

# 考虑碳减排和双向公平关切的供应链复杂性研究

王晶,葛彤彤,司凤山\*

(安徽财经大学管理科学与工程学院,安徽蚌埠233030)

**摘要:**在碳排放约束政策下,针对考虑制造商和零售商双向公平关切的双渠道供应链的复杂性问题,通过构建多周期动态博弈模型,从系统复杂性的视角,分析决策变量调整速度、公平关切程度和碳交易价格等因素对供应链决策和利润的影响,揭示经济系统的演化行为并对混沌系统实施控制。研究发现,过高的制造商和零售商决策变量调整速度会导致系统经倍周期分岔陷入混沌状态;处于主导地位 of 的零售商有能力影响供应链系统的整体稳定性,跟随者地位的制造商则仅能影响系统局部范围的稳定性;不论是制造商还是零售商,导致系统混沌对自身不利,但对方会获益;公平关切和碳交易价格能够影响供应链成员的利润,但影响程度取决于系统所处的稳定状态;提出参数调整控制法对混沌系统实施有效控制,使其重返稳定状态。

**关键词:**碳减排;双向公平关切;双渠道供应链;系统复杂性;混沌控制

中图分类号:F273

文献标志码:A

引用格式:王晶,葛彤彤,司凤山.考虑碳减排和双向公平关切的供应链复杂性研究[J].山东大学学报(理学版),2025,60(6):31-44.

## Research on complexity of supply chain considering carbon emission reduction and two-way fairness concerns

WANG Jing, GE Tongtong, SI Fengshan\*

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

**Abstract:** Under carbon emission constraints, this paper addresses the complexity of a dual-channel supply chain with bidirectional fairness concerns between manufacturers and retailers. A multi-period dynamic game model is developed to analyze the effects of decision-variable adjustment speed, fairness concern intensity, and carbon trading price on supply chain decision-making and profitability from a systemic complexity perspective. The research reveals the evolutionary behavior of the economic system and proposes chaos control strategies. Key findings include: Excessively high adjustment speeds in decision variables can induce a chaotic state in the system via period-doubling bifurcation. A dominant retailer influences the overall stability of the supply chain, whereas a follower manufacturer only affects local stability. System chaos harms the party causing it but benefits the other. Fairness concerns and carbon pricing impact member profits, though the extent depends on system stability. A parameter-based control method is proposed to effectively suppress chaos and restore stability.

**Key words:** carbon emission reduction; two-way fairness concerns; dual-channel supply chain; system complexity; chaos control

## 0 引言

气候变化对全球的影响日益显著<sup>[1]</sup>,实现“碳达峰”和“碳中和”已成为全球共识,不仅减缓全球变暖的进程,而且涉及经济效率和环境效益的双重追求。然而,推动低碳转型的同时,必须考虑到公平关切,确保不同群体在能源转型中的利益得到平衡。供应链管理作为连接生产与消费和协调经济活动的重要机制,其低碳转型将影响环境效益的提升和经济效率的优化。面对消费者的低碳偏好与碳排放规制约束,供应链企业在制定最优定价与碳减排等运营策略时,常常表现出较强的公平关切倾向,这也是企业彼此间发展与维持良

收稿日期:2024-07-15;网络出版时间:2025-05-06 12:40:07

基金项目:安徽省高校科研计划资助项目(2022AH050589,2024AH052067);安徽省哲学社会科学规划资助项目(AHSKYY2023D009)

第一作者:王晶(1981—),女,副教授,硕士生导师,博士,研究方向为供应链管理、系统复杂性。E-mail:crystalstella@126.com

\*通信作者:司凤山(1981—),男,副教授,硕士生导师,博士,研究方向为物流与供应链管理、系统稳定性。E-mail:sifs2007@126.com

好合作关系的关键因素。例如,京东物流通过“清流计划”与供应链上下游合作,探索在包装等多个环节实现低碳环保,有效提高了资源利用率。

在供应链管理实践中,公平关切因素的增加和决策者有限理性决策行为容易导致供应链系统产生复杂的混沌现象<sup>[2]</sup>,如连续的订购策略<sup>[3]</sup>、产品定价行为<sup>[4]</sup>、随机需求<sup>[5]</sup>都可能使系统表现出混沌的动态特性。混沌现象的研究有助于理解供应链中的复杂动态行为,预测和控制潜在的不稳定因素,增强供应链的韧性。因此,本文将探讨如何在外部碳政策影响下,实现“碳达峰”和“碳中和”目标的同时,确保供应链的公平性和稳定性,这有助于构建一个更加高效、公正且稳健的供应链系统。

碳减排政策对相关行业产品质量和节能减排水平提出了更高要求。已有文献研究了不同碳排放规制对供应链定价<sup>[6-7]</sup>、技术投资<sup>[8]</sup>、利益协调<sup>[9]</sup>、碳标签选择<sup>[10-11]</sup>、低碳技术扩散<sup>[12]</sup>等决策的影响。Toptal等<sup>[13]</sup>分析不同碳政策对最优库存和投资策略的影响,发现在碳税政策下企业更倾向于技术创新。Fan等<sup>[14]</sup>在完全信息条件下,对比分析碳税政策、碳交易政策对公司碳减排技术投入的影响。毋博等<sup>[15]</sup>研究了在市场需求以及碳交易价格不确定的条件下,碳税政策和碳交易政策对供应链碳减排激励机制设计的影响。王道平等<sup>[16]</sup>分析了内部碳交易价格和零售商碳配额对供应链成员碳减排量、批发价格、订购数量和利润的影响。夏西强等<sup>[17]</sup>等通过构建原始制造商与再制造商之间的博弈模型,分析了政府碳税和补贴政策对独立再制造产业的不同影响。已有文献较少关注供应链企业上、下游之间联动对碳减排所起的作用。

在供应链合作框架下,利益分配机制往往会激发制造商与零售商对公平性的考量,进而影响其合作态度和行为。实际上,低碳供应链的运营决策同样受到对公平关切考量的影响。Cui等<sup>[18]</sup>首次将公平性考量融入供应链管理领域,提出了纵向公平性问题的概念。此后,众多学者围绕供应链领域中的纵向公平关切问题展开了深入探究,分析供应链成员的公平关切行为对企业决策的影响<sup>[19-22]</sup>。徐扬等<sup>[23]</sup>从消费者对差异化定价的公平关切视角进行分析,结果发现消费者公平关切抑制了差异化定价策略的采用。另外,有学者针对同行竞争情境下的公平关切进行探讨<sup>[24]</sup>,与此同时,也有研究聚焦于供应链体系里横向与纵向公平关切并存的复杂情形<sup>[25]</sup>,这些研究从不同维度揭示了公平关切在供应链中的表现形式和作用机制。

市场环境不断变化使得供应链难以实现完全均衡,而公平关切在深刻塑造供应链成员行为与决策的同时,可能触发供应链低碳运作的混沌效应,增加管理的复杂性。现有文献对供应链系统复杂性的研究主要有2个角度:一是通过定性分析揭示需求信号处理、价格波动、短缺博弈和配送博弈等不确定因素对供应链系统复杂性的影响<sup>[26-27]</sup>;二是通过定量建模研究,揭示供应链系统中的混沌现象<sup>[28]</sup>。但这些较少融合碳减排和公平关切2种因素。Chen等<sup>[29]</sup>研究了考虑资金约束和绿色度背景下的有限理性供应商与2个竞争零售商的供应链动态博弈模型,发现供应商调整速度对系统稳定性和利润影响较大。Ma等<sup>[30-31]</sup>研究考虑消费者低碳偏好的服装供应链竞争问题,构建了集中和分散决策下的静态和动态博弈模型,探讨了调整参数对系统稳定性的影响,并应用混沌控制方法稳定系统。郑清等<sup>[32]</sup>考虑碳排放税影响,构建双寡头制造商的废品回收与绿色低碳广告投入的动态博弈模型,并通过反馈控制有效管控混沌系统。李秋香等<sup>[33]</sup>建立双寡头零售商的动态价格博弈模型,分析不同商业目标和公平关切下的系统复杂性,并通过控制因子有效管控混沌系统。这些文献通过数学建模与数值模拟相结合的方式,为复杂系统动态博弈分析提供了有效的研究方法。这也意味着从系统复杂性的视角把握低碳供应链动态特征,才可能进一步得出公平关切下供应链系统优化的内在机理。

为了契合低碳发展的迫切诉求、兼顾供应链上下游主体的利益分配、考虑系统的复杂运行机制,本文聚焦于零售商双渠道供应链中碳减排、公平关切与系统复杂性的交互作用,从系统稳定性的视角分析制造商面临碳减排约束时,制造商与零售商的公平关切行为、策略调整速度等因素对系统稳定性的影响,展现博弈主体从初态到均衡态的策略调整过程,并采用参数调整控制法对混沌系统进行有效管理,确保供应链可持续稳定运营。

