

## 滞后效应影响下低碳供应链减排投入与零售定价

陈东彦<sup>1,2†</sup>, 黄春丽<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨理工大学 管理学院, 哈尔滨 150080; 2. 哈尔滨理工大学 应用科学学院, 哈尔滨 150080)

**摘要:** 考虑减排投资效果滞后效应的影响, 构建低碳供应链纵向合作减排微分博弈模型. 运用微分对策理论, 得到分散式决策和集中式决策下低碳供应链的最优减排努力投入、宣传努力投入和零售定价策略, 以及分散式决策下制造商的合作减排支付比例, 并对不同决策机制下供应链成员的均衡策略进行比较分析. 研究发现: 集中式决策下, 制造商减排努力投入和零售商宣传努力投入均高于分散式决策下的相应值; 滞后时间存在一个阈值, 只有滞后时间低于该阈值时, 集中式决策才能提升整个供应链系统的经济绩效.

**关键词:** 低碳供应链; 合作减排; 滞后效应; 微分对策

中图分类号: F272

文献标志码: A

## Carbon emissions reduction and retail pricing strategies in a low-carbon supply chain with lag effect

CHEN Dong-yan<sup>1,2†</sup>, HUANG Chun-li<sup>1</sup>

(1. School of Management, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 2. School of Applied Science, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** By considering the lag effect of mitigation investment, the differential game models are developed for vertical cooperative mitigation in a low-carbon supply chain. By applying the differential game, the optimal strategy problems of emission reduction investment, promotion investment and pricing are investigated in the decentralized and centralized decisions, respectively. Also, the optimal sharing rate of manufacturers is given in the decentralized decision. The paper comparatively analyzes the optimal equilibrium strategies in the two decision systems. The results show that the emission reduction investment of manufacturers and promotion investment of retailers are higher in the centralized decision than that in the decentralized decision, yet the economic performance of the low-carbon supply chain can be improved with the help of centralized decision when lag time is less than a given threshold value.

**Keywords:** low-carbon supply chain; cooperative mitigation; lag effect; differential game

## 0 引言

随着市场经济的迅速发展, 以温室气体排放为主的环境问题成为社会关注的焦点. 为了限制CO<sub>2</sub>等温室气体的排放, 众多国家发布了强制减排、征收碳税以及碳限额与交易等多项碳排放调控政策. 宏观层面的减排目标必将分解落实到微观企业层面, 制造企业需要对现有技术和社会行为模式进行改变和革新<sup>[1]</sup>. 例如雷诺作为全球第一个公开承诺减少碳排放的汽车厂商, 通过加大使用可再生能源, 不断改善生产设施的能效, 达到降低各业务运营单位碳排放的目标. 而零售企业主要通过营造低碳购物环境、建立

低碳营销环境、宣传低碳企业形象等手段刺激消费者的碳消费行为, 形成以低碳消费拉动低碳生产的局面<sup>[2]</sup>.

低碳经济时代的来临给供应链运营、生产管理等领域带来新的研究课题, 众多学者着手研究供应链低碳化问题. Benjaafar等<sup>[3]</sup>指出, 企业可通过改善生产、库存、仓储、物流及运营管理等方式降低企业碳排放量. 杜少甫等<sup>[4]</sup>将碳排放许可交易引入企业生产管理中, 侧重研究碳排放限额约束下企业最优生产策略问题. Du等<sup>[5]</sup>借助报童模型, 考虑了供应链依赖碳排放权交易机制下每个成员的最优决策问题. Hua

收稿日期: 2017-05-09; 修回日期: 2017-10-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目(11271103).

责任编委: 关新平.

作者简介: 陈东彦(1964—), 女, 教授, 博士生导师, 从事时滞系统鲁棒控制、最优化方法以及系统优化与供应链管理研究; 黄春丽(1979—), 女, 博士生, 从事系统优化与供应链管理的研究.

†通讯作者. E-mail: dychen\_2004@hotmail.com

等<sup>[6]</sup>基于EOQ模型研究了当仅考虑碳排放权交易机制时供应链的最优订货批量问题. Song等<sup>[7]</sup>在随机环境下研究了碳限额、征收碳税及碳排放权交易3种碳排放调控政策对企业最优订货策略的影响,研究表明,碳排放权交易机制能提升供应链成员的期望利润,且在一定条件下能有效减少企业碳排放量. Yang等<sup>[8]</sup>进一步分析了上述3种碳排放调控政策下低碳政策对供应链协调问题的影响. 以上文献在微观层面对供应链低碳化问题展开研究,但均未考虑上下游企业间的纵向合作. 事实上,企业间的长期合作减排有助于各自利润的提升<sup>[9]</sup>.

