

南方金融

South China Finance

ISSN 1007-9041, CN 44-1479/F

《南方金融》网络首发论文

题目：碳配额与补贴政策下企业减排和社会福利的比较研究
作者：魏琦，潘雨，李林静
收稿日期：2020-09-08
网络首发日期：2021-02-02
引用格式：魏琦，潘雨，李林静. 碳配额与补贴政策下企业减排和社会福利的比较研究[J/OL]. 南方金融.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1479.F.20210201.1658.004.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

碳配额与补贴政策下企业减排和社会福利的比较研究*

魏琦, 潘雨, 李林静

(兰州理工大学, 甘肃 兰州 730050)

摘要：为应对气候变化，世界各国将减少二氧化碳排放定位重要任务和工作。而构建碳交易市场，允许企业在碳市场进行买卖，可以促进企业减少碳排放，从而对企业在生产过程中的碳减排起到激励作用。我国碳市场建设时间较短，市场运行机制相比于发达国家不够成熟，探索出符合中国国情且同国际市场接轨的碳市场运行机制迫在眉睫。本文结合中国碳市场运行环境，构建双寡头企业生产约束下的一般均衡模型，分别对碳配额政策及补贴政策给企业生产经营决策造成的影响进行研究，并通过数值算例分析社会福利最大化情形。研究表明：第一，双寡头企业在生产减排博弈过程中，依据各自边际净化成本倾向不同，会产生较大的净化减排量差异，边际净化成本倾向和净化减排量成反向变动。第二，在补贴政策下，企业受到政府补贴激励，会促进企业提高自身减排能力获得补贴收益，且寡头企业间的净化水平竞争有利于提高行业整体净化水平。第三，碳配额政策对社会总体福利更优，而补贴政策使得企业获得更高产量且总体净化减排量更高。

关键词：绿色金融；碳配额；碳减排；双寡头模型；社会福利

中图分类号：F832.5, F416.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1007-9041-2021(01)-0000-00

一、引言

从工业时代开始，人类经济活动规模与方式发生巨大变化，造成二氧化碳等温室气体排放剧增。短期来看，厄尔尼诺现象加剧，如2016年太平洋海温峰值偏高达 2.9°C ，导致当年美洲、欧洲、亚太地区暴风雨、洪涝等自然灾害频发，由此引发的极端气候事件高达20多起。长期来看，自1979年以来，全球冰层面积正以每年13500平方英里的速度减少。《京都议定书》提出了6种引起气候变暖的温室气体，而二氧化碳排放占温室气体排放总量的 $3/4$ ，因此二氧化碳排放规模的变化，对温室效应影响极大。从1900年到2015年，全球二氧化碳总排放量增加约58%，二氧化碳浓度增长近43%，这些数值变化足以体现近一百多年二氧化碳排放规

收稿日期：2020-09-08

作者简介：魏琦，女，教授，供职于兰州理工大学；

潘雨，女，兰州理工大学硕士研究生；

李林静，女，兰州理工大学硕士研究生。

* 本文受国家自然科学基金项目《不确定性冲击下碳排放权交易效率与调控机制构建的实验研究》(项目编号：7196302)的支持。感谢匿名审稿人的宝贵意见。文责自负。

模的快速攀升。如何控制二氧化碳排放,进而减缓温室效应对全球气候的影响已引起广泛关注。

从经济学角度来看,气候变化会导致和环境负外部性,因此,应对气候变化的实质是解决环境外部性问题。构建碳交易市场,即政府根据其市场管理职能规定碳排放权作为可交易的产权,允许企业在碳市场进行买卖,可以促进企业减少碳排放,从而对企业在生产过程中的碳减排起到激励作用。1997年在日本通过的《京都议定书》提出了具有法律约束力的碳排放限制和碳减排目标,起到了里程碑式作用,并确定了“灵活三机制”,即国际排放权贸易(IET)、联合履约(JI)和清洁发展(CDM)机制,催生了全球碳市场的兴起。与此同时,一些国家为了发展低碳经济,由政府推出带有激励性质的补贴政策。例如,美国政府曾为其新能源汽车行业提供75亿美元补贴,用于技术升级,促进汽车行业碳排放降低。

中国作为最大的发展中国家在国际碳减排责任上没有强制履约义务,然而,中国在碳减排责任上勇于担当,致力于寻求积极的解决方案改善全球生态环境。自2017年底全国碳市场启动以来,碳交易体系建设正在加速推进,由于中国目前处于全国性碳市场的基础建设和模拟运行期,市场运行机制相比于发达国家不够成熟,找到符合中国国情且同全球碳市场接轨的市场运行机制显得尤为重要。

二、文献综述

目前,国内外学者对各国在碳配额和补贴政策指导下的碳市场运行效率及对企业生产减排的影响进行了广泛的研究。关于碳配额政策下市场运行效率和最优决策研究,Shobe等(2014)通过一系列经济实验检验了加利福尼亚州在控制温室气体排放方面实施的创新性举措的有效性,发现配额控制储备这种从紧政策减少了市场的流动性,损害市场交易者维持碳价长期平稳的能力,最终导致市场低效和碳交易价格波动剧烈。Kollenberg等(2016)通过构建碳配额分额松紧范围模型,定量描述欧盟市场稳定储蓄机制对于减少外部执行成本的局限性,并提出了最优的配额分配调整比例。王鑫等(2015)通过分析碳配额发放范围和比例对工业部门的影响,并以经济指标和贸易指标量化了配额政策的影响程度。吴慧娟和张智光(2020)通过构建碳市场价格机制和形成路径,研究中国碳价低迷的原因,提出减排门槛低,惩罚力度不够,二产占比较高,非清洁能源利用率低和减排投入不足是碳价过低的原因。任晓松等(2020)采用双重差分模型和多重中介效应模型,研究碳交易对高污染工业企业经济绩效的影响,提出碳交易显著提升高污染工业企业经济绩效。赵立祥等(2020)采用双重差分模型,研究碳交易对我国大气污染的协同减排作用,提出碳交易可通过倒逼技术进步和调整能源强度实现大气污染的协同减排效应。胡艺等(2020)研究碳交易政策在发达国家和发展中国家的适用性,提出碳交易在两类国家间的效果无差异。