## 1 问题描述与模型构建

### 1.1 基本问题描述

本文所研究的供应链系统由一个制造商和一个零售商组成,制造商将产品以价格 $w$ 批发给零售商销售,零售商开辟线上、线下双渠道进行产品销售,线上渠道零售价为 $p_d$ ,线下渠道零售价为 $p_{cc}$ ,相较于批发价

格,两渠道单位产品分别加价  $m_d$  和  $m_{rc}$ , 即  $p_i = w + m_i$ ,  $i$  表示 2 种渠道。为了增强制造商的环保责任,政府实施碳排放约束政策,为其分配的碳限额为  $G$ 。如果制造商排放的碳总量超出限额,则需购买碳排放权,否则可以出售排放权获取收益。制造商为了获取更大利润,会主动加大碳排放技术的研发投入力度,以确保拥有较高的碳减排率  $\tau$ , 为此付出的投资成本为  $k\tau^2/2$ ,  $k$  为碳减排投资成本系数<sup>[34]</sup>。

假设零售商具有较大的市场规模,在供应链上下游企业中具有较强的话语权,所以制造商和零售商在 Stackelberg 博弈中的决策顺序为:零售商作为主导者首先决策两渠道的单位产品加价  $m_d$  和  $m_{rc}$ , 然后,制造商作为跟随者决策批发价格  $w$  和碳减排率  $\tau$ 。

线上和线下渠道的产品需求量分别为<sup>[35]</sup>

$$\begin{aligned} q_d &= a\delta - p_d + bp_{rc}, \\ q_{rc} &= a(1-\delta) - p_{rc} + bp_d. \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $a$  为潜在市场最大需求量,  $\delta$  为消费者线上购物偏好比例,  $0 < \delta < 1$ ;  $b$  为交叉价格弹性系数。

假设单位产品的生产成本为 0<sup>[36]</sup>, 进而得到制造商的利润  $\pi_m$  为

$$\pi_m(w, \tau) = w(q_d + q_{rc}) - \frac{1}{2}k\tau^2 - h(e(1-\tau)(q_d + q_{rc}) - G), \quad (2)$$

其中,  $h$  为单位碳排放权的交易价格;  $e$  为单位产品初始碳排放量。

零售商的利润  $\pi_r$  为

$$\pi_r(p_d, p_{rc}) = (p_d - w)q_d + (p_{rc} - w)q_{rc}. \quad (3)$$

供应链运营过程中,制造商和零售商都以追求各自利润最大化为决策目标,不可避免地存在利润分配不公的问题,从而引发彼此之间的公平关切行为。此时,两者不再以利润最大化作为决策目标,而是参照对方的利润制定决策以使自身效用最大。

在制造商和零售商彼此间存在双向公平关切行为时,其效用函数分别为<sup>[37]</sup>

$$U_m = \pi_m - \lambda(\pi_r - \pi_m), \quad (4)$$

$$U_r = \pi_r - \mu(\pi_m - \pi_r), \quad (5)$$

其中,  $\lambda$  为制造商的公平关切系数,  $\mu$  为零售商的公平关切系数,  $\mu$  越大,表示决策者对利润分配的公平性越重视。

## 1.2 动态模型构建

在现实市场中,制造商和零售商难以完全掌握决策所需的全部信息,作为有限理性的决策者,需要不断地调整策略才能达到博弈均衡,这是一个长期、反复的过程。因此,本文构建了一个多周期动态策略调整的博弈模型,用以刻画制造商和零售商策略调整的演化轨迹,展现供应链系统从初始态到均衡态的渐近过程。

由于信息的不对称性,制造商和零售商通常根据当前  $t$  期的边际利润制定下一期  $t+1$  期的策略,故得到最终的供应链多周期动态博弈模型<sup>[38]</sup>:

$$\begin{cases} m_{rc}(t+1) = m_{rc}(t) + \alpha_1 m_{rc}(t) \frac{\partial U_r(m_{rc}(t), m_d(t))}{\partial m_{rc}(t)}, \\ m_d(t+1) = m_d(t) + \alpha_2 m_d(t) \frac{\partial U_r(m_{rc}(t), m_d(t))}{\partial m_d(t)}, \\ w(t+1) = w(t) + \beta_1 w(t) \frac{\partial U_m(w(t), \tau(t), m_{rc}(t+1), m_d(t+1))}{\partial w(t)}, \\ \tau(t+1) = \tau(t) + \beta_2 \tau(t) \frac{\partial U_m(w(t), \tau(t), m_{rc}(t+1), m_d(t+1))}{\partial \tau(t)}, \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  分别为零售商线下和线上渠道单位产品加价的调整速度(调整频率),  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  分别为制造商批发价格和碳减排率的调整速度。

## 2 系统的复杂性分析

### 2.1 系统稳定性的判断

系统(6)对应的 Jacobian 矩阵为

$$J(m_{rc}, m_d, w, \tau) = \begin{pmatrix} J_{11} & J_{12} & 0 & 0 \\ J_{21} & J_{22} & 0 & 0 \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} & J_{34} \\ J_{41} & J_{42} & J_{43} & J_{44} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

将系统(6)拆分成零售商决策系统(8)和制造商决策系统(9)为<sup>[39]</sup>

$$\begin{cases} m_{rc}(t+1) = m_{rc}(t) + \alpha_1 m_{rc}(t) \frac{\partial U_r(m_{rc}(t), m_d(t))}{\partial m_{rc}(t)}, \\ m_d(t+1) = m_d(t) + \alpha_2 m_d(t) \frac{\partial U_r(m_{rc}(t), m_d(t))}{\partial m_d(t)}. \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} w(t+1) = w(t) + \beta_1 w(t) \frac{\partial U_m(w(t), \tau(t), m_{rc}(t+1), m_d(t+1))}{\partial w(t)}, \\ \tau(t+1) = \tau(t) + \beta_2 \tau(t) \frac{\partial U_m(w(t), \tau(t), m_{rc}(t+1), m_d(t+1))}{\partial \tau(t)}. \end{cases} \quad (9)$$

**命题 1** 当零售商决策系统(8)和制造商决策系统(9)同时稳定时,系统(6)才稳定。

**证明** 假设式(7)的特征根为  $\theta$ , 则  $\theta$  满足

$$|\theta E - J| = \begin{vmatrix} \theta - J_{11} & -J_{12} & 0 & 0 \\ -J_{21} & \theta - J_{22} & 0 & 0 \\ -J_{31} & -J_{32} & \theta - J_{33} & -J_{34} \\ -J_{41} & -J_{42} & -J_{43} & \theta - J_{44} \end{vmatrix} = 0. \quad (10)$$

根据行列式计算法则,式(10)等价于

$$\begin{vmatrix} \theta - J_{11} & -J_{12} \\ -J_{21} & \theta - J_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \theta - J_{33} & -J_{34} \\ -J_{43} & \theta - J_{44} \end{vmatrix} = 0. \quad (11)$$

式(11)中的 2 个行列式分别对应于系统(8)、(9) Jacobian 矩阵的特征多项式。系统的稳定性取决于其所有特征根的实部是否落在单位圆内,因此当系统(8)、(9)的 2 个特征根的绝对值同时小于 1 时,式(10)中的特征根绝对值也小于 1,即当零售商决策系统(8)和制造商决策系统(9)同时稳定时,系统(6)才稳定。证毕。

命题 1 表明,系统(6)的稳定性问题可以拆分为 2 个决策子系统来研究。根据 Stackelberg 博弈顺序,当零售商决策系统稳定并收敛于均衡点  $(m_{rc}^*, m_d^*)$  时,制造商根据零售商的决策结果再决策得到均衡解  $(w^*, \tau^*)$ ,下面将分别探讨不同决策子系统的稳定性及其对系统整体稳定性的影响。

## 2.2 零售商决策系统的稳定域

令  $m_{rc}(t+1) = m_{rc}(t)$ ,  $m_d(t+1) = m_d(t)$ ,得到系统(8)的 4 个均衡点。根据实际意义,均衡点  $E_{Ri}$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 都出现了价格为 0 的不合理情形,此处只分析系统(8)在正均衡点  $E_{R4}(m_{rc}^*, m_d^*)$  处的局部渐近稳定性。其中,

$$m_{rc}^* = \frac{1}{\Delta_1(b+1)(1+2\lambda)} \left[ 4(1-b^2)eh(1+\lambda)^2(1+2\mu) - a(-2(1+\lambda)((b-3)\lambda-2) + (7+b+8\lambda(2+\lambda))\mu + 2(b-1)\delta(1+2\lambda)(2+3\mu+2\lambda(1+\mu)) \right], \quad (12)$$

$$m_d^* = \frac{1}{\Delta_1(b+1)(1+2\lambda)} \left[ 2a(1+\lambda)(2b(\delta-1)-2\delta+\lambda-3b\lambda+4(b-1)\delta\lambda) + a(-1-2\delta(3+4\lambda(2+\lambda)) + b(6\delta-7-8\lambda(2+\lambda)+8\delta\lambda(2+\lambda)))\mu - 4(b^2-1)eh(1+\lambda)^2(1+2\mu) \right], \quad (13)$$

