

## 碳交易下考虑产品替代性的供应链减排决策研究

王东阳,李芳,施可可

上海理工大学 管理学院,上海 200093

**摘要:**在碳交易背景下,针对企业单一的减排方式,提出了能源费用托管型合作模式的外包减排,并对两种减排方式进行对比分析。构建自主减排与外包减排 Stackelberg 博弈模型,比较分析交叉价格弹性、碳交易价格及减排投资系数对两种减排方式下企业利润和碳减排量的影响,进一步细化影响选择减排方式的因素,采用算例仿真验证模型的有效性。研究表明:无论哪种减排方式,企业碳减排量和利润与交叉价格弹性系数成正向变动关系;碳交易价格增长,会调动制造商减排积极性,产品的碳减排量增加,而对利润产生负效应;减排投资系数的增大,对企业减排起到负向阻碍作用;节能服务公司与制造商自主减排投资系数比影响供应链选择减排方式,当减排投资系数比小于阈值时,企业应选择能源费用托管型合作模式的外包减排,同时决策因素的变动会影响其选择减排方式的时机。

**关键词:**交叉价格弹性;碳交易价格;供应链减排;减排投资系数

**中图分类号:**F274 **文献标识码:**A **doi:**10.16055/j.issn.1672-058X.2023.0005.008

### Influence of Supply Chain Emission Reduction Strategy Considering Product Substitution under Carbon Cap-and-Trade

WANG Dongyang, LI Fang, SHI Keke

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

**Abstract:** In the context of carbon cap-and-trade, the outsourced emission reduction with energy cost trusteeship cooperation model was proposed for the single emission reduction mode of enterprises, and the two emission reduction modes were compared and analyzed. The Stackelberg game model of autonomous emission reduction and outsourced emission reduction was constructed to compare and analyze the effects of cross-price elasticity, carbon trading price and emission reduction investment coefficient on corporate profits and carbon emission reduction under the two emission reduction methods. The factors affecting the choice of emission reduction methods were further elaborated. The effectiveness of the model was verified by simulation. The results show that no matter what kind of emission reduction method, the carbon emission reduction and profit of enterprises have a positive relationship with the cross-price elasticity coefficient. The increase of carbon trading price will mobilize the enthusiasm of manufacturers to reduce emissions, and the carbon emission reduction of products will increase, which will have a negative effect on profits. The increase in emission reduction investment coefficient has a negative hindering effect on the emission reduction of enterprises. The independent emission reduction investment coefficient ratio between the energy-saving service company and the manufacturer affects the choice of emission reduction mode of the supply chain. When the emission reduction investment coefficient ratio is less than the threshold, the enterprise should choose the outsourcing emission reduction mode of energy

**收稿日期:**2021-03-05 **修回日期:**2021-05-18 **文章编号:**1672-058X(2023)05-0055-09

**基金项目:**国家自然科学基金项目(71840003);上海市软科学研究重点项目(19692104000).

**作者简介:**王东阳(1997—),女,黑龙江肇东人,硕士研究生,从事供应链管理. Email:wangdongyang\_97@126.com

**通讯作者:**李芳(1966—),女,陕西西安人,博士,副教授,从事供应链、云制造等研究. Email:lifang2502@126.com.

**引用格式:**王东阳,李芳,施可可.碳交易下考虑产品替代性的供应链减排决策研究[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2023,40(5):55—63.

WANG Dongyang, LI Fang, SHI Keke. Influence of supply chain emission reduction strategy considering product substitution under carbon cap-and-trade[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2023, 40(5): 55—63.

cost custody cooperation, and the change of decision-making factors will affect the timing of its choice of emission reduction mode.

**Keywords:** cross-price elasticity; carbon trading price; supply chain mitigation; emission reduction investment coefficient

## 1 引言

全球二氧化碳的大量排放,使温室效应持续增强,导致全球气温不断飙升,自然灾害频发,减少碳排放迫在眉睫。据相关数据统计 2020 年我国碳排放量为 102.51 亿 t,自 2005 年连续十五年排放量占世界首位,形势十分严峻,在第七十五届联合国大会一般性辩论上首次明确提出了碳中和、碳达峰目标,要采取强有力的措施减少碳排放。碳交易政策作为有效的碳政策被广泛推广,我国自 2011 年开展碳交易市场的试点工作,到 2021 年七月成立全国统一的碳交易市场,减排效果显著,运用市场机制,将碳排放权作为商品在市场上交易,可以使稀缺的碳排放权进行有效利用,同时把碳减排任务落实到每个企业上,促使企业进行技术改革、产业升级等完成碳减排任务。目前企业的碳减排方式主要分为两种:自主减排,制造企业通过生产技术创新,采用节能技术生产低碳产品,减少碳排放;外包减排,制造企业与第三方节能服务公司进行合作减排,由专业的减排服务公司运用成熟的减排技术进行减排<sup>[1]</sup>。所以在存在多种碳减排方式以及不同影响因素变动的情况下,研究企业的减排决策很有价值。

近年来在碳政策下对企业运营减排的研究较多。Lamba 等<sup>[2]</sup>考虑三种碳政策下供应商的选择问题,其中研究结果显示,在碳交易政策下,碳交易价格的增长,会减少企业的碳排放量。Wang 等<sup>[3]</sup>在一个由制造商和零售商组成的两级供应链中,建立单一和联合减排模型,探究其生产和减排策略。张令荣等<sup>[4]</sup>在碳交易背景下构建闭环供应链,探讨闭环供应链最优的减排策略。刘楠峰等<sup>[5]</sup>在碳交易制度下,分别考虑碳配额的分配、排控目标的不同、市场结构的变化对企业的经济与环境效益的影响。武丹等<sup>[6]</sup>在碳背景下,考虑消费者低碳偏好建立微分博弈模型,探讨最优减排策略。Zhang 等<sup>[7]</sup>考虑消费者低碳偏好,研究由制造商和零售商组成的两阶段双渠道供应链的动态定价和减排策略。以上的研究中关于企业运营减排的方式大多是属于自主减排的范畴内,很少涉及外包减排这一减排途径,但目前第三方服务商不断兴起,在某种情况下,企业与第三方合作,外包减排的减排效果更优。顺应市场发展的趋势,廖诺等<sup>[8]</sup>在碳规制下对外包减排任务进行研究,分别构建供应链与零售商集中、分散与第三方合作三种情况下探讨供应链利润与减排量。贺勇等<sup>[9]</sup>研究了两种减排方式(自主减排与外包减排)并且

