

【产业经济】

碳交易市场链接的成本与福利分析

——基于 MAC 曲线的实证研究

傅京燕^{1,2}, 代玉婷¹

- (1. 暨南大学经济学院, 广东 广州 510632;
2. 暨南大学资源环境与可持续发展研究所, 广东 广州 510632)

[摘要] 全国统一碳排放权交易市场的建立拟于 2016 年启动, 但碳交易市场的链接存在经济福利的不确定性, 因此, 需要量化碳交易市场给社会带来的福利影响。本文基于 2001—2012 年省级面板数据构造总减排成本函数, 进而利用边际减排成本(MAC)曲线模拟分析了高碳区、中碳区和低碳区的三个“交易代表”在完全竞争的碳交易市场中的成本和福利变化。研究表明, 以碳强度衡量的区域异质性会导致 MAC 曲线的差异化——低碳区 MAC 曲线呈递增型, 高碳区和中碳区的 MAC 曲线呈倒 U 型, 而倒 U 型的 MAC 曲线使得市场碳排放权的总供给曲线呈水平状, 供给和需求曲线决定了市场均衡碳价为 217.22 元/吨 CO₂e; 为履行 2020 年碳强度下降 40%—45% 的减排目标, 建立统一的碳交易市场可使交易者平均每年的减排开支下降 3.94%。本文的主要启示是: 发挥市场手段在解决温室气体排放问题中的重要作用, 重视排放行为的产权化, 根据各省份发展阶段以兼顾公平, 并辅以必要的政策支持, 通过扩大交易规模逐步实现碳交易市场的地区融合。

[关键词] 边际减排成本; 碳交易市场; 贸易所得; 成本—福利分析

[中图分类号]F424.1 **[文献标识码]**A **[文章编号]**1006-480X(2015)09-0084-15

一、问题提出

碳交易市场的建立是中国推进生态文明建设的重要体制创新, 中国拟于 2016 年启动全国碳排放权交易市场(以下简称碳交易市场)以实现现有试点的链接, 这意味着拥有高边际减排成本的交易方将能够从国内其他低成本的交易市场购买碳排放权实现履约。碳交易市场的链接能够增强二氧化碳减排的有效性, 增加市场流动性, 并且降低区域间减排力度差异造成的碳泄露风险, 但也会影响交易者的成本—收益和各省份之间的利益分配^[1], 因此需要对碳交易市场链接存在的经济福利不确定性^[2]予以量化分析。不同地区减排成本的差异性建立碳交易市场的前提条件, 碳交易市场

[收稿日期] 2015-08-06

[基金项目] 国家自然科学基金项目“基于强度减排的碳交易机制对产业竞争力影响的理论与 ECGE 模拟”(批准号 71273115); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(暨南远航计划)“时间约束下中国碳排放峰值预测及低碳政策有效性研究”(批准号 15JNYH010)。

[作者简介] 傅京燕(1973—), 女, 北京人, 暨南大学经济学院教授, 博士生导师, 暨南大学资源环境与可持续发展研究所副所长; 代玉婷(1991—), 女, 河南信阳人, 暨南大学经济学院硕士研究生。通讯作者: 傅京燕, 电子邮箱: fuan2@163.com。

有效性的基本评判标准是有效的市场价格等于最小化的边际减排成本^[3],因此边际减排成本是分析环境政策工具影响效果的标准工具。Weitzman^[4]1974年发表的经典文献中也指出,边际成本曲线的形状、截距和斜率是决定使用价格政策还是数量政策的关键。Ellerman and Decaux^[5]利用麻省理工学院联合项目中研发的EPPA(Emissions Prediction and Policy Analysis)模型构造边际减排成本曲线(Marginal Abatement Cost Curve,MACC),奠定了利用MAC曲线分析碳交易市场链接的理论基础。

近年来MAC的估值方法及其性质在气候变化背景下再次受到环境经济学家的关注。Wilson and Swisher^[6]、Zhang and Folmer^[7]以及DU et al.^[8]等学者对现有文献中减排成本的核算方法进行了探讨和总结,结果差异很大,例如对京都议定书履约国减排成本的估计,不同模型所得结果差异有5个百分点之大^[9]。在估计MAC曲线的基础上,可以估计不同政策情景下碳排放权均衡价格。Ellerman and Decaux^[5]运用EPPA模型得到全球12个区域的MAC,并利用边际减排成本分析了基于市场来完成京都议定书下的碳减排目标的优点。他们发现,若OECD国家之间建立碳交易市场链接,美国、日本、欧盟—12(1992年)和其他OECD国家将分别获得23亿美元、104.9亿美元、3.3亿美元和0.1亿美元的贸易所得,每个参与国的福利都得到净增加。

中国对二氧化碳边际减排成本的研究有限,经济学分析主要集中于估值方法的测度。陈诗一^[10]使用方向性距离函数估计了行业的边际减排成本并将其作为征收碳税的依据。魏楚^[11]也使用方向性距离函数,对中国各地级市的边际减排成本以及影响因素进行了定量分析,发现东部显著高于中部和西部,区域间的差异化日趋明显。吴力波等^[12]通过CGE模型模拟了中国各省份的边际减排成本曲线,并通过分析边际减排成本曲线形状和斜率的动态特征对碳税和碳交易机制的选择进行了比较。由于中国的碳交易试点在2013年才开始运行,国内对碳交易的实证研究不多,更是缺乏对碳交易市场链接的经济绩效和市场行为的研究。本文旨在利用MAC曲线量化建立统一碳交易市场对社会福利的影响,并利用MAC曲线对中国碳交易市场链接的福利效应进行定量分析。本研究将为中国通过市场化机制手段实现2020年碳排放强度目标和2030年碳排放总量目标提供政策依据。

二、模型构建与福利分析

1. 模型构建

边际减排成本是环境经济学分析的重要工具,一些学者对其估值方法进行专门研究^[13],另一些学者则将其应用于环境经济学领域的排放权交易^[14]。边际减排成本曲线是以温室气体减排量为横轴,以最后一单位减排量所对应的减排成本为纵轴的曲线图^[15]。MAC曲线描述了温室气体减排量和影子价格之间的函数关系,已成为分析碳排放交易的经典工具。最早的边际减排成本曲线产生于20世纪70年代末期,用于研究两次石油价格冲击后如何减少石油的消费;到20世纪90年代初,减排成本曲线开始被用于推算电力消费的节约量^[16]。构建边际减排成本曲线的基本方法有两种:一种是自下而上的微观方法,另一种是自上而下的宏观方法。微观层面上,最著名的MAC曲线是由McKinsey公司构建的,其中包含300项减排策略^[17]。可计算一般均衡模型属于自上而下的宏观模型,Ellerman and Decaux^[5]利用该模型结合全球MAC曲线首次对京都议定书诞生的碳交易机制的成本和福利效应进行了研究。

本文拟合边际减排成本曲线的模型结构借鉴Ellerman and Decaux^[5],该文利用可计算一般均衡模型拟合MAC曲线(MACC),确定减排量和边际减排成本之间存在二次函数关系: $MAC = \beta_1 ER^2 + \beta_2 ER$,其中MAC表示边际减排成本,ER表示减排量。在构造MAC曲线时,Ellerman and Decaux^[5]的研究使用的是宏观模型,但本文利用自下而上的方法从微观层面核算减排成本,自下而上的模型有