近年来,从动态角度出发,以企业长远经济绩效和环境绩效最大化为决策目标,研究供应链成员的最优合作减排策略问题一直受到学者的广泛关注. 王芹鹏等<sup>[10]</sup>考虑了零售商为主导者的供应链,其中零售商承担制造商部分减排努力成本,并运用微分对策理论给出制造商和零售商最优减排努力水平和宣传努力水平. 之后,赵道致等<sup>[11]</sup>将供应链低碳化问题推广到零售商竞争的情形. 不同于文献[10]的研究背景,徐春秋等<sup>[12]</sup>指出,制造商会比零售商面临更大的减排压力,进而考虑制造商为主导者的供应链,并构建了制造商与零售商之间的3种微分博弈模型(协同控制的集中式决策、无成本分担的分散式决策及成本分担契约下的分散式决策),研究发现,集中式决策下供应链利润远大于两种分散式决策下的数值. 黄守军等<sup>[13]</sup>利用随机微分对策理论建立考虑发电商减排技术协同效应的供应链合作减排模型,给出了分散式和集中式决策下的最优减排投入. 王素凤等<sup>[14]</sup>基于技术进步、电力价格、燃料价格、碳价、补贴政策和投资项目的碳减排率等多重不确定因素,构建了发电商减排投资的实物期权模型. 此外,游达明等<sup>[15]</sup>侧重研究低碳供应链生态研发、合作促销与定价问题. 现有文献均假设企业的减排投资效果是即时的,但实践中减排投资效果往往存在一定的滞后效应<sup>[16]</sup>.

本文将滞后效应引入低碳供应链决策中,研究考虑滞后效应的动态合作减排投入和零售定价问题,基于Nerlove-Arrow模型,构建单位产品减排量的延迟微分方程,利用微分对策理论分别给出制造商和零售商在分散式决策和集中式决策下的最优减排努力投入、宣传努力投入和定价策略以及分散式决策下最优的合作减排支付比例,并从滞后时间对整个供应链利润、单位产品减排量的影响等方面进行数值分析,验证供应链最优决策的有效性.

## 1 问题描述与模型假设

考虑由一个制造商  $M$  和一个零售商  $R$  组成的低碳供应链. 为了实现产品减排绩效的提升,制造商通常采用技术革新、改善生产和运营流程等减排手段降低产品过程中的碳排放量,而零售商采用营造低碳购物环境、宣传低碳产品等营销手段,合理制定产品价格,实现低碳产品的销售. 考虑到市场中存在的领导结构,选择制造商作为供应链关系中的主导者,与下游零售商构成 Stackelberg 微分博弈. 为了激励零售商努力进行低碳宣传,制造商会承担零售商一定比例的低碳宣传努力成本.

### 1.1 符号说明

$E_M(t)$ :  $t$ 时刻制造商  $M$  投入的减排努力水平;

$E_R(t)$ :  $t$ 时刻零售商  $R$  投入的低碳宣传努力水平;

$\phi$ : 制造商承担零售商低碳宣传努力成本的支付比例,  $\phi \in [0, 1]$ ;

$\tau(t)$ :  $t$ 时刻单位产品的减排量;

$C(E_i(t))$  ( $i = M, R$ ):  $t$ 时刻制造商的减排努力成本或零售商的宣传努力成本;

$J_i$  ( $i = M, R$  或  $MR$ ): 制造商、零售商或整个供应链的利润函数.

### 1.2 模型假设

**假设1** 文献[12]指出,单位产品的减排量是一个动态变化过程,与制造商的减排努力相关,并建立了单位产品减排量动态模型  $\dot{\tau}(t) = \gamma E_M(t) - \delta \tau(t)$ . 本文考虑减排投资效果的滞后效应,利用如下延迟微分方程描述单位产品减排量  $\tau(t)$  的动态变化:

$$\dot{\tau}(t) = \gamma E_M(t - d) - \delta \tau(t), \quad (1)$$

$$\tau(0) = \tau_0.$$

其中:  $\tau_0 \geq 0$  表示单位产品的初始减排量;  $\gamma > 0$  表示制造商减排努力水平对单位产品减排量变化率的影响因子;  $d$  表示制造商减排效果的滞后时间,滞后效应是由于先进的节能减排技术转为节能减排绩效需要一个过程所产生的;  $\delta > 0$  表示当制造商不进行减排投入时单位产品减排量的衰减率,是由于减排设备的运行、操作和维护不到位或减排设备老化等所造成的.

**假设2** 低碳产品的需求一方面受零售商低碳宣传努力水平和单位产品减排量等非价格因素的影响,零售商投入的低碳宣传努力水平直接拉动需求,而制造商则通过技术革新降低单位产品排放量、提升产品的低碳度影响产品需求<sup>[12]</sup>; 另一方面也受价格因素的影响,消费者更倾向于购买低碳度高、价格低廉的产品,价格越低产品市场需求就越高. 借鉴

Ouardighi 的模型<sup>[17]</sup>, 设两个方面通过分离相乘形式同时影响产品需求, 则

$$S(t) = (a - bp(t))(\alpha\tau(t) + \beta E_R(t)). \quad (2)$$

其中:  $a > 0$  表示市场的潜在需求;  $b > 0$  为价格敏感系数, 表征零售价格对产品需求的影响程度, 为保证产品需求不为负值, 不妨假设  $0 < p(t) < a/b$ ;  $\alpha > 0$  为单位产品减排量对产品需求的影响因子;  $\beta > 0$  为零售商投入的低碳宣传努力水平对产品需求的影响因子.