引入了政府补贴政策,来探究每种补贴方式下哪种减排更优;每种减排方式下,哪种补贴方式更适宜。张文杰等<sup>[10]</sup>建立了多目标加权灰靶决策模型,研究节能服务公司的选择问题。由此可见外包减排这种方式逐渐被人们所认可,但学者们对外包减排的研究主要是在能源效益分享型模式下,未对能源费用托管型合作模式下供应链减排决策研究。随着合同能源管理模式的发展,其中高效的能源费用托管型合作模式逐渐成为主流<sup>[11]</sup>。所以本文对能源费用托管型外包减排合作模式进行研究,企业根据自己的需求确定支付给节能服务公司减排投资费用,与减排服务公司签订合同,减排服务公司按照合同进行减排研发。

随着经济水平的提高以及人们对环境问题的重视,单一普通产品不再满足消费者的需求,企业为提高自身的竞争力,会不断调整生产计划,同时生产普通产品与低碳产品,产品呈现一定的替代性,满足消费者多样的需求。蒋曼曼等<sup>[12]</sup>针对产品替代的情形,考虑零售商行为偏好,探究供应链协调问题。刁心微<sup>[13]</sup>在混合碳政策下,探究制造商低碳转型的过程中技术选择策略。郭军华等<sup>[14]</sup>在碳税政策下,制造商双模式生产,研究碳税与消费者低碳偏好对定价决策的影响。柯春媛等<sup>[15]</sup>在碳交易政策下建立制造商生产两种产品的利润模型,探究其生产决策问题。缪文清等<sup>[16]</sup>在碳交易制度下,考虑制造商生产普通产品与低碳产品的差别定价,探究补贴机制对其最优决策的影响。通过以上分析,大部分研究主要关注在制造商生产多种产品的生产决策以及定价问题,并没有在碳交易政策下,探讨制造商同时生产两种具有替代性的产品的减排决策。

综上所述,相关企业减排的研究主要集中在自主减排,少数研究考虑了外包减排但只在能源效益分享型合作模式下,更是忽略多产品可替代的供应链的减排决策。为此本文在碳交易政策下,考虑制造商双模式生产,研究自主减排、能源费用托管型外包减排的供应链减排决策问题。旨在通过研究,分析供应链选择不同减排方式的条件,并探究各因素(交叉价格弹性系数、碳交易价格、减排投资系数)的变化对选择减排方式的时机的影响,同时对不同情形下供应链整体利润、减排量的影响,此外为制造型企业完成碳减排任务的同时达到最优经济效益状态、为政府完善相关的碳政策提供理论依据。

## 2 问题描述与基本假设

本文在碳交易政策下,建立包含单一制造商与单一零售商的二级供应链,制造商同时生产两种产品,两种产品功能上可相互替代,其中产品 1 是减排技术处理过的低碳产品,产品 2 是普通产品。通过构建制造商自主研发技术减排和外包减排任务的两种分散决策模型,并对均衡结果进行对比分析。

**假设 1** 制造商生产的两种产品,其生产成本为  $c_i$ ,批发价格为  $w_i$ ,两者相互竞争可替代,通过同一家零售商进行销售,销售价格为  $p_i$ ,其中  $c_1 > c_2 (i = 1, 2)$ 。

**假设 2** 产品的市场需求不仅受自身价格的影响,而且还会受到替代产品的价格的影响<sup>[12]</sup>。市场需求  $D_i = a - p_i + \theta p_j, i \neq j = 1, 2$ ;  $a$  为潜在的市场需求(足够大);  $\theta$  为两种产品的交叉价格弹性系数;  $\theta$  越大代表两种产品的替代性越强,且  $0 < \theta < 1$ 。

**假设 3** 制造商生产低碳产品,自主减排成本为一次性支出:  $\frac{1}{2} \lambda e_1^2$ ,  $\lambda$  为减排成本系数,  $e_1$  为低碳产品的碳减排量;当制造商与第三方减排服务商合作外包减排任务时,第三方减排服务商的减排成本为  $\frac{1}{2} \eta \lambda e_1^2$ ,其中  $\eta$  为节能服务公司与制造商自主减排投资系数比,由于减排节能公司在减排的专业性高于供应链上的其他企业,所以第三方节能减排服务公司投资减排系数低于制造商自主减排投资系数,即  $0 < \eta < 1$ <sup>[8]</sup>。

**假设 4** 在供应链中,两种产品的市场势力均等,从而制造商对产品的批发价格是同时决策的<sup>[17]</sup>。

**假设 5**  $\pi_m$  为制造商利润,  $\pi_r$  为零售商利润,  $\pi_s$  为减排服务商利润。

## 3 模型构建与求解

### 3.1 制造商自主减排分散决策模型

在分散决策下,制造商与零售商为不同的决策主体,各自均以自身的利润最大化为目标。该博弈模型中,分为两阶段进行博弈,制造商作为主导者,首先制定产品的批发价格以及低碳产品的碳减排量,其次零售商根据制造商的决策决定产品的销售价格。

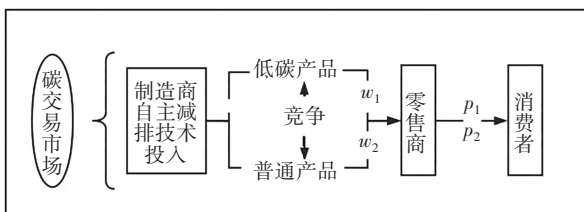


图 1 制造商自主减排供应链模型

Fig. 1 Manufacturer autonomous emission reduction supply chain model

由此,制造商与零售商的利润模型为:

$$\pi_m^{MN} = (w_1 - c_1)D_1 + (w_2 - c_2)D_2 - p_c [(e - e_1)D_1 + eD_2 - E] - \frac{1}{2} \lambda e_1^2 \quad (1)$$

$$\pi_r^{MN} = \sum_{i=1}^2 (p_i - w_i)D_i, i = 1, 2 \quad (2)$$

其中,  $e$  为初始碳排放量,  $E$  为碳排放额度,  $p_c$  为碳交易价格。

式(1)中的  $(w_1 - c_1)D_1$  为制造商将低碳产品销售给零售商的利润,  $(w_2 - c_2)D_2$  为制造商将普通产品销售给零售商的利润,  $(e - e_1)D_1 + eD_2$  为实行碳减排后碳排放量,若  $(e - e_1)D_1 + eD_2 > E$  时,该企业按照碳交易价格在全国统一碳交易市场进行购买碳排放额;若  $(e - e_1)D_1 + eD_2 < E$  时,该企业按照碳交易价格在全国统一碳交易市场进行售卖碳排放额,获得一部分收益。

