

# 非对称信息下供应链减排投资策略及激励机制<sup>①</sup>

楼高翔,张洁琼,范体军,周炜星

(华东理工大学商学院,上海 200237)

**摘要:** 来自政府和市场的低碳压力迫使企业及其所在供应链采取减排行动. 由此,在允许排放权交易且消费者低碳偏好信息不对称情景下,对制造商投资减排技术的供应链激励机制设计问题展开研究. 研究表明,非对称信息下,制造商可以通过供应链激励机制设计实现信息共享,但该机制并不一定能实现系统绩效最优;由于缺乏消费者低碳偏好的准确信息,制造商的利润总会小于其在对称信息下的利润,而拥有私有信息的零售商则可能获得额外收益;制造商的最优减排水平与消费者低碳偏好正相关;通过管制排放权交易价格、提供技术投入补贴等手段,政府可以激励企业投资减排技术,并达到降低碳排放总量的目的.

**关键词:** 减排技术投资; 排放权交易; 非对称信息; 供应链

**中图分类号:** F272.3; F224 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2016)02-0042-11

## 0 引 言

根据 IPCC 第四次评估报告,全球气候变暖 90% 的可能性是人类工业化活动排放出大量的二氧化碳和甲烷等温室气体造成的<sup>[1]</sup>. 鉴于全球气候变暖可能对人类造成灾难性的影响,温室气体排放问题已引起了各国政府、企业和社会的空前关注.

作为世界最大的二氧化碳排放国家,我国政府提出到 2015 年全国单位 GDP 二氧化碳排放比 2010 年下降 17% 的减排目标,同时在 4 个直辖市、广东、湖北和深圳 7 地积极展开碳排放权交易的试点工作. 可以预见,碳排放权交易机制将在我国未来的减排实践中扮演重要的角色<sup>[2]</sup>.

另一方面,环境问题已日益受到消费者的普遍关注. 除了关注商品本身的碳排放情况,一些具有低碳偏好的消费者也愿意通过购买行为督促企业生产和销售低碳产品. 例如,心理和行为经济学研究发现,企业通过给消费者提供充足的成本和

碳排放信息,降低在成本-效益分析方面的认知困难程度,并响应环境保护的诉求,能够有效地增加消费者的支付意愿<sup>[3]</sup>. 也有研究开始把消费者的环境敏感性纳入到企业碳减排运作决策考虑<sup>[4]</sup>.

目前对于排放权交易机制的研究大多停留在宏观层面<sup>[5]</sup>. 由于全球碳排放的限制以及排放与交易机制的建立,碳排放因素势必会对企业的生产运作决策产生影响,部分学者开始从微观层面展开研究,探讨减排政策对企业和供应链运作的影响. Benjaafar 等率先将碳排放因素纳入企业决策模型中,得出诸多颇有意义的管理启示,在碳排放运作议题上具有开创性意义<sup>[6]</sup>. 张靖江针对单个排放依赖型厂商,研究其在不同需求情形下的单周期最优产量决策,并将该问题研究拓展到排放依赖型供应链中<sup>[7]</sup>. Hua<sup>[8]</sup> 等考虑了排放权交易机制的影响,设计了可用于存货碳足迹管理的最优订货量模型. Du 等<sup>[9]</sup> 认为排放许可分配是政

① 收稿日期: 2014-11-29; 修订日期: 2015-09-25.

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划课题资助项目(2013BAH11F03); 国家自然科学基金资助项目(71573087; 71431004; 71473085; 71202052); 上海市浦江人才计划资助项目(15PJJC020; 14PJJC020); 中央高校基本科研业务费资助项目.

作者简介: 楼高翔(1976—),男,浙江义乌人,博士,副教授. Email: gxlou@ecust.edu.cn

府的重要减排政策手段,探讨了碳配额对于排放依赖型企业及排放许可供应商的决策影响,同时利用伯努利纳什社会福利函数可以得到最优配额分配方案. Mohamad 等<sup>[10]</sup>将欧盟碳排放交易体系与供应链运营管理相结合,针对生产过程中的温室气体排放问题,建立了一系列基于协调机制的二级供应链模型. Konur 和 Schaefer<sup>[11]</sup>对 4 种不同碳排放政策下库存控制和运输策略进行比较分析,发现承运人的运输成本和运输产生的排放均会对客户的决策产生影响.

上述研究均基于相关减排政策,在对称信息条件下对企业和供应链的生产运作决策进行分析. 在现实经济活动中,供应链中成员为了自身利益最大化,隐瞒或虚报私有信息的情况时有发生,而信息不对称会带来诸如交易成本增加、绩效监测困难、供应链效率降低等严重后果. 因此,在存在信息不对称的情况下,如何设计有效的激励机制以消除信息不对称问题并提高供应链绩效,已成为越来越多学者的研究重点.

针对供应链中非对称信息的研究,有部分学者选择以下游企业拥有的私有信息作为系统的非对称信息,如价格信息、市场需求信息、销售商能力信息和销售成本信息等. 但斌等<sup>[12]</sup>对价格信息不对称下的生鲜供应链协调问题展开研究,其研究结果表明,批发商共享采购价格信息,不但提高了批发市场运营商的期望利润,更有助于稳定生鲜农产品的供给,平抑生鲜农产品价格波动. Babich 等<sup>[13]</sup>研究了需求信息非对称下供应商激励契约设计问题,结果显示该契约能够实现供应商和零售商之间利润的任意分配,且在极限情况下,供应商最优解接近于系统最优解,信息租接近于零. 曹柬等<sup>[14]</sup>对销售商能力为不对称信息下的供应链线性分成制契约设计展开研究,比较了不对称信息为离散类型和连续类型情况下的线性分成制契约设计过程,并提出了不对称信息为连续类型情况下的次优契约是线性分离契约的前提条件. 郎艳怀<sup>[15]</sup>探究了销售商成本信息非对称和价格弹性需求下,二级供应链的激励机制设计问题. 研究表明,较之对称信息博弈情况,非对称信息激励机制下销售商能获得更大的收益,且此时的系统总收益也是更大的;供应链在信息不对称情形下无法凭借激励机制实现系统最优,只能得到帕

累托改善的次优结果. Shen 和 Willems<sup>[16]</sup>将零售商成本信息作为私有信息,探究了考虑渠道协调和不考虑渠道协调两种情况下,最大化制造商期望利润的回购契约设计问题.

