

·管理科学与工程·

低碳经济下碳税对供应链减排及合作策略的影响分析

□姜 跃¹ 韩水华² 赵 洋³[1. 福建工程学院 福州 350118; 2. 厦门大学 厦门 361005; 3. 山东工商学院
烟台 264005]

[摘要] 在低碳经济下,以由低碳制造商、普通制造商和零售商组成的供应链作为研究对象,考虑了无碳税和有碳税两种情形,分析了分散决策和集中决策两种情况下供应链减排决策及合作策略,研究发现,在分散决策的情况下,碳税税率应该设置在一个合理分范围内,这样才能够充分调动低碳制造商减排的积极性,碳税如果设置过高,增加了企业的经营负担,并没有起到减排的作用,但是在集中决策下,碳税越高越能促进企业减排;同时还发现集中决策能够有效地提高供应链利润,因此需要设计一定约束机制来保证供应链各企业能够按照集中决策的方式来进行决策,并分析得出了合作机制。最后使用算例分析的方法分析了相关参数对供应链最优决策的影响。

[关键词] 碳税; 减排合作; 斯坦伯格博弈; 减排成本**[中图分类号]** F124.5; F224**[文献标识码]** A**[DOI]** 10.14071/j.1008-8105(2018)-3012

Analysis on the Impact of Carbon Tax on Supply Chain Reduction and Cooperation Strategy in the Low-carbon Economy

JIANG Yue¹ HAN Shui-hua² ZHAO Yang³

(1. Fujian University of Technology Fuzhou 350118 China;

2. Xiamen University Xiamen 361005 China;

3. Shandong Technology and Business University Yantai 264005 China)

Abstract In the context of low-carbon economics, considering two conditions of whether carbon tax is imposed or not, a two-stage dynamic game model is discussed in a supply chain consisting of a manufacturer of low carbon product, a manufacturer of normal product and a retailer under carbon tax system. The supply chain reduction and cooperation strategy is analyzed under the condition of integrated manner and decentralized manner. The results show that the carbon tax rate should be set within a reasonable range in decentralized manner, if the carbon tax is set too high, it only increases the operating burden of the company, but does not play a role in reducing carbon emissions. But under integrated manner, the higher the carbon tax is, the more it can promote corporation to reduce carbon emissions. At the same time, we also find that integrated manner can effectively improve the profit of the supply chain, therefore, it is necessary to design a certain constraint mechanism to ensure

[收稿日期] 2018-05-11**[基金项目]** 福建省社会科学规划项目“碳税规制下供应链减排合作策略研究”(FJ2017C014); 福建省自然科学基金项目“碳排约束下的可持续产品设计及其技术选择策略研究”(2018J05117); 山东省自然科学基金青年项目“基于产品多样性的战略顾客选择购买渠道研究”(ZR2017BG017)。**[作者简介]** 姜跃(1985-)女,博士,福建工程学院管理学院讲师;韩水华(1970-)男,厦门大学管理学院博士生导师;赵洋(1986-)女,博士,山东工商学院管理学院讲师。

that the enterprises in the supply chain can make decisions according to integrated manner. At last, a numerical method is used to analyze the impact of related parameters on enterprises' optimal decision.

Key words carbon tax; reduction cooperation; Stackelberg game; reduction cost

引言

21世纪以来,全球气候变暖问题已经成为全球十大环境问题之首,逐渐受到国际社会的关注。全球平均气温上升,全球气候变暖已成为一个不争的事实^[1]。各国相继出台一系列政策来降低温室气体排放,其中碳税政策作为降低碳排放的有效手段之一,使用最为广泛^[2]。Jensen和Bruvoll分析了不同碳税税率对降低碳排放的影响,结果表明碳税在降低碳排放方面作用明显^[3~4]。碳税主要有两方面效果,一方面碳税可以促进能源产品的转换,改变能源生产和消费结构,鼓励能源节约并提高效率;另一方面,碳税的税收循环可以影响投资和消费行为,如可以通过对环保项目或者节能减排技术创新进行补贴,激励可再生能源的发展^[5~6]。20世纪90年代初期碳税才在欧洲各国家开始逐步兴起,时间比较短,其中瑞典、丹麦、挪威、芬兰和荷兰是世界上最早开始推行碳税的国家,各国根据自己的经济和政治情况制定了相应的碳税政策^[7]。

政府已经出台或即将出台的碳税政策将使供应链企业面临新的运作环境。面对政府的碳税政策,以及消费者不断增加的低碳产品需求,企业需要更加关注产品的生产过程以及产品的碳排放情况,因此低碳产品应运而生。与普通产品相比,低碳产品在其生产过程通过改进工艺降低了碳排放,但是低碳产品由于改进了生产工艺,其生产成本必然上升,因此价格普遍偏高,进而影响了市场的接受度。而普通产品由于不需要进行减排,因此与低碳产品相比具有一定的价格优势,但是随着碳税的开征和碳税税率的不断上升,普通产品的这一成本优势将会被逐步削弱。在碳税规制下,低碳产品和普通产品有其各自的优势和不足,因此为其定价及研究供应商上下游企业的减排合作就变得十分重要。

以往的研究主要关注产品定价和供应链减排,但是关于碳税对供应链减排及其合作策略的影响方面的研究还比较少。在产品定价方面,Ferguson和Toktay把消费者分为不同的群体,分析不同消费群体对新产品和普通产品定价的影响,在此基础上研究了第三方参与对新产品和普通产品定价策略的影响^[8]。公彦德把由制造商和零售商组成的两级供

应链作为研究对象,研究了合作博弈和非合作博弈两种情况下的产品定价策略,结果显示联合定价为最优选择^[9]。马秋卓研究了制造商作为碳购买方和碳销售方两种情况下的产品定价模型,研究发现随着碳交易量和碳交易风险的增加,产品价格随之不断上升^[10]。

在供应链减排方面,Benjaafar在研究供应链系统时考虑了碳排放因素,得出了诸多有意义的管理启示^[11]。Zhao Rui使用博弈论的方法研究企业自愿减排和非自愿减排两种情况下企业的最优减排决策^[12]。姜跃研究供应商参与和零售商成本分担对企业减排决策的影响是如何随着碳税的变化而变化的,研究结果碳税不是越高越好,碳税在一定合理范围内才能够促进企业减排^[13~14]。赵道致等把供应商和制造商组成的两级供应链作为研究对象,通过建立微分博弈模型分析制造商和供应商的减排决策,同时研究得出碳排放量是如何随着时间的变化而变化的^[15]。

