

# 基于碳排放限额和低碳销售努力的博弈模型分析及控制

司凤山<sup>†</sup>, 王 晶, 戴道明

(安徽财经大学 管理科学与工程学院, 安徽 蚌埠 233030)

**摘 要:** 以双渠道供应链为研究对象, 在考虑碳排放限额和低碳销售努力的基础上, 分别构建单周期静态博弈模型和多周期动态博弈模型, 研究最优决策和系统稳定性问题. 在静态模型中, 给出集中决策和分散决策下的最优策略解析式; 在动态模型中, 探究博弈系统的局部渐近稳定性条件, 讨论时滞等参数对系统稳定性的影响, 并对失稳系统进行有效控制. 研究表明: 提高碳排放限额能够增加供应链系统利润; 随着低碳销售努力的增加, 供应链系统利润和制造商利润均呈下降趋势; 不合理的延迟策略将导致系统失去稳定.

**关键词:** 碳排放限额; 低碳销售努力; 微分价格博弈; Hopf 分岔; 稳定性; 控制

**中图分类号:** F224; TP273

**文献标志码:** A

## Analysis and control of game model based on carbon emission quota and low carbon sales efforts

SI Feng-shan<sup>†</sup>, WANG Jing, DAI Dao-ming

(School of Management Science and Engineering, Anhui University of Finance and Economics, Bengbu 233030, China)

**Abstract:** Considering the carbon emission quota and low carbon sales efforts in the dual-channel supply chain, the single period static game model and the multi-period dynamic game model are constructed to explore the optimal decision and the system stability respectively. In the static model, the optimal decision analytic formulas under the centralized decision and the decentralized decision are given. In the dynamic model, the local asymptotic stability conditions of the game system are explored, and the effect of delay parameters on the stability of the system is discussed. In addition, the instability system is effectively controlled. The study shows that the increase of carbon emission quota can increase the profit of the supply chain system; with the increase of low carbon sales efforts, the profits of the supply chain system and manufacturer will be reduced; the unreasonable delay parameter will lead to instability of the system.

**Keywords:** carbon emission quota; low carbon sales efforts; differential price game; Hopf bifurcations; stability; control

## 0 引 言

我国经济在取得巨大成就的同时也对环境造成严重破坏, 这迫使企业必须努力发展低碳经济, 减少碳排放量. 为此, 本文构建基于碳排放限额和低碳销售努力的博弈模型, 分析制造商和零售商的最优定价和碳减排策略, 探究决策变量对博弈模型稳定性的影响, 力争为企业决策提供参考.

关于两级供应链碳减排最优策略问题, 程永伟等<sup>[1]</sup>和王一雷等<sup>[2]</sup>研究了碳减排博弈模型中混合碳政策和联合碳减排机制对定价和碳减排策略的影响. 徐朗等<sup>[3]</sup>和支帮东等<sup>[4]</sup>探究了斯坦科尔伯格博

弈模型分别在竞合模式和联合决策下的最优碳减排策略问题. 此外, 学者们还考虑了公平关切<sup>[5-6]</sup>、碳限额和渠道协作<sup>[7]</sup>、消费者低碳偏好和政府补贴<sup>[8]</sup>、需求信念偏差<sup>[9]</sup>等因素对最优碳减排策略的影响. 本文在前人研究的基础上, 给出集中决策和分散决策下的两级供应链的最优碳减排策略解析式.

关于双渠道供应链中的碳减排问题, 申成然等<sup>[10]</sup>在考虑消费者低碳偏好的基础上研究了风险规避和碳减排努力的关系问题. 周艳菊等<sup>[11]</sup>分析了双渠道供应链竞合模式下决策参数对碳减排和利润的影响. 汪传旭等<sup>[12]</sup>分析了双渠道闭环供应链中碳限

收稿日期: 2018-05-27; 修回日期: 2018-08-30.

基金项目: 安徽省教育厅高校人文社会科学研究重点项目(SK2017A0434); 安徽省教育厅高校优秀青年人才支持计划项目(gxyq2017101); 安徽省哲学社会科学规划青年项目(AHSKQ2016D29); 安徽省教育厅自然科学研究重大项目(KJ2015ZD02).

责任编辑: 张维海.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: sifs2007@126.com.

额和政府补贴对闭环供应链最优决策的影响. Zhou等<sup>[13]</sup>和 Xu等<sup>[14]</sup>对比分析了碳排放约束下的双渠道供应链在集中决策和分散决策下的最优定价策略. 借鉴前人研究的理论和方法, 本文在分析两级供应链中的碳减排约束时, 不但考虑双渠道和碳限额因素, 而且还考虑制造商的碳减排投入和碳交易因素, 将使构建的博弈模型更符合实际.

针对供应链中的销售努力问题, 张智超等<sup>[15]</sup>研究了公平关切和销售努力下的双渠道供应链在集中决策和分散决策下的最优策略. 李建斌等<sup>[16]</sup>和 Pu等<sup>[17]</sup>分析了双渠道供应链中存在搭便车行为时的最优策略, 探究了最优零售价、最优销售努力和搭便车行为的关系. 覃艳华等<sup>[18]</sup>研究了基于需求均匀分布和销售努力的双渠道供应链博弈模型的最优策略. 李新然等<sup>[19]</sup>和王道平等<sup>[20]</sup>构建了考虑销售努力与其他因素共同作用下的供应链决策模型, 对比分析了不同决策模式下的最优策略. 鉴于此, 本文还进一步综合考虑零售商的低碳销售努力程度对产品定价和碳减排最优策略的影响.

综上所述, 在研究方法上, 学者们普遍采用运筹和优化的方法给出最优策略的解析式, 比较最优策略在不同决策模式下的差异性, 分析各种因素对最优策略的影响, 但是在双渠道供应链中综合运用运筹优化的方法和复杂系统动力学方法的研究并不多见. 在研究内容上, 在双渠道供应链中同时考虑碳减排限额、碳交易、碳减排投入和低碳销售努力的研究还比较少见. 因此, 本文在前人研究的基础上, 综合考虑多种决策因素的共同作用, 构建双渠道供应链的单周期静态博弈模型, 借助传统方法给出最优策略的解析表达式, 以及分析碳减排限额、碳减排量和低碳销售努力对最优策略的影响; 同时, 还构建带双时滞的动态价格博弈模型, 利用非线性动力学理论和复杂系统理论, 研究多种决策参数对系统动力学演化行为的影响, 并对失稳系统进行有效控制. 两种类型的博弈模型和研究方法可以有效相互补充, 能够从不同视角加深对博弈系统的认识和理解, 有助于促进制造商和零售商的科学决策, 这是本文与以往研究的不同之处.

## 1 问题描述与假设

双渠道供应链由一个制造商和一个零售商构成, 制造商负责产品生产, 单位产品的生产成本为  $c$ , 其一方面把产品以价格  $w$  批发给零售商进行线下销售, 零售价为  $p_r$ ; 另一方面制造商还通过网络渠道进行线上销售, 直销价为  $p_m$ . 制造商生产过程中产生碳排放, 单位产品的初始碳排放量为  $e_0$ . 政府为了鼓励制

造商实施节能减排, 规定其一定时期内的碳排放限额为  $K_c$ . 若在该时期内, 制造商的碳排放总量超过限额值, 则需要向政府交纳碳税, 单位碳排放量的税额为  $p_e$ ; 若制造商该时期有剩余额度, 则可以交易额获取收益, 单位碳排放额度的交易价也为  $p_e$ . 因此, 企业为了获取更多利润, 可以提高碳减排技术以降低单位产品的碳排放量. 单位产品的碳减排量为  $e$ , 所以改善后的单位产品的碳排放量为  $e_0 - e$ . 与此同时, 零售商在运营过程中也努力降低碳排放量以响应政府的低碳经济政策和吸引更多低碳偏好的消费者, 零售商的低碳销售努力程度为  $s$ . 另外,  $D_m$  和  $D_r$  分别为直销渠道和零售商渠道的产品市场需求量.