助于描述技术细节,通过核算 MAC 和评估不同减排项目的成本效益,可以筛选出可行有效的技术策略^[8]。同时, MAC 会受到很多因素的影响,Baker et al.^[18]认为环境政策会通过公共 R&D 投入等途径引起技术变化,技术变化又会导致边际减排成本改变。因此,中国区域技术水平的差异性可能使 MAC 在区域间存在差异。此外,现有文献中常使用碳强度作为衡量技术水平的指标^[19,20],所以本文将碳强度作为衡量区域间技术水平差异性的指标,探讨区域间差异性对 MAC 曲线的影响。考虑到数据的可获性,本文去除了中国香港、中国台湾、中国澳门和西藏自治区的样本数据,将余下 30 个省份按碳强度划分为高碳区、中碳区和低碳区,继而考虑了区域异质性对边际减排成本的影响分析。另外,本文在研究中发现,虽然中国各省份 2001—2012 年碳强度表现为整体下降趋势,但并非逐年下降,利用平均减排成本替代边际成本来拟合边际减排成本曲线并不准确。所以本文并未采用现有文献^[21,22]先计算平均减排成本,再用平均减排成本替代边际减排成本的方法。而是首先通过构建总减排成本和减排量之间的函数关系,再利用总减排成本和边际减排成本之间的一阶导数关系获得 MAC 曲线。总减排成本函数和边际减排成本函数的公式如下:

$$TC_{it} = b_1 ER_{it}^3 + b_2 ER_{it}^2 + b_3 ER_{it} + \alpha_i + v_{it} \quad (1)$$

$$MAC_{it} = \frac{d(TC_{it})}{d(ER_{it})} = 3b_1 ER_{it}^2 + 2b_2 ER_{it} + b_3 \quad (2)$$

其中, $t=1, 2, \dots, T$ 表示时间; $i=1, 2, \dots, n$ 表示各省份; α_i 表示各省份的特异性; v_{it} 表示相互独立的随机误差项; TC_{it} 表示第 i 个省份在 t 时期的总减排成本; ER_{it} 表示第 i 个省份在 t 时期的减排量; MAC_{it} 表示地区 i 的边际减排成本。

2. 福利分析

利用边际减排成本曲线,就可以分析各方主体因参与碳交易而获得的福利增量。现假定碳交易市场有两个参与者,二者具有不同的 MAC 曲线,边际减排成本的不同是其参与碳交易市场的基本前提。图 1 包含两

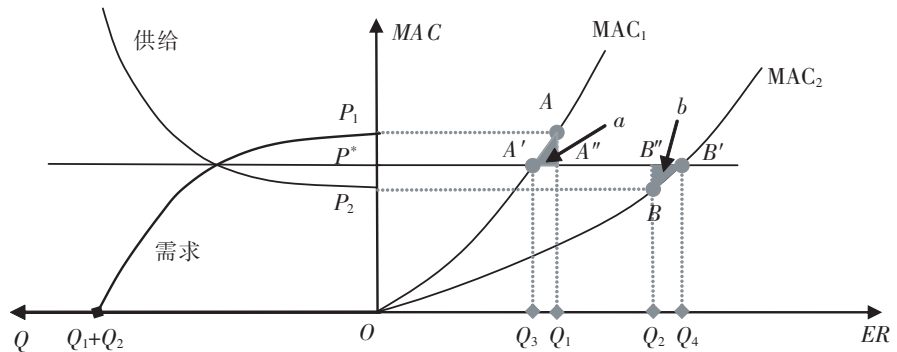


图 1 边际减排成本曲线

资料来源:作者绘制。

条 MAC 曲线,分别为 MAC_1 和 MAC_2 ;横轴 ER 表示减排量,纵轴 MAC 表示边际减排成本(影子价格);点 $A(Q_1, P_1)$ 表示地区 1 减排 Q_1 时的边际减排成本为 P_1 ;点 $B(Q_2, P_2)$ 表示地区 2 减排 Q_2 时的边际减排成本为 P_2 ; Q_3 和 Q_4 表示两地区参与碳交易后所选择的减排量。当不存在统一碳交易市场时,在一定时间和减排水平下, MAC 曲线和横轴所围成的积分面积代表各地区单独减排时花费的总成本。一旦碳排放权可以进行交易,那么市场将在“看不见的手”的指引下,优化资源配置,促使交易者的减排成本最小化,社会总福利增加。

本文将各省份作为独立的交易体进行分析,不同省份间开展碳交易也是一种贸易行为。当市场均衡碳价低于交易体单独减排的边际成本(或影子价格)时,该交易体会在碳交易市场购买碳排放权,这里将此需求量称为外省份调入量;反之,当市场均衡碳价高于交易体单独减排的边际成本时,

交易体会选择增加减排量,并且将这部分新增供应量卖出,这里称其为调出量。在存在碳交易市场的背景下,通过加总所有交易体的外省份调入量和调出量,就可以获得不同价格下的市场总需求和总供给,而需求曲线和供给曲线的交点则决定了市场均衡碳价。

本文使用表 1 来比较贸易前后交易双方的成本和福利变化。其中 P^* 由碳交易市场总供给和总需求来决定,表示碳交易市场的均衡碳价; a 和 b 分别表示图 1 中两块阴影部分的面积。本文假定在特定时间范围内,地区 1 和地区 2 必须完成 Q_1 和 Q_2 的减排量。开展碳交易前,地区 1 和地区 2 的减排成本可用区域 OQ_1A 和区域 OQ_2B 的面积表示;二者参与碳交易后,两地区只需共同完成 Q_1+Q_2 的减排量,由于地区 1 和地区 2 分别获得了 a 和 b 的贸易所得,所以最终支付的减排成本(减排净成本)分别为面积 $S(OA'A''Q_1)$ 和 $S(OQ_2B)-b$ 。

表 1 碳交易的福利分析

	贸易前		贸易后	
	地区 1	地区 2	地区 1	地区 2
减排限制	Q_1	Q_2	两地区共减排 Q_1+Q_2	
边际减排成本	P_1	P_2		P^*
减排成本	$S(OQ_1A)$	$S(OQ_2B)$	$S(OA'Q_3)$	$S(OB'Q_4)$
调入(+)/调出(-)	0	0	$A'A''$	$-B'B'$
贸易所得	0	0	a	b
净成本	$S(OQ_1A)$	$S(OQ_2B)$	$S(OA'A''Q_1)$	$S(OQ_2B)-b$

注: $S(\cdot)$ 表示括号区域的面积。

资料来源:作者计算。

三、数据处理

1. 温室气体排放的数据处理

本文中各省份温室气体排放总量可以根据终端能源消费导致的温室气体排放的加总得到,核算方程参照《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》。具体公式如下:

$$GHG = \sum_{k=1}^3 E_k \times GWP_k \tag{3}$$

$$E_k = \sum_{j=1}^8 FUEL_j \times NCV_j \times EF_{jk} \tag{4}$$

其中, GHG 表示温室气体排放总量,或称为二氧化碳当量值(CO_2e)。变量 $E_k(k=1,2,3)$ 分别表示二氧化碳、甲烷和一氧化二氮这三种温室气体的排放量。目前控排国家主要是针对二氧化碳的排放实行减排方案,但是对氮氧化物和甲烷的关注度也日益增加。Kuik et al.^[23]认为如果使用 MAC 来衡量碳价,则需要碳交易市场在任何时点(When)、任何温室气体(What)和任何区域(Where)之间实现边际减排成本的“时时相等,处处相等”原则。这意味着在核算 MAC 时应尽可能包含多种温室气体,以防止碳泄漏的发生。因此,本文核算了三种温室气体的排放,以碳当量作为计量单位。 GWP (Global Warming Potential)表示全球变暖潜能值, GWP 与计算时使用的评估期的跨度有关。本文中的 GWP 的评估期为 100 年,依据 2007 年政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次评估报告的结果,二氧化碳 100 年的 GWP 为 1,甲烷为 25,一氧化二氮为 298。变量 $FUEL_j, j=1,2,\dots,8$ 表示第 j 种化石能源的终端消费量,本文共将 8 种化石能源纳入核算体系。 NCV (Net Calorific Value)为《中

