

# 边际减排成本与区域差异性研究<sup>①</sup>

杨子暉<sup>1</sup>, 陈里璇<sup>1</sup>, 罗 彤<sup>2</sup>

(1. 中山大学岭南学院, 广州 510275; 2. 珠海华润银行股份有限公司广州分行, 广州 510627)

**摘要:** 在全球气候变暖的背景下, 减少 CO<sub>2</sub> 排放量已经成为世界各国面临的重大挑战, 而我国作为 CO<sub>2</sub> 排放大国, 承诺到 2020 年单位 GDP 的排放量较 2005 年下降 40%~45%。围绕 CO<sub>2</sub> 的减排问题, 本文展开了两大方面的研究工作: 1) 基于我国 8 种化石能源的面板数据, 采用二次型方向性距离函数模型测算我国各省份(直辖市、自治区)的 CO<sub>2</sub> 边际减排成本, 并由此分析省际层面和区域层面的 CO<sub>2</sub> 减排成本差异和技术效率。研究结果表明, 减排成本最低的省份(山西)是最高的地区(北京)的 1/5, 而且不同省份之间 CO<sub>2</sub> 减排成本差异较大。还发现, CO<sub>2</sub> 边际减排成本的大小整体呈现为“东部 > 中部 > 西部”。这为在全国范围内不同省份之间建立碳排放交易市场提供了理论分析与实证检验的参考依据。2) 深入考察了我国各省份 CO<sub>2</sub> 边际减排成本存在较大差异的原因。分析结果表明, CO<sub>2</sub> 排放浓度、研发程度、人力资源水平、能源结构、碳排放政策以及城市化水平等是影响边际减排成本的主要因素。在此基础上, 提出了现阶段发展低碳经济的若干建议, 从而使得本文研究具有重要的学术价值与现实意义。

**关键词:** 二次型方向性距离函数; CO<sub>2</sub> 边际减排成本; 影响因素分析

**中图分类号:** F205      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1007-9807(2019)02-0001-21

## 0 引 言

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告显示, 2011 年大气中 CO<sub>2</sub> 比 1750 年(工业化前)提高了 40%, 由 CO<sub>2</sub> 增长引致的温室效应已经造成全球变暖等严重后果, 减少 CO<sub>2</sub> 排放已经成为各国政府的当务之急。在此背景下, 如何有效减少 CO<sub>2</sub> 排放, 从而减缓温室效应, 兑现中国对国际社会的减排承诺, 已经成为我国目前亟需研究的重大课题。相较于我国过往的行政性强制减排指令, 将市场机制纳入到环境政策的设计中, 已经成为学术界与监管部门的共识<sup>[1]</sup>。其中二氧化碳边际减排成本作为市场交易中的关键要素, 早已被政府间气候变化专门委员会、世界银行、联

合国等国际性组织以及学术界, 应用在减排政策实施的经济效果评估中<sup>[2,3]</sup>。此外, 考虑到我国各区域经济发展差异较大, 不同区域的减排空间和实施成本的不同, 合理估算 CO<sub>2</sub> 的边际减排成本, 不仅能够直观反映区域碳减排的潜力与成本, 促进区域环境协同治理, 而且还有利于建立碳交易市场, 进一步降低、优化全国的碳减排成本。有鉴于此, 现阶段从省际层面与区域层面对我国 CO<sub>2</sub> 边际减排成本及其影响因素展开深入研究显然具有重要的学术价值与现实意义。它将有助于我国逐步建立全国统一的碳交易市场, 形成以市场机制解决节能减排、发展低碳经济的新思路, 而且也为我国未来能源与环境政策的选择与安排提供理论分析与实证检验的参考依据。

① 收稿日期: 2018-06-24; 修订日期: 2018-08-15。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71273286); 国家社会科学基金资助重大项目(17ZDA073); 广东省自然科学基金资助重点项目(2018B030311053); 国家自然科学基金创新研究群体项目(71721001); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目。

作者简介: 杨子暉(1979—), 男, 广东揭阳人, 教授, 博士生导师。Email: yangzhui@mail.sysu.edu.cn

边际减排成本表示在某一排放水平上,减少一单位的 CO<sub>2</sub>碳排放需要付出的经济成本.关于减排成本,中外的学者使用了不同的方法进行研究.大体可分成三大类:专家型的 MAC 曲线、模型推导的 MAC 曲线和基于生产理论推导的边际减排成本曲线.其中,专家型的 MAC 曲线是指基于工程的方法,由专家估测在某一技术下,减少设定量的 CO<sub>2</sub>排放量所需要付出的成本.此类方法的缺陷在于没有考虑技术、跨期因素的相互作用,以及非技术要素对减排成本的影响,且分析结果存在主观性.模型推导的 MAC 曲线则是通过设定一系列假设,构造满足假设的模型,推导出不同排放水平下的减排成本,并组成边际减排曲线.它考虑了跨期动态因素和各种因素的交叉影响,但仍存在过度依赖模型选择与假设的局限性,相关文献包括 Edenhofer 等<sup>[4]</sup>和 Weyant 等<sup>[5]</sup>,在此不一一赘述.

CO<sub>2</sub>排放源于生产,因此基于生产理论对边际减排成本进行追根溯源的逻辑是明了而合理的.近年来基于生产理论推导边际减排成本的文献更是大量涌现,该类分析方法的原理是在一定的技术和经济环境下,假设一定的生产可行集,构造了函数模型,并通过求导的方式来测算边际减排成本.该方法基于生产理论推导出两种常用的模型,一是成本函数,二是距离函数.其中,距离函数因不需要考虑每种投入产出要素的价格而有着更为广泛的应用.具体来说,距离函数大体可以分成两类,一类是 Shepard 距离函数,Shepard 距离函数假设合意产出与非合意产出呈一定比例同向变动,它通常被用于计算影子价格<sup>[6-8]</sup>、边际减排成本<sup>[9]</sup>等.