根据实际情况且不失一般性, 给出如下假设:

1) 制造商和零售商为有限理性, 在 Stackelberg 博弈中, 制造商是领导者, 零售商是追随者.

2) 制造商为了降低单位产品的碳排放量, 需要支付一定的碳减排技术研发成本. 这里仅考虑一次性资金投入的情况, 如果单位产品的碳减排量为  $e$ , 则制造商需要承担的成本为  $k_m e^2/2$ ,  $k_m$  为碳减排成本系数. 制造商的其他成本均忽略.

3) 零售商的低碳销售成本也仅考虑一次性投入的状况. 若零售商的低碳销售努力程度为  $s$ , 则需要承担的成本为  $k_r s^2/2$ , 其中  $k_r$  为低碳销售努力的成本系数. 零售商的其他成本均忽略.

4) 为了确保制造商和零售商能正常获利, 设定  $p_r > w$ ,  $p_m > w > c$ .

5) 制造商单位产品的碳减排量不高于单位产品的碳排放量, 即  $e \leq e_0$ .

6) 消费者具有低碳偏好, 所以对消费者对零售商的低碳销售努力颇为敏感.

## 2 单周期静态博弈模型

制造商和零售商的需求函数<sup>[21]</sup>分别为

$$D_m = a - \beta p_m + \gamma p_r - \eta s, \quad (1)$$

$$D_r = a - \beta p_r + \gamma p_m + \eta s. \quad (2)$$

其中:  $a$  为产品最大潜在需求量;  $\beta$  为价格敏感系数;  $\gamma$  为交叉价格敏感系数;  $\eta$  为低碳销售努力敏感系数; 根据对需求影响程度的不同, 有  $\beta > \gamma > \eta$ .

### 2.1 集中决策

集中决策下的供应链系统利润为

$$\begin{aligned} \pi_c(p_m, p_r, e) = & (p_m - c)D_m + (p_r - c)D_r - \\ & [(e_0 - e)(D_m + D_r) - K_c]p_e - \\ & k_m e^2/2 - k_r s^2/2. \end{aligned} \quad (3)$$

其中:  $\pi_c$  为集中决策下的供应链系统利润, 下标  $c$  表示集中决策. 下列命题中, 上标 \* 表示最优策略.

**命题1** 集中决策中, 当满足  $\beta - \gamma < k_m/p_e^2$  且系统利润最大时, 存在唯一的最优决策值. 最优直销价为  $p_{m,c}^* = (A_1 + A_2 + A_3 + A_4)/A_0$ , 最优零售价为  $p_{r,c}^* = (A_1 - A_2 + A_3 - A_4)/A_0$ , 最优碳减排量为  $e_c^* = A_6/A_5$ . 其中

$$\begin{aligned} A_0 &= 2(\gamma^2 - \beta^2)(p_e^2\beta - p_e^2\gamma - k_m), \\ A_1 &= 2ap_e^2(\gamma^2 - \beta^2), \quad A_2 = p_e^2s\eta(\beta - \gamma)^2, \\ A_3 &= \beta k_m(a + c\beta + e_0p_e\beta) + \gamma k_m(a - c\gamma - e_0p_e\gamma), \\ A_4 &= s\eta k_m(\gamma - \beta), \quad A_5 = p_e^2(\beta - \gamma) - k_m, \\ A_6 &= p_e[(c + e_0p_e)(\beta - \gamma) - a]. \end{aligned}$$

**证明** 化简式(3)为

$$\begin{aligned} \pi_c(p_m, p_r, e) &= \\ &(p_m - c + p_e e - p_e e_0)D_m + (p_r - c + \\ &p_e e - p_e e_0)D_r + p_e K_c - k_m e^2/2 - k_r s^2/2. \end{aligned}$$

经计算可得,  $\pi_c(p_m, p_r, e)$  关于  $p_m, p_r$  和  $e$  的海塞矩阵为  $H_1$ , 其一阶顺序主子式  $\text{Det}(H_{11}) = -2\beta < 0$ ; 二阶顺序主子式  $\text{Det}(H_{12}) = 4(\beta^2 - \gamma^2) > 0$ ; 当  $\beta - \gamma < k_m/p_e^2$  时, 三阶顺序主子式  $\text{Det}(H_{13}) = 4(\beta^2 - \gamma^2)(p_e^2\beta - p_e^2\gamma - k_m) < 0$ . 此时, 海塞矩阵是负定的,  $\pi_c(p_m, p_r, e)$  是关于  $p_m, p_r$  和  $e$  的严格凹函数, 即存在唯一的最优决策值. 联立

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi_c(p_m, p_r, e)}{\partial p_m} &= 0, \quad \frac{\partial \pi_c(p_m, p_r, e)}{\partial p_r} = 0, \\ \frac{\partial \pi_c(p_m, p_r, e)}{\partial e} &= 0, \end{aligned}$$

即可求得最优值.  $\square$

此时, 供应链的最优系统利润为

$$\pi_c^* = (B_1 + B_2 + B_3)/B_0. \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} B_0 &= 2(\beta^2 - \gamma^2)[k_m - (\beta - \gamma)p_e^2], \\ B_1 &= (\beta - \gamma)^2 p_e^2 [(\beta + \gamma)k_r s^2 - \eta^2 s^2 - \\ &2K_c p_e(\beta + \gamma)], \\ B_2 &= k_m(\beta + \gamma)(a - c\beta + c\gamma)^2 + k_m s^2(\beta - \gamma)\eta^2 + \\ &k_m s^2(\gamma^2 - \beta^2)k_r, \\ B_3 &= k_m p_e(\beta^2 - \gamma^2)[2K_c + (\beta - \gamma)e_0^2 p_e - \\ &2e_0(a - c\beta + c\gamma)]. \end{aligned}$$

**命题2** 集中决策中, 低碳销售努力  $s$  与最优直销价  $p_{m,c}^*$  负相关, 与最优零售价  $p_{r,c}^*$  正相关; 最优系统利润  $\pi_c^*$  与碳排放限额  $K_c$  正相关, 而当  $\eta^2/(\beta + \gamma) > k_r$  时, 其与低碳销售努力  $s$  正相关, 反之负相关.

**证明** 由于

$$\begin{aligned} -\frac{1}{2} &< \frac{\partial p_{m,c}^*}{\partial s} = -\frac{\eta}{2(\gamma + \beta)} < 0, \\ 0 &< \frac{\partial p_{r,c}^*}{\partial s} = \frac{\eta}{2(\gamma + \beta)} < \frac{1}{2}, \\ \frac{\partial \pi_c^*}{\partial K_c} &= p_e > 0. \end{aligned}$$

又因  $\frac{\partial \pi_c^*}{\partial s} = \frac{s\eta^2}{\beta + \gamma} - sk_r$ , 故当  $\eta^2/(\beta + \gamma) > k_r$  时,  $\pi_c^*$  与  $s$  正相关; 当  $\eta^2/(\beta + \gamma) < k_r$  时, 二者负相关.  $\square$

命题2表明, 低碳销售努力  $s$  对最优直销价  $p_{m,c}^*$  和最优零售价  $p_{r,c}^*$  的影响恰恰相反. 而且  $s$  增加一个单位,  $p_{m,c}^*$  就会降低少于半个单位, 而  $p_{r,c}^*$  则会增加少于半个单位. 提高低碳销售努力不一定会增加供应链系统利润, 但是制造商向政府争取较大的碳排放限额则一定能获得更大的利润, 且  $K_c$  增加一个单位, 最优系统利润就会增加  $p_e$  个单位.

