

# 碳限额交易政策下寄售契约对两级可持续供应链的协调

陈玉玉<sup>1†</sup>, 李帮义<sup>1</sup>, 徐健腾<sup>2</sup>, 柏庆国<sup>2</sup>, 刘志<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 211106; 2. 曲阜师范大学 管理学院, 山东 日照 276826)

**摘要:** 考虑消费者具有低碳偏好, 在环境保护和经济利益的双重驱动下, 制造商对生产环节和销售环节进行减排技术投资, 如引进减排设备或技术. 以包含单个制造商和单个零售商的二级可持续供应链为研究对象, 基于碳限额交易政策, 首先研究寄售契约对该供应链的协调效果; 然后探究制造商应如何理性地选择减排技术投资方式, 即应该在生产环节和销售环节均进行减排技术投资还是仅在生产环节减排技术投资; 最后通过算例分析对理论结果进行验证, 并运用田口实验对参数进行鲁棒性分析和优化. 研究表明, 当政府规定的碳限额高于某一阈值时, 利润损失率低于25%, 寄售契约能够实现较好的协调效果. 此外, 与仅在生产环节进行减排投资相比, 在生产和销售环节均进行减排投资不仅减排水平提高, 而且系统总利润和制造商利润增大.

**关键词:** 碳限额交易政策; 减排技术投资; Stackelberg 博弈; 寄售契约; 协调; 低碳供应链; 田口实验

中图分类号: F253

文献标志码: A

## Two-echelon sustainable supply chain coordination with consignment contract under cap-and-trade regulation

CHEN Yu-yu<sup>1†</sup>, LI Bang-yi<sup>1</sup>, XU Jian-teng<sup>2</sup>, BAI Qing-guo<sup>2</sup>, LIU Zhi<sup>1</sup>

(1. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China; 2. School of Management, Qufu Normal University, Rizhao 276826, China)

**Abstract:** Taking into account the consumer has a low carbon preferences, under the dual driving force of environment production and economic benefit, the manufacturer invests in the emission reduction technology in the production process and sales process, such as introducing the emission reduction equipment or cleaner production technology. For a two-echelon sustainable supply chain that includes single manufacturer and single retailer, this paper studies the coordination efficiency of consignment contract on this supply chain under cap-and-trade regulation. And then we explore that how the manufacturer rationally chooses the way of investment in emission reduction, i.e., whether the manufacturer should invest in production and sales processes or only in the production sector. Finally, a numerical example is undertaken to illustrate the theoretical results, and the robustness analysis and optimization of the parameters are carried out by using the Taguchi method. It is found that when the carbon cap is stipulated by the government is higher than a threshold, the profit loss rate is less than 25%, and the consignment contract can achieve better coordination. In addition, compared with the emission reduction investment only in the production process, investment in both production and sales sectors is more sustainable and profitable.

**Keywords:** cap-and-trade regulation; investment of carbon reduction technology; Stackelberg game; consignment contract; coordination; low-carbon supply chain; Taguchi method

## 0 引言

伴随着经济迅速发展, 全球气温变暖, 温室效应的危害引起了全社会关注. 各工业化国家相继制定了相关法律, 以限制二氧化碳等温室气体的排放. 当今有3种被广泛采用的碳政策: 碳限额交易政策、碳

税政策和碳限额政策<sup>[1]</sup>. 其中碳限额交易政策是一种以市场为基础的减排政策, 实施效果最为显著, 并在许多国家成功实施. 在该政策下, 碳排放权被当作可供买卖交易的商品, 当企业的实际碳排放量超过碳限额时, 可以通过购买碳排放权的形式维持其生产

收稿日期: 2017-10-28; 修回日期: 2018-01-17.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71771138, 71702087); 中央高校基本科研业务费专项基金项目(NP2016303, NS2017057); 江苏省普通高校研究生科研计划项目(KYCX18\_0236).

责任编委: 唐加福.

作者简介: 陈玉玉(1990—), 女, 博士生, 从事低碳供应链、生产者责任延伸的研究; 李帮义(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事供应链建模与优化、生产者责任延伸等研究.

†通讯作者. E-mail: chenyyu@nuaa.edu.cn.

运营;反之,则可以售出剩余的碳排放权.截止到2017年12月,全国碳配额累计成交量为4.7亿吨,交易总额高达104.9亿元.中国7个试碳交易试点运行良好,为全国碳市场的启动奠定了基础.

碳限额交易政策日趋成熟,但其推广过程仍有一系列难题亟待解决,如供应链各成员如何根据碳政策进行运营决策从而提高经济效益;如何促使减排技术提升进而抑制碳排放量;仅在生产环节还是在生产和销售环节均进行减排技术投资等.

针对碳限额交易政策下的供应链运营决策问题, Du等<sup>[2]</sup>运用 Stackelberg 博弈方法,探讨了碳限额对包含单个制造商和单个供应商的两级供应链系统决策的影响. Du等<sup>[3]</sup>基于报童模型,通过对制造商和供应商之间定价和产量的博弈分析,得到唯一的纳什均衡策略. Zheng等<sup>[4]</sup>从制造商定价以及销售商订购批量的角度,对不同碳政策(碳限额、碳税和碳限额交易)的影响进行了分析. 鲁力等<sup>[5]</sup>研究了回购契约对不同碳排放政策的两级供应链协调问题. 江文等<sup>[6]</sup>研究了顾客的战略行为对碳限额交易政策下两级供应链决策的影响及其协调问题.

上述研究的关注点是利用不同的碳排放法规控制碳排放,没有考虑减排投资.然而,在现实中企业通常会在其生产或销售过程引进减排设备或者清洁生产技术,从而提高经济效益和实现社会责任. Li等<sup>[7]</sup>研究了产品可持续水平竞争的两条可持续供应链的博弈,得出了链与链竞争的均衡结构. Toptal等<sup>[8]</sup>分析了不同碳监管机制下的生产计划决策和绿色技术投资. Drake等<sup>[9]</sup>聚焦于企业生产技术选择问题,分别讨论了碳交易政策和碳税政策对企业生产决策的影响. 赵道致等<sup>[10]</sup>针对制造商主导的二级供应链,构建了碳排放量市场需求函数,并进一步求得最优碳排放曲线以及参与主体的最大收益. 骆瑞玲等<sup>[11]</sup>针对不确定的市场需求环境,以包含单个制造商与零售商两阶供应链为研究对象,研究了减排技术投资及碳限额交易政策对供应链企业决策的影响.但是,以上研究仅聚焦于制造商在生产环节的减排策略,忽略了其在运输、销售等方面的减排措施. 本文将针对制造商对于生产环节和销售环节的减排技术投资进行充分分析,并与仅对生产环节减排技术投资进行比较,以彰显研究的必要性.

