

文章编号:1003-207(2015)10-0057-10

DOI:10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2015.10.007

# 低碳背景下政府行为及供应链合作研发博弈分析

张汉江<sup>1,2</sup>, 张佳雨<sup>1,2</sup>, 赖明勇<sup>1,2,3</sup>

(1. 湖南大学经济与贸易学院, 湖南长沙 410079; 2. 湖南省物流信息与仿真技术重点实验室, 湖南长沙 410079; 3. 长沙理工大学经济管理学院, 湖南长沙 410114)

**摘要:**研究了在低碳化背景下,考虑政府征收碳税的纵向供应链最优减排问题。通过建立供应链无减排研发、单独减排研发以及合作减排研发三种模型,采用逆向求解法,首先制造商制定最优减排量,然后供应链参与者决定各自的价格并得到各自的最优利润。通过对均衡结果分析得出,供应链合作研发的最优减排量大于单独研发最优减排量;供应链最优减排量与研发成本系数成负向关系,与分担比例成正向关系。最后用数值分析法证明了,制定合理碳税税率不仅促使最优减排量达到最大值,并且有利于供应链合作减排研发。最后联系实际为政府制定合理碳税税率,以及企业如何实现节能减排供应链协调提出了建议。

**关键词:**物流与供应链管理;低碳减排;合作研发;供应链协调;碳税

**中图分类号:**F224.32;F205 **文献标识码:**A

## 1 引言

伴随着低碳经济的快速发展,减少 CO<sub>2</sub> 排放,减缓全球变暖已成为世界各国的共识。而“碳税”作为一种成本低、效果明显的经济手段已被美国、加拿大等国家纷纷采纳<sup>[1]</sup>。为了适应“低碳”发展战略要求,我国在《中国碳税税制框架结构设计》中提出碳税采用二氧化碳排放量作为计税依据,并采用从量法计征。在低碳发展背景下,制造企业在面临政府规制以及低碳产品需求偏好的制约下,开始关注自身二氧化碳排放水平,并通过减排研发实施低碳化供应链管理,减少产品碳排放量,减轻碳税负担,提升企业核心竞争力,实现低碳发展目标。

作为国民经济基础的建材行业,其生产过程产生的大量 CO<sub>2</sub> 构成了实现低碳发展目标严峻的挑战。在碳税政策制定及“十八”大关于生态文明建设的要求下,中国建材联合会发出了《发展绿色建材推进节能减排倡议书》,并于 2013 年 10 月 22 日制定了《建材行业加快与推进节能减排的实施方案》,提出了建材行业节能减排的主要目标和实施途径。要

力争使建材行业万元增加值二氧化碳排放比 2010 年降低 18% 以上。水泥工业作为最主要的建材工业,其 CO<sub>2</sub> 排放量在 2010 年达到 10 亿多吨占全国排放总量的 20% 左右,从而水泥行业节能减排是实现建材行业减排的重中之重。作为水泥行业领跑者的海螺集团通过与供应链上游企业合作研发,采用纯低温余热发电技术,2013 年实现 CO<sub>2</sub> 排放减少量 680 万吨。由此可见,在低碳化背景下,要实现企业最优减排目标,政府制定合理的税率以及供应链合作减排研发意义重大。

大量学者对征收碳税的效果进行了分析。大部分学者持支持观点,其中 Conefrey 等<sup>[2]</sup>通过爱尔兰循环利用碳税收收入的案例、Allan 等<sup>[3]</sup>通过分门别类建立“能源—经济—环境”模型,都证明了碳税在促进经济的同时促使碳排放减少,实现“双重红利”。也有学者通过一般均衡模型(CGE)论证了碳税政策的影响,Lu Chuanyi 等<sup>[4]</sup>论证了碳税对于碳排放的减少是一种有效的政策措施,并且对中国经济增长几乎无消极影响。姚昕等<sup>[5]</sup>、朱永彬等<sup>[6]</sup>认为征收碳税不仅对 GDP 无消极影响,反而会提高 GDP。但也有学者观点不一致,如 Meng 等<sup>[7]</sup>通过建立一般均衡模型(CGE)得出,碳税能有效的降低碳排放,但是会导致经济的温和收缩。Cachon<sup>[8]</sup>通过建立考虑运营成本及碳排放对外部环境成本的模型,得出碳价格不是降低碳排放的有效机制,最具吸引

收稿日期:2014-07-01; 修订日期:2015-05-25

基金项目:国家自然科学基金国际合作项目(71420107027);湖南省社科基金课题(2012YBA070)

作者简介:张汉江(1962-),男(汉族),四川人,湖南大学经济与贸易学院教授,博士,研究方向:物流系统工程、供应链管理、产业组织理论。

力的是提高消费者的燃料使用效率。Lukas 等<sup>[9]</sup>在一个提供减少二氧化碳投资计划的供应链上建立时序交易模型,结果显示是不经济的、无生态效率的,说明了财政计划对供应链上经济效率和生态效率不仅无积极影响甚至有负面影响。也有一部分学者,只论证了碳税对碳减排量单方面的影响,如 Martina 等<sup>[10]</sup>运用面板数据分析证明了征收碳税有助于英国制造业减少对能源和电力的使用,从而实现碳排放减少目标。

碳税政策对碳排放减少以及经济发展的影响至关重要,但消费者的低碳消费压力也不容忽视。学者们也进行了大量研究。蔡圣华等<sup>[11]</sup>、李友东等<sup>[12]</sup>都论证了消费者低碳消费压力有助于形成绿色供应链,对供应链合作减排起到积极作用。张毅等<sup>[13]</sup>通过环境投入产出分析模型(EE-IOA)证明科学制定减排目标,引导消费者行为向绿色消费转变、依靠消费者力量更能促进企业节能减排。Servaes<sup>[14]</sup>指出企业只有存在较高的消费者意识的前提下才能实现社会责任与提高公司的价值。

