

考虑零售商竞争的联合减排与低碳宣传微分对策

赵道致, 徐春秋, 王芹鹏

(天津大学 管理与经济学部, 天津 300072)

摘要: 借助微分博弈研究由单个制造商与两个零售商组成的供应链系统中长期联合减排和低碳宣传的问题. 在消费者需求受产品减排量和零售商低碳宣传努力影响的情况下, 构建了3种微分博弈模型. 研究发现, 在一定条件下, 成本分担契约可以实现制造商和零售商利润的 Pareto 改善, 而且处于稳定状态时, 随着竞争强度的增加, 制造商和整个供应链系统的利润逐渐上升, 零售商的利润逐渐下降. 最后, 通过算例对模型进行了分析.

关键词: 低碳; 供应链; 合作减排; 微分博弈; Stackelberg 博弈

中图分类号: F272

文献标志码: A

Differential strategies of joint emission reductions and low-carbon promotion considering competing retailers

ZHAO Dao-zhi, XU Chun-qiu, WANG Qin-peng

(College of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China. Correspondent: XU Chun-qiu, E-mail: xuchunqiu112@163.com)

Abstract: With the aid of differential game, the long-term joint emission reductions and low-carbon promotion problems of the supply chain system consisted of a single manufacturer and two retailers are studied. In the case that the consumer demand is affected by emission reductions of products and the retailers' low-carbon promotion, three differential game models are constructed. It is found that the cost-sharing contract can achieve Pareto improvement of manufacturers' and retailers' profits under certain conditions. With the increase of competition, the profits of the manufacturer and supply chain system increase while the retailers' profits decrease. Finally, the model is analyzed through an example.

Key words: low-carbon; supply chain; cooperative on carbon emission reductions; differential game; Stackelberg game

0 引言

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)^[1]指出: 人类活动产生的温室气体排放是全球气候变暖以及极端气候出现频繁的主要原因. 在巨大的气候变化压力下, 各国政府相继出台了相关的碳减排计划, 如我国政府在哥本哈根会议上明确承诺: 到2020年中国单位GDP二氧化碳排放将比2005年下降40%~50%.

在降低碳排放方面, 供应链上下游联合减排与低碳宣传起着重要的作用. 生产环节的节能减排使消费者购买低碳产品成为可能, 销售环节的低碳宣传有利于引导消费者购买低碳产品, 只有两者紧密合作才能高效地将低碳产品传递到消费者手中. 例如, 青岛啤酒的“低碳运营模式”不仅涉及青岛啤酒内部的技术

研发、产品设计等, 还将联合前端供应商和后端销售商等全产业链一起进行低碳经济发展模式的探索, 打造全产业链、低碳运营模式.

零售商通过向消费者讲解、推荐、设立低碳产品专柜等方式宣传低碳产品, 可以有效引导消费者的低碳消费理念, 激励非环保型的消费者向环保型的消费者转变. 另外, 制造商生产的产品往往通过多个零售商进行销售, 销售相同产品的零售商之间必然存在竞争. 例如, 家电零售商之间往往通过价格和非价格竞争的形式争夺消费者, 2013年掀起的电商大战等. 因此, 在考虑零售商竞争的情况下, 研究供应链的运营管理问题具有重要的现实意义.

在低碳经济的背景下已有一些学者将碳排放问题引入企业的运营管理决策中, 如: 杜少甫等^[2]研究

收稿日期: 2013-07-20; 修回日期: 2013-11-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71072155, 71202086).

作者简介: 赵道致(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 从事物流与供应链管理、运营管理、工业工程研究; 徐春秋(1983—), 女, 博士生, 从事物流与供应链管理、运营管理的研究.

了确定需求下考虑企业依赖碳排放权交易机制的企业生产优化模型; Zhang 等^[3]基于随机需求也进行了相关的研究, 通过报童模型建立了企业依赖碳排放权交易机制的生产与存储优化决策模型; Hua 等^[4]则侧重在碳排放权交易机制下研究企业的最优订货批量问题. 这些文献都对考虑碳排放约束在微观层面的应用做出了重要贡献, 但没有从供应链角度考虑上下游之间的合作关系.

目前, 将碳排放因素纳入到供应链运营研究中也已经取得了一些进展. Benjaafar 等^[5]研究了供应链中企业合作对成本和碳排放降低的影响. 在此基础上, Chen 等^[6]利用经济订货批量 (EOQ) 模型进行数值分析, 研究了何种情况下可以通过修订订货批量降低碳排放, 何种情况下碳排放量的相对减少量高于成本的相对增加, 并研究了排放量减少和成本增加的影响因素. Du 等^[7]在考虑存在碳排放权交易的情况下, 提出了一种新型供应链, 基于报童模型分析了排放依赖型供应链双方的博弈过程.

另外, 消费者低碳行为对企业的影响也引起了国内外学者的广泛关注. Liu 等^[8]指出, 环保型厂商采取一些营销手段, 激励非环保消费者转变成环保消费者, 能增加产品的市场需求. Li 等^[9]指出, 消费者逐渐更加关注企业在环境保护方面的表现, 越来越多的消费者在考虑购买决策时注重企业的环境记录. Wei 等^[10]研究了消费者具体的低碳消费方式, 并分析了低碳消费行为的影响因素. 朱庆华等^[11]从消费者环境偏好存在差异的角度, 分析了政府的最优补贴政策 and 生产商的最优绿色度水平, 为政府和生产商的决策提供了理论指导. 陈剑^[12]指出, 消费者偏好行为等必将对企业的生产方式、运营策略, 以及企业间的竞争与合作策略等方面产生巨大影响, 为企业的经营提出了许多新课题.

