

碳交易及补贴机制下供应链差别定价研究

缪文清¹, 沈炳良²

(1. 上海财经大学浙江学院 工商管理系, 浙江 金华 321013; 2. 上海财经大学浙江学院 公共基础部, 浙江 金华 321013)

摘要:研究了碳交易机制、补贴机制以及碳交易及补贴机制下, 一个二级供应链中普通产品和低碳产品竞争的差别定价策略, 通过求解Stackelberg博弈模型得出单一的补贴政策并不能激励制造商进行节能减排, 应与碳交易机制结合使用, 其节能减排效果优于单一的碳交易机制。最后通过一个算例分析验证了碳交易及补贴机制的有效性。研究表明: 碳交易价格升高到一定程度时, 普通产品的零售价批发价均升高, 低碳产品的价格均下降, 普通产品的销量下降, 低碳产品销量上升, 碳排放总量下降; 随着低碳补贴的增加, 普通产品的零售价, 低碳产品的批发价、零售价均降低, 普通产品的销量下降, 低碳产品的销量上升, 其中低碳产品的价格和需求对低碳补贴的反应更加敏感, 使碳排放量降低的同时还提高了制造商和零售商的利润。

关键词:碳交易; 低碳补贴; 供应链; 差别定价策略; 减排

中图分类号:C934 **文献标志码:**A **文章编号:**1002—980X(2020)9—0185—

大量的二氧化碳排放会造成环境污染、气候变化等不可逆的破坏, 联合国呼吁全球各国应加大减排努力并统一碳排放规则。我国为实现2030年碳排放的达峰目标, 在降低二氧化碳排放方面力度加大, 例如, 2017年12月, 发布了《全国碳排放权交易市场建设方案(发电行业)》; 2019年3月, 发布了《碳排放权交易管理暂行条例(征求意见稿)》(《条例》), 并在全国范围内开展碳配额和管理系列培训等, 通过以上措施逐步建立全国统一的碳交易市场, 旨在通过市场需求确定碳交易价格, 调整企业碳排放量, 促进企业绿色生产, 达到节能减排的目的。

在碳交易机制下, 碳排放权和企业其他资源一样可以交易, 从而改变企业的成本与利润构成。在此背景下, 制造商通过技术革新降低二氧化碳排放, 需要独立承担技术革新的成本, 基于制造商为理性人的假设, 其在无政府干预的情况下, 制造商为利润最大化, 必定会选择不进行节能减排, 因此政府可通过限制其碳排放额或对于低碳产品给予补贴, 对其进行奖惩, 以促进制造商进行技术革新。

一、文献综述

目前对于碳交易的研究分为以下几类。第一, 碳交易机制下企业的生产经营活动, 包括企业的最优生产数量、订货批量、碳排放权的交易数量等^[1-3]; Yenipazarli^[4]研究了碳交易机制下企业如何生产再造以降低碳排放量减少环境污染。第二, 碳交易机制下供应链的决策, 包括供应链上、下游企业的生产数量、定价、利润以及供应链整体的利润、碳排放总量等^[5-7]。Caro等^[8]研究了供应链中上下游企业合作减排的最佳比例。马秋卓等^[9]将供应商和制造商分为高排放和低排放型企业, 分别购买和出售碳排放权, 利用超网络模型研究了有、无碳交易情况下的产量、价格以及供应链整体效益。谢鑫鹏和赵道致^[10]研究了一个大型国有制造商和一个具备一定生产能力的零售商在完全不合作、半合作和完全合作时的产品价格、最优利润、碳排放总量以及社会福利等, 得出完全合作能够提高减排效率和利润。盛丽丽^[11]利用收益共享契约对损失厌恶型供应链进行协调, 确定最优订货批量和定价。杨磊^[12]将电子渠道引入到供应链分销模型, 分析了4种不同渠道下企业的最优决策。王道平^[13]采用shapley值法对碳交易机制下的普通产品和低碳产品制造商存在竞争的供应链进行协调。

关于低碳补贴的研究, 高举红^[14]对比了补贴、碳税以及补贴和碳税机制对三级闭环供应链的影响, 得出补贴和碳税机制既能增加供应链各成员的利润, 又能够提高回收率, 降低碳排放总量。朱庆华^[15]分析了普

收稿日期: 2020—03—26

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目“Hopf代数及其作用的同调性质的若干研究”(11601486); 2018年浙江省教育厅一般项目“基于变量回路法的D运输问题模型及解法研究”(Y201840041); 2019年度上海财经大学浙江学院发展基金项目“基于碳交易的供应链企业减排及定价策略分析”(2019GR010)

作者简介:缪文清(1987—), 女, 江西玉山人, 硕士, 上海财经大学浙江学院讲师, 研究方向: 供应链管理; 沈炳良(1981—), 男, 浙江德清人, 博士后, 上海财经大学浙江学院副教授, 研究方向: 数学。

通产品和低碳产品制造商在不同政府补贴模式下竞争状况。李友东^[16]分析了政府补贴机制下供应链成员参与合作减排的成本分摊模型。曹细玉^[17]研究了随机需求下,考虑低碳补贴、碳税以及消费者低碳偏好的供应链协调模型。张海咪^[18]将碳交易与补贴结合,在假设新产品与再制品同质的情况下,分析了碳交易、补贴以及碳交易和补贴政策对供应链的利润、回收率、碳排放量以及产品价格的影响。

我国建立全国性的碳交易市场已经势在必行,但是目前对于碳减排的研究大多集中于碳交易和征收碳税^[19-24],而研究低碳补贴的较少,同时研究碳交易以及低碳补贴的则更少,并且现有的文献大多认定新产品与再制品无差别,价格相同。本文从碳交易及低碳补贴的角度研究了供应链中普通产品与低碳产品的差别定价模型,对企业节能减排和政府确定碳排放配额以及制定低碳补贴政策具有一定的借鉴意义。

二、问题描述与假设

本文研究了一个制造商和一个零售商组成的二级供应链,建立 Stackelberg 博弈模型,制造商为领导者,零售商为跟随者。供应链的利润为 π ,制造商和零售商的利润分别用 π_m 和 π_r 表示,制造商生产普通产品和低碳产品,两种产品是有差别的,制造商分别以 w_1 、 w_2 的价格批发给零售商,零售商的零售价分别为 p_1 、 p_2 , $p_2 > p_1$,制造商生产两种产品的成本为 c_1 、 c_2 ,由于低碳产品的生产技术尚不成熟,所以 $c_2 > c_1$ 。