也有部分学者针对上游供应商、制造商的成本信息非对称问题进行探究. Xu 等<sup>[17]</sup>研究了后备供应商成本信息非对称情况下的契约设计问题,结果表明,传统的定价契约将导致后备供应商无限期延后发货,而考虑提前期和一次性转移支付的新契约能够有效解决信息不对称问题. 张煜等<sup>[18]</sup>针对供应链上下游企业间质量成本信息非对称问题展开研究并发现,引入第三方质量成本审查策略后,新契约对成本虚报问题有显著的抑制作用,同时能够消除因信息不对称引起的信息租;下游企业通过提高批发价格能够有效激励上游企业增加对质量成本的投入. Cakanyildirim 等<sup>[19]</sup>探究了供应商生产成本信息非对称,且保留利润与生产成本相关的情况下,零售商的契约设计问题. 研究表明,非对称信息并不一定影响系统绩效,当低成本供应商的成本效率在一定范围内时,契约能够有效协调供应链. 他们还进一步分析了各个可能对最优契约造成影响的因素并得到了相关结论.

对于激励机制能否协调供应链、消除信息不对称以及缺乏信息一方是否需要为得到信息而支付信息租等方面,上述研究者们持有不同的见解. 本文将“制造商——零售商”的二级供应链为研究对象,在碳排放交易的政策条件下,考虑消费者低碳偏好作为零售商私有信息的不对称信息结构,对制造商的减排技术投资策略和激励机制设计问题展开研究,并与对称信息和集中控制的情况作比较,同时探究排放权交易价格、减排难度以及单位产品碳排放对于双方决策、减排技术推广、最终减排效果的影响,从而寻找有效的供应链协调策略以最终实现供应链碳减排的目的.

## 1 理论分析

### 1.1 问题描述、基本假设与参数

考虑由单个制造商和单个零售商构成的二级供应链系统,如图 1 所示. 顾客需求  $D$  受产品价

格  $P$  和单位产品的碳减排水平决定. 制造商的碳排放受配额  $C_g$  约束, 超出或节省部分可通过排放权交易转化.

结合现实情况, 做出如下假设:

1) 供应链成员是风险中性的, 即其效用水平等于其期望收益水平;

2) 排放权自由交易, 在一定范围内排放权市场供应充足;

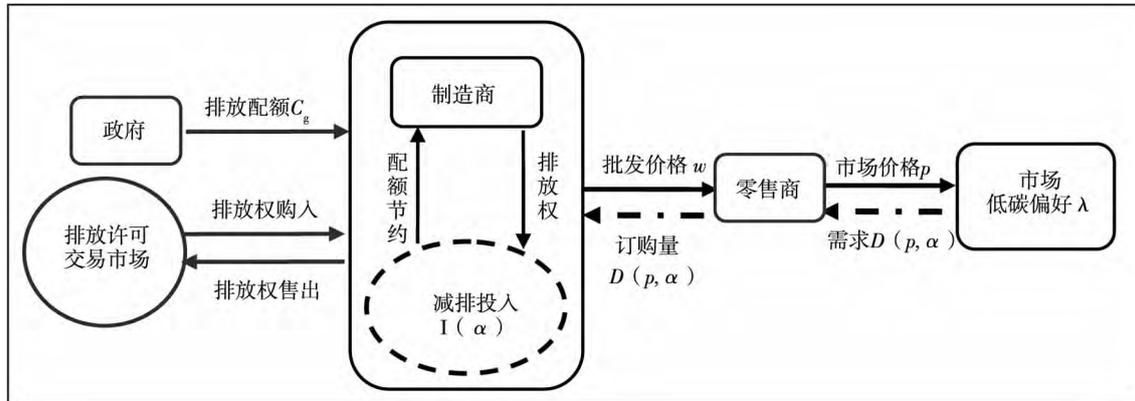


图1 允许排放权交易的二级供应链系统示意图

Fig. 1 Two levels supply chain system with emission trading

3) 市场需求函数为<sup>[20]</sup>  $D = a - p + \lambda\alpha$ , 其中  $a$  表示市场潜在需求;  $p$  为产品市场价格;  $\alpha \in (0, 1)$  表示减排百分比;  $\lambda$  表示单位减排百分比变化对消费者需求的影响;

4) 减排投入成本  $I(\alpha)$  随减排百分比  $\alpha$  上升而加速上升, 本文假设  $I(\alpha) = -k \ln(1 - \alpha)$ ;

5) 在信息不对称情形下, 市场上消费者低碳偏好为零售商的私有信息. 制造商无法准确预测消费者低碳偏好;

本文所涉及的主要参数符号汇总如表 1.

表1 主要参数符号汇总表

Table 1 Parameters and notations

$C_g$	来自政府的排放许可配额
$c$	制造商生产单位产品的变动成本
$w$	决策变量, 单位产品批发价格
$p$	决策变量, 单位产品市场价格
$r$	排放权交易市场上单位排放权交易价格
$e_0$	制造商生产单位产品产生的初始碳排放量
$k$	制造商面临的减排难度系数
$\lambda$	市场上消费者低碳偏好系数
$\alpha$	决策变量, 单位产品的减排百分比 $\alpha \in (0, 1)$
$I(\alpha)$	减排百分比为 $\alpha$ 时的减排投入成本, 连续可微, 且满足 $I(0) = 0, I(1) = +\infty, I'(\alpha) > 0, I''(\alpha) > 0$
$D(p, \alpha)$	零售商面对的产品市场需求, 也是零售商对制造商提出的订货数量

### 1.2 非对称信息下的激励机制设计

假设零售商拥有私有信息——市场上消费者的低碳偏好, 分别用  $\lambda_L$  和  $\lambda_H$  表示, 并将零售商称为 L 型 (H 型), 同时假设  $\lambda_H / \lambda_L > 1$ . 远离市场的制造商无法准确预测消费者低碳偏好, 仅知道低碳偏好为  $\lambda_L$  的概率为  $\rho$ , 为  $\lambda_H$  的概率为  $1 - \rho$ , 因此制造商希望通过设计有效的激励机制, 诱使零售商披露自己的私有信息, 实现自身期望利润最大化. 为此, 制造商向零售商提供两种契约  $\{w_L, \alpha_L, t_L\}$  和  $\{w_H, \alpha_H, t_H\}$  供其选择, 其中  $t$  为零售商给制造商的一次性转移支付.

于是, 零售商面临的优化问题为

$$\max_p \pi_A^R = (p - w)(a - p + \lambda\alpha) - t \quad (1)$$

式中下标 A 表示非对称信息情景.

