

【基础理论研究】

碳交易机制下考虑零售商公平关切的 双渠道供应链稳定性分析

司凤山, 葛彤彤, 王 晶

(安徽财经大学 管理科学与工程学院, 安徽 蚌埠 233030)

摘 要: 针对供应链系统的稳定性问题, 在碳交易机制下构建动态博弈模型, 探究决策变量调整速度、公平关切等因素对系统稳定性的影响, 刻画系统从博弈初始态到均衡态的演化过程, 并对混沌系统实施有效控制。研究发现: 价格调整速度存在范围限制, 否则极易引起系统经历稳定状态、倍周期分岔状态和混沌状态而失去稳定; 系统失稳引起价格和碳减排率出现波动, 企业难以稳定获利; 零售商公平关切的增强会加大系统失稳的风险, 并制约制造商决策的空间; 无论系统是否稳定, 零售商的公平关切行为对制造商不利而对自身有利, 系统失稳状态下这种趋势更显著; 稳定系统中碳交易机制的引入对制造商和零售商都不利, 但是系统失稳时加剧制造商的不利而对零售商有利; 延迟反馈控制法能够使失稳系统重回稳定状态, 从而提高系统的可控性。

关键词: 碳交易机制; 公平关切; 双渠道供应链; 稳定性分析; 混沌控制

中图分类号: F 224.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.13486/j.issn.2097-4973.2025.02.015

随着经济和工业的快速发展, 全球气候变暖和环境污染等问题愈发严峻, 低排放和低污染逐渐成为各国关注的焦点。为了有效控制碳排放, 各国政府出台了多种碳政策, 其中碳限额与碳交易机制被普遍认为是遏制碳排放最有效的市场机制之一^[1-2]。与此同时, 由于电子商务的普及, 网络购物成为居民消费的重要渠道, 在购物场景日益线上化的大背景下, 众多制造商开始积极拓展线上渠道, 然而这极大地损害了线下零售商的利益, 导致供应链利润分配的不公平。碳交易机制的引入使得供应链中的碳排放权成为一种有价值的资源, 各成员间的利益分配和合作关系变得更复杂, 供应链企业利润分配的公平性问题也更突出。长期不公平的利润分配可能会使企业之间的合作伙伴关系破裂^[3], 零售商甚至可能会以牺牲自身利润为代价采取报复措施^[4], 从而对供应链造成伤害。

关于碳交易机制在供应链中的应用研究, 邢青松等^[5]研究了碳交易机制下嵌入式低碳服务提供商参与减排的契约设计与协调问题, 发现两部制费用契约能够实现供应链的完美协调。徐小平等^[6]考虑了参考价格效用对消费者的影响, 分析了碳交易机制下供应链最优决策与协调问题, 其研究表明参考价格效应的存在使平台倾向于设置更高的碳价, 从而激励制造商进行更多的碳减排投资。Yang 等^[7]研究了再制造模式对碳减排水平和企业利润的影响, 以及制造商最优回收渠道的选择问题, 其研究发现集中决策模式可能更有利于实现碳减排, 而某些分散决策模式则可能因决策不一致导致碳排放增加。此外, 合理的碳价格设定也是实现供应链协调的关键因素。夏西强、Ji 和王一雷等^[8-10]探究了不同碳配额分配方式和碳排放配

收稿日期: 2024-06-05

基金项目: 安徽省哲学社会科学规划项目(AHSKY2022D109)

第一作者简介: 司凤山(1981—), 男, 山东滕州人, 副教授, 博士, 主要从事供应链系统复杂性研究。

E-mail: sifs2007@126.com

置方式对供应链减排策略的影响,发现碳配额分配方式会显著影响供应链各方的决策和利润,以及整体的碳排放量。Xu 等^[11]研究了碳交易机制下,渠道替代和消费者低碳偏好对供应链最优决策的影响,并设计了一种收益共享合同,实现了供应链的帕累托改进,研究发现限额与交易法规可以激励供应链成员采取碳减排措施,但同时也可能导致零售价格上升。陈晓红和 Xu 等^[12-13]分析了单位碳排放交易价格对供应链最优决策以及碳排放的影响,研究表明碳交易价格的提高可以有效激励企业减少碳排放,从而降低供应链的整体碳排放量;在限额与交易法规下,供应链成员可以通过合作来提高整体利润和降低碳排放量。上述文献大多是以决策者完全理性为前提的,认为企业在决策过程中只以实现自身利益最大化为目标,并没有考虑供应链成员有限理性行为的影响,以及决策者在最大化自身收益的同时也会注重公平问题。

关于公平关切对供应链决策主体行为影响的研究,杨浩雄等^[14]研究了非预售模式和预售模式下,零售商公平关切行为对产品绿色水平和企业利润的影响,并设计了一种成本共担契约,研究发现当零售商具有较强的公平关切倾向时,其可能倾向于设定更高的销售价格来维护自身利益,这可能导致供应链整体利润的降低。林志炳等^[15]探讨了在需求扰动的情形下,制造商增值服务和零售商公平关切对供应链的影响,研究发现需求扰动和零售商的公平关切行为对服务供应链的决策具有显著影响,通过合理设计契约和协调机制,可以有效缓解需求扰动和零售商公平关切行为对供应链整体绩效的负面影响。Pan 等^[16]考察了同行之间横向公平关切对单个主导零售商和两个制造商组成的供应链定价、盈利能力和效用的影响,当零售商具有较强的公平关切倾向时,其可能倾向于选择更加合作的策略来维护自身利益,这可能导致供应链整体利润的提升。Zheng 等^[17]提出了一种合作博弈论机制以协调零售商公平关切下的三级闭环供应链,认为在考虑公平关切的情况下,通过合理设计博弈规则和分配机制,能够实现供应链成员之间的合作,从而提高整体利润和降低碳排放量。李重莲等^[18]在制造商、线上线下零售商都具有双向公平关切的情形下,提出了批发价格折扣与服务成本共担契约对供应链进行协调,认为通过合理设计契约参数,可以实现线上和线下渠道的协同合作,降低渠道冲突,并满足供应链成员的公平关切需求。上述文献较少关注双渠道供应链中碳减排交易机制下的零售商公平关切问题。