在低碳化背景下,供应链参与者如何在政府规制及消费者低碳偏好的作用下选择最优决策方式实现供应链协调成为了关键。Benjaafar 等<sup>[15]</sup>将碳足迹参数引入到各种优化模型中,分析了如何通过经营决策调整碳排放的减少,研究了供应链中企业合作对成本和碳排放降低的影响。赖苹等<sup>[16]</sup>研究了在征收外生碳排放税的条件下,利用两阶段动态博弈模型,探讨了开展节能减排技术研发的企业对三种联盟合作模式的选择,得出全联盟合作模式是企业的最佳选择。Jaber 等<sup>[17]</sup>建立两阶段合作的动态模型证明了对超额排放进行惩罚措施时,供应链管理使得库存及减排成本最小的合作模式选择。黄守军等<sup>[18]</sup>研究了基于碳减排调度的厂网合作竞价机制问题,并讨论了合作机制的最优参数,合作竞价机制能够增加低碳机组的发电收益,提高发电商 CO<sub>2</sub> 减排的积极性。Theiben 等<sup>[19]</sup>通过网络分析法(ANP),以快速消费品行业为例,通过敏感性分析证明了纵向供应链上供应商和制造商协同合作是 CO<sub>2</sub> 减排管理持续高效的办法。Tsai 等<sup>[20]</sup>通过活动成本理论(ABC)及生命周期理论(LCA)两种方法,研究了绿色建筑领域如何控制建筑成本及运用低碳建造方法的问题,最后得出结论,集约化情况下有助于分配和合理利用资源,有助于绿色建筑项目方面建设成本管理运用混合决策模型。张汉江<sup>[21-22]</sup>等研究了政府财政补贴下的闭环供应链短

期均衡,得出政府以社会福利最大化为目标时可以实现更优的回收水平的结论<sup>[21,22]</sup>。

上述研究中,或者只是宏观地分析了碳税及低碳消费偏好对宏观经济及碳排放减少的影响,或者只是分析了低碳条件下企业如何选择最优合作模式。本文的创新之处在于即加入了政府碳税,又加入了市场低碳敏感系数,在两个外部环境干预下,通过微观上建立纵向供应链企业的三种减排研发模型,得出不同情况下供应链均衡结果,证明了合作研发减排量大于单独研发减排量。最后验证了碳税税率与市场敏感系数对最优减排量的影响。说明了征收碳税和市场低碳偏好都有利于促进产业减排量的增加,合作减排情况下供应链上参与者的利润更大。

## 2 模型描述

### 2.1 问题描述及假设条件

针对 CO<sub>2</sub> 排放,政府征税导致制造商利润减少,因此制造商进行减排研发,促使其单位产品的碳排放量下降,降低税收负担的同时提升产品的市场需求,对上游原材料或零部件供应商具有正向的外部经济性,供应商有积极性与其进行供应链合作减排,比如分担一部分减排研发费用,实现供应链协调,从而实现全供应链的帕累托最优。

为了更清楚地分析和描述该问题,本文作如下相应的模型假设:

(1) 供应商和制造商关于市场的信息都是对称和完全的,并且市场能够完全出清。

(2) 供应商和制造商的关系为 1:1,即制造商每生产一个单位产品消耗供应商提供的一个单位原料。

(3) 供应商和制造商在减排研发前后供应成本和制造成本不变,分别为  $c_s$ 、 $c_m$  且  $0 < c_s < c_m$ 。

(4) 该产品属于制造环节的较高碳排放产品,减排研发后单位产品碳排放量为  $e' = e_0 - e$ 。

(5) 响应“低碳”社会的号召,消费者的低碳消费意识增强,影响产品需求的变量不仅仅只是价格,因此假设产品的需求量是产品价格和碳排放量的线性函数,即为  $D(p_m, e') = \alpha - \beta p_m - \gamma e'$  其中  $\alpha$  为该产品的市场容量,  $\beta$  是价格对需求量的反映系数,  $\gamma$  为产品单位碳排放量对需求量的反映系数。

(6) 依据《中国碳税税制框架结构设计》政府对碳排放严重超标的制造企业征收从量的碳税,碳税税率  $t = (10 \sim 40)$  元 / CO<sub>2</sub>。

(7) 根据经典模型标准假设(研发成果与研发投

入成二次关系),在该研究中单位产品的碳减排量  $e$  即为减排研发的成果,因此制造商减排研发的成本函数为  $c(e) = \frac{1}{2}\epsilon e^2$ ,其中  $\epsilon > 0$ 。

## 2.2 参数和变量的描述符号说明

$\alpha$ —某建材行业龙头企业其年均市场容量

$\beta$ —产品需求价格弹性系数,反应产品价格对需求的影响

$\gamma$ —消费者对低碳产品的需求敏感系数(产品碳排放量对消费者需求的影响)

$c_s$ —建材产品主要原料供应商的供应成本

$c_m$ —建材产品整个生产过程单位制造成本

$e_0$ —传统生产模式下该产品的单位碳排放量

$e'$ —减排研发后单位产品碳排放量

$t$ —政府对制造商征收的碳排放从量税税率

$\epsilon$ —制造商减排研发投资参数

$\theta$ —上游供应商分担减排研发成本的比例  
决策变量:

$p_s$ —供应商为制造商提供原材料的价格

$p_m$ —制造商制造产品的销售价格

$e$ —单位产品低碳提升度即碳减排量,减排研发前后碳排放量的变化量。

依据上述模型假设及变量设定,可以构建高碳排放产品生产供应链上下游在政府征收碳税以及碳排放量影响消费者需求双重作用下供应商和制造商的利润函数为:

$$\pi_s(p_s, p_m, e) = [\alpha - \beta p_m - \gamma(e_0 - e)](p_s - c_s) - \frac{1}{2}\epsilon e^2 \quad (1)$$

$$\pi_m(p_s, p_m, e) = [\alpha - \beta p_m - \gamma(e_0 - e)][p_m - p_s - c_m - t(e_0 - e)] - \frac{1}{2}(1 - \theta)\epsilon e^2 \quad (2)$$

## 3 博弈模型的建立与求解

### 3.1 传统的无减排研发下的供应链最优决策 ( $e=0, \theta=0$ )

水泥作为我国最主要的建材产品之一,其工业过程  $\text{CO}_2$  排放占总排放 50—60%,燃料排放占 45%,电力排放占 5—10%,因而水泥产量和单位产品能耗是影响水泥行业  $\text{CO}_2$  排放的最主要因素。进入 21 世纪以来我国水泥行业年均增速为 12%,2013 年产量为 24.16 亿吨,比 2012 年的 22.10 亿吨增长 9.32%。“十一五”期间我国水泥行业  $\text{CO}_2$  排放由 2005 年的 8.42 亿吨增长到 2010 年 11.8 亿吨,增长了 40%,依据  $\text{CO}_2$  排放计算公式及对水泥

