

# 碳排放权的非对称拍卖模型及其配置效率<sup>①</sup>

王明喜<sup>1</sup>, 李明<sup>1</sup>, 郭冬梅<sup>2\*</sup>, 胡毅<sup>3</sup>

(1. 对外经济贸易大学国际经济贸易学院, 北京 100029; 2. 中央财经大学经济学院, 北京 100081;  
3. 中国科学院大学经济与管理学院, 北京 100190)

**摘要:** 作为我国碳交易体系的试金石,“七省市”试点运营状况如何? 是学界和管理层特别关注的一个焦点问题. 以碳排放权的初始配置准则为切入点, 展开理论探讨与定性分析, 发现: 在现行的溯源免费配置准则下, 试点地区的碳交易市场有明显的“聚类效应”特征, 其原因是排放权的误配导致企业逆向选择所致. 为了从机制设计本源上消除企业减排的逆向选择, 把拍卖有偿配置准则引入碳交易市场中, 构建企业减排投资回报率指标, 定义排放权的社会最优配置, 建立碳排放权的非对称拍卖模型, 分析异质性企业在碳排放权拍卖中的投标策略及其拍卖前的减排投资决策行为, 剖析企业所有权差异对其减排投资和排放权配置结果的影响, 阐述政府补贴企业减排投资的政策效果, 基于政府补贴政策效果提出完善我国碳交易市场的相关建议.

**关键词:** 碳排放权; 配置机制; 减排效率

**中图分类号:** F016      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1007-9807(2019)07-0034-18

## 0 引言

改革开放成就了我国经济增长奇迹, 但也贴上了“全球碳排放总量第一”的标签, 并为此付出了沉重的环境代价<sup>[1]</sup>. 为扭转这一颓势, 平衡经济与环境的和谐发展, 我国政府于2012年制定了“2020年单位GDP碳排放比2005年下降40%~45%”的约束性减排指标. 为保证此指标的实施, 自2013年起在北京、上海、深圳、天津、重庆、广东和湖北7个省市试行碳排放权交易, 并计划在十三五期间建立全国统一的碳排放权交易体系<sup>[2]</sup>. 理论上, 合理而严格的环境政策既能发展经济, 又

能改善环境质量, 实现经济与环境双赢的波特效应. 然而, 我国的碳排放权交易市场能否有效促进企业减排投资, 以推动其低碳技术创新, 进而提升生产效率和市场竞争力, 用创新收益去弥补由减排所增加的生产成本, 创造出文献[3]提出的波特效应前提条件, 成为社会各界高度关注的焦点.

作为碳交易市场运营的起点, 碳排放权初始配置机制设计既是政府职能部门工作的重点, 也是机制设计科学领域的一个难点. 毋庸置疑, 在交易市场建立之初, 排放权的免费配置<sup>②</sup>可以减弱减排政策实施的企业阻力和政治障碍, 让被管制

① 收稿日期: 2016-10-21; 修订日期: 2018-12-14.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71471039); 对外经济贸易大学优秀青年学者资助项目(18YQ02); 江苏高校哲学社会科学优秀创新团队资助项目(2015ZSTD006); 北京市共建项目专项资助项目; 国家社会科学基金资助项目(18BTJ004).

通讯作者: 郭冬梅(1980—), 女, 教授, 博士生导师. Email: guodongmeicufe@163.com

② 被学者热议的两种免费配置准则是溯源准则(Grandfathering Principle)和标杆准则(Benchmarking Principle). 其中前者是以企业的历史排放量或排放强度为依据, 决定企业当年的排放许可量, 然后逐年递推<sup>[4,5]</sup>. 以北京市碳交易市场为例, 企业在2009年~2012年间的平均排放量为2013年该企业的排放许可量, 2010年~2013年的平均排放量为2014年排放许可量, 逐年类推. 标杆准则是以行业平均碳排放量为标准, 排放实体的产出量乘以该标准即为其获得的排放配额. 究竟哪种准则在实践中更好, 学术界并没有开棺定论, 各有优缺点<sup>[6]</sup>.

企业在碳交易市场从无到有的过渡中,有个认知、缓冲、转变到适应的过程,同时为没有参与减排的企业提供交易模版,发挥示范作用,在一定程度上避免了投机所引起的市场失灵(market failure)和企业再选址导致的碳遗漏(carbon leakage)<sup>[7-9]</sup>.于是,欧盟在2005年建立碳交易ETS(emission-and-trade scheme)系统时,排放权由政府免费分配给管控企业;同时,溯源免费配置准则也是我国试点地区碳排放权的主要分配方式.但是,自碳排放权的免费配置方式实施以来,批评声音不绝于耳,诸如减弱碳交易市场对企业减排的激励效果、人为延长落后产能和生产工艺、企业把免费获取的排放权价值转移到终端消费品价格中以获取额外收益等.例如,溯源免费配置方式可以延长落后电厂的使用年限3年~4年<sup>[10]</sup>;德国RWE电力公司在2005年~2007年,以转移碳排放权价值的方式获得额外利润约6.4亿美元<sup>[11]</sup>.那么,我国试点地区现行的溯源免费配置准则能否在全国统一的碳交易体系中加入推广和使用,尚需进行系统利弊权衡分析和深入探讨.与已有统计和案例文献不同,这里以我国七省市碳交易市场的客观现实为背景,建立一个企业碳排放的溯源准则决策模型,演绎出管控企业存在逆向选择行为的前提条件<sup>③</sup>,挖掘减排企业逆向选择的根源,据此解释我国试点地区碳交易的“聚类效应”——核查前后出现量价齐升的短暂市场繁荣,在完善碳排放权配置机制设计理论的同时,为降低我国碳价波动风险提供理论依据.

追根溯源,免费配置方式被学者所诟病的是缺乏充分的经济学或管理学理论基础,而且,政府而非企业自身,在碳排放权配置过程中扮演着主导角色,带有“行政命令有余,市场手段不足”的计划经济色彩,与中共十八大着重强调的“减少政府对价格形成的干预,激发市场自身活力,把创新摆在国家发展全局的核心位置”深化改革的指导方针格格不入.因此,在筹建我国统一的碳交易市场过程中,政府和市场必须重新定位,充分发挥市场配置的决定性作用,以解决碳排放权配置中的无效问题,政府则扮演宏观调控的辅助功能.所

以,准确回答政府主导的溯源准则配置结果是否存在碳排放权的误配,深入探讨碳排放权的市场定价模式及其对应的配置效率,对比分析政府和市场这“两只手”在推动企业低碳技术创新上的差异等问题,是评估碳交易市场绩效无法回避的关键问题,也可以为我国在新常态下全面推行碳排放权市场交易提供重要启示.

然而,碳排放权是一种无形资产,其内在固有价值与企业内部因素(如减排技术、减排潜力、资金约束、生产工艺改进难易程度)和外部因素(消费者低碳环保意识、宏观减排措施和减排力度、低碳补贴、产品隐含碳的国际竞争压力)息息相关<sup>[12,13]</sup>,缺乏规范化的资产定价模式.但是,拍卖作为一种特殊市场交易方式,依赖投标者之间的公开竞价,以公平、高度透明的有偿配置准则,填补了碳排放权价值发现空缺<sup>[14]</sup>.对排放企业而言,拍卖有偿配置方式可以让企业根据自身实际状况,选择是购买排放权以覆盖其实际排放量,还是增加减排投资降低其实际排放量,这样,不但提高了企业减排成本分摊的灵活性,还激励了企业减排投资积极性<sup>[15]</sup>.简言之,从价值发现、减排成本灵活性以及投资激励的角度,拍卖有偿配置机制优于免费分配方式.那么,自然要问:拍卖能否消除我国试点地区企业减排的逆向选择行为?鉴于我国实际国情,拍卖能否充分发挥成本分摊的灵活性,激励企业减排投资和创新?并实现排放权的有效配置?

为回答这些问题,当二级交易市场价格稳定时,对比分析了拍卖有偿和溯源免费两种配置准则下,企业排放决策模型及其对应的均衡结果,结果显示:拍卖可以有效降低企业排放逆向选择行为的发生.尽管如此,当拍卖后存在活跃的二级交易市场时,无论是单物品拍卖还是多物品拍卖,拍卖结果决定着拍卖品最终是否被有效配置<sup>[16]</sup>.同时,拍卖前的投资决策影响着投标者的竞标策略,反过来,拍卖规则设计、拍卖方式、信息对称性又影响着拍卖对竞标者投资创新的激励效果.若投资表现为规模报酬递增或不变时,对称投标者通过一级价格拍卖的投标博弈结果是有效的<sup>[17]</sup>;给

③ 此处的逆向选择行为是指,相对于正常商业行为,企业参与碳交易市场后,反而增加了其实际碳排放量.

定递减的反风险率(the inverse hazard rate),对称投标者拍卖前的投资行为可以有效降低采购拍卖支付成本<sup>[18]</sup>;当竞争对手的投资信息公开时,一级价格拍卖则挫伤非对称投标者拍卖前投资创新的积极性<sup>[19]</sup>.与这些文献相比,文中拍卖模型探讨的对象是:非对称的投标者,且竞标者之间并不了解他们竞争对手在拍卖前的具体投资信息.这样的建模前提更加符合拍卖实践,一是因为任何企业为了保持自己商品的特色和市场竞争优势,投资创新相关信息属于企业机密,不可能公开;二是完全同质企业在现实商业环境中很少见,而异质性企业则更具有广泛性,因此非对称竞标企业更加贴近商业现实.

特别地,根据我国实际国情,企业有国有和私营之分,碳排放权拍卖模型的非对称性主要表现为企业所有权的不同,进而,政府与国有企业之间的利润分成关系引发国有和私营企业承担的减排投资风险有所差异,导致同等条件下国有企业的投资回报率高于私营企业.这样,参照文献[19]的做法,假设国有企业在拍卖中的估价分布函数优于私营企业;为保护企业机密,假设减排投资水平属于企业的私密信息,构建独立私人估价拍卖情景,借鉴文献[20]和文献[21]的研究工作保证均衡投标策略的存在性和唯一性,据此演绎非对称投标者均衡投标策略的定性性质,分析碳排放权拍卖的有效性,并与文献[22]和文献[23]的结论进行了对比分析,进而考察政府与国有企业之间的利润分成关系对两类企业减排投资决策的影响,为国有和私营企业在减排投资上是否存在差异、以及差异的程度和原因提供传导机制和理论依据.

鉴于此,以我国七省市碳交易试点的排放权初始配置机制为研究对象,针对政府主导的溯源配置准则,第1节构建溯源准则下碳排放权的配置模型,分析企业的排放决策,讨论企业碳减排逆向选择产生的根源,探讨拍卖有偿配置方式消除或减弱企业逆向选择行为的机理.第2节依据我国实际国情,建立非对称碳排放权拍卖模型,重新

检验碳排放权的减排效果,对企业均衡投标策略、减排投资决策和政府利润分成决策展开数理演绎和定性探讨,分析政府补贴方式的选择对企业减排投资的影响,进而提出可供选择的、有效的碳排放权配置方案.第3节用数值算例诠释文中的结论.第4节总结全文,讨论未来进一步研究方向.由于文中涉及参数较多,为便于查阅,把所有参数及其含义以表格形式在附录中列出,同时,所有证明过程均放在附录中.