关于补贴政策,国内外主要围绕对电力企业的生产减排展开,Chen等(2016)分析了碳市场和补贴政策对于中国燃煤电厂CCS(碳捕捉和存储)改造投资和碳减排的影响。Wang等(2017)运用博弈模型,研究表明绿色保险补贴相对于政府给予企业的直接创新补贴风险更低。Li等(2018)在考虑了不同消费者效应的基础上,建立制造商和两个零售商之间的博弈模型,研究双渠道供应链中政府消费补贴和替代补贴对环境友好产品的影响。Bhandari等(2017)

运用 IEEE RTS 模型实证检验了可再生补贴和碳税政策在电力系统中的交互影响。Fischer 等 (2017) 认为上游补贴对减排技术影响程度相比下游补贴更具优越性。Fan (2017) 研究了小世界网络背景下的政府碳补贴最优监管策略。Nie (2016) 采用包含政府、银行和股东等所有利益相关者的微观经济模型分析,发现政府补贴使得可再生能源企业的产出和负债上升。Moiseyev 等 (2014) 研究了补贴和碳定价对欧盟木材生物质能源利用的影响。

关于碳配额和补贴对于社会福利的影响,Cao 等 (2017) 研究了碳限额交易和补贴政策对于企业运作和减排的影响,并通过构建动态博弈模型研究两种政策下整体社会福利情况,认为政策效果取决于环境损害系数值,且配额对企业生产来说并不一定有正面效应,最终的效应取决于企业的博弈结果。陈伯成等 (2014) 分别考虑在碳配额、政府补贴以及惩罚模式下,企业生产减排的最优策略,并分析了三种模式的局限性,探讨了最为合理的政府决策模式。

现有文献主要集中于两种政策下微观企业的最优决策变动,一些学者考虑了碳配额政策对企业最优生产及减排的影响,另一些学者分析了补贴政策对企业生产减排技术的激励效果,而碳交易作为政府为达到减排目标而人为赋予含碳温室气体商品价值的市场,其意义更在于宏观层面社会成本和社会收益的比较,以期实现社会福利水平的最优,然而鲜有学者通过衡量总体社会福利水平,将两种政策进行对比。但由于碳市场是人为设计的、强制企业减排的市场,而我国碳市场仍属于建立初期,交易期集中、活跃度较低、价格波动剧烈,未充分调动企业主观减排意愿,企业与政府之间的动态机制还未建立,所以本文构建静态模型研究碳配额和补贴政策。基于以上背景,本文首先构建双寡头模型,分别考量企业在两种政策规制下的最优生产和减排能力,其次,引入福利分析,将生产者剩余、消费者剩余及政府和环境等因素纳入整体福利分析范畴,最后,通过数值算例,比较两种政策对企业生产减排的影响及社会福利大小。

三、政策思路及基本假设

(一) 两种政策思路

根据《“十三五”控制温室气体排放工作方案》,为了实现低碳发展目标,本文基于国内外碳市场理论和实践,对碳配额和补贴这两种碳市场运行机制进行对比分析。

第一,碳配额运行机制。按照总量控制与交易原则,政府给碳交易体系内的企业发放免费碳排放权配额(以下简称碳配额),当企业碳配额不足以覆盖其实际碳排放量时,超出碳配额的碳排放量需要从碳市场进行购买,当企业碳配额有剩余时,可以在碳市场卖出获利。企业边际减排成本不同,碳配额机制下,边际减排成本较低的企业采取低碳投资活动,降低碳排放量;边际减排成本较高的企业可直接购买碳配额,既可有效减少 CO₂ 排放量,又能促进低碳技术与开发,用市场机制解决企业负外部性问题。但同时,碳配额的引入使得碳排放权成为产品边际成本的一部分,合理的碳配额数量会促使企业通过碳减排降低产品边际成本,过量的碳配额会造成严重的市场竞争不公平。如碳交易规模最大的欧盟碳排放权交易体系(EU ETS),在运行初期,依据碳排放权分配的“祖父法则”向各企业免费分配占总量

95%的碳配额，这种免费分配方式造成了电力行业以垄断优势获得过量碳配额，并且通过提高产品价格将“成本转嫁”及卖出碳配额获得“额外利润”，最终获得高额收益，而水泥、化工等行业由于市场竞争无法转嫁减排成本，并且承受电价上涨的成本压力，使得行业竞争力严重削弱。

第二，补贴运行机制。在补贴思路下，政府依据企业实际的净化处理量进行补贴，企业减排量越多则获得政府补贴越多，此时，碳市场参与交易的产品类型为中国核证减排量（Chinese Certified Emission Reduction，简写作CCER）。企业受到来自政府的低碳生产激励，边际减排成本曲线向下平移，会使更多的企业实施内部减排技术，引进先进减排技术，购买减排设备，实现更高的产量，从而达到更优的整体减排效果。然而，补贴政策对于政府的财政支持要求更高，补贴额度设置过低起不到激励作用，过高则加重政府财政负担。