在企业只生产普通产品,此时市场的需求量为 $Q = \alpha - \beta p_1$,通过技术革新,增加低碳产品的生产,低碳产品的需求量为 $Q_2 = \alpha - \beta p_2$,而市场的总需求量不变,普通产品与低碳产品具有竞争的关系,此时普通产品的需求量为 $Q_1 = \beta(p_2 - p_1)$,即消费者具有低碳偏好,在普通产品和低碳产品价格相同时会选择购买低碳产品,此时普通产品无人购买,需求量为 0。为了计算方便,令 $\alpha = 1$, $\beta = 1$,即在一定范围内,产品的市场容量为 1,低碳产品的需求量为 $Q_2 = 1 - p_2$,普通产品的需求量为 $Q_1 = p_2 - p_1$ 。在碳限额政策下,政府给予制造商的碳排放额度为 E_g ,普通产品的单位碳排放量为 e_1 ,通过技术革新后生产的,企业可以通过碳交易市场购买或出售碳排放权,单位碳排放权的交易价格为 p_c ,也可通过技术革新生产低碳产品,低碳产品的单位碳排放量为 e_2 ($e_2 < e_1$),单位产品的碳减排量为 e ($0 < e < e_1$),此时技术革新的成本为 $\frac{1}{2}\varepsilon e^2$, ε 为投资成本系数,企业总的碳排放量为 E 。同时政府为鼓励制造商多生产低碳产品,也可对每单位低碳产品给予补贴 s 。

三、模型的建立与分析

(一)碳交易机制下供应链定价决策

在此二级供应链中,制造商为领导者,从利润最大化的角度优先做出决策,之后零售商在制造商决策的基础上做出对其最有利的决策。决策的过程中双方的信息是透明的、对称的,则制造商的利润函数为

$$\pi_m = (w_1 - c_1)Q_1 + (w_2 - c_2)Q_2 - \frac{1}{2}\varepsilon e^2 - p_c[e_1Q_1 + (e_1 - e)Q_2 - E_g] \quad (1)$$

其中:第一项为制造商出售普通产品的收入;第二项为制造商出售低碳产品的收入;第三项为制造商技术革新的投入;第四项为制造商进行碳交易的收入或成本;当 $e_1Q_1 + (e_1 - e)Q_2 - E_g > 0$ 时,即制造商的实际碳排放大于政府限额,需要到碳交易市场购买碳排放权差额;当 $e_1Q_1 + (e_1 - e)Q_2 - E_g < 0$ 时,即制造商的实际碳排放小于政府限额,其可以出售多余的碳排放权。

相应的,零售商的利润函数为

$$\pi_r = (p_1 - w_1)Q_1 + (p_2 - w_2)Q_2 \quad (2)$$

采用逆向归纳法先对零售商的利润函数求极值,其海塞矩阵为

$$H_{(\pi_r)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 \pi_r}{\partial p_1^2} & \frac{\partial^2 \pi_r}{\partial p_1 \partial p_2} \\ \frac{\partial^2 \pi_r}{\partial p_2 \partial p_1} & \frac{\partial^2 \pi_r}{\partial p_2^2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -2 & 1 \\ 1 & -2 \end{vmatrix} \quad (3)$$

$|H_{(\pi_r)}| = 3 > 0$, $-2 < 0$,因此 $H_{(\pi_r)}$ 为负定矩阵, π_r 存在局部极大值,分别对 p_1 、 p_2 求偏导,得到

$$\frac{\partial \pi_r}{\partial p_1} = p_2 - 2p_1 + w_1 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \pi_r}{\partial p_2} = p_1 - 2p_2 - w_1 + w_2 + 1 \quad (5)$$

令 $\frac{\partial \pi_r}{\partial p_1} = 0, \frac{\partial \pi_r}{\partial p_2} = 0$, 求得

零售商的零售价为

$$\begin{cases} p_1 = \frac{w_1 + w_2 + 1}{3} \\ p_2 = \frac{2w_2 - w_1 + 2}{3} \end{cases} \quad (6)$$

将公式(6)代入到式(1)中, 得到制造商的利润函数为

$$\pi_m = (w_1 - c_1) \frac{1 + w_2 - 2w_1}{3} + (w_2 - c_2) \frac{1 + w_1 - 2w_2}{3} - \frac{1}{2} \varepsilon e^2 - p_c \left[e_1 \frac{1 + w_2 - 2w_1}{3} + (e_1 - e) \frac{1 + w_1 - 2w_2}{3} - E_g \right] \quad (7)$$

其对应的海塞矩阵为

$$H_{(\pi_m)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 \pi_m}{\partial w_1^2} & \frac{\partial^2 \pi_m}{\partial w_1 \partial w_2} \\ \frac{\partial^2 \pi_m}{\partial w_2 \partial w_1} & \frac{\partial^2 \pi_m}{\partial w_2^2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -\frac{4}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & -\frac{4}{3} \end{vmatrix} \quad (8)$$

$|H_{(\pi_m)}| = \left(-\frac{4}{3}\right)^2 - 1^2 = \frac{1}{9} > 0, -\frac{4}{3} < 0, H_{(\pi_m)}$ 为负定矩阵, π_m 有局部极大值, 将制造商的利润函数分别对普

通产品和低碳产品的批发价求一阶偏导, 并令其等于 0, 得到

$$\begin{cases} \frac{\partial \pi_m}{\partial w_1} = \frac{1 + 2w_2 - 4w_1 + 2c_1 - c_2 + 2p_c e_1 - p_c(e_1 - e)}{3} = 0 \\ \frac{\partial \pi_m}{\partial w_2} = \frac{1 + 2w_1 - 4w_2 - c_1 + 2c_2 - p_c e_1 + 2p_c(e_1 - e)}{3} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} w_1^* = \frac{1 + c_1 + p_c e_1}{2} \\ w_2^* = \frac{1 + c_2 + p_c e_1 - p_c e}{2} \end{cases} \quad (10)$$

将公式(10)代入到公式(6)中, 得到零售商的零售价为

$$\begin{cases} p_1^* = \frac{4 + c_1 + c_2 + 2p_c e_1 - p_c e}{6} \\ p_2^* = \frac{5 - c_1 + 2c_2 + p_c e_1 - 2p_c e}{6} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} Q_1^* = \frac{1 - 2c_1 + c_2 - p_c e_1 - p_c e}{6} \\ Q_2^* = \frac{1 + c_1 - 2c_2 - p_c e_1 + 2p_c e}{6} \end{cases} \quad (12)$$