## 1 减排效果:溯源准则与拍卖

在溯源准则下,排放权被免费分配给企业,所以企业生产的商品价格及其成本独立于碳排放量,为简化分析,商品的价格成本差被正规化为1.因企业的碳排放量与其消耗的能源投入量严格正相关,所以,企业的碳排放量( $e$ )可以描述其产出情况( $Q$ ),产量随着排放量的增加而增加,且以递减的速度增加,当排放量为0时企业没有产出<sup>④</sup>,即 $Q(0) = 0, Q'(e) > 0, Q''(e) < 0$ .设企业分配的排放许可量为 $K$ ,碳排放权的二级市场交易价格为 $t$ .若企业的实际碳排放量 $e$ 大于 $K$ ,则它必须到二级市场上购买对应的超额许可量,其购买成本为 $t(e - K)$ ;否则,企业可以到二级市场上出售盈余许可部分,获得收益 $t(K - e)$ ;因此, $t$ 的大小反映企业排放二氧化碳的机会成本.这样,在溯源免费配置准则下企业的碳排放决策问题为

$$\max_e [Q(e) - t(e - K)] \quad (1)$$

**命题1** 当二级交易市场价格较大时,企业将选择减排,降低实际碳排放量,使其低于排放配额;反之,当二级交易市场价格较小时,企业更愿意增加碳排放以扩大产出,最终的碳排放量高于排放配额,即逆向选择发生.

我国七省市试点地区的碳交易市场实际运营状况显示,碳排放权的二级市场交易价格不高,且

<sup>④</sup> 任何一个企业的生产过程,无论是有形商品还是服务,均摆脱不了二氧化碳的排放,或是在生产过程中的直接碳排放,或是中间投入品的间接碳排放.例如,一个咨询公司仅提供在线咨询,那么它至少有一部电话或一个耳麦,而电话或耳麦的生产必然伴随着一定量的二氧化碳排放.

在每年3月和6月出现量价齐升的短暂市场繁荣<sup>⑤</sup>。以广东省碳交易市场为例,2015年每吨碳基本游走于15元和20元两个低位价格水平上。即使是碳交易价格水平最高的北京市,2015年的最高交易价格仍低于每吨碳60元,远远低于碳排放的真实机会成本<sup>⑥</sup>。根据命题1,过低的二级交易市场价格,将导致企业碳减排出现逆向选择行为,降低试点地区的减排效果。另外,我国的《碳排放权交易核查机构管理办法》规定,参与强制减排的企业在每年的3月份上报去年的实际碳排放总量,6月份职能部门核查企业的实际碳排放量是否超过其分配的许可量。因此,3月和6月短暂的市场繁荣,充分佐证了强制减排企业参与了二级市场交易,成为市场的需求方,其需求量为实际碳排放量超出配额许可的部分,从而导致试点地区的碳交易带有“政策聚类”特点。

**注1** 与文献[8]的结论相反,溯源免费配置准则并没有在我国碳交易试点地区发挥校正市场失灵之功效,同时,“政策聚类”加大了市场交易价格的波动风险,“企业逆向选择”增加了部分企业的碳排放,形成一种新型的环境政策管理区域内的“碳遗漏”,降低碳交易市场的减排效果。因此,命题1佐证了文献[24]和文献[25]提出的“免费配置准则将可能导致低效果”结论。

尽管溯源配置准则可以让减排企业有个缓冲、适应的过渡阶段,但却伴随着企业碳减排的逆向选择行为,从资源配置效率上讲是不可取的。究其逆向选择的原因,是碳排放权的配置是由政府根据历史排放量进行配置,而不是企业根据利润最大化原则自主选择的结果。为了让企业自主选择碳排放权的需求量,碳排放权必须成为一个企业生产的内生投入要素。然而,由于二氧化碳排放所导致的未来环境治理成本的不确定性,使得碳排放成本(或碳排放权的机会成本)难以精确量化,所以,碳排放权这一无形资产缺乏标准的定价模式。为揭示碳排放权资源的内在价值,一个备选方案是让市场去决定碳排放权资源的配置和使用,一种配置方法是拍卖有偿配置准则。通过设计

竞价规则,拍卖依靠报价者在竞价过程中的信息披露,由竞买者决定资产的交易价格,以公开、公平、高度透明的方式实现其价值发现。拍卖配置机制的这些优点,使得这一特殊市场交易方式在2007年被欧盟的ETS系统和美国东北十州的碳交易市场使用,用来解决碳排放权资源的定价难题,我国的碳交易试点地区也用它为二级市场释放价格信号。

如果采取拍卖方式配置碳排放权资源,参与减排企业以有偿竞价方式获取其需求量,是否可以消除企业碳排放的逆向选择行为,进而激励企业的减排投资?为回答此问题,记拍卖成交价为 $a$ ,企业的实际碳排放量为 $e^A$ 。为便于比较溯源配置准则与拍卖配置方式下企业的决策结果,仍用记号 $K$ 表示企业获得的初始排放许可量,只是此时的 $K$ 是企业拍卖中竞买的排放许可量,而不是政府根据企业历史排放状况分配的配额量。

**命题2** 在拍卖配置准则下,若企业参与竞价,则它的排放决策不存在逆向选择行为。

**注2** 除了文献[15]总结的拍卖优于免费配置的因素外,命题2发现,拍卖还可以消除免费配置准则下企业减排的逆向选择行为,提高碳交易市场的减排效果。

由命题2可知,无论二级市场价格水平如何,拍卖配置方式消除了溯源准则下企业碳减排的逆向选择问题,激励企业增加减排投资,提高碳排放权资源的使用效率。接着,自然要问:拍卖配置结果对不同企业碳减排投资的激励程度是否相同?若不同,其差异的原因是什么?此外,对于政府而言,为扩大政府收入或平衡财政收支,以更加灵活、多样化的经济手段撬动企业减排投资,充分发挥政府减排补贴的杠杆作用,如何最大化政府在碳排放权拍卖中的收益?为回答这些问题,需要结合我国实际国情,根据企业所有权的不同对企业进行分类,探讨它们在碳排放权拍卖中的投标策略和减排投资决策行为,为建立全国统一的碳

⑤ 数据来源于中国碳交网 <http://www.tanjiaoyi.com>

⑥ 碳排放权价格为每吨碳25欧元时,方能刺激企业发电装机容量煤转气的投资,而每吨碳40欧元~50欧元的价格水平才有望拉动企业对碳捕捉和储存的投资(<http://www.chinabgao.com/freereport/64930.html>)。

交易市场提供一些前瞻性的决策依据和设计指导.

## 2 非对称的碳排放权拍卖模型

由于我国企业特殊的资本构成方式,使得国有企业和股份制企业归国家和集体所有,企业经理负责经营,所有权和经营权的分离使得企业的利润存在分成,部分利润用于企业所有者的分红,部分用于企业的再投资;而私营企业的所有利润均归私营业主所有,并负责支配.这样,从利润分成的角度,可以把我国企业分成两类.一类是存在利润分成的企业,记为  $i$ ,另一类是没有利润分成的企业,记为  $j$ .为比较集体所有资本与自由流动资本间的减排投资效率差异,假设企业  $i$  和企业  $j$  均是重点减排企业,在规定时间内必须达到既定的碳减排目标.

因为一单位排放权拍卖对应的配置结果是企业  $i$  或企业  $j$  获得,而多单位排放权拍卖对应的配置结果是企业  $i$  和企业  $j$  哪个企业获得较多的排放权数,从这个角度出发,一单位和多单位碳排放权的配置结果并不影响分析碳排放权是否存在误配问题.因此,为简化分析,假设政府通过拍卖方式出售一个不可分割的碳排放权.若企业  $i$  获得碳排放权,则政府除了得到拍卖价格外,还可以得到企业  $i$  中标后的利润分成,设政府与企业  $i$  间的利润分成比例为  $1 - \alpha$ ;若企业  $j$  获得碳排放权,则政府仅得到排放权的拍卖成交价.

在投标阶段,每个企业对碳排放权的估价与自身的减排潜力、当前掌握的减排技术、改变生产工艺的难易程度、消费者对其产品能耗水平的敏感程度等私有因素息息相关,这样,企业的碳排放权竞标过程符合拍卖理论中的独立私人估价 (*independent private value*) 环境.即企业  $i$  知道自己对排放权的估价  $v_i$ ,企业  $j$  在投标时仅知道  $v_i$  是服从某个分布的随机变量,对于  $j$  的估价  $v_j$  也是如此.由于企业  $i$  与政府之间存在利益分成关系,所以估价  $v_i$  和估价  $v_j$  服从不同的累积分布函数.根据文献[26]和文献[27]的做法,假设  $v_i$  和  $v_j$  分别是服从累积分布函数  $F_i$  和累积分布函数  $F_j$  的随机

变量,其对应的密度函数分别为正的  $f_i$  和  $f_j$ .

参与碳减排的企业存在两种极端情形,一种极端乐观的情形是:企业已经拥有非常先进的碳减排技术,如掌握碳扑捉和储存技术,减少排放权许可的当量二氧化碳所需要的边际成本低于拍卖成交价,那么企业将选择不竞标而增加减排投资,以降低生产成本.另一种极端悲观的情形是:企业没有掌握有效的碳减排技术,在碳减排技术专利保护的时间范围内,也没有突破现有减排技术的创新能力,则该企业更愿意在拍卖中获得尽可能多的排放权,以覆盖其实际碳排放量.在现实中,大部分企业处于上述两种极端情形之间,相对于正常的商业生产模式,初始减排投资降低碳排放量的效果明显,当减排量达到一定程度之后,再继续降低碳排放量需要的投资额将大幅上升,此时,到拍卖市场上竞买碳排放权,使其覆盖减排投资后的实际碳排放量,是一个减排成本较低的选择.因此,每个企业在参与碳排放权竞买之前,有一个减排投资决策阶段,根据投资的减排效果和碳排放权的预期拍卖成交价,选择减排投资水平.

综上,碳排放权拍卖过程实际上是一个三阶段博弈过程.第一阶段,政府用一级价格密封式拍卖方式出售碳排放权,价高者得,根据收益最大化目标选择企业  $i$  的利润分成比例  $1 - \alpha$ ;第二阶段,参与竞标的企业选择各自在拍卖前的减排投资水平;第三阶段,在一级价格密封式拍卖规则下,风险中性的企业报出各自的投标价.为演绎出子博弈纳什均衡,根据逆向演绎法,首先考察第三阶段企业  $i$  和企业  $j$  的均衡投标策略.