此外,还有一些学者基于碳政策对考虑减排技术投资时的供应链进行了协调性研究. Swami等<sup>[12]</sup>以包含单个制造商和单个供应商的两级供应链为研究对象,且双方均进行减排技术投资,基于两部收费制

契约实现供应链的有效协调. Dong等<sup>[13]</sup>研究了碳限额交易政策对企业生产和减排策略的影响,并进一步引入契约对供应链进行了协调性分析. Xu等<sup>[14]</sup>对比分析了收益共享契约和两部收费制契约对两级可持续供应链协调性的影响,研究发现后者可以实现完美协调.

上述文献虽然已对碳限额交易政策下低碳供应链的协调进行了研究,但缺乏考虑减排时寄售契约对碳限额交易政策下低碳供应链协调效果的研究. 寄售契约是指制造商将产品寄售在零售商处,委托零售商将商品销售给顾客,若商品售出,则由下游零售商决定其将收取的收益比例<sup>[15]</sup>. 由于在寄售契约中制造商对产品拥有所有权,零售商既不需要提前预付押金也不承担库存管理责任,更重要的是零售商不会因为不确定性等因素(比如产品剩余或变质)而承担风险. 综上分析,寄售契约被广泛应用并受到零售商的青睐<sup>[16]</sup>. 另一方面,上述文献均假设生产商是领导者,而当今社会大型零售商拥有越来越大的主导权,比如沃尔玛等大型超市<sup>[17]</sup>,因此本文研究以下游零售商作为主导者,更加符合实际和具有现实意义.

基于上述分析,本文在假设制造商在生产和销售环节进行减排技术投资的基础上,进一步研究碳交易政策下寄售契约对两级可持续供应链协调效果,拟解决的问题如下:在碳限额交易政策的约束下,制造商应如何理性地选择减排技术投资方式;供应链各成员应如何选择决策形式,以兼顾经济效益和社会责任;寄售契约对于具有单个制造商和单个零售商的两级可持续供应链协调性的影响机理.

## 1 问题描述与符号说明

本文研究包含单个制造商和单个零售商的两级供应链,其中零售商是 Stackelberg 博弈的领导者,制造商是跟随者. 基于寄售契约,零售商负责销售产品,并确定寄售契约中的收益共享比例  $r$ ; 制造商决定仅在生产环节进行减排技术投资还是在生产和销售环节均进行减排技术投资,并确定减排投资水平  $s_m$  和  $s_r$ .

考虑到消费者的低碳消费偏好以及政府对企业低碳生产的政策引导,制造商将进行减排技术投资. 减排技术投资是减排水平的二次函数,在生产环节和销售环节的减排技术投资分别为  $\frac{1}{2}t_m s_m^2$  和  $\frac{1}{2}t_r s_r^2$ . 其中:  $s_m$  和  $s_r$  分别为制造商在生产和销售环节的减排技术投资水平,  $t_m$  和  $t_r$  分别为生产和销售环节减排技术成本投资系数. 进行减排前,单位产品的碳排放量为  $a$ ,进行减排技术投资后,单位产品的碳

排放量为  $a - k_m s_m - k_r s_r$ , 其中  $k_m$  和  $k_r$  分别表示生产和销售环节的减排水平对碳排放的影响系数。

值得关注的是, 减排技术投资不仅降低产品的碳排放量, 而且会影响消费者对该产品的市场需求. 随着公众环保意识的增强, 消费者更加青睐于环保(碳排放较低)的产品, 因此市场需求与减排水平正相关, 即市场需求量随着减排水平的提高而增大. 市场需求函数表达式为

$$D(s_m, s_r) = d_0 + \beta_m s_m + \beta_r s_r.$$

其中:  $\beta_m > 0, \beta_r > 0$ , 表示形式参见文献[12-13].

政府首先对企业的最高碳排放量  $\phi$  以及碳交易市场单位碳排放交易价格  $u$  进行规定. 若该供应链中总的碳排放量  $E = (a - k_m s_m - k_r s_r)D(s_m, s_r)$  超过碳限额  $\phi$ , 则制造商将以单价  $u$  购买超出的碳排放权; 反之, 制造商会以相同的价格在碳交易市场售出剩余的碳排放权。

文中符号的解释说明见表1, 相应变量的最优值用上标“\*”标注。

表1 模型中的符号及其含义

符号	含义
$s_m$	生产环节减排水平(决策变量)
$s_r$	销售环节减排水平(决策变量)
$r$	收益共享比例(决策变量, $0 \leq r \leq 1$ )
$D(s_m, s_r)$	产品的市场需求, 与减排水平成正相关
$d_0$	产品基本市场需求量
$\beta_m$	生产环节减排水平对市场的影响系数
$\beta_r$	销售环节减排水平对市场的影响系数
$p$	单位产品的销售价格
$c$	单位产品的生产成本
$a$	不进行减排时, 单位产品的碳排放量
$k_m$	生产环节减排水平对碳排放的影响系数
$k_r$	销售环节减排水平对碳排放的影响系数
$\phi$	碳限额
$u$	单位碳排放权交易价格
$t_m$	生产环节减排技术成本投资系数
$t_r$	销售环节减排技术成本投资系数
$\Pi^I(s_m, s_r)$	集中决策时的系统总利润
$\Pi_M(s_m, s_r)$	制造商的利润
$\Pi_R(r)$	零售商的利润
$\Pi^D$	分散决策时的系统总利润

相关假设如下:

1) 生产和销售环节的减排技术投资系数需要满足  $t_m > 2uk_m\beta_m$  和  $t_r > 2uk_r\beta_r$ [13].

2) 为保证利润的非负性, 假设  $\Delta = (t_r - 2uk_r\beta_r)(t_m - 2uk_m\beta_m) - u^2(k_m\beta_r + k_r\beta_m)^2 > 0$ .