**假设3** 考虑到减排努力成本和宣传努力成本分别为减排努力水平和宣传努力水平的增函数且呈现上凸的特点, 借鉴文献<sup>[16]</sup>, 设其为二次函数, 即

$$C(E_M(t)) = \frac{1}{2}k_M E_M^2(t), \quad (3)$$

$$C(E_R(t)) = \frac{1}{2}k_R E_R^2(t), \quad (4)$$

其中  $k_M$  和  $k_R$  分别为减排努力成本系数和宣传努力成本系数.

**假设4** 供应链企业的决策目标是在兼顾环境效益基础上追求自身或整体长期经济效益的最大化. 假设供应链可以无限期地运作下去, 并考虑制造商和零售商拥有相同的贴现率  $\lambda > 0$ , 制造商低碳产品批发价格  $\omega$  为常值, 且  $0 < \omega < p(t) < a/b$ . 因此, 制造商、零售商和整个供应链的利润函数分别为

$$J_M = \int_0^\infty e^{-\lambda t} [\omega S(t) - C(E_M(t)) - \phi C(E_R(t))] dt,$$

$$J_R = \int_0^\infty e^{-\lambda t} [(p(t) - \omega)S(t) - (1 - \phi)C(E_R(t))] dt,$$

$$J_{MR} = \int_0^\infty e^{-\lambda t} [p(t)S(t) - C(E_M(t)) - C(E_R(t))] dt.$$

低碳产品的生产成本不是系统的决策变量, 其不影响供应链最优策略的制定, 为便于研究, 本文假设生产成本为0.

## 2 分散式决策

在分散式决策下, 制造商和零售商作为独立的经济个体均以自身利润最大化为目标进行决策. 制造商首先制定自身减排努力水平并对零售商的低碳宣传给予支持, 承担零售商的部分宣传费用, 决定宣传成本支付比例; 在制造商确定减排努力水平和支付比例后, 零售商再决策自身低碳宣传努力水平和产品零售价格. 显然, 这是一个由制造商主导的 Stackelberg 博弈(用上标  $D$  表示), 可以利用逆向归纳法求解.

**定理1** 分散式决策下, 制造商和零售商的微分

博弈均衡策略分别为

$$E_M^D(t) = \frac{\alpha\gamma\omega(a - b\omega)}{2(\lambda + \delta)k_M} e^{\delta t}.$$

$$\phi^D = \begin{cases} \frac{5b\omega - a}{3b\omega + a}, & \frac{a}{5b} < \omega < \frac{a}{b}; \\ 0, & 0 < \omega \leq \frac{a}{5b}. \end{cases}$$

$$E_R^D(t) = \frac{\beta(a - b\omega)^2}{4b(1 - \phi^D)k_R}.$$

$$p^D(t) = \frac{a + b\omega}{2b}.$$

单位产品减排量的最优轨迹为

$$\tau^D(t) = e^{-\delta t} \tau_0 + \frac{\alpha\gamma^2\omega(a - b\omega)}{2\delta(\lambda + \delta)k_M} e^{\delta t} (1 - e^{-\delta t}).$$

**证明** 首先, 给定制造商减排努力水平  $E_M(t)$  和支付比例  $\phi$ , 确定零售商的最优宣传努力水平和产品零售价格. 零售商的最优决策问题可以刻画为最优控制问题, 即

$$\begin{aligned} & \max J_R; \\ & \text{s.t. 式(1)}. \end{aligned}$$

构造如下 Hamilton 函数<sup>[18]</sup>:

$$\begin{aligned} H_R = & e^{-\lambda t} \left\{ (p(t) - \omega)(a - bp(t))(\alpha\tau(t) + \beta E_R(t)) - \right. \\ & \left. \frac{1}{2}(1 - \phi)k_R E_R^2(t) \right\} + q(t)[\gamma E_M(t - d) - \delta\tau(t)]. \end{aligned}$$

因约束方程中不含控制变量  $p(t)$  和  $E_R(t)$ , 零售商最优决策问题满足

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_R}{\partial E_R} &= \beta(p(t) - \omega)(a - bp(t)) - (1 - \phi)k_R E_R = 0, \\ \frac{\partial H_R}{\partial p} &= a + b\omega - 2bp(t) = 0. \end{aligned}$$

故

$$E_R^D(t) = \frac{\beta(a - b\omega)^2}{4b(1 - \phi)k_R}, \quad (5)$$

$$p^D(t) = \frac{a + b\omega}{2b}. \quad (6)$$

制造商的最优决策问题刻画为最优控制问题

$$\begin{aligned} & \max J_M; \\ & \text{s.t. 式(1)}. \end{aligned}$$

将式(5)和(6)代入制造商最优决策问题, 构造 Hamilton 函数

$$\begin{aligned} H_M = & e^{-\lambda t} \left\{ \frac{\omega(a - b\omega)}{2} \left[ \alpha\tau(t) + \frac{\beta^2(a - b\omega)^2}{4b(1 - \phi)k_R} \right] - \right. \\ & \left. \frac{1}{2}k_M E_M^2(t) - \frac{\beta^2(a - b\omega)^4\phi}{32b^2k_R(1 - \phi)^2} \right\} + \\ & q(t)[\gamma E_M(t - d) - \delta\tau(t)]. \end{aligned}$$

