

## 基于碳配额政策的两级低碳供应链博弈与优化

杨仕辉, 王平

(暨南大学 经济学院, 广州 510632)

**摘要:** 通过构建供应商和制造商两级低碳供应链 Stackelberg 博弈模型, 得到博弈均衡解和收益共享契约参数, 比较分散决策、集中决策和收益共享契约下实现低碳供应链的经济效应, 并通过算例分析了是否合作减排以及合作减排对供应链成员产量、碳减排量、利润的影响和收益共享契约参数对供应链成员利润的影响, 为供应链上下游企业开展碳减排合作提供了理论依据和政策建议。

**关键词:** 碳配额; 低碳供应链; Stackelberg 博弈; 收益共享契约; 优化

**中图分类号:** N945.12

**文献标志码:** A

## Game and optimization of a two-level low-carbon supply chain under the carbon quota policy

YANG Shi-hui, WANG Ping

(College of Economics, Ji'nan University, Guangzhou 510632, China. Correspondent; YANG Shi-hui, E-mail: yangshh@126.com)

**Abstract:** Through constructing a Stackelberg game model between the supplier and the manufacture, the game equilibrium solution and the revenue sharing contract parameters are obtained. Then a comparison of low-carbon economic effects among decentralized decision-making, centralized decision-making and revenue sharing contract is conducted. Through a numerical example, it is analyzed whether the supply chain can choose cooperation on carbon emission and what impacts will it have on product yield, carbon emission yield and profits of the low-carbon supply chain members, and how the revenue sharing contract parameters influence the profits of low-carbon supply chain. The theoretical basis and policy suggestions are provided for long term cooperation of emission reduction in the supply chain.

**Keywords:** carbon quota; low-carbon supply chain; Stackelberg game; revenue sharing contract; optimization

### 0 引言

我国现已成为 CO<sub>2</sub> 全球排放量最大的国家, 实施低碳经济战略, 是我国发展经济的必由之路。低碳化时代, 政府实施碳减排政策, 消费者偏好低碳化产品, 如何平衡供应链上下游企业之间的利润分配和碳减排量是研究低碳化供应链企业之间最集中的两个问题。本文关注的是在消费者偏好低碳产品时, 考虑政府给定的碳配额和市场决定的碳交易机制下供应商和制造商之间的碳减排博弈, 研究双方为实现利润最大化选择单位产品最优减排量之间的博弈, 探求基于碳配额政策下的两级低碳供应链是否可以通过收益共享契约实现最优利润和减排量。

目前, 针对供应链契约模型的研究较多。文献 [1] 系统地对多种供应链契约模型进行了详细的描述

和分析; 文献 [2] 在需求受价格影响和股票市场影响下, 建立了收益共享和数量折扣的联合契约, 结果表明协调机制可以实现供应链双方的最完美结合和最优的利润分配; 文献 [3] 研究了收益共享契约, 可以使得短周期产品供应链达到最优协调。有大量的文献研究了低碳经济下的供应链。文献 [4] 将碳减排成本和碳排放规制引入供应链运营方式选择中, 研究碳减排成本和两种碳规制对其的影响; 文献 [5] 研究了在不确定性且具有动态性的环境政策下企业的碳减排投资成本决策问题; 文献 [6] 研究了低碳下的最优订货批量问题; 文献 [7] 通过研究分析表明, 产品碳排放量和政府排放上限对两制造商和碳配额供应商最优变量以及利润值的影响呈反向关系; 文献 [8] 建立了供应商与制造商的二级供应链在新形势下的利润

**收稿日期:** 2015-03-25; **修回日期:** 2015-07-15.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(71273114).

**作者简介:** 杨仕辉(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 从事低碳供应链管理、气候政策等研究; 王平(1991—), 女, 硕士生, 从事低碳供应链管理的研究。

优化模型, 得出了企业的最优碳减排量和最优产量, 并通过数值模型说明了该模型在实践中的应用; 文献[9]研究了基于自执行旁支付契约下的供应商与制造商之间的碳减排博弈与协调, 研究表明旁支付执行契约可以使决策双方依靠个人理性在分散决策下取得集中决策效果。