首先运用逆向归纳法对零售商的利润函数求极值:通过式(2)得到零售商利润关于  $p_i$  的 Hessian 矩阵  $H = \begin{bmatrix} -2 & 2\theta \\ 2\theta & -2 \end{bmatrix}$ ,根据假设 2 中  $0 < \theta < 1$ ,其一阶顺序主子式  $|H_1| = -2 < 0$ ,二阶顺序主子式  $|H_2| = 4(1 - \theta^2) > 0$ ,可知矩阵为负定,零售商的利润函数为严格的凹函数,存在最优解  $p_i$  使零售商得到最优利润。

对  $p_i$  求一阶偏导,  $\frac{\partial \pi_r}{\partial p_i} = 0$  得产品的销售价格为

$$p_1 = \frac{a + w_1 - \theta w_2}{2 - 2\theta} \quad (3)$$

$$p_2 = \frac{a + w_2 - \theta w_1}{2 - 2\theta} \quad (4)$$

将式(3)、式(4)代入式(1)制造商利润函数中,得到制造商关于  $w_i, e_1$  的 Hessian 矩阵为

$$H_2 = \begin{bmatrix} -1 & \theta & -\frac{P_c}{2} \\ \theta & -1 & \frac{P_c \theta}{2} \\ -\frac{P_c}{2} & \frac{P_c \theta}{2} & -\lambda \end{bmatrix}$$

当  $\lambda > \frac{P_c^2}{4}$  时,一阶主子式为  $-1 < 0$ ,二阶顺序主子式

为  $1 - \theta^2 > 0$ ,三阶顺序主子式  $(\theta^2 - 1)(\lambda - \frac{P_c^2}{4}) < 0$ ,因此该矩阵为负定,即存在最优的批发价格  $w_1, w_2$  与减排量  $e_1$ ,使制造商的利润取得极大值。

$\frac{\partial \pi_m^{MN}}{\partial w_1} = 0, \frac{\partial \pi_m^{MN}}{\partial w_2} = 0, \frac{\partial \pi_m^{MN}}{\partial e_1} = 0$  可得均衡解如下:

最优减排量为

$$e_1^{MN*} = \frac{p_c [a - c_1 + ep_c(\theta - 1) + c_2\theta]}{4\lambda - p_c^2} \quad (5)$$

最优批发价格

$$w_1^{MN*} = \frac{1}{2} [c_1 + (e - e_1^{MN*})p_c - \frac{a}{\theta - 1}] \quad (6)$$

$$w_2^{MN*} = \frac{1}{2} (c_2 + ep_c - \frac{a}{\theta - 1}) \quad (7)$$

$$\pi_m^{MN*} = \frac{8a\lambda [a + (A_1 + A_2)(\theta - 1)] - ap_c^2(1 + \theta) [2A_2(\theta - 1) - a] + (\theta - 1) \{ p_c^2 [A_2^2(1 - \theta^2) + 8EP_C] - 4\lambda [c_1(c_1 - 2A_2\theta) + c_2^2 + 2ep_c(c_1 - A_2(\theta - 1))] + 8p_c E \}}{8(\theta - 1)(p_c^2 - 4\lambda)}$$

$$\pi_r^{MN*} = \frac{p_c^2 [a + A_2(\theta - 1)]^2 (1 + \theta) (P_c - 8\lambda) + 16 \{ 2a^2 + (\theta - 1) [2a(A_1 + A_2) + 2A_1A_2\theta - A_1^2 - A_2^2] \}}{16(1 - \theta)(p_c - 4\lambda)^2}$$

$$\pi^{MN*} = \pi_m^{MN*} + \pi_r^{MN*}$$

其中,  $A_i = c_i + ep_c$  为保证供应链正常运行, 其所求变量  $p_i^{MN*}$ 、 $w_i^{MN*}$ 、 $D_i^{MN*}$ 、 $\pi_m^{MN*}$ 、 $\pi_r^{MN*}$  均大于零, 其中  $B = a - c_1 + 2ep_c(\theta - 1) + c_2\theta > 0$ 。

**推论 1** 当企业自主减排时, 随着不同产品的交叉价格弹性系数越大, 低碳产品的需求会增长以及产品的碳减排水平会提高, 而普通产品的需求会先增加, 当交叉价格弹性系数大于  $\frac{4\lambda(c_1 + ep_c) - ap_c^2}{2p_c^2(c_2 + ep_c)}$  时, 需求会下降, 若企业追求更高利润, 应倾向生产低碳产品。

**证明:**

$$\frac{\partial D_1^{MN*}}{\partial \theta} = \frac{(c_2 + ep_c)\lambda}{4\lambda - p_c^2} > 0$$

$$\frac{\partial e_1^{MN*}}{\partial \theta} = \frac{p_c(c_2 + ep_c)}{4\lambda - p_c^2} > 0$$

$$\text{当 } 0 < \theta < \frac{4\lambda(c_1 + ep_c) - ap_c^2}{2p_c^2(c_2 + ep_c)} \text{ 时, } \frac{\partial D_2^{MN*}}{\partial \theta} > 0; \text{ 否则}$$

$$\frac{\partial D_2^{MN*}}{\partial \theta} < 0$$

**推论 2** 在碳交易政策下, 随着碳交易价格的不断增长, 会激励制造商提高碳减排水平, 碳减排量不断增加; 自主减排投资的成本不断上升时, 导致制造商不断降低碳减排水平, 减少低碳产品的生产, 大量生产普通产品。

**证明:**

$$\frac{\partial e_1^{MN*}}{\partial p_c} = \frac{p_c^2(a - c_1 + c_2\theta) + 4\lambda B}{(p_c^2 - 4\lambda)^2} > 0$$

$$\frac{\partial e_1^{MN*}}{\partial \lambda} = \frac{-4p_c B}{(P_c^2 - 4\lambda)^2} < 0$$

$$\frac{\partial D_2^{MN*}}{\partial \lambda} = \frac{p_c^2 \theta B}{(p_c^2 - 4\lambda)^2} > 0$$

将式(5)、式(6)、式(7)代入需求函数中可得低碳产品与普通产品的需求量为

$$D_1^{MN*} = \frac{[a - c_1 + ep_c(\theta - 1) + c_2\theta]\lambda}{P_c^2 - 4\lambda}$$

$$D_2^{MN*} = \frac{P_c^2 [a + (c_2 + ep_c)(\theta + 1) - 4\lambda [a - c_2 + ep_c(\theta - 1) + c\theta]]}{4(P_c^2 - 4\lambda)}$$