第二类是方向性距离函数,这类方法在 Shepard 距离函数的基础上进行了改进,具有显著的优点:方向性距离函数允许合意产出增加的同时减少非合意产出,突破了 Shepard 距离函数的一大限制,在技术的发展水平不断提高的今天,显然方向性距离函数是更为适用的方法,目前已被应用于行业层面、城市层面以及省际层面的研究中.具体来看,早期文献大多基于行业层面的研究,Färe 等<sup>[10]</sup>使用方向性距离函数测量 1993 年~1997 年 209 家发电厂的技术效率和非合意产出 SO<sub>2</sub>的影子价格.Murty 等<sup>[11]</sup>基于印度的燃煤火力

发电厂 1996 年~1997 年以及 2003 年~2004 年的月度观测面板数据,计算出非合意产出的影子价格、合意产出和非合意产出间的替代弹性.Matsushita 等<sup>[12]</sup>利用日本电力部门数据,计算 CO<sub>2</sub>减排成本和处理反射性废物减排成本及两者的弹性,通过分析发现低放射性废物对产生 CO<sub>2</sub>的传统能源的替代性更强,碳税或者碳交易机制带来的碳成本的上升,会导致生产方式偏好核电站.Wei 等<sup>[13]</sup>使用我国 124 家火电企业 2004 年的数据,基于二次型的方向距离函数估计了 CO<sub>2</sub>的影子价格,并探讨了减排成本的推动因素,得出减排成本与企业规模、厂龄、煤炭使用比例呈负相关,与技术水平呈正相关.Du 等<sup>[14]</sup>基于 2008 年 648 家发电厂的横截面数据集,研究我国发电厂的环境技术效率和碳减排成本.结果表明,国有电厂效率最低,其面临的二氧化碳边际减排成本也是最低的.此外,也有学者基于城市层面的数据展开研究,例如 Wang 和 Wei<sup>[15]</sup>应用 DEA 方法来评估,2006 年~2010 年中国 30 个主要城市的能源排放效率以及工业部门的二氧化碳节能减排潜力,研究发现城市之间效率存在显著差异:沿海地区的城市拥有最高的排放效率,但西部地区城市的效率最低.魏楚<sup>[16]</sup>基于参数化的方向性距离函数模型,使用我国 104 个城市 2001 年~2008 年的数据,对这些城市的 CO<sub>2</sub>边际减排成本和驱动因素进行了探究,测算的 CO<sub>2</sub>边际减排成本为 967 元/t,CO<sub>2</sub>边际减排成本与 CO<sub>2</sub>排放浓度呈 U 型曲线关系,并且与产业结构负相关,而与城市化水平正相关.Wu 和 Ma<sup>[17]</sup>基于用中国 2002 年~2013 年 286 个城市的数据,提出了一种加权连续状态空间方法研究中国二氧化碳边际减排成本的异质性与收敛性,结果表明中国的二氧化碳边际减排成本呈现收敛性,但从长远来看,仍然存在着巨大的异质性.近几年,基于省际层面数据进行研究的文献逐渐涌现,Wang 等<sup>[18]</sup>基于生产理论框架,利用中国 28 个省数据,采用非参数估计的方法建立了二氧化碳边际减排成本模型,实证结果表明:在保持或减少二氧化碳排放水平的同时,扩大国内生产总值,对潜在 GDP 有着较大的影响.Wei 等<sup>[19]</sup>使用基于扩展的 SBM(slacks-based measure)模型,估计 1995 年~2007 年期间中国 29 个省非合

意产出、二氧化碳减排潜力以及边际减排成本,研究发现东部地区的排放效率最低,边际减排成本最高,而西部地区的潜在减排幅度最大,减少二氧化碳排放的边际成本最低. Zhang 等<sup>[20]</sup>分别使用方向产出距离函数与 Shephard 产出距离函数,来估计中国 2006 年~2010 年的二氧化碳排放的影子价格,发现使用前者方法估算的价格比使用后者方法估计出来的要更高,且二氧化碳排放的影子价格在样本期内升高,与此同时,影子价格与区域经济发展水平正相关. Du 等<sup>[21]</sup>使用参数方向性产出具体的函数估算了我国 2001 年~2010 年的省级层面的 CO<sub>2</sub> 减排成本,并指出我国为达成 40%~45% 碳浓度的减排,减排成本将会提高 559 元/t~623 元/t.

纵观该领域的研究,现有的文献主要集中在对行业或者城市层面的微观的研究,有关省际层面的宏观分析还相对较少,而省级地区作为国家政策的一级承接体,在节能减排政策的具体落实上,具有一定的自主性,而且,中国各区域的经济水平、技术水平存在明显的差异,使得二氧化碳排放效率在中国不同的省份之间可能存在明显的不同. 因此,对省际层面展开深入分析,有助于全面评价全国范围内 CO<sub>2</sub> 边际减排成本,为进一步“因地制宜”地建立合理的减排机制奠定基础. 再者,过往的文献大多聚焦于二氧化碳排放的决定性因素(例如 Du 等<sup>[22]</sup>、Wang 等<sup>[23]</sup>)<sup>②</sup>,而从经济成本的角度,对于二氧化碳边际减排成本的影响因素展开深入研究的文献还是相对较少. 考虑到我国各区域经济发展差异较大,不同区域具有不同的减排空间与实施成本,深入考察二氧化碳减排成本的影响因素具有重要的学术价值与现实意义,它能为碳交易市场价格补贴政策的制定提供客观的参考依据<sup>[18]</sup>,进而有助于实现全社会减排成本的优化. 其次,关于采用何种方法对 CO<sub>2</sub> 减排成本进行有效估算,现有的学术界仍然无法达