令

$$\frac{\partial H_M}{\partial E_M} = -e^{-\lambda t} k_M E_M(t) + \gamma q(t) \frac{\partial E_M(t-d)}{\partial E_M(t)} = 0,$$

$$\dot{q}(t) = -\frac{\partial H_M}{\partial \tau} = \delta q(t) - \frac{\alpha\omega(a-b\omega)}{2} e^{-\lambda t},$$

$$\frac{\partial H_M}{\partial \phi} = \frac{\beta^2(a-b\omega)^3}{8bk_R(1-\phi)^2} \left[ \omega - \frac{(a-b\omega)(1+\phi)}{4b(1-\phi)} \right] = 0.$$

不妨设  $\frac{\partial E_M(t-d)}{\partial E_M(t)} = M(t)$ , 则制造商的最优决策满足

$$E_M^D(t) = \frac{\gamma}{k_M} e^{\lambda t} M(t) q(t).$$

$$\phi^D = \begin{cases} \frac{5b\omega - a}{3b\omega + a}, & \frac{a}{5b} < \omega < \frac{a}{b}; \\ 0, & 0 < \omega \leq \frac{a}{5b}. \end{cases}$$

其中

$$q(t) = ce^{\delta t} + \frac{\alpha\omega(a-b\omega)}{2(\lambda+\delta)} e^{-\lambda t}, \quad c \in R.$$

根据文献[18],  $M(t) = \Phi(t-d, t) = e^{\delta d}$ , 所以

$$E_M^D(t) = \frac{c\gamma}{k_M} e^{(\lambda+\delta)t+\delta d} + \frac{\alpha\gamma\omega(a-b\omega)}{2(\lambda+\delta)k_M} e^{\delta d}.$$

当  $t \rightarrow \infty$  时, 制造商投入的减排努力水平是有限的, 因此

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E_M^D(t) < \infty.$$

由此可得  $c = 0$ , 故制造商最优减排努力水平为

$$E_M^D(t) = \frac{\alpha\gamma\omega(a-b\omega)}{2(\lambda+\delta)k_M} e^{\delta d}. \quad (7)$$

将式(7)代入(1), 得到单位产品减排量微分方程(1)的解为

$$\tau^D(t) = e^{-\delta t} \tau_0 + \frac{\alpha\gamma^2\omega(a-b\omega)}{2\delta(\lambda+\delta)k_M} e^{\delta d} (1 - e^{-\delta t}). \quad (8)$$

最后, 将  $\phi^D$  代入式(5), 得到零售商的最优低碳宣传努力水平. □

由定理1, 当存在合作减排时制造商和零售商的最优利润为

$$J_M^D = \frac{\alpha\omega(a-b\omega)\tau_0}{2(\lambda+\delta)} + \frac{\beta^2(a-b\omega)^2(a+3b\omega)^2}{128b^2\lambda k_R} + \frac{\alpha^2\gamma^2\omega^2(a-b\omega)^2}{8k_M\lambda(\lambda+\delta)^2} (2e^{\delta d} - e^{2\delta d}), \quad (9)$$

$$J_R^D = \frac{\alpha(a-b\omega)^2\tau_0}{4b(\lambda+\delta)} + \frac{\beta^2(a-b\omega)^3(a+3b\omega)}{64b^2\lambda k_R} + \frac{\alpha^2\gamma^2\omega(a-b\omega)^3}{8bk_M\lambda(\lambda+\delta)^2} e^{\delta d}. \quad (10)$$

**推论1** 1) 当低碳产品批发价格不高于  $a/(5b)$  时, 制造商不承担零售商的低碳宣传努力成本, 此时批发价格正向影响制造商的最优减排努力水平, 负向影响零售商的最优宣传努力水平. 2) 当低碳产品批发价格高于  $a/(5b)$  时, 制造商承担零售商的低碳宣传努力成本, 批发价格正向影响制造商的最优合作减排

支付比例; 而对制造商的最优减排努力水平和零售商的最优宣传努力水平的影响呈先正向后负向作用趋势; 当批发价格为  $a/(2b)$  时, 制造商的最优减排努力水平达到最大值; 而当批发价格为  $a/(3b)$  时, 零售商的最优宣传努力水平达到最大值.

由推论1可知, 制造商承担零售商宣传努力成本的要求是其边际利润  $\omega$  高于  $a/(5b)$ , 且边际利润是促进供应链成员低碳减排和宣传投入的主要因素. 当制造商边际利润不高于  $a/(5b)$  时, 制造商边际利润较低, 其不承担零售商的低碳宣传努力成本. 制造商边际利润的提升使得零售商边际利润  $p(t) - \omega$  降低, 因此, 制造商会提高低碳减排努力投入, 而零售商则降低宣传努力投入; 当制造商边际利润高于  $a/(5b)$  且低于  $a/(3b)$  时, 供应链成员均拥有足够高的边际利润, 其投入的减排努力和宣传努力均会增多, 并且制造商也将提高支付比例以激励零售商更多的低碳宣传努力投入; 当制造商边际利润高于  $a/(3b)$  时, 零售商的边际利润较低, 即使制造商愿意承担零售商较高的宣传努力成本, 也无法激励零售商投入更高的宣传努力.