国能源统计年鉴》(2013)附录 4 提供的中国化石能源的平均低位发热值。 EF (Emission Factor)为温室气体排放因子,该值与燃料燃烧的技术和环境有关,本文采用 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南中公布的缺省排放因子。为简化计算,文中假定燃料的利用方式为能源工业中固定源燃烧,且得到充分氧化。

对于《中国统计年鉴》中一些缺失的数据本文分别对其进行如下处理:①浙江、安徽、福建、江西、湖南和广西 2000—2003 年的天然气消费量没有统计数据,而 2004 年依次为 0.32 亿立方米、0.15 亿立方米、0.6 亿立方米、0 亿立方米、0.06 亿立方米和 0.02 亿立方米,所以可以认为之前年份的消费量为零。②有些省份的能源消费起初出现小幅增加,然后逐渐递减为零。例如,重庆市 2001—2009 年的原油消费量从 0.19 亿立方米增加到 3.17 亿立方米,随后又减少到 0.01 亿立方米,所以可以认为没有统计的年份消费量为零。③对于宁夏和海南,没有统计数据的年份前后的消费量都很大,所以不可以认为其为零,在拟合模型时本文将这些年份的缺失数据进行剔除。

表 2 为各类能源品种的平均低位发热值和排放因子,表中的煤炭是煤产品的统称,《中国能源统计年鉴》公布了洗精煤、洗中煤和煤泥三种煤的发热值,文中采用三种煤型的平均值作为煤炭的发热值。与此相似,煤炭的二氧化碳排放因子,也取无烟煤、炼焦煤、其他沥青煤和亚沥青煤二氧化碳缺省排放因子的平均值。燃料油主要是由原油的裂化残渣油和直馏残渣油制成,它的热值和原油相同,所以本文令燃料油的排放因子与原油相同。

表 2 热值和排放因子

能源品种	平均低位发热值 (kJ/kg)	缺省排放因子(kg/tj)		
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O
煤炭	23626	95900	1	1.5
焦炭	28435	107000	1	1.5
原油	41816	73300	3	0.6
汽油	43070	74100	3	0.6
煤油	43070	71500	3	0.6
柴油	42652	74100	3	0.6
燃料油	41816	73300	3	0.6
天然气	38931	56100	1	0.1

注:天然气的平均低位发热值单位为 kJ/m³。

资料来源:《中国能源统计年鉴》(2013)附录 4 各种能源折标准煤参考系数;《IPCC 国家温室气体清单指南 2006》。

根据公式(3)和公式(4)以及地区生产总值等相关数据,本文计算了 2000—2012 年中国 30 个省份的温室气体排放量和碳强度。图 2 是 2000—2012 年各省份平均碳排放量和平均碳强度值,从中可以看出:以 1995 年为基准年剔除价格因素计算实际碳排放强度,在 2000—2012 年期间山西的平均碳强度最高,达 18.97 吨 CO₂e/万元,其次是宁夏,碳强度最低的省份是广东;山东的碳排量平均值最高,其次是河北,青海最低;碳排放量高的省份,其碳强度并不一定高;碳排放量低的省份,其碳强度也不一定最低。

一般而言,经济发展水平高的地区,其服务业比重也相对较高,因此这些地区的碳强度会相对较低。并且由于经济水平和技术水平上的差异,不同省份减少单位碳排放量所花费的减排成本各不相同。为了研究碳强度对减排成本曲线的影响,本文将中国 30 个省份按碳强度进行划分,取 2000—2012 年各省份平均碳强度中最大值和最小值的平均三等分作为划分区间的临界值,所得结果如下:①高碳区指碳强度平均值不低于 7 吨 CO₂e/万元的地区,包括山西、宁夏、贵州、内蒙古、新疆、甘肃、

辽宁、青海和河北共9个省份。②中碳区指碳强度4—7吨CO₂e/万元的区域,包括黑龙江、陕西、吉林、云南、安徽、河南、湖北、山东、天津、四川与湖南共11个省份。③低碳区指碳强度平均值不高于4吨CO₂e/万元的区域,包括江西、上海、重庆、海南、江苏、广西、浙江、北京、福建和广东共计10个省份。得到碳强度和地区生产总值,减排量可以根据连续两年的碳强度变化乘以该年实际地区生产总值而得到。

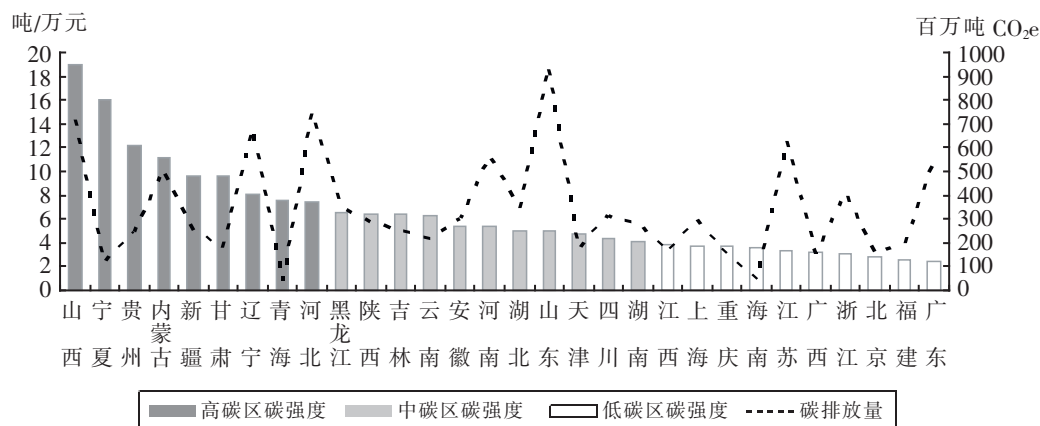


图2 2000—2012年各省份平均碳排放量和平均碳强度

资料来源:作者绘制。

2. 成本数据的核算

与节能减排投资相关的成本包括运行成本和资本成本。运行成本是在节能减排项目运营时产生的相关成本,一般包括维修费用和人工福利等。资本成本往往是在项目建设初期产生的一次性成本,属于固定资产的投资。目前在中国官方的统计年鉴中可以找到1995—2012年分地区的国有能源工业固定资产投资数据以及1994—1995年和2000—2012年的能源工业投资数据。一方面,能源工业投资并非只包括固定资产投资数据,因此不能将能源工业投资作为节能减排项目的静态投资数据;另一方面,中国的能源工业长期以来国有经济占主导地位,所以为了克服节能减排投资数据的不可获得性,在假定各地区相关能源项目的新建或改造至少不会带来能源效率下降或环境恶化的基础上,可以将各省份的国有能源工业固定资产投资数据作为节能减排投资的近似值。