## 2.2 分散决策

在分散决策中考虑 Stackelberg 博弈, 制造商优先决定直销价格  $p_m$ 、批发价格  $w$  和碳减排量  $e$ ; 零售商在制造商决策的基础上决定零售价  $p_r$  和低碳销售努力  $s$ . 制造商和零售商的利润分别为

$$\begin{aligned} \pi_m(p_m, w, e) &= \\ &(p_m - c)D_m + (w - c)D_r - \\ &[(e_0 - e)(D_m + D_r) - K_c]p_e - k_m e^2/2, \quad (5) \end{aligned}$$

$$\pi_r(p_r, s) = (p_r - w)D_r - k_r s^2/2. \quad (6)$$

**命题3** Stackelberg 博弈中, 当满足  $\eta^2 < 2\beta k_r$  且零售商利润最大时, 存在唯一最优零售价为  $p_{r,d}^* = (E_1 + E_2 + E_3 + E_4)/E_0$ , 最优低碳销售努力为  $s_d^* = E_5/E_0$ ; 当满足  $\text{Det}(H_{21}) < 0, \text{Det}(H_{22}) > 0, \text{Det}(H_{23}) < 0$  且制造商利润最大时, 存在唯一最优直销价为  $p_{m,d}^* = (C_1 + C_2 + C_3)/C_0$ , 最优批发价为  $w_d^* = (C_4 + C_5 + C_6 + C_7 + C_8)/C_0$ , 最优碳减排量为  $e_d^* = D_2/(D_0 + D_1)$ . 其中

$$\begin{aligned} C_0 &= (\beta - \gamma)[(\gamma - \beta)\eta^4 + 4\beta k_r(\beta + \\ &\gamma)(2\beta k_r - \eta^2)], \\ C_1 &= (ep_e - c - e_0p_e)(\beta - \gamma)^2\eta^4, \\ C_2 &= [(ep_e - c - e_0p_e)(\beta - \gamma)(\beta + 3\gamma) - \\ &3a\beta - a\gamma]\eta^2\beta k_r, \\ C_3 &= 4\beta^2 k_r^2(\beta + \gamma)[a + (c - ep_e + e_0p_e)(\beta - \gamma)], \\ C_4 &= [(c - ep_e + e_0p_e)(\beta - \gamma) - 2a](\beta - \gamma)\eta^4, \\ C_5 &= -4\beta^3\eta^2 k_r(c + e_0p_e - ep_e) - 3\beta\gamma\eta^2 k_r(a - \\ &c\beta + ep_e\beta - e_0p_e\beta), \\ C_6 &= \gamma^2(a + 2\beta ep_e - 2c\beta - 2\beta e_0p_e), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_7 &= \gamma^3(c + e_0 p_e - e p_e), \\
C_8 &= 4\beta^2[a + (c - e p_e + e_0 p_e)(\beta - \gamma)](\beta + \gamma)k_r^2; \\
D_0 &= 2p_e^2\beta k_r(\beta^2 - \gamma^2)[(3\beta + \gamma)k_r - 2\eta^2], \\
D_1 &= k_m[(\beta - \gamma)\eta^4 + 4\beta(\beta + \gamma)k_r(\eta^2 - 2\beta k_r)], \\
D_2 &= -2p_e\beta k_r(\beta + \gamma)[a - (c + e_0 p_e)(\beta - \gamma)] \times \\
&\quad [(\beta + \gamma)k_r - 2\eta^2]; \\
E_0 &= (\beta - \gamma)\{2p_e^2\beta k_r(\beta^2 - \gamma^2)[(3\beta + \gamma)k_r - 2\eta^2] + \\
&\quad k_m(\beta - \gamma)\eta^4 + 4k_m\beta k_r(\beta + \gamma)(\eta^2 - 2\beta k_r)\}, \\
E_1 &= 2ap_e^2\beta k_r(\beta^2 - \gamma^2)[(3\beta + \gamma)k_r - 2\eta^2], \\
E_2 &= [2a - (c + e_0 p_e)(\beta - \gamma)](\beta - \gamma)\eta^4 k_m, \\
E_3 &= [(c + e_0 p_e)(\beta - \gamma)(3\beta + \gamma) + \\
&\quad a(\beta + 3\gamma)]\eta^2\beta k_r k_m, \\
E_4 &= 2k_r^2\beta k_m(\beta + \gamma)[(c + e_0 p_e)(\gamma^2 - \beta^2) - \\
&\quad a(3\beta - \gamma)], \\
E_5 &= (\beta^2 - \gamma^2)(\eta^2 - 2\beta k_r)\eta k_m[a - \\
&\quad (c + e_0 p_e)(\beta - \gamma)]; \\
\text{Det}(H_{21}) &= \frac{2(\gamma - \beta)\eta^2 + 2(2\beta^2 - \gamma^2)k_r}{\eta^2 - 2\beta k_r}, \\
\text{Det}(H_{22}) &= \frac{1}{(\eta^2 - 2\beta k_r)^2} \{ (4\gamma - 5\beta)\eta^4\beta + k_r\beta[2\eta^2 \times \\
&\quad (4\beta^2 - \beta\gamma - 2\gamma^2) - \beta\gamma^2 k_r] + 2\beta k_r(\eta^2 - \beta k_r) \times \\
&\quad [(4\beta^2 - \gamma - 2\beta\gamma)\eta^2 + \beta\gamma k_r](3\gamma^2 - 4\beta^2) \}, \\
\text{Det}(H_{23}) &= \frac{g_1 g_2 - g_3 + g_4}{(\eta^2 - 2\beta k_r)^3}, \\
g_1 &= (p_e \eta^2 - p_e \beta k_r)(\beta - \gamma), \\
g_2 &= 2p_e(\eta^2 - \beta k_r)(\gamma - \beta)[(\gamma - \beta)\eta^2 + \\
&\quad (2\beta^2 - \gamma^2)k_r] + p_e(\beta - \gamma)(\beta\eta^2 + \\
&\quad 2\beta\gamma k_r - \eta^2\gamma)[(2\beta + \gamma)k_r - \eta^2], \\
g_3 &= p_e(\beta - \gamma)[(2\beta + \gamma)k_r - \eta^2][(2p_e\beta - 2p_e\gamma) \times \\
&\quad (2\beta k_r + \gamma k_r - \eta^2)\beta^2 k_r - (p_e\eta^2 - p_e\beta k_r) \times \\
&\quad (\gamma - \beta)(\eta^2\gamma - 2\beta k_r\gamma - \eta^2\beta)], \\
g_4 &= k_m(\eta^2 - 2\beta k_r)\{ [4(\gamma - \beta)\eta^2 + \\
&\quad 4k_r(2\beta^2 - \gamma^2)](\beta\eta^2 - \eta^2\beta + \beta^2 k_r) + \\
&\quad (\beta\eta^2 + 2\beta\gamma k_r - \eta^2\gamma)^2 \}.
\end{aligned}$$

**证明** 与命题1的证明方法类似. 根据逆向求解法, 当满足  $\eta^2 < 2\beta k_r$  时,  $\pi_r(p_r, s)$  是关于  $p_r$  和  $s$  的严格凹函数, 即存在唯一的最优决策值. 此时, 最优零售价和最优低碳销售努力分别为

$$p_{r,d}^* = \frac{w\eta^2 - ak_r - w\beta k_r - \gamma k_r p_m}{\eta^2 - 2\beta k_r}, \quad (7)$$

$$s_d^*(p_m, w) = \frac{\eta(w\beta - a - \gamma p_m)}{\eta^2 - 2\beta k_r}. \quad (8)$$