现有文献主要探究了碳交易政策和公平关切行为对供应链最优决策的影响,较少考虑行为因素在碳排放规制下对双渠道供应链企业减排和价格决策的影响,并且多是在假定博弈系统稳定的前提下通过最优化方法直接给出最优策略,而实际上博弈方需要在有限理性的情形下经过长期的策略调整才能达到均衡。基于此,本文将零售商公平关切引入具有碳交易机制的制造商双渠道中,通过构建动态博弈模型探究决策变量调整速度、公平关切等因素对供应链系统稳定性的影响,刻画博弈策略从博弈初始态到均衡态的演化过程,分析系统不同状态下的策略演化趋势,并对处于混沌状态的供应链系统进行有效控制。

1 问题描述与基本假设

考虑由一个制造商和一个公平关切的零售商组成的双渠道供应链,制造商负责产品生产,并通过线上和线下渠道销售给消费者,供应链结构如图 1 所示。在线下渠道中,零售商以批发价格 w 获得产品,再以零售价格 p_r 出售给消费者;在线上渠道中,制造商直接以价格 p_d 向消费者出售产品。此外,产品在生产过程中会产生大量碳排放,因此制造商会受到政府碳排放规则的限制,政府分配给制造商的碳总额为 G ,特定生产周期内超出或剩余的部分可以根据碳市场中的交易价格购买或者出售。为了积极响应国家环保政策,制造商开始自行投资减排技术以降低碳排放量。

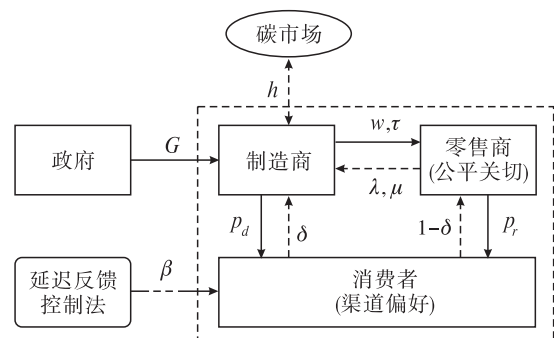


图 1 双渠道供应链结构

为使模型具有一般性,做如下假设:

假设 1 制造商通过减排技术投资实现碳减排,投入成本是关于单位产品碳减排率 τ 的凸函数,其成本为 $k\tau^2/2$ ^[19], k 为碳减排投资成本系数, $0 \leq \tau < 1$ 。

假设 2 为了降低计算的复杂性,单位产品的生产成本为 0^[20-21]。

假设 3 制造商是供应链的主导者,首先确定产品碳减排率 τ 、批发价格 w 以及线上直销价格 p_d 。零售商是跟随者,根据制造商的决策再决定线下零售价格 p_r ,双方进行斯塔克尔伯格博弈。

假设 4 为了对市场进行细分,更准确地描述不同消费者群体的购买行为,在需求函数中考虑消费者的渠道偏好,消费者线上渠道偏好为 δ ,线下渠道偏好为 $1-\delta$, $0 < \delta < 1$ 。

基于上述描述和假设,线下零售渠道和线上直销渠道的需求函数分别为 $Q_r = a(1-\delta) - p_r + bp_d$, $Q_d = a\delta - p_d + bp_r$ 。式中: Q_r 和 Q_d 分别为线下和线上渠道产品需求量; a 为潜在市场产品最大需求量, $a > 0$; b 为交叉价格弹性系数, $0 < b < 1$ 。

制造商进行碳减排投资后,制造商和零售商的利润函数分别为

$$\begin{aligned} \pi_m(w, p_d, \tau) &= wQ_r + p_dQ_d - \frac{1}{2}k\tau^2 - h(e(1-\tau)(Q_r + Q_d) - G), \\ \pi_r(p_r) &= (p_r - w)Q_r. \end{aligned} \quad (1)$$

式中: π_m 为制造商利润, π_r 为零售商利润, h 为单位碳排放权交易价格, e 为单位产品初始碳排放量。

2 动态博弈模型构建及稳定域分析

在实际经济活动中,企业难以完全掌握市场中的全部决策信息,其需要在有限理性的情形下经过长期的策略调整才能达到均衡(最优策略)。基于此,针对制造商考虑零售商公平关切的情形,构建一个多周期动态的博弈模型,以展现企业博弈过程的演化轨迹。

2.1 动态博弈模型构建

制造商线上渠道的开通使零售商的利益受损,因此零售商会产生公平关切行为。此时,如果制造商决策时考虑零售商的公平关切行为,那么零售商会被视为公平关切的决策者,零售商的效用函数为 $U_r = \pi_r - \lambda(\mu\pi_m - \pi_r)$ 。式中: μ 为相对利润系数,代表了零售商对制造商利润的关注程度, $0 \leq \mu \leq 1$, μ 越大,意味着零售商对制造商利润的关注比例越高; λ 为零售商公平关切系数, $0 \leq \lambda \leq 1$ 。

