

碳减排机制下供应链决策的演化博弈分析

何明萱

澳门科技大学商学院, 澳门

收稿日期: 2025年3月7日; 录用日期: 2025年3月19日; 发布日期: 2025年4月16日

摘要

面对全球气候变暖的挑战, 碳减排成为各国政府和企业的议题。本文以制造商和零售商构成的二级供应链为背景, 通过零售商主导的Stackelberg博弈模型, 构建了制造商和零售商的博弈支付矩阵。利用演化博弈理论, 探讨在碳减排机制下供应链中各参与方的决策演化过程。通过数值实验分析了对演化结果的影响因素。研究表明, 在低碳生产与销售过程中, 只有一个参与者(制造商或零售商)采用低碳行为, 二者不同时采用低碳策略; 零售商低碳订购水平与制造商低碳生产水平呈相反关系。零售商与制造商配合发展低碳经济, 双方才能获利更大。

关键词

碳减排, 供应链决策, Stackelberg博弈, 演化博弈

Evolutionary Game Analysis of Supply Chain Decision under Carbon Reduction Mechanism

Mingxuan He

School of Business, Macau University of Science and Technology, Macau

Received: Mar. 7th, 2025; accepted: Mar. 19th, 2025; published: Apr. 16th, 2025

Abstract

Faced with the challenge of global warming, carbon reduction has become an important issue for governments and enterprises. Based on the background of the two-level supply chain consisting of manufacturers and retailers, this paper constructs the game payment matrix of manufacturers and retailers through the Stackelberg game model. Using evolutionary game theory, the paper discusses the decision-making evolution process of each participant in the supply chain under the carbon

emission reduction mechanism. The factors influencing the evolution results are analyzed by numerical experiments. Research shows that in the process of low-carbon production and sales, only one participant (manufacturer or retailer) adopts low-carbon behavior. The low carbon level of retailers is inversely related to that of manufacturers. Retailers and manufacturers will benefit more if they work together to develop a low-carbon economy.

Keywords

Carbon Emission Reduction, Supply Chain Decision, Stackelberg Game, Evolutionary Game

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球气候变化问题的加剧，碳减排已成为全球应对环境变化的核心策略。为了减少温室气体排放，许多国家和地区出台了严格的碳减排政策，并通过建立碳交易市场来激励企业降低碳排放。发展低污染、低能耗、资源利用率高的绿色低碳经济成为世界各国的共识[1]。碳排放交易是在总量控制的前提下，各个主体通过市场交易达到总的碳减排成本最小化，这是一种政府管制和市场交易相结合的有效措施。2011年，中国正式开展了碳排放交易试点工作，随后在2015年的巴黎气候大会上，中国郑重宣布于2017年启动全国统一的碳排放权交易市场，同时中国政府提出力争于2030年前实现碳达峰，努力争取2060年前实现碳中和[2]。这些行动旨在通过市场机制促进碳减排，为应对全球气候变化贡献中国力量。

为了经济和环境的可持续发展，考虑资源消耗和环境影响的绿色供应链就应运而生了[3]。这一新型供应链管理模式的旨在从原材料采购、生产制造、物流运输到产品回收处理的每一个环节，都尽量减少对资源的消耗，并降低对环境产生的负面影响。供应链作为商品从生产到消费者的传递通道，其碳排放水平直接影响到整体减排效果。随着全球对环境保护意识的日益增强，绿色供应链已经成为企业提升竞争力、实现可持续发展及应对环境挑战的重要策略[4]。许多制造企业开始使用绿色生产技术，以促进生产过程的绿色化[5]。因此，研究碳减排机制对供应链决策的影响，对于推动低碳经济转型具有重要意义。

近年来，众多学者对碳减排机制下的供应链进行了研究，与本文相关的研究可以分为以下几个方面：碳限额交易下供应链决策和协调，消费者低碳偏好下供应链决策，供应链上下游企业共同努力等方面。夏良杰等[6]研究了低碳供应链成员的减排决策，发现零售商的推广效率 and 市场竞争程度显著影响利润。李新军等[7]探讨了汽车制造企业在政府监管下的供应链决策问题，研究了政府如何激励企业进行碳减排。许海娟等[8]讨论了政府规制措施、低碳生产收益增长率以及“搭便车”行为对企业碳减排策略的影响。张丹露等[9]研究了碳交易背景下不同补贴模式对供应链成员减排策略的影响，发现消费者补贴相比制造商补贴更能提高供应链成员对环境成本的重视。徐春秋等[10]考虑制造商和零售商联合减排的前提下，探究了供应链企业利润受成本分担契约的影响情况。上述文献仅仅考虑在碳限额交易下供应链的决策，却没有考虑到消费者低碳偏好带来的影响。同时多数文献都是基于决策者完全理性展开研究，但是在供应链的实际运营中，利益相关者的决策往往是有限理性的动态演化过程。

演化博弈理论能动态反映利益相关者的决策行为以及外部环境的影响[11]，因此部分学者使用演化博弈分析供应链相关利益者的决策。王文利等[12]研究了碳限额交易政策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。通过构建制造商和零售商的博弈支付矩阵，利用演化博弈理论分析得到演化稳定策略。张金泉等[13]从政府、企业、消费者三个层面阐述了制造商和零售商的策略选择