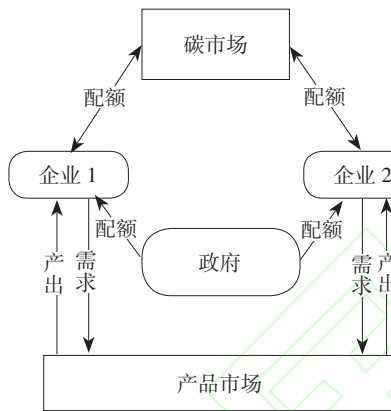


图1 碳配额政策下双寡头企业生产经营决策

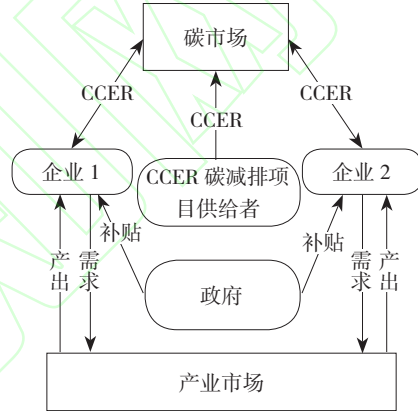


图2 补贴政策下双寡头企业生产经营决策

（二）基本假设

为了模拟政府构建全国碳交易市场对企业生产经营和减排的影响，分别建立企业在碳配额和补贴政策下的古诺双寡头模型，两家企业皆为高碳排放企业，可以看做是钢铁、电力等高载能行业，且具有寡头竞争特性。两家企业生产销售的产品为同质产品，产量为 q_i ，其线性反需求函数为： $P(q_1, q_2) = a - b(q_1 + q_2)$ ，两家企业的单位生产成本作常量 c 处理。当不存在碳排放权交易时，根据古诺模型均衡解可知，每家企业的均衡产量为 $\frac{a-c}{3b}$ ，市场总产量为 $\frac{2(a-c)}{3b}$ 。

碳排放权交易市场为完全竞争市场，碳市场中碳价由市场供需决定。企业的碳排放总量与单位产出成正相关关系，两家寡头企业的碳排放强度相同为 e ，当产量为 q_i 时，企业 i 的碳排放量为： $E_{q_i} = e \times q_i$ 。 E_{ii} 绝对值为企业 i 在碳市场的交易量，当企业的碳排放量大于所拥有的碳配额或CCER时，企业选择从碳交易市场购入碳配额或CCER以满足企业自身的排放需求（ $E_{ii} > 0$ ），当企业碳配额或CCER多于实际排放量，则卖出碳配额或CCER获利（ $E_{ii} < 0$ ）。若企业通过各种生产减排措施，获得的净化减排量为 E_{si} ，那么净排放到空气中的污染物为： $E_{q_i} - E_{si} = e \times q_i - E_{si}$ 。由于产品生产过程中的碳排放具有负外部性，对环境损害造成的经济损失

系数为 v 。

考虑现实情境中，2014—2016年度中国七个碳交易试点平均履约率为99%，因此本文不考虑碳市场中企业违约行为，即在履约期内企业持有的碳配额或CCER数量大于等于其碳排放量，并不产生超过碳配额或CCER限额的过量排放。在单排放物二氧化碳的单周期生产中，碳配额和CCER仅可在当年使用，不存在跨期存储情形，因此不考虑碳配额存储的相关成本收益以及机会损失等问题。政府根据碳减排目标及各行业历史排放数据，确定各企业当年碳配额数量，政府给予的免费碳配额以 C 表示。

现有关于企业净化减排的文献中，将企业净化水平和减排成本视为影响企业碳排放能力的同一因素进行考量，忽视了净化水平和减排成本对于企业生产效率的差别影响，与实际情况不符，因此本文模型的主要贡献是考虑不同净化水平和减排成本对企业生产经营和减排决策的影响，单位净化水平系数为 α_i ，边际净化成本倾向为 β_i ，减排总成本为净化减排量的二次函数： $C_{si} = \frac{1}{2} \times \beta_i \times E_{si}^2$ 。

为方便后面讨论，用表1给出具体符号定义。

表1 主要参数和符号

E_{si}	E_{qi}	α_i	e	C_i
净化减排量	企业生产碳排放总量	单位碳排放净化水平系数	生产中单位碳排放强度	市场交易碳价
β_i	c	C	q	P
边际净化成本倾向	单位产品生产成本	免费碳配额数量	企业产量	单位产品价格
E_{ti}	μ	v	C_i^c	C_i^s
市场交易量	政府对单位净化排放物补贴系数	环境损害系数	碳配额政策下的市场均衡碳价	补贴政策下的市场均衡碳价

四、模型构建

(一) 碳配额政策

1. 生产减排策略模型

在碳配额政策下，企业收益来源于出售产品获得的销售收入，成本则由三部分构成，产品的生产成本，生产过程中减排成本和碳交易市场购入碳配额的成本。因此，企业 i 的利润函数为：

$$\Pi_i(q_1, q_2) = [P(q_1, q_2) - c] \times q_i - C_{si} - C_i \times E_{ti} \quad (1)$$

在政府政策规制下，生产约束 $E_{qi} \leq E_{si} + E_{ti} + C$ ，碳市场实现均衡时有：

$$E_{ti} = E_{qi} - E_{si} - C = e \times q_i - E_{si} - C \quad (2)$$

将式(2)带入式(1)，企业 i 的最大利润函数可表示为：

$$\max_{(q_i, E_{si})} \Pi_i = [a - b(q_1 + q_2) - c] \times q_i - \frac{1}{2} \times \beta_i \times E_{si}^2 - C_i \times (e \times q_i - C - E_{si}) \quad (3)$$