供应链双方主从博弈的过程中都以最大化自身效用函数为决策目标,其中制造商的效用函数即为利润函数。 U_r 关于 p_r 的二阶偏导为 $\partial^2 U_r / \partial p_r^2 = -2(1+\lambda) < 0$,因此存在唯一的 p_r 使 U_r 最大化,零售商的最优反应函数为

$$p_r(w, \tau, p_d) = \frac{w - a(\delta - 1)(1 + \lambda) + w\lambda(1 + \mu) + eh\lambda\mu(b + \tau - b\tau - 1) + b(1 + \lambda - \lambda\mu)p_d}{2(1 + \lambda)}. \quad (2)$$

由于市场信息的不完整性和不对称性,制造商和零售商通常根据当前周期的边际利润进行下一期的策略决策,将式(2)带入式(1),制造商利润函数关于批发价格 w 、线上直销价格 p_d 以及产品碳减排率 τ 的边际利润为

$$\begin{cases} \frac{\partial \pi_m(w, p_d, \tau)}{\partial w} = \frac{-a(\delta - 1)(1 + \lambda) - 2w(1 + \lambda + \lambda\mu) + (b - 1)eh(1 + \lambda + 2\lambda\mu)(\tau - 1) + 2b(1 + \lambda + \lambda\mu)p_d}{2(1 + \lambda)}, \\ \frac{\partial \pi_m(w, p_d, \tau)}{\partial p_d} = -(a(b(\delta - 1) - 2\delta)(1 + \lambda) - 2bw(1 + \lambda + \lambda\mu) + (b - 1)eh(-2 + b)(1 + \lambda) + 2b\lambda\mu(\tau - 1) + 2(2(1 + \lambda) + b^2(\lambda(\mu - 1) - 1))p_d) / [2(1 + \lambda)], \\ \frac{\partial \pi_m(w, p_d, \tau)}{\partial \tau} = -(aeh(-1 + b(\delta - 1) - \delta)(1 + \lambda) - (b - 1)ehw(1 + \lambda + 2\lambda\mu) + 2(b - 1)^2e^2h^2\lambda\mu(\tau - 1) + 2k(1 + \lambda)\tau + (b - 1)eh(2b\lambda\mu - (2 + b)(1 + \lambda))p_d) / [2(1 + \lambda)]. \end{cases}$$

据此建立的制造商决策动态博弈系统为^[22]

$$\begin{cases} \omega(t+1) = \omega(t) + \alpha_1 \omega(t) \frac{\partial \pi_m(\omega(t), p_d(t), \tau(t))}{\partial \omega(t)}, \\ p_d(t+1) = p_d(t) + \alpha_2 p_d(t) \frac{\partial \pi_m(\omega(t), p_d(t), \tau(t))}{\partial p_d(t)}, \\ \tau(t+1) = \tau(t) + \alpha_3 \tau(t) \frac{\partial \pi_m(\omega(t), p_d(t), \tau(t))}{\partial \tau(t)}. \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 分别表示批发价格、线上直销价格和产品碳减排率的调整速度。由式(2)可知，零售商的价格决策可以由 ω, p_d 和 τ 得到，即零售商决策变量的演化行为与制造商决策变量的演化行为基本一致。因此，后续仿真部分将不再重复描述 $p_r(t)$ 行为演化过程，而是主要分析系统(3)的稳定性和演化轨迹。

2.2 均衡点的局部渐近稳定性

令 $\omega(t+1) = \omega(t), p_d(t+1) = p_d(t), \tau(t+1) = \tau(t)$ ，可得系统(3)的 8 个均衡点。根据实际意义，均衡点 $E_i (i=1, \dots, 7)$ 都出现了价格或产品碳减排率为零的不合理情形。因此，本文只分析系统(3)在正均衡点 $E_8(\omega^*, p_d^*, \tau^*)$ 处的局部渐近稳定性。其中，

$$\begin{aligned} \omega^* &= (-4ehk(1-b^2)(1+\lambda - (b-2)\lambda\mu) - 4ka(1+(b-1)\delta)(1+\lambda) + 4bka\lambda\mu((b-1)\delta - b) + \\ &\quad e^2 h^2 a((1-b)(4-2\delta + b(3+b+2\delta))(1+\lambda) + 4a\lambda\mu(b^2 - 1)((b-1)\delta - b)))/\Delta_1, \\ p_d^* &= (4(b^2 - 1)ehk(1+\lambda + \lambda\mu) + 4ak(b(\delta - 1) - \delta)(1+\lambda + \lambda\mu) + a(b-1)e^2 h^2((-1 - 4\delta + \\ &\quad b(-5 + 2b(\delta - 1) + 2\delta))(1+\lambda) + 4(1+b)(b(\delta - 1) - \delta)\lambda\mu))/\Delta_1, \\ \tau^* &= 2eh(b^2 - 1)((b-1)eh((3+b)(1+\lambda) + 2(1+b)\lambda\mu) + \\ &\quad a(1+\lambda - b(\delta - 1)(1+\lambda + 2\lambda\mu) + \delta(1+\lambda + 2\lambda\mu)))/\Delta_1, \\ \Delta_1 &= 2(b^2 - 1)(4k(1+\lambda + \lambda\mu) + (b-1)e^2 h^2((3+b)(1+\lambda) + 2(1+b)\lambda\mu)). \end{aligned}$$

系统(3)在 E_8 处的 Jacobian 矩阵为

$$J = \begin{bmatrix} J_{11}^* & \omega^* \alpha_1 \Delta_2 & \omega^* \alpha_1 \Delta_3 \\ p_d^* \alpha_2 \Delta_2 & J_{22}^* & p_d^* \alpha_2 \Delta_4 \\ \tau^* \alpha_3 \Delta_3 & \tau^* \alpha_3 \Delta_4 & J_{33}^* \end{bmatrix}.$$

