

低碳供应链生态研发、合作促销与定价的微分博弈分析

游达明^{a,b}, 朱桂菊^a

(中南大学 a. 商学院, b. 两型社会与生态文明协同创新中心, 长沙 410083)

摘要: 针对低碳供应链研发、促销与定价问题, 构建微分博弈模型. 将产品低碳度和商誉作为状态变量, 综合考虑价格和非价格因素对市场需求的三重影响, 考察并比较不同决策下供应链的反馈均衡策略, 结合数值模拟, 对相关参数进行敏感性分析. 研究发现: 集中式决策可促使供应链实现经济绩效和环境绩效双赢; 产品批发价对分散式决策下供应链均衡策略及利润产生重要且不同影响; 两种决策下产品低碳度随时间单调变化, 而商誉的变化却呈现多样性.

关键词: 低碳供应链; 生态技术创新; 广告促销; 零售定价; 微分博弈

中图分类号: F272.3

文献标志码: A

Differential game analysis of ecological R&D, cooperative promotion and pricing in the low-carbon supply chain

YOU Da-ming^{a,b}, ZHU Gui-ju^a

(a. School of Business, b. Collaborative Innovation Center of Resource-Conserving & Environment-Friendly Society and Ecological Civilization, Central South University, Changsha 410083, China. Correspondent: ZHU Gui-ju, E-mail: orangeacademic2014@163.com)

Abstract: Aiming at solving the problem of R&D, promotion and pricing in the low-carbon supply chain, a differential game model is constructed. Both the products' low-carbon degree and goodwill are used as state variables. Meanwhile, it is considered that the market demand is affected by multiple factors, including the low-carbon degree, the goodwill and the retail price. Then, the feedback equilibrium strategies under different decision situations are obtained and compared. Furthermore, the sensitivity analysis of related parameters is conducted by using the numerical simulation method. The results show that the economic performance and environment performance of the low-carbon supply chain can achieve "win-win" with the help of centralized decision. In decentralized decision, wholesale price has important but different influences on equilibrium strategies and profits. The products' low-carbon degree trajectory is monotonic while the goodwill trajectory shows changing diversity.

Keywords: low-carbon supply chain; eco-technology innovation; advertisement promotion; retail price; differential game

0 引言

面对严重的环境问题, 现有技术和社会行为模式必须改变和革新^[1]. 2014 年, 北京市铸锻、建材、化工、包装及印刷等行业共 392 家污染企业被关停退出, 江苏常隆农化公司等 6 家企业被判赔偿环境修复费用 1.6 亿余元. 自 2015-01-01 起, 中国实施新修订的《环境保护法》, 开启了依法治污新纪元. 也就是说, 企业的竞争力甚至存亡越来越取决于它们能否应对可持续发展的要求. 大量研究表明, 生态技术创新企

业由于生态效率提升及形象塑造, 通常比其竞争对手具有更强的市场竞争优势^[2-3]. 随着“低碳环保”理念的深入人心, 节能减排产品越来越受到广大消费者的追捧. 如果说制造商生态研发为消费者购买低碳产品提供了可能, 若要真正实现低碳产品消费规模化, 则需要零售商这一纽带的高效引导. 零售商通过价格折扣、低碳标签、低碳消费返利等手段引导消费者低碳偏好, 提高市场需求^[4], 间接激发制造商绿色生产^[5].

低碳时代的到来, 给企业生产运营管理提出了新

收稿日期: 2015-04-29; 修回日期: 2015-07-27.

基金项目: 教育部哲学社会科学研究重大课题攻关项目(13JZD0016); 国家自然科学基金项目(71172100); 国家软科学研究计划项目(2014GXSD135).

作者简介: 游达明(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事技术创新与管理、投融资决策、战略管理等研究; 朱桂菊(1986—), 女, 博士生, 从事生态技术创新、低碳供应链的研究.

的挑战. 杜少甫等^[6]创新性地将排放许可交易与生产优化相结合, 研究了排放限额下企业最优生产策略. 部分学者基于不同规制条件探讨了企业生态研发最优投入问题^[7]. 这些文献为低碳背景下企业微观层面最优决策提供了相关理论依据, 但没有考虑企业之间的合作. 实践过程中, 企业与供应链其他成员可以通过某种契约进行合作减排, 提高各自利润^[8]. 研发和促销是新产品开拓市场不可或缺的两大重要手段^[9], 对于具有双重外部性的低碳产品而言尤为如此. 前述相关文献都是用静态模型分析企业最优决策, 但由于生态研发、广告促销、零售价格以及市场需求都是动态现象, 在动态架构下研究异质型合作问题更加贴近现实^[10], 如质量控制与促销^[11]、质量控制与商誉^[12]、定价与库存^[13]、生态研发与促销^[14]等. Jorgensen 等^[15]对 Nerlove 等^[16]的经典模型进行扩展, 构建出了制造商为领导者的合作促销 Stackelberg 微分博弈模型. 王芹鹏等^[14]、赵道致等^[17]综合考虑制造商生态研发和零售商促销所形成的低碳商誉对市场的影响, 分析了不同决策情形下低碳供应链长期动态最优策略. 但是, 上述文献多聚焦于研发和促销对于产品需求量的促进作用, 而对低碳产品如何定价问题避而不谈, 所构建模型只是简单地假设产品零售价为事先给定的外生变量. 事实上, 零售商常常把低碳产品价格折扣与广告促销相结合, 对消费者购买决策产生重要影响. 因此, 在生态研发和促销宣传的同时如何对低碳产品进行合理定价便成为低碳供应链亟待解决的一个重要难题.

通过对现有文献的回顾与梳理, 可以看出低碳供应链运营问题已引起国内外学者的普遍关注, 而且根据不同研究对象, 现有文献给出了许多不同数学形式的动态优化模型和微分博弈模型. 但是, 基于研发-促销异质型合作视角研究低碳供应链长期动态最优控制的文献较少, 而且这些文献没有考虑零售价对市场需求以及低碳供应链决策的影响. 鉴于此, 本文将制造商生态研发、零售商促销和产品定价统一纳入分析框架, 假设处于领导地位的大型制造商为零售商分担一定比例的促销成本, 产品低碳度和商誉都是动态变化的. 市场需求同时受价格和非价格因素共同影响, 采用微分博弈理论, 研究不同决策情形下低碳供应链生态研发、促销与定价的均衡策略问题. 与以往研究相比, 本文的研究有以下 3 个特点:

1) 将制造商生态研发努力、促销参与率、零售商促销努力和定价统一纳入分析框架, 构建微分博弈模型, 而现有成果极少将这 4 个因素同时看作内生变量进行动态分析;

2) 在模型构建中, 同时将产品低碳度和商誉看作

是动态变化的, 而且状态变量商誉除了受决策变量零售商促销努力的影响外, 还受状态变量产品低碳度的影响, 而现有成果多考虑商誉或低碳度(碳排放量)单一状态变量, 鲜有文献考虑两个状态变量的交互影响;

3) 假定消费者购买决策同时受低碳偏好、品牌偏好和产品价格的多重影响, 并且结合低碳产品需求特性假设市场需求与价格因素和非价格因素之间为可分离相乘的关系, 而现有成果多考虑价格或非价格单一因素对低碳产品的影响, 为数不多的多因素复合影响分析中还是假设为简单相加的线性关系.