而制造商面临的优化问题为

$$\begin{aligned} \max_{w_L, \alpha_L, t_L, w_H, \alpha_H, t_H} \pi_A^M = & (1 - \rho) \pi_H^M(w_H, \alpha_H, t_H) + \rho \pi_L^M(w_L, \alpha_L, t_L) = \\ & (1 - \rho) \{ (w_H - c)(a - p_{HH} + \lambda_H \alpha_H) - \\ & r[e_0(1 - \alpha_H)(a - p_{HH} + \lambda_H \alpha_H) - C_g] + \\ & k \ln(1 - \alpha_H) + t_H \} + \rho \{ (w_L - c) \times \\ & (a - p_{LL} + \lambda_L \alpha_L) - \\ & r[e_0(1 - \alpha_L)(a - p_{LL} + \lambda_L \alpha_L) - C_g] + \\ & k \ln(1 - \alpha_L) + t_L \} \end{aligned} \quad (2)$$

s. t.

$$\pi_{LL}^R = (p_{LL} - w_L)(a - p_{LL} + \lambda_L \alpha_L) - t_L \geq M \quad (3)$$

$$\pi_{HH}^R = (p_{HH} - w_H)(a - p_{HH} + \lambda_H \alpha_H) - t_H \geq M \quad (4)$$

$$\pi_{LL}^R(w_L, \alpha_L, t_L, p_{LL}) \geq \pi_{LH}^R(w_H, \alpha_H, t_H, p_{LH}) \quad (5)$$

$$\pi_{HH}^R(w_H, \alpha_H, t_H, p_{HH}) \geq \pi_{HL}^R(w_L, \alpha_L, t_L, p_{HL}) \quad (6)$$

其中  $M$  为零售商的保留利润. 约束 (3) 和 (4) 表明零售商只有在达到保留利润的时候才会选择与制造商合作. 约束 (5) 和 (6) 则保证了零售商会根据市场的实际情况选择相应的契约.

易知式 (3) 和式 (6) 一定取等式. 如果约束松弛, 制造商总会在不影响约束成立的前提下增加一次性转移支付  $t_L$  和  $t_H$  来增加自己的利润. 因此, 可以得到

$$t_L = (p_{LL} - w_L)(a - p_{LL} + \lambda_L \alpha_L) - M \quad (7)$$

$$t_H = t_L - (p_{HL} - w_L)(a - p_{HL} + \lambda_H \alpha_L) + (p_{HH} - w_H)(a - p_{HH} + \lambda_H \alpha_H) \quad (8)$$

令零售商利润  $\pi^R$  关于价格  $p$  的一阶条件等于 0, 有

$$\frac{\partial \pi^R}{\partial p} = a - p + \lambda \alpha - p + w = 0$$

$$\Rightarrow p_{LL}(\alpha_L, w_L) = \frac{1}{2}(a + \lambda_L \alpha_L + w_L)$$

$$p_{HH}(\alpha_H, w_H) = \frac{1}{2}(a + \lambda_H \alpha_H + w_H)$$

$$p_{HL}(\alpha_L, w_L) = \frac{1}{2}(a + \lambda_H \alpha_L + w_L)$$

由式 (7) 和式 (8) 有

$$\Rightarrow t_L = (p_{LL} - w_L)(a - p_{LL} + \lambda_L \alpha_L) - M$$

$$= \frac{1}{4}(a + \lambda_L \alpha_L - w_L)^2 - M$$

$$= (p_{LL} - w_L)^2 - M = t_L(\alpha_L, w_L)$$

$$t_H = t_L - \frac{1}{4}(a + \lambda_H \alpha_L - w_L)^2 +$$

$$\frac{1}{4}(a + \lambda_H \alpha_H - w_H)^2$$

$$= (p_{LL} - w_L)^2 - (p_{HL} - w_L)^2 +$$

$$(p_{HH} - w_H)^2 - M$$

$$= t_H(\alpha_L, w_L, \alpha_H, w_H)$$

因此, 在非对称信息情况下, 制造商面临的优化问题可表示为

$$\max_{w_L, \alpha_L, t_L, w_H, \alpha_H, t_H} \pi_A^M =$$

$$(1 - \rho) \left\{ \frac{1}{2}(w_H - c)(a + \lambda_H \alpha_H - w_H) - \right.$$

$$\left. \frac{1}{2}re_0(1 - \alpha_H)(a + \lambda_H \alpha_H - w_H) + \right.$$

$$k \ln(1 - \alpha_H) - \frac{1}{4}(a + \lambda_H \alpha_L - w_L)^2 +$$

$$\left. \frac{1}{4}(a + \lambda_H \alpha_H - w_H)^2 \right\} +$$

$$\rho \left\{ \frac{1}{2}(w_L - c)(a + \lambda_L \alpha_L - w_L) - \right.$$

$$\left. \frac{1}{2}re_0(1 - \alpha_L)(a + \lambda_L \alpha_L - w_L) + \right.$$

$$\left. k \ln(1 - \alpha_L) \right\} -$$

$$M + \frac{1}{4}(a + \lambda_L \alpha_L - w_L)^2 + rC_g$$

最优化后可得

$$w_H = w_H(\alpha_H) = c + re_0 - re_0 \alpha_H \quad (9)$$

考虑到  $a, r, e_0$  和  $\lambda_H$  均为外生变量, 可令  $\zeta_1 =$

$$\frac{1}{2}(\lambda_H + re_0)^2, \zeta_2 = \frac{1}{2}(\lambda_H + re_0)(a - c - re_0),$$

则当消费者低碳偏好较低时, 制造商的最优减排

$$\text{水平 } \alpha_H = \frac{(\zeta_1 - \zeta_2) + \sqrt{(\zeta_1 + \zeta_2)^2 - 4k\zeta_1}}{2\zeta_1}. \text{ 将}$$

$\alpha_H^*$  代入式 (9) 可以得到相应的最优批发价格

$$w_H^* = w_H(\alpha_H) = c + re_0 - re_0 \alpha_H = c + re_0 - re_0 \frac{(\zeta_1 - \zeta_2) + \sqrt{(\zeta_1 + \zeta_2)^2 - 4k\zeta_1}}{2\zeta_1}$$

同样, 求得  $\pi_A^M$  关于  $w_L, \alpha_L$  的一阶条件、二阶条件, 并令一阶条件等于 0, 可得

$$w_L = w_L(\alpha_L) = c + re_0 +$$

$$\frac{2}{\rho} \alpha_L \left( \frac{1 - \rho}{2} \lambda_H + \frac{\rho - 1}{2} \lambda_L - \frac{\rho}{2} re_0 \right) \quad (10)$$

$$\text{令 } \zeta_3 = \frac{1}{2\rho} [\rho(re_0 + \lambda_H) - (\lambda_H - \lambda_L)]^2 -$$

$$\frac{1 - \rho}{2}(\lambda_H + \lambda_L)^2, \zeta_4 = \frac{1}{2}[\rho(re_0 + \lambda_H) - (\lambda_H - \lambda_L)] \times$$

$(a - c - re_0)$ . 则当消费者低碳偏好较低时, 制造商的

$$\text{最优减排水平 } \alpha_L^* = \frac{\zeta_3 - \zeta_4 + \sqrt{(\zeta_3 + \zeta_4)^2 - 4\rho k \zeta_3}}{2\zeta_3}.$$