**推论2** 1) 制造商减排努力水平是滞后时间的增函数, 而零售商宣传努力水平与滞后时间无关. 2) 制造商最优利润函数是滞后时间的减函数, 当滞后时间低于  $\frac{\ln 2}{\delta}$  时, 制造商减排努力投入促进自身利润的提升, 反之不起促进作用, 而零售商最优利润函数是滞后时间的增函数. 3) 当  $\lambda + \delta > 1/d$  时, 贴现率  $\lambda$  的增加或衰减率  $\delta$  的减小, 使得制造商减排努力投入随之降低; 当  $\lambda + \delta < 1/d$  时, 贴现率  $\lambda$  的增加或衰减率  $\delta$  的增加, 使得制造商减排努力投入随之降低.

推论2表明: 当滞后时间较短时, 制造商减排努力水平的提高能促进自身经济绩效和环境绩效的提升, 这一结果与以往研究结果相似<sup>[15]</sup>; 而滞后时间较长时, 较高减排努力水平的投入不会提高自身经济绩效, 还有可能造成投资浪费. 滞后时间越长, 制造商的减排努力成本越高, 而获得的利润越低, 但制造商的减排努力投入能在一定程度上拉动低碳产品需求, 使得零售商的利润增加.

**推论3** 1) 当  $d < \frac{1}{\delta} \ln \frac{\tau_0}{\Omega_1}$  时, 单位产品的减排量随时间变化呈递减趋势, 但其值总是高于  $\Omega_1 e^{\delta d}$ ; 然而, 当  $d > \frac{1}{\delta} \ln \frac{\tau_0}{\Omega_1}$  时, 单位产品的减排量随时间变化呈递增趋势, 但其值总是低于  $\Omega_1 e^{\delta d}$ , 其中,  $\Omega_1 = \frac{\alpha\gamma^2\omega(a-b\omega)}{2\delta(\lambda+\delta)k_M}$ . 2) 当低碳产品批发价格  $\omega \in (0, \frac{a}{2b})$  时, 产品批发价格正向影响单位产品减排量的稳定值; 当低碳产品批发价格  $\omega \in (\frac{a}{2b}, \frac{a}{b})$  时, 产品批发价格负向影响单位产品减排量的稳定值.

推论3说明,当制造商减排效果的滞后时间相对较短(长)时,尽管单位产品拥有较高(低)的初始减排量,其值也会随时间的变化逐渐降低(升高)。此外,当低碳产品批发价格为  $\frac{a}{2b}$  时,单位产品减排量的稳定值达到最大值,低碳产品批发价格的临界点与推论1一样,这是因为单位产品的减排量受到制造商减排努力水平的影响。

### 3 集中式决策

当制造商和零售商建立了稳定的合作机制,结成战略合作伙伴关系时,双方会以整个供应链利润最大化为目标进行决策(用上标C表示集中式决策),此时,供应链的决策变量只有  $E_M(t)$ 、 $E_R(t)$  和  $p(t)$ 。类似于定理1,可给出如下定理。

**定理2** 集中式决策下,制造商和零售商的微分博弈均衡策略分别为

$$\begin{aligned} E_M^C(t) &= \frac{\alpha\gamma a^2}{4bk_M(\lambda + \delta)} e^{\delta t}, \\ E_R^C(t) &= \frac{\beta a^2}{4bk_R}, \\ p^C(t) &= \frac{a}{2b}. \end{aligned}$$

单位产品减排量的最优轨迹为

$$\tau^C(t) = e^{-\delta t} \tau_0 + \frac{\alpha\gamma^2 a^2}{4b\delta(\lambda + \delta)k_M} e^{\delta t} (1 - e^{-\delta t}),$$

整个供应链的最优利润为

$$\begin{aligned} J_{MR}^C &= \frac{\alpha a^2 \tau_0}{4b(\lambda + \delta)} + \frac{\beta^2 a^4}{32b^2 \lambda k_R} + \\ &\quad \frac{\alpha^2 \gamma^2 a^4}{32b^2 k_M \lambda (\lambda + \delta)^2} (2e^{\delta d} - e^{2\delta d}). \end{aligned} \quad (11)$$

**推论4** 当  $d < \frac{1}{\delta} \ln \frac{\tau_0}{\Omega_2}$  时,单位产品的减排量随时间变化呈递减趋势,但其值总是高于  $\Omega_2 e^{\delta d}$ ; 当  $d > \frac{1}{\delta} \ln \frac{\tau_0}{\Omega_2}$  时,单位产品的减排量随时间变化呈递增趋势,但其值总是低于  $\Omega_2 e^{\delta d}$ ,其中  $\Omega_2 = \frac{\alpha\gamma^2 a^2}{4b\delta(\lambda + \delta)k_M}$ 。