从文献回顾可以看出: 碳排放问题已引起了国内外学者的普遍关注, 尤其是将碳排放约束引入到企业和供应链的运营问题中, 已取得了一些研究成果. 但是, 目前很少有文章从供应链长期运营的角度研究供应链低碳化的问题. 因此, 本文选择实际中经常出现的一种现象 (上游制造商进行节能减排, 下游零售商进行低碳宣传) 进行研究, 分析上下游之间的长期合作问题. 其创新性主要体现在: 从动态角度结合低碳经济时代供应链的新特征, 研究存在零售商竞争条件下的上下游联合减排与低碳宣传问题, 分析成本分担契约在协调供应链绩效上的条件和效果, 有利于企业根据实际情况进行合作契约的选择与制定.

1 问题描述及符号说明

1.1 问题描述

本文研究由单个制造商与两个零售商组成的供应链系统, 制造商生产的低碳产品通过两个竞争性的零售商进行销售. 制造商为了鼓励零售商对产品进行低碳宣传, 愿意为零售商承担部分低碳宣传成本. 在该问题中, 制造商首先选择自身的减排努力水平和为两零售商承担的低碳宣传成本比例, 然后两零售商根据制造商的决策同时制定低碳宣传努力的决策. 这一问题属于有同时选择的动态博弈的范畴.

1.2 符号说明

令 $E_M(t)$ 表示 t 时刻制造商的减排努力程度, 是制造商的决策变量; $E_i(t)$ 表示 t 时刻零售商 i 的低碳宣传努力程度, 是零售商 i 的决策变量; $\tau(t)$ 表示制造商的单位产品减排量; $X_i(t)$ 表示制造商为零售商 i 承担的低碳宣传成本比例, 是制造商的决策变量; π_M 和 π_i 分别表示制造商和零售商 i 的边际利润.

1.3 基本假设

1) 考虑到减排努力成本和质量控制努力成本具有相同的凸性特征, 本文借鉴文献 [13] 对质量控制努力成本的假设, 设

$$C_M(E_M(t)) = \frac{\eta_M}{2} E_M^2(t),$$

其中 $\eta_M > 0$, 表示制造商的减排努力成本系数.

2) 借鉴文献 [14] 对销售努力成本的假设, 假设零售商 i 的低碳宣传努力成本是关于其低碳宣传努力程度的凸函数, t 时刻零售商 i 的低碳宣传努力成本为

$$C_i(E_i(t)) = \frac{\eta_i}{2} E_i^2(t), \quad i = 1, 2,$$

其中 $\eta_i > 0$, 表示零售商 i 的低碳宣传努力成本系数.

3) 为激励零售商进行低碳宣传, 制造商对零售商的低碳宣传给予补偿以减少零售商的投资成本, 补偿比例为 $X_i(t)$, 且 $X_i(t) < 1$.

4) 制造商的减排努力带来设备更新、生产流程改进等, 使用该设备和生产流程生产出的每批次 (每个) 产品排放量都会有所降低. 因此产品的减排量由制造商的减排努力程度来决定, 且随着时间的推移, 已投资的设备会老化等原因, 产品减排量存在一个自然衰减状况. 用下式表示产品减排量的变化过程:

$$\dot{\tau}(t) = \lambda E_M(t) - \delta \tau(t). \quad (1)$$

其中: $\tau(t)$ 为 t 时刻单位产品的减排量, 且初始产品减排量 $\tau(0) = \tau_0 \geq 0$; $\lambda > 0$ 为制造商减排努力对减排量的影响程度; $\delta > 0$ 为减排量的衰减系数.

5) 两零售商销售同一制造商的产品, 在销售过程中构成相互竞争关系, 两者之间的竞争关系可通过如

下形式的需求函数表示:

$$Q_i(t) = \alpha_i + \beta_1 E_i(t) + \beta_2 (E_i(t) - E_j(t)) + \theta_i \tau(t),$$

$$i, j = 1, 2, i \neq j. \quad (2)$$

其中: $\alpha_i > 0$, 为不进行减排和低碳宣传时零售商 i 的潜在销售量; $\beta_1, \theta_i > 0$, 分别为零售商的低碳宣传努力程度和单位产品减排量对需求的影响; β_2 为两零售商低碳宣传的竞争系数. 为便于计算, 文中令 $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2, \beta = \beta_1 + \beta_2, \theta = \theta_1 + \theta_2$.

6) 设制造商和零售商具有相同的贴现率 $\rho > 0$, 目标均是在无限区间内寻求自身利润最大化. 假设模型中的参数都是与时间无关的常数(为书写方便, 下文不再列出时间 t).

2 联合减排与低碳宣传模型分析

基于以上对问题的描述和假设, 本节进一步分析成本分担契约能否使制造商和零售商的最优利润达到 Pareto 改善以及改善的程度, 并与集中决策时的情况进行对比, 考查其能否达到集中决策时的最优水平, 以便于为企业实际决策提供参考依据.

