

低碳供应链生产及交易决策机制

谢鑫鹏^{1,2}, 赵道致¹

(1. 天津大学 管理与经济学部, 天津 300072; 2. 军事交通学院 汽车工程系, 天津 300161)

摘要: 研究由两个产品制造商和上游碳配额供应商所组成的供应链系统的生产和交易决策问题. 通过建立经济主体的主从博弈模型, 得到它们之间互为反应函数的纳什均衡解, 并在此基础上设定其为产品碳排放量和排放上限的函数. 分析表明, 产品碳排放量和政府排放上限对两制造商和碳配额供应商最优变量以及利润值的影响呈反向关系; 在两制造商严格控制排放量和政府科学制定排放上限的前提下, 两级主体可通过某种契约进一步提高各自的利润值.

关键词: 单位产品碳排放量; 碳排放上限; 碳交易价格; 广义递增失效率

中图分类号: F274

文献标志码: A

Low carbon supply chain production and trading decision-making mechanism

XIE Xin-peng^{1,2}, ZHAO Dao-zhi¹

(1. Department of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Department of Automotive Engineering, Military Traffic Institute, Tianjin 300161, China. Correspondent: XIE Xin-peng, E-mail: xiexinpeng2010@yeah.net)

Abstract: The production and trading decision issue of a supply chain consisting of two emission-dependent manufacturers and one emission permit supplier is studied. By the establishment of the three agents' Stackelberg game model, their mutual reflecting Nash equilibrium solution can be obtained. On this basis, its functions are set as product carbon emission and government's 'cap-and-trade' regulation. The analysis results show that the impact of unit product's carbon emission and the government's 'cap-and-trade' regulation on three agents' optimal values and profits is inversed. Under the premise of controlling of product emissions strictly and setting emissions cap scientifically, two-level economic agents can increase their profits further by means of some contracts.

Key words: unit product's carbon emission; carbon emission cap; carbon price; generalized increasing failure rate

0 引言

清洁发展机制(CDM)是京都议定书中一种灵活的履约机制,其核心内容是允许发展中国家和发达国家间通过项目合作得到核准的碳排放配额(CERs).在这种背景下,碳排放权与其他资源一样成为企业生产的资源投入并能为其带来利润.因此,对碳排放的限制和交易会改变企业的成本构成和盈利模式,并最终影响企业的盈利行为.这一新问题的出现为挖掘事实真相提供了契机.

碳排放权交易的思想起源于Coase^[1]阐述的要通过市场交易的方式来使得外部成本内部化. Stern^[2]认为

为碳排放权分配方式主要有免费分配、公开拍卖和标价出售3种方式.在此基础上, Goulder等^[3]对碳排放权机制设计问题进行了相关研究.随后开始出现将碳排放引入供应链研究的相关文献. Diabat等^[4]研究了如何设计供应链中工厂和配送中心的布局,使成本最小的同时碳排放不超过限额. Cachon^[5-6]研究了供应链中零售商下游网点布局如何在满足碳排放约束的条件下,同时使得运营和消费成本最小化. Benjaafar等^[7]分析了如何调整运营决策来减少碳排放,以及供应链企业合作对成本和碳排放降低的影响.

在供应链企业生产和减排决策方面,杜少甫等^[8]

收稿日期: 2012-12-13; 修回日期: 2013-05-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71072155).

作者简介: 谢鑫鹏(1982—),男,讲师,博士,从事供应链管理、低碳经济的研究; 赵道致(1956—),男,教授,博士生导师,从事物流与供应链管理、工业工程理论与应用、项目管理等研究.

研究了在确定性需求下,考虑依赖碳排放权交易机制且有多种获取渠道时企业的生产优化模型. Zhang 等^[9]基于随机需求模型,建立了依赖碳排放权交易机制的企业生产决策和存储优化模型.在此基础上, Du 等^[10-11]在考虑存在碳排放权交易的情况下,提出了一种由传统绿色环保组织作为碳排放权供应商与碳排放权依赖型企业所组成的新型供应链,并基于报童模型分析了双方的博弈过程.本文在文献[9-11]的研究基础上,对考虑产品碳排放量和政府碳排放规制前提下的上下游企业最优决策和供应链利润分配等问题进行深入研讨.

1 情景假设和参数说明

考虑由 1 个上游碳配额供应商 S 和 2 个下游产生不同碳排放量的产品制造商 $M_i (i = 1, 2, \text{下同})$ 组成的低碳供应链. 两制造商生产的产品完全不可替代,且均具有易逝品特性. 设 ε_i 为需求的随机变量,分布和概率密度函数分别为 $F(\varepsilon_i)$ 和 $f(\varepsilon_i)$. 定义 $h(\varepsilon_i) = f(\varepsilon_i)/[1 - F(\varepsilon_i)]$ 为随机变量 ε_i 的广义失效率函数. 若函数 $h(\varepsilon_i)$ 具有 $h'(\varepsilon_i) > 0$ 的特性,则称其为广义递增失效率函数.

两制造商所生产产品的市场价格和单位成本分别为 p_i 和 c_{m_i} , 且假设其均为常量. 两种产品的产量为 q_i , 在销售季节期间,产品均不存在缺货和库存持有成本;在销售季节末,产品的剩余价值均为零. 此外,由于两制造商在生产产品的过程中会产生碳排放,假设其单位产品的碳排放量分别为 e_{m_i} , 政府要通过规定碳排放上限 E_{m_i} 的方法减少制造商总的碳排放量. 如果制造商生产所需的碳配额大于政府规定的碳排放上限,则需要以 p_c 的价格从碳配额供应商处购买所需的碳配额 E_{r_i} ; 反之无需购买. 设 c_s 为考虑了碳配额审核和验收等一系列程序所需的运营成本.

此外,本文不考虑两制造商的减排投资情况,只考虑其与供应商之间的碳配额交易成本. 设两个产品制造商和碳配额供应商的利润函数分别为 Π_{M_i} 和 Π_S , 由它们所组成的低碳供应链的总利润为 Π_C , 两制造商和供应商的边际利润分别为 ρ_{M_i} 和 ρ_S . 本文在分析任意两个量之间的相互关系时,设定 $\gamma_{x,y}$ 为任意两个量 x, y 之间的相关系数.

