

· 区块链与供应链 ·

碳限额约束下双渠道供应链减排成本分担演化博弈研究



□王 芳¹ 张恒杰¹ 朱 艳² 董玉成²

[1. 河海大学 南京 211100; 2. 四川大学 成都 610065]

[摘 要] 碳限额背景下, 考虑到碳减排技术的高成本, 双渠道供应链中的制造商倾向于与零售商共担成本以减少企业风险。对制造商和零售商碳减排成本分担冲突问题进行研究, 有助于供应链协同减排, 促进国家实现碳减排目标。本文针对一个制造商和一个零售商组成的双渠道供应链系统, 运用演化博弈模型研究碳限额约束下的减排成本分担及减排策略 (投资碳减排技术和购买碳排放配额) 选择问题, 并分析价格调控机制对演化稳定策略的影响。研究发现: 存在 (制造商不投资, 零售商不投资)、(制造商投资, 零售商不投资) 和 (制造商不投资, 零售商投资) 三种演化稳定策略; 进一步, 当引入价格调控机制时, 双渠道供应链系统在策略 (制造商投资, 零售商投资) 上也能形成稳定。此外, 通过仿真分析验证了上述理论结果, 并讨论了不同情形下的产品批发价格、减排技术成本、碳交易成本、成本分担比例对制造商和零售商共同分担碳减排技术成本意愿的影响。

[关键词] 双渠道供应链; 演化博弈; 碳减排; 成本分担

[中图分类号] X322; F274

[文献标识码] A

[DOI] 10.14071/j.1008-8105(2024)-3001

引言

近年来, 温室气体过度排放导致的气候变暖问题已经引起了全球高度重视。减少二氧化碳等温室气体的排放量已经逐渐成为全球共识。随着《联合国气候变化框架公约》《京都议定书》《巴黎协议》等协议的出台, 各国相继提出了碳减排目标。2020年习近平主席在联合国大会上宣布, 我国力争于2030年前碳排放达到峰值, 2060年前实现碳中和。为了实现“双碳”战略, 我国生态环境部制定了全国碳排放配额总量确定与分配方案, 各地政府依据企业历史碳排放数据将碳排放配额分配给企业, 并对企业的碳排放总量做出限制。此外, 我国于2021年开始施行《碳排放权交易管理办法 (试

行)》, 企业可以通过全国碳市场买卖碳配额。碳限额与交易机制是指政府将碳排放权的总额度分解为一定单位的碳排放配额, 通过总量方式或者单位方式将排放配额分配给企业, 并允许其在碳交易市场买卖碳排放配额, 以推动企业绿色低碳发展, 促进国家实现碳减排目标^[1-5]。Mirzaee等设计了碳限额与交易机制下绿色供应商选择与订单分配的鲁棒优化模型^[6]。李璟等对碳限额与交易机制供应链定价问题展开研究^[7]。杨建华和解雯倩分析了碳限额与交易机制下竞争制造商减排决策^[8]。

随着经济不断发展, 各个产业之间的分工越发清晰, 各色产业链逐渐形成。供应链连接了国内外的产业链, 并促进了供应链网络的形成^[9-12]。供应链在运营过程中会排放大量温室气体, 例如Van

[收稿日期] 2024-01-04

[基金项目] 国家自然科学基金 (72171075, 72271171); 河海大学优秀硕士学位论文培育项目 (422003493); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (422003155)。

[作者简介] 王芳, 河海大学商学院博士研究生; 朱艳, 四川大学商学院博士研究生; 董玉成, 四川大学商学院教授、博士生导师。

[通信作者] 张恒杰, 河海大学商学院教授、博士生导师。E-mail: hengjiezhang@hhu.edu.cn。

[引用格式] 王芳, 张恒杰, 朱艳, 等. 碳限额约束下双渠道供应链减排成本分担演化博弈研究[J]. 电子科技大学学报 (社科版), 2024, 26(3): 75-88. DOI: [10.14071/j.1008-8105\(2024\)-3001](https://doi.org/10.14071/j.1008-8105(2024)-3001).

[Citation Format] WANG Fang, ZHANG Heng-jie, ZHU Yan, et al. Evolutionary game analysis of emission reduction cost sharing in a dual-channel supply chain under carbon cap constraints[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China (Social Science Edition), 2024, 26(3): 75-88. DOI: [10.14071/j.1008-8105\(2024\)-3001](https://doi.org/10.14071/j.1008-8105(2024)-3001).

Hoek等在其研究中表明:仅全球2 500家大型企业供应链中的温室气体排放量就占全球排放量的20%以上^[13]。因此,鼓励供应链进行碳减排,可以为实现碳减排目标做出重要贡献^[14-15]。生产制造环节是供应链的核心环节之一,在此环节原材料被制造为成品,并产生较多的温室气体。因此,制造企业的碳排放量往往超出政府提出的碳限额,需要采取措施以减少供应链碳排放。

在碳限额与交易机制背景下,供应链企业碳排放量受到限制,迫切需要行之有效的碳减排策略。为此,国内外学者对不同供应链的碳减排策略进行了研究。谢鑫鹏和赵道致将新古典经济学和博弈论方法结合,研究了不同合作状态下供应链的碳减排效果和收益^[16]。Xu等研究了碳限额与交易机制下按订单生产的供应链产品生产和定价问题,提出了最优总排放量和产量,并分析了碳交易价格对供应链公司收益的影响^[17]。王文宾和管婕研究了碳限额交易政策下电力供应链中发电商减排策略^[18]。Ji等从Stackelberg博弈视角出发,研究了不同渠道下的供应链减排决策问题^[19]。Tong等综合运用演化博弈、Stackelberg博弈和系统动力学对零售商主导的供应链碳减排行为进行了研究^[20]。王文利和程天毓运用演化博弈研究了碳交易背景下制造商主导的二级供应链中制造商的减排和零售商的低碳营销策略^[21]。Gopalakrishnan等研究了碳减排背景下供应链中公司的碳排放责任计算问题,并运用合作博弈论方法获得碳足迹平衡方案^[15]。Xia和Niu考虑到制造商和零售商之间的信息不对称问题,设计了供应链碳减排契约以确保双方收益^[22]。卓四清和韩雪使用微分博弈研究了在碳补贴与零售商竞争环境下低碳供应链的动态最优合作决策问题^[23]。杨洁等使用非合作-合作两型博弈研究了限制交流结构下供应链碳减排策略^[24]。刘名武等对供应链减排的相关研究进行了

梳理和综述^[25]。

为了提高产品的市场占有率,制造商往往会通过多种渠道甚至全渠道销售产品^[26]。值得一提的是,双渠道供应链被企业广泛应用于销售产品^[27-28]。在双渠道供应链中,制造商既通过直销的方式销售产品,也通过零售商销售产品^[29-30]。新产品的升级和新技术的研发意味着高昂的成本,制造商往往需要和零售商合作,共同分担相关成本,例如,双方分担紧俏产品升级成本^[28],双方共同分担绿色技术研发成本^[31]。在制造商主导的双渠道供应链中,零售商的产品来自制造商,且产品批发价格由制造商制定。因此,当制造商让利给零售商时,零售商往往愿意与制造商分担碳减排技术成本。在碳限额约束下,如何设计双渠道供应链中制造商和零售商的碳减排成本分担机制是一个值得深入研究的问题。然而,已有文献缺少对双渠道供应链碳减排成本分担机制的研究。此外,在碳减排成本分担问题中,制造商和零售商通常是有限理性的,他们往往会在与对方的交互中不断更新和优化自身的策略。演化博弈作为一个研究有限理性假设下的策略交互与演化的方法^[32],能够有效解决双渠道供应链中制造商和零售商的碳减排成本分担问题。

为此,本文运用演化博弈方法对碳限额约束下的双渠道供应链碳减排成本分担问题进行研究,其流程图如图1所示。首先,分析制造商和零售商碳减排成本分担冲突中的焦点问题,提出研究假设并构建制造商和零售商的演化博弈模型。其次,分析制造商和零售商的演化稳定策略及局部均衡点的稳定性。进一步,考虑到制造商会通过产品批发价格影响零售商的决策,构建考虑价格调控机制的制造商和零售商的演化博弈模型。接着,利用仿真方法对制造商和零售商的稳定策略进行分析,并讨论主要参数对双渠道供应链碳减排成本分担演化稳定策略的影