2.1 无成本分担的分散式决策

分析无成本分担的分散式决策有助于契约设计时满足制造商和两零售商的参与约束, 同时为契约协调的效果提供参考基础. 如果集中决策时的最优水平是契约协调的上限, 则无成本分担的分散式决策时的最优水平将是契约协调时各方利润的下限. 制造商和两零售商独自决策以最大化各自的利润(用上标 N 表示无成本分担的分散式决策).

制造商和两零售商的决策问题分别为

$$\max_{E_M} J_M^N = \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[\pi_M \sum_{i=1}^2 Q_i - C_M(E_M) \right] dt, \quad (3)$$

$$\max_{E_i} J_i^N = \int_0^\infty e^{-\rho t} [\pi_i Q_i - C_i(E_i)] dt. \quad (4)$$

定理 1 供应链上下游微分博弈的均衡结果如下:

1) 制造商单位产品减排量的最优轨迹为

$$\tau^{N*}(t) = \left(\tau_0 + \frac{B^N}{A^N} e^{A^N t} \right) - \frac{B^N}{A^N}. \quad (5)$$

2) 制造商和两零售商微分博弈的均衡策略为 (E_M^{N*}, E_i^{N*}) .

3) 制造商和两零售商的利润最优值函数分别为

$$J_M^{N*}(\tau, t) = e^{-\rho t} (a_1^{N*} \tau + b_1^{N*}), \quad (6)$$

$$J_i^{N*}(\tau, t) = e^{-\rho t} (a_{2i}^{N*} \tau + b_{2i}^{N*}). \quad (7)$$

其中

$$A^N = -\delta, \quad B^N = \frac{\lambda^2 \pi_M \theta}{\eta_M (\rho + \delta)};$$

$$E_M^{N*} = \frac{\lambda \pi_M \theta}{\eta_M (\rho + \delta)}, \quad E_i^{N*} = \frac{\pi_i \beta}{\eta_i};$$

$a_1^{N*}, b_1^{N*}, a_{2i}^{N*}, b_{2i}^{N*}$ 满足如下约束方程组:

$$\begin{cases} \rho a_1^N = \pi_M \theta - \delta a_1^N, \\ \rho b_1^N = \frac{\lambda^2 a_1^{N2}}{2\eta_M} + \pi_M \alpha + \sum_{i=1}^2 \frac{\pi_M \beta_1 \pi_i \beta}{\eta_i}, \\ \rho a_{2i}^N = \pi_i \theta_i - \delta a_{2i}^N, \\ \rho b_{2i}^N = \frac{\lambda^2 a_1^N a_{2i}^N}{\eta_M} + \frac{\pi_i^2 \beta^2}{2\eta_i} - \frac{\pi_i \beta_2 \pi_j \beta}{\eta_j} + \pi_i \alpha_i. \end{cases} \quad (8)$$

证明 采用逆向归纳法, 首先求解两零售商的最优控制问题. 根据式(4), 记 t 时刻零售商 i 的最优利润值函数为

$$J_i^{N*}(\tau, t) = e^{-\rho t} V_i^N(\tau), \quad (9)$$

其中

$$V_i^N(\tau) = \max_{E_i} \int_t^\infty e^{-\rho(s-t)} [\pi_i Q_i - C_i(E_i)] ds,$$

满足如下 HJB 方程:

$$\rho V_i^N(\tau) = \max_{E_i} [\pi_i Q_i - C_i(E_i) + V_i^{N'}(\tau) \dot{\tau}]. \quad (10)$$

使式(10)最大化的一阶条件为 $E_i = \pi_i \beta / \eta_i$.

t 时刻制造商的最优利润值函数为

$$J_M^{N*}(\tau, t) = e^{-\rho t} V_M^N(\tau), \quad (11)$$

其中

$$V_M^N(\tau) =$$

$$\max_{E_M} \int_t^\infty e^{-\rho(s-t)} \left[\pi_M \sum_{i=1}^2 Q_i - C_M(E_M) \right] ds,$$

满足如下 HJB 方程:

$$\rho V_M^N(\tau) =$$

$$\max_{E_M} \left[\pi_M \sum_{i=1}^2 Q_i - C_M(E_M) + V_M^{N'}(\tau) \dot{\tau} \right]. \quad (12)$$

使式(12)最大化的一阶条件为 $E_M = \lambda V_M^{N'}(\tau) / \eta_M$.

将 E_M, E_i 代入式(12)和(10), 整理可得

$$\rho V_M^N(\tau) = [\pi_M \theta - \delta V_M^{N'}(\tau)] \tau + \frac{\lambda^2 [V_M^{N'}(\tau)]^2}{2\eta_M} + \pi_M \alpha + \sum_{i=1}^2 \frac{\pi_M \beta_1 \pi_i \beta}{\eta_i}, \quad (13)$$

$$\rho V_i^N(\tau) = [\pi_i \theta_i - \delta V_i^{N'}(\tau)] \tau + \frac{\lambda^2 V_M^{N'}(\tau) V_i^{N'}(\tau)}{\eta_M} + \frac{\pi_i^2 \beta^2}{2\eta_i} - \frac{\pi_i \beta_2 \pi_j \beta}{\eta_j} + \pi_i \alpha_i. \quad (14)$$

根据式(13)和(14)微分方程的特点, 推测 τ 的线性最优值函数是 HJB 方程的解.