1 模型描述与基本假设

本文假设低碳供应链由一个作为领导者的大型制造商和一个作为追随者的零售商组成. 制造商通过引进新技术、改造生产流程等手段进行生态研发, 降低产品生产及使用过程中的能源消耗和碳排放量; 零售商通过免费换购、低碳消费返利等手段进行促销, 结合零售定价, 引导消费者低碳偏好. 同时, 为了激励零售商促销投入的积极性, 售卖更多的低碳产品, 制造商愿意为零售商承担部分或全部促销成本.

假设 1 假设制造商通过生态研发能够提高产品低碳度. 然而, 随着时间的推移, 已有投资设备老化、技术落后, 产品低碳度存在一个自然衰减状况^[17]. 产品低碳度随时间的变化情况为

$$\dot{E}(t) = \varepsilon I(t) - \delta E(t). \quad (1)$$

其中: $E(t)$ 为 t 时刻产品低碳度, 表征产品在全生命周期中碳排放量(即产品的碳足迹)的减少或环境友好程度, 且初始低碳度 $E(0) = E_0$; $I(t)$ 为 t 时刻制造商生态研发努力水平; $\varepsilon > 0$ 为生态研发效率, 表征制造商生态研发努力对产品低碳度的影响程度; $\delta > 0$ 为产品低碳度的自然衰退率.

假设 2 正如 Chen^[18]实证研究发现, 企业生态研发不仅可以降低产品对环境的损害程度, 还可以通过提高产品低碳度来正向影响品牌形象(商誉). 因此, 借鉴文献[11]关于质量控制和促销对商誉的影响, 本文假设产品的商誉同时受产品低碳度和促销努力的正向影响, 并对 Nerlove 等^[16]经典商誉模型进行修正来刻画商誉随时间的变化情况, 即

$$\dot{G}(t) = \beta A(t) + \theta E(t) - \sigma G(t). \quad (2)$$

其中: $G(t)$ 为 t 时刻低碳产品的商誉, 且初始商誉 $G(0) = G_0$; $A(t)$ 为 t 时刻零售商促销努力水平; $\beta > 0$ 和 $\theta > 0$ 分别为零售商促销努力和产品低碳度对商誉的边际贡献率; $\sigma > 0$ 为商誉的自然衰退率, 通常是由于新产品推出和消费者遗忘对其造成的影响^[14].

假设 3 假定消费者倾向于购买低碳度高、品

牌形象好、价格低廉的产品。与谢鑫鹏等^[19]和 Zhang 等^[20]认为零售价、低碳水平或其他因素与市场需求均为简单线性关系不同, Ouardighi 等^[21]将市场需求影响因素分为价格因素和非价格因素, 并认为两种因素通过可分离相乘的形式对市场需求产生影响, 其他类似函数形式可参见文献[10, 22-23]。因此, 低碳产品的市场需求函数为

$$D(t) = (\eta E(t) + \gamma G(t))(a - bp(t)). \quad (3)$$

其中: $p(t)$ 为 t 时刻低碳产品的零售价; $\eta > 0$, $\gamma > 0$ 和 $b > 0$ 分别为消费者低碳偏好、品牌偏好和价格敏感系数, 依次表征产品低碳度、商誉和零售价对市场需求的影 响程度; $a > 0$ 为市场规模, 且 $a - bp(t) \geq 0$ 。

通过式(3)可以看出:

1) 市场需求受零售价负向影响, 同时受产品低碳度和商誉正向影响 ($D_p < 0$, $D_E > 0$, $D_G > 0$)。

2) 假定产品低碳度和商誉固定不变, 当 $p(t) \in (0, a/2b)$ 时, 需求价格弹性 $e = bp(t)/(a - bp(t)) < 1$; 当 $p(t) \in (a/2b, a/b)$ 时, 需求价格弹性 $e > 1$ 。事实上, 低碳产品价格较高时, 消费者对价格增加更加敏感, 倾向于选择替代产品, 忽略环保诉求。

3) 产品低碳度或商誉的增加会降低零售价对市场需求的负面影响 ($D_{pE} = -b\eta < 0$, $D_{pG} = -b\gamma < 0$)。换句话说, 伴随着产品低碳度或商誉的提升, 消费者需求对低碳产品零售价的敏感性降低。

假设 4 与众多学者类似, 假设生态研发成本^[24-25]和广告促销成本^[26-27]分别为研发努力和促销努力的凸函数, 即

$$C_M(t) = \frac{K_m}{2} I(t)^2, \quad C_R(t) = \frac{K_r}{2} A(t)^2. \quad (4)$$

其中: $C_M(t)$ 和 $C_R(t)$ 分别为 t 时刻制造商生态研发和零售商促销努力的成本; $K_m > 0$ 和 $K_r > 0$ 分别为制造商生态研发和零售商促销努力的成本系数。以二次函数表示投入或成本是文献中常用的形式^[14]。本文研究的生态研发旨在降低产品碳排放量(或环境损害), 不会带来单位产品生产成本的改变^[28]。同样, 假设广告促销也不会带来单位产品管理成本的改变^[26]。因此, 将制造商单位产品生产成本和零售商单位产品管理成本都视作常数, 方便起见, 简化为 0。

假设 5 Chutani 等^[23]通过对国内外关于纵向合作广告的研究发现: 制造商为宣传其品牌的零售商分担一定比例的广告费用, 能够有效激励零售商的积极性, 被众多行业所采用。因此, 假设低碳供应链中, 大型制造商依赖自身强大的实力, 在与零售商对话过程中占据主导地位, 并愿意主动为零售商承担部分或全部促销成本。记 $\lambda(t)$ ($0 \leq \lambda(t) \leq 1$) 为 t 时刻制造商

为零售商分担的促销成本比例, 表征制造商的促销参与率。

假设 6 假设制造商和零售商基于完全信息进行理性决策, 不计供应链存货成本和缺货成本; 在无限时间范围内, 制造商和零售商在任意时刻均具有相同的贴现因子 ρ ($\rho > 0$); 制造商低碳产品批发价为常数 ω ($\omega \geq 0$)。因此, 制造商、零售商和供应链整体长期利润分别为

$$J_M = \int_0^\infty e^{-\rho t} [\omega D(t) - C_M(t) - \lambda(t) C_R(t)] dt, \quad (5)$$

$$J_R = \int_0^\infty e^{-\rho t} [(p(t) - \omega) D(t) - (1 - \lambda(t)) C_R(t)] dt, \quad (6)$$

$$J_S = \int_0^\infty e^{-\rho t} [p(t) D(t) - C_M(t) - C_R(t)] dt. \quad (7)$$

本文变量间相互关系如图 1 所示。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 t 。

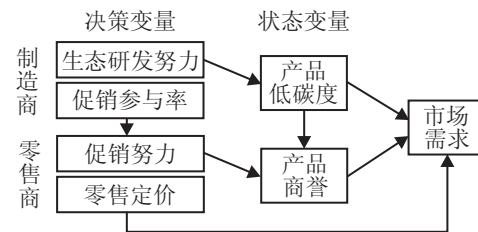


图1 本文变量关系图

2 模型求解与分析

2.1 分散式决策

该情形下, $0 \leq \lambda \leq 1$, 制造商(领导者)和零售商(跟随者)组成两阶段 Stackelberg 非合作博弈, 用上标 D 表示。决策顺序为: 制造商先选择最优生态研发努力和促销参与率; 零售商在此基础上, 选择最优的促销努力和零售价。因此, 制造商和零售商的决策问题分别为

$$\begin{aligned} \max_{I, \lambda} J_M^D &= \int_0^\infty e^{-\rho t} [\omega (\eta E + \gamma G)(a - bp) - \frac{K_m}{2} I^2 - \frac{\lambda K_r}{2} A^2] dt; \\ \max_{p, A} J_R^D &= \int_0^\infty e^{-\rho t} [(p - \omega) (\eta E + \gamma G)(a - bp) - \frac{(1 - \lambda) K_r}{2} A^2] dt. \end{aligned} \quad (8)$$