3) 为保证生产过程有利可图, 需要满足  $p \geq c + ua$ , 否则制造商将不进行生产。

## 2 模型构建与分析

### 2.1 集中决策系统

集中决策系统中, 供应链各成员作为一个整体, 统一决策. 当制造商在生产和销售环节分别进行减排技术投资时, 供应链的利润函数为

$$\begin{aligned} \Pi^I(s_m, s_r) = & (p - c)D(s_m, s_r) - \frac{1}{2}t_m s_m^2 - \frac{1}{2}t_r s_r^2 - \\ & u[(a - k_m s_m - k_r s_r)D(s_m, s_r) - \phi]. \end{aligned} \quad (1)$$

其中: 第1部分表示生产决策的经济效益, 第2、第3部分分别表示生产和销售环节的减排技术投资, 第4部分表示碳排放交易所带来的收益或成本。

**定理1** 当制造商分别对生产和销售环节进行减排技术投资时, 所确定的生产环节的唯一最优减排水平为

$$s_m^{I*} = \frac{\lambda_1 d_0 + \lambda_2 \xi}{\Delta}. \quad (2)$$

销售环节的唯一最优减排水平为

$$s_r^{I*} = \frac{\lambda_3 d_0 + \lambda_4 \xi}{\Delta}. \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} \xi &= p - c - ua, \\ \lambda_1 &= u(t_r k_m - uk_m k_r \beta_r + uk_r^2 \beta_m), \\ \lambda_2 &= t_r \beta_m - uk_r \beta_m \beta_r + uk_m \beta_r^2, \\ \lambda_3 &= u(t_m k_r - uk_m k_r \beta_m + uk_m^2 \beta_r), \\ \lambda_4 &= t_m \beta_r - uk_m \beta_m \beta_r + uk_r \beta_m^2, \\ \Delta &= (t_r - 2uk_r \beta_r)(t_m - 2uk_m \beta_m) - \\ & u^2(k_m \beta_r + k_r \beta_m)^2. \end{aligned}$$

**证明** 将需求函数  $D(s_m, s_r) = d_0 + \beta_m s_m + \beta_r s_r$  代入利润函数(1), 根据  $\xi = p - c - ua$ , 可得

$$\begin{aligned} \Pi^I(s_m, s_r) = & (\xi + uk_m s_m + uk_r s_r)(d_0 + \beta_m s_m + \beta_r s_r) - \\ & \frac{1}{2}t_m s_m^2 - \frac{1}{2}t_r s_r^2 + u\phi. \end{aligned}$$

根据一阶最优性条件  $\frac{\partial \Pi^I(s_m, s_r)}{\partial s_m} = 0$  和

$\frac{\partial \Pi^I(s_m, s_r)}{\partial s_r} = 0$ , 可得

$$s_m^{I*} = \frac{\lambda_1 d_0 + \lambda_2 \xi}{\Delta}, \quad s_r^{I*} = \frac{\lambda_3 d_0 + \lambda_4 \xi}{\Delta}.$$

进一步, 根据假设2), 可得  $\Pi^I(s_m, s_r)$  关于决策

变量的二阶偏导

$$\frac{\partial^2 \Pi^I(s_m, s_r)}{\partial s_m^2} = 2uk_m\beta_m - t_m < 0,$$

$$\frac{\partial^2 \Pi^I(s_m, s_r)}{\partial s_r^2} = 2uk_r\beta_r - t_r < 0,$$

$$\frac{\partial^2 \Pi^I(s_m, s_r)}{\partial s_r \partial s_m} = u(k_m\beta_r + k_r\beta_m),$$

因此海塞矩阵

$$\frac{\partial^2 \Pi^I(s_m, s_r)}{\partial s_m^2} \cdot \frac{\partial^2 \Pi^I(s_m, s_r)}{\partial s_r^2} - \left( \frac{\partial^2 \Pi^I(s_m, s_r)}{\partial s_r \partial s_m} \right)^2 =$$

$$(2uk_m\beta_m - t_m)(2uk_r\beta_r - t_r) -$$

$$u^2(k_m\beta_r + k_r\beta_m)^2 = \Delta > 0.$$

故  $\Pi^I(s_m, s_r)$  是关于  $s_m$  和  $s_r$  的严格凹函数,  $s_m^{I*}$  和  $s_r^{I*}$  具有唯一性. □

将式(2)和(3)代入(1),可得在生产和销售环节分别进行减排技术投资时,集中决策系统的总利润为

$$\begin{aligned} \Pi^{I*}(s_m^{I*}, s_r^{I*}) = & \\ & \{u^2(t_mk_r^2 + t_rk_m^2)d_0^2 + 2\lambda_5d_0\xi + \\ & (t_m\beta_r^2 + t_r\beta_m^2)\xi^2\}/2\Delta + u\phi, \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $\lambda_5 = \frac{1}{2}t_m(t_r - 2uk_r\beta_r) + \frac{1}{2}t_r(t_m - 2uk_m\beta_m)$ , 且  $\lambda_5 > 0$ .

### 2.2 分散决策系统

当供应链各参与主体进行独立决策时,制造商将产品委托至零售商进行销售,零售商(Stackelberg 博弈领导者)首先制定收益共享比例  $r$ , 以保证获得收益的  $(1 - r)$  份额,并将剩余的收益返回给制造商. 作为 Stackelberg 博弈跟随者,制造商将根据零售商确定的  $r$ , 决定减排水平  $s_m$  和  $s_r$ , 从而实现其利润最大化.

分散决策系统中,上游制造商(Stackelberg 博弈的跟随者)的利润为

$$\begin{aligned} \Pi_M(s_m, s_r) = & \\ & (rp - c)D(s_m, s_r) - \frac{1}{2}t_ms_m^2 - \frac{1}{2}t_rs_r^2 - \\ & u[(a - k_ms_m - k_rs_r)D(s_m, s_r) - \phi]. \end{aligned} \quad (5)$$

下游零售商(Stackelberg 博弈的领导者)的利润为

$$\Pi_R(r) = (1 - r)pD(s_m, s_r). \quad (6)$$

**定理2** 分散决策系统中,当制造商在生产和销售环节均进行减排技术投资时,零售商确定的唯一最优收益共享比例为

$$r^* = \frac{(t_m\beta_r^2 + t_r\beta_m^2)(p + c + ua) - \lambda_5d_0}{2(t_m\beta_r^2 + t_r\beta_m^2)p}. \quad (7)$$

制造商所确定的生产环节和销售环节唯一最优减排水平  $s_m^{D*}$  和  $s_r^{D*}$  分别为

$$s_m^{D*} =$$

$$\begin{aligned} & \{[2(t_m\beta_r^2 + t_r\beta_m^2)\lambda_1 - \lambda_5\lambda_2]d_0 + \\ & (t_m\beta_r^2 + t_r\beta_m^2)\lambda_2\xi\}/(2(t_m\beta_r^2 + t_r\beta_m^2)\Delta), \end{aligned} \quad (8)$$

$$s_r^{D*} =$$

$$\begin{aligned} & \{[2(t_m\beta_r^2 + t_r\beta_m^2)\lambda_3 - \lambda_5\lambda_4]d_0 + \\ & (t_m\beta_r^2 + t_r\beta_m^2)\lambda_4\xi\}/(2(t_m\beta_r^2 + t_r\beta_m^2)\Delta). \end{aligned} \quad (9)$$

**证明** 将市场需求函数  $D(s_m, s_r) = d_0 + \beta_ms_m + \beta_rs_r$  代入利润函数(5),可得分散决策时上游制造商的利润函数为

$$\begin{aligned} \Pi_M(s_m, s_r) = & \\ & (rp - c - ua + uk_ms_m + uk_rs_r)(d_0 + \beta_ms_m + \beta_rs_r) - \\ & \frac{1}{2}t_ms_m^2 - \frac{1}{2}t_rs_r^2 + u\phi. \end{aligned}$$