### 2.1 均衡投标策略

当企业碳减排投资达到一定的额度后,其边际投资的减排效果将下降,此时成本最小化准则使得企业由增加减排投资转移到在拍卖市场中竞买排放许可权,以覆盖其实际碳排放量,这样,企业对排放权的估价  $v$  与降低碳排放权当量的减排投资成本  $s$  正相关.而减排投资存在失败的可能,失败的结果使得减少排放权许可量的投资额将大于  $s$ ,相应的估价也将大于  $v$ ,于是,  $1 - F(v)$  可以

用来度量企业减排投资失败的可能性。按照文献[17]和文献[28]的理论模型,可以用 $f(v)$ 近似衡量降低一个单位碳排放量所需要的边际减排投资。这样,用指标 $F(v)/f(v)$ 表示企业碳减排投资的回报率。随着减排投资的增加,企业在碳减排方面积累的相关知识越多、技术越成熟,进而减排投资成功的可能性越大,减排的边际投资成本越小,因此,企业碳减排投资的回报率 $F(v)/f(v)$ 是估价 $v$ 的严格递增函数。

实践中,我国政府经常出于宏观政策推行或试点推广等考虑,为国有企业的决策失败买单<sup>⑦</sup>,因此,相对于企业 $j$ ,企业 $i$ 为减排投资失败承担的风险较小,即 $1 - F_i(v) < 1 - F_j(v)$ ,于是有 $F_i(v) > F_j(v)$ ,换言之,企业 $i$ 减排投资成功的可能性高于企业 $j$ 。而在信息网络化的今天,企业 $i$ 和企业 $j$ 减排的边际投资差距会随着人力资本的自由流动而很快消失,即 $f_i(v) = f_j(v)$ 。这样

$$F_i(v)/f_i(v) > F_j(v)/f_j(v) \quad (2)$$

企业的估价 $v$ 越高,为了在拍卖中赢得碳排放权,相应的投标价 $b$ 也越大,所以 $b$ 是 $v$ 的递增函数,记其反函数为 $v = \varphi(b)$ 。当估价为0时,说明企业没有碳排放,对碳排放权没有需求,当然它也不会参与碳排放权拍卖的竞标,即 $b(0) = 0$ ;当拍卖的价格达到某个临界值 $w$ 时,对企业而言,即使在拍卖中赢得碳排放权,也没有获利的空间,即 $b(w) = w$ ,此时,该企业应放弃竞标,增加减排投资可能是一个更好地选择。

在投标阶段,企业 $i$ 选择投标价 $b_i$ 为了最大化自己的预期收益,因此,其目标函数为

$$\max_{b_i} \alpha(v_i - b_i) \Pr_i(\text{win}) \quad (3)$$

其中 $\Pr_i(\text{win})$ 表示当估价为 $v_i$ 而投标为 $b_i$ 时,企业 $i$ 的获胜概率。具体地

$$\begin{aligned} \Pr_i(\text{win}) &= \Pr_i(b_i > b_j(v_j)) \\ &= \Pr_i[v_j < \varphi_j(b_i)] \\ &= F_j[\varphi_j(b_i)] \end{aligned} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3),则企业 $i$ 的目标函数变为

$$\max_{b_i} \alpha(v_i - b_i) F_j[\varphi_j(b_i)] \quad (5)$$

同理可得,企业 $j$ 在投标阶段的目标函数为

$$\max_{b_j} (v_j - b_j) F_i[\varphi_i(b_j)] \quad (6)$$

文献[21]已经证明了这类非对称拍卖的均衡投标策略是唯一存在的。于是,企业 $i$ 和企业 $j$ 的均衡投标策略必然满足一阶必要条件,对式(5)和式(6)两式分别关于 $b_i$ 和 $b_j$ 求导,得

$$(v_i - b_i) f_j[\varphi_j(b_i)] \varphi_j'(b_i) - F_j[\varphi_j(b_i)] = 0 \quad (7)$$

$$(v_j - b_j) f_i[\varphi_i(b_j)] \varphi_i'(b_j) - F_i[\varphi_i(b_j)] = 0 \quad (8)$$

将 $v_i = \varphi_i(b_i)$ 和 $v_j = \varphi_j(b_j)$ 分别代入式(7)和式(8)式并整理,得

$$\varphi_i(b_i) - b_i = F_j[\varphi_j(b_i)] / \{f_j[\varphi_j(b_i)] \varphi_j'(b_i)\} \quad (9)$$

$$\varphi_j(b_j) - b_j = F_i[\varphi_i(b_j)] / \{f_i[\varphi_i(b_j)] \varphi_i'(b_j)\} \quad (10)$$

给定抽象的累积分布函数 $F_i$ 和累积分布函数 $F_j$ ,无法精确给出均衡投标策略 $\varphi_i(b_i)$ 和均衡投标策略 $\varphi_j(b_j)$ 的显示表达式,只能借助 $\varphi_i(b_i)$ 和 $\varphi_j(b_j)$ 满足的微分方程,探讨一些定性性质。

**命题3** 对 $(0, w)$ 区间内的任意一个投标价 $b$ ,企业 $j$ 的估价 $v_j$ 均高于企业 $i$ 的估价 $v_i$ ,即 $\varphi_j(b) > \varphi_i(b)$ ,  $b \in (0, w)$ 。

命题3的等价描述是: $b_i(v) > b_j(v)$ ,  $v \in (0, w)$ 。进而 $b_i(v_i) > b_j(v_i) \geq b_j(v_j)$ ,  $v_i \geq v_j$ 。也就是说,在投标阶段,只要企业 $i$ 对碳排放权的估价不低于企业 $j$ 的估价,企业 $i$ 将获得碳排放的使用权。究其原因,是因为企业 $i$ 与企业 $j$ 所有权的不同,使得它们在碳减排投资时承担的风险存在差异,导致它们对竞争对手估价的累积分布函数、进而对竞争对手估价的预期值有所不同,这一竞争环境下企业 $i$ 与企业 $j$ 采取了不同的投标策略。即使对碳排放权的估价相同,相对较大的减排投资风险使得企业 $j$ 的报价趋于保守。

**注3** 命题3的结论类似于文献[19]。文

<sup>⑦</sup> 这样的案例很多,如为了让四大国有银行成功上市,国家成立了四大不良资产处置公司,完全把四大国有银行的不良资产剥离给对应的不良资产处置公司处理;又如,为了执行政企分离政策,我国要为长期运营亏损的企业员工发放一次性买断补贴;再如,政府要填补医保基金的巨大赤字缺口。

献[19]采用一阶随机占优的分布函数,建立了非对称竞标模型,得到随机占优的投标者报出相对激进的价格。

接着,考察在  $v_i < v_j$  时,企业  $i$  与企业  $j$  的中标情况. 如图 1 所示,由于企业的投标价不超过各自的估价,所以曲线  $b_i(v)$  和曲线  $b_j(v)$  在对角线的下方. 设企业  $j$  的估价  $v_j = v_1$ , 当企业  $i$  的估价  $v_i \in (v_2, v_1)$  时,虽然企业  $i$  的估价低于企业  $j$  的估价,但是非对称的投标策略使得企业  $i$  的投标价  $b_i(v_i)$  仍然高于企业  $j$  的投标价  $b_j(v_j)$ . 只有  $v_i \in (0, v_2)$  时,  $b_i(v_i) < b_j(v_j)$ , 企业  $j$  才能获得碳排放的使用权. 尽管图 1 不能精确刻画  $v_i < v_j$  时非对称企业  $i$  和  $j$  的获胜情况,但可以从中获得启示,得到如下结论.

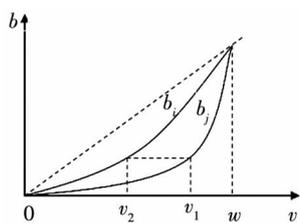


图 1 在  $v_i < v_j$  时企业的中标情况

Fig. 1 The winning outcomes of firms with  $v_i < v_j$

**命题 4** 当  $v_i < v_j$  时,

$$\begin{cases} b_i(v_i) > b_j(v_j), \varphi_i[b_j(v_j)] < v_i < v_j; \\ b_i(v_i) < b_j(v_j), 0 < v_i < \varphi_i[b_j(v_j)] \end{cases} \quad (11)$$

既然企业对碳排放权估价的高低是由企业降低同等碳排放量所需要的投资额决定的,为了降低碳减排对一国或地区整体经济发展的影响,并节约企业碳减排成本,在碳排放权资源配置的过程中,降低单位碳排放量需要较高投资额的企业应获得碳排放的使用权,而投资较低的企业应增加减排投资,以降低排放权当量的许可量,多个减排路径并存,体现出碳减排过程中的“能者多劳”,最终可以降低碳减排对经济发展的冲击,实现低碳经济的平稳过渡. 因此,当  $b_i(v_i) > b_j(v_j)$  ( $v_i < v_j$ ) 发生时,着眼于两企业减排投资的总成本,称碳排放权资源被“误配”了.

根据命题 4,若把国有企业和私营企业不加以区分,一起纳入同一个碳排放权配置体系,将可能会出现碳排放权的误配,使得碳减排成本较低的企业获得碳排放的使用权,而碳减排成本较高

的企业只能通过减排投资降低碳排放权的同等量. 这样,为了实现既定的减排目标,碳排放权的误配增加了减排的总投资额,其具体增加量见下面的命题 5.

**命题 5** 由碳排放权误配所增加的企业减排总成本最高可达  $F_i(w) / \{f_i(w) \varphi_i'[b_j(v_j)]\}$ .

**注 4** 相对于文献[19],命题 4 给出了非对称竞标策略的社会经济后果,并在命题 5 中对此后果进行了范围界定.

在独立私人估价模式下,企业  $j$  对碳排放权的估价  $v_j$  是确定的;由式(10)可知,  $j$  的投标策略  $b_j(\cdot)$  随着  $F_i$  的变化而做出调整. 因此,当碳排放权资源被误配时,企业碳减排成本的增加量在较大程度上是由企业  $i$  的个体特征决定的,比如企业  $i$  的估价分布函数  $F_i$ 、企业  $i$  与政府之间的利益裙带关系(式(2))、企业的  $i$ “影子投标”( $v - b_i(v)$ ) 低于竞争对手“影子投标”( $v - b_j(v)$ ) 的程度等. 因此,为了降低企业碳减排的成本,避免碳排放权资源误配现象的发生,必须从企业  $i$  入手,弱化或消除其在投标期初的竞争优势(即企业  $i$  和企业  $j$  之间的估价累积分布函数差异).

那么,在我国现有的企业资本构成客观现实下,不同企业在参与碳排放权的投标前,它们的碳减排投资决策或投资水平是否存在差异? 若存在差异,其差异程度和影响因素又是什么? 基于微分方程(9)和微分方程(10),进一步考察企业  $i$  和企业  $j$  在第二阶段的减排投资决策行为.