综上所述,虽然上述研究对碳税、产品定价和供应链减排都有一定贡献,但是仍然存在一些不足,主要包括:(1)已有文献主要分析碳税的减排效果以及碳税对经济运行的影响,很少有文献研究碳税对供应链的减排与合作策略的影响;(2)已有研究没有分析如何根据消费者对价格的敏感系数、碳税以及减排难度系数来确定产品价格以及减排量,同时分析上述参数变化对供应链企业最优决策的影响;(3)现有文献没有对碳税规制下供应链上下游企业的合作策略进行分析。

2013年3月国家发展改革委发布了《低碳产品认证管理暂行办法》,明确了我国低碳产品的认证体系的主要内容。在本文中我们把通过国家《低碳产品认证管理暂行办法》的产品称作为低碳产品,把生产低碳产品的企业称作为低碳制造商;把未通过国家《低碳产品认证管理暂行办法》的产品称作为普通产品,把生产普通产品的企业称作为普通制造商。本文通过建立低碳产品制造商、普通产品制造商和零售商的博弈模型,主要解决以下几个问题:(1)低碳制造商、普通制造商和零售商在碳税政策约束下,如何根据碳税税率的变化来调整低碳产品价格、普通产品价格以及最优减排量;(2)对比分析低碳制造商、普通制造商和零售商

在分散决策和集中决策两种情况下最优决策的变化, 确定最佳的决策方式; (3) 为了实现供应链的整体最优, 低碳制造商、普通制造商要如何设计合作策略来保证零售商愿意参与减排合作。

一、问题描述与模型假设

本文以低碳制造商、普通制造商和零售商组成的供应链作为研究对象, 其中一个制造商生产普通产品, 称作普通制造商, 记为H; 另一个制造商生产低碳产品, 称作低碳制造商, 记为L, 普通制造商和低碳制造商都通过同一个零售商来销售产品。同时政府为了降低碳排放, 刺激企业生产低碳产品会根据产品的碳排放情况来收取碳税, 如图1所示。

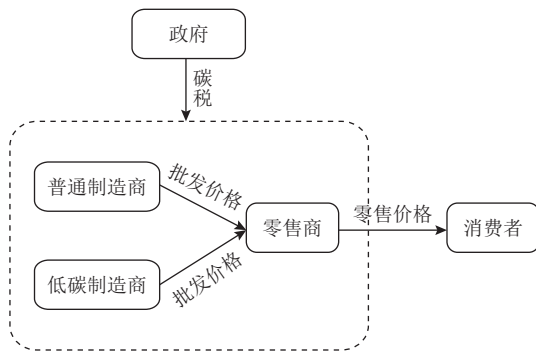


图 1 供应链结构图

为了研究需要, 简化模型, 本文做出如下假设:

- (1) 普通产品具有和低碳产品相同的功能, 两者只是在碳排放量上有所差别;
- (2) 政府根据产品的碳排放量来征收碳税, 不考虑碳税减免等情况;
- (3) 市场上的消费者有普通消费者和低碳消费者两种类型, 同时低碳意识较高并且具有一定经济能力的消费者不会购买普通产品;
- (4) 供应链的博弈中, 制造商是领导者, 零售商是跟随者。

定义相关符号含义如下: w_L 和 w_H 分别表示低碳产品和普通产品的批发价格; p_L 和 p_H 分别表示低碳产品和普通产品的零售价格; c_L 和 c_H 分别表示低碳产品和普通产品的生产成本, $c_L > c_H$; Q_L 和 Q_H 分别表示低碳产品和普通产品的市场需求量; e 表示普通产品的碳排放量; x 表示低碳产品的减排量; $e - x$ 表示低碳的产品的碳排放量; t 表示碳税; Π 表示利润。制造商刚开始减排是相对比较容易的, 随着减排量的不断提升, 制造商的减排难度越来越大, 制造商减资成本函数 $c(x)$ 满足

$c'(x) > 0$ 和 $c''(x) > 0$, 用 k 表示减排难度系数, 则制造商的减成本为 $\frac{1}{2} kx^2$ [16-17]。

在市场需求方面, 低碳产品由于其在生产过程中降低了碳排放量, 这就导致有较高低碳意识且具有一定经济能力的消费者会购买低碳产品, 但这并没有改变产品的市场需求特性, 只是低碳产品定价越低, 购买低碳产品的消费者就会越多, 购买普通产品的消费者就会越少。当低碳产品的价格和普通产品的价格相等时, 购买普通产品的消费者就会转向购买低碳产品, 普通产品的市场需求量等于0, 此时普通产品退出市场。根据这一特性, 低碳产品和普通产品的市场需求量分别为 $Q_L = a - bp_L$ 和 $Q_H = b(p_L - p_H)$ 。下标L表示低碳制造商, H表示普通制造商, R表示零售商, 上标ND表示无碳税下的分散决策, NC表示无碳税下的集中决策, YD表示有碳税下的分散决策, YC表示有碳税下的集中决策, *表示最优解。

二、无碳税时模型分析

(一) 分散决策下模型分析

在分散决策下, 制造商和零售商代表了不同的利益主体, 都是以自己的利润最大化作为决策目标, 而并不考虑供应链的整体利益, 低碳制造商、普通制造商和零售商的目标函数分别为:

$$\Pi_L^{ND} = (a - bp_L)(w_L - c_L) - \frac{1}{2} kx^2 \quad (1)$$

$$\Pi_H^{ND} = b(p_L - p_H)(w_H - c_H) \quad (2)$$

$$\Pi_R^{ND} = (p_L - w_L)(a - bp_L) + b(p_L - p_H)(p_H - w_H) \quad (3)$$

Stackelberg博弈指出厂商之间存在着行动次序的区别, 最优决策的决定依据以下顺序: 领导性厂商决定产品的价格和产量等决策变量, 然后跟随者厂商可以观察到领导性厂商的决策, 然后根据领导性厂商的决策等来确定他自己的决策。而本文研究的供应链中的制造商和零售商在供应链中的地位也不相同, 其减排决策中也同样存在着行动次序, 存在领导性企业和跟随性企业, 因此本文选择了Stackelberg博弈来分析其减排决策。低碳制造商和普通制造商在第一阶段先分别确定低碳产品、普通产品的批发价格和低碳产品减排量, 零售商在第二阶段确定两种产品的零售价格。根据逆向归纳的求解方法, 先求出两种产品的零售价格, 再求出两种产品的批发价格及低碳产品的减排量。