目前, 将碳交易和碳配额纳入供应链中的研究很少, 大多数的研究集中于单个企业的生产减排决策, 但事实上碳减排是供应链各成员共同面临而非单一成员面临的问题, 因此应进一步加强低碳化供应链成员之间的碳减排合作与协调问题。本文重点考虑在碳配额政策和消费者偏好低碳产品背景下, 供应链成员如何参与碳减排和收益共享契约优化设计, 使供应链成员各方都有动力参与碳减排, 实现整体供应链协调优化, 以解决碳减排和利润公平分配等问题。

## 1 模型假设与变量说明

### 1.1 模型描述

考虑消费者低碳偏好背景下的低碳化两级供应链(见图1), 由一个制造商和一个供应商构成, 供应商为制造商提供中间产品, 制造商加工成成品, 通过直接销售渠道到达消费者。在低碳政策下, 政府期初免费发放给企业一定数量的碳排放配额, 如果企业碳排放超过政府限制的碳配额, 则需在碳交易市场买入碳排放权, 当然, 企业也可以通过技术创新进行碳减排; 如果企业碳排放低于政府配额, 企业也可将多余的配额售出。通过建立分散决策模型、集中决策模型和收益共享契约模型, 探讨低碳下的收益共享契约设计问题, 求出博弈均衡解, 再通过数值分析, 模拟求解实现收益共享的契约参数。

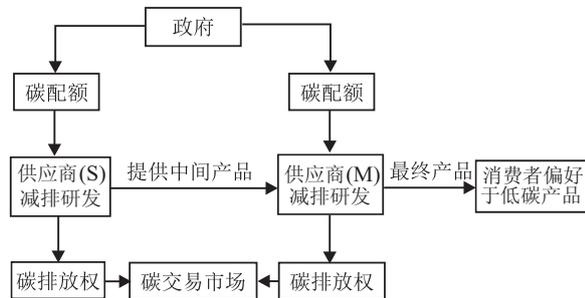


图1 低碳环境下制造商与供应商供应链间的生产和交易

### 1.2 模型假设

1) 供应链由一个供应商和一个制造商组成, 供应商为制造商提供中间产品, 制造商再加工后销售给市场, 一单位的中间商品对应一单位的成品, 即不存在库存和缺货成本。

2) 在没有碳减排时, 非低碳产品的逆需求函数为  $p = a - bq$ , 假设  $a > 0$ ,  $b > 0$  和  $a > c_s + c_m$ , 保证供应链有利可图。由于消费者偏好低碳产品, 愿意为

单位低碳产品付出更高的价格<sup>[10-11]</sup>(记为  $\alpha > 0$ ), 则低碳产品逆需求函数为  $p = a - bq + \alpha$ 。

3) 碳减排成本是关于碳减排量的单调递增函数, 即  $C(\Delta e) = \beta_i(\Delta e_i)^2/2$ ,  $C'(\Delta e) \geq 0$ 。其中  $\beta$  为努力程度,  $\beta$  越大, 碳减排成本越高, 碳减排投资是单独的研发成本, 与产品的生产成本无关<sup>[12]</sup>。

4) 假定供应链成员都是理性的, 即收益共享契约下的中间产品价格 ( $w_s$ ) 小于无契约下的中间产品价格 ( $w_d$ )。

5) 碳交易价格由碳市场决定, 是外生变量。有关变量及其含义如表1所示。

表1 变量定义一览表

变量	含义
$p$	单位产品的市场销售价格
$p_c$	单位碳交易价格
$q$	市场需求量
$c_m$	制造商加工中间产品的成本
$c_s$	供应商生产单位中间产品的成本
$w_d$	无契约供应链下的中间产品价格
$w_s$	收益共享契约下的中间产品价格
$\pi_T$	集中决策下供应链总利润
$\Delta e_s$	供应商的单位减排量
$\Delta e_m$	制造商的单位减排量
$e_s$	供应商单位初始碳排放量
$e_m$	制造商单位初始碳排放量
$g_s$	政府分配给供应商的碳排放总额
$g_m$	政府分配给制造商的碳排放总额
$\pi_s$	供应商利润
$\pi_m$	制造商利润