2 模型的建立

制造商总的碳排放量与其产品产量线性相关,因此两制造商会根据配额供应商提供碳价格的高低决策各自的产量. 碳配额供应商首先决策给制造商的碳交易价格,然后两制造商根据碳价格和碳排放上限作产品产量决策的 Stackelberg 博弈. 假设 $S(q_i)$ 为产品的期望销售量,当产品的实际需求大于产量时,期望

销售量等于产量;当产品的实际需求小于产量时,期望销售量等于实际需求. 同时,两制造商的利润函数还包括以碳价格从供应商处购买碳配额的交易成本,因此两制造商的利润函数可以表示为

$$\Pi_{M_i}(q_i) = p_i E[\min(q_i, D_i)] - c_{m_i} q_i - p_c E_{r_i}, \quad (1)$$

由于

$$S(q_i) \equiv \int_0^{q_i} \bar{F}(x) dx \equiv q_i - \int_0^{q_i} F(x) dx, \quad (2)$$

将式(2)代入(1)可得到

$$\Pi_{M_i}(q_i) = \begin{cases} p_i \left[q_i - \int_0^{q_i} F(x) dx \right] - c_{m_i}, & q_i \leq E_{m_i}/e_{m_i}; \\ p_i \left[q_i - \int_0^{q_i} F(x) dx \right] - c_{m_i} q_i - p_c (e_{m_i} q_i - E_{m_i}), & q_i > E_{m_i}/e_{m_i}. \end{cases} \quad (3)$$

式(3)满足

$$\partial^2 \Pi_{M_i}(q_i) / \partial q_i^2 = -p_i f(q_i) < 0,$$

因此两区间存在惟一产量 q_i^* 使其利润达到局部最优. 若 $q_i \leq E_{m_i}/e_{m_i}$, 则最优值 q_i^* 或者为能使 $\partial \Pi_{M_i}(q_i) / \partial q_i = 0$ 的值, 或者为边界值 $0 \cup E_{m_i}/e_{m_i}$. 又因为

$$\partial \Pi_{M_i}(q_i) / \partial q_i = p_i [1 - F(q_i)] - c_{m_i} = 0 \Rightarrow$$

$$q_i^* = F^{-1}[(p_i - c_{m_i})/p_i],$$

$$\lim_{q_i \rightarrow 0} \partial \Pi_{M_i} / \partial q_i = p_i - c_{m_i} > 0,$$

所以当 $q_i \leq E_{m_i}/e_{m_i}$ 时,使制造商利润取得局部最优的产量为

$$q_i^* = \min\{F^{-1}[(p_i - c_{m_i})/p_i], E_{m_i}/e_{m_i}\}.$$

同理,若 $q_i \geq E_{m_i}/e_{m_i}$, 则使制造商利润取得局部最优的产量为

$$q_i^* = \max\{E_{m_i}/e_{m_i}, F^{-1}[(p_i - c_{m_i} - e_{m_i} p_c)/p_i]\}.$$

分析可知,当 $E_{m_i} < e_{m_i} F^{-1}[(p_i - c_{m_i} - e_{m_i} p_c)/p_i]$ 时,有

$$q_i^* = F^{-1}[(p_i - c_{m_i} - e_{m_i} p_c)/p_i];$$

当 $E_{m_i} > e_{m_i} F^{-1}[(p_i - c_{m_i})/p_i]$ 时,有

$$q_i^* = E_{m_i}/e_{m_i} \cup q_i^* = F^{-1}[(p_i - c_{m_i})/p_i].$$

因此得到

$$q_i^* = \begin{cases} F^{-1}[(p_i - c_{m_i} - e_{m_i} p_c)/p_i], & E_{m_i} < e_{m_i} F^{-1}[(p_i - c_{m_i} - e_{m_i} p_c)/p_i]; \\ E_{m_i}/e_{m_i}, & e_{m_i} F^{-1}[(p_i - c_{m_i} - e_{m_i} p_c)/p_i] < E_{m_i} < e_{m_i} F^{-1}[(p_i - c_{m_i})/p_i]; \\ F^{-1}[(p_i - c_{m_i})/p_i], & E_{m_i} > e_{m_i} F^{-1}[(p_i - c_{m_i})/p_i]. \end{cases} \quad (4)$$

对于碳配额供应商而言,它要满足两制造商生产所需

的碳配额, 因此其利润函数为

$$\begin{aligned} \Pi_S(p_c) &= \sum_{i=1,2} (p_c - c_s) E_{r_i} = \\ & (p_c - c_s) \sum_{i=1,2} (e_{m_i} q_i - E_{m_i}). \end{aligned} \quad (5)$$

若 $E_{r_i} = e_{m_i} F^{-1}[(p_i - c_{m_i} - e_{m_i} p_c)/p_i] - E_{m_i} < 0$, 则碳配额供应商会因碳价格过高无法获得利润, 因此, 理性的配额供应商应使碳价格满足

$$p_c^* \in (c_s, \{p_i[1 - F^{-1}(E_{m_i}/e_{m_i})] - c_{m_i}\}/e_{m_i}).$$

3 模型的求解和分析

3.1 最优产量和碳价格

从所求两制造商的最优产量 $F(q_i^*) = [(p_i - c_{m_i} - e_{m_i} p_c)/p_i]$ 可以看出, 由于 $F(\cdot)$ 为单调递增函数, 两制造商的最优产量均与碳交易价格呈负相关. 将最优产量 q_i^* 代入供应商的利润函数中, 并求其对碳交易价格 p_c 的一阶偏导数. 由于 q_i^* 的二阶偏导数为

$$\frac{\partial^2 \Pi_S(p_c)}{\partial p_c^2} = \sum_{i=1,2} -e_{m_i}^2 \frac{2 + (p_c - c_s) e_{m_i} f'(q_i^*)}{p_i f^2(q_i^*)}, \quad (6)$$

根据广义增长失效率函数满足 $h'(x) > 0$ 的特性^[12-13] 可得

$$(p_c - c_s) e_{m_i} f'(q_i^*) / (p_i f^2(q_i^*)) > -1,$$

因此 $\partial^2 \Pi_S(p_c) / \partial p_c^2 < 0$, 即存在 p_c^* 使得碳配额供应商的利润 $\Pi_S(p_c)$ 达到局部最优. 令 $\partial \Pi_S(p_c) / \partial p_c = 0$, 得到

$$p_c^* = \frac{\sum_{i=1,2} [e_{m_i} q_i^*(p_c) - E_{m_i}]}{\sum_{i=1,2} [e_{m_i}^2 / p_i f(q_i^*)]} + c_s. \quad (7)$$

又因为 $\partial \Pi_S(p_c) / \partial p_c$ 在边界值处满足

$$\begin{aligned} \partial \Pi_S(p_c) / \partial p_c |_{p_c=c_s} &> 0, \\ \partial \Pi_S(p_c) / \partial p_c \Big|_{p_c = \frac{\sum_{i=1,2} \{p_i[1 - F^{-1}(E_{m_i}/e_{m_i})] - c_{m_i}\}}{\sum_{i=1,2} e_{m_i}}} &< 0, \end{aligned}$$