将公式(11)、公式(12)代入到制造商利润函数中, 求其对减排量 e 的一阶导数, 并令其等于 0, 得到最优利润下的单位低碳产品最优减排量 e^* :

$$\frac{\partial \pi_m}{\partial e} = \frac{c_1 p_c - 2c_2 p_c + 2p_c^2 e + p_c - p_c^2 e_1}{6} - \varepsilon e = 0$$

$$e^* = \frac{p_c^2 e_1 - p_c + 2c_2 p_c - c_1 p_c}{2p_c^2 - 6\varepsilon} \quad (13)$$

为保证供应链的效率,假设 $2p_c^2 - 6\varepsilon < 0$, 则 $p_c^2 e_1 - p_c + 2c_2 p_c - c_1 p_c < 0$, 为了计算方便,令 $2p_c^2 - 6\varepsilon = J$, $p_c^2 e_1 - p_c + 2c_2 p_c - c_1 p_c = K$ 。

推论 1: 碳交易机制下,单位低碳产品的最优碳减排量随着投资成本系数的增加而减少,即 ε 越大, e^* 越小。

证明: $\frac{\partial e^*}{\partial \varepsilon} = \frac{6(p_c^2 e_1 - p_c + 2c_2 p_c - c_1 p_c)}{(2p_c^2 - 6\varepsilon)^2}$, 因为 $p_c^2 e_1 - p_c + 2c_2 p_c - c_1 p_c < 0$, 所以 $\frac{\partial e^*}{\partial \varepsilon} < 0$, 最优单位碳减排

量与投资成本系数负相关。投资成本系数越高,制造商在技术革新方面的投入一定的情况下,其效用转化率越低,单位产品的最优碳减排量越低,制造商想提高单位产品的碳减排量,必须要在技术革新方面增加投资。

将公式(13)代入公式(1)、公式(2)即得到制造商和零售商的最大收益 $\pi_m^* \pi_r^*$ 。

(二) 补贴机制下供应链定价决策

企业为鼓励制造商节能减排,提高低碳产品的比例,对低碳产品进行补贴,此时制造商的利润为 $\pi_m = (w_1 - c_1)Q_1 + (w_2 - c_2 + s)Q_2 - \frac{1}{2}\varepsilon e^2$, 零售商的利润函数为 $\pi_r = (p_1 - w_1)Q_1 + (p_2 - w_2)Q_2$ 。

推论 2: 单一的低碳补贴政策不能促进企业节能减排。

当制造商的利润最大时,求其对应的最优碳减排量 e , 用制造商的利润函数对 e 求一阶导,并令其等于 0, 得到最优减排量。即令 $\frac{\partial \pi_m}{\partial e} = -\varepsilon e = 0$, 则 $e^* = 0$ 。节能减排需要制造商进行技术革新,需要大笔资金的投入,最优碳减排量为 0 表示制造商为追求利润最大化,在政府没有强制措施时,会选择不进行技术创新的投入,不会选择投资减排,不生产低碳产品,只生产普通产品,所以单一的政府低碳补贴政策并不能激励制造商,对于企业低碳化没有作用。

(三) 碳交易及政府补贴机制下供应链定价决策

实际情况中政府经常会采用多种政策同时实行,碳减排背景下可同时实行碳交易和低碳补贴政策,此时制造商的利润函数为

$$\pi_m = (w_1 - c_1)Q_1 + (w_2 - c_2 + s)Q_2 - \frac{1}{2}\varepsilon e^2 - p_c[e_1 Q_1 + (e_1 - e)Q_2 - E_g] \quad (14)$$

零售商的利润函数为

$$\pi_r = (p_1 - w_1)Q_1 + (p_2 - w_2)Q_2 \quad (15)$$

$$H_{(\pi_r)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 \pi_r}{\partial p_1^2} & \frac{\partial^2 \pi_r}{\partial p_1 \partial p_2} \\ \frac{\partial^2 \pi_r}{\partial p_2 \partial p_1} & \frac{\partial^2 \pi_r}{\partial p_2^2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -2 & 1 \\ 1 & -2 \end{vmatrix}$$

$|H_{(\pi_r)}| = 5 > 0$, $-2 < 0$, 因此 $H_{(\pi_r)}$ 为负定矩阵, π_r 存在局部极大值, 分别对 p_1, p_2 求偏导, 得到

$$\frac{\partial \pi_r}{\partial p_1} = p_2 - 2p_1 + w_1$$

$$\frac{\partial \pi_r}{\partial p_2} = p_1 - 2p_2 - w_1 + w_2 + 1$$

令 $\frac{\partial \pi_r}{\partial p_1} = 0$, $\frac{\partial \pi_r}{\partial p_2} = 0$, 求得零售商的零售价为

$$\begin{cases} p_1 = \frac{w_1 + w_2 + 1}{3} \\ p_2 = \frac{2w_2 - w_1 + 2}{3} \end{cases} \quad (16)$$

将其代入制造商的利润函数,其海塞矩阵为

$$H_{(\pi_m)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 \pi_m}{\partial w_1^2} & \frac{\partial^2 \pi_m}{\partial w_1 \partial w_2} \\ \frac{\partial^2 \pi_m}{\partial w_2 \partial w_1} & \frac{\partial^2 \pi_m}{\partial w_2^2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -\frac{4}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & -\frac{4}{3} \end{vmatrix}$$

$|H_{(\pi_m)}| = \left(-\frac{4}{3}\right)^2 - 1^2 = \frac{15}{9} > 0, -\frac{4}{3} < 0, H_{(\pi_m)}$ 为负定矩阵, π_m 有局部极大值,将制造商的利润函数分别对普通产品和低碳产品的批发价求一阶偏导,并令其等于0,求解得

$$\begin{cases} w_1^* = \frac{1 + c_1 + p_c e_1}{2} \\ w_2^* = \frac{1 + c_2 - s + p_c e_1 - p_c e}{2} \end{cases} \quad (17)$$

将公式(17)代入公式(16),得到

$$\begin{cases} p_1^* = \frac{4 + c_1 + c_2 + 2p_c e_1 - p_c e - s}{6} \\ p_2^* = \frac{5 - c_1 + 2c_2 + p_c e_1 - 2p_c e - 2s}{6} \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} Q_1^* = \frac{1 - 2c_1 + c_2 - p_c e_1 - p_c e - s}{6} \\ Q_2^* = \frac{1 + c_1 - 2c_2 - p_c e_1 + 2p_c e + 2s}{6} \end{cases} \quad (19)$$