## 2 模型求解

### 2.1 分散决策下的模型解

此时, 供应商和制造商之间进行非合作两阶段博弈。第1阶段, 供应商决定碳减排量和中间产品的价格; 第2阶段, 制造商确定产品订购量和碳减排量。下面采用逆向归纳法求解这两阶段博弈。

制造商的利润目标函数为

$$\pi_m = pq - (c_m + w_d)q + p_c[g_m - (e_m - \Delta e_m)q] - \frac{\beta_m \Delta e_m^2}{2}; \quad (1)$$

供应商的利润目标函数为

$$\pi_s = (w_d - c_s)q + p_c[g_s - (e_s - \Delta e_s)q] - \frac{\beta_s \Delta e_s^2}{2}. \quad (2)$$

将  $p = a - bq + \alpha$  代入式(1), 由一阶条件得

$$\begin{cases} q = \frac{\beta_m(A + c_s - w_d + e_s p_c)}{C}, \\ \Delta e_m = \frac{p_c(A + c_s - w_d + e_s p_c)}{C}. \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$A = a + \alpha - c_m - c_s - e_m p_c - e_s p_c > 0,$$

$$C = 2b\beta_m - p_c^2 > 0.$$

式(2)有最优解的条件是其海赛矩阵为负定. 由式(2)得

$$H_s = \frac{1}{p_c^2 - 2b\beta_m} \begin{bmatrix} 2\beta_m & p_c\beta_m \\ p_c\beta_m & -\beta_s(p_c^2 - 2b\beta_m) \end{bmatrix}.$$

令

$$\begin{aligned} |H_1^s| &= \frac{2\beta_m}{p_c^2 - 2b\beta_m} < 0, \\ |H_2^s| &= \frac{2\beta_m\beta_s}{2b\beta_m - p_c^2} - \frac{p_c^2\beta_m^2}{(p_c^2 - 2b\beta_m)^2} > 0, \end{aligned}$$

即当  $p_c^2 < 2b\beta_m$  且  $4b\beta_m\beta_s > p_c^2(\beta_m + 2\beta_s)$  成立时, 式(2)有最优解. 再由一阶条件得

$$\Delta e_s^{d*} = \frac{Ap_c\beta_m}{B}, \quad (4)$$

其中

$$B = 4b\beta_m\beta_s - p_c^2(\beta_m + 2\beta_s) > 0.$$

将式(4)代入(3)、(1)和(2), 可得

$$\begin{cases} q^{d*} = \frac{A\beta_m\beta_s}{B}, \\ \Delta e_m^{d*} = \frac{Ap_c\beta_s}{B}; \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \pi_s^{d*} = \frac{A^2\beta_m\beta_s + 2g_s p_c B}{2B}, \\ \pi_m^{d*} = \frac{CA^2\beta_m\beta_s^2 + 2g_m p_c B^2}{2B^2}. \end{cases} \quad (6)$$

## 2.2 集中决策下的模型解

现在考虑将整条供应链作为决策主体, 以整体利润为最优目标, 可得供应链总利润目标函数

$$\begin{aligned} \pi_T &= (p - c_m - c_s)q - \frac{\beta_m\Delta e_m^2 + \beta_s\Delta e_s^2}{2} + \\ & p_c[(g_m + g_s) - (e_m + e_s) + (\Delta e_m + \Delta e_s)]q. \end{aligned} \quad (7)$$

由一阶条件解得

$$q = \frac{a + \alpha - c_m - c_s + p_c(\Delta e_m + \Delta e_s - e_m - e_s)}{2b}. \quad (8)$$

二阶条件  $\partial^2\pi_T/\partial q^2 = -2b < 0$ , 即存在最优的  $q$  使得利润最优. 再将式(8)代入(7), 海塞矩阵为

$$H_T = \begin{bmatrix} \frac{p_c^2}{2b} - \beta_s & \frac{p_c^2}{2b} \\ \frac{p_c^2}{2b} & \frac{p_c^2}{2b} - \beta_m \end{bmatrix}.$$