问题,运用演化博弈的方法研究了不同策略组合下的均衡条件。Wang 等[14]探讨了政府干预下,中小企业、核心企业和商业银行组成的绿色供应链演化博弈模型。这些研究为理解和解决绿色供应链中的复杂博弈行为提供了重要的理论支持。

通过回顾相关的文献,可以看出多数研究主要集中在绿色供应链的发展路径、环境法规对供应链成员决策的影响,以及企业和政府之间,上下游企业之间的减排博弈等方面,而对绿色供应链企业之间的博弈行为关注较少,鲜有文献在演化博弈的视角下研究碳排放权交易中供应链企业的策略选择问题。为此,本文从供应链内部出发,在碳减排机制约束的基础上,以制造商和零售商构成的供应链为研究对象,构建演化博弈模型,研究制造商低碳生产与零售商低碳营销之间的博弈关系。

2. 模型描述与假设

本研究考虑一个由零售商和上游碳排放制造商组成的两级供应链系统。制造商的生产受到政府低碳政策要求的约束,零售商可以选择销售定购的低碳产品。如果零售商选择定购低碳产品,则需要向制造商支付定订购成本,制造商将这笔资金投入低碳生产。制造商也可以主动选择投资低碳生产。在本研究中,假设制造商受到资金约束,需要从零售商获得碳融资来提供低碳生产,并在交货时将本金和利息偿还给零售商。该供应链系统中的决策者都是有限理性的,很难在一次决策中做出最优选择,在实际中要不断调整策略而获得稳定均衡。零售商先决定是否订购低碳产品,制造商再根据零售商的决策对其进行是否低碳生产的决策。因此,本文的低碳策略选择问题是由零售商主导的 Stackelberg 博弈模型[15]。制造商的策略集合为(低碳生产 Y, 不低碳生产 N),零售商的策略集合为(订购低碳产品 Y, 不订购低碳产品 N)。本文在建模过程中,对描述问题的相关符号(见表 1)及假设如下:

Table 1. Model parameter symbols and instructions

表 1. 模型参数符号及说明

参数符号	含义
e_0	传统生产时单位产品的碳排放量
e	低碳生产时单位产品的碳减排量(决策变量)
w	产品的单位批发价(决策变量)
m	零售商的单位利润(决策变量)
c	制造商生产单位产品的生产成本
a	潜在市场需求量
b	消费者价格敏感系数
k	消费者对低碳产品的敏感系数
q	市场的实际需求量
c_1	低碳产品生产或投资系数
s	零售商支付低碳产品生产成本的系数
r	零售商的利率
h	碳交易市场上单位碳排放量的交易价
E	政府提供给制造商的碳限额

1) 假设市场实际需求量 q 是产品价格 p 和碳减排量 e 的线性函数,即 $q = a - bp + ke$, 其中 a 为潜在市场需求量, b 为消费者对价格的敏感度, b 越大表明消费者对低碳产品的价格越敏感。 k 为消费者对低

碳产品的敏感系数。产品价格 p 由制造商和零售商共同确定, 即 $p = m + w$ 。

2) 在本研究中, 假设碳减排量水平代表企业在产品中为消费者做出的环境努力。该假设引用了文献[15]的研究, 该研究认为企业利润是低碳生产投资的凹函数。低碳产品生产成本或投资为 $\frac{1}{2}c_1e^2$, 这意味着碳减排量 e 越高, 所需的投资越大, 也体现边际减排成本递增规律。 c_1 为低碳产品生产或投资系数。

3) 参考文献[16]的研究, 设政府制定碳排放限额与交易政策, 将碳排放限额 E 分配给制造商, 剩余的碳排放许可可以在碳交易市场上以交易价格 h 进行买卖。碳交易市场机制使得制造商产生的额外收益为 $h[E - (e_0 - e)q]$, 产生的额外支出为 $h(e_0q - E)$, 其中 $0 < q(e_0 - e) < E$ 。

4) 假设零售商作为该 Stackelberg 博弈中的领导者, 拥有充足的资本; 制造商作为跟随者, 存在资本约束, 仅拥有足够日常生产的营运资金。如果零售商订购低碳产品时, 需向制造商支付定制低碳产品生产成本, 如果制造商选择投资低碳生产, 则需要零售商提供碳融资并支付相应的利息。

3. 碳排放交易机制下模型的构建

本文采用零售商主导的 Stackelberg 模型, 先由零售商确定单位产品的利润 m 及碳减排量 e , 随后制造商确定单位产品批发价 w , 且双方均以利润最大化为目的。结合零售商与制造商的低碳产品策略, 提出了四种可能的策略组合: 订购低碳产品, 低碳生产(Y, Y); 订购低碳产品, 不低碳生产(Y, N); 不订购低碳产品, 低碳生产(N, Y); 不订购低碳产品, 不低碳生产(N, N)。