将  $\alpha_L^*$  代入式 (10) 可以得到相应的最优批发价格

$$\begin{aligned}
w_L^* &= w_L^*(\alpha_L) = c + re_0 + \frac{2\eta_1}{\rho}\alpha_L \\
&= c + re_0 - re_0\alpha_L^* + \frac{1-\rho}{\rho}(\lambda_H - \lambda_L)\alpha_L^* \\
&= c + re_0 - re_0 \frac{\zeta_3 - \zeta_4 + \sqrt{(\zeta_3 + \zeta_4)^2 - 4\rho k \zeta_3}}{2\zeta_3} + \\
&\quad \frac{1-\rho}{\rho}(\lambda_H - \lambda_L) \frac{\zeta_3 - \zeta_4 + \sqrt{(\zeta_3 + \zeta_4)^2 - 4\rho k \zeta_3}}{2\zeta_3}
\end{aligned}$$

推论 1 契约条件下, H 型零售商(即消费者低碳偏好为高)可以得到除保留利润外的额外收益,而 L 型零售商(即消费者低碳偏好为低)只能得到保留利润。

市场上消费者低碳偏好为  $\lambda_H$  时,零售商接受契约  $\{w_H, \alpha_H, t_H\}$  后得到的收益将大于其保留利润,这一差值可以看作制造商为了得到真实的市场信息所需要付给零售商的“信息共享费”。如果制造商不支付该成本,零售商可能虚报市场信息进而损害制造商的期望利润。

推论 1 同时也表明约束(3)和约束(6)可以保证约束(4)的实现。此外,在暂不考虑式(5)的情况下求得最优解后,可以验证式(5)也必定成立。

推论 2 减排难度过大时,制造商有可能选择不投资减排技术。非对称信息下,市场上消费者低碳偏好越高,制造商对减排难度的承受能力越强(证明略)。

根据推论 2,  $\alpha_H^*$  和  $\alpha_L^*$  可改写为分段函数形式

$$\alpha_H^* = \begin{cases} \frac{(\zeta_1 - \zeta_2) + \sqrt{(\zeta_1 + \zeta_2)^2 - 4k\zeta_1}}{2\zeta_1}, & k < \zeta_2 \\ 0, & k \geq \zeta_2 \end{cases}$$

$$\alpha_L^* = \begin{cases} \frac{\zeta_3 - \zeta_4 + \sqrt{(\zeta_3 + \zeta_4)^2 - 4\rho k \zeta_3}}{2\zeta_3}, & k < \frac{\zeta_4}{\rho} \\ 0, & k \geq \frac{\zeta_4}{\rho} \end{cases}$$

从利润角度解释,推论 2 表明:市场上消费者低碳偏好较高,当  $k < \zeta_2$  时,投资减排技术可以为制造商带来正的收益,否则制造商会选择不进行减排技术投资;市场上消费者低碳偏好较低,当  $k < \frac{\zeta_4}{\rho}$  时,投资减排技术可以为制造商带来正的收益,否则制造商会选择不进行减排技术投资。

推论 3 契约条件下,市场上消费者低碳偏好较高时,制造商对减排技术投资的力度更大,获得的一次性转移支付较高,表现为  $\alpha_H^* > \alpha_L^*$ ,  $t_H^* > t_L^*$ ,但相应的批发价格则较低,即  $w_H^* < w_L^*$ 。

当市场上消费者对低碳产品偏好较高时,增加减排投入对需求的促进作用更显著,制造商将通过加大减排投入刺激需求,进而增加自身利润,零售商也愿意一次性支付较高的费用鼓励制造商增加技术投入;另一方面,为了抑制零售商制定高价而对需求产生负面影响,高偏好下制造商会以较低的批发价格将产品出售给零售商。

### 1.3 供应链整合模型

在整合模型中,供应商和零售商组成一个利益整体,根据利润最大化原则确定减排水平和产品市场价格。此时供应链整体面临的优化问题为

$$\begin{aligned}
\max_{p, \alpha} \pi^{SC} &= (p - c)(a - p + \lambda\alpha) - \\
&\quad r[e_0(1 - \alpha)(a - p + \lambda\alpha) - C_g] + \\
&\quad k \ln(1 - \alpha) \tag{11}
\end{aligned}$$

求解上述优化问题,可以得到在整合模型中,供应链的最优减排水平、最优市场价格和此时供应链的利润,分别为

$$\begin{aligned}
\alpha_{SC}^* &= \frac{(\lambda + 2re_0 - a + c) + \sqrt{(\lambda + a - c)^2 - 8k}}{2(\lambda + re_0)} \\
p_{SC}^* &= \frac{1}{2}[a + \lambda\alpha_{SC}^* + c + re_0(1 - \alpha_{SC}^*)] \\
&= \frac{1}{2}(a + c + re_0) + \frac{1}{4}(\lambda - re_0) \times \\
&\quad \frac{(\lambda + 2re_0 - a + c) + \sqrt{(\lambda + a - c)^2 - 8k}}{\lambda + re_0} \\
\pi_0^{SC*} &= (\xi_2 + \xi_1\alpha_2)^2 + k \ln(1 - \alpha_2) + rC_g \\
&= \frac{1}{16}[2(a - c - re_0) + (\lambda + 2re_0 - a + c) + \\
&\quad \sqrt{(\lambda + a - c)^2 - 8k}]^2 + \\
&\quad k \ln\left(1 - \frac{(\lambda + 2re_0 - a + c) + \sqrt{(\lambda + a - c)^2 - 8k}}{2(\lambda + re_0)}\right) + \\
&\quad rC_g
\end{aligned}$$

推论 4 非对称信息下,制造商可以通过激励机制实现信息共享,但该机制并不一定能实现系统绩效最优。当且仅当市场上消费者低碳偏好为高时,制造商的最优解恰为系统最优解。

### 1.4 对称信息下的契约协调

作为比较,在本节中假设供应链具有对称信息结构,制造商首先向零售商提供单一契约 $\{w, \alpha, t\}$ ,然后由零售商决定是否接受契约,并确定相应的市场价格。