其中  $\Delta_1 = 4(b-1)(2+3\mu+2\lambda(1+\mu))$ 。

系统(8)在  $E_{R4}$  处的 Jacobian 矩阵为

$$J_R = \begin{pmatrix} J_{R11}^* & \frac{m_{rc}^* \alpha_1 \Delta_3}{4k(1+\lambda)^2 + \Delta_2} \\ \frac{m_d^* \alpha_2 \Delta_3}{4k(1+\lambda)^2 + \Delta_2} & J_{R22}^* \end{pmatrix}, \tag{14}$$

其中,

$$J_{R11}^* = \frac{1 + ((\Delta_5 + \Delta_3 m_d^* - \Delta_4 m_{rc}^*) \alpha_1)}{4k(1+\lambda)^2 + \Delta_2},$$

$$J_{R22}^* = \frac{1 + (((4a(2\delta - 1)(1+\mu)\Delta_2 + \Delta_5) - \Delta_4 m_d^* + \Delta_3 m_{rc}^*) \alpha_2)}{4k(1+\lambda)^2 + \Delta_2},$$

$$\Delta_2 = 4(b-1)e^2 h^2 (1+\lambda)^2,$$

$$\Delta_3 = \Delta_6(1+\mu) + k(2+2\lambda+\mu+b(6+7\mu+2\lambda(7+8\mu+4\lambda(1+\mu)))) ,$$

$$\Delta_4 = 2(2k(1+\lambda)(3+b+4\lambda) + k(7+b+8\lambda(2+\lambda))\mu + \Delta_6(1+\mu)) ,$$

$$\Delta_5 = -(1+\lambda)^2(2a(b-1)e^2 h^2(2\delta-1)(1+\mu) - 2(b-1)ehk(1+2\mu) + ak(4\delta(1+\mu) - 3 - 4\mu)) ,$$

$$\Delta_6 = 4(b^2-1)((b-1)e^2 h^2 + k) .$$

由于系统(8)的特征方程较为复杂,特征根无法直接求得,因此采用 Jury 法则借助特征方程的系数来判断系统的稳定性。若系统(8)在  $E_{R4}$  处局部渐近稳定,则其对应的 Jacobian 矩阵的特征多项式为  $F_R(\theta) = \theta^2 + a_1\theta + a_0$ ,其中,

$$a_0 = J_{R11}^* + J_{R22}^* - \frac{m_d^* m_{rc}^* \alpha_1 \alpha_2 \Delta_3^2}{(4k(1+\lambda)^2 + \Delta_2)^2}, \quad a_1 = -(J_{R11}^* + J_{R22}^*) .$$

**命题 2** 零售商决策系统在唯一正均衡点  $E_{R4}(m_{rc}^*, m_d^*)$  处局部渐近稳定的充要条件为

$$\begin{cases} F_R(1) = a_0 + a_1 + 1 > 0, \\ F_R(-1) = a_0 - a_1 + 1 > 0, \\ |F_R(0)| = |a_0| < 1. \end{cases} \tag{15}$$

命题 2 可以根据 Jury 法则得到,此处证明过程略。

为了更直观地展现  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  对系统(8)稳定域的影响,参考文献[38-39]的参数取值方法,在满足系统(8)存在均衡解约束条件的基础上,参数取值为: $a = 100$ ,  $\delta = 0.4$ ,  $b = 0.5$ ,  $e = 3$ ,  $h = 6$ ,  $k = 5\ 000$ ,  $G = 30$ ,  $\lambda = \mu = 0.5$ 。根据式(15)得到零售商决策系统(8)关于线上线下单位产品加价调整速度  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  的稳定域如图 1 所示。

从图 1 可知,系统(8)的稳定域由 2 个调整速度参数构成,其在系统(8)运行过程中保持在一定范围内,可以确保系统的稳定。即零售商决策变量调整速度的任意组合  $(\alpha_i, \alpha_j)$ ,  $i, j = 1, 2; i \neq j$  处在稳定域内,零售商决策系统才稳定,否则系统将失去稳定甚至陷入混沌状态。从状态空间的角度来看,系统稳定域也可以被视为一个状态集合,集合内的所有状态都是系统能够收敛到的稳态解,也就是说,当系统(8)处于这些状态时,它能够保持稳定运行。

### 2.3 制造商决策系统的稳定域

同理,此处只分析制造商决策系统(9)在正均衡点  $E_{M4}(w^*, \tau^*)$  处的局部渐近稳定性,系统(9)关于批发价格调整速度  $\beta_1$  和碳减排率调整速度  $\beta_2$  的稳定域如图 2 所示。

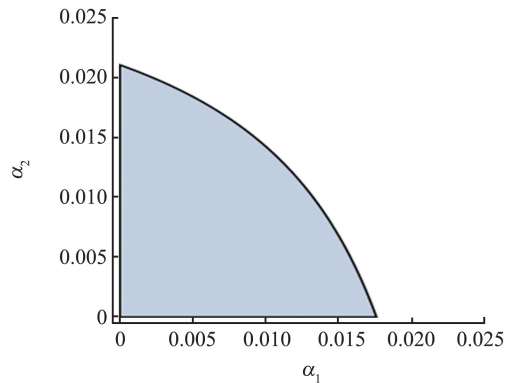


图 1 系统(8)关于  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  的稳定域  
Fig.1 Stable regions of system (8) with respect to  $\alpha_1$  and  $\alpha_2$

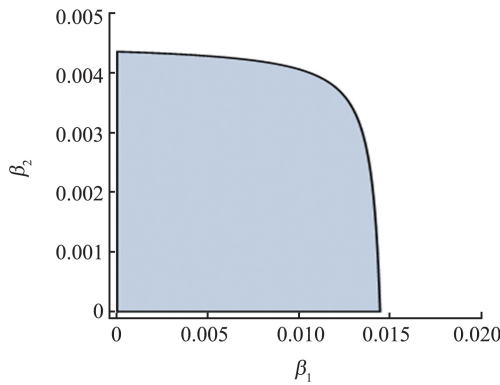


图2 系统(9)关于 $\beta_1$ 和 $\beta_2$ 的稳定域

Fig.2 Stable regions of system (9) with respect to  $\beta_1$  and  $\beta_2$

结合命题1和图1、2可知,只有当零售商和制造商决策变量调整速度的任意组合 $(\alpha_i, \alpha_j)$ 和 $(\beta_i, \beta_j)$ ,  $i, j=1, 2$ 且 $i \neq j$ 同时处于各自的稳定域时,系统(6)才达到稳定状态,否则将经历分岔而陷入混沌状态。

### 3 决策变量调整速度对系统复杂性的影响

由上文分析可知,供应链整体的稳定性取决于零售商决策系统和制造商决策系统的稳定性,下面将讨论2个子系统稳定性的不同组合对供应链整体稳定性的影响。

#### 3.1 制造商决策系统稳定、零售商决策系统不稳定

令 $\alpha_2=0.01, \beta_1=0.01, \beta_2=0.001$ ,依据图1、2可知3者都处于稳定域内。批发价 $w$ 、碳减排率 $\tau$ 、单位产品加价 $m_{rc}$ 和 $m_d$ 、最终零售价 $p_{rc}$ 和 $p_d$ 随 $\alpha_1$ 增大的动态演化行为如图3所示。