设函数 $V_M^N(\tau)$ 和 $V_i^N(\tau)$ 的具体表达式为

$$V_M^N(\tau) = a_1^N(\tau) + b_1^N, \quad V_i^N(\tau) = a_{2i}^N(\tau) + b_{2i}^N. \quad (15)$$

其中 $a_1^N, b_1^N, a_{2i}^N, b_{2i}^N$ 均为未知常数. 将式(15)及其一阶导数代入(13)和(14), 整理并对比其左右两边的同类项系数, 可得约束方程组(8). 求解该方程组可得

$a_1^{N*}, b_1^{N*}, a_{2i}^{N*}, b_{2i}^{N*}$, 将其代入式 (15), 可得

$$V_M^N(\tau) = a_1^{N*}(\tau) + b_1^{N*}, V_i^N(\tau) = a_{2i}^{N*}(\tau) + b_{2i}^{N*}. \quad (16)$$

将式 (16) 及其一阶导数分别代入 (E_M, E_i) , 可得制造商和两零售商的均衡解为

$$E_M^{N*} = \frac{\lambda\pi_M\theta}{\eta_M(\rho + \delta)}, E_i^{N*} = \frac{\pi_i\beta}{\eta_i}. \quad (17)$$

将式 (17) 代入状态方程 (1), 根据状态方程的边界条件 $\tau(0) = \tau_0 \geq 0$, 可求得产品减排量的轨迹如式 (5). 将式 (16) 分别代入 (11) 和 (9), 可得制造商和两零售商各自的利润最优值函数分别为式 (6) 和 (7). \square

由定理 1 可得如下性质.

性质 1 决策变量与参数的关系如下:

- 1) E_i 与 π_i, β_1, β_2 正相关, 与 η_i 负相关;
- 2) E_M 与 π_M, λ, θ 正相关, 与 η_M 负相关.

2.2 成本分担契约下的分散式决策

为激励两零售商进行低碳宣传, 制造商给两零售商分别提供一定比例的补贴. 下面进一步分析成本分担契约对均衡解及供应链绩效的影响. 制造商和两零售商各自决策以最大化各自的利润(用上标 Y 表示无成本分担的分散式决策).

制造商和两零售商的决策问题分别为

$$\max_{E_M, X_i} J_M^Y = \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[\pi_M \sum_{i=1}^2 Q_i - C_M(E_M) - \sum_{i=1}^2 X_i C_i(E_i) \right] dt, \quad (18)$$

$$\max_{E_i} J_i^N = \int_0^\infty e^{-\rho t} [\pi_i Q_i - (1 - X_i) C_i(E_i)] dt. \quad (19)$$

定理 2 供应链上下游微分博弈的均衡结果如下:

- 1) 制造商单位产品减排量的最优轨迹为

$$\tau^{Y*}(t) = \left(\tau_0 + \frac{B^Y}{A^Y} e^{A^Y t} \right) - \frac{B^Y}{A^Y}. \quad (20)$$

- 2) 制造商和两零售商微分博弈的均衡策略为 $((E_M^{Y*}, X_i^*), E_i^{Y*})$.

- 3) 制造商和两零售商的利润最优值函数分别为

$$J_M^{Y*}(\tau, t) = e^{-\rho t} (a_1^{Y*} \tau + b_1^{Y*}), \quad (21)$$

$$J_i^{Y*}(\tau, t) = e^{-\rho t} (a_{2i}^{Y*} \tau + b_{2i}^{Y*}). \quad (22)$$

其中

$$\begin{aligned} A^Y &= -\delta, B^Y = \frac{\lambda^2 \pi_M \theta}{\eta_M(\rho + \delta)}; \\ E_M^{Y*} &= \frac{\lambda \pi_M \theta}{\eta_M(\rho + \delta)}, E_i^{Y*} = \frac{2\pi_M \beta_1 + \pi_i \beta}{2\eta_i}; \\ X_i^* &= \frac{2\pi_M \beta_1 - \pi_i \beta}{2\pi_M \beta_1 + \pi_i \beta}; \end{aligned}$$

$a_1^{Y*}, b_1^{Y*}, a_{2i}^{Y*}, b_{2i}^{Y*}$ 满足如下约束方程组:

$$\begin{cases} \rho a_1^Y = \pi_M \theta - \delta a_1^Y, \\ \rho b_1^Y = \frac{\lambda^2 a_1^{Y2}}{2\eta_M} + \pi_M \alpha + \sum_{i=1}^2 \frac{(2\pi_M \beta_1 + \pi_i \beta)^2}{8\eta_i}, \\ \rho a_{2i}^Y = \pi_i \theta_i - \delta a_{2i}^Y, \\ \rho b_{2i}^Y = \frac{\lambda^2 a_1^Y a_{2i}^Y}{\eta_M} + \frac{(2\pi_M \beta_1 + \pi_i \beta) \pi_i \beta}{4\eta_i} - \frac{(2\pi_M \beta_1 + \pi_j \beta) \pi_i \beta_2}{2\eta_j} + \pi_i \alpha_i. \end{cases} \quad (23)$$

证明 采用逆向归纳法. 首先求解零售商的决策. 根据式 (19), 记 t 时刻零售商 i 的最优利润值函数为

$$J_i^{Y*}(\tau, t) = e^{-\rho t} V_i^Y(\tau), \quad (24)$$

其中

$$V_i^Y(\tau) = \max_{E_i} \int_t^\infty e^{-\rho(s-t)} [\pi_i Q_i - (1 - X_i) C_i(E_i)] ds,$$