制造商、零售商以及供应链的最优利润:

$$\frac{\partial D_1^{MN*}}{\partial \lambda} = \frac{-p_c^2 B}{(p_c^2 - 4\lambda)^2} < 0$$

### 3.2 制造商外包减排分散决策模型

不同于制造商自主减排, 制造商选择与节能服务公司进行能源费用托管型合作模式合作, 将减排任务外包给节能服务公司, 制造商支付一定的减排服务费用, 节能服务公司为企业提供减排技术与能源管理服务。此情形下分三阶段进行博弈, 制造商作为主导者, 首先决定产品批发价格与支付给节能服务公司的费用, 其次节能服务公司根据制造商所支付的费用确定产品的碳减排量, 最后由零售商根据制造商的决策决定产品的销售价格。

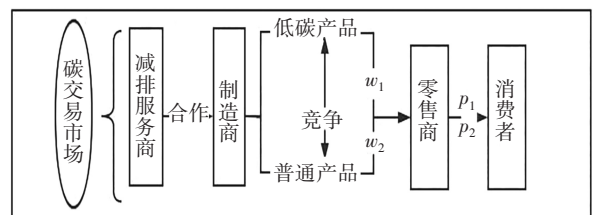


图 2 制造商外包减排供应链结构模型

Fig. 2 Structure model of manufacturer's outsourced emission reduction supply chain

在此情况下, 制造商、零售商与节能服务企业的利润为

$$\pi_m^{NN} = (w_1 - c - ve_1)D_1 + (w_2 - c)D_2 - p_c [(e - e_1)D_1 + eD_2 - E] \quad (8)$$

$$\pi_r^{NN} = \sum_{i=1}^2 (p_i - w_i)D_i, i = 1, 2 \quad (9)$$

$$\pi_i = ve_1 D_1 - \frac{1}{2} \eta \lambda e_1^2 \quad (10)$$

其中,  $v$  为减排量支付价格。

采用逆向归纳法, 首先对零售商利润函数进行分析可得到最优的销售价格:

$$p_1 = \frac{a+w_1-\theta w_1}{2-2\theta}$$

$$p_2 = \frac{a+w_2-\theta w_2}{2-2\theta}$$

其次分析节能服务企业的利润,因为  $\frac{\partial \pi_1^2}{\partial e_1^2} = -\lambda \eta <$

0,则  $\pi_1$  是关于  $e_1$  的严格凹函数,当  $\frac{\partial \pi_1}{\partial e_1} = 0$  存在唯一最

$$w_1^{NN*} = \frac{v(p_c-v)[A_1\theta^3-A_2\theta+a(\theta-2)(\theta+1)]+2\eta\lambda[a+A_1(1-\theta^2)+\theta(a-c_1+c_2)]}{2(\theta^2-1)[v(p_c-v)-2\eta\lambda]} \quad (11)$$

$$w_2^{NN*} = \frac{a(1+\theta)+A_2-A_1\theta^2}{2-2\theta^2} \quad (12)$$

将  $w_1^{NN*}$ 、 $w_2^{NN*}$  代入式 (8) 中,可得当  $0 < p_c < \frac{a+2c_2\theta-c_1(1+\theta)}{e(1-\theta)}$  时,

$$v = \frac{p_c}{2} \quad (13)$$

**推论 3** 当  $0 < p_c < \frac{a+2c_2\theta-c_1(1+\theta)}{e(1-\theta)}$ , 制造商支付给

节能服务公司的减排服务价格只与碳交易价格有关,且成正相关。

$$\pi_m^{NN*} = \frac{p_c^2[c_1\theta^4(c_1-2c_2)-\eta p_c(\theta^2-1)^2(2c_2+\eta p_c)]+8\eta\lambda[2(\theta^2-1)[a(A_1+A_2)+\eta p_c(\theta-1)(A_1+c_2)]+\eta c_1[c_1(1-2\theta^2)+2c_2\theta(\theta^2+\theta-1)]+2a^2(1+\theta)+p_c^2-8\eta\lambda][c_2^2(2\theta^2-1)+8\eta p_c^2(\theta^2-1)]-\eta p_c^2(1+\theta)^2[2A_2(\theta-1)-a]}{8(\theta^2-1)(p_c^2-8\eta\lambda)}$$

$$\pi_r^{NN*} = \frac{p_c^2(16\eta\lambda-p_c^2)(A_2-A_1\theta^2)^2-64\eta^2\lambda^2[A_1^2(1+2\theta^3-2\theta)+A_2(A_2-2A_1\theta^2)-2a(1+\theta)(A_1+A_2-2A_1\theta-1)]+a(1+\theta)p_c^2(p_c^2-16\eta\lambda)[2(A_2-A_1\theta^2)-a(1+\theta)]}{16(\theta^2-1)(p_c^2-8\eta\lambda)^2}$$

$$\pi_1^* = \frac{p_c^2\eta\lambda[(a+(c_1+\eta p_c)(\theta-1))]^2}{2(p_c^2-8\eta\lambda)^2}$$

**推论 4** 当  $p_c^2 \neq 8\eta\lambda$  时,  $\pi_1 > 0$ , 减排服务商才愿意与制造商合作进行减排。

供应链的总利润为:

$$\pi^{NN*} = \pi_m^{NN*} + \pi_r^{NN*}$$

为保证供应链正常运行,其所求变量  $p_i^{MN*}$ 、 $w_i^{MN*}$ 、 $D_i^{MN*}$ 、 $\pi_m^{MN*}$ 、 $\pi_r^{MN*}$  均大于零,其中  $G = a + (c_1 + \eta p_c)(\theta - 1) > 0$ 。

**推论 5** 制造商外包减排任务时,随着交叉价格弹性系数的增大,会带动低碳产品的需求量,企业应加大生产低碳产品同时提高产品的碳减排水平;而普通产品的需求量会先增加,当交叉价格弹性系数大于  $\frac{4\lambda(c_1+\eta p_c)-\eta p_c^2}{2p_c^2(c_1+\eta p_c)}$  时,普通产品的需求量会下降,为了保证供应链的利润,企业应及时调整生产计划。

**证明:**

$$\frac{\partial D_1^{NN*}}{\partial \theta} = \frac{2\eta\lambda(c_1+\eta p_c)}{8\eta\lambda-p_c^2} > 0$$

