

混合碳政策下制造商低碳转型的技术选择策略研究

刁心薇^{1,2}, 曾珍香^{1†}, 孙丞²

(1. 河北工业大学 经济管理学院, 天津 300401; 2. 河北工业大学 理学院, 天津 300401)

摘要: 在碳交易和碳税并行的混合碳政策下, 考虑由一个制造商和一个零售商组成的供应链系统, 通过 Stackelberg 博弈方法, 构建供应链系统分散决策模型, 确定制造商和零售商的最优减排与定价决策, 并基于此分析制造商低碳转型过程中的技术选择策略, 探讨低碳产品最优减排率与碳配额和碳税之间的关系, 为政府制订政策提供理论依据。研究表明: 制造商低碳转型过程中的技术选择主要取决于普通产品与低碳产品碳排放成本的差额, 当差额小于阈值时, 两种产品共同生产, 否则普通产品将被停产; 政府可以通过增加碳配额促进低碳产品最优减排率的提升; 而碳税对低碳产品最优减排率的影响较为复杂, 当减排相对成本较低时, 提高碳税可以促进低碳产品减排率的提升, 而当减排相对成本较高时, 碳税的提高会使减排率呈现先增加后下降的趋势。最后通过算例验证了上述结论。

关键词: 碳交易; 碳税; 供应链; 普通产品; 低碳产品; 技术选择

中图分类号: F272

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1536

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Technology Selection in Low Carbon Transition of the Manufacturer under Mixed Carbon Policy

DIAO Xin-wei^{1,2}, ZENG Zhen-xiang^{1†}, SUN Cheng²

(1. School of Economics and Management, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. School of Science, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: Under the mixed carbon policy of cap-and-trade and carbon tax, this paper considers a supply chain system composed of a manufacturer and a retailer. By Stackelberg game method, the decentralized decision model of supply chain system is constructed to determine the optimal emission reduction and pricing decisions of the manufacturer and the retailer. Based on these decisions, this paper analyzes the technology selection strategy of the manufacturer in the process of low-carbon transformation, discusses the relationship between the optimal emission reduction rate of low-carbon products, carbon quota and carbon tax, which provides theoretical basis for the government to formulate policies. The research shows that the technological choice of the manufacturer in the process of low-carbon transformation mainly depends on the difference between the carbon emission cost of ordinary products and low-carbon products. When the difference is less than the threshold value, the two products will be produced together, otherwise ordinary products will be discontinued. The government can promote optimal reduction rate of the low carbon product by adding carbon quotas. The impact of carbon tax on the optimal emission reduction rate of low-carbon products is complicated. When the relative cost of emission reduction is low, the increase of carbon tax can promote the emission reduction rate of low-carbon products, while when the relative cost of emission reduction is high, the increase of carbon tax will make the emission reduction rate increase first and then decrease. Finally, an example is given to verify the above conclusion.

Keywords: cap-and-trade; carbon tax; supply chain; ordinary products; low-carbon products; technological choice

0 引言

二氧化碳等温室气体的大量排放是导致气候问题的重要原因^[1]。为遏制气候的不断恶化, 各国政府积极采取各种碳排放政策, 其中碳税和碳交易被认为是减少碳排放的最为有效的市场激励机制, 受到学术界的广泛关注。诸多学者从制度成本、政策

可行性、减排效果、社会效率、国际合作等方面对两种政策进行比较^[2-7], 发现碳税与碳交易制度各有优劣, 互为补充, 二者并行使用、协调配合, 可以更为有效的提高减排效率^[8]。挪威是混合碳政策实施的成功典范, 其国内油气、造纸、航空等高排放部门不仅被征收碳税, 而且受碳交易规制的约束。

收稿日期: 2019-11-03; 修回日期: 2020-02-16.

基金项目: 天津市哲学社会科学规划课题重点项目(TJGL17-028).

†通讯作者. E-mail: xzeng@hebut.edu.cn

芬兰、丹麦、瑞典等北欧国家也相继推行混合碳政策，他们的实践表明，碳税与碳交易并行的混合碳政策对控制温室气体排放具有良好的促进作用。我国于2017年启动了全国碳交易系统，取代欧盟成为全球最大的碳交易市场。同时，国家发改委和财政部联合颁布了《“中国碳税税制框架设计”专题报告》，对碳税实施框架、推出时间、税率等提出了具体方案。而当前“成品油消费税”、欧美国家进口产品碳关税等已经在扮演“碳税”的角色。可以预见，碳交易与碳税并行的混合碳政策必将在碳减排实践中发挥重要作用。

混合碳政策的出现引导企业关注节能减排，并逐步引进清洁生产工艺，最终实现低碳发展的目标。然而当前由于缺乏先进的技术支持，低碳产品往往工艺复杂，碳排放节约的成本不足以弥补清洁生产投资，导致产品价格较高，难以被消费者广泛接受，特别是中低收入家庭，价格是决定其购买产品的首要因素。此前就有调查发现，在冰箱、电视、空调等家电市场中，低碳产品比普通产品贵几百元甚至上千元，较高的价格让消费者望而却步，价格便宜、性价比高的产品成为消费者的理想选择。由此可见，企业在低碳转型过程中面临着生产技术选择的策略问题。一方面，为适应经济发展趋势，提升企业竞争力，采用清洁技术生产低碳产品是必然选择。另一方面，在逐步推进清洁生产的过程中，从企业利益和市场需求出发，是否继续生产普通产品也值得探讨。因此，在混合碳政策下，企业如何选择生产技术，合理安排生产活动以获取市场竞争优势成为当前需要关注的问题之一。