成一致意见:二次型函数还是超对数,参数化模型还是非参数化模型,线性规划求解还是计量求解. 本文认为或许不必拘泥于对方法技术的争论,而更需要联系现实经济含义,找到一种能估计出 CO<sub>2</sub> 边际减排成本,并且能依据其结果对边际减排成本影响因素展开分析的方法. 对此问题的研究不仅能为中国未来能源和环境经济政策的选择与安排提供理论分析与实证检验的参考依据,而且也将有助于逐步建立全国统一的碳交易市场,形成以市场机制实现节能减排、发展低碳经济的新思路. 最后,为了保证边际减排成本计算的准确性与合理性,本文扩大了能源数据的种类和时间跨度,结合我国使用最多的 8 种化石能源的 10 年数据,并且在省际层面展开了面板数据分析,通过扩大样本量而使得本文研究结论具有更广泛的现实指导意义. 有鉴于此,本文首先采用了二次型方向性距离函数模型测算各省份(直辖市、自治区) CO<sub>2</sub> 的边际减排成本,并由此分析了省际层面和区域层面的减排成本与技术效率. 接着,深入分析我国各省份边际减排成本存在较大差异的原因,考察了包括排放浓度、能源消费结构、人力资源水平、相关碳排放政策、产业结构、城市化水平、研发强度、私人汽车拥有量八大因素对减排成本大小的影响,由此得出富有启发意义的结论. 在此研究过程中,本文的分析将有助于正确甄别边际减排成本的重要影响因素,从而为我国未来制度性的选择与安排提供参考依据. 在此基础上,提出了现阶段发展低碳经济的若干建议,使得本文研究具有重要的学术价值与现实意义.

## 1 模型设定、方法说明

### 1.1 模型设定

首先,方向性距离函数方法可分为两类,一类是参数法,另一类是非参数法. 相对于非参数化方

② Du 等<sup>[22]</sup>基于 1995 年~2009 年的 7 种化石能源和水泥生产的二氧化碳排放的省际面板数据,对中国二氧化碳排放的决定性因素,变化趋势和减排潜力进行了探讨,得出经济发展、技术进步和产业结构是影响中国二氧化碳排放的最重要因素,而能源消费结构、贸易开放度和城市化水平的影响可以忽略不计. Wang 等<sup>[23]</sup>使用 Shephard 距离函数来测算非合意产出(二氧化碳排放)和投入(能耗),同时提出了一种改进的 PDA (production-theoretical decomposition analysis) 方法,将二氧化碳排放的变化分解为七个驱动因素,根据 2005 年~2010 年的数据,该研究发现,影响二氧化碳排放的三大因素依次为经济发展、能源结构、能源效率. 此外,技术进步、能源强度降低和二氧化碳排放效率的提高,降低了二氧化碳排放增长率. 此外,中国东部、中部和西部的二氧化碳排放和驱动因素有显著差异.

法而言,参数化方法的优点在于可以保证可导性和减排成本的唯一性.因此,近年来应用参数化距离函数来测算非合意产出的文献也越来越多(例如 Zhang 和 Choi<sup>[24]</sup>).关于参数法的方向距离函数,其模型设定通常为二次型或超对数型,且一系列的研究表明,二次型要更优于超对数型<sup>[25-27]</sup>.

因此,本文使用二次型方向性距离函数来估算我国各省 CO<sub>2</sub> 排放的边际减排成本.假设方向性向量为

$$g = (g_y, -g_b) \tag{1}$$

则方向性距离函数可以定义为

$$D(x, y, b; g_y, -g_b) = \tag{2}$$

$$\max \{ \beta : (y + \beta g_y, b - \beta g_b) \in P(x) \}$$

其中  $y$  是合意产出,即 GDP.  $b$  为非合意产出,即本文中污染物 CO<sub>2</sub> 的排放量.而  $p(x) = \{(y, b)\}$  则表示能够产出  $(y, b)$  的生产可行集.

方向性距离函数可通过如下过程来解释:在平面坐标内,定义横轴为  $b$ ,纵轴为  $y$ ,原生产点为  $A(y, b)$ ,在生产可能集  $p(x)$  内,生产者可沿着方向向量  $g = (g_y, -g_b)$ ,将原生产点映射到生产前沿面,且该过程可通过提高技术效率来实现.这个函数的优点就是可以实现在非合意产出减少的同时,增加合意产出,这点更加符合现阶段我国生产的实际情况,相比其他类型的函数具有更高的研究价值与现实意义.

$\beta$  的最大值是方向性距离函数的值,是合意产出和非合意产出以同样的比例反向缩放所能达到的最大值,也即在投入一定时的最优产出,此时合意产出在生产可行集内尽可能大,而非合意产出在生产可行集内尽可能小.从原生产点移动到生产前沿面上时,合意产出增加  $\beta y$ ,同时,非合意产出减少  $\beta b$ .在前沿上,方向性距离函数为 0.此时,技术效率达到最大,方向前沿面上的切线斜率为  $-q/p$ ,其中  $q$  为非合意产出的价格, $p$  为合意产出的价格.

设  $R$  表示生产者所能获得的最大收益.即收益

$$R(x, p, q) = \tag{3}$$

$$\max \{ py - qb : D(x, y, b; g_y, g_b) \geq 0 \}$$

因此当  $(g_y, g_b) = (1, -1)$  时,收益的表达式可以刻画为

$$R(x, p, q) = \tag{4}$$

$$\max_{y, b} \{ py - qb : D(x, y, b; 1, -1) \geq 0 \}$$

构造拉格朗日函数并求导可得

$$(p \times 1 + q \times 1) \times \frac{\partial D(x, y, b; 1, -1)}{\partial y} = -p \tag{5}$$

$$(p \times 1 + q \times 1) \times \frac{\partial D(x, y, b; 1, -1)}{\partial b} = q \tag{6}$$

对式(5)和式(6)取比值,得到污染物影子价格

$$q = -p \times \frac{\partial D / \partial b}{\partial D / \partial y} \tag{7}$$

方向性距离函数对非合意产出的偏导与方向性距离函数对合意产出偏导数的比值表示在生产前沿上两种产出的价格比.其中合意产出为 GDP 值,非合意产出为 CO<sub>2</sub> 排放量, GDP 以人民币计价,其价格  $p$  可标准化为 1,具体而言,CO<sub>2</sub> 的影子价格可以表示为

$$q = - \frac{\partial D / \partial b}{\partial D / \partial y} \tag{8}$$

其中  $q$  是影子价格,也即边际减排成本.根据上述推导,可以直观地看到,污染物的影子价格即为在技术有效率的生产前沿面上,增加一单位的合意产出,所需增加的非合意产出的成本,亦即生产前沿面上的切线斜率.因此影子价格就是本文所求的污染物边际减排成本.