优的碳减排量且满足  $e_1 = \frac{v(a-w_1+w_2\theta)}{2\lambda\eta}$ , 将其代入 (8)

中,当  $\lambda > \frac{v(p_c-v)(1+\theta)}{2\eta}$  时,  $\lambda$  为碳减排成本系数(足够

大),存在唯一  $w_1$ 、 $w_2$ ,使得制造商的利润为极大值。

令  $\frac{\partial \pi_m^{NN*}}{\partial w_1} = 0$ ,  $\frac{\partial \pi_m^{NN*}}{\partial w_2} = 0$ , 可得均衡批发价格:

将  $v = \frac{p_c}{2}$  代入  $e_1$  可得均衡减排量为:

$$e_1^{NN*} = \frac{p_c[a+(c_1+\eta p_c)(\theta-1)]}{8\eta\lambda-p_c^2} \quad (14)$$

低碳产品与普通产品的需求:

$$D_1^{NN*} = \frac{2\eta\lambda[a+(c_1+\eta p_c)(\theta-1)]}{8\eta\lambda-p_c^2} \quad (15)$$

$$D_2^{NN*} = \frac{8\eta\lambda[a-A_2\theta A_1]-p_c^2[a(1+\theta)-A_2+A_1\theta^2]}{4(8\eta\lambda-p_c^2)} \quad (16)$$

将式 (11) — 式 (16) 代入式 (8) — 式 (10) 中可得制造商、零售商、减排服务商的最优利润:

$$\frac{\partial e_1^{NN*}}{\partial \theta} = \frac{p_c(c_1+\eta p_c)}{8\eta\lambda-p_c^2} > 0$$

当  $0 < \theta < \frac{4\lambda(c_1+\eta p_c)-\eta p_c^2}{2p_c^2(c_1+\eta p_c)}$  时,  $\frac{\partial D_2^{NN*}}{\partial \theta} > 0$ ; 否则

$$\frac{\partial D_2^{NN*}}{\partial \theta} < 0$$

**推论 6** 在碳交易政策下,制造商与节能服务公司合作减排,当自主减排投资系数一定时,外包减排投资系数越大,  $\eta$  越大,制造商的碳减排量会降低,低碳产品的生产需求下降,而普通产品的生产需求会增加;碳交易价格的上升,会激励企业提高碳减排水平,减少碳排放量。

**证明:**

$$\frac{\partial e_1^{NN*}}{\partial \eta} = -\frac{8p_c\eta G}{(p_c^2-8\eta\lambda)^2} < 0$$

$$\frac{\partial e_1^{NN*}}{\partial p_c} = \frac{p_c^2[a+c_1(\theta-1)]+8\eta\lambda G}{(p_c^2-8\eta\lambda)^2} > 0$$

$$\frac{\partial D_1^{NN*}}{\partial \eta} = -\frac{2p_c^2\lambda G}{(p_c^2-8\eta\lambda)^2} < 0$$

$$\frac{\partial D_2^{NN*}}{\partial \eta} = \frac{2p_c^2 \lambda \theta G}{(p_c^2 - 8\eta \lambda)^2} > 0$$

### 3.3 两种减排方式的利润对比分析

企业选择与节能服务公司合作外包减排,关键条

$$\eta < \eta^* = \frac{-\{p_c^2[(c_1 - c_2)^2 p_c^2 \theta^4 - 4\lambda(A_1 - a)(A_1 - a + 2A_2\theta(1 + \theta^2))] - \theta^2(a - c_1 + c_2)(a - A_1 + A_2) + A_1\theta^4(A_1 - 2c_2)\}}{8\lambda\{p_c^2(\theta^2 - 1)[2a(A_1 - A_2\theta) + 2A_1A_2\theta - a^2]\} + p_c^2[A_1^2 - 2(c_1 - c_2)A_1\theta^2 - 2A_2^2\theta^4] + 2A_1A_2\theta(\theta^2 - 1)}$$

**推论 7** 影响供应链选择减排方式的关键因素为减排投资系数比  $\eta$ 。当  $\eta < \eta^*$  时,供应链外包减排的利润高于自主减排的利润,供应链应选择与节能服务公司合作,外包减排;当  $\eta^* < \eta < 1$  时,供应链自主减排的利润高于外包减排的利润,供应链应选择减排技术的投入,自主减排。

**推论 8** 选择外包减排阈值  $\eta$  的大小与交叉价格弹性系数、碳交易价格、减排投资系数有关。随着产品交叉弹性系数越强,低碳产品的需求与碳减排水平不断提高, $\eta$  不断减小,企业更倾向于自主减排;当自主减排投资系数不断升高,降低了低碳产品的需求以及碳减排水平,普通产品的需求增加, $\eta$  不断减小,企业更倾向于自主减排;碳交易价格的不断增长, $\eta$  这一临界值不断增大,企业更倾向于选择与节能服务公司合作,外包减排任务。

## 4 算例分析

本文采用 Matlab 进行数值分析,更直观地表明,在碳交易政策下,供应链选取不同的减排方式需满足的条件,并进一步分析交叉价格弹性系数、碳交易价格、减排投资系数对供应链最优的利润和减排量以及选择减排方式的条件的影 响。钢铁行业是我国政府重点关注的碳排放行业,其每年的碳排放量占我国碳排放量的 15%,所以本文以钢铁行业为例进行数值分析。在上述约束的条件下,根据上海市能源环境交易所相关数据以及相关文献对模型中的参数进行赋值如下:

$$a = 1\ 000, c_1 = 700, c_2 = 600, e = 6, \\ \theta = 0.4, \lambda = 3\ 500, E = 500, p_c = 50$$

### 4.1 减排投资系数比 $\eta$ 的影响分析

如图 3(a) 所示,减排投资系数比  $\eta$  是影响供应链选择减排方式的关键因素。 $\eta < \eta^*$  时,外包减排的利润远大于供应链自主减排, $\eta$  越小,说明自主减排的成本越高,难度越大,所以企业为了能够取得更高的效益应选择外包减排任务;当  $\eta > \eta^*$  时,供应链自主减排的利润高于外包减排, $\eta$  越大,两种减排的难度差异不大,企业应选择自主减排的减排方式。

从图 3(b)、图 3(c)、图 3(d) 可以看出,选择减排方式的影响因素  $\eta$  与交叉价格弹性系数、碳交易价格、减排投资系数有关。产品交叉价格弹性系数越大, $\eta$  越