可以看出,集中式决策下,滞后时间、贴现率及衰减率的影响与分散式决策类似。

比较定理1和定理2,可以给出如下结果。

**定理3** 制造商的最优减排努力水平、零售商的最优宣传努力水平、单位产品减排量满足  $E_M^D(t) < E_M^C(t)$ ,  $E_R^D(t) < E_R^C(t)$  和  $\tau^D(t) < \tau^C(t)$ , 而零售价格满足  $p^D(t) > p^C(t)$ 。

定理3说明,集中式决策激励制造商减排努力水平和零售商宣传努力水平的投入,进而提升单位产品减排量。由于以整个供应链为决策对象会增加边际收益,导致供应链成员的减排努力水平和宣传努力水平增加。对于整个供应链利润的比较有如下结果。

**定理4** 滞后时间  $d$  存在一个阈值,当  $d \leq$

$\frac{\ln(\varepsilon_3 + K)}{\delta}$  时,集中式决策下整个供应链的利润不低于分散式决策下整个供应链的利润,反之分散式决策下整个供应链利润偏高。其中

$$\begin{aligned} K &= \sqrt{\frac{\alpha b^2 \omega^2 \tau_0}{4\varepsilon_2(\lambda + \delta)} + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} + \varepsilon_3^2}, \\ \varepsilon_1 &= \frac{\beta^2 [4a^4 - (a - b\omega)^2 (a + 3b\omega)(3a + b\omega)]}{128b^2 k_R \lambda (\lambda + \delta)^2}, \\ \varepsilon_2 &= \frac{\alpha^2 \gamma^2 [a^4 - 4b^2 \omega^2 (a - b\omega)^2]}{32b^2 k_M \lambda (\lambda + \delta)^2}, \\ \varepsilon_3 &= 1 - \frac{2b\omega(a - b\omega)^3}{a^4 - 4b^2 \omega^2 (a - b\omega)^2}. \end{aligned}$$

**证明** 由式(9)~(11)可知

$$\begin{aligned} J_{MR}^C - J_M^D - J_R^D &= \\ &\quad \frac{\alpha b^2 \omega^2 \tau_0}{4(\lambda + \delta)} + \varepsilon_1 - \varepsilon_2 (e^{2\delta d} - 2\varepsilon_3 e^{\delta d}), \end{aligned}$$

于是  $J_{MR}^C \geq J_M^D + J_R^D$  当且仅当

$$e^{\delta d} \leq \varepsilon_3 + K. \quad (12)$$

当  $a \geq b\omega$  时,有  $\varepsilon_1 > 0$ ,  $\varepsilon_2 > 0$  及  $\varepsilon_3 > \frac{1}{2}$ , 则  $K > \varepsilon_3$ , 所以  $\varepsilon_3 + K > 2\varepsilon_3 > 1$ 。因此,不等式(12)对滞后时间  $d$  的解存在,并且

$$d \leq \frac{\ln(\varepsilon_3 + K)}{\delta}.$$

于是:当  $d \leq \frac{\ln(\varepsilon_3 + K)}{\delta}$  时,  $J_{MR}^C \geq J_M^D + J_R^D$ ; 当  $d > \frac{\ln(\varepsilon_3 + K)}{\delta}$  时,  $J_{MR}^C < J_M^D + J_R^D$ 。□

定理4的结果与徐春秋等<sup>[12]</sup>、游达明等<sup>[15]</sup>得出的结论不同,这是由于滞后时间影响供应链成员决策机制的选择。滞后时间存在一个阈值,只有当滞后时间低于阈值时,集中式决策下整个供应链的利润才高于分散式决策,此时,供应链成员合作得出集中化的决策才是有意义的。当滞后时间高于阈值时,即使集中式决策下供应链可实现较高的减排努力水平和宣传努力水平,但是作为理性人,供应链成员仍不会选择集中式决策,而倾向于减排努力水平和宣传努力水平都较低且利润较高的分散式决策。

### 4 数值分析

本节从单位产品减排量随时间的变化、滞后时间对整个供应链利润和均衡策略的影响以及均衡策略对于关键参数的敏感性3个方面进行数值分析以验证上述理论结果。假设模型中贴现率  $\lambda = 0.3$ , 衰减率  $\delta = 0.2$ , 低碳产品批发价格  $\omega = 4$ , 单位产品减排量初始值  $\tau_0 = 30$ , 市场潜在需求  $a = 5$ , 减排努力成本系数  $k_M = 1$ , 宣传努力成本系数  $k_R = 1$ , 影响因子  $\gamma = 0.8$ ,  $b = 1$ ,  $\alpha = 0.4$ ,  $\beta = 0.6$ 。

首先,根据系统参数,绘制两种决策下单位产品减排量的最优轨迹(取 $d = 2, t \in [0, 20]$ ,见图1);然后,鉴于滞后时间对整个供应链利润和微分博弈均衡策略的影响,保持其他参数不变,令滞后时间在区间 $[0, 7]$ 内变化,绘制两种决策下整个供应链利润及制造商和零售商的微分博弈均衡策略随滞后时间的变化情况(见图2、图3);最后,依次变动贴现率或衰减率,进行敏感性分析(取 $d = 2$ ,见表1、表2)。