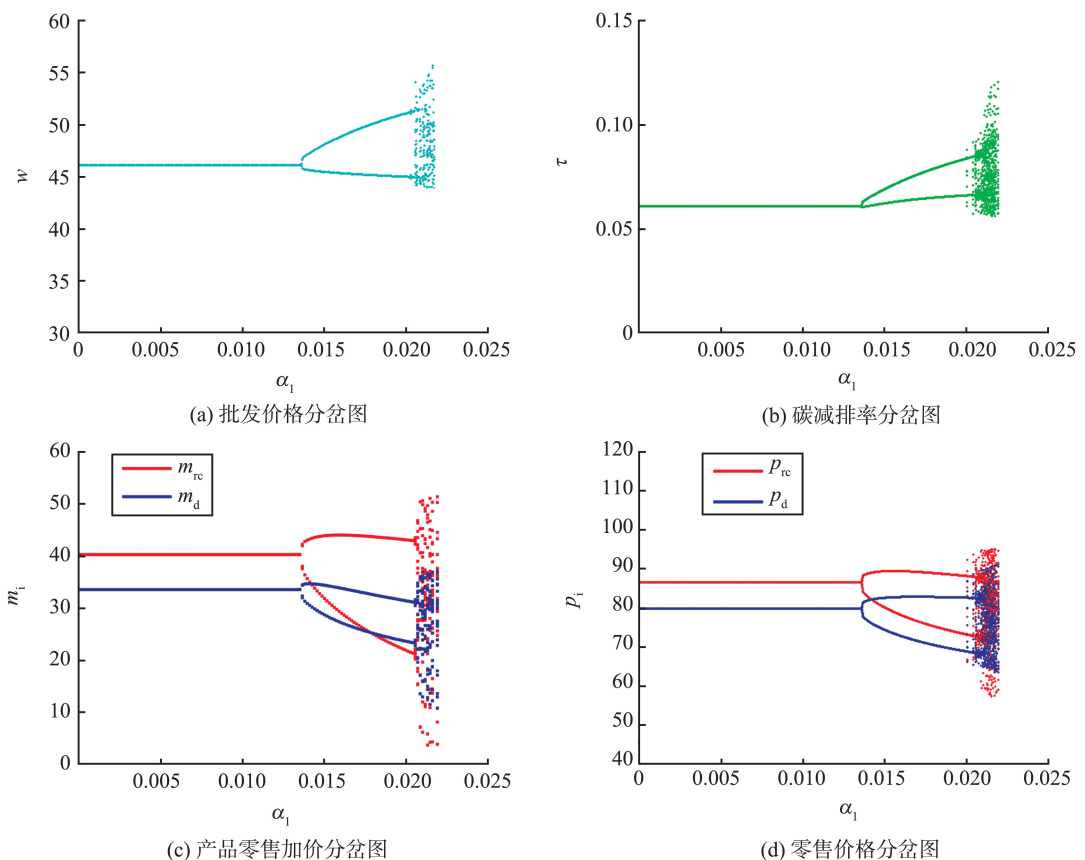


图3 系统(8)、(9)关于 $\alpha_1$ 的动态演化行为

Fig.3 Dynamic evolution behavior of systems (8) and (9) with respect to  $\alpha_1$

图3所示的演化行为中都出现了倍周期分岔现象,究其原因是随着线下渠道单位产品加价调整速度  $\alpha_1$  的增加,使得系统的周期性解出现突变,出现了周期倍增的现象,这也是通向混沌的一条途径。具体来说,系统(8)、(9)都从稳定态经倍周期分岔陷入混沌状态,此时制造商和零售商的决策变量出现剧烈波动,难以稳定经营和获利。因此,零售商过大的决策变量调整速度会导致自身和制造商决策系统同时失去稳定。

零售商决策变量的调整速度  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  对自身和制造商平均利润的影响如图4所示。

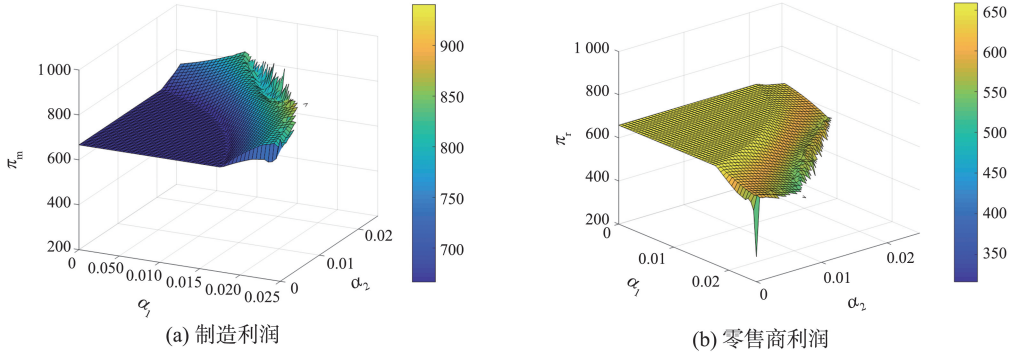


图4  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  对供应链成员平均利润的影响

Fig.4 Impact of  $\alpha_1$  and  $\alpha_2$  on the average profits of supply chain members

图4表明,当系统处于稳定状态时,制造商和零售商可以获得相对稳定的利润;随着  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  的逐渐增大,制造商利润增大,零售商利润减少。对比发现, $\alpha_1$  对两者利润的影响更显著。因此,过高的单位产品加价调整速度导致的系统混沌不利于零售商本身,但是对制造商有利,长此以往势必引起利润分配不均,彼此的公平关切遭到破坏。具体来讲,零售商切不可频繁调价,避免导致市场混乱、消费者迷茫。制造商和零售商应该根据市场状况和产品特点制定合适的价格策略,且保持一定的稳定性,从而更好地促进产品销售。

### 3.2 制造商决策系统不稳定、零售商决策系统稳定

令  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.01$ ,  $\beta_2 = 0.001$ , 依据图1、2可知三者都处于稳定域内。制造商系统和零售商系统关于批发价格调整速度  $\beta_1$  的演化行为如图5所示。

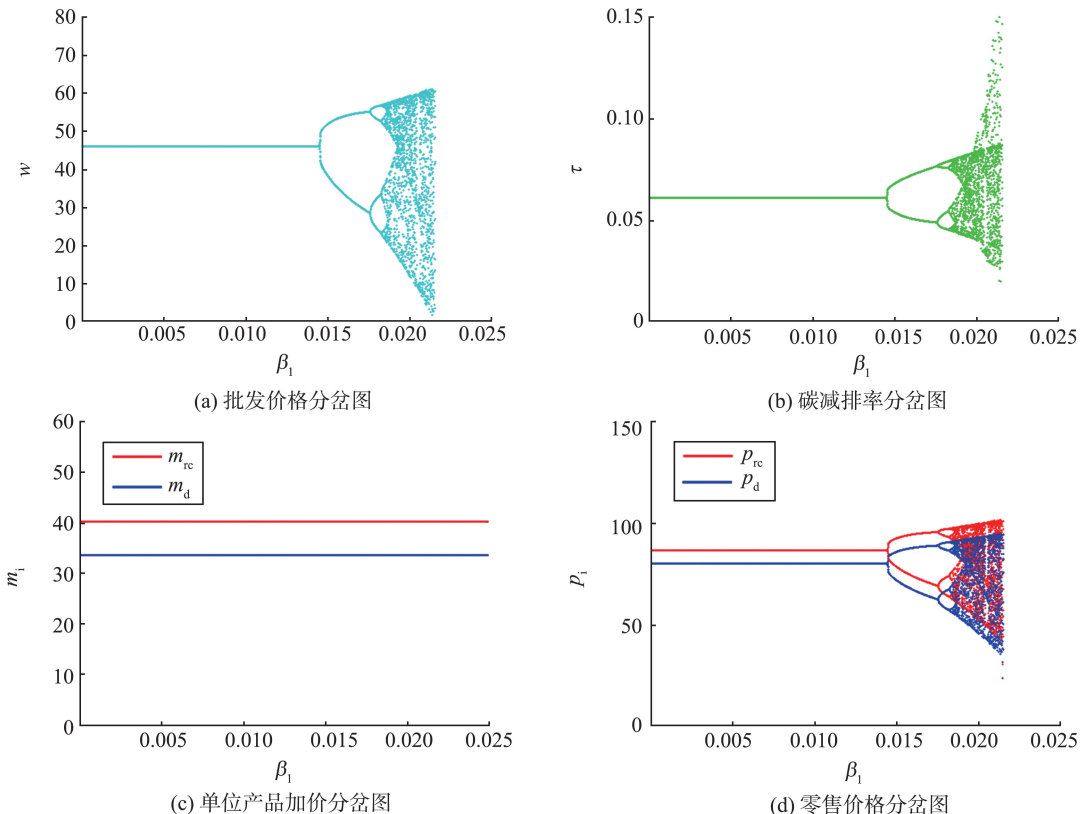


图5 系统(8)、(9)关于  $\beta_1$  的动态演化行为

Fig.5 Dynamic evolution behavior of systems (8) and (9) with respect to  $\beta_1$

在图5中,随着批发价格调整速度 $\beta_1$ 的增加,批发价格 $w$ 和碳减排率 $\tau$ 的纳什均衡都失去稳定,即系统(9)经倍周期分岔进入混沌状态;而 $m_{rc}$ 和 $m_d$ 始终处在均衡状态;零售价格 $p_{rc}$ 和 $p_d$ 由于受到 $w$ 和 $\tau$ 的影响,同样陷入混沌。因此,制造商过大的决策变量调整速度会导致自身进入混沌,但是不会对零售商决策系统造成影响。具体地,处于供应链主导地位的企业决策对整个系统的稳定性具有决定性的影响,而跟随者的决策仅影响局部范围,在市场中具有话语权且处于领导者地位的企业,更应该增强社会责任感,带头践行稳定市场和发展经济的重任,实现环境效益和经济效益的双丰收。