件是合作后的利润高于自主减排的利润,所以对两种减排方式下的最优利润进行对比:

$$\pi_m^{NN*} - \pi_m^{MN*} > 0$$

小,企业越倾向于自主减排;碳交易价格的 增长, $\eta$  越大,企业越倾向于外包减排,是因为在碳交易政策下,企业在碳交易市场交易碳排放额的成本增加,促使企业提高高碳减排量水平,减少碳排放额的 买入,所以企业更倾向于选择碳减排更专业的节能服务公司外包减排任务;随着碳减排投资系数的增大, $\eta$  减小,企业越倾向于自主减排,减排成本的提高,会降低企业的减排积极性,企业会调低碳减排水平,减少低碳产品的生产,加大普通产品的产出,低碳生产需求以及低碳水平的降低,企业应倾向于自主减排,得到更优利润。

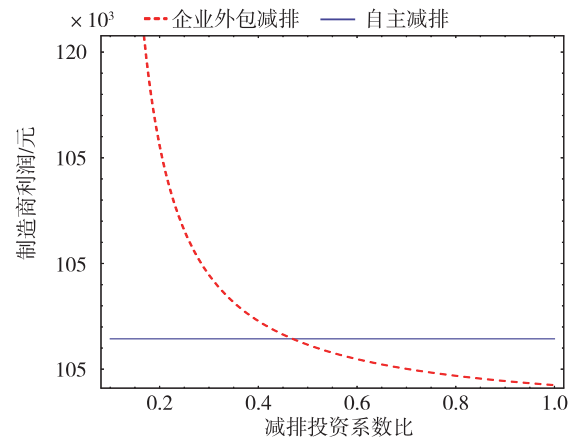


图 3 (a) 减排投资系数比对制造商利润的影响  
Fig. 3 (a) Effect of emission reduction investment coefficient on manufacturer's profit

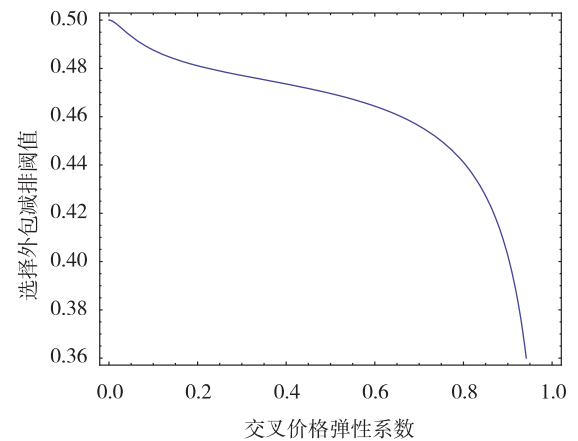


图 3 (b) 交叉价格弹性系数对选择外包减排阈值的影响  
Fig. 3 (b) The influence of cross-price elasticity coefficient on the selection of outsourcing emission reduction threshold

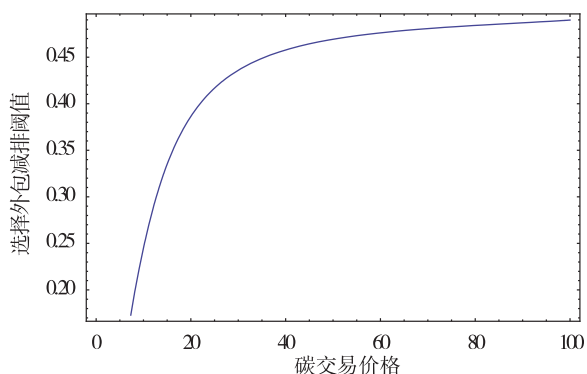


图 3 (c) 碳交易价格对选择外包减排阈值的影响  
Fig. 3 (c) The impact of carbon trading price on the selection of outsourcing emission reduction threshold

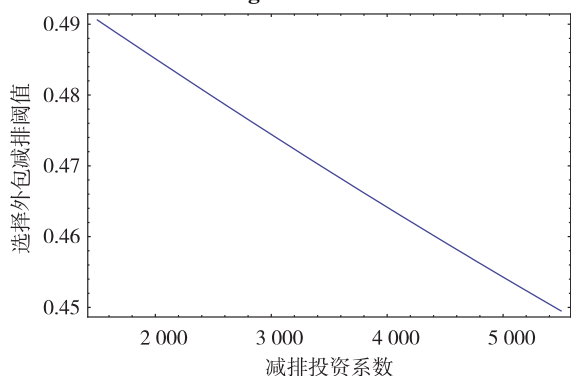


图 3 (d) 减排投资系数对选择外包减排阈值的影响  
Fig. 3 (d) Influence of emission reduction investment coefficient on the selection of outsourcing emission reduction threshold

### 4.2 交叉价格弹性系数 $\theta$ 的影响分析

由图 4(a)、图 4(b) ( $\eta=0.6$ ) 可知,无论供应链选择自主减排还是外包减排,随着产品交叉价格弹性系数增大,普通产品与低碳产品的价格竞争越激烈,会促使低碳产品碳减排量不断增加,碳减排水平的不断提高,但自主减排方式下的碳减排量增长幅度大于外包减排的碳减排量增长幅度,自主减排更易受交叉价格弹性系数的影响,此外随着产品交叉价格弹性系数的增长,两种减排方式的企业的利润不断增加,且差异较小。

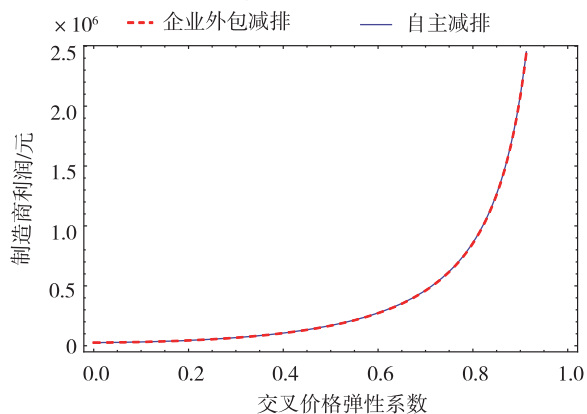


图 4 (a) 交叉价格弹性系数对制造商利润的影响  
Fig. 4 (a) Influence of cross-price elasticity coefficient on manufacturer's profit