目前，国内外许多学者在碳排放政策下对企业运营管理的相关问题进行探讨。Chen等针对生产具有替代关系的两产品制造企业，确定了碳限额和碳交易政策下企业的最优生产决策和期望利润^[9]。Xu等分别在碳交易和碳税政策下研究企业的产品定价问题，并讨论两种政策对总的碳排放量、企业利润及社会效益的影响^[10]。Yang等在碳交易政策下，分析制造商的渠道选择和减排决策^[11]。Chen等研究碳交易政策和回收法规下再制造企业的再生产和回收问题^[12]。国内学者熊中楷等通过构建Stackelberg博弈模型，研究碳税政策和消费者环保意识对制造商的碳排放量和供应链成员利润的影响^[13]。杨仕辉等基于碳交易政策，探讨了供应商和制造商的合作减排问题^[14]。程永伟和穆东以同时生产新能源汽车和传统燃油汽车的车辆制造企业为研究对象，在碳

交易政策下构建了联合生产决策模型，分析碳交易价格对企业产量、定价及利润的影响^[15]。

上述文献主要探讨了碳政策下企业的定价、减排等生产决策，而没有涉及其技术选择的策略问题。Krass等研究了碳税政策对企业技术的影响，发现起初碳税的增加可以引导企业采用低碳技术，而碳税的进一步提高，会使得企业技术选择发生逆转^[16]。Gong和Zhou在碳交易政策下以制造商总成本最低为目标探讨了的企业绿色技术和常规技术的选择问题，但其研究没有考虑产品的市场因素^[17]。Aflaki等建立了可再生能源技术和天然气技术之间投资权衡模型，该研究重点分析低碳技术与普通技术的投资决策，而没有涉及企业的生产决策问题^[18]。郭强等研究了碳交易政策下制造商对普通产品和低碳产品的定价和技术选择策略，但是他的研究并未考虑在生产低碳产品的同时，是否需要保留部分普通产品的情形^[19]。

通过文献梳理可以看出，学者们针对碳排放政策下企业运营管理的探讨已取得一定的进展，为后续研究奠定了基础，但仍然存在一些不足。一方面，现有文献大部分是将碳交易和碳税政策分别纳入模型，比较分析其对企业决策的影响，而忽视了现实中日趋重要的两种政策并行的情况。另一方面，已有研究多集中在碳政策下企业的定价、减排等生产决策的讨论，而针对企业低碳转型过程中技术选择策略的研究还不充分，很少有学者从利润最大化的角度研究供应链中的制造企业如何选择生产技术。因此，本文在碳税与碳交易并行的混合碳政策下，基于供应链视角，研究制造企业在低碳转型过程中的技术选择策略，并探讨低碳产品最优减排率与碳配额和碳税之间的关系，为政府制订碳排放政策提供理论依据。

1 问题描述与模型假设

本文考虑由单一制造商和单一零售商组成的供应链系统，在该系统中制造商居于主导地位。制造商分别采取清洁技术和一般技术生产同种产品。采取清洁技术生产的产品由于碳排放量较低，本文称之为“低碳产品”，而一般技术未考虑生产过程中的节能减排问题，因此其产品被称为“普通产品”。两种产品通过同一零售商进行销售。为进一步研究问题，本文做出如下假设：

假设1 政府为引导制造商降低产品碳排放，实施碳税和碳交易并行的混合碳政策。在碳交易政策中，政府分配给单位产品的免费碳配额为 d ，而

碳税政策实施时, 单位碳排放的税率为 k .

假设 2 制造商应用清洁技术生产低碳产品, 需要付出的成本为 $\frac{1}{2}m\tau^2$, 本文将其称为减排成本, 这里 m 表示碳减排成本系数, $\tau(0 \leq \tau \leq 1)$ 为与普通产品相比低碳产品的碳减排率。

假设 3 低碳产品与普通产品仅在碳排放上存在差异, 在功能与质量上则完全相同。二者具有共同的需求函数, 满足线性关系, 即 $Q = N - bp$, 其中 $N > 0$, 表示该产品的市场容量, b 表示消费者对价格的敏感系数。

假设 4 市场上的消费者分为两种类型, 一是购买低碳产品的消费者, 二是购买普通产品的消费者, 具有足够经济能力并且低碳意识较高的消费者不会购买普通产品。因此低碳产品的市场容量为 N , 而普通产品的市场容量为 $N - Q_1$ 。根据假设 3 不难确定低碳产品的市场需求量 $Q_1 = N - bp_1$, 普通产品的市场需求量 $Q_2 = N - Q_1 - bp_2 = b(p_1 - p_2)^{[20]}$ 。

制造商以 ω_1 的价格将低碳产品批发给零售商, 零售商又以价格 p_1 将其出售给消费者。普通产品的批发价、零售价和碳排放量分别为 ω_2 、 p_2 和 e 。不考虑减排成本和碳排放成本, 上述两种产品的制造成本为 c 。