且满足如下 HJB 方程:

$$\rho V_i^Y(\tau) = \max_{E_i} [\pi_i Q_i - (1 - X_i) C_i(E_i) + V_i^{Y'}(\tau) \dot{\tau}]. \quad (25)$$

使式 (25) 最大化的一阶条件为 $E_i = \frac{\pi_i \beta}{\eta_i(1 - X_i)}$. t 时刻制造商的最优利润值函数为

$$J_M^{Y*}(\tau, t) = e^{-\rho t} V_M^Y(\tau), \quad (26)$$

其中

$$V_M^Y(\tau) = \max_{E_M, X_i} \int_t^\infty e^{-\rho(s-t)} \left[\pi_M \sum_{i=1}^2 Q_i - C_M(E_M) - \sum_{i=1}^2 X_i C_i(E_i) \right] ds,$$

且满足如下 HJB 方程:

$$\rho V_M^Y(\tau) = \max_{E_M, X_i} \left[\pi_M \sum_{i=1}^2 Q_i - C_M(E_M) - \sum_{i=1}^2 X_i C_i(E_i) + V_M^{Y'}(\tau) \dot{\tau} \right]. \quad (27)$$

将零售商的反应函数 E_i 代入式 (27), 由最大化的一阶条件可得

$$E_M = \frac{\lambda V_M^{Y'}(\tau)}{\eta_M}, X_i = \frac{2\pi_M \beta_1 - \pi_i \beta}{2\pi_M \beta_1 - \pi_i \beta}.$$

将 E_M, X_i, E_i 代入式 (27) 和 (25), 整理可得

$$\begin{aligned} \rho V_M^Y(\tau) &= \\ &[\pi_M \theta - \delta V_M^{Y'}(\tau)] \tau + \frac{\lambda^2 [V_M^{Y'}(\tau)]^2}{2\eta_M} + \\ &\sum_{i=1}^2 \frac{(2\pi_M \beta_1 + \pi_i \beta)^2}{8\eta_i} + \pi_M \alpha, \end{aligned} \quad (28)$$

$$\rho V_i^Y(\tau) = [\pi_i \theta_i - \delta V_i^{Y'}(\tau)]\tau + \frac{\lambda^2 V_M^{Y'}(\tau) V_i^{Y'}(\tau)}{\eta_M} + \frac{(2\pi_M \beta_1 + \pi_i \beta) \pi_i \beta}{4\eta_i} - \frac{(2\pi_M \beta_1 + \pi_j \beta) \pi_i \beta_2}{2\eta_j} + \pi_i \alpha_i. \quad (29)$$

根据式 (28) 和 (29) 微分方程的特点, 推测关于 τ 的线性最优值函数是 HJB 方程的解。

设函数 $V_M^Y(\tau)$ 和 $V_i^Y(\tau)$ 的具体表达式为

$$V_M^Y(\tau) = a_1^Y(\tau) + b_1^Y, \quad V_i^Y(\tau) = a_{2i}^Y(\tau) + b_{2i}^Y. \quad (30)$$

其中 $a_1^Y, b_1^Y, a_{2i}^Y, b_{2i}^Y$ 均为未知常数. 将式 (30) 及其一阶导数代入 (28) 和 (29), 整理并对比其左右两边的同类项系数, 可得到约束方程组 (23). 求解该方程组可得 $a_1^{Y*}, b_1^{Y*}, a_{2i}^{Y*}, b_{2i}^{Y*}$, 将其代入式 (30), 可得

$$\begin{aligned} V_M^Y(\tau) &= a_1^{Y*}(\tau) + b_1^{Y*}, \\ V_i^Y(\tau) &= a_{2i}^{Y*}(\tau) + b_{2i}^{Y*}. \end{aligned} \quad (31)$$

将式 (31) 及其一阶导数分别代入 $((E_M, X_i), E_i)$, 可得制造商和两零售商的均衡解为

$$\begin{aligned} E_M^{Y*} &= \frac{\lambda \pi_M \theta}{\eta_M(\rho + \delta)}, \quad X_i^* = \frac{2\pi_M \beta_1 - \pi_i \beta}{2\pi_M \beta_1 + \pi_i \beta}, \\ E_i^{Y*} &= \frac{2\pi_M \beta_1 + \pi_i \beta}{2\eta_i}. \end{aligned} \quad (32)$$

将式 (32) 代入状态方程 (1), 根据状态方程的边界条件 $\tau(0) = \tau_0 \geq 0$, 可求得产品减排量的轨迹如式 (20). 将式 (31) 分别代入 (26) 和 (24), 可得制造商和两零售商各自的利润最优值函数分别为式 (21) 和 (22). \square

由定理 2 可得如下性质.

性质 2 1) 制造商为零售商分担低碳宣传成本, 提高了零售商低碳宣传的积极性;

2) 由于制造商在合作中处主导地位首先进行决策, 制造商为零售商分担低碳宣传成本并不会影响自身的减排努力;

3) 制造商为零售商 i 提供的低碳宣传成本补贴比例随制造商边际收益的增加而增加, 随零售商 i 边际收益的增加而减少, 且当 $2\pi_M \beta_1 > \pi_i \beta$ 时提供补贴, 否则不但不补贴, 而且会以零售商 i 的低碳宣传成本为基础收取一定的费用.