产量等分析,国家发展和改革委员会能源研究所预计 2015 年我国水泥行业  $\text{CO}_2$  排放将达到 13.2 亿吨,比 2010 年增长 12%。水泥等建材行业如此严峻节能减排压力下,只有通过政府这支“有形的手”进行有效调控才能实现“新常态”下对环境的要求。而碳税作为被理论和实践论证为节能减排有效的调控手段,在中国的试行将会通过影响该行业产量、单位能耗等指标影响其排放量,从而达到节能减排的目的。既然水泥行业工业过程及燃料燃放的  $\text{CO}_2$  排放占到 90%以上,因此从量税  $t$  直接对制造商征收,导致制造商利润减少。

根据具体分析建立由上游供应商先行定价,下游制造商跟随定价的两级动态博弈模型。模型中考虑政府对传统企业制造生产过程产生的二氧化碳排放量征收从量税,在该模型中税率  $t$  为外部参数,供应商的供应价格  $p_s$ 、制造商的出售价格  $p_m$  都为决策变量。供应商和制造商的决策是最大化其利润函数:

$$\max_{p_s} \pi_s = (\alpha - \beta p_m - \gamma e_0)(p_s - c_s) \quad (3)$$

$$\max_{p_m} \pi_m = (\alpha - \beta p_m - \gamma e_0)(p_m - p_s - c_m - t e_0) \quad (4)$$

由(4)式求一阶条件,令  $\frac{\partial \pi_m}{\partial p_m} = 0$ ,得到制造商销售价格对供应商供货价格的相机行动规则为:

$$p_m^*(p_s) = \frac{p_s + c_m + t e_0}{2} + \frac{\alpha - \gamma e_0}{2\beta} \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)求一阶偏导,并令  $\frac{\partial \pi_s}{\partial p_s} = 0$ ,得到供应商的最优供货价格为:

$$p_s^* = \frac{(c_s - c_m - t e_0)}{2} + \frac{\alpha - \gamma e_0}{2\beta} \quad (6)$$

将(6)代入(5)得到制造商最优销售价格为:

$$p_m^* = \frac{(c_s + c_m + t e_0)}{4} + \frac{3(\alpha - \gamma e_0)}{4\beta} \quad (7)$$

将企业的最优决策(6)、(7)代入其相应的利润函数(3)、(4)中,得到供应商和制造商的均衡利润分别为:

$$\pi_s^* = \frac{[\alpha - \beta(c_s + c_m) - (\beta + \gamma)e_0]^2}{8\beta} \quad (8)$$

$$\pi_m^* = \frac{[\alpha - \beta(c_s + c_m) - (\beta + \gamma)e_0]^2}{16\beta} \quad (9)$$

### 3.2 制造商单独减排研发情况下供应链最优决策 ( $e \neq 0, \theta = 0$ )

政府碳税政策下消费者的低碳意识也会逐渐增强即  $\beta$  增大,所以产品碳排放量越大产品的销量就

会下降,企业的利润就会受损,相信绝大部分高碳排放企业会做出积极应对,减少企业损失。节能低碳技术作为降低能耗影响产品碳排放量的主要措施,其在实践过程中由于规模和新旧项目的不同所以成本不同,各企业根据实际情况选取相应的技术进行节能减排。但就目前国内形势看成本最低的高效节能选粉技术(474/t)、水泥窑纯低温余热发电技术(578/t)是被广泛采用的模式,如海螺水泥在 2013 年底通过余热发电技术已实现二氧化碳减排 680 万吨,整个项目建成后将会减排二氧化碳 1613 万吨。

因此将实践减排技术考虑进理论模型,在制造商经济实力和研发技术水平一定的条件下,制造商节能减排的结果是改变了传统模式下单位产品的碳排放量,因此单位产品的减排量  $e$  为决策变量,随着碳排放量的减少,产品的市场需求增加、企业的碳税成本以及企业利润也会发生变化。因此可以得到碳税条件下,制造商单独进行减排研发的情况下,供应商和制造商的利润函数分别为:

$$\max_{p_s} \pi_s' = [\alpha - \beta p_m - \gamma(e_0 - e)](p_s - c_s) \tag{10}$$

$$\max_{p_m, e} \pi_m' = [\alpha - \beta p_m - \gamma(e_0 - e)] \times [p_m - p_s - c_m - t(e_0 - e)] - \frac{1}{2} \epsilon e^2 \tag{11}$$

通过前看后推的求解过程,得出供应商的最优批发价格为:

$$p_s^* = \frac{c_s - c_m - t(e_0 - e)}{2} + \frac{\alpha - \gamma(e_0 - e)}{2\beta} \tag{12}$$

制造商单独研发情况下的最优出售价格为:

$$p_m^* = \frac{c_s + c_m + t(e_0 - e)}{4} + \frac{3[\alpha - \gamma(e_0 - e)]}{4\beta} \tag{13}$$

以及供应商和制造商的均衡利润为:

$$\pi_s^*(e) = \frac{[\alpha - \beta(c_s + c_m) - (\beta t + \gamma)(e_0 - e)]^2}{8\beta} \tag{14}$$

$$\pi_m^*(e) = \frac{[\alpha - \beta(c_s + c_m) - (\beta t + \gamma)(e_0 - e)]^2 - 8\beta \epsilon e^2}{16\beta} \tag{15}$$

假定这些企业都满足理性行为人的前提假设,制造商有积极性进行单独研发的前提条件是  $\pi_m^* \geq \pi_m^*$ , 即有以下两种情况:

$$\textcircled{1}: 8\epsilon\beta - (\beta t + \gamma)^2 < 0, e >$$

$$\frac{2(\beta t + \gamma)[\alpha - \beta(c_s + c_m) - e_0(\beta t + \gamma)]}{8\epsilon\beta - (\beta t + \gamma)^2}$$

$$\textcircled{2}: 8\epsilon\beta - (\beta t + \gamma)^2 > 0$$

$$0 < e < \frac{2(\beta t + \gamma)[\alpha - \beta(c_s + c_m) - e_0(\beta t + \gamma)]}{8\epsilon\beta - (\beta t + \gamma)^2}$$