各省份每年的总减排成本是减排项目周期内的年度等效成本的总和,年度等效成本包括资本回收成本和运行成本。不同地区减排项目的时间跨度不同,这里统一假定减排投资的平均周期是7年。这一假定是基于2012年《温室气体自愿减排项目审定与核证指南》的中国自愿减排(China Certified Emission Reduction, CCER)项目的周期审定准则,根据该准则CCER项目周期可选择7年或10年。如果选定项目周期为10年,则基于现有1995—2012年的投资数据,只能得到2004—2012年的总减排成本数据,所以为了扩展面板数据的时间维度使模型估计更加稳健,本文选择7年作为项目周期。

(1)资本回收成本。节能减排投资的资本成本属于一次性成本,需要将其转化到整个项目周期的等效年度内,使之成为年度资本回收成本。年度资本回收成本的计算公式是:

$$CRC = PV \times \frac{r \times (1+r)^t}{(1+r)^t - 1} \quad (5)$$

其中, CRC 表示资本回收成本, PV 是节能减排投资现值, r 是指贴现率, t 代表投资周期,本文中 $t=7$ 。从中国人民银行官方网站可以获得1995—2012年每年的5年期以上人民币贷款基准利率。由于一年期内国家可能多次调整利率,所以这里的贴现率为相应年份的长期贷款利率的平均值。

(2)运行成本。年度运行成本包括燃料动力费、人员工资福利、修理费和其他费用。国家和省级的统计年鉴上并没有记录节能减排项目的运行成本,所以需要通过核算若干种CCER项目的运行成本相对于静态投资的近似比率来估计。目前中国CCER项目可分为发电项目和森林经营碳汇项目两类,以发电项目为主,发电项目主要包括水电项目、风电工程和光伏发电项目,也包括沼气发电项目和瓦斯发电项目。由于森林经营碳汇项目文件中并未报告静态投资和运行成本的财务类指标,所以本文没有考虑碳汇项目。通过对比发现,虽然不同类型的CCER项目的运行成本相对于静态资本的比率不同,但是对于相同类型的项目,该比率基本相同,这是因为节能减排项目往往都属于技术水平复杂和技术含量较高的项目,并且这些项目大都通过机器进行控制以便简化人工操作。节能减排项目趋向于标准化运营,相同类型项目的管控模式相似,项目成本主要源于初始投资。表3列出了8个CCER项目的静态投资和运行成本,包括主要的CCER项目类型(风电、水电、光电、沼气发电和瓦斯发电),通过计算可得CCER项目的运行成本相对于静态投资的平均比率为4%。

表3 CCER项目成本构成

项目名称	静态投资 C_1 (万元)	年运行成本 C_2 (万元)	比值(C_2/C_1)(%)
中广核大悟鲁家畈风电场工程项目	18628.32	532.20	2.86
华润电力风能东宏风电场二期工程项目	53895.51	1351.27	2.51
福建永泰县梧桐25兆瓦水电项目	17652.03	356.28	2.02
新疆阿克苏吐木秀克水电站	52450.00	1152.00	2.20
信义芜湖三山100兆瓦光伏电站项目	87200.00	1230.90	1.41
中晶塔城乌苏20兆瓦光伏并网发电项目	23320.57	314.00	1.35
佛山市南海垃圾焚烧发电一厂改扩建项目	72741.36	7061.00	9.71
晋城寺河煤矿瓦斯发电项目	79300.00	5960.00	7.52
平均值	—	—	4.00

资料来源:中国自愿减排交易平台。

本文假定运行成本相对于静态资本投资的比例每一年都相同,并且使用4%作为运行成本相对于静态投资的比率,将其乘以节能减排投资额,即可得到各省份的年度运行成本。最后,将资本回收成本和年度运行成本加总,即为各省份每年的等效减排成本。

四、实证分析

1. 面板数据模型的参数估计

为避免伪回归问题,在对面板数据进行回归分析之前本文对模型中各变量进行了单位根检验,检验结果表明,因变量 TC 和自变量 ER 、 ER^2 与 ER^3 在LLC(Levin-Lin-Chu)检验形式下 p 值都很小,原值序列都通过了5%显著性水平的检验,所以各变量都是平稳序列,可以直接进行回归分析。

通过F统计量检验本文发现应该建立固定效应回归模型。本文的研究对象是中国高碳区、中碳区和低碳区三个地区,由于各省份的技术水平和产业结构存在较大差异,因此相对于随机效应模型来说,建立个体固定效应模型更为合适。本文利用面板可行性广义最小二乘法(FGLS)的回归方法对模型进行拟合。

表 4 是总减排成本方程的回归结果,从中可以得出如下结论:高碳区和中碳区的总减排成本曲线既应包含减排量的三次项,同时也应包含一次项和二次项,即高碳区和中碳区应选择模型一;低碳区的最优总减排成本曲线应该只含有减排量的三次项,即低碳区应选择模型三。原因如下:①如果在总减排成本函数中引入减排量的四次方项 (ER^4),不仅该变量本身无法通过显著性检验 ($p>0.1$),同时还导致自变量 ER 或 ER^2 无法通过检验且系数变化很大,所以可以判定三个地区的总减排成本函数至多只包含减排量的三次项。②三个区域的总减排成本曲线中的三次项都很显著 ($p<0.05$),所以可以确定边际减排成本与减排量之间存在二次函数关系,这一点和 Ellerman and Decaux^[5]的结论一致。

表 4 总减排成本曲线的回归结果

	高碳区		中碳区		低碳区		
	模型一	模型二	模型一	模型二	模型一	模型二	模型三
ER	7.6E+05* (1.7647)	9.00E+05 (1.5941)	1.9E+06*** (5.2829)	1.8E+06*** (4.0801)	7.10E+05 (1.2575)	2.40E+05 (0.4658)	
ER^2	6.5E+02*** (3.6234)	6.0E+02*** (3.3325)	1.1E+02*** (2.8046)	1.60E+02 (1.6256)	6.9E+02** (2.5402)		
ER^3	-0.05*** (-3.9756)	-0.04 (-1.5401)	-0.01** (-2.3124)	-0.01* (-1.7011)	-0.05 (-1.1044)	0.06* (1.8736)	0.07*** (2.6390)
ER^4		-7.70E-07 (-0.3085)		-4.90E-07 (-0.5186)			
N	105	105	120	120	115	115	115
\bar{R}^2	0.62	0.59	0.48	0.48	0.56	0.54	0.56
F	16.31	13.60	10.15	9.34	13.18	13.14	15.53

注:括号内的数据代表 t 值;*、**、*** 分别代表在 10%、5%和 1%的水平上显著;总减排成本 TC 以元为单位,减排量 ER 以万吨 CO_2e 为单位。

资料来源:作者计算。

通过选择合适的总减排成本曲线,可获得 MAC 曲线,具体结果见表 5。①碳强度不同的地区,其 MAC 曲线中的回归系数也不同,例如高碳区边际减排成本曲线二次项的系数为-0.16,中碳区为-0.04,低碳区为 0.20。这意味着三个地区进行等量减排时,所支付的边际减排成本是不相同的,所以这创造了地区之间进行碳排放权交易的可能性。如果将中国分为高碳区、中碳区和低碳区,同时不考虑各省份之间的交易成本,那么影子价格较高的地区会购买碳排放权,影子价格较低的地区就成为碳排放权的卖方。②高碳区和中碳区减排量平方项的系数都为负,并且存在截距项,高碳区的 MAC 曲线的截距项为 756029.70,中碳区为 1913225.00,但低碳区 MAC 曲线不含截距项。

