

doi: 10.3969/j.issn.1007-7375.2022.01.002

碳抵消机制下的制造/再制造生产决策优化研究

陈伟达, 陈政屹

(东南大学 经济管理学院, 江苏 南京 211189)

摘要: 为研究碳排放权抵消机制对制造/再制造生产决策的影响, 分别构建基于配额和基于排放量两种抵消机制的生产决策优化模型。分析抵消上限、再制造品接受度对产量、企业利润、消费者剩余和社会总福利的影响。结果表明, 抵消机制会提高新品产量并降低再制造品产量, 增加企业利润、消费者剩余和社会总福利, 以上变化幅度随抵消上限的提高先增大后减小。再制造品接受度较高时, 最优解对抵消上限变化更敏感。政府应将抵消上限设定在低水平且谨慎调整, 可通过适度牺牲企业利润提高社会福利。拥有高配额的企业在配额机制下运作更具效益, 反之在排放量机制下更优。

关键词: 碳抵消机制; 碳限额与交易; 制造/再制造; 生产决策

中图分类号: F272.3

文献标志码: A

文章编号: 1007-7375(2022)01-0011-08

Optimal Manufacturing/Remanufacturing Production Decisions Under Carbon Offset Mechanism

CHEN Weida, CHEN Zhengyi

(School of Economics & Management, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Carbon offset mechanism is an important supplementary regulation of carbon market. To study the impact of carbon offset mechanism on manufacturing/remanufacturing production decisions, two production decisions models are constructed respectively for emission-based and allowance-based carbon offsets mechanism. Through model solving and numerical analysis, the optimal decisions under the two models are compared to explore the impact of offset cap, and acceptance of remanufactured products on optimal production decisions. The results show that, the offset mechanism will increase the quantity of new products and reduce the quantity of remanufactured ones, and improve the firm's profit, consumer surplus and social welfare. Raising offset cap will strengthen this trend. However, an increase in the offset cap does not always reduce the cost of carbon emissions. This trend reverses when offset cap is too high. Optimal strategies are more sensitive to offset cap when the acceptance of remanufactured products is large. For government, a reasonable offset cap should be set to improve social welfare, although this may reduce the firm's profit. Manufacturers with high free allowance can earn more profit under allowance-based mechanism than that under emission-based mechanism, and vice versa.

Key words: carbon offsets mechanism; cap-and-trade regulation; manufacturing/remanufacturing; production decisions

因CO₂为主的温室气体大量排放导致的全球变暖问题已成为全球治理的重要议题, 也引起了社会的广泛关注, 世界各国政府都在努力平衡经济发展与节能减排之间的关系。2005年《京都议定书》正式生效, 由此形成的碳排放权交易机制将碳排放权视作一种可在碳市场流通的商品, 旨在市场化条件下引导企业 and 国家进行减排。同年, 欧盟采用碳限

额与交易制度建立碳市场, 是目前规模最大、最成熟的碳排放权交易体系。我国于2011年10月开始碳排放权交易试点工作, 并在2017年12月启动全国碳市场建设。与欧盟相同, 我国碳市场采用碳限额与交易制度, 纳管企业需使用配额 (Chinese emission allowances, CEA)与核证减排量 (Chinese certification emission reductions, CCER)对碳排放进行履约, 即

收稿日期: 2020-08-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (71971058, 71571042)

作者简介: 陈伟达 (1965—), 浙江省人, 教授, 博士, 主要研究方向为再制造运作管理和低碳运作管理。

一个履约期内企业需要拥有与碳排放等额的CEA和CCER。

随着碳限额与交易制度的发展，碳排放权抵消机制成为碳市场的重要补充机制，该机制允许纳管企业使用一定量的CCER进行碳排放履约。目前，我国7个试点碳市场均引入抵消机制，制定了不尽相同的政策，其中6个试点发布了专门的碳排放权抵消机制管理规定。从规定上看，按照CCER可使用量计算方法的不同可将抵消机制分为两类：1) 基于配额的抵消机制(下文简称：配额机制); 2) 基于排放量的抵消机制(下文简称：排放量机制)。值得关注的是，与CEA相比CCER具有价格优势，企业可通过充分使用CCER获益。表1介绍了2019年我国碳市场的相关情况。以上海碳市场为例，其CEA和CCER的平均价格分别为33.42 元/t、3.61 元/t，CCER总成交量达 1.512×10^7 t，若全部用于履约可为纳管企业节约碳排放成本4.5亿元。

表 1 2019年中国碳市场平均价格与抵消机制规定				
Table 1 The average price of CEA and CCER, and offsets mechanism policy of China's pilot carbon market in 2019				
交易所	CEA/(元·t ⁻¹)	CCER/(元·t ⁻¹)	抵消上限/%	机制类别
北京	83.27	10.43	5	配额
上海	33.42	3.61	1	配额
天津	13.98	\	10	排放量
广东	16.77	16.84	10	排放量
深圳	10.19	\	10	排放量
湖北	29.50	24.42	10	配额
重庆	19.90	\	8	排放量

除了政府实施各项碳政策外，企业也在选择绿色生产模式以降低碳排放量。其中，具有低成本、低耗材、低排放优势的再制造策略受到企业的广泛关注，如惠普和卡特彼勒等。再制造是指通过检测、拆卸、维修和测试等一系列程序将废旧产品恢复到原始工作状态的一种工业过程^[1-3]，可有效实现资源循环利用，具有显著的碳减排效益，是企业向低碳生产转型的有效途径。再制造和碳市场在碳减排方面具有较强的一致性。