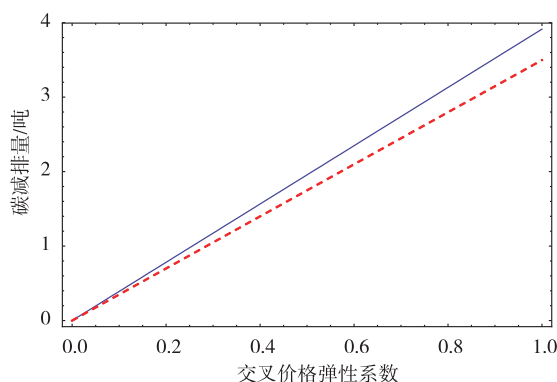


图 4 (b) 交叉价格弹性系数对碳减排量的影响  
Fig. 4 (b) Influence of cross-price elasticity coefficient on carbon emission reduction

### 4.3 碳交易价格 $p_c$ 的影响分析

由图 5(a)、图 5(b) ( $\eta=0.6$ ) 可知,在碳交易政策下,碳交易价格的不断增长,自主减排与外包减排两种减排方式的产品碳减排量是不断增长的,促进企业不断提高产品的碳减排水平,生产更加低碳的产品,但此时碳减排成本是上升的,企业的利润受到消极影响,随着碳交易价格的增长,企业的利润不断降低。所以政府要不断调控碳交易价格,使其处于合适的范围内,督促企业不断提高碳减排水平的同时保证企业的利润不受到消极影响,使经济与环境二者都达到最优水平。

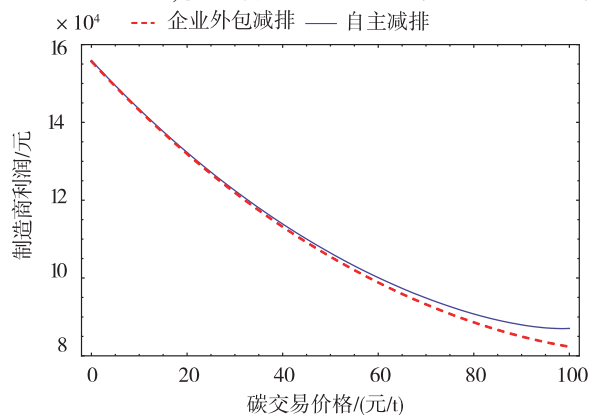


图 5 (a) 碳交易价格对制造商利润的影响  
Fig. 5 (a) The impact of carbon trading price on manufacturers' profits

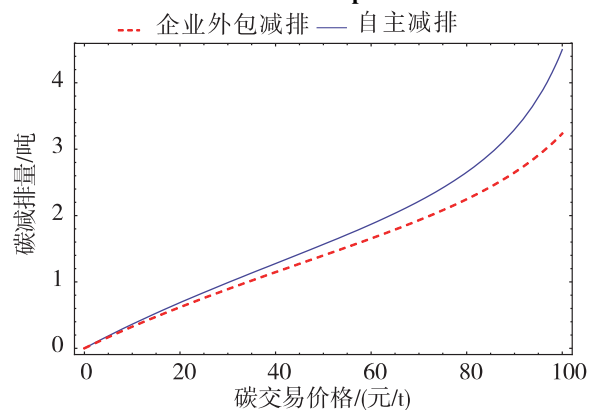


图 5 (b) 碳交易价格对碳减排量的影响  
Fig. 5 (b) The impact of carbon trading price on carbon emission reduction

#### 4.4 减排投资系数 $\lambda$ 的影响分析

由图 6(a)、图 6(b) ( $\eta=0.6$ ) 可知产品的碳减排量和企业利润均与减排投资系数负相关。两种减排方式下,随着减排投资系数的增长,企业进行产品减排的难度增加,使企业成本增加压力,会导致利润减少,降低了制造商减排积极性,产品的碳减排量下降,减少对低碳产品的投入,加大对普通产品的生产,对环境产生负面影响。此时政府可以考虑对企业进行适当的补贴,减轻企业经济压力,提高企业减排积极性。

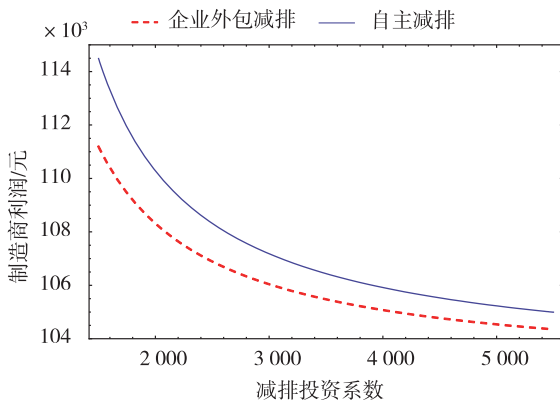


图 6 (a) 减排投资系数对制造商利润的影响

Fig. 6 (a) Influence of emission reduction investment coefficient on manufacturer's profit

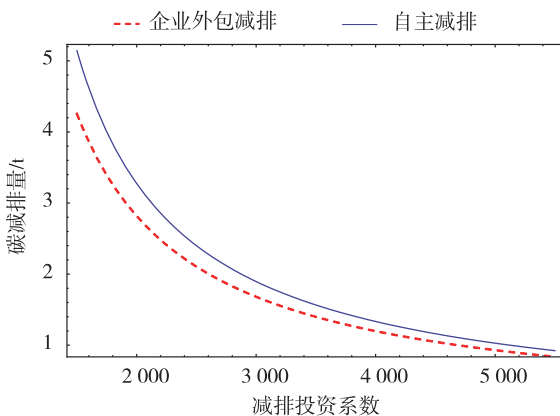


图 6 (b) 减排投资系数对碳减排量的影响

Fig. 6 (b) Influence of emission reduction investment coefficient on carbon emission reduction

## 5 结论与展望

本文研究在碳交易政策下供应链的减排决策,分别考虑制造商自主减排投入与外包减排两种减排方式,比较分析两种减排方式的最优决策,探究影响选择减排方式的因素,同时研究产品交叉价格弹性系数、碳交易价格、减排投资系数对不同情形下供应链利润、减排量等决策的影响,得到以下主要结论:

(1) 供应链减排方式的选择与减排投资系数比有关,减排投资系数比达到一定阈值时,供应链的最优选择是自主减排投入,当小于阈值时,供应链与节能服务公司合作减排,利润最优,此外能源费用托管型合作模式下制造商支付给节能服务公司的减排费用与碳交易价格呈正相关。

(2) 选择减排方式的阈值与交叉价格弹性系数、碳交易价格、减排投资系数有关。产品交叉价格弹性系数、减排投资系数越大,阈值越小,企业应倾向于自主减排;碳交易价格越高,阈值越大,企业应倾向于与节能服务公司合作,外包减排。