表 5 分区域的 MAC 曲线方程

区域	函数关系
高碳区	$MAC_H=756029.70+1290.11ER-0.16ER^2$
中碳区	$MAC_M=1913225.00+228.71ER-0.04ER^2$
低碳区	$MAC_L=0.20ER^2$

注:此处边际减排成本 MAC 的单位为元/万吨 CO_2e ,减排量 ER 的单位为万吨 CO_2e 。

资料来源:作者计算。

根据表 5 可以画出边际减排成本和减排量之间的大致形状。图 3 以减排量(ER)为横轴,以边际减排成本(MAC)为纵轴,分别拟合了高碳区、中碳区和低碳区这三条边际减排成本曲线。从图 3 可以看出,当 ER 小于相应的临界值时,高碳区和中碳区的 MAC 随着 ER 的增加而增加,一旦 ER 超过临界值, MAC 将随着 ER 的增加而减小;而低碳区的边际减排成本曲线是递增型,边际减排成本随减排量的增加而增加。

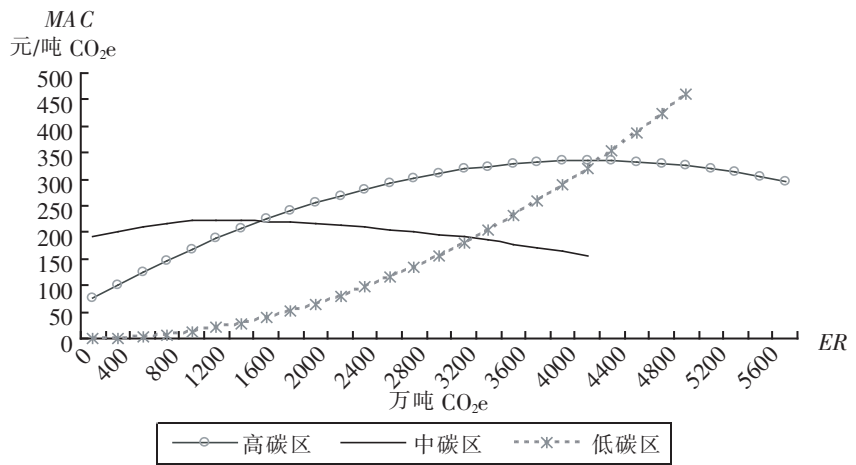


图 3 分区域的边际减排成本曲线

资料来源:作者绘制。

为什么在实证分析中会得到倒 U 型和递增型两类不同的边际减排成本曲线图呢?原因如下:
 ①虽然不减排就不会产生成本,但是实际上一旦进行减排,就需要投入固定资产和相应的运行成本。这意味着具有减排义务的地区在进行减排的一开始就面临较高的边际减排成本,所以当减排量为零时,该地区面临大于零的边际减排成本。中国每年节能减排开支很高,国家统计局的相关数据显示,1995—2000 年高碳区、中碳区和低碳区各省份的国有能源工业固定资产投资平均值分别为 14.6 亿元、21.0 亿元和 11.62 亿元。
 ②当减排量加大时,这就需要继续增加节能减排投资,因此边际减排成本会随着减排量的增加而增加。
 ③随着投资和技术水平不断增加,单位投资所产生的减排量增加,额外增加一单位减排量的边际成本会因减排效率的提高而下降,所以边际减排成本又会随着减排量的增加而减少。图 4 为 2001—2012 年中国能源工业固定资产投资额和单位土地面积的平均投资额,可以看出 2003—2005 年

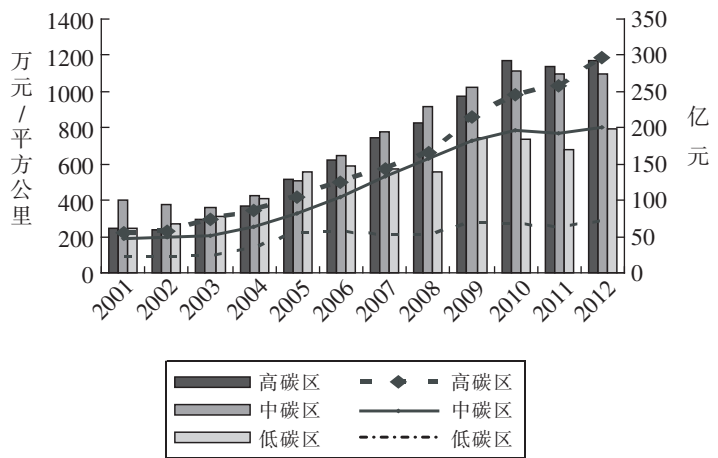


图 4 2001—2012 年能源工业固定资产投资额(柱形)和单位土地面积的平均投资额(折线)

资料来源:作者绘制。

高碳区、中碳区和低碳区各省份年度固定投资相差并不大。但为了促进高碳区和中碳区的节能减排,国家加大了对这两个地区的投资,2005—2012 年高碳区各地区平均国有能源工业固定资产投资从 130 亿元增至 293 亿元,中碳区从 128 亿元增至 274 亿元,并且高碳区和中碳区各省份平均单位土地面积的投资额分别增长了 84%和 47%。由于投资额的大幅增加,自 2003 年以来高碳区和中碳区的平均碳强度都显著降低。由图 5 可知,相比于 2003 年,2012 年高碳区和中碳区碳强度分别

降低了 30.83%和 30.85%。

以上分析都是针对高碳区和中碳区,那为何低碳区不会出现倒 U 型边际减排成本曲线呢?这主要是因为低碳区代表平均碳强度较低的省份,如北京、上海、江苏和广东等,这些地区的第三产业往往比重较高,节能减排技术水平也较先进。额外增加一单位减排量所带来的成本增加量不足以通过减排效率的提高而得到弥补,所以低碳区 MAC 曲线只存在单调递增的现象。