将供应商和制造商的最优价格,即式(12)、(13)代入制造商的利润函数式(11),然后通过一阶求导令  $\frac{\partial \pi_m}{\partial e} = 0$ , 可以求解得到利润最大条件下的最优碳减排量为:

$$e^* = \frac{(\beta t + \gamma)[\alpha - \beta(c_s + c_m) - e_0(\beta t + \gamma)]}{8\epsilon\beta - (\beta t + \gamma)^2} \tag{16}$$

所以制造商单独实施节能减排研发的条件是:

$$s. t. 8\epsilon\beta - (\beta t + \gamma)^2 > 0 \text{ 且}$$

$$\alpha - \beta(c_s + c_m) - e_0(\beta t + \gamma) > 0$$

将式(16)代入式(14)、(15)可以得到供应商和制造商在最大减排研发努力下的利润分别为:

$$\pi_s^* = \frac{[(\beta c_s + \beta c_m - \alpha)(\beta t + \gamma)^2 - 4\epsilon\beta e_0(\beta t + \gamma) + 4\alpha\epsilon\beta - 4\epsilon\beta^2(\beta t + \gamma)]}{2\beta[8\epsilon\beta - (\beta t + \gamma)^2]} \tag{17}$$

$$\pi_m^* = \frac{[4\epsilon\beta + (\beta t + \gamma)^2][\alpha - \beta(c_s + c_m) - e_0(\beta t + \gamma)]^2}{8\beta[8\epsilon\beta - (\beta t + \gamma)^2]} \tag{18}$$

### 3.3 供应商与制造商进行合作减排研发情况下供应链最优决策 ( $e \neq 0, \theta \neq 0$ )

现实情况下节能减排作为一项系统工程,需要大量的资金为保证,大型建材行业的节能减排更是需要强大的资金保证,仅通过制造商一个环节的减排研发投入会给企业造成资金压力甚至会导致严重的经济负担,作为制造商来说更需要强有力的资金支持减缓研发成本压力。从 3.2 模型看出受碳税直接影响的制造商减排研发导致的低碳产品市场需求的增加,相应的增加了对上游供应商原材料地需求,增加了供应商的收入,激发了供应商参与到供应链节能减排研发中来的积极性。因而供应链上下游在合作减排研发上达成了一致共识。合作共识的前提下分担研发费用作为最直接最广泛的合作研发模式成为现实以及理论研究主要的运用模式。

因此在碳税政策下,供应链合作减排研发下供应商和制造商优化自己的价格和减排水平以实现利润函数的极大化模型为:

$$\max_{p_s} \pi_s^* = [\alpha - \beta p_m - \gamma(e_0 - e)] \times (p_s - c_s) -$$

$$\frac{1}{2} \theta \epsilon e^2 \quad (19)$$

$$\max_{p_m, e} \pi_m^* = [\alpha - \beta p_m - \gamma(e_0 - e)] \times [p_m - p_s - c_m - t(e_0 - e)] - \frac{1}{2} (1 - \theta) \epsilon e^2 \quad (20)$$

通过对式(20)求一阶导并令  $\frac{\partial \pi_m^*}{\partial p_m} = 0$ , 求解得到相机行动规则  $p_m^*(p_s)$ 。代入式(19)求一阶导数, 令  $\frac{\partial \pi_s^*}{\partial p_s} = 0$ , 可以求得合作研发情况下供应商和制造商的最优价格为:

$$p_s^*(e) = \frac{c_s - c_m - t(e_0 - e)}{2} + \frac{\alpha - \gamma(e_0 - e)}{2\beta} \quad (21)$$

$$p_m^*(e) = \frac{c_s + c_m + t(e_0 - e)}{4} + \frac{3[\alpha - \gamma(e_0 - e)]}{4\beta} \quad (22)$$

将(21)、(22)代入供应商和制造商的利润函数可以得到供应商和制造商的均衡利润:

$$\pi_s^* = \frac{[\alpha - \beta(c_s + c_m) - (e_0 - e)(\beta t + \gamma)]^2 - 4\beta\theta\epsilon e^2}{8\beta} \quad (23)$$

$$\pi_m^* = \frac{[\alpha - \beta(c_s + c_m) - (e_0 - e)(\beta t + \gamma)]^2 - 8\beta(1 - \theta)\epsilon e^2}{16\beta} \quad (24)$$

作为理性经济人的企业追逐利润最大化是其根本目标, 因此在政府低碳化政策实施下企业做出怎样的应对依赖于对不同行为决策下所得利润的比较。因而企业形成供应链上合作减排研发的前提条件是, 供应商分担研发费用之后的利润不小于无减排研发时的利润, 即  $\pi_s^* \geq \pi_s^*$ , 制造商合作研发之后的利润不小于不进行减排研发时的利润, 即  $\pi_m^* \geq \pi_m^*$ , 通过讨论可以得到碳减排量的取值范围为:

$$\textcircled{1}: \theta \geq \frac{2}{3},$$

$$e \in (0, \frac{2(\beta t + \gamma)[\alpha - \beta(c_s + c_m) - e_0(\beta t + \gamma)]}{4\beta\theta\epsilon - (\beta t + \gamma)^2}]$$

$$\textcircled{2}: 0 < \theta < \frac{2}{3},$$

$$e \in (0, \frac{2(\beta t + \gamma)[\alpha - \beta(c_s + c_m) - e_0(\beta t + \gamma)]}{8(1 - \theta)\epsilon\beta - (\beta t + \gamma)^2}]$$

将式(21)、(22)的价格函数代入制造商的利润函数式(20), 求一阶条件令  $\frac{\partial \pi_m^*}{\partial e} = 0$ , 可以求得在供应商和制造商合作研发情况下, 制造商的最优碳减

排量为:

$$e^{**} = \frac{(\beta t + \gamma)[\alpha - \beta(c_s + c_m) - e_0(\beta t + \gamma)]}{8(1 - \theta)\epsilon\beta - (\beta t + \gamma)^2} \quad (25)$$