根据一阶最优性条件  $\frac{\partial \Pi_M(s_m, s_r)}{\partial s_m} = 0$  和  $\frac{\partial \Pi_M(s_m, s_r)}{\partial s_r} = 0$ , 可得在生产和销售环节的最优减排水平分别为

$$s_m^{D*}(r) = \frac{\lambda_1d_0 + \lambda_2(rp - c - ua)}{\Delta},$$

$$s_r^{D*}(r) = \frac{\lambda_3d_0 + \lambda_4(rp - c - ua)}{\Delta}.$$

对  $\Pi_M(s_m, s_r)$  分别求关于  $s_m$  和  $s_r$  二阶偏导,得到

$$\frac{\partial^2 \Pi_M(s_m, s_r)}{\partial s_m^2} = 2uk_m\beta_m - t_m < 0,$$

$$\frac{\partial^2 \Pi_M(s_m, s_r)}{\partial s_r^2} = 2uk_r\beta_r - t_r < 0,$$

$$\frac{\partial^2 \Pi_M(s_m, s_r)}{\partial s_r \partial s_m} = u(k_m\beta_r + k_r\beta_m).$$

进一步,可得

$$\frac{\partial^2 \Pi_M(s_m, s_r)}{\partial s_m^2} \cdot \frac{\partial^2 \Pi_M(s_m, s_r)}{\partial s_r^2} - \left( \frac{\partial^2 \Pi_M(s_m, s_r)}{\partial s_r \partial s_m} \right)^2 =$$

$$\Delta > 0.$$

因此  $\Pi_M(s_m, s_r)$  为关于决策变量  $s_m$  和  $s_r$  的严格凹函数.

将式(8)和(9)代入(6),根据  $\Delta + \beta_m\lambda_1 + \beta_r\lambda_3 = \lambda_5$  和  $\beta_m\lambda_2 + \beta_r\lambda_4 = t_m\beta_r^2 + t_r\beta_m^2$ ,得零售商的最优利润

$$\Pi_R(r) = (1 - r)p \frac{\lambda_5d_0 + (t_m\beta_r^2 + t_r\beta_m^2)(rp - c - ua)}{\Delta}.$$

根据  $\frac{d\Pi_R(r)}{dr} = 0$ , 可得寄售契约下最优收益共享比例为  $r^*$ . 并且,由

$$\frac{d^2 \Pi_R(r)}{dr^2} = \frac{-2(t_m\beta_r^2 + t_r\beta_m^2)p^2}{\Delta} < 0,$$

可知  $\Pi_R(r)$  是关于  $r$  的严格凹函数. 将式(7)分别代入  $s_m^{D*}(r)$  和  $s_r^{D*}(r)$ , 由

$$r^*p - c - ua = \frac{(t_m\beta_r^2 + t_r\beta_m^2)\xi - \lambda_5d_0}{2(t_m\beta_r^2 + t_r\beta_m^2)},$$

可得式(8)和(9)。□

此外,收益共享比例 $r^*$ 还应满足 $0 \leq r^* \leq 1$ 。由式(7)可得

$$1 - r^* = \frac{\lambda_5 d_0 + (t_m \beta_r^2 + t_r \beta_m^2)(p + c + ua)}{2(t_m \beta_r^2 + t_r \beta_m^2)p} \geq 0,$$

即 $r^* \leq 1$ ;若

$$d_0 \leq \frac{(t_m \beta_r^2 + t_r \beta_m^2)(p + c + ua)}{\lambda_5},$$

则可得 $r^* \geq 0$ 。

进一步,根据

$$\begin{aligned} (t_m \beta_r^2 + t_r \beta_m^2)\lambda_1 - \lambda_5 \lambda_2 &= -t_r \beta_r \Delta, \\ (t_m \beta_r^2 + t_r \beta_m^2)\lambda_3 - \lambda_5 \lambda_4 &= -t_m \beta_r \Delta, \end{aligned}$$

可得关系式

$$\begin{aligned} s_m^{I*} &= 2s_m^{D*} + \frac{t_r \beta_m d_0}{t_m \beta_r^2 + t_r \beta_m^2}, \\ s_r^{I*} &= 2s_r^{D*} + \frac{t_m \beta_r d_0}{t_m \beta_r^2 + t_r \beta_m^2}. \end{aligned}$$

故集中决策时生产和销售环节的最优减排水平分别大于其对应的分散决策时的最优减排水平。

将式(7)~(9)代入(5)和(6),可得制造商和零售商的最优利润 $\Pi_M^*(s_m^{D*}, s_r^{D*})$ 和 $\Pi_R^*(r^*)$ 分别为

$$\begin{aligned} \Pi_M^*(s_m^{D*}, s_r^{D*}) &= \\ u\phi - \frac{3\lambda_5^2 d_0^2}{8(t_m \beta_r^2 + t_r \beta_m^2)\Delta} &+ \{4u^2(t_m k_r^2 + t_r k_m^2)d_0^2 + \\ 2\lambda_5 d_0 \xi + (t_m \beta_r^2 + t_r \beta_m^2)\xi^2\} &/8\Delta, \\ \Pi_R^*(r^*) &= \\ \frac{(t_m \beta_r^2 + t_r \beta_m^2)\xi^2 + 2\lambda_5 d_0 \xi}{4\Delta} &+ \frac{\lambda_5^2 d_0^2}{4(t_m \beta_r^2 + t_r \beta_m^2)\Delta}. \end{aligned}$$

因此,在生产和销售环节均进行减排技术投资时,分散决策时系统总利润为

$$\begin{aligned} \Pi^{D*} &= \Pi_M^*(s_m^{D*}, s_r^{D*}) + \Pi_R^*(r^*) = \\ \{4u^2(t_m k_r^2 + t_r k_m^2)d_0^2 + 6\lambda_5 d_0 \xi + \\ 3(t_m \beta_r^2 + t_r \beta_m^2)\xi^2\} &/8\Delta - \\ \frac{\lambda_5^2 d_0^2}{8(t_m \beta_r^2 + t_r \beta_m^2)\Delta} &+ u\phi. \end{aligned}$$

定义 $\Delta_{II}$ 表示与集中决策相比,分散决策系统的利润损失率,即 $\Delta_{II} = \frac{\Pi^{I*} - \Pi^{D*}}{\Pi^{I*}} \cdot 100\%$ 。