因此, 在分散决策下制造商的利润函数为:

$$\begin{aligned} \Pi_M &= (\omega_1 - c)Q_1 + (\omega_2 - c)Q_2 - [(1 - \tau)e - d]Q_1P \\ &\quad - (e - d)Q_2P - k[(1 - \tau)eQ_1 + eQ_2] - \frac{1}{2}m\tau^2 \\ &= (\omega_1 - c - (1 - \tau)eP + dP - k(1 - \tau)e)Q_1 \\ &\quad + (\omega_2 - c - eP + dP - ke)Q_2 - \frac{1}{2}m\tau^2 \quad (1) \end{aligned}$$

为简化模型形式, 令

$A = eP + ke > 0$, 表示零配额下单位普通产品的碳排放成本;

$c_1 = c + (1 - \tau)eP - dP + k(1 - \tau)e = c + (1 - \tau)A - dP$, 表示单位低碳产品的生产成本 (这里不包括减排成本);

$c_2 = c + eP - dP + ke = c + A - dP$, 表示单位普通产品的生产成本。

注 1 这里 c_2 是一个常数, 而 c_1 与 τ 有关, 且 $c_1 = c_2 - A\tau$ 。

引入上述符号后, (1) 式可以简记为:

$$\Pi_M = (\omega_1 - c_1)Q_1 + (\omega_2 - c_2)Q_2 - \frac{1}{2}m\tau^2 \quad (2)$$

零售商的利润函数为:

$$\Pi_R = (p_1 - \omega_1)Q_1 + (p_2 - \omega_2)Q_2$$

本文使用的主要参数如下表所示:

符号	含义
ω_1, p_1	低碳产品的批发价格和零售价格 (决策变量)
ω_2, p_2	普通产品的批发价格和零售价格 (决策变量)
τ	低碳产品的碳减排率 (决策变量)
d	单位产品的免费碳配额
k	单位碳排放的税率
m	碳减排成本系数
e	单位普通产品的碳排放量
Q_1, Q_2	低碳产品与普通产品的市场需求量
A	零配额时单位普通产品的碳排放成本
c	单位产品的制造成本 (不包括排放成本和减排成本)
c_1	低碳产品的生产成本 (不包括减排成本),
c_2	普通产品的生产成本

2 模型求解与分析

2.1 混合碳政策下供应链的分散式决策

根据 Stackelberg 博弈, 制造商作为主导, 首先确定两种产品的批发价格和减排率, 而后零售商根据制造商的决策确定两种产品的最优零售价格, 通过逆向求导的方法, 我们得到如下结论:

定理 1 分散决策下,

(1) 零售商确定的低碳产品和普通产品的最优零售价格分别为:

$$p_1^* = \frac{2}{3}\omega_1 - \frac{1}{3}\omega_2 + \frac{2N}{3b}, \quad (3)$$

$$p_2^* = \frac{1}{3}\omega_1 + \frac{1}{3}\omega_2 + \frac{N}{3b}. \quad (4)$$

(2) 令 $B = \min \left\{ \sqrt{\frac{3m}{b}}, \frac{N}{b} - c + dP, \frac{1}{2} \left(-\frac{N}{b} - c + dP + \sqrt{\left(\frac{N}{b} - c + dP \right)^2 + \frac{24m}{b}} \right) \right\}$, 当 $A < B$ 时, 制造商存在唯一的最优决策, 使得制造商的利润达到极大值。此时低碳产品的最优碳减排率、两种产品的最优批发价格分别为:

$$\tau^* = \frac{-A^2b + A(N - bc + bdP)}{6m - 2bA^2};$$

$$\begin{cases} \omega_1^* = \frac{N}{2b} + \frac{1}{2}c_1 = \frac{N}{2b} + \frac{1}{2}c_2 - \frac{1}{2}A\tau^*, \\ \omega_2^* = \frac{N}{2b} + \frac{1}{2}c_2. \end{cases} \quad (5)$$

证明 (1) 分散决策下, 零售商的利润函数为:

$$\begin{aligned} \Pi_R &= (p_1 - \omega_1)Q_1 + (p_2 - \omega_2)Q_2 \\ &= -bp_1^2 + bp_1p_2 - bp_2^2 + (N_1 + b\omega_1 - b\omega_2)p_1 \\ &\quad + b\omega_2p_2 - \omega_1N. \end{aligned}$$

令 $\partial \Pi_R / \partial p_1 = 0$, $\partial \Pi_R / \partial p_2 = 0$, 解得:

$$p_1^* = \frac{2}{3}\omega_1 - \frac{1}{3}\omega_2 + \frac{2N}{3b},$$

$$p_2^* = \frac{1}{3}\omega_1 + \frac{1}{3}\omega_2 + \frac{N}{3b}.$$

表 1 符号说明

Π_R 对应的 Hessian 阵为:

$$H = \begin{pmatrix} -2b & b \\ b & -2b \end{pmatrix}.$$

因为 $-2b < 0$, 且 $|H| = 3b^2 > 0$, Hessian 阵为负定阵, 所以零售商存在唯一的最优零售价格 p_1^*, p_2^* .

