

碳排放约束下的企业最优减排投资行为^①

王明喜¹, 鲍 勤², 汤 铃³, 汪寿阳²

(1. 对外经济贸易大学国际经济贸易学院, 北京 100029; 2. 中国科学院数学与系统科学研究院, 北京 100190; 3. 北京化工大学经济管理学院, 北京 100029)

摘要: 为兑现“十二五”和 2020 年的碳减排目标, 我国政府于 2013 年年底在“七省市”试点启动碳交易市场, 并在 2015 年推广至全国. 根据欧盟的经验, 在碳交易市场运行之初, 政府需要设定一个碳排放许可总量, 并将其分配给参与减排的企业. 为实现在减排企业间合理分配碳排放许可量, 目前在政界热议的配置方式包括免费、拍卖、免费拍卖相结合、单边交易模式和双边交易模式五种方案. 为探讨这五种方案能否实现“企业以最小的减排投资成本实现既定的减排目标”这一问题, 本文从企业微观生产过程出发, 剖析企业减排路径及其减排投资渠道, 建立企业减排投资成本最小化模型, 推导各投资渠道的最优投资水平, 进而分别讨论免费、拍卖、免费拍卖相结合、单边和双边交易模式配置碳排放配额对最优减排投资的实施情况. 根据所得结论, 提出这五种配置方式在实施过程中需要重点考虑的因素, 为相关政策的制定和实施提供一定的科学依据和参考.

关键词: 碳减排; 减排路径; 交易机制; 最优投资

中图分类号: F016 文献标识码: A 文章编号: 1007-9807(2015)06-0041-17

0 引 言

自我国政府在德班气候变化大会上承诺兑现 2020 年碳减排目标以来, 关于采用何种措施实现此目标成为学者、政策制定者和管理层共同关注的一个焦点问题. 在降低碳排放的措施中, 尽管价格控制(征收碳税)在理论上优于数量控制(碳排放配额), 但在实践中数量控制更加广泛^[1]. 事实上, 碳税早在上世纪 90 年代已经引入丹麦、芬兰、瑞典等一些北欧国家, 而欧盟在 2005 年建立的数量控制排放交易机制(Emission-and-trade Scheme)则是更大的市场, 并在近几年不断完善. 因此, 国内政界更倾向于用数量控制手段降低我国的碳排放. 工商联新能源商会秘书长曾少军分析道: “……建立一个全国性的碳交易市场, 必须

要有强制性的总量……”^[2]; 国家发改委在《中国温室气体自愿减排交易活动管理办法》中, 声明要实行碳交易的“总量控制”^[3].

在政界人士的推波助澜下, 我国建立数量控制碳交易市场的趋势愈演愈烈. 2010 年, 在“十二五”规划征求意见中, “研究建立碳交易市场”被直接修改为“逐步建立碳交易市场”; 2011 年 10 月, 国家发改委正式确定“北京、天津、重庆、上海、湖北、广东和深圳”七省市为全国首批实施碳排放交易试点, 根据试点要求, 2013 年年底在试点省市启动碳交易市场, 2015 年建成全国性的碳交易市场^[4]. 为配合碳交易市场的建立, 截至目前为止, 全国已成立了 30 多家环境交易所; 而且, 在 2012 年 7 月, 北京环境交易所等四家机构在广州联合举办了“低碳发展与碳交易论坛暨碳交

① 收稿日期: 2012-10-03; 修订日期: 2013-05-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71471039; 71001097; 71203214).

作者简介: 王明喜(1979—), 男, 安徽亳州人, 副教授. Email: mxwang@uibe.edu.cn

易/ISO14064/PAS2050 评估与核查员培训”,旨在提高碳资产开发评估能力,为即将启动的国内碳交易市场储备技术专家。此外,在场内和场外已发生碳排放量的交易案例,2009年11月17日,上海济丰纸业包装股份有限公司向厦门赫仕环境工程有限公司购买了6266t的碳排放量^[5];2010年10月9日,大唐与俄罗斯天然气公司在北京环境交易所签署了碳减排量购买协议。所有这些为我国建立碳交易市场提供了政策引导、交易场地、碳资产评估专家、碳交易案例等前期准备工作。

在碳交易市场运行之初,政府需要设定一个碳排放许可总量,并把其分配给参与减排的企业。然而,如何在减排企业间合理分配既定的碳排放配额?一种配置方法是:在给定排放总量约束的前提下,通过免费、拍卖或二者相结合的方式分配给参与减排的企业。这种分配方式因存在碳排放总量的约束,所以本文称其为“强制减排”。“强制减排”被欧盟排放交易机制所使用,且被许多学者认可,如文献[6-9]等,并得到我国政策制定者的青睐。此外,为了鼓励企业积极参与碳减排,环境交易所借鉴《京都议定书》中的清洁发展机制(Clean Development Mechanism),引入单边和双边碳交易模式,并已经把它们应用于实际碳交易活动中。由于单边和双边交易模式是企业自发进行碳减排,然后把减少的碳排放量出售给其他企业,因此在本文中称单边和双边交易模式为“自发减排”。

除了“强制减排”和“自发减排”外,国内外专家和学者也提出了其它降低碳排放的措施和经济手段,如征收碳税^[10-11]、提高能源价格^[12]、增加清洁能源在能源消费中的比例^[13]、发展碳捕捉和碳储存技术^[14]等。尽管这些减排措施有其理论上的合理性和实践中的可行性,但它们不是本文讨论的重点。本文主要集中于数量控制下的碳交易市场研究,针对“强制减排”和“自发减排”展开分析,考察这两种碳减排措施能否“以最小的经济成本实现既定的碳减排目标”。考虑到理论对实践指导的实用性和可操作性,本文首先从企业微观生产环节出发,剖析企业的碳减排路径,把企业的减排投资归为三个渠道——研发投资、设备投资和行为减排投资,并把企业的投资时间窗口分为“十二五”和“十三五”两个阶段,用折算因子将

两个时期的财富进行折现。然后,从成本-收益的角度,建立实现既定减排目标下的成本最小化模型,并导出三个减排投资渠道上最优投资水平的显示表达式。接着,分析“强制减排”和“自发减排”措施实施最优投资水平的状况,基于获得的结论,给出在实施减排政策时需要注意的关键因素,为减排政策的制定和实施提供一定的科学依据和参考。为便于阅读,本文把所有的证明和推导过程放在附录中。

1 模型

1.1 企业减排路径及其投资行为

在理论层面,降低交通运输业碳排放的路径有:运输工具技术创新^[15,16]、低碳燃料技术发展^[15,17]、减少行程^[15]、鼓励和推广电动车的使用^[17]。在具体实践中,为了实现我国“十二五”碳减排目标,《“十二五”规划纲要》指出,在“十二五”期间,节能减排措施包括:提高企业管理水平,淘汰落后生产工艺,加快技术创新,用信息技术升级传统产业,增加清洁能源在能耗中的比例等。综合理论和实践两方面,本文把减排路径归纳为三类,它们分别是:技术路径、清洁能源路径和管理路径。

从微观生产的角度,技术路径是在不改变投入组合的前提下,从两方面减少单位产品的碳排放量:一方面是,技术进步可以提高能源的利用效率,进而降低单位产出的耗能量,最终实现降低单位产出的碳排放量;另一方面是,通过发明新产品、新设备和新的生产工艺,使得产品更加“绿化”,从而提高单位能耗的产出量,降低单位产品的碳排放量。而清洁能源路径则不同,它使用清洁能源代替传统碳基能源作为生产的能源投入品,通过改变投入组合来达到降低单位产品碳排放的目的。管理路径是通过培训、学习和监督等手段提高员工节能意识,养成节能的好习惯,如随手关灯、上下一层楼走人行梯、控制适宜的空调温度不要太高或太低等。

对于一个企业而言,为了在生产中具体实施技术、清洁能源和管理减排路径,将伴随着相应的投入成本。技术减排路径是研发人员知识积累升

华的结果,在知识积累过程中,研发人员的工资、实验室、实验设备和各种试剂等均需要一定的资金支持,这部分资金支出构成企业的研发投入,称为“研发投资”。在生产过程中,清洁能源减排路径意味着产品的生产过程必须做出相应调整(如用太阳能代替煤作为生产热水的能源来源,必须拆除燃烧煤的锅炉,安装收集太阳能的装置),主要体现在用能设备的更换或更新,更换设备将花费企业一定数额的资金,这部分资金称为“设备投资”。管理路径主要是改变“人的行为习惯”,一个习惯的改变有时不太容易,需要反复强调和必要的物质激励,这部分资金投入可称为“行为投资”。

1.2 假设和记号

政府在选择参与减排的企业时,可以选择重点减排行业中的企业,因为一个行业的碳减排成功,可以为其他行业提供榜样和效仿模版,使得其他行业可以相继跟进。假设有 N 个企业参与碳减排,分别记为 $i = 1, 2, \dots, N$ 。企业的减排投资可划分为两个时期:1 期的时间跨度是“十二五”(2011 - 2015),2 期的时间跨度是“十三五”(2016 - 2020)。时间跨度划分的依据是,在“十二五”期间,从没有碳交易市场到建立碳交易试点,大部分减排企业只能通过自身投资降低碳排放,到 2015 年实现碳排放强度比 2010 年下降 17% 的减排目标;而进入“十三五”,全国性的碳交易市场建成,所有企业根据自己的实际情况,可以选择自身投资减排,也可以到市场上购买碳排放许可量,到 2020 年实现碳排放强度比 2005 年下降 40% - 45% 的减排目标。

在没有任何刻意减排投资的情况下,企业 i 的 BAU (business-as-usual) 碳排放量记为 b_{1i} 和 b_{2i} ,其中下标 1 和 2 分别代表 1 期和 2 期;在企业 i 采取减排投资之后,其实际的碳排放量分别记为 e_{1i} 和 e_{2i} 。这样,企业 i 在 1 期的碳减排量为 $b_{1i} - e_{1i}$,在 2 期的碳减排量为 $b_{2i} - e_{2i}$ 。根据 2005 年《中国统计年鉴》中的能耗情况,结合固态、液态和气态碳基能源的平均碳排放系数,计算出 2005 年的碳排放强度,再基于预测的 GDP 增速和 BAU 碳排放,把 2020 年减排强度目标转化为碳减排量,进而测算达到 2020 年碳减排目标的 N 个企业的实际碳排放上限,记为 K 。于是,兑现 2020 年的碳减

排目标意味着

$$\sum_{i=1}^N (e_{1i} + e_{2i}) \leq K.$$

在减排投资的践行方面,国务院发文要求“要采取铁的手腕淘汰落后产能,防止死灰复燃”^[18]。据美国 Pew 智库最新公布的一份报告,2011 年我国清洁能源投资 455 亿美元,据全球第二位^[19]。2012 年 3 月科技部编制了《全民节能减排手册》,向全社会宣传普及节能减排的科学知识和方法,提高全民节能减排意识。因此,为实现“十二五”和 2020 年的碳减排目标,假设 N 个企业在研发、设备和行为减排三方面均有投资。记企业 i 的研发投资为 (x_{1i}, x_{2i}) ,设备投资为 (y_{1i}, y_{2i}) ,行为投资为 (z_{1i}, z_{2i}) 。