1) 对策略组合(Y, Y), 该组合中, 零售商订购低碳产品时, 需向制造商支付一定定制低碳产品成本, 即零售商和制造商共同分担低碳成本, s 为分担比例系数。零售商的利润 π_r 与制造商利润 π_m 分别为:

$$\pi_r(m, e) = mq - \frac{1}{2}sc_1e^2 \quad (1)$$

$$\pi_m(w) = (w - c)q - \frac{1}{2}c_1(1 - s)e^2 - h[(e_0 - e)q - E] \quad (2)$$

2) 对策略组合(Y, N), 该组合中, 零售商订购低碳产品时, 需向制造商支付全部低碳产品生产成本, 即零售商负担低碳成本。零售商的利润 π_r 与制造商利润 π_m 函数分别为:

$$\pi_r(m, e) = mq - \frac{1}{2}c_1e^2 \quad (3)$$

$$\pi_m(w) = (w - c)q - h(e_0q - E) \quad (4)$$

3) 对策略组合(N, Y), 该组合中, 制造商承担所有的低碳成本。但由于资金有制, 制造商需要零售商提供碳融资, 并支付相应的利息。零售商的利润 π_r 与制造商利润 π_m 函数分别为:

$$\pi_r = mq + \frac{1}{2}rc_1e^2 \quad (5)$$

$$\pi_m = (w - c)q - \frac{1}{2}c_1(1 + r)e^2 - h[(e_0 - e)q - E] \quad (6)$$

4) 对策略组合(N, N), 零售商的利润 π_r 与制造商利润 π_m 函数分别为:

$$\pi_r = mq \quad (7)$$

$$\pi_m = (w - c)q - h(e_0q - E) \quad (8)$$

对以上四种组合, 采用逆向归纳法求最优解。对于组合(Y, Y), 将 $q = a - bp + ke$ 及 $p = m + w$ 代入两式, 首先(2)对 w 求一阶偏导数, 再对 w 求二阶偏导的结果为 $-2b < 0$, 导数小于零, 制造商利润函数 π_m

是关于 w 的凹函数, 存在最大值。因此, 令一阶导数等于零可得

$$w = \frac{a + ke + b[c - m + h(e_0 - e)]}{2b} \quad (9)$$

接着, 把式(9)代入到式(1)中, 可以得到零售商关于 m, e 的利润函数。分别对 m, e 求一阶、二阶偏导数, 可得函数 π_r 的海塞矩阵 H 为

$$H = \begin{bmatrix} -b & \frac{k+bh}{2} \\ \frac{k+bh}{2} & -c_1s \end{bmatrix}$$

当 $\lambda_1 = 4bc_1s - (k+bh)^2 > 0$ 时, 海塞矩阵 H 负定, 可以得到制造商利润函数 π_m 存在最大值。令一阶导数等于零, 解关于 m, e 方程组可得结果为:

$$m^* = \frac{2\mu c_1 s}{\lambda_1}, e^* = \frac{\mu \varepsilon}{\lambda_1}$$

这里 $\mu = a - bc - kh$, $\varepsilon = bh + k$ 。我们令 $\lambda_2 = 4bc_1 - \varepsilon^2$, $\lambda_3 = 2bc_1(1+r) - \varepsilon^2$ 。

同理, 对其他策略组合采用逆向归纳法求解。表 2 为各策略组合下的均衡解集合(w 的值可将 m 及 e 代入求得), 表 3 为各策略组合下的最优利润, 表 4 为制造商和零售商的博弈支付矩阵。

根据利润函数, 通过分析及比较, 在满足一定条件下, 利润函数有如下的关系:

$$\begin{aligned} \pi_m^{YN*} &> \pi_m^{YY*} > \pi_m^{NY*} > \pi_m^{NN*}, \pi_r^{NY*} > \pi_r^{YY*} > \pi_r^{YN*} > \pi_r^{NN*} \\ \text{或者 } \pi_m^{YN*} &> \pi_m^{NY*} > \pi_m^{YY*} > \pi_m^{NN*}, \pi_r^{NY*} > \pi_r^{YY*} > \pi_r^{YN*} > \pi_r^{NN*} \end{aligned} \quad (10)$$

Table 2. The optimal solution for each strategy combination

表 2. 各个策略组合下的最优解

策略组合	m^*	e^*	w^*
(Y, Y)	$\frac{2\mu c_1 s}{\lambda_1}$	$\frac{\mu \varepsilon}{\lambda_1}$	*
(Y, N)	$\frac{2\mu c_1}{\lambda_2}$	$\frac{\mu \varepsilon^2}{\lambda_2}$	*
(N, Y)	$\frac{\mu}{2b}$	$\frac{\mu \varepsilon}{2\lambda_3}$	*
(N, N)	$\frac{\mu}{2b}$	0	$\frac{4a-3\mu}{4b}$

Table 3. The optimal profit for each strategy combination

表 3. 各个策略组合下的最优利润

策略组合	π_m^*	π_r^*
(Y, Y)	$\frac{2b\mu^2 c_1^2 s^2 + 2\lambda_1^2 hE - \mu^2 c_1(1-s)}{2\lambda_1^2}$	$\frac{\mu^2 c_1 s}{2\lambda_1}$
(Y, N)	$\frac{b\mu^2 c_1^2 + \lambda_2^2 hE}{\lambda_2^2}$	$\frac{c_1 \mu^2}{2\lambda_2}$