供应链合作减排研发情况下的最优减排量满足  $s. t. 0 < \theta < \frac{2}{3}, 8(1 - \theta)\epsilon\beta - (\beta t + \gamma)^2 > 0$  且

$$\alpha - \beta(c_s + c_m) - e_0(\beta t + \gamma) > 0$$

在供应商与制造商合作研发情况下的最优碳减排量为  $e^{**}$ , 将式(25)代入式(23)、(24), 得到在分担节能减排研发费用情况下供应商和制造商的均衡利润为:

$$\pi_s^{**} = \frac{[\alpha - \beta(c_s + c_m) - e_0(\beta t + \gamma)]^2}{2\beta[8(1 - \theta)\epsilon\beta - (\beta t + \gamma)^2]^2} \times \{ [4(1 - \theta)\epsilon\beta]^2 - \beta\theta\epsilon(\beta t + \gamma)^2 \} \quad (26)$$

$$\pi_m^{**} = \frac{[\alpha - \beta(c_s + c_m) - e_0(\beta t + \gamma)]^2}{16\beta[8(1 - \theta)\epsilon\beta - (\beta t + \gamma)^2]^2} \times [8(1 - \theta)\epsilon\beta + (\beta t + \gamma)^2 - 1] \quad (27)$$

#### 4 均衡结果分析

命题 1 供应商和制造商合作研发碳减排技术情况下的最优减排量比制造商单独进行减排研发情况下的最优碳减排量大, 既  $e^{**} > e^*$ 。可以说明在高碳排放行业合作减排研发, 可以使减排研发资金更充足、实力更雄厚、效果更显著。联系到现实中海螺水泥, 其依靠供应链减排合作模式相对于仅依靠单方面的减排研发小型企业来说减排效果更好。这些理论结果和现实情况都说明了政府对制造商碳排量征收从量税的前提条件下, 供应链合作研发节能减排技术, 对高碳排放行业减排效果更显著, 对我国实现总体碳减排目标成效更大, 所以应该鼓励建材等一批行业形成供应链减排研发系统。

证明: 因为  $0 < \theta < \frac{2}{3}$  所以  $8(1 - \theta)\epsilon\beta - (\beta t + \gamma)^2 < 8\epsilon\beta - (\beta t + \gamma)^2$

比较(25)式和(16)式, 有

$$\frac{(\beta t + \gamma)[\alpha - \beta(c_s + c_m) - e_0(\beta t + \gamma)]}{8(1 - \theta)\epsilon\beta - (\beta t + \gamma)^2} > \frac{(\beta t + \gamma)[\alpha - \beta(c_s + c_m) - e_0(\beta t + \gamma)]}{8\epsilon\beta - (\beta t + \gamma)^2}$$

即  $e^{**} > e^*$  得证。

命题 2 产品的低碳提升度即(最优减排量)  $e^*$  ( $e^{**}$ ) 随减排研发投入参数  $\epsilon$  的增加而减少。

即  $\frac{\partial e^*}{\partial \epsilon} < 0, \frac{\partial e^{**}}{\partial \epsilon} < 0$

证明: 将制造商单独研发情况下的最优碳减排

量(16)式对  $\epsilon$  求一阶偏导数:

$$\frac{\partial e^*}{\partial \epsilon} = \frac{-8\beta(\beta t + \gamma)[\alpha - \beta(c_s + c_m) - e_0(\beta t + \gamma)]}{[8\epsilon\beta - (\beta t + \gamma)^2]^2}$$

因为 $[\alpha - \beta(c_s + c_m) - e_0(\beta t + \gamma)] > 0$ 在前面的讨论中已

经得到,因此  $\frac{\partial e^*}{\partial \epsilon} < 0$ 。

$$\frac{\partial e^{**}}{\partial \epsilon} = \frac{-8\epsilon\beta(1 - \theta)(\beta t + \gamma)[\alpha - \beta(c_s + c_m) - e_0(\beta t + \gamma)]}{[8(1 - \theta)\epsilon\beta - (\beta t + \gamma)^2]^2} < 0$$

所以,无论是制造商单独研发还是供应商与制造商合作研发,最优减排量随 R & D 支出的增加而递减,说明低碳研发存在规模的不经济性。

命题 3 供应链进行减排研发合作时,供应商分担的研发成本  $\theta$  比例越大,制造商就更有积极性进行减排研发活动,因此最优减排量  $e^{**}$  就越大,有  $\frac{\partial e^{**}}{\partial \theta} > 0$ 。因为供应商分担的比例越大,所要负担的研发成本就会越大,相对于制造商来说研发成本就相应减少,研发压力就会降低从而提升其减排积极性,促进整条供应链的减排研发有助于提高产品减排量,对于政府提出的构建“低碳”社会发展更加有效。

证明:将制造商合作研发情况下的最优碳减排量(25)式对  $\theta$  求一阶偏导数可以得到:

$$\frac{\partial e^{**}}{\partial \theta} = \frac{8\epsilon\beta(\beta t + \gamma)[\alpha - \beta(c_s + c_m) - e_0(\beta t + \gamma)]}{[8(1 - \theta)\epsilon\beta - (\beta t + \gamma)^2]^2}$$

因  $\alpha - \beta(c_s + c_m) - e_0(\beta t + \gamma) > 0$ ,所以  $\frac{\partial e^{**}}{\partial \theta} > 0$ 。

### 5 数值分析

#### 5.1 碳税税率 $t$ 变化的影响分析

政府对该供应链上生产过程中的碳排放量征收从量税  $t$ ,作为“有形的手”反映管理者对碳排放量的控制。随着政府碳税税率的增加,制造商不得不加大减排研发力度,使减排量增加,但是并不是征收税率越大碳减排量就越大,结合上述模型结果以及现实背景可以得出最优减排量随着碳税税率的增加,呈现先增加后减少的趋势。由于直接通过求一阶导数的方式很难分析说明碳税和市场敏感系数对最优减排量的影响。因此采用 Matlab7.0 进行数值分析。为了说明政府税收对最优减排量的影响,结合已有研究及行业背景,我们假定某一较高碳排放建材产品的市场容量  $\alpha = 900$ ,需求价格弹性  $\beta = 6$ ,初始单位产品的碳排放量  $e_0 = 2.3$ ,供应商的单位成本  $c_s = 10$ ,制造商的单位制造成本  $c_m = 18$ ,制造商碳减排研发的投入成本系数  $\epsilon = 3800$ ,供应商分担比例  $\theta = \frac{1}{3}$ ,低碳敏感系数  $\gamma = 5$ 。当政府对每单位产品征收的碳排放税率在 10~40 元时,计算结果如表 1 所示。图 1 是碳税对最优减排量的影响。当供应商分担比例取不同值时,碳税税率的变化对供应商和制造商利润的影响结果如表 2,图 2 是碳税对于利润增长率的影响。