**定理3** 集中决策时系统总利润高于分散决策时,并且:1) 当 $\phi > \frac{t_m t_r d_0^2}{2u(t_m \beta_r^2 + t_r \beta_m^2)}$ 时, $0 < \Delta_{II} < 25\%$ ;2) 当 $\phi \leq \frac{t_m t_r d_0^2}{2u(t_m \beta_r^2 + t_r \beta_m^2)}$ 时, $\Delta_{II} \geq 25\%$ 。

**证明** 根据

$$\lambda_5^2 - u^2(t_m k_r^2 + t_r k_m^2)(t_m \beta_r^2 + t_r \beta_m^2) = t_m t_r \Delta,$$

可得集中决策和分散决策时的利润之差为

$$\Pi^{I*} - \Pi^{D*} =$$

$$\frac{(t_m \beta_r^2 + t_r \beta_m^2)\xi^2 + 2\lambda_5 d_0 \xi}{8\Delta} + \frac{\lambda_5^2 d_0^2}{8(t_m \beta_r^2 + t_r \beta_m^2)\Delta} =$$

$$\frac{1}{4}\Pi^{I*} - \frac{1}{4}u\phi + \frac{t_m t_r \Delta d_0^2}{8(t_m \beta_r^2 + t_r \beta_m^2)\Delta}.$$

由于 $\xi > 0$ ,可得 $\Pi^{I*} > \Pi^{D*}$ ,即集中决策时系统总利润大于分散决策时,故 $\Delta_{II} = \frac{\Pi^{I*} - \Pi^{D*}}{\Pi^{I*}} > 0$ 恒成立。由

$$\begin{aligned} \Delta_{II} &= \frac{\Pi^{I*} - \Pi^{D*}}{\Pi^{I*}} \cdot 100\% = \\ \left[ \frac{1}{4} + \frac{t_m t_r d_0^2 - 2u(t_m \beta_r^2 + t_r \beta_m^2)\phi}{8(t_m \beta_r^2 + t_r \beta_m^2)\Pi^{I*}} \right] &\cdot 100\%, \end{aligned}$$

可得,当 $\phi \geq \frac{t_m t_r d_0^2}{2u(t_m \beta_r^2 + t_r \beta_m^2)}$ 时, $0 \leq \Delta_{II} \leq 25\%$ ;

当 $\phi < \frac{t_m t_r d_0^2}{2u(t_m \beta_r^2 + t_r \beta_m^2)}$ 时, $\Delta_{II} > 25\%$ 。□

定理3表明,由于双重边际化效应,寄售契约下分散决策时的系统总利润总是小于集中决策系统,即寄售契约不能实现与集中决策利润相等的协调效果。另一方面,当政府制定的碳限额 $\phi$ 高于阈值 $\frac{t_m t_r d_0^2}{2u(t_m \beta_r^2 + t_r \beta_m^2)}$ 时,利润损失率小于25%,此时寄售契约可以有效协调该供应链系统;反之,碳限额交易政策下不宜使用寄售契约进行协调。

### 2.3 与仅在生产环节减排比较分析

若制造商仅在生产环节进行减排技术投资,则市场需求函数 $D(s) = d_0 + \beta s$ ,其中 $\beta > 0$ 。为区别表示,仅在生产环节进行减排技术投资的相应变量均加下标“1”。

集中决策系统中,供应链所有参与主体将作为一个整体进行统一决策,其目标是整个供应链的收益最大化,供应链总收益函数为

$$\begin{aligned} \Pi_1^I(s) &= (p - c)(d_0 + \beta s) - \frac{1}{2}ts^2 - \\ &u[(a - ks)(d_0 + \beta s) - \phi]. \end{aligned} \quad (10)$$

根据一阶最优性条件 $\frac{d\Pi_1^I(s)}{ds} = 0$ ,可以得到集中决策系统中最优减排水平

$$s_1^{I*} = \frac{ukd_0 + \beta\xi}{t - 2uk\beta}. \quad (11)$$

将式(11)代入(10),可得集中决策时的系统利润为

$$\Pi_1^{I*}(s_1^{I*}) = \frac{u^2 k^2 d_0^2 + \beta^2 \xi^2 + 2(t - uk\beta)d_0 \xi}{2(t - 2uk\beta)} + u\phi.$$

分散决策系统中,上游制造商(Stackelberg 博弈的跟随者)的利润为

$$\begin{aligned} \Pi_{M1}(s) &= (rp - c)(d_0 + \beta s) - \frac{1}{2}ts^2 - \\ &u[(a - ks)(d_0 + \beta s) - \phi], \end{aligned} \quad (12)$$

下游零售商(Stackelberg博弈的领导者)的利润为

$$\Pi_{R1}(r) = (1 - r)p(d_0 + \beta s). \quad (13)$$

**引理1** 当制造商仅在生产环节进行减排技术投资时,零售商所确定的寄售契约中的唯一最优收益共享比例为

$$r_1^* = \frac{\beta^2(p + c + ua) - (t - uk\beta)d_0}{2\beta^2 p}. \quad (14)$$

制造商确定的生产环节唯一最优减排水平为

$$s_1^{D*} = \frac{(3uk\beta - t)d_0 + \beta^2\xi}{2\beta(t - 2uk\beta)}. \quad (15)$$

将式(14)和(15)代入(12)和(13),可得分散决策时制造商的最优利润为

$$\begin{aligned} \Pi_{M1}^*(s_1^{D*}) = & \{[u^2k^2\beta^2 - 3t(t - 2uk\beta)]d_0^2 + \beta^4\xi^2 + \\ & 2\beta^2(t - uk\beta)d_0\xi\}/(8\beta^2(t - 2uk\beta)) + u\phi. \end{aligned}$$

零售商的最优利润为

$$\begin{aligned} \Pi_{R1}^*(r_1^*) = & \{(t - uk\beta)^2d_0^2 + 2\beta^2(t - uk\beta)d_0\xi + \beta^4\xi^2\}/ \\ & (4\beta^2(t - 2uk\beta)). \end{aligned}$$

因此可得仅在生产环节进行减排技术投资时的系统总利润为

$$\begin{aligned} \Pi_1^{D*} = \Pi_{M1}^*(s_1^{D*}) + \Pi_{R1}^*(r_1^*) = & \{[3u^2k^2\beta^2 - t^2 + 2tuk\beta]d_0^2 + 3\beta^4\xi^2 + \\ & 6\beta^2(t - uk\beta)d_0\xi\}/(8\beta^2(t - 2uk\beta)) + u\phi. \end{aligned}$$

**推论1** 集中决策时的最优利润大于分散决策时,其利润差为

$$\Pi_1^{I*} - \Pi_1^{D*} = \frac{u^2k^2d_0^2 + \beta^2\xi^2 + 2(t - uk\beta)d_0\xi}{8(t - 2uk\beta)} + \frac{td_0^2}{8\beta^2}.$$

若  $\phi \geq \frac{td_0^2}{2u\beta^2}$ , 则  $0 < \Pi_\Delta \leq 25\%$ ; 若  $\phi < \frac{td_0^2}{2u\beta^2}$ , 则  $\Pi_\Delta > 25\%$ .

