

随机需求下考虑低碳政策规制的企业生产策略

马常松^{1,2}, 陈旭¹, 罗振宇², 李天²

(1. 电子科技大学 经济与管理学院, 成都 610054; 2. 西南财经大学 天府学院, 成都 610052)

摘要: 针对碳限额政策、碳税政策、碳限额与交易政策对企业生产活动的限制, 将绿色技术引入企业生产策略中. 研究表明, 碳限额和碳税政策下的最优产量和最大期望利润都不可能大于最优情形下的产量和期望利润, 碳限额与交易政策下的期望利润大小主要取决于政府的初始碳配额量. 同时, 为了有效应对政府的约束和管制行为, 企业绿色技术投入行为能够在一定程度上增加产品产出, 提升企业期望利润.

关键词: 低碳政策; 绿色技术投入; 生产策略; 随机需求

中图分类号: TP270

文献标志码: A

Production strategy of considering low carbon emission policies regulation under stochastic demand

MA Chang-song^{1,2}, CHEN Xu¹, LUO Zhen-yu², LI Tian²

(1. School of Management and Economics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China; 2. College of Tianfu, Southwestern University of Finance and Economics, Chengdu 610052, China. Correspondent: MA Chang-song, E-mail: uestc-vip@163.com)

Abstract: Based on the restrictions on production activities under cap, carbon emission tax and cap and trade policies, the green technology is introduced to the manufacturer's production strategy. The study results show that the manufacturer's expected profit and quantity under cap and carbon emission tax are lower than the case without carbon emission constraint. The manufacturer's maximum quantity under cap-and trade is depending on the price of carbon emission allowance. The initial allowance decides the manufacturer's expected profit. In the same time, the green technology input can improve manufacturer's production quantities and expected profit in some degree.

Keywords: low-carbon; green technology input; production strategy; stochastic demand

0 引言

人类社会的高速发展对气候和环境产生了极大的影响, 特别是二氧化碳等温室气体的大量排放, 导致气候和环境不断恶化. 近年来, 全球的持续变暖已经日益威胁到人类的生存和发展, 据联合国政府间气候变化委员会(IPCC)第4次评估报告指出: 在过去100年, 全球地表平均温度升高了 0.74°C , 海平面升高了 $0.17\text{m}^{[1]}$. 因此, 应对全球气候变暖的主要手段是转变人类生产和生活方式, 实现低碳经济和低碳生活. 我国2010年中央经济工作会议明确将碳排放作为低碳经济发展的重要约束性指标纳入“十二五”发展规划^[2]. 国际上现有的碳排放政策主要包括: 碳税、碳限额、碳限额与交易3种形式. 前两种政策对企业而言

都是一种“硬约束”, 只能通过调整产量或采用新技术减少碳排放来满足; 碳限额与交易允许企业间自由买卖碳排放权^[3], 使碳排放约束成为一种“软约束”, 可通过调整产量、采用新技术、买卖碳排放权等方式来满足.

自20世纪50年代开始, 学术界对企业生产策略进行了广泛深入的研究, 并取得了丰富的研究成果, 其目标大都是在总成本最小或总收益最大的前提下满足顾客的多样化需求. 但全球气候持续变暖给人类的生存和发展带来了严峻挑战, 企业在制定生产和定价决策时不得不考虑碳排放因素. 在碳排放政策约束下企业生产策略研究方面, 针对单个企业的研究较多. 文献[4]在完美市场的假设下, 分析了能源政策、财税

收稿日期: 2014-03-22; **修回日期:** 2014-07-24.

基金项目: 国家软科学研究计划项目(2013GXS4D145); 教育部人文社会科学研究青年基金项目(11YJC630022); 四川省科技支撑计划项目(2012FZ0003).

作者简介: 马常松(1973—), 男, 讲师, 博士生, 从事供应链管理的研究; 陈旭(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 从事运营管理、绿色供应链管理等研究.

政策等对碳交易价格和其他工业部门的影响. 文献[5]从福利增加的角度对碳排放权交易进行研究, 得到了基于产出的碳排放权分配原则能产生与碳税相同效果的结论. 文献[6]在企业生产模型中同时考虑了碳限额、碳税等环境约束, 采用混合整数规划方法进行求解, 得到了企业最优的产品结构和生产数量. 文献[7]研究对比了碳税和碳排放交易机制对台湾石化工业部门的影响, 结果表明, 如果单独实施碳税政策, 2011~2020年我国台湾石化工业的GDP累计损失为5.7%; 如果同时实施碳税和碳交易, 同时期我国台湾石化工业的GDP累计损失为4.7%. 文献[8]基于报童模型研究了不同碳排放政策下企业的运输模式选择问题, 研究发现, 碳税和碳限额与交易两种政策均无法实现减少碳排放量的目标, 只有碳限额政策能够减少碳排放量. 文献[9]在传统EOQ模型的基础上增加了碳足迹、碳税、企业社会责任等环境和社会约束, 运用单变量优化模型分析了企业在碳税、碳限额、碳限额与交易、碳抵消等不同条件下, 企业最优的生产数量. 文献[10]研究了碳限额、碳税和碳限额与交易3种政策下企业的生产和投资行为, 分析了不同的碳排放政策对企业利润和碳排放量减少的影响. 文献[11]分别对碳限额、碳税和碳限额与交易3种政策下的经典报童问题进行研究, 得到了3种政策下企业的最优生产策略和最大期望利润, 同时研究发现, 为了减少一定量的碳排放量, 在碳税政策下, 针对高利润的易逝性产品, 边际利润高的企业设置的碳税应高于边际利润低的企业, 反之亦反; 在碳限额与交易政策下, 碳限额设置应该满足企业边际利润小于碳排放权购买价格的要求. 在供应链层面上, 文献[12]率先将碳排放约束纳入到供应链系统中, 研究了碳限额与交易政策对企业投资、生产、库存和订货决策行为的影响, 得到了在碳限额政策下, 企业可以通过修改订单数量来最大化利润的结论. 文献[13]在前期研究的基础上设计了有效的企业生产流程、生产计划和库存管理策略, 得到了适当的绿色技术投入能够增加企业利润的结论.