表 1 碳税税率对企业最优减排量和利润的数值分析

$t$	$e^*$	$e^{**}$	$p_s'^*$	$p_s^{**}$	$p_m'^*$	$p_m^{**}$	$(\pi_s^{**} - \pi_s'^*) / \pi_s'^* (\%)$	$(\pi_m^{**} - \pi_m'^*) / \pi_m'^* (\%)$
10	0.2125	0.3225	77.6927	78.2890	123.4141	123.2077	1.5245	1.1999
12	0.2421	0.3694	75.7953	76.6119	124.3875	124.0852	2.1854	1.7086
14	0.2690	0.4128	73.9367	75.0035	125.3392	124.9256	2.9942	2.3226
16	0.2931	0.4531	72.1085	73.4549	126.2733	125.7334	3.9707	3.0523
18	0.3145	0.4902	70.3031	71.9576	127.1939	126.5130	5.1403	3.9110
20	0.3332	0.5243	68.5121	70.5031	128.1049	127.2687	6.5350	4.9147
22	0.3490	0.5554	66.7266	69.0828	129.0109	128.0048	8.1958	6.0841
24	0.3621	0.5836	64.9376	67.6876	129.9163	128.7258	10.1752	7.4451
26	0.3722	0.6086	63.1347	66.3075	130.8261	129.4368	12.5415	9.0305
28	0.3791	0.6305	61.3068	64.9315	131.7458	130.1430	15.3846	10.8828
30	0.3827	0.6490	59.4412	63.5464	132.6816	130.8509	18.8245	13.0567
32	0.3826	0.6636	57.5233	62.1364	133.6405	131.5682	23.0250	15.6253
34	0.3786	0.6741	55.5360	60.6815	134.6309	132.3043	28.2145	18.6865
36	0.3702	0.6795	53.4587	59.1553	135.6624	133.0719	34.7204	22.3757
38	0.3567	0.6788	51.2667	57.5219	136.7472	133.8881	43.0276	26.8847
40	0.3373	0.6704	48.9291	55.7299	137.8999	134.7771	53.8836	32.4942

表 2 不同分担比例下税率对利润的影响

t	$\theta = \frac{1}{6}$		$\theta = \frac{1}{4}$		$\theta = \frac{1}{3}$		$\theta = \frac{1}{2}$	
	$(\pi_s^{**} - \pi_s^{*}) / (\pi_m^{**} - \pi_m^{*}) /$		$(\pi_s^{**} - \pi_s^{*}) / (\pi_m^{**} - \pi_m^{*}) /$		$(\pi_s^{**} - \pi_s^{*}) / (\pi_m^{**} - \pi_m^{*}) /$		$(\pi_s^{**} - \pi_s^{*}) / (\pi_m^{**} - \pi_m^{*}) /$	
	$\pi_s^{*} (\%)$	$\pi_m^{*} (\%)$	$\pi_s^{*} (\%)$	$\pi_m^{*} (\%)$	$\pi_s^{*} (\%)$	$\pi_m^{*} (\%)$	$\pi_s^{*} (\%)$	$\pi_m^{*} (\%)$
10	0.6747	0.4765	1.0768	0.7967	1.5245	1.1999	2.4865	2.4289
12	0.9622	0.6765	1.5392	1.1326	2.1854	1.7086	3.5935	3.4766
14	1.3102	0.9163	2.1017	1.5365	2.9942	2.3226	4.9720	4.7557
16	1.7251	1.1990	2.7761	2.0144	3.9707	3.0524	6.6713	6.2970
18	2.2145	1.5285	3.5770	2.5738	5.1403	3.9110	8.7565	8.1403
20	2.7880	1.9096	4.5229	3.2236	6.5350	4.9149	11.3145	10.3374
22	3.4575	2.3479	5.6368	3.9754	8.1958	6.0841	14.4624	12.9565
24	4.2376	2.8507	6.9478	4.8432	10.1752	7.4451	18.3611	16.0879
26	5.1463	3.4266	8.4925	5.8444	12.5415	9.0305	23.2357	19.8540
28	6.2063	4.0863	10.3178	7.0012	15.3846	10.8828	29.4097	24.4235
30	7.4461	4.8433	12.4844	8.3415	18.8245	13.0567	37.3635	30.0351
32	8.9019	5.7144	15.0718	9.9012	23.0250	15.6253	47.8371	37.0379
34	10.6207	6.7210	18.1865	11.7272	28.2145	18.6865	62.0274	45.9616
36	12.6641	7.8909	21.9734	13.8818	34.7204	22.3757	81.9882	57.6513
38	15.1140	9.2601	26.6347	16.4490	43.0276	26.8847	111.5255	73.5404
40	18.0824	10.8770	32.4607	19.5458	53.8836	32.4942	158.4523	96.2711

从图 1 首先可以看出在制定碳税之初,随着税率的增加,最优减排量逐渐增加,并且增加趋势越来越大;其次当碳税税率增加到某一值时,供应链最优减排量达到最大值,然而当税率超过此值,随着碳税税率的增加,最优减排量会逐渐下降。所以联系到现实的管理中,为了达到“绿色低碳”发展目标,政府需制定合理的碳税税率,既不能过低也不能过高,过低的税率达不到刺激高碳排放行业的减排的积极性,过高的碳税税率会增加企业负担降低其减排积极性。