目前，许多学者对碳限额与交易制度下的制造/再制造生产优化决策问题展开研究。杜少甫等^[4]在国内首先建立碳限额与交易制度下的生产决策优化模型。常香云等^[5]对比研究无碳排放约束、碳税和碳限额3种碳政策下的制造/再制造生产决策问题。

Liu等^[6]在需求分布信息有限的情况下研究碳限额、碳税和碳排放限额与交易制度3种碳政策对再制造的影响。Miao等^[7]研究在碳税和碳限额与交易制度下考虑以旧换再的再制造生产决策。Wang等^[8]在不同的资本条件下建立3种优化模型，研究生产决策和融资决策问题。陈玉玉等^[9]基于碳限额交易制度研究再制造企业生产和减排投资决策。Zhou等^[10]在碳税制度下研究回收品质量不确定的再制造问题。张焕勇等^[11]将消费者划分为高端和低端群体，并将产品拓展为新品、再制造品、翻新品，研究碳限额与交易制度下的企业再制造问题。

尽管以上文献对碳限额与交易制度下的制造/再制造生产决策进行了广泛的研究，但是涉及碳排放权抵消机制的研究还很少见。目前，对碳排放权抵消机制的研究聚焦于机制的运作情况以及CEA和CCER的价格关系。李峰等^[12]比较分析我国各试点碳市场的抵消机制。Mansanetbataller等^[13]通过欧盟碳市场实证研究发现，在碳政策确定时，欧盟碳市场配额(European Union allowance, EUA)和核证减排量(certification emission reductions, CER)价格具有较强的一致性。Nazifi等^[14]发现对CER的使用限制和抵消机制政策变化是影响EUA和CER价格差异的主要因素。Barrieu等^[15]通过均衡框架证明履约规则是影响EUA和CER价格的显著因素。但是，这些研究大都从理论以及实证角度分析碳排放权抵消机制，还没有从运作管理的角度分析其作用，更没有文献将其与制造/再制造问题相结合。

基于此，本文在碳限额与交易制度下分析碳抵消机制对制造/再制造生产决策的影响。分别构建在碳抵消机制下的基于配额机制和基于排放量机制的生产决策优化模型，分析在不同抵消上限、政府免费配额和再制造品接受度下，两种抵消机制对制造/再制造生产决策的影响。旨在通过该研究，为企业和政府提供更多决策依据和理论指导。

1 问题描述与假设

1.1 问题描述

考虑一个垄断制造/再制造企业的单周期决策，在该周期内同时生产新品和再制造品。新品的生产成本和碳排放量较高。另外，新品与再制造品在市场上存在竞争关系，消费者对新品和再制造品的接

受度不同。在碳限额与交易制度下, 政府在当期给予企业一定免费配额, 企业在期末使用CEA和CCER对碳排放进行履约, 不足或多余的部分可通过碳市场进行交易, 其中CCER的使用受抵消机制约束。

1.2 基本假设

本文用到的基本假设如下。

1) 新品与再制造品异质且存在竞争, 消费者对于新品的接受度大于再制造品^[16-17]。其产量竞争关系满足 $\begin{cases} p_n = Q - q_n - \alpha q_r; \\ p_r = \alpha(Q - q_n - q_r) \end{cases}$ 。

2) 企业的CEA、CCER、碳排放量只占市场的极小部分, 其增减不会影响碳市场价格, 即在单周内碳价格不发生波动。

3) 不考虑由于项目来源等因素对CCER使用形成的限制, CCER在碳市场充分可得无交易成本。

4) 随着市场对CCER的需求增加, CEA和CCER的价格将分别出现下跌和上涨, CEA的价格总是不小于CCER^[15]。

1.3 符号说明

本文用到的符号及其含义如表2所示。

表2 符号及其含义

Table 2 Variables and parameters

类型	符号	符号含义
决策变量	q_n/q_r	新品/再制造品的产量
	p_n/p_r	新品/再制造品的单位售价
	c_n/c_r	新品/再制造品的单位成本
	$\varepsilon_n/\varepsilon_r$	新品/再制造品的单位碳排放量
	E	$E = \varepsilon_n q_n + \varepsilon_r q_r$, 碳排放总量
	Q	产品的市场容量
相关参数	α	消费者对于再制造品的接受度
	$\zeta_{\text{CEA}}/\zeta_{\text{CCER}}$	配额/核证减排量的单位价格
	E_g	政府发放的免费配额量
	K	核证减排量抵消上限, $K \in [0, 1]$
	B	碳价格系数, $B > 0$
	β	CCER对CEA的替代系数, $\beta \in [0, 1]$
	θ	碳排放量对社会总福利的影响系数
相关函数	$C_1(K)/C_2(K)$	$\zeta_{\text{CEA}} = C_1(K)$, $\zeta_{\text{CCER}} = C_2(K)$, CEA、CCER价格关于 K 函数

2 模型建立与求解

2.1 模型建立

1) 不考虑抵消机制的最优生产决策模型。

在不考虑抵消机制时, 碳限额与交易制度下的企业利润函数为

$$\Pi_1 = (p_n - c_n)q_n + (p_r - c_r)q_r + (E_g - E)\zeta_{\text{CEA}} \quad (1)$$