由于海塞矩阵

$$H^{ND} = \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 \Pi_R^{ND}}{\partial p_L^2} & \frac{\partial^2 \Pi_R^{ND}}{\partial p_L \partial p_H} \\ \frac{\partial^2 \Pi_R^{ND}}{\partial p_H \partial p_L} & \frac{\partial^2 \Pi_R^{ND}}{\partial p_H^2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -2b & b \\ -b & -2b \end{vmatrix},$$

其一阶顺序主子式等于 $-2b < 0$, 二阶顺序主子式等于 $3b^2 < 0$, 则海塞矩阵为负定, 则零售商利润按函数 Π_R^{ND} 是关于 p_L 和 p_H 的凹函数, 存在最优值, 令 $\frac{\partial \Pi_R^{ND}}{\partial p_L} = 0, \frac{\partial \Pi_R^{ND}}{\partial p_H} = 0$, 可以得到以下命题:

命题1: 在无碳税的情况下的Stackelberg博弈中, 零售商的最优价格策略为:

$$p_L^{ND} = \frac{2a + 2bw_L - bw_H}{3b}, p_H^{ND} = \frac{a + bw_L + bw_H}{3b}$$

低碳制造商根据低碳产品零售价格来确定低碳产品的批发价格以及减排量, 普通制造商根据普通产品的零售价格来确定普通产品的批发价格。分别令 $\frac{\partial \Pi_H^{ND}}{\partial w_H} = 0, \frac{\partial \Pi_L^{ND}}{\partial w_L} = 0, \frac{\partial \Pi_L^{ND}}{\partial x} = 0$ 可以求得均衡结果见命题2。

命题2: 在无碳税的情况下的Stackelberg博弈中, 可以得到如下均衡解: (1) 低碳产品和普通产品的最优批发价格, 以及低碳产品的最优减排量分别为

$$w_L^{ND*} = \frac{5a + 2bc_H + 8bc_L}{15b}, w_H^{ND*} = \frac{5a + 8bc_H + 2bc_L}{15b},$$

$$x^{ND*} = 0; (2) 低碳产品和普通产品的零售价格分别为 $p_L^{ND*} = \frac{35a - 4bc_H + 14bc_L}{45b}, p_H^{ND*} = \frac{5a + 2bc_H + 2bc_L}{9b};$$$

$$(3) 低碳产品和普通产品的市场需求量分别为 $Q_L^{ND*} = \frac{2(5a + 2bc_H - 7bc_L)}{45}, Q_H^{ND*} = \frac{2(5a - 7bc_H + 2bc_L)}{45};$$$

$$(4) 低碳产品和普通产品制造商的最优利润分别为 $\Pi_L^{ND*} = \frac{2(5a + 2bc_H - 7bc_L)^2}{675b}, \Pi_H^{ND*} = \frac{2(5a - 7bc_H + 2bc_L)^2}{675b};$$$

零售商利润的最优利润等于 $\Pi_R^{ND*} =$

$$\frac{4 [25a^2 + 13b^2c_H^2 - 25abc_L + 13b^2c_L^2 - bc_H(25a + bc_L)]}{675b},$$

$$\text{供应链的总体利润为 } \Pi^{ND*} = \frac{4 [100a^2 + 79b^2c_H^2 - 100abc_L + 79b^2c_L^2 - 2bc_H(50a + 29bc_L)]}{675b}$$

由命题1和命题2可以得到如下结论:

结论1: 低碳产品的零售价格与低碳产品的批发价格正相关, 与普通产品的批发价格负相关; 普通产品的零售价格与低碳产品的批发价格和普通产品的批发价格正相关。这主要是因为零售商销售低碳产品的成本随着低碳产品批发价格的上升而不断增加, 因此零售商就需要通过提高低碳产品零售价格的方法来获取最高利润; 当普通产品批发价格上升时, 普通产品的零售价格也将随之上升, 此时降

低碳产品零售价格能够获得更多竞争优势。

结论2: 在无碳税的情况下, 低碳产品制造商的最优减排量为0, 这主要是因为减排会增加企业的成本, 企业减排的积极性较低, 因此需要政府制定相应的政策来刺激企业减排。

结论3: 低碳制造商和普通制造商的产品市场占有率主要取决于产品的生产成本, 当低碳制造商和普通制造商生产成本相同时, 即 $c_L = c_H$, 此时低碳制造商和普通制造商平分市场。

(二) 集中决策下模型分析

在集中决策下, 低碳制造商、普通制造商和零售商是一个利益整体, 通过设定合理的低碳产品价格、普通产品价格, 以及减排量可以实现供应链整体利润最大化的目标, 即求如下最优化问题:

$$AX\Pi^{NC} = (a - bp_L)(p_L - c_L) + b(p_L - p_H)(p_H - c_H) - \frac{1}{2}kx^2 \quad (4)$$

上式第一项表示低碳产品的销售收入, 第二项表示普通产品的销售收入, 第三项表示低碳产品的减排成本。分别令 $\frac{\partial \Pi^{NC}}{\partial p_L} = 0, \frac{\partial \Pi^{NC}}{\partial p_H} = 0, \frac{\partial \Pi^{NC}}{\partial x} = 0$, 可以求得集中决策下的均衡结果见命题3。

命题3: 在无碳税的情况下的集中决策时, 低碳产品的零售价格为 $p_L^{NC*} = \frac{2a - bc_H + 2bc_L}{3b}$, 普通产品的零售价格为 $p_H^{NC*} = \frac{a + bc_H + bc_L}{3b}$, 低碳产品市场需求量为 $Q_L^{NC*} = \frac{a + bc_H - 2bc_L}{3}$, 普通产品市场需求量为 $Q_H^{NC*} = \frac{a - 2bc_H + bc_L}{3}$, 低碳产品的减排量为 $x^{NC*} = 0$, 供应链总利润为 $\Pi^{NC*} = \frac{a^2 + b^2c_H^2 - abc_L + b^2c_L^2 - bc_H(a + bc_L)}{3b}$

分析分散决策和集中决策时的低碳产品和普通产品零售价格可以发现 $\frac{\partial p_L^{ND*}}{\partial c_H} < 0, \frac{\partial p_L^{ND*}}{\partial c_L} > 0, \frac{\partial p_H^{ND*}}{\partial c_H} > 0, \frac{\partial p_H^{ND*}}{\partial c_L} > 0, \frac{\partial p_L^{YD*}}{\partial c_H} < 0, \frac{\partial p_L^{YD*}}{\partial c_L} > 0, \frac{\partial p_H^{YD*}}{\partial c_H} > 0, \frac{\partial p_H^{YD*}}{\partial c_L} > 0$, 由此可得结论4。