其中，

$$\begin{aligned} J_{11}^* &= 1 + (-a(\delta - 1)(1+\lambda) - 4\omega^*(1+\lambda + \lambda\mu) + (b-1)eh(1+\lambda + 2\lambda\mu)(\tau^* - 1) + \\ &\quad 2b(1+\lambda + \lambda\mu)p_d^*)\alpha_1 / (2(1+\lambda)), \\ J_{22}^* &= 1 + (-a(b(\delta - 1) - 2\delta)(1+\lambda) + 2b\omega^*(1+\lambda + \lambda\mu) - \Delta_5(\tau^* - 1) + \\ &\quad 4(-2(1+\lambda) + b^2(1+\lambda - \lambda\mu))p_d^*)\alpha_2 / (2(1+\lambda)), \\ J_{33}^* &= 1 + (-aeh(-1 + b(\delta - 1) - \delta)(1+\lambda) + (b-1)eh\omega^*(1+\lambda + 2\lambda\mu) - \\ &\quad 4k(1+\lambda)\tau^* - 2(b-1)^2 e^2 h^2 \lambda\mu(2\tau^* - 1) - \Delta_5 p_d^*)\alpha_3 / (2(1+\lambda)), \\ \Delta_2 &= \frac{b(1+\lambda + \lambda\mu)}{1+\lambda}, \Delta_3 = \frac{(b-1)eh(1+\lambda + 2\lambda\mu)}{2(1+\lambda)}, \\ \Delta_4 &= -\frac{(b-1)eh(2b\lambda\mu - (2+b)(1+\lambda))}{2(1+\lambda)}, \Delta_5 = (b-1)eh(2b\lambda\mu - (2+b)(1+\lambda)). \end{aligned}$$

根据 Jury 法则，为确保系统在均衡点 E_8 处的局部渐近稳定性， E_8 处 Jacobian 矩阵的特征多项式为 $F(\theta) = \theta^3 + a_2\theta^2 + a_1\theta + a_0$ 。式中： $a_2 = -(J_{11}^* + J_{22}^* + J_{33}^*)$ ， $a_1 = J_{22}^* J_{33}^* + J_{11}^* (J_{22}^* + J_{33}^*) - \omega^* \tau^* \alpha_1 \alpha_3 \Delta_3^2 - p_d^* \alpha_2 (\omega^* \alpha_1 \Delta_2^2 + \tau^* \alpha_3 \Delta_4^2)$ ， $a_0 = J_{11}^* (\tau^* p_d^* \alpha_2 \alpha_3 \Delta_4^2 - J_{22}^* J_{33}^*) + \omega^* \alpha_1 (\tau^* J_{22}^* \alpha_3 \Delta_3^2 + p_d^* \alpha_2 \Delta_2 (J_{33}^* \Delta_2 - 2\tau^* \alpha_3 \Delta_3 \Delta_4))$ 。

系统(3)在 E_8 处局部渐近稳定的充要条件为

$$\begin{cases} 1+a_2+a_1+a_0 > 0, \\ 1-a_2+a_1-a_0 > 0, \\ 1 > |a_0|, \\ |1-a_0^2| > |a_0-a_1a_2|. \end{cases} \quad (4)$$

当满足式(4)时,制造商和零售商的博弈策略经过长期调整后可以达到均衡状态。因此,决策者必须保证决策变量的调整速度在上述局部渐近稳定的范围内,否则供应链系统将出现多周期分岔、混沌等复杂现象,不利于制造商和零售商的稳定获利。为了更直观地展示决策变量调整速度 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 对系统(3)稳定域的影响,参照文献[18,21]参数取值方法,结合本文仿真需要,参数取值为 $a=100, b=0.5, h=5, e=6, G=100, k=3\ 500, \delta=0.55, \lambda=\mu=0.5$ 。

由式(4)得到系统(3)关于 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 的三维稳定域如图 2 所示。只有当决策变量调整速度的任意组合 $(\alpha_i, \alpha_j, \alpha_k) (i, j, k=1, 2, 3; i \neq j \neq k)$ 处于图中的稳定域时,系统(3)才能稳定。任一调整速度超出区域,系统都将失去稳定甚至陷入混沌状态。

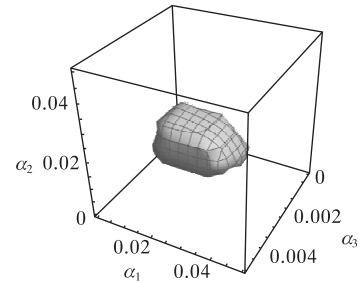


图 2 系统(3)的三维稳定域

3 动态博弈系统稳定性分析

3.1 决策变量调整速度对系统稳定性的影响

为了单独研究 α_1 对系统的影响,令 $\alpha_2=0.01, \alpha_3=0.001$,由图 2 可知此时 α_2 和 α_3 均处于稳定域内。批发价 w 、线上直销价 p_d 和碳减排率 τ 随 α_1 增大的动态演化行为如图 3(a)和图 3(b)所示,图 3(c)是系统(3)关于 α_1 的最大 Lyapunov 指数图,图 3(d)是系统(3)处于混沌状态时的吸引子图。