假设  $g_y = 1, g_b = -1$ ,方向性距离函数  $D(x_k, y_k, b_k; 1, -1)$  的值则可以解释为合意产出可提高的百分比以及非合意产出可降低的百分比.二次型的具体形式如下

$$D(x, y, b; 1, -1) = \alpha_0 + \sum_{n=1}^3 \alpha_n x_n + \beta_1 y + \gamma_1 b + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^3 \sum_{n'=1}^3 \alpha_{nn'} x_n x_{n'} + \frac{1}{2} \beta_2 y^2 + \frac{1}{2} \gamma_2 b^2 + \sum_{n=1}^3 \delta_n x_n y + \sum_{n=1}^3 \eta_n x_n b + \mu y b \tag{9}$$

为了构建 CO<sub>2</sub> 影子价格,对于上述二次型形式的方向距离函数添加两个约束,即它对合意产出是非递增的、对非合意产出是非递减的.

根据式(5),可以推导出 CO<sub>2</sub> 影子价格的表达式为

$$q = -p \times \frac{\partial D / \partial b}{\partial D / \partial y} = - \frac{\gamma_1 + \gamma_2 b + \sum_{n=1}^3 \eta_n x_n + \mu y}{\beta_1 + \beta_2 y + \sum_{n=1}^3 \delta_n x_n + \mu b}$$

$$p = 1 \tag{10}$$

### 1.2 模型求解方法

对于二次型方向性距离函数的求解,通常有两种方法:线性规划法(linear programming)和随机变量法(stochastic variable).其中,线性规划法克服了随机变量法的缺陷——得到结果可能和二次型前提条件相违背,而被学者广泛采用(例如陈诗一<sup>[28]</sup>).

基于 Färe 等<sup>[10]</sup>对方向性距离函数非负性、单调性、转换性、凹凸性等性质的详细讨论,对于上述的二次型方向性距离函数模型,采用线性规划法求解

$$\min \sum_{k=1}^K \{D(x_k, y_k; b_k; 1, -1) - 0\} \tag{11}$$

s. t.

- ①  $D(x_k, y_k; b_k; \mathbf{g}) \geq 0, k = 1, \dots, K$
- ②  $\partial D(x_k, y_k; b_k; \mathbf{g}) / \partial b \geq 0, k = 1, \dots, K$
- ③  $\partial D(x_k, y_k; b_k; \mathbf{g}) / \partial y \leq 0, k = 1, \dots, K$
- ④  $\partial D(x_k, y_k; b_k; \mathbf{g}) / \partial x_{n,k} \geq 0, k = 1, \dots, K$
- ⑤  $\beta_1 - \gamma_1 = -1, \beta_2 = \mu = \gamma_2, \delta_n = \eta_n,$   
 $n = 1, 2, 3$
- ⑥  $\alpha_{nn'} = \alpha_{n'n}, n = 1, 2, 3$

目标函数应使得样本的原生产点与前沿有效点在方向向量上的离差和最小.在本文中,则是要使得各省各年的方向性距离函数值之和最小.上述6个约束条件的意义分别为:约束①表示投入产出始终在可行生产集合内,以使目标函数符合单向偏离的函数设定;约束②、约束③、约束④则意味着目标函数需满足单调性,以确保影子价格的符号为正;约束⑤反映了方向性距离函数的转换特性;约束⑥则是使得投入变量之间和产出变量之间满足对称性要求.

### 1.3 数据说明

鉴于数据的可获得性,研究样本为我国29个省份(直辖市、自治区)<sup>③</sup>,样本时间跨度为2003年~2012年.在实际研究过程中,采用了两种产出进行分析,包括非合意产出(即CO<sub>2</sub>排放量)和合意产出(即GDP产值).同时,在分析过程中考虑了三种要素投入:劳动力(x<sub>1</sub>)、资本存量(x<sub>2</sub>)和能源消费(x<sub>3</sub>).

其中,劳动力(x<sub>1</sub>)的数据来自于《中国统计

年鉴》,单位是万人.GDP、资本存量(x<sub>2</sub>)均以人民币为单位计量.同时,利用世界银行公布的我国GDP平减指数进行调整,获得了以2003年为基期的实际GDP指数,数据主要来源于《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》、《省级温室气体清单编制指南(试行)》等.而资本存量(x<sub>2</sub>)同样通过价格平减获得了以2003年为基期的实际变量.此外,遵循该领域的研究惯例,采用了以下方面来计算每年实际资本存量

$$x_2^t = x_2^0 (1 - \rho)^t Inv^t + \sum_{s=1}^t Inv^s (1 - \rho)^{t-s} \tag{12}$$

x<sub>2</sub><sup>0</sup>是某省基期的资本存量,Inv<sup>t</sup>是第t年的投资,ρ是固定资本折旧,x<sub>2</sub><sup>t</sup>是t年的固定资本存量,此外,遵循该领域的研究惯例,把我国2000年的资本存量估计值作为本文年资本存量估计值的起点,每年的投资量通过查阅《中国统计年鉴》得到.能源消费(x<sub>3</sub>)的数据来源于《中国能源统计年鉴》、《省级温室气体清单编制指南(试行)》以及《综合能耗计算通则》.此外,本文整合了我国8种主要能源的数据:具体包括煤炭、焦炭、原油、燃料油、汽油、煤油、柴油和天然气,这部分数据来源于《中国能源统计年鉴》.能源消费的核算公式为

$$x_3 = \sum_{i=1}^m energy_i \times a_i \tag{13}$$

其中i表示第i种能源,m表示能源种类的总数.energy<sub>i</sub>是某省不同能源的实际消费量,a<sub>i</sub>是不同能源的折标系数(即热量排放相当于一单位标准煤的能源单位).各种能源的折标系数如表1所示.