结论4: 分散决策和集中决策情况下, 低碳产品的零售价格与普通产品的生产成本负相关, 与低碳产品的成本正相关; 普通产品的零售价格与低碳产品的生产成本和普通产品的生产成本正相关。

(三) 无碳税时供应链减排合作分析

比较集中决策和分散决策两种情况下供应链的利润, 可以得到以下命题。

命题4: 供应链系统在集中决策时的利润大于分散决策时的利润

证明: 公式 (4) 所表示的供应链总利润分别对 p_L 和 p_H 求二阶偏导数

$$\frac{\partial^2 \Pi^{NC}}{\partial^2 p_L} = -2b, \quad \frac{\partial^2 \Pi^{NC}}{\partial^2 p_H} = -2b, \quad \frac{\partial^2 \Pi^{NC}}{\partial p_L \partial p_H} = b$$

因此可得海塞矩阵 $H = \begin{vmatrix} -2b & b \\ b & -2b \end{vmatrix} = 3b^2 > 0$, 且其一阶顺序主子式等于 $-2b < 0$, 则海塞矩阵为负定, 公式 (4) 存在最优值, 即公式 (4) 在点 $(\frac{2a - bc_H + 2bc_L}{3b}, \frac{a + bc_H + bc_L}{3b})$ 达到最优, 命题4得证。

$$\begin{aligned} \underline{w}_L^{NC} &= \frac{\Pi_L^{ND*} + \frac{1}{2} kx^2}{Q_L^{NC*}} + c_L, \quad \overline{w}_L^{NC} = p_L^{NC*} - \frac{\Pi_R^{ND*} - (p_H^{NC*} - w_H^{NC})Q_H^{NC*}}{Q_L^{NC*}} \\ \underline{w}_H^{NC} &= \frac{\Pi_H^{ND*}}{Q_H^{NC*}} + c_H, \quad \overline{w}_H^{NC} = p_H^{NC*} - \frac{\Pi_R^{ND*} - (p_L^{NC*} - w_L^{NC})Q_L^{NC*}}{Q_H^{NC*}} \end{aligned}$$

证明: 集中决策下没有达成谈判契约时低碳产品的批发价格为 w_L^{NC} , 普通产品的批发价格为 w_H^{NC} , 则低碳制造商、普通制造商和零售的利润分别为:

$$\Pi_L^{NC*} = Q_L^{NC*}(w_L^{NC} - c_L) - \frac{1}{2} kx^2 \quad (5)$$

$$\Pi_H^{NC*} = Q_H^{NC*}(w_H^{NC} - c_H) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \underline{w}_L^{NC} &= \frac{\Pi_L^{ND*} + \frac{1}{2} kx^2}{Q_L^{NC*}} + c_L, \quad \overline{w}_L^{NC} = p_L^{NC*} - \frac{\Pi_R^{ND*} - (p_H^{NC*} - w_H^{NC})Q_H^{NC*}}{Q_L^{NC*}} \\ \underline{w}_H^{NC} &= \frac{\Pi_H^{ND*}}{Q_H^{NC*}} + c_H, \quad \overline{w}_H^{NC} = p_H^{NC*} - \frac{\Pi_R^{ND*} - (p_L^{NC*} - w_L^{NC})Q_L^{NC*}}{Q_H^{NC*}} \end{aligned}$$

\underline{w}_L^{NC} 和 \overline{w}_L^{NC} 分别表示低碳制造商和零售商能够接受的低碳产品的最低和最高批发价格, \underline{w}_H^{NC} 和 \overline{w}_H^{NC} 分别表示普通制造商和零售商能够接受的普通产品的最低和最高批发价格, w_L^{NC} 和 w_H^{NC} 分别表示达成协议的低碳产品和普通产品价格, 其具体价格主要取决于双方的谈判能力。

三、有碳税时的模型分析

(一) 分散决策下模型分析

在分散决策下, 为了获取最高的利润, 制造商和零售商独自决策。低碳制造商进行减排, 减排水平为 x , 此时政府根据制造商的碳排放量收取碳税, 假设碳税为 t 。在此决策过程中, 制造商是领导者、零售商为跟随者, 根据逆向归纳的求解方

由命题4可以发现, 供应链在集中决策时的总利润大于分散决策时的总利润, 可见供应链的最佳决策方式是集中决策, 在集中决策下, 供应链是一个完美的整体, 此时可以做出全局最优的决策, 并且可以为供应链在分散决策下各主体的合作策略提供理论依据。

命题5: 若低碳制造商、普通制造商和零售商能够进行谈判, 达成契约, 使得低碳制造商、普通制造商和零售商都能够按集中决策情形下进行决策, 则该契约必须满足以下约束条件:

$$\underline{w}_L^{NC} \leq w_L^{NC} \leq \overline{w}_L^{NC}, \quad \underline{w}_H^{NC} \leq w_H^{NC} \leq \overline{w}_H^{NC}。其中:$$

$$\Pi_R^{NC*} = (p_L^{NC*} - w_L^{NC})Q_L^{NC*} + (p_H^{NC*} - w_H^{NC})Q_H^{NC*} \quad (7)$$

在集中决策下低碳制造商、普通制造商和零售商的利润大于等于其在分散决策下的利润是能达成谈判的必要条件, 即 $\Pi_L^{NC*} \geq \Pi_L^{ND*}$, $\Pi_H^{NC*} \geq \Pi_H^{ND*}$, $\Pi_R^{NC*} \geq \Pi_R^{ND*}$, 将公式 (5)、(6)、(7) 代入上述不等式, 可以求得 $\underline{w}_L^{NC} \leq w_L^{NC} \leq \overline{w}_L^{NC}$, $\underline{w}_H^{NC} \leq w_H^{NC} \leq \overline{w}_H^{NC}$, 其中

法, 先求出两种产品的零售价格, 再求出两种产品的批发价格及低碳产品的减排量。零售商的目标函数为:

$$\Pi_R^{YD} = (p_L - w_L)(a - bp_L) + b(p_L - p_H)(p_H - w_H) \quad (8)$$

公式 (8) 分别对 p_L 和 p_H 求偏导数, 可以得到 $p_L^{YD} = \frac{2a + 2bw_L - bw_H}{3b}$, $p_H^{YD} = \frac{a + bw_L + bw_H}{3b}$