续表

(N, Y)	$\frac{c_1\mu^2(1+r)+8\lambda_3hE}{8\lambda_3}$	$\frac{\mu^2c_1[4bc_1(1+r)^2-\varepsilon^2(2+r)]}{8\lambda_3^2}$
(N, N)	$\frac{\mu^2+16bhE}{16b}$	$\frac{\mu^2}{8b}$

Table 4. The game pay-off matrix**表 4.** 博弈支付矩阵

策略组合		制造商	
		低碳生产 ^{ac}	不低碳生产
零售商	订购	$(\pi_r^{YY*}, \pi_m^{YY*})$	$(\pi_r^{YN*}, \pi_m^{YN*})$
	不订购	$(\pi_r^{NY*}, \pi_m^{NY*})$	$(\pi_r^{NN*}, \pi_m^{NN*})$

4. 碳减排机制下策略演进分析

一般情况下, 博弈参与方具有有限理性, 博弈参与方之间的均衡策略不是某一时刻的决策, 而是不断学习、动态调整的结果。假设零售商采用“订购低碳产品”策略的概率为 x , 采用“不订购低碳产品”策略的概率为 $1-x$ 。假设制造商采用“低碳生产”的概率为 y , 采取“不低碳生产”的概率例为 $1-y$, $x, y \in (0, 1)$ 。则零售商订购策略的期望收益、不订购策略的期望收益及平均期望收益分别是:

$$U_1 = y\pi_r^{YY*} + (1-y)\pi_r^{YN*} \quad (11)$$

$$U_2 = y\pi_r^{NY*} + (1-y)\pi_r^{NN*} \quad (12)$$

$$\bar{U} = xU_1 + (1-x)U_2 \quad (13)$$

对于制造商, 低碳生产策略期望收益、不低碳生产策略期望收益及平均期望收益分别是:

$$V_1 = x\pi_m^{YY*} + (1-x)\pi_m^{NY*} \quad (14)$$

$$V_2 = x\pi_m^{YN*} + (1-x)\pi_m^{NN*} \quad (15)$$

$$\bar{V} = yV_1 + (1-y)V_2 \quad (16)$$

根据(11)~(13)式, 可以得到零售商的复制动态方程为:

$$\frac{dx}{dt} = x(1-x)[y(\pi_r^{YY*} - \pi_r^{NY*}) + (1-y)(\pi_r^{YN*} - \pi_r^{NN*})]$$

同理根据(14)~(16)式, 可以得到制造商的复制动态方程。联立得到二维动力系统为

$$\begin{cases} F(x, y) = \frac{dx}{dt} = x(1-x)[y(\pi_r^{YY*} - \pi_r^{NY*}) + (1-y)(\pi_r^{YN*} - \pi_r^{NN*})] \\ G(x, y) = \frac{dy}{dt} = y(1-y)[x(\pi_m^{YY*} - \pi_m^{YN*}) + (1-x)(\pi_m^{NY*} - \pi_m^{NN*})] \end{cases} \quad (17)$$

根据微分方程理论, 动态演化博弈的均衡点 (x, y) 需同时满足 $F(x, y) = 0$ 和 $G(x, y) = 0$, 通过该条件, 则可得到系统均衡点为 $E_1(0, 0)$, $E_2(1, 0)$, $E_3(0, 1)$, $E_4(1, 1)$ 。当 $(\pi_r^{YY*} - \pi_r^{NY*})(\pi_r^{YN*} - \pi_r^{NN*}) < 0$ 以及 $(\pi_m^{YY*} - \pi_m^{YN*})(\pi_m^{NY*} - \pi_m^{NN*}) < 0$ 时, $E_5(x^*, y^*)$ 也是系统潜在的均衡点。其中

$$(x^*, y^*) = \left(\frac{\pi_m^{NN^*} - \pi_m^{NY^*}}{\pi_m^{YY^*} - \pi_m^{YN^*} - \pi_m^{NY^*} - \pi_m^{NN^*}}, \frac{\pi_r^{NN^*} - \pi_r^{YN^*}}{\pi_r^{YY^*} - \pi_r^{YN^*} - \pi_r^{YN^*} - \pi_r^{NN^*}} \right)$$

系统均衡点的局部稳定点由二维动态系统的雅可比矩阵 J 分析确定。根据 Friedman 理论, 系统(17)的雅可比矩阵 J 为:

$$J = \begin{bmatrix} F_x(x, y) & F_y(x, y) \\ G_x(x, y) & G_y(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_{11} & j_{12} \\ j_{21} & j_{22} \end{bmatrix}$$