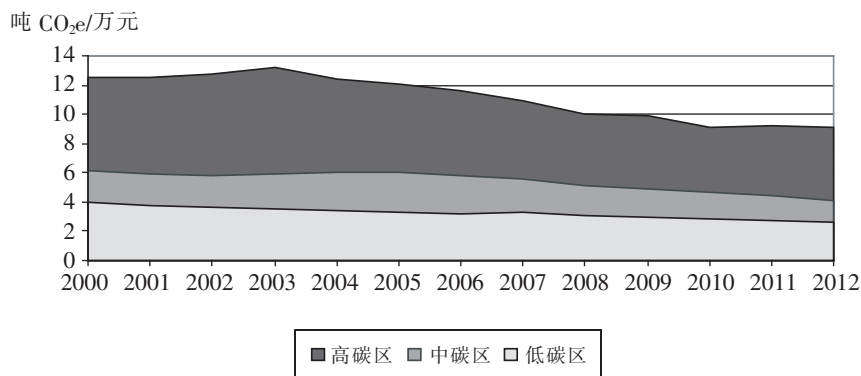


图 5 2000—2012 年高碳、中碳和低碳地区平均碳强度变化

资料来源:作者绘制。

2. 福利水平的实证分析

为了模拟统一碳交易市场的交易情景,这里需要知道市场参与方的减排任务(减排量)和其减排时对应的影子价格(边际减排成本曲线)。为了得到减排量,大致需要以下三个步骤:①确定减排原则。2009 年的哥本哈根会议上,中国政府承诺到 2020 年单位 GDP 的二氧化碳排放比 2005 年下降 40%—45%,所以本文在估算 2020 年的二氧化碳当量排放时以此作为测算减排量的标准。在本研究中,2005 年全国平均碳强度为 5.59 吨 CO₂e/万元,进而算得 2020 年的碳强度应为 3.07—3.35 吨 CO₂e/万元。②估算 GDP 总量。本文利用简单线性回归法,估算了 2020 年的实际 GDP 总量。在核算中,本文发现中国 2014—2020 年的实际 GDP 增长率为 6.45%。利用实际 GDP 和碳强度变化,可算得中国 2005—2020 年的累积减排量不应低于 1538.72 千万吨 CO₂e。③选定减排总任务的分配准则。得出总减排量后,接下来需要考虑如何在省份间进行分配。本文基于人口的公平准则对总减排量进行分配,即假定人口基数较大的省份能源消费量也相对较多,所以应该多减排,反之分配少的减排量,因此可得各地区平均每年应该达到的减排量。由于高碳区、低碳区和中碳区内部各个省份都具有相同的 MAC 曲线,所以三个区域内部不会产生碳排放权交易,或者说其内部达到了一种碳交易的动态均衡状态。因此,最后只需从这三个区域内部各选取一个“交易代表”,然后通过分析这三个代表的贸易行为,利用其福利水平的变动来反映整个社会的福利变化。

通过计算,可得 2005—2020 年高碳区、中碳区和低碳区的“交易代表”年均减排量为 2294.68 万吨 CO₂e、4163.82 万吨 CO₂e 和 3612.72 万吨 CO₂e,所以以三者之和(10071.22 万吨)作为碳交易的上限。由于已知减排量和边际减排成本之间的关系,因此可获得在参与碳交易前“三个交易代表”的影子价格依次为 287.39 元/吨 CO₂e、217.20 元/吨 CO₂e 和 261.03 元/吨 CO₂e(见表 6)。减排成本的差异创造了成本优势,各地区应该买进比较劣势的产品,出售比较优势的产品。假定碳交易市场上只存在三个“交易代表”,市场是完全竞争的,由交易者的需求量和供给量决定市场均衡碳价。

消费者和生产者会根据各自的技术水平和资源禀赋来决定所要扮演的角色。在分析过程中本

表 6 碳交易市场建立前后的福利分析

贸易前			
	高碳区	中碳区	低碳区
减排量(万吨 CO ₂ e)	2294.68	4163.82	3612.72
MAC(元/吨 CO ₂ e)	287.39	217.20	261.03
减排总成本(百万元)	4470.40	9012.93	3075.03
贸易后			
均衡碳价(元/吨 CO ₂ e)	217.22	217.22	217.22
减排量(万吨 CO ₂ e)	1310.83	5464.78	3295.61
调入(+)/调出(-)(万吨 CO ₂ e)	983.85	-1,300.96	317.11
贸易所得(百万元)	370.58	117.99	68.41
成本下降率(%)	8.29	1.31	2.22
净成本(百万元)	4099.82	8894.94	3006.62

资料来源:作者计算。

文发现:市场需求曲线是一条向下倾斜的曲线,但市场供给曲线是一条水平直线,其原因在于中碳区的 MAC 曲线呈倒 U 型。图 6 是本文拟合的市场需求和供给曲线,需求曲线向右下方倾斜,而供给曲线是水平的,二者相交处的均衡碳价为 217.22 元/吨 CO₂e。表 7 为不同碳价下碳交易市场的整体动态。

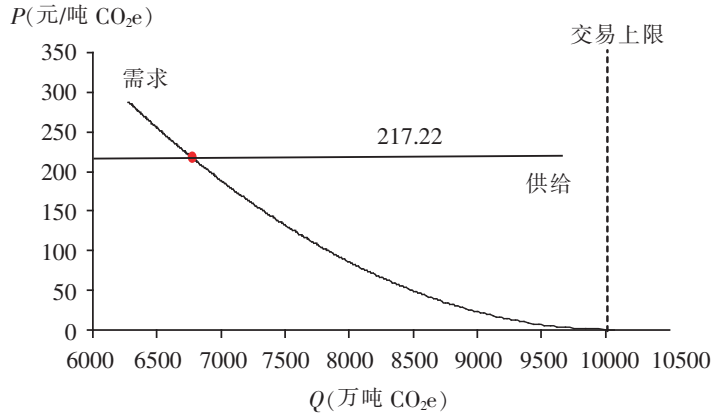


图 6 碳交易市场的供求曲线

资料来源:作者绘制。

(1) 当碳价低于 217.20 元/吨 CO₂e 时,高碳区、中碳区和低碳区的“交易代表”此时的影子价格都不低于 217.20 元/吨 CO₂e,所以为保证最低成本,三者都不会扮演碳交易市场的供给方。当中碳区的影子价格恰好等于 217.20 元/吨 CO₂e 时,中碳区的“交易代表”有可能成为供给者。但是代入数据后,本文算得在 217.20 元/吨 CO₂e 价格

表 7 不同碳价下的市场动态

碳价区间(元/吨 CO ₂ e)	供给方	需求方	市场状态	是否出清
$0 \leq P^* \leq 217.20$	无	所有“交易代表”	供小于需	否
$217.20 < P^* < 217.22$	无	所有“交易代表”	供小于需	否
$P^* = 217.22$	中碳区“交易代表”	高碳区和低碳区“交易代表”	供等于需	是
$217.22 < P^* < 261.03$	中碳区“交易代表”	高碳区和低碳区“交易代表”	供大于需	否
$P^* = 261.03$	中碳区“交易代表”	高碳区“交易代表”	供大于需	否
$261.03 < P^* < 287.39$	中碳区和低碳区“交易代表”	高碳区“交易代表”	供大于需	否
$P^* = 287.39$	中碳区和低碳区“交易代表”	无	供大于需	否
$P^* > 287.39$	所有“交易代表”	无	供大于需	否

资料来源:作者计算。

上,中碳区扮演需求方所获的贸易所得为 11.86 百万元(图 7 中弧形区域 AB 的面积),而其扮演供给方所获的贸易所得为 11.78 百万元(三角形 AFG 的面积),前者高于后者。这意味着即使假定中碳区充当供给者的身份,但由于其总减排成本高于充当需求方的支出,所以中碳区“交易代表”会选择作为需求方,此时交易市场碳排放权的需求大于供给,市场无法出清。

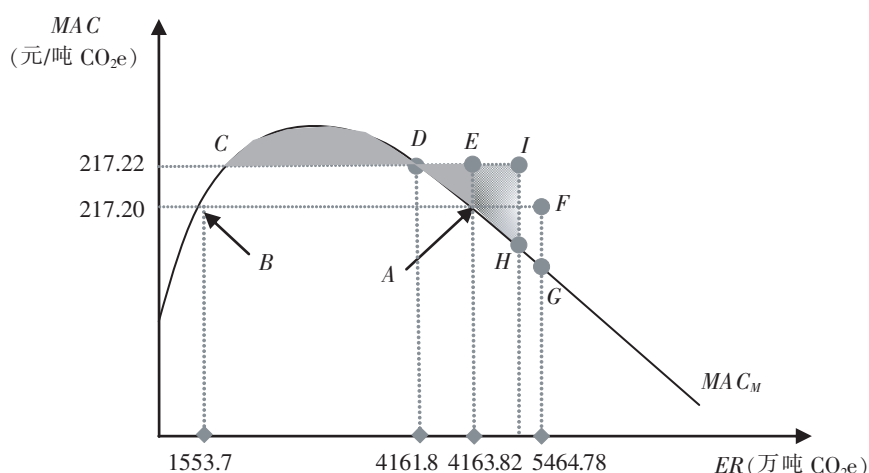


图 7 中碳区“交易代表”的福利分析

资料来源:作者绘制。

(2)当价格到达 217.22 元/吨 CO_2e 时,对于高碳区和低碳区而言,此时的市场碳价依旧低于其单独减排时的影子价格,所以,二者此时仍为碳排放权的需求方。而中碳区此时处于向下倾斜的 MAC 曲线部分(中碳区 MAC 曲线对称轴的右边),额外增加一单位的减排量,会给中碳区带来福利净增加,且此时成为供给方所获的福利增量至少不会比中碳区充当需求方低。所以中碳区会成为唯一供给方,并且愿意提供的减排量为无穷大,因此市场碳排放权的供给曲线呈水平状。