(2) 将 p_1^*, p_2^* 分别代入 Q_1, Q_2 , 则此时两种产品的市场销量为:

$$Q_1 = -\frac{2}{3}b\omega_1 + \frac{1}{3}b\omega_2 + \frac{1}{3}N,$$

$$Q_2 = \frac{1}{3}b\omega_1 - \frac{2}{3}b\omega_2 + \frac{1}{3}N.$$

将上述 Q_1, Q_2 代入公式 (2), 得到制造商的利润函数为:

$$\Pi_M = (\omega_1 - c_1)\left(-\frac{2}{3}b\omega_1 + \frac{1}{3}b\omega_2 + \frac{1}{3}N\right) + (\omega_2 - c_2)\left(\frac{1}{3}b\omega_1 - \frac{2}{3}b\omega_2 + \frac{1}{3}N\right) - \frac{1}{2}m\tau^2.$$

令 $\partial\Pi_M/\partial\omega_1 = 0, \partial\Pi_M/\partial\omega_2 = 0, \partial\Pi_M/\partial\tau = 0$, 解得

$$\tau^* = \frac{A(N - bc_2)}{6m - 2bA^2} = \frac{-A^2b + A(N - bc + bdP)}{6m - 2bA^2},$$

$$\omega_1^* = \frac{N}{2b} + \frac{1}{2}c_1 = \frac{N}{2b} + \frac{1}{2}c_2 - \frac{1}{2}A\tau^*,$$

$$\omega_2^* = \frac{N}{2b} + \frac{1}{2}c_2.$$

此时 Π_M 对应的 Hessian 阵为

$$\begin{pmatrix} -\frac{4}{3}b & \frac{2}{3}b & -\frac{2}{3}bA \\ \frac{2}{3}b & -\frac{4}{3}b & \frac{1}{3}bA \\ -\frac{2}{3}bA & \frac{1}{3}bA & -m \end{pmatrix}.$$

当 $0 < A < \sqrt{3m/b}$ 时, 其顺序主子式分别为: $\Delta_1 = -\frac{4}{3}b < 0, \Delta_2 = \frac{4}{3}b^2 > 0, \Delta_3 = \frac{4}{9}b^2(bA^2 - 3m) < 0$, 所以 Hessian 阵为负定阵, $\omega_1^*, \omega_2^*, \tau^*$ 是制造商的唯一最优策略。

由于 $\tau^* \in [0, 1]$, 由 $\tau^* \geq 0$, 得到

$$A \leq \frac{N}{b} - c + dP.$$

由 $\tau^* \leq 1$, 推出

$$A \leq \frac{1}{2}\left(-\left(\frac{N}{b} - c + dP\right) + \sqrt{\left(\frac{N}{b} - c + dP\right)^2 + \frac{24m}{b}}\right).$$

根据 B 的定义, 显然, 当 $A < B$ 时, 可以保证 $0 \leq \tau^* \leq 1$ 且制造商存在唯一的最优决策。证明成立。□

注 2 由定理 1, 以下内容均在 $A < B$ 的情况下讨论。

推论 1 $\partial\tau^*/\partial d > 0, \partial p_1^*/\partial d < 0, \partial p_2^*/\partial d < 0$

证明

$$\frac{\partial\tau^*}{\partial d} = \frac{bAP}{6m - 2bA^2} > 0;$$

$$\frac{\partial p_1^*}{\partial d} = \frac{2}{3} \frac{\partial\omega_1^*}{\partial d} - \frac{1}{3} \frac{\partial\omega_2^*}{\partial d} = -\frac{P}{6} - \frac{A^2bP}{3(6m - 2bA^2)} < 0;$$

$$\frac{\partial p_2^*}{\partial d} = \frac{1}{3} \frac{\partial\omega_1^*}{\partial d} + \frac{1}{3} \frac{\partial\omega_2^*}{\partial d} = -\frac{P}{3} - \frac{A^2bP}{6(6m - 2bA^2)} < 0.$$

证明成立。□

推论 1 表明低碳产品的最优减排率与 d 正相关, 而产品的零售价格与 d 负相关。这是因为政府通过增加碳配额, 可以降低制造商的生产成本, 提高其利润。由于此时零售价格也适度减少, 所以产品的销量随之增加。减排成本是一次性投入, 销量的增加使得单位产品的平均减排成本降低。面对严峻的环境形势, 当制造商利润提高, 且平均减排成本降低时, 他们愿意提高自身减排努力水平, 促进减排率的进一步提升。

2.2 制造商生产模式选择

引理 1 当 $\frac{N}{b} - c_2 \leq A\tau^*$ 时, 制造商仅生产低碳产品; 当 $\frac{N}{b} - c_2 > A\tau^*$ 时, 制造商两种产品共同生产。

证明 对于制造商, 若出现低碳产品的零售价格低于普通产品, 或者普通产品的零售价格低于批发价格, 亦或普通产品的批发价格低于成本价格, 即 $p_1 \leq p_2$ 或 $p_2 \leq \omega_2$ 或 $\omega_2 \leq c_2$ 时, 制造商会放弃生产普通产品。根据定理 1, 将 (5) 式分别代入 (3)(4) 式, 我们有

$$p_1^* = \frac{1}{3}c_1 - \frac{1}{6}c_2 + \frac{5N}{6b},$$

$$p_2^* = \frac{1}{6}c_1 + \frac{1}{6}c_2 + \frac{2N}{3b}.$$

由 $p_1^* \leq p_2^*$ 及 $c_2 = c_1 + A\tau^*$, 有

$$\frac{N}{b} - c_2 \leq A\tau^*. \quad (6)$$

由 $p_2^* \leq \omega_2^*$, 有

$$\frac{N}{b} - c_2 \leq A\tau^*. \quad (7)$$

由 $\omega_2^* \leq c_2$, 有

$$\frac{N}{b} - c_2 \leq 0. \quad (8)$$

只要式 (6)(7)(8) 中有一个成立, 则普通产品将被停产。因此, 我们得到普通产品的停产条件为: $\frac{N}{b} - c_2 \leq A\tau^*$, 此时制造商仅生产低碳产品。反之, 若 $\frac{N}{b} - c_2 > A\tau^*$, 则制造商两种产品共同生产。证明成立。□