以最大利润为目标, 建立最优生产决策模型 $\max \Pi_1$, 记为模型1。

2) 考虑配额机制的最优生产决策模型。

引入碳排放权抵消机制后, 鉴于CEA与CCER实际存在的价格差, 企业可以通过购买并使用CCER进行履约获得收益, 这使得碳排放履约机理发生变化。详见图1。

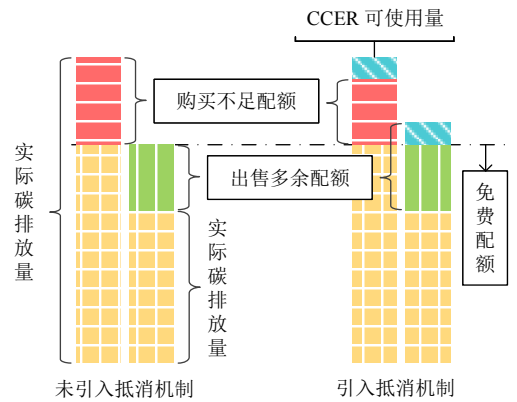


图1 碳排放履约机理

Figure 1 Carbon emissions compliance mechanism

在配额机制下, $\text{CCER可用量} = \text{政府免费配额} E_g \times \text{抵消上限} K$ 。根据履约机理, 建立考虑配额机制的企业利润函数为

$$\Pi_2 = (p_n - c_n)q_n + (p_r - c_r)q_r - KE_g\zeta_{\text{CCER}} + [(1 + K)E_g - E]\zeta_{\text{CEA}} \quad (2)$$

以最大利润为目标, 建立最优生产决策模型 $\max \Pi_2$, 记为模型2。

3) 考虑排放量机制的最优生产决策模型。

在排放量机制下, $\text{CCER可用量} = \text{排放量} E \times \text{抵消上限} K$ 。根据履约机理, 建立考虑排放量机制的企业利润函数为

$$\Pi_3 = (p_n - c_n)q_n + (p_r - c_r)q_r - KE\zeta_{\text{CCER}} + [E_g - (1 - K)E]\zeta_{\text{CEA}} \quad (3)$$

以最大利润为目标, 建立最优生产决策模型 $\max \Pi_3$, 记为模型3。

根据文献[15], 记 $\zeta_{\text{CEA}} = C_1(K) = B(1 - \beta K)$, $\zeta_{\text{CCER}} = C_2(K) = B(1 - \beta)K$ 。其中, B 代表碳价格系数; β 代表CCER对CEA的替代系数。具体可参考图2。

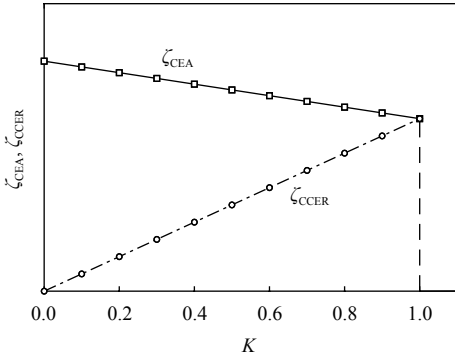


图 2 抵消上限 K 对碳价格 ζ_{CEA} 与 ζ_{CCR} 的影响

Figure 2 The effect of K on ζ_{CEA} and ζ_{CCR}

将 $\zeta_{\text{CEA}} = C_1(K)$, $\zeta_{\text{CCR}} = C_2(K)$ 代入模型 2 和模型 3, 得到最优生产决策模型 $\max \Pi'_2$ 、 $\max \Pi'_3$, 分别记为模型 4 和模型 5, 其利润函数分别为

$$\begin{cases} \Pi'_2 = (p_n - c_n)q_n + (p_r - c_r)q_r - KE_g C_2(K) + [(1+K)E_g - E]C_1(K); \\ \Pi'_3 = (p_n - c_n)q_n + (p_r - c_r)q_r - KEC_2(K) + [E_g - (1-K)E]C_1(K). \end{cases} \quad (4)$$

$$(5)$$

2.2 模型求解

2.2.1 抵消机制对生产决策最优解的影响

再制造品可节省 60% 的电能、70% 的金属材, 减少 80% 的空气污染物排放, 价格可达新品的 50% ~ 70%^[18-21]。并且在实际生产中 $q_n, q_r \geq 0$ 。据此, 假设 $\alpha\varepsilon_n - \varepsilon_r > 0$, 即消费者对再制造品的接受度较高且再制造品具有低排放优势。然后, 对模型求解, 可得定理 1。

定理 1 企业的生产决策最优解为

$$\begin{cases} q_n^i = 0, q_r^i = \frac{\alpha Q - C_R^i}{2\alpha}, \text{ 若 } S^i(1-\alpha)Q; \\ q_n^i = \frac{(1-\alpha)Q - C_N^i + C_R^i}{2(1-\alpha)}, q_r^i = \frac{\alpha C_N^i - C_R^i}{2\alpha(1-\alpha)}, \\ \text{若 } (1-\alpha)C_N^i \leq S^i < (1-\alpha)Q; \\ q_n^i = \frac{Q - C_N^i}{2}, q_r^i = 0, \text{ 若 } S^i < (1-\alpha)C_N^i. \end{cases}$$