为了求解利润最大化函数，对产量和净化减排量求一阶偏导：

$$\frac{\partial \pi_i}{\partial q_i} = a - b(q_1 + q_2) - c - bq_i - C_i \times e \quad (4)$$

$$\frac{\partial \pi_i}{\partial E_{si}} = -\beta_i E_{si} + C_i \quad (5)$$

分别令式(4),式(5)等于零,得到寡头企业生产减排的均衡解,此最优解是企业1和企业2均衡产量和净化减排量的最优组合 (q_i, E_{si}) :

$$q_i = \frac{a - c - C_i \times e}{3b} \quad (6)$$

$$Q^C = q_1 + q_2 = \frac{2(a - c - C_i \times e)}{3b} \quad (7)$$

$$E_{si} = \frac{1}{\beta_i} \times C_i \quad (8)$$

企业1和企业2作为古诺模型下双寡头企业,彼此信息完全对称,两家企业的产量相同。方程的纳什均衡解即为企业的均衡产量决策,将式(7),式(8)求得的均衡产量和最优净化减排量带入碳交易约束方程,可同时得到市场中的均衡碳价:

$$C_t^C = \frac{2e(a - c) - 3b \times (E_i + C)}{3b \left(\frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} \right) + 2e^2}$$

进一步对利润函数各变量求二阶偏导,得到负定海赛矩阵:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \pi_i}{\partial q_i^2} & \frac{\partial^2 \pi_i}{\partial q_i \partial E_{si}} \\ \frac{\partial^2 \pi_i}{\partial E_{si} \partial q_i} & \frac{\partial^2 \pi_i}{\partial E_{si}^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2b & 0 \\ 0 & -\beta_i \end{bmatrix}$$

由此可知,企业*i*的利润函数 π_i 是关于产量 q_i 及净化减排量 E_{si} 的凹函数,因此一定存在 (q_i, E_{si}) 使得 $Max \pi_i$ 存在。求得的均衡解组合 (q_i, E_{si}) 即为企业*i*获得最大利润时的最优生产减排决策。

分析均衡产量表达式 $q_i = \frac{a - c - C_i \times e}{3b}$ 可以看出,碳配额政策下每家企业的产量均小于无碳交易时的产量,市场总产量 $q^1 + q^2$ 为 $\frac{2(a - c - C_i \times e)}{3b}$,也小于无碳交易时的市场总产量,即 $q_1 + q_2 < \frac{2(a - c)}{3b}$,这意味着碳配额政策对于企业产量存在负向的影响,碳市场中的均衡碳价和企业碳排放强度将影响企业产量,均衡碳价和企业碳排放强度越高,越不利于企业扩大产量。

分析均衡碳价表达式 $C_t^C = \frac{2e(a - c) - 3b \times (E_i + C)}{3b \left(\frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} \right) + 2e^2}$ 可以看出,市场均衡碳价同企业边际净化成本倾向成正比关系,企业边际净化成本倾向增加,则市场中均衡碳价越高。

分析净化处理量表达式 $E_{si} = \frac{1}{\beta_i} \times C_i$ 可以看出,当碳市场中均衡碳价一定时,企业的净化减排量和边际净化成本倾向为反比关系。

2. 碳配额下福利模型

企业生产减排能力的提高对于社会总体环境效益的改善有正向推动作用,社会福利的度

量取决于各经济主体损益的加总，经济学通常用经济剩余衡量总体社会福利。对比两种政策下企业净化减排量和产量的变化对总体社会福利的影响，为碳市场政策制定提供参考借鉴。

在两种政策规制下，为了比较出最优政策，以追求社会福利最大化为目标，建立社会福利模型。在碳配额政策下，参照 Yenipazarli (2016) 的做法，此处生产者剩余用两家寡头企业的利润和来表示，以 $\Pi_{MS}^C = Q^C \times \left(P^C - c - \frac{C_{si}}{q_i} \right)$ 表示配额政策下企业达到均衡产量后的利润。消费者剩余为 $\int_0^{q^*} (P - P^*) dq$ 。环境造成的负外部性以 $v^* (e^* Q^{C^*} - E_{si})$ 表示，即经济损害系数乘以企业产出的全部碳排放与净化减排量的差值部分。

碳配额政策下社会福利由三部分构成：生产者剩余，消费者剩余，及环境负外部成本，因此，社会福利最大化函数表示为：

$$\max_{(C,v)} SW^C = \Pi_{MS}^C + \int_0^{q^{C^*}} (P - P^{C^*}) dq - v \times (e \times Q^{C^*} - E_{si})$$

将各部分带入，整理后得：

$$\max_{(C,v)} SW^C = -\frac{3}{2}b(Q^C)^2 + \left[\frac{5(a-c) - e \times (2C_t + 3v)}{3} - \frac{C_{si}}{q_i} \right] \times Q^C + v \times E_{si}$$

(二) 补贴政策

1. 生产减排策略模型

国家为鼓励企业低碳生产，发展低碳经济，通过对净化减排量补贴的方式，形成对企业低碳生产的正向激励。从企业决策方面来说，均衡碳价一旦确立，在碳配额政策下，企业通过增加自身净化减排量的方式扩大生产，当企业的边际减排成本高于碳市场交易碳价，企业将选择从市场购买，而在补贴政策下，企业减排动力主要来自政府给予的碳减排补贴收益。因此，补贴政策下，企业收益分别来自产品市场的销售收入和政府给予的补贴奖励，其成本依然是三部分构成：生产成本、减排成本和购买项目型碳抵消产品的支出。企业利润函数被表示为：

$$\Pi_i(q_1, q_2) = [P(q_1, q_2) - c] \times q_i - C_{si} - C_t \times E_{ti} + \mu \times \alpha_i \times e \times q_i \quad (9)$$

此时，生产约束表示为 $E_{qi} \leq E_{ti} + E_{si}$ ，碳市场实现均衡时有：

$$E_{ti} = E_{qi} - E_{si} = e \times q_i - E_{si} \quad (10)$$

将式(10)带入式(9)得：

$$\max_{(q_i, E_{si})} \Pi_i = [a - b(q_1 + q_2) - c] \times q_i - \frac{1}{2} \beta_i E_{si}^2 - C_t \times (e \times q_i - E_{si}) + \mu \times \alpha_i \times e \times q_i \quad (11)$$