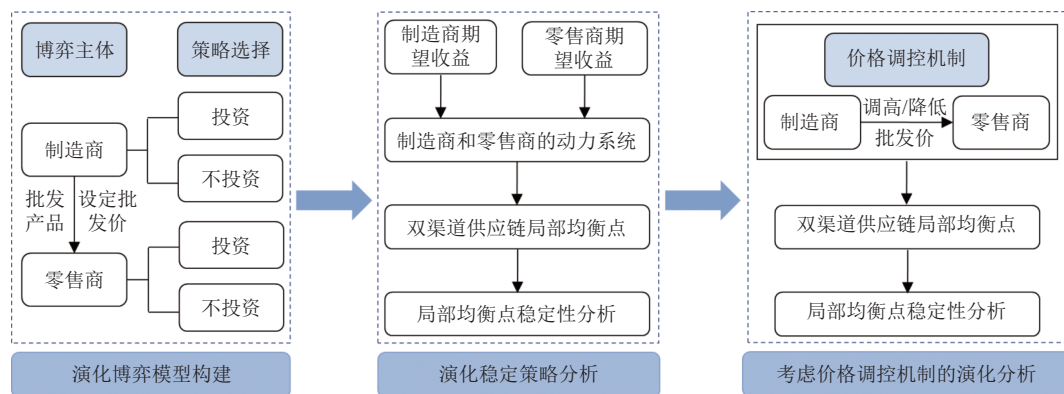


图1 双渠道供应链演化博弈研究流程图

响。最后，基于理论分析和仿真结果，提出一些促进制造商和零售商共同分担碳减排成本的管理对策。

一、问题分析与模型构建

本文考虑由一个制造商和一个零售商组成的双渠道供应链，并假定制造商生产产品过程中的碳排放总量超出限额。为了满足碳限额要求，制造商可以投资碳减排技术或者购买碳排放配额。然而，投资碳减排技术的成本一般比较高昂，制造商往往希望零售商能够分担碳减排技术成本。在此情况下，零售商存在两种策略选择：（1）投资碳减排技术，即分担成本；（2）不投资碳减排技术，即不分担成本。进一步，零售商的策略选择会影响制造商的投资决策。制造商和零售商的决策会相互影响和演化。为构建制造商和零售商之间的演化博弈模型，提出如下假设：

- 1. 制造商生产的产品为紧俏产品，其在双渠道供应链中占据主导地位。制造商能够单方面决定批发给零售商的产品数量以及批发价格。为了避免“价格战”，双方的产品销售价格保持一致。设制造商的总产量为 O ，由制造商直销的产量为 O_1 ，由零售商销售的产量为 O_2 。进一步，假定碳减排技术仅减少碳排放，对制造商的产量没有影响，即 O 保持不变。
- 2. 制造商的碳排放量超出配额许可范围。如果制造商不履行控制排放责任，政府会根据超出配额许可范围的碳排放量，按照碳交易市场均价的数倍予以处罚。为避免巨额处罚，制造商会使用碳减排技术或购买碳排放配额，以减少碳排放量。
- 3. 当不使用碳减排技术时，制造商需要购买碳排放配额，其成本为 Q 。投资碳减排技术需要的成本为 C ，并假定制造商和零售商的碳减排成本分担比例分别为 $\alpha(0 < \alpha < 1)$ 和 $1 - \alpha$ 。碳减排技术能够有效减少碳排放。制造商使用该技术能够使其碳排放量放低于分配的碳排放配额。制造商能够出售多余的碳排放配额，其收益为 G 。

4. 当使用碳减排技术时，制造商生产的产品为低碳产品，其销售价格为 P_1 。当不使用碳减排技术时，产品的销售价格为 P_2 。由于使用碳减排技术增加了生产成本，制造商会调高低碳产品的销售价格，假设 $P_1 > P_2 > 0$ 。随着公众环保意识的增强，人们愿意购买低碳产品。同时，当使用碳减排技术时，制造商以价格 W_1 将低碳产品批发给零售商。当不使用碳减排技术时，制造商以价格 W_2 将产品批发给零售商。

制造商和零售商之间碳减排成本分担演化博弈模型中涉及的参数如表1所示。

令 U 表示制造商和零售商的收益，上标 m, r 分别表示制造商和零售商，下标 i, n 分别表示投资策略和不投资策略。当制造商和零售商都选择不投资碳减排技术时，制造商需要购买碳排放权。此时，制造商和零售商的收益分别为：

$$U_{mm}^m = P_2 O_1 + W_2 O_2 - Q, \quad U_{nn}^r = (P_2 - W_2) O_2$$

当制造商选择投资碳减排技术且零售商选择不投资（即零售商不分担碳减排技术投资成本）时，制造商需要承担所有投资成本。在这种情况下，制造商和零售商的收益分别为：

$$U_{im}^m = P_1 O_1 + W_1 O_2 + G - C, \quad U_{in}^r = (P_1 - W_1) O_2$$

当制造商和零售商都选择投资碳减排技术时，双方按照比例 α 和 $1 - \alpha$ 分担减排技术成本。此时，制造商和零售商的收益分别为：

$$U_{ii}^m = P_1 O_1 + W_1 O_2 + G - \alpha C, \quad U_{ii}^r = (P_1 - W_1) O_2 - (1 - \alpha) C$$

当零售商选择投资碳减排技术且制造商选择不投资时（即制造商不分担碳减排技术投资成本），零售商承担所有投资成本。在这种情况下，制造商和零售商的收益分别为：

$$U_{mi}^m = P_1 O_1 + W_1 O_2 + G, \quad U_{ni}^r = (P_1 - W_1) O_2 - C$$

为表达简便，投资碳减排技术和不投资碳减排技术分别被简写为投资和不投资。建立制造商和零售商之间碳减排成本分担博弈的收益矩阵，如表2所示。

表 1 模型参数汇总表

参数	定义	参数	定义
O	制造商的总产量	α	制造商的碳减排技术成本分担比例
O_1	制造商直销的产量	$1 - \alpha$	零售商的碳减排技术成本分担比例
O_2	零售商分销的产量	P_1	低碳产品的销售价格
C	碳减排技术的成本	P_2	不使用碳减排技术时产品的销售价格
Q	购买碳排放配额的成本	W_1	低碳产品的批发价格
G	制造商出售碳排放配额的收益	W_2	不使用碳减排技术时产品的批发价格

表 2 双渠道供应链碳减排成本分担的收益矩阵

制造商/零售商	投资	不投资
投资	$U_{ii}^m = P_1 O_1 + W_1 O_2 + G - \alpha C$ $U_{ii}^r = (P_1 - W_1) O_2 - (1 - \alpha) C$	$U_{in}^m = P_1 O_1 + W_1 O_2 + G - C$ $U_{in}^r = (P_1 - W_1) O_2$
不投资	$U_{ni}^m = P_1 O_1 + W_1 O_2 + G$ $U_{ni}^r = (P_1 - W_1) O_2 - C$	$U_{nn}^m = P_2 O_1 + W_2 O_2 - Q$ $U_{nn}^r = (P_2 - W_2) O_2$

二、模型分析

本节对双渠道供应链碳减排成本分担演化博弈模型的演化稳定策略进行分析,并研究双渠道供应链系统局部均衡点的稳定性。

(一) 演化稳定策略分析

在演化博弈中,制造商和零售商都是有限理性的个体,双方在碳减排成本分担博弈过程中以一定的概率选择投资策略。假设制造商选择投资策略的概率为 $x(0 \leq x \leq 1)$,选择不投资策略的概率为 $1-x$;零售商选择投资策略的概率为 $y(0 \leq y \leq 1)$,选择不投资策略的概率为 $1-y$ 。令 $E_{(x)}^m$ 和 $E_{(1-x)}^m$ 分别表示制造商选择投资和不投资时的期望收益, $\bar{E}^m$ 表示制造商的平均期望收益:

$$\begin{cases} E_{(x)}^m = y(P_1 O_1 + W_1 O_2 + G - \alpha C) + (1-y)(P_1 O_1 + W_1 O_2 + G - C) \\ E_{(1-x)}^m = y(P_1 O_1 + W_1 O_2 + G) + (1-y)(P_2 O_1 + W_2 O_2 - Q) \\ \bar{E}^m = x E_{(x)}^m + (1-x) E_{(1-x)}^m \end{cases} \quad (1)$$

令 $E_{(y)}^r$ 和 $E_{(1-y)}^r$ 分别表示零售商选择投资与不投资时的期望收益, $\bar{E}^r$ 表示零售商的平均期望收益:

$$\begin{cases} E_{(y)}^r = x[(P_1 - W_1) O_2 - (1 - \alpha) C] + (1-x)[(P_1 - W_1) O_2 - C] \\ E_{(1-y)}^r = x(P_1 - W_1) O_2 + (1-x)(P_2 - W_2) O_2 \\ \bar{E}^r = y E_{(y)}^r + (1-y) E_{(1-y)}^r \end{cases} \quad (2)$$

根据Malthusian方程^[33-34],制造商选择投资策略的比例随时间的增长率 dx/dt 与投资策略的期望收益平均期望收益之差 $E_{(x)}^m - \bar{E}^m$ 呈正相关,零售商同理。为了表达简便,令 $P = P_1 - P_2$ 。根据上述分析,构建了制造商和零售商组成的二维动力系统:

$$\begin{cases} F^m(x, y) = dx/dt = x(1-x)\{-y\alpha C + (1-y)[P O_1 + (W_1 - W_2) O_2 + G - C + Q]\} \\ F^r(x, y) = dy/dt = y(1-y)\{-x(1-\alpha)C + (1-x)[(P + W_2 - W_1) O_2 - C]\} \end{cases} \quad (3)$$

命题1 双渠道供应链系统的局部均衡点为 $E_1 =$

$(0, 0)$, $E_2 = (1, 0)$, $E_3 = (1, 1)$, $E_4 = (0, 1)$, $E_5 = (x_1, y_1)$, 其中, $x_1 = [(P + W_2 - W_1) O_2 - C] / [(P + W_2 - W_1) O_2 - \alpha C]$, $y_1 = [P O_1 + (W_1 - W_2) O_2 + G - C + Q] / [P O_1 + (W_1 - W_2) O_2 + G - C + Q + \alpha C]$, 并且 $0 < x_1 < 1$, $0 < y_1 < 1$ 。