## 2.2 减排投资决策

给定企业减排技术,设投资  $s$  取得的减排收益为  $g(s)$ ,且  $g'(s) > 0, g''(s) < 0$ ,即减排收益随着减排投资的增加以递减的速度上升. 为了分析企业  $i$  和企业  $j$  在减排投资阶段因所有权不同所产生的决策差异,假设减排技术固定,即企业  $i$  和企业  $j$  有相同的减排投资效益  $g(\cdot)$ . 为简化记号<sup>⑧</sup>,在下文的分析中,设  $s = v$ . 由式(7)可知

$$\{b_i F_j[\varphi_j(b_i)]\}' = \varphi_i(b_i) f_j[\varphi_j(b_i)] \varphi_j'(b_i) \quad (12)$$

式(12)两边关于  $b_i$  在  $[0, b_i]$  上积分可得

$$b_i F_j[\varphi_j(b_i)] = \int_0^{b_i} \varphi_i(x) f_j[\varphi_j(x)] \varphi_j'(x) dx$$

<sup>⑧</sup> 对于  $s \neq v$  的情形,只要  $v$  与  $s$  正相关,文中所有的定性结论仍成立.

$$= \varphi_i(b_i)F_j[\varphi_j(b_i)] - \int_0^{b_i} F_j[\varphi_j(x)]\varphi_i'(x)dx$$

于是

$$[\varphi_i(b_i)-b_i]F_j[\varphi_j(b_i)]=\int_0^{b_i} F_j[\varphi_j(x)]\varphi_i'(x)dx \tag{13}$$

将式(13)代入式(5)式,可得企业*i*在投资阶段的决策问题为

$$\max_{s_i} \alpha \left\{ \alpha \int_0^{b_i} F_j[\varphi_j(x)]\varphi_i'(x)dx + g(s_i) - s_i \right\}$$

注意到  $v_i = s_i$ , 企业*i*的最优投资水平  $s_i^*$  满足的一阶必要条件为

$$\alpha F_j[\varphi_j(b_i(s_i))] + g'(s_i) = 1 \tag{14}$$

类似地,企业*j*的最优投资水平  $s_j^*$  满足的一阶必要条件为

$$F_i[\varphi_i(b_j(s_j))] + g'(s_j) = 1 \tag{15}$$

**命题6** (I)若  $F_j[\varphi_j(b_i(s_i^*))] < F_i[\varphi_i(b_j(s_j^*))]$ , 则  $s_i^* < s_j^*$ ;

(II)若  $F_j[\varphi_j(b_i(s_i^*))] \geq F_i[\varphi_i(b_j(s_j^*))]$ , 则存在  $\alpha_0 \in (0,1]$ , 使得: 当  $\alpha \in (\alpha_0,1]$  时,  $s_i^* > s_j^*$ ; 当  $\alpha \in (0,\alpha_0)$  时,  $s_i^* < s_j^*$ .

**注5** 文献[28]探讨了对于可分割的拍卖品, 拍卖方的分割决策对相同企业投资决策有显著影响, 而命题6给出了当投标者非对称时, 拍卖方的利润分成比例将如何影响企业的投资决策.

因为企业*i*在投标阶段的获胜概率是由企业*j*的估价累积分布函数和投标策略决定的, 所以, 当企业*i*预期自己在投标阶段获得碳排放权的可能性较低时, 将会把减排希望寄托于投标前的减排投资阶段, 精心设计碳减排计划, 并策划减排投资资金的投放时点和时空分布, 充分发挥每笔资金的减排效率, 使得单位减排量消耗的资金降到最低; 此时, 既然企业*j*获得碳排放权的可能性较大, 那么*j*在减排投资阶段的动力不足, 努力程度相对于企业*i*将有所懈怠. 因此, 降低相同的碳排放权许可量, 企业*i*的减排成本低于企业*j*的减排成本.

随着  $1 - \alpha$  的不断增加, 企业*i*获得碳排放权的净利润越来越少, 这样, 政府利益分成  $1 - \alpha$  对企业*i*竞买碳排放权有消极影响. 所以, 当  $1 - \alpha$  接近于0时, 政府的利润分成对企业*i*的减排决策影响较小, 在企业*i*预期自己在投标阶段获得

碳排放权的可能性较大的前提下, 相对于企业*j*, 企业*i*在减排投资阶段的努力水平较低, 降低碳排放权许可量的减排成本较高, 即  $s_i^* > s_j^*$ ; 当  $1 - \alpha$  接近于1时, 政府获得企业*i*使用碳排放权的几乎所有利润, 即使企业*i*与企业*j*间的非对称信息使得企业*i*获得碳排放权的可能性较大, 此时, 从利润最大化的角度考虑, 企业*i*仍然愿意选择在减排投资阶段更加努力, 提高减排资金的利用效率, 使得最终  $s_i^* < s_j^*$  情形发生.

### 2.3 碳排放权的有效配置与政府收益

若企业*i*在投标阶段竞买到碳排放权, 则它支付给政府的价格为  $b_i(s_i^*)$ ; 此外, 企业*i*还要将使用碳排放权获得利润的  $1 - \alpha$  部分—— $(1 - \alpha)[s_i^* - b_i(s_i^*)]$ ——分给政府. 而企业*j*竞买到碳排放权, 仅支付其投标价  $b_j(s_j^*)$  给政府. 因此, 政府通过拍卖一个单位的碳排放权, 获得的总收益  $TR$  为

$$\begin{cases} TR_i = (1 - \alpha)s_i^* + \alpha b_i(s_i^*), & \text{企业 } i \text{ 竞买到碳排放权} \\ TR_j = b_j(s_j^*), & \text{企业 } j \text{ 竞买到碳排放权} \end{cases}$$

根据文献[29]的工作, 碳排放的社会福利损失定义为: 每排放一单位的二氧化碳, 整个社会愿意接收的弥补 (willingness to accept compensation). 因此, 碳减排的社会福利可以定义为: 每减少一单位碳排放, 整个社会的支付意愿 (willingness to pay). 在一单位碳排放权拍卖交易中, 排放权最终归企业*i*(或企业*j*)所有, 那么, 没有中标的企业为了降低一单位的碳排放量, 必须做出相应的减排投资  $s$ , 其社会净收益为社会支付意愿减去  $s$ . 而整个社会支付意愿对于企业*i*和企业*j*是相同的, 当减排投资  $s$  越小, 碳减排的社会净收益就越大. 这样, 当减排投资较高的企业获得了碳排放权时, 另一企业降低一单位碳排放将需要较小的投资, 获得较大的社会净收益, 此时, 称碳排放权的配置结果是社会最优的.

**命题7** 碳排放权的社会最优配置与政府收益最大化二者之间不是总能相容的. 具体地

(I) 当  $s_i^* \geq s_j^*$  时, 碳排放权的社会最优配置可以实现政府收益最大化;

(II) 当  $\varphi_i[b_j(s_j^*)] < s_i^* < s_j^*$  时, 政府收益最大化不能实现碳排放权的社会最优配置;

(III) 当  $s_i^* < \varphi_i[b_j(s_j^*)] < s_j^*$  且  $s_i^* \leq b_j$

( $s_j^*$ )时,碳排放权的社会最优配置可实现政府收益最大化;

(IV)当  $b_j(s_j^*) < s_i^* < \varphi_i[b_j(s_j^*)] < s_j^*$  时,对于较大的  $\alpha$ ,碳排放权的社会最优配置可以实现政府收益最大化;对于较小的  $\alpha$ ,碳排放权的社会最优配置不能实现政府收益最大化.

**注6** 文献[16]证明了,在多物品拍卖中,配置的有效性和收益最大化很难同时实现.而命题7则证明了,在带二级交易市场的拍卖中,不仅拍卖结果决定着配置的有效性,而且社会最优配置与卖方的收益最大化有时也很难相容.

对于政府而言,通过有偿方式配置碳排放权,既能实现碳排放权资源的社会最优配置,增加减排的社会净收益,同时还能增加政府的财政收入,当然是两全其美.但有时却难以实现碳排放权资源的社会最优配置和最大化政府收益的双重目标,这需要政府通过宏观调控或加以引导,排除碳排放权资源的非社会最优配置情形的发生,使得配置结果向增加政府收益的方向发展.在具体实践过程中,政府职能部门可以通过调研影响企业减排投资效果的主要因素,如碳减排技术专利数、减排投资在总投资额中的占比、减排技术研发投资额及员工素质等,对比分析降低相同单位产值碳排放量,国有企业与私营企业二者之间的投资额差异.若命题7中的(I)和(III)情形出现,政府通过价高者中标的竞标规则,即可实现减排的社会最优配置和政府收益最大化的双重目标;若(II)和(IV)情形出现,政府可以通过增加财政支出,以转移支付的形式对国有企业或私营企业的碳减排进行补贴,降低企业的碳减排投资成本;对私营企业进行减排补贴,使得(II)和(IV)移动到(I),或者对国有企业进行减排补贴,使得(II)和(IV)移动到(III),校正碳排放权资源的非社会最优配置,同时还能增加政府的拍卖收益.

### 2.4 减排补贴的路径选择

为了有效发挥碳交易市场的激励作用,较溯源配置准则,拍卖配置方式是我国建立全国性碳交易体系较好的初始配置方式.然而,企业实际碳排放量的降低必然伴随着企业的减排投资,增加了企业产品的生产成本.为了减弱碳排放权由免费到有偿过渡的企业阻力,鼓励企业积极进行减排投资,在实践中,政府对企业采取了多种形式的

补贴政策.事实上,“七省市”碳交易试点的溯源配置方式是对减排企业的间接补贴,把碳排放权资源免费分配给它们,其结果是不但没有激起部分企业的减排积极性,反而诱发它们增加实际碳排放量.这说明碳交易试点地区的间接减排补贴政策效果欠佳,存在严重的财政支出误配问题.

从补贴的对象来看,国内外对企业碳减排投资的现行补贴政策,要么是直接补贴企业的生产,降低由碳减排投资所增加的生产成本,要么是补贴购买低碳产品的消费者,通过培育低碳产品的需求市场,以提高企业生产低碳产品的积极性.

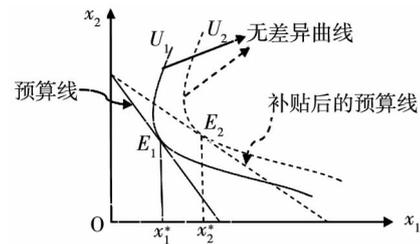


图2 补贴对低碳产品消费量及消费者效用的影响

Fig.2 The effects of subsidy on the low-carbon goods and consumer utility

如图2所示,假设消费者有两种消费品——低碳商品  $x_1$  和其他商品  $x_2$ , 其对应的价格分别为  $p_1$  和  $p_2$ , 在政府对购买低碳产品的消费者进行补贴之前,消费均衡为  $E_1$ , 消费者对商品1的均衡消费量为  $x_1^*$ , 由此带给消费者的效用水平为  $U_1$ . 若政府对单位商品  $x_1$  的消费补贴为  $m$ , 等价于商品  $x_1$  的价格由原来的  $p_1$  降为  $p_1 - m$ , 那么消费者的预算线将变得更加平缓, 新的均衡点为  $E_2$ , 商品1的均衡消费量为  $x_2^*$ , 对应的效用水平由  $U_1$  上升到  $U_2$ . 这样, 政府补贴低碳产品消费的政策效果是: 低碳商品市场消费量增加, 消费者福利水平上升; 低碳商品供给方的市场收益增加 ( $p_1(x_2^* - x_1^*) > 0$ ), 其碳减排投资的收益增加. 但是, 由补贴引发的低碳产品市场收益增加额  $p_1(x_2^* - x_1^*)$ , 在企业间的归属与企业的市场占有率成正比. 若国有企业  $i$  在行业间的市场占有率明显大于企业  $j$ , 则大部分市场收益增加额将流向企业  $i$ , 其减排投资的回报率上升, 即  $s_i^*$  将大幅下降,  $s_i^* < s_j^*$ , 此时, 若命题7(II)出现, 碳排放权资源的非社会最优配置发生; 反之, 企业  $j$  的  $s_j^*$  大幅下降,  $s_i^* > s_j^*$ , 命题(7)(I)成立, 实现了碳排放权资源的社会最优配置; 若企业  $i$  和企业  $j$  的市场占有率无明显优势, 则二者将均分市场收益的增加额,  $s_i^*$  和  $s_j^*$  将

