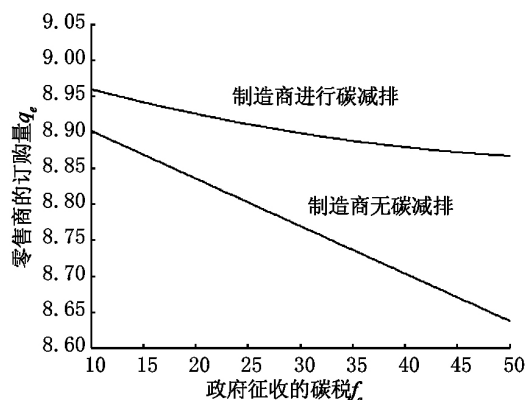


图3 碳税对零售商订购量的影响

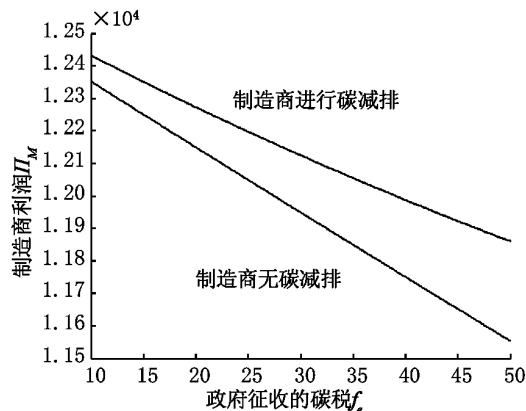


图4 碳税对制造商利润的影响

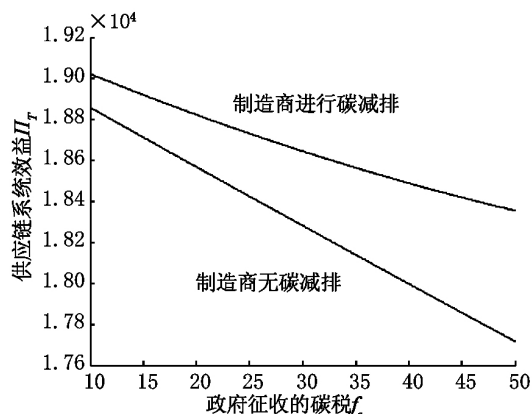


图5 碳税对供应链系统效益的影响

由图1~图5可以看出,随着碳税水平 f_e 的增大,产品的单位碳减排量 v_e 显著提高,且无论制造商进行碳减排还是制造商无碳减排,废旧产品的回收率 τ_e 均上升,零售商的订购量 q_e 均减少,制造商的利润 Π_M 和供应链系统的效益 Π_T 都呈下降的变化趋势。这意味着,政府征收碳税对制造商减少碳排放和参与回收再制造具有正向作用,但对制造商生产运作和供应链绩效却起到负面影响,即碳税政策有利于环境保护和资源再利用,而不利制造业的经济发展。因此,以目前我国制造企业自身竞争力和国民经济的发展水平来看,碳税水平的设定既要考虑碳减排的目标,又要照顾到企业的承受能力,在环境效益和经济效益之间达到有效平衡。

另一方面,碳税水平 f_e 越大,制造商进行碳减排后废旧产品的回收率 τ_e 提高越多,零售商订购产品的数量 q_e 增加越多,制造商的利润 Π_M 和供应链系统的效益 Π_T 增加的幅度均越大,即减排的效果越显著。这说明,政府对企业加大碳税的征收力度,有助于推动制造商降低碳排放量。

6 结论与建议

以碳减排为背景,运用博弈理论建立了闭环供应链的生产与回收决策模型,比较分析制造商减排前后产品的批发价格、废旧产品的回收率、产品的订购量以及供应链成员的利润,并通过数理模型和数值算例讨论消费者减排偏好系数、减排投资规模系数、碳税等因素对闭环供应链生产与回收策略的影响,得出如下主要结论:

1) 制造商减排后,废旧产品的回收率提升,产品的订购量增多,供应链成员的利润提高;

2) 碳减排对产品批发价格的影响取决于碳税水平和消费者减排偏好系数;当碳税水平低于消费者减排偏好系数时,制造商减排后产品的批发价格升高;当碳税水平高于消费者减排偏好系数时,制造商减排后产品的批发价格降低;

3) 消费者减排偏好系数的增大和减排投资规模系数的减小会使制造商提高产品的单位碳减排量,零售商增加产品的订购量以及回收商提升废旧产品的回收率;

4) 政府加大碳税的征收力度能够提高产品的单位碳减排量、提升废旧产品的回收率,但降低制造商的利润和供应链系统的绩效。

基于上述结论,对在我国碳减排实践中起关键作用的政府职能部门和供应链成员给出如下建议:

1) 给政府的建议。(i) 碳税在开始征收阶段采

取低税率。短期内政府征收碳税会降低市场需求量和企业的利润,对企业的经济增长带来较大的冲击,但从长远的发展来看,碳税是一个有效的环境经济政策工具,能够提高碳减排量和废旧产品的回收率,推动低碳经济的发展。在目前的国情下我国还不适合实施高税率的碳税政策,可以先试行采取低税率的征收方式,并对减排企业给予减税、补贴等经济激励,在探索中积累经验之后再逐步提高税率水平;

(ii) 加大力度提高消费者的环境保护意识。政府应积极向消费者宣传绿色环保知识,在社会上普及低碳消费观念,让公众在思想上深刻认识到环境保护对人类生存和发展是至关重要的。虽然这在短期内难以取得显著的效果,但对于发展绿色经济,实现政府、企业和消费者多方共赢来说是有利的长远之计;