求解利润最大化函数，对各变量一阶偏导，得：

$$\frac{\partial \pi_i}{\partial q_i} = a - b(q_1 + q_2) - c - b q_i - C_t \times e + \mu \times \alpha_i \times e \quad (12)$$

$$\frac{\partial \pi_i}{\partial E_{si}} = -\beta_i E_{si} + C_t \quad (13)$$

分别令式(12)，(13)等于零，求出产量和净化减排量的均衡解 (q_i, E_{si}) 组合：

$$q_i = \frac{a - c - C_t \times e + \mu \times e \times (2\alpha_i - \alpha_j)}{3b} \quad (14)$$

$$Q^S = q_1 + q_2 = \frac{2(a-c-C_i \times e) + (\alpha_1 + \alpha_2) \times \mu \times e}{3b} \quad (15)$$

$$E_{si} = \frac{1}{\beta_i} \times C_i \quad (16)$$

(14) — (16) 表明, 信息完全对称的补贴政策下, 双寡头企业的均衡产量受到彼此间净化水平差距影响, 且两者的临界比例为 2, 这意味着当 $\alpha_j \leq 2\alpha_i$ 或 $\alpha_i \leq 2\alpha_j$ ($i \neq j$), 两家企业中拥有较高净化水平的企业将迅速占据产品市场优势, 若 $\alpha_j \geq 2\alpha_i$ 或 $\alpha_i \geq 2\alpha_j$ ($i \neq j$), 对于净化水平更高的企业来说, 由高净化水平带来的生产规模扩大效应得到进一步加强, 该企业在产品市场上的领先地位得到最大保障。结合现实情形来看, 企业购买先进减排技术和设备造成短期成本增加, 但是, 更高净化水平带来的生产规模扩大效应, 使得企业在寡头竞争中处于有利地位, 攫取更多市场份额, 这种优势能够完全弥补前期减排投资付出的成本, 成为一种长效增长动力。此外, 式 (16) 表明边际净化成本倾向与净化减排量成反比关系, 边际净化成本倾向越高, 企业越不愿采取措施提高净化处理量, 此结论与碳配额政策下相同。

将式 (15), 式 (16) 求得的均衡产量和最优净化减排量带入碳交易生产约束方程, 可以得出补贴政策下的均衡碳价:

$$C_{s'} = \frac{[2(a-c) + (\alpha_1 + \alpha_2) \times \mu \times e] \times e - 3b \times E_i}{3b \left(\frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} \right) + 2e^2}$$

进一步求解利润函数对各变量的二阶偏导得到

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \pi_i}{\partial q_i^2} & \frac{\partial^2 \pi_i}{\partial q_i \partial E_{si}} \\ \frac{\partial^2 \pi_i}{\partial E_{si} \partial q_i} & \frac{\partial^2 \pi_i}{\partial E_{si}^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2b & 0 \\ 0 & -\beta_i \end{bmatrix}$$

海赛矩阵为负

定, 可知企业 i 的利润函数 π_i 是关于产量 q_i 及净化处理量 E_{si} 的凹函数, 明确了净化减排量和产量的均衡解同时为企业利润达到最大化的最优决策时的均衡解。

2. 补贴下福利模型

补贴政策下社会福利由四部分构成: 生产者剩余, 消费者剩余, 政府给予的补贴及环境负外部成本。生产者剩余 $\Pi_{MS}^C = Q^C \times \left(P^C - c - \frac{C_{si}}{q_i} \right)$ 表示, 即补贴政策下企业达到均衡产量后的利润, 消费者剩余为 $\int_0^{q^*} (P - P^*) dq$, 由环境造成的经济损失以 $v \times (e \times Q^{C^*} - E_{si})$ 表示。企业单位减排越多, 政府给予更高的补贴额度, 所以, 政府给予企业的补贴表示为 $\mu \times e \times \alpha_i \times q_i$ 。社会福利最大化函数表示如下:

$$\max_{(\mu, v)} SW^S = \Pi_{MS}^S + \int_0^{q^{S^*}} (P - P^{S^*}) dq - \mu \times e \times \alpha_i \times q_i - v \times (e \times Q^{S^*} - E_{si})$$

将各部分带入, 整理得:

$$\max_{(\mu, v)} SW^S = -\frac{3}{2} b (Q^S)^2 + \left[\frac{5(a-c) + (\alpha_1 \times \mu + \alpha_2 \times \mu - 3v - 2C_i) \times e}{3} - \frac{C_{si}}{q_i} \right] \times Q^S - \mu \times e \times \alpha_i \times q_i + v \times E_{si}$$

(三) 对比分析

为了更清晰观察两种政策导向下的企业决策差异，用表2将两家企业的最优决策结果进行对比分析。在净化水平和减排成本确定情形下，补贴政策下的碳价显然比碳配额政策下的

市场碳价更高，相比高出 $\frac{(\alpha_1+\alpha_2)\times\mu\times e^2+3b\times C}{3b\left(\frac{1}{\beta_1}+\frac{1}{\beta_2}\right)+2e^2}$ ，且补贴政策下的企业产量也更高，因而政府

实施补贴政策，将鼓励企业扩大生产使得行业整体产出都要高于碳配额政策下的产出。由于净化处理量与边际净化成本倾向反向变动，而企业边际净化成本倾向取决于企业的减排技术和减排设备等投入，在补贴政策下，企业受到补贴激励会投入更多净化减排资金，使得单位减排成本降低，结果导致补贴政策下的企业净化减排量也更高。