制造商决策变量的调整速度 $\beta_1$ 和 $\beta_2$ 对制造商和零售商平均利润的影响如图6所示。

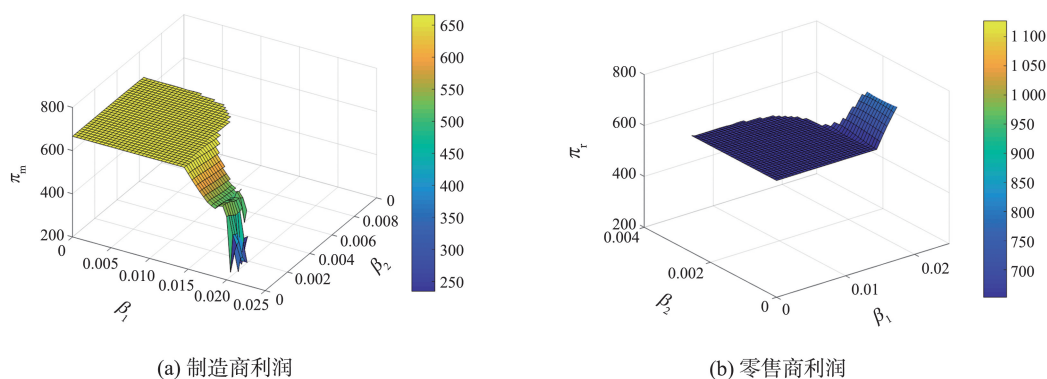


图6  $\beta_1$ 和 $\beta_2$ 对供应链成员平均利润的影响

Fig.6 Impact of  $\beta_1$  and  $\beta_2$  on the average profits of supply chain members

从图6可知,随着制造商批发价格调整速度 $\beta_1$ 的逐渐增大,制造商的利润大幅减少,零售商的利润逐渐增加;而制造商碳减排率的调整速度 $\beta_2$ 对供应链成员的利润影响较弱。因此,过高的批发价格调整速度导致的系统混沌不利于制造商本身,但是对零售商有利。具体来说,制造商不会频繁调整批发价格给自己带来损失,虽然零售商在一定程度上有利可图,但批发价格的过度变化也会影响零售商的销售预测、库存管理等方面,不是保持可持续发展的良策。

### 3.3 制造商和零售商决策系统都不稳定

令 $\alpha_2=0.01$ , $\beta_2=0.001$ ,此时 $\alpha_2$ 和 $\beta_2$ 均处于稳定域内。批发价格 $w$ 和碳减排率 $\tau$ 随 $\alpha_1$ 和 $\beta_1$ 增大的动态演化行为如图7所示。

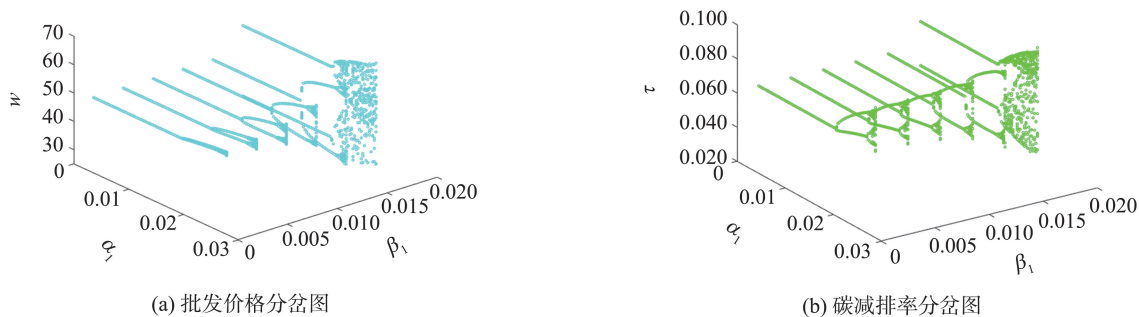


图7 系统(9)关于 $\alpha_1$ 和 $\beta_1$ 的动态演化行为

Fig.7 Dynamic evolution behavior of system (9) with respect to  $\alpha_1$  and  $\beta_1$

从图7可知,随着批发价格调整速度 $\beta_1$ 的增大,批发价格和碳减排率的混沌现象越发显著。随着线下渠道单位产品加价调整速度 $\alpha_1$ 的增大,批发价格和碳减排率都由稳定状态逐渐进入混沌状态。因此,作为主导者零售商的加价调整速度会影响作为跟随者制造商决策的稳定性,而作为跟随者,制造商批发价格的调整速度则加剧了系统混沌的程度。因此,产品批发价和销售的加价都需要保持相对稳定,否则两者频繁变动的叠加效应会加剧市场需求预测的难度、消费者的不信任度、库存管理的复杂度,从而降低供应链效率。

制造商和零售商决策变量的调整速度 $\alpha_1$ 和 $\beta_1$ 对他们平均利润的影响如图8所示。

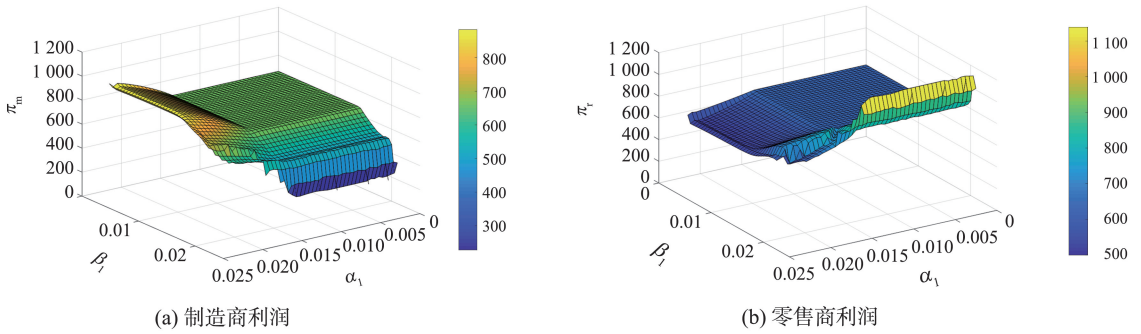


图 8  $\alpha_1$  和  $\beta_1$  对供应链成员平均利润的影响  
 Fig.8 Impact of  $\alpha_1$  and  $\beta_1$  on the average profits of supply chain members

从图 8 可知,当制造商或零售商采取较高的决策变量调整速度时,将导致自身利润受损,反而促使另一方的利润增大;但是当他们都采取较高的决策变量调整速度时,零售商作为供应链中的主导方将获得更多的利润,而制造商作为跟随方利润将减少。因此,市场进入无序状态对供应链中的跟随者不利,而主导者作为市场的领头羊则更容易获利。这说明,无论是制造商还是零售商,双方应谨慎决策努力找到均衡点,避免盲目跟风或过度反应导致自身利润受损。作为供应链的主导者在决策上有更大的灵活性和优势,有助于在竞争中占据有利地位。而作为跟随者,要注重与主导者的合作与协调,及时了解市场需求和趋势,更好地制定和调整自身策略,减少盲目过快策略调整而导致利润损失。

### 4 不同系统状态下利润的演化行为

系统状态的变化会影响制造商和零售商的决策效果,本节将分析不同系统状态下公平关切和碳交易价格对制造商和零售商利润的影响。

#### 4.1 公平关切对利润的影响

系统不同状态下,公平关切系数对供应链成员平均利润的影响如图 9 所示。

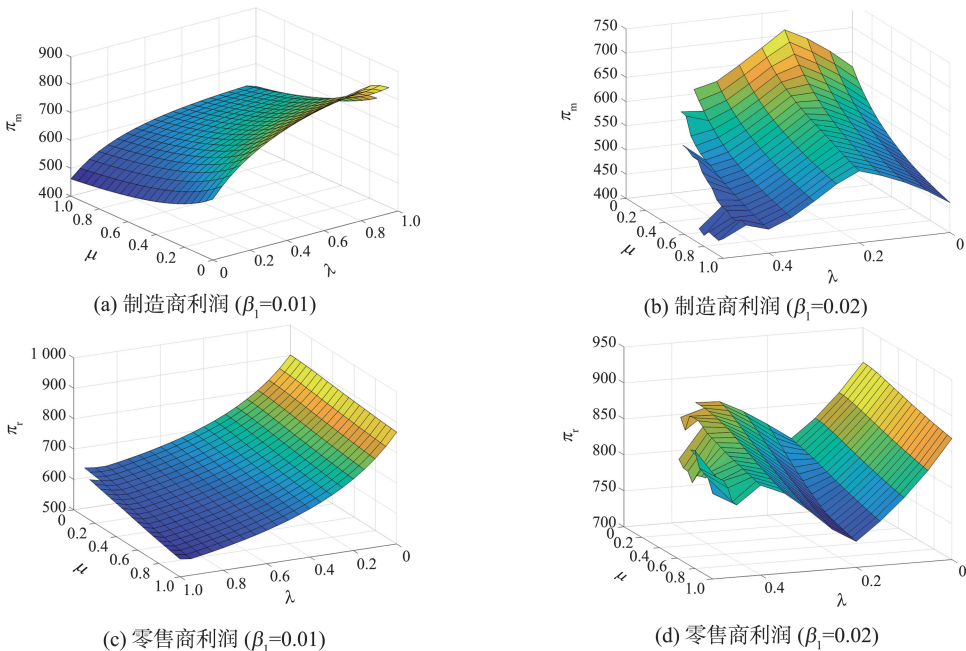


图 9 不同系统状态下  $\mu$  和  $\lambda$  对供应链成员平均利润的影响( $\beta_1 = 0.01$  时系统稳定, $\beta_1 = 0.02$  时系统混沌)  
 Fig.9 Impact of  $\mu$  and  $\lambda$  on the average profits of supply chain members under different system states  
 (the system is stable at  $\beta_1 = 0.01$  and chaotic at  $\beta_1 = 0.02$ )