定理 1 分散式决策下, 制造商最优生态研发努力和促销参与率, 零售商最优促销努力和产品零售价均衡策略分别为

$$\begin{cases} I^{D*} = \frac{\varepsilon \omega (a - b\omega)}{2K_m(\rho + \delta)} \left(\eta + \frac{\gamma \theta}{\rho + \sigma} \right), \\ \lambda^{D*} = \frac{5b\omega - a}{3b\omega + a}, \\ A^{D*} = \frac{\beta \gamma (a - b\omega)(a + 3b\omega)}{8bK_r(\rho + \sigma)}, \\ p^{D*} = \frac{a + b\omega}{2b}. \end{cases} \quad (9)$$

证明 采用逆向归纳法求解. 记 t 时刻以后, 零售商长期利润的最优价值函数为

$$J_R^{D*}(p, A) = e^{-\rho t} V_R^D(E, G).$$

根据最优控制理论, $V_R^D(E, G)$ 对任意 $E \geq 0$ 和 $G \geq 0$ 都满足 Hamilton-Jacobi-Bellman(HJB) 方程

$$\begin{aligned} \rho V_R^D(E, G) = & \max_{A, p} \left[(p - \omega)(\eta E + \gamma G)(a - bp) - \right. \\ & \left. \frac{(1 - \lambda)K_r}{2} A^2 + V_{RE}^{D'}(\varepsilon I - \delta E) + \right. \\ & \left. V_{RG}^{D'}(\beta A + \theta E - \sigma G) \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

对式(10)右边关于 A 和 p 求一阶偏导, 并分别令其等于零, 可解得

$$A = \frac{\beta V_{RG}^{D'}}{(1 - \lambda)K_r}, \quad p = \frac{a + b\omega}{2b}. \quad (11)$$

同理, 记 t 时刻以后, 制造商长期利润最优价值函数为

$$J_M^{D*}(I, \lambda) = e^{-\rho t} V_M^D(E, G).$$

$V_M^D(E, G)$ 对任意 $E \geq 0$ 和 $G \geq 0$ 都满足 HJB 方程

$$\begin{aligned} \rho V_M^D(E, G) = & \max_{I, \lambda} \left[\omega(\eta E + \gamma G)(a - bp) - \right. \\ & \left. \frac{K_m}{2} I^2 - \frac{\lambda K_r}{2} A^2 + V_{ME}^{D'}(\varepsilon I - \right. \\ & \left. \delta E) + V_{MG}^{D'}(\beta A + \theta E - \sigma G) \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

将式(11)代入(12), 并对(12)右边关于 I 和 λ 求一阶偏导, 分别令其等于零, 可解得

$$I = \frac{\varepsilon V_{ME}^{D'}}{K_m}, \quad \lambda = \frac{2V_{MG}^{D'} - V_{RG}^{D'}}{2V_{MG}^{D'} + V_{RG}^{D'}}. \quad (13)$$

将式(11)和(13)代入(10)和(12), 整理得

$$\begin{aligned} \rho V_R^D(E, G) = & \left[\frac{\eta(a - b\omega)^2}{4b} - \delta V_{RE}^{D'} + \theta V_{RG}^{D'} \right] E + \\ & \left[\frac{\gamma(a - b\omega)^2}{4b} - \sigma V_{RG}^{D'} \right] G + \frac{\varepsilon^2 V_{RE}^{D'} V_{ME}^{D'}}{K_m} + \\ & \frac{\beta^2 V_{RG}^{D'} (2V_{MG}^{D'} + V_{RG}^{D'})}{4K_r}, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \rho V_M^D(E, G) = & \left[\frac{\eta\omega(a - b\omega)}{2} - \delta V_{ME}^{D'} + \theta V_{MG}^{D'} \right] E + \\ & \left[\frac{\gamma\omega(a - b\omega)}{2} - \sigma V_{MG}^{D'} \right] G + \frac{\varepsilon^2 (V_{ME}^{D'})^2}{2K_m} + \\ & \frac{\beta^2 (2V_{MG}^{D'} + V_{RG}^{D'})^2}{8K_r}. \end{aligned} \quad (15)$$

根据式(14)和(15)的结构, 可假设最优价值函数 $V_R^D(E, G)$ 和 $V_M^D(E, G)$ 关于 E 和 G 的线性解析式分别为

$$\begin{cases} V_R^D(E, G) = r_1 E + r_2 G + r_3, \\ V_M^D(E, G) = m_1 E + m_2 G + m_3. \end{cases} \quad (16)$$

其中: $r_1, r_2, r_3, m_1, m_2, m_3$ 为常数. 将式(16)及其对 E 和 G 的一阶偏导代入式(14)和(15), 解得

$$\begin{cases} r_1^* = \frac{(a - b\omega)^2}{4b(\rho + \delta)} \left(\eta + \frac{\gamma\theta}{\rho + \sigma} \right), \\ r_2^* = \frac{(a - b\omega)^2 \gamma}{4b(\rho + \sigma)}, \\ r_3^* = \frac{\beta^2 r_2^* (2m_2^* + r_2^*)}{4\rho K_r} + \frac{\varepsilon^2 r_1^* m_1^*}{\rho K_m}; \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} m_1^* = \frac{\omega(a - b\omega)}{2(\rho + \delta)} \left(\eta + \frac{\gamma\theta}{\rho + \sigma} \right), \\ m_2^* = \frac{\omega(a - b\omega)\gamma}{2(\rho + \sigma)}, \\ m_3^* = \frac{\beta^2 (2m_2^* + r_2^*)^2}{8\rho K_r} + \frac{\varepsilon^2 m_1^{*2}}{2\rho K_m}. \end{cases} \quad (18)$$

将式(17)、(18)代入(11)和(13), 可求得分散式决策下低碳供应链生态研发、合作促销与定价的均衡策略, 见式(9). $\square$

由于 $0 \leq \lambda \leq 1, 0 \leq bp \leq a$, 命题1隐含的条件是 $\omega \in [a/5b, a/b]$, 后续分析及仿真都在此范围内进行.

推论 1 1) 分散式决策下, 制造商最优生态研发努力和零售商最优促销努力都与消费者品牌偏好正相关, 与成本参数、衰退率和贴现因子负相关.

2) 分散式决策下, 当 $\omega \in (a/5b, a/3b)$ 时, 产品批发价正向影响制造商最优生态研发努力和零售商最优促销努力 ($\partial I^{D*}/\partial \omega > 0, \partial A^{D*}/\partial \omega > 0$); 当 $\omega \in (a/3b, a/2b)$ 时, 产品批发价正向影响制造商最优生态研发努力, 负向影响零售商最优促销努力 ($\partial I^{D*}/\partial \omega > 0, \partial A^{D*}/\partial \omega < 0$); 当 $\omega \in (a/2b, a/b)$ 时, 产品批发价负向影响制造商最优生态研发努力和零售商最优促销努力 ($\partial I^{D*}/\partial \omega < 0, \partial A^{D*}/\partial \omega < 0$). 因此, 当 $\omega = a/3b$ 时, 零售商最优促销努力达到最大值; 当 $\omega = a/2b$ 时, 制造商最优生态研发努力达到最大值.