因此式 (7) 即为碳配额供应商的最优碳价格. 此时两制造商所需的碳配额为

$$E_{r_i}^* = e_{m_i} F^{-1}[(p_i - c_{m_i} - e_{m_i} p_c^*) / p_i] - E_{m_i}.$$

由于碳配额供应商和两个产品制造商均不会单方面偏离其最优策略, 所求最优值 (p_c^*, q_i^*) 即为两级供应链 Stackelberg 博弈的惟一 Nash 均衡点. 将 (p_c^*, q_i^*) 代入式 (1) 和 (3) 中, 得到制造商和供应商的最优利润函数分别为

$$\begin{aligned} \Pi_{M_i}^*(q_i^*) &= \\ p_i S(q_i^*) - c_{m_i} q_i^* - p_c^* (e_{m_i} q_i^* - E_{m_i}), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\Pi_S^*(p_c^*) = (p_c^* - c_s) \sum_{i=1,2} (e_{m_i} q_i^* - E_{m_i}). \quad (9)$$

3.2 产品碳排放和政府碳规制与最优值的关系

将第 3.1 节所求最优值 (p_c^*, q_i^*) 分别看作单位产品碳排放 e_{m_i} 和政府规定的碳排放上限 E_{m_i} 的函数, 首先求产品最优产量 $q_i(e_{m_i})$ 对 e_{m_i} 的一阶偏导数, 得到

$$\begin{aligned} \partial q_i(e_{m_i}) / \partial e_{m_i} &= \\ \partial q_i(e_{m_i}) / \partial F(q_i(e_{m_i})) \cdot \partial F(q_i(e_{m_i})) / \partial e_{m_i} &= \\ - \frac{[p_c(e_{m_1}, e_{m_2}) + e_{m_i} \partial p_c(e_{m_1}, e_{m_2}) / \partial e_{m_i}]}{p_i f(q_i(e_{m_i}))}. \end{aligned} \quad (10)$$

求解碳交易价格 $p_c(e_{m_1}, e_{m_2})$ 对单位产品排放量 e_{m_i} 的一阶偏导数, 并将式 (10) 代入其中得到

$$\begin{aligned} \partial p_c(e_{m_1}, e_{m_2}) / \partial e_{m_i} &= \\ \left\{ \left[q_i(e_{m_i}) - \frac{e_{m_i} p_c(e_{m_1}, e_{m_2})}{p_i f(q_i(e_{m_i}))} \right] \left[\sum_{i=1,2} \frac{e_{m_i}^2}{p_i f(q_i(e_{m_i}))} \right] + \right. \\ \left. \left\{ \sum_{i=1,2} [e_{m_i} q_i(e_{m_i}) - E_{m_i}] \right\} \left[\frac{2e_{m_i}}{p_i f(q_i(e_{m_i}))} + \right. \right. \\ \left. \left. \frac{e_{m_i}^2 f'(q_i(e_{m_i}))}{p_i^2 f^3(q_i(e_{m_i}))} p_c(e_{m_1}, e_{m_2}) \right\} \right\} / \\ \left\{ \left[\sum_{i=1,2} \frac{e_{m_i}^2}{p_i f(q_i(e_{m_i}))} \right]^2 - \left\{ \sum_{i=1,2} [e_{m_i} q_i(e_{m_i}) - E_{m_i}] \right\} \times \right. \\ \left. \frac{e_{m_i}}{p_i f(q_i(e_{m_i}))} \frac{e_{m_i}^2 f'(q_i(e_{m_i}))}{p_i f^2(q_i(e_{m_i}))} + \right. \\ \left. \frac{e_{m_i}^2}{p_i f(q_i(e_{m_i}))} \left[\sum_{i=1,2} \frac{e_{m_i}^2}{p_i f(q_i(e_{m_i}))} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (11)$$

式 (11) 中, 设

$$\begin{aligned} N(q_i(e_{m_i})) &= \\ \frac{\left\{ \sum_{i=1,2} [e_{m_i} q_i(e_{m_i}) - E_{m_i}] \right\} e_{m_i}^3 f'(q_i(e_{m_i}))}{p_i f^2(q_i(e_{m_i}))}, \end{aligned}$$

代入 $\partial p_c(e_{m_1}, e_{m_2}) / \partial e_{m_i}$, 并根据广义失效率函数的特性

$$\begin{aligned} [p_c(e_{m_1}, e_{m_2}) - c_s] \frac{e_{m_i} f'(q_i(e_{m_i}))}{p_i f^2(q_i(e_{m_i}))} &> \\ - \frac{p_c(e_{m_1}, e_{m_2}) - c_s}{p_c(e_{m_1}, e_{m_2}) + c_{m_i} / e_{m_i}} &> -1, \end{aligned}$$

有 $\partial p_c(e_{m_1}, e_{m_2}) / \partial e_{m_i} > 0$, $\partial q_i(e_{m_i}) / \partial e_{m_i} < 0$. 此外, 有

$$\frac{\partial p_c(e_{m_1}, e_{m_2})}{\partial e_{m_i}} > \frac{e_{m_i} q_i(e_{m_i}) + p_c(e_{m_1}, e_{m_2})}{e_{m_i} \sum_{i=1,2} \frac{e_{m_i}^2}{p_i f(q_i(e_{m_i}))}},$$

$$\partial q_i(e_{m_i}) / \partial e_{m_i} <$$

$$- \left\{ p_c(e_{m_1}, e_{m_2}) \left\{ \left[\sum_{i=1,2} \frac{e_{m_i}^2}{p_i f(q_i(e_{m_i}))} \right] + 1 \right\} + \right.$$

$$\left. e_{m_i} q_i(e_{m_i}) \right\} / \left\{ p_i f(q_i(e_{m_i})) \sum_{i=1,2} \frac{e_{m_i}^2}{p_i f(q_i(e_{m_i}))} \right\},$$

进而得到结论 1.

结论 1 最优碳交易价格 $p_c(e_{m_1}, e_{m_2})$ 与单位产品碳排放量 e_{m_i} 正相关, 且变化率 $\gamma_{p_c(e_{m_1}, e_{m_2}), e_{m_i}}$ 大于

$$\frac{e_{m_i} q_i(e_{m_i}) + p_c(e_{m_1}, e_{m_2})}{e_{m_i} \sum_{i=1,2} \frac{e_{m_i}^2}{p_i f(q_i(e_{m_i}))}};$$

最优产量 $q_i(e_{m_i})$ 与单位产品碳排放量 e_{m_i} 呈负相关, 且两者变化率 $\gamma_{q_i(e_{m_i}), e_{m_i}}$ 的绝对值大于

$$\frac{p_c(e_{m_1}, e_{m_1}) \left\{ \left[\sum_{i=1,2} \frac{e_{m_i}^2}{p_i f(q_i(e_{m_i}))} \right] + 1 \right\} + e_{m_i} q_i(e_{m_i})}{p_i f(q_i(e_{m_i})) \sum_{i=1,2} \frac{e_{m_i}^2}{p_i f(q_i(e_{m_i}))}}.$$