2.3 协同控制的集中式决策

下面以集中决策时的最优决策为目标研究契约协调的效果. 假设存在以最大化供应链整体利益为目标为中心决策者, 整个供应链系统的决策问题为(用上标 c 表示无成本分担的分散式决策)

$$\max_{E_M, E_i} J_{sc}^c = \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[\pi_M \sum_{i=1}^2 Q_i - C_M(E_M) + \right.$$

$$\left. \sum_{i=1}^2 [\pi_i Q_i - C_i(E_i)] \right] dt. \quad (33)$$

定理 3 集中式决策下的均衡结果如下:

1) 单位产品减排量的最优轨迹为

$$\tau^{c*}(t) = \left(\tau_0 + \frac{B^c}{A^c} e^{A^c t} \right) - \frac{B^c}{A^c}. \quad (34)$$

2) 供应链系统最优决策的均衡策略为 (E_M^{c*}, E_i^{c*}) .

3) 供应链系统的利润最优值函数为

$$J_{sc}^{c*}(\tau, t) = e^{-\rho t} (a_3^* \tau + b_3^*). \quad (35)$$

其中

$$\begin{aligned} A^c &= -\delta, \quad B^c = \frac{\lambda^2 \left(\pi_M \theta + \sum_{i=1}^2 \pi_i \theta_i \right)}{\eta_M(\rho + \delta)}, \\ E_M^{c*} &= \frac{\lambda \left(\pi_M \theta + \sum_{i=1}^2 \pi_i \theta_i \right)}{\eta_M(\rho + \delta)}, \quad E_i^{c*} = \frac{\pi_M \beta_1 + \pi_i \beta}{\eta_i}, \end{aligned}$$

a_3^*, b_3^* 满足如下约束方程组:

$$\begin{cases} \rho a_3 = \pi_M \theta + \sum_{i=1}^2 \pi_i \theta_i - \delta a_3, \\ \rho b_3 = \\ \frac{\lambda^2 a_3^2}{2\eta_M} + \frac{(\pi_M \beta_1 + \pi_i \beta - 2\pi_j \beta_2)(\pi_M \beta_1 + \pi_i \beta)}{2\eta_i} + \\ \frac{(\pi_M \beta_1 + \pi_j \beta - 2\pi_i \beta_2)(\pi_M \beta_1 + \pi_j \beta)}{2\eta_j} + \\ \pi_M \alpha + \pi_i \alpha_i + \pi_j \alpha_j. \end{cases} \quad (36)$$

证明 根据式 (33), 记 t 时刻供应链系统的最优利润值函数为

$$J_{sc}^{c*}(\tau, t) = e^{-\rho t} V_{sc}^c(\tau). \quad (37)$$

其中

$$\begin{aligned} V_{sc}^c(\tau) &= \max_{E_M, E_i} \int_t^\infty e^{-\rho(s-t)} \left[\pi_M \sum_{i=1}^2 Q_i - \right. \\ &\quad \left. C_M(E_M) + \sum_{i=1}^2 [\pi_i Q_i - C_i(E_i)] \right] ds, \end{aligned}$$

满足 HJB 方程

$$\begin{aligned} \rho V_{sc}^c(\tau) &= \max_{E_M, E_i} \left[\pi_M \sum_{i=1}^2 Q_i - C_M(E_M) + \right. \\ &\quad \left. \sum_{i=1}^2 [\pi_i Q_i - C_i(E_i)] + V_{sc}^{c'}(\tau)(\lambda E_M - \delta \tau) \right]. \end{aligned} \quad (38)$$

使式 (38) 最大化的一阶条件为

$$E_M = \frac{\lambda V_{sc}^{c'}(\tau)}{\eta_M}, \quad E_i = \frac{\pi_M \beta_1 + \pi_i \beta}{\eta_i}.$$

将 E_M, E_i 代入式 (38), 整理可得

$$\rho V_{sc}^c(\tau) =$$

$$\left[\pi_M \theta + \sum_{i=1}^2 \pi_i \theta_i - \delta V_{sc}^c(\tau) \right] \tau + \pi_M \alpha + \frac{\lambda^2 [V_{sc}^c(\tau)]^2}{2\eta_M} + \frac{(\pi_M \beta_1 + \pi_i \beta - 2\pi_j \beta_2)(\pi_M \beta_1 + \pi_i \beta)}{2\eta_i} + \frac{(\pi_M \beta_1 + \pi_j \beta - 2\pi_i \beta_2)(\pi_M \beta_1 + \pi_j \beta)}{2\eta_j} + \pi_i \alpha_i + \pi_j \alpha_j. \quad (39)$$

根据式(39)微分方程的特点, 推测 τ 的线性最优值函数是 HJB 方程的解.