3) 分散式决策下, 消费者低碳偏好、生态研发效率和产品低碳度对商誉的边际贡献率都正向影响制造商最优生态研发努力, 却对零售商最优促销努力没有影响. 也就是说, 上述3个因素的共同作用可以促使制造商自愿通过加大生态技术创新投入力度来提高企业经济绩效和环境绩效.

4) 分散式决策下, 产品最优零售价和制造商最优促销参与率与产品批发价、市场规模以及价格敏感系数有关.

随着产品批发价的增加, 制造商愿意为零售商承担更多的促销成本 ($\partial \lambda^{D*}/\partial \omega > 0$), 零售商将通过提高零售价来降低因批发成本增加而带来的损失 ($\partial p^{D*}/\partial \omega > 0$). 进一步, 结合式(9)可得 $\lambda^{D*} = (2\omega -$

$(p^{D*} - \omega)/(2\omega + (p^{D*} - \omega))$. 因此, 随着零售商边际利润的增加, 制造商促销参与率将不断降低. 现实中, 与地方性小零售商相比, 规模较大的零售商(如沃尔玛), 同一产品的边际利润相对较低, 可从制造商处获得更多促销补贴.

将最优策略(9)代入状态方程(1)和(2), 得

$$\begin{cases} \dot{E}(t) = \frac{\varepsilon^2 \omega (a - b\omega)}{2K_m(\rho + \delta)} \left(\eta + \frac{\gamma\theta}{\rho + \sigma} \right) - \delta E(t), \\ \dot{G}(t) = \frac{\beta^2 \gamma (a - b\omega)(a + 3b\omega)}{8bK_r(\rho + \sigma)} + \theta E(t) - \sigma G(t). \end{cases} \quad (19)$$

求解微分方程(19), 可得如下定理.

定理2 分散式决策下, 产品低碳度和商誉的最优轨迹分别为

$$\begin{cases} E^D(t) = E_\infty^D + (E_0 - E_\infty^D)e^{-\delta t}, \\ G^D(t) = \\ G_\infty^D + \frac{\theta}{\sigma - \delta}(E_0 - E_\infty^D)e^{-\delta t} + \\ \left[G_0 - G_\infty^D - \frac{\theta}{\sigma - \delta}(E_0 - E_\infty^D) \right] e^{-\sigma t}. \end{cases} \quad (20)$$

其中

$$\begin{cases} E_\infty^D = \frac{\varepsilon^2 \omega (a - b\omega)}{2K_m \delta (\rho + \delta)} \left(\eta + \frac{\gamma\theta}{\rho + \sigma} \right), \\ G_\infty^D = \frac{a - b\omega}{2\sigma} \left[\frac{\beta^2 \gamma (a + 3b\omega)}{4bK_r(\rho + \sigma)} + \right. \\ \left. \frac{\varepsilon^2 \theta \omega}{K_m \delta (\rho + \delta)} \left(\eta + \frac{\gamma\theta}{\rho + \sigma} \right) \right], \end{cases} \quad (21)$$

E_∞^D 和 G_∞^D 分别为分散式决策下产品低碳度和商誉的稳定值, 即 $t \rightarrow \infty$.

推论2 1) 分散式决策下, 产品低碳度和商誉的稳定值与消费者低碳偏好、品牌偏好和产品低碳度对商誉的边际贡献率正相关, 与成本参数、衰退率和贴现因子负相关.

2) 分散式决策下, $\omega \in \left(\frac{a}{5b}, \frac{(n_1 + n_2)a}{(3n_1 + 2n_2)b} \right)$ 时, $\frac{\partial E_\infty^D}{\partial \omega} > 0$, $\frac{\partial G_\infty^D}{\partial \omega} > 0$, 产品批发价正向影响产品低碳度和商誉的稳定值; 当 $\omega \in \left(\frac{(n_1 + n_2)a}{(3n_1 + 2n_2)b}, \frac{a}{2b} \right)$ 时, $\frac{\partial E_\infty^D}{\partial \omega} > 0$, $\frac{\partial G_\infty^D}{\partial \omega} < 0$, 产品批发价正向影响产品低碳度稳定值, 负向影响商誉稳定值; 当 $\omega \in \left(\frac{a}{2b}, \frac{a}{b} \right)$ 时, $\frac{\partial E_\infty^D}{\partial \omega} < 0$, $\frac{\partial G_\infty^D}{\partial \omega} < 0$, 产品批发价负向影响产品低碳度和商誉稳定值. 其中

$$\begin{aligned} n_1 &= \frac{\beta^2 \gamma}{4K_r \sigma (\rho + \sigma)}, \\ n_2 &= \frac{\varepsilon^2 \theta}{2K_m \sigma \delta (\rho + \delta)} \left(\eta + \frac{\gamma\theta}{\rho + \sigma} \right). \end{aligned}$$

因此, 当 $\omega = \frac{a}{2b}$ 时, 产品低碳度稳定值达到最大, 与推论1中制造商最优生态研发努力的临界点一样;

当 $\omega = \frac{(n_1 + n_2)a}{(3n_1 + 2n_2)b}$ 时, 商誉稳定值达到最大, 与推论1中零售商最优促销努力的临界点不同, 因为商誉除了受促销努力的影响之外, 还受产品低碳度的影响.

3) 分散式决策下, 产品低碳度轨迹是单调的, 而商誉轨迹呈现多变性.

从式(20)可以看出: 当 $E_0 < E_\infty^D$ 时, 产品低碳度随时间单调递增; 当 $E_0 > E_\infty^D$ 时, 产品低碳度随时间单调递减; 当 $E_0 = E_\infty^D$ 时, 产品低碳度为常数. 然而, 由于商誉受产品低碳度和促销努力的共同影响, 轨迹变化呈现多样性. 换句话说, 如果产品低碳度对商誉没有影响, 即 $\theta = 0$, 商誉轨迹也将呈现单调性, 这时将与 Grosset 等^[29]和 Zhang 等^[30]的研究一致.

结合最优策略(9)和状态轨迹(20), 可以得出分散式决策下制造商、零售商和供应链整体长期利润为

$$\begin{aligned} J_M^D &= \\ &= \frac{\omega(a - b\omega)}{2} \Omega + \frac{\varepsilon^2 \omega^2 (a - b\omega)^2}{8K_m \rho (\rho + \delta)^2} \left(\eta + \frac{\gamma\theta}{\rho + \sigma} \right)^2 + \\ &+ \frac{\beta^2 \gamma^2 (a - b\omega)^2 (a + 3b\omega)^2}{128b^2 \rho K_r (\rho + \sigma)^2}, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} J_R^D &= \\ &= \frac{(a - b\omega)^2}{4b} \Omega + \frac{\varepsilon^2 \omega (a - b\omega)^3}{8bK_m \rho (\rho + \delta)^2} \left(\eta + \frac{\gamma\theta}{\rho + \sigma} \right)^2 + \\ &+ \frac{\beta^2 \gamma^2 (a - b\omega)^3 (a + 3b\omega)}{64b^2 \rho K_r (\rho + \sigma)^2}, \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} J_S^D &= \\ &= \frac{(a - b\omega)(a + b\omega)}{4b} \Omega + \frac{\varepsilon^2 a \omega (a - b\omega)^2}{8bK_m \rho (\rho + \delta)^2} \left(\eta + \frac{\gamma\theta}{\rho + \sigma} \right)^2 + \\ &+ \frac{\beta^2 \gamma^2 (a - b\omega)^2 (a + 3b\omega)(3a + b\omega)}{128b^2 \rho K_r (\rho + \sigma)^2}. \end{aligned} \quad (24)$$

其中 $\Omega = \left[\frac{E_0}{\rho + \delta} \left(\eta + \frac{\gamma\theta}{\rho + \sigma} \right) + \frac{\gamma G_0}{\rho + \sigma} \right]$.