在契约协调下,零售商及制造商利润的目标函数为

$$\max_p \pi_S^R = (p - w)(a - p + \lambda\alpha) - t \quad (12)$$

$$\max_{w, \alpha, t} \pi_S^M = [w - c - re_0(1 - \alpha)](a - p + \lambda\alpha) + rC_g + k \ln(1 - \alpha) + t \quad (13)$$

$$\text{s. t. } \pi_S^R = (p - w)(a - p + \lambda\alpha) - t \geq M$$

其中下标 S 表示对称信息情景。

求解上述优化问题,可以得到在对称信息下制造商的最优契约参数和零售商的最优市场价格分别为

$$\alpha_A^* = \frac{(\lambda + 2re_0 - a + c) + \sqrt{(\lambda + a - c)^2 - 8k}}{2(\lambda + re_0)}$$

$$w_A^* = c + re_0 \left( 1 - \frac{(\lambda + 2re_0 - a + c) + \sqrt{(\lambda + a - c)^2 - 8k}}{2(\lambda + re_0)} \right)$$

$$t_A^* = \frac{1}{16} [a - c + \lambda + \sqrt{(\lambda + a - c)^2 - 8k}]^2 - M$$

$$p_A^* = \frac{1}{2} [a + \lambda\alpha_A^* + c + re_0(1 - \alpha_A^*)]$$

$$= \frac{1}{2} (a + c + re_0) + \frac{1}{4} (\lambda - re_0) \times$$

$$\frac{(\lambda + 2re_0 - a + c) + \sqrt{(\lambda + a - c)^2 - 8k}}{\lambda + re_0}$$

显然,  $\alpha_A^* = \alpha_{SC}^*, p_A^* = p_{SC}^*$ 。

即在对称信息下,制造商可以通过契约有效协调供应链,实现系统绩效最优。制造商以成本价(包括生产成本和碳成本)将产品出售给零售商,以促进整体供应链的运作绩效,而零售商需要支付制造商一定费用作为减排技术投资的补贴。通过调整一次性转移支付,制造商可以获得除零售商保留利润以外的所有利润。

另外,由于对市场上消费者低碳偏好信息的缺失,非对称信息下制造商的利润总会小于其在对称信息下的利润,而拥有私有信息的零售商则有机会获得更多的利润。这是由于非对称信息下,若市场上消费者低碳偏好为高,虽然此时供应链整体利润与对称信息时相同,但零售商可以获得除保留利润以外的额外收益,相当于制造商支付了其一部分费用作为信息租,制造商利润减少。若市场上消费者低碳偏好为低,虽然此时零售商只能获得保留利润,但由于较对称信息而言供应链整体利润降低了,所以制造商利润还是减少了。

## 2 算例分析

### 2.1 碳排放相关因素对企业最优决策影响分析

为了进一步研究排放权交易价格  $r$ 、减排难度系数  $k$  和单位产品碳排放  $e_0$  对制造商和零售商最优决策的影响,本文针对这 3 个参数作灵敏度分析(如表 2 ~ 表 4 所示)。

表 2 排放权交易价格波动对最优决策影响

Table 2 Sensitivity analysis of optimization to  $r$

$r$	$\alpha$		$w$		$t$		$p$		$D$	
	$\alpha_H$	$\alpha_L$	$w_H$	$w_L$	$t_H$	$t_L$	$p_{HH}$	$p_{LL}$	$D_H$	$D_L$
5	0.65	0.15	8.87	10.72	2 421.09	2 045.30	58.34	55.94	49.47	45.23
6	0.66	0.21	9.01	11.21	2 410.17	2 044.97	58.48	56.43	49.47	45.22
7	0.67	0.26	9.14	11.63	2 400.63	2 044.73	58.61	56.85	49.47	45.22
8	0.68	0.30	9.26	12.00	2 392.23	2 044.56	58.74	57.22	49.47	45.22
9	0.69	0.34	9.38	12.33	2 384.78	2 044.44	58.85	57.54	49.47	45.22
10	0.70	0.38	9.49	12.62	2 378.13	2 044.35	58.96	57.83	49.47	45.21
11	0.71	0.41	9.59	12.88	2 372.16	2 044.30	59.06	58.09	49.47	45.21
12	0.72	0.44	9.68	13.11	2 366.77	2 044.26	59.16	58.33	49.47	45.21
13	0.73	0.47	9.78	13.33	2 361.88	2 044.24	59.25	58.54	49.47	45.21
14	0.73	0.49	9.86	13.52	2 357.43	2 044.23	59.34	58.73	49.47	45.21
15	0.74	0.52	9.94	13.70	2 353.35	2 044.24	59.42	58.91	49.47	45.21
	↗	↗	↗	↗	↘	↘	↗	↗	→	↘

注: 参数:  $C_g = 20, c = 8, e_0 = 8, \lambda_H = 12, \lambda_L = 8, a = 100, k = 250, \rho = 0.5$ 。

表3 减排难度系数对最优决策影响  
Table 3 Sensitivity analysis of optimization to  $k$

$k$	$\alpha$		$w$		$t$		$p$		$D$	
	$\alpha_H$	$\alpha_L$	$w_H$	$w_L$	$t_H$	$t_L$	$p_{HH}$	$p_{LL}$	$D_H$	$D_L$
159.5	0.81	0.61	8.93	12.39	2 427.21	2 139.56	59.35	58.64	50.42	46.26
217.5	0.74	0.47	9.28	12.53	2 396.05	2 078.72	59.10	58.13	49.82	45.59
275.5	0.67	0.31	9.65	12.69	2 363.82	2 017.25	58.85	57.60	49.20	44.91
333.5	0.60	0.16	10.02	12.84	2 330.44	1 955.12	58.59	57.06	48.57	44.22
391.5	0.52	0.00	10.40	13.00	2 295.81	1 892.25	58.32	56.50	47.91	43.50
449.5	0.44	0.00	10.80	13.16	2 259.81	1 828.59	58.04	55.93	47.24	44.07
507.5	0.36	0.00	11.21	13.33	2 222.31	1 764.06	57.76	55.33	46.55	44.67
565.5	0.27	0.00	11.63	13.51	2 183.16	1 698.58	57.46	54.72	45.83	45.28
623.5	0.19	0.00	12.07	13.69	2 142.16	1 632.03	57.15	54.09	45.09	45.91
681.5	0.10	0.00	12.52	13.88	2 099.11	1 564.30	56.83	53.43	44.31	46.57
739.5	0.00	0.00	13.00	14.07	2 053.72	1 495.23	56.50	52.74	43.50	47.26
	↘	↘→	↗	↗	↘	↘	↘	↘	↘	↘↗

注: 参数:  $C_g = 20, c = 8, e_0 = 8, \lambda_H = 12, \lambda_L = 8, a = 100, r = 10, \rho = 0.5$ .