因为研发投资是一个较长期的投资项目,短期内很难有实质性的突破成果,根据 Kennedy^[20]的做法,设企业 i 的研发投资在 1 期取得的碳减排量为 $\alpha_{1i}x_{1i}^{\frac{1}{2}}$ 。而企业 i 的研发投资在 2 期取得的减排量有两个来源,一部分来自于 x_{2i} ,记为 $\theta_{2i}x_{2i}^{\frac{1}{2}}$,另一部分来自于 x_{1i} ,记为 $\alpha_{2i}x_{1i}^{\frac{1}{2}}$ 。其中 α_{1i} 、 α_{2i} 和 θ_{2i} 表示减排效果参数,为非负常数,当其值为 0 时,表示没有减排效果。因为研发是一个创新知识不断积累的过程,所以研发投资 x_{1i} 的减排效果会逐渐变好,即 $\alpha_{2i} \geq \alpha_{1i}$;又因为研发投资 x_{2i} 是在前人研究成果的基础上,进一步探索未知领域,所以其减排效果好于 1 期,但低于 x_{1i} 在 2 期的减排效果,即 $\alpha_{2i} \geq \theta_{2i} \geq \alpha_{1i}$ 。

企业引进一个新的设备,员工需要花费时间去熟悉新设备的操作流程、运转原理、如何维护保养以及如何排除一些小故障等等,随着时间的推移,员工对设备的认知不断加深,设备的生产效率也相应地提高。所以,设备投资取得的减排量为

$$\beta_{1i}y_{1i}^{\frac{1}{2}} + \beta_{2i}y_{2i}^{\frac{1}{2}} + \phi_{2i}y_{1i}^{\frac{1}{2}}$$

且 $0 \leq \beta_{1i} \leq \phi_{2i} \leq \beta_{2i}$ (文献[6]也做过类似的假设)。研发投资和设备投资没有完成的减排部分归功于行为减排,于是,企业 i 在 1 期的行为投资减排量为

$$b_{1i} - e_{1i} - \alpha_{1i}x_{1i}^{\frac{1}{2}} - \beta_{1i}y_{1i}^{\frac{1}{2}}$$

在 2 期的行为投资减排量为

$$b_{2i} - e_{2i} - \alpha_{2i}x_{1i}^{\frac{1}{2}} - \theta_{2i}x_{2i}^{\frac{1}{2}} - \beta_{2i}y_{2i}^{\frac{1}{2}} - \phi_{2i}y_{1i}^{\frac{1}{2}}$$

相对于研发投资和设备投资而言,行为投资的绝对减排量可能较低,但单位减排量的投资成本可能较高,这是因为生活习惯和传统方式已根深蒂固,很难被改变.按照 Parry 和 Toman^[21] 中的成本估算方法,假设

$$z_{1i} = \nu_i (b_{1i} - e_{1i} - \alpha_{1i}x_{1i}^{\frac{1}{2}} - \beta_{1i}y_{1i}^{\frac{1}{2}})^2$$

$$z_{2i} = \nu_i (b_{2i} - e_{2i} - \alpha_{2i}x_{2i}^{\frac{1}{2}} - \theta_{2i}x_{2i}^{\frac{1}{2}} - \beta_{2i}y_{2i}^{\frac{1}{2}} - \phi_{2i}y_{2i}^{\frac{1}{2}})^2$$

不像技术减排,行为减排随着时间的变化,其减排效果变化不会太大,所以1期和2期的减排参数相同,均为正常数 ν_i .

关于减排效果参数 α_{1i} 、 α_{2i} 、 β_{1i} 、 β_{2i} 、 θ_{2i} 、 ϕ_{2i} 和 ν_i 的估计,可以通过实验方法近似测算.具体地,把 N 个企业随机分为两组,分别称为实验组和对照组.在其他条件相同的条件下,实验组企业进行减排研发投入 x_{1i} ,分别在1期和2期期末计算实验组相对于对照组的额外减排量 Δ_{1i} 和 Δ_{2i} ,于是, $\alpha_{1i} = \Delta_{1i} / (x_{1i})^{\frac{1}{2}}$, $\alpha_{2i} = \Delta_{2i} / (x_{2i})^{\frac{1}{2}}$.类似地,也可以近似估算其他减排效果参数的值.

相对于 BAU 情形,企业的刻意减排投资降低了二氧化碳的排放量,减缓气候变暖的步伐,减少极端天气和自然灾害发生的频率,使得人们呼吸较清洁空气的同时,节省了大量赈灾物资和医疗费用.因此,环保部已经宣布,企业的减排评估将与环境收益挂钩^[22](企业具体环境效益评价方法可参考文献[23]).因为环境收益对所有企业均相同,所以分别记 δ_1 和 δ_2 为1期和

2期的平均环境收益.同时,企业本身也有减排投资的动力,因为这样做不仅可以使其在未来的碳交易市场上抢占先机,扮演卖者角色,其产品还可以顺利通过国家环境质检部门的检验并投放市场,被消费者所青睐.因此,着眼于“十三五”,企业积极参与减排投资是有利可图的.假设企业 i 在1期和2期的平均市场收益分别为 π_{1i} 和 π_{2i} .既然减排投资分别发生在“十二五”和“十三五”期初,所以把1期作为即期,把2期作为远期,而远期投资可能存在一些无法预测的不确定性因素,于是,在计算成本收益时,企业将对“十三五”期间的成本收益打一定的折扣 λ .于是, N 个企业通过碳减排投资取得的总收益为

$$\sum_{i=1}^N (\pi_{1i} + \delta_1) (b_{1i} - e_{1i}) + \lambda \sum_{i=1}^N (\pi_{2i} + \delta_2) (b_{2i} - e_{2i}).$$

在实际操作时, λ 的值可以借鉴相同时期银行间同业拆借利率(interbank offered rate)为参考值.既然企业可以根据自己的历史能耗量,估算出 (b_{1i}, b_{2i}) ,那么企业 i 的决策变量为 $(x_{1i}, x_{2i}; y_{1i}, y_{2i}; z_{1i}, z_{2i})$ 或 $(x_{1i}, x_{2i}; y_{1i}, y_{2i}; e_{1i}, e_{2i})$.

2 最优减排投资行为

根据第一节的成本—收益分析,为了以最小的投资成本达到既定的碳减排目标,政府面临的最优化问题为

$$\min_{X, Y, E} \sum_{i=1}^N \left[x_{1i} + y_{1i} + \nu_i (b_{1i} - e_{1i} - \alpha_{1i}x_{1i}^{\frac{1}{2}} - \beta_{1i}y_{1i}^{\frac{1}{2}})^2 \right] - \sum_{i=1}^N (\pi_{1i} + \delta_1) (b_{1i} - e_{1i}) +$$

$$\lambda \left\{ \sum_{i=1}^N \left[x_{2i} + y_{2i} + \nu_i (b_{2i} - e_{2i} - \alpha_{2i}x_{2i}^{\frac{1}{2}} - \theta_{2i}x_{2i}^{\frac{1}{2}} - \beta_{2i}y_{2i}^{\frac{1}{2}} - \phi_{2i}y_{2i}^{\frac{1}{2}})^2 \right] - \sum_{i=1}^N (\pi_{2i} + \delta_2) (b_{2i} - e_{2i}) \right\} \quad (P1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^N (e_{1i} + e_{2i}) \leq K$$

其中 $X = (x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1N}, x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2N})$, $Y = (y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1N}, y_{21}, y_{22}, \dots, y_{2N})$, $E = (e_{11}, e_{12}, \dots, e_{1N}, e_{21}, e_{22}, \dots, e_{2N})$.

当 δ_1 和 δ_2 充分大时,为了最小化投资成本,约束条件必须是非紧约束,即 $\sum_{i=1}^N (e_{1i} + e_{2i}) < K$.尽管不能走“先污染后治理”的经济发展道路,但非紧约

束出现的可能性不大,这是因为我国的实际国情决定的.当前,我国正处于工业化和城市化的进程中,发展经济提高人民生活水平是首要任务,相对于实体商品而言,较清洁空气带给消费者的效用可能要位居其次,因此 δ_1 和 δ_2 的值不可能太大.所以,本文仅考虑带紧约束的优化问题(P1),其最优解为

$$\begin{cases}
 x_{1i}^* = \left(\frac{2(B-K) + (\delta_1 + \pi_{1i} - \lambda(\delta_2 + \pi_{2i}))(J_{12} + J_2)}{2J} \alpha_{1i} + \frac{2(B-K) + (\lambda(\delta_2 + \pi_{2i}) - \delta_1 - \pi_{1i})(J_1 + J_{12})}{2J} \alpha_{2i} \right)^2 \\
 y_{1i}^* = \left(\frac{2(B-K) + (\delta_1 + \pi_{1i} - \lambda(\delta_2 + \pi_{2i}))(J_{12} + J_2)}{2J} \beta_{1i} + \frac{2(B-K) + (\lambda(\delta_2 + \pi_{2i}) - \delta_1 - \pi_{1i})(J_1 + J_{12})}{2J} \beta_{2i} \right)^2 \\
 z_{1i}^* = \frac{1}{\nu_i} \left(\frac{2(B-K) + (\delta_1 + \pi_{1i} - \lambda(\delta_2 + \pi_{2i}))(J_{12} + J_2)}{2J} \right)^2 \\
 x_{2i}^* = \left(\frac{2(B-K) + (\lambda(\delta_2 + \pi_{2i}) - \delta_1 - \pi_{1i})(J_1 + J_{12})}{2\lambda J} \theta_{2i} \right)^2 \\
 y_{2i}^* = \left(\frac{2(B-K) + (\lambda(\delta_2 + \pi_{2i}) - \delta_1 - \pi_{1i})(J_1 + J_{12})}{2\lambda J} \phi_{2i} \right)^2 \\
 z_{2i}^* = \frac{1}{\nu_i} \left(\frac{2(B-K) + (\lambda(\delta_2 + \pi_{2i}) - \delta_1 - \pi_{1i})(J_1 + J_{12})}{2\lambda J} \right)^2 \quad i = 1, 2, \dots, N
 \end{cases} \tag{1}$$

其中 $B = \sum_{i=1}^N (b_{1i} + b_{2i})$ $J_1 = \sum_{i=1}^N (\alpha_{1i}^2 + \beta_{1i}^2 + \frac{1}{\nu_i})$,
 $J_2 = \sum_{i=1}^N [\alpha_{2i}^2 + \beta_{2i}^2 + \frac{1}{\lambda}(\theta_{2i}^2 + \phi_{2i}^2 + \frac{1}{\nu_i})]$ $J_{12} =$
 $\sum_{i=1}^N (\alpha_{1i}\alpha_{2i} + \beta_{1i}\beta_{2i})$ $J = J_1 + 2J_{12} + J_2$.

如果仅考察单期情形,比如实现“十二五”或者 2020 年碳减排目标的最优减排投资行为,在 (P1) 中,令 $x_{2i} = y_{2i} = z_{2i} = e_{2i} = \pi_{2i} = \delta_2 = 0$ 即得所需结果,此时的问题 (P1) 在 $\pi_{1i} = 0$ 时退化为王明喜等^[24] 中讨论的问题,对应地,最优解 (1) 也退化为文献 [24] 中的式 (3). 当 $x_{2i} = \alpha_{1i} = 0$, $\pi_{1i} = \pi_{2i} = 0$, 约束条件中的 $e_{1i} = 0$ 时,问题 (P1) 就退化为 Kennedy 文献 [20] 中的目标函数 (6): 为实现《京都议定书》中的减排目标,加拿大所要采取的最优早期行为;相应地最优解 (1) 就退化为 Kennedy 文献 [20] 中的式 (7) - (11).