目前, 现有的理论研究大多从宏观层面出发, 如研究减排政策对国家或行业的经济影响等, 从微观层面出发、针对碳排放政策约束下的企业运作优化的研究还较少. 鉴于此, 本文立足微观视角, 以企业的生产决策为研究内容, 为企业生产策略制定提供微观基础. 针对碳限额政策、碳税政策、碳限额与交易政策对企业生产活动的限制, 将绿色技术引入企业生产策略中. 研究结果表明, 碳限额和碳税政策下的最优产量和最大期望利润都不可能大于最优情形下的产量和期望利润. 碳限额与交易政策下的期望利润大小主要取决

于政府的初始碳配额量. 同时, 为了有效应对政府的约束和管制行为, 企业绿色技术投入行为能够在一定程度上增加产品产出, 并提升企业期望利润.

1 问题描述

考虑生产单一产品的企业, 它面临的市场需求是随机的, 在销售期结束时, 剩余库存会按照残值进行处理. 在碳限额和碳限额与交易政策下, 政府规定一个最大碳排放量 K , 企业在生产活动中所产生的碳排放量不能超过政府限额. 在碳税政策下, 政府对所有排碳产品进行征税, 从而实现减排目标. 为了表述方便, 模型中符号的含义如下: $f(\cdot)$ 为随机需求的概率密度函数, $F(\cdot)$ 为随机需求的分布函数, Q 为产品产量, p 为每单位产品的零售价格, c 为每单位产品的生产成本, v 为每单位产品在销售周期末的残值, r 为每单位产品的缺货机会成本, K 为政府规定的最大碳排放量, k 为每单位产品的碳排放量, $0 \leq T \leq 1$ 为绿色技术投入水平, E 为企业之于外部市场碳交易数量, ω 为外部市场的单位碳交易价格, π 为企业期望利润.

上述参数必须满足某些条件, 才能使建立的模型有实际意义, 本文假设:

1) $p \geq c > v > 0$, 该条件表明每个在消费者市场上出售的产品都会为企业带来利润的增长, 另一方面, 若有一个产品未售出, 则零售商会受到利润上的损失.

2) $r = p - c$, 该条件表明企业面临的缺货机会成本是卖出一个产品所赚取的利润.

3) 假设绿色技术投入成本为 $C(T)$, 它是连续可微的, 随绿色技术投入水平 T 的上升而加速上升, 且 $C'(T) > 0, C''(T) > 0$, 并满足 $C(0) = 0, C(1) = \infty$.

绿色技术投入函数如图1所示.

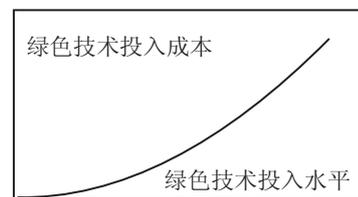


图1 绿色技术投入函数

2 模型建立

令 x 为产品的随机需求, x 服从需求的概率密度函数为 $f(\cdot)$ 的分布; p 、 c 和 r 分别为每单位产品的零售价格、产品的生产成本和缺货产品的机会成本; $c - v$ 为超过市场需求的产品所产生的超生产成本; $p + r - c$ 为不满足市场需求时所产生的缺货成本. 若企业的生产量为 Q , 则企业在无限额下的期望利润为

$$\pi^n(Q) = (p - v) \int_0^Q x f(x) dx - (c - v) \int_0^Q Q f(x) dx +$$

$$(p+r-c) \int_Q^\infty Qf(x)dx - r \int_Q^\infty xf(x)dx. \quad (1)$$

对 Q 求导得

$$\frac{d\pi^n(Q)}{dQ} = (v-p-r)F(Q) + p+r-c.$$

令 $d\pi^n(Q)/dQ = 0$, 得到

$$\int_0^Q f(x)dx = \frac{p+r-c}{p+r-v},$$

则有

$$Q^* = F^{-1}\left(\frac{p+r-c}{p+r-v}\right). \quad (2)$$

2.1 碳限额政策下的企业生产策略

2.1.1 碳限额政策下无绿色技术投入的企业生产策略

在碳限额政策下, 政府规定一个最大碳排放量 K , 企业在进行生产活动时产生的碳排放量不能超过政府规定的强制限额. 因此, 企业在政府碳限额政策下的期望利润为

$$\pi^n(Q); \quad (3)$$

$$\text{s.t. } kQ \leq K. \quad (4)$$

约束条件意味着企业在生产活动中的总碳排放量不得超过政府规定的碳排放量. 通过对生产企业在该情形下的最优生产策略进行讨论, 得到以下命题.

定理 1 企业在政府碳限额政策下的产品最优生产量 $Q^a \leq Q^*$.