当  $p_c^2 < 2b\beta_m$  且  $2b\beta_m\beta_s > p_c^2(\beta_m + \beta_s)$  时,  $H_T$  负定, 存在最优的  $\Delta e_m$  和  $\Delta e_s$ , 使得利润最优. 将式(8)代入(7), 对  $\Delta e_m, \Delta e_s$  求一阶条件, 得

$$\begin{cases} \Delta e_s^{T*} = \frac{Ap_c\beta_m}{B - 2b\beta_m\beta_s + p_c^2\beta_s}, \\ \Delta e_m^{T*} = \frac{Ap_c\beta_s}{B - 2b\beta_m\beta_s + p_c^2\beta_s}. \end{cases} \quad (9)$$

将式(9)代入(7)、(8), 可得

$$\begin{cases} q^{T*} = \frac{A\beta_s\beta_m}{B - 2b\beta_m\beta_s + p_c^2\beta_s}, \\ \pi_T^* = (g_m + g_s)p_c + \frac{A^2\beta_m\beta_s}{2(B - 2b\beta_m\beta_s + p_c^2\beta_s)}. \end{cases} \quad (10)$$

## 2.3 收益共享契约下的模型解

在收益共享契约式供应链中, 制造商从供应商那里以较低的中间产品价格购入  $w_s$ , 并承诺给  $\varphi$  ( $0 < \varphi < 1$ ) 的销售收益作为回报. 与上面的模型相同, 博弈仍分两步进行, 下面采用逆向归纳法求解.

制造商的利润目标函数为

$$\begin{aligned} \pi_m^\varphi &= (1 - \varphi)pq - (c_m + w_s)q + p_c[g_m - \\ & (e_m - \Delta e_m)q] - \frac{\beta_m\Delta e_m^2}{2}; \end{aligned} \quad (11)$$

供应商的利润目标函数为

$$\begin{aligned} \pi_s^\varphi &= \varphi pq + (w_s - c_s)q + p_c[g_s - \\ & (e_s - \Delta e_s)q] - \frac{\beta_s\Delta e_s^2}{2}. \end{aligned} \quad (12)$$

由式(11)的一阶条件得

$$q^\varphi = \frac{(a + \alpha)(1 - \varphi) - c_m - w_s + p_c(\Delta e_m - e_m)}{2b(1 - \varphi)}. \quad (13)$$

将式(13)代入(11)中, 若  $\partial^2\pi_m^\varphi/\partial\Delta e_m^2 = [p_c^2 - 2b(1 - \varphi)\beta_m]/[2b(1 - \varphi)] < 0$ , 即当  $p_c^2 < 2b(1 - \varphi)\beta_m$  时, 存在最优碳减排量. 再令  $\partial\pi_m^\varphi/\partial\Delta e_m = 0$ , 得

$$\Delta e_m^{\varphi*} = \frac{Dp_c}{E}. \quad (14)$$

其中

$$D = (a + \alpha)(1 - \varphi) - c_m - e_m p_c - w_s > 0,$$

$$E = 2b(1 - \varphi)\beta_m - p_c^2 > 0.$$

再将式(14)代入(13)得

$$q^{\varphi*} = \frac{D\beta_m}{E}. \quad (15)$$

将式(15)代入(12), 此时二阶条件  $\partial^2\pi_s^\varphi/\partial\Delta e_s^2 = -\beta_s < 0$ , 满足最大值的条件. 求  $\Delta e_s$  的一阶偏导并令  $\partial\pi_s^\varphi/\partial\Delta e_s = 0$ , 可求得

$$\Delta e_s^{\varphi*} = \frac{Dp_c\beta_m}{E\beta_s}. \quad (16)$$

## 3 结果比较

### 3.1 分散决策模型与集中决策模型比较

由式(5)和(10)可得

$$q^{T*} - q^{d*} = \frac{(2b\beta_m - p_c^2)A\beta_s^2\beta_m}{[2b\beta_m\beta_s - p_c^2(\beta_m + \beta_s)]B} > 0. \quad (17)$$

由  $A > 0, \beta_m > 0$ , 以及式(2)的最优解条件  $p_c^2 < 2b\beta_m$  且  $B > 0$  和式(7)的最优解条件  $2b\beta_m\beta_s > p_c^2(\beta_m + \beta_s)$ , 可知  $q^{T*} - q^{d*} > 0$ .