基于表1能源数据,本文CO<sub>2</sub>排放量(b)的度量参照《2006年IPCC国家温室气体排放清单指南》公布的CO<sub>2</sub>计算方法

$$b = \sum_{i=1}^m energy_i \times CF_i \times CC_i \times COF_i \times 44/12 \tag{14}$$

其中i表示第i种能源,m表示能源种类的总数.energy<sub>i</sub>表示某省能源消费实物量,CF<sub>i</sub>代表转换因子(即低位发热量),CC<sub>i</sub>反映了单位热量的含碳水平,COF<sub>i</sub>为氧化率,刻画了各种能源的氧化水平,而44/12则为转换系数.

③ 西藏、内蒙古数据缺失,不含港澳台.

表 1 各能源的各项系数

Table 1 Coefficients of various energy sources

能源	折标准煤系数	碳含量缺省 值 $t/TJ$	低位发热量 $MJ/t, km^3$	碳转换系数	碳氧化率	CO <sub>2</sub> 排放系数 $kg - CO_2/kg, kg - CO_2/m^3$
煤炭	0.714	25.800	20 908	3.667	0.940	1.859
焦炭	0.917	29.420	28 435	3.667	0.930	2.853
原油	1.429	20.080	41 816	3.667	0.980	3.017
燃料油	1.429	21.100	41 816	3.667	0.980	3.170
汽油	1.471	18.900	43 070	3.667	0.980	2.925
煤油	1.471	19.600	43 070	3.667	0.980	3.033
柴油	1.457	20.200	42 652	3.667	0.980	3.096
天然气	1.330	15.300	38 931	3.667	0.990	2.162

注：数据根据《综合能耗计算通则》(GB/T 2589 - 2008)、《省级温室气体清单编制指南》(发改办气候[2011]1041号)整理得到。

## 2 实证分析

### 2.1 边际减排成本分析

#### 2.1.1 线性规划估计结果

遵循该领域的研究惯例<sup>[18]</sup>,本文在线性规划之前对数据进行标准化处理.具体地,将各省份各年度的投入以及产出数据分别除以它们的均值,在此基础上对标准化的数据进行线性求解,得到

的参数估计值如表 2 所示.

根据表 2 的估计结果发现,方向距离函数各系数绝对值均小于 1,说明每种投入要素和产出要素单独变动一个单位,方向距离函数值的变动均小于 1,即有效率或者无效率均是各种要素合力影响的结果,单一要素的变动无法造成效率 100%的变动.由此可见,要在提高我国经济产出的同时减少 CO<sub>2</sub> 的排放,仅仅依靠单边投入无法取得最大的产出效率,需要协调劳动力、资本、能源等多方的要素投入.

表 2 方向距离函数参数估计值

Table 2 Estimation of parameters of directional distance function

参数	对应变量名	估计值
$\alpha_0$	常数项	-0.026 6
$\alpha_1$	$x_1$	0.185 5
$\alpha_2$	$x_2$	0.561 7
$\alpha_3$	$x_3$	0
$\beta_1$	$y$	-0.765 5
$\gamma_1 = \beta_1 + 1$	$b$	0.234 5
$\alpha_{11}$	$x_1 x_1$	-0.239 8
$\alpha_{22}$	$x_2 x_2$	-0.014 5
$\alpha_{33}$	$x_3 x_3$	0
$\alpha_{12} = \alpha_{21}$	$x_1 x_2$	-0.255 2
$\alpha_{13} = \alpha_{31}$	$x_1 x_3$	0
$\alpha_{23} = \alpha_{32}$	$x_2 x_3$	0
$\beta_2 = \gamma_2 = \mu$	$y^2, b^2, yb$	-0.147 9
$\delta_1 = \eta_1$	$x_1 y, x_1 b$	0.313 7
$\delta_2 = \eta_2$	$x_2 y, x_2 b$	0.077 0
$\delta_3 = \eta_3$	$x_3 y, x_3 b$	0

进一步地,根据线性估计的参数值,可以得到全国各省份(直辖市、自治区)CO<sub>2</sub>的影子价格,即边际减排成本,并将各个省的碳减排成本列于表3.由表3的估计结果,可以看出东部省份近年来边际减排成本相对较高,其中浙江、北京、广东等东部省份成为减排成本最高的前十

名地区,这意味着东部地区可能因“节能减排”而遭受较大的经济冲击.同时,山西、河北等则成为边际减排成本最小的后十名省份.另外,全国各省份平均减排成本为1 471元/t,因此从整体上看,每减少一吨CO<sub>2</sub>的排放,其经济产出的代价是1 471元.

表3 我国各省份(直辖市、自治区)CO<sub>2</sub>的边际减排成本

Table 3 The marginal cost of CO<sub>2</sub> emission reduction in China's provinces (municipalities)