图 7 中,点 A 代表中碳区所处的状态,即为了达到中国在哥本哈根会议的承诺,中碳区的“交易代表”在 2005—2020 年期间平均每年需要减排 4163.82 万吨 CO_2e ,并且独自减排时的边际减排成本为 217.20 元/吨 CO_2e ;点 $I(5464.78, 217.22)$ 表示当市场碳价为 217.22 元/吨 CO_2e 时,中碳区的总减排量为 5464.78 万吨 CO_2e ,其中 4163.82 万吨 CO_2e 是中碳区需要达到的减排量,余下的 1300.96 万吨 CO_2e 是高碳区和低碳区在此碳价下的总需求量。当碳价为 217.22 元/吨 CO_2e 时,中碳区充当需求方所获的福利增量可以由弧形区域 CD 的面积减三角形 DEA 的面积来表示,其恰好等于多边形 $AEIH$ 围成的面积(中碳区充当碳交易供给方所获的福利增量),说明中碳区作为碳交易市场需求方所获得的贸易所得与其作为供给方恰好相等,此时中碳区“交易代表”愿意成为供给者^①。

(3)当价格超过 217.22 元/吨 CO_2e 时,中碳区充当碳交易需求方所获的最大贸易所得会一直低于充当供给方时的贸易所得,所以,进一步可以确定当碳价超过 217.22 元/吨 CO_2e 时,中碳区的“交易代表”会选择成为市场供给者。并且当碳价超过 261.03 元/吨 CO_2e 时,低碳区的“交易代表”也会成为供给者,因为此时市场碳价已经超过其单独减排时所支付的影子价格,但此时由于中碳区的“交易代表”供给意愿是无穷大,所以市场总供给大于总需求,碳交易市场无法出清。此外,当市场碳价大于 287.39 元/吨 CO_2e 时,高碳区也会成为新的供给方,市场中将不存在碳排放权的需求方,显然此时市场亦无法出清。

利用均衡价格和 MAC 曲线可以获得市场均衡时交易者愿意自己承担的减排量。表 6 为碳交易市场建立前后不同碳强度地区的三个“交易代表”的福利变化情况。从表 6 可以看出,建立统一碳交易市场能够使所有参与者的减排成本减小,进而提高全社会的福利水平。当价格为 217.22 元/吨

① 该情景的模拟方法可由线性规划来完成。

CO₂e 时,高碳区的“交易代表”每年平均会承担 1310.83 万吨 CO₂e 的减排量,剩下的 983.85 万吨 CO₂e 会选择外省份调入,并且通过碳交易可以获得 370.58 百万元的贸易所得,成本减少 8.29%。低碳区会承担 3295.61 万吨 CO₂e 的减排量,剩余 317.11 万吨 CO₂e 通过外省份调入获得,其总成本相对于贸易前每年平均减少 68.41 百万元,约占其贸易前总减排成本的 2.22%。中碳区面临比贸易前高的碳价格,通过省内调出也获得了 117.99 百万元的利益净流入,成本降低 1.31%,交易者平均每年的减排开支可下降 3.94%,因此建立统一的碳交易市场将促使社会福利显著增加。

五、结论与政策启示

1. 结论

本文通过面板数据模型并结合微观数据拟合边际减排成本曲线,并借此模拟分析了碳交易市场的总需求曲线和总供给曲线,从而量化不同交易体参与统一碳交易市场的福利变化。本文结论如下:①碳强度不同的地区,其边际减排成本曲线的斜率和拐点各不相同。具体表现为低碳区的 MAC 曲线随着减排量的增加,边际减排成本也增加,而中碳区和高碳区的 MAC 曲线呈“倒 U 型”。②市场碳排放权需求曲线向右下方倾斜,即随着碳价的降低,碳排放权需求相应增加。但由于中碳区 MAC 曲线呈倒 U 型,导致市场碳排放权供给曲线为一条水平直线,这意味着一旦碳价超过均衡值 217.22 元/吨 CO₂e,市场上碳排放权的供给量会达到无穷大。③减排成本的差异性创造了建立统一碳交易市场的可能性,通过碳交易,交易者都会获得不同规模的贸易所得。本文的研究显示,建立统一碳交易市场能使高碳区、中碳区和低碳区的三个“交易代表”平均每年分别获得 370.58 百万元、117.99 百万元和 68.41 百万元的贸易所得,交易者平均每年的减排开支可下降 3.94%,因此引入市场机制能提升全社会的福利水平。

2. 政策启示

(1)推进建立全国统一碳交易市场的同时需要考虑地区产业结构的差异,通过合理设定减排总量实现环境质量提升和经济发展的双重红利。碳强度是产业发展的结果性指标,低碳区的第三产业占比相对较高,由于其 MAC 曲线呈递增型,所以过高的减排任务会增加低碳区的成本负担。碳交易市场链接能够确立有效的价格信号,政府只需要合理设定减排总量,交易者就可以依据市场情况,在投资节能减排新技术和进入交易市场购买排放权之间进行灵活选择,从而以最低的成本实现既定的减排目标。在完成减排任务并改善地区环境质量的同时,各地区又可利用所节省的减碳开支投资于更高回报的项目,从而促进地区的经济增长。目前国际上只有加州和魁北克的碳交易市场于 2013 年 10 月 1 日形成链接,国内广东与深圳的链接以及京津冀的大气污染联防联控工作已着手开展。碳交易市场的链接有助于降低减排成本和增加交易主体的异质性,有助于建设资源有偿使用和生态环境容量有限的生态文明制度,同时也是调结构和转方式的重大机制体制改革的重要任务。

(2)欠发达地区的碳强度相对较高,由于减排过程存在规模效应,可以适当增加减排任务,但欠发达地区面临较大的经济发展压力,因此需要强化财政配套措施。中碳区和高碳区的边际减排成本曲线呈“倒 U 型”,说明经济发展水平较低的地区在减排过程中会存在规模经济,所以利用碳交易市场增加地区减排基数将有助于促进这部分红利的实现。除了这种基于统一市场的方法之外,也可采用差异化地区减排目标的方法,但该方法是一种次优选择。因为建立统一碳交易市场充分体现了市场起决定性作用的资源配置机制,在实现地区减排的同时,促进不同地区之间的交流与合作,有助于节能减排技术的推广和应用。但是二氧化碳和其他温室气体的全球性特征使减排成本主要由减排行动方承担,而相应带来的收益却由全球所有国家获得,所以如果要求一些经济发展水平较低的