尽管模型 (P1) 与文献 [6] 中的最优化模型在建模形式上有一些相似之处,但与文献 [6] 中的模型相比,模型 (P1) 的理论贡献体现为以下四点: 一是,模型 (P1) 基于“十二五”和“十三五”规划中的减排目标为建模依据,把企业的减排投资划分为两个时间跨度,更加贴近我国政策制定的现实,因此,所得结论对政策实施的指导意义更强;二是,考虑到减排企业的实际情况,把企业的减排市场收益纳入模型 (P1),纳入之后获得的结论与文献 [6] 对应的结论有本质上的差异,有时甚至相反,如文献 [6] 中的命题 2 与下文中的命题 2 和命题 3 截然不同;三是,文献 [6] 侧重于探讨如何度量和控制碳减排投资的不确定性问题,

而本文则侧重于考察“强制减排”和“自发减排”对最优减排投资的实施情况;四是,文献 [6] 中的某些结论仅是本文中对应结论的特例,如文献 [6] 中的命题 1 是式 (1) 在 $x_{2i} = y_{2i} = z_{2i} = e_{2i} = \pi_{2i} = \pi_{1i} = \delta_2 = 0$ 时的一个特例.

此外,从式 (1) 中还可以得到一些比较静态分析结果,这些结果可以为制定碳减排政策提供一定的方向性参考依据.若碳减排预算力度加大,即 $B - K$ 变大,为了实现对应的碳减排目标,两期的研发、设备和行为减排均需要加大投资力度.因此,考虑到我国沿海与内地、东部与西部、农村与城市在经济发展和科技水平方面存在较大差异,在实现我国“十二五”和 2020 年碳减排目标的贡献度上,不能一刀切,要根据各地区的经济实力和碳减排技术有区别地对待.特别是在进入 2012 年以后,我国 GDP 增速首次跌破 8%,这样,相对于 2010 年制定碳减排目标的时候,2015 年和 2020 年的实际 GDP 总额可能比预期要低,碳减排对经济增长的冲击可能会进一步加大,不利于我国经济的平稳增长.因此,为了以最小经济增长冲击实现预期的碳减排目标,可能需要重新、谨慎审视“十二五”规划和 2020 年的碳减排目标.

若把 $1/\nu_i$ 看作作为减排的减排效果,从式 (1) 中可以发现,企业碳减排投资水平与其减排效果密切相关.首先,因 1 期研发和设备投资的碳减排量在 1 期和 2 期均有所体现,所以它们的投资水平是 1 期和 2 期减排效果“加权和”的平方,其中“权重”的选取与 N 个企业的减排效果均相关.这一结果与本文作者的直觉也是相符的:既然每个企业比较优势的存在,为了以最小经济成本兑

现既定的减排目标,政府需要统筹考虑企业之间的差别,有区别地对待,实现能者多劳,物尽其力.其次,因为本文研究的问题是2020年的碳减排目标能否实现,所以考察的时间结束点是2020年.这样,导致企业*i*的2期研发和设备投资仅与其2期的减排效果相关.事实上,2期的研发和设备投资在2020年之后仍会有减排功效,所以政府在制定碳减排政策时,应适当考虑2020年之后的减排量.再次,在企业的碳减排投资结构上,式(1)可以提供一定的参考依据.如 $x_{2i}, y_{2i}, z_{2i} = \theta_{2i}^2, \phi_{2i}^2, 1/v_i$.最后,如果抛开基期财富与远期财富之间的

差异($\lambda = 1$),且减排平均收益不随时间发生变化($\delta_1 = \delta_2, \pi_{1i} = \pi_{2i}$),那么1期和2期的行为投资相同,这也进一步验证了“行为减排随时间推移,其减排效果变化不大”的结论.

3 最优减排投资的实施

在实践中,如果缺乏政府的政策引导,那么单个企业不会考虑环境收益,只考虑自己的减排市场收益,此时,其减排投资决策问题是

$$\min_{x_{1i}, x_{2i}, y_{1i}, y_{2i}, e_{1i}, e_{2i}} x_{1i} + y_{1i} + v_i (b_{1i} - e_{1i} - \alpha_{1i}x_{1i}^{\frac{1}{2}} - \beta_{1i}y_{1i}^{\frac{1}{2}})^2 - \pi_{1i}(b_{1i} - e_{1i}) + \lambda [x_{2i} + y_{2i} + v_i (b_{2i} - e_{2i} - \alpha_{2i}x_{2i}^{\frac{1}{2}} - \theta_{2i}x_{2i}^{\frac{1}{2}} - \beta_{2i}y_{2i}^{\frac{1}{2}} - \phi_{2i}y_{2i}^{\frac{1}{2}})^2 - \pi_{2i}(b_{2i} - e_{2i})] \tag{P2}$$

从优化问题(P2)中,容易导出企业*i*的个体最优减排投资为

$$\begin{cases} \bar{x}_{1i} = \left(\frac{1}{2}\pi_{1i}\alpha_{1i} + \frac{1}{2}\lambda\pi_{2i}\alpha_{2i}\right)^2 \\ \bar{y}_{1i} = \left(\frac{1}{2}\pi_{1i}\beta_{1i} + \frac{1}{2}\lambda\pi_{2i}\beta_{2i}\right)^2 \\ \bar{z}_{1i} = \frac{1}{v_i}\left(\frac{1}{2}\pi_{1i}\right)^2 \\ \bar{x}_{2i} = \left(\frac{1}{2}\pi_{2i}\theta_{2i}\right)^2, \bar{y}_{2i} = \left(\frac{1}{2}\pi_{2i}\phi_{2i}\right)^2, \\ \bar{z}_{2i} = \frac{1}{v_i}\left(\frac{1}{2}\pi_{2i}\right)^2 \end{cases} \tag{2}$$

式(2)显示,从单个企业成本最小化的角度出发,企业的刻意减排投资行为与环境收益和排放预算均无关.对比式(1)和(2),可以发现:当 $\delta_1 \neq \lambda\delta_2$ 时,在缺乏政府政策引导的前提下,企业的个体减排投资行为将偏离最优减排投资行为.那么,在何

种政策下,企业的个体减排投资行为才能实施最优水平?为回答此问题,下面着重讨论“强制减排”和“自发减排”措施,分析企业在这两个措施下的减排投资行为.

3.1 强制减排

“强制减排”是在控制碳排放总量*K*的前提下,有针对性地选取强制减排企业,每个企业通过一定的分配方式获取初始碳排放配额,其中分配过程有两种选择方式,一种是免费分配,另一种是企业通过拍卖或投标方式获取份额;而且,每个企业的实际碳排放量不允许超过获得的配额,否则将受到严厉惩罚.这样,对于“强制减排”措施,企业排放的二氧化碳是要付费的,且要在每期期初确定自己需求的碳排放配额.假设1期每单位碳排放的价格为*p*₁,2期的价格为*p*₂,则企业*i*减排投资决策的最优化问题为

$$\min_{x_{1i}, x_{2i}, y_{1i}, y_{2i}, e_{1i}, e_{2i}} x_{1i} + y_{1i} + v_i (b_{1i} - e_{1i} - \alpha_{1i}x_{1i}^{\frac{1}{2}} - \beta_{1i}y_{1i}^{\frac{1}{2}})^2 + p_1e_{1i} - \pi_{1i}(b_{1i} - e_{1i}) + \lambda [x_{2i} + y_{2i} + v_i (b_{2i} - e_{2i} - \alpha_{2i}x_{2i}^{\frac{1}{2}} - \theta_{2i}x_{2i}^{\frac{1}{2}} - \beta_{2i}y_{2i}^{\frac{1}{2}} - \phi_{2i}y_{2i}^{\frac{1}{2}})^2 + p_2e_{2i} - \pi_{2i}(b_{2i} - e_{2i})] \tag{P3}$$

从问题(P3)的目标函数中,可以导出企业*i*在“强制减排”下的投资决策为

$$\begin{cases} \tilde{x}_{1i} = \left(\frac{p_1 + \pi_{1i}}{2}\alpha_{1i} + \frac{\lambda(p_2 + \pi_{2i})}{2}\alpha_{2i}\right)^2, \tilde{y}_{1i} = \left(\frac{p_1 + \pi_{1i}}{2}\beta_{1i} + \frac{\lambda(p_2 + \pi_{2i})}{2}\beta_{2i}\right)^2, \tilde{z}_{1i} = \frac{1}{v_i}\left(\frac{p_1 + \pi_{1i}}{2}\right)^2 \\ \tilde{x}_{2i} = \left(\frac{p_2 + \pi_{2i}}{2}\theta_{2i}\right)^2, \tilde{y}_{2i} = \left(\frac{p_2 + \pi_{2i}}{2}\phi_{2i}\right)^2, \tilde{z}_{2i} = \frac{1}{v_i}\left(\frac{p_2 + \pi_{2i}}{2}\right)^2 \end{cases} \tag{3}$$

若企业以免费方式获取碳排放配额,即在问题(P3)中 $p_1 = p_2 = 0$,于是有如下命题:

命题1 若企业以免费方式获取碳排放配额,则当 $\delta_1 \neq \lambda\delta_2$ 时,企业的碳减排投资将偏离最

优碳减排投资水平。

若政府选择免费方式配置企业的碳排放配额,在操作手段上较简单易行,其初始配额可以采用溯源(Grandfathering)法则和标杆(Benchmarking)法则相结合的准则进行配置^[25]。对于生产过程较难改进的传统生产工艺,根据其历史排放量免费发放排放配额(溯源法则);对于生产工艺较容易改进或升级的产业采取标杆法则,即选取该行业单位产品碳排放量最低的企业为标杆,其他企业的碳排放配额等于其产出量乘以标杆企业的单位产品碳排放量;对于减排潜力较大的企业,其期初的配额则根据溯源法则进行配置,以后逐年根据标杆法则进行更新。这样,免费配置方式不但尊重了企业的历史贡献,还可以体现出企业间的竞争优势。

然而,由于企业和政府之间的信息不对称,企业为了降低自己的碳减排投资成本,毫无疑问它们会选择瞒报或虚报自己的 BAU 排放量,或者通过寻租和游说使得自己获得尽可能多的排放配额,从而出现“道德风险”。此时,企业在研发、设备和行为减排三个渠道上的刻意减排投资均严重偏离式(1)中对应的最优减排投资水平。为了避免企业“道德风险”的出现,政府可以设置企业碳排放量的检测机构或安装自动化测量仪器,不定期地对企业进行碳排放量抽查,通过加强管理,进而排除企业与政府之间关于碳排放量的信息不对称;政府还可以制定法规制度,对瞒报或虚报碳排放量的企业采取较严厉的经济惩罚,使其自觉报出真实的碳排放量是一个占优策略。

若企业以拍卖或投标方式获得碳排放配额,即在(P3)中 $p_1 > 0, p_2 > 0$ 此时,每个企业的个体减排投资与最优减排投资之间的关系见下面的命题 2。

