

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2018.03.017

# 碳排放权配额统一增价拍卖均衡下企业减排研究

张庭溢

(福建工程学院 交通运输学院, 福建 福州 350118)

**摘要:** 由于碳排放权资源的稀缺性,过高的碳排放权拍卖价格将极大地增加企业的生产运营成本,从而迫使企业考虑投资以降低碳排放成本。针对低碳产品敏感的消费者建立产销模型,由竞拍企业的碳排放权需求函数在统一增价拍卖中形成拍卖均衡,以企业自身收益最大化为决策标准,给出最优减排决策。结论表明:碳排放总量的大小直接决定了拍卖均衡价格的高低,碳排放权拍卖总量的控制是经济结构调整的一个有效措施。

**关键词:** 碳排放权配额拍卖; 独立需求; 古诺竞争; 减排; 统一增价拍卖

**中图分类号:** F062.2; F224.3; F253.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-4348(2018)03-0293-08

## Study on carbon emission reduction of two homogeneous enterprises under the equalization of carbon emission quota with unified auction

ZHANG Tingyi

(School of Transportation, Fujian University of Technology, 350118, Fuzhou, China)

**Abstract:** Due to the scarcity of carbon emission quota, its excessive auction price will greatly increase the cost of production and operation, thus forcing enterprises to consider investing to reduce the cost of carbon emissions. A production and marketing model was established for consumers who are sensitive to low-carbon products. Auction equilibrium was realized in unified auction with the working of the carbon emission demand function of the enterprises. Maximization of their profits was the standard in their decision-making when making the optimal decision in reducing emission. Results show that the total amount of carbon emissions directly determines the auction equilibrium price. The control of the total amount of carbon emission quota making a auction is an effective measure in economic restructuring.

**Keywords:** carbon emission quota auction; independent demand; Cournot competition; carbon emission reduction; unified auction

近年来,如何降低碳排放是气候大会的重要议题。2015 年巴黎气候变化大会通过了第一个全球参与的、具有法律效力的减排公约——《巴黎协定》,通过了各国“自主减排+盘点”的方式。中国政府预计在 2030 年之前碳排放达到峰值,提出单位 GDP 碳排放相比 2005 年下降 60%~65% 这一很有挑战性的目标<sup>[1]</sup>。为了实现碳排放总量的控制和碳排放强度的降低,中国政府借鉴欧盟碳排放交易机制,试点了以交易机制为主的碳排放规制政策,并将最终采用拍卖机制。饶蕾<sup>[2]</sup>

收稿日期: 2018-01-12  
基金项目: 福建省社会科学规划项目 (FJ2015C119); 福建省自然科学基金资助项目 (2016J05167); 教育部人文社会科学  
研究青年项目 (16YJC790032)  
作者简介: 张庭溢 (1982-), 男, 福建莆田人, 副教授, 博士, 研究方向: 生态供应链管理。

等基于对欧盟碳交易体系的研究,提出中国应从免费原则逐步过渡到拍卖原则。同时,根据欧盟在 2009 年公布的《哥本哈根气候变化综合协议》,为了实现 2020 年比 2005 年碳排放总量减少 21% 这一目标,碳排放的分配将逐渐由行政式免费分配过渡到碳排放权拍卖为主的分配方式,通过拍卖的方式来分配初始碳排放权是欧盟碳排放上限—交易机制 (EU-ETS) 后期运行的唯一方式<sup>[3]</sup>。

国内外学者主要从机制优劣和机制设计视角研究了碳排放权的拍卖交易问题。碳排放总量的控制使碳排放权成为了稀缺资源,碳排放权配额拍卖引入了竞争机制,可以最大程度保证碳排放权配额分配的公平性,同时提供了碳排放权的价格发现机制,对于减排资源的合理分配具有重要意义。碳排放权拍卖机制可以使资源配置优化更加有效,<sup>[4]</sup>拍卖原则减少了税收扭曲,减少了政策争论,提供了更多的流动性,效率更高,因此更优<sup>[5]</sup>。同时公开拍卖机制相对于固定价格出售机制,其碳排放价格能够更合理地反映市场状况,有利于企业进行更加有效的决策<sup>[6]</sup>。政府还可利用拍卖收入对企业进行减税或者财政补贴,可以减少该方式的实施阻力<sup>[7]</sup>。对参与企业而言,是从二级交易市场上直接购买配额,还是在一级市场上通过拍卖方式竞价获得排放权,其最主要的决策依据是两个市场上交易价格的高低比较<sup>[8]</sup>。政府可以实施适当的市场干预和调控措施,通过碳排放权拍卖机制可制定合理的拍卖保留价和二级市场交易价格,使二级市场交易价格维持在理想水平<sup>[9]</sup>。Wang<sup>[10]</sup>等对碳排放许可证拍卖机制设计进行了分析,但他们假设价格可以被任意微调,与现实存在一定差距,这样的拍卖机制很难应用于未来的商业活动。学者丁黎黎<sup>[11]</sup>针对政府在碳排放权交易市场中的多目标问题,引入实施质量门槛变量来构建政府与竞标企业间的动态博弈模型,借以分析政府如何兼顾拍卖交易中的经济收益与非经济收益情形是对传统碳排放权拍卖机制设计的有益补充。当前增价拍卖机制在多物品拍卖机制中相对较为成熟。王明荣和王明喜<sup>[12]</sup>把帕累托最优概念引入碳排放许可证拍卖—交易框架,在比较分析无偿分配及拍卖分配的不同影响的基础上,提出了标准增价拍卖方式的量化模型,设计了一个新的碳排放许可证