从表 2 计算数据得出,随着碳税税率的增加,供应商和制造商在合作研发时的利润比单独研发时的利润大,且利润增长率成上升趋势。根据不同分担比例下利润增长率结果作图 2 说明,随着  $\theta$  增加(即供应商分担比例增加)供应商和制造商利润增长趋势越来越快,曲线越来越陡峭,供应商与制造商之间差距拉大,有效缓解了研发收益效果不均问题。所以,供应链合作减排研发不仅提高碳减排量,实现良好的外部效应,对供应链上的参与者也都是有利可图的。作为政府应该在开展碳税政策的同时制定相关的产业政策和科技政策,提供合作平台和创造有利条件鼓励企业开展供应链减排研发合作。

### 5.2 低碳敏感系数 $\gamma$ 变化对企业最优减排量和利润的影响分析

为了说明市场对低碳产品需求的敏感系数对于最优减排量的影响,以行业为例设政府征收碳税  $t$

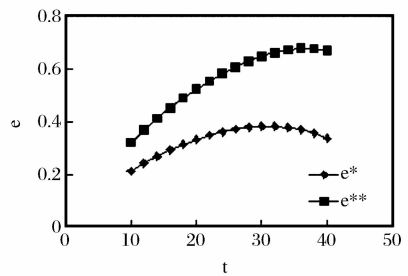


图 1 碳税对最优减排量的影响

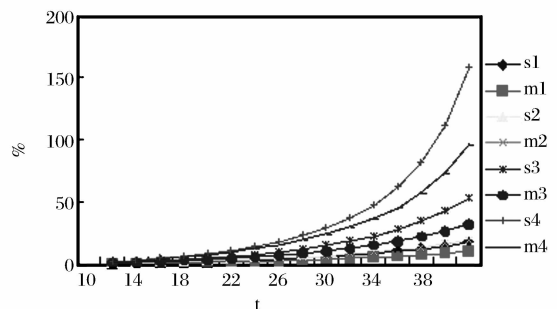


图 2 碳税对利润增加的影响

$= 20$ , 市场低碳敏感系数  $\gamma$  在  $5 \sim 60$  之间变动,步长为 5,同样用数值分析法计算得到表 3。图 3 反映了低碳敏感系数对最优减排量的影响,图 4 则反映了低碳敏感系数对于利润增长率的影响。

从图 3 可以看出,市场对产品碳排放量的敏感系数  $\gamma$  与最优减排量  $e$  成正向关系,即随着敏感系数的增加,最优减排量增加。说明市场对低碳产品的需求偏好越大越有助于供应链上进行减排研发。

表 3 低碳敏感系数的数值分析

$\gamma$	$e^*$	$e^{**}$	$(\pi_s^{**} - \pi_s^{*}) / \pi_s^{*} (\%)$	$(\pi_m^{**} - \pi_m^{*}) / \pi_m^{*} (\%)$
5	0.3332	0.5243	6.5350	57.3720
10	0.3401	0.5376	7.1919	58.0707
15	0.3466	0.5504	7.8984	58.8150
20	0.3526	0.5627	8.6584	59.6078
25	0.3581	0.5745	9.4761	60.4524
30	0.3630	0.5858	10.3564	61.3522
35	0.3675	0.5965	11.3049	62.3110
40	0.3714	0.6067	12.3275	63.3333
45	0.3748	0.6163	13.4310	64.4238
50	0.3777	0.6254	14.6231	65.5879
55	0.3799	0.6338	15.9126	66.8315
60	0.3816	0.6417	17.3093	68.1614

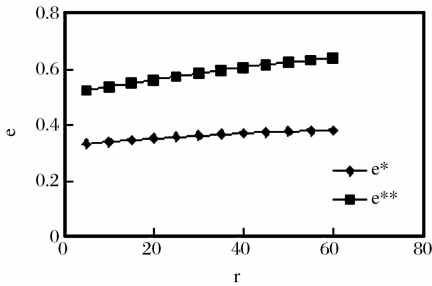


图 3  $\gamma$  对最优减排量的影响

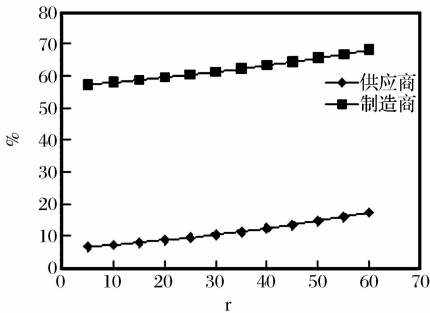


图 4  $\gamma$  对利润增长率的影响

从图 4 可以知道,随着市场对产品碳排放量敏感系数的增加,供应商和制造商在合作研发时的利润比单独研发时的利润大,利润的增长率呈小幅度上升趋势。而图 2 中看出利润的增长率呈大幅度上升趋势,所以可以得出结论:市场对低碳产品敏感系数作为另一重要因素对供应链上碳排放量的减少以及供应链上各参与者利润的增加有积极影响。这一结论要求政府应该创造条件引导和号召社会低碳公众意识,从市场层面刺激生产企业节能减排;对于排放企业来说应该将消费者低碳意识纳入其生产经营决策的考虑范围,这样才能在市场上赢得消费者信

赖,提高市场占有率,增加企业利润。

## 6 结语

本文研究了政府征收碳税条件下,纵向供应链减排研发模型。通过建立纵向供应链无减排研发、制造商单独减排研发、供应商与制造商合作减排研发三种模型,得出了不同情形下供应商和制造商的最优经营投资决策、利润决策、以及制造商的最优减排量决策。通过对求解的均衡解进行边际分析以及数值分析发现:(1)纵向供应链合作减排研发的最优减排量大于单独减排的最优减排量;(2)最优减排量与研发投资参数成反向变动关系,即最优减排量随 R & D 支出的增加而递减,说明低碳研发存在规模的不经济性;(3)合作减排研发情况下,供应商分担研发成本的比例越大,制造商更有积极性进行减排,所以最优减排量就越大;(4)随着碳税税率的增加,最优减排量成先增加后减少的变化。政府在特定的情形下需要制定合理的碳税税率才能达到使减排量最大的目的;(5)市场低碳敏感系数有助于促进碳排放量的减少,同时有助于减排研发后供应链上参与者利润的增加。这些结论归根结底要为发展“新常态”下节能减排实践任务服务,因此建议政府应强化财政税收体制在节能减排方面的改革,制定符合我国国情和行业特色的碳税税率,在 10—40 税率的范围内根据不同阶段实时调整,达到碳税刺激减排的目的,促使高碳排放行业实现最优减排,其次在实施强制措施的同时依靠激励措施,创造条件如建立节能减排高峰论坛、产业联盟等促成节能减排这一庞大的系统工程实现供应链协调合作,更加高效完成减排任务;企业作为减排研发的关键力量,只有通过减排技术的不断改进和完善一方面降低碳税负担,另一方面满足广大消费者对低碳产品的需求,降低自身研发成本实现利润最大化,并且在考虑减排研发实际情况下从长远发展考虑寻求合作机会,达成供应链上协调将节能减排作为一项系统工程完成减排任务。综上,节能减排不只是一个口号也不仅是一项目标,而是一件需要具体依靠政府、企业、消费者各方力量共同完成的长远而艰巨的任务。