其中, $i = 1, 2$, 分别代表模型 4、5 的最优解和相关量。为简化表达, 记 $S^i = C_N^i - C_R^i$; $C_N^1 = c_n + \varepsilon_n C_1(K)$; $C_R^1 = c_r + \varepsilon_r C_1(K)$; $C_N^2 = c_n + K\varepsilon_n C_2(K) + (1-K)\varepsilon_n C_1(K)$; $C_R^2 = c_r + K\varepsilon_r C_2(K) + (1-K)\varepsilon_r C_1(K)$ 。

抵消上限 K 是抵消机制的重要政策内容, 各碳市场对 K 的设定不尽相同, 选取 K 作为主要变量展开研究。另外, 由于实际生产中满足只生产新品或再制造品情况较少^[18-21]。本文考虑同时生产新品和再制造品的情形, 对最优解求关于 K 的偏导数, 可得

$$\begin{cases} \frac{\partial q_n^1}{\partial K} = \frac{B\beta(\varepsilon_n - \varepsilon_r)}{2(1-\alpha)}, \frac{\partial q_r^1}{\partial K} = \frac{-B\beta(\alpha\varepsilon_n - \varepsilon_r)}{2(1-\alpha)}; \\ \frac{\partial q_n^2}{\partial K} = B(1+\beta-2K) \frac{(\varepsilon_n - \varepsilon_r)}{2(1-\alpha)}, \frac{\partial q_r^2}{\partial K} = B(2K - \beta - 1) \cdot \frac{(\alpha\varepsilon_n - \varepsilon_r)}{2(1-\alpha)}. \end{cases}$$

已知 $\varepsilon_n > \varepsilon_r$, $\alpha\varepsilon_n - \varepsilon_r > 0$, 易得命题 1 和命题 2, 这里不再证明。

命题 1 配额机制下, 新品 (再制造品) 产量随着 K 提高而增加 (减少), 产品总量和碳排放量增加。

命题 2 排放量机制下, 当 $K < \frac{\beta+1}{2}$ 时, 新品 (再制造品) 产量随着 K 提高而增加 (减少), 产品总量和碳排放量增加; 当 $K \geq \frac{\beta+1}{2}$ 时, 新品 (再制造品) 产量随着 K 提高而减少 (增加), 产品总量和碳排放量减少。

2.2.2 抵消机制对企业利润的影响

为分析抵消机制对企业利润的影响, 求式 (4) 和式 (5) 关于 K 的偏导得到

$$\begin{cases} \frac{\partial \Pi'_2}{\partial K} = B[\beta E - (2K + \beta - 1)E_g]; \\ \frac{\partial \Pi'_3}{\partial K} = B[(1+\beta-2K)E - \beta E_g]. \end{cases} \quad (6)$$

$$(7)$$

由导数易得命题 3、命题 4。

命题 3 配额机制提高了企业利润。当 $E_g < \frac{\beta E}{1+\beta}$ 时, Π'_2 随 K 提高而增加; 当 $E_g \geq \frac{\beta E}{1+\beta}$ 时, Π'_2 在 $K \in (0, \frac{\beta E + (1-\beta)E_g}{2E_g})$ 随 K 提高而增加, 在 $K \in (\frac{\beta E + (1-\beta)E_g}{2E_g}, 1)$ 随 K 提高而减少。

证明 为了使得 $\frac{\partial \Pi'_2}{\partial K} \geq 0$, 则有 $K \leq \frac{\beta E + (1-\beta)E_g}{2E_g}$ 。当 $E_g < \frac{\beta E}{1+\beta}$ 时, $\frac{\partial \Pi'_2}{\partial K}$ 在 $K \in [0, 1]$ 大于零; 当 $E_g > \frac{\beta E}{1+\beta}$ 时, $\frac{\partial \Pi'_2}{\partial K}$ 在 $K \in (0, \frac{\beta E + (1-\beta)E_g}{2E_g})$ 大于零, $K \in (\frac{\beta E + (1-\beta)E_g}{2E_g}, 1)$ 小于零。又当 $K=1$ 时, 抵消机制相当于降低了 CEA 价格, 企业利润高于引入抵消机制前的利润。

命题 4 排放量机制提高了企业利润, 当 $E_g < \frac{(1+\beta)E}{\beta}$ 时, Π'_3 在 $K \in (0, \frac{(1+\beta)E - \beta E_g}{2E})$ 随 K 提高而增加, 在 $K \in (\frac{(1+\beta)E - \beta E_g}{2E}, 1)$ 随 K 提高而减少; 当 $E_g \geq \frac{(1+\beta)E}{\beta}$ 时, Π'_3 随 K 提高而减少。

证明过程与命题3类似, 这里不再阐述。

2.2.3 抵消机制对消费者剩余的影响

消费者剩余CS是指消费者愿意的支付价格与实际支付价格的差额, 根据文献[22]的算式可得

$$CS = \int_{p_r}^{p_n} (x - p_n) dx + \int_{p_r}^{1-\alpha} (x - p_r) dx = \frac{(q_n + \alpha q_r)^2 + \alpha(1-\alpha)q_r^2}{2} \quad (8)$$