减排成本	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
北京	2 772.6	2 729.1	2 701.8	2 709.6	2 844.6	2 946.1	3 350.9	3 520.5	3 936.2	4 250.5
天津	1 183.5	1 138.6	1 094.7	1 057.0	1 048.8	992.8	973.5	887.6	1 051.1	1 127.5
河北	1 434.9	1 152.1	824.2	728.7	571.6	518.0	486.9	429.6	316.3	541.7
辽宁	1 477.4	1 377.8	1 147.7	1 040.3	939.6	906.4	894.4	789.7	892.2	982.6
上海	1 331.8	1 192.5	1 133.0	1 104.9	1 187.0	1 153.3	1 181.1	1 098.8	1 511.9	1 849.0
江苏	1 895.5	1 537.3	1 182.8	1 176.2	1 063.9	966.3	943.2	828.8	692.9	775.9
浙江	1 281.4	1 408.7	1 602.3	1 826.5	1 901.4	2 321.7	2 859.4	3 032.4	3 866.4	5 355.7
福建	1 759.2	1 859.9	1 864.5	1 937.9	1 943.3	1 940.6	1 872.9	1 920.3	2 317.6	2 673.0
山东	2 630.8	2 036.9	1 733.9	1 364.3	1 049.9	833.4	841.1	724.4	916.9	1 075.0
广东	2 519.0	2 481.5	2 546.7	2 426.9	2 339.2	2 045.3	2 129.4	2 047.5	2 460.2	3 083.6
海南	1 025.3	1 033.6	1 041.0	1 019.2	968.8	955.9	959.8	948.2	933.5	950.1
山西	835.0	765.7	648.8	542.7	489.1	500.1	587.4	499.1	398.7	447.8
吉林	1 518.1	1 436.7	1 220.5	1 182.7	1 169.0	1 099.0	1 120.7	1 075.2	998.9	1 062.3
黑龙江	2 510.8	2 320.3	2 036.9	1 997.2	1 945.5	1 697.1	1 677.2	1 515.9	1 426.9	1 451.9
安徽	1 618.8	1 492.0	1 424.3	1 392.8	1 338.2	1 243.5	1 270.0	1 277.4	1 353.4	1 497.5
江西	1 553.8	1 486.7	1 460.0	1 456.9	1 434.5	1 404.7	1 429.7	1 389.3	1 530.5	1 811.4
河南	3 547.3	2 692.7	2 208.3	1 980.9	1 760.3	1 632.9	1 797.2	1 721.8	2 002.0	2 643.0
湖北	2 369.4	2 289.7	2 159.7	2 065.2	1 572.2	1 547.7	1 540.4	1 447.5	1 602.5	1 695.4
湖南	1 979.7	1 764.4	1 583.3	1 550.9	1 512.8	1 534.4	1 611.2	1 612.7	1 666.4	1 799.0
广西	1 627.3	1 548.5	1 517.3	1 458.4	1 406.2	1 411.9	1 426.8	1 382.2	1 349.4	1 402.5
重庆	1 408.6	1 390.9	1 355.9	1 362.0	1 323.2	1 291.2	1 310.2	1 343.0	1 574.2	1 684.6
四川	2 517.3	2 285.1	2 340.6	2 231.9	2 102.8	2 066.8	2 058.0	2 015.3	2 194.3	2 354.4
贵州	1 181.2	1 133.1	1 116.8	1 035.7	1 066.4	1 004.2	989.6	1 005.0	996.5	1 042.6
云南	1 418.9	1 275.2	1 207.0	1 206.3	1 334.9	1 336.8	1 350.5	1 368.9	1 444.9	1 632.7
陕西	1 823.8	1 687.2	1 602.7	1 458.9	1 398.5	1 264.4	1 254.5	1 138.7	1 135.7	1 080.0
甘肃	1 260.4	1 202.8	1 172.5	1 139.4	1 092.0	1 071.3	1 093.2	1 048.5	996.6	1 048.7
青海	930.3	924.7	920.2	907.0	893.8	884.2	900.8	904.2	914.1	913.4
宁夏	882.6	884.9	866.4	846.1	818.8	783.0	767.2	725.0	636.9	629.4
新疆	1451.6	1387.8	1323.1	1251.5	1214.9	1149.5	1090.0	1005.1	961.7	890.7

注: 边际减排成本单位为元/t.

表4是方向性距离函数的估计结果,首先通过分析发现,各个省份方向距离函数值为0的个数为6个,这说明在298个有效样本中,具有技术效率的样本仅为6个(北京、江苏、浙江、福建、广东、海南),从而意味着全国各省份的技术效率水平普遍较低,因此,可以通过加大研发投入,进一步优化投入要素的产出组合,以实现效率最大化,

从而进一步降低方向距离函数的值.其次,各省份方向距离函数的均值是0.25,这说明各省份的平均无效率生产程度是25%.由于各省份的2003年~2012年期间,CO<sub>2</sub>排放量均值是29 789万t,GDP均值是8 124亿元,因此可以通过效率的改善,使得CO<sub>2</sub>排放量减少7 447万t,而GDP增加2 031亿元,从而提高了合意产出,并降低了非合意产出.

表4 我国各省份(直辖市、自治区)CO<sub>2</sub>的方向距离函数值

Table 4 Value of directional distance function of CO<sub>2</sub> produced by each province (municipality) of China