根据式(1)、(2)、(5)、(7)和(8), 得到  $\pi_m(p_m, w, e)$  关于  $p_m$ 、 $w$  和  $e$  的海塞矩阵为  $H_2$ . 显然, 当满足  $\text{Det}(H_{21}) < 0, \text{Det}(H_{22}) > 0, \text{Det}(H_{23}) < 0$  时,  $\pi_m(p_m, w, e)$  是关于  $p_m$ 、 $w$  和  $e$  的严格凹函数, 即存在唯一的最优决策值. 此时, 最优直销价、最优批发价和最优碳减排量分别为

$$p_{m,d}^* = (C_1 + C_2 + C_3)/C_0, \quad (9)$$

$$w_d^* = (C_4 + C_5 + C_6 + C_7 + C_8)/C_0, \quad (10)$$

$$e_d^* = D_2/(D_0 + D_1). \quad (11)$$

依据式(7)~(10)可得最优零售价和最优低碳销售努力分别为

$$p_{r,d}^* = (E_1 + E_2 + E_3 + E_4)/E_0, \quad (12)$$

$$s_d^* = E_5/E_0. \quad (13)$$

命题成立.  $\square$

此时, 制造商和零售商的最优利润分别为

$$\begin{aligned}
\pi_{m,d}^* &= \\
& (p_{m,d}^* - c)D_{m,d}^* + (w_d^* - c)D_{r,d}^* - \\
& [(e_0 - e_d^*)(D_{m,d}^* + D_{r,d}^*) - K_c]p_e - k_m e_d^{*2}/2, \quad (14)
\end{aligned}$$

$$\pi_{r,d}^* = (p_{r,d}^* - w_d^*)D_{r,d}^* - k_r s_d^{*2}/2. \quad (15)$$

其中:  $D_{m,d}^* = a - \beta p_{m,d}^* + \gamma p_{r,d}^* - \eta s_d^*$ ,  $D_{r,d}^* = a - \beta p_{r,d}^* + \gamma p_{m,d}^* + \eta s_d^*$ , 下标  $d$  表示分散决策.

**命题4** Stackelberg 博弈中, 最优零售价  $p_{r,d}^*$  与直销价  $p_m$  和批发价  $w$  均正相关; 最优低碳销售努力  $s_d^*$  与直销价  $p_m$  正相关, 而与批发价  $w$  负相关.

命题4的证明与命题2的证明过程和方法类似, 此处省略.

命题4表明, Stackelberg 博弈中, 直销价对最优零售价和最优低碳销售努力都会产生同步的影响. 但是, 批发价对最优零售价和最优低碳销售努力则会产生相反的影响. 这说明制造商作为领导者, 通过直销价和批发价可以有效对零售商的最优策略进行干预, 充分体现了博弈中地位的主从关系.

### 3 静态模型仿真

为了通过数值仿真验证本文理论分析的正确性, 模型中的参数取值如下:  $a = 1, \beta = 0.5, \gamma = 0.4, \eta = 0.3, c = 0.3, e_0 = 0.4, e = 0.1, K_c = 0.5, s = 0.3, p_e = 0.4, k_m = 0.6, k_r = 0.6$ .

1) 关于命题2, 集中决策下低碳销售努力  $s$  对最优直销价  $p_{m,c}^*$  和最优零售价  $p_{r,c}^*$  的影响如图1所示.

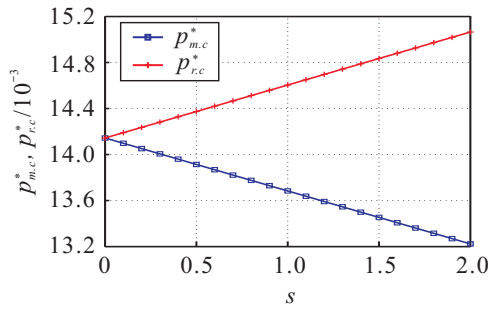


图1 最优直销价和最优零售价的变化趋势

由图1可以看出,集中决策下最优直销价随低碳销售努力的增加而降低,最优零售价则随低碳销售努力的增加而升高.究其原因,低碳销售努力的提高,引起零售商的销售成本增加,必然导致零售价的提高.同时,提高低碳销售努力还会吸引具有低碳偏好的消费者转而选择零售商渠道消费,造成直销渠道的需求量降低,此时制造商通过降低直销价进行促销不失为一种良策.

经计算,  $k_r - \eta^2 / (\beta + \gamma) = 0.5 > 0$ , 故最优系统利润  $\pi_c^*$  与低碳销售努力  $s$  负相关. 碳排放限额  $K_c$  和低碳销售努力  $s$  对最优系统利润  $\pi_c^*$  的影响如图2所示.

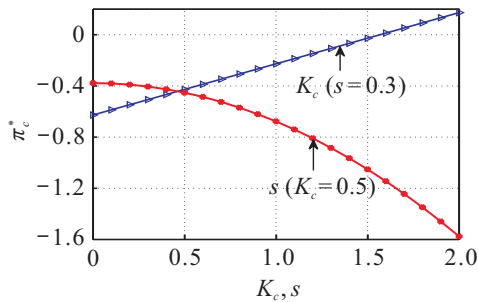


图2 供应链最优系统利润的变化趋势

由图2可以看出,集中决策下的系统利润随低碳销售努力的增加而降低,随碳排放限额的增加而提高.原因是在市场需求基本稳定的情形下,零售商提高低碳销售努力,只是把部分消费者从直销渠道吸引到零售商渠道上来.然而,提高低碳销售努力会增加零售商的销售成本,从而拉低供应链的系统利润.此外,在碳排放总量保持不变的情况下,提高碳排放限额能够减少制造商的税额,或者出售多余的额度获利,故最优系统利润随着碳排放限额的增加而提高.

2) 关于命题4,分散决策下直销价  $p_m$  和批发价  $w$  对最优零售价  $p_{r,d}^*$  和最优销售努力  $s_d^*$  的影响如图3所示.

通常由于生产成本增加或者产品供不应求,制造商会选择提高直销价格维持利润或者遏制需求而获取高额利润.此时,零售价存在上涨空间,零售商可以通过提高低碳销售努力增强竞争力,但销售成本的增

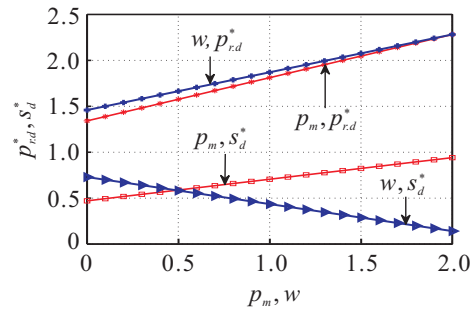


图3 最优零售价和最优低碳销售努力的变化趋势

加必然导致零售价的上涨.此外,如果制造商提高批发价,则势必引起零售价的上涨,零售商为了维护价格竞争优势,会适当降低低碳销售努力以减少销售成本,冲抵批发价上涨所带来的不利影响.

3) 集中决策和分散决策下的最优策略比较分析如表1所示.

表1 两种决策模式下的最优策略对比

决策类型	$p_{m,i}^*$	$p_{r,i}^*$	$e_i^*$	$\pi_i^*$
集中决策 ( $i = c$ )	5.049 32	5.149 32	0.653 425	4.852 75
分散决策 ( $i = d$ )	5.170 02	5.709 93	0.614 926	4.743 15

由表1可以看出,分散决策下的最优直销价和最优零售价均高于集中决策下的最优值,但是最优碳减排量则低于集中决策下的情形.此外,集中决策下的总利润高于分散决策下的总利润,这也是由于两种决策模式所追求的目标不同所致.

### 4 多周期时滞动态博弈模型

制造商利润  $\pi_m$  关于直销价  $p_m$  和批发价  $w$ , 以及零售商利润  $\pi_r$  关于零售价  $p_r$  的边际利润分别为

$$\begin{cases} \frac{\partial \pi_m(p_m, w)}{\partial p_m} = \Delta_1 + w\gamma - 2\beta p_m + \gamma p_r, \\ \frac{\partial \pi_m(p_m, w)}{\partial w} = \Delta_2 + \gamma p_m - \beta p_r, \\ \frac{\partial \pi_r(p_r)}{\partial p_r} = \Delta_2 + \gamma p_m - 2\beta p_r + \beta w. \end{cases} \quad (16)$$

其中:  $\Delta_1 = a - c\gamma - s\eta - (\gamma - \beta)(e_0 - e)p_e + \beta c$ ,  $\Delta_2 = a + s\eta$ .