拍卖机制,并给出不同排放率下企业采取严格竞标和策略竞标。学者曾鸣<sup>[13]</sup>则针对标准增价拍卖方式,并给出不同排放率下企业采取严格竞标和策略竞标两种方案,分析了不同策略组合下的企业利润。

综上所述,国内外学者对碳排放权拍卖研究主要基于对拍卖机制本身带来的影响,抑或对碳排放权的拍卖机制进行研究,而把碳排放权拍卖政策与企业的产销与减排决策进行研究的文献还相对比较少。笔者将在前人研究基础上,通过数学模型研究当面向单位产品碳排放敏感的消费者时,参与碳排放权增价拍卖的企业存在不同竞争结构时竞拍的纳什均衡,以及在拍卖均衡下参与碳排放权拍卖的实体企业的生产及减排决策。

## 1 基本模型

### 1.1 模型说明

碳排放权拍卖政策下,所有有碳排放需求的企业都将参与到碳排放权配额拍卖的博弈中,包括不同行业、不同地区,而且企业之间存在着各种各样的竞争和合作关系,如上下游的产销博弈、同行业内企业间的竞争关系以及横向和纵向之间的投资和创新共享等。本文主要考虑由两家同质型竞争企业参与竞拍,考虑以下两种竞争结构:独立需求和古诺竞争。在独立需求中,参与拍卖的碳排放企业产品不存在竞争关系,假设企业均为本区域垄断,即企业面对独立需求,如德国的 RWE 电力公司和德国蒂森克虏伯钢铁公司共同参与碳排放权拍卖;古诺竞争中,参与拍卖的实体企业的产品之间存在替代关系,如德国 RWE 电力公司和 Vattenfall 电力公司共同参与碳排放权的拍卖。拍卖方式分配碳排放权方案的步骤如下:首先确定所有参与碳排放实体企业名单;其次确定分配总量;再次通过拍卖的方式把碳排放配额分配给排放实体;最后得到均衡价格和各企业得到的碳排放权。

### 1.2 相关假设

假设 1:拍卖获取碳排放配额是企业获取碳排放权的唯一方式。

根据欧盟碳排放—交易机制的规定,企业上一阶段的多余碳排放权不带入下一个阶段,不考虑上一个阶段碳排放配额剩余的情况。为了简化起见,假定不考虑企业可以通过购买减排信用、碳

中和等途径来获取碳排放权,生产销售过程中所产生的所有碳排放都需要通过竞拍获得,即购买获得一单位的排放权意味着企业在接下来的生产销售中可以排放一单位的碳排放量。如果企业  $i$  竞拍所得的排放配额为  $E_i$ ,那么接下来的生产中将消耗  $E_i$  的碳排放量。基于此,需要假设 2。

假设 2:生产过程中的碳排放量是可以准确预估并且是稳定的,即不考虑内外部环境不确定性因素的影响。

假设 3:政府或环保组织把总量配额为  $\bar{E}$  的碳排放权通过拍卖的方式全部分配给参与拍卖的碳排放实体。

为了缓解气候恶化,世界上绝大部分国家或地区都在世界气候大会上承诺未来的碳减量,并对总量进行控制。即所拍卖的总的碳排放配额是有限的,假设碳排放配额拍卖总量为  $\bar{E}$ 。若有  $n$  个企业参与碳排放权拍卖,每个碳排放企业竞拍所得的碳排放量为  $E_i$ ,则有:  $\sum_{i=1}^n E_i = \bar{E}$ 。

假设 4:假设拍卖机制为统一价格增价拍卖,同时每个企业都执行严格的估值竞拍策略。

统一价格增价拍卖是同质多物品拍卖中最常见的一种拍卖方式。在碳排放权统一价格拍卖中,竞价人的投标如同一次订购,竞价人将会递交“价格—数量”投标,然后由拍卖人根据这些投标建立一个需求曲线,它确定每一个价格  $p$  上的需求总量,最后拍卖人确定成交价格使得需求量恰好等于实际供给量。假设 4 表明每个企业将向碳排放所有者真实提供自身碳排放的需求和可以接受的价格。