(二) 均衡点稳定性分析

为分析局部均衡点的稳定性,本节对双渠道供应链系统的稳定策略进行求解。首先,分别求 $F^m(x, y)$ 和 $F^r(x, y)$ 关于 x 和 y 的偏导,获得双渠道供应链系统的雅克比矩阵 J :

$$J = \begin{bmatrix} \partial F^m(x, y) / \partial x & \partial F^m(x, y) / \partial y \\ \partial F^r(x, y) / \partial x & \partial F^r(x, y) / \partial y \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $\partial F^m(x, y) / \partial x = (1 - 2x)\{-y\alpha C + (1 - y)[P O_1 + (W_1 - W_2) O_2 + G - C + Q]\}$, $\partial F^m(x, y) / \partial y = -x(1 - x)[P O_1 + G + (W_1 - W_2) O_2 - C + \alpha C + Q]$, $\partial F^r(x, y) / \partial x = -y(1 - y)[(P + W_2 - W_1) O_2 - \alpha C]$, $\partial F^r(x, y) / \partial y = (1 - 2y)\{-x(1 - \alpha)C + (1 - x)[(P + W_2 - W_1) O_2 - C]\}$ 。

依据Friedman的均衡点稳定性公理^[34],当且仅当均衡点在雅克比矩阵中同时满足行列式($\text{Det}(J)$)大于零、迹($\text{Tr}(J)$)小于零时,均衡点为系统的演化稳定策略(Evolutionarily Stable Strategy)。将5个局部均衡点带入雅克比矩阵,计算得出各点处的行列式和迹,如表3所示。

其中,雅克比矩阵 J 在点 E_3 处的迹 $\text{Tr}(J)|_{(1,1)} = C > 0$,其不满足Friedman^[34]的均衡点稳定性公理,局部均衡点 E_3 不是系统的演化稳定策略。同样地,雅克比矩阵 J 在点 E_5 处的迹 $\text{Tr}(J)|_{(x_1, y_1)} = 0$,局部均衡点 E_5 在区间 $(0, 1)$ 内也不是系统的演化稳定策略。为分析其他3个局部均衡点的稳定性,我们提出了命题2。

命题2 双渠道供应链系统的演化稳定策略随参数的变化情况如下:

表 3 局部均衡点处雅克比矩阵的行列式和迹

均衡点	$\text{Det}(J)$	$\text{Tr}(J)$
E_1	$[P O_1 + (W_1 - W_2) O_2 + G - C + Q][(P + W_2 - W_1) O_2 - C]$	$P(O_1 + O_2) + 2(W_2 - W_1) O_2 - 2C + G + Q$
E_2	$-[P O_1 + (W_1 - W_2) O_2 + G - C + Q](\alpha - 1)C$	$-P O_1 - (W_1 - W_2) O_2 - G - Q + \alpha C$
E_3	$\alpha C(1 - \alpha)C$	C
E_4	$-\alpha C[-(P + W_2 - W_1) O_2 + C]$	$C - (P + W_2 - W_1) O_2 - \alpha C$
E_5	/	0

情形1: 当 $PO_1 + (W_1 - W_2)O_2 + G - C + Q < 0$ 且 $(P + W_2 - W_1)O_2 - C < 0$ 时, 演化稳定策略为(制造商不投资, 零售商不投资), 其相位图如图2a所示;

情形2: 当 $PO_1 + (W_1 - W_2)O_2 + G - C + Q > 0$ 时, 演化稳定策略为(制造商投资, 零售商不投资), 其相位图如图2b所示;

情形3: 当 $(P + W_2 - W_1)O_2 - C > 0$ 时, 演化稳定策略为(制造商不投资, 零售商投资), 其相位图如图2c所示;

情形4: 当 $(P + W_2 - W_1)O_2 - C > 0$ 且 $PO_1 + (W_1 - W_2)O_2 + G - C + Q > 0$, 演化稳定策略为(制造商投资, 零售商不投资)和(制造商不投资, 零售商投资), 其相位图如图2d所示。

三、考虑价格调控机制的演化分析

由于制造商在双渠道供应链中占据主导地位, 其能够单方面对产品进行定价。在这种情况下, 制造商能够通过提高/降低产品定价对零售商的分担碳减排技术成本的决策施加影响。为此, 我们研究价格调控机制对制造商与零售商之间碳减排成本分担演化博弈的影响。

(一) 考虑价格调控机制时演化稳定策略分析

制造商在双渠道供应链中占据主导地位, 其能够提高/降低低碳产品批发价格。当零售商投资碳减排技术时, 制造商会降低批发价格让利给零售商, 反之制造商则会提高价格。具体而言, 在制造商投资的情况下, 如果零售商不投资, 制造商高价批发低碳产品给零售商, 价格为 W_3 , 否则价格为 W_1 ; 在制造商不投资的情况下, 如果零售商投资,

制造商低价批发低碳产品给零售商, 价格为 W_4 , 否则制造商批发产品给零售商, 价格为 W_2 。显然地, $0 < W_4 < W_1 < W_3$ 。

当双方都选择不投资时, 或双方都选择投资并按照比例 α 和 $1-\alpha$ 分担碳减排技术成本时, 制造商和零售商的收益与第二节一致。当制造商选择投资碳减排技术且零售商选择不投资时(即零售商不分担碳减排技术投资成本), 制造商批发产品给零售商的价格为 W_3 。此时, 制造商和零售商的收益分别为:

$$U_{in}^m = P_1 O_1 + W_3 O_2 + G - C, \quad U_{in}^r = (P_1 - W_3) O_2$$

当制造商选择不投资且零售商选择投资时(即制造商不分担碳减排技术投资成本), 制造商批发产品给零售商的价格为 W_4 。在这种情况下, 制造商和零售商的收益分别为:

$$U_{ni}^m = P_1 O_1 + W_4 O_2 + G, \quad U_{ni}^r = (P_1 - W_4) O_2 - C$$

基于上述分析, 构建了考虑价格调控机制时制造商和零售商之间减排成本分担博弈的收益矩阵, 如表4所示。

当考虑价格调控机制时, 制造商投资碳减排技术时的期望收益 $E_{(x)}^m$ 、不投资碳减排技术时的期望收益 $E_{(1-x)}^m$ 及平均期望收益 $\bar{E}^m$ 分别为:

$$\begin{cases} E_{(x)}^m = y(P_1 O_1 + W_1 O_2 + G - \alpha C) + (1-y)(P_1 O_1 + W_3 O_2 + G - C) \\ E_{(1-x)}^m = y(P_1 O_1 + W_4 O_2 + G) + (1-y)(P_2 O_1 + W_2 O_2 - Q) \\ \bar{E}^m = x E_{(x)}^m + (1-x) E_{(1-x)}^m \end{cases} \quad (5)$$

同样地, 当考虑价格调控机制时, 零售商投资碳减排技术时的期望收益 $E_{(y)}^r$ 、不投资减排技术的期望收益 $E_{(1-y)}^r$ 及平均期望收益 $\bar{E}^r$ 分别为:

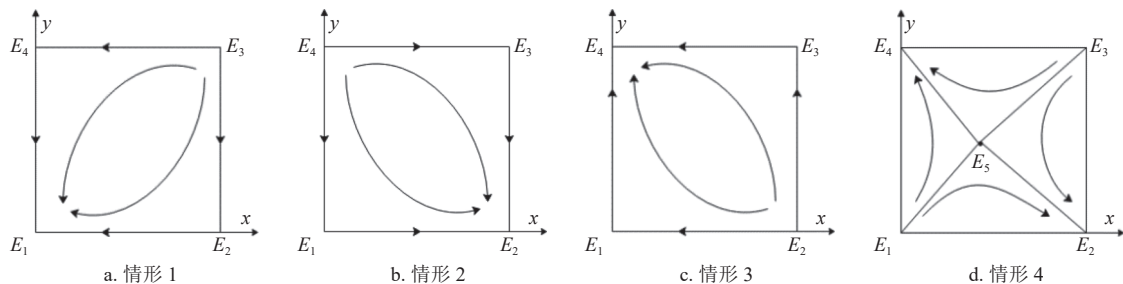


图2 双渠道供应链系统策略演化动态相位图

表4 考虑价格调控机制时双渠道供应链碳减排成本分担博弈收益矩阵

制造商/零售商	投资	不投资
投资	$U_{ii}^m = P_1 O_1 + W_1 O_2 + G - \alpha C$ $U_{ii}^r = (P_1 - W_1) O_2 - (1 - \alpha) C$	$U_{in}^m = P_1 O_1 + W_3 O_2 + G - C$ $U_{in}^r = (P_1 - W_3) O_2$
不投资	$U_{ni}^m = P_1 O_1 + W_4 O_2 + G$ $U_{ni}^r = (P_1 - W_4) O_2 - C$	$U_{nn}^m = P_2 O_1 + W_2 O_2 - Q$ $U_{nn}^r = (P_2 - W_2) O_2$

$$\begin{cases} E_{(y)}^r = x[(P_1 - W_1)O_2 - (1 - \alpha)C] + \\ (1 - x)[(P_1 - W_4)O_2 - C] \\ E_{(1-y)}^r = x(P_1 - W_3)O_2 + (1 - x)(P_2 - W_2)O_2 \\ \bar{E}^r = yE_{(y)}^r + (1 - y)E_{(1-y)}^r \end{cases} \quad (6)$$