证明 令 $\varphi \geq 0$, 由约束条件可得

$$kQ - K \leq 0, \quad (5)$$

$$\varphi(kQ - K) = 0, \quad (6)$$

$$(v-p-r)F(Q) + p+r-c - \varphi k = 0. \quad (7)$$

当 $\varphi = 0$ 时, 由式(7)可得 $d\pi(Q)/dQ = 0$, 因此得到 $Q^a = Q^*$, $kQ^* \leq K$. 当 $\varphi > 0$ 时, 由式(7)可得

$$\frac{d\pi(Q)}{dQ} = (v-p-r)F(Q) + p+r-c = \varphi k > 0,$$

因此得到 $Q^a < Q^*$, $kQ^* > K$.

综上所述, 企业在政府碳限额政策下的产品最优生产量 $Q^a \leq Q^*$. \square

定理 1 表明, 企业的最优生产量不会大于无限额下的最优生产量. 另一方面, 政府规定的初始限额能够对企业的生产策略产生影响, 只有限额 K 小于最优生产量情形下的碳排放量, 碳限额政策才能发挥作用.

推论 1 企业在碳限额政策下的期望利润

$$\pi^a(Q^a) \leq \pi^n(Q^*).$$

证明 由定理 1 可得, 当 $kQ^* \leq K$ 时, $Q^a = Q^*$, 得到

$$\pi^a(Q^a) = \pi^n(Q^*).$$

当 $kQ^* > K$ 时, $Q^a < Q^*$, 得到

$$\pi^a(Q^a) < \pi^n(Q^*).$$

\square

推论 1 表明, 碳限额政策能够对企业的期望利润产生影响, 企业在政府碳限额政策约束下的期望利润小于在无限额约束下的期望利润.

2.1.2 碳限额政策下考虑绿色技术投入的企业生产策略

在碳限额政策约束下, 越来越多的企业意识到依靠技术创新、新能源开发、产业转型等多种手段, 能够提高能源利用率, 使企业进行生产活动时产生的碳排放量不超过政府规定的强制限额的同时增加企业利润. 若 T 为绿色技术投入水平, 假设绿色技术投入成本为 $C(T)$, 则企业在此情况下的期望利润为

$$\pi^a(Q, T) =$$

$$(p-v) \int_0^Q xf(x)dx - (c+c(T)-v) \int_0^Q Qf(x)dx + [p+r-c-c(T)] \int_Q^\infty Qf(x)dx - r \int_Q^\infty xf(x)dx; \quad (8)$$

$$\text{s.t. } (1-T)kQ \leq K. \quad (9)$$

约束条件意味着企业在进行绿色技术投入后, 生产活动产生的总碳排放量不得超过政府规定的碳排放量. 通过对生产企业在该情形下的最优生产策略进行讨论, 得到以下定理.

定理 2 在进行绿色技术投入后, 企业存在一个在政府碳限额政策约束下的生产策略, 使得企业期望利润最大.

证明 引入 $\varphi \geq 0$, 企业期望利润函数为

$$\pi^a(Q, T) =$$

$$(p-v) \int_0^Q xf(x)dx -$$

$$(c+c(T)-v) \int_0^Q Qf(x)dx +$$

$$[p+r-c-c(T)] \int_Q^\infty Qf(x)dx -$$

$$r \int_Q^\infty xf(x)dx + \varphi[K - (1-T)kQ],$$

$$\frac{d^2\pi^a(Q, T)}{dQ^2} = (v-p-r)f(Q) < 0.$$

因此, 企业的期望利润函数是关于生产策略产量 Q 的凸函数, 且存在极值点使得企业期望利润最大. \square

定理 3 $Q^a \leq Q_a^T \leq Q^*$.

证明 令 $\varphi \geq 0$, 由约束条件可得

$$K - (1-T)kQ \leq 0, \quad (10)$$

$$\varphi[K - (1-T)kQ] = 0, \quad (11)$$

$$(v-p-r)F(Q) + p+r-c - \varphi(1-T)k = 0. \quad (12)$$

当 $\varphi = 0$ 时, 由式(10)可得 $d\pi(Q)/dQ = 0$, 从而得到 $Q_a^T = Q^*$, 由定理 1 可知, 在此情形下

$$Q^* = Q^a, kQ_a^T = kQ^a = kQ^* \leq K.$$

当 $\varphi > 0$ 时, 由式 (10) 可得

$$\frac{d\pi(Q)}{dQ} = (v - p - r)F(Q) + p + r - c =$$

$$\varphi(1 - T)k > 0,$$

因此得到 $Q_a^T < Q^*$, 由式 (11) 可得

$$K = (1 - T)kQ_a^T < kQ^*,$$

因此得到在绿色技术投入下的最优产量

$$Q_a^T = \frac{K}{(1 - T)k} > \frac{K}{k} = Q^a.$$

综上所述, $Q^a \leq Q_a^T \leq Q^*$. \square

定理 3 表明, 有效的绿色技术投入可以降低每单位产品的碳排放量, 从而在政府规定碳限额 K 下增加产品产量.

本文令生产企业在碳限额政策约束下的最大期望收益为

$$\pi^a(Q_a^T, T) = \pi^n(Q^c) - c(T).$$

为了讨论碳限额政策下绿色技术投入对生产策略的影响, 得到以下定理.

定理 4 $\pi^n(Q^*) \geq \pi^a(Q_a^T, T) \geq \pi^a(Q^a)$.

证明 由定理 3 可得 $Q^* \geq Q^c$, 从式 (11) 得到

$$\pi^a(Q_a^T, T) = \pi^n(Q_a^T) - c(T) < \pi^n(Q^*),$$

因此有 $\pi^n(Q^*) > \pi^a(Q_a^T, T)$. 由式 (11) 可得

$$\pi^a(Q_a^T, T) - \pi^a(Q^a) = \pi^n(Q^c) - \pi^n(Q^a) - c(T),$$

若 $T = 0$, 则 $\pi^a(Q_a^T, T) - \pi^a(Q^a) = 0$.