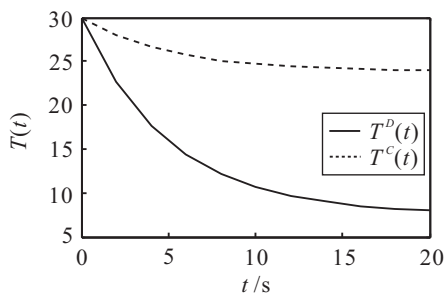


图1 单位产品减排量的最优轨迹

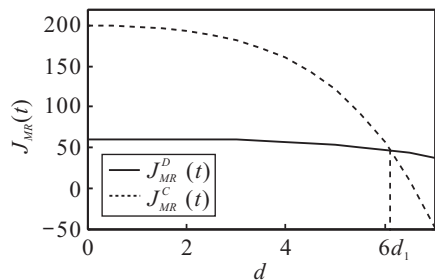


图2 滞后时间对整个供应链利润的影响

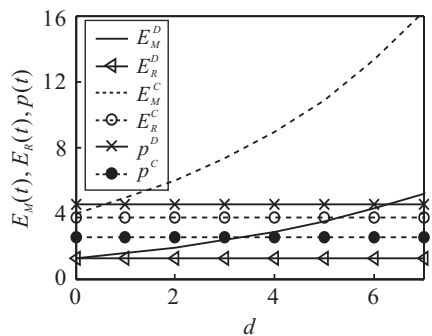


图3 滞后时间对微分博弈均衡策略的影响

由图1可知,分散式决策下各个时刻单位产品减排量及其稳定值均低于集中式决策下的相应值.这说明集中式决策较分散式决策更有利于单位产品节能减排。

由图2可知:若 $d \in [0, 6.1208]$ ,则集中式决策下整个供应链的利润较高;若 $d \in (6.1208, \infty)$ ,则分散式决策下整个供应链的利润较高,图2中 $d_1 = 6.1208$ .由此说明,当减排滞后时间较短或不发生滞后效应时,集中式决策下高水平的减排努力投入和宣传努力投入会给供应链系统带来更高的利润,此时供应链成员选择集中式决策,这与以往文献的结论一致;而当滞后时间较长时,制造商和零售商进行集中

表1 贴现率对微分博弈均衡策略的影响

$\lambda$	$E_M^D$	$E_M^C$	$E_R^D$	$E_R^C$	$p^D$	$p^C$
0.150	2.7279	8.5247	1.275	3.75	4.5	2.5
0.225	2.2465	7.0204	1.275	3.75	4.5	2.5
0.300	1.9095	5.9673	1.275	3.75	4.5	2.5
0.375	1.6605	5.1890	1.275	3.75	4.5	2.5
0.450	1.4689	4.5902	1.275	3.75	4.5	2.5

表2 衰减率对微分博弈均衡策略的影响

$\delta$	$E_M^D$	$E_M^C$	$E_R^D$	$E_R^C$	$p^D$	$p^C$
0.100	1.9542	6.1070	1.275	3.75	4.5	2.5
0.150	1.9198	5.9994	1.275	3.75	4.5	2.5
0.200	1.9095	5.9673	1.275	3.75	4.5	2.5
0.250	1.9185	5.9954	1.275	3.75	4.5	2.5
0.300	1.9436	6.0737	1.275	3.75	4.5	2.5

式决策虽然会促进低碳减排努力投入和低碳宣传努力投入,但不会给整个供应链带来更高的利润,此时供应链成员倾向于分散式决策。

由图3可知,集中式决策下制造商的低碳减排努力投入和零售商的低碳宣传努力投入均高于分散式决策,低碳产品的零售价格却低于分散式决策.两种决策下制造商减排效果滞后时间越长,制造商投入的减排努力就越高,说明在一定范围内,滞后时间能激励制造商投入较高的减排努力,而零售商的低碳宣传努力投入和低碳产品的零售价格为常值,不受滞后时间影响。

由表1和表2不难得到以下观测结果:

1) 贴现率负向影响制造商的低碳减排努力投入,但不影响零售商的低碳宣传努力投入以及产品零售价格.这一结论与游达明等<sup>[15]</sup>的研究结果相同.贴现率的提高使得经济运转速度减慢,经济规模缩小,进而制造商降低减排努力投入。

2) 当 $\lambda + \delta < 0.5(1/d)$ 时,衰减率 $\delta$ 负向影响制造商的低碳减排努力投入,但不影响零售商的低碳宣传努力投入以及产品零售价格,这一结论与游达明等<sup>[15]</sup>的研究结果相同.由此说明,当贴现率和衰减率均较低时,即使单位产品减排量降低,制造商仍可以减少低碳减排努力投入.然而,当 $\lambda + \delta > 0.5$ 时,衰减率 $\delta$ 正向影响制造商的低碳减排努力投入,但仍不影响零售商的低碳宣传努力投入以及产品零售价格,这一结论与游达明等<sup>[15]</sup>的研究结果不同.这是因为,在社会贴现率固定情况下,较高的衰减率说明减排设备的运行、操作和维护存在问题或减排设备严重老化,导致单位产品碳排放量升高(减排量降低),进而制造商需要投入较高的低碳减排努力。

## 5 结论

本文在改进徐春秋等<sup>[12]</sup>研究模型基础上,考虑了减排效果滞后效应对单位产品减排量变化率的影响,并利用微分对策理论在动态结构下研究供应链定价和合作减排策略问题. 研究表明,滞后时间不仅影响供应链成员最优决策的制定,而且影响供应链成员决策机制的选择. 由于本文未考虑链上供应商减排行为对单位产品减排量的影响,研究结果仅适用于自产自销企业. 在未来研究中可在一对多或三层供应链框架下研究滞后效应对供应链决策的影响;另外,还可以考虑滞后效应影响下供应链的协调问题.