根据图 5(a) 和图 9 可知, $\beta_1 = 0.01$  时,系统处于稳定状态,此时只有当零售商公平关切程度较低,制造

商提升公平关切水平才能获取高额收益;制造商降低公平关切水平零售商能够显著获利。这说明,在稳定的系统中,零售商获利与否直接受到制造商公平关切强度的影响,而制造商是否获利则取决于零售商和自身公平关切水平的综合作用。 $\beta_1 = 0.02$  时,系统处于混沌状态,制造商追求高公平关切并不会为其带来更多的收益,而是存在一个最优公平关切系数  $\lambda$  使得其利润最大;随着制造商公平关切的增加,零售商利润先降低后提高,存在一个  $\lambda$  使得零售商利润最小。这说明,在混沌的系统中,制造商和零售商获利的多少不仅取决于公平关切水平,还和系统的混沌状态紧密相关。此外,无论系统状态如何,零售商公平关切程度的增加都会导致制造商和零售商利润的降低,在系统混沌状态下的下降趋势更明显。

#### 4.2 碳交易价格对利润的影响

不同批发价格调整速度下,碳交易价格  $h$  对供应链成员平均利润的影响如图 10 所示。

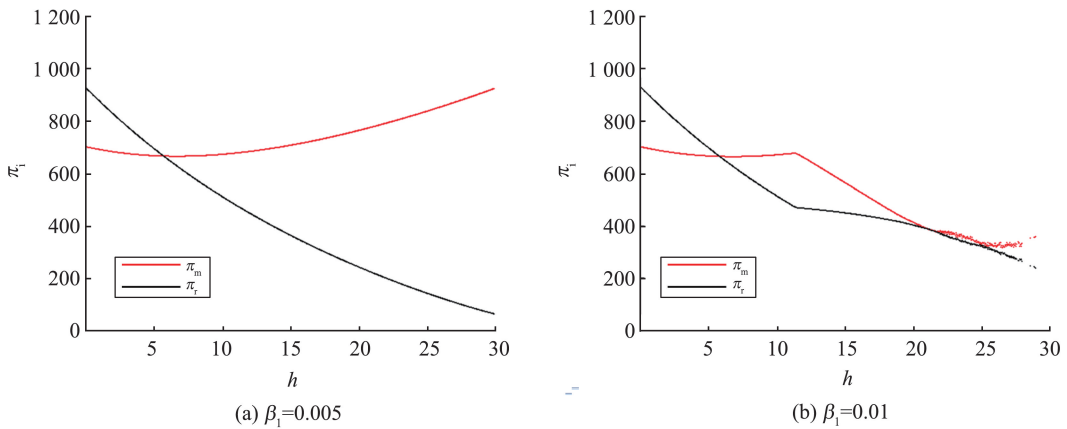


图 10  $\beta_1$  下  $h$  对供应链成员平均利润的影响

Fig.10 Impact of  $h$  on the average profits of supply chain members under  $\beta_1$

根据图 5(a) 和图 10 可知,当  $\beta_1 = 0.005$  和  $\beta_1 = 0.01$  时,系统都处于稳定状态。当批发价格调整速度  $\beta_1$  较低时,随着碳交易价格  $h$  的逐渐增大,制造商利润先降低后增高,零售商利润则始终降低;当  $\beta_1$  较大时,随着  $h$  增大,制造商利润先增高后降低,存在一个最优的  $h$  使其利润最大,而零售商利润下降的趋势有所减缓。这说明,当批发价格保持相对稳定时,较高的碳交易价格对制造商有利,而对零售商不利;当批发价格变动过于频繁时,较高的碳交易价格对制造商不利,对零售商有利。

## 5 混沌控制

根据图 3、5 可知,当系统混沌时,决策变量的剧烈波动不利于企业的健康可持续发展。因此,本节采用参数调整控制法来抑制系统的混沌现象,使其重返稳定状态。

根据式(8)、(9)可知,零售商系统的稳定性会影响全局,而制造商系统的稳定性仅影响局部,因此要实现供应链系统的整体混沌控制,必须在零售商决策系统中引入控制参数  $\phi$ ,此时系统(6)转变为<sup>[40]</sup>

$$\begin{cases} m_{rc}(t+1) = (1-\phi) \left( m_{rc}(t) + \alpha_1 m_{rc}(t) \frac{\partial U_r(m_{rc}(t), m_d(t))}{\partial m_{rc}(t)} \right) + \phi m_{rc}(t), \\ m_d(t+1) = (1-\phi) \left( m_d(t) + \alpha_2 m_d(t) \frac{\partial U_r(m_{rc}(t), m_d(t))}{\partial m_d(t)} \right) + \phi m_d(t), \\ w(t+1) = w(t) + \beta_1 w(t) \frac{\partial U_m(w(t), \tau(t), m_{rc}(t+1), m_d(t+1))}{\partial w(t)}, \\ \tau(t+1) = \tau(t) + \beta_2 \tau(t) \frac{\partial U_m(w(t), \tau(t), m_{rc}(t+1), m_d(t+1))}{\partial \tau(t)}. \end{cases} \quad (16)$$

设置参数  $\alpha_1 = 0.022$ ,  $\alpha_2 = 0.01$ ,  $\beta_1 = 0.01$ ,  $\beta_2 = 0.001$ ,由图 3 可知此时系统(16)处于混沌状态,其随  $\phi$  变化的动态演化行为如图 11 所示。当  $0 < \phi < 0.32$  时,随着  $\phi$  不断增大,系统先处于混沌状态,后进入倍周期分

岔状态;当  $\phi > 0.32$  时,系统得以有效控制,恢复至稳定状态。

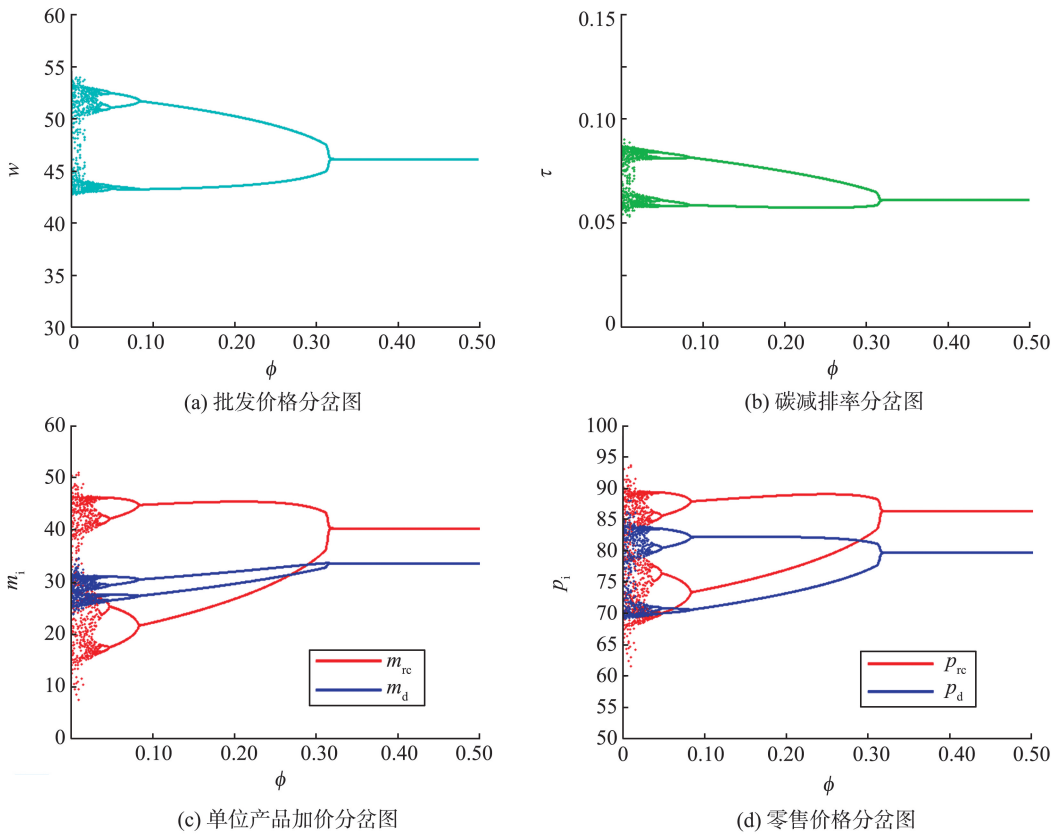


图 11 系统 (16) 关于控制参数  $\phi$  的动态演化行为

Fig.11 Dynamic evolution behavior of system (16) with respect to control parameter  $\phi$