当 $\pi^n(Q_a^T) - \pi^n(Q^a) > c(T)$ 时, 有

$$\pi^a(Q_a^T, T) > \pi^n(Q^a) = \pi^a(Q_a^T, 0),$$

此时进行绿色技术投入可以增加生产企业在碳限额政策下的期望利润.

当 $\pi^a(Q_a^T, T) - \pi^n(Q^a) = c(T)$ 时, 有

$$\pi^a(Q_a^T, T) = \pi^a(Q^a) = \pi^a(Q_a^T, 0),$$

此时绿色技术投入不会增加生产企业在碳限额政策下的期望利润, 所以生产企业理性地放弃绿色技术投入.

当 $\pi^n(Q_a^T) - \pi^n(Q^a) < c(T)$ 时, 有

$$\pi^a(Q_a^T, T) < \pi^a(Q^a) = \pi^a(Q_a^T, 0),$$

此时进行绿色技术投入只会减少生产企业在碳限额政策下的期望利润, 所以不进行绿色技术投入, 从而 $\pi^a(Q_a^T, T) = \pi^a(Q^a)$. \square

定理 4 表明, 在碳限额政策下, 适当的绿色技术投入能够增加生产企业期望利润; 另一方面, 只有当 $\pi^n(Q_a^T) - \pi^n(Q^a) > c(T)$, 即进行绿色投入后的企业期望利润高于碳限额政策下的期望利润和绿色技术投入之和时, 企业才会进行绿色技术投入.

2.2 碳税政策下的企业期望利润

2.2.1 碳税政策下无绿色技术投入的企业生产策略

在碳税政策下, 政府对企业生产的排碳性产品进行征税. 令 γ 为政府规定的征税水平, 由此得到在碳税情形下的企业期望利润为

$$\begin{aligned} \pi^b(Q) = & (p - v) \int_0^Q xf(x)dx - (c - v) \int_0^Q Qf(x)dx + \\ & (p + r - c - \gamma) \int_Q^\infty Qf(x)dx - r \int_Q^\infty xf(x)dx. \end{aligned}$$

定理 5 企业在碳税政策下的产品最优生产量 $Q^b \leq Q^*$.

证明 对 Q 求导可得

$$\frac{d\pi^b(Q)}{dQ} = (v - p - r)F(Q) + p + r - c - \gamma.$$

令 $d\pi^b(Q)/dQ = 0$ 时, 得到

$$\int_0^Q f(x)dx = \frac{p + r - c - \gamma}{p + r - v},$$

从而得到

$$F(Q^b) = \frac{p + r - c - \gamma}{p + r - v}.$$

由前文可知

$$F(Q^*) = \frac{p + r - c}{p + r - v}.$$

由概率分布函数的递增性可知, $Q^b \leq Q^*$. \square

定理 5 表明, 由于碳税的存在, 企业在碳税政策下的最优生产量不会大于无碳税下的最优生产量.

2.2.2 碳税政策下考虑绿色技术投入的企业生产策略

在碳税政策下, 若 T 为绿色技术投入水平, 假设绿色技术投入成本为 C^T , 其中 C^T 为产品固定成本与对每单位产品进行绿色技术投入成本的总和, 则企业在此情况下的期望利润为

$$\begin{aligned} \pi^b(Q, T) = & (p - v) \int_0^Q xf(x)dx - (c - v) \int_0^Q Qf(x)dx + \\ & (p + r - C^T) \int_Q^\infty Qf(x)dx - r \int_Q^\infty xf(x)dx. \end{aligned}$$

令碳税情形下的碳排放减少比例为 $\delta = (Q^* - Q_T^b)/Q^*$, 可以得到以下定理.

定理 6 在碳税政策约束下, 当产品为高利润类型时, 碳排放减少比例 δ 随绿色技术水平的提高而减少; 当产品为低利润类型时, 碳排放减少比例 δ 随绿色技术水平的提高而增加.

证明 对 Q 求导可得

$$\frac{\partial \pi^b(Q, T)}{\partial Q} = (v - p - r)F(Q) + p + r - C^T.$$

令

$$x \frac{\partial \pi^b(Q, T)}{\partial Q} = 0,$$

得到

$$F(Q_T^b) = \frac{p+r-c^T-\gamma}{p+r-v}.$$

令 $c_u = c - v$ 为超额成本, $c_o = p + r - c^T$ 为缺货时面临的机会成本损失, 并令

$$\frac{p+r-C^T}{p+r-v} = \frac{1}{2},$$

可得 $c_u = c_o$. 因此, 当

$$\frac{p+r-C^T}{p+r-v} \geq 0.5$$

时, 产品为高利润类型; 反之, 当

$$\frac{p+r-C^T}{p+r-v} < 0.5$$

时, 企业产品为低利润类型.