其中

$$\begin{aligned} j_{11} &= (1-2x) \left[y(\pi_r^{YY^*} - \pi_r^{NY^*}) + (1-y)(\pi_r^{YN^*} - \pi_r^{NN^*}) \right], \\ j_{12} &= x(1-x) (\pi_r^{YY^*} - \pi_r^{NY^*} - \pi_r^{YN^*} + \pi_r^{NN^*}), \\ j_{21} &= y(1-y) (\pi_m^{YY^*} - \pi_m^{NY^*} - \pi_m^{YN^*} + \pi_m^{NN^*}), \\ j_{22} &= (1-2y) \left[x(\pi_m^{YY^*} - \pi_m^{YN^*}) + (1-x)(\pi_m^{NY^*} - \pi_m^{NN^*}) \right] \end{aligned}$$

通过分析矩阵 J 的行列式和迹在五个均衡点处的符号, 可以判断系统的演化稳定策略(ESS)。判断条件为将这几个均衡点分别代入到雅可比矩阵 J 中, 可以求出矩阵行列式 $\det(J)$ 和迹 $\text{tr}(J)$ 的值, 如果满足 $\det(J) = j_{11}j_{22} - j_{12}j_{21} > 0$, $\text{tr}(J) = j_{11} + j_{22} < 0$, 则该均衡点为演化稳定策略(ESS)。按照该条件, 对于 E_5 有 $\text{tr}(J) = 0$, 因此不考察该均衡点。现将均衡点 E_1 至 E_4 分别代入雅可比矩阵 J , 可得如下式子:

- 1) 在 $E_1(0, 0)$, $\det(J) = (\pi_r^{YN^*} - \pi_r^{NN^*})(\pi_m^{NY^*} - \pi_m^{NN^*})$, $\text{tr}(J) = \pi_r^{YN^*} - \pi_r^{NN^*} + \pi_m^{NY^*} - \pi_m^{NN^*}$ 。
- 2) 在 $E_2(1, 0)$, $\det(J) = (\pi_r^{NN^*} - \pi_r^{YN^*})(\pi_m^{YY^*} - \pi_m^{YN^*})$, $\text{tr}(J) = \pi_r^{NN^*} - \pi_r^{YN^*} + \pi_m^{YY^*} - \pi_m^{YN^*}$ 。
- 3) 在 $E_3(0, 1)$, $\det(J) = (\pi_r^{YY^*} - \pi_r^{NY^*})(\pi_m^{NN^*} - \pi_m^{NY^*})$, $\text{tr}(J) = \pi_r^{YY^*} - \pi_r^{NY^*} + \pi_m^{NN^*} - \pi_m^{NY^*}$ 。
- 4) 在 $E_4(1, 1)$, $\det(J) = (\pi_r^{NY^*} - \pi_r^{YY^*})(\pi_m^{YN^*} - \pi_m^{YY^*})$, $\text{tr}(J) = \pi_r^{NY^*} - \pi_r^{YY^*} + \pi_m^{YN^*} - \pi_m^{YY^*}$ 。

根据第(10)式, 我们可以确定系统的四个均衡点的 $\det(J)$ 及 $\text{tr}(J)$ 的符合稳定条件, 如表 5 所示。

Table 5. The stability of each equilibrium point

表 5. 各均衡点的稳定性

均衡点	$\det(J)$	$\text{tr}(J)$	稳定性判别
$E_1(0, 0)$	+	+	不稳定
$E_2(1, 0)$	+	-	ESS
$E_3(0, 1)$	+(或-)	-	ESS (或不稳定)
$E_4(1, 1)$	+	+	不稳定

根据表 5 可以看出, $(1, 0)$ 和 $(0, 1)$ 具有局部稳定性, 它们代表了系统演化和 ESS 中的稳定均衡。 $(1, 0)$ 表示当零售商选择定制低碳产品时, 系统演化平衡达到稳定状态。 $(0, 1)$ 表示当制造商选择投资低碳产品时, 系统演化平衡达到稳定状态。 $(0, 0)$ 和 $(1, 1)$ 是不稳定的系统演化平衡。

根据表 5 通过分析可以得到相关的结论, 即在低碳技术尚在发展阶段时, 零售商与制造商的博弈向两个方向演变: 零售商采取低碳定制策略、制造商不采取低碳投入, 即稳定点 $(1, 0)$, 或者零售商不采取低碳定制策略、制造商采取低碳投入, 即稳定点 $(0, 1)$, 就是只有一家企业承担低碳成本。当低碳技术已经发展到成熟阶段时, 零售商和制造商之间的博弈只朝一个方向发展: 零售商采用订购低碳产品策略, 而制造商不采取低碳生产策略, 因此, 作为博弈主导者, 只有零售商采取低碳行动, 即 $(1, 0)$ 是唯一的 ESS。

5. 数值分析

我们采用数值模拟进行分析供应链决策的演化, 分析供应链成员低碳意愿对演化博弈结果的影响, 同时分析参数变化对系统演化的影响。设定参数的初始值为: $a = 500$, $c = 1$, $c_1 = 50$, $s = 0.6$, $e_0 = 600$, $E = 40000$, $r = 0.05$, $h = 0.2$, $b = 0.5$, $k = 1$, 其中 h , k , r 在后续讨论中将赋予不同的值。用 Matlab 编程进行数值实验。