推论1表明,当碳限额  $\phi$  不小于  $\frac{td_0^2}{2u\beta^2}$  时,利润损失率  $\Pi_\Delta \in [0, 25\%]$ ; 当碳限额  $\phi$  大于  $\frac{td_0^2}{2u\beta^2}$  时,利润损失率  $\Pi_\Delta$  大于25%. 即碳限额  $\phi$  较大时,利润损失率比较小,寄售契约的协调效果较好; 当碳限额  $\phi$  较小时,利润损失率较大,不宜用寄售契约进行协调.

**定理4** 集中决策系统中,当满足  $\beta_m = \beta_r = \beta$ ,  $k_m = k_r = k$  和  $t_m = t_r = t$  时,  $s_m^{I*} + s_r^{I*} > s_1^{I*}$ ,  $\Pi^{I*}(s_m^{I*}, s_r^{I*}) > \Pi_1^{I*}(s_1^{I*})$ .

**证明** 此时  $\Delta = t - 4uk\beta > 0$ , 通过比较式(2)、(3)和(11),可得集中决策时两种情形的最优减排水平之差为

$$s_m^{I*} + s_r^{I*} - s_1^{I*} = \frac{t(ukd_0 + \beta\xi)}{(t - 4uk\beta)(t - 2uk\beta)} > 0,$$

即在生产与销售环节均进行减排技术投资时的最优减排水平大于仅在生产环节进行减排投资时.

集中决策时,两种情形下的利润之差为

$$\begin{aligned} \Pi^{I*}(s_m^{I*}, s_r^{I*}) - \Pi_1^{I*}(s_1^{I*}) = & \frac{tu^2k^2d_0^2 + t\beta^2\xi^2 + 2tuk\beta d_0\xi}{2(t - 2uk\beta)(t - 4uk\beta)} > 0, \end{aligned}$$

即在生产与销售环节均进行减排投资时的供应链总利润高于仅在生产环节减排投资时.  $\square$

定理4的管理启示是,在集中决策系统中,与仅在生产环节进行减排投资相比,在生产环节和销售环节均进行减排技术投资虽然增加了减排成本,但是由于减排获得的经济效益也增大,最终导致供应链总利润高于仅在生产环节进行减排技术投资时. 此外,在生产和销售环节均进行减排技术投资能够更加有效地降低对环境的污染,实现企业的社会责任的同时为企业树立良好的社会形象,因此集中决策时制造商应该在生产和销售环节分别进行减排技术投资.

**定理5** 分散决策系统中,当满足  $\beta_m = \beta_r = \beta$ ,  $k_m = k_r = k$  和  $t_m = t_r = t$  时,  $s_m^{D*} + s_r^{D*} > s_1^{D*}$ ,  $\Pi^{D*}(s_m^{D*}, s_r^{D*}) > \Pi_1^{D*}(s_1^{D*})$ ,  $\Pi_M^*(s_m^{D*}, s_r^{D*}) > \Pi_{M1}^*(s_1^{D*})$ .

**证明** 通过比较式(8)、(9)和(15),可得分散决策时两种情形的最优减排水平之差为

$$s_m^{D*} + s_r^{D*} - s_1^{D*} = \frac{tukd_0 + 2uk\beta^2\xi}{2(t - 4uk\beta)(t - 2uk\beta)} > 0.$$

在生产与销售环节均进行减排技术投资时的最优减排水平高于仅在生产环节减排技术投资时.

分散决策时,两种情形下系统总利润之差为

$$\begin{aligned} \Pi^{D*}(s_m^{D*}, s_r^{D*}) - \Pi_1^{D*}(s_1^{D*}) = & \frac{3t(c_e^2k^2d_0^2 + \beta^2\xi^2 + 2uk\beta d_0\xi)}{8(t - 2uk\beta)(t - 4uk\beta)} + \frac{td_0^2}{16\beta^2} > 0. \end{aligned}$$

两种情形下的制造商利润之差为

$$\begin{aligned} \Pi_M^*(s_m^{D*}, s_r^{D*}) - \Pi_{M1}^*(s_1^{D*}) = & \frac{t(c_e^2k^2d_0^2 + \beta^2\xi^2 + 2uk\beta d_0\xi)}{8(t - 2uk\beta)(t - 4uk\beta)} + \frac{3td_0^2}{16\beta^2} > 0. \end{aligned}$$

即分散决策时,在生产与销售环节均进行减排投资时的系统总利润以及制造商的利润均高于仅在生产环节减排投资时.  $\square$

定理5表明,与集中决策相同,分散决策时制造商在生产环节和销售环节同时进行减排投资能够实现环境的影响降低和供应链总利润的提高,此外还能实现分散决策时制造商自身利润的增加. 因此分散决策时制造商同样应该在生产和销售环节分别进行减排技术投资.

### 3 算例分析

下面通过算例分析对上述理论结果进行验证,并对参数的稳健程度(鲁棒性)进行分析.算例分析中参数赋值如下所示: $d_0 = 50, \beta_m = \beta_r = \beta = 2, p = 300, c = 150, a = 5, k_m = k_r = k = 0.1, t_m = t_r = t = 15, u = 5, \phi = 300$ .

定义 $\Delta_{\Pi 1}$ 和 $\Delta_{\Pi 2}$ 分别为仅在生产环节进行减排技术投资和在生产、销售环节均进行减排技术投资时的利润损失率.图1表明,随着政府规定的碳限额 $\phi$ 的增加,利润损失率 $\Delta_{\Pi}$ 减少,即只有当碳限额 $\phi$ 较高时,寄售契约下的利润损失较小,此时寄售契约对供应链的协调效果较为理想.特别地,当制造商在生产环节进行减排技术投资时,若碳限额 $\phi$ 大于468.8,则利润损失率 $\Delta_{\Pi 2}$ 在25%以下;当制造商仅在生产环节进行减排技术投资时,只有当碳限额 $\phi$ 大于937.5时,利润损失率 $\Delta_{\Pi 1}$ 才会在25%以下,即寄售契约实现有效协调的难度增大.另一方面,对于某一固定的碳限额,在生产环节进行减排技术投资时的利润损失率小于仅在生产环节减排技术投资

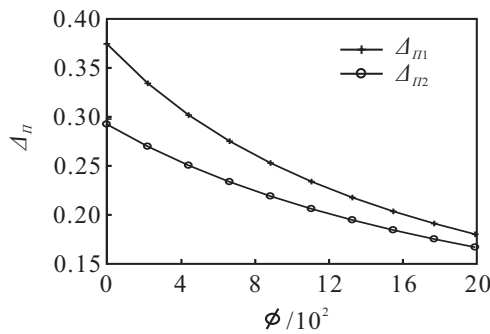


图1  $\Delta_{\Pi}$  随碳限额  $\phi$  的变化趋势

时,因此与仅在生产环节进行减排投资相比,寄售契约更加适用于在生产和销售环节均进行减排投资时供应链的协调.