通过时间序列描述  $m_{rc}$ 、 $m_d$  在控制参数取不同值时的控制效果。保持上述参数不变,当  $\phi = 0.05$  时,系统 (16) 处于混沌状态,此时  $m_{rc}$ 、 $m_d$  的时间序列如图 12(a) 所示;当  $\phi = 0.4$  时,系统处于稳定状态,此时  $m_{rc}$ 、 $m_d$  的时间序列如图 12(b) 所示。对比可以发现, $\phi < 0.32$  时, $m_{rc}$ 、 $m_d$  经过 100 个迭代周期后依旧无法达到纳什均衡; $\phi > 0.32$  时, $m_{rc}$ 、 $m_d$  经过 20 个迭代周期后基本达到纳什均衡,此后一直保持稳定。这说明,当决策者选择合适的控制参数时,混沌系统可以被控制在稳定状态。

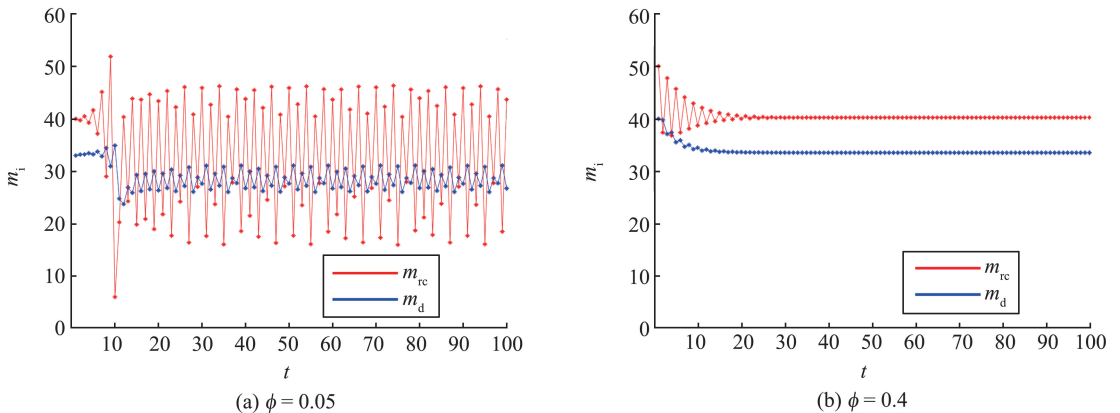


图 12 单位产品加价的时间序列 ( $\phi = 0.05$  时系统混沌,  $\phi = 0.4$  时系统稳定)

Fig.12 Time series of unit product markup (the system is chaotic at  $\phi = 0.05$  and stable at  $\phi = 0.4$ )

由图 11、12 可知,混沌的系统通过外加参数调节可以有效改变系统的转态,使之从混沌趋于稳定。这说明,在现实市场中,尽管存在不可预测性和复杂性,但通过精细的管理和适时的干预,可以在一定程度上引导和稳定市场动态,实现对复杂经济现象的有效管理。

## 6 结论

本文在考虑制造商碳减排约束的基础上,通过构建双渠道主从动态博弈模型,研究了制造商和零售商决策变量调整速度、公平关切、碳交易价格等因素对系统稳定性和利润的影响,给出了博弈系统的稳定域,并对混沌系统实施有效控制。研究发现:(1)决策变量调整速度对系统稳定性至关重要,过高的调整速度会导致系统陷入混沌状态,从而影响供应链成员的利润;(2)处于主导地位的零售商能够影响系统的全局稳定性,而作为跟随者的制造商仅影响系统的局部稳定性;(3)公平关切系数和碳交易价格也会影响供应链成员的利润,但影响程度取决于系统所处的状态;(4)在系统稳定状态下,零售商公平关切程度的增加会导致制造商和零售商利润降低,而在系统混沌状态下,存在一个最优公平关切系数使得制造商利润最大;(5)参数调整控制法可以有效控制混沌系统,使其恢复稳定状态。

本文有以下管理启示:(1)企业应根据自身情况和市场环境,合理调整决策速度,避免系统陷入混沌状态;(2)作为龙头企业和行业的引领者,在决策时更要慎重,否则会对整个行业带来不利影响;(3)企业应关注自身和合作伙伴的公平关切行为,并采取协商或契约等方式进行调整,确保利润分配的公平性;(4)企业应关注碳交易价格的变化趋势,并根据价格调整自身碳减排策略;(5)对处于动荡中的市场,政府可以外加一定的干预措施,通过市场调节加速其重返稳定的发展状态。

### 参考文献:

- [1] UNFCCC. Glasgow climate pact[C]//Decisions adopted by the conference of the parties serving as the meeting of the Parties to the Paris agreement. Glasgow: United Nations, 2021:2-10.
- [2] WU Y, ZHANG D Z. Demand fluctuation and chaotic behaviour by interaction between customers and suppliers[J]. International Journal of Production Economics, 2007, 107(1):250-259.
- [3] 李卓群,严广乐. 不确定需求下带约束供应链系统复杂动态行为分析[J]. 控制与决策, 2016, 31(1):173-179.  
LI Zhuoqun, YAN Guangle. Analysis of complex dynamics behaviors in constrained supply chain system under uncertain demand process[J]. Control and Decision, 2016, 31(1):173-179.
- [4] 依不拉音·吾斯曼,郭文强,阿布都热合曼·卡的儿,等. 专业零售商与厂家直售商的多渠道供应价格博弈的混沌动力学研究[J]. 运筹与管理, 2019, 28(11):54-59.  
YIBULAYIN Wusiman, GUO Wenqiang, ABUDOUREHEMAN Kadier, et al. Research on chaotic dynamics of multi-channel supply chain price game between professional retailers and factory direct sellers[J]. Operations Research and Management Science, 2019, 28(11):54-59.
- [5] HWARNG H B, XIE N. Understanding supply chain dynamics: a chaos perspective[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 184(3):1163-1178.
- [6] 戴道明,王忆都. “双碳”目标下多周期供应链政府补贴、碳减排与定价协调研究[J/OL]. 计算机集成制造系统. <https://doi.org/10.13196/j.cims.2023.0372>.  
DAI Daoming, WANG Yidu. Coordination of government subsidies, carbon emission reduction and pricing in multi-cycle supply chain under “dual-carbon” target[J/OL]. Computer Integrated Manufacturing Systems. <https://doi.org/10.13196/j.cims.2023.0372>.
- [7] 唐书传,刘云志,肖条军. 考虑社会责任的供应链定价与碳减排决策[J]. 中国管理科学, 2020, 28(4):99-108.  
TANG Shuchuan, LIU Yunzhi, XIAO Tiaojun. Pricing and carbon emission reduction decisions in A socially responsible supply chain[J]. Chinese Journal of Management Science, 2020, 28(4):99-108.
- [8] CHE C, ZHENG H X, GENG X, et al. Research on carbon emission reduction investment decision of power energy supply chain: based on the analysis of carbon trading and carbon subsidy policies[J]. Energies, 2022, 15(17):6151.
- [9] XIA J, NIU W J. Carbon-reducing contract design for a supply chain with environmental responsibility under asymmetric information[J]. Omega, 2021, 102:102390.
- [10] 刘名武,樊宝丹,邹梓琛. 碳税政策下制造商碳标签选择策略[J/OL]. 山东大学学报(理学版). <https://link.cnki.net/urlid/37.1389.N.20240912.1707.002>.  
LIU Mingwu, FAN Baodan, ZOU Zichen. Carbon tax policy and manufacturer's carbon labeling strategy[J/OL]. Journal of Shandong University (Natural Science). <https://link.cnki.net/urlid/37.1389.N.20240912.1707.002>.