引理 1 表明, 混合碳政策下, 制造商是否生产普通产品, 主要取决于单位低碳产品与普通产品碳排放成本的差额。当差额大于阈值 $\frac{N}{b} - c_2$, 说明

此时单位碳排放的成本较高, 普通产品的成本优势不再明显, 制造商即使以获利最大的方式出售单位普通产品, 其所获收益也无法冲抵与低碳产品相比多余的碳排放的支出, 因此制造商放弃生产普通产品。而当差额小于阈值 $\frac{N}{b} - c_2$, 则表明单位碳排放成本较低, 低碳产品没有明显的碳排放优势, 普通产品市场中仍有获利的机会, 因此制造商选择继续生产普通产品。

下面我们将分两种情况, 具体讨论制造商的技术选择策略。

2.2.1 情形一

对于 $\frac{N}{b} - c + dP$, 本文将其称为“单位低碳产品的理想收益”。 $\frac{N}{b}$ 表示低碳产品的最高定价 (对应低碳产品的销量为 0), 若此时低碳产品不产生碳排放, 则单位产品的利润恰为 $\frac{N}{b} - c + dP$ (这里未考虑减排成本)。本文将 $\sqrt{\frac{3m}{b}}$ 称为“减排相对成本”。

我们首先讨论“单位低碳产品的理想收益”小于“减排相对成本”, 即 $\frac{N}{b} - c + dP < \sqrt{\frac{3m}{b}}$ 时, 制造商的技术选择策略。

当 $\frac{N}{b} - c + dP < \sqrt{\frac{3m}{b}}$ 时, 不难看出:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left\{ -\left(\frac{N}{b} - c + dP\right) + \sqrt{\left(\frac{N}{b} - c + dP\right)^2 + 24\frac{m}{b}} \right\} \\ & > \frac{1}{2} \left\{ -\left(\frac{N}{b} - c + dP\right) + \sqrt{9\left(\frac{N}{b} - c + dP\right)^2} \right\} \\ & = \frac{N}{b} - c + dP, \end{aligned}$$

故此时 $B = \frac{N}{b} - c + dP$ 。

定理 2 当 $\frac{N}{b} - c + dP < \sqrt{\frac{3m}{b}}$ 时,

若 $A < \min\{\sqrt{\frac{2m}{b}}, \frac{N}{b} - c + dP\}$, 则制造商两种产品同时生产;

若 $\min\{\sqrt{\frac{2m}{b}}, \frac{N}{b} - c + dP\} \leq A < \frac{N}{b} - c + dP$, 则制造商仅生产低碳产品。

证明 根据引理 1,

$$\frac{N}{b} - c_2 - A\tau^* = \frac{\left(\frac{N}{b} - c - A + dP\right)(6m - 3bA^2)}{(6m - 2bA^2)}. \quad (9)$$

当 $A < \min\{\sqrt{\frac{2m}{b}}, \frac{N}{b} - c + dP\}$ 时, (9) 式的分子分母均大于零, 故由引理 1 可知, 制造商两种产品同时生产。

当 $\min\{\sqrt{\frac{2m}{b}}, \frac{N}{b} - c + dP\} \leq A < \frac{N}{b} - c + dP$ 时, (9) 式的分母为正, 分子为负, 故由引理 1 可知, 普通产品将会停产, 制造商仅生产低碳产品。证明成立。□

定理 3 当 $\frac{N}{b} - c + dP < \sqrt{\frac{3m}{b}}$ 时,

若 $A \leq A_1$, 则 τ^* 关于 k 单调递增;

若 $A_1 < A < B$, 则 τ^* 关于 k 单调递减, 其中,

$$A_1 = \frac{3m - \sqrt{9m^2 - 3bm\left(\frac{N}{b} - c + dP\right)^2}}{b\left(\frac{N}{b} - c + dP\right)}.$$

证明 由于

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tau^*}{\partial k} &= \frac{\partial \tau^*}{\partial A} \frac{\partial A}{\partial k} = \\ & \frac{b^2\left(\frac{N}{b} - c + dP\right)A^2 - 6mbA + 3mb\left(\frac{N}{b} - c + dP\right)}{2(3m - bA^2)^2} e. \end{aligned} \quad (10)$$

(10) 式中的分母大于零, 分子是关于 A 的二次函数, 且 $b^2\left(\frac{N}{b} - c + dP\right) > 0$, 图像为开口向上的抛物线, 当 $\frac{N}{b} - c + dP < \sqrt{\frac{3m}{b}}$ 时, 有

$$\Delta = 12b^2m\left(3m - b\left(\frac{N}{b} - c + dP\right)^2\right) > 0,$$

所以分子关于 A 存在两个零点, 分别为

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{3m - \sqrt{9m^2 - 3bm\left(\frac{N}{b} - c + dP\right)^2}}{b\left(\frac{N}{b} - c + dP\right)}, \\ A_2 &= \frac{3m + \sqrt{9m^2 - 3bm\left(\frac{N}{b} - c + dP\right)^2}}{b\left(\frac{N}{b} - c + dP\right)}. \end{aligned}$$