与碳排放权免费配额相比,碳排放配额的拍卖将影响到企业的生产决策,如果企业不采取适当减排措施或降低产量,则需要承担更多的减排成本。这就迫使企业必须生产过程中采用相应的对策来降低单位产品碳排放。故在模型中考虑企业通过技术投资减排来降低单位产品的碳排放。假设减排投资费用为  $\rho_i a_i^2$ ,其中  $\rho_i$  表示参与碳排放的实体企业投资于技术减排的成本系数,非负实数。代表着一个企业的技术减排能力,其值越低,表示该企业的技术减排能力越高; $a_i$  表示参与碳排放的实体企业单位产品碳排放量减排的贡献,也可以认为是该企业对产品的碳减排所

作出的努力,非负实数。

决策顺序:在政府发布碳排放总量和竞拍机制后,每个投标的碳排放企业根据自己自身利润最大化条件给出单位碳排放权的估值—需求函数  $E_i(\alpha)$ ,其中  $E_i$  为第  $i$  个企业碳排放权的需求量, $\alpha$  为单位碳排放权拍卖均衡价格。然后,政府在获得每个碳排放实体企业的碳排放权需求函数  $E_i(\alpha)$  的私有信息后,按照统一价格增价拍卖机制确定单位碳排放权拍卖均衡价格以及每个碳排放实体所购买的碳排放权,随后碳排放实体根据均衡的碳排放权价格确定产量和单位减排量。表示为:

$$\left. \begin{array}{c} \max \pi_1(a_1) \\ \dots \\ \max \pi_n(a_n) \end{array} \right\} \rightarrow \sum_i E_i(\alpha) = \bar{E} \rightarrow \left\{ \begin{array}{c} \max \pi_1(q_1) \\ \dots \\ \max \pi_n(q_n) \end{array} \right.$$

根据以上的决策顺序,通过逆向归纳法求解,求解分为三个步骤:一是产销博弈,即确定企业的产量,结合减排投资水平、市场需求等要素,在企业追求自身利益最大化下建立企业碳排放权需求量与均衡价格函数。二是根据碳排放总量和各个企业的碳排放权需求函数建立拍卖均衡模型,获得均衡价格。三是在均衡价格下决定生产与减排决策。

## 2 竞拍企业间产品不存在直接竞争

### 2.1 产销模型

市场中一共有 2 个企业参与碳排放权的拍卖,企业之间除了共同参与碳竞拍者之间的关系,不存在其他的竞合关系。每个企业的产品分别面对独立的需求,需求函数假设为:

$$q_i = Q_i + \varphi a_i - p_i \quad (1)$$

其中,  $0 \leq a_i \leq \bar{a}_i < e_i$ ,  $e_i$  表示减排前单位产品碳排放量。

下标  $i$  表示第  $i$  个竞拍企业,  $i = 1, 2$ 。式(1)第一项表示不考虑单位产品碳排放影响需求时产品的潜在市场需求总量,第二项表示采用减排措施后增加的消费者需求,由于受到技术条件限制,单位产品减排的最高上限为  $\bar{a}_i$ ,第三项为产品市场价格。

因为竞拍所得的碳排放权将完全使用,所以,有

$$E_i = (e_i - a_i) q_i \quad (2)$$

建立第  $i$  个企业利润最大化模型:

$$\begin{aligned} \max \pi_i(a_i, q_i) = & \\ (Q_i + \varphi a_i - q_i) q_i - c_i q_i - \alpha E_i - \rho_i a_i^2 \quad (3) \\ \text{s.t. } \sum_i^2 E_i = \bar{E} \end{aligned}$$

收益模型是关于单位减排量  $a_i$  和产量  $q_i$  的函数。其中第一项为企业的销售收入;第二项为生产成本,  $c$  表示单位产品生产成本;第三项为竞拍购买的碳排放权成本,假设拍卖均衡时单位碳排放权的均衡价格是  $\alpha$ ;第四项为技术减排投资成本。

## 2.2 增价拍卖均衡

首先需要得出企业自身对单位碳排放权的估值,即关于对所要投标的碳排放权的出价和需求量的关系。

$$\begin{aligned} \text{将 } q_i = \frac{E_i}{e_i - a_i} \text{ 代入利润模型(3)式得,} \\ \pi_i = \left( Q_i + \varphi a_i - \frac{E_i}{e_i - a_i} \right) \frac{E_i}{e_i - a_i} - \\ c_i \frac{E_i}{e_i - a_i} - \alpha E_i - \rho_i a_i^2 \quad (4) \end{aligned}$$

定义  $v(E_i)$  表示为企业采购边际碳排放收入,即每消耗 1 单位的碳排放量为企业所带来的收入(也称为企业  $i$  碳排放权的估值),那么边际利润

为  $v(E_i) - \alpha$ ,单位碳排放量企业利润为  $\frac{\partial \pi_i}{\partial E_i}$ ,所以

以  $\frac{\partial \pi_i}{\partial E_i} = v(E_i) - \alpha$ ,则有

$$v(E_i) = \frac{\partial \pi_i}{\partial E_i} + \alpha = \frac{Q_i + \varphi a_i - c_i}{e_i - a_i} - \frac{2E_i}{(e_i - a_i)^2} \quad (5)$$