距离函数	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
北京	0.090 1	0.092 6	0.090 4	0.087 0	0.084 1	0.062 0	0.065 5	0.048 3	0.011 6	0
天津	0.065 1	0.066 8	0.060 5	0.056 1	0.065 3	0.016 4	0.044 5	0.068 2	0.108 8	0.132 9
河北	0.415 0	0.427 5	0.476 6	0.505 3	0.503 0	0.514 8	0.617 5	0.669 9	0.724 9	0.933 2
山西	0.515 1	0.516 2	0.533 5	0.579 1	0.593 2	0.530 6	0.618 2	0.624 9	0.657 4	0.781 7
辽宁	0.440 2	0.501 3	0.544 5	0.573 6	0.595 3	0.609 7	0.669 1	0.721 2	0.814 1	0.912 3
吉林	0.138 7	0.139 0	0.160 2	0.179 8	0.167 7	0.201 4	0.244 4	0.296 0	0.320 8	0.360 3
黑龙江	0.272 5	0.279 9	0.297 2	0.313 4	0.342 7	0.334 0	0.388 0	0.403 2	0.412 5	0.479 6
上海	0.122 3	0.085 4	0.085 9	0.066 5	0.057 8	0.047 9	0.051 4	0.038 1	0.102 6	0.142 5
江苏	0.132 4	0.155 8	0.178 7	0.195 1	0.192 5	0.091 8	0.068 9	0.021 4	0.018 9	0
浙江	0	0.058 8	0.144 3	0.208 5	0.246 2	0.291 9	0.351 1	0.341 7	0.384 8	0.348 3
安徽	0.170 0	0.151 2	0.162 1	0.188 9	0.222 3	0.268 1	0.347 3	0.384 9	0.413 7	0.496 2
福建	0	0.022 6	0.053 6	0.067 0	0.075 2	0.081 2	0.120 2	0.140 5	0.207 8	0.223 9
江西	0.059 4	0.071 7	0.083 4	0.103 4	0.122 0	0.110 5	0.165 4	0.208 6	0.235 0	0.296 1
山东	0.441 2	0.537 7	0.797 7	0.799 6	0.837 8	0.764 8	0.780 9	0.845 7	0.990 6	1.062 7
河南	0.308 8	0.440 2	0.495 9	0.556 2	0.590 3	0.571 6	0.640 0	0.687 2	0.829 5	0.793 4
湖北	0.224 7	0.244 1	0.265 8	0.291 5	0.271 2	0.232 0	0.262 6	0.296 6	0.374 3	0.391 1
湖南	0.093 8	0.106 5	0.180 3	0.190 8	0.199 3	0.159 1	0.192 7	0.190 5	0.220 7	0.234 1
广东	0.059 3	0.088 5	0.111 9	0.114 7	0.100 7	0	0.035 1	0.066 5	0.185 0	0.167 4
广西	0.029 3	0.041 0	0.045 8	0.045 7	0.044 4	0.049 2	0.094 1	0.131 0	0.176 1	0.248 9
海南	0.005 6	0.002 6	0	0.006 1	0.022 0	0.018 0	0.028 0	0.029 0	0.038 1	0.054 7
重庆	0.060 7	0.071 8	0.097 8	0.122 5	0.164 1	0.131 3	0.172 0	0.204 6	0.235 9	0.260 1
四川	0.255 6	0.275 9	0.267 6	0.292 7	0.333 9	0.337 2	0.421 0	0.415 1	0.389 7	0.413 2
贵州	0.162 1	0.187 0	0.203 1	0.231 4	0.223 9	0.202 4	0.239 0	0.249 9	0.280 1	0.331 4
云南	0.121 8	0.138 8	0.171 3	0.199 8	0.228 6	0.234 5	0.290 2	0.322 8	0.331 7	0.375 7
陕西	0.160 2	0.189 7	0.209 7	0.245 3	0.274 8	0.261 8	0.320 7	0.375 3	0.419 0	0.514 4
甘肃	0.107 4	0.115 4	0.125 4	0.128 6	0.140 5	0.142 9	0.163 1	0.183 6	0.215 2	0.260 4
青海	0.005 9	0.006 9	0.008 9	0.014 7	0.020 4	0.018 1	0.030 0	0.029 8	0.042 3	0.061 4
宁夏	0.052 9	0.050 1	0.059 3	0.065 7	0.070 5	0.070 1	0.086 3	0.102 7	0.131 3	0.164 3
新疆	0.159 4	0.175 9	0.193 0	0.211 8	0.229 3	0.244 4	0.312 8	0.321 3	0.380 9	0.458 8



2.1.2 CO<sub>2</sub> 边际减排成本的区域差异

基于表 3 和表 4 的分析结果,计算了各个省份(直辖市、自治区)的平均减排成本:北京(3 176 元/t)、浙江(2 546 元/t)、广东(2 408 元/t)、四川(2 217 元/t)、河南(2 199 元/t)、福建(2 009 元/t)、黑龙江(1 858 元/t)等省份的减排成本较高.它们大多为东部沿海省份,经济较为发达,减少一单位 CO<sub>2</sub> 排放所要付出的经济代价较大.与此同时,减排成本较低的省份大多来自内陆地区,其中包括贵州(1 057 元/t)、辽宁(1 045 元/t)、海南(984 元/t)、青海(909 元/t)、宁夏(784 元/t)、河北(700 元/t)、以及山西(571 元/t).同时,与北京、广东等省份相比,作为东部沿海省份海南省的减排成本较低.究其原因,这是因为农业及旅游业是海南的支柱产业.作为碳排放的主要来源,传统农业创造的 GDP 相对较低,因此减少一单位 CO<sub>2</sub>

排放所造成的经济损失也相应较小.与此同时, Murty 等<sup>[11]</sup>、魏楚<sup>[16]</sup>在研究中指出,CO<sub>2</sub> 的排放具有规模效应,即碳排放浓度越大,其减排所需付出的成本也越低,该理论能够很好地解释山西的 CO<sub>2</sub> 排放量较高,而其边际减排成本却最低这一现象.山西作为产煤大省,第二产业居于主导地位,存在大量的工业碳排放,而且以煤炭为主的能源消费结构更是加剧了污染排放<sup>④</sup>.同时还发现减排成本最低的省份(山西)甚至不及减排成本最高的省份(北京)的 1/5,由此看出不同省份之间的减排成本差异较大,这就为在全国范围内不同省份之间建立碳排放交易市场提供了客观基础.

为了更直观观察我国各省份的减排成本和距离函数,分别画出了 2003 年、2007 年、2010 年以及 2012 年中国各省份减排成本均值的柱状图(见图 1).