2.2 集中式决策

假设制造商和零售商事先“达成”有约束力的合作协议, 以供应链整体利润最大化为目标确定最优策略, 用上标 C 表示. 供应链决策问题为

$$\begin{aligned} \max_{I, A, p} J_S^C &= \\ &= \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[p(\eta E + \gamma G)(a - bp) - \right. \\ &\left. \frac{K_m}{2} I^2 - \frac{K_r}{2} A^2 \right] dt. \end{aligned} \quad (25)$$

定理3 集中式决策下, 制造商最优生态研发努力、零售商最优促销努力和零售均价均衡策略分别为

$$\begin{cases} I^{C*} = \frac{\varepsilon a^2}{4K_m b (\rho + \delta)} \left(\eta + \frac{\gamma\theta}{\rho + \sigma} \right), \\ A^{C*} = \frac{\beta a^2 \gamma}{4K_r b (\rho + \sigma)}, \\ p^{C*} = \frac{a}{2b}. \end{cases} \quad (26)$$

证明 同理, 记 t 时刻以后, 供应链整体长期利润的最优价值函数为

$$J_S^{C*}(I, A, p) = e^{-\rho t} V_S^C(E, G).$$

$V_S^C(E, G)$ 对任意 $E \geq 0$ 和 $G \geq 0$ 都满足 HJB 方程

$$\begin{aligned} \rho V_S^C(E, G) = & \max_{I, A, p} \left[p(\eta E + \gamma G)(a - bp) - \right. \\ & \left. \frac{K_m}{2} I^2 - \frac{K_r}{2} A^2 + V_{SE}^{C'}(\varepsilon I - \delta E) + \right. \\ & \left. V_{SG}^{C'}(\beta A + \theta E - \sigma G) \right]. \end{aligned} \quad (27)$$

将式 (27) 右边关于 I, A 和 p 求一阶偏导, 并分别令其等于零, 可解得

$$I = \frac{\varepsilon V_{SE}^{C'}}{K_m}, \quad A = \frac{\beta V_{SG}^{C'}}{K_r}, \quad p = \frac{a}{2b}. \quad (28)$$

将式 (28) 代入 (27), 整理得

$$\begin{aligned} \rho V_S^C(E, G) = & \left(\frac{\eta a^2}{4b} - \delta V_{SE}^{C'} + \theta V_{SG}^{C'} \right) E + \left(\frac{\gamma a^2}{4b} - \sigma V_{SG}^{C'} \right) G + \\ & \frac{\varepsilon^2 (V_{SE}^{C'})^2}{2K_m} + \frac{\beta^2 (V_{SG}^{C'})^2}{2K_r}. \end{aligned} \quad (29)$$

同理, 假设 $V_S^C(E, G) = s_1 E + s_2 G + s_3$, 其中 s_1, s_2, s_3 为常数. 将 $V_S^C(E, G)$ 及其对 E 和 G 的一阶偏导代入式 (29), 可求得

$$\begin{cases} s_1^* = \frac{a^2}{4b(\rho + \delta)} \left(\eta + \frac{\gamma\theta}{\rho + \sigma} \right), \\ s_2^* = \frac{a^2\gamma}{4b(\rho + \sigma)}, \\ s_3^* = \frac{\varepsilon^2 s_1^{*2}}{2\rho K_m} + \frac{\beta^2 s_2^{*2}}{2\rho K_r}. \end{cases} \quad (30)$$

将式 (30) 代入 (28), 可以求得集中式决策下, 低碳供应链生态研发、促销与定价的均衡策略, 见式 (26). $\square$

可以看出, 集中式决策下, 产品批发价对供应链均衡策略不产生影响, 其他因素对均衡策略的影响与分散式决策类似, 不再赘述.

将最优策略 (26) 代入状态方程 (1) 和 (2), 得

$$\begin{cases} \dot{E}(t) = \frac{\varepsilon^2 a^2}{4bK_m(\rho + \delta)} \left(\eta + \frac{\gamma\theta}{\rho + \sigma} \right) - \delta E(t), \\ \dot{G}(t) = \frac{\beta^2 a^2 \gamma}{4bK_r(\rho + \sigma)} + \theta E(t) - \sigma G(t). \end{cases} \quad (31)$$

求解微分方程 (31), 可得如下定理.

定理 4 集中式决策下, 产品低碳度和商誉的最优轨迹分别为

$$\begin{cases} E^C(t) = E_\infty^C + (E_0 - E_\infty^C)e^{-\delta t}, \\ G^C(t) = \\ G_\infty^C + \frac{\theta}{\sigma - \delta} (E_0 - E_\infty^C)e^{-\delta t} + \\ \left[G_0 - G_\infty^C - \frac{\theta}{\sigma - \delta} (E_0 - E_\infty^C) \right] e^{-\sigma t}. \end{cases} \quad (32)$$

其中

$$\begin{cases} E_\infty^C = \frac{\varepsilon^2 a^2}{4bK_m\delta(\rho + \delta)} \left(\eta + \frac{\gamma\theta}{\rho + \sigma} \right), \\ G_\infty^C = \\ \frac{a^2}{4b\sigma} \left[\frac{\varepsilon^2 \theta}{K_m\delta(\rho + \delta)} \left(\eta + \frac{\gamma\theta}{\rho + \sigma} \right) + \right. \\ \left. \frac{\beta^2 \gamma}{K_r(\rho + \sigma)} \right]. \end{cases} \quad (33)$$

E_∞^C 和 G_∞^C 分别为集中式决策下产品低碳度和商誉的稳定值, 即 $t \rightarrow \infty$.

同样, 集中式决策下, 产品批发价对产品低碳度和商誉的最优轨迹及其稳定值均不产生影响, 其他因素的影响与分散式决策类似, 不再赘述.

结合最优策略 (26) 及状态轨迹 (32), 可以得出集中式决策下供应链整体长期利润为

$$\begin{aligned} J_S^C = & \frac{a^2}{4b} \Omega + \frac{\varepsilon^2 a^4}{32b^2 K_m \rho (\rho + \delta)^2} \left(\eta + \frac{\gamma\theta}{\rho + \sigma} \right)^2 + \\ & \frac{\beta^2 \gamma^2 a^4}{32b^2 \rho K_r (\rho + \sigma)^2}. \end{aligned} \quad (34)$$

2.3 比较与分析

设 $\Delta I = I^{C*} - I^{D*}$, $\Delta A = A^{C*} - A^{D*}$, $\Delta p = p^{C*} - p^{D*}$, 由式 (9) 和 (26), 可得

$$\begin{cases} \Delta I = \frac{\varepsilon [(a - b\omega)^2 + b^2\omega^2]}{4K_m b(\rho + \delta)} \left(\eta + \frac{\gamma\theta}{\rho + \sigma} \right); \\ \Delta A = \frac{\beta\gamma [(a - b\omega)^2 + 2b^2\omega^2]}{8K_r b(\rho + \sigma)}; \\ \Delta p = -\frac{\omega}{2}. \end{cases} \quad (35)$$

推论 3 与分散式决策相比, 集中式决策下制造商生态研发努力和零售商促销努力均有所提高, 而产品零售价降低了 $\omega/2$.

通过式 (35) 可直接看出推论 3 成立, 此略.