进一步, 根据式(5)和(6), 构建了考虑价格调控机制时制造商和零售商组成的二维动力系统:

$$\begin{cases} F^m(x, y) = x(1 - x)\{y[(W_1 - W_4)O_2 - \alpha C] + \\ (1 - y)[PO_1 + (W_3 - W_2)O_2 + G - C + Q]\} \\ F^r(x, y) = y(1 - y)\{x[W_3O_2 - W_1O_2 - (1 - \alpha)C] + \\ (1 - x)[(P + W_2 - W_4)O_2 - C]\} \end{cases} \quad (7)$$

命题3 当考虑价格调控机制时, 双渠道系统的局部均衡点为 $E_1 = (0, 0)$, $E_2 = (1, 0)$, $E_3 = (1, 1)$, $E_4 = (0, 1)$, $E_6 = (x_2, y_2)$, 其中 $x_2 = (PO_2 + W_2O_2 - W_4O_2 - C)/[(W_2 + W_1 - W_4 - W_3 - P)O_2 - \alpha C]$, $y_2 = (PO_1 + G - C + Q + W_3O_2 - W_2O_2)/[PO_1 + G - C + (W_3 + W_4 - W_2 - W_1)O_2 + \alpha C + Q]$, 且 $0 < x_2 < 1$, $0 < y_2 < 1$ 。

(二) 考虑价格调控机制时均衡点稳定性分析

同样地, 为分析局部均衡点的稳定性, 分别求 $F^m(x, y)$ 和 $F^r(x, y)$ 关于 x 和 y 的偏导, 获得考虑价格调控机制时双渠道供应链系统的雅克比矩阵 J :

$$J = \begin{bmatrix} \partial F^m(x, y)/\partial x & \partial F^m(x, y)/\partial y \\ \partial F^r(x, y)/\partial x & \partial F^r(x, y)/\partial y \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, $\partial F^m(x, y)/\partial x = (1 - 2x)\{y[(W_1 - W_4)O_2 - \alpha C] + (1 - y)[PO_1 + (W_3 - W_2)O_2 + G - C + Q]\}$, $\partial F^m(x, y)/\partial y = x(1 - x)[(W_1 - W_4 - W_3 + W_2)O_2 - PO_1 - \alpha C - G + C - Q]$, $\partial F^r(x, y)/\partial x = y(1 - y)[(W_3 - W_1 - P - W_2 + W_4)O_2 + \alpha C]$, $\partial F^r(x, y)/\partial y = (1 - 2y)\{x[W_3O_2 - W_1O_2 - (1 - \alpha)C] + (1 - x)[(P + W_2 - W_4)O_2 - C]\}$ 。

进一步, 将5个局部均衡点带入雅克比矩阵, 计算得出考虑价格调控机制时5个均衡点处的行列式和迹, 如表5所示。

同样地, 雅克比矩阵 J 在点 E_6 的迹 $\text{Tr}(J)|_{(x_2, y_2)}$ 为0, E_6 在区间(0,1)内不是系统的演化稳定策略。为分析其他4个局部均衡点的稳定性, 提出命题4。

命题4 考虑价格调控机制时, 双渠道供应链系统的演化稳定策略随着产品批发价格的变化情况如下:

情形1: 当 $\alpha C + W_4O_2 < W_1O_2 < W_3O_2 - (1 - \alpha)C$ 时, 系统的演化稳定策略为 (制造商投资, 零售商投

资), 其相位图如图3a所示;

情形2: 当 $W_3O_2 + PO_1 + G - C + Q < W_2O_2 < W_4O_2 - PO_2 + C$ 时, 演化稳定策略为 (制造商不投资, 零售商不投资), 其相位图如图3b所示;

情形3: 当 $W_2O_2 - (PO_1 + G - C + Q) < W_3O_2 < W_1O_2 + (1 - \alpha)C$ 时, 演化稳定策略为 (制造商投资, 零售商不投资), 其相位图如图3c所示;

情形4: 当 $W_1O_2 - \alpha C < W_4O_2 < W_2O_2 + PO_2 - C$ 时, 演化稳定策略为 (制造商不投资, 零售商投资), 其相位图如图3d所示;

情形5: 当 $\alpha C + W_4O_2 < W_1O_2 < W_3O_2 - (1 - \alpha)C$ 且 $W_3O_2 + PO_1 + G - C + Q < W_2O_2 < W_4O_2 - PO_2 + C$, 演化稳定策略为 (制造商投资, 零售商投资) 和 (制造商不投资, 零售商不投资), 其相位图如图3e所示;

情形6: 当 $W_1O_2 - \alpha C < W_4O_2 < W_2O_2 + PO_2 - C$ 且 $W_2O_2 - (PO_1 + G - C + Q) < W_3O_2 < W_1O_2 + (1 - \alpha)C$, 演化稳定策略为 (制造商投资, 零售商不投资) 和 (制造商不投资, 零售商投资), 其相位图如图3f所示。

四、数值及仿真分析

本节通过一个数值例子分析制造商和零售商之间碳减排成本冲突的演化过程, 并通过仿真实验分析主要参数对演化稳定策略的影响。

(一) 数值分析

制造业是国家经济命脉所系, 对国民经济的发展有着举足轻重的影响。同时, 制造业产生的碳减排放在所有行业中占据较大比重。因此, 减少制造业中产生的碳排放是实现“双碳”目标的关键。对于一个特定的制造商而言, 其可以通过投资碳减排技术或购买碳排放配额来满足碳限额。由于投资碳减排技术的成本往往较高, 制造商往往希望处于供应链下游的零售商分担碳减排技术的成本。本文构建的演化博弈模型能够为制造商和零售商之间的碳减排成本分担问题提供分析工具。

为了便于分析, 考虑由一家机械制造商与一家

表 5 考虑价格调控机制时局部均衡点处雅克比矩阵的行列式和迹

均衡点	Det(J)	Tr(J)
E_1	$[PO_1 + (W_3 - W_2)O_2 + G - C + Q][(P + W_2 - W_4)O_2 - C]$	$P(O_1 + O_2) + (W_3 - W_4)O_2 - 2C + G + Q$
E_2	$[(W_2 - W_3)O_2 - PO_1 - G + C - Q][(W_3 - W_1)O_2 - (1 - \alpha)C]$	$(W_2 - W_1)O_2 - PO_1 - G + \alpha C - Q$
E_3	$(\alpha C - W_1O_2 + W_4O_2)[(1 - \alpha)C - W_3O_2 + W_1O_2]$	$C + W_4O_2 - W_3O_2$
E_4	$(W_1O_2 - W_4O_2 - \alpha C)[C + (W_4 - W_2 - P)O_2]$	$(1 - \alpha)C + (W_1 - W_2 - P)O_2$
E_6	/	0