表4 单位产品碳排放对最优决策影响  
Table 4 Sensitivity analysis of optimization to  $e_0$

$e_0$	$\alpha$		$w$		$t$		$p$		$D$	
	$\alpha_H$	$\alpha_L$	$w_H$	$w_L$	$t_H$	$t_L$	$p_{HH}$	$p_{LL}$	$D_H$	$D_L$
0.25	0.65	0.15	8.87	10.72	2 421.09	2 045.30	58.34	55.94	49.47	45.23
0.30	0.66	0.21	9.01	11.21	2 410.17	2 044.97	58.48	56.43	49.47	45.22
0.35	0.67	0.26	9.14	11.63	2 400.63	2 044.73	58.61	56.85	49.47	45.22
0.40	0.68	0.30	9.26	12.00	2 392.23	2 044.56	58.74	57.22	49.47	45.22
0.45	0.69	0.34	9.38	12.33	2 384.78	2 044.44	58.85	57.54	49.47	45.22
0.50	0.70	0.38	9.49	12.62	2 378.13	2 044.35	58.96	57.83	49.47	45.21
0.55	0.71	0.41	9.59	12.88	2 372.16	2 044.30	59.06	58.09	49.47	45.21
0.60	0.72	0.44	9.68	13.11	2 366.77	2 044.26	59.16	58.33	49.47	45.21
0.65	0.73	0.47	9.78	13.33	2 361.88	2 044.24	59.25	58.54	49.47	45.21
0.70	0.73	0.49	9.86	13.52	2 357.43	2 044.23	59.34	58.73	49.47	45.21
0.75	0.74	0.52	9.94	13.70	2 353.35	2 044.24	59.42	58.91	49.47	45.21
	↗	↗	↗	↗	↘	↘	↗	↗	→	↘

注: 参数:  $C_g = 20, c = 8, r = 10, \lambda_H = 12, \lambda_L = 8, a = 100, k = 250, \rho = 0.5$ .

结果显示:

1) 排放权交易价格和单位产品碳排放的增加均意味着单位产品减排成本的上升,因此制造商希望通过提高减排水平节约碳排放,并以提高批发价格的方式将减排技术投资成本转嫁给零售商.另一方面,批发价格的上升必然会导致市场价格上升,制造商将适当降低一次性转移支付以避免市场价格过高;

2) 减排难度过大(如技术限制、成本限制)会对制造商减排投资活动产生抑制作用,甚至可能出现制造商不投资减排技术的情况.制造商通过增加批发价格和降低一次性转移支付能够有效控制市场价格产生太大波动.

## 2.2 集中控制和激励机制下供应链系统利润比较分析

通过上述理论分析,已经得到了激励机制并不一定能有效协调供应链的推论,为了得到更直观的结论,在本小节中将各排放相关因素作为自变量,比较不同市场状态下,集中控制和激励机制下供应链系统的利润.

如图2~图4所示,当市场上消费者低碳偏好为高时,信息非对称情况下制造商的激励机制确实能够使供应链系统利润与集中控制下系统利润一致;而当市场上消费者低碳偏好为低时,信息非对称情况下供应链系统利润总是低于集中控制下系统利润,且这一差值随着排放权交易价格和单位产品碳

排放的增大而减小 随着减排难度的增大而增大.

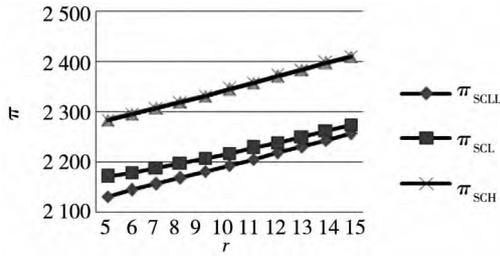


图 2 排放权交易价格波动对供应链系统利润影响  
Fig. 2 Supply chain's profits versus  $r$

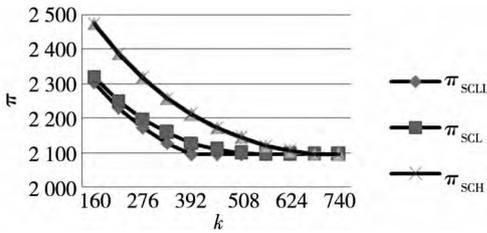


图 3 减排难度系数对供应链系统利润影响  
Fig. 3 Supply chain's profits versus  $k$

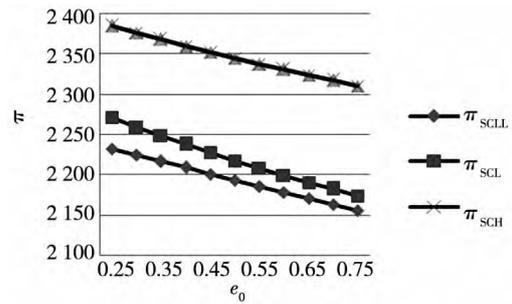


图 4 单位产品碳排放对供应链系统利润影响  
Fig. 4 Supply chain's profits versus  $e_0$

此外, 根据推论 1, 非对称信息下, 当市场上消费者低碳偏好为高时, 虽然制造商的激励机制令其最优解恰为系统最优解, 但制造商依然不可避免的需要支付给零售商一部分金额作为信息租. 由表 5 可知, 零售商的额外收益与排放权交易价格和单位产品碳排放同向变化, 与减排难度呈反向变化.

表 5 排放相关因素对 H 型零售商额外收益影响

Table 5  $R_H$  versus  $r, k$  and  $e_0$

$r$	$R_H$	$k$	$R_H$	$e_0$	$R_H$
5.00	26.52	159.50	114.79	0.25	26.52
6.00	37.45	217.50	85.69	0.30	37.45
7.00	46.99	275.50	56.84	0.35	46.99
8.00	55.39	333.50	28.27	0.40	55.39
9.00	62.84	391.50	0.00	0.45	62.84
10.00	69.49	449.50	0.00	0.50	69.49
11.00	75.46	507.50	0.00	0.55	75.46
12.00	80.85	565.50	0.00	0.60	80.85
13.00	85.74	623.50	0.00	0.65	85.74
14.00	90.19	681.50	0.00	0.70	90.19
15.00	94.26	739.50	0.00	0.75	94.26

非对称信息下, 若市场上消费者低碳偏好为低, 制造商的激励机制无法有效协调供应链, 那什么情况下此时的最优解最接近集中控制下系统的最优解这一问题值得探究.

图 5 和图 6 描绘了  $\lambda_H$  和  $\lambda_L$  对最优减排水平  $\alpha_L, \alpha_{SC}$  及市场价格  $p_L, p_{SC}$  的影响, 可以看到在左上角位置  $\alpha_L$  和  $p_L$  最接近  $\alpha_{SC}$  和  $p_{SC}$ , 而该位置恰为  $\lambda_H$  与  $\lambda_L$  差值最小的时候. 也就是说非对称信息下, 当实际消费者低碳偏好为低时, 制造商对市场预估的两种状态越接近, 则激励机制下供应链最优解将越接近集中控制下系统的最优解; 反之, 则越偏离.