令  $H_i = \frac{Q_i + \varphi a_i - c_i}{e_i - a_i}$ ,  $L_i = \frac{2}{(e_i - a_i)^2}$ , ( $i = 1, 2$ ),

则有

$$v(E_i) = H_i - L_i E_i \quad (6)$$

$H_i$  是当减排量为  $a_i$  并且所采购的碳排放量为 0 时的单位碳排放的边际利润贡献。随着碳排放采购量的增加,边际利润以  $L_i$  的速率减小。对于后续的双方拍卖博弈来说,  $v(E_i)$  是很关键的一个式子,因为对碳排放权的估值将直接影响碳排放权的均衡价格。

式(5)对  $E_i$  求导得,

$$\frac{\partial v(E_i)}{\partial E_i} = -\frac{2}{(e_i - a_i)^2} < 0$$

即碳排放权的估值将随着减排量的增加而减少,可得命题 1。

**命题 1:**碳排放权估值存在规模不经济效应。

命题 1 说明随着碳排放权采购量的增加,单位碳排放量的增加给企业带来的边际利润递减。当政府所拍卖的碳排放总量越高时,必将从整体上导致越低的碳排放均衡价格。

(4)式是关于  $E_i$  的二次凸函数,  $\frac{\partial \pi_i}{\partial E_i} = 0$  时,

利润最优。所以有:  $\frac{\partial \pi_i}{\partial E_i} = v(E_i) - \alpha = 0$ ,即

$$H_i - L_i E_i = \alpha \quad (7)$$

在统一价格增价拍卖下,2 个企业的碳排放权拍卖配额均衡为:

$$\begin{cases} \frac{H_i - \alpha}{L_i} = E_i \\ \sum_{i=1}^2 E_i = \bar{E} \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)得碳排放权的均衡价格和第  $i$  个企业的采购量分别为

$$\alpha = \frac{H_i L_j + H_j L_i - \bar{E} L_i L_j}{L_i + L_j} \quad (9)$$

$$E_i = \frac{H_i}{L_i} - \frac{H_i L_j + H_j L_i - \bar{E} L_i L_j}{L_i (L_i + L_j)} \quad (10)$$

式(9)(10)给出了碳排放均衡价格的表达式。同时有以下结论:一是碳排放权拍卖均衡价格是关

于  $a_i$ ,  $\bar{E}$  的函数。由  $\frac{\partial \alpha}{\partial E} = \frac{-L_1 L_2}{L_1 + L_2} < 0$ ,说明均衡

价格与碳排放总量配额成负相关。如果对碳排放总量进行过于严格的控制,将会大大提高企业的生产成本,压缩消费者和生产企业的剩余。二是消费者需求潜力的增加将会提高碳排放权的均衡价格,这是因为随着企业需求潜力的增加,对碳排放权的竞争将更加激烈,推高碳排放权价格。对式(9)整理得

$$\begin{aligned} \alpha = & \frac{(Q_1 + \varphi a_1 - c_1)(e_1 - a_1)}{(e_1 - a_1)^2 + (e_2 - a_2)^2} + \\ & \frac{(Q_2 + \varphi a_2 - c_2)(e_2 - a_2) - 2\bar{E}}{(e_1 - a_1)^2 + (e_2 - a_2)^2} \quad (11) \end{aligned}$$

如果考虑两个参与碳拍卖的实体企业是对称的,得



$$\begin{cases} \alpha = \frac{(Q_i + \varphi a_i - c_i)(e_i - a_i) - \bar{E}}{(e_i - a_i)^2} \\ E_i = \frac{\bar{E}}{2} \end{cases} \quad (12)$$

### 2.3 减排决策分析

当未考虑两个碳排放拍卖实体企业的对称性时,得

$$\pi_i(a_i) = \left( Q_i + \varphi a_i - \frac{E_i}{e_i - a_i} \right) \frac{E_i}{e_i - a_i} - c_i \frac{E_i}{e_i - a_i} - \alpha E_i - \rho_i a_i^2 \quad (13)$$

其中,  $\alpha = \frac{H_1 L_2 + H_2 L_1 - \bar{E} L_1 L_2}{L_1 + L_2}$ ;  $E_i = \frac{H_i}{L_i} - \frac{H_i L_j + H_j L_i - \bar{E} L_i L_j}{L_i(L_i + L_j)}$ ;  $H_i = \frac{Q_i + \varphi a_i - c_i}{e_i - a_i}$ ,  $L_i = \frac{2}{(e_i - a_i)^2}$ 。