表2 碳配额和补贴政策下古诺模型博弈结果

变量	碳配额	补贴
均衡碳价	$C_i^c = \frac{2e(a-c)-3b\times(E_i+C)}{3b\left(\frac{1}{\beta_1}+\frac{1}{\beta_2}\right)+2e^2}$	$C_i^s = \frac{[2(a-c)+(\alpha_1+\alpha_2)\times\mu\times e]\times e-3b\times E_i}{3b\left(\frac{1}{\beta_1}+\frac{1}{\beta_2}\right)+2e^2}$
企业最优产出	$q_i = \frac{a-c-C_i\times e}{3b}$	$q_i = \frac{a-c-C_i\times e+\mu\times e\times(2\alpha_i-\alpha_j)}{3b}$
行业产出	$Q^c = q_1+q_2 = \frac{2(a-c-C_i\times e)}{3b}$	$Q^s = q_1+q_2 = \frac{2(a-c-C_i\times e)+(\alpha_1+\alpha_2)\times\mu\times e}{3b}$
企业独立净化减排量	$E_{si} = \frac{1}{\beta_i}\times C_i^c$	$E_{si} = \frac{1}{\beta_i}\times C_i^s$

五、数值模拟分析

在上述理论基础上，为了检验模型有效性以及观察两种政策的社会福利效果，运用典型数值算例进行分析验证。产品市场反需求函数为 $P(q_1, q_2) = 150 - 0.5(q_1 + q_2)$ ，两企业单位生产成本 $c=10$ ，单位碳排放强度 $e=1$ 。根据《北京碳市场年度报告2015》给出的政府发放免费配额和碳交易量比例，本文假定政府给予高碳排放行业免费碳配额 $C=100$ ，碳市场中参与碳交易量 $E_i=12$ 。为了观察企业决策对于净化水平及减排成本因素的敏感度，假定企业2的边际净化成本倾向 $\beta=1$ ，净化水平 $\alpha_2 = \frac{1}{3}$ ，逐渐调整企业1的净化处理水平及减排成本，分析它们对企业决策具体影响程度。

(一) 碳配额政策

企业1边际净化成本倾向 β_1 逐步提高，如表3所示，碳市场碳价 q_1 也逐步抬升，在这种情形下，企业1产量逐渐缩小，说明企业选择适当减产以满足碳排放限制。对于高碳排放行业来说，适当减产达到了政府环境规制的目的，却对高碳排放行业整体产出水平造成了一定抑制。

随着企业边际净化成本倾向 β_1 逐步提高，观察到企业1净化减排量 E_{s1} 迅速减少，说明

边际净化成本倾向对企业净化减排量具有负向影响。从企业角度来说,由于减排成本高,导致企业投资先进减排技术和设备意愿低,更倾向于从碳市场购买碳配额满足碳排放需求,而放弃选择通过自身减排获得节约量以此扩大生产。

表3 配额政策下边际净化成本倾向波动对企业最优决策的灵敏度分析

β_1	Ct	q_1	Es_1	Π_1	q_2	Es_2	Π_2
1/5	10.18	86.55	50.91	4244.89	86.55	10.18	4452.23
1/4	11.79	85.47	47.16	4241.11	85.47	11.79	4449.60
1/3	14.00	84.00	42.00	4242.00	84.00	14.00	4438.00
1/2	17.23	81.85	34.46	4256.00	81.85	17.23	4404.45
1	22.40	78.40	22.40	4309.76	78.40	22.40	4309.76
2	26.35	75.76	13.18	4376.91	75.76	26.35	4203.29
3	28.00	74.67	9.33	4411.56	74.67	28.00	4150.22
4	28.90	74.06	7.23	4432.22	74.06	28.90	4118.94
5	29.47	73.68	5.89	4445.87	73.68	29.47	4098.39
给定企业2减排成本参数,随着企业1减排成本增加	市场均衡碳价增大	企业1产量减小	企业1净化减排量减小	企业1利润先减小后增大	企业2产量减小	企业2净化减排量增大	企业2利润减小

(二) 补贴政策

为了观察补贴政策下,净化成本参数变动对企业最优决策的影响,假定企业1净化水平 $\alpha_1=0.5$,并参考陈伯成(2014)给出的政府补贴参数值,政府给予企业单位碳减排补贴 $\mu=20$ 。控制企业1净化水平不变,随着边际净化成本倾向 β_1 逐渐增加,从表4中可以看出,企业1净化减排量 Es_1 不断下降,而产量 q_1 先增大后减小,说明补贴下企业净化减排量受企业自身边际净化成本倾向的直接影响,企业产量则受到市场整体的波动影响。

从企业生产利润最大化角度来看,观察到企业1利润 Π_1 在边际净化成本倾向 $\beta_1=1$ 时,成为企业利润由降低到升高的U型转折点,说明企业1减排成本大于企业2时,企业1将放弃自身减排而转向购买项目型碳抵消产品满足碳排放需求,从而扩大生产获得规模经济收益,结果获得比企业2更高的利润。从市场碳价来看,补贴下碳价相比于碳配额政策下上升更快,原因可能是企业受到政府低补贴激励,将碳排放节约量用于扩大生产,造成碳市场碳排放权供不应求,碳价上行。

表4 补贴政策下边际净化成本倾向波动对企业最优决策的灵敏度分析

β_1	Ct	q_1	Es_1	Π_1	q_2	Es_2	Π_2
1/5	23.86	77.65	119.28	4747.56	77.48	23.86	5054.45
1/4	29.33	82.67	117.33	4595.56	76.00	29.33	5095.11
1/3	34.83	79.00	104.50	4424.29	72.33	34.83	4834.32
1/2	42.87	73.64	85.74	4252.58	66.97	42.87	4350.38
1	55.73	65.07	55.73	4171.98	58.40	55.73	3322.20
2	65.57	58.51	32.78	4271.57	51.84	65.57	2325.12
3	69.67	55.78	23.22	4354.30	49.11	69.67	1855.75
4	71.91	54.28	17.98	4409.97	47.61	71.91	1584.88
5	73.33	53.33	14.67	4448.89	46.67	73.33	1408.89
给定企业2减排成本参数,随着企业1减排成本增加	市场均衡碳价增大	企业1产量先增大后减小	企业1净化减排量减小	企业1利润先减小后增大	企业2产量减小	企业2净化减排量增大	企业2利润减小