(3) 在碳政策下,产品交叉价格弹性系数越大,企业越倾向于生产低碳产品,提高碳减排水平;企业的减排投资系数越高,低碳产品的碳减排水平越低,供应链节点企业的利润越小;碳交易价格增长,产品的碳减排量增加,而企业的利润降低。

本文研究对企业、政府具有积极的指导意义。对企业来说在不同的因素影响下,及时调整内部的生产决策,选择适当的减排方式,才能满足市场需求,完成减排任务的同时经济效益也会得到提高;对政府而言,充分掌握碳政策的实践效果并进行调整,适当调控碳交易价格以及对减排负担重的企业进行补贴。

根据以上研究,提出建议:本文研究一个制造商与一个零售商构成两级供应链,但未考虑制造商竞争的情形,这将是未来的研究方向。在减排服务商与供应链合作的能源合同管理,本文只考虑了能源费用托管型,之后可以对三种合同管理模式进行探究,对比分析。

#### 参考文献(References):

- [1] OUYANG J, SHEN H. The choice of energy saving modes for an energy-intensive manufacturer considering non-energy benefits[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 141: 83—98.
- [2] LAMBA K, SINGH S P, MISHRA N. Integrated decisions for supplier selection and lot-sizing considering different carbon emission regulations in big data environment[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 128(2): 1052—1062.
- [3] WANG Z, WU Q. Carbon emission reduction and product collection decisions in the closed-loop supply chain with cap-and-trade regulation[J]. International Journal of Production Research, 2020, 1: 1—25.
- [4] 张令荣, 杨子凡, 程春琪. 碳配额交易政策下闭环供应链的



- 减排策略选择[J]. 管理工程学报, 2022, 36(1): 172—180.
- ZHANG Ling-rong, YANG Zi-fan, CHENG Chun-qi. Selection of emission reduction strategies for closed-loop supply chain under carbon quota trading policy[J]. Journal of Management Engineering, 2022, 36(1): 172—180.
- [5] 刘楠峰, 范莉莉, 李树良, 等. 碳交易制度对企业碳减排绩效影响[J]. 系统工程, 2022, 40(3): 13—23.
- LIU Nan-feng, FAN Li-li, LI Shu-liang, et al. Effect of carbon trading system on carbon emission reduction performance of enterprises[J]. Systems Engineering, 2022, 40(3): 13—23.
- [6] 武丹, 杨玉香. 考虑消费者低碳偏好的供应链减排微分博弈模型研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(4): 126—137.
- WU Dan, YANG Yu-xiang. Research on differential game model of supply chain emission reduction considering consumers' low-carbon preference[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(4): 126—137.
- [7] ZHANG C, LIU Y, HAN G. Two-stage pricing strategies of a dual-channel supply chain considering public green preference[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 151(6): 1—10.
- [8] 廖诺, 卢晨, 贺勇. 碳交易政策下节能服务公司参与供应链合作减排策略研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(2): 160—167.
- LIAO Nuo, LU Chen, HE Yong. Research on the strategy of energy saving service companies participating in supply chain cooperation and emission reduction under carbon trading policy[J]. China Management Science, 2021, 29(2): 160—167.
- [9] 贺勇, 陈志豪, 廖诺. 政府补贴方式对绿色供应链制造商减排决策的影响机制[J]. 中国管理科学, 2022, 30(6): 87—98.
- HE Yong, CHEN Zhi-hao, LIAO Nuo. Influence mechanism of government subsidy mode on emission reduction decision of green supply chain manufacturers[J]. Chinese Journal of Management Science, 2022, 30(6): 87—98.
- [10] 张文杰, 袁红平. 基于多目标加权灰靶决策模型的节能服务公司选择研究[J]. 中国管理科学, 2019, 27(2): 179—186.
- ZHANG Wen-jie, YUAN Hong-ping. Research on energy saving service company selection based on multi-objective weighted grey target decision model[J]. Chinese Journal of Management Science, 2019, 27(2): 179—186.
- [11] LIU H, HU M, ZHANG X. Energy costs hosting model: the most suitable business model in the developing stage of energy performance contracting[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172(3): 2553—2566.
- [12] 蒋曼曼, 陈达强. 基于产品替代的利他型低碳供应链协调研究[J]. 科技管理研究, 2021, 41(13): 195—202.
- JIANG Man-man, CHEN Da-qiang. Research on altruistic low-carbon supply chain coordination based on product substitution[J]. Science and Technology Management Research, 2021, 41(13): 195—202.
- [13] 刁心薇, 曾珍香, 孙丞. 混合碳政策下两产品供应链的协同研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(2): 149—159.
- DIAO Xin-wei, ZENG Zhen-xiang, SUN Cheng. Collaborative research on supply chain of two products under mixed carbon policy[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(2): 149—159.
- [14] 郭军华, 孙林洋, 张诚, 等. 碳税政策下考虑消费者低碳偏好的供应链定价与协调[J]. 系统工程, 2020, 38(6): 61—69.
- GUO Jun-Hua, SUN Lin-yang, ZHANG Cheng, et al. Supply chain pricing and coordination considering consumers' low-carbon preference under carbon tax policy[J]. Systems Engineering, 2020, 38(6): 61—69.
- [15] 柯春媛, 夏芄, 张国兴. 碳交易政策下制造商双模式生产决策问题研究[J]. 华东经济管理, 2019, 33(6): 177—184.
- KE Chun-yuan, XIA Peng, ZHANG Guo-xing. Research on dual-mode production decision of manufacturers under carbon trading policy[J]. East China Economic Management, 2019, 33(6): 177—184.
- [16] 缪文清, 沈炳良. 碳交易及补贴机制下供应链差别定价研究[J]. 技术经济, 2020, 39(9): 51—60.
- MIAO Wen-qing, SHEN Bing-liang. Research on supply chain differential pricing under carbon trading and subsidy mechanism[J]. Journal of Technology Economics, 2020, 39(9): 51—60.
- [17] 周艳菊, 胡凤英, 周正龙. 碳税政策下制造商竞争的供应链定价策略和社会福利研究[J]. 中国管理科学, 2019, 27(7): 94—105.
- ZHOU Yan-ju, HU Feng-ying, ZHOU Zheng-long. Research on supply chain pricing strategy and social welfare of manufacturers' competition under carbon tax policy[J]. China Management Science, 2019, 27(7): 94—105.