容易证明此时 $A_1 < B < A_2$, 所以当 $A \leq A_1$ 时, (10) 式中分子大于等于零, 故 $\partial \tau^*/\partial k \geq 0$, 即低碳产品的最优减排率随碳税的增加而提高。而当 $A_1 < A < B$ 时, (10) 式中分子小于零, 故 $\partial \tau^*/\partial k < 0$, 即此时最优减排率随着碳税的增加而降低。证明成立。□

定理 3 表明, 在减排相对成本较高时, 碳税只有在合理范围内, 才能调动制造商的减排积极性, 如果税率设置过高, 会给制造商的生产经营增加负担, 而没有起到促进减排的作用。这是因为, 在“ $\frac{N}{b} - c + dP < \sqrt{\frac{3m}{b}}$ ”“ $A_1 < A < B$ ”下, 即减排成本和排放成本均较高时, 产品必然处于高价格、低销量的情形。由于减排成本是一次性投入, 所以此时单位产品的减排成本较高。如果政府继续提高碳税, 会导致销量进一步降低, 在这种低销量的情况下, 销量进一步减少会造成单位产品的减排成本迅速上升, 当其大于减排所带来的收益时, 制造商会选择降低低碳产品的减排率。政府在制订相关政策时, 应充分考虑这一点。

2.2.2 情形二

情形二分析“单位低碳产品的理想收益”不低于“减排相对成本”, 即 $\frac{N}{b} - c + dP \geq \sqrt{\frac{3m}{b}}$ 时, 制造商的技术选择策略。首先, 我们讨论此时定理 1

中 B 的取值情况。由于,

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left\{ -\left(\frac{N}{b} - c + dP\right) + \sqrt{\left(\frac{N}{b} - c + dP\right)^2 + 24\frac{m}{b}} \right\} \\ & \leq \frac{1}{2} \left\{ -\left(\frac{N}{b} - c + dP\right) + \sqrt{\left(\frac{N}{b} - c + dP + 2\sqrt{\frac{3m}{b}}\right)^2} \right\} \\ & = \sqrt{\frac{3m}{b}}. \end{aligned}$$

因此,

$$B = \frac{1}{2} \left\{ -\left(\frac{N}{b} - c + dP\right) + \sqrt{\left(\frac{N}{b} - c + dP\right)^2 + 24\frac{m}{b}} \right\}.$$

定理 4 当 $\frac{N}{b} - c + dP \geq \sqrt{\frac{3m}{b}}$ 时,

若 $A < \min\{\sqrt{\frac{2m}{b}}, B\}$, 则制造商两种产品同时生产;

若 $\min\{\sqrt{\frac{2m}{b}}, B\} \leq A < B$, 则制造商仅生产低碳产品。

证明 根据引理 1,

$$\frac{N}{b} - c_2 - A\tau^* = \frac{\left(\frac{N}{b} - c + dP - A\right)(6m - 3bA^2)}{(6m - 2bA^2)}.$$

当 $A < \min\{\sqrt{\frac{2m}{b}}, B\}$ 时, 上式分子分母均为正, 故 $\frac{N}{b} - c_2 - A\tau^* > 0$, 制造商两种产品同时生产。

当 $\min\{\sqrt{\frac{2m}{b}}, B\} \leq A < B$ 时, 上式分母为正, 分子为负, 故 $\frac{N}{b} - c_2 - A\tau^* \leq 0$, 制造商仅生产低碳产品。证明成立。□

定理 5 当 $\frac{N}{b} - c + dP \geq \sqrt{\frac{3m}{b}}$ 时, τ^* 关于税率 k 单调递增。

证明 由 (10) 式, 显然分母大于零, 而分子是一个关于 A 的二次函数, 当 $\frac{N}{b} - c + dP \geq \sqrt{\frac{3m}{b}}$ 时,

$$\Delta = 12b^2m(3m - b\left(\frac{N}{b} - c + dP\right)^2) \leq 0,$$

故分子恒大于等于 0, 因此有 $\frac{\partial \tau^*}{\partial k} \geq 0$, 即最优减排率随着碳税的提高而增加。证明成立。□

定理 5 说明, 当减排相对成本较低时, 提高碳税, 可以引导制造商更好的实施清洁生产, 达到降低碳排放的目标。

3 算例分析

为验证上述结论, 本文分两种情况进行算例分析。首先, 假定减排相对成本较高, 基础参数设定如下: $N = 500, c = 35, e = 0.7, m = 1800, b = 10, d = 0.5$ 。如图 1 所示, 当碳税税率 k 与碳交易价格 P 之间的关系落在区域一时, 制造商同时生产两种产品, 而当 k 与 P 之间的关系落在区域二时, 制造商仅生产低碳产品, 这与定理 2 相对应。

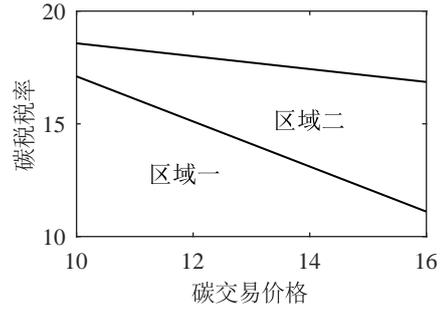


图 1 情形一. 制造商的技术选择策略

为验证最优减排率与碳配额之间的关系, 我们令 $P = 1, k = 0.4, d \in [0, 10]$, 通过图 2, 可以发现低碳产品最优减排率关于 d 单调递增, 证明推论 1 成立。然后令 $d = 0.5, k \in [0, 18]$, 得到碳税税率与最优减排率之间的关系, 如图 3 所示。可以看出在减排相对成本较高的情况下, 随着碳税的增加, 最优减排率先增加, 当税率增加到 8.93(对应 $A = 13.25$) 后, 随着碳税的继续增加, 最优减排率将下降, 证明定理 3 成立。