将公式(18)、公式(19)代入制造商的利润函数中,求其对减排量 e 的一阶导,令其为0,得

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi_m}{\partial e} &= \frac{c_1 p_c - 2c_2 p_c + 2p_c^2 e + p_c - p_c^2 e_1 + 2p_c s}{6} - \varepsilon e = 0 \\ e^{**} &= \frac{p_c^2 e_1 - p_c + 2c_2 p_c - c_1 p_c - 2p_c s}{2p_c^2 - 6\varepsilon} \end{aligned}$$

推论3:碳交易及政府补贴机制下,单位产品的最优碳减排量与投资成本系数负相关。

证明: $\frac{\partial e^{**}}{\partial \varepsilon} = \frac{6(p_c^2 e_1 - p_c + 2c_2 p_c - c_1 p_c - 2p_c s)}{(2p_c^2 - 6\varepsilon)^2}$, 因为 $p_c^2 e_1 - p_c + 2c_2 p_c - c_1 p_c - 2p_c s < 0$, 所以 $\frac{\partial e^{**}}{\partial \varepsilon} < 0$, 最

优碳减排量与投资成本系数负相关,随着投资成本系数的增加而减少,即 ε 越大, e^{**} 越小。投资成本系数越大,制造商在技术革新投入一定的情况下,所起的作用越小,碳减排量则越小。

推论4:碳交易及政府补贴机制下,单位产品的最优碳减排量与低碳补贴正相关。

证明: $\frac{\partial e^{**}}{\partial s} = \frac{-2p_c}{2p_c^2 - 6\varepsilon}$, 因为 $2p_c^2 - 6\varepsilon < 0$, 所以 $\frac{\partial e^{**}}{\partial s} > 0$, e^{**} 与 s 正相关。 s 越大, e 越大。政府对于低碳产

品的补贴力度越大,对制造商的节能减排越有激励作用,能够促使制造商为了获得更大的利润,加大节能减排力度。同时补贴力度加大,制造商会有更多的资金用于低碳产品的技术革新,提高单位低碳产品的碳减排量,进入节能减排的良性循环。

推论5:碳交易及政府补贴机制下,普通产品的批发价与政府的低碳补贴无关;普通产品的零售价,低碳产品的批发价和零售价、普通产品的需求量均与政府补贴呈负相关;低碳产品的需求量与政府补贴正相关。

证明: $w_1^* = \frac{1 + c_1 + p_c e_1}{2}$, 与 s 无关。

$$w_2^{**} = \frac{1 + c_2 - s + p_c e_1 - p_c e}{2} = \frac{1 + c_2 - s + p_c e_1 - p_c \left(\frac{K - 2p_c s}{J}\right)}{2}$$

$\frac{\partial w_2^{**}}{\partial s} = \frac{3\varepsilon}{J} < 0$, 所以低碳产品的批发价与政府补贴负相关,即政府补贴越高,批发价越低。低碳补贴越

高,对制造商生产低碳产品的激励越大,制造商为获取更多补贴,生产更多的低碳产品,只有降低价格,才能使其迅速打开市场,同时低碳补贴可以弥补制造商生产低碳产品的成本,因此批发价降低。

$$p_1^{**} = \frac{4 + c_1 + c_2 + 2p_c e_1 - p_c e - s}{6} = \frac{4 + c_1 + c_2 + 2p_c e_1 - p_c \left(\frac{K - 2p_c s}{J} \right) - s}{6}$$

$\frac{\partial p_1^{**}}{\partial s} = \frac{\varepsilon}{J} < 0$, 所以普通产品的零售价与政府补贴负相关,即政府补贴越高,普通产品的零售价越低。

$$p_2^{**} = \frac{5 - c_1 + 2c_2 + p_c e_1 - 2p_c e - 2s}{6} = \frac{5 - c_1 + 2c_2 + p_c e_1 - 2p_c \left(\frac{K - 2p_c s}{J} \right) - 2s}{6}$$

$\frac{\partial p_2^{**}}{\partial s} = \frac{3\varepsilon}{J} < 0$, 所以低碳产品的零售价与政府补贴负相关,即补贴越高,低碳产品的零售价越低。可见,随着政府补贴的增加,两种产品的零售价均有下降,低碳产品的零售价对补贴的反应更敏感,降幅更大。低碳产品的批发价降低,对于零售商来说是成本降低了,零售商也通过降低其价格来扩大销量。普通产品面对低碳产品的激烈竞争,只能相应地降价。

$$Q_1^{**} = \frac{1 - 2c_1 + c_2 - p_c e_1 - p_c e - s}{6} = \frac{1 - 2c_1 + c_2 - p_c e_1 - p_c \left(\frac{K - 2p_c s}{J} \right) - s}{6}$$

$\frac{\partial Q_1^{**}}{\partial s} = \frac{\varepsilon}{J} < 0$, 所以普通产品的需求量与政府补贴负相关,即补贴越高,普通产品的需求量越低。

$$Q_2^{**} = \frac{1 + c_1 - 2c_2 - p_c e_1 + 2p_c e + 2s}{6} = \frac{1 + c_1 - 2c_2 - p_c e_1 + 2p_c \left(\frac{K - 2p_c s}{J} \right) + 2s}{6}$$

$\frac{\partial Q_2^{**}}{\partial s} = -\frac{2\varepsilon}{J} > 0$, 所以低碳产品的需求量与政府补贴正相关,即政府补贴越高,低碳产品的需求量越大。

政府补贴增加后,企业为了获得更多的利润,普通产品和低碳产品的价格都会降低,总需求量增加,而低碳产品的价格降幅更大,并且消费者都具有低碳偏好,则低碳产品的需求量增加更多,普通产品的需求量下降。

(四) 比较分析

因单一的低碳补贴政策并不能促进企业节能减排,因此,在此只对碳交易机制下的供应链决策与碳交易及补贴下的供应链决策进行比较分析。

推论 6: 碳交易机制下,增加政府补贴后,单位低碳产品的碳减排量提高了。低碳产品的批发价、零售价,普通产品的零售价都降低了,普通产品的批发价不变。低碳产品的需求量提高了,普通产品的需求量降低了。

$$e^{**} - e^* = \frac{-2p_c s}{2p_c^2 - 6\varepsilon} > 0, w_2^{**} - w_2^* = \frac{3\varepsilon s}{J} < 0, p_1^{**} - p_1^* = \frac{\varepsilon s}{J} < 0, p_2^{**} - p_2^* = \frac{3\varepsilon s}{J} < 0, Q_1^{**} - Q_1^* = \frac{\varepsilon s}{J} < 0, \\ Q_2^{**} - Q_2^* = -\frac{2\varepsilon s}{J} > 0$$