**命题 1**  $q^{T*} > q^{d*}$ , 即实施集中决策比分散决

策下订购量(或产品的需求量)更多. 由式(6)和(10)可得

$$\pi_T^* - \pi_m^{d*} - \pi_s^{d*} = \frac{A^2\beta_m\beta_s^3C^2}{2[2b\beta_m\beta_s - p_c^2(\beta_m + \beta_s)]B^2} > 0. \quad (18)$$

**证明** 由  $A = a + \alpha - c_m - c_s - e_m p_c - e_s p_c > 0$ ,  $B = 4b\beta_m\beta_s - p_c^2(\beta_m + 2\beta_s) > 0$ ,  $C = 2b\beta_m - p_c^2 > 0$ , 以及式(7)的最优解条件  $2b\beta_m\beta_s > p_c^2(\beta_m + \beta_s)$ , 可知  $\pi_T^* - \pi_m^{d*} - \pi_s^{d*} > 0$ .  $\square$

**命题2**  $\pi_T^* > \pi_m^{d*} + \pi_s^{d*}$ , 即集中决策下的供应链总利润大于分散决策下的供应链总利润.

由式(4)、(5)和(9)可得

$$\begin{cases} \Delta e_s^{T*} - \Delta e_s^{d*} = \frac{(2b\beta_m - p_c^2)A p_c \beta_s \beta_m}{[2b\beta_m\beta_s - p_c^2(\beta_m + \beta_s)]B} > 0, \\ \Delta e_m^{T*} - \Delta e_m^{d*} = \frac{(2b\beta_m - p_c^2)A p_c \beta_s^2}{[2b\beta_m\beta_s - p_c^2(\beta_m + \beta_s)]B} > 0. \end{cases} \quad (19)$$

**证明** 由  $A > 0$ ,  $\beta_m > 0$ ,  $\beta_s > 0$  和式(2)的最优解条件  $p_c^2 < 2b\beta_m$  且  $B > 0$  以及式(7)的最优解条件  $2b\beta_m\beta_s > p_c^2(\beta_m + \beta_s)$ , 可知  $\Delta e_s^{T*} - \Delta e_s^{d*} > 0$ ,  $\Delta e_m^{T*} - \Delta e_m^{d*} > 0$ .  $\square$

**命题3**  $\Delta e_s^{T*} > \Delta e_s^{d*}$ ,  $\Delta e_m^{T*} > \Delta e_m^{d*}$ , 即实施集中决策比分散决策下制造商和供应商的碳减排量均比分散决策下的碳减排量更多.

### 3.2 收益共享契约模型与集中决策模型比较

收益共享契约下, 为得到供应链的全局协调, 供应商与制造商的决策水平应当与集中决策模型下的决策水平相同, 要满足这一条件就要使得  $q^{\varphi*} = q^{T*}$ ,  $\Delta e_s^{\varphi*} = \Delta e_s^{T*}$ ,  $\Delta e_m^{\varphi*} = \Delta e_m^{T*}$  这3个等式同时成立, 可得

$$\begin{cases} \frac{D\beta_m}{E} = \frac{A\beta_s\beta_m}{B - 2b\beta_m\beta_s + p_c^2\beta_s}, \\ \frac{Dp_c\beta_m}{E\beta_s} = \frac{Ap_c\beta_m}{B - 2b\beta_m\beta_s + p_c^2\beta_s}, \\ \frac{Dp_c}{E} = \frac{Ap_c\beta_s}{B - 2b\beta_m\beta_s + p_c^2\beta_s}. \end{cases} \quad (20)$$

求解得

$$\varphi = \frac{p_c^2\beta_m(A + c_s + e_s p_c - w_s) - C\beta_s(c_s + e_s p_c - w_s)}{p_c^2(a + \alpha)(\beta_m + \beta_s) - 2b\beta_m\beta_s(A - a - \alpha)}. \quad (21)$$

在进行收益共享契约设计时, 如果能使  $\varphi(w_s)$  满足式(21), 则收益共享契约可以达到集中决策下的目标, 即供应链全局协调.