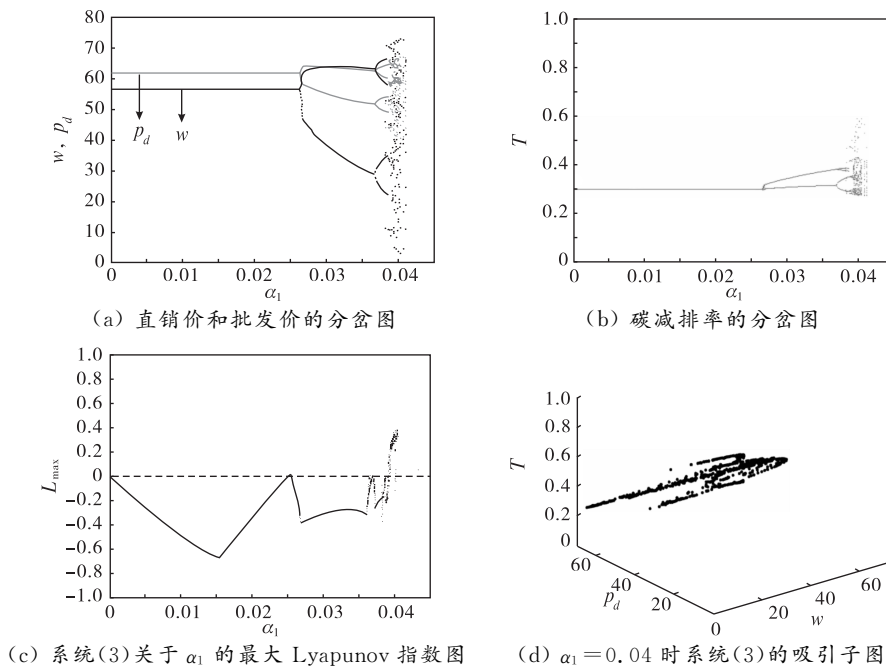


图 3 系统(3)关于 α_1 的动态演化行为

由图 3(a)(b)可知,当 α_1 较小时, (w, p_d, τ) 收敛于均衡点 E_8 ,系统处于稳定状态。随着 α_1 不断增大, w, p_d, τ 的纳什均衡不再稳定,系统经历 2 周期分岔、4 周期分岔……直至陷入混沌状态,此时最优决策剧烈波动。图 3(c)借助最大 Lyapunov 指数的变化反映了系统状态的变化,当指数小于 0 时,系统处于稳定状态或者倍周期分岔状态;当指数大于 0 时,系统处于混沌状态;当指数等于 0 时,系统处于分岔的临界

点。当 $0 < \alpha_1 < 0.026$ 时,系统处于稳定状态;当 $0.026 < \alpha_1 < 0.037$ 时,系统进入 2 周期分岔状态;当 $0.037 < \alpha_1 < 0.039$ 时,系统进入 4 周期分岔状态;直至 $\alpha_1 > 0.039$ 时指数大于 0,系统进入混沌状态(图 3(d))。一旦市场进入无序状态,企业就很难在博弈中做出正确决策,决策变量的剧烈波动不仅会导致整个供应链上下游企业决策的失误,同时也使得企业自身无法制定长期战略并实施,会对决策主体造成伤害。

图 4 描述了当 α_1 取不同值时,制造商和零售商的利润随时间 t 的变化趋势。当 $\alpha_1 = 0.01$ 时,系统处于稳定状态,各成员的利润曲线平稳;当 $\alpha_1 = 0.030$ 或 $\alpha_1 = 0.037$ 时,系统处于倍周期分岔状态,各成员的利润经过若干周期的迭代后出现了小幅波动;当 $\alpha_1 = 0.041$ 时,系统处于混沌状态,各成员的利润出现剧烈波动。混沌状况下供应链上下游企业无法稳定获利,更难以据此做出正确决策,不利于长期良性发展。此外,线上价格调整速度 α_2 和产品碳减排率调整速度 α_3 对系统稳定性的影响与 α_1 类似,不再赘述。

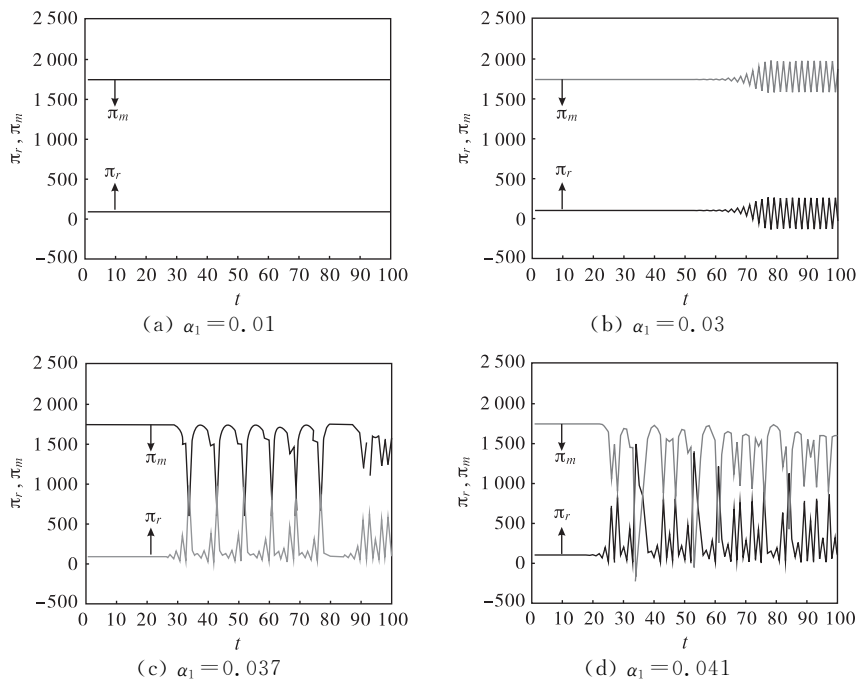


图 4 批发价调整速度 α_1 对制造商和零售商利润的影响

3.2 公平关切系数对系统稳定性的影响

$\mu = 0.5$ 时,系统(3)分别关于 (α_2, α_3) 、 (α_1, α_3) 和 (α_1, α_2) 在零售商不同关切程度下的二维稳定域如图 5 所示。