推论 7: 当 $2p_c B J + 4p_c^2 K + 12\varepsilon K - 6\varepsilon e_1 J < 0$ 时,政府的低碳补贴可以降低制造商的碳排放量,并且随着补贴的增加,碳排放量降低的越多。

证明: 令 $1 - 2c_1 + c_2 - p_c e_1 = A, 1 + c_1 - 2c_2 - p_c e_1 = B$, 无政府低碳补贴的情况下,制造商最大利润时的碳排放量为

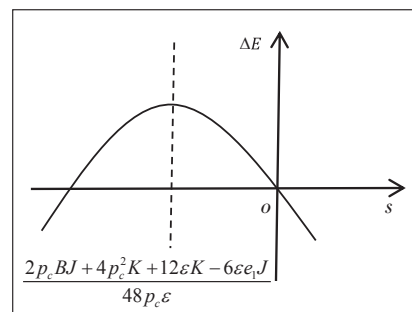
$$E_1 = e_1 \frac{A - p_c \frac{K}{J}}{6} + \left(e_1 - \frac{K}{J} \right) \frac{B + 2p_c \frac{K}{J}}{6}$$

有低碳补贴时,制造商的碳排放量为

$$E_2 = e_1 \frac{A - p_c \frac{K - 2p_c s}{J} - s}{6} + \left(e_1 - \frac{K - 2p_c s}{J} \right) \frac{B + 2p_c \frac{K - 2p_c s}{J} + 2s}{6}$$

$$\Delta E = E_2 - E_1 = e_1 \frac{2p_c^2 s - Js}{6} + \left(e_1 - \frac{K}{J} \right) \left(-\frac{12\epsilon s}{6J} \right) + \frac{2p_c s}{J} \frac{B + 2p_c \frac{K - 2p_c s}{J} + 2s}{6} = -e_1 \frac{\epsilon s}{J} + \frac{K}{J} \frac{2\epsilon s}{J} + \frac{2p_c s}{J} \frac{B + 2p_c \frac{K - 2p_c s}{J} + 2s}{6} = \frac{-6\epsilon e_1 s + 12\epsilon K s + 2p_c B J s + 4p_c^2 K s - 24p_c s^2}{6J^2}$$

对 s 求二阶导数, 得到 $\frac{\partial \Delta E}{\partial s} = \frac{-48p_c}{6J^2} < 0$, ΔE 在 $s = \frac{2p_c B J + 4p_c^2 K + 12\epsilon K - 6\epsilon e_1 J}{48p_c \epsilon}$ 时有最大值, ΔE 是关于 s 的凹函数, 当 $s = 0$ 时, $\Delta E = 0$, 所以当 $2p_c B J + 4p_c^2 K + 12\epsilon K - 6\epsilon e_1 J < 0$, $s > 0$ 时, $\Delta E < 0$, ΔE 与 s 凹性负相关, 如图 1 所示。碳排放总量随着政府低碳补贴的升高而减少, 并且减速加快。政府的低碳补贴越高, 对制造商生产低碳产品的激励越大, 同时可投入到技术革新的资金越多, 低碳产品的低碳化程度越高, 消费者具有低碳偏好, 低碳产品的需求量越大, 普通产品的需求量越低, 总的碳排放量减少。


 图 1 ΔE 函数图

四、算例分析

假设供应链由一个制造商和一个零售商组成, 利用 MATLAB 软件对算例进行分析, 为计算方便, 令 $c_1 = 0.1$, $c_2 = 0.2$, $\epsilon = 0.5$, $p_c = 1$, $e_1 = 0.5$, $E_g = 0.05$, 没有政府补贴及 $s = 0.05$ 时的均衡解见表 1。

当其他条件不变, $\epsilon \in \left(\frac{1}{3}, \frac{1}{2}\right)$ 时, 最优减排量的取值如图 2 所示。最优碳减排量与投资成本系数成凸性负相关, 投资成本系数越大, 最优碳减排量越小, 验证了推论 1 和推论 3, 并且政府给予低碳补贴时的最优碳排放量高于无补贴的情况, 验证了推论 6。

(一) 最优决策与碳交易价格的关系

如图 3 所示, 碳交易及政府补贴机制下, 当其他条件不变时, 由 $0 < e^* < e_1$, $p_2 > p_1$, 得 $p_c \in (0, 1.1)$, 此时最优碳减排量与碳交易价格正相关, 随着碳交易价格的上升而增加, 并且增速加快。碳交易价格越高, 制造商通过碳交易市场获取利润的激励效果越大, 制造商更有动力去减能减排, 同时从碳交易市场获取的利润也能够补贴技术革新方面的支出, 能有更多的资金进行技术革新, 导致最优碳减排量升高。

表 1 均衡结果表

均衡解	无补贴 ($s=0$)	补贴 $s = 0.05$
e^*	0.2	0.3
w_1^*	0.8	0.8
w_2^*	0.75	0.675
p_1^*	0.85	0.825
p_2^*	0.9	0.85
Q_1^*	0.05	0.025
Q_2^*	0.1	0.15
E	0.055	0.0425
π_m^*	0.075	0.08125
π_r^*	0.0175	0.026875
π	0.0925	0.108125