### 3.3 收益共享契约模型与分散决策模型比较

为了保证收益共享契约的顺利实施, 除了使得全局协调外, 还需要保证供应链成员的协调(参与约

束条件), 换言之, 收益共享契约下的各方利润均要大于分散决策下各自所获得的利润, 即  $\pi_s^{\varphi*} > \pi_s^{d*}$ ,  $\pi_m^{\varphi*} > \pi_m^{d*}$ , 求解得

$$\varphi_1 < \varphi < \varphi_2. \quad (22)$$

其中

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \{(A^2\beta_m\beta_s + 2Bg_s p_c)/(2B) + \beta_s \Delta e_s^{T*2}/2 - (w_s - c_s)q^{T*} - p_c[g_s - (e_s - \Delta e_s^{T*})q^{T*}]\} / \{(a - bq^{T*} + \alpha)q^{T*}\}, \\ \varphi_2 &= 1 - \{[(2b\beta_m - p_c^2)A^2\beta_m\beta_s^2 + 2g_m p_c B^2]/(2B^2) + (c_m + w_s)q^{T*} - p_c[g_m - (e_m - \Delta e_m^{T*})q^{T*}] + \beta_m \Delta e_m^{T*2}/2\} / \{(a - bq^{T*} + \alpha)q^{T*}\}. \end{aligned}$$

**命题4** 如果收益共享契约参数  $\varphi(w_s)$  同时满足式(21)和(22), 则不仅使整体供应链得到协调, 供应链成员的利润也得到了帕累托改善.

## 4 算例分析

设定有关参数如表2所示. 根据表2中参数求解不同状态下供应链成员的碳减排量、产量和利润, 如表3所示. 由表3可以看出, 与分散决策相比, 在收益共享契约下, 供应链系统的订购量更大, 制造商和供应商的单位产品碳减排量更多, 总利润得到提高, 且都达到了集中决策下的最优决策量. 这说明收益共享契约相比分散决策而言, 各个决策变量都有了改善, 且使得供应链系统得到整体协调.

表2 相关参数值

参数	$a$	$b$	$\alpha$	$c_s$	$c_m$	$p_c$
取值	2000	0.5	0.8	40	50	10
参数	$\beta_m$	$\beta_s$	$g_m$	$g_s$	$e_m$	$e_s$
取值	600	800	10000	6000	40	40

表3 不同状态下供应链中的最优值

系统状态	分散决策	集中决策	收益共享契约
$q$	721	1568	1568
$\Delta e_m$	12	26	26
$\Delta e_s$	9	20	20
供应链总利润	776487	1030970	1030970

表4则描述了不同的  $(w_s, \varphi)$  对供应链成员的影响. 由表4可以看出: 随着  $w_s$  的增大,  $\varphi$  逐渐变小; 随着  $\varphi$  的变小, 制造商利润在递增, 供应商利润在递减. 在A, B, C, D四种情况下,  $\varphi \in (\varphi_1, \varphi_2)$ , 收益共享契约下供应商和制造商的利润都比无契约形式的要高. 而E, F两种情况下,  $\varphi \notin (\varphi_1, \varphi_2)$ , 无法保证收益共享契约在供应链中顺利实施. 所以为保证收益共享契约达到整体供应链最优,  $w_s$  和  $\varphi(w_s)$  必须同时满足式(21)和(22), 才能使得收益共享契约达到整体与个体最优化.

表4 契约参数对供应链成员利润的影响

序号	$w_s$	$\varphi_1$	$\varphi$	$\varphi_2$	$\pi_s^{d*}$	$\pi_s^{\varphi*}$	$\pi_s^{\varphi*} - \pi_s^{d*}$	$\pi_m^{d*}$	$\pi_m^{\varphi*}$	$\pi_m^{\varphi*} - \pi_m^{d*}$
A	15	0.478	0.529	0.612	460 176	555 133	96 937	316 311	473 857	157 546
B	20	0.474	0.518	0.608	460 176	542 846	82 670	316 311	488 124	171 813
C	30	0.466	0.483	0.599	460 176	514 480	54 304	316 311	516 490	200 179
D	40	0.457	0.472	0.591	460 176	486 059	25 883	316 311	544 911	228 600
E	50	0.449	0.448	0.583	460 176	457 637	-2 539	316 311	573 333	257 022
F	60	0.441	0.425	0.575	460 176	429 213	-30 963	316 311	601 757	285 446