制造商和零售商根据各自的边际利润进行价格决策.如果边际利润为正,则制造商会提高直销价和批发价,零售商会上涨零售价;如果边际利润为负,则相反.制造商和零售商动态调整价格的过程<sup>[22]</sup>为

$$\begin{cases} \dot{p}_m = v_m p_m (\Delta_1 + w\gamma - 2\beta p_m + \gamma p_r), \\ \dot{w} = v_w w (\Delta_2 + \gamma p_m - \beta p_r), \\ \dot{p}_r = v_r p_r (\Delta_2 + \gamma p_m - 2\beta p_r + \beta w). \end{cases} \quad (17)$$

其中:  $v_m$ 、 $v_w$ 、 $v_r$  分别为直销价、批发价和零售价的调整速度.制造商和零售商可以综合考虑当前价格

和历史价格进行决策. 但由于价格信息不透明, 当前价格难以及时准确获取, 制造商和零售商只能参照历史价格进行决策. 历史直销价和历史零售价分别为  $\tau_m > 0$  和  $\tau_r > 0$  之前的价格. 为了简化运算, 假定他们参照同期的历史价格进行决策, 即  $\tau_m = \tau_r = \tau$ . 基于此, 最终的动态价格博弈模型为

$$\begin{cases} \dot{p}_m = v_m p_m (-2\beta p_m(t-\tau) + \gamma p_r(t-\tau) + \gamma w + \Delta_1), \\ \dot{w} = v_w w (\gamma p_m(t-\tau) - \beta p_r(t-\tau) + \Delta_2), \\ \dot{p}_r = v_r p_r (\gamma p_m(t-\tau) - 2\beta p_r(t-\tau) + \beta w + \Delta_2). \end{cases} \quad (18)$$

## 5 Hopf分岔的存在性和局部渐近稳定性

经计算易得, 模型(18)的唯一正均衡点为  $E(p_m^*, w^*, p_r^*)$ . 此均衡点为零售商的盈亏均衡点<sup>[23]</sup>, 零售价高于盈亏均衡点时零售商获利. 其中

$$\begin{aligned} p_m^* &= \frac{c\beta - \beta\Delta_3}{2(\beta + \gamma)} + \frac{a(\beta + 2\gamma) - s(\beta - 2\gamma)\eta}{2(\beta^2 - \gamma^2)}, \\ w^* &= \frac{c\gamma - \gamma\Delta_3}{2(\beta + \gamma)} + \frac{a(2\beta + \gamma) + s(2\beta - \gamma)\eta}{2(\beta^2 - \gamma^2)}, \\ p_r^* &= \frac{c\gamma - \gamma\Delta_3}{2(\beta + \gamma)} + \frac{a(2\beta + \gamma) + s(2\beta - \gamma)\eta}{2(\beta^2 - \gamma^2)}; \end{aligned}$$

$\Delta_3 = (e - e_0)p_e$ . 模型(18)在该均衡点处的特征方程式为

$$\lambda^3 + M_1\lambda^2 + \Delta_4 e^{-\lambda\tau} + \Delta_5 e^{-2\lambda\tau} = 0. \quad (19)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta_4 &= M_2\lambda^2 + M_3\lambda, \quad \Delta_5 = M_4\lambda + M_5, \\ M_1 &= -p_m v_r \beta, \quad M_2 = v_w w \beta + 2p_m v_m \beta, \\ M_3 &= -p_r v_w v_r w \beta^2 - p_m p_r v_m v_r \gamma^2 - 2p_m p_r v_m v_r \beta^2, \\ M_4 &= 2p_m v_m v_w w \beta^2 - p_m v_m v_w w \gamma^2, \\ M_5 &= 2p_m p_r v_m v_w v_r w \beta \gamma^2 - 2p_m p_r v_m v_w v_r w \beta^3. \end{aligned}$$

### 5.1 $\tau = 0$ 的情形

式(19)可简化为

$$\lambda^3 + (M_1 + M_2)\lambda^2 + (M_3 + M_4)\lambda + M_5 = 0. \quad (20)$$

根据赫尔维茨定理可知, 如果条件  $(H_1)$ :  $M_1 + M_2 > 0, M_3 + M_4 > 0, M_5 > 0, (M_1 + M_2)(M_3 + M_4) - M_5 > 0$  同时满足, 则模型(18)在均衡点处渐近稳定.

### 5.2 $\tau > 0$ 的情形

式(19)两边同乘以  $e^{\lambda\tau}$  可得

$$M_2\lambda^2 + M_3\lambda + \Delta_6 e^{\lambda\tau} + \Delta_7 e^{-\lambda\tau} = 0. \quad (21)$$

其中:  $\Delta_6 = \lambda^3 + M_1\lambda^2, \Delta_7 = M_4\lambda + M_5$ .

假定  $\lambda = i\omega (\omega > 0)$  是式(21)的一个正根, 则有

$$\begin{cases} \Delta_8 \cos(\omega\tau) + \Delta_9 \sin(\omega\tau) = M_2\omega^2, \\ \Delta_{10} \sin(\omega\tau) - \Delta_{11} \cos(\omega\tau) = M_3\omega. \end{cases} \quad (22)$$

其中:  $\Delta_8 = M_5 - M_1\omega^2, \Delta_9 = \omega^3 + M_4\omega, \Delta_{10} = M_1\omega^2 + M_5, \Delta_{11} = M_4\omega - \omega^3$ . 从而有

$$\begin{cases} \sin(\omega\tau) = \frac{\omega^5 M_2 + \Delta_{12}\omega^3 - \omega M_3 M_5}{\omega^6 + \omega^4 M_1^2 - \omega^2 M_4^2 - M_5^2}, \\ \cos(\omega\tau) = \frac{\Delta_{13}\omega^4 + \Delta_{14}\omega^2}{\omega^6 + \omega^4 M_1^2 - \omega^2 M_4^2 - M_5^2}. \end{cases} \quad (23)$$

其中:  $\Delta_{12} = M_1 M_3 - M_2 M_4, \Delta_{13} = M_3 - M_1 M_2, \Delta_{14} = M_3 M_4 - M_2 M_5$ . 进而有

$$\begin{aligned} \omega^{12} + N_{10}\omega^{10} + N_8\omega^8 + N_6\omega^6 + N_4\omega^4 + \\ N_2\omega^2 + N_0 = 0. \end{aligned} \quad (24)$$

其中

$$\begin{aligned} N_{10} &= 2M_1^2 - M_2^2, \\ N_8 &= 2M_2^2 M_4 - 2M_4^2 + M_1^4 - M_1^2 M_2^2 - M_3^2, \\ N_6 &= \\ &4M_1 M_2 M_3 M_4 - M_1^2 M_3^2 - 2M_3^2 M_4 - 2M_1^2 M_4^2 - \\ &M_2^2 M_4^2 - 2M_5^2 - 2M_1 M_2^2 M_5 + 4M_2 M_3 M_5, \\ N_4 &= \\ &M_4^4 - M_3^2 M_4^2 + 2M_1 M_3^2 M_5 - 2M_1^2 M_5^2 - M_2^2 M_5^2, \\ N_2 &= 2M_4^2 M_5^2 - M_3^2 M_5^2, \quad N_0 = -M_5^4. \end{aligned}$$

令  $f(\omega) = \omega^{12} + N_{10}\omega^{10} + N_8\omega^8 + N_6\omega^6 + N_4\omega^4 + N_2\omega^2 + N_0$ . 因  $\lim_{\omega \rightarrow \infty} f(\omega) \rightarrow \infty, f(0) = -M_5^4 < 0$ , 故式(24)至少有一个正根. 不失一般性, 假设式(24)有12个正根, 即为  $\omega_k (k = 1, 2, \dots, 12)$ . 对于每一个正根  $\omega_k$  都存在一系列的  $\{\tau_k^{(j)} | k = 1, 2, \dots, 12; j = 0, 1, \dots\}$  与之对应, 即

$$\begin{aligned} \tau_k^{(j)} &= \frac{1}{\omega_k} \arccos \left\{ \frac{\Delta_{13}\omega_k^4 + \Delta_{14}\omega_k^2}{\omega_k^6 + \omega_k^4 M_1^2 - \omega_k^2 M_4^2 - M_5^2} \right\} + \\ &\frac{2j\pi}{\omega_k}, \quad k = 1, 2, \dots, 12, \quad j = 0, 1, \dots \end{aligned}$$