5.1. 供应链成员减排意愿对演化博弈结果的影响

当供应链成员减排意愿较高时, 即 x , y 的值较大时, 表示双方更倾向于采取低碳订购和生产策略。设置零售商低碳订购及制造商低碳生产概率(x , y)的初始值为(0.1, 0.1)、(0.3, 0.3)、(0.5, 0.5)、(0.7, 0.7)、(0.9, 0.9), 可以得到零售商及制造商在不同初始点到平衡点的演化轨迹, 如图 2(a)及图 2(b)所示, 其中横轴表示时间的变化, 纵轴分别表示零售商低碳订购和制造商低碳生产的概率。

由图 1 可知, 当(x , y)的初始值较小时, 零售商采用不订购策略, 而制造商采用低碳生产策略。随着 x 的值增大, 零售商低碳订购的意愿增强, 零售商由不订购策略转向低碳订购策略, 且 x 较大时稳定收敛到 1。而对于制造商, 随着 y 的值增大, 制造商低碳生产的意愿降低, 制造商由低碳生产策略转向不低碳生产策略, 且 y 较大时稳定收敛到 0。数值实验说明: 零售商和制造商之间的博弈只朝一个方向发展, 就是二者不同时采用低碳策略, 有一方采用低碳策略时, 另一方则采取相反策略。无论供应链企业初始选择低碳的比例多大, 最终系统的博弈演化结果只能为(1, 0)或(0, 1)。由此验证了博弈双方最终的稳定策略与(x , y)的初始值相关。

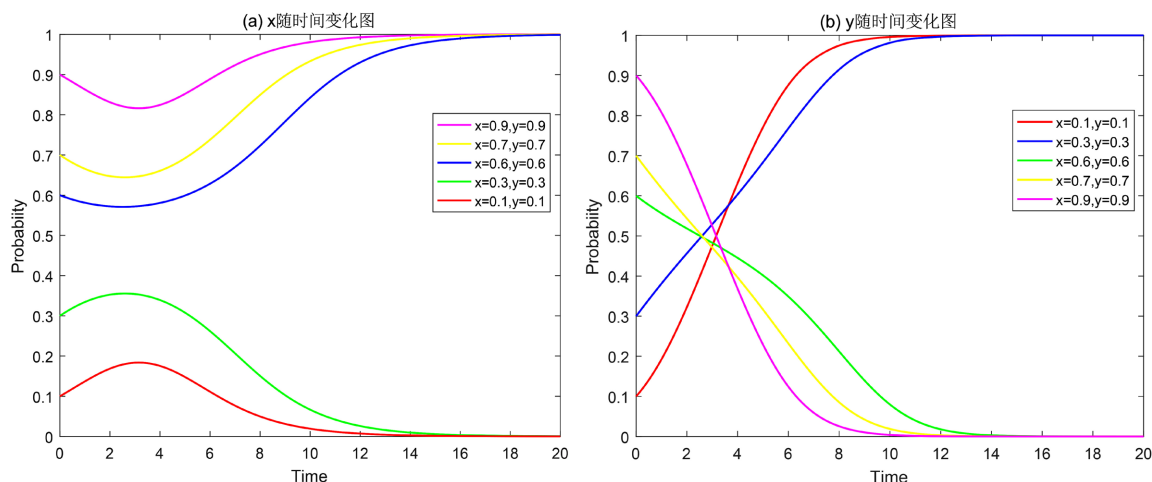


Figure 1. The influence of initial values on evolutionary game

图 1. 初始值对演化博弈的影响

5.2. 参数对演化博弈结果的影响

在上述构建的供应链演化博弈模型中, 双方需要考虑对方的博弈均衡策略。因此需要对各影响因素进行敏感性分析, 因此考虑供应链内部参数对演化博弈结果的影响。首先分析碳排放交易价 h 对系统的影响。政府对企业的碳排放实施监管, 主要是通过碳排放交易单位价格 h 和碳排放限额 E 来调整, 这种调整影响着碳成本、企业决策和企业利润。假设其他参数不变, h 分别取 0.2, 0.3, 0.35 和 0.4, 零售商及制造商在不同取值下的演化轨迹如图 2。

由图 2 可知, 系统最终收敛到(1, 0)的概率随着碳排放交易价格 h 的增加而减小, 随着 h 增加, 零售

商的意愿逐渐转向不低碳订购，而制造商的意愿逐渐转向低碳生产。由此得出以下结论：在低碳技术发展阶段，政府通过提高碳排放交易价格能够有效减少供应链企业的碳排放，同时也降低了作为领导者的零售商进行低碳定制的概率，提高了作为跟随者的制造商进行低碳生产的概率。

假设其他参数不变， k 分别取 0.5, 0.8, 1, 1.3 和 1.6，通过相图反映零售商及制造商在不同 k 取值下的演化图，如图 2(a) 所示。 r 分别取 0.02, 0.03, 0.035, 0.04 和 0.05，图 2(b) 反映零售商及制造商在不同 r 取值下的演化图，其中横轴和纵轴分别为零售商和制造商采用低碳的概率。初值 $(x, y) = (0.3, 0.3)$ 。