然而本文只考虑到了征税导致减排量的下降,却没有考虑到供应链参与者利润损失,所以在征收碳税同时对企业的节能减排技术研发行为进行补贴可能成为进一步研究的方向。

## 参考文献:

[1] Lin Boqiang, Li Xuehui. The effect of carbon tax on per



- capita CO<sub>2</sub> emissions [J]. *Energy Policy*, 2011, 39(9): 5137–5146.
- [2] Conefrey T, Gerald J D F, Valeri L M, et al. The impact of a carbon tax on economic growth and carbon dioxide emissions in Ireland[J]. *Journal of Environmental Planning and Management*, 2013, 56(7): 934–952.
- [3] Allan G, Lecca P, McGregor P, et al. The economic and environmental impact of a carbon tax for Scotland: A computable general equilibrium analysis[J]. *Ecological Economics*, 2014, 100: 40–50.
- [4] Lu Chuanyi, Tong Qing, Liu Xuemei. The impacts of carbon tax and complementary policies on Chinese economy [J]. *Energy Policy*, 2010, 38(11): 7278–7285.
- [5] 姚昕, 刘希颖. 基于增长视角的中国最优碳税研究[J]. *经济研究*, 2010, (11): 48–58.
- [6] 朱永彬, 刘晓, 王铮. 碳税政策的减排效果及其对我国经济的影响分析[J]. *中国软科学*, 2010, (4): 1–10.
- [7] Meng S, Siriwardana M, McNeill J. The environmental and economic impact of the carbon tax in Australia[J]. *Environmental and Resource Economics*, 2013, 54(3): 313–332.
- [8] Cachon G P. Retail store density and the cost of greenhouse gas emissions[J]. *Management Science*, 2013, 60(8): 1907–1925.
- [9] Lukas E, Welling A. Timing and eco(nomic) efficiency of climate-friendly investments in supply chains[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 233(2): 448–457.
- [10] Martina R, de 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.
- [11] 蔡圣华, 牟敦国, 方梦祥. 二氧化碳强度减排目标下我国产业结构优化的驱动力研究[J]. *中国管理科学*, 2011, 19(4): 167–173.
- [12] 李友东, 赵道致, 谢鑫鹏. 考虑消费者低碳偏好的两级供应链博弈分析[J]. *内蒙古大学学报*, 2013, 45(5): 64–69.
- [13] 张毅, 夏炎. 工业化过程中碳排放消费建设比的演变规律研究[J]. *中国管理科学*, 2012, 20(2): 159–166.
- [14] Servaes H. The impact of corporate social responsibility on firm value: The role of customer awareness [J]. *Management Science*, 2013, 59(5): 1045–1061.
- [15] Benjaafar S, Li Yanzhi, Daskin M. Carbon footprint and the management of supply chains: Insights from simple models[J]. *Automation Science and Engineering*, 2013, 10(1): 99–116.
- [16] 赖苹, 曹国华, 马文斌. 基于节能减排技术研发的企业联盟合作模式选择[J]. *技术经济*, 2013, 32(12): 10–14.
- [17] Jaber M Y, Glock C H, Saadany AMAE. Supply chain coordination with emissions reduction incentives [J]. *International Journal of Production Research*, 2013, 51(1): 69–82.
- [18] 黄守军, 任玉珑, 孙睿, 等. 基于碳减排调度的激励性厂网合作竞价机制设计[J]. *中国管理科学*, 2011, 19(5): 138–146.
- [19] Theiben S, Spinler S. Strategic analysis of manufacturer-supplier partnerships: An ANP model for collaborative CO<sub>2</sub> reduction management [J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 233(2): 383–397.
- [20] Tsai W H, Yang C H, Chang J C, et al. An activity-based costing decision model for life cycle assessment in green building projects[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 238(2): 607–619.
- [21] 张汉江, 孟园, 何酉子. 公共财政补贴内生性与闭环供应链的短期均衡结果分析[J]. *系统工程*, 2013, 31(08): 55–59.
- [22] 张汉江, 李聪颖, 姚琴, 等. 闭环供应链上的最优回收激励契约与政府补贴再制造政策的最优化[J]. *系统工程*, 2014, 32(8): 74–79.

## The Game Analysis of the Supply Chain Cooperative R & D and the Government's Behavior under the Low-carbon Background

ZHANG Han-jiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Jia-yu<sup>1,2</sup>, LAI Ming-yong<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Economics and Trade, Hunan University, Changsha 410079, China;

2. Hunan Province Key Laboratory of logistics information and Simulation Technology, Changsha 410079, China;

3. Economics and Management School of Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** In the background of low-carbon, study the optimal emission reductions for vertical supply chain with a carbon tax levied by the Government. Through the three models of no reduction of R & D, manufacturer's reduction of R & D alone and cooperation reduction, the converse method is used to solve this problem. By this method, firstly the decision is made by the manufacturer on the optimal emission reduc-

tions; then the price of products as set by the supplier and the manufacturer respectively and then their own optimal profits are gained. Through the analysis of equilibrium, It's found that the optimal emission reductions under the supply chain's cooperation R & D is more than that by manufacturer's reduction alone; The optimal emission reductions have a negative relationship with R & D cost coefficient, and a positive relationship with share proportion. At last, a numerical analysis proves that the reasonable carbon tax rates not only maximize the emission reductions, but also is conducive to supply chain's cooperative reductions of R & D.

**Key words:** logistics and supply chain management; carbon emissions; cooperative research and development; supply chain coordination; carbon tax