结论 1 表明, 如果单位产品的碳排放较高, 则碳配额供应商会因此提高碳交易价格获取更多的利润, 制造商会因为较高的碳配额交易成本而放弃高产量。

同理, 求最优产量 $q_i(E_{m_i})$ 对 E_{m_i} 的一阶偏导数

$$\begin{aligned} \partial q_i(E_{m_i}) / \partial E_{m_i} = \\ \partial q_i(E_{m_i}) / \partial F(q_i(E_{m_i})) \partial F(q_i(E_{m_i})) / \partial E_{m_i} = \\ - e_{m_i} / p_i f(q_i(E_{m_i})) \partial p_c(E_{m_1}, E_{m_2}) / \partial E_{m_i}. \end{aligned} \quad (12)$$

求解碳交易价格 $p_c(E_{m_1}, E_{m_2})$ 对 E_{m_i} 的一阶偏导数, 并将其代入式 (12) 得到

$$\begin{aligned} \partial q_i(E_{m_i}) / \partial E_{m_i} = \\ e_{m_i} / \left\{ p_i f(q_i(E_{m_i})) \sum_{i=1,2} \frac{e_{m_i}^2}{p_i f(q_i(E_{m_i}))} + \right. \\ \left. \frac{\left\{ \sum_{i=1,2} [e_{m_i} q_i(E_{m_i}) - E_{m_i}] \right\} e_{m_i}^3 f'(q_i(E_{m_i}))}{p_i f^2(q_i(E_{m_i}))} \right\} \\ \frac{\sum_{i=1,2} \frac{e_{m_i}^2}{p_i f(q_i(E_{m_i}))}}{e_{m_i}^2}. \end{aligned} \quad (13)$$

式 (13) 中, 设

$$\Theta(q_i(E_{m_i})) = \frac{\left\{ \sum_{i=1,2} [e_{m_i} q_i(E_{m_i}) - E_{m_i}] \right\} e_{m_i}^3 f'(q_i(E_{m_i}))}{p_i f^2(q_i(E_{m_i}))}.$$

由于

$$p_c(E_{m_1}, E_{m_2}) - c_s = \frac{\sum_{i=1,2} [e_{m_i} q_i(E_{m_i}) - E_{m_i}]}{\sum_{i=1,2} \frac{e_{m_i}^2}{p_i f(q_i(E_{m_i}))}},$$

$$h'(x) > 0,$$

可得

$$\Theta(q_i(E_{m_i})) > -e_{m_i}^2 \sum_{i=1,2} \frac{e_{m_i}^2}{p_i f(q_i(E_{m_i}))}.$$

代入式 (13) 得到

$$\begin{aligned} \frac{e_{m_i}}{p_i f(q_i(E_{m_i})) \sum_{i=1,2} \frac{e_{m_i}^2}{p_i f(q_i(E_{m_i}))}} > \frac{\partial q_i(E_{m_i})}{\partial E_{m_i}} > 0, \\ - \frac{1}{\sum_{i=1,2} \frac{e_{m_i}^2}{p_i f(q_i(E_{m_i}))}} < \frac{\partial p_c(E_{m_1}, E_{m_2})}{\partial E_{m_i}} < 0. \end{aligned}$$

进而得到结论 2.

结论 2 最优产量 $q_i(E_{m_i})$ 与政府规定的碳排放上限 E_{m_i} 呈正相关, 相关系数满足

$$\gamma_{q_i(E_{m_i}), E_{m_i}} < \frac{e_{m_i}}{p_i f(q_i(E_{m_i})) \sum_{i=1,2} \frac{e_{m_i}^2}{p_i f(q_i(E_{m_i}))}};$$

最优碳交易价格 $p_c(E_{m_1}, E_{m_2})$ 与 E_{m_i} 呈负相关, 相关系数满足

$$|\gamma_{p_c(E_{m_1}, E_{m_2}), E_{m_i}}| < \frac{1}{\sum_{i=1,2} \frac{e_{m_i}^2}{p_i f(q_i(E_{m_i}))}}.$$

推论 1 由于

$$\left| \frac{\Theta(q_i(E_{m_i}))}{e_{m_i}^2 \sum_{i=1,2} \frac{e_{m_i}^2}{p_i f(q_i(E_{m_i}))}} \right| < \frac{p_c(E_{m_1}, E_{m_2}) - c_s}{p_c(E_{m_1}, E_{m_2}) + \frac{c_{m_i}}{e_{m_i}}},$$

$\Theta(q_i(E_{m_i}))$ 偏离 $e_{m_i}^2 \left\{ \sum_{i=1,2} \frac{e_{m_i}^2}{p_i f(q_i(E_{m_i}))} \right\}$ 的程度取决于 $(c_s, c_{m_i}/e_{m_i})$ 的值. c_s 或 c_{m_i}/e_{m_i} 越大, $\Theta(q_i(E_{m_i}))$ 偏离程度越大, 最优产量和碳交易价格随碳排放上限的变化率也越大; 反之则越小。

结论 2 和推论 1 表明: 如果供应商的碳配额运营成本较高, 则碳交易价格对于排放上限的敏感性也会提高; 如果产生单位碳排放量的成本较高, 则产量对于碳排放上限的敏感性也会提高。

下面分析经济主体最优利润值与产品碳排放量与碳排放上限的关系. 首先求三主体利润对 e_{m_i} 的一阶偏导数, 得到

$$\begin{aligned} \partial \Pi_{M_i}(q_i(e_{m_i})) / \partial e_{m_i} = \\ - \frac{\partial p_c(e_{m_1}, e_{m_2})}{\partial e_{m_i}} [e_{m_i} q_i(e_{m_i}) - E_{m_i}] - \\ p_c(e_{m_1}, e_{m_2}) q_i(e_{m_i}). \end{aligned} \quad (14)$$

由式 (14) 易得到 $\partial \Pi_{M_i}(q_i(e_{m_i})) / \partial e_{m_i} < 0$, 且由结论 1 可得

$$\frac{\partial \Pi_{M_i}(q_i(e_{m_i}))}{\partial e_{m_i}} < - \frac{e_{m_i} q_i(e_{m_i}) - E_{m_i}}{e_{m_i} \sum_{i=1,2} [e_{m_i} q_i(e_{m_i}) - E_{m_i}]}.$$

同样有

$$\begin{aligned} \partial \Pi_S(p_c(e_{m_1}, e_{m_2})) / \partial e_{m_i} = \\ \left\{ 1 - \frac{e_{m_i}^2}{p_i f(q_i(e_{m_i})) \sum_{i=1,2} \frac{e_{m_i}^2}{p_i f(q_i(e_{m_i}))}} \right\} \times \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1,2} [e_{m_i} q_i(e_{m_i}) - E_{m_i}] \frac{\partial p_c(e_{m_1}, e_{m_2})}{\partial e_{m_i}} + \left[q_i(e_{m_i}) - \frac{e_{m_i} p_c(e_{m_1}, e_{m_2})}{(p_i f(q_i(e_{m_i})))} \right] [p_c(e_{m_1}, e_{m_2}) - c_s]. \quad (15)$$

式(15)中, 由于

$$e_{m_i}^2 / \left\{ p_i f(q_i(e_{m_i})) \sum_{i=1,2} [e_{m_i}^2 / (p_i f(q_i(e_{m_i})))] \right\} < 1,$$

$$p_i q_i(e_{m_i}) f(q_i(e_{m_i})) > e_{m_i} p_c(e_{m_1}, e_{m_2}),$$

有 $\partial \Pi_S(p_c(e_{m_1}, e_{m_2})) / \partial e_{m_i} > 0$, 进而得到结论3.