为了研究在生产环节和销售环节均进行减排技术投资时,各参数对制造商利润和零售商利润的影响程度,寻找能够使双方利润达到最高的鲁棒参数集,下面将利用田口实验(又称为鲁棒参数设计)分别对制造商和零售商的决策进行正交矩阵实验设计和分析.田口实验是指为实现参数的最优化设置,使用正交矩阵表进行实验设计,并在评价设计参数的稳健程度(鲁棒性)时使用信噪比(SN ratio)衡量的一种方法,其目的是实现成本的最小化或利润的最大化.田口方法的优点较多,主要体现在该方法可以只用少量试验便可提取较多信息,并且该方法能够实现同时优化多个参数<sup>[18]</sup>.由于本文研究问题的目标是制造商和零售商利润,田口实验中采用如下计算公式计算信噪比(Taguch<sup>[19]</sup>):

$$SN = -10 \log \left( \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (x_j)^{-2} \right). \quad (16)$$

其中: $x_j$ 为第 $j$ 次参数组合设计的性能响应,在该实验中即为制造商或零售商利润; $m$ 为参数设计的样本数量.

对于制造商利润的鲁棒参数设计实验如表2所示. $\beta_m, c, a, k_m$ 和 $t_m$ 表示5个可控因素, $u$ 和 $\phi$ 表示两个不可控因素.可控变量使用 $L_8(2^5)$ 正交矩阵,而不可控变量使用 $L_4(2^2)$ 正交矩阵.表2中的水平1表示在算例参数取值的基础上-10%,水平2表示在算例参数取值的基础上+10%.

表2 制造商利润正交实验表及其信噪比

序号	$\beta_m$	$c$	$a$	$k_m$	$t_m$	数值				SN ratio
	A	B	C	D	E	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	
No.1	1	1	1	1	1	3170.5	3440.5	3470.1	3800.1	70.7539
No.2	1	1	1	2	2	2849.8	3119.8	3149.7	3479.7	69.9006
No.3	1	2	2	1	1	1953.9	2223.9	2507.0	2507.0	67.0866
No.4	1	2	2	2	2	1695.1	1965.1	1922.0	2252.0	65.7071
No.5	2	1	2	1	2	3346.6	3616.6	3598.9	3928.9	71.1389
No.6	2	1	2	2	1	3964.4	4234.4	4296.3	4626.3	72.5905
No.7	2	2	1	1	2	2391.0	2661.0	2650.7	2980.7	68.4541
No.8	2	2	1	2	1	2876.2	3146.2	3194.9	3524.9	69.9961

图2和表3分别为上游制造商信噪比主效应图和正交阵列方差分析表.由于田口实验提出的噪音比率具有测量偏离理想值大小的特性,由式(16)可知噪音比率(SN)越大偏离期望值的方差越小<sup>[20]</sup>.由图

2可见,与参数 $a, k_m$ 和 $t_m$ 相比,参数 $\beta_m$ 和 $c$ 对信噪比的影响更为显著,且参数 $\beta_m$ 和 $k_m$ 在水平2时的信噪比最大,参数 $c, a$ 和 $t_m$ 在水平1的信噪比最大.由表3可见, $\beta_m, c, a$ 和 $t_m$ 对制造商的利润影响较为显著,

参数  $k_m$  对制造商的利润影响程度相对较小,因此生产商为优化其利润首先需要注意参数  $\beta_m, c, a$  和  $t_m$  的影响。

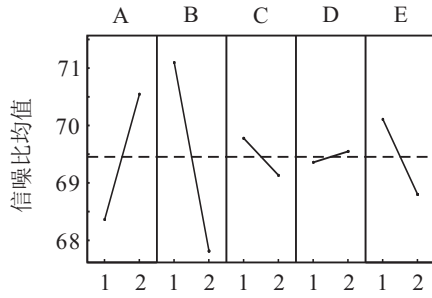


图2 制造商SN ratio的主效应图

零售商的鲁棒参数设计实验如表4所示. 其中:  $d_0, \beta_r, p, k_r$  和  $t_r$  表示5个可控因素,  $u$  和  $c$  为不可

控因素. 可控变量使用  $L_8(2^5)$  正交矩阵, 不可控变量使用  $L_4(2^2)$  正交矩阵. 表4中的水平1表示在算例参数初始值的基础上-10%, 水平2表示在参数初始值的基础上+10%.

表3 制造商利润信噪比方差分析

来源	自由度	Adj SS	Adj MS	F 值	P 值
$\beta_m$	1	9.5296	9.5296	267.38	0.004
$c$	1	21.5824	21.5824	605.57	0.002
$a$	1	0.8331	0.8331	23.38	0.040
$k_m$	1	0.0724	0.0724	2.03	0.290
$t_m$	1	3.4146	3.4146	95.81	0.010
误差	2	0.0713	0.0356		
合计	7	35.5033			

表4 零售商利润正交实验表及其信噪比

序号	$d_0$	$\beta_r$	$p$	$k_r$	$t_r$	数值				SN ratio
	A	B	C	D	E	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	
No.1	1	1	1	1	1	5997.6	4263.1	5941.3	4161.3	73.7443
No.2	1	1	1	2	2	5915.5	4263.4	5864.8	4168.3	73.7105
No.3	1	2	2	1	1	11582.0	8818.2	11786.0	8893.0	79.9829
No.4	1	2	2	2	2	11028.0	8470.2	11219.0	8542.2	79.6048
No.5	2	1	2	1	2	11375.0	9059.4	11419.0	9032.4	80.0175
No.6	2	1	2	2	1	12109.0	9543.9	12315.0	9630.5	80.5583
No.7	2	2	1	1	2	7220.2	5212.1	7158.9	5096.8	75.4515
No.8	2	2	1	2	1	7694.7	5436.0	7747.7	5384.5	75.9397

图3和表5分别为下游零售商信噪比主效应图和正交阵列的方差分析表. 由图3可见, 参数  $p$  对零售

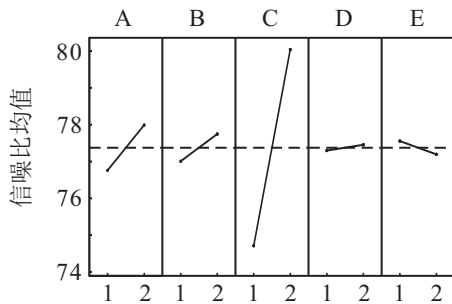


图3 零售商SN ratio的主效应图

表5 零售商利润信噪比方差分析

来源	自由度	Adj SS	Adj MS	F 值	P 值
$d_0$	1	3.0315	3.0315	199.98	0.005
$\beta_r$	1	1.0866	1.0866	71.68	0.014
$p$	1	56.8049	56.8049	3747.28	0.001
$k_r$	1	0.0476	0.0476	3.14	0.218
$t_r$	1	0.2595	0.2595	17.12	0.054
误差	2	0.0303	0.0152		
合计	7	61.2604			

商信噪比影响的显著性远远高于其余4个参数. 参数  $d_0, \beta_r, p$  和  $k_r$  在水平2的信噪比最大,  $t_r$  在水平1的信噪比最大. 由表5可见, 销售价格  $p$  对零售商的利润影响非常显著, 其次是参数  $d_0$  和  $\beta_r$ , 而  $k_r$  和  $t_r$  对零售商的利润影响的显著性较低.