为了分析补贴政策下企业产量和净化减排量对净化水平变化灵敏度，控制企业2净化水平 $\alpha_2 = \frac{1}{3}$ ，边际净化成本倾向 $\beta_2=1$ ，企业1边际净化成本倾向 $\beta_1=0.8$ ，单位减排补贴 $\mu=20$ 等参数不变，企业1净化水平变化对自身生产和减排决策的影响，如表5所示。

随着企业1净化水平 α_1 不断提高，碳市场碳价 C_t 增长十分缓慢，说明企业通过自身减排技术和减排设备达到的碳节约量较容易满足环境规制下的生产约束： $E_{qi} = E_{si} + E_{ti}$ ，因此外购需求较低，供过于求碳价上升不显著。此外，观察到企业1产量 q_1 随净化水平增加而逐渐提升，说明企业的净化水平对净化减排量变化具有正向推动作用。

观察到企业1净化减排量 E_{s1} 随着 α_1 提升而逐渐提高，对企业2减排能力形成刺激，企业2净化处理量 E_{s2} 也逐渐增加，说明行业内的净化能力竞争有益于总体净化减排量的提高，补贴政策的实施有助于提高环境收益。

表5 补贴政策下净化水平波动对企业最优决策的灵敏度分析

α_1	C_t	q_1	E_{s1}	Π_1	q_2	E_{s2}	Π_2
0.1	50.36	57.98	62.95	2991.70	67.32	50.36	4456.75
0.2	50.73	60.40	63.41	3275.35	65.74	50.73	4257.28
0.3	51.10	62.82	63.88	3566.47	64.16	51.10	4059.00
0.4	51.47	65.24	64.34	3865.07	62.57	51.47	3861.91
0.5	51.84	67.66	64.81	4171.15	60.99	51.84	3666.00
0.6	52.22	70.08	65.27	4484.70	59.41	52.22	3471.28
0.7	52.59	72.50	65.74	4805.73	57.83	52.59	3277.74
0.8	52.96	74.91	66.20	5134.24	56.25	52.96	3085.39
0.9	53.33	77.33	66.67	5470.22	54.67	53.33	2894.22
给定企业2净化水平，随着企业1净化水平提高	市场均衡碳价增大	企业1产量增加	企业净化1减排量增大	企业1利润增大	企业2产量减小	企业2净化减排量增大	企业2利润减小

(三) 最优政策分析

最后，以社会福利最大化作为政策参考指标的数值算例，比较出两种政策中更具优越性的一种。参考Cao(2017)的做法，根据参数设定的比例，由环境损害带来的经济损失系数取值 $v \in (0,10)$ 。由于政府发放免费碳配额最高限制， $C < \frac{2e^*(a-c)}{3b} - E_t$ ，所以假设 $C \in (0,150)$ ，并且取补贴系数 $\mu \in (0,60)$ 。

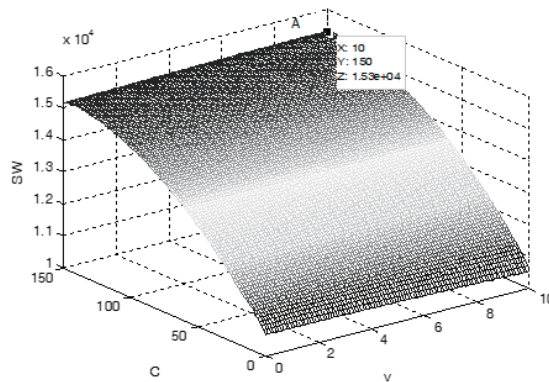


图3 碳配额政策下社会福利数值算例

碳配额政策下社会福利整体算例如图3所示,点A为碳配额政策下社会福利最大值点,此时,政府给予最高配额150,单位环境损害系数10,对于企业来说,碳配额越高企业将获得更大利润,对应本文中寡头企业获得生产者剩余8879,成为获得经济剩余最多的碳交易行为参与者。从消费者角度来看,消费者从产品消费中获得7876的经济剩余。从环境污染造成的福利损失情况来看,环境损害系数增加到10,产生的环境污染经济损失达到1455。总体来看,社会福利最大化情形,只有在政府给予企业碳配额限制范围内最高免费配额且企业自身获得最大利润时才能实现。

补贴政策下社会福利整体算例如图4所示,点B为补贴政策下社会福利最大值点,此时,政府给予补贴为0,且环境损害系数为0,而含碳污染物一经排放到空气中就会对生态环境造成损害,由此造成难以预估的经济损失,因此,这是一种无法达到的理想状态。此时的最大福利值显著低于免费碳配额政策下的最大福利值,15300>10660。结果显示,相较于碳配额政策,补贴政策对总体社会福利的贡献不足,生产者剩余和消费者剩余均低于配额政策下,补贴和环境负外部成本均为0。但补贴政策下,碳价格偏高,可激励更多的企业积极减排,在增加企业产量的同时实现更高的总体净化水平。因此,在仅考虑社会福利最大化这一指标时,碳配额政策是目前的最优选择,政策制定者在构建碳市场运行机制可以此作为参考,然而,现实情形中,政策制定过程需考虑更多复杂因素,如生态环境保护程度、产业结构调整速度、经济发展规模等。