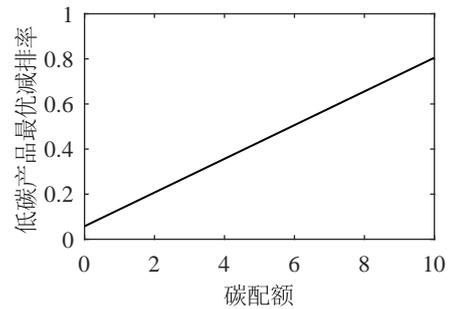


图 2 情形一. 碳配额与最优减排率的关系

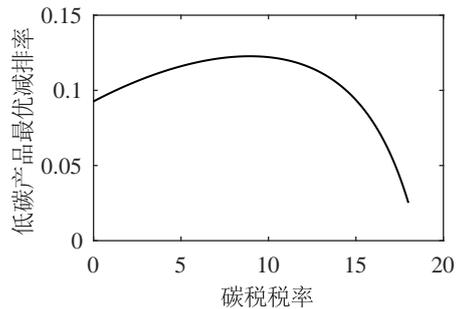


图 3 情形一. 碳税税率与最优减排率的关系

第二种情形, 减排相对成本较低, 基础参数设定如下: $N = 500, c = 35, e = 0.7, m = 900, b = 1, d = 0.5$ 。制造商的技术选择策略, 如图 4 所示, 当碳税税率 k 与碳交易价格 P 之间的关系落在区域三时, 制造商同时生产两种产品, 而当 k 与 P 之间的关系落在区域四时, 制造商仅生产低碳产品, 结论与定理 4 相对应。

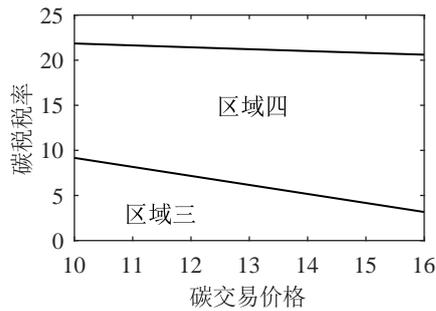


图4 情形二. 制造商技术选择策略

然后, 本文令 $P = 10$, $k = 0.5$, d 在区间 $[0, 12]$ 内变化。通过图 5, 可以发现此时低碳产品的最优减排率关于 d 单调递增, 表明情形二中推论 1 仍然成立。令 $d = 0.5$, $k \in [0, 11.5]$, 通过图 6 可以看出, 此时低碳产品最优减排率关于碳税单调递增, 证明定理 5 成立。可见, 当减排成本相对较低时, 政府可通过增加碳税实现减少碳排放的目标。

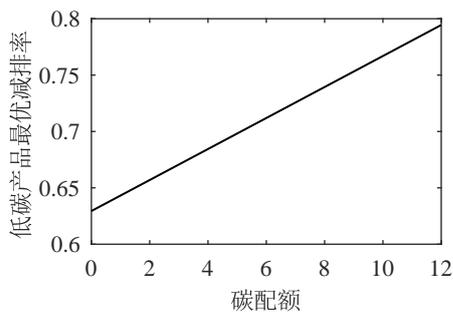


图5 情形二. 碳配额与最优减排率的关系

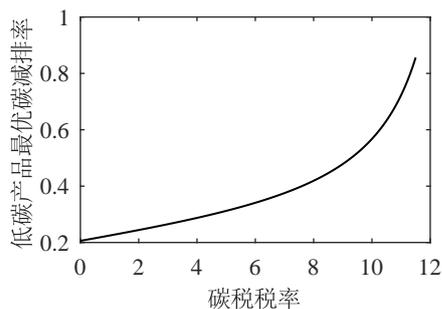


图6 情形二. 碳税税率与最优减排率的关系

4 结论

本文在碳税与碳交易并存的混合碳政策下, 基于供应链视角, 研究制造商在低碳转型过程中的技术选择策略, 并探讨低碳产品最优减排率与碳配额和碳税之间的关系。研究表明: (1) 制造商的技术选择主要取决于单位低碳产品与普通产品碳排放成本的差额, 当差额大于阈值时, 表明碳排放成本较高, 普通产品将要停产, 而差额小于阈值, 则两种产品同时生产; (2) 政府可以通过增加碳配额提升低

碳产品的最优减排率; (3) 严苛的碳税政策不一定能够有效的减少碳排放, 当减排相对成本较高时, 随着碳税的增加, 低碳产品的最优减排率先提高后降低; 而当减排相对成本较低时, 提高碳税可以促进减排率的提升。

本文的研究仍存在一些缺陷, 后续可以继续扩展研究。例如, 将消费者偏好和社会比较纳入决策模型, 研究其对技术选择策略的影响。此外, 本文是在需求确定的情形下展开的, 后续可以讨论需求波动时, 制造商的技术选择决策问题。

参考文献 (References)