在第一阶段, 低碳制造商通过确定低碳产品的批发价格和减排量, 普通制造商通过确定普通产品的批发价格来使其利润最大化, 低碳制造商和普通制造商的目标函数分别为:

$$\begin{aligned} \Pi_L^{YD} &= (a - bp_L)(w_L - c_L) \\ &\quad - (a - bp_L)(e - x)t - \frac{1}{2} kx^2 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\Pi_H^{YD} = b(p_L - p_H)(w_H - c_H) - b(p_L - p_H)et \quad (10)$$

把 p_L^{YD} 和 p_H^{YD} 代入到公式 (9) 和 (10), 由一

均衡条件可得低碳制造商和普通制造商的最优决策, 均衡结果见命题6。

命题6 在政府收取碳税的情况下低碳产品和普

通产品的最优批发价格, 以及低碳产品的最优减排量分别为:

$$w_L^{YD*} = \frac{15ak + 30bekt - 10abt^2 - 4b^2et^3 + 6bkc_H - 4b^2t^2c_H + 24bkc_L}{b(45k - 14bt^2)}$$

$$w_H^{YD*} = \frac{15ak + 30bekt - 6abt^2 - 8b^2et^3 + 24bkc_H - 8b^2t^2c_H + 6bkc_L}{b(45k - 14bt^2)}$$

$$x^{YD*} = \frac{2(5at - 5bet^2 + 2bct_H - 7bct_L)}{45k - 14bt^2}$$

同时可以求得低碳产品和普通产品的市场需求量分别为:

$$Q_L^{YD*} = \frac{2k(5a - 5bet + 2bc_H - 7bc_L)}{45k - 14bt^2}$$

$$Q_H^{YD*} = \frac{2[(a - bet)(5k - 2bt^2) + b(2bt^2 - 7k)c_H + 2bkc_L]}{45k - 14bt^2}$$

比较 x^{ND*} 和 x^{YD*} 可知 $x^{YD*} > x^{ND*}$, 这就说明了碳税能够促使低碳制造商降低产品的碳排放。分析 $\frac{\partial x^{YD*}}{\partial t}$, 当 t 相对较小时, $\frac{\partial x^{YD*}}{\partial t} > 0$, 当 t 增加到一定程度 $\frac{\partial x^{YD*}}{\partial t} < 0$, 这就说明了当碳税相对较小时, 政府提高碳税税率能够促使企业降低碳排放, 当碳税增加到一定程度时, 碳税的增加反而促使企业选择增加碳排放, 由此可以得到结论5。

结论5: 在其他条件不变的情况下, 当碳税相对较小时, 低碳产品的碳排放减少量与碳税正相关; 当碳税增加到一定程度, 低碳产品的碳排放减少量与碳税负相关。

结论5说明了碳税不是越高越好, 碳税在一定合理范围内, 能够调动企业减排的积极性, 降低碳排放, 如果碳税税率设置过高, 只是给企业增加经营负担, 起不到任何减排作用。形成这一现象的原因是, 企业的减排成本与减排量之间是二次相关, 因此随着减排量的增加, 减排成本的增加速度大于碳税的增加速度, 当减排量达到一定程度, 此时减排成本大于政府所收取的碳税, 所以企业为了实现利润最大化, 就会停止减排。

(二) 集中决策下模型分析

在集中决策下, 低碳制造商、普通制造商和零

$$\Pi^{YC*} = (a - bp_L^{YC*}) [(p_L^{YC*} - c_L) - (e - x^{YC*})t] - \frac{1}{2}kx^{YC*2} + b(p_L^{YC*} - p_H^{YC*}) [(p_H^{YC*} - c_H) - et]$$

(三) 有碳税时供应链减排合作分析

通过上文分析可知, 供应链的总利润在集中决策下大于等于在分散决策下, 即 $\Delta\Pi = \Pi^{YC*} - \Pi^{YD*} \geq 0$, 低碳制造商、普通制造商和零售商都能够参与集中决策充分必要条件为:

$$\Delta\Pi_L = \Pi_L^{YC*} - \Pi_L^{YD*} \geq 0, \quad \Delta\Pi_H = \Pi_H^{YC*} - \Pi_H^{YD*} \geq 0,$$

售商是一个利益整体, 通过设定合理的低碳产品价格、普通产品价格, 以及减排量可以实现供应链整体利润最大化的目标, 即求如下最优化问题:

$$\text{MAX}\Pi^{YC} = (a - bp_L) [(p_L - c_L) - (e - x)t] - \frac{1}{2}kx^2 + b(p_L - p_H) [(p_H - c_H) - et] \quad (11)$$

公式(11)分别对 p_L , p_H 和 x 求偏导数, 并令其等于0, 可以得到:

$$a - btx - bc_H + bc_L + bp_H - 2bp_L = 0 \quad (12)$$

$$et + c_H - p_H + p_L = 0 \quad (13)$$

$$-kx + t(a - bp_L) = 0 \quad (14)$$

联立式(12)、(13)和(14)并进行求解, 可以得到命题7。

命题7 如果政府收取碳税, 在集中决策下, 低碳产品的减排量、低碳产品价格和普通产品价格分别为:

$$x^{YC*} = \frac{t(bet - bc_H + 2bc_L - a)}{2bt^2 - 3k}$$

$$p_L^{YC*} = \frac{2abt^2 + bkc_H - 2ak - bekt - 2bkc_L}{b(2bt^2 - 3k)}$$

$$p_H^{YC*} = \frac{abt^2 + b^2et^3 + b^2t^2c_H - ak - 2bekt - bkc_H - bkc_L}{b(2bt^2 - 3k)}$$

此时供应链利润为:

$$\Delta\Pi_R = \Pi_R^{YC*} - \Pi_R^{YD*} \geq 0, \quad \text{且} \Delta\Pi = \Delta\Pi_L + \Delta\Pi_H + \Delta\Pi_R.$$

命题8 在政府收取碳税的情况下, 若低碳制造商、普通制造商和零售商能够进行谈判, 达成协议, 使得低碳制造商、普通制造商和零售商都能够按集中决策情形下进行决策, 则该协议必须满足以下约束条件: $w_L^{YC} \leq w_L^{YD} \leq \overline{w}_L^{YC}$, $w_H^{YC} \leq w_H^{YD} \leq \overline{w}_H^{YC}$ 。