令 c_1 为低绿色技术投入情形下的成本, c_2 为高绿色技术投入下的成本, 且 $c_2 > c_1$, 在不同成本下的最优产量分别为 Q_T^b 和 $Q_T^{b'}$. 当

$$\frac{p+r-C^T}{p+r-v} \geq 0.5$$

时, 企业产品为高利润类型, 可以得到 $Q_T^b > Q_T^{b'}$, 从而得到

$$\delta' = \frac{Q^* - Q_T^b}{Q^*} > \frac{Q^* - Q_T^{b'}}{Q^*} = \delta'';$$

反之, 当

$$\frac{p+r-C^T}{p+r-v} < 0.5$$

时, 可得 $\delta' < \delta''$. □

定理 6 表明, 在碳税政策下, 当产品为高利润类型时, 碳排放减少量 δ 随绿色技术水平的提高而减少; 当产品为低利润类型时, 碳排放减少量 δ 随绿色技术水平的提高而增加. 因此, 为了减少碳排放, 政府在设计碳税政策时, 对高利润产品类型生产企业的征税税率水平应该小于对低利润产品类型生产企业的税率水平.

2.3 碳限额与交易政策下的企业生产策略

2.3.1 碳限额与交易政策下无绿色技术投入的企业生产策略

在碳限额与交易政策下, 政府规定一个最大碳排放量 K , 企业在进行生产活动时产生的碳排放量不能超过政府规定的强制限额. 为了避免超过政府的碳限额, 企业之间可以通过配额交易调节余缺, 即碳排放配额不足的企业可以向拥有多余配额的企业购买碳排放权. 令 E 为企业与外部碳交易市场的碳交易量, 由此得到在碳限额与交易情形下的企业期望利润为

$$\pi^c(Q) = (p-v) \int_0^Q xf(x)dx -$$

$$(c-v) \int_0^Q Qf(x)dx + (p+r-c) \int_Q^\infty Qf(x)dx - r \int_Q^\infty xf(x)dx - \omega E;$$

$$\text{s.t. } kQ = K + E. \tag{13}$$

$kQ = K + E$ 意味着企业的总碳排放量必须等于政府的初始碳排放配额与外部市场碳排放交易数量之和. 当 $E > 0$ 时, 表示生产商将从碳交易市场购买碳排放配额; 当 $E = 0$ 时, 表示生产企业将不会在外部市场上进行交易; 当 $E < 0$ 时, 表示生产企业将在碳交易市场上售出使用不完的配额.

令

$$\theta(Q) = \frac{1}{k} \frac{d\pi(Q)}{dQ}$$

为单位的碳配额所带来的企业期望利润增加, 可得到以下定理.

定理 7 在碳限额与交易政策下, 存在一个最优的产量 Q^c , 且满足条件 $\theta(Q^c) = \omega$.

证明 由式 (7) 可知, $E = kQ - K$, 由此得到企业的期望利润函数为

$$\begin{aligned} \pi^c(Q) = & (p-v) \int_0^Q xf(x)dx - \\ & (c-v) \int_0^Q Qf(x)dx + \\ & (p+r-c) \int_Q^\infty Qf(x)dx - \\ & r \int_Q^\infty xf(x)dx - \omega(kQ - K). \end{aligned}$$

对 Q 求导得

$$\frac{d\pi^c(Q)}{dQ} = (v-p-r)F(Q) + p+r-c-\omega k,$$

$$\frac{d^2\pi^c(Q)}{dQ^2} = (v-p-r)f(Q) < 0.$$

由此可知, $\pi^c(Q)$ 是关于 Q 的凹函数. 令

$$\frac{d\pi^c(Q)}{dQ} = (v-p-r)F(Q) + p+r-c = \omega k,$$

因为

$$\theta(Q) = \frac{1}{k} \frac{d\pi(Q)}{dQ},$$

所以 $\theta(Q^c) = \omega$. □

定理 7 表明: 1) 当 $\theta(Q^c) > \omega$ 时, 生产一单位产品所得到边际利润高于一单位的碳排放配额价格, 在此情形下, 企业将从外部市场购买碳排放配额来生产更多的产品以获得更多的利润. 2) 当 $\theta(Q^c) < \omega$ 时, 生产一单位产品得到的边际利润低于一单位的碳排放配额价格, 在此情形下, 企业将在碳交易市场上出售碳排放配额. 因此, 只有当 $\theta(Q^c) = \omega$ 时, 企业不会从碳交易市场上购买或出售碳排放配额, 在此情形下

才能得出最优的生产策略.

定理 8 1) 若 $\theta(Q^a) = \omega$, 则 $Q^c = Q^a < Q^*$; 2) 若 $\theta(Q^a) < \omega$, 则 $Q^c < Q^a < Q^*$; 3) 若 $\theta(Q^a) > \omega$, 则 $Q^a < Q^b \leq Q^*$.

证明 令

$$\theta(Q) = \frac{1}{k} \frac{d\pi(Q)}{dQ},$$

对 Q 求导得

$$\frac{d\theta(Q)}{dQ} = \frac{1}{k} (v - p - r) f(Q) < 0.$$

由此可见, $\theta(Q)$ 是关于 Q 的递减函数. 由式 (3) 和定理 2 可得

$$\theta(Q^*) = 0, \theta(Q^c) = \omega,$$

因此有 $Q^* > Q^c$.

1) 若 $\theta(Q^a) = \omega$, $\theta(Q^c) = \theta(Q^a)$, 则可以得到 $Q^c = Q^a$, 进而得到 $Q^c = Q^a < Q^*$.

2) 若 $\theta(Q^a) > \omega$, $\theta(Q^c) > \theta(Q^a)$, 则可以得到 $Q^c > Q^a$, 进而得到 $Q^a < Q^c < Q^*$.