下降相同的幅度,补贴  $m$  将不能改变  $s_i^*$  和  $s_j^*$  之间的大小关系,命题 7 中的误配情形(II)仍然可能发生。

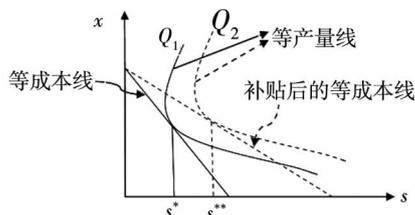


图3 补贴对企业减排投资和产量的影响

Fig. 3 The effects of subsidy on the abatement investment and output of firms

如图 3 所示,  $s$  为企业的碳减排投资, 设  $x$  为减排投资外的其他投入要素, 其价格为  $p$ , 为获得产量  $Q_1$ , 企业的最小成本所对应的减排投资水平为  $s^*$ . 若政府对企业的减排投资补贴为  $m$ , 相当于减排投资的价格由 1 下降为  $1 - m$ , 企业的等成本线变得更加平坦, 此时, 企业的产出量增加, 减排投资  $s^*$  随着  $m$  的变大而上升. 这样, 若政府对企业  $i$  和企业  $j$  采取同样的生产补贴, 可以使得两个企业的减排投资同时增加, 但无法确定能否校正命题 7(II) 中的非社会最优配置; 若仅补贴企业  $j$ , 当  $s_j^*$  上升到  $s_i^* < s_j^*$  成立时, 碳排放权的非社会最优配置将可能发生, 只有当补贴的额度达到一定程度后, 命题 7(III) 成立, 才能实现碳排放权资源的社会最优配置。

简言之, 消费补贴政策可以培育低碳产品的需求侧市场, 但碳排放权的配置是否是社会最优的, 依赖于国有企业和私营企业之间的市场占有率. 根据图 2 中的分析, 为校正或避免碳排放权资源非社会最优配置的发生, 政府应对私营企业的产品进行消费补贴, 当补贴额度达到一定程度后,  $s_i^* > s_j^*$  成立, 可以实现碳排放权的社会最优配置, 增加减排的社会净收益. 在生产补贴政策下, 企业的碳减排投资增加, 且投资额随着补贴程度的上升而变大, 这一性质与企业的所有权属性无关. 但碳排放权资源是否实现了社会最优配置, 依赖于补贴额度, 当补贴达到一定额度后, 可以实现碳排放权资源的社会最优配置. 因此, 为了使企业积极参与碳减排, 又能实现碳排放权的社会最优配置, 政府应同时对所有企业进行碳减排的生产

补贴, 但对私营和国有企业的补贴应采取二元政策, 避免一刀切.

综上所述, 为了矫正碳排放权资源的非社会最优配置, 无论是补贴消费, 还是补贴生产, 政府均需加大对私营企业的补贴力度. 究其根源, 还是企业所有权的属性问题, 国有企业在碳排放权拍卖竞标时得到了“照顾”——体现在企业的估价累积分布函数上, 那么为了实现企业间的公平竞争, 私营企业在减排投资阶段必须得到政府的“照顾”——减排投资获得的补贴力度较大, 最终使得不同所有权属性企业在市场竞争中实现了外生条件的“趋同化”<sup>⑨</sup>.

### 3 数值分析

国家发展改革委气候司副司长蒋兆理在“2015(第六届)中国钢铁节能减排论坛”上强调: 钢铁、电力、物流等 6 个行业将作为首批试点行业, 纳入我国即将启动的全国碳排放交易市场体系. 这样, 年产 8 亿吨钢的钢铁行业将是碳交易新兴市场的参与者, 被迫进行绿色投资和技术变革, 成为我国低碳经济发展的践行者. 因此, 本节将以首钢集团为例, 用数值算例诠释溯源免费配置准则下企业的逆向选择行为、拍卖有偿配置准则防阻企业逆向选择的机理、非对称企业在碳排放权拍卖中的均衡投标策略和竞标前的减排投资决策、政府利润分成对国有企业碳减排投资的影响等问题.

按照北京市发改委下发的《关于进一步做好 2014 年碳排放权交易试点有关工作的通知》要求, 首钢集团旗下 7 家单位(首钢总公司、首钢冷轧公司、首钢氧气厂、首钢微电子、首钢实业公司、首钢机电公司和首钢吉泰安公司)被纳入北京市环境交易所的重点排放单位, 进行履约管理. 为精简叙述, 以首钢总公司为代表展开分析. 设在溯源准则下首钢总公司的生产函数为  $Q(e) = 2e^{1/2}$ , 由式(1)可知, 该公司唯一的最优实际碳排放量为  $e^c = 1/t^2$ . 给定企业的碳排放配额  $K$ , 则

$$\begin{cases} e^c > K, 0 < t < 1/\sqrt{K}; \\ e^c \leq K, t \geq 1/\sqrt{K}. \end{cases}$$

⑨ 这里的趋同化是指企业无法改变, 但却影响企业生产或投资决策的一些外部因素.

对应地,首钢总公司从排放  $e^c$  中获得的利润为

$$Q(e^c) - t(e^c - K) = tK + 1/t$$

$$\begin{cases} \text{关于 } t \text{ 以递增的速度下降, } 0 < t < 1/\sqrt{K} \\ \text{关于 } t \text{ 以递增的速度上升, } t \geq 1/\sqrt{K} \end{cases}$$

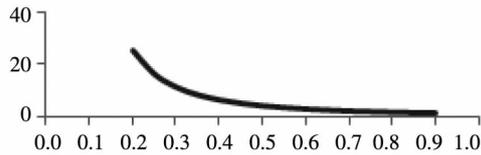


图4 实际碳排放量  $e^c$  随着  $t$  的变化趋势

Fig.4 The change of the actual emission  $e^c$  with  $t$

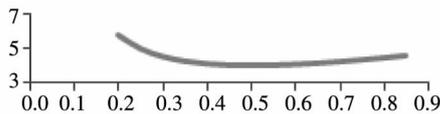


图5 企业的利润随着  $t$  的变化趋势

Fig.5 The change of firm's profit with  $t$

给定首钢总公司 2014 年年初获得的免费排放配额 4 万吨,即  $K = 4$ . 根据北京市环境交易所 2014 年碳排放权全年交易价格状况,从最低价 4 元每吨碳变化到最高价 89 元每吨碳,以百元为单位,可以模拟当  $t$  以 0.05 为步长从 0.05 变化到 1 时,首钢总公司的实际碳排放量和利润的变化趋势(见图 4 和图 5). 从图 4 中可以发现,当  $t < 0.5 = 1/K^{1/2}$  时,首钢总公司的实际碳排放量超过排放配额,需要到碳交易市场购买额外的排放许可权,成为碳交易市场的买方,此时逆向选择发生;当  $t \geq 0.5$  时,逆向选择消失,此情形符合 2014 年首钢总公司的实际履约情况(经 2015 年核查,首钢集团旗下 7 家重点排放单位全部完成履约). 图 5 给出了首钢总公司逆向选择的原因,当  $t < 0.5$  时,碳排放的增加将带来首钢总公司的钢铁产量及其收益增加,此增加量除了能完全弥补购买排放权的成本外,还有盈余,且实际碳排放量及其盈余随着二级交易价格的降低而增加;当  $t > 0.5$  时,碳排放的边际收益小于排放的边际成本  $t$ ,为了最大化利润,首钢总公司必然选择降低实际碳排放量,把盈余的排放许可量在二级市场上出售,此部分收益可以完全弥补由产量减少导致的收益损失,仍有剩余,所以随着  $t$  的增加,企业实际碳排放量降低,但利润增加(2015 年首钢集团由出售盈余的碳

排放权获利 800 多元).

截至 2018 年 8 月,拍卖有偿配置方式在我国碳交易试点地区仅仅是扮演释放价格信号功能,拍卖碳排放权数占排放权总数的比例低于 5%. 在此情形下,缺乏可靠的实际数据参考,仅能做一些数值模拟分析. 在拍卖配置准则下,为便于比较,假设首钢总公司竞买到的排放配额仍为  $K = 4$ ,根据式(A2),拍卖成交价为  $a = 0.5$ ,那么首钢总公司之所以参与竞标,意味着二级市场交易价格  $t > 0.5$ ,根据式(3)和图 4,首钢总公司的实际碳排放量  $e^A < K$ ,即没有逆向选择发生.

假设在碳排放权拍卖中,国有企业首钢总公司(用下标  $i$  表示)和私营企业唐钢公司(用下标  $j$  表示)参与竞标. 为简化计算,设  $v \in [0, 1]$ ,  $F_i(v) = (v+1)/2$ ,  $F_j(v) = v/2$ ;  $v \in [1, 2]$ ,  $F_i(v) = 1$ ,  $F_j(v) = v/2$ . 由式(9)和式(10)两式可得投标策略  $\varphi_i$  和投标策略  $\varphi_j$  满足的微分方程为

$$\begin{cases} \varphi_i(b) - b = \varphi_j(b)/\varphi_j'(b) \\ \varphi_j(b) - b = [\varphi_i(b) + 1]/\varphi_i'(b) \end{cases}$$

其解为

$$\begin{cases} \varphi_i(b) = 2b + 1/3 \\ \varphi_j(b) = 2b + 2/3 \end{cases} \quad (16)$$

由式(16)可得,首钢总公司和唐钢公司的贝叶斯—纳什均衡投标策略分别为

$$b_i^*(v) = \begin{cases} 0, v \in [0, \frac{2}{3}] \\ \frac{1}{2}(v - \frac{1}{3}), v \in (\frac{2}{3}, 1) \\ \frac{1}{3}, v \in [1, \frac{4}{3}) \\ v, v \in [\frac{4}{3}, 2] \end{cases},$$

$$b_j^*(v) = \begin{cases} 0, v \in [0, \frac{2}{3}] \\ \frac{1}{2}(v - \frac{2}{3}), v \in (\frac{2}{3}, \frac{4}{3}) \\ v, v \in [\frac{4}{3}, 2] \end{cases} \quad (17)$$

如图 6 所示,当估价低于  $2/3$  时,唐钢公司将不参与投标,所以首钢总公司的最优均衡报价为 0;当估价处于区间  $[1, 4/3)$  时,首钢总公司的估价累计分布为常数,于是首钢总公司对唐钢公司

报价的最优反应是报出  $1/3$  的价格水平;当估价处于区间  $[4/3, 2]$  时,首钢总公司和唐钢公司经过反复博弈的均衡结果只能是二者均报出各自的估价;而且在  $(2/3, 4/3)$  的估价区间上,当首钢总公司和唐钢公司的估价相同时,前者的报价始终大于后者. 根据命题 4,  $v_j > v_i$  且  $b_i > b_j$  只发生在  $(2/3, 4/3)$  区间上,所以,由碳排放权误配所增加的企业减排总成本最高可达到 1.