结论3 两制造商最优利润均与其单位产品碳排放量呈负相关, 且相关系数的绝对值大于

$$\frac{e_{m_i} q_i(e_{m_i}) - E_{m_i}}{e_{m_i} \sum_{i=1,2} [e_{m_i} q_i(e_{m_i}) - E_{m_i}]};$$

碳配额供应商的最优利润值与制造商单位产品的碳排放量呈正相关, 且相关系数大于

$$\frac{e_{m_j}^2}{p_j f(q_j(e_{m_j})) e_{m_j} \sum_{i=1,2} [e_{m_i}^2 / p_i f(q_i(e_{m_i}))]}.$$

结论3表明: 较高单位产品的碳排放量的制造商所能获得的最优利润值较低, 它们之间的负相关系数取决于制造商所需购买碳配额占两制造商总的比例; 高排放产品对碳配额供应商是有利的, 其利润函数与产品碳排放量的正相关系数取决于 $e_{m_j}^2 / p_j f(q_j(e_{m_j}))$ 值所占总的比例.

同理, 求两制造商利润对 E_{m_i} 一阶偏导数. 由于

$$\frac{\partial q_i(E_{m_i})}{\partial p_c(E_{m_1}, E_{m_2})} = - \frac{e_{m_i}}{p_i f(q_i(E_{m_i}))},$$

经化简有

$$\begin{aligned} \partial \Pi_{M_i}(q_i(E_{m_i})) / \partial E_{m_i} = & \frac{p_i f(q_i(E_{m_i}))}{e_{m_i}} [e_{m_i} q_i(E_{m_i}) - E_{m_i}] \frac{\partial q_i(E_{m_i})}{\partial E_{m_i}} + \\ & p_c(E_{m_1}, E_{m_2}). \end{aligned} \quad (16)$$

容易得到 $\partial \Pi_{M_i}(q_i(E_{m_i})) / \partial E_{m_i} > 0$. 同样地, 求碳配额供应商利润对 E_{m_i} 的一阶偏导数, 并经化简得到

$$\begin{aligned} \partial \Pi_S(p_c(E_{m_1}, E_{m_2})) / \partial E_{m_i} = & \left\{ \left\{ \frac{e_{m_i}}{\sum_{i=1,2} \frac{e_{m_i}^2}{p_i f(q_i(E_{m_i}))}} - \frac{p_i f(q_i(E_{m_i}))}{e_{m_i}} \right\} \frac{\partial q_i(E_{m_i})}{\partial E_{m_i}} - \right. \\ & \left. \frac{1}{\sum_{i=1,2} \frac{e_{m_i}^2}{p_i f(q_i(E_{m_i}))}} \right\} \left\{ \sum_{i=1,2} [e_{m_i} q_i(E_{m_i}) - E_{m_i}] \right\}. \end{aligned} \quad (17)$$

式(17)中, 由于

$$\left\{ e_{m_i}^2 / \sum_{i=1,2} \frac{e_{m_i}^2}{(p_i f(q_i(E_{m_i})))} \right\} / p_i f(q_i(E_{m_i})) < 1,$$

有 $\partial \Pi_S(p_c(E_{m_1}, E_{m_2})) / \partial E_{m_i} < 0$, 进而得到结论4.

结论4 两制造商最优利润 $\Pi_{M_i}(E_{m_i})$ 与碳排放上限 E_{m_i} 呈正相关, 相关系数小于

$$[e_{m_i} q_i(E_{m_i}) - E_{m_i}] / \sum_{i=1,2} \frac{e_{m_i}^2}{p_i f(q_i(E_{m_i}))};$$

碳配额供应商最优利润 $\Pi_S(E_{m_1}, E_{m_2})$ 与碳排放上限 E_{m_i} 呈负相关, 相关系数的绝对值小于

$$\frac{e_{m_i} \left\{ \sum_{i=1,2} [e_{m_i} q_i(E_{m_i}) - E_{m_i}] \right\}}{p_i f(q_i(E_{m_i})) \sum_{i=1,2} \frac{e_{m_i}^2}{p_i f(q_i(E_{m_i}))}}.$$

结论4表明: 较宽松的碳排放上限能使制造商获得较高的利润值; 碳配额供应商则更倾向于政府对制造商较为苛刻的碳配额分配政策.

3.3 供应链利润的分配和协调

由以上分析过程可见, 两制造商利润 $\Pi_{M_i}(q_i)$ 与单位产品碳排放量 e_{m_i} 呈正相关, 与碳排放上限 E_{m_i} 呈负相关; 碳配额供应商情况恰好相反. 下面分析政府对两制造商规定的碳排放上限 E_{m_i} 如何影响各主体及其供应链总利润, e_{m_i} 的分析过程与 E_{m_i} 相同.

设由两产品制造商和碳配额供应商组成供应链的总利润为 $\Pi_C = \Pi_{M_i} + \Pi_S$, 均为政府碳排放上限 E_{m_i} 的函数. 即

$$\begin{aligned} \Pi_C(E_{m_1}, E_{m_2}) = & \sum_{i=1,2} \{ p_i S(q_i(E_{m_i})) - c_{m_i} q_i(E_{m_i}) - \\ & c_s [e_{m_i} q_i(E_{m_i}) - E_{m_i}] \}. \end{aligned} \quad (18)$$

对式(18)求 E_{m_i} 的一阶偏导数, 由于 $\frac{\partial q_i(E_{m_i})}{\partial E_{m_i}} > 0$, 容易得到 $\partial \Pi_C(E_{m_1}, E_{m_2}) / \partial E_{m_i} > 0$. 同理, 将供应链总利润看作单位产品碳排放函数, 并求其对 e_{m_i} 一阶偏导数, 得到

$$\begin{aligned} \partial \Pi_C(e_{m_1}, e_{m_2}) / \partial e_{m_i} = & \sum_{i=1,2} \left\{ e_{m_i} [p_c(e_{m_1}, e_{m_2}) - c_s] \frac{\partial q_i(e_{m_i})}{\partial e_{m_i}} - c_s q_i(e_{m_i}) \right\}. \end{aligned}$$

由于 $\partial q_i(e_{m_i}) / \partial e_{m_i} < 0$, 有 $\partial \Pi_C(e_{m_1}, e_{m_2}) / \partial e_{m_i} < 0$, 这表明供应链总利润与两产品的碳排放量呈负相关.