将定理1中的最优解代入式(8), 并对 K 求导可得

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial CS_1}{\partial K} = \frac{1}{2} B \beta E; \\ \frac{\partial CS_2}{\partial K} = \frac{1}{2} B(1+\beta-2K)E. \end{array} \right. \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial CS_1}{\partial K} = \frac{1}{2} B \beta E; \\ \frac{\partial CS_2}{\partial K} = \frac{1}{2} B(1+\beta-2K)E. \end{array} \right. \quad (10)$$

其中, CS_1 、 CS_2 分别代表配额机制和排放量机制下的消费者剩余。经观察得命题5、命题6。

命题5 配额机制增加了消费者剩余, CS_1 随 K 提高而增加。

命题6 排放量机制增加了消费者剩余, 当 $K < \frac{1+\beta}{2}$ 时, CS_2 随 K 提高而增加; 当 $K \geq \frac{1+\beta}{2}$ 时, CS_2 随 K 提高而减少。

由于两种抵消机制下的最优决策不同且算式复杂, 本文将通过数值分析对比 CS_1 、 CS_2 。

2.2.4 抵消机制对社会总福利的影响

本节分析碳排放权抵消机制对于社会福利 W 的影响。根据文献[23], 算式为

$$W = \Pi + CS - \theta E. \quad (11)$$

其中, Π 、 θ 和 E 分别代表企业利润、单位碳排放量的社会价值[23]、碳排放量。首先分析不考虑碳排放因素的情况(即 $\theta=0$), 将定理1中的最优解代入式(13), 并对 K 求导得到

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial W_1}{\partial K} = B \left[\frac{3}{2} \beta E - (2K + \beta - 1) E_g \right]; \\ \frac{\partial W_2}{\partial K} = B \left[\frac{3}{2} (1 + \beta - 2K) E - \beta E_g \right]. \end{array} \right. \quad (12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial W_1}{\partial K} = B \left[\frac{3}{2} \beta E - (2K + \beta - 1) E_g \right]; \\ \frac{\partial W_2}{\partial K} = B \left[\frac{3}{2} (1 + \beta - 2K) E - \beta E_g \right]. \end{array} \right. \quad (13)$$

其中, W_1 、 W_2 分别为配额机制和排放量机制下的社会总福利。经观察可得命题7、命题8, 证明方法与命题3类似, 此处不再证明。

命题7 配额机制下, 当 $E_g < \frac{3\beta E}{2(1+\beta)}$ 时, W_1 随 K 提高而增加; 当 $E_g \geq \frac{3\beta E}{2(1+\beta)}$ 时, W_1 在 $K \in (0, \frac{3\beta E + 2(1-\beta)E_g}{4E_g})$ 随 K 提高而增加, 在 $K \in (\frac{3\beta E + 2(1-\beta)E_g}{4E_g}, 1)$ 随 K 提高而减少。

1)随 K 提高而减少。

命题8 排放量机制下, 当 $E_g < \frac{3(1+\beta)E}{2\beta}$ 时, W_2 在 $K \in (0, \frac{3(1+\beta)E - 2\beta E_g}{6E})$ 随 K 提高而增加, 在 $K \in (\frac{3(1+\beta)E - 2\beta E_g}{6E}, 1)$ 随 K 提高而减少; 当 $E_g \geq \frac{3(1+\beta)E}{2\beta}$ 时, W_2 随 K 提高而减少。

当 $\theta \neq 0$ 时, 由于算式复杂, 本文将通过数值分析研究抵消上限对社会总福利的影响。

3 数值分析

当前, 我国碳市场的免费配额发放较为充足, 超半数碳市场的抵消上限设定为10%, 并参考表1, 结合文献[18-21], 对相关参数进行设定, 具体见表3。

表3 相关参数设定

Q	c_n	c_r	ε_n	ε_r	α	E_g	K	B	β	θ
800	150	100	4	1	0.7	950	0.1	20	0.25	1

3.1 抵消上限对最优生产决策的影响

图3、图4分别描述了在不同抵消上限 K 下, 配额和排放量机制下的制造/再制造最优生产决策及碳排放量 E 的变化。

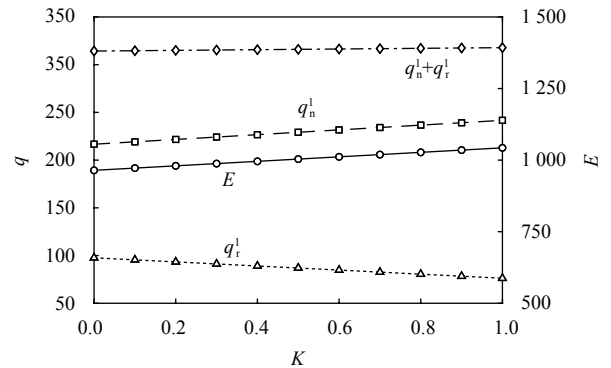


图3 配额机制下抵消上限 K 对最优生产决策的影响

Figure 3 The effect of K on optimal production decision under allowance-based mechanism

由图3可知, 在配额机制下, 由于 K 的提高使企业可以使用更多CCER且降低了CEA价格, 这减少了企业碳排放成本, 削弱了再制造品的低排放优势, 企业生产更多的新品并减少再制造品产量, 产品总量小幅上升, 碳排放量提高。这验证了命题1。