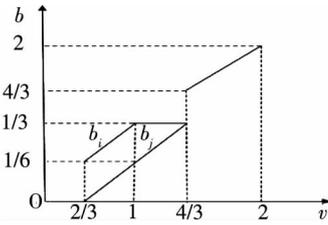


图 6 均衡投标策略  $b_i^*(v)$  和均衡投标策略  $b_j^*(v)$  的曲线图

Fig. 6 The curves of equilibrium bidding strategies  $b_i^*(v)$  and the curves of equilibrium bidding strategies  $b_j^*(v)$

设  $g(s) = 2s^{1/2}$ , 式(17)分别代入式(14)和式(15), 得

$$\begin{cases} s_i^{-1/2} = 1 - \frac{\alpha}{3} - \alpha b_i \\ s_j^{-1/2} = \frac{1}{3} - b_j \end{cases}$$

当报价水平  $b$  以  $0.01$  为步长从  $1/6$  变化到  $1/3$  时,图 7 给出了唐钢公司竞标前的减排投资水平和  $\alpha$  分别等于  $0.2, 0.5, 0.7, 0.9$  对应的首钢总公司竞标前的减排投资水平. 从图中可以发现,随着政府分给首钢总公司利润比例的上升,首钢总公司减排投资积极性下降. 当利润分成比例较小时,政府在拍卖过程中对首钢总公司的“照顾”有限,由于首钢总公司存在一些无法避免的行政

审批程序及其成本支出,导致首钢总公司预期自己竞标获胜的可能性相对较小(对应着图 7 中横坐标  $b_i$  的较小值),为达到既定的碳减排目标,在竞标前的减排投资高于唐钢公司. 然而,当利润分成达到一定比例之后,政府与首钢总公司之间的利益裙带关系,使得首钢总公司在拍卖中能否中标倍受政府关注,“照顾”程度上升;尽管如此,首钢总公司的减排投资仍依赖于自己竞标的获胜预期,若获胜的可能性较小(对应着图 7 中横坐标  $b_i$  的较小值),首钢总公司的减排投资高于私营企业,反之,若唐钢公司预期自己获胜的可能性较小(对应着图 7 中横坐标  $b_j$  的较小值和  $b_i$  的较大值),唐钢公司的减排投资高于首钢总公司. 另外,当唐钢公司在拍卖中的报价达到一定高度后(对应着图 7 中  $\alpha=0.9$  时  $s_i$  曲线的后半段),很自信地认为在拍卖中获胜,获得碳排放权的使用权,而且根据当前已经掌握的减排技术和产出水平,获得的碳排放权可以完全覆盖自己的实际碳排放量.

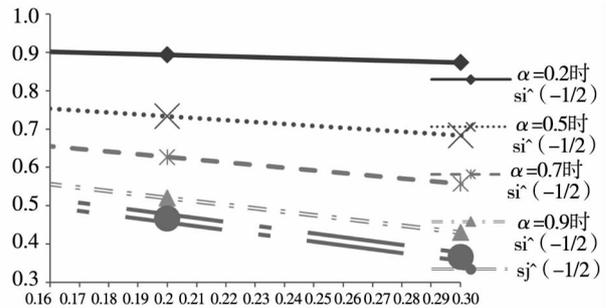


图 7 企业  $i$  和企业  $j$  的竞标前减排投资水平

Fig. 7 The abatement investment levels of firms  $i$  and firms  $j$  before the auction

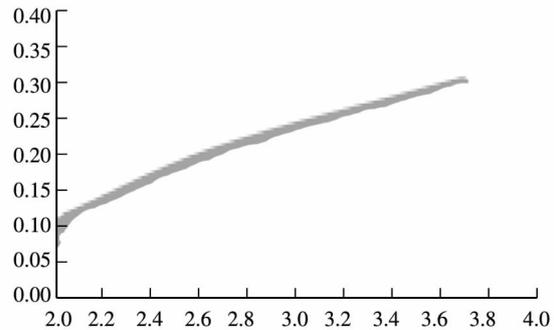
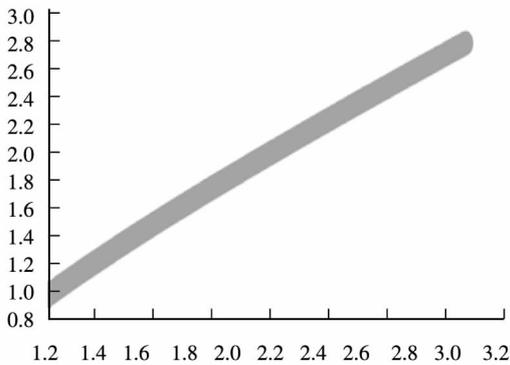


图 8 企业  $i$  投资变化对政府收益的影响(左图对应  $\alpha=0.2$ ,右图对应  $\alpha=0.9$ )

Fig. 8 The effects of firm  $i$ 's investment on the government's profit with  $\alpha=0.2$  (the left figure) and  $\alpha=0.9$  (the right figure)

图8给出了,若首钢总公司在拍卖中获胜,其竞标前的投资变化对政府收益的影响.无论政府与首钢总公司之间的利润分成比例如何,政府拍卖收益均随着首钢总公司减排投资的增加而增加;随着政府利润分成比例的上升,尽管首钢总公司竞标报价下降,但减排投资的增加使得政府的拍卖收益仍然上升.

## 4 结束语

我国的七省市碳交易试点能否被顺利推广到全国,与试点地区碳排放权的企业配置效果和企业的减排效率息息相关.于是,从试点地区的二级市场交易数据入手,发现在每年的三月(强制减排企业向当地的环保部门上报去年的实际碳排放量)和六月(环保部门核查减排企业的实际碳排放量是否超出其获得的排放许可量)量价齐升,具有明显的政策聚类效应;进而构建我国碳交易试点的碳排放权溯源准则配置模型,其演绎结果显示,强制减排企业存在严重的逆向选择行为,碳排放权的溯源准则初始配置机制对部分企业的碳减排起到反向激励的负效应.究其原因,试点地区的强制减排企业数目有限,碳减排作为所有企事业单位的副产品,成为供给者,二级市场总体上呈现出供过于求的非均衡态势,使得碳排放权交易年均价格呈现低开低走的格局,对强制减排企业而言,较低的二级市场交易价格(或较低的碳排放成本)无法激起其碳减排的积极性和主动性,导致政策时点上的短暂市场繁荣.为了提高企业碳减排的积极性,确保2020年碳减排目标的实现,在建立全国范围内跨省区碳交易市场时,建议降低政府这只“有形手”在碳排放权初始配置中的作用,加强市场这只“无形手”扮演的角色,落实“十三五”规划中政府和市场在经济发展中的角色定位.

如何在实践中落实碳排放权的市场配置作用?借鉴欧盟ETS经验,文中建立了碳排放权拍卖初始配置模型,其结果显示:拍卖有偿配置方式可以有效避免企业碳减排的逆向选择行为.为了对我国的碳交易市场提供一些政策启示,结合我国的客观现实,把企业分为国有和私营两类,构建

了企业减排投资的回报率指标,从企业减排社会净收益角度定义了碳排放权的有效配置,建立了一个非对称的碳排放权拍卖模型,并进行数理演绎和定性分析,发现:1)在一级价格拍卖下,碳排放权存在误配的可能.理论上,估价高的企业获得碳排放权的使用权,然而,当国有企业的估价低于私营企业时,国有企业仍有中标的可能,此时,碳排放权的误配发生.2)企业在参与碳排放权竞标前的减排投资行为依赖于企业对竞标获胜的预期.为实现既定的减排目标,企业竞标前的减排投资积极性与竞标获胜预期成反比,此外,政府与国有企业间的利润分成对国有企业竞标前的减排投资积极性有一定的挫伤.3)碳排放权的有效配置与政府拍卖收益最大化能否相容,是由企业竞标前的减排投资行为决定的.4)政府对企业碳减排的补贴方式和路径趋同化,可以同时实现排放权有效配置与政府拍卖收益最大化的双重目标.因此,为了建立行之有效的全国碳交易市场,建议继续坚持二元经济特色,切忌把国有企业和私营企业简单纳入统一监督管理标准、实行一刀切方针,营造企业在碳排放权交易市场体系中的趋同化外部条件,提高企业减排投资积极性.

目前,我国正处于实现2020年碳减排目标的冲刺阶段,要想实现经济发展模式由粗犷的能耗型向集约的节能、清洁型转变,必须完成要素驱动向创新驱动的结构升级.因此,我国政府通过可再生能源绿色补贴政策,在“十二五”期间战略性地培育了一批清洁能源新兴产业,如新能源汽车和光伏发电.这些新兴产业未来将构成我国碳交易框架下的生力军:一方面,新兴清洁能源产业及其下游产业链掌握着相对先进的低碳或去碳化技术,能够保证碳减排目标的顺利实施;另一方面,政府可以利用在碳排放权拍卖中获得的收入,以转移支付的形式有战略性地扶持新兴清洁能源行业发展,在减轻政府公共财政资金支出压力的同时,激励企业低碳技术创新,进而扩大政府财政支出的货币乘数,最终改进全要素生产率.但是,值得提及的是,碳交易市场机制与清洁能源补贴政策所覆盖的行业范围存在一定程度的交叉重叠,多个政策交叉并行存在相互抵触的风险,甚至可能导致政策工具失灵.比如电力行业既被纳入碳交易市场体系,也是清洁能源政策补贴的对象,当

补贴政策激励效果良好时,电力行业的实际碳排放量降低,对碳排放权的需求减少,导致碳交易市场价格下降,进而引起其他行业的碳排放权需求增加,这样,电力行业的补贴政策对其他行业的交叉影响,将造成其他行业实际碳排放量的增加,减弱碳交易市场机制的减排效果,甚至可能引发碳交易市场失灵。

因此,应把新兴清洁能源行业及其下游产业

链纳入碳交易机制设计框架内,充分发挥其生力军作用的同时,尽量避免不同政策间交叉抵触风险的发生。那么,如何建模分析新兴清洁能源行业对碳排放权需求总量和碳价的影响程度及其传导路径?把这个问题分析清楚,既是调整碳交易市场上排放权配额总量发放标准的重要依据,亦是降低碳市场交易价格波动风险的一把利器,因此,这是未来值得研究的一个方向。