命题 2 若企业以拍卖或投标方式获得碳排放配额,只有当价格 $p_{1i} = \frac{2(B-K) + (\delta_1 + \pi_{1i} - \lambda(\delta_2 + \pi_{2i}))(J_1 + J_2)}{J} - \pi_{1i}$, 且

$$p_{2i} = \frac{2(B-K) + (\lambda(\delta_2 + \pi_{2i}) - \delta_1 - \pi_{1i})(J_1 + J_2)}{\lambda J} - \pi_{2i}$$

时,企业 i 的个体减排投资恰好实施最优投资水平,以最小减排成本实现既定的碳排放预算 K ; 当

价格取其它值时,要么是 1 期的企业个体投资水平偏离最优减排投资,要么是 2 期的企业个体投资水平偏离最优减排投资,或者是两期的企业个体投资水平均偏离最优减排投资。

相对于免费方式获取碳排放配额,以拍卖或投标方式配置排放配额透明度较高,在一定程度上可以避免“以权谋私、权钱交易、假公济私”等某些社会腐败现象的发生,以公平竞标的方式使得企业排放二氧化碳的环境外部性内生,成为企业生产的一种“投入要素”;此外,为降低投标成本、提高拍卖交易效率,拍卖还可以选择在网上进行^[26]。目前,欧盟的 ETS(Emission-and-trade Scheme) 是使用公开拍卖碳排放配额的最大的、最成功的市场,拍卖分配方式在 2007 年被引入 ETS,随着时间的推移,用拍卖方式分配的配额比例不断上升,据 Capoor 和 Ambrosi^[27] 的测算,到 2013 年在 ETS 中被拍卖的配额比例将达到 50%,到 2020 年这一比例将上升到 70% - 80%。尽管拍卖可以弥补免费配置碳排放配额的某些缺陷,但要想实现“以最小成本达到既定的碳减排目标”,命题 2 显示,合理选择拍卖成交价格是实施最优减排投资的关键。当 1 期和 2 期的碳排放配额的价格选择合适时,企业的个体减排投资行为才能实施最优投资水平,否则,均有所偏离。

为了使得减排企业有一段适应过程,做好碳减排竞标的前期准备,也有学者和专家建议:在实施“强制减排”政策的期初,以免费方式配置碳排放配额,经历一段时间之后,然后逐步缩小免费配额的比重,同时提高拍卖份额^[2]。这样,假设企业在 1 期免费获取排放配额,而在 2 期以竞标形式获得排放配额,即在问题(P3)中 $p_1 = 0, p_2 > 0$ 。

命题 3 若企业在 1 期以免费方式获取碳排放配额,而在 2 期以拍卖方式获得碳排放配额,则

$$\text{当 } p_{2i} = \frac{2(B-K) + (\lambda(\delta_2 + \pi_{2i}) - \delta_1 - \pi_{1i})(J_1 + J_2)}{\lambda J} -$$

$$\pi_{2i} > \frac{\lambda\delta_2 - \delta_1}{\lambda} \text{ 时, 企业 } i \text{ 在 1 期的个体减排投资水平}$$

偏低,而在 2 期的减排投资恰好实施最优时的投资水平,此时尽管所有 N 个企业的碳减排投资成本之和低于最优量,但碳排放总量将超过 K ; 当

$$p_{2i} = \frac{2(B-K) + (\lambda(\delta_2 + \pi_{2i}) - \delta_1 - \pi_{1i})(J_1 + J_2)}{\lambda J} -$$

$\pi_{2i} < \frac{\lambda \delta_2 - \delta_1}{\lambda}$ 时,企业 i 在 1 期的个体减排投资水平偏高,在 2 期的减排投资恰好实施最优时的投资水平; 当 $p_{2i} = \frac{2(B-K) + (\lambda(\delta_2 + \pi_{2i}) - \delta_1 - \pi_{1i})(J_1 + J_{12})}{\lambda J} - \pi_{2i} = \frac{\lambda \delta_2 - \delta_1}{\lambda}$ 时,企业 i 的个体减排投资能够实施最优投资水平; 当 $p_{2i} \neq \frac{2(B-K) + (\lambda(\delta_2 + \pi_{2i}) - \delta_1 - \pi_{1i})(J_1 + J_{12})}{\lambda J} - \pi_{2i}$ 时,企业 i 在 2 期的个体减排投资偏离最优水平。

除了“七省市”碳交易试点在 2013 年年底启动外,我国的绝大多数地区“十二五”期间没有碳交易市场价格作为参考,为了让企业有一段适应时间,只能选择免费配置碳排放配额,而企业则会通过游说或寻租方式让自己获得尽可能多的排放配额,以减少在 1 期的减排投资,对企业而言,最理想的结果是实现配额能够完全覆盖自己的 BAU 排放量,这样,“十二五”的碳减排目标可能无法完成. 进入“十三五”时期,在企业有所心理准备和预期的条件下,将碳交易试点模式推广到全国,建立全国性的碳交易市场,形成交易价格 p_{2i} ,政府通过控制 p_{2i} 能及时矫正 1 期的企业减排投资水平,使其回到最优减排投资路径上来。

3.2 自发减排

由于我国东部沿海地区地域优势的存在,导致东部沿海和中西部地区之间的经济与技术发展水平存在较大差异,为了平衡不同地区间的经济发展水平,提高企事业单位的减排积极性,除了国家制定碳排放总量并要求企业进行“强制减排”外,政府还可以引入企事业之间的碳交易“单边模式”和“双边模式”。例如,大别山地区交通不便

利,经济发展相对缓慢,存在许多可开发空地,而上海市经济发展迅速,但可开发空地相对较少. 为平衡大别山区和上海市的经济发展,其中的一个备选措施就是碳交易. 大别山区可以利用空地进行就地植树,把由绿化带来的碳减排出售给上海市,而上海市把原本用于减排投资的资金部分转移给大别山区. 因为上海市经济已经发展到一定高度,所以其碳减排的边际经济成本将远大于大别山区. 这样,上海市和大别山区通过碳减排交易,既达到了国家规定的碳减排目标,又平衡了地区间的经济收入,而且还降低了碳减排的投入成本,实现了“一石三鸟”之功效。

单边和双边碳交易模式最初出自于《京都议定书》中的清洁发展机制. 在单边碳交易模式中,企事业单位首先进行自主减排投资,到投资期末时,计算相对于 BAU 情形的碳减排量 $b_i - e_i$,经第三方认证机构(如环境交易所)和国家主管部门批准,完成碳减排量的注册,然后寻找并以合适的价格出售给其他企事业单位. 在 2009 年 11 月 17 日,厦门赫仕环境工程有限公司出售给上海济丰纸业包装股份有限公司 6 266 t 的碳减排量就是单边碳交易模式的一个案例. 在双边碳交易模式中,准备投资减排的企业与准备购买碳减排量的企业首先协商交易的碳减排量及其交易价格,签订交易合同,并在国家主管部门备案,然后卖方开始碳减排投资,在合同规定的交割日期,计算碳减排量 $b_i - e_i$,并经第三方认证后完成交易. 2010 年 8 月 5 日,摩科瑞能源贸易公司购买甘肃锦泰电力有限公司金口坝水电项目所产生的碳减排量,其交易在北京环境交易所完成,就是一个典型的场内双边交易案例。

根据交易流程,在单边交易模式中,企业 i 在期末的碳减排量为 $b_{1i} + b_{2i} - e_{1i} - e_{2i}$,若交易价格为 w ,则企业 i 的最优化问题为

$$\min_{x_{1i}, x_{2i}, y_{1i}, y_{2i}, v_i, \pi_{1i}, \pi_{2i}} x_{1i} + y_{1i} + v_i (b_{1i} - e_{1i} - \alpha_{1i} x_{1i}^{\frac{1}{2}} - \beta_{1i} y_{1i}^{\frac{1}{2}})^2 - \pi_{1i} (b_{1i} - e_{1i}) + \lambda [x_{2i} + y_{2i} + v_i (b_{2i} - e_{2i} - \alpha_{2i} x_{2i}^{\frac{1}{2}} - \beta_{2i} y_{2i}^{\frac{1}{2}} - \phi_{2i} y_{2i}^{\frac{1}{2}})^2 - w(b_{1i} + b_{2i} - e_{1i} - e_{2i}) - \pi_{2i} (b_{2i} - e_{2i})] \tag{P4}$$

基于优化问题(P4),可以讨论单边碳交易模式是否能够实施最优碳减排投资(1)。

命题4 当 $\delta_1 \neq \lambda \delta_2$ 时,无论碳交易价格 w 定在何水平,单边交易模式下的企业个体减排投资

都无法实施最优减排投资. 当 $\delta_1 = \lambda\delta_2$ 时, 政府通过合理引导企业的碳交易价格, 使得 $w = \frac{2(B - K) - \pi_{1i}(J_1 + J_{12}) - \lambda\pi_{2i}(J_{12} + J_2)}{\lambda J}$, 单边交易模式下的企业个体减排投资能够实施最优减排投资.

虽然单边交易模式能够使得企业进行自发减排投资, 但交易价格是企业双方协商而定, 自发减排的企业将根据协商交割价格选择自己的减排投资水平, 使得减排投资成本最小化. 与 N 个企业整体最优减排投资 (1) 相比, 只有当 1 期和 2 期的环

$$\min_{x_{1i}, x_{2i}, y_{1i}, y_{2i}, v_i, \theta_{1i}, \theta_{2i}} x_{1i} + y_{1i} + v_i (b_{1i} - e_{1i} - \alpha_{1i}x_{1i}^{\frac{1}{2}} - \beta_{1i}y_{1i}^{\frac{1}{2}})^2 - (w_1 + \pi_{1i})(b_{1i} - e_{1i}) + \lambda [x_{2i} + y_{2i} + v_i (b_{2i} - e_{2i} - \alpha_{2i}x_{2i}^{\frac{1}{2}} - \theta_{2i}x_{2i}^{\frac{1}{2}} - \beta_{2i}y_{2i}^{\frac{1}{2}} - \phi_{2i}y_{2i}^{\frac{1}{2}})^2 - (w_2 + \pi_{2i})(b_{2i} - e_{2i})] \tag{P5}$$

从优化问题 (P5) 中, 可以发现双边交易模式具有如下性质:

命题 5 当 $\delta_1 = \lambda\delta_2$ 时, 政府通过合理引导企业的碳交易价格, 使得 $w_1 = \lambda w_2 = \frac{2(B - K) - \pi_{1i}(J_1 + J_{12}) - \lambda\pi_{2i}(J_{12} + J_2)}{J}$, 双边交易模式下的企业个体减排投资能够实施最优减排投资. 当 $\delta_1 \neq \lambda\delta_2$ 时, 只有 $w_1 = \frac{2(B - K) + (\delta_1 + \pi_{1i} - \lambda(\delta_2 + \pi_{2i}))(J_{12} + J_2)}{J} - \pi_{1i}$ 且 $w_2 = \frac{2(B - K) + (\lambda(\delta_2 + \pi_{2i}) - \delta_1 - \pi_{1i})(J_1 + J_{12})}{\lambda J} - \pi_{2i}$, 双边

交易模式下的企业个体减排投资与最优减排投资一致. 否则, 企业个体减排投资均偏离最优减排投资.