其中:

$$\begin{aligned} \overline{w_L^{YC}} &= \frac{\Pi_L^{YD*} + \frac{1}{2} kx^2 + Q_L^{YC*} (e - x)t}{Q_L^{YC*}} + c_L, \quad \overline{w_L^{YC}} = p_L^{YC*} - \frac{\Pi_R^{YD*} (p_H^{YC*} - w_H^{YC}) Q_H^{YC*}}{Q_L^{YC*}} \\ \overline{w_H^{YC}} &= \frac{\Pi_H^{YD*} + Q_H^{YC*} et}{Q_H^{YC*}} + c_H, \quad \overline{w_H^{YC}} = p_H^{YC*} - \frac{\Pi_R^{YD*} (p_L^{YC*} - w_L^{YC}) Q_L^{YC*}}{Q_H^{YC*}} \end{aligned}$$

证明方法同命题5

$\overline{w_L^{YC}}$ 和 $\overline{w_H^{YC}}$ 分别表示低碳制造商和零售商能够接受的低碳产品的最低和最高批发价格, w_H^{YC} 和 $\overline{w_H^{YC}}$ 分别表示普通制造商和零售商能够接受的普通产品的最低和最高批发价格, w_L^{YC} 和 w_H^{YC} 分别表示达成协议的低碳产品和普通产品价格, 其具体价格主要取决于双方的谈判能力。

四、算例分析

使用Matlab对上述各公式进行求解, 分析消费者对价格的敏感系数、碳税和减排的难度系数对低碳产品价格、普通产品价格以及减排量的影响, 进而获得对供应链各企业和政府有益的结论, 为其制定决策提供参考。令 $a=30, c_L=8, c_H=5, e=3$ 。

(一) 价格敏感系数的影响分析 ($t=5, k=100$)

由图2和图3可以看出, 低碳产品和普通产品价格

格与消费者对价格的敏感系数负相关, 减排量与消费者对价格的敏感系数负相关。形成这一现象的主要原因是消费者对价格的敏感系数越高, 提高产品价格所带来的销量的降低幅度越大, 因此为了获得较高的利润水平, 随着消费者对价格的敏感系数不断升高, 企业就要通过降低产品的销售价格来提高销量。同时, 随着消费者对价格敏感系数不断提高, 消费者能够承受的产品的最高价格不断下降, 因此企业需要不断降低生产成本, 而降低减排量在一定程度上可以降低企业的生产成本, 因此随着消费者对价格敏感系数的不断升高, 低碳产品的减排量随之不断下降。这一现象告诉我们, 企业可以通过加强产品的宣传, 例如美化包装设计、提升产品的功能、加强在低碳产品方面的宣传工作, 尽可能的降低消费者对价格敏感度, 进而提高产品价格和减排水平。表1汇总了价格敏感系数对低碳产品价格、普通产品价格和减排量的影响。

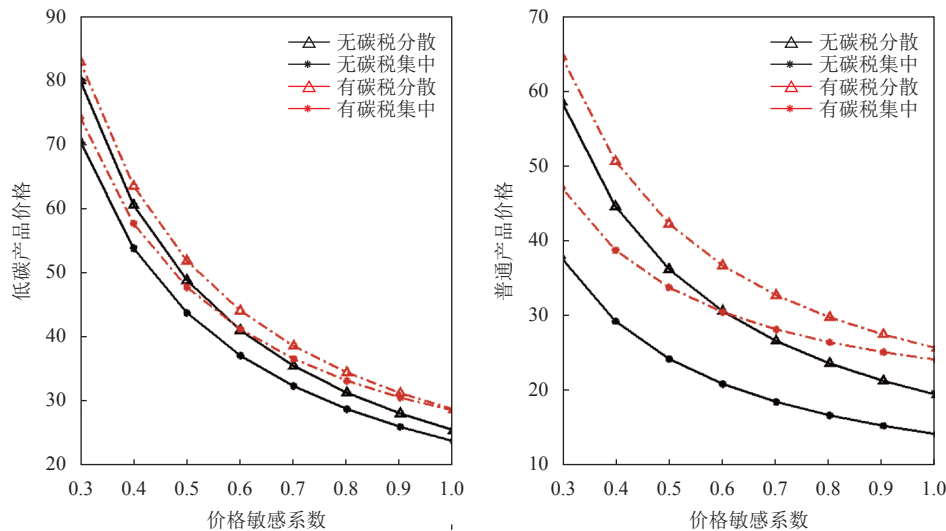


图2 价格敏感系数对低碳产品和普通产品价格的影响

同时, 通过图2和图3还可以看出, 集中决策情况下低碳产品和普通产品价格小于分散决策情况下普通产品和低碳产品的价格, 而集中决策情况下低碳产品的减排量大于分散决策情况下的减排量。这说明, 集中决策为最佳决策方式, 供应链上下游企业可以通过使用一定的协调机制促使低碳制造商、普通制造商和零售商进行集中决策, 这样不仅能够

降低产品销售价格, 提升各自的利润水平, 还能够起到降低碳排放的作用, 进而实现经济和环境的同时最优。

(二) 碳税的影响分析影响 ($k=100, b=0.3$)

由图4可知, 在分散决策的情况下, 随着碳税的不断升高, 低碳产品和普通产品的价格也随之不断上升; 但是在集中决策下, 随着碳税的不断升

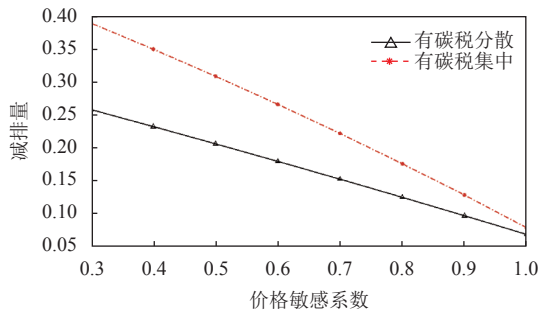


图 3 价格敏感系数对减排量的影响

表 1 价格敏感系数对决策变量影响汇总

| | 无碳税分散 | 无碳税集中 | 有碳税分散 | 有碳税集中 |
|--------|-------|-------|-------|-------|
| 低碳产品价格 | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ |
| 普通产品价格 | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ |
| 减排量 | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ |

高, 低碳产品的价格却不断下降, 普通产品价格先小幅度上升后不断下降。这主要是因为, 在分散决策的情况下、低碳制造商、普通制造商和零售商都是以自身利润最大化为决策目标。此时如果碳税升高, 低碳制造商和普通制造商的生产成本就会不断上升。因此为了获取最大利润, 低碳制造商和普通制造商都会不断提高其产品价格。但是低碳制造商、普通制造商和零售商在集中决策的情况下是一个利益体, 此时的决策目标为供应链整体利润最大化, 低碳制造商和普通制造商降低产品价格能够提高零售商的利润水平, 零售商利润的上升幅度大于低碳制造商和普通制造商利润的下降幅度, 所以在集中决策下, 随着碳税的逐步上升, 低碳产品和普通产品的价格反而下降。