## 5 结 论

在考虑消费者低碳偏好和碳配额政策情况下,本文通过构建供应商和制造商之间的碳减排合作博弈模型,探讨了是否可以通过收益共享契约来实现产品碳减排和供应链利润的帕累托改善,比较了分散决策、集中决策和收益共享契约下的最优碳减排量和成员利润,并通过数值分析比较了收益共享契约和无契约下的各参与方的产量、利润和碳减排量。

研究结果表明,在消费者低碳偏好和碳配额政策背景下,收益共享契约能够达到集中决策下的最优,同时又使得分散决策下各参与方的利润增加,碳减排量也得到了较大的提高.这说明如果双方谈判使收益共享契约参数的选择达到合理区间,则制造商和供应商之间能够通过制定收益共享契约来实现集中决策下最优,同时还能够使得各参与方利润得到改善,并降低碳排放量。

本文不足之处在于,为了更符合实际模型加入的参数较多,而最终契约的选择也要满足个体与整体的最优,这就影响了契约参数的取值, $w_s$ 与 $\varphi$ 是一一对应,不方便契约参与者的决策.以后的研究方向是要放宽这个条件,求解参数取值区间更利于企业的决策。

## 参考文献(References)

- [1] Cachon G. Supply chain coordination with contracts[C]. Handbooks in Operations Research and Management Science: Supply Chain Management: Design, Coordination and Operation. Amsterdam: The Netherlands, 2003: 229-340.
- [2] Sarathi G P, Sarmah S H, Jenamani M, et al. An integrated revenue sharing and quantity discounts contract for coordinating a supply chain dealing with short life-cycle products[J]. Applied Mathematical Modeling, 2014, 38(15/16): 4120-4136.
- [3] 黄宝凤, 仲伟俊, 张玉林. 短生命周期产品供应链中供需双方合作的价值研究[J]. 管理工程学报, 2005, 19(4): 104-109.  
(Huang B F, Zhong W J, Zhang Y L. The value study of supply-demand coordination in supply chain with short life cycle products[J]. J of Industrial Engineering Management, 2005, 19(4): 104-109.)
- [4] Hoen K M, Tan T, Fransoo J C, et al. Effect of carbon emission regulations on transport mode selection in supply chains[R]. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2010.
- [5] Saltari E, Travaglini G. The effects of environmental policies on the abatement investment decisions of a green firm[J]. Resource and Energy Economics, 2011, 33(3): 666-685.
- [6] Hua G, Cheng T C E, Wang S, et al. Managing carbon footprints in inventory management[J]. Int J of Production Economics, 2011, 132(2): 178-185.
- [7] 谢鑫鹏, 赵道致. 低碳供应链生产及交易决策机制[J]. 控制与决策, 2014, 29(4): 651-658.  
(Xie X P, Zhao D Z. Low carbon supply chain production and trading decision-making mechanism[J]. Control and Decision, 2014, 29(4): 651-658.)
- [8] 赵道致, 王楚格. 考虑低碳政策的供应链企业减排决策研究[J]. 工业工程, 2014, 17(1): 105-111.  
(Zhao D Z, Wang C G. A research on emission reduction decision in supply chain with low-carbon policy considered[J]. Industrial Engineering Journal, 2014, 17(1): 105-111.)
- [9] 夏良杰, 赵道致, 何龙飞, 等. 基于自执行旁支付契约的供应商与制造商减排博弈与协调[J]. 管理学报, 2014, 11(5): 750-757.  
(Xia L J, Zhao D Z, He L F, et al. Game on carbon emission reduction and coordination based on side-payment self-enforcing contract between supplier and manufacture[J]. Chinese J of Management, 2014, 11(5): 750-757.)
- [10] Ray S, Jewkes E M. Customer lead time management when both demand and price are lead time sensitive[J]. European J of Operational Research, 2004, 153(3): 769-781.
- [11] Moon W, Florkowski W J, Brückner B, et al. Willingness to pay for environmental practices implications for eco-labeling[J]. Land Economics, 2002, 78(1): 88-102.
- [12] Aspremont C D, Jacquemin A. Cooperative and non-cooperative R&D in duopoly with spillovers[J]. The American Economic Review, 1988, 78(5): 1133-1137.

(责任编辑: 孙艺红)