当参与拍卖的两个实体企业完全对称时,将式(12)代入企业*i*的收益模型(4)式,得到关于减排量  $a_i$  的利润函数:

$$\pi_i(a_i) = \left( Q_i + \varphi a_i - \frac{\bar{E}}{2(e_i - a_i)} - c_i \right) \frac{\bar{E}}{2(e_i - a_i)} - \frac{[(Q_i + \varphi a_i - c_i)(e_i - a_i) - \bar{E}]\bar{E}}{2(e_i - a_i)^2} - \rho_i a_i^2 = \frac{\bar{E}^2}{4(e_i - a_i)^2} - \rho_i a_i^2 \quad (14)$$

式(14)为连续函数,又因为单位减排量  $a_i$  的定义域区间为  $[0, \bar{a}_i]$ , 所以必然存在一个最优值  $a_i^*$ , 使  $\pi_i(a_i)$  最大。

进一步分析式(14), 当对称的碳排放实体参与碳排放权统一价格拍卖时, 第一, 其利润的多少与消费者对产品的碳排放敏感度、消费者需求潜力以及生产成本无关。虽然消费者需求潜力的增加会提高企业的收益, 但是另一方面间接提高了碳排放权的拍卖均衡价格, 这部分对利润的影响与碳排放权的成本相互抵消。第二, 企业利润随着碳排放总量的增加而增加, 碳排放总量的增加降低了企业碳排放成本, 提高了企业收益。第三, 利润随着企业技术减排的增强而增加。所以不管是企业还是政府都应该非常重视提高能源效率,

加大能够低成本降低单位排放量技术的研发。

## 3 竞拍企业间产品存在古诺竞争

### 3.1 产销模型

古诺竞争模型中, 竞争企业生产有相互替代性的产品, 面对共同的潜在消费群体, 两个企业联合确定产品的市场出清价格。假设市场中一共有两个生产相互替代性产品的企业参与碳排放权的拍卖, 面对单位产品碳排放敏感的消费者, 即自身碳排放的减少会增加潜在需求, 产品之间存在一定的替代性。设第*i*个企业的反需求函数为:

$$p_i = Q_i + \varphi a_i - q_i - q_j$$

其中:  $i, j = 1, 2; i \neq j; 0 \leq a_i < e_i$ 。

因为所竞拍的碳排放权将完全使用, 所以有:

$$E_i = (e_i - a_i) q_i \quad (15)$$

建立第*i*个企业利润最大化收益模型:

$$\begin{aligned} \max \pi_i(a_i, q_i) &= (Q_i + \varphi a_i - q_i - q_j) q_i - c_i q_i - \alpha E_i - \rho_i a_i^2 \\ \text{s.t. } \sum_i E_i &= \bar{E} \end{aligned} \quad (16)$$

收益模型是关于单位减排量和产量的函数。其中第一项为企业的销售收入; 第二项为生产成本; 第三项为竞拍购买的排放权成本, 设拍卖均衡时单位碳排放权的均衡价格是  $\alpha$ ; 第四项为技术减排投资成本。

### 3.2 统一价格增价拍卖均衡

首先需要得出自身对单位碳排放权的估值, 即关于对所要投标的碳排放权的价格和需求量的关系, 假设两个企业分别*i*和*j*。

将  $q_i = \frac{E_i}{e_i - a_i}$ 、 $q_j = \frac{E_j}{e_j - a_j}$  代入收益模型(15)式, 得

$$\begin{aligned} \max \pi_i &= \left( Q_i + \varphi a_i - \frac{E_i}{e_i - a_i} - \frac{E_j}{e_j - a_j} \right) \frac{E_i}{e_i - a_i} - c_i \frac{E_i}{e_i - a_i} - \alpha E_i - \rho_i a_i^2 \\ \frac{\partial \pi_i}{\partial E_i} &= v(E_i) - \alpha \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} v(E_i) &= \frac{\partial \pi_i}{\partial E_i} + \alpha = \frac{(e_j - a_j)(Q_i + \varphi a_i - c_i) - E_j}{(e_i - a_i)(e_j - a_j)} - \frac{2E_i}{(e_i - a_i)^2} \end{aligned} \quad (18)$$

令  $H_i = (e_j - a_j)(Q_i + \varphi a_i - c_i)$ ,  $K_i = (e_i - a_i)(e_j - a_j)$ ,  $L_i = \frac{2}{(e_i - a_i)^2}$ ,  $(i=1,2)$ , 则有:

$$v(E_i) = \frac{H_i - E_j}{K_i} - L_i E_i \quad (19)$$

(17) 式是关于  $E_i$  的二次凸函数,  $\frac{\partial \pi_i}{\partial E_i} = 0$  时, 利润

最优。所以有:  $\frac{\partial \pi_i}{\partial E_i} = v(E_i) - \alpha = 0$ , 即

$$\frac{H_i - E_j}{K_i} - L_i E_i = \alpha \quad (20)$$

在统一价格增价拍卖下, 两个企业的碳排放权拍卖配额均衡为:

$$\begin{cases} \frac{H_1 - E_2}{K_1} - L_1 E_1 = \alpha \\ \frac{H_2 - E_1}{K_2} - L_2 E_2 = \alpha \\ E_1 + E_2 = \bar{E} \end{cases} \quad (21)$$