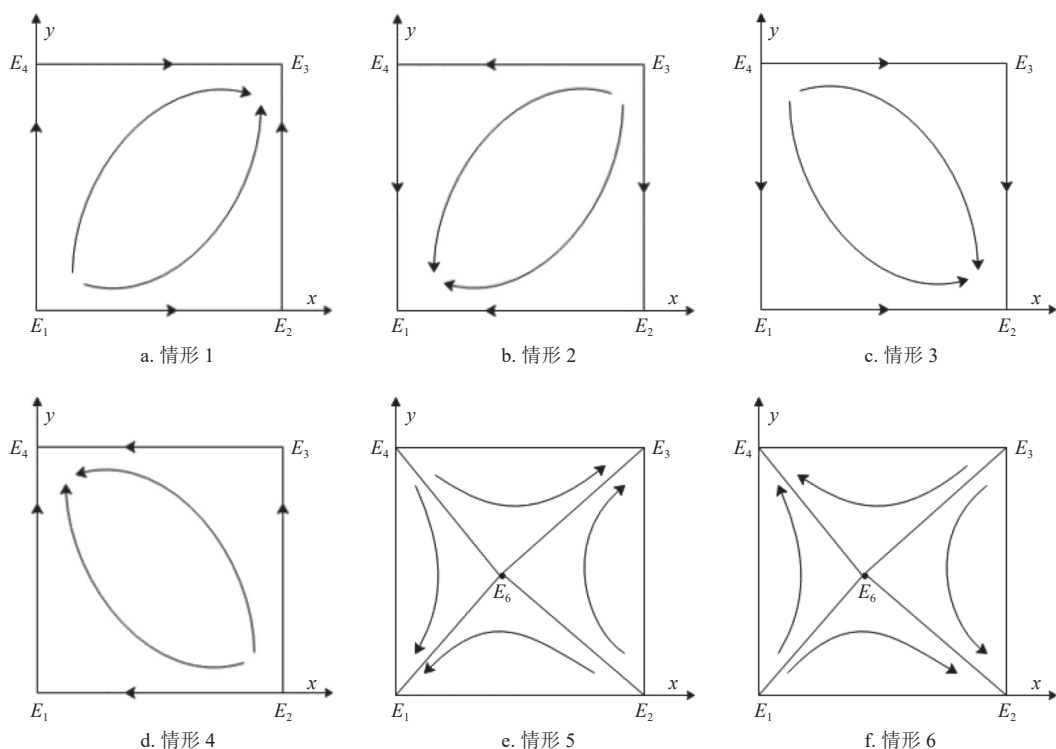


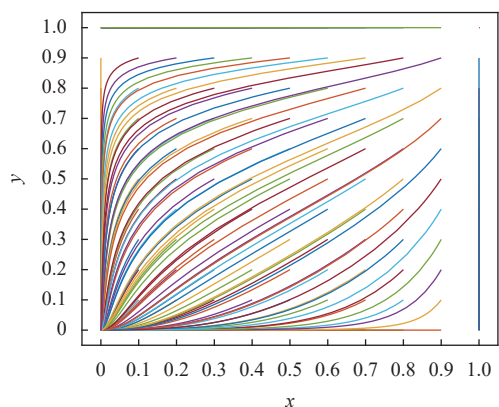
图3 考虑价格调控机制时双渠道供应链系统演化动态相位图

零售商组成的双渠道供应链系统，其中机械制造商生产过程中产生的碳排放超出限额，超出量为 1×10^5 吨。假定碳交易的单位成本为 40 元/吨，购买碳排放配额的成本 Q 为 4×10^6 元，投资碳减排技术的成本 C 为 7×10^6 元。如果投资碳减排技术，机械制造商的碳排放会有明显的下降，其会产生 5×10^4 吨碳排放权用于在碳交易市场上出售，其收益 G 为 2×10^6 元。当不使用碳减排技术时，生产的产品市场销售价格 P_2 为 1×10^5 元/台。随着环保意识的增加，人们能够接受价格略高的低碳产品。假定低碳产品市场销售价格 P_1 为 1.2×10^5 元/台。此外，使用碳减排技术前后，机械制造商总产量 $O = 200$ 台保持不变，且 $O_1 = O_2 = 100$ 台。为表达简便，省去所有参数的单位（元/台、吨、台）并将价格参数 P_1 、 P_2 、 C 、 Q 、 G 都除以 10^5 。简化后的参数如下： $P_1 = 1.2$ ， $P_2 = 1$ ， $C = 70$ ， $Q = 40$ ， $G = 20$ 。同时，将其其他参数 α ， W_1 ， W_2 ， W_3 ， W_4 设定为不同值，分析不同情形下机械制造商和零售商的演化稳定策略。

情形1：在满足 $W_3 O_2 + P O_1 + G - C + Q < W_2 O_2 < W_4 O_2 - P O_2 + C$ 的情况下，设定制造商分担比例和不同批发价格等参数为： $\alpha = 0.6$ ， $W_1 = 0.5$ ， $W_2 = 0.8$ ， $W_3 = 0.65$ ， $W_4 = 0.4$ 。

首先，生成 100 组初始策略组合，让其在情形 1 的参数下进行演化，结果如图 4a 所示。接着，为清晰展示制造商和零售商之间的演化轨迹，在图 4b

中呈现了在初始策略组合 $x_0 = y_0 = 0.5$ 下双方的演化轨迹。图 4 表明：当制造商在双方都不投资情况下



a. 100 组初始策略组合

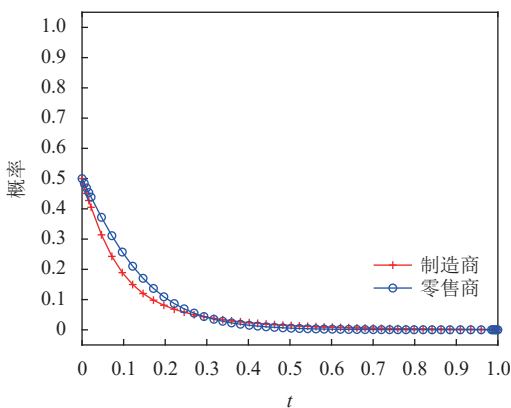
b. $x_0 = y_0 = 0.5$

图4 情形1下双渠道供应链系统的策略演化轨迹

的收益大于其单方面投资情况下的收益且零售商在双方都不投资情况下的收益大于其单方面投资情况下的收益时, 制造商和零售商都会选择不投资碳减排技术的策略。

情形2: 在满足 $W_2O_2 - (PO_1 + G - C + Q) < W_3O_2 < W_1O_2 + (1 - \alpha)C$ 的情况下, 设置制造商分担比例和不同批发价格等参数如下: $\alpha = 0.6$, $W_1 = 0.7$, $W_2 = 0.6$, $W_3 = 0.9$, $W_4 = 0.5$ 。

首先, 生成100组初始策略组合, 让其在情形1的参数下进行演化, 结果如图5a所示。接着, 为清晰展示制造商和零售商之间的演化轨迹, 在图5b中呈现了在初始策略组合 $x_0 = y_0 = 0.5$ 下双方的演化轨迹。图5表明: 当制造商在其单方面投资情况下的收益大于双方都不投资情况下的收益且零售商在制造商单方面投资的收益大于双方分担情况下的收益时, 制造商选择投资策略, 零售商选择不投资策略。

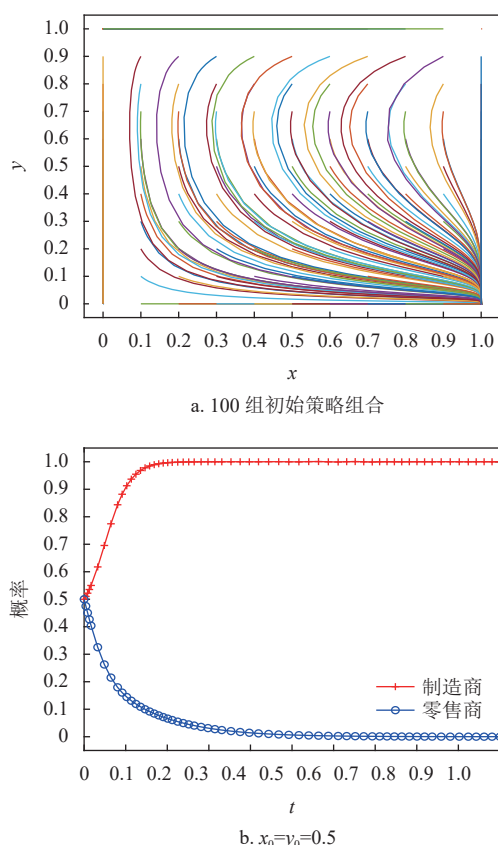


图5 情形2下双渠道供应链系统的策略演化轨迹

情形3: 在满足 $W_1O_2 - \alpha C < W_4O_2 < W_2O_2 + PO_2 - C$ 的情况下, 设置制造商分担比例和不同批发价格等参数为: $\alpha = 0.6$, $W_1 = 0.7$, $W_2 = 0.9$, $W_3 = 0.75$, $W_4 = 0.35$ 。

首先, 生成100组初始策略组合, 让其在情形

1的参数下进行演化, 结果如图6a所示。接着, 为清晰展示制造商和零售商之间的演化轨迹, 在图6b中呈现了在初始策略组合 $x_0 = y_0 = 0.5$ 下双方的演化轨迹。图6显示: 当零售商在其单方面投资情况下的收益大于双方都不投资情况下的收益且制造商在零售商单方面投资情况下的收益大于双方分担情况下的收益时, 制造商选择不投资策略, 零售商选择投资策略。

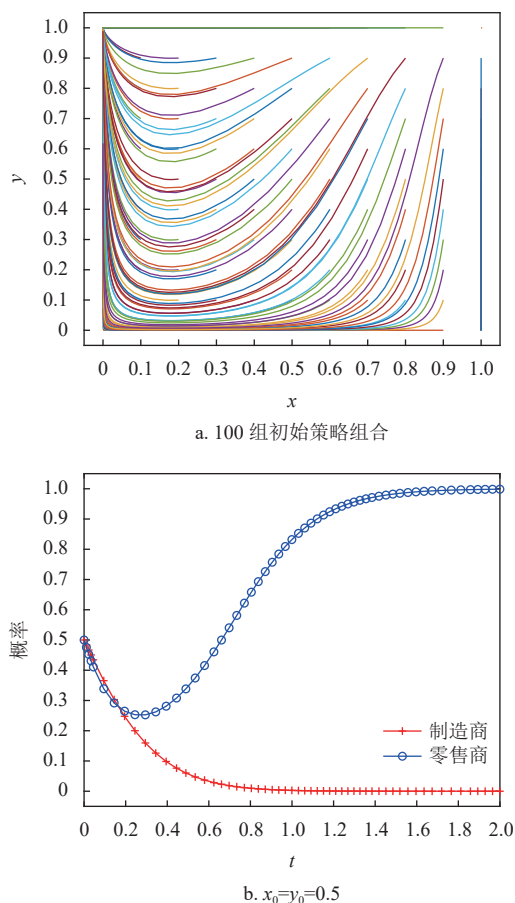
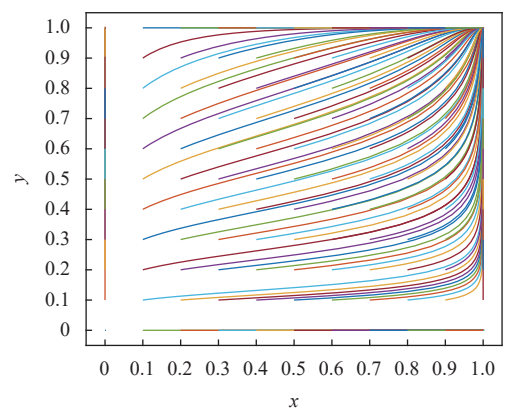


图6 情形3下双渠道供应链系统的策略演化轨迹

情形4: 在满足 $\alpha C + W_4O_2 < W_1O_2 < W_3O_2 - (1 - \alpha)C$ 的情况下, 设置制造商分担比例和不同批发价格等参数如下: $\alpha = 0.6$, $W_1 = 0.75$, $W_2 = 0.85$, $W_3 = 1.1$, $W_4 = 0.3$ 。