由图5可知, 在分散决策的情况下, 随着碳税

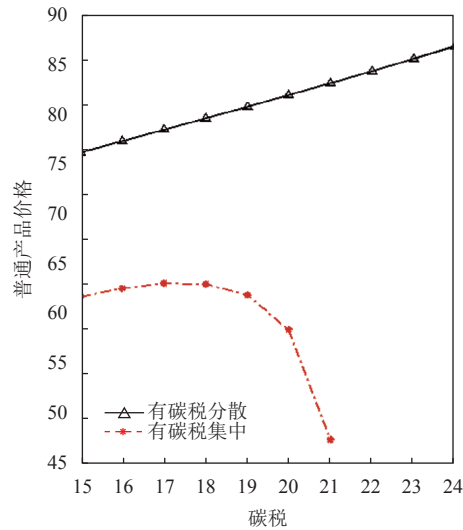
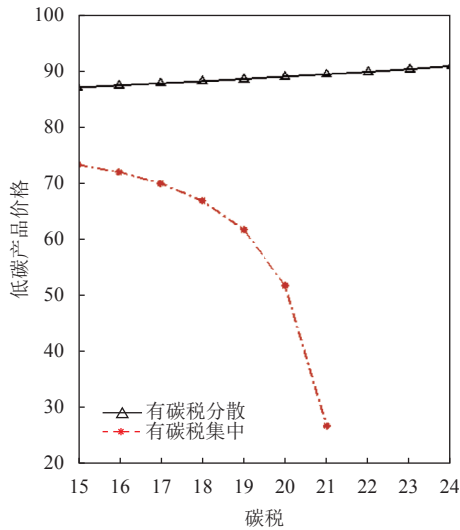


图 4 碳税对低碳产品和普通产品价格的影响

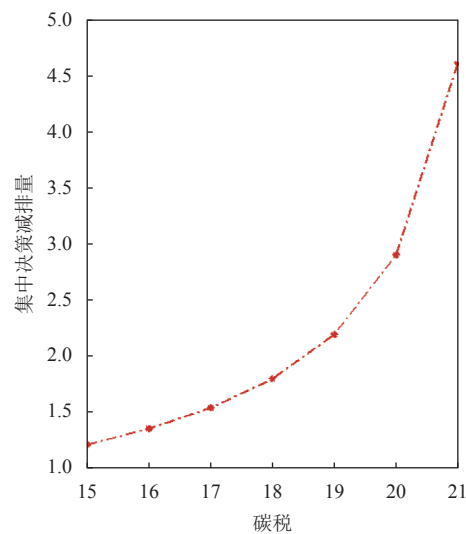
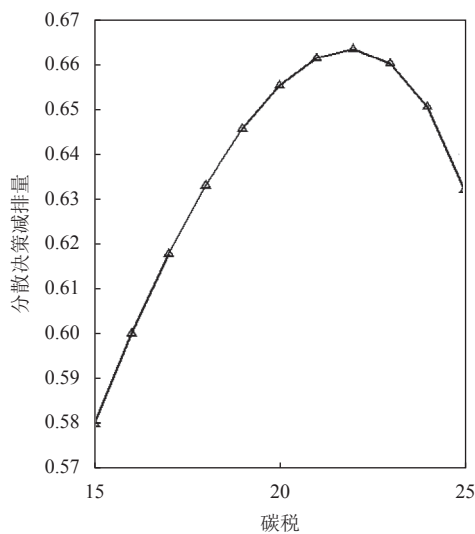


图 5 碳税对减排量的影响

的逐步升高减排量先升高后降低, 在集中决策的情况下, 随着碳税的逐步升高, 减排量逐步上升。这就说明了, 在分散决策的情况下, 碳税税率应该设置在一个合理分范围内, 这样才能够充分调动低碳制造商减排的积极性。碳税如果设置过高, 只是增加了企业的经营负担, 并没有起到减排的作用。而在集中决策下, 碳税越高越能促进企业减排, 这就要求政府在碳税设置时, 要充分调研, 详细分析, 周密计算, 能够在不同决策方式下设置合理的碳税

表 2 碳税对决策变量影响汇总

| | 分散决策 | 集中决策 |
|--------|------|------|
| 低碳产品价格 | ↗ | ↘ |
| 普通产品价格 | ↗ | ↗ |
| 减排量 | ↗ | ↗ |

税率。表2汇总了碳税对低碳产品价格、普通产品价格和减排量的影响。

(三) 减排难度系数的影响分析 ($t=15, b=0.3$)

由图6和图7可以看出, 不论是在分散决策还是集中决策的情况下, 随着减排难度系数不断增加, 低碳制造商的减排成本就随之不断上升, 低碳产品生产成本上升, 因此低碳产品的价格就不断上升。由于普通产品销量取决于低碳产品价格与普通产品价格之差, 低碳产品价格上升, 普通产品的定价区间就随之扩大, 普通制造商为了获取较高的利润就会不断提高普通产品的价格。同时随着减排难度系数越来越大, 减排成本就随之越大, 低碳制造商的减排意愿就越低, 所以减排量越低。表3汇总了减排难度系数对低碳产品价格、普通产品价格和减排量的影响。

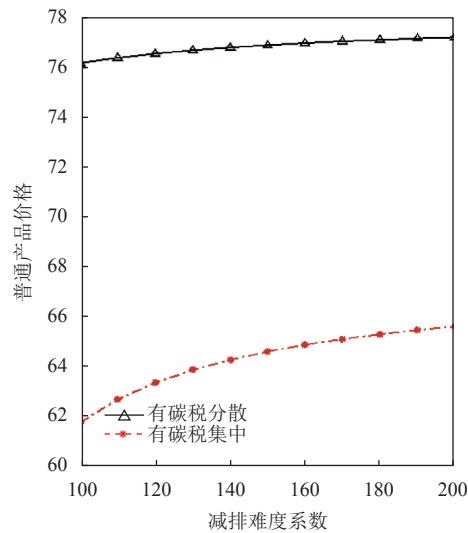
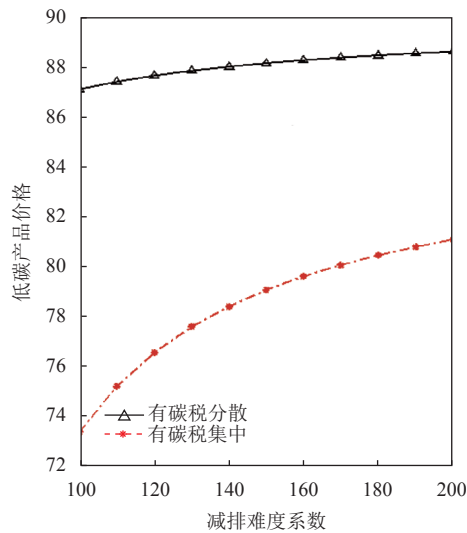