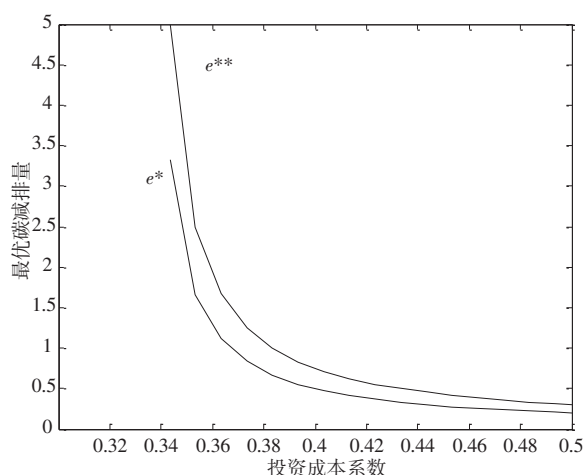


图 2 最优碳减排量与投资成本系数关系图

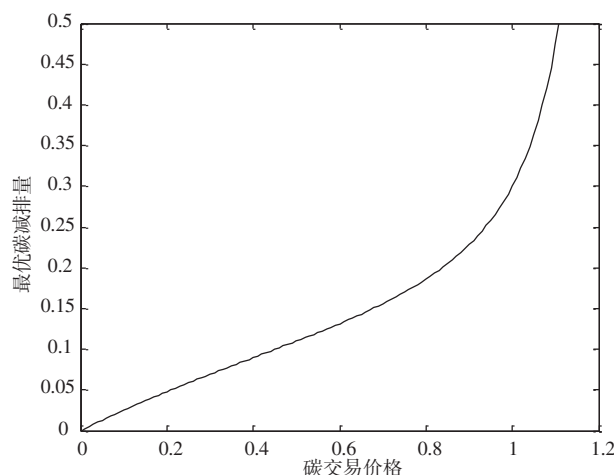


图 3 最优碳减排量与碳交易价格关系图

图4-图6为两种产品的批发价、零售价以及需求量与碳交易价格的关系。碳交易及补贴机制下,其他条件不变时,普通产品的批发价与碳交易价格正相关,低碳产品的批发价随着碳交易价格的上升先增加后降低。碳交易价格上升后,企业为了获取更多利润而降低碳排放量,在技术革新方面增加投入,技术革新的成本将分摊到每一个低碳产品上,因此低碳产品的批发价不断上升,而随着企业低碳产品生产规模的扩大,达到规模效应,技术革新分摊到每一个低碳产品上的成本开始下降,因此低碳产品的批发价先增加后减少,低碳产品的零售价也相应先增加后降低,其需求量对应地先降低后增加。同时,随着碳交易成本的增加,普通产品的单位碳排放量不变,其购买碳排放权的成本就越高,导致普通产品的批发价不断上升,相应的,普通产品的零售价也不断上升,与低碳产品的价格差不断减小,消费者具有低碳偏好,导致普通产品的需求量不断减少。

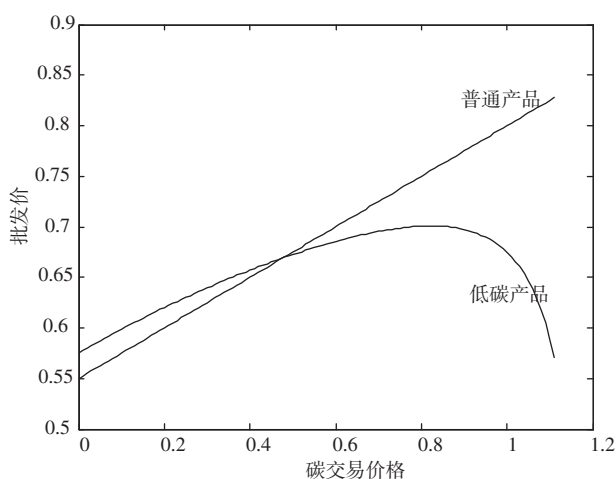


图4 两种产品的批发价与碳交易价格的关系

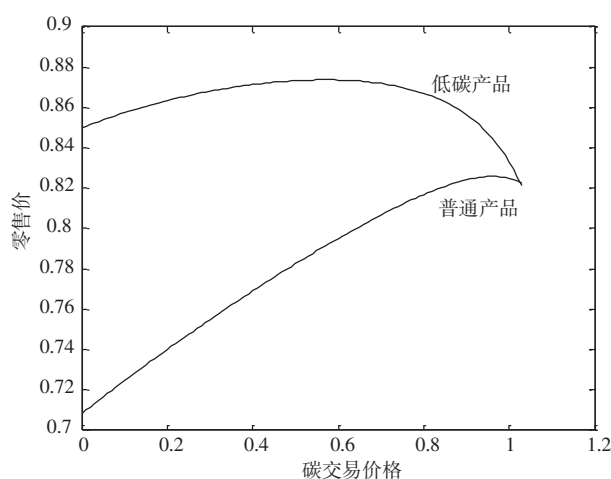


图5 两种产品的零售价与碳交易价格的关系

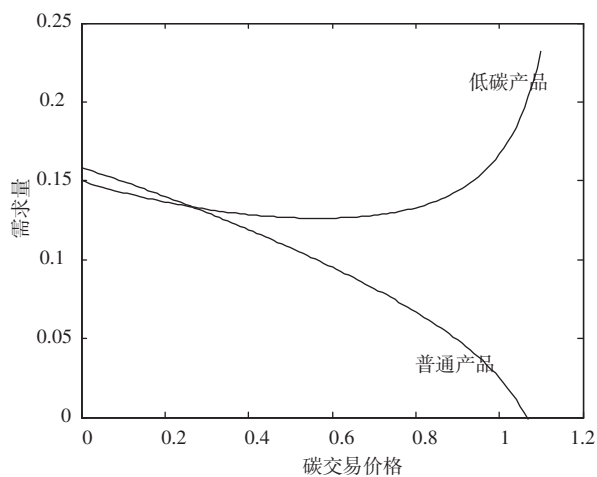


图6 两种产品的需求量与碳交易价格的关系

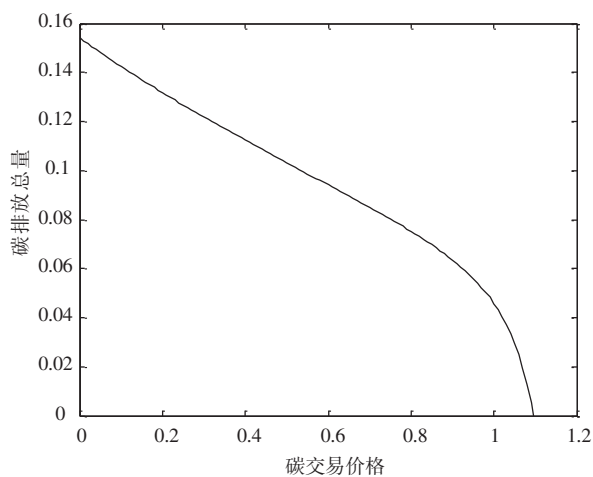


图7 碳排放总量与碳交易价格的关系

如图7所示,碳排放总量与碳交易价格负相关。随着碳交易价格的升高,最优碳减排量不断上升,单位低碳产品的碳排放量不断减少,并且普通产品的销量下降,低碳产品的销量在短暂的下降后也快速上升,使得制造商的碳排放总量不断下降。当碳交易价格达到一定数值时,碳排放总量急速下降,边际碳排放减少量增加。因此政府在采用碳交易机制时应确定一个合理的碳交易价格,发挥碳交易机制的最大效用。