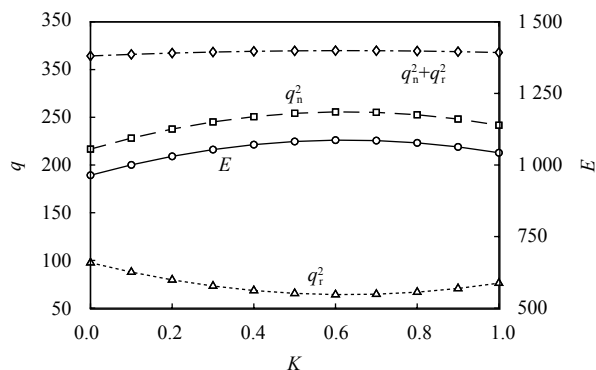


图4 排放量机制下抵消上限 K 对最优生产决策的影响
Figure 4 The effect of K on optimal production decision under emission-based mechanism

由图4可知,在排放量机制下,当 $K < \frac{\beta+1}{2}$ 时, K 的提高使企业生产更多的新品并减少再制造品产量,产品总量小幅上升,碳排放量增加。当 $K \geq \frac{\beta+1}{2}$ 时,由于 K 的提高引起的CCER价格上涨超出了CCER可使用量提高带来的排放成本节约,增强了再制造品的低排放优势,企业生产更多的再制造品并减少新品产量,产品总量小幅下降,碳排放量减少。这验证了命题2。

由于抵消机制降低了碳排放成本,相较于机制引入前,企业总是会选择生产更多的新品,降低再制造产量,造成更多的碳排放。

3.2 再制造品接受度对最优生产决策的影响

图5、图6分别描述了在不同抵消上限的情形下,再制造品接受度对配额和排放量机制下的制造/再制造最优生产决策的影响。

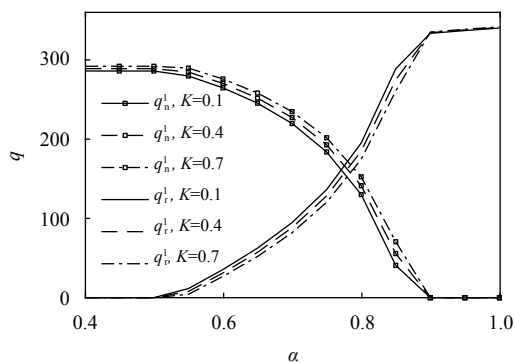


图5 配额机制下再制造品接受度 α 对最优生产决策的影响
Figure 5 The effect of α on optimal production decision under allowance-based mechanism

观察可知,当 α 较低时企业只生产新品,随 α 提高增产再制造品的同时减产新品,并在 α 较大时只生产再制造品,当 α 继续向1趋近,再制造品产量小

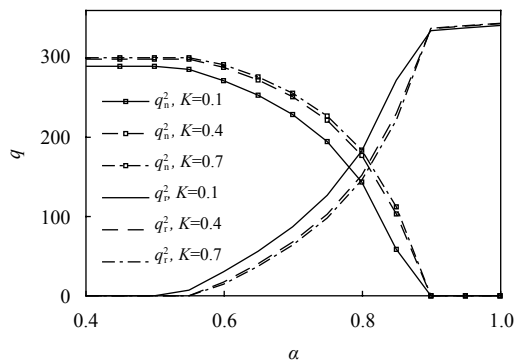


图6 排放量机制下再制造品接受度 α 对最优生产决策的影响
Figure 6 The effect of α on optimal production decision under emission-based mechanism

幅增加。在同时生产新品和再制造品的情形下, α 越大时最优生产决策对于 K 变化越敏感,再制造品接受度高的企业更应关注碳市场抵消上限政策的变化。

对比图5、图6, K 变化对于排放量机制下的最优生产决策影响更显著。这是由于此机制下产量不仅受到CEA价格影响,还受到CCER可使用量及价格的双重影响。观察图6可以发现,在 K 较大时其变化影响减弱($K=0.4$ 和 0.7 时,曲线接近)。这进一步验证了命题1、命题2。

3.3 政府免费配额与抵消上限对企业利润差额的影响

图7描述了政府免费配额 E_g 、抵消上限 K 变化对配额和排放量机制下企业利润的差额 $\Pi'_3 - \Pi'_2$ 的影响。

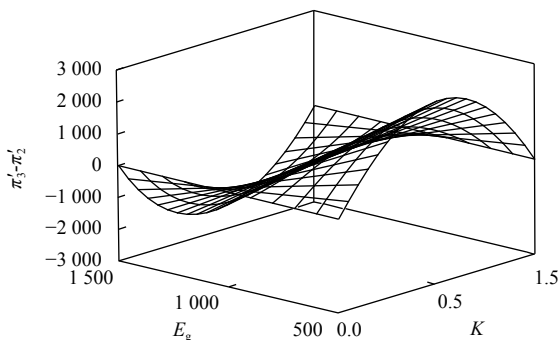


图7 政府免费配额和抵消上限 K 对两种机制下企业利润差额的影响
Figure 7 The effect of E_g and K on $\Pi'_3 - \Pi'_2$

由图3、图4可知,当前参数下 E 在1000左右。观察图7可知,当 E_g 明显大于(小于) E 时,配额(排放量)机制下的企业利润更高, K 在一定范围内提高会放大这种差异。但若是 K 过高,由于CEA与CCER的同质化,两种机制在企业利润上的差异被削减。同样,在 K 极小时差异也有限。