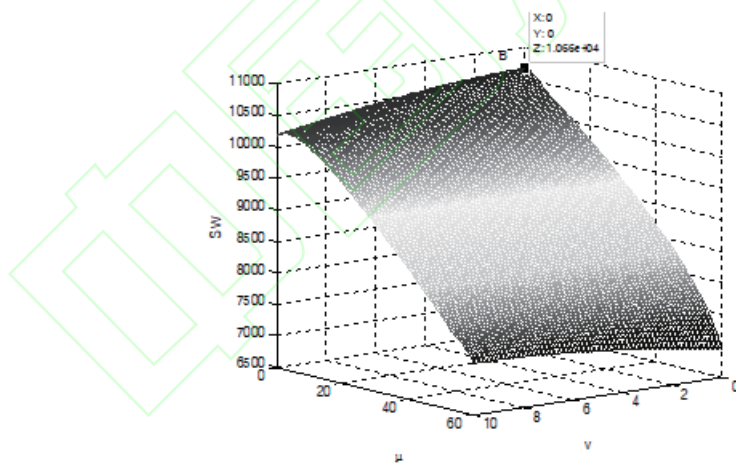


图4 补贴政策下社会福利数值算例

六、结论及政策建议

本文结合中国碳市场运行环境,构建双寡头企业生产约束下的一般均衡模型,分别对碳配额政策及补贴政策给企业生产经营决策造成的影响进行研究,并通过数值算例分析社会福利最大化情形。研究表明:第一,双寡头企业在生产减排博弈过程中,依据各自边际净化成本倾向不同,会产生较大的净化减排量差异,边际净化成本倾向和净化减排量成反向变动。第二,在补贴政策下,企业受到政府补贴激励,会促进企业提高自身减排能力获得补贴收益,

且寡头企业间的净化水平竞争有利于提高行业整体净化水平。第三，碳配额政策对社会总体福利更优，而补贴政策使得企业获得更高产量且总体净化减排量更高。

基于以上结论，提出如下建议：第一，应站在总体社会福利最大化角度，选取碳配额政策作为主要的碳市场运行机制，并引入补贴政策作为补充形式，用以激励企业减排积极性。第二，为提高碳配额管理水平，政应加快完善各行业碳排放数据收集工作并根据企业历史排放能力分配符合实际的碳配额指标。第三，应引导和鼓励企业在追求利润最大化目标时应兼顾社会责任，有意识的选择减排方式扩大产能，取得规模收益，最终实现环境和经济收益“双赢”的最优目标。

参考文献

- [1] Bhandari V, Anthony M, Bruce F et al. Interacting Policies in Power Systems: Renewable Subsidies and a Carbon Tax[J].The Electricity Journal,2017,30.
- [2] Cao K Y, Xu X P, Wu Q et al. Optimal Production and Carbon Emission Reduction Level under Cap-and-trade and Low Carbon Subsidy Policies[J].Journal of Cleaner Production,2017,167.
- [3] Chen H D, Wang C, Ye M H. An Uncertainty Analysis of Subsidy for Carbon Capture and Storage(CCS) Retrofitting Investment in China's Coal Power Plants Using a Real-options Approach[J]. Journal of Cleaner Production,2016,137.
- [4] Fan R G, Dong L L, Yang W G et al. Study on the Optimal Supervision Strategy of Government Low-carbon Subsidy and the Corresponding Efficiency and Stability in The Small-world Network Context[J].Journal of Cleaner Production,2017,168.
- [5] Fischer C, Greaker M, Einar K. Robust Technology Policy Against Emission Leakage: The Case of Upstream Subsidies[J]. Journal of Environmental Economics and Management,2017,84.
- [6] Kollenberg S, Taschini L. Emissions Trading Systems with Cap Adjustments[J].Journal of Environmental Economics and Management,2016,80.
- [7] Li B, Chen W C, Xu C C. Impacts of Government Subsidies for Environmental-Friendly Products in a Dual-channel Supply Chain[J].Journal of Cleaner Production,2018,171.
- [8] Moiseyev A, Solberg B, Maarit A et al. The Impact of Subsidies and Carbon Pricing on the Wood Biomass Use for Energy in the EU[J].Energy,2014,76.
- [9] Nie P Y, Chen Y H, Yang Y C.Subsidies in Carbon Finance for Promoting Renewable Energy Development[J].Journal of Cleaner Production,2016,139.
- [10] Shobe W, Holt C, Huetteman T. Elements of Emission Market Design: An Experimental Analysis of California's Market for Greenhouse Gas Allowances[J].Journal of Economic Behavior & Organization,2014,107.
- [11] Wang C, Nie P Y, Peng D H et al. Green Insurance Subsidy for Promoting Clean Production Innovation[J].Journal of Cleaner Production,2017,148.
- [12] Yenipazarli A. Managing New and Remanufactured Products to Mitigate Environmental Damage under Emissions Regulation[J].European Journal of Operational Research,2016,249.
- [13] 陈伯成,李英杰.“考虑排放许可交易的生产优化”的补充研究[J].中国管理科学,2014(9).
- [14] 陈伯成,李英杰,闫学为.补贴及惩罚模式下的排放许可交易生产优化[J].中国管理科学学术年会.2014(SI).
- [15] 胡艺,魏小燕,沈铭辉.碳税比碳交易更适合发展中国家吗?[J].亚太经济,2020(4).
- [16] 任晓松,马茜,刘宇佳,赵国浩.碳交易政策对高污染工业企业经济绩效的影响——基于多重中介效应模型的实证分析[J].资源科学,2020(9).

- [17] 王鑫,滕飞. 中国碳市场免费配额发放政策的行业影响[J]. 中国人口·资源与环境,2015(2).
- [18] 吴慧娟,张智光. 中国碳交易价格低迷的成因:理论模型与实证分析[J]. 管理现代化,2020(6).
- [19] 赵立祥,赵蓉,张雪薇. 碳交易政策对我国大气污染的协同减排有效性研究[J]. 产经评论,2020(3).

(编辑:黄亚捷)

中国知网