## 参考文献:

- [1]林伯强,邹楚沅. 发展阶段变迁与中国环境政策选择[J]. 中国社会科学, 2014, 5: 81-95.  
Lin Boqiang, Zou Chuyuan. Changes in development stage and environmental policy options in China[J]. Social Sciences in China, 2014, 5: 81-95. (in Chinese)
- [2]石敏俊,袁永娜,周晟吕,等. 碳减排政策:碳税、碳交易还是两者兼之[J]. 管理科学学报, 2013, 16(9): 9-19.  
Shi Minjun, Yuan Yongna, Zhou Shenglü, et al. Carbon tax, cap-and-trade or mixed policy: Which is better for carbon mitigation[J]. Journal of Management Sciences in China, 2013, 16(9): 9-19. (in Chinese)
- [3]Ambec S, Barla P. A theoretical foundation of the porter hypothesis[J]. Economics Letters, 2002, 75(3): 355-360.
- [4]Martin R, Muûls M, Preux L, et al. Industry compensation under relocation risk: A firm-level analysis of the EU emissions trading scheme[J]. The American Economic Review, 2014, 104(8): 2482-2508.
- [5]Schmidt R C, Heitzig J. Carbon leakage: Grandfathering as an incentive device to avert firm relocation[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2014, 67(2): 209-233.
- [6]王明喜,胡毅,郭冬梅,等. 低碳经济:理论实证研究进展与展望[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(1): 17-34.  
Wang Mingxi, Hu Yi, Guo Gongmei, et al. Low-carbon economy: Theoretical and empirical progress and prospects[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2017, 37(1): 17-34. (in Chinese)
- [7]Sterner T, Isaksson L H. Refunded emission payments: A hybrid instrument with some attractive properties[J]. Ecological Economics, 2006, 57(1): 93-106.
- [8]Gersbach H, Requate T. Emission taxes and optimal refunding schemes[J]. Journal of Public Economics, 2004, 88(3): 713-725.
- [9]Böhringer C, Rosendahl K E, Storrøsten H B. Robust policies to mitigate carbon leakage[J]. Journal of Public Economics, 2017, 149(5): 35-46.
- [10]Nelson R A, Tietenberg T, Donihue M R. Differential environmental regulation: Effects on electric utility capital turnover and emissions[J]. Review of Economics & Statistics, 1993, 75(2): 368-373.
- [11]Goeree J K, Holt C A, Palmer K, et al. An experimental study of auctions versus grandfathering to assign pollution permits[J]. Journal of the European Economic Association, 2010, 8(2): 514-525.
- [12]付秋芳,忻莉燕,马士华. 惩罚机制下供应链企业碳减排投入的演化博弈[J]. 管理科学学报, 2016, 19(4): 56-70.  
Fu Qiufang, Xin Liyan, Ma Shihua. Evolutionary game of carbon-emission-reduction investment in supply chains under a contract with punishment mechanism[J]. Journal of Management Sciences in China, 2016, 19(4): 56-70. (in Chinese)
- [13]王素凤,杨善林,彭张林. 面向多重不确定性的发电商碳减排投资研究[J]. 管理科学学报, 2016, 19(2): 31-41.  
Wang Sufeng, Yang Shanlin, Peng Zhanglin. Research on the power producer's carbon abatement investment in view of multiple uncertainties[J]. Journal of Management Sciences in China, 2016, 19(2): 31-41. (in Chinese)
- [14]王明喜,鲍勤,汤铃,等. 碳排放约束下的企业最优减排投资行为[J]. 管理科学学报, 2015, 18(6): 41-57.

- Wang Mingxi, Bao Qin, Tang Ling, et al. Enterprises' optimal abatement investment behavior with the carbon emission constraint[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2015, 18(6): 41–57. (in Chinese)
- [15] Peter C, Suzi K. Tradeable carbon permit auctions; How and why to auction not grandfather[J]. *Energy Policy*, 2002, 30(4): 333–345.
- [16] Milgrom P, Strulovici B. Substitute goods, auctions, and equilibrium[J]. *Journal of Economic Theory*, 2009, 144(1): 212–247.
- [17] Piccione M, Tan G. Cost-reducing investment, optimal procurement and implementation by auctions[J]. *International Economic Review*, 1996, 37(3): 663–685.
- [18] Rogerson W P. Simple menus of contracts in cost-based procurement and regulation[J]. *American Economic Review*, 2003, 93(3): 919–926.
- [19] Arozamena L, Cantillon E. Investment incentives in procurement auctions[J]. *Review of Economic Studies*, 2004, 71(1): 1–18.
- [20] Lebrun B. Uniqueness of the equilibrium in first-price auctions[J]. *Games & Economic Behavior*, 2006, 55(1): 131–151.
- [21] Riley J, Maskin E. Asymmetric auctions[J]. *Review of Economic Studies*, 2000, 67(3): 413–438.
- [22] Kaplan T R, Zamir S. Asymmetric first-price auctions with uniform distributions; Analytic solutions to the general case[J]. *Economic Theory*, 2012, 50(2): 269–302.
- [23] Mares V, Swinkels J M. On the analysis of asymmetric first price auctions[J]. *Journal of Economic Theory*, 2014, 152: 1–40.
- [24] Nash J R. Too much market? Conflict between tradable pollution allowances and the polluter pays principle[J]. *Harvard Environmental Law Review*, 2000, 24(2): 1–59.
- [25] Clò S. An analysis of the EU emissions trading effectiveness[J]. *Climate Policy*, 2009, 9(1): 227–241.
- [26] Wang M, Liu S. Equilibrium bids in practical multi-attribute auctions[J]. *Economics Letters*, 2014, 123(3): 352–355.
- [27] 王明喜, 胡毅, 乔晗. 招标采购制度下药价虚高的根源及防阻机制[J]. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(2): 379–388.
- Wang Mingxi, Hu Yi, Qiao Han. High drug price's root and prevention in the centralized bid-and-procurement scheme[J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2017, 37(2): 379–388. (in Chinese)
- [28] Gong J, Li J, McAfee R P. Split-award contracts with investment[J]. *Journal of Public Economics*, 2012, 96(1): 188–197.
- [29] Frankhauser S. The social costs of greenhouse gas emissions: An expected value approach[J]. *Energy Journal*, 1994, 15(2): 157–184.

## An asymmetric auction model of carbon emission rights and its allocation efficiency

WANG Ming-xi<sup>1</sup>, LI Ming<sup>1</sup>, GUO Dong-mei<sup>2\*</sup>, HU Yi<sup>3</sup>

1. School of International Trade and Economics, University of International Business and Economics, Beijing 100029, China;
2. School of Economics, Central University of Finance & Economics, Beijing 100081, China;
3. School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract:** At present, researchers and managers are concerned with the performance of the seven carbon-trading pilots in China. Hence, this paper theoretically analyzes their performances from the initial allocation viewpoint of carbon emission rights. It is found that there exists a clustering effect of carbon trading in the pi-

lots. The underlying reason for it is because of the mismatch of permits and the consequent adverse selection of enterprises. To eliminate the adverse selection from mechanism design, the paper introduces auctioning into the carbon-trading market. Moreover, based on China’s actual conditions, an asymmetric auction model of rights is developed by constructing the abatement investment return index and defining the socially optimal rights allocation. In our model, enterprises’ asymmetric equilibrium bidding strategies and their abatement investment decision before the auction are investigated, respectively. Then, the effects of the enterprise ownership differences on abatement investment and allocation are examined. Finally, the effectiveness regarding the low-carbon government subsidy is discussed and associated options are suggested in order to improve China’s carbon-trading market.

**Key words:** carbon emission rights; allocation mechanism; abatement efficiency

附录

表 A1 参数符号及其含义汇总表  
Table A1 Parameter symbols and their meanings

符号	含义	符号	含义
$e$	企业生产的实际碳排放量	$(0, w)$	估价 $v_i(v_j)$ 的变化范围
$Q$	企业的产量	$b$	企业参与碳排放权拍卖的报价
$K$	企业获得的碳排放许可量	$v - b$	企业在拍卖中的影子投标
$t$	碳交易二级市场价格	$\varphi$	表示 $b$ 是 $v$ 的反函数
$e^G$	溯源免费配置准则下,企业的实际碳排放量	$\text{Pr}_i(\text{win})$	企业 $i$ 在拍卖中的获胜概率
$a$	碳排放权拍卖成交价	$s$	企业的减排投资额
$e^A$	拍卖有偿配置准则下,企业的实际碳排放量	$g(s)$	投资 $s$ 带给企业的减排收益
$i$	与政府存在利润分成关系的国有企业	$m$	政府政策性补贴额度
$j$	与政府不存在利润分成关系的私营企业	$x_1(x_2)$	消费端补贴政策下低碳商品(其他商品)
$1 - \alpha$	政府从国有企业那里获得的利润分成比例	$p_1(p_2)$	低碳商品(其他商品)的价格
$\alpha$	国有企业利润留存比例	$U$	消费端补贴政策下消费者的效用
$v_i(v_j)$	企业 $i(j)$ 对碳排放权的估价	$E$	消费端补贴政策下均衡消费点
$F$	估价 $v$ 的累积分布函数,其密度函数为 $f$	$x$	除 $s$ 外的其他投入要素
$F/f$	企业减排投资回报率	$p$	其他要素对应的综合价格

命题 1 的证明 由已知条件可知,目标函数(1)的最优解  $e^G$  满足微分方程

$$Q'(e^G) = t,$$

且  $de^G/dt = 1/Q''(e^G) < 0$ , 即  $e^G$  是  $t$  的严格递减函数.

当二级交易市场价格较大时,因为

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} [Q(e^G) - t(e^G - K)] = \lim_{t \rightarrow +\infty} Q(e^G) + \lim_{t \rightarrow +\infty} t(K - e^G) \tag{A-1}$$

既然  $e^G$ 、进而  $Q(e^G)$  是有限数,最大化式(1)中的目标函数,只需式(A-1)中等号右边第二项最大化即可. 而  $K > 0, e^G \geq 0$ , 所以,为了最大化目标函数(1),企业的最佳碳排放量为  $e^G$  将严格小于  $K$ .

当二级交易市场价格较小时,注意到

$$\lim_{t \rightarrow 0} [Q(e^c) - t(e^c - K)] = \lim_{t \rightarrow 0} Q(e^c) - \lim_{t \rightarrow 0} t(e^c - K) = \lim_{t \rightarrow 0} Q(e^c)$$

又因为  $Q'(e^c) > 0$ , 此时, 企业的碳排放量是多多益善, 将超出排放许可量, 所以  $e^c > K$ , 即企业碳减排的逆向选择出现.

**命题 2 的证明** 在拍卖配置方式下, 参与减排企业竞买排放许可量的目标函数为

$$\max_K [Q(K) - aK],$$

其唯一的最优竞买量  $K$  满足

$$Q'(K) = a \tag{A-2}$$

在实际生产中, 企业的实际碳排放量决策问题为

$$\max_e [Q(e) - t(e - K)]$$

其最佳的实际碳排放量  $e^A$  满足

$$Q'(e^A) = t \tag{A-3}$$

减排企业之所以参与拍卖, 并竞买排放许可量  $K$ , 是因为拍卖成交价  $a$  严格小于二级市场交易价格  $t$ , 否则, 企业将不参与竞买排放许可量  $K$ , 而到二级市场上以较低的成本获得对应的许可量. 注意到  $Q''(e) < 0$ , 即  $Q'(e)$  是  $e$  的严格递减函数. 由式(A-2)和式(A-3)两式可得:  $e^A < K$ . 这样, 在拍卖有偿配置方式下, 若企业参与竞价, 则它的实际碳排放量低于其获得的初始许可量, 不会出现企业碳减排的逆向选择问题.