设函数 $V_{sc}^c(\tau)$ 的具体表达式为

$$V_{sc}^c(\tau) = a_3(\tau) + b_3, \quad (40)$$

其中 a_3, b_3 均为未知常数. 将式(40)及其一阶导数代入(39), 整理并对比其左右两边的同类项系数, 可得约束方程组(36). 求解该方程组可得 a_3^*, b_3^* , 将其代入式(40)可得

$$V_{sc}^c(\tau) = a_3^*(\tau) + b_3^*. \quad (41)$$

将式(41)及其一阶导数分别代入 E_M, E_i , 可得供应链系统的均衡解为

$$E_M^c = \frac{\lambda \left(\pi_M \theta + \sum_{i=1}^2 \pi_i \theta_i \right)}{\eta_M (\rho + \delta)},$$

$$E_i^c = \frac{\pi_M \beta_1 + \pi_i \beta}{\eta_i}. \quad (42)$$

将式(42)代入状态方程(1), 根据状态方程的边界条件 $\tau(0) = \tau_0 \geq 0$, 可求得产品减排量的轨迹如式(34). 将式(41)代入(37), 可得供应链系统的利润最优值函数为(35). □

由定理1~定理3可得如下推论.

推论 1 1) $E_M^N = E_M^Y < E_M^c$.

2) 当 $2\pi_M \beta_1 > \pi_i \beta$ 时, $E_i^N < E_i^Y < E_i^c$; 当 $2\pi_M \beta_1 < \pi_i \beta$ 时, $E_i^Y < E_i^N < E_i^c$.

3)

$$V_M^Y(\tau) - V_M^N(\tau) = \sum_{i=1}^2 \frac{(2\pi_M \beta_1 - \pi_i \beta)^2}{8\rho\eta_i},$$

$$V_i^Y(\tau) - V_i^N(\tau) = \frac{(2\pi_M \beta_1 - \pi_i \beta)\pi_i \beta}{4\rho\eta_i} - \frac{(2\pi_M \beta_1 - \pi_j \beta)\pi_i \beta_2}{2\rho\eta_j}.$$

4) 当 $t \neq 0$ 时, $\tau^N = \tau^Y < \tau^c$.

由推论1可知: 1) 当 $2\pi_M \beta_1 > \pi_i \beta$ 时, 与无成本分担的分散式决策相比, 在成本分担契约下的分散式决策时, 制造商的减排努力程度没有变化, 零售商的低碳宣传努力程度有所提高, 协同控制的集中式决策下, 制造商的减排努力程度和零售商的低碳宣传努力程度都最高; 当 $2\pi_M \beta_1 < \pi_i \beta$ 时, 制造商不但不给零售商提供补贴, 反而会从零售商处收取一定的费用, 此时与无成本分担的分散式决策相比, 零

售商的低碳宣传努力程度有所下降, 降低了零售商进行低碳宣传的积极性. 2) 当 $2\pi_M \beta_1 \neq \pi_i \beta$ 时, 成本分担契约可以实现制造商利润的 Pareto 改善; 当 $\frac{(2\pi_M \beta_1 - \pi_i \beta)\beta\eta_j}{2(2\pi_M \beta_1 - \pi_j \beta)\beta_2\eta_i} > 1$ 时, 成本分担契约可以实现零售商 i 利润的 Pareto 改善. 3) 成本分担契约对制造商和零售商利润的 Pareto 改善效果, 受消费者对零售商的低碳宣传敏感性、两零售商之间的低碳宣传竞争强度、零售商的低碳宣传成本系数、制造商和两零售商边际收益以及折现率的影响. 4) 协同控制的集中式决策下, 单位产品减排量最高, 减排效果最好; 成本分担契约旨在提高零售商低碳宣传的积极性, 增加低碳产品销量, 不会对制造商减排努力造成影响, 因此成本分担前后具有相同的减排效果.

3 算例分析

推论1已经分析了成本分担契约对决策变量、利润及减排效果的影响, 本节重点分析成本分担契约下供应链成员及供应链系统利润随竞争强度系数 β_2 的变化关系. 相关参数值如下: $\lambda = 2, \delta = 1, \alpha_1 = 5, \alpha_2 = 5, \beta_1 = 3, \theta_1 = 2, \theta_2 = 1, \rho = 0.9, \pi_M = 5, \pi_1 = 4, \pi_2 = 5, \eta_M = 18, \eta_1 = 12, \eta_2 = 11, \tau_0 = 0$. 将相关参数代入模型, 可得稳定状态时供应链各成员及供

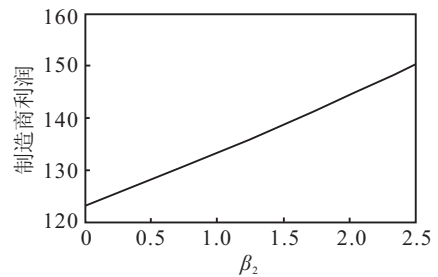


图 1 制造商利润随竞争系数 β_2 的变化

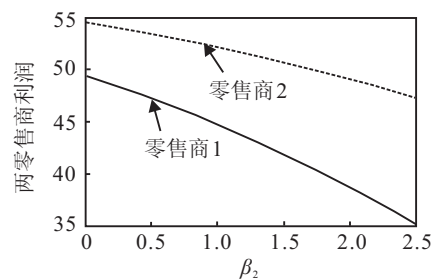


图 2 零售商利润随竞争系数 β_2 的变化

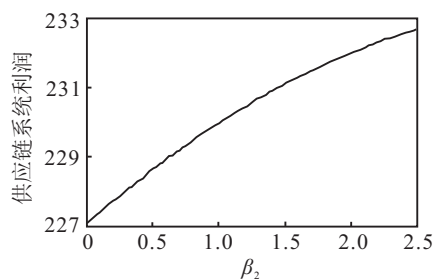


图 3 供应链系统利润随竞争系数 β_2 的变化

供应链系统利润随竞争系数 β_2 的变化轨迹, 如图1~图3所示.