(二)最优决策与低碳补贴的关系

其他条件不变的情况下,增加政府低碳补贴 $s, s \in (0, 0.1)$,此时最优碳减排量与低碳补贴的关系为正相关,如图8所示,验证了推论4。

ΔE 、碳排放总量与 s 凹性负相关,如图9所示,随着 s 的增加, ΔE 不断减小。即有低碳补贴时制造商的碳排放量要低于无低碳补贴的情况,并随着补贴的增加,碳排放差额越来越大,与推论7一致。加入低碳补贴

后,生产单位低碳产品的收入增加了,制造商投资生产低碳产品的动力增加,低碳产品的生产数量也越多,碳排放总量越低,并且单位补贴所引起的碳排放减少量越大,低碳补贴的效果边际递增。

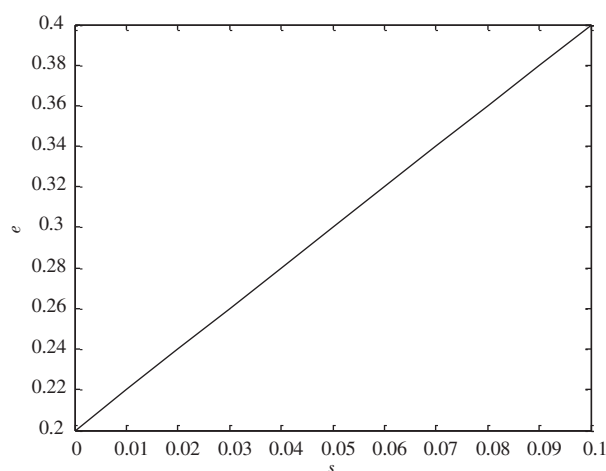
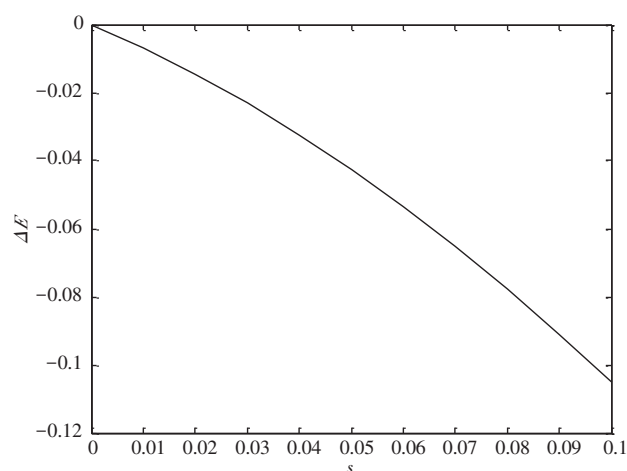


图8 最优碳减排量与低碳补贴关系图


 图9 ΔE 与低碳补贴的关系

碳交易及政府补贴机制下,供应链、制造商、零售商利润与低碳补贴凸性正相关,如图10所示。随着补贴的升高,供应链、制造商、零售商的利润均有增加,并且单位补贴的利润增加值越大,即低碳补贴的边际效用增加。因此政府增加低碳补贴,对制造商、零售商的激励作用均增大。

由此可见,政府补贴越大,其碳减排的效果越好,并且供应链各成员的利润上升的越多,如图11所示,达到双赢的局面。政府可增加低碳补贴,以达到更好的节能减排效果。

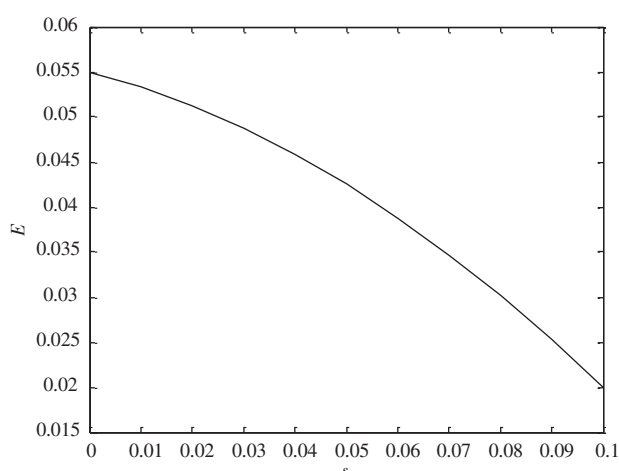


图10 碳排放量与低碳补贴的关系

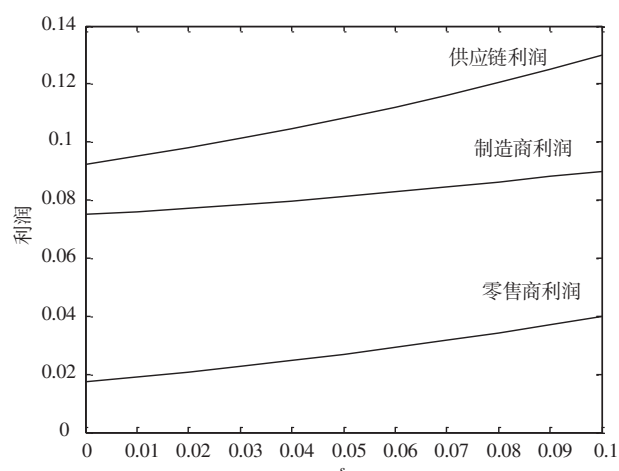


图11 供应链、制造商、零售商利润与低碳补贴的关系

五、结论

本文在碳交易的背景下,建立了一个二级供应链节能减排模型,分析了政府低碳补贴对生产销售两种产品的供应链的影响,并通过数值分析得出:①单一的低碳补贴并不能提高企业产品的低碳化程度,应与碳交易政策同时实行发挥作用;②最优碳减排量随着投资成本系数的增加而减少;③最优碳减排量与低碳补贴正相关;④碳交易及补贴机制下,普通产品的批发价、零售价与碳交易价格正相关,需求量与碳交易价格负相关,低碳产品的批发价、零售价随着碳交易价格的上升先增加后降低,需求量先减少后升高;碳排放总量与碳交易价格负相关;⑤普通产品的零售价,低碳产品的批发价和零售价、普通产品的需求量均与低碳补贴呈负相关;低碳产品的需求量与低碳补贴正相关;⑥低碳补贴可降低碳排放量,并可提高供应链参与各方的利润,并且边际效用递增。政府在碳交易机制下,应将碳交易价格提高到一定程度,才能够更有效地降低低碳产品的价格,提高其销量,降低碳排放总量,并通过提高低碳补贴来降低低碳产品的价格,使低碳产品的售价并不