忽略财富的时间价值 (即 $\lambda = 1$), 当环境平均收益和减排市场收益的值在 1 期和 2 期均相同时, 若政府能引导交易双方把协商价格定为 $2(B - K) / J$, 那么双边交易模式则能够实施政府期望的最优投资水平. 当交易双方中有一方处于定价权的强势地位, 使得交易价格过高或过低, 此时, 即使政府采取必要的政策引导, 双边交易模式下的企业个体减排投资仍可能偏离最优水平.

因为远期投资不确定性因素的存在, 一般而言, 同等量的远期财富小于即期财富, 即 $0 < \lambda < 1$, 此时, 要想缩小企业个体减排投资偏离最优减排投资的程度, 必须对双边交易模式中的 1 期和 2 期交易价格进行同时控制, 使得两期价格不但体

现出财富的时间价值差异, 还要考虑到碳减排预算和不同投资路径上的减排效果.

境边际收益满足一定的大小关系 ($\delta_1 = \lambda\delta_2$), 且交割价格被定在一个合适的值时, 单边交易模式才能实施最优减排投资 (1); 否则, 单边交易模式下的企业个体减排投资均偏离最优投资水平.

当企业存在减排投资资金不足时, 双边交易模式可能是一个较好的碳交易方式. 根据双边交易模式的定义, 假设 1 期期初碳交易双方协商的交易价格为 w_1 , 2 期期初的碳交易价格为 w_2 . 则企业 i 在 1 期的减排投资收益为 $(w_1 + \pi_{1i})(b_{1i} - e_{1i})$, 而其在 2 期的减排投资收益为 $(w_2 + \pi_{2i})(b_{2i} - e_{2i})$. 于是, 企业 i 的成本最小化问题为

4 数值分析

由于缺乏企业层面的碳排放量数据, 本节将用数值算例考察最优减排投资水平关于一些参数变化的敏感度, 以及强制减排和自发减排措施下企业个体减排投资偏离最优水平的程度. 关于一些参数的选取, 仅仅是为了计算最优减排投资和减排措施下的企业个体减排投资量, 并没有现实意义. 因此, 计算所得减排投资量的具体数值也没有实际意义和企业参考价值.

为简化记号, 考虑仅有两个企业的情形, 即 $N = 2$, 且企业 1 和企业 2 的减排效果相同, 这样就可以省略下标 i . 为了考察最优减排投资关于参数变化的敏感度, 设基准情形为 $b_1 = b_2 = 250$, $K = 800$, $\alpha_1 = \beta_1 = 1$, $\alpha_2 = \beta_2 = 3$, $\theta_2 = \phi_2 = 2$, $\nu = 1/2$, $\delta_1 = 4$, $\delta_2 = 5$, $\pi_1 = \pi_2 = 1$, $\lambda = 2/3$, 则 $B - K = 200$, $J_1 = 8$, $J_2 = 66$, $J_{12} = 12$, $J = 98$. 由式 (1) 可得基准情形下的最优减排投资量分别为 $x_1^* = y_1^* = 68.15$, $x_2^* = 11.90$, $x_2^* = y_2^* = 33.83$, $x_2^* = 16.91$ (保留小数点后两位). 相对于基准情形, 当排放预算、减排效果参数、环境收益、减排市场收益和折算因子分别变化 10% 时, 其对应的最优减排投资的变化情况见表 1.

表1 最优减排投资关于参数变化的敏感度(取小数点后两位)

Table 1 Sensitivity of the optimal emission reduction investment on parameters (two bit decimal)

参数		投资					
		$\Delta x_1/x_1^*$	$\Delta y_1/y_1^*$	$\Delta z_1/z_1^*$	$\Delta x_2/x_2^*$	$\Delta y_2/y_2^*$	$\Delta z_2/z_2^*$
$\Delta K/K$	-10%	94.76%	94.76%	78.15%	101.94%	101.94%	101.94%
$\Delta \alpha_1/\alpha_1$	10%	2.28%	-3.52%	-2.98%	-3.74%	-3.74%	-3.74%
$\Delta \alpha_2/\alpha_2$	10%	4.06%	-9.15%	-7.77%	-9.72%	-9.72%	-9.72%
$\Delta \theta_2/\theta_2$	10%	-4.65%	-4.65%	-3.95%	15.01%	-4.95%	-4.95%
$\Delta \delta_1/\delta_1$	10%	0.89%	0.89%	13.48%	-4.17%	-4.17%	-4.17%
$\Delta \delta_2/\delta_2$	10%	-0.74%	-0.74%	-10.58%	3.54%	3.54%	3.54%
$\Delta \pi_1/\pi_1$	10%	0.22%	0.22%	3.29%	-1.05%	-1.05%	-1.05%
$\Delta \pi_2/\pi_2$	10%	-0.15%	-0.15%	-2.16%	0.70%	0.70%	0.70%
$\Delta \lambda/\lambda$	-10%	-5.09%	-5.09%	8.09%	10.66%	10.66%	10.66%

表1中的数值表示:每行的行标参数变化10%,其他参数的值保持基准情形不变,最优投资相对于基准情形的变化率,其中“-”表示减少。表1显示,对减排投资影响最大的因素是预期减排目标,当实际碳排放总量上限被降低10%之后,企业在研发、设备和减排行为上的投资均需加大力度,且2期的投资量将会成倍增加,才能完成既定的减排目标。因此,减排本身的成本确实很高。再考虑到减排对经济结构的影响,所以很多国家不愿意制定碳减排的硬性约束指标。这也从另外一个角度说明了,我国作为一个发展中国家的大国,对降低碳排放的决心。

当某个投资渠道的减排效果提高时,为平衡两期的减排成本,使得两期的边际投资减排量相同,达到降低减排成本的目的,此投资渠道对应的减排投资自然增加,而其他减排渠道的投资量则降低。但是,1期的减排投资对减排效果的敏感度明显小于2期减排投资的敏感度(见表1的第三、四和五行),这是因为:随着时间的推移,同样的投资量从1期进入2期将会取得较好的减排效果,

所以相对于1期的减排投资变化率,2期的减排投资变化更大。

因为所有企业均受益于环境改善,所以从整个国家的福利层面考虑,环境收益的提高将伴随着同期减排投资的增加。而当减排市场收益增加时,在利润的诱惑下,企业必然会改变投资模式,使得社会资源流向减排行业,因此,同期的减排投资增加。在设计的算例中,由于环境收益严格大于市场收益,所以相对于市场收益而言,减排投资对环境收益的敏感度更加明显。

因研发和设备投资的减排效果在1期和2期均有所体现,而且它们在2期的减排效果会更好,所以当未来的不确定性因素减弱时,企业将重新调整减排投资在两期的资金分配,降低1期的投资额,同时增加2期的投资额。纵观表1的第五和八列,可以发现,行为减排关于收益的敏感度大于其关于减排效果的敏感度,其原因是:由于行为减排效果不随时间发生变化,排除财富的时间效应,行为减排投资关于减排效果的敏感度基本为0。

表2 免费配置方式下的投资偏离最优投资的程度(保留小数点后两位)

Table 2 The deviation of investment from the optimal in the free change mechanism (two bit decimal)

δ_2	$\delta_1 - \lambda \delta_2$	Δx_1	Δy_1	Δz_1	Δx_2	Δy_2	Δz_2
5	0.67	-65.90	-65.90	-11.40	-32.83	-32.83	-16.41
6	0	-64.90	-64.90	-8.95	-35.25	-35.25	-17.62
7	-0.67	-63.89	-63.89	-6.78	-37.74	-37.74	-18.87

仅当 δ_2 的值发生变化,其他参数的取值保持基准情形不变,表 2 给出免费配置方式下,企业个体减排投资偏离最优减排的程度.表 2 显示:当 $\delta_1 - \lambda\delta_2$ 的值由大逐渐变小时,1 期减排投资偏离最优减排投资的程度逐渐变小,而 2 期的偏离程度则逐渐变大.其主要原因是 $\delta_1 - \lambda\delta_2$ 的变动是 δ_2 的变化所致,由表 1 可知相对于 1 期而言 2 期的减排投资对 δ_2 的变化更敏感.此外,从表 2 中,

表 3 拍卖配置方式下的投资偏离最优投资的程度(保留小数点后两位)

Table 3 The deviation of investment from the optimal in the auction mechanism (two bit decimal)

p_{1i}	p_{2i}	Δx_1	Δy_1	Δz_1	Δx_2	Δy_2	Δz_2
3.88	4.82	0	0	0	0	0	0
3.88	4.33	-7.77	-7.77	-0.01	-5.42	-5.42	-2.71
3.88	5.30	8.24	8.24	0.01	5.86	5.86	2.93
3.49	4.82	-3.10	-3.10	-1.82	0.04	0.04	0.02
4.27	4.82	3.34	3.34	1.99	0.04	0.04	0.02
3.49	4.33	-10.70	-10.70	-1.82	-5.37	-5.37	-2.69
4.27	5.30	11.61	11.61	1.97	5.83	5.83	2.92

对于免费和拍卖相结合的配置方式,要想使得企业个体减排投资实施最优减排投资,对拍卖价格 p_{2i} 的限制条件更加严格.对于基准情形,只有当 $p_{2i} = 4.82$ 时 2 期的企业个体减排投资才能实施最优减排投资,此时 $\Delta x_1 = \Delta y_1 = -28.25$, $\Delta z_1 = -11.40$,即 1 期的企业个体减排投资均低于最优投资.当 $\delta_2 = 18$,其他参数保持基准情形不变时 $p_{2i} = 7.44$,此时 2 期的企业个体减排投资仍能实施最优减排投资,但 1 期的企业个体减排投资均高于最优投资,具体偏离程度分别为 $\Delta x_1 = \Delta y_1 = 24.81$, $\Delta z_1 = 1.54$.当 p_{2i} 取其他值时 2 期的企业个体减排投资均偏离最优投资,其

表 5 单边交易模式配置方式下的投资偏离最优投资的程度(保留小数点后两位)

Table 5 The deviation of investment from the optimal in the one-side trade mechanism (two bit decimal)

δ_2	$\delta_1 - \lambda\delta_2$	w	Δx_1	Δy_1	Δz_1	Δx_2	Δy_2	Δz_2
5	2/3	4.52	-11.53	-11.53	-3.84	-3.38	-3.38	-1.69
		5.02	-1.01	-1.01	-2.45	2.42	2.42	1.21
		5.52	10.41	10.41	-0.94	8.71	8.71	4.36
6	0	4.52	-10.52	-10.52	-1.40	-5.79	-5.79	-2.90
		5.02	0	0	0	0	0	0
		5.52	11.42	11.42	1.51	6.30	6.30	3.15
7	-2/3	4.52	-9.52	-9.52	0.77	-8.29	-8.29	-4.15
		5.02	1.00	1.00	2.17	-2.50	-2.50	-1.25
		5.52	12.42	12.42	3.68	3.80	3.80	1.90

还可以发现,条件 $\delta_1 - \lambda\delta_2 \neq 0$ 仅是免费配置方式下个体减排投资偏离最优投资的一个非充分条件.