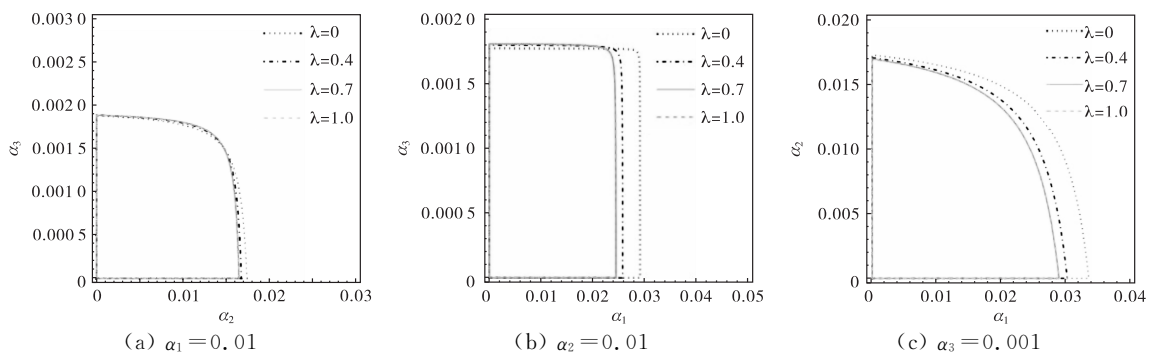


图 5 零售商公平关切系数 λ 对系统稳定域的影响

随着公平关切系数 λ 的增大,系统的稳定域逐渐缩小。因此,当 λ 较小时,制造商有充足的空间调整决策,也更有利于制造商决策系统的稳定。当 λ 越大时,制造商决策系统的稳定域越小,此时限制了制造商策略调整的范围,增加了市场陷入混沌状态的风险。这说明零售商的公平关切程度越高越不利于制造

商决策和系统的稳定。

图 6 表示不同系统状态下,零售商公平关切系数 λ 对供应链成员平均利润的影响。当系统处于稳定状态时($\alpha_1=0.01$),随着 λ 增大制造商利润略有下降,零售商利润逐渐提高;当系统处于失稳状态时($\alpha_1=0.037$),相较于图 6(a),随着 λ 增大制造商利润降低明显,零售商的利润则提高显著。因此,市场进入无序状态时,零售商的公平关切行为对制造商更为不利,而对零售商自身则更加有利。

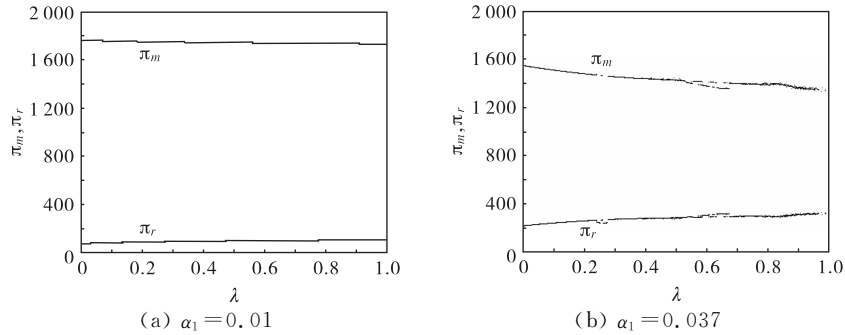


图 6 λ 对供应链成员平均利润的影响

3.3 不同系统状态下碳交易价格对利润的影响

α_2, α_3 保持不变, α_1 取不同值时, h 对供应链成员长期平均利润的影响如图 7 所示。可以发现,不同 α_1 下碳交易价格 h 对零售商利润的影响发生了改变。当 $\alpha_1=0.01$ 时(系统稳定),制造商和零售商利润随着 h 的增大先降低后提高;当 $\alpha_1=0.03$ 时(系统倍周期分岔),制造商利润变化趋势基本保持不变但是下降幅度更为明显,零售商的利润先提高后逐渐降低,存在一个最优的碳交易价格 h 使得零售商利润最大化。这表明,当制造商采取较高的决策变量调整速度时,碳交易机制的引入对零售商有利。

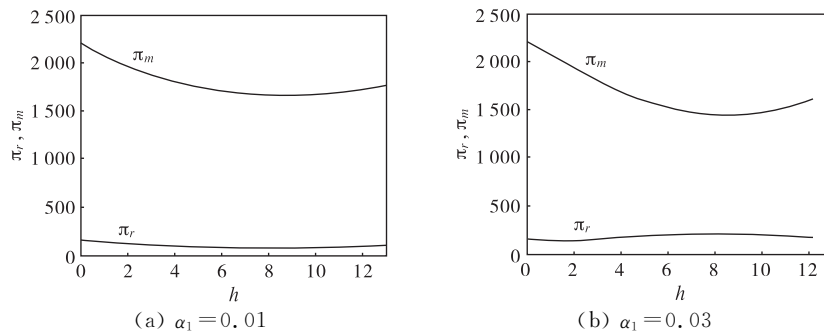


图 7 不同 α_1 下 h 对供应链成员平均利润的影响

4 混沌系统控制

混沌系统导致企业面临价格和利润的剧烈波动,为了规避这种风险,有必要采取控制措施使系统恢复至稳定状态,以确保市场的健康稳定发展。本文采用延迟反馈控制法消除和抑制经济系统中的混沌现象。在系统(3) $w(t)$ 和 $p_d(t)$ 的决策中引入延迟反馈控制信号,加入控制信号后的系统为

$$\begin{cases} w(t+1) = w(t) + \alpha_1 w(t) \frac{\partial \pi_m(w(t), p_d(t), \tau(t))}{\partial w(t)} + \beta(w(t) - x(t)), \\ p_d(t+1) = p_d(t) + \alpha_2 p_d(t) \frac{\partial \pi_m(w(t), p_d(t), \tau(t))}{\partial p_d(t)} + \beta(p_d(t) - y(t)), \\ \tau(t+1) = \tau(t) + \alpha_3 \tau(t) \frac{\partial \pi_m(w(t), p_d(t), \tau(t))}{\partial \tau(t)}, \\ x(t+1) = w(t), \\ y(t+1) = p_d(t). \end{cases} \quad (5)$$