3) 若 $\theta(Q^a) < \omega$, $\theta(Q^c) < \theta(Q^a)$, 则可以得到 $Q^c < Q^a$, 进而得到 $Q^c < Q^a \leq Q^*$. \square

定理 8 表明, 在碳限额与交易政策下的最优产量都是低于无限额下的最优产量, 这是因为当碳配额的单位价格大于生产一单位产品的边际利润时, 企业将在外部市场出售碳排放配额. 碳限额与交易政策下的最优产量是否高于碳限额下的最优产量主要取决于产品边际利润的大小. 当 $\theta(Q^c) > \omega$ 时, 多生产一单位产品增加的边际利润高于购买碳配额的成本, 企业将从外部市场购买碳配额以生产更多产品, 所以, 碳限额与交易政策下的最优产量高于碳限额情形下的最优产量. 当 $\theta(Q^c) < \omega$ 时, 多生产一单位的产品所带来的边际利润低于购买碳配额的成本, 企业将在外部市场上出售碳配额, 所以碳限额与交易政策下的最优产量低于碳限额下的最优产量. 当 $\theta(Q^c) = \omega$ 时, 多生产一单位产品带来的边际利润等于购买碳配额的成本, 所以企业不会与外部市场进行交易.

为了讨论碳限额与交易政策对生产策略的影响, 令生产企业在碳限额与交易政策约束下的最大期望收益为

$$\pi^c(Q^c) = \pi^n(Q^c) - \omega(kQ^c - K). \quad (15)$$

定理 9 当 $K^* = kQ^c + \frac{1}{\omega}[\pi^n(Q^*) - \pi^n(Q^c)]$ 时:

1) 若 $K > K^*$, 则 $\pi^c(Q^c) > \pi^n(Q^*) > \pi^a(Q^a)$;

2) 若 $K = K^*$, 则 $\pi^c(Q^c) = \pi^n(Q^*) > \pi^a(Q^a)$;

3) 若 $K < K^*$, 则 $\pi^n(Q^*) > \pi^c(Q^c) \geq \pi^a(Q^a)$.

证明 当 $\pi^c(Q)$ 取最大值时, 有

$$\pi^c(Q^c) > \pi^n(Q^*) - \omega(kQ^* - K).$$

若 $K \geq kQ^*$, 则由定理 1 可知, $\pi^n(Q^*) = \pi^a(Q^a)$, 所以有

$$\pi^c(Q^c) - \pi^a(Q^a) > -\omega(kQ^* - K) > 0,$$

因此

$$\pi^c(Q^c) > \pi^a(Q^a).$$

若 $K < kQ^*$, 则 $K = kQ^a$, 当 $\pi^c(Q)$ 取最大值时有

$$\pi^c(Q^c) \geq \pi^n(Q^a) - \omega(kQ^a - K),$$

由推论 1 可知 $\pi^a(Q^a) = \pi^n(Q^a)$, 得到

$$\pi^c(Q^c) - \pi^a(Q^a) \geq -\omega(kQ^a - K) = 0,$$

所以 $\pi^c(Q^c) \geq \pi^a(Q^a)$. 综合可得 $\pi^c(Q^c) \geq \pi^a(Q^a)$.

若 $K \leq kQ^c$, 则由式 (15) 可得

$$\pi^c(Q^c) =$$

$$\pi^n(Q^c) - \omega(kQ^c - K) \leq \pi^n(Q^c) < \pi^n(Q^*),$$

若 $K \geq kQ^*$, 则有

$$\pi^c(Q^c) > \pi^n(Q^*) - \omega(kQ^c - K) > \pi^n(Q^*),$$

因此 $\pi^c(Q^c) > \pi^n(Q^*)$. 当 $K^* \in (kQ^c, kQ^*)$ 时, 由介值定理可知, 存在一个 K^* , 使得 $\pi^c(Q^c) = \pi^n(Q^*)$, 此时有

$$K^* = kQ^c + \frac{1}{\omega}[\pi^n(Q^*) - \pi^c(Q^c)].$$

因为 $\pi^c(Q)$ 是关于 K 的递增函数, 所以有:

1) 当 $K > K^*$ 时, $\pi^c(Q^c) > \pi^n(Q^*) > \pi^a(Q^a)$;

2) 当 $K = K^*$ 时, $\pi^c(Q^c) = \pi^n(Q^*) > \pi^a(Q^a)$;

3) 当 $K < K^*$ 时, $\pi^n(Q^*) > \pi^c(Q^c) \geq \pi^a(Q^a)$. \square

定理 9 表明, 企业可以通过购买或出售碳配额增加企业期望利润, 所以, 企业在碳限额与交易政策下的期望利润总是高于碳限额下的期望利润. 另一方面, 企业在碳限额与交易政策下的期望利润是否高于无限额下的期望利润主要取决于政府的初始碳配额量.

2.3.2 碳限额与交易政策下考虑绿色技术投入的企业生产策略

在碳限额与交易政策下, 若 T 为绿色技术投入水平, 则企业在此情况下的期望利润为

$$\pi^c(Q, T) =$$

$$(p - v) \int_0^Q xf(x)dx -$$

$$(c + c(T) - v) \int_0^Q Qf(x)dx +$$

$$[p + r - c - c(T)] \int_Q^\infty Qf(x)dx -$$

$$r \int_Q^\infty xf(x)dx - \omega E; \quad (16)$$

$$\text{s.t. } (1 - T)kQ = K + E. \quad (17)$$

约束条件意味着企业在有绿色技术投入下的总碳排放量必须等于政府的初始碳排放配额与外部市场碳排放交易数量之和. 为了研究企业在碳限额与交

易政策下的最优生产策略, 得到以下定理.

定理 10 在绿色技术投入情形下, 企业存在一个在碳限额与交易政策下的生产策略, 使得企业期望利润最大, 且满足 $\theta(Q_c^T) = (1 - T)\omega$.