由式(21)可得命题 2: 当仅有两家企业参与统一价格增价拍卖, 令  $H_i = (e_j - a_j)(Q_i + \varphi a_i - c_i)$ ,  $K_i = (e_i - a_i)(e_j - a_j)$ ,  $L_i = \frac{2}{(e_i - a_i)^2}$ ,  $(i, j=1, 2; i \neq j)$ , 则碳排放权的均衡价格以及第  $i$  个企业购买的碳排放权为

$$\alpha = \frac{(H_i - \bar{E})(L_j K_j - 1)}{K_i(L_j K_j - 1) + K_j(L_i K_i - 1)} + \frac{(H_j - \bar{E})(L_i K_i - 1) - \bar{E}(L_i K_i - 1)(L_j K_j - 1)}{K_i(L_j K_j - 1) + K_j(L_i K_i - 1)} \quad (22)$$

$$E_i = \frac{(H_i - \bar{E})K_j - (H_j - \bar{E})K_i + K_i \bar{E}(L_j K_j - 1)}{K_i(L_j K_j - 1) + K_j(L_i K_i - 1)} \quad (23)$$

命题 2 给出了在参与竞拍的企业产品存在古诺竞争时的碳排放拍卖均衡价格的表达式, 可以看到均衡价格是关于  $a_i$ 、 $\bar{E}$  的函数。

因  $\frac{\partial \alpha}{\partial \bar{E}} = \frac{-(L_j K_j - 1) - (L_i K_i - 1) - (L_i K_i - 1)(L_j K_j - 1)}{K_i(L_j K_j - 1) + K_j(L_i K_i - 1)} < 0$ , 说明均衡价格与碳排放总量配额成负相关。

考虑两个参与碳拍卖的实体企业是对称的, 得

$$\begin{cases} \alpha = \frac{2(e_i - a_i)(Q_i + \varphi a_i - c_i) - 3\bar{E}}{2(e_i - a_i)^2} \\ E_i = \frac{\bar{E}}{2} \end{cases} \quad (24)$$

### 3.3 减排决策

① 当参与拍卖的两个实体企业不对称时, 有

$$\begin{aligned} \max \pi_i(a_i) = & \left( Q_i + \varphi a_i - \frac{E_i}{e_i - a_i} - \frac{E_j}{e_j - a_j} - c_i \right) \frac{E_i}{e_i - a_i} - \\ & \alpha E_i - \rho_i a_i^2 \end{aligned} \quad (25)$$

$$\text{其中: } \alpha = \frac{(H_i - \bar{E})(L_j K_j - 1)}{K_i(L_j K_j - 1) + K_j(L_i K_i - 1)};$$

$$\begin{aligned} E_i = & \frac{(H_i - \bar{E})K_j - (H_j - \bar{E})K_i + K_i \bar{E}(L_j K_j - 1)}{K_i(L_j K_j - 1) + K_j(L_i K_i - 1)} + \\ & \frac{(H_j - \bar{E})(L_i K_i - 1) - \bar{E}(L_i K_i - 1)(L_j K_j - 1)}{K_i(L_j K_j - 1) + K_j(L_i K_i - 1)}; \\ E_i = & \frac{(H_i - \bar{E})K_j - (H_j - \bar{E})K_i + K_i \bar{E}(L_j K_j - 1)}{K_i(L_j K_j - 1) + K_j(L_i K_i - 1)}; \\ H_i = & (e_j - a_j)(Q_i + \varphi a_i - c_i); \\ K_i = & (e_i - a_i)(e_j - a_j); L_i = \frac{2}{(e_i - a_i)^2}; \end{aligned}$$

② 当参与拍卖的两个实体企业完全对称时, 有

$$\begin{aligned} \max \pi_i(a_i) = & \left( Q_i + \varphi a_i - \frac{\bar{E}}{e_i - a_i} - c_i \right) \frac{\bar{E}}{2(e_i - a_i)} - \\ & \frac{2(e_i - a_i)(Q_i + \varphi a_i - c_i) - 3\bar{E}}{4(e_i - a_i)^2} \bar{E} - \rho_i a_i^2 \end{aligned}$$

整理得:

$$\max \pi_i(a_i) = \frac{\bar{E}^2}{4(e_i - a_i)^2} - \rho_i a_i^2 \quad (26)$$

(25) 式和 (26) 式均为连续函数, 又因为单位减排量  $a_i$  的定义域为  $[0, \bar{a}_i]$ , 所以必然存在一个最优值  $a^*_i$ , 使  $\pi_i(a_i)$  最大。