在证明命题 3 之前, 首先证明下面 3 个引理.

**引理 1** 曲线  $\varphi_i(b)$  与  $\varphi_j(b)$  在  $(0, w)$  上至多相交一次.

**证明** 假设在区间  $(0, w)$  上存在两个点  $b_1$  和点  $b_2$ , 使得曲线  $\varphi_i(b)$  与曲线  $\varphi_j(b)$  相交, 则  $\varphi_i(b_1) = \varphi_j(b_1)$ , 且  $\varphi_i(b_2) = \varphi_j(b_2)$ . 在  $b_1$  点处, 式(9)和式(10)两式隐含着

$$\begin{cases} \varphi_j'(b_1)[\varphi_i(b_1) - b_1] = F_j[\varphi_j(b_1)]/f_j[\varphi_j(b_1)] \\ \varphi_i'(b_1)[\varphi_j(b_1) - b_1] = F_i[\varphi_i(b_1)]/f_i[\varphi_i(b_1)] \end{cases}$$

再由式(2), 可知

$$\varphi_i'(b_1) > \varphi_j'(b_1) \tag{A-4}$$

类似地, 有

$$\varphi_i'(b_2) > \varphi_j'(b_2) \tag{A-5}$$

不妨设  $b_1 < b_2$ , 于是, 由式(A-4)可得:  $\varphi_i(b) > \varphi_j(b), b \in (b_1, b_2)$ . 这样, 若曲线  $\varphi_i(b)$  与曲线  $\varphi_j(b)$  在  $b_2$  点再次相交, 必然有  $\varphi_i'(b_2) < \varphi_j'(b_2)$  成立, 这与(A-5)式矛盾!

**引理 2** 若曲线  $\varphi_i(b)$  与曲线  $\varphi_j(b)$  相交, 则在交点之后,  $\varphi_i(b) > \varphi_j(b)$ .

**证明** 设曲线  $\varphi_i(b)$  与曲线  $\varphi_j(b)$  在  $b_1$  处相交, 则  $\varphi_i(b_1) = \varphi_j(b_1)$ . 由引理 1 可知, 曲线  $\varphi_i(b)$  与曲线  $\varphi_j(b)$  在区间  $(b_1, w)$  上将不再相交, 且  $\varphi_i'(b_1) > \varphi_j'(b_1)$ . 于是,  $\varphi_i(b) > \varphi_j(b), b \in (b_1, w)$ .

**引理 3** 若曲线  $\varphi_i(b)$  与曲线  $\varphi_j(b)$  在  $(0, w)$  上不相交, 则  $\varphi_j(b) > \varphi_i(b), b \in (0, w)$ .

**证明** 若  $\varphi_i(b) > \varphi_j(b), b \in (0, w)$ , 则  $\varphi_i(b) - b > \varphi_j(b) - b$ . 将  $b_i = b_j = b$  分别代入式(9)和式(10)两式, 得: 对于任意的  $b \in (0, w)$ ,

$$F_j[\varphi_j(b)]/f_j[\varphi_j(b)]\varphi_j'(b) = \varphi_i(b) - b > \varphi_j(b) - b = F_i[\varphi_i(b)]/f_i[\varphi_i(b)]\varphi_i'(b)$$

等价地

$$\frac{f_j[\varphi_j(b)]}{F_j[\varphi_j(b)]}\varphi_j'(b) < \frac{f_i[\varphi_i(b)]}{F_i[\varphi_i(b)]}\varphi_i'(b)$$

注意到回报率  $F(v)/f(v)$  是估价  $v$  的递增函数, 而  $\varphi_i(b) > \varphi_j(b)$ , 于是有

$$\frac{f_j[\varphi_j(b)]}{F_j[\varphi_j(b)]}\varphi_j'(b) < \frac{f_i[\varphi_i(b)]}{F_i[\varphi_i(b)]}\varphi_i'(b) < \frac{f_i[\varphi_j(b)]}{F_i[\varphi_j(b)]}\varphi_i'(b)$$

再由式(2), 可得

$$\varphi_j'(b) < \varphi_i'(b), b \in (0, w) \tag{A-6}$$

因为  $\varphi_i(b) > \varphi_j(b) (b < w), \varphi_i(w) = \varphi_j(w) = w$ , 所以在接近  $w$  时, 必须存在点  $b^* < w$ , 使得  $\varphi_j'(b^*) > \varphi_i'(b^*)$

此与(A-6)式矛盾! 因此,引理3成立.

**命题3的证明** 若曲线 $\varphi_i(b)$ 与曲线 $\varphi_j(b)$ 相交,由引理1可知这样的交点只能有一个,设为 $b_1$ .由引理2可知,

$$\varphi_i(b) > \varphi_j(b), b \in (b_1, w) \quad (\text{A-7})$$

此时,曲线 $\varphi_i(b)$ 与曲线 $\varphi_j(b)$ 在 $(b_1, w)$ 将不再相交.由引理3,知道,

$$\varphi_j(b) > \varphi_i(b), b \in (b_1, w) \quad (\text{A-8})$$

式(A-7)与式(A-8)矛盾! 即曲线 $\varphi_i(b)$ 与曲线 $\varphi_j(b)$ 在 $(0, w)$ 上不相交.再次利用引理3,可立得 $\varphi_j(b) > \varphi_i(b), b \in (0, w)$ .

**命题4的证明** 由命题3可知, $b_j \{ \varphi_i [ b_j(v_j) ] \} < b_i \{ \varphi_i [ b_j(v_j) ] \} = b_j(v_j)$ .而 $b(v)$ 是 $v$ 的递增函数,于是有 $\varphi_i [ b_j(v_j) ] < v_j$ .当 $\varphi_i [ b_j(v_j) ] < v_i < v_j$ 时,再次利用 $b(v)$ 的单调性,可得: $b_i(v_i) > b_i \{ \varphi_i [ b_j(v_j) ] \} = b_j(v_j)$ ;类似地,可得式(11)的第二个不等式.

**命题5的证明** 由命题4可知,当 $\varphi_i [ b_j(v_j) ] < v_i < v_j$ 时,企业 $i$ 减少碳排放权许可量所需要的投资低于企业 $j$ ,反而获得了碳排放权,此时,要实现降低碳排放权许可的二氧化碳量,企业 $i$ 的投资成本为 $b_i(v_i)$ ,企业 $j$ 的减排投资为 $v_j$ ,其碳减排的总投资额为 $b_i(v_i) + v_j$ ;反之,若企业 $j$ 获得了碳排放权的使用权,降低同样的碳排放,企业 $i$ 的投资成本为 $v_i$ ,企业 $j$ 的投资为 $b_j(v_j)$ ,其碳减排的总投资额为 $v_i + b_j(v_j)$ .这两种不同配置结果所导致减排总投资的差额为

$$b_i(v_i) + v_j - [v_i + b_j(v_j)] = [v_j - b_j(v_j)] - [v_i - b_i(v_i)] \geq 0$$

因为 $v_i - b_i(v_i) \geq 0$ ,当 $v_i = w$ 时, $v_i - b_i(v_i)|_{v_i=w} = 0$ ,此时,注意到减排投资回报率是估价的增函数,由式(10)可

得:最大的差额为 $v_j - b_j(v_j) = \frac{F_i(w)}{f_i(w)\varphi_i'[b_j(v_j)]}$

**命题6证明** 由式(14)和式(15)两式,可得

$$g'(s_i) - g'(s_j) = F_i[\varphi_i(b_j(s_j))] - \alpha F_j[\varphi_j(b_i(s_i))]$$

(I)若 $F_j[\varphi_j(b_i(s_i^*))] < F_i[\varphi_i(b_j(s_j^*))]$ ,则

$$g'(s_i^*) - g'(s_j^*) = F_i[\varphi_i(b_j(s_j^*))] - \alpha F_j[\varphi_j(b_i(s_i^*))] > 0$$

而 $g''(s) < 0$ ,所以 $s_i^* < s_j^*$ .

(II)若 $F_j[\varphi_j(b_i(s_i^*))] \geq F_i[\varphi_i(b_j(s_j^*))]$ ,则存在 $\alpha_0 \in (0, 1)$ ,使得

$$\alpha_0 F_j[\varphi_j(b_i(s_i^*))] = F_i[\varphi_i(b_j(s_j^*))]$$

这样,当 $\alpha \in (\alpha_0, 1]$ 时, $g'(s_i^*) - g'(s_j^*) < 0$ ,于是有 $s_i^* > s_j^*$ .当 $\alpha \in (0, \alpha_0)$ 时, $g'(s_i^*) - g'(s_j^*) > 0$ , $s_i^* < s_j^*$ .

**命题7的证明** 根据2.1节的分析,当 $s_i^* \geq s_j^*$ 时, $b_i(s_i^*) > b_j(s_j^*)$ ,企业 $i$ 获得了碳排放权,企业 $j$ 降低碳排放权许可量的减排成本为 $s_j^*$ ,小于等于 $s_i^*$ ,实现了碳排放权的社会最优配置;同时,由于 $s_i^* \geq b_i(s_i^*) > b_j(s_j^*)$ ,于是有 $TR_i = b_i(s_i^*) + (1 - \alpha)[s_i^* - b_i(s_i^*)] > b_j(s_j^*) = TR_j$ ,相对于企业 $j$ 获得碳排放权,政府获得了较高的收益.此时,碳排放权的配置结果不仅增加了碳减排的社会净收益,而且还实现了政府的收益最大化.

当 $\varphi_i [ b_j(s_j^*) ] < s_i^* < s_j^*$ 时, $b_i(s_i^*) > b_j(s_j^*)$ ,虽然企业 $i$ 仍获得了碳排放的使用权,但企业 $j$ 降低碳排放权许可量的减排成本为 $s_j^*$ ,严格大于 $s_i^*$ ,即碳排放权的配置结果不是社会最优的;尽管如此,政府从企业 $i$ 那里获得的收益 $TR_i > TR_j$ .此时,政府收益的增加是以损失社会净收益为代价的.

当 $s_i^* < \varphi_i [ b_j(s_j^*) ] < s_j^*$ 时, $b_i(s_i^*) < b_j(s_j^*)$ ,企业 $j$ 获得了碳排放权,企业 $i$ 降低碳排放权许可量的减排成本为 $s_i^*$ ,小于 $s_j^*$ ,碳排放权的配置结果是社会最优的.进一步地,若 $s_i^* \leq b_j(s_j^*)$ ,则 $TR_j = b_j(s_j^*) > (1 - \alpha)s_i^* + \alpha b_i(s_i^*) = TR_i$ ,企业 $j$ 中标将提高政府收益;若 $s_i^* > b_j(s_j^*)$ ,企业 $j$ 获胜是提高还是降低政府收益则由分成参数 $\alpha$ 决定的,这是因为:存在 $\beta(0 < \beta < 1)$ ,使得 $b_j(s_j^*) = (1 - \beta)s_i^* + \beta b_i(s_i^*)$ ,对于 $0 < \alpha < \beta$ 有 $TR_j < TR_i$ ,对于 $\beta < \alpha < 1$ 有 $TR_j > TR_i$ .