证明 由式 (17) 可得 $E = (k - T)Q - K$, 代入式 (16) 得到

$$\begin{aligned} \pi^c(Q, T) = & (p - v) \int_0^Q xf(x)dx - \\ & (c + c(T) - v) \int_0^Q Qf(x)dx + \\ & [p + r - c - c(T)] \int_Q^\infty Qf(x)dx - \\ & r \int_Q^\infty xf(x)dx - \omega[(1 - T)kQ - K], \\ \frac{d\pi^c(Q, T)}{dQ} = & (v - p - r)F(Q) + p + r - c - \\ & c(T) - \omega k(1 - T), \\ \frac{d^2\pi^c(Q, T)}{dQ^2} = & (v - p - r)f(Q) < 0. \end{aligned}$$

令

$$\frac{\partial \pi^c(Q, T)}{\partial Q} = 0,$$

可以得到

$$\begin{aligned} (v - p - r)F(Q) + p + r - c - \\ c(T) - \omega k(1 - T) = 0, \end{aligned}$$

由此可得 $\theta(Q_c^T) = (1 - T)\omega$. \square

定理 10 表明, 在绿色技术投入下存在一个使企业期望利润最大生产策略. 当 $\theta(Q_c^T) > (1 - T)\omega$ 时, 企业将会通过购买碳配额增加企业期望收益; 当 $\theta(Q_c^T) < (1 - T)\omega$ 时, 碳交易所带来的企业期望利润低于绿色技术投入带来的边际收益, 企业将会售出碳配额; 只有当 $\theta(Q_c^T) = (1 - T)\omega$ 时, 企业不会进行碳交易, 从而达到最优产量.

定理 11

- 1) 若 $\theta(Q^a) > \omega$, 则 $Q^a < Q^c < Q_c^T < Q^*$;
- 2) 若 $\theta(Q^a) = \omega$, 则 $Q^c \leq Q_c^T = Q^a < Q^*$;
- 3) 若 $(1 - T)\omega \leq \theta(Q^a) < \omega$, 则 $Q^c < Q^a \leq Q_c^T < Q^*$;
- 4) 若 $\theta(Q^a) < (1 - T)\omega$, 则 $Q^c < Q_c^T < Q^a < Q^*$.

证明 令 $\theta(Q) = \frac{1}{k} \frac{d\pi(Q)}{dQ}$, 对 Q 求导得

$$\frac{d\theta(Q)}{dQ} = \frac{1}{k}(v - p - r)f(Q) < 0,$$

由此可见 $\theta(Q)$ 是关于 Q 的递减, 且有

$$\theta(Q^*) = 0, \theta(Q^c) = \omega, \theta(Q_c^T) = (1 - T)\omega.$$

因此, 可以得出 $Q^* > Q^c$, $Q^* > Q_c^T$, $Q^c < Q_c^T$.

- 1) 若 $\theta(Q^a) > \omega$, 则 $\theta(Q^a) > \theta(Q^c) \geq \theta(Q_c^T)$, 因

此得到 $Q^a < Q^c \leq Q_c^T < Q^*$.

- 2) 若 $\theta(Q^a) = \omega$, 则 $\theta(Q^a) = \theta(Q^c) \geq \theta(Q_c^T)$, 因此得到 $Q^a = Q^c \leq Q_c^T < Q^*$.

- 3) 若 $(1 - T)\omega \leq \theta(Q^a) < \omega$, 则 $\theta(Q^c) > \theta(Q^a) \geq \theta(Q_c^T)$, 因此得到 $Q^c < Q^a \leq Q_c^T < Q^*$.

- 4) 若 $\theta(Q^a) < (1 - T)\omega$, 则 $\theta(Q^c) > \theta(Q_c^T) \geq \theta(Q^a)$, 因此得到 $Q^c < Q_c^T < Q^a < Q^*$. \square

定理 11 表明: 在碳限额与交易政策下, 即使进行绿色技术也不可能达到无限额下的最优产量; 进行绿色技术投入后的最优产量高于无绿色技术投入下的最优产量; 碳限额、碳限额与交易和碳限额与交易下考虑绿色技术投入三者之间的最优产量大小关系主要取决于碳限额下的边际利润的大小.

为了讨论碳限额与交易政策下绿色技术投入对生产策略的影响, 令生产企业在碳限额与交易政策约束下的最大期望收益为

$$\begin{aligned} \pi^c(Q_c^T, T) = \\ \pi^n(Q_c^T) - \omega[(1 - T)kQ_c^T - K] - c(T). \end{aligned} \quad (18)$$

定理 12 $\pi^c(Q_c^T, T) \geq \pi^c(Q^c) \geq \pi^a(Q^a)$.

证明 将式 (18) 减去 (15) 可得

$$\begin{aligned} \pi^c(Q_c^T, T) - \pi^c(Q^c) = \\ \pi^n(Q_c^T) - \pi^n(Q^c) - c(T) - \omega k[Q^c - (1 - T)Q_c^T]. \end{aligned}$$

若 $T = 0$, 则

$$\begin{aligned} \pi^c(Q_c^T, 0) - \pi^c(Q^c) = \\ \pi^n(Q_c^T) - \pi^n(Q^c) - c(T) - \omega k[Q_c^* - (1 - T)Q_c^T] = 0. \end{aligned}$$

1) 当

$$\pi^n(Q_c^T) - \pi^n(Q^c) - c(T) > \omega k[Q^c - (1 - T)Q_c^T]$$

时, 可得

$$\begin{aligned} \pi^c(Q_c^T, T) > \pi^c(Q^c) = \\ \pi^c(Q_c^T, 0) > \pi^c(Q^c), \end{aligned}$$

此时进行绿色技术投入可以增加生产企业在碳限额与交易政策下的期望利润.