### 参考文献(References)

- [1] Carrillo-Hermosilla J, del Rio Gonzalez P, Konnola T. Eco-innovation: When sustainability and competitiveness shake hands[M]. Shanghai: Shanghai Century Publishing Group, 2014: 1-10.
- [2] 杜向荣, 孔令雪. 浅谈零售企业的低碳营销之路[J]. 现代商业, 2011(8): 6-8.  
(Du X R, Kong L X. Low-carbon marketing pathway of retail industry[J]. Modern Business, 2011(8): 6-8.)
- [3] Benjaafar S, Li Y, Daskin M. Carbon footprint and the management of supply chains: Insights from simple models[J]. IEEE Trans on Automation Science and Engineering, 2013, 10(1): 99-116.
- [4] 杜少甫, 董骏峰, 梁樑, 等. 考虑排放许可与交易的生产优化[J]. 中国管理科学, 2009, 17(3): 81-86.  
(Du S F, Dong J F, Liang L, et al. Optional production policy with emission permits and trading[J]. Chinese J of Management Science, 2009, 17(3): 81-86.)
- [5] 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(C): 61-67.
- [6] Hua G, Cheng T C E, Wang S. Managing carbon footprints in inventory management[J]. Int J of Production Economics, 2011, 132(2): 178-185.
- [7] Song J, Leng M. Analysis of the single-period problem under carbon emissions policies[M]. New York: Springer, 2012: 297-313.
- [8] Yang L, Zheng C S, Xu M H. Comparisons of low carbon policies in supply chain coordination[J]. J of Systems Science and Systems Engineering, 2014, 23(3): 342-361.
- [9] 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.)
- [10] 王芹鹏, 赵道致. 两级供应链减排与促销的合作策略[J]. 控制与决策, 2014, 29(2): 307-314.  
(Wang Q P, Zhao D Z. Cooperative strategy of carbon emissions reduction and promotion in a two-echelon supply chain[J]. Control and Decision, 2014, 29(2): 307-314.)
- [11] 赵道致, 徐春秋, 王芹鹏. 考虑零售商竞争的联合减排与低碳宣传微分对策[J]. 控制与决策, 2014, 29(10): 1809-1815.  
(Zhao D Z, Xu C Q, Wang Q P. Differential strategies of joint emission reductions and low-carbon promotion considering competing retailers[J]. Control and Decision, 2014, 29(10): 1809-1815.)
- [12] 徐春秋, 赵道致, 原白云, 等. 上下游联合减排与低碳宣传的微分博弈模型[J]. 管理科学学报, 2016, 19(2): 53-65.  
(Xu C Q, Zhao D Z, Yuan B Y, et al. Differential game model on joint carbon emission reduction and low-carbon promotion in supply chains[J]. J of Management Sciences in China, 2016, 19(2): 53-65.)
- [13] 黄守军, 陈其安, 任玉珑. 低碳技术组合应用下纵向合作减排的随机微分对策模型[J]. 中国管理科学, 2015, 23(12): 94-104.  
(Huang S J, Chen Q A, Ren Y L. Stochastic differential game models for vertical cooperative mitigation in electricity market with combined application of low-carbon technologies[J]. Chinese J of Management Science, 2015, 23(12): 94-104.)
- [14] 王素凤, 杨善林, 彭张林. 面向多重不确定性的发电商碳减排投资研究[J]. 管理科学学报, 2016, 19(2): 31-41.  
(Wang S F, Yang S L, Peng Z L. Research on the power producer's carbon abatement investment in view of multiple uncertainties[J]. J of Management Sciences in China, 2016, 19(2): 31-41.)
- [15] 游达明, 朱桂菊. 低碳供应链生态研发、合作促销与定价的微分博弈分析[J]. 控制与决策, 2016, 31(6): 1047-1056.  
(You D M, Zhu G J. Differential game analysis of ecological R & D, cooperative promotion and pricing in the low-carbon supply chain[J]. Control and Decision, 2016, 31(6): 1047-1056.)
- [16] 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.)
- [17] El Ouardighi F, Kogan K. Dynamic conformance and design quality in a supply chain: An assessment of contracts' coordinating power[J]. Annals of Operations Research, 2013, 211(1): 137-166.
- [18] Basin M, Gonzalez J R. Optimal control for linear systems with multiple time delays in control input[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2006, 51(1): 91-97.

(责任编辑: 李君玲)