首先, 生成100组初始策略组合, 让其在情形1的参数下进行演化, 结果如图7a所示。接着, 为清晰展示制造商和零售商之间的演化轨迹, 在图7b中呈现了在初始策略组合 $x_0 = y_0 = 0.5$ 下双方的演化轨迹。图7表明: 当制造商在双方分担情况下的收益高于在零售商单方面投资情况下的收益且零售商在双方分担情况下的收益高于在制造商单方面投资情况下的收益时, 制造商和零售商都会选择投资碳减排技术策略, 分担碳减排技术成本。



a. 100 组初始策略组合

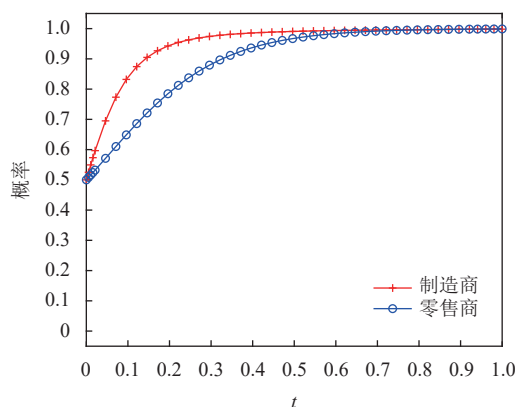
b. $x_0=y_0=0.5$

图7 情形4下双渠道供应链系统的策略演化轨迹

(二) 仿真分析

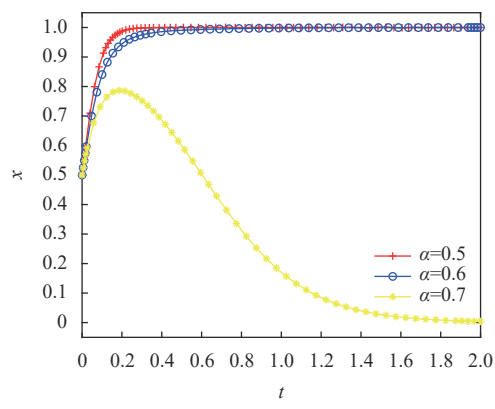
本节通过仿真实验分析成本分担比例、减排成本因素、产品批发价格对制造商和零售商策略演化的影响。

1. 成本分担比例对策略演化的影响

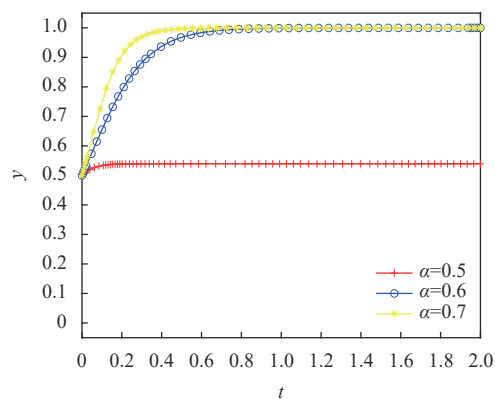
设定制造商成本分担比例 $\alpha \in \{0.5, 0.6, 0.7\}$, 除 α 外其他参数与上一节中情形4的参数一致。在不同的 α 下, 制造商和零售商的策略演化轨迹如图8所示。发现随着制造商成本分担比例增加, 制造商的演化稳定策略由选择投资策略改为不投资策略, 零售商由不稳定策略逐渐稳定并选择投资策略。因此, 在批发价不变的情况下, 适当提高制造商成本分担比例有利于制造商和零售商共同分担碳减排成本。

2. 碳减排成本因素对策略演化的影响

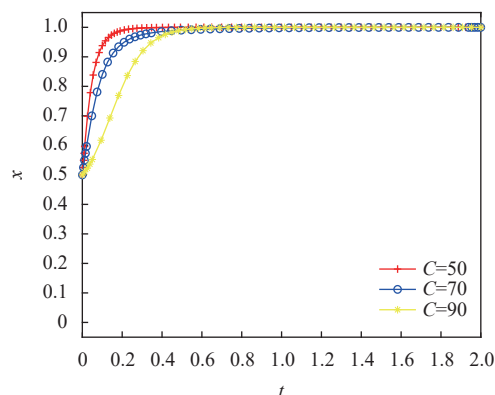
首先, 分析碳减排技术成本对制造商和零售商策略演化的影响。设定碳减排技术成本 $C \in \{50, 70, 90\}$, 除 C 外其他参数与上一节中情形4的参数一致。在不同的 C 下, 制造商和零售商的策略演化轨迹如图9所示。本文发现: 随着碳减排技术成本增加, 制造商和零售商选择投资策略的演化速度都变



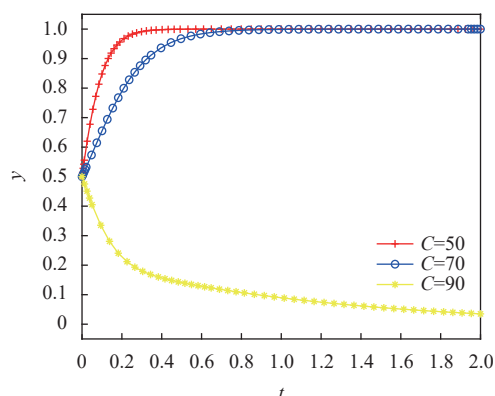
a. 制造商



b. 零售商

图8 成本分担比例 α 对策略演化的影响

a. 制造商



b. 零售商

图9 碳减排技术成本 C 对策略演化的影响

慢, 制造商的演化稳定策略一直为投资策略, 零售商的演化稳定策略由投资改为不投资。碳减排技术成本对零售商的碳减排技术投资决策影响较大, 过高的碳减排技术成本不利于零售商与制造商共同分担减排成本。

接着, 分析碳排放配额购买成本对制造商和零售商策略演化的影响。设定碳排放配额购买成本 $Q \in \{10, 25, 40\}$, 除 Q 外其他参数与上一节中情形4的参数一致。在不同的 Q 下, 制造商和零售商的策略演化轨迹如图10所示。图10表明: 随着成本增加, 制造商选择投资策略的演化速度加快, 零售商选择投资策略的演化速度变化不明显, 双方都稳定在选择投资策略。碳排放配额的购买成本较高时, 制造商购买碳排放配额的意愿会下降, 会更加愿意投资碳减排技术。较高的碳排放配额购买成本有利于制造商与零售商共同分担减排成本。

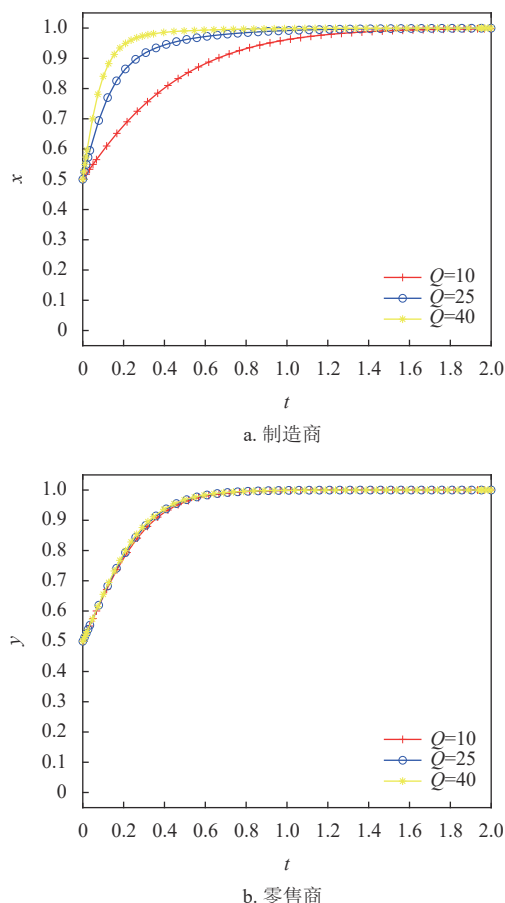


图10 碳排放配额购买成本 Q 对策略演化的影响

3. 批发价格对策略演化的影响

首先, 分析批发价格 W_1 对制造商和零售商策略演化的影响。设定批发价格 $W_1 \in \{0.6, 0.75, 0.9\}$, 除 W_1 外其他参数与上一节中情形4的参数一致。在不同的 W_1 下, 制造商和零售商的策略演化轨迹如

图11所示。图11表明: 随着批发价格 W_1 增加, 制造商选择投资策略的演化速度加快, 稳定策略由不投资改为投资, 零售商选择投资策略的演化速度变慢, 稳定策略由投资改为不投资。因此, 当制造商和零售商共同分担碳减排技术成本时, 适中的产品批发价格 W_1 有利于双方共同分担减排成本, 低的产品批发价格会导致制造商选择不投资策略, 高的产品批发价格则会导致零售商选择不投资策略。