## 4 独立需求和古诺竞争下的对比

### 4.1 均衡价格及企业利润对比分析

独立需求和古诺竞争下, 对称情形下企业的均衡价格和企业利润如表 1 所示。

表 1 对称情形下企业的均衡价格和利润

Tab.1 Equilibrium price and profit of an enterprise under symmetric circumstances

	独立需求	古诺竞争
拍卖均衡价格( $\alpha^*$ )	$\frac{(e_i - a_i)(Q_i + \varphi a_i - c_i) - \bar{E}}{(e_i - a_i)^2}$	$\frac{2(e_i - a_i)(Q_i + \varphi a_i - c_i) - 3\bar{E}}{2(e_i - a_i)^2}$
企业利润( $\pi^*$ )	$\frac{\bar{E}^2}{4(e_i - a_i)^2} - \rho_i a_i^2$	$\frac{\bar{E}^2}{4(e_i - a_i)^2} - \rho_i a_i^2$

上表可以得到如下结论：

第一，在统一价格增价拍卖博弈中，独立需求下所形成的碳排放权的均衡价格比古诺竞争下所形成的碳排放权均衡价格要低。对于均衡价格的差异，主要是因为均衡价格是由拍卖参与者对单位碳排放权的边际收益来决定的，独立需求下的碳排放边际收益高于古诺需求下的碳排放边际收益

益 
$$\left( \frac{Q_i + \varphi a_i - c_i}{e_i - a_i} - \frac{2E_i}{(e_i - a_i)^2} > \frac{(e_j - a_j)(Q_i + \varphi a_i - c_i) - E_j}{(e_i - a_i)(e_j - a_j)} - \frac{2E_i}{(e_i - a_i)^2} \right), \text{ 而}$$

竞拍双方都以真实的减排边际成本和排放权需求策略参与拍卖。简单来说，就是古诺竞争形成的竞争压缩了单位碳排放权带来的收益，所以单位碳排放权形成的均衡价格较低。

第二，当碳排放上限趋近于 0 时，不管是独立需求还是古诺竞争，其碳排放权的最高价格均为  $\frac{Q_i + \varphi a_i - c_i}{e_i - a_i}$ 。

第三，企业的最优利润和减排决策是一致的。在经典的古诺竞争模型中，由于古诺需求形成的竞争会减少企业的垄断利润，而在碳排放资源紧缺并需要通过拍卖取得的情形下，古诺竞争和独立需求下利润和减排决策相同，是因为拍卖形成的公平竞争，消除了独立需求形成的垄断带来的优势。

4.2 数值仿真敏感性分析

为了更好地揭示单位产品碳排放量的变动对拍卖均衡价格和企业利润的影响，通过数值仿真的方法进行分析。从表 1 可知，独立需求和古诺竞争两种情形下均衡价格、利润与减排量存在相同的敏感性特征，故以独立需求为例。

以独立需求为例，分析不同碳排放总量下企业减排与均衡价格、利润之间的关系。设定  $Q_i =$

$100, \varphi = 2, c_i = 2, e_i = 46, \bar{E} = 800, \bar{E} = 1\,000$  和  $\bar{E} = 1\,500$  代入式 (12) 与式 (14)，得图 1 和图 2。

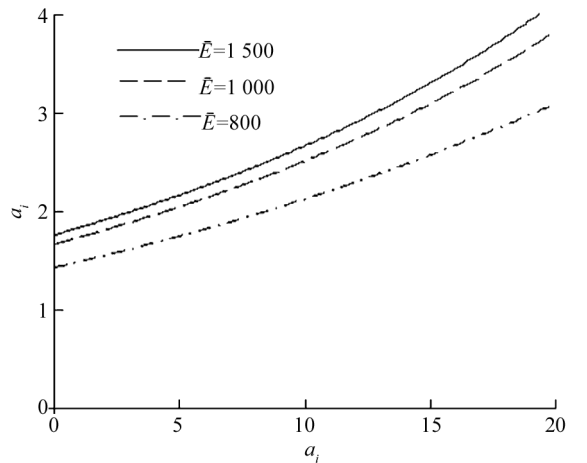


图 1 单位产品减排量对拍卖均衡价格的影响

Fig.1 Impacts of t emission reduction per unit product on auction equilibrium price

图 1 表明：碳排放总量供应的增加，在碳排放企业相同减排量的情况下，碳排放均衡价格降低；当碳排放总量一定时，企业的减排量越大，即企业单位产品绿色程度越高，所形成的碳排放均衡价格越高，这是单位碳排放边际收入增加的缘故。

图 2 表明：越高的总量，企业的利润越大，其所对应的最优单位减排量越大，即碳排放总量越高，其单位碳排放反而越低。随着碳排放总量上限的减少，企业的最优减排量分别 4、2 和 1，这说明碳排放总量的控制可以有效地控制碳排放总量，但不是越低的总量对技术减排创新水平的推动力就越大。