在基准情形中,式(3)隐含着:当 $p_{1i} = 3.88$ 且 $p_{2i} = 4.82$ 时,拍卖分配方式下企业个体减排恰好实施最优减排水平.当价格取其他值时,企业个体减排投资偏离最优水平的程度见表 3,且偏离程度关于 p_{2i} 的变化更加敏感.

具体的偏离程度见表 4.

表 4 “免费 + 拍卖”配置方式下的投资偏离最优投资的程度(保留小数点后两位)

Table 4 The deviation of investment from the optimal in the “free change + auction” mechanism (two bit decimal)

δ_2	p_{2i}	Δx_2	Δy_2	Δz_2
5	4	-8.83	-8.83	-4.41
	5	2.17	2.17	1.09
18	5.02	-35.49	-35.49	-17.75
	8	9.63	9.63	4.81

在单边交易模式中,让 δ_2 的取值发生变动,使得 $\delta_1 - \lambda\delta_2$ 的值由正变到负,具体的数值结果见表 5.

表5显示,只有当 $\delta_1 - \lambda\delta_2 = 0$ 时,才可能通过选择合适的交易价格 $w = 5.02$ 矫正企业的个体减排投资,使其实施最优减排投资。当 $\delta_1 - \lambda\delta_2 \neq 0$ 时,企业在1期和2期的减排投资均偏离最优投资水平。

类似于单边交易模式,当 $\delta_2 = 6$ (或 $\delta_1 - \lambda\delta_2 = 0$)时,双边交易模式只有在 $w_1 = 3.35$ 和 $w_2 = 5.02$ 时,企业个体减排投资与最优减排投资一致;当 $\delta_2 = 5$ (或 $\delta_1 - \lambda\delta_2 = 2/3$)时,双边交易模式只有在 $w_1 = 3.87$ 和 $w_2 = 4.81$ 时,企业个体减排投资实施最优减排投资;当 $\delta_2 = 7$ (或 $\delta_1 - \lambda\delta_2 = -2/3$)时,双边交易模式只有在 $w_1 = 2.82$ 和 $w_2 = 5.22$ 时,企业个体减排投资才能实施最优减排投资;在其他的交易价格水平上,企业个体投资均不同程度地偏离最优投资。

5 结束语

为了以较小的经济增长冲击实现“十二五”和2020年的碳减排目标,本文从企业微观生产过程剖析其碳减排路径,总结为加强管理、提高生产效率和扩大清洁能源的使用比例三条路径,在这三条路径上,企业对应的减排投资分别为行为减排投资、研发投资和设备投资。由于未来投资不确定性因素的存在,使得未来财富有所缩水,因此,本文又进一步把企业的减排投资时间窗口划分为两个时期,并用折算因子把第2期的投资成本和收益折算到即期。相对于正常的商业行为,刻意的减排投资必然降低空气中的碳排放总量,进而减少极端天气等自然灾害的发生和相应的救灾物资花费,从整个国家的角度出发,碳减排是有收益的,本文定义为环境收益。基于所有企业的减排投资总和、环境总收益以及减排市场收益,给出了兑现既定碳减排目标下的成本最小化模型,并导出其显示最优解。

关于最优减排投资行为的实施,本文有针对性地考查了“强制减排”和“自发减排”措施。在强制减排的免费分配措施中,由于获得较多的排

放配额可以降低碳减排投资,节约生产成本,所以企业希望获得刚好能覆盖其实际排放量的碳排放配额。因此,虽然免费配置方式有操作层面上方便快捷的优点,但企业的减排投资水平偏离最优投资水平。甚至企业有时为获得较多排放配额采取贿赂相关管理人员,造成寻租等腐败现象的发生。尽管拍卖配置方式可以从理论上矫正企业减排投资的偏离程度,实施最优减排投资水平,但我国还没有碳排放配额拍卖的先例。如果采取“一刀切”的政策,在企业没有一定的投标经验和心理准备的前提下,可能会出现适得其反。因此,较合理的做法是,期初实行免费配置方式分配一部分排放配额,然后再逐渐降低免费配置的份额,逐步加大拍卖配置的比例,通过控制拍卖交易价格矫正企业个体减排投资的偏离程度,最终实施最优减排投资水平。因此,我国计划先建立“七省市”碳交易试点,然后在将其推广到全国是合乎理论逻辑的。

在自发减排中,无论是单边还是双边交易模式,均可以通过碳交易实现“经济发展和保护环境”共进,在缩小地区间经济发展差异的同时,扩大中西部地区的绿化面积,弱化碳减排对东部沿海地区经济发展的冲击。而且,单边交易模式不仅有利于加强企业在碳交易定价中的话语权,还可以降低买家的交割风险,极大增加了企业碳交易的动力。但要想实施最优碳减排效果,1期和2期的环境收益起到关键性的作用,只要二者之间不满足关系式 $\delta_1 = \lambda\delta_2$,那么无论交易价格为何水平,均无法实施最优减排投资水平。所以,为了矫正企业的碳减排投资水平,政府可以把对企业的考核与环境收益相挂钩,通过引入适当的环境收益值,使得企业的个体减排投资回到最优投资水平的轨道上。

在碳交易定价问题上,政府可以根据不同企业的减排效果,有区别地对待,采用不同政策加以引导企业的减排投资水平,鼓励企业积极参与减排投资,从而实现能者多劳,以较高的效率、较低的投资成本兑现既定的碳减排目标。

参考文献:

- [1] Jotzo F, Pezzey J C V. Optimal intensity targets for greenhouse gas emissions trading under uncertainty[J]. Environmental

- Resource Economy, 2007, 38(2): 259–284.
- [2] 华夏时报. 监管层酝酿碳交易市场路线图[OL]. 2011–06–10. <http://www.chinatimes.cc/yaowen/hongguan/2011-06-10/24249.shtml>.
- China Times. Regulators is brewing the carbon trading market roadmap[OL]. 2011–06–10. <http://www.chinatimes.cc/yaowen/hongguan/2011-06-10/24249.shtml>. (in Chinese)
- [3] 经济参考报. 国内碳交易办法或上半年实施, 将限制交易所总量[OL]. 2012–04–06. http://ny.china.com.cn/2012-04/06/content_4920969.htm.
- Economic Information Daily. Chinese carbon trading scheme will implement and limit the amount of exchange in the first half of 2012[OL]. 2012–04–06. http://ny.china.com.cn/2012-04/06/content_4920969.htm. <http://www.chinatimes.cc/yaowen/hongguan/2011-06-10/24249.shtml>. (in Chinese)
- [4] 郭力方. 七省市碳交易试点全面启动[OL]. 中国证券报, 2012–06–05. <http://money.163.com/12/0605/02/836UV98400253B0H.html>.
- Guo Lifang. Carbon trading pilot started in seven provinces and cities[OL]. 2012–06–05. China Securities Daily, <http://money.163.com/12/0605/02/836UV98400253B0H.html>. (in Chinese)
- [5] 王明荣, 王明喜. 基于帕累托最优配置的碳排放许可证拍卖机制[J]. 中国工业经济, 2012, 290(5): 96–108.
- Wang Mingrong, Wang Mingxi. An auction mechanism of carbon emission permits based on Pareto optimality[J]. China Industrial Economics, 2012, 290(5): 96–108. (in Chinese)
- [6] Wang M, Wang M, Wang S Y. Optimal investment and uncertainty on China's carbon emission abatement[J]. Energy Policy, 2012, 41(2): 871–877.
- [7] Demailly D, Quirion P. European emission trading scheme and competitiveness: A case study on the iron and steel industry[J]. Energy Economics, 2008, 30(4): 2009–2027.
- [8] Massetti E, Tavoni M. A developing Asia emission trading scheme (Asia ETS)[J]. Energy Economics, 2012, 34(S3): S436–S443.
- [9] 朱帮助, 魏一鸣. 基于 GMDH-PSO-LSSVM 的国际碳市场价格预测[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(12): 2264–2271.
- Zhu Bangzhu, Wei Yiming. Carbon price prediction based on integration of GMDH, particle swarm optimization and least squares support vector machines[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2011, 31(12): 2264–2271. (in Chinese)
- [10] Poterba J M. Tax policy toward global warming: On designing a carbon tax[D]. Dornbusch R, Poterba J. Economic Policy Responses to Global Warming, Cambridge: MIT Press, 1991: 71–97.
- [11] 倪红日. 运用税收政策促进我国节约能源的研究[J]. 财税研究, 2005, 244(9): 3–6.
- Ni Hongri. A study on tax policies of economizing energy use[J]. Taxation Research Journal, 2005, 244(9): 3–6. (in Chinese)
- [12] 王 灿, 陈吉宁, 邹 骥. 基于 CGE 模型的 CO₂ 减排对中国经济的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(12): 1621–1623.
- Wang Can, Chen Jining, Zou Ji. Impact assessment of CO₂ mitigation on China economy based on a CGE model[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2005, 45(12): 1621–1623. (in Chinese)
- [13] 庄贵阳. 中国经济低碳发展的途径与潜力分析[J]. 太平洋学报, 2005, 11(3): 79–87.
- Zhuang Guiyang. An analysis of “low carbon path” potentials in China's economic growth[J]. Pacific Journal, 2005, 11(3): 79–87. (in Chinese)
- [14] 巢清尘, 陈文颖. 碳捕获和存储技术综述及对我国的影响[J]. 地理科学进展, 2006, 21(3): 291–298.
- Chao Qingchen, Chen Wenying. The summary of capture and storage technology and its impact on China[J]. Advance in Earth Science, 2006, 21(3): 291–298. (in Chinese)
- [15] Kromer M A, Bandivadekar A, Evans C. Long-term greenhouse gas emission and petroleum reduction goals: Evolutionary pathways for the light-duty vehicle sector[J]. Energy, 2010, 35(1): 387–397.
- [16] Jönsson J, Algehed J. Pathways to a sustainable European kraft pulp industry: Trade-offs between economy and CO₂ emissions for different technologies and system solutions[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(16): 2315–2325.