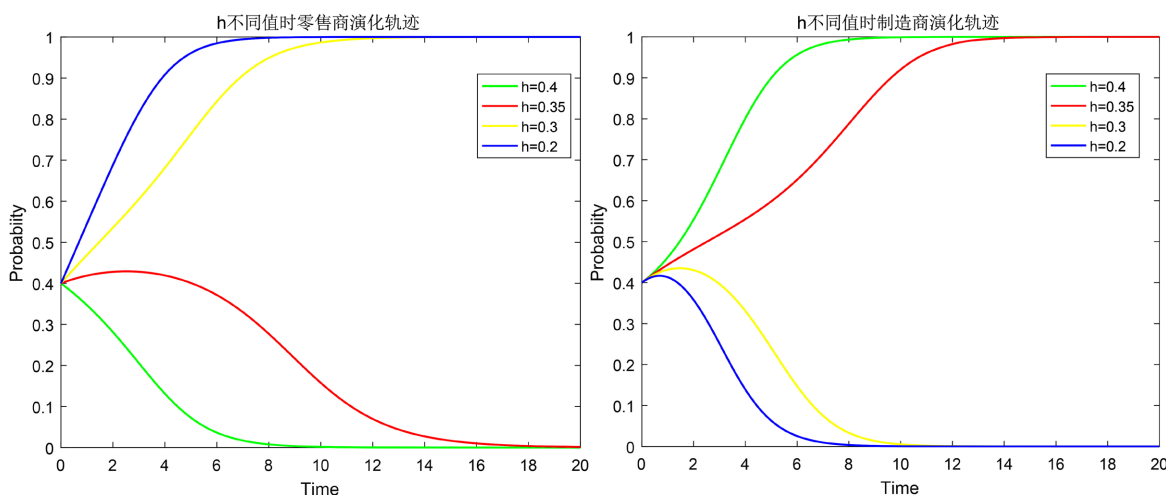


Figure 2. The influence of parameter h on evolutionary game

图 2. 参数 h 对演化博弈的影响

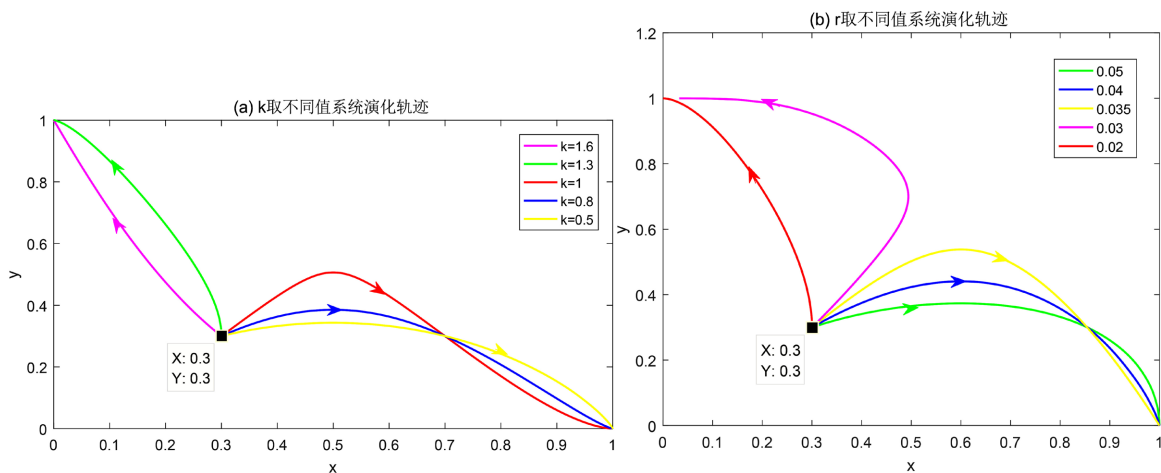


Figure 3. The influence of parameter k and r on evolutionary game

图 3. 参数 k , r 对演化博弈的影响

由图 3(a) 可知，随着消费者对低碳产品的敏感系数 k 的增加，系统从收敛到 $(1, 0)$ 逐渐转向收敛到 $(0, 1)$ ，表明零售商的意愿逐渐转向不采用低碳订购，而制造商的意愿逐渐转向采用低碳生产。由此得出以下结论：在低碳技术发展阶段，消费者对低碳产品敏感度的提升激励供应链企业减少碳排放。消费者对低碳产品敏感度越高，零售商寻求低碳定制的概率越低，制造商投入低碳生产的概率越大。消费者对价格敏感性的提高刺激了供应链企业减少碳排放。

由图 3(b) 可知，随着制造商对零售商碳融资利率 r 的增加，系统从收敛到 $(0, 1)$ 逐渐转向收敛到 $(1, 0)$ ，

表明零 r 增加时, 零售商采用低碳订购的意愿增加, 而制造商采用低碳生产的意愿减少。因此, 合适的碳融资利率可以减小供应链预期碳排放量。在合适的碳融资利率条件下, 零售商致力于低碳定制的概率较大, 制造商投资低碳生产的概率较小。商碳融资利率实行一定程度也能提高整个供应链企业的碳排放。