### 4 结论

本文基于碳限额交易政策, 考虑消费者低碳偏好和减排技术投资, 研究了寄售契约对两级供应链的协调效果. 下游零售商 (Stackelberg 博弈的领导者) 首先决定寄售契约中的收益共享比例, 上游制造商 (Stackelberg 博弈的跟随者) 决定仅在生产环节进行减排技术投资还是在生产环节和销售环节均进行减排技术投资, 以及确定减排水平. 首先探究制造商和零售商在生产环节和销售环节减排技术投资时的最优决策; 然后与仅在生产环节进行减排技术投资进行比较; 最后, 运用田口实验对供应链系统进行灵敏度分析. 主要研究结论总结如下: 1) 当碳限额  $\phi$  高于某一阈值时, 利润损失率低于 25%, 即当政府设定的碳限额较高时, 寄售契约能够实现较有效的协调; 2) 与仅

在上游进行减排技术投资相比,在生产和销售环节均进行减排技术投资不仅减排水平高(即对环境更加友好),而且系统总利润和制造商利润均增大;3)通过算例分析发现,销售价格对制造商和零售商的利润影响均较为显著。

本文的研究对于限额与交易机制约束下的制造商减排决策具有一定的指导意义,对于我国发展低碳经济具有一定的参考价值。同时本文的研究也有不足之处,如研究对象为包含单个制造商与单个零售商两级供应链,且研究的是单周期的减排决策问题,具有一定的局限性,这是需要进一步探究的问题。

#### 参考文献(References)

- [1] Song J, Leng M. Analysis of the single-period problem under carbon emissions policies[M]. New York: Springer, 2012: 297-313.
- [2] 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.
- [3] Du S, Ma F, Fu Z, et al. Game-theoretic analysis for an emission-dependent supply chain in a 'cap-and-trade' system[J]. Annals of Operations Research, 2015, 228(1): 135-149.
- [4] Zheng Y, Yang X, Wang Z. Manufacture's optimal pricing policy and retailer's optimal ordering policy under different carbon emission policies[J]. Progress in Applied Mathematics, 2014, 7(2): 20-26.
- [5] 鲁力, 陈旭. 不同碳排放政策下基于回购合同的供应链协调策略[J]. 控制与决策, 2014, 29(12): 2212-2220. (Lu L, Chen X. Supply chain coordination with buyback contract under different carbon emission policies[J]. Control and Decision, 2014, 29(12): 2212-2220.)
- [6] 江文, 陈旭. 限额与交易下考虑战略顾客行为的供应链决策与协调[J]. 控制与决策, 2016, 31(3): 477-485. (Jiang W, Chen X. Supply chain decisions and coordination with strategic customer behavior under cap-and-trade policy[J]. Control and Decision, 2016, 31(3): 477-485.)
- [7] Li X, Li Y. Chain-to-chain competition on product sustainability[J]. J of Cleaner Production, 2016, 112: 2058-2065.
- [8] Toptal A, Özlü H, Konu D. Joint decisions on inventory replenishment and emission reduction investment under different emission regulations[J]. Int J of Production Research, 2014, 52(1): 243-269.
- [9] Drake D F, Kleindorfer P R, Van Wassenhove L N. Technology choice and capacity portfolios under emissions regulation[J]. Production and Operations Management, 2016, 25(6): 1006-1025.
- [10] 赵道致, 原白云, 徐春明. 低碳供应链纵向合作减排的动态优化[J]. 控制与决策, 2014, 29(7): 1340-1344. (Zhao D Z, Yuan B Y, Xu C M. Dynamic optimization about vertical cooperation on carbon emissions reduction in low-carbon supply chain[J]. Control and Decision, 2014, 29(7): 1340-1344.)
- [11] 骆瑞玲, 范体军, 夏海洋. 碳排放交易政策下供应链碳减排技术投资的博弈分析[J]. 中国管理科学, 2014, 22(11): 44-53. (Luo R L, Fan T J, Xia H Y. The game analysis of carbon reduction technology investment on supply chain under carbon cap-and-trade rules[J]. Chinese Management Science, 2014, 22(11): 44-53.)
- [12] Swami S, Shah J. Channel coordination in green supply chain management[J]. J of the Operational Research Society, 2013, 64(3): 336-351.
- [13] Dong C, Shen B, Chow P, et al. Sustainability investment under cap-and-trade regulation[J]. Annals of Operations Research. 2016, 240(2): 509-531.
- [14] Xu J, Chen Y, Bai Q. A two-echelon sustainable supply chain coordination under cap-and-trade regulation[J]. J of Cleaner Production, 2016, 135: 42-56.
- [15] Wang Y, Jiang L, Shen Z J. Channel performance under consignment contract with revenue sharing[J]. Management Science, 2004, 50(1): 34-47.
- [16] Hu W, Li Y, Wang W. Benefit and risk analysis of consignment contracts[J]. Annals of Operations Research, 2015, 257(1/2): 1-19.
- [17] Yun F L, Wang Y, Wu Y. Consignment contracts with revenue sharing for a capacitated retailer and multiple manufacturers[J]. Manufacturing and Service Operations Management, 2016, 17(4): 527-537.
- [18] Houg J Y, Hsu H F, Liu Y H, et al. Applying the Taguchi robust design to the optimization of the asymmetric reduction of ethyl 4-chloro acetoacetate by bakers' yeast[J]. J of Biotechnology, 2003, 100(3): 239-250.
- [19] Taguchi G. Tables of orthogonal arrays and linear graphs[M]. Tokyo: Maruzen, 1962: 1-52.
- [20] Kim K D, Han D N, Kim H T. Optimization of experimental conditions based on the Taguchi robust design for the formation of nano-sized silver particles by chemical reduction method[J]. Chemical Engineering J, 2004, 104(1): 55-61.

(责任编辑: 郑晓蕾)