设 $\Delta E(t) = E^C(t) - E^D(t)$, $\Delta G(t) = G^C(t) - G^D(t)$, $\Delta E_\infty = E_\infty^C - E_\infty^D$, $\Delta G_\infty = G_\infty^C - G_\infty^D$, 根据式 (20)、(21)、(32) 和 (33), 可得

$$\begin{cases} \Delta E(t) = \Delta E_\infty (1 - e^{-\delta t}), \\ \Delta G(t) = \Delta G_\infty (1 - e^{-\sigma t}) + \frac{\theta \Delta E_\infty}{\sigma - \delta} (e^{-\sigma t} - e^{-\delta t}), \\ \Delta E_\infty = \frac{\varepsilon^2 [(a - b\omega)^2 + b^2\omega^2]}{4K_m b\delta(\rho + \delta)} \left(\eta + \frac{\gamma\theta}{\rho + \sigma} \right), \\ \Delta G_\infty = \frac{\theta}{\sigma} \Delta E_\infty + \frac{\beta}{\sigma} \Delta A. \end{cases} \quad (36)$$

推论 4 与分散式决策相比, 集中式决策下一时刻产品低碳度和商誉及其稳定值均有所提高.

证明 显然 $\Delta E_\infty \geq 0$, $\Delta G_\infty \geq 0$, $\Delta E(t) \geq 0$. 又因为

$$\Delta G(t)' = \beta \Delta A e^{-\sigma t} + \frac{\Delta E_\infty \theta \delta}{\sigma - \delta} (e^{-\delta t} - e^{-\sigma t}) \geq 0,$$

$$\Delta G(0) = 0,$$

故 $\Delta G(t) \geq 0$ 成立. $\square$

设 $\Delta J_S = J_S^C - J_S^D$, 根据式 (24) 和 (34), 可得

$$\Delta J_S = \quad (37)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\varepsilon^2 a}{32b^2 K_m \rho (\rho + \delta)^2} \left(\eta + \frac{\gamma \theta}{\rho + \sigma} \right)^2 [a^3 - \\ & 4b\omega(a - b\omega)^2] + \frac{\beta^2 \gamma^2}{128b^2 \rho K_r (\rho + \sigma)^2} [4a^4 - \\ & (a - b\omega)^2 (a + 3b\omega)(3a + b\omega)] + \frac{b\omega^2}{4} \Omega. \quad (38) \end{aligned}$$

推论 5 与分散式决策相比, 集中式决策下供应链整体长期利润有所提升. 如果制造商和零售商事先“达成”的协议中能够合理分配利润, 将会促使制造商和零售商的最优利润实现“双重帕累托改善”.

证明 对于式 (37), 令

$$f(a) = a^3 - 4b\omega(a - b\omega)^2,$$

$$g(a) = 4a^4 - (a - b\omega)^2(a + 3b\omega)(3a + b\omega).$$

求得

$$f(a)' = (3a^2 + 8b^2\omega^2 - 8ab\omega) \geq 0, f(b\omega) \geq 0,$$

故当 $a \geq b\omega$ 时, $f(a) \geq 0$ 恒成立. 同时, $g(b\omega) \geq 0$, $g(a)' = 4a^3 - 4b\omega(3a^2 + b^2\omega^2 - 7ab\omega)$, $g(b\omega)' \geq 0$, 且 $g(a)'' = 4(3a^2 + 7b^2\omega^2 - 6ab\omega) \geq 0$. 故当 $a \geq b\omega$ 时, $g(a) \geq 0$ 恒成立. 因此, $\Delta J_S \geq 0$. $\square$

3 数值模拟分析

通过外生变量赋值对相关结论进行数值模拟, 更为直观地分析不同决策情形下供应链最优均衡策略、状态变量最优轨迹及稳定值、供应链成员及其整体利润对于关键参数的敏感性(字母含义同前文). 借鉴 Giovanni^[26], Amrouche 等^[31]的研究成果, 将基准参数设置为: $a = 5$, $b = 1$, $\omega = 2$, $\eta = 0.5$, $\gamma = 0.5$, $\varepsilon = 0.8$, $\delta = 0.2$, $\beta = 1$, $\theta = 0.5$, $\sigma = 0.3$, $\rho = 0.3$, $K_m = 1$, $K_r = 1$, $E_0 = 10$, $G_0 = 50$.

首先, 根据基准参数, 绘制出两种决策情形下产品低碳度和商誉的最优轨迹(取 $t \in [0, 15]$, 见图 2); 然后, 鉴于产品批发价对均衡策略及相关变量的重要影响, 保持其他参数不变, 取 $\omega \in [1, 5]$, 绘制出两种决策情形下均衡策略、产品低碳度和商誉稳定值、供应链成员和总体利润随批发价的变化情况(见图 3); 最后, 按照 -50% , -25% , $+25\%$, $+50\%$ 的方式依次变动一个参数, 进行敏感性分析(见表 1).

从图 2 可以看出, 算例基准参数两种决策情形下产品低碳度和商誉均具有时间稳定趋向, 意味着即使产品低碳度(或商誉)受技术误差(或消费者遗忘)等因素干扰偏离稳定状态, 随着时间依然还能回归. 进一步, 由于 $E_0 < E_\infty^D < E_\infty^C$, 产品低碳度最优轨迹具