式中： β 是控制参数，令 $x(t+1)=w(t)$, $y(t+1)=p_d(t)$ 是为了简化分析过程，结果不受影响^[23]。设置参数 $\alpha_1=0.04$, $\alpha_2=0.01$, $\alpha_3=0.001$ ，此时系统(3)处于混沌状态。

系统(5)随 β 变化的动态演化行为如图 8 所示。由图 8(a)(b)(c)可知，在系统(3)中加入延迟反馈控制信号后，当 $0<\beta<0.47$ 时，随着控制因子 β 不断增大， w 、 p_d 、 τ 先处于混沌状态，然后进入倍周期分岔状态；当 $\beta>0.47$ 时， L_{\max} 小于 0，此时混沌系统得以有效控制重回稳定状态。如果经济系统遭受破坏而处于非稳定的波动状态，那么可以对其加以外部的政策干预，通过政策调节使其回归稳定状态。令 $\beta=0.03<0.47$ ，此时系统(5)仍然处于混沌状态，混沌没有得到有效控制，如图 8(d)所示。但是当 $\beta=0.48>0.47$ 时，系统(5)的吸引子经多周期博弈后将收敛域一个点，这说明混沌系统得以控制，重返稳定状态。

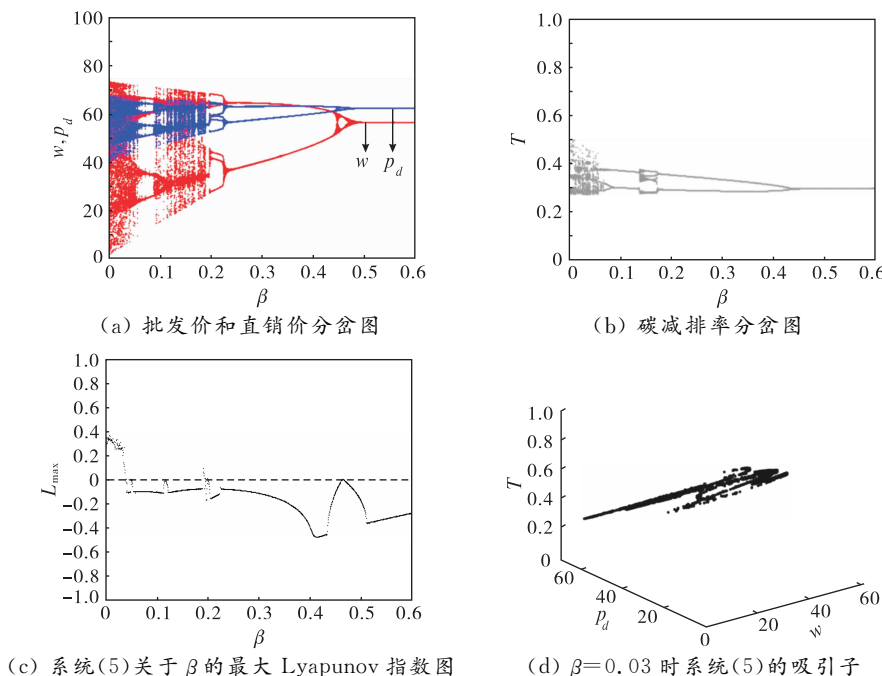


图 8 系统(5)关于 β 的动态演化行为

5 结论

在碳限额和碳交易机制的背景下，考虑零售商公平关切的双渠道供应链稳定性问题。通过构建动态博弈模型，分析了决策变量调整速度、公平关切等因素对系统稳定性的影响，探究了系统不同状态下产品定价、碳减排率以及企业利润的变化趋势，并对混沌系统实施了有效控制。研究发现：(1)决策变量调整速度存在范围限制，否则系统将失去稳定，进入混沌状态；(2)零售商公平关切的增强会加大系统失稳的风险，并制约制造商的决策空间；(3)系统失稳状态下，零售商的公平关切行为对制造商更为不利，而对自身则更加有利；(4)碳交易机制对制造商和零售商的影响取决于系统状态，系统失稳时加剧制造商的不利而对零售商有利；(5)延迟反馈控制法能够有效控制混沌系统，使其恢复到稳定状态。

综上得到以下管理启示：(1)制造商和零售商应合理控制价格等决策变量的调整频率，确保市场保持相对稳定，避免市场动荡；(2)制造商应关注零售商的公平关切行为，并采取有效措施缓解渠道冲突，实现合作共赢；(3)政府可以通过引入碳交易机制等政策手段，引导企业进行碳减排，并促进供应链的稳定发展；(4)在经济市场出现异常波动时，可以采取外部调节措施使市场恢复到稳定状态。

未来研究可以进一步考虑制造商的公平关切行为，研究消费者低碳偏好对供应链决策的影响，将模型拓展到多制造商、多零售商的双渠道供应链情境，并探究其他控制方法对混沌系统的控制效果。

参考文献:

- [1] XU X, HE P, XU H, et al. Supply chain coordination with green technology under cap-and-trade regulation[J]. *International journal of production economics*, 2017, 183(1): 433-442.
- [2] DONG C, SHEN B, CHOW P S, et al. Sustainability investment under cap-and-trade regulation[J]. *Annals of operations research*, 2016, 240(2): 509-531.
- [3] LIU J, KE H, ZHANG R, et al. Who exhibits fairness concern is better for supply chain stability and the environment[J]. *Journal of cleaner production*, 2023, 386(2): 1-12.
- [4] LI T, XIE J, ZHAO X, et al. On supplier encroachment with retailer's fairness concerns[J]. *Computers & industrial engineering*, 2016, 98(8): 499-512.
- [5] 邢青松, 王静, 邓富民. 碳限额交易机制下考虑嵌入度的低碳服务契约设计与协调[J/OL]. *中国管理科学*, (2023-12-08)[2024-05-10]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.0007>.
- [6] 徐小平, 吴婕, 何平. 碳交易机制下考虑参考价格效应的平台化运作决策及协调机制研究[J]. *管理学报*, 2023, 20(10): 1536-1545.
- [7] YANG L, HU Y, HUANG L. Collecting mode selection in a remanufacturing supply chain under cap-and-trade regulation[J]. *European journal of operational research*, 2020, 287(2): 480-496.
- [8] 夏西强, 陈俊, 朱庆华, 等. 碳配额分配方式对授权再制造影响及协调机制研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2023, 43(9): 2632-2655.
- [9] JI J, ZHANG Z, YANG L. Comparisons of initial carbon allowance allocation rules in an O2O retail supply chain with the cap-and-trade regulation[J]. *International journal of production economics*, 2017, 187(5): 68-84.
- [10] 王一雷, 朱庆华. 不同碳排放权配置方式下供应链长期碳减排决策研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2023, 43(7): 2084-2101.
- [11] XU L, WANG C, ZHAO J. Decision and coordination in the dual-channel supply chain considering cap-and-trade regulation[J]. *Journal of cleaner production*, 2018, 197(10): 551-561.
- [12] 陈晓红, 曾祥宇, 王传强. 碳限额交易机制下碳交易价格对供应链碳排放的影响[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(10): 2562-2571.
- [13] XU J, CHEN Y, BAI Q. A two-echelon sustainable supply chain coordination under cap-and-trade regulation[J]. *Journal of cleaner production*, 2016, 135(11): 42-56.
- [14] 杨浩雄, 陈欣冉, 石伟, 等. 预售模式下考虑零售商公平关切的绿色产品供应链决策研究[J/OL]. *中国管理科学*, (2023-09-06)[2024-05-10]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.2709>.
- [15] 林志炳, 郭耿, 陈蕾雯. 考虑需求扰动及零售商公平关切行为的服务供应链决策[J/OL]. *中国管理科学*, (2023-02-07)[2024-05-10]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.2132>.
- [16] PAN K, CUI Z, XING A, et al. Impact of fairness concern on retailer-dominated supply chain[J]. *Computers & industrial engineering*, 2020, 139(1): 1-9.
- [17] ZHENG X X, LIU Z, LI K W, et al. Cooperative game approaches to coordinating a three-echelon closed-loop supply chain with fairness concerns[J]. *International journal of production economics*, 2019, 212(6): 92-110.
- [18] 李重莲, 范定祥, 王晓蕾. 双向公平关切下双渠道供应链的线上线下融合契约设计[J]. *中国管理科学*, 2021, 29(11): 122-133.

- [19] 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.
- [20] LI G,LI L,SUN J. 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(6):32-48.
- [21] ZHOU Y W,GUO J,ZHOU W. Pricing/service strategies for a dual-channel supply chain with free riding and service-cost sharing[J]. International journal of production economics,2018,196(2):198-210.
- [22] MA J,ZHANG F,JIANG H. Dynamic pricing game under different channel power structures in a closed-loop supply chain[J]. International journal of bifurcation and chaos,2020,30(4):1-27.
- [23] 侯爱丽. 基于政府补贴下绿色供应链的内在复杂性及其协调研究[D]. 天津:天津大学,2018.

Analysis of the stability of a dual-channel supply chain with retailer fairness concerns under carbon trading mechanism

SI Fengshan, GE Tongtong, WANG Jing

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

Abstract: In order to address the stability problem of supply chain systems, a dynamic game model is constructed under the carbon trading mechanism to explore the impact of decision variable adjustment speed, fairness concerns, and other factors on system stability, depict the evolution process of the system from the initial state to the equilibrium state, and effectively control the chaotic system. The study found that there is a limit to the speed of price adjustment, otherwise it is easy to cause the system to experience stable, period doubling bifurcation, and chaotic states, leading to instability. System instability causes fluctuations in prices and carbon emission reduction rates, making it difficult for companies to maintain stable profits. The increase in retailers' fairness concerns increases the risk of system instability and constrains the decision-making space of manufacturers. Regardless of whether the system is stable, retailers' fairness concerns are detrimental to manufacturers but beneficial to themselves, and this trend is more pronounced under system instability. The introduction of carbon trading mechanisms in stable systems is detrimental to both manufacturers and retailers, but it exacerbates the disadvantage of manufacturers and benefits retailers when the system is unstable. Delayed feedback control can return the unstable system to a stable state, thereby improving the controllability of the system.

Keywords: carbon trading mechanism; fairness concerns; dual-channel supply chain; stability analysis; chaos control

(责任编辑:王新亮)

引用格式 司凤山,葛彤彤,王晶. 碳交易机制下考虑零售商公平关切的双渠道供应链稳定性分析[J]. 山东航空学院学报, 2025,42(2):109-118.

SI F S,GE T T,WANG J. Analysis of the stability of a dual-channel supply chain with retailer fairness concerns under carbon trading mechanism[J]. Journal of Shandong University of Aeronautics,2025,42(2):109-118.