6. 结论与启示

本文分析了零售商和制造商构成二级供应链运营决策的博弈问题, 通过构建零售商主导的 Stackelberg 博弈, 给出了零售商及制造商的利润函数, 探讨了制造商和零售商选择低碳生产和订购低碳产品的均衡条件, 通过数值实验分析了供应链成员低碳意愿及参数变化对演化博弈结果的影响。研究发现如下。1) 零售商和制造商之间的博弈只朝一个方向发展, 就是二者不同时采用低碳策略, 有一方采用低碳策略时, 另一方则采取相反策略, 即稳定点为(1, 0)或者(0, 1)。在一定条件下(1, 0)是唯一的 ESS 点。2) 系统的演化稳定策略与初始值(x, y)的取值有关, 与碳排放交易价、消费者对低碳产品的敏感系数、碳融资利率及其他参数变化有关, 只有当参数在一定取值范围内, 制造商和零售商才会选择低碳生产策略和低碳订购策略。3) 在低碳生产策略和低碳订购策略的组合下, 零售商低碳订购水平与制造商低碳生产水平呈相反关系。因此零售商需配合制造商发展低碳经济, 双方才能获得更大的收益。

根据分析可以得到如下启示: 零售商虽然不参与生产环节的碳排放, 但利用其在销售链中的地位, 建立低碳可持续发展的理念必不可少。消费者的低碳意识决定了低碳市场的规模, 是企业实施低碳营销的动力。零售商需要利用各种方式, 刺激消费者低碳消费, 激发低碳产品需求和购买行为, 支持低碳营销。同时制造商需要分析碳价和碳交易市场的变化趋势, 适应环境需要, 并相应地调整其低碳投资, 以实现整个供应链利润最大化。

参考文献

- [1] Fan, W., Fang, Y. and Jiang, R. (2024) An Analysis of Optimal Equilibrium in the Carbon Trading Market—From a Tripartite Evolutionary Game Perspective. *International Review of Financial Analysis*, **96**, Article 103629. <https://doi.org/10.1016/j.irfa.2024.103629>
- [2] Zhang, G. and Bi, S. (2023) Inhibition or Promotion: The Impact of Carbon Emission Trading on Market Structure: Evidence from China. *Frontiers in Energy Research*, **11**, Article 1238416. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1238416>
- [3] 于晓辉, 张志强, 于亚南. 考虑消费者偏好的绿色供应链补贴绩效研究[J]. 系统科学与数学, 2022, 42(4): 818-831.
- [4] Giri, B.C., Molla, M.U. and Biswas, P. (2022) Pythagorean Fuzzy DEMATEL Method for Supplier Selection in Sustainable Supply Chain Management. *Expert Systems with Applications*, **193**, Article 116396. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116396>
- [5] Sun, H., Wan, Y., Zhang, L. and Zhou, Z. (2019) Evolutionary Game of the Green Investment in a Two-Echelon Supply Chain under a Government Subsidy Mechanism. *Journal of Cleaner Production*, **235**, 1315-1326. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.329>
- [6] 夏良杰, 白永万, 秦娟娟. 碳交易规制下信息不对称供应链的减排和低碳推广博弈研究[J]. 运筹与管理, 2018, 27(6): 37-45.
- [7] 李新军, 陈美娜, 达庆利. 碳交易视角下政府管制的汽车制造企业闭环供应链优化决策[J]. 管理评论, 2020, 32(5): 269-279.
- [8] 许海娟, 叶春明, 李芳. 政府规制下供应链企业碳减排演化博弈分析[J]. 软科学, 2025, 39(2): 107-114.
- [9] 张丹露, 李峰, 梁樑, 等. 碳交易背景下考虑消费者动态绿色感知的碳减排决策研究[J/OL]. 中国管理科学: 1-23. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.0867>, 2024-09-26.
- [10] 徐春秋, 赵道致, 原白云, 等. 上下游联合减排与低碳宣传的微分博弈模型[J]. 管理科学学报, 2016, 19(2): 53-65.
- [11] 周旻, 邓飞其. 供应链上演化博弈的复制动态及演化稳定策略[J]. 统计与决策, 2007, 23(7): 43-44.
- [12] 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.
- [13] 张金泉, 温素彬, 李慧. 低碳经济下供应链运营决策的演化博弈分析[J]. 运筹与管理, 2024, 33(5): 77-83.

-
- [14] Wang, Z., Jian, Z. and Ren, X. (2023) Pollution Prevention Strategies of SMEs in a Green Supply Chain Finance under External Government Intervention. *Environmental Science and Pollution Research*, **30**, 45195-45208. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25444-4>
- [15] Ghosh, D. and Shah, J. (2015) Supply Chain Analysis under Green Sensitive Consumer Demand and Cost Sharing Contract. *International Journal of Production Economics*, **164**, 319-329. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.11.005>
- [16] Kang, K., Zhao, Y., Zhang, J. and Qiang, C. (2019) Evolutionary Game Theoretic Analysis on Low-Carbon Strategy for Supply Chain Enterprises. *Journal of Cleaner Production*, **230**, 981-994. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.118>