令  $\tau_0 = \min\{\tau_k^{(j)} | k = 1, 2, \dots, 12; j = 0, 1, \dots\} = \min\{\tau_k^{(0)} | k = 1, 2, \dots, 12\} = \tau_{k_0}^{(0)}$ , 此时  $\omega_0 = \omega_{k_0}$ . 于是

$$\tau_0 = \frac{1}{\omega_0} \arccos \left\{ \frac{\Delta_{13}\omega_0^4 + \Delta_{14}\omega_0^2}{\omega_0^6 + \omega_0^4 M_1^2 - \omega_0^2 M_4^2 - M_5^2} \right\}. \quad (25)$$

即当  $\tau = \tau_0$  时, 式(21)有一对纯虚根  $\pm i\omega_0$ . 对特征方程式(21)两边求  $\lambda$  关于  $\tau$  的导数, 得

$$\left[\frac{d\lambda}{d\tau}\right]^{-1} = \frac{2M_2\lambda + M_3 + \Delta_{15}e^{\lambda\tau} + M_4e^{-\lambda\tau}}{\Delta_7e^{-\lambda\tau}\lambda - \Delta_6e^{\lambda\tau}} - \frac{\tau}{\lambda}, \quad (26)$$

其中  $\Delta_{15} = 3\lambda^2 + 2M_1\lambda$ . 从而有

$$\operatorname{Re}\left[\frac{d\lambda}{d\tau}\right]_{\tau=\tau_0}^{-1} = \frac{R_1R_2 + I_1I_2}{R_1^2 + I_1^2}. \quad (27)$$

其中

$$R_1 = M_5\omega_0 \sin(\omega_0\tau_0) - M_4\omega_0^2 \cos(\omega_0\tau_0) - \omega_0^4 \cos(\omega_0\tau_0) - M_1\omega_0^3 \sin(\omega_0\tau_0),$$

$$I_1 = M_4\omega_0^2 \sin(\omega_0\tau_0) + \omega_0M_5 \cos(\omega_0\tau_0) - \omega_0^4 \sin(\omega_0\tau_0) + M_1\omega_0^3 \cos(\omega_0\tau_0),$$

$$R_2 = M_3 - 2M_1\omega_0 \sin(\omega_0\tau_0) + M_4 \cos(\omega_0\tau_0) - 3\omega_0^2 \cos(\omega_0\tau_0),$$

$$I_2 = 2M_2\omega_0 + 2M_1\omega_0 \cos(\omega_0\tau_0) - 3\omega_0^2 \sin(\omega_0\tau_0) - M_4 \sin(\omega_0\tau_0).$$

当条件  $(H_2)$  :  $R_1R_2 + I_1I_2 \neq 0$  满足时, 模型 (18) 符合 Hopf 分岔的横截性条件, 故而得出如下结论<sup>[24-25]</sup>.

**定理 1** 如果条件  $(H_1)$  和条件  $(H_2)$  满足, 则当  $\tau \in [0, \tau_0)$  时, 模型 (18) 在均衡点  $E(p_m^*, w^*, p_r^*)$  处局部渐近稳定; 当  $\tau > \tau_0$  时, 模型 (18) 在均衡点处不稳定; 当  $\tau = \tau_0$  时, 模型 (18) 产生 Hopf 分岔.

### 6 动态模型数值仿真

为了验证本文理论分析的正确性以及探究决策因素对价格系统和企业利润的影响, 价格调整速度取值为  $v_m = v_w = v_r = 0.5$ , 直销价  $p_m$ 、批发价  $w$  和零售价  $p_r$  的初始值分别为 1.2、0.8 和 1.5, 其余参数取值与第 3 节相同. 此时, 模型 (18) 具体为

$$\begin{cases} \dot{p}_m = p_m(-0.5p_m(t-\tau) + 0.2p_r(t-\tau) + 0.2w + 0.48), \\ \dot{w} = w(0.2p_m(t-\tau) - 0.25p_r(t-\tau) + 0.55), \\ \dot{p}_r = p_r(0.2p_m(t-\tau) - 0.5p_r(t-\tau) + 0.25w + 0.55). \end{cases} \quad (28)$$

#### 6.1 时滞参数对系统稳定性的影响

经计算可得模型 (28) 的均衡点为  $E(7.5, 8.18, 8.18)$ ,  $M_1 + M_2 = 3.92 > 0$ ,  $M_3 + M_4 = 9.09 > 0$ ,  $M_5 = 5.65 > 0$ ,  $(M_1 + M_2)(M_3 + M_4) - M_5 = 29.99 > 0$ . 此时条件  $(H_1)$  满足, 所以当  $\tau = 0$  时, 模型 (28) 在均衡点处渐近稳定.

进一步可求得  $\omega_0 = 5.26$ ,  $\tau_0 = 0.315$ ,  $R_1R_2 +$

$I_1I_2 = 189.19 \neq 0$ . 由定理 1 可知, 当  $\tau = \tau_0$  时系统经分岔而失稳, 如图 4 所示.

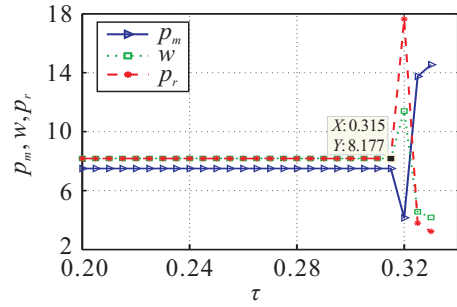


图 4 系统状态的变化趋势

由图 4 可知, 时滞参数  $\tau$  的增大会导致系统从稳定状态逐渐转为不稳定状态, 分岔临界点  $\tau_0$  两侧的系统状态显著不同. 系统失稳会引起价格的剧烈波动, 会对制造商和零售商的决策造成不利影响, 所以参照的历史价格不宜过于久远.

#### 6.2 碳减排量和低碳销售努力对价格和利润的影响

以制造商为例, 直销价  $p_m$  和零售价  $p_r$  会随着碳减排量  $e$  的增加而降低, 而制造商利润  $\pi_m$  则会先略微增加然后再降低. 当  $\tau = 0.2$  时, 价格和利润的变化趋势如图 5 所示.

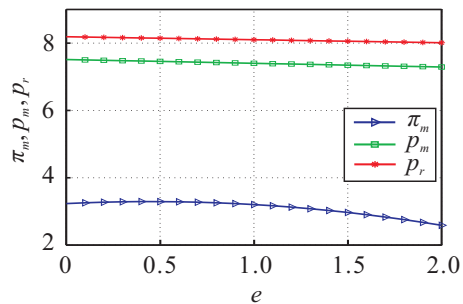


图 5 价格和利润的变化趋势

探究原因, 增加  $e$  意味着单位产品的碳排放量降低, 在总产量和单位产品的税额保持不变时, 制造商向政府缴纳的碳税将减少, 甚至会出售多余的碳排放限额获利. 总之, 成本的降低或者额外收入的增加都会引起直销价格的下降. 零售商为了应对竞争会同步降低零售价. 对于制造商利润而言, 适当提高  $e$  会减少成本从而增加利润, 但过高的  $e$  需要投入大量资金, 导致增加的成本大于由此带来的收益, 所以制造商的利润先增加后减小, 碳减排量  $e$  存在最优值.

此外, 当  $\tau = 0.2$  时, 低碳销售努力  $s$  对制造商利润  $\pi_m$  和供应链整体利润  $\pi_{sum}$  的影响如图 6 所示.