令 $\partial \Pi_C / \partial q_i = 0$, 解得

$$q_{ic}^* = F^{-1}[(p_i - c_{m_i} - e_{m_i} c_s) / p_i]. \quad (19)$$

由式(19)可知, 两制造商实际产生的碳排放量均应满足条件

$$E_i(e_{m_i}, q_i) = e_{m_i} q_i < e_{m_i} F^{-1} \left[\frac{p_i - c_{m_i} - e_{m_i} c_s}{p_i} \right].$$

当碳排放上限均满足条件 $E_{m_i} < e_{m_i} q_{ic}^*$ 时, 可得

$$E_{m_i} < e_{m_i} F^{-1} \left[\frac{p_i - c_{m_i} - e_{m_i} c_s}{p_i} \right].$$

因为 $p_c^* > c_s$, 所以有

$$e_{m_i} F^{-1}[(p_i - c_{m_i} - e_{m_i} p_c^*)/p_i] <$$

$$e_{m_i} F^{-1}[(p_i - c_{m_i} - e_{m_i} c_s)/p_i],$$

由此可将两碳排放上限可能的取值区间划分为

$$A_1 \in [0, e_{m_i} F^{-1}[(p_i - c_{m_i} - e_{m_i} p_c^*)/p_i]] \cup$$

$$A_2 \in [e_{m_i} F^{-1}[(p_i - c_{m_i} - e_{m_i} p_c^*)/p_i],$$

$$e_{m_i} F^{-1}[(p_i - c_{m_i} - e_{m_i} c_s)/p_i]].$$

在区域 A_1 中, 两个制造商相对于其产品产量 q_i 的边际利润均为

$$\frac{\partial \Pi_{M_i}^*}{\partial q_i} = -\frac{\partial p_c^*}{\partial q_i} (e_{m_i} q_i - E_{m_i}). \quad (20)$$

又根据式 (7) 可得

$$\frac{\partial p_c^* / \partial q_i = e_{m_i} \left[\sum_{i=1,2} \frac{e_{m_i}^2}{p_i f(q_i)} \right] + \sum_{i=1,2} [e_{m_i} q_i^* (p_c) - E_{m_i}] \frac{e_{m_i}^2 f'(q_i)}{p_i}}{\left[\sum_{i=1,2} \frac{e_{m_i}^2}{p_i f(q_i)} \right]^2} < 0,$$

进而得到 $\partial \Pi_{M_i}^* / \partial q_i > 0$.

在区域 A_2 中, 政府分配给每个制造商的碳配额均大于其生产所需, 但小于按照使得供应链利润最大化产量生产所需的碳配额, 这样, 两制造商都将扩大生产以用掉过多的碳配额, 进而获得更多利润.

由式 (4) 可知, 当政府分配的碳配额正好等于制造商生产所需时, $E_{r_i} = 0$, $e_{m_i} q_i = E_{m_i}$. 此时, 碳配额供应商的利润为零, 两制造商利润和等于供应链总利润, 即

$$\begin{aligned} \Pi_C = \Pi_{NS} &= \sum_{i=1,2} \Pi_{M_i} = \sum_{i=1,2} [p_i S(q_i) - c_{m_i} q_i] = \\ &= \sum_{i=1,2} \left[p_i S \frac{E_{m_i}}{e_{m_i}} - c_{m_i} \frac{E_{m_i}}{e_{m_i}} \right]. \end{aligned} \quad (21)$$

当制造商以 $q_{ic}^* = F^{-1}[(p_i - c_{m_i} - e_{m_i} c_s)/p_i]$ 生产时, 供应链利润最优值为

$$\begin{aligned} \Pi_C = \Pi_W &= \sum_{i=1,2} \Pi_{M_i} = \\ &= \sum_{i=1,2} [p_i S(q_{ic}^*) - c_{m_i} q_{ic}^* - c_s (e_{m_i} q_{ic}^* - E_{m_i})]. \end{aligned} \quad (22)$$

由此可得两者的差值为

$$\begin{aligned} \Delta \Pi_{NS,W} &= \\ &= \sum_{i=1,2} \left\{ [p_i [1 - F(\bar{h}_i)] - c_{m_i} - e_{m_i} c_s] \left(\frac{E_{m_i}}{e_{m_i}} - q_{ic}^* \right) \right\}, \\ \bar{h}_i &\in (E_{m_i}/e_{m_i}, q_{ic}^*). \end{aligned} \quad (23)$$

式 (23) 中, 由于 $E_{im} < e_{m_i} q_{ic}^*$, 有 $\Delta \Pi_{NS,W} < 0$. 这表明碳配额供应商参与决策后, 供应链的最优利润值变大了. 为了同时提高两制造商和碳配额供应商的利润, 可以分配利润增量 $|\Delta \Pi_{NS,W}|$. 设两制造商和碳配额供应商之间的转移支付函数为 $T_i(q_i, E_{m_i})$, 由于

两制造商利润函数对产量的二阶偏导数均小于零, 存在 $q_{T_i}^*$ 使其达到最优. 令 $\partial \Pi_{M_i, T_i} / \partial q_i = 0$, 解得

$$F(q_{T_i}^*) = \frac{[p_i - c_{m_i} - \partial T_i(q_i, E_{m_i}) / \partial q_i]}{p_i}. \quad (24)$$

根据 Cachon^[14-15]关于供应链利润协调的研究可得到结论 5.

结论 5 当满足 $q_{T_i}^* = q_{ic}^*$ 时, 供应链可以达到集中决策下的最优利润, 供应链系统达到了协调, 即当两级主体间的转移支付对于产量的边际利润与生产该产品所需的碳配额运营成本相等时可协调供应链的利润值.

同样地, 令 $T_i(q_i, e_{m_i})$, 可以得到当 $\partial T_i(q_i, e_{m_i}) / \partial q_i = e_{m_i} c_s$ 时, 该转移支付契约可协调供应链利润值的结论. 假设两制造商和碳配额供应商的利润和与整个供应链的最优利润值相等, 并设它们占供应链总利润的比例为 $(\alpha_i(E_{m_i}), 1 - \sum_{i=1,2} \alpha_i(E_{m_i}))$, 则两制造商和碳配额供应商的利润函数可以表示为

$$\Pi_{M_i}(E_{m_i}) = \alpha_i(E_{m_i}) \Pi_C(E_{m_1}, E_{m_2}),$$

$$\Pi_S(E_{m_1}, E_{m_2}) = \left[1 - \sum_{i=1,2} \alpha_i(E_{m_i}) \right] \Pi_C(E_{m_1}, E_{m_2}).$$

若制造商按照政府分配的碳配额生产, 则其利润应为

$$\Pi_{M_i,r}(E_{m_i}) = \Pi_{NS}(E_{m_i}) = p_i S \frac{E_{m_i}}{e_{m_i}} - c_{m_i} \frac{E_{m_i}}{e_{m_i}},$$