- [17]Dagoumas A S , Barker T S. Pathways to a low-carbon economy for the UK with the macro-econometric E3MG model [J]. *Energy Policy* , 2010 , 38(6) : 3067 – 3077.
- [18]国发[2010]第12号. 国务院关于进一步加大工作力度确保实现“十一五”节能减排目标的通知 [OL]. 2012 – 09 – 28. http://d.wanfangdata.com.cn/Claw_G000100910.aspx.
Guofa [2010] No. 12. The state council on strengthening the efforts to inform the implementation of “eleven-fifth” energy saving and emission reduction [OL]. 2012 – 09 – 28. http://d.wanfangdata.com.cn/Claw_G000100910.aspx. (in Chinese)
- [19]Pew 智库. 美国清洁能源投资额重夺全球第一中国居第二 [OL]. 2012 – 09 – 28. <http://www.51jnhb.com/news/17544567.html>.
Pew Research Center. America clean energy investment takes the world’s first and China ranks second [OL]. 2012 – 09 – 28. <http://www.51jnhb.com/news/17544567.html>. (in Chinese)
- [20]Kennedy P W. Optimal early action on greenhouse gas emissions [J]. *Canadian Journal of Economics* , 2002 , 35(1) : 16 – 35.
- [21]Parry I W H , Toman M. Early emissions reduction programs: An application to CO₂ policy [R]. Discussion Paper 00 – 26 , Resources for the Future , 2000.
- [22]Zhang R B. Ministry of industry and information technology “Twelfth-five” energy saving and emission reduction measures [R]. 2010 Creation Conference on Science and Technology of China International Industrial Energy Saving & Pollution Reduction , Beijing , China , May 2010.
- [23]卞亦文. 非合作博弈两阶段生产系统的环境效率评价 [J]. *管理科学学报* , 2012 , 15(7) : 11 – 19.
Bian Yiwen. Eco-efficiency evaluation of non-cooperative game two-stage production system [J]. *Journal of Management Sciences in China* , 2012 , 15(7) : 11 – 19. (in Chinese)
- [24]王明喜,王明荣,尚 维,等. 最优减排策略及其实施的理论分析 [J]. *管理评论* , 2010 , 22(6) : 42 – 47.
Wang Mingxi , Wang Mingrong , Shang Wei , et al. A theoretical analysis of optimal emission reduction decision and its implementation [J]. *Management Review* , 2010 , 22(6) : 42 – 47. (in Chinese)
- [25]李凯杰,曲如晓. 碳排放交易体系初始排放权分配机制的研究进展 [J]. *经济学动态* , 2012 , 6: 130 – 138.
Li Kaijie , Qu Ruxiao. Study on Chinese initial distribution models of emission rights in the trading system of carbon emissions [J]. *Economics Information* , 2012 , 6: 130 – 138. (in Chinese)
- [26]倪冠群,徐寅峰,郑斐峰. 网上一口价在线拍卖的定价策略设计 [J]. *管理科学学报* , 2011 , 14(3) : 1 – 9.
Ni Guanqun , Xu Yinfeng , Zheng Feifeng. Pricing strategy for online “buy it now” auction [J]. *Journal of Management Sciences in China* , 2011 , 14(3) : 1 – 9. (in Chinese)
- [27]Capoor K , Ambrosi P. State and trends of the carbon market 2009 [R]. The World Bank Report , Washington D. C. , 2009.
- [28]刘树林. 数理经济学 [M]. 北京: 科学出版社 , 2008.
Liu Shulin. *Mathematical Economics* [M]. Beijing: Science Press , 2008. (in Chinese)

Enterprises’ optimal abatement investment behavior with the carbon emission constraint

WANG Ming-xi¹ , BAO Qin² , TANG Ling³ , WANG Shou-yang²

1. School of International Trade and Economics , University of International Business and Economics , Beijing 100029 , China;
2. Academy of Mathematics and Systems Science , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100190 , China;
3. School of Economics and Management , Beijing University of Chemical Technology , Beijing 100029 , China

Abstract: To meet the carbon reduction targets proposed in the 12th Five-Year Plan and 2020, China will establish its carbon trading market in seven provinces and cities in 2013 and all over the country by 2015. With the EU experience, to start the carbon trading market the government needs to set the total carbon emission permits. For the government to effectively allocate these permits across the enterprises participating in the emission reduction, there are several allocation formats, such as auction, unilateral and bilateral transactions. It is a natural question to explore whether the different allocation formats will allow China to minimize the emission reduction cost, given the emission reduction target. To answer this question, this paper studies the enterprises' emission reduction pathways and associated investment channels based on the production process, develops a cost minimization model of emission reduction investment and deduces its explicit solutions, and then discusses the implementation of the optimal abatement investment under several allocation formats. According to the results, some policy suggestions for implementing relevant policy measures are put forward.

Key words: abatement; emission reduction pathway; trade mechanism; optimal investment

附录:

问题(P1) 最优解的推导过程: 构造 Lagrange 函数

$$L(X, Y, E, \mu) = \sum_{i=1}^N \left[x_{1i} + y_{1i} + \nu_i \left(b_{1i} - e_{1i} - \alpha_{1i} x_{1i}^{\frac{1}{2}} - \beta_{1i} y_{1i}^{\frac{1}{2}} \right)^2 \right] - \sum_{i=1}^N (\pi_{1i} + \delta_1) (b_{1i} - e_{1i}) + \lambda \left\{ \sum_{i=1}^N \left[x_{2i} + y_{2i} + \nu_i \left(b_{2i} - e_{2i} - \alpha_{2i} x_{2i}^{\frac{1}{2}} - \theta_{2i} x_{2i}^{\frac{1}{2}} - \beta_{2i} y_{2i}^{\frac{1}{2}} - \phi_{2i} y_{2i}^{\frac{1}{2}} \right)^2 \right] - \sum_{i=1}^N (\pi_{2i} + \delta_2) (b_{2i} - e_{2i}) \right\} - \mu \left(K - \sum_{i=1}^N (e_{1i} + e_{2i}) \right) \tag{A1}$$

其中 μ 是 Lagrange 乘子. 式(A1) 分别关于 X, Y, E 和 μ 求偏导数得

$$\begin{cases} 1 - \nu_i [\alpha_{1i} (b_{1i} - e_{1i} - \alpha_{1i} x_{1i}^{\frac{1}{2}} - \beta_{1i} y_{1i}^{\frac{1}{2}}) + \lambda \alpha_{2i} (b_{2i} - e_{2i} - \alpha_{2i} x_{2i}^{\frac{1}{2}} - \theta_{2i} x_{2i}^{\frac{1}{2}} - \beta_{2i} y_{2i}^{\frac{1}{2}} - \phi_{2i} y_{2i}^{\frac{1}{2}})] x_{1i}^{-1/2} = 0 \\ 1 - \nu_i [\beta_{1i} (b_{1i} - e_{1i} - \alpha_{1i} x_{1i}^{\frac{1}{2}} - \beta_{1i} y_{1i}^{\frac{1}{2}}) + \lambda \beta_{2i} (b_{2i} - e_{2i} - \alpha_{2i} x_{2i}^{\frac{1}{2}} - \theta_{2i} x_{2i}^{\frac{1}{2}} - \beta_{2i} y_{2i}^{\frac{1}{2}} - \phi_{2i} y_{2i}^{\frac{1}{2}})] y_{1i}^{-1/2} = 0 \\ 1 - \theta_{2i} \nu_i (b_{2i} - e_{2i} - \alpha_{2i} x_{2i}^{\frac{1}{2}} - \theta_{2i} x_{2i}^{\frac{1}{2}} - \beta_{2i} y_{2i}^{\frac{1}{2}} - \phi_{2i} y_{2i}^{\frac{1}{2}}) x_{2i}^{-1/2} = 0 \\ 1 - \phi_{2i} \nu_i (b_{2i} - e_{2i} - \alpha_{2i} x_{2i}^{\frac{1}{2}} - \theta_{2i} x_{2i}^{\frac{1}{2}} - \beta_{2i} y_{2i}^{\frac{1}{2}} - \phi_{2i} y_{2i}^{\frac{1}{2}}) y_{2i}^{-1/2} = 0 \\ \delta_1 + \pi_{1i} + \mu - 2\nu_i (b_{1i} - e_{1i} - \alpha_{1i} x_{1i}^{\frac{1}{2}} - \beta_{1i} y_{1i}^{\frac{1}{2}}) = 0 \\ \lambda (\delta_2 + \pi_{2i}) + \mu - 2\lambda \nu_i (b_{2i} - e_{2i} - \alpha_{2i} x_{2i}^{\frac{1}{2}} - \theta_{2i} x_{2i}^{\frac{1}{2}} - \beta_{2i} y_{2i}^{\frac{1}{2}} - \phi_{2i} y_{2i}^{\frac{1}{2}}) = 0 \\ K - \sum_{i=1}^N (e_{1i} + e_{2i}) = 0 \\ i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \tag{A2}$$

解方程组(A2) 可得式(1). 这样, 仅说明了式(1) 是使得优化问题(P1) 取得极大值的必要条件(或驻点). 接着, 将证明式(1) 确实是问题(P1) 的最优解.

令 $F_{1i}(x_{1i}, y_{1i}, e_{1i}) = b_{1i} - e_{1i} - \alpha_{1i} x_{1i}^{\frac{1}{2}} - \beta_{1i} y_{1i}^{\frac{1}{2}}$, 则 $F_{1i}(x_{1i}, y_{1i}, e_{1i})$ 的 Hessian 矩阵

$$D^2 F_{1i}(x_{1i}, y_{1i}, e_{1i}) = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} \alpha_{1i} x_{1i}^{-\frac{3}{2}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{4} \beta_{1i} y_{1i}^{-\frac{3}{2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

的所有主子式均非负, 即 $D^2 F_{1i}(x_{1i}, y_{1i}, e_{1i})$ 是一个半正定矩阵. 根据刘树林^[28] (定理 7.4.5) 可知 $F_{1i}(x_{1i}, y_{1i}, e_{1i})$ 是一个凸函数. $F_{1i}(x_{1i}, y_{1i}, e_{1i})$ 再经过一个单调递增的凸变换 $\nu_i(\cdot)^2$ 仍是一个凸函数(具体证明过程见刘树林^[28], 定理 7.4.

7). 而 $x_{1i} + y_{1i}$ 和 $\sum_{i=1}^N (\delta_1 + \pi_{1i}) (b_{1i} - e_{1i})$ 均是线性函数(既是凸的也是凹的), 根据刘树林^[28] (定理 7.4.6) 可立得

$$\sum_{i=1}^N \left[x_{1i} + y_{1i} + v_i (F_{1i}(x_{1i}, y_{1i}, e_{1i}))^2 \right] - \sum_{i=1}^N (\delta_1 + \pi_{1i})(b_{1i} - e_{1i})$$

是一个多元凸函数. 记

$$F_{2i}(x_{2i}, y_{2i}, e_{2i}) = b_{2i} - e_{2i} - \alpha_{2i}x_{2i}^{\frac{1}{2}} - \theta_{2i}y_{2i}^{\frac{1}{2}} - \beta_{2i}y_{1i}^{\frac{1}{2}} - \phi_{2i}y_{2i}^{\frac{1}{2}}$$

同理可得

$$\sum_{i=1}^N \left[x_{2i} + y_{2i} + v_i (F_{2i}(x_{2i}, y_{2i}, e_{2i}))^2 \right] - \sum_{i=1}^N (\delta_2 + \pi_{2i})(b_{2i} - e_{2i})$$

也是一个多元凸函数. 再次利用刘树林^[28](定理 7.4.6)可知, 问题(P1)中的目标函数是一个多元凸函数.

注意到问题(P1)中的约束条件是一个有界闭集, 即是一个紧集, 所以目标函数一定存在最优解. 而对凸函数而言, 其驻点为其极小值点. 根据刘树林^[28](定理 8.4.5), 此极小值点必为最小值点, 即为优化问题(P1)的最优解.

问题(P2)最优解的推导过程: 目标函数分别关于 $x_{1i}, x_{2i}, y_{1i}, y_{2i}, e_{1i}$ 和 e_{2i} 求偏导数并令其值为 0, 即可得式(2). 类似于问题(P1)最优解的推导过程可以证明式(2)的充分性.

命题 1 的证明 在式(3)中令 p_1 和 p_2 的值同时取 0, 即退化为式(2), 然后再与式(1)比较, 即得结论.