若制造/再制造企业的碳减排水平较高, 能取得高于实际排放量的免费配额, 在配额机制下运作更具经济效益。反之, 在排放量机制下运作更优。制造/再制造行业具有工厂分散的特点, 例如卡特彼勒在中国多省市设立了工厂, 加之目前碳市场的抵消机制各不相同, 碳排放权抵消机制能对企业的业务布局和投资决策造成具有现实意义的影响。例如企业可优先对在配额机制下运作的工厂进行碳减排投资, 获得超出行业的碳减排水平。

3.4 抵消上限对消费者剩余和社会总福利的影响

图8描述了 $\theta = 1$ 时抵消上限 K 对两种机制下的企业利润 Π 、消费者剩余 CS 和社会总福利 W 的影响。

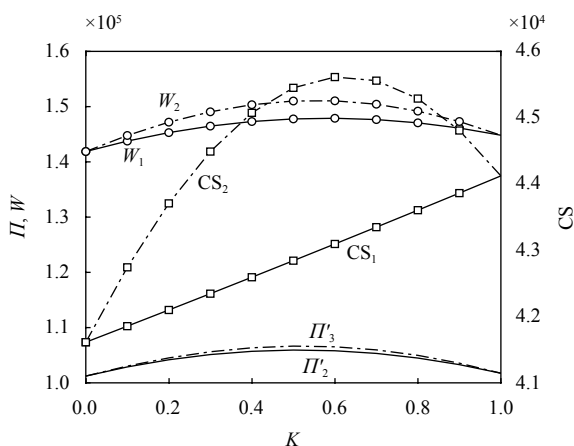


图8 抵消上限对企业利润、消费者剩余和社会总福利的影响

Figure 8 The effect of K on Π , CS and W

由图8可知, 随着 K 的提高, 企业利润 Π_2 和 Π_3 分别在分界点 $K = \frac{\beta E + (1-\beta)E_g}{2E_g}$ 、 $K = \frac{(1+\beta)E - \beta E_g}{2E}$ 呈现出先增后减的趋势, 验证了命题3、命题4。在配额机制下, 消费者剩余始终随着 K 提高而增加。在 $K \leq \frac{3\beta E + 2(1-\beta)E_g}{4E_g}$ 时, 社会总福利随 K 的提高而增加, 由于企业利润的变化带动社会总福利在 $K \geq \frac{3\beta E + 2(1-\beta)E_g}{4E_g}$ 时, 随 K 的提高而下降。在排放量机制下, 以 $K = \frac{1+\beta}{2}$ 为分界点, 消费者剩余随 K 的提高先增加后下降, 在社会总福利上, 以 $K = \frac{3(1+\beta)E - 2\beta E_g}{6E}$ 为分界点呈现更加明显的变动。

值得注意的是, 在设定抵消上限时适度牺牲企业利润能够实现社会总福利最大化, 政府可以据此合理设定抵消上限。并且, 在当前参数的分析下, 排放量机制更具优势。

4 结论

本文研究了碳限额与交易制度下考虑碳排放权抵消机制的制造/再制造生产决策优化问题。根据我国碳市场实际情况引入抵消机制, 构建了制造/再制造生产决策优化模型, 并得到相应的最优解。对比分析了基于配额和基于排放量两种抵消机制下, 抵消上限和再制造品接受度变化对最优生产决策的影响, 并进一步分析抵消上限对企业利润、消费者剩余和社会总福利的影响。主要结论如下。

1) 抵消机制使新品增产, 再制造品减产。提高抵消上限会使企业制造更多新品, 减少再制造品产量, 产品总量和碳排放量增加。排放量机制下, 在上限较高时提高上限会带来相反效果。

2) 企业同时生产新品和再制造品时, 消费者对再制造品的接受度越高, 抵消上限变化对最优生产决策的影响越大。

3) 政府免费配额影响两种抵消机制在企业利润上的大小对比。配额较高时, 配额机制下的企业利润更高; 配额较少时, 排放量机制下的企业利润更高。提高抵消上限会使得利润差距先放大后缩小。

4) 抵消机制提高了企业利润, 但提高抵消上限不总是降低碳排放成本。随着抵消上限的提高, 企业利润先增加后减少。

5) 抵消机制增加了消费者剩余和社会总福利。配额机制下, 消费者剩余随抵消上限增加而增加; 排放量机制下, 提高抵消上限会使消费者剩余先增加后减少; 社会总福利均随抵消上限提高先增加后减少。

碳排放权抵消机制能给企业、消费者和社会带来福利, 但会使再制品产量降低。抵消上限在一个适中区间内变动时的影响具有不确定性, 政府应设定一个较低水平的上限, 并且谨慎调整, 确保碳政策调整方向精准可控。政府在设定抵消上限时可以适当牺牲企业利润以获得更大的社会福利。鉴于我国当前的碳政策, 基于排放量的抵消机制可以给社会带来更多福利。

需要指出的是, 本文假设碳市场中的CCER充分可得无交易成本, 但实际上CCER以市场主体间的协议交易为主, 存在交易壁垒。下一步可探讨在CCER供给不充足且存在壁垒的情况下抵消机制对企业生产决策的影响。