- [11] 张云丰,尚钱龙,龚本刚,等. 碳标签制度下三级供应链定价与碳减排决策[J]. 系统工程学报, 2022, 37(2):242-262.  
ZHANG Yunfeng, SHANG Qianlong, GONG Bengang, et al. Pricing and carbon emission reduction decisions in three-echelon supply chain under carbon labelling system[J]. Journal of Systems Engineering, 2022, 37(2):242-262.
- [12] 刘培德,李西娜,李佳路. 碳配额交易机制下竞争企业低碳技术扩散:基于复杂网络的演化博弈分析[J]. 系统工程理论与实践, 2024, 44(2):684-699.  
LIU Peide, LI Xina, LI Jialu. Diffusion of low-carbon technology of competitive enterprises under carbon quota trading mechanism: evolutionary game analysis based on complex network[J]. China Industrial Economics, 2024, 44(2):684-699.
- [13] TOPTAL A, ÖZLÜ H, KONUR D. Joint decisions on inventory replenishment and emission reduction investment under different emission regulations[J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(1):243-269.
- [14] FAN X S, CHEN K L, CHEN Y J. Is price commitment a better solution to control carbon emissions and promote technology investment? [J]. Management Science, 2023, 69(1):325-341.
- [15] 毋博,周建亨. 需求和碳交易价格不确定性下的供应链碳减排激励[J/OL]. 中国管理科学. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.2686>.  
WU Bo, ZHOU Jianheng. Incentives for carbon emission reduction in supply chains under the uncertainty of demand and carbon trading prices[J/OL]. Chinese Journal of Management Science. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.2686>.
- [16] 王道平,殷悦,朱梦影. 基于不同碳配额交易路径的供应链减排决策研究[J]. 运筹与管理, 2024, 33(5):35-41.  
WANG Daoping, YIN Yue, ZHU Mengying. Research on supply chain emission reduction decisions based on different carbon quota trading paths[J]. Operations Research and Management Science, 2024, 33(5):35-41.
- [17] 夏西强,朱庆华,武晓晴. 政府碳税与补贴政策对独立再制造模式的影响[J]. 系统工程学报, 2024, 39(4):629-640.  
XIA Xiqiang, ZHU Qinghua, WU Xiaojing. Impact of government carbon-tax and subsidy policy on independent remanufacturing[J]. Journal of Systems Engineering, 2024, 39(4):629-640.
- [18] CUI T H T, RAJU J S, ZHANG J Z. Fairness and channel coordination[J]. Management Science, 2007, 53(8):1303-1314.
- [19] 杜少甫,杜婵,梁樑,等. 考虑公平关切的供应链契约与协调[J]. 管理科学学报, 2010, 13(11):41-48.  
DU Shaofu, DU Chan, LIANG Liang, et al. Supply chain coordination considering fairness concerns [J]. Journal of Management Sciences in China, 2010, 13(11):41-48.
- [20] 王磊,成克河,王世伟. 考虑公平关切的双渠道供应链定价策略研究[J]. 中国管理科学, 2012, 20(S2):563-568.  
WANG Lei, CHENG Kehe, WANG Shiwei. Research on pricing strategy of dual-channel supply chain considering fairness concerns[J]. Chinese Journal of Management Science, 2012, 20(S2):563-568.
- [21] 周艳菊,鲍茂景,陈晓红,等. 基于公平关切的低碳供应链广告合作-减排成本分担契约与协调[J]. 中国管理科学, 2017, 25(2):121-129.  
ZHOU Yanju, BAO Maojing, CHEN Xiaohong, et al. Co-op advertising and emission reduction cost sharing contract and coordination in low-carbon supply chain based on fairness concerns[J]. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(2):121-129.
- [22] 曹晓刚,曹博威,闻卉. 考虑公平关切的混合回收渠道闭环供应链决策研究[J/OL]. 中国管理科学. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.0619>.  
CAO Xiaogang, CAO Bowei, WEN Hui. Research on closed-loop supply chain decision-making of mixed recycling channels considering fairness concerns[J/OL]. China Industrial Economics. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.0619>.
- [23] 徐扬,吴阳,吕建成,等. 考虑消费者公平关切行为的众筹定价策略[J]. 系统工程学报, 2024, 39(5):767-781.  
XU Yang, WU Yang, Lü Jiancheng, et al. Crowdfunding pricing strategies considering consumers' fairness concern behaviors [J]. Journal of Systems Engineering, 2024, 39(5):767-781.
- [24] 韩同银,刘丽,金浩. 考虑政府补贴和公平关切的双渠道绿色供应链决策研究[J]. 中国管理科学, 2022, 30(4):194-204.  
HAN Tongyin, LIU Li, JIN Hao. Research on dual-channel green supply chain decision making considering government subsidy and fairness concerns[J]. Chinese Journal of Management Science, 2022, 30(4):194-204.
- [25] 李庆颖,朱晨,马曼琼. 考虑公平关切和产能投入的半导体供应链生产与采购决策研究[J]. 系统工程, 2025, 43(2):65-81.  
LI Qingying, ZHU Chen, MA Manqiong. Research on production and purchasing decision of semiconductor supply chain considering equity concern and capacity input[J]. China Industrial Economics, 2025, 43(2):65-81.
- [26] 吴江,彭扬,邹黎敏,等. 不确定性因素影响下的混沌供应链系统脉冲同步策略研究[J]. 中国管理科学, 2023, 31(11):80-89.

- WU Jiang, PENG Yang, ZOU Limin, et al. Research on impulsive synchronization strategy of chaotic supply chain system under the influence of uncertain factors[J]. Chinese Journal of Management Science, 2023, 31(11):80-89.
- [27] 董海,徐德珉. 三渠道回收模式下闭环供应链混沌控制研究[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2020, 17(1):55-61, 80.  
DONG Hai, XU Demin. Research on chaos and control of closed-loop supply chain under three channel recovery modes[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2020, 17(1):55-61, 80.
- [28] 于世海,陈光春. 复杂系统视角下供应链模型动力学仿真研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(4):328-331, 347.  
YU Shihai, CHEN Guangchun. Research on supply chain models and its dynamical characteristics simulation based on complex system theory[J]. Computer Simulation, 2016, 33(4):328-331, 347.
- [29] CHEN J X, ZHENG J H, ZHANG T H, et al. Dynamical complexity of pricing and green level for a dyadic supply chain with capital constraint[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2022, 195:1-21.
- [30] MA J H, SI F S, ZHANG Q, et al. Impact of extended warranty service on product pricing in online direct retailers' competitive market[J]. Energy Economics, 2024, 129:107217.
- [31] MA J H, WANG Z X. Optimal pricing and complex analysis for low-carbon apparel supply chains[J]. Applied Mathematical Modelling, 2022, 111:610-629.
- [32] 郑清,阿布都热合曼·卡的尔. 碳税机制下考虑不同低碳策略的动态博弈模型及复杂性研究[J]. 运筹与管理, 2022, 31(4):55-60.  
ZHENG Qing, ARBudureheman Kader. Research on dynamic game model and complexity considering different low-carbon strategies under carbon tax mechanism[J]. Operations Research and Management Science, 2022, 31(4):55-60.
- [33] 李秋香,张玉豪,黄毅敏,等. 考虑不同商业目标和公平关切的动态博弈模型及复杂性研究[J]. 运筹与管理, 2019, 28(1):35-45.  
LI Qiuxiang, ZHANG Yuhao, HUANG Yimin, et al. Complexity analysis for dynamic game model with fair-caring and different business objectives[J]. Operations Research and Management Science, 2019, 28(1):35-45.
- [34] YANG L, ZHANG Q, JI J N. Pricing and carbon emission reduction decisions in supply chains with vertical and horizontal cooperation[J]. International Journal of Production Economics, 2017, 191:286-297.
- [35] 吉清凯,方刚,赵达. 有限产能直销优先策略下双渠道供应链的定价博弈模型[J]. 中国管理科学, 2022, 30(4):184-193.  
JI Qingkai, FANG Gang, ZHAO Da. Pricing game of dual-channel supply chains under the "capacity for direct-channel first" policy[J]. Chinese Journal of Management Science, 2022, 30(4):184-193.
- [36] LI G, LI L, SUN J S. Pricing and service effort strategy in a dual-channel supply chain with showrooming effect[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2019, 126:32-48.
- [37] 邹清明,胡李庆,邹霆钧. 碳限额与碳交易机制下考虑公平关切的供应链定价与协调研究[J]. 中国管理科学, 2022, 30(10):142-154.  
ZHOU Qingming, HU Liqing, ZHOU Tingjun. Carbon cap and trade mechanism: pricing and coordination of supply chains with fairness concerns[J]. Chinese Journal of Management Science, 2022, 30(10):142-154.
- [38] TIAN Y, MA J H, XIE L, et al. Coordination and control of multi-channel supply chain driven by consumers' channel preference and sales effort[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2020, 132:109576.
- [39] MA J H, REN H. The impact of variable cost on a dynamic Cournot-Stackelberg game with two decision-making stages[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2018, 62:184-201.
- [40] CHEN X L, ZHOU J H. The complexity analysis and chaos control in omni-channel supply chain with consumer migration and advertising cost sharing[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2021, 146:110884.

(编辑:祁业卿)