命题 2 的证明 比较式(1)和式(3), 价格 (p_{1i}, p_{2i}) 与 $\left(\frac{2(B-K) + (\delta_1 + \pi_{1i} - \lambda(\delta_2 + \pi_{2i}))(J_{12} + J_2)}{J} - \pi_{1i}, \frac{2(B-K) + (\lambda(\delta_2 + \pi_{2i}) - \delta_1 - \pi_{1i})(J_1 + J_{12})}{\lambda J} - \pi_{2i} \right)$ 的大小关系共有 9 种, 但可以把其归为 7 种情形进行讨论.

(I) 当 $p_{1i} \geq \frac{2(B-K) + (\delta_1 + \pi_{1i} - \lambda(\delta_2 + \pi_{2i}))(J_{12} + J_2)}{J} - \pi_{1i}$ 且 $p_{2i} > \frac{2(B-K) + (\lambda(\delta_2 + \pi_{2i}) - \delta_1 - \pi_{1i})(J_1 + J_{12})}{\lambda J} - \pi_{2i}$ 时, 每个企业在研发、设备和行为减排上的投资水平严格高于最优投资水平, 所有企业的碳排放总量严格小于碳排放预算 K , 但所有企业的总成本却严格大于最优投资水平下的总成本.

(II) 当 $p_{1i} \leq \frac{2(B-K) + (\delta_1 + \pi_{1i} - \lambda(\delta_2 + \pi_{2i}))(J_{12} + J_2)}{J} - \pi_{1i}$ 且 $p_{2i} < \frac{2(B-K) + (\lambda(\delta_2 + \pi_{2i}) - \delta_1 - \pi_{1i})(J_1 + J_{12})}{\lambda J} - \pi_{2i}$ 时, 情形与(I)相反.

(III) 当 $p_{1i} = \frac{2(B-K) + (\delta_1 + \pi_{1i} - \lambda(\delta_2 + \pi_{2i}))(J_{12} + J_2)}{J} - \pi_{1i}$ 且 $p_{2i} = \frac{2(B-K) + (\lambda(\delta_2 + \pi_{2i}) - \delta_1 - \pi_{1i})(J_1 + J_{12})}{\lambda J} - \pi_{2i}$ 时, 企业的个体减排投资恰好实施最优投资水平, 以最小减排成本实现既定的碳排放预算 K .

(IV) 当 $p_{1i} > \frac{2(B-K) + (\delta_1 + \pi_{1i} - \lambda(\delta_2 + \pi_{2i}))(J_{12} + J_2)}{J} - \pi_{1i}$ 且 $p_{2i} < \frac{2(B-K) + (\lambda(\delta_2 + \pi_{2i}) - \delta_1 - \pi_{1i})(J_1 + J_{12})}{\lambda J} - \pi_{2i}$ 时, 2 期的减排投资水平严格低于对应的最优量.

(V) 当 $p_{1i} > \frac{2(B-K) + (\delta_1 + \pi_{1i} - \lambda(\delta_2 + \pi_{2i}))(J_{12} + J_2)}{J} - \pi_{1i}$ 且 $p_{2i} = \frac{2(B-K) + (\lambda(\delta_2 + \pi_{2i}) - \delta_1 - \pi_{1i})(J_1 + J_{12})}{\lambda J} - \pi_{2i}$ 时, 1 期的减排投资水平严格高于对应的最优量.

(VI) 当 $p_{1i} < \frac{2(B-K) + (\delta_1 + \pi_{1i} - \lambda(\delta_2 + \pi_{2i}))(J_{12} + J_2)}{J} - \pi_{1i}$ 且 $p_{2i} > \frac{2(B-K) + (\lambda(\delta_2 + \pi_{2i}) - \delta_1 - \pi_{1i})(J_1 + J_{12})}{\lambda J} - \pi_{2i}$ 时, 2 期的减排投资水平严格高于对应的最优量.

(VII) 当 $p_{1i} < \frac{2(B-K) + (\delta_1 + \pi_{1i} - \lambda(\delta_2 + \pi_{2i}))(J_{12} + J_2)}{J} - \pi_{1i}$ 且 $p_{2i} = \frac{2(B-K) + (\lambda(\delta_2 + \pi_{2i}) - \delta_1 - \pi_{1i})(J_1 + J_{12})}{\lambda J} - \pi_{2i}$ 时, 1 期的减排投资水平严格低于对应的最优量.

命题 3 的证明 若企业在 1 期以免费方式获取碳排放配额, 而在 2 期以拍卖方式获得碳排放配额, 则单个企业的优化问题为

$$\min_{x_{1i}, y_{1i}, e_{1i}, x_{2i}, y_{2i}, e_{2i}} \left[x_{1i} + y_{1i} + v_i (b_{1i} - e_{1i} - \alpha_{1i}x_{1i}^{\frac{1}{2}} - \beta_{1i}y_{1i}^{\frac{1}{2}})^2 - \pi_{1i}(b_{1i} - e_{1i}) + \lambda [x_{2i} + y_{2i} + v_i (b_{2i} - e_{2i} - \alpha_{2i}x_{2i}^{\frac{1}{2}} - \theta_{2i}x_{1i}^{\frac{1}{2}} - \beta_{2i}y_{1i}^{\frac{1}{2}} - \phi_{2i}y_{2i}^{\frac{1}{2}})^2 + p_{2i}e_{2i} - \pi_{2i}(b_{2i} - e_{2i}) \right] \tag{A3}$$

因问题(P3)在 $p_1 = 0$ 时即为问题(A3), 所以问题(P3)在 $p_1 = 0$ 时的解(3)也即为问题(A3)的解.

$$\begin{cases} \hat{x}_{1i} = \left(\frac{\pi_{1i}}{2} \alpha_{1i} + \frac{\lambda(p_{2i} + \pi_{2i})}{2} \alpha_{2i} \right)^2 & \hat{y}_{1i} = \left(\frac{\pi_{1i}}{2} \beta_{1i} + \frac{\lambda(p_{2i} + \pi_{2i})}{2} \beta_{2i} \right)^2 & \hat{z}_{1i} = \frac{1}{v_i} \left(\frac{\pi_{1i}}{2} \right)^2 \\ \hat{x}_{2i} = \left(\frac{p_{2i} + \pi_{2i}}{2} \theta_{2i} \right)^2 & \hat{y}_{2i} = \left(\frac{p_{2i} + \pi_{2i}}{2} \phi_{2i} \right)^2 & \hat{z}_{2i} = \frac{1}{v_i} \left(\frac{p_{2i} + \pi_{2i}}{2} \right)^2 \end{cases} \quad (A4)$$

类似于命题 2 的证明过程,对比式(A4)和式(1),可立得命题 3 中的结论.

命题 4 的证明 类似于均衡解(1)的推导方法,从目标函数(P4)中,可以得到其最优解为

$$\begin{cases} \hat{x}_{1i} = \left(\frac{\pi_{1i} + \lambda w}{2} \alpha_{1i} + \frac{\lambda(w + \pi_{2i})}{2} \alpha_{2i} \right)^2 \\ \hat{y}_{1i} = \left(\frac{\pi_{1i} + \lambda w}{2} \beta_{1i} + \frac{\lambda(w + \pi_{2i})}{2} \beta_{2i} \right)^2 & \hat{z}_{1i} = \frac{1}{v_i} \left(\frac{\pi_{1i} + \lambda w}{2} \right)^2 \\ \hat{x}_{2i} = \left(\frac{w + \pi_{2i}}{2} \theta_{2i} \right)^2 & \hat{y}_{2i} = \left(\frac{w + \pi_{2i}}{2} \phi_{2i} \right)^2 & \hat{z}_{2i} = \frac{1}{v_i} \left(\frac{w + \pi_{2i}}{2} \right)^2 \end{cases} \quad (A5)$$

要想使得单边交易模式下的企业个体减排投资实施最优减排投资(1),必须在各个路径上的减排投资相同,即式(A5)与式(1)完全相同,即

$$\begin{cases} \pi_{1i} + \lambda w = \frac{2(B - K) + (\delta_1 + \pi_{1i} - \lambda(\delta_2 + \pi_{2i}))(J_{12} + J_2)}{J} \\ \lambda(\pi_{2i} + w) = \frac{2(B - K) + (\lambda(\delta_2 + \pi_{2i}) - \delta_1 - \pi_{1i})(J_1 + J_{12})}{J} \end{cases} \quad (A6)$$

式(A6)隐含着

$$\frac{(\delta_1 + \pi_{1i} - \lambda(\delta_2 + \pi_{2i}))(J_{12} + J_2)}{J} - \pi_{1i} = \frac{(\lambda(\delta_2 + \pi_{2i}) - \delta_1 - \pi_{1i})(J_1 + J_{12})}{J} - \lambda\pi_{2i} \quad (A7)$$

注意到 $J = J_1 + 2J_{12} + J_2$, 于是由式(A7)可得

$$\delta_1 = \lambda\delta_2 \quad (A8)$$

因此,由式(A6)和(A8)两式可知,当 $\delta_1 \neq \lambda\delta_2$ 时,式(A5)中的减排投资量不可能等于式(1)中对应的减排投资量.当

$\delta_1 = \lambda\delta_2$ 时,由(A6)可得 $w = \frac{2(B - K) - \pi_{1i}(J_1 + J_{12}) - \lambda\pi_{2i}(J_{12} + J_2)}{\lambda J}$, 此时式(A5)等同于式(1).

命题 5 的证明 类似于均衡解(1)的推导方法,从目标函数(P5)中,可以得到双边交易模式下企业的减排投资为

$$\begin{cases} \check{x}_{1i} = \frac{1}{4} \left((w_1 + \pi_{1i}) \alpha_{1i} + \lambda(w_2 + \pi_{2i}) \alpha_{2i} \right)^2 \\ \check{y}_{1i} = \frac{1}{4} \left((w_1 + \pi_{1i}) \beta_{1i} + \lambda(w_2 + \pi_{2i}) \beta_{2i} \right)^2 \\ \check{z}_{1i} = \frac{1}{4v_i} (w_1 + \pi_{1i})^2 \\ \check{x}_{2i} = \frac{1}{4} \theta_{2i}^2 (w_2 + \pi_{2i})^2 & \check{y}_{2i} = \frac{1}{4} \phi_{2i}^2 (w_2 + \pi_{2i})^2 & \check{z}_{2i} = \frac{1}{4v_i} (w_2 + \pi_{2i})^2 \end{cases} \quad (A9)$$

对比式(A9)和式(1)两式,若要双边交易模式下企业实施最优减排投资水平,则有

$$\begin{cases} \pi_{1i} + w_1 = \frac{2(B - K) + (\delta_1 + \pi_{1i} - \lambda(\delta_2 + \pi_{2i}))(J_{12} + J_2)}{J} \\ \lambda(\pi_{2i} + w_2) = \frac{2(B - K) + (\lambda(\delta_2 + \pi_{2i}) - \delta_1 - \pi_{1i})(J_1 + J_{12})}{J} \end{cases} \quad (A10)$$

于是,从式(A10)可得:当 $\delta_1 = \lambda\delta_2$ 时,有

$$w_1 = \lambda w_2 = \frac{2(B - K) - \pi_{1i}(J_1 + J_{12}) - \lambda\pi_{2i}(J_{12} + J_2)}{J} \quad (A11)$$

此时式(A9)等同于式(1).当 $\delta_1 \neq \lambda\delta_2$ 时,类似于命题 2 的证明,可得命题 5 中的其他结论.