地区进行减排,则国家需要对其进行政策支持或财政补贴,例如将环境保护费或环境税用于新能源补贴。

(3)扩大交易基数,创造碳交易市场的流动性。在碳交易市场中,交易者通过买卖碳排放权形成碳价,而碳价均衡值的发现既有助于控制交易市场的风险,也可为通过拍卖实施有偿使用排放权的初始定价提供价格指导。本文的研究以碳交易市场是完全竞争为假设前提,所以现实情况越接近这一假设,市场上显示的碳价就越接近碳排放权的真实值。微观理论中指出完全竞争的市场要求有大量的卖家和买家,完全竞争市场是流动性很高的市场,因此交易基数对流动性的贡献是首要的。2014年深圳碳交易市场的控排企业为635家,2015年广东碳交易市场的控排企业仅217家,这也是深圳碳交易市场流动性高于广州碳交易市场的原因。因此通过扩大交易基数,增加纳入控排的企业,可以创造碳交易市场的流动性。

(4)做好减排任务的分配,协调各地区利益。区域碳交易市场的链接需要各地区在一系列的机制问题上达成妥协,例如包括每个区域的交易上限^[4]。本文发现,虽然引入碳交易机制会提高整体福利,但单个参与者的获利份额各不相同。这种差异一方面取决于交易者本身的技术水平和产业结构,另一方面也取决于交易者面临的减排任务。因此,为了在减排之际兼顾公平,政府在设定排放权交易总量控制和进行碳交易配额的分配时,要充分把握各省份的发展现状,特别是在分配减排目标时,不仅需要考虑到各省份的人口规模,还需要将能耗强度、地区生产总值和第二产业增加值等作为配额分配应当考虑的因素。

[参考文献]

- [1]Ranson, M., and Robert N. Stavins. Post-Durban Climate Policy Architecture Based on Linkage of Cap-and-Trade Systems[R]. NBER Working Paper, 2012.
- [2]Corina, H. Linking Emission Trading Schemes: Pros and Cons[R]. ICGG Working Paper, 2013.
- [3]Baumol, W. J., and W. E. Oates. The Theory of Environmental Policy[M]. Cambridge University Press, 1995.
- [4]Weitzman, M. L. Prices vs Quantities[J]. Review of Economic Studies, 1974,128(41):477-491.
- [5]Ellerman, A. D., and A. Decaux. Analysis of Post-Kyoto CO₂ Emissions Trading Using Marginal Abatement Curves[R]. MIT Working Paper, 1998.
- [6]Wilson, D., and J. Swisher. Exploring the Gap: Top-Down versus Bottom-Up Analyses of the Cost of Mitigating Global Warming[J]. Energy Policy, 1993,21(3):249-263.
- [7]Zhang, Z. X., and H. Folmer. Economic Modelling Approaches to Cost Estimates for the Control of Carbon Dioxide Emissions[J]. Energy Economics, 1998,20(1):101-120.
- [8]DU, L., A. Hanley, and C. Wei. Estimating the Marginal Abatement Cost Curve of CO₂ Emissions in China: Provincial Panel Data Analysis[R]. Kiel Working Paper, 2015.
- [9]Fischer, C., and R. D. Morgenstern. Carbon Abatement Costs: Why the Wide Range of Estimates [J]. The Energy Journal, 2006,27(2):73-86.
- [10]陈诗一. 边际减排成本与中国环境税改革[J]. 中国社会科学, 2011,(3):85-100.
- [11]魏楚. 中国城市 CO₂ 边际减排成本及其影响因素[J]. 世界经济, 2014,(7):115-141.
- [12]吴力波,钱浩祺,汤维祺. 基于动态边际减排成本模拟的碳排放权交易与碳税选择机制[J]. 经济研究, 2014,49(9):48-61.
- [13]Klepper, G., and S. Peterson. Marginal Abatement Cost Curves in General Equilibrium: The Influence of World Energy Prices[J]. Resource and Energy Economics, 2006,28(1):1-23.
- [14]Criqui, P., S. Mima, and L. Viguier. Marginal Abatement Costs of CO₂ Emission Reductions, Geographical Flexibility and Concrete Ceilings: An Assessment Using the POLES Model [J]. Energy Policy, 1999,27(10):585-601.

- [15] Kesicki, F., and N. Strachan. Marginal Abatement Cost (MAC) Curves: Confronting Theory and Practice[J]. *Environmental Science & Policy*, 2011,14(8):1195–1204.
- [16] Faruqui, A, M. Mauldin, S. Schick, K. Seiden, G. Wikler and C. W. Gellings. Efficient Electricity Use: Estimates of Maximum Energy Savings[R]. Electric Power Research Institute Working Paper, 1990.
- [17] McKinsey & Company. Pathways to a Low-Carbon Economy Version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve[EB/OL]. http://www.mckinsey.com/client_service/sustainability/latest_thinking/pathways_to_a_low_carbon_economy, 2009.
- [18] Baker, E., L. Clarke, and E. Shittu. Technical Change and the Marginal Cost of Abatement [J]. *Energy Economics*, 2008,30(6):2799–2816.
- [19] York, R., E. A. Rosa, and T. Dietz. STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic Tools for Unpacking the Driving Forces of Environmental Impacts[J]. *Ecological Economics*, 2003,46(3):351–365.
- [20] Hubacek, K., K. S. Feng, and B. Chen. Changing Lifestyles towards a Low Carbon Economy: An IPAT Analysis for China[J]. *Energies*, 2012,5(1):22–31.
- [21] Mosnaim, A. Estimating CO₂ Abatement and Sequestration Potentials for Chile [J]. *Energy Policy*, 2001,29(8):631–640.
- [22] Zhou, P., L. Zhang, D. Q. Zhou, and W. J. Xia. Modeling Economic Performance of Interprovincial CO₂ Emission Reduction Quota Trading in China[J]. *Applied Energy*, 2013,(112):1518–1528.
- [23] Kuik, O., L. Brander, and Richard S. J. Tol. Marginal Abatement Costs of Greenhouse Gas Emissions: A Meta-Analysis[J]. *Energy Policy*, 2009,37(4):1395–1403.

The Cost-Benefit Analysis of Carbon Market Linkage—An Empirical Study Based on MAC Curves

FU Jing-yan^{1,2}, DAI Yu-ting¹

(1. College of Economics of Jinan University, Guangzhou 510632, China;

2. IRES D of Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: An unified carbon trading market is expected to be established in 2016, but the economic impact of linkage is uncertain. Thus, it is essential to quantify the welfare arising from carbon market linkage. This paper constructs total abatement functions by provincial panel data from 2001 to 2012, and examines the change of costs and benefits of three trading representatives who come from high carbon zones, medium carbon zones and low carbon zones respectively, using marginal abatement cost (MAC) curves. We find that the regional heterogeneity measured by the carbon intensity can lead to differences in MAC curves, which is showed by the increasing type of MAC curves in low carbon zones, and the inverted-U MAC curves in middle carbon zones and in high carbon zones. And then the findings exhibit that the supply curve of tradable carbon permits is horizontal because of the inverted-U MAC curve in middle carbon zones. In addition, the market clearing price, which indicated by the intersection of the supply curve and the demand curve, is about 217.22RMB/tco₂e. Furthermore, we find that the unified carbon trading market can substantially cut counterparties' abatement cost to make carbon intensity decrease by 40%—45% in 2020 on average by 3.94%. The main implication is that it's essential to let the market solve the problem of greenhouse gas emissions, stress emission capitalization, pay attention to equity based on the development stage of different regions, and gradually achieve regional integration by expanding trade scales.

Key Words: marginal abatement cost; carbon trading market; trade gains; cost-benefit analysis

JEL Classification: C61 E01 Q51

[责任编辑:王燕梅]