2) 当

$$\pi^n(Q_c^T) - \pi^n(Q^c) - c(T) = \omega k[Q^c - (1 - T)Q_c^T]$$

时, 可得

$$\pi^c(Q_c^T, T) = \pi^c(Q^c) = \pi^c(Q_c^T, 0),$$

此时绿色技术投入不会增加生产企业在碳限额与交易政策下的期望利润, 所以生产企业理性地放弃绿色技术投入.

3) 当

$$\pi^n(Q_c^T) - \pi^n(Q^c) - c(T) < \omega k[Q^c - (1 - T)Q_c^T]$$

时, 可得

$$\pi^c(Q_c^T, T) < \pi^c(Q^c) = \pi^c(Q_c^T, 0),$$

此时进行绿色技术投入只会减少生产企业在碳限额与交易政策下的期望利润, 所以不进行绿色技术投入, 从而 $\pi^c(Q_c^T, T) = \pi^c(Q^c)$, 综上可得

$$\pi^c(Q_c^T, T) \geq \pi^c(Q^c).$$

由定理 9 可知, $\pi^c(Q^c) \geq \pi^a(Q^a)$, 综上所述

$$\pi^c(Q_c^T, T) \geq \pi^c(Q^c) \geq \pi^a(Q^a). \quad \square$$

定理 12 表明, 在碳限额与交易政策下, 适当的绿色技术投入能够增加生产企业期望利润. 另一方面, 只有当

$$\pi^n(Q_c^T) - \pi^n(Q^c) - c(T) > \omega k [Q^c - (1 - T)Q_c^T]$$

时, 企业才会进行绿色技术投入.

3 结 论

近年来, 由于环境恶化的日益严峻, 今后政府对碳排放的规制必定是越来越严, 绿色低碳产品的生产是企业生产的必然方向. 本文基于随机市场需求, 对碳限额政策、碳税政策、碳限额与交易政策下企业的生产策略进行了研究, 为企业在低碳环境下的经营管理提供了新的思路.

由分析可知, 碳限额和碳税政策下的最优产量和最大期望利润都不可能大于最优情形下的产量和期望利润, 政府规定的初始限额能够对企业的生产策略产生重大影响. 但在碳限额与交易政策下, 企业的最优生产量主要取决于碳交易价格的水平, 在此情形下的期望利润和最优情形下的期望利润的大小主要取决于政府的初始碳配额量. 政府的低碳政策对企业的生产会产生较大的影响, 因此, 企业必须重视产量调整或考虑绿色技术投入对政府的约束和管制的有效应对, 才能使企业获得最佳收益. 总之, 适当的绿色技术投入能够在一定程度上增加产品产出和提升企业期望利润.

参考文献(References)

- [1] IPCC. The third assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. London: Cambridge University Press, 2007: 45-50.
- [2] 朱启贵. 能源流核算与节能减排统计指标体系[J]. 上海交通大学学报, 2010, 18(6): 28-35.
(Zhu Q G. Energy flow accounting and the statistic index system of energy saving and emissions reduction[J]. J of

Shanghai Jiaotong University, 2010, 18(6): 28-35.)

- [3] 陈晓红. 碳排放权交易价格影响因素实证研究——以欧盟排放交易体系为例[J]. 系统工程, 2012, 30(2): 53-60.
(Chen X H. Empirical research on price impact factor of carbon emission exchange: Evidence from EU ETS[J]. Systems Engineering, 2012, 30(2): 53-60.)
- [4] Considine T, Timothy J. The impacts of weather variations on energy demand and carbon emissions[J]. Resource and Energy Economics, 2000, 22(4): 295-314.
- [5] Carolyn F, Alan F. Output-based allocation of emissions permits: Efficiency and distributional effects in a general equilibrium setting with taxes and trade[M]. Washington: RFF Discussion Paper Resource for the Future, 2004: 23-24.
- [6] Letmathe P, Balakrishnan N. Environmental consideration on the optimal product mix[J]. European J of Operational Research, 2005, 167(2): 398-412.
- [7] Lee Cheng F, Lin Sue J, Lewis Charles. Analysis of the impacts of combining carbon taxation and emission trading on different industry sectors[J]. Energy Policy, 2008, 36(2): 722-729.
- [8] Hoen K M R, Tan T, Fransoo J C, et al. Effect of carbon emission regulations on transport mode selection in supply chains[Z]. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2010.
- [9] Arslanv M C, Turkay M. EOQ revisited with sustainability considerations[J]. Foundations of Computing and Decision Sciences, 2013, 38(4): 223-249.
- [10] Jiang Y, Klabjany D. Optimal emissions reduction investment under green house gas emissions regulations[Z]. Evanston: Northwestern University, 2012.
- [11] Song J P, Leng M. Analysis of the single-period problem under carbon emissions policies[J]. Int Series in Operations Research & Management Science, 2012, 176(2): 297-313.
- [12] Benjaafar S, Mohsen E A. Production-inventory system with both patient and impatient demand classes[J]. Trans on Automation Science and Engineering, 2012, 9(1): 148-159.
- [13] Benjaafar S, Li Y, Daskin M. Carbon footprint and the management of supply chains: Insights from simple models[J]. Trans on Automation Science and Engineering, 2013, 10(1): 99-115.

(责任编辑: 郑晓蕾)