参考文献:

- [1] CHEN M. End-of-life vehicle recycling in China: now and the future[J]. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 2005, 57(10): 20-26.
- [2] GAGNO R J, MORGAN S D. Remanufacturing scheduling systems: an exploratory analysis comparing academic research and industry practice[J]. *International Journal of Rapid Manufacturing*, 2014, 4(2/3/4): 179.
- [3] AYDIN R, KWONG C K, JI P, et al. Coordination of the closed-loop supply chain for product line design with consideration of remanufactured products[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 114: 286-298.
- [4] 杜少甫, 董骏峰, 梁樑, 等. 考虑排放许可与交易的生产优化[J]. *中国管理科学*, 2009, 17(3): 81-86.
DU Shaofu, DONG Junfeng, LIANG Liang, et al. Optimal production policy with emission permits and trading[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2009, 17(3): 81-86.
- [5] 常香云, 王艺璇, 朱慧贇, 等. 集成碳排放约束的企业制造/再制造生产决策[J]. *系统工程*, 2014, 32(2): 49-56.
CHANG Xiangyun, WANG Yixuan, ZHU Huiyun, et al. Optimal production decision for manufacturing/remanufacturing with constraint of carbon emission[J]. *Systems Engineering*, 2014, 32(2): 49-56.
- [6] LIU B, HOLMBOM M, SEGERSTEDT A, et al. Effects of carbon emission regulations on remanufacturing decisions with limited information of demand distribution[J]. *International Journal of Production Research*, 2015, 53(2): 532-548.
- [7] MIAO Z, MAO H, FU K, et al. Remanufacturing with trade-ins under carbon regulations[J]. *Computers & Operations Research*, 2018, 89: 253-268.
- [8] WANG Y, CHEN W, LIU B, et al. Manufacturing/remanufacturing decisions for a capital-constrained manufacturer considering carbon emission cap and trade[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 140: 1118-1128.
- [9] 陈玉玉, 李帮义, 柏庆国, 等. 碳交易环境下再制造企业生产及减排投资决策[J]. *控制与决策*, 2020, 35(3): 695-703.
CHEN Yuyu, LI Bangyi, BAI Qingguo, et al. Research on production and emission reduction investment decisions of the remanufacturing enterprise under carbon trading environment[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(3): 695-703.
- [10] ZHOU J, DENG Q, LI T. Optimal acquisition and remanufacturing policies considering the effect of quality uncertainty on carbon emissions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 186: 180-190.
- [11] 张焕勇, 李宇航, 韩云霞. 碳限额与交易机制下企业再制造生产决策研究[J]. *软科学*, 2018, 32(6): 87-91.
ZHANG Huanyong, LI Yuhang, HAN Yunxia. Research on remanufacturing strategy of enterprises under carbon cap-and-trade mechanism[J]. *Soft Science*, 2018, 32(6): 87-91.
- [12] 李峰, 王文举, 闫甜. 中国试点碳市场抵消机制[J]. *经济与管理研究*, 2018, 39(12): 94-103.
LI Feng, WANG Wenju, YAN Tian. The offset mechanism of China's pilot carbon market[J]. *Research on Economics and Management*, 2018, 39(12): 94-103.
- [13] MANSANETBATALER M, CHEVALLIER J, HERVEMIGNUCCI M, et al. EUA and sCER phase II price drivers: Unveiling the reasons for the existence of the EUA-sCER spread[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(3): 1056-1069.
- [14] NAZIFI F. Modelling the price spread between EUA and CER carbon prices[J]. *Energy Policy*, 2013, 56: 434-445.
- [15] BARRIEU P, FEHR M. Market-consistent modeling for cap-and-trade schemes and application to option pricing[J]. *Operations Research*, 2014, 62(2): 234-249.
- [16] FERRER G, SWAMINATHAN J M. Managing new and differentiated remanufactured products[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 203(2): 370-379.
- [17] FERRER G, SWAMINATHAN J M. Managing new and remanufactured products[J]. *Management Science*, 2006, 52(1): 15-26.
- [18] ZHANG J, CHEN M. Assessing the impact of China's vehicle emission standards on diesel engine remanufacturing[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 107: 177-184.
- [19] KASMAN A, DUMAN Y S. CO₂ emissions, economic growth, energy consumption, trade and urbanization in new EU member and candidate countries: a panel data analysis[J]. *Economic Modelling*, 2015, 44: 97-103.
- [20] 徐滨士. 绿色再制造工程的发展现状和未来展望[J]. *中国工程科学*, 2011, 13(1): 4-10.
XU Binshi. Development status and prospect of green remanufacturing engineering[J]. *Strategic Study of CAE*, 2011, 13(1): 4-10.
- [21] HAZEN B T, BOONE C A, WANG Y, et al. Perceived quality of remanufactured products: construct and measure development[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 142: 716-726.
- [22] ZEELLENBERG M, BEATTIE J, DER PLIGT J V, et al. Consequences of regret aversion: effects of expected feedback on risky decision making[J]. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 1996, 65(2): 148-158.
- [23] ESENDURAN G, KEMAHLIOĞLU-ZIYA E, SWAMINATHAN J M. Take-back legislation: consequences for remanufacturing and environment[J]. *Decision Sciences*, 2016, 47(2): 219-256.

(责任编辑: 程静)