(iii) 加强对企业减排技术创新的财政政策支持。减排技术研发的投入会增加企业的边际成本,降低企业碳减排的积极性,因此,政府对企业减排技术研发上提供补贴,能够缓解成本增加所产生的压力,进而更有效地推进绿色经济建设。

2) 给企业的建议。为有效应对碳税政策,制造商应集中资源和精力加大对减排技术研发的投入,以及努力提高供应链其它成员和消费者的低碳环保意识,并与合作伙伴之间建立稳定互利的关系,积极开展回收再制造业务和减少碳排放量活动,以减少废弃物对环境的危害和降低制造过程对环境的污染;零售商应充分发挥自身贴近消费者的优势,客观宣传低碳产品,做好售后服务,提高消费者对低碳产品的使用满意度,激发消费者购买低碳产品的欲望;回收商应结合自身专业化的特点,优化回收网络,降低回收成本,提高服务水平,想方设法地从消费者手中收购更多的废旧产品,形成规模效应。只有经过供应链成员多方共同协作,才能在保证环境效益的同时增加企业的经济效益,从而实现闭环供应链的和谐发展。

7 参考文献

- [1] 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.
- [2] Zhao Jinye, Hobbs B F, Pang Jongshe. Long-run equilibrium modeling of emissions allowance allocation systems in electric power markets [J]. Operations Research, 2010, 58(3): 529-548.
- [3] 常香云, 朱慧赟. 碳排放约束下企业制造/再制造生产决策研究 [J]. 科技进步与对策, 2012, 29(11): 75-78.

- [4] 申成然,熊中楷.碳排放约束下制造商再制造决策研究[J].系统工程学报,2014,29(4):537-549.
- [5] 赵道致,原白云,夏良杰,等.碳排放约束下考虑制造商竞争的供应链动态博弈[J].工业工程与管理,2014,19(1):65-71.
- [6] 常香云,王艺璇,朱慧赞,等.集成碳排放约束的企业制造/再制造生产决策[J].系统工程,2014,32(2):49-56.
- [7] 王拓.碳排放限制对再制造供应链的影响[D].成都:西南交通大学,2014.
- [8] 张婷,蔡海生,王晓明.土地利用变化的碳排放机理及效应研究综述[J].江西师范大学学报:自然科学版,2013,37(1):93-100.
- [9] D'Aspremont C, Jacquemin A. Cooperative and noncooperative R&D in duopoly with spillovers[J]. American Economic Review, 1988, 78(5): 1133-1137.
- [10] 于维生,张志远.中国碳税政策可行性与方式选择的博弈研究[J].中国人口·资源与环境,2013,23(6):8-15.
- [11] Chitra K. In search of the green consumers: A perceptual study[J]. Journal of Services Research, 2007, 7(1): 173-191.
- [12] Ray S, Jewkes E M. Customer lead time management when both demand and price are lead time sensitive[J]. European Journal of Operational Research, 2004, 153(3): 769-781.
- [13] Tsay A A. The quantity flexibility contract and supplier-customer incentives[J]. Management Science, 1999, 45(10): 1339-1358.
- [14] Savaskan R C, Bhattacharya A, Van Wassenhove L N. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing[J]. Management Science, 2004, 50(2): 239-252.
- [15] Sarkis J. A strategic decision framework for green supply chain management[J]. Journal of Cleaner Production, 2003, 11(4): 397-409.
- [16] Vachon S, Klassen R D. Supply chain management and environmental technologies: the role of integration[J]. International Journal of Production Research, 2007, 45(2): 401-423.
- [17] Vorasayan J, Ryan S M. Optimal price and quantity of refurbished products[J]. Production and Operations Management, 2006, 15(3): 369-383.
- [18] Webster S, Mitra S. Competitive strategy in remanufacturing and the impact of take-back law[J]. Journal of Production Management, 2007, 25(6): 1123-1140.
- [19] Harris I, Naim M, Palmer A, et al. Assessing the impact of cost optimization based on infrastructure modeling on CO₂ emissions[J]. International Journal of Production Economics, 2011, 131(1): 313-321.
- [20] Chaabane A, Ramudhin M, Paquet M. Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme[J]. International Journal of Production Economics, 2012, 135(1): 175-185.
- [21] Subramanian R, Gupta S, Talbot B. Compliance strategies under permits for emissions[J]. Production and Operation Management, 2007, 16(6): 763-779.

The Production and Recycling Strategy for Closed-Loop Supply Chain at the Background of Carbon Emission Reduction

ZENG Jianfeng^{1,2}, LIU Jian²

(1. Journal of Periodical Office, Jiangxi Normal University, Nanchang Jiangxi 330027, China;

2. School of Information Management, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang Jiangxi 330032, China)

Abstract: Based on carbon tax and consumers' low-carbon awareness, the manufacturer Stackelberg model for both reducing and no reducing carbon emission scenarios is proposed, which closed-loop supply chain consists of a manufacturer, a retailer and a recycler. The optimal strategies of closed-loop supply chain are obtained. Then, the equilibrium solutions and profits are contrasted in two scenarios, and the influences of carbon tax are analyzed by some numerical examples. The result shows that it is effective countermeasures for carbon tax that the manufacturer reduces carbon emission, and when carbon tax is lower than consumers' low-carbon awareness, the retailer's order quantity doesn't decrease because of advancing the wholesale price, but increases. The increase of consumers' low-carbon awareness and the decrease of the investment-reduce-emission scaling parameter both can increase emission reduction, production quantity and recycling rate. The unit emission reduction and the recycling rate of used products are increased with the increasing of carbon tax, while the manufacturer's profit and the supply chain's performance are declined.

Key words: closed-loop supply chain; carbon emission reduction; Stackelberg game; carbon tax

(责任编辑:王金莲)