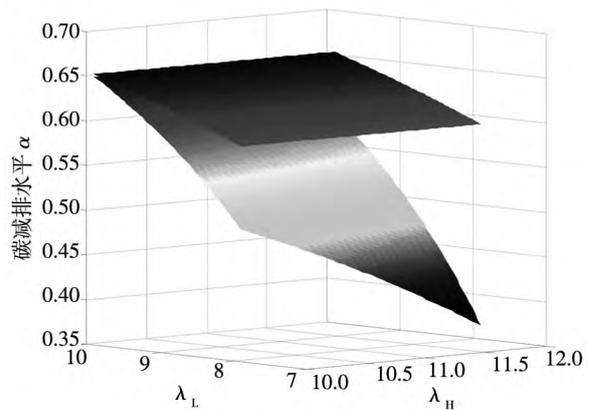


图 5  $\lambda_H$  和  $\lambda_L$  对最优减排水平  $\alpha$  影响  
Fig. 5  $\alpha$  versus  $\lambda_H$  and  $\lambda_L$

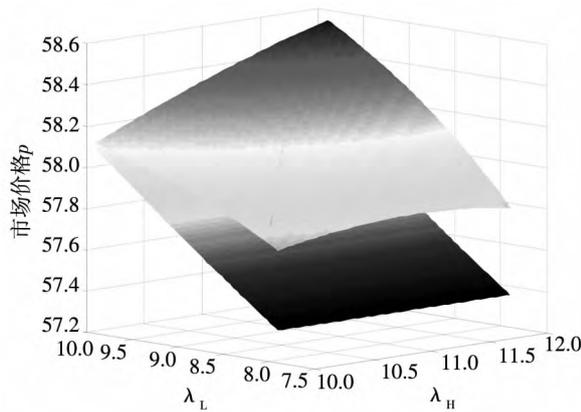


图6  $\lambda_H$ 和 $\lambda_L$ 对最优市场价格 $p$ 影响

Fig. 6  $p$  versus  $\lambda_H$  and  $\lambda_L$

### 2.3 碳排放相关因素对最优结果影响分析

在2.1小节中,针对各碳排放相关因素对制造商减排技术投资决策的影响展开了分析,在本小节中,将进一步探究因减排技术投资变化而对最优结果产生的影响.

结果显示:

1) 排放权交易价格的上升将激励制造商提高减排水平,增加减排投入,获得更多的排放权节约(表2).由于初始排放量不受影响,整个系统的最终排放量呈递减趋势,制造商将通过出售排放权获利(图7).因此,政府对排放权交易市场加以管制,适当抬高交易价格,将有助于减排技术的推广及减排目标的达成.

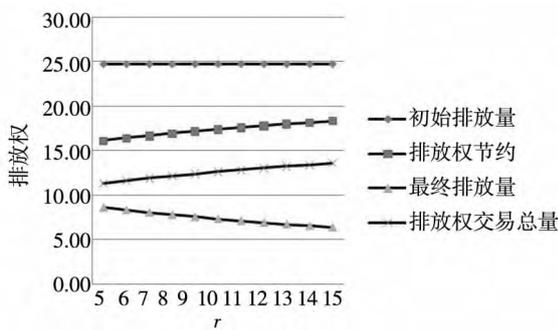


图7 排放权交易价格波动对优化结果影响

Fig. 7 Optimization results versus  $r$

2) 减排难度过大(如技术限制、成本限制)会对制造商减排投资活动产生负面影响(表2).虽然初始排放量因产量下降而下降,排放权节约量的锐减使得最终排放量依然增加,制造商由出售排放权转变为买入排放权(图8).因此当减排难度较大时,政府可以对制造商提供技术支持,或者给予适当技术投入补贴,帮助制造商顺利开展减排活动.

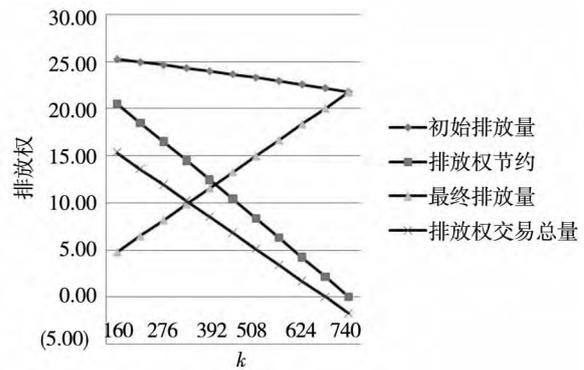


图8 减排难度系数对优化结果影响

Fig. 8 Optimization results versus  $k$

3) 高排放制造商更愿意增加减排投入,获得更多的排放权节约(表4),由于较高的初始排放量,与低排放制造商相比,高排放制造商最终排放量大,出售排放权获益少,利润低(图9).因此,政府可以考虑帮助高排放制造商向低排放转型,以获得环境及利润的双重收益.

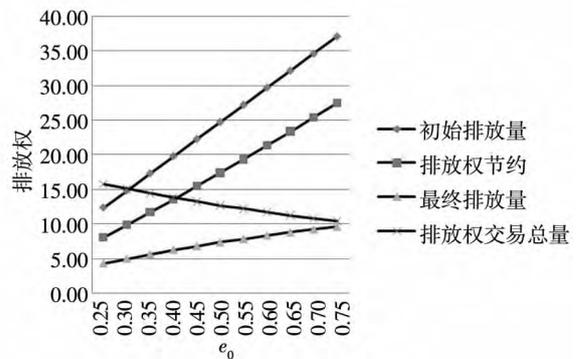


图9 单位产品碳排放对优化结果影响

Fig. 9 Optimization results versus  $\epsilon_0$

## 3 结束语

本文考虑由单制造商、单零售商构成的二级供应链,制造商受碳配额约束,且主动投资减排技术,零售商面对市场上消费者具有低碳偏好.在允许排放权交易的条件下,首先分析了当消费者低碳偏好为零售商私有信息时,制造商如何设计激励机制的问题,其次将非对称信息、对称信息和集中控制3种情况下双方的最优决策进行比较,最后通过算例分析,探究了各外生变量对双方最优决策、供应链系统利润和最优结果的影响,得到了相关政策建议.

得到以下主要结论: 1) 非对称信息下, 制造商可以通过激励机制实现信息共享, 但该机制并不一定能实现系统绩效最优. 当且仅当市场上消费者低碳偏好为高时, 制造商的最优解恰为系统最优解, 而当消费者低碳偏好为低时, 该解与系统最优解的偏离程度取决于制造商对市场状态的预估情况; 2) 对称信息下, 制造商可以通过契约有效协调供应链, 实现系统绩效最优, 且通过调整一次性转移支付, 制造商可以获得除零售商保留利润以外的所有利润. 但非对称信息下, 由于缺失市场上消费者低碳偏好信息, 制造商的利润总会小于在对称信息下的利润, 而拥有私有信息的零售商则有机会获得除保留利润外的额外收益; 3) 减

排难度过大时, 制造商有可能选择不投资减排技术. 非对称信息下, 市场上消费者低碳偏好越高, 制造商对减排难度的承受能力越强, 减排技术投资的力度越大, 并获得更高的一次性转移支付, 但相应的批发价格则较低; 4) 对排放权交易价格的管制、加强节能减排宣传、提供技术支持或减排技术投入补贴等手段均能达到激励企业投资减排技术和降低碳排放总量的目的.