5 结论

本文主要研究了碳排放权配额有偿拍卖分配的碳排放规制政策下形成的碳排放权拍卖均衡和

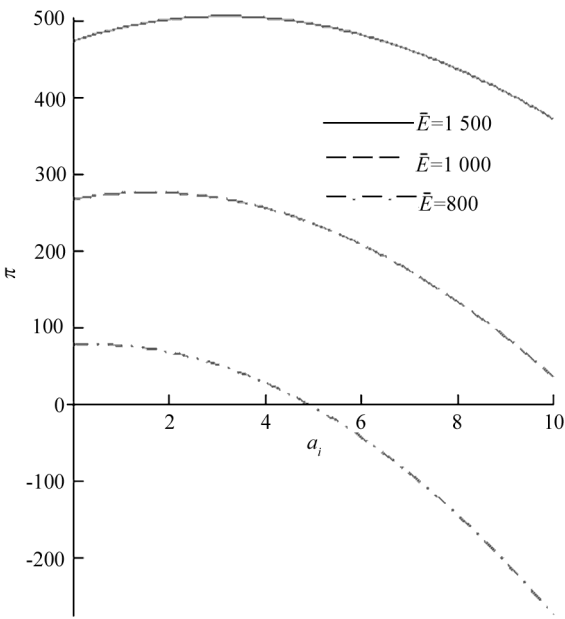


图 2 产品单位减排量对企业利润的影响  
Fig.2 Impacts of product unit emission reduction on an enterprise's profit

企业的产销和减排决策问题。考虑参与碳排放权

实体的企业的两种竞争情况,独立需求和古诺竞争,给出了企业在面对不同竞争环境下的最优减排决策,以及在不同竞争环境下碳排放的均衡价格,结论和管理启示主要包含以下内容:

第一,碳排放总量的大小直接决定了拍卖均衡价格的高低,碳排放总量越小,则碳排放权的拍卖均衡价格越高,反之则越低。

第二,产品单位碳排放量的逐渐减少,将会逐渐推高企业的碳拍卖均衡价格。这意味着,如果随着整个社会对于单位碳排放使用效率的提高,那些对于单位碳排放所创造的收益较低的企业将面临巨大的压力,甚至被淘汰,从而能够很好地借用市场的力量提高整个社会能源使用效率,实现结构调整。如火力发电将逐渐被核电、天然气发电和风力发电等较为环保的能源所替代。

第三,碳排放总量的下降可以提高单位碳排放的使用效率,但却未必能促使单个企业做出更激进的减排策略。这两者之间并不矛盾,因为对于后者来说企业选择了减排虽然可以降低企业的单位产品碳排放,但却将付出过大的减排代价,反而不能够实现单位碳排放的增值。

参考文献:

[1] 李俊峰,王田,祁悦.从巴黎气候大会成果看“多边主义下的大国推动模式”[J].世界环境,2016(1):27-30.  
[2] 饶蕾,曾骋,张发林.欧盟碳排放交易配额分配方式对我国的启示[J].环境保护,2009(9):66-68.  
[3] European Commission. Questions & Answers on Emissions Trading and National Allocation Plans[Z], 2008.  
[4] WANG M, LANG L. Reconsidering Carbon Permits Auction Mechanism: An Efficient Dynamic Model[J]. The World Economy, 2017(8): 1624-1645.  
[5] CRAMTON P, KERR S. Tradeable Carbon Permit Auctions: How and Why to Auction not Grandfather[J]. Energy policy, 2002(4):333-345.  
[6] 李昊,赵道致.碳排放权交易机制对供应链影响的仿真研究[J].科学与科学技术管理,2012(11):117-123.  
[7] 韩晓亚,袁溥.拍卖作为碳排放权主导分配方式的可行性分析[J].中国经贸导刊(理论版),2017(23):26-27.  
[8] 黄宗煌,蔡世峰.碳市场配额分配方式对厂商决策行为的影响研究[J].环境经济研究,2017(1):82-98.  
[9] 王明喜,胡毅,曹杰.“菜单式”碳排放权拍卖机制及其配置效率[J].环境经济研究,2017(4):7-22.  
[10] WANG M X, DANG C Y, WANG M R, et al. Carbon emission permits a new asset Chinese potential market and allocation Mechanism[J]. Advances in Information Sciences and Service Sciences, 2012(1): 49-58.  
[11] 丁黎黎,王晓玲,徐寅峰.质量门槛约束下的碳排放权拍卖机制研究[J].系统工程学报,2015(5):628-635.  
[12] 王明荣,王明喜.基于帕累托最优配置的碳排放权许可证拍卖机制[J].中国工业经济,2012(5):96-109.  
[13] 曾鸣,何深,杨玲玲,等.碳排放交易市场排放权的拍卖方案设计[J].水电能源科学,2010(9): 161-163.

(责任编辑:王圆圆)