在上述参数的取值下, 从图1~图3可以看出: 达到稳定状态时, 随着两零售商之间竞争的加剧, 制造商和供应链系统利润逐渐上升, 两零售商利润逐渐下降. 竞争强度越大, 两零售商之间低碳宣传努力的差值带来的销售量差别越大. 为了获得更多的市场份额, 两零售商都会更努力地进行低碳宣传, 低碳宣传努力增加的结果一方面带来了销量的增加, 另一方面也会增加零售商各自的成本, 出现制造商利润上升, 零售商利润下降的现象. 制造商利润的增加幅度超过了零售商利润下降的幅度, 从而供应链系统利润逐渐上升.

4 结论及展望

本文考虑存在零售商竞争的情况, 从上下游长期动态联合减排与低碳宣传的角度, 构建了3种微分博弈模型, 通过对模型求解与分析可得以下结论: 1) 协同控制的集中式决策下, 制造商的减排努力和两零售商的低碳宣传努力以及单位产品减排量都最高; 2) 与无成本分担的分散式决策相比, 成本分担契约下制造商的减排努力没有发生变化; 3) 当 $2\pi_M\beta_1 > \pi_i\beta$ 时, 制造商为零售商 i 承担了低碳宣传成本, 零售商的低碳宣传努力有所提高; 4) 当 $\frac{(2\pi_M\beta_1 - \pi_i\beta)\beta\eta_j}{2(2\pi_M\beta_1 - \pi_j\beta)\beta_2\eta_i} > 1$ 时, 成本分担契约可以实现零售商 i 利润的 Pareto 改善; 5) 达到稳定状态时, 随着两零售商之间竞争的加剧, 制造商和供应链系统利润逐渐上升, 两零售商利润逐渐下降.

由于本文重在分析成本分担契约改善供应链绩效的情况及竞争因素的影响, 建立模型时并未考虑政府补贴政策、碳交易政策等环保法规对制造商产品减排量和供应链成员决策的影响. 加入碳税和碳交易等政策的约束将是进一步的研究课题. 另外, 在多级供应链和复杂供应链网络框架下, 研究上下游之间联合减排与低碳宣传的问题也将是进一步的研究方向.

参考文献(References)

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability [EB/OL]. (2013-06-20). <http://www.ipcc.ch/publications-and-data/publications-ipcc-fourth-assessment-report-wg2-report-impacts-adaptation-and-vulnerability.htm>.

[2] 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. Optimal production policy with emission permits and trading[J]. Chinese J of Management Science, 2009, 17(3): 81-86.)

[3] Zhang J, Nie T, Du S. Optimal emission-dependent

production policy with stochastic demand[J]. Int J of Society Systems Science, 2011, 3(1/2): 21-39.

[4] 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.

[5] Benjaafar S, Li Y, Daskin M. Carbon footprint and the management of supply chains: Insights from simple models[J]. Automation Science and Engineering, 2013, 10(1): 99-116.

[6] Chen X, Benjaafar S, Elomri A. The carbon-constrained EOQ[J]. Operations Research Letters, 2013, 41(2): 172-179.

[7] Du S, Ma F, Fu Z. Game-theoretic analysis for an emission-dependent supply chain in a "cap-and-trade" system[J]. Annals of Operations Research, 2011, DOI 10.1007/s10479-011-0964-6.

[8] Liu Z, Anderson T D, Cruz J M. Consumer environmental awareness and competition in two-stage supply chains[J]. European J of Operational Research, 2012, 218(3): 602-613.

[9] Li F, Dong S, Xue L, et al. Energy consumption-economic growth relationship and carbon dioxide emissions in China[J]. Energy Policy, 2011, 39(2): 568-574.

[10] Wei Y, Liu L, Fan Y, et al. The impact of lifestyle on energy use and CO₂ emission: An empirical analysis of China's residents[J]. Energy Policy, 2007, 35(1): 247-257.

[11] 朱庆华, 竇一杰. 基于政府补贴分析的绿色供应链管理博弈模型[J]. 管理科学学报, 2011, 14(6): 86-94.
(Zhu Q H, Dou Y J. A game model for green supply chain management based on government subsidies[J]. J of Management Sciences in China, 2011, 14(6): 86-94.)

[12] 陈剑. 低碳供应链管理研究[J]. 系统管理学报, 2012, 21(6): 721-728.
(Chen J. Study on supply chain management in a low-carbon era[J]. J of Systems and Management, 2012, 21(6): 721-728.)

[13] 洪江涛, 黄沛. 两级供应链上质量控制的动态协调机制研究[J]. 管理工程学报, 2011, 25(2): 62-65.
(Hong J T, Huang P. Dynamic coordination mechanisms of quality control in two-echelon supply chains[J]. J of Industrial Engineering/Engineering Management, 2011, 25(2): 62-65.)

[14] 田厚平, 刘长贤. 双重信息不对称下销售渠道双目标混合激励模型[J]. 管理科学学报, 2011, 14(3): 34-47.
(Tian H P, Liu C X. Bi-objective incentive model in distribution channel under the framework of dual information asymmetry[J]. J of Management Sciences in China, 2011, 14(3): 34-47.)

(责任编辑: 李君玲)