从图 6 中发现, 制造商利润  $\pi_m$  和供应链系统利润  $\pi_{sum}$  都是关于低碳销售努力  $s$  的减函数, 这与图 2 中低碳销售努力  $s$  对系统利润的影响基本一致. 虽然两种类型的模型存在周期和状态的差异, 但是相同参

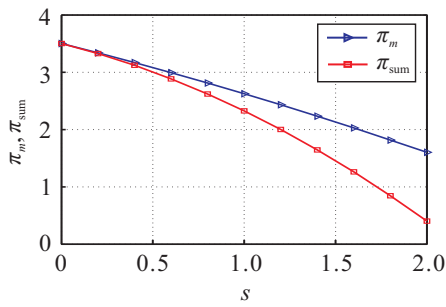


图6 制造商利润和供应链系统利润的变化趋势

数对供应链系统利润的影响基本相同,所以,构建带时滞的动态博弈模型是对单周期静态博弈模型研究的一个有效补充.图6中现象的原因与图2的分析类似,不再赘述.

至此,当 $\tau = 0.2$ 时,低碳销售努力 $s$ 和碳减排量 $e$ 共同作用对制造商利润 $\pi_m$ 的影响如图7所示.

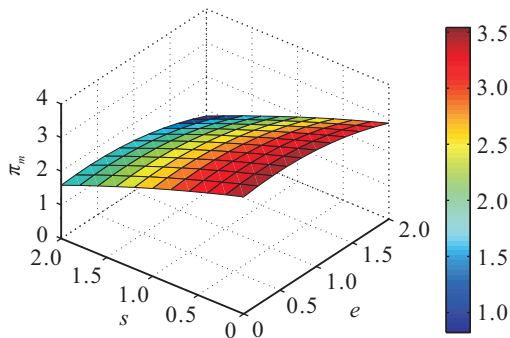


图7 制造商利润的变化趋势

由图7可知: $\pi_m$ 随 $s$ 的增加而减小;随 $e$ 的增加先增大而后减小;并且 $e$ 越大, $s$ 对 $\pi_m$ 的影响越显著. $s$ 和 $e$ 对 $\pi_m$ 的影响与图5和图6的分析相同,不再赘述.

### 7 稳定性控制

通过上述分析可以明确,针对不利于决策和获利的失稳系统,有必要采取控制措施使其重返稳定状态.当 $\tau = 0.33 > \tau_0$ 时系统(28)是不稳定的,其吸引子如图8所示.

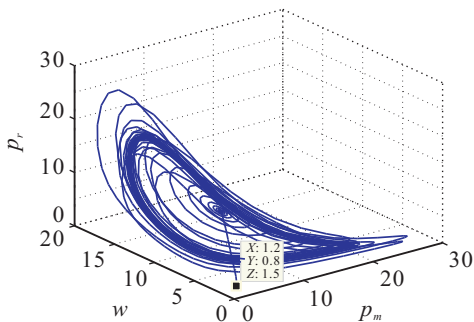


图8 当 $\tau = 0.33$ 时,系统(28)的吸引子

从图8中明显看出,价格经多次博弈后趋于不规则的极限环,会造成市场价格的不稳定,因此,采取变量反馈控制法对其进行有效控制.系统(28)增加控

制项后变为

$$\begin{cases} \dot{p}_m = p_m(-0.5p_m(t-\tau) + 0.2p_r(t-\tau) + 0.2w + 0.48) - \mu(p_m - p_m^*), \\ \dot{w} = w(0.2p_m(t-\tau) - 0.25p_r(t-\tau) + 0.55), \\ \dot{p}_r = p_r(0.2p_m(t-\tau) - 0.5p_r(t-\tau) + 0.25w + 0.55). \end{cases} \quad (29)$$

其中: $\mu$ 为控制参数,调节其值可以改变系统的状态; $p_m^* = 7.5$ 为直销价的均衡值.

当 $\tau = 0.33$ 时,系统(29)关于 $\mu$ 的分岔图如图9所示.

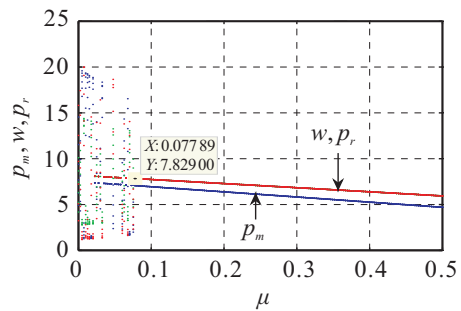


图9 系统(29)关于 $\mu$ 的分岔图

从图9中可以发现,分岔临界点为 $\mu_0 = 0.07789$ .取 $\mu = 0.07 < \mu_0$ 和 $\mu = 0.08 > \mu_0$ ,其对应的吸引子分别如图10和图11所示.显然,当 $\tau = 0.33, \mu = 0.07$ 时,系统仍处于不稳定状态,稳定性没有得到有效控制.但是当 $\tau = 0.33, \mu = 0.08$ 时,价格经长期博弈后会趋于均衡点,此时价格市场是稳定的.

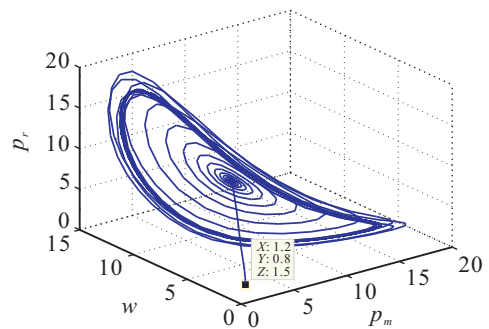


图10 当 $\mu = 0.07$ 时,系统(29)的吸引子

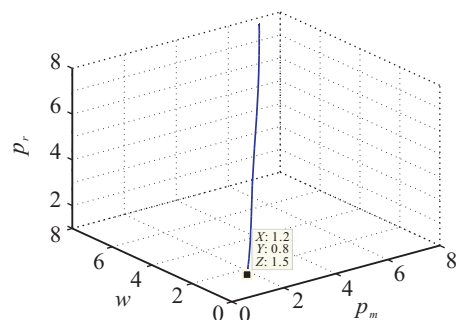


图11 当 $\mu = 0.08$ 时,系统(29)的吸引子



显然,采用变量反馈控制法通过调节控制参数可以使失稳的系统重返稳定状态.这也说明,如果市场由于不良竞争或受到经济危机的干扰,导致价格博弈过程中出现异常现象,则可以通过市场外部的政府调节措施使其重返正常运营状态.

## 8 结 论

本文在考虑碳排放限额和低碳销售努力的基础上,首先构建了双渠道供应链静态价格博弈模型,分别分析了集中决策和分散决策下的制造商和零售商的最优策略问题,给出了最优直销价、最优零售价、最优批发价、最优低碳销售努力和最优碳减排量的解析表达式;通过数值仿真分析了低碳销售努力、碳排放限额等因素对最优价格和最优利润的影响;建立了带双时滞的动态价格博弈模型,以时滞参数作为研究对象,分析了系统Hopf分岔的存在性和局部渐近稳定性,给出了系统稳定的条件;通过数值仿真探讨了时滞参数、碳减排量和低碳销售努力对价格和利润的影响;最后对失稳系统采用变量反馈控制法进行了有效控制.

研究表明:制造商和零售商竞合博弈过程中存在最优策略;提高碳排放限额会增加系统利润;提高低碳销售努力却不一定增加系统利润.研究还发现:制造商和零售商的延迟决策变量不宜过大,否则会导致系统失稳;碳减排量存在最优值使得制造商利润最大;变量反馈控制法对失稳系统的控制是可行的.

本文的研究有助于加深对价格博弈系统稳定性的理解,有利于理清各种变量对系统性能和最优策略的影响,为制造商和零售商的科学决策提供参考.另外,为促进企业低碳运营,政府可以采取低碳补贴的形式增强企业低碳技术投入的动力,这是未来研究需要考虑的因素.