- [1] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis: working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 159-254.
- [2] Svante M. Optimal mix of emissions taxes and cap-and-trade[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2008, 56: 131-140.
- [3] Dipeso J. Carbon tax versus cap-and-trade[J]. Environmental Quality Management, 2009, 18(4): 95-100.
- [4] 石敏俊, 袁永娜, 周晟吕, 等. 碳减排政策: 碳税、碳交易还是两者兼之?[J]. 管理科学学报, 2013, 16(9): 9-19.
(Shi M J, Yuan Y N, Zhou S L, et al. Carbon tax, cap-and-trade or mixed policy: Which is better for carbon mitigation?[J]. Journal of Management Sciences in China, 2013, 16(9): 9-19.)
- [5] 曾繁华, 陈建军, 吴立军. 碳税与排放权交易制度比较及碳税实施问题研究 [J]. 财政研究, 2014, (5): 33-36.
(Zeng F H, Chen J J, Wu L J. Study on the comparison of carbon tax and carbon trading, and the implementation of carbon tax[J]. Public Finance Research, 2014, (5): 33-36.)
- [6] 魏庆坡. 碳交易与碳税兼容性分析——兼论中国减排路径选择 [J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(5): 35-43.
(Wei Q P. Study on the pathway of China to mitigate emissions based on the compatibility of carbon tax and ETS[J]. China Population Resources and Environment, 2015, 25(5): 35-43.)
- [7] 张博, 刘庆, 潘浩然. 混合碳减排制度设计研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(12): 39-45.
(Zhang B, Liu Q, Pan H R. A study on the design of a hybrid policy for carbon abatement[J]. China Population Resources and Environment, 2016, 26(12): 39-45.)
- [8] 中国财政科学研究院课题组. 在积极推进碳交易的同时择机开征碳税 [J]. 财政研究, 2018, 4: 2-19.
(CAFS Research Group. Selection appropriate opportunities to levy carbon tax while actively promoting carbon emissions trading[J]. Public Finance

- Research, 2018, 4: 2-19.)
- [9] Chen X, Chan C K, Lee Y C E. Responsible production policies with substitution and carbon emissions trading[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 134: 642-651.
- [10] Xu X Y, Xu X P, He P. Joint production and pricing decisions for multiple products with cap-and-trade and carbon tax regulations[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112(20): 4093-4106.
- [11] Yang L, Ji J N, Wang M Z, et al. The manufacturer's joint decisions of channel selections and carbon emission reductions under the cap-and-trade regulation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 193: 506-523.
- [12] Chen Y Y, Li B Y, Bai Q G, et al. Decision-making and environmental implications under cap-and-trade and take-back regulations[J]. *International Journal of Production Economics*, 2015, 162: 160-173.
- [13] 熊中楷, 张盼, 郭年. 供应链中碳税和消费者环保意识对碳排放影响 [J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(9): 2245-2252.
(Xiong Z K, Zhang P, Guo N. Impact of carbon tax and consumers' environmental awareness on carbon emissions in supply chains[J]. *Systems Engineering-Theory&Practice*, 2014, 34(9): 2245-2252.)
- [14] 杨仕辉, 王平. 基于碳配额政策的两级低碳供应链博弈与优化 [J]. *控制与决策*, 2016, 31(5): 924-928.
(Yang S H, Wang P. Game and optimization of a two-level low-carbon supply chain under the carbon quota policy[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(5): 924-928.)
- [15] 程永伟, 穆东. 应对碳价格波动的新能源汽车联合生产策略. *系统工程学报*, 2018, 33(6): 780-792.
(Cheng Y W, Mu D. Joint production strategies of new energy vehicle with carbon price disruption[J]. *Journal of systems engineering*, 2018, 33(6): 780-792.)
- [16] Krass D, Nedorezov T, Ovchinnikov A. Environmental taxes and the choice of green technology[J]. *Production and Operations Management*, 2013, 22(5): 1035-1055.
- [17] Gong X T, Zhou S X. Optimal production planning with emissions trading[J]. *Operations Research*, 2013, 61(4): 908-924.
- [18] Aflaki S, Netessine S. Strategic investment in renewable energy sources: the effect of supply intermittency[J]. *Manufacturing&Service Operations Management*, 2017, 19(3): 489-507.
- [19] 郭强, 柳娟, 应松宝, 等. 碳配额交易下制造商低碳技术选择策略研究 [J]. *工业工程与管理*, 2018, 23(4): 45-52.
(Guo Q, Liu J, Ying S B, et al. Low-carbon technology choice on the manufacture under cap-and-trade policy[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2018, 23(4): 45-52.)
- [20] 徐春秋, 赵道致, 原白云. 政府补贴政策下产品差别定价与供应链协调机制 [J]. *系统工程*, 2014, 32(3): 78-86.
(Xu C Q, Zhao D Z, Yuan B Y. Products differential pricing and supply chain coordination mechanism under the government subsidy policy[J]. *Systems Engineering*, 2014, 32(3): 78-86.)

作者简介

刁心薇 (1979—), 女, 讲师, 博士生, 从事供应链运营管理的研究, E-mail: dxw_79@163.com;

曾珍香 (1965—), 女, 教授, 博士生导师, 从事供应链管理、复杂系统与管理决策等研究, E-mail: xzeng@hebut.edu.cn.

孙丞 (1977—), 男, 讲师, 博士, 从事供应链运营管理的研究, E-mail: sunchtz@163.com.