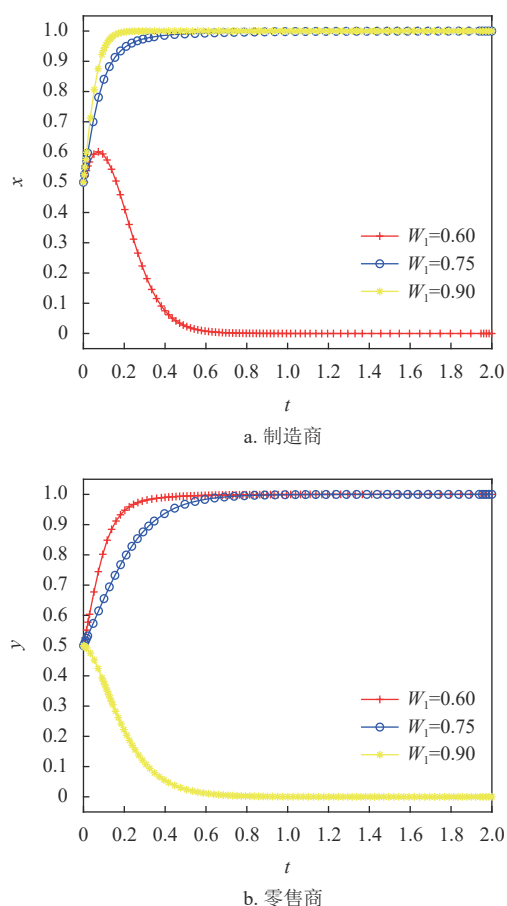
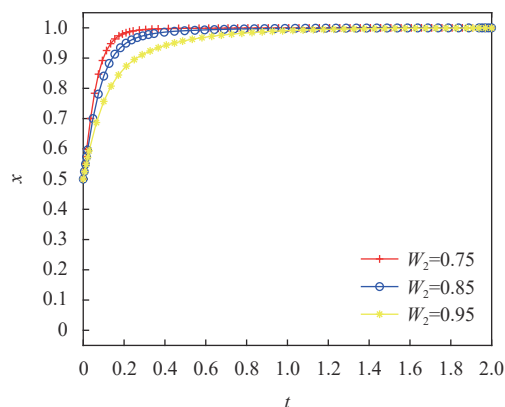


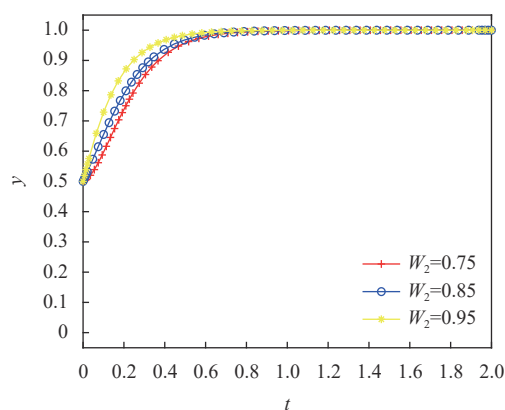
图11 批发价格 W_1 对策略演化的影响

接着, 分析批发价格 W_2 对制造商和零售商策略演化的影响。设定批发价格 $W_2 \in \{0.75, 0.85, 0.95\}$, 除 W_2 外其他参数与上一节中情形4的参数一致。在不同的 W_2 下, 制造商和零售商的策略演化轨迹如图12所示。本文发现: 随着批发价格 W_2 增加, 制造商选择投资策略的演化速度逐渐变慢, 零售商选择投资策略的演化速度逐渐加快, 但是双方的演化稳定策略保持不变; 随着双方都不投资时的批发价格 W_2 的增加, 制造商选择投资策略的意愿降低, 零售商选择投资策略的意愿增加。

然后, 我们分析批发价格 W_3 对制造商和零售商策略演化的影响。设定批发价格 $W_3 \in \{0.9, 1, 1.1\}$, 除 W_3 外其他参数与上一节中情形4的参数一致。在



a. 制造商

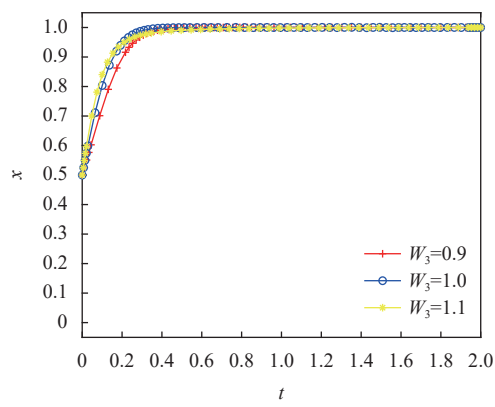


b. 零售商

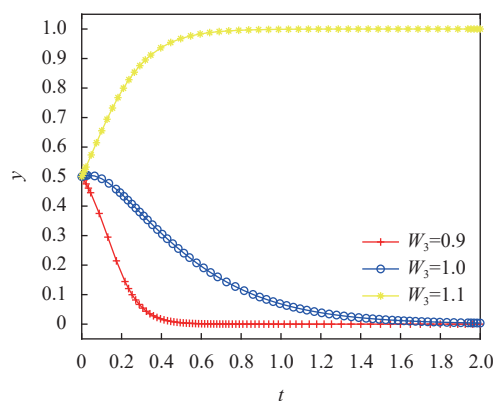
图12 批发价格 w_2 对策略演化的影响

不同的 w_3 下,制造商和零售商的策略演化轨迹如图13所示。我们发现:随着批发价格 w_3 增加,制造商选择投资策略的演化速度有轻微变化,其演化稳定策略保持不变;零售商选择投资策略的演化速度加快,演化稳定策略由不投资策略改为投资策略。当制造商投资,零售商不投资时,制造商单方面投资时批发价格 w_3 的改变会对零售商的策略选择产生较大影响。随着批发价格 w_3 的提高,零售商的收益逐渐降低,最终会改变策略选择,与制造商共同分担减排成本。

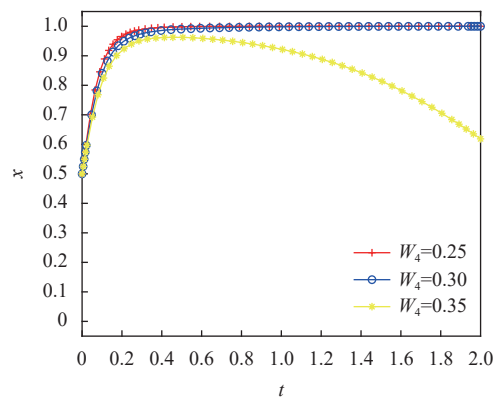
最后,分析批发价格 w_4 对制造商和零售商策略演化的影响。设定批发价格 $w_4 \in \{0.25, 0.3, 0.35\}$,除 w_4 外其他参数与上一节中情形4的参数一致。在不同的 w_4 下,制造商和零售商的策略演化轨迹如图14所示。本文发现:随着批发价格 w_4 增加,制造商由稳定状态(选择投资策略)变成不稳定,零售商选择投资策略的演化速度稍微变慢,但演化稳定策略仍为投资策略。当双方分担碳减排成本时,零售商单方面投资时的批发价格 w_4 的改变对制造商策略选择影响较大,对零售商策略选择影响较小。



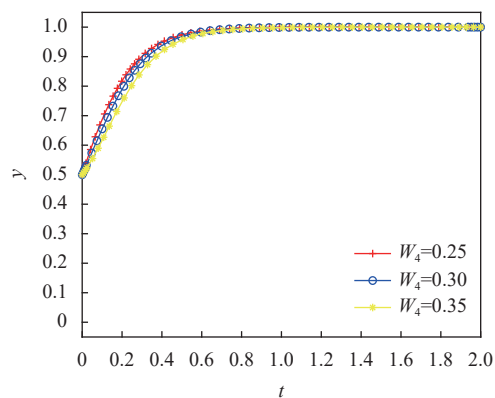
a. 制造商



b. 零售商

图13 批发价格 w_3 对策略演化的影响

a. 制造商



b. 零售商

图14 批发价格 w_4 对策略演化的影响

五、结论

本文对制造商和零售商碳减排成本分担冲突问题进行研究,构建了双方之间的演化博弈模型及二维动力系统,并得到了三种演化稳定策略:(制造商不投资,零售商不投资)、(制造商投资,零售商不投资)和(制造商不投资,零售商投资)。进一步,研究了价格调控机制对制造商与零售商之间碳减排成本分担演化博弈的影响。研究发现:当引入价格调控机制时,双渠道供应链系统在策略(制造商投资,零售商投资)上也能形成稳定。同时,通过数值例子分析了双渠道供应链系统中策略的演化轨迹,并基于仿真实验研究了主要参数对演化稳定策略的影响。依据理论及仿真研究结果,提出了促进零售商与制造商共同分担碳减排技术成本的管理对策:适当提高制造商的成本分担比例、当制造商投资且零售商不投资时提高产品批发价格。

实际生活中的供应链系统往往具有更加复杂的特征,例如,供应链系统往往涉及多个制造商和多个零售商、制造商和零售商在碳减排成本分担博弈中可能存在其他的策略选择。因此,研究复杂环境下的供应链碳减排成本分担问题将是有价值的研究方向。

附录:

命题1证明过程:

令 $F^m(x, y) = 0$ 且 $F^r(x, y) = 0$, 即

$$\begin{cases} x(1-x)\{-y\alpha C + (1-y)[PO_1 + (W_1 - W_2)O_2 + G - C + Q]\} = 0 \\ y(1-y)\{-x(1-\alpha)C + (1-x)[(P + W_2 - W_1)O_2 - C]\} = 0 \end{cases}$$