## 参考文献(References)

[1] 程永伟,穆东,马婷婷.混合碳政策下供应链减排决策优化[J].系统管理学报,2017,26(5):947-956.  
(Cheng Y W, Mu D, Ma T T. Optimal decision of carbon emission reduction in supply chain based on mixed carbon policy[J]. Journal of System & Management, 2017, 26(5): 947-956.)

[2] 王一雷,朱庆华,夏西强.基于消费偏好的供应链上下游联合减排协调契约博弈模型[J].系统工程学报,2017,32(2):188-198.  
(Wang Y L, Zhu Q H, Xia X Q. Supply chain upstream and downstream joint coordination contract game model based on consumer preference[J]. Journal of Systems Engineering, 2017, 32(2): 188-198.)

[3] 徐朗,汪传旭,周诗宇.考虑碳减排研发技术溢出的两级供应链决策与协调机制[J].华中师范大学学报:自然科学版,2016,50(6):851-874.  
(Xu L, Wang C X, Zhou S Y. Decision and coordination of two-echelon supply chain considering carbon reduction technology spillovers[J]. Journal of Central China Normal University: Natural Science, 2016, 50(6): 851-874.)

[4] 支帮东,陈俊霖,刘晓红.碳限额与交易机制下基于成本共担契约的两级供应链协调策略[J].中国管理科学,2017,25(7):48-56.  
(Zhi B D, Chen J L, Liu X H. The coordination strategy for two-tier supply chains with a cost-sharing contract in the cap-and-trade mechanism[J]. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(7): 48-56.)

[5] Li Q Q, Xiao T J, Qiu Y Z. Price and carbon emission reduction decisions and revenue-sharing contract considering fairness concerns[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 190(7): 303-314.

[6] 石松,颜波,石平.考虑公平关切的自主减排低碳供应链决策研究[J].系统工程理论与实践,2016,36(12):3079-3091.  
(Shi S, Yan B, Shi P. Pricing and coordination decisions in autonomous reduction low-carbon supply chain with fairness concerns[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2016, 36(12): 3079-3091.)

[7] 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 Journal of Management Science, 2014, 22(11): 44-53.)

[8] 曹细玉,覃艳华,张杰芳.基于政府不同补贴模式下的供应链碳减排策略与协调[J].华中师范大学学报:自然科学版,2017,51(1):93-99.  
(Cao X Y, Qin Y H, Zhang J F. Carbon reduction strategy and coordination of supply chain under different government subsidy modes[J]. Journal of Central China Normal University: Natural Science, 2017, 51(1): 93-99.)

[9] 陈克贵,王新宇,黄敏,等.两种需求模式下过度自信零售商的最优定价和订货联合决策[J].控制与决策,2018,33(1):101-110.  
(Chen K G, Wang X Y, Huang M, et al. Joint pricing and order quantities decisions for overconfident retailers with two demand cases[J]. Control and Decision, 2018, 33(1): 101-110.)

[10] 申成然,刘小媛.考虑风险规避与碳减排的双渠道供应链决策[J].计算机工程与应用,2018,54(4):1-8.  
(Shen C R, Liu X Y. Decision of dual-channel supply

- chain when considering risk aversion and carbon emission reduction[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2018, 54(4): 1-8.)
- [11] 周艳菊, 叶欣, 詹结祥. 制造商竞争与合作下双渠道供应链联合减排的微分博弈分析[J]. *控制与决策*, 2018, 33(11): 2021-2028.  
(Zhou Y J, Ye X, Zhan J X. Differential game model of joint emission reduction strategies in a dual-channel supply chain considering manufacturers' competition and cooperation[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(11): 2021-2028.)
- [12] 汪传旭, 李辉. 政府补贴下考虑碳排放限量的双渠道闭环供应链决策[J]. *复旦大学学报: 自然科学版*, 2018, 57(2): 131-142.  
(Wang C X, Li H. The closed-loop supply chain decision with carbon emission limits based on dual channel sales and recycling under government subsidies[J]. *Journal of Fudan University: Natural Science*, 2018, 57(2): 131-142.)
- [13] Zhou Y J, Xin Y. Differential game model of joint emission reduction strategies and contract design in a dual-channel supply chain[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 190(7): 592-607.
- [14] Xu J T, Qi Q, Bai Q G. Coordinating a dual-channel supply chain with price discount contracts under carbon emission capacity regulation[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2018, 56(4): 449-468.
- [15] 张智超, 张庆, 刘志. Nash公平和努力溢出效应下的双渠道供应链销售策略[J]. *系统科学学报*, 2017, 25(3): 89-95.  
(Zhang Z C, Zhang Q, Liu Z. Research on selling strategy of dual-channel supply chain based on Nash bargaining fairness and effort spill-over effect[J]. *Journal of System Science*, 2017, 25(3): 89-95.)
- [16] 李建斌, 朱梦萍, 戴宾. 双向搭便车时双渠道供应链定价与销售努力决策[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(12): 3046-3058.  
(Li J B, Zhu M P, Dai B. Optimal pricing and sales effort decisions in a dual-channel supply chain in case of bidirectional free riding[J]. *System Engineering—Theory & Practice*, 2016, 36(12): 3046-3058.)
- [17] Pu X J, Gong L, Han X H. Consumer free riding: Coordinating sales effort in a dual-channel supply chain[J]. *Electronic Commerce Research and Applications*, 2017, 22(3/4): 1-12.
- [18] 覃艳华, 曹玮嘉. 需求均匀分布条件下考虑零售商销售努力的双渠道供应链协调[J]. *华中师范大学学报: 自然科学版*, 2014, 48(5): 774-778.  
(Qin Y H, Cao W J. The dual channel supply chain coordination considering retailer's sale effort under uniformly distributed demand[J]. *Journal of Central China Normal University: Natural Science*, 2014, 48(5): 774-778.)
- [19] 李新然, 王奇琦. 政府补贴下考虑销售努力的闭环供应链研究[J]. *科研管理*, 2017, 38(8): 51-63.  
(Li X R, Wang Q Q. A research on the closed-loop supply chain with sales effort under the government subsidy[J]. *Science Research Management*, 2017, 38(8): 51-63.)
- [20] 王道平, 李小燕. 零售商竞争下考虑产品商誉的纵向联合促销微分博弈[J]. *控制与决策*, 2017, 32(12): 2210-2218.  
(Wang D P, Li X Y. Differential game on vertical joint promotion considering goodwill and retailers' competition[J]. *Control and Decision*, 2017, 32(12): 2210-2218.)
- [21] Ma J H, Guo Z B. The influence of information on the stability of a dynamic Bertrand game[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2016, 30(1/2/3): 32-44.
- [22] Si F S, Ma J H. Complex dynamics in a triopoly game with multiple delays in the competition of green product level[J]. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2018, 28(2): 1-24.
- [23] 张桂涛, 胡劲松, 孙浩, 等. 考虑损失规避零售商的多期多产品供应链网络均衡[J]. *中国管理科学*, 2015, 23(6): 73-82.  
(Zhang G T, Hu J S, Sun H, et al. Multi-period supply chain network equilibrium with loss-averse retailer and multi-products flow[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2015, 23(6): 73-82.)
- [24] Kuznetsov Y A. *Elements of applied bifurcation theory*[M]. New York: Springer, 2004: 249-294.
- [25] Hassard B D, Kazarinoff N D, Wan Y H. *Theory and applications of hopf bifurcation*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1981: 961-969.

### 作者简介

司凤山(1981—), 男, 讲师, 博士, 从事供应链管理 with 协调的研究, E-mail: sifs2007@126.com;

王晶(1981—), 女, 副教授, 博士, 从事微分博弈和系统复杂性等研究, E-mail: crystalstella@126.com;

戴道明(1972—), 男, 教授, 博士, 从事博弈论等研究, E-mail: ddmaufe@126.com.

(责任编辑: 李君玲)