需要指出的是, 本文仅局限于单制造商、单零售商构成的二级供应链, 而供应链实际运作中, 可能存在多制造商、多零售商竞争的情况. 产品之间的替代性、企业之间的差异性以及需求的随机性等因素均可作为进一步研究的方向.

### 参考文献:

- [1] IPCC ( Intergovernmental Panel on Climate Change) . Climate Change 2007: The Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge: Cambridge University Press ,2007.
- [2] 石敏俊, 袁永娜, 周晟吕, 等. 碳减排政策: 碳税、碳交易还是两者兼之? [J]. 管理科学学报, 2013, 16(9): 9-19.  
Shi Minjun, Yuan Yongna, Zhou Shenglü, et al. Carbon tax, cap-and-trade or mixed policy: Which is better for carbon mitigation [J]. Journal of Management Sciences in China, 2013, 16(9): 9-19. ( in Chinese)
- [3] Joe B. Loads of green washing-can behavioral economics increase willingness-to-pay for efficient washing machines in the UK? [J]. Energy Policy, 2012, 50: 242-252.
- [4] Toptal A, Özlü H, Konur D. Joint decisions on inventory replenishment and emission reduction investment under different emission regulations [J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(1): 243-269.
- [5] Ghosh S. Examining carbon emissions economic growth nexus for India: A multivariate co integration approach [J]. Energy Policy, 2010, 38: 3008-3014.
- [6] Benjaafar S, Li Y, Daskin M. Carbon footprint and the management of supply chains: Insights from simple models [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2013, 10(1): 99-116.
- [7] 张靖江. 考虑排放许可与交易的排放依赖型生产运作优化 [D]. 合肥: 中国科技大学, 2010.  
Zhang Jingjiang. Optimization of emission-dependent production consider with emission permits and cap-and-trade policy [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010. ( in Chinese)
- [8] Hua G, Cheng T C, Wang S. Managing carbon footprints in inventory control [J]. International Journal of Production Economics, 2011, 132(2): 178-185.
- [9] Du S, Zhu L, Liang L, et al. Emission-dependent supply chain and environment-policy-making in the 'cap-and-trade' system [J]. Energy Policy, 2013, 57: 61-67.
- [10] Mohamad Y, Christoph H, Ahmed M. Supply chain coordination with emissions reduction incentives [J]. International Journal of Production Research, 2013, 53(1): 69-82.
- [11] Konur D, Schaefer B. Integrated inventory control and transportation decisions under carbon emissions regulations: LTL vs. TL carriers [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2014, 68( August): 14-38.
- [12] 但斌, 丁松, 伏红勇. 信息不对称下销地批发市场的生鲜供应链协调 [J]. 管理科学学报, 2013, 16(10): 40-50.  
Dan Bin, Ding Song, Fu Hongyong. Fresh supply chain coordination by wholesale market in sale place under information asymmetry [J]. Journal of Management Sciences in China, 2013, 16(10): 40-50. ( in Chinese)

- [13] Babich V , Li H , Ritchken P , et al. Contracting with asymmetric demand information in supply chains [J]. *European Journal of Operational Research* , 2012 , 217( 2) : 333 – 341.
- [14] 曹 柬 , 杨春节 , 李 平 , 等. 不对称信息下供应链线性分成制契约设计研究 [J]. *管理科学学报* , 2009 , 12( 2) : 19 – 30.  
Cao Jian , Yang Chunjie , Li Ping , et al. Design of supply chain linear shared-saving contract with asymmetric information [J]. *Journal of Management Sciences in China* , 2009 , 12( 2) : 19 – 30. ( in Chinese)
- [15] 郎艳怀. 非对称信息和弹性需求下的供应链激励机制研究 [J]. *中国管理科学* , 2012 , 20( 5) : 106 – 111.  
Lang Yanhuai. Incentive mechanism in supply chain under asymmetric information and elastic demand [J]. *Chinese Journal of Management Science* , 2012 , 20( 5) : 106 – 111. ( in Chinese)
- [16] Shen Y , Willems S. Coordinating a channel with asymmetric cost information and the manufacturer's optimality [J]. *International Journal of Production Economics* , 2012 , 135( 1) : 125 – 135.
- [17] Xu H , Shi N , Ma S , et al. Contracting with an urgent supplier under cost information asymmetry [J]. *European Journal of Operational Research* , 2010 , 206 ( 2) : 374 – 383.
- [18] 张 煜 , 汪寿阳. 基于批发价格契约的质量成本审查模型分析 [J]. *系统工程理论与实践* , 2011 , 31( 8) : 1481 – 1488.  
Zhang Yu , Wang Shouyang. Analysis of quality cost audit model based on wholesale price contract [J]. *System Engineering-Theory & Practice* , 2011 , 31( 8) : 1481 – 1488. ( in Chinese)
- [19] Cakanyildirim M , Feng Q , Gan X , et al. Contracting and coordination under asymmetric production cost information [J]. *Production and Operations Management* , 2012 , 21( 2) : 345 – 360.
- [20] Ghosh D , Shah J. A comparative analysis of greening policy across supply chain structures [J]. *International Journal of Production Economics* , 2012 , 135( 2) : 568 – 583.

## Supply chain's investment strategy of emission reducing and incentive mechanism design under asymmetric information

*LOU Gao-xiang , ZHANG Jie-qiong , FAN Ti-jun , ZHOU Wei-xing*

School of Business , East China University of Science and Technology , Shanghai 200237 , China

**Abstract:** Greenhouse gas emissions have serious impacts on the natural environment. Considering emission trading and investment of emission reduction technology , models were presented for a two-stage supply chain to analyze the optimal investment decisions and incentive mechanism design under asymmetric consumer preference information. The results indicate that information sharing can be realized by an incentive mechanism , but such a mechanism can't ensure the optimal performance of the whole system. The manufacture's profit will be less due to the lack of accurate information about consumer preference , while the retailer with private information may gain an above-reservation profit. There is appositve correlation between the optimal percentage of emission reduction and a consumer's low-carbon preference. Meanwhile , the government can promote investment in emission-reduction technologies and achieve its emission reduction target by controlling emission trading prices and providing technology investment subsidies.

**Key words:** investment of emission reducing technology; carbon emission trading; asymmetric information; supply chain