通过求解上式,获得 $E_1 = (0, 0)$, $E_2 = (1, 0)$, $E_3 = (1, 1)$, $E_4 = (0, 1)$ 和 $E_5 = (x_1, y_1)$ 这5个局部均衡点。其中,

$$x_1 = \frac{(P + W_2 - W_1)O_2 - C}{(P + W_2 - W_1)O_2 - \alpha C},$$

$$y_1 = \frac{PO_1 + (W_1 - W_2)O_2 + G - C + Q}{PO_1 + (W_1 - W_2)O_2 + G - C + Q + \alpha C}$$

考虑到 $0 < x < 1$ 且 $0 < y < 1$, 因此 x_1 和 y_1 要满足 $0 < x_1 < 1$ 且 $0 < y_1 < 1$, 由此命题1得证。

证毕。

命题3证明过程与命题1相似,我们省略其证明过程。

命题2证明过程:

首先证明(1): 雅可比矩阵 J 在 E_1 处的行列式和迹分别为 $\text{Det}(J)|_{(0,0)} = [PO_1 + (W_1 - W_2)O_2 + G - C + Q]$

$[(P + W_2 - W_1)O_2 - C]$, 和 $\text{Tr}(J)|_{(0,0)} = P(O_1 + O_2) - 2C + 2(W_2 - W_1)O_2 + G + Q$ 。显然, 当 $PO_1 + (W_1 - W_2)O_2 + G - C + Q < 0$ 且 $(P + W_2 - W_1)O_2 - C < 0$ 时, $\text{Det}(J)|_{(0,0)} > 0$, $\text{Tr}(J)|_{(0,0)} < 0$ 。根据Friedman^[30]的均衡点稳定性公理, 系统在 $E_1 = (0, 0)$ (即(制造商不投资, 零售商不投资))处为演化稳定策略。

(2)和(3)的证明与(1)类似,我们省略其证明过程。

证毕。

命题4的证明与命题2类似,省略其证明过程。

参考文献

- [1] 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: 325-341.
- [2] FENG H R, ZENG Y L, CAI X Q, et al. Altruistic profit allocation rules for joint replenishment with carbon cap-and-trade policy[J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 290: 956-967.
- [3] 淳伟德, 张业霞, 陈威. 碳限额与碳交易机制研究现状及趋势展望[J]. 电子科技大学学报(社科版), 2022, 24(1): 92-104.
- [4] CHAI Q, XIAO Z, LAI K, et al. Can carbon cap and trade mechanism be beneficial for remanufacturing?[J]. *International Journal of Production Economics*, 2018, 203: 311-321.
- [5] 陈晓红, 曾祥宇, 王傅强. 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.
- [6] MIRZAEI H, SAMARGHANDI H, WILLOUGHBY K. A robust optimization model for green supplier selection and order allocation in a closed-loop supply chain considering cap-and-trade mechanism[J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, 228: 120423.
- [7] 李璟, 谢家平, 古丽扎尔·艾赛提. 非对称信息下考虑绿色偏好差异化与碳约束的减排定价策略优化[J/OL]. 中国管理科学: 1-13 [2022-04-13]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.1185>.
- [8] 杨建华, 解雯倩. 碳限额交易下考虑平台推广服务的竞争制造商减排决策研究[J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(12): 3305-3318.
- [9] KORPEOGLU C G, KORPEOGLU E, CHO S H. Supply chain competition: a market game approach[J]. *Management Science*, 2020, 66(12): 5485-6064.
- [10] 陈剑, 刘运辉. 数智化使能运营管理变革: 从供应链到供应链生态系统[J]. 管理世界, 2021, 37(11): 227-240+14.
- [11] 李勇建, 陈婷. 区块链赋能供应链: 挑战、实施路径

- 与展望[J]. 南开管理评论, 2021, 24(05): 192-201+212+202-203.
- [12] 余德建, 盛丽博, 李登峰. 基于主路径的闭环供应链领域知识演化研究[J/OL]. 中国管理科学: 1-12 [2022-07-05]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.1583>.
- [13] VAN HOEK R, FUGATE B, DAVLETSKIN M, et al. Integrating blockchain into supply chain management: a toolkit for practical implementation[M]. London: Kogan Page, 2019.
- [14] 陈威, 王圣洁, 尚雅茹, 等. 基于地方保护的碳限额与交易机制下电力供应链企业的低碳技术投资研究[J]. 电子科技大学学报(社科版), 2022, 24(5): 73-87.
- [15] GOPALAKRISHNAN S, GRANOT D, GRANOT F, et al. Incentives and emission responsibility allocation in supply chains[J]. *Management Science*, 2021, 67(7): 4172-4190.
- [16] 谢鑫鹏, 赵道致. 低碳供应链企业减排合作策略研究[J]. 管理科学, 2013, 26(3): 108-119.
- [17] XU X P, ZHANG W, HE P, et al. Production and pricing problems in make-to-order supply chain with cap-and-trade regulation[J]. *Omega*, 2017, 66: 248-257.
- [18] 王文宾, 管婕. 碳限额交易政策下考虑发电商减排策略的电力供应链决策[J/OL]. 中国管理科学: 1-12 [2023-08-23]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.1558>.
- [19] JI J N, ZHANG Z Y, YANG L. Carbon emission reduction decisions in the retail-dual-channel supply chain with consumers' preference[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 141: 852-867.
- [20] TONG W, MU D, ZHAO F, et al. The impact of cap-and-trade mechanism and consumers' environmental preferences on a retailer-led supply chain[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2019, 142: 88-100.
- [21] 王文利, 程天毓. 碳交易背景下供应链运营决策的演化博弈分析[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(5): 1272-1281.
- [22] XIA J, NIU W J. Carbon-reducing contract design for a supply chain with environmental responsibility under asymmetric information[J]. *Omega*, 2021, 102: 102390.
- [23] 卓四清, 韩雪. 碳补贴与零售商竞争下供应链合作方式的微分博弈研究[J]. 管理工程学报, 2023, 37(2): 80-89.
- [24] 杨洁, 曾子豪, 吴林炜, 等. 限制交流结构下供应链碳减排策略的非合作-合作两型博弈研究[J/OL]. 系统工程理论与实践: 1-20 [2023-08-17]. <https://doi.org/10.12011/SETP2022-2730>.
- [25] 刘名武, 林强, 王晓斐. 供应链减排运作决策研究现状与发展趋势[J]. 电子科技大学学报(社科版), 2022, 24(2): 86-95.
- [26] HU M, XU X L, XUE W L, et al. Demand pooling in omnichannel operations[J]. *Management Science*, 2022, 68(2): 883-894.
- [27] MODAK N M, KELLE P. Managing a dual-channel supply chain under price and delivery-time dependent stochastic demand[J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 272: 147-161.
- [28] 陈俊霖, 王山. 双渠道供应链中紧俏产品升级成本分担演化博弈分析[J]. 中国管理科学, 2022, 30(10): 224-235.
- [29] LI W, CHEN J, LIANG G Q, et al. Money-back guarantee and personalized pricing in a Stackelberg manufacturer's dual-channel supply chain[J]. *International Journal of Production Economics*, 2018, 197: 84-98.
- [30] 张令荣, 徐航, 李云凤. 碳配额交易背景下双渠道供应链减排决策研究[J]. 管理工程学报, 2023, 37(2): 90-98.
- [31] 潘晨, 杨柏, 冯鹤林, 等. 碳交易制度下绿色供应链不同成本分担合同选择[J]. 系统工程学报, 2023, 38(4): 556-576.
- [32] KAHNEMAN D. A perspective on judgment and choice: mapping bounded rationality[J]. *American Psychologist*, 2003, 58(9): 697-720.
- [33] 黄海棠, 李登峰, 蔡创能, 等. 基于三方演化博弈模型的精准扶贫主体行为研究[J]. 电子科技大学学报(社科版), 2020, 22(2): 77-87.
- [34] FRIEDMAN D. Evolutionary games in economics[J]. *Econometrica*, 1991, 59(3): 637-666.

Evolutionary Game Analysis of Emission Reduction Cost Sharing in a Dual-Channel Supply Chain Under Carbon Cap Constraints

WANG Fang¹ ZHANG Heng-jie¹ ZHU Yan² DONG Yu-cheng²

(1. Hohai University Nanjing 211100 China; 2. Sichuan University Chengdu 610065 China)

Abstract Excessive emission of the greenhouse gas, whose main component is carbon dioxide, has led to the problem of global warming and attracted global attention. Supply chains generate large amounts of carbon dioxide during manufacturing, so there is an urgent need to reduce supply chain carbon emissions. There are mainly two carbon emission reduction strategies: carbon emission reduction technology and carbon trading. Considering the high cost of carbon reduction technology, a manufacturer in dual-channel supply chains tends to share costs with retailer to reduce corporate risks. Therefore, the core issue of supply chain carbon emission reduction is how to encourage manufacturer and retailer to jointly invest in carbon emission reduction technology. This paper studies the emission reduction cost sharing based on evolutionary game, and further analyzes the effect of price regulation mechanism on evolutionary stability strategies. There are three evolutionary stability strategies: (1) manufacturer invests and retailer doesn't invest, (2) manufacturer doesn't invest and retailer invests, (3) neither manufacturer or retailer invest. Further more, when introducing price regulation mechanism, the dual-channel supply chain system will stabilize on the strategy that both manufacturer and retailer invest. In addition, the simulation analysis is used to verify the above theoretical results, and analyze the impact of some parameters on manufacturers and retailers sharing the carbon emission reduction technology costs.

Key words dual-channel supply chain; evolutionary game; carbon emission reduction; cost sharing

编辑 蒋晓