此即为制造商的保有利润. 因此, 当碳配额供应商参与决策后, 两制造商的实际效用增量应为

$$U_{M_i}(E_{m_i}) = \alpha_i(E_{m_i}) \Pi_C(E_{m_1}, E_{m_2}) - \Pi_{M_i,r}(E_{m_i}).$$

若使两制造商的效用增量大于零, 则分享比例应满足

$$\alpha_i(E_{m_i}) > \frac{\Pi_{M_i,r}(E_{m_i})}{\Pi_C(E_{m_1}, E_{m_2})}.$$

对于碳配额供应商而言, 其保有利润为零, 效用增量应为

$$U_S(E_{m_1}, E_{m_2}) = \left[1 - \sum_{i=1,2} \alpha_i(E_{m_i}) \right] \Pi_C(E_{m_1}, E_{m_2}).$$

此时, 两制造商与碳配额供应商效用增量之和恰好等于供应链利润的增量 $|\Delta \Pi_{NS,W}|$. 此外, 求解 $\alpha_i(E_{m_i})$ 对 E_{m_i} 的一阶偏导数, 容易得到 $\partial \alpha_i(E_{m_i}) / \partial E_{m_i} > 0$, 即政府应该寻求能够同时使得两制造商和碳配额供应商效用最大化条件下的碳排放上限, 也即寻求 E_{m_i} 使得 $\max_{U_{M_i}, U_S} \prod_{i=1,2} U_{M_i}(E_{m_i}) U_S(E_{m_1}, E_{m_2})$.

同样地, 设两制造商利润分享比例为其单位产品碳排放量的函数, 并求其对 e_{m_i} 的一阶偏导数, 容易得到 $\partial \alpha_i(e_{m_i}) / \partial e_{m_i} < 0$, 即制造商应该治理产品碳排放量以使供应链效用和最大化, 也即寻求 e_{m_i} 使得 $\max_{U_M, U_S} \prod_{i=1,2} U_{M_i}(e_{m_i}) U_S(e_{m_1}, e_{m_2})$.

注意到, 本文分析的是下游两个制造商的情况,

可将上述结论扩展到 n 个制造商的情况. 但若上游存在多个碳配额供应商, 且它们独立决策碳交易价格, 则所得结论有所不同, 这一情况后续研究会尽力解决.

4 数值分析

为了表明上述问题和结论, 并简化计算过程, 假设随机变量 $\varepsilon_i \sim U[0, 200]$. 由此可得随机变量 ε_i 的分布函数和密度函数分别为 $F(\varepsilon_i) = \varepsilon_i/200$, $f(\varepsilon_i) = 1/200$. 因为 $h'(\varepsilon_i) > 0$, 所以满足广义递增失效率函数的条件. 设两种低碳产品的零售价格分别为 $p_1 = 100$, $p_2 = 80$, 碳排放量分别为 $e_{m_1} = 1.5$, $e_{m_2} = 1$, 单位生产成本和供应商单位碳配额的运营成本分别为 $c_{m_1} = 10$, $c_{m_2} = 12$, $c_s = 5$. 根据以上假设, 可得集中决策下供应链的最优产量为 $q_{1c}^* = 165$, $q_{2c}^* = 157.5$. 由此政府碳排放上限应分别满足 $E_{m_1} \in (0, 247.5)$, $E_{m_2} \in (0, 157.5)$. 现假设政府实际规定的排放上限分别为 $E_{m_1} = 100 < E_{m_1}^+ = 247.5$, $E_{m_2} = 80 < E_{m_2}^+ = 157.5$, 则根据式 (4) 和 (7) 可得最优产量和碳价格分别为 $(q_1^*, q_2^*, p_c^*) = (115, 136, 18.326)$. 当政府设定的排放上限分别为 $E_{m_1} = 100$, $E_{m_2} = 80$ 时, 两制造商需以 $p_c = 18.326$ 的碳价格分别购买 $E_{r_1} = 1.5 \times 115 - 100 = 72.5$, $E_{r_2} = 1 \times 136 - 80 = 56$ 单位的碳配额. 此时两制造商、碳配额供应商和整个供应链的最优利润分别为

$$\Pi_{M_1}^*(q_1^*) = 6593.0475, \Pi_{M_2}^*(q_2^*) = 6973.7663,$$

$$\Pi_S^*(p_c^*) = 2865.8857, \Pi^* = 16432.6995.$$

两制造商相对整个供应链的利润分享比例分别为

$$\alpha_1 = 0.4012, \alpha_2 = 0.4243.$$

碳排放上限 $E_{m_1} \in (0, 240)$, $E_{m_2} \in (0, 150)$ 均以步长为 10 逐渐增加时, 最优产量 q_i^* 、最优碳交易价格 p_c^* 、各主体最优利润和两制造商讨价还价能力的相应数据如表 1 所示, 限于篇幅, 这里只列出单制造商的部分数据, 另一制造商与之相同. 由表 1 可见, 随着碳

排放上限的逐步放宽, 两制造商在与碳配额供应商就碳价格问题讨价还价时的能力在增强; 同时, 无论是制造商还是碳配额供应商, 其讨价还价能力变化的空间都将随碳排放上限的增加而减小. 各经济主体利润分配和效用提升情况如表 2 所示.

最优碳价格 p_c^* 和产量 q_i^* 与碳配额上限 E_{m_i} 的关系见图 1. 各主体利润与碳配额上限 E_{m_i} 的关系见图 2. 由图 1 和图 2 可见, 随着政府碳排放上限的逐步放宽, 最优产量将会增加, 碳价格将会降低; 同时, 两制造商和供应链总利润均在增加, 而碳配额供应商的利润在减少. 上述结论与第 3.2 节的分析相吻合.

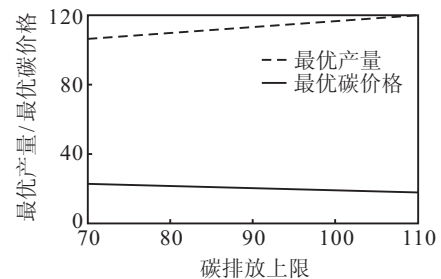


图 1 最优碳价格 p_c^* 和产量 q_i^* 与碳配额上限 E_{m_i} 的关系

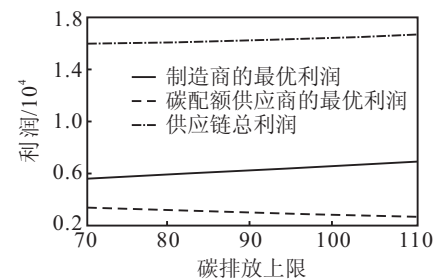


图 2 各主体利润与碳配额上限 E_{m_i} 的关系

各经济主体分配利润与碳排放上限 E_{m_i} 的关系如图 3 所示. 效用提升与碳排放上限 E_{m_i} 的关系如图 4 所示. 由图 3 可见, 若制造商按照政府规定的碳排放上限生产, 则其所得利润值也随 E_{m_i} 的增大而增