是遥不可及,使其贴近普通产品的价格,使普通产品的销量下降,低碳产品的销量上升,可提高企业的绿色化程度,不仅提高企业的利润,也可大幅提高社会效益,降低社会总的碳排放量。

参考文献

- [1] ZHANG J J, NIE T F, DU S F. Optimal emission-dependent production policy with stochastic demand[J]. International Journal of Society Systems Science, 2011, 3(1/2): 21-39.
- [2] HUA G, CHENG T C E, WANG S. Managing carbon footprints in inventory management[J]. International Journal of Production Economics, 2011, 132(2): 178-185.
- [3] 何大义, 马洪云. 碳排放约束下企业生产与存储策略研究[J]. 资源与产业, 2011, 13(2): 63-68.
- [4] 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.
- [5] 邢光军, 李培君. 碳减排情形下的闭环供应链差别定价模型研究[J]. 软科学, 2019, 31(9): 138-144.
- [6] 覃艳华, 曹细玉, 曹磊. 碳排放交易机制下的供应链运作策略及协调研究[J]. 运筹与管理, 2017, 26(3): 36-42.
- [7] 陈晓红, 曾祥宇, 王傅强. 碳限额交易机制下碳交易价格对供应链碳排放的影响[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(10): 2562-2571.
- [8] CARO F, CORBETT C J, TAN T, et al. Double counting in supply chain carbon footprinting[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2013, 15(4): 545-558.
- [9] 马秋卓, 宋海清, 陈功玉. 考虑碳交易的供应链环境下产品定价与产量决策研究[J]. 中国管理科学, 2014, 22(8): 37-46.
- [10] 谢鑫鹏, 赵道致. 低碳供应链企业减排合作策略研究[J]. 管理科学, 2013, 26(3): 108-119.
- [11] 盛丽丽, 汪传旭. 碳交易环境下损失厌恶型供应链收益共享协调[J]. 数学的实践与认识, 2014, 44(13): 94-102.
- [12] 杨磊, 张琴, 张智勇. 碳交易机制下供应链渠道选择与减排策略[J]. 管理科学学报, 2017, 20(11): 75-87.
- [13] 王道平, 李小燕, 赵亮. 碳交易机制下考虑制造商竞争的供应链协调研究[J]. 运筹与管理, 2018, 27(4): 62-71.
- [14] 高举红, 王海燕, 孟燕莎. 基于补贴与碳税的闭环供应链定价策略[J]. 工业工程, 2014, 17(3): 61-67.
- [15] 朱庆华, 夏西强, 王一雷. 政府补贴下低碳与普通产品制造商竞争研究[J]. 系统管理学报, 2014, 29(5): 640-651.
- [16] 李友东, 赵道致. 考虑政府补贴的低碳供应链研发成本分摊比较研究[J]. 软科学, 2014, 28(2): 21-26.
- [17] 曹细玉, 张杰芳. 碳减排补贴与碳税下的供应链碳减排决策优化与协调[J]. 运筹与管理, 2018, 27(4): 57-61.
- [18] 张海咪, 刘渤海, 李恩重, 等. 碳交易及补贴政策对再制造闭环供应链的影响[J]. 中国表面工程, 2018, 31(1): 165-174.
- [19] 张汉江, 张佳雨, 赖明勇. 低碳背景下政府行为及供应链合作研发博弈分析[J]. 中国管理科学, 2015, 23(10): 57-66.
- [20] 程永伟, 穆东. 供应链的碳税模式及最优税率[J]. 系统管理学报, 2016, 25(4): 752-758.
- [21] MARTINA R, PREUXA L B, WAGNER U J. The impact of a carbon tax on manufacturing: Evidence from micro data[J]. Public Economics, 2014, 117(9): 1-14.
- [22] 付丽苹, 刘爱东. 征收碳税对高碳企业转型的激励模型[J]. 系统工程, 2012, 30(7): 94-98.
- [23] SHEU J B. Bargaining framework for competitive green supply chains under governmental financial intervention[J]. Transportation Research Part E, 2011, 47(5): 573-592.
- [24] 张李浩, 宋相勃, 张广雯, 等. 基于碳税的供应链碳减排技术投资协调研究[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(4): 883-891.

Study on Differential Pricing of Supply Chain Based on Carbon Trading and Subsidy Policy

Miao Wenqing¹, Shen Bingliang²

(1. Department of Business Administration, Shanghai University of Finance & Economics Zhejiang College, Jinhua 321013, Zhejiang, China;

2. Department of Foundation, Shanghai University of Finance & Economics Zhejiang College, Jinhua 321013, Zhejiang, China)

Abstract: Differential pricing strategy for the competition between ordinary products and low-carbon products in a two-echelon supply chain is studied under carbon trading mechanism, subsidy mechanism and carbon trading and subsidy mechanism. . By solving the Stackelberg Game Model, it is concluded that a single subsidy policy can not encourage manufacturers to save energy and reduce emissions, it should be used in combination with carbon trading mechanism. And the energy saving and emission reduction effects are superior to the single carbon trading mechanism. Finally, the effectiveness of carbon trading and subsidy mechanism is verified by a numerical example. The research shows that when the price of carbon trading rises to a certain level, retail and wholesale prices of ordinary products will increase, the prices of low-carbon products will decrease, the demand of ordinary products will decrease, the demand of low-carbon products will increase and the total carbon emissions will decrease. With the increase of low-carbon subsidies, retail prices of ordinary products and the wholesale and retail prices of low-carbon products will decrease, the demand of ordinary products will decrease, the demand of low-carbon products will increase, and the price and demand of low-carbon products are more sensitive to the low-carbon subsidies. Higher low-carbon subsidies will reduce carbon emissions and increase the profits of manufacturers and retailers.

Keywords: carbon trading; low-carbon subsidy; supply chain; differential pricing strategy; emission reduction