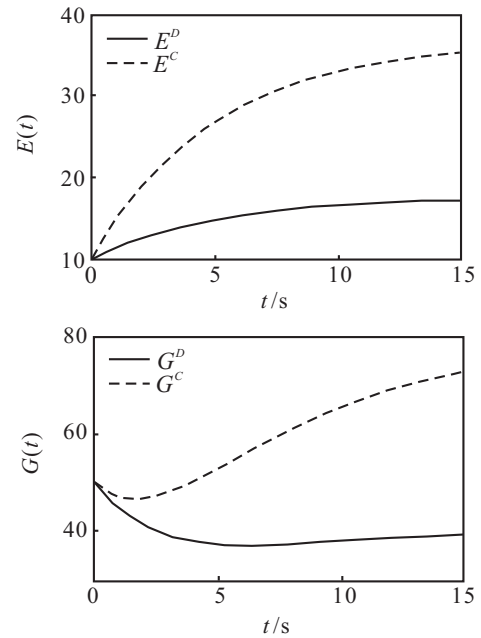


图 2 基准参数下状态变量的最优轨迹

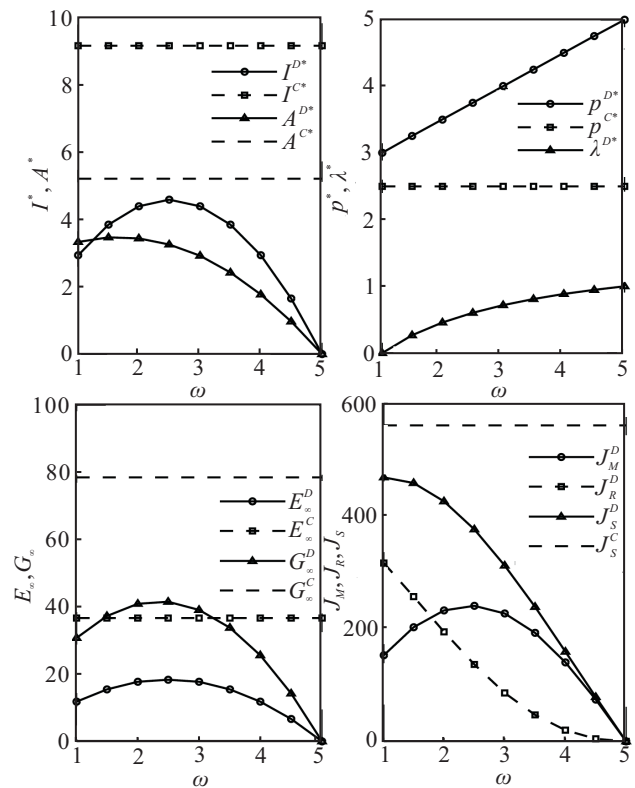


图 3 批发价对均衡策略和相关变量的影响

有单调递增特性, 且集中式决策下增加更快; 尽管 $G_0 < G_\infty^D < G_\infty^C$, 但受产品低碳度和促销努力的双重影响, 两种决策情形下商誉均是先减少后增加, 变化方向呈现多样性, 且同一时刻集中式决策下商誉值相对更大. 这一结果与王芹鹏等^[14]的结论有所不同, 其研究发现低碳商誉随时间呈现单调性. 这是因为王芹鹏等^[14]假定低碳商誉只受决策变量生态研发努力单一影响, 本文假定低碳商誉同时受状态变量产品低碳度和决策变量促销努力的共同影响, 更加贴近现实.

表 1 相关参数对均衡策略、状态变量稳定值和供应链整体长期利润的敏感性分析

参 数	I^{D*}/I^{C*}	A^{D*}/A^{C*}	p^{D*}/p^{C*}	λ^{D*}	$E_{\infty}^D/E_{\infty}^C$	$G_{\infty}^D/G_{\infty}^C$	J_S^D/J_S^C
基 准	4.40/9.17	3.44/5.21	3.50/2.50	0.4545	17.60/36.67	40.79/78.47	426.10/560.26
$a = (2.50 \rightarrow 7.50)$	+ +	+ +	+ +	-	+ +	+ +	+ +
$b = (0.50 \rightarrow 1.50)$	- -	- -	- -	+	- -	- -	- -
$\eta = (0.25 \rightarrow 0.75)$	+ +	⊗ ⊗	⊗ ⊗	⊗	+ +	+ +	+ +
$\gamma = (0.25 \rightarrow 0.75)$	+ +	+ +	⊗ ⊗	⊗	+ +	+ +	+ +
$\varepsilon = (0.40 \rightarrow 1.20)$	+ +	⊗ ⊗	⊗ ⊗	⊗	+ +	+ +	+ +
$\beta = (0.50 \rightarrow 1.50)$	⊗ ⊗	+ +	⊗ ⊗	⊗	⊗ ⊗	+ +	+ +
$\theta = (0.25 \rightarrow 0.75)$	+ +	⊗ ⊗	⊗ ⊗	⊗	+ +	+ +	+ +
$\delta = (0.10 \rightarrow 0.30)$	- -	⊗ ⊗	⊗ ⊗	⊗	- -	- -	- -
$\sigma = (0.15 \rightarrow 0.45)$	- -	- -	⊗ ⊗	⊗	- -	- -	- -
$K_m = (0.50 \rightarrow 1.50)$	- -	⊗ ⊗	⊗ ⊗	⊗	- -	- -	- -
$K_r = (0.50 \rightarrow 1.50)$	⊗ ⊗	- -	⊗ ⊗	⊗	⊗ ⊗	- -	- -
$\rho = (0.15 \rightarrow 0.45)$	- -	- -	⊗ ⊗	⊗	- -	- -	- -

结合图3可以看出,本算例中集中式决策下各变量不受产品批发价的影响.分散式决策下,制造商最优生态研发、零售商最优促销、产品低碳度稳定值、商誉稳定值以及制造商长期利润均伴随产品批发价 ω 的增加而呈现先增加后减少趋势,且在不同 ω 处达到各自峰值.同时,产品批发价正向影响产品零售价和制造商促销参与率,负向影响零售商长期利润和供应链整体利润.更进一步,分散式决策下,当产品批发价较低时,零售商所获得的长期利润高于制造商;伴随着批发价的提高,制造商边际利润不断增加,零售商边际利润不断降低,随后制造商长期利润高于零售商;当批发价超过某阈值时(图3中 $\omega > 2.5$),尽管批发价的增加能够给制造商带来较高的边际利润,但是依然无法抵消因研发努力和促销参与而带来更高的成本,导致制造商长期利润和供应链整体利润不断降低.

表1中“+”表示增加;“-”表示减少;“⊗”表示不变.在上述算例给定模型参数取值范围内,由表1可以看出,同一参数(除去批发价 ω)对两种决策情形下同一变量的变化趋势有相同影响.不同参数的影响情况具体如下:

1) 价格敏感系数 b 负向影响制造商生态研发努力、零售商促销努力、产品零售价、产品低碳度和商誉稳定值以及供应链整体利润,正向影响制造商促销参与率;市场规模 a 对相关变量的影响趋势与价格敏感系数 b 的影响完全相反.需要指出的是,当价格敏感系数 b 越大时,分散式决策下制造商促销参与率越高,这是因为在同一价格水平下,价格敏感系数 b 越大,市

场需求越小,制造商需要提高促销参与率,以期增加零售商促销的积极性.当市场规模 a 越大时,市场(潜在)需求越大,零售商所获边际利润越大,促销投入的积极性越高,此时制造商可适度降低促销参与率,提高自身利润水平.

2) 消费者低碳偏好 η 、生态研发效率 ε 和产品低碳度对商誉的边际贡献率 θ 三个参数对表1中同一变量变化趋势的影响相同,正向影响生态研发努力、产品低碳度和商誉稳定值、供应链整体长期利润.这是因为,生态研发效率 ε 越高,减排效果越好,在同一批发价和研发成本下,制造商将会加大研发投入,获得更多利润,产品低碳度和商誉的稳定值也随之增加;伴随着低碳偏好愈加明显,市场需求越来越大,供应链因此获得更多利润.然而,上述3个参数对零售商促销努力却不产生影响.作为追随者的零售商,确定上述3个参数会促使制造商加大研发投入,在同一零售价和制造商促销参与率下,将会选择维持原有促销投入,避免增加不必要的促销成本,发挥后发优势.这一结论与Giovanni^[26]的研究结果不同,他发现,研发努力对商誉的边际贡献率同时对制造商研发努力和零售商促销努力产生正向影响.这一分歧的出现是因为,本文假定零售价为内生变量,由追随者零售商决策,而Giovanni假定批发价为内生变量,由领导者制造商决策.进一步,与上述3个参数相比,产品低碳度衰退率 δ 对相关变量的影响完全相反(无影响除外).

3) 消费者品牌偏好 γ 和零售商促销对商誉的边际贡献率 β 对表1中同一变量变化趋势的影响较为相似,最大的不同在于前者正向影响制造商生态研发

努力和产品低碳度稳定值,而后者却没有影响.由于消费者品牌偏好 γ 较高时,同一商誉水平会带来更多的市场需求.鉴于此,制造商愿意通过加大生态研发努力提高产品低碳度来间接提高商誉,零售商也愿意加大促销努力直接正向影响商誉,从而进一步提高产品低碳度和商誉稳定值,正向影响供应链长期利润.但是,制造商基于自身利润最大化考虑,并不会因为零售商促销对商誉边际贡献率 β 的增加而加大生态研发努力,产品低碳度稳定值也因此不会得到提高.进一步,商誉衰退率 σ 对相关变量的影响与消费者品牌偏好 γ 的影响完全相反(无影响除外).

成本系数(K_m, K_r)和贴现因子 ρ 对相关变量的影响相似,为负向影响或无影响,不再赘述.