表 1 产品产量、碳交易价格和各主体利润最优数据

序号	碳排放上限	最优产量	最优碳价格	购买配额	制造商最优利润	碳配额供应商最优利润	供应链总利润	制造商讨价还价能力
1	70	105.833	23.012	88.751	5622.723	3386.347	15981.076	0.3121
2	80	109.167	21.451	83.689	5932.332	3210.681	16026.910	0.3487
3	90	112.500	19.830	78.746	6245.675	3021.125	16267.188	0.3782
4	100	115.433	18.326	72.549	6593.047	2865.885	16432.699	0.4012
5	110	119.167	17.875	67.470	6926.893	2667.347	16611.076	0.4209

表 2 各主体利润值和分配情况随碳排放上限变化数据

序号	碳排放上限	供应链最优利润	单制造商最优利润	两种情况利润差	按分配比例制造商最优利润	按分配比例供应商最优利润	制造商提高效用	供应商提高效用	总效用提升
1	70	16285.076	4912.343	11372.733	5082.572	2893.425	248.898	479.152	728.05
2	80	16386.890	5531.658	10855.232	5714.109	2431.942	326.247	420.796	747.043
3	90	16467.138	5900.585	10566.553	6227.872	1923.362	413.112	327.287	740.399
4	100	16532.574	6212.073	10320.501	6632.869	1440.408	509.001	193.451	702.452
5	110	16581.232	6499.889	10081.343	6979.041	956.911	613.331	56.229	669.56

大. 对于按照分享比例分配供应链总利润而言, 制造商所得利润与 E_{m_i} 呈正相关, 碳配额供应商所得利润与其呈负相关. 由图 4 可见, 可以找到使供应链的总效用提升量达到最优的碳排放上限, 即图 4 中所示为 $E_{m_i}^* = 80$ 左右. 上述结论与第 3.3 节所得结论相吻合. 因为可将 E_{m_i}/e_{m_i} 看作政府给制造商分配的产量, 所以对 e_{m_i} 的分析过程与对 E_{m_i} 的分析过程恰好相反, 所得的图形关系也是反向的, 但其原理和分析过程相同, 此处不再赘述.

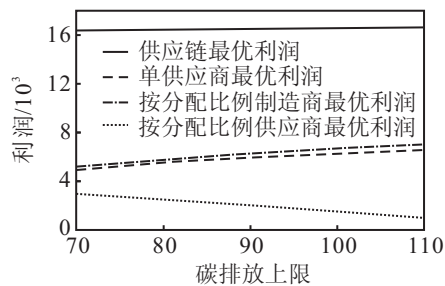


图 3 各经济主体分配利润与碳排放上限 E_{m_i} 的关系

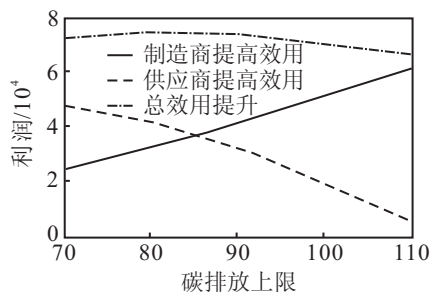


图 4 效用提升与碳排放上限 E_{m_i} 的关系

5 结 论

本文从易逝产品的碳排放量和政府的碳排放规制入手, 分析了存在碳交易背景下由碳配额供应商和其下游两个产品制造商(可扩展到 n 个制造商)组成低碳供应链的最优决策问题, 并分别得到各经济主体的最优变量和利润值. 分析表明, 两种产品产量均反比于自身的碳排放量, 正比于政府的碳规制; 碳交易价格呈现出与产量相反的状态. 两制造商和碳配额供应商的利润提升空间与产品碳排放量和碳排放上限呈相反的关系, 因此制造商应该有效治理产品的碳排放量, 政府也应合理确定碳排放上限值, 以使各经济主体的效用和达到最优.

参考文献(References)

[1] Coase Ronald H. The problem of social cost[J]. J of Law and Economics, 1960, 3(1): 1-44.
 [2] Stern. The economics of climate change[J]. American Economic Review, 2008, 98(2): 1-37.
 [3] Goulder Lawrence H, Hafstead Marc A C, Dworsky Michael S. Impacts of alternative emissions allowance

allocation methods under a federal cap-and-trade program[J]. J of Environmental Economics and Management, 2010, 60(3): 161-181.

- [4] Diabat Ali, Simchi-Levi. A carbon-capped supply chain network problem[C]. IEEE Int Conf on Industrial Engineering and Engineering Management. IEEM, 2009: 523-527.
 [5] Cachon G P. Carbon footprint and the management of supply chains[C]. The Informs Annual Meeting. San Diego, 2009: 50-53.
 [6] Cachon G P. Supply chain design and the cost of greenhouse gas emissions[R]. Pennsylvania: University of Pennsylvania, 2011.
 [7] Benjaafar Saif, Li Yan-zhi, Daskin Mark. Carbon footprint and the management of supply chains: Insights from simple models[J]. IEEE Trans on Automation Science and Engineering, 2013, 10(1): 99-116.
 [8] 杜少甫, 董骏峰, 梁樑. 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 S F, Dong J F, Liang L. Production optimization considering emission permits and trading[J]. Chinese J of Management Science, 2009, 17(3): 81-86.)
 [9] Zhang Jing-jiang, Nie Teng-fei, Du Shao-fu. Optimal emission-dependent production policy with stochastic demand[J]. J Int J of Society Systems Science, 2011, 3(2): 21-39.
 [10] Du Shao-fu. Game-theoretic analysis for an emission-dependent supply chain in a 'cap-and-trade' system[J]. Annals of Operations Research, 2011, DOI 10.1007/s10479-011-0964-6.
 [11] Du Shao-fu, Zhu Li-li, Liang Liang. Emission-dependent supply chain and environment-policy-making in the 'cap-and-trade' system[J]. Energy Policy, 2013, 57(3): 61-67.
 [12] Barlow Richard E, Marshall Albert W, Proschan Frank. Properties of probability distributions with monotone hazard rate[J]. Annals of Mathematical Statistics, 1963, 34(2): 375-389.
 [13] Block Henry W, Savits Thomas H. Multivariate increasing failure rate average distributions[J]. Annals of Probability, 1980, 8(4): 793-801.
 [14] Cachon G P. Supply chain coordination with contracts[J]. Handbooks in Operations Research and Management Science, 2003, 11(2): 1-95.
 [15] Cachon Gérard P. Supply chain coordination with revenue-sharing contracts: Strengths and limitations[J]. Management Science, 2005, 51(1): 30-44.

(责任编辑: 郑晓蕾)