图 6 减排难度系数对低碳产品和普通产品价格的影响

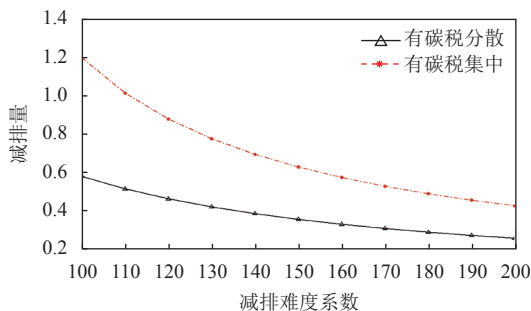


图 7 减排难度系数对减排量的影响

表 3 减排难度系数对决策变量影响汇总

| | 分散决策 | 集中决策 |
|--------|------|------|
| 低碳产品价格 | ↗ | ↗ |
| 普通产品价格 | ↗ | ↗ |
| 减排量 | ↘ | ↘ |

有碳税集中决策四种情况下产品定价与供应链减排合作策略, 通过研究可得: (1) 在分散决策的情况下, 随着碳税的逐步升高减排量先升高后降低; 在集中决策的情况下, 随着碳税的逐步升高, 减排量逐步上升。这就说明了, 在分散决策的情况下, 碳税税率应该设置在一个合理分范围内, 这样才能够充分调动低碳制造商减排的积极性, 但是碳税如果设置过高, 只是增加了企业的经营负担, 并没有起到减排的作用, 而是在集中决策下, 碳税越高越能促进企业减排, 这就要求政府在碳税设置时, 要

五、结论

本文主要以低碳制造商、普通制造商和零售商组成的供应链作为研究对象, 分析碳税规制下的低碳产品定价与供应链的减排合作, 分别讨论了无碳税分散决策、无碳税集中决策、有碳税分散决策和

充分调研, 详细分析, 周密计算, 能够在不同决策方式下设置合理的碳税税率。(2) 集中决策时, 供应链总利润高于分散决策时的供应链总利润, 可见集中决策是供应链的最佳决策方式。(3) 为了保证供应链中的低碳制造商、普通制造商和零售商都能够按照集中决策情形下进行决策, 必须设定相应的合作约束机制, 该约束机制必须符合如下条件: $w_L^{NC} \leq w_L^{NC} \leq \overline{w_L^{NC}}$, $w_H^{NC} \leq w_H^{NC} \leq \overline{w_H^{NC}}$, $w_L^{YC} \leq w_L^{YC} \leq \overline{w_L^{YC}}$, $w_H^{YC} \leq w_H^{YC} \leq \overline{w_H^{YC}}$ 。最后, 本文使用算例分析的方法分析了消费者对价格的敏感系数、碳税和减排难度系数对各决策变量的影响。

参考文献

- [1] FIKSEL J, GRAEDEL T, HECHT A D, et al. EPA at 40: bringing environmental protection into the 21st century[J]. *Environmental science & technology*, 2009, 43(23): 8716-8720.
- [2] 国务院发展研究中心课题组, 刘世锦, 张永生. 全球温室气体减排: 理论框架和解决方案[J]. *经济研究*, 2009(3): 4-13.
- [3] BJORNER T B, JENSEN H H. Energy Taxes, Voluntary Agreements and Investment Subsidies- a Mico-Pannel Analysis of the Effect on Danish Industrial Companies' Energy Demand[J]. *Resource and Energy Economis*, 2002, 24(3): 229-249.
- [4] BRUVOLL A, LARSEN B M. Greenhouse Gas Emission in Norway: Do Carbon Taxes Work?[J]. *Energy policy*, 2004, 32(4): 493-505.
- [5] GRAY W, METCALF G E. Carbon Tax Competitiveness Concerns: Assessing a Best Practices Carbon Credit[J]. *Social Science Electronic Publishing*, 2017, 70(2): 447-468.
- [6] WANG C, WANG W, HUANG R. Supply chain enterprise operations and government carbon tax decisions considering carbon emissions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 152: 271-280.
- [7] 张晓盈, 钟锦文. 碳税的内涵、效应与中国碳税总体框架研究[J]. *复旦学报(社会科学版)*, 2011(4): 92-101.
- [8] FERGUSON M E, TOKTAY L B. The Effect of Competition on Recovery Strategies[J]. *Production & Operations Management*, 2010, 15(3): 351-368.
- [9] 公彦德, 李帮义, 刘涛. 基于Shapley值和相同利润增长率的供应链协调策略[J]. *系统管理学报*, 2009, 18(1): 61-66.
- [10] 马秋卓, 宋海清, 陈功玉. 考虑碳交易的供应链环境下产品定价与产量决策研究[J]. *中国管理科学*, 2014, 22(8): 37-46.
- [11] BENJAAFAR S, LI YANZHI, DASKIN M. Carbon footprint and the management of supply chains: Insights from simple models[J]. *IEEE Transactions on automation science and engineering*, 2013, 10(1): 1-18.
- [12] RUI Z, NEIGHBOUR G, HAN J, et al. Using game theory to describe strategy selection for environmental risk and carbon emissions reduction in the green supply chain[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2012, 25(6): 927-936.
- [13] 姜跃, 韩水华. 碳税规制下供应商参与对企业减排决策的影响分析[J]. *软科学*, 2016, 30(6): 43-48.
- [14] 姜跃, 韩水华. 碳税规制下零售商减排成本分担对企业减排决策的影响[J]. *商业研究*, 2017, 59(8): 158-166.
- [15] 赵道致, 原白云, 徐春明. 低碳供应链纵向合作减排的动态优化[J]. *控制与决策*, 2014(7): 1340-1344.
- [16] SUBRAMANIAN R, GUPTA S, TALBOT B. Compliance Strategies under Permits for Emissions[J]. *Production & Operations Management*, 2007, 16(6): 763-779.
- [17] 骆瑞玲, 范体军, 夏海洋. 碳排放交易政策下供应链碳减排技术投资的博弈分析[J]. *中国管理科学*, 2014, 22(11): 44-53.

编辑 何婧