4 结 论

目前经济管理领域常用最优控制和微分博弈解决供应链动态研发-促销问题,但鲜有文献同时将价格因素作为内生变量纳入分析框架.本文在现有文献的基础上,假定产品低碳度和商誉都随时间动态变化,而且前者还对后者产生影响,采用可分离相乘的函数形式描述价格和非价格因素(产品低碳度和商誉)对市场的影响,构建微分博弈模型,研究不同决策情形下低碳供应链最优生态研发、促销和定价策略,并结合模拟仿真法,对相关参数进行了敏感性分析.研究发现:

1) 与分散式决策相比,集中式决策下产品零售价有所降低,而制造商最优生态研发努力、零售商最优促销努力、状态变量最优轨迹及其稳定值和供应链整体长期利润都有所提高,但供应链成员自身利润的相对大小却与利润分配协议有关;

2) 分散式决策下,制造商最优促销参与率与市场规模、价格敏感系数和批发价有关,且批发价对均衡策略、状态变量稳定值、供应链成员及整体长期利润都产生重要复杂影响;

3) 两种决策情形下,产品低碳度随时间单调变化,而由于产品低碳度对商誉的影响,商誉随时间变化呈现多样性;

4) 除批发价之外,同一参数对两种决策情形下同一变量的变化趋势有相同影响.

因此,企业应根据不同合作模式及利润分配协议,结合相关参数制定差异化生态研发、促销投资和定价策略,努力实现自身利润及整体利润的“双重帕累托改善”.但是,本文还存在一定的局限性,今后可考虑:在低碳供应链中同时考虑批发价和零售价的最优定价;引入政府环境规制因素对低碳减排的影响.

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] Eiadat Y, Kelly A, Roche G, et al. Green and Competitive? An Empirical Test of the Mediating Role of Environmental Innovation Strategy[J]. J of World Business, 2008, 43(2): 131-145.
- [3] Schiederig T, Tietze F, Herstatt C. Green innovation in technology and innovation management: An exploratory literature review[J]. R&D Management, 2012, 42(2): 180-192.
- [4] 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.
- [5] Matthews H S, Hendrickson C T, Weber C L. The importance of carbon footprint estimation boundaries[J]. Environmental Science and Technology, 2008, 42(16): 5839-5842.
- [6] 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.)
- [7] 安崇义, 唐跃军. 排放权交易机制下企业碳减排的决策模型研究[J]. 经济研究, 2012, 58(8): 45-58.
(An C Y, Tang Y J. Research on decision model of enterprises' carbon emission reduction under emission trading system[J]. Economic Research J, 2012, 58(8): 45-58.)
- [8] 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, 2013, 29(4): 651-658.
(Xie X P, Zhao D Z. Low carbon supply chain production and trading decision-making mechanism[J]. Control and Decision, 2013, 29(4): 651-658.)
- [9] 胡本勇, 彭其渊. 基于广告-研发的供应链合作博弈分析[J]. 管理科学学报, 2008, 11(2): 61-70.
(Hu B Y, Peng Q Y. Game analysis on cooperation based on R&D-advertisement in Supply chain[J]. J of Management Science in China, 2008, 11(2): 61-70.)
- [10] 熊新生, 赵勇. 供应链中耐用品的广告投入和零售价策略分析[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(6): 1425-1430.
(Xiong X S, Zhao Y. Optimal advertising and retail pricing in a durable goods supply chain[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2014, 34(6): 1425-1430.)

- [11] Nair A, Narasimhan R. Dynamics of competing with quality-and advertising-based goodwill[J]. *European J of Operational Research*, 2006, 175(1): 462-474.
- [12] El Ouardighi F, Pasin F. Quality improvement and goodwill accumulation in a dynamic duopoly[J]. *European J of Operational Research*, 2006, 175(2): 1021-1032.
- [13] Jorgensen S. Optimal production, purchasing and pricing: A differential game approach[J]. *European J of Operational Research*, 1986, 24(1): 64-76.
- [14] 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.)
- [15] Jorgensen S, Taboubi S, Zaccour G. Cooperative advertising in a marketing channel[J]. *J of Optimization Theory and Application*, 2001, 110(1): 145-158.
- [16] Nerlove M, Arrow K J. Optimal advertising policy under dynamic conditions[J]. *Economica*, 1962, 29(114): 129-142.
- [17] 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.)
- [18] Chen Y S. The drivers of green innovation and green image: green core competence[J]. *J of Business Ethics*, 2008, 81(3): 531-543.
- [19] 谢鑫鹏, 赵道致, 刘永军. 需求具有碳排放敏感性的低碳供应链收益共享寄售契约[J]. *系统管理学报*, 2015, 24(1): 107-115.
(Xie X P, Zhao D Z, Liu Y J. Revenue sharing consignment contract of low-carbon supply chain with carbon-emission sensitive demand[J]. *J of Systems and Management*, 2015, 24(1): 107-115.)
- [20] Zhang J, Chiang W K, Liang L. Strategic pricing with reference effects in a competitive supply chain[J]. *Omega*, 2014, 44(2): 126-135.
- [21] El Ouardighi F, Kogan K. Dynamic conformance and design quality in a supply chain: An assessment of contract's coordinating power[J]. *Annals of Operations Research*, 2013, 211(1): 137-166.
- [22] El Ouardighi F. Supply quality management with optimal wholesale price and revenue sharing contracts: A two-stage game approach[J]. *Int J of Production Economics*, 2014, 156(5): 260-268.
- [23] Chutani A, Sethi S P. Optimal advertising and pricing in a dynamic durable goods supply chain[J]. *J of Optimization Theory and Applications*, 2012, 154(2): 615-643.
- [24] D'Aspremont, Jacquemin. Cooperative and noncooperative R&D in duopoly with spillovers[J]. *The American Economic Review*, 1988, 78(5): 1133-1137.
- [25] 宋之杰, 孙其龙. 减排视角下企业的最优研发与补贴[J]. *科研管理*, 2012, 33(10): 80-89.
(Song Z J, Sun Q L. The optimal R&D investment and subsidy under the perspective of emission reduction[J]. *Science Research Management*, 2012, 33(10): 80-89.)
- [26] De Giovanni P. Quality Improvement vs. Advertising support: Which strategy works better for a manufacturer?[J]. *European J of Operations Research*, 2011, 208(2): 119-130.
- [27] Prasad A, Sethi S P. Competitive advertising under uncertainty: A stochastic differential game approach[J]. *J of Optimization Theory and Applications*, 2004, 123(1): 163-185.
- [28] 游达明, 朱桂菊. 不同竞争模式下企业生态技术创新最优研发与补贴[J]. *中国工业经济*, 2014, 31(8): 122-133.
(You D M, Zhu G J. The Enterprise's Eco-technology innovation optimal R&D investment and subsidy under different co-competition[J]. *China Industrial Economics*, 2014, 31(8): 122-133.)
- [29] Grosset L, Roberti P, Viscolani B. A goodwill model with predatory advertising[J]. *Operations Research Letters*, 2011, 39(6): 419-422.
- [30] Zhang J, Gou Q L, Liang L, et al. Supply chain coordination through cooperative advertising with reference price effect[J]. *Omega*, 2013, 41(2): 345-353.
- [31] Amrouche N, Martin-Herran G, Zaccour G. Feedback Stackelberg equilibrium strategies when the private label competes with the national brand[J]. *Annals of Operations Research*, 2008, 164(1): 79-95.

(责任编辑: 孙艺红)