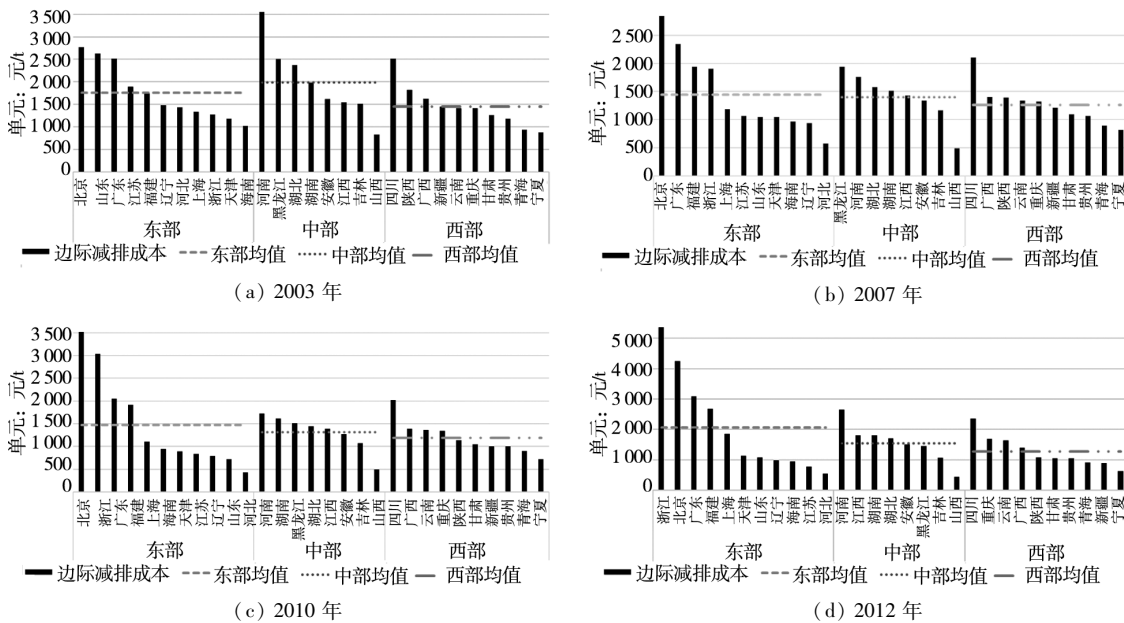


图 1 各省份边际减排成本

Fig. 1 Marginal reduction costs of each province

从柱状图中可以看到,随着我国经济不断发展,边际减排成本较高的省份逐渐从中部向东南部沿海转移,形成边际减排成本最高的第一阶梯,同时边际减排成本次高的第二阶梯聚集在中部地区,其余省份组成第三、四阶梯.此外,各省份边际减排成本的渐进演变,也反映了我国经济发展模式的变化,第三产业逐渐成型并聚集在东南沿海,相应地,这些地区也成为了全国边际减排成本最高的

地区.由图 1 还直观地看出,边际减排成本与经济发展程度成正比:经济越发达,要减排一单位的非合意产出所需要付出的经济代价就越大.

在前文的基础上,对我国各省份的边际减排成本均值(影子价格)进行区域分析(如图 2 所示).结果表明,减排成本呈现出“东部 > 中部 > 西部”的关系,其中东部为 1 602 元、中部为 1 524 元、而西部为 1 285 元.由此可见,西部成为最具碳

④ 相关研究表明燃烧煤炭产生的 CO<sub>2</sub> 要远高于天然气、石油等燃料.

排量出售潜力的地区,一方面是其减排成本低于东部和中部的整体水平,另一方面则是其经济发展较慢、碳排放量较小.按照比较优势理论,西部省份更适合成为我国碳排放交易市场的出售方,而东部地区则更可能成为交易配额的购买方.此外,未来碳排放交易的定价机制可能会影响产业布局,随着产业结构的优化,东部很可能将高排放的第二产业向中西部逐步转移,并加速发展第三产业.

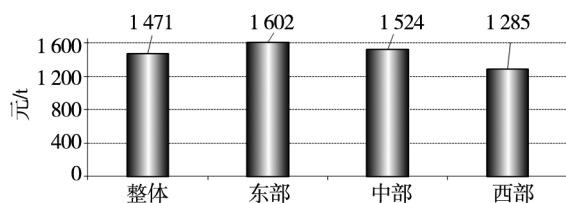


图2 各区域边际减排成本均值

Fig.2 Average of marginal reduction costs in each region

表5 相关文献边际减排成本比较

Table 5 Comparison of marginal abatement costs in related literature

作者	样本	模型	减排成本
Wang 等 <sup>[18]</sup>	2007年中国28个省市	DDF	475元/t
Du 等 <sup>[21]</sup>	2001年~2010年中国30个省市	DDF	1300元/t
Ma 等 <sup>[29]</sup>	2001年~2010年中国30个省市	DDF	2251元/t
本文	2003年~2012年中国29个省市	DDF	1471元/t

注:SBM、DDF、DF分别代表 slacks-based measure, 方向距离函数(directional distance function)与距离函数(distance function)

## 2.2 边际减排成本影响因素的定性分析

在以上对各个省份(直辖市、自治区)的边际减排成本与技术效率进行分析的基础上,本文深入考察了我国省际间边际减排成本的影响因素,具体而言,考察了包括CO<sub>2</sub>排放浓度、能源结构、产业结构、城市化水平、私家车拥有量等在内的8个因素对减排成本大小的影响.具体如下:

1) CO<sub>2</sub>排放浓度(CI),本文使用CO<sub>2</sub>排放量/万元GDP的对数值作为CO<sub>2</sub>排放浓度(CI)的测量指标.相关文献的研究结果显示,CO<sub>2</sub>减排具有规模效应,即排放浓度越大,边际减排成本越小.因此预期边际减排成本与排放浓度之间存在负相关的关系.

2) 能源消费结构(ECS),本文采用煤炭消费占总能源消费的比例来测量.研究表明,燃烧煤炭产生的二氧化碳量是天然气的1.6倍,是石油燃

现有文献中,采用方向距离函数(directional distance function, DDF)对CO<sub>2</sub>边际减排成本进行测算的结果存在着一定的差异,如表5所示,Wang 等<sup>[18]</sup>测算结果与本文测算结果的数量级差距较大;与此同时,Du 等<sup>[21]</sup>和Ma 等<sup>[29]</sup>与本文测算结果的数量级相同,但具体数值仍然存在差异.具体来看,前者数量级上的差距,主要与样本时间选取有关,后者的区别则反映了将投入产出扩展到不同距离函数的技术前沿的路径差异.接下来,本文基于DDF测算了减排成本,在中国的省际层面和区域层面做了更为细致的比较,并在此基础上,对边际减排成本的影响因素展开全面、深入的分析与检验,是对现有文献的有益补充.

烧的1.2倍.此外,根据污染减排物的规模效应,随着技术的进步,以煤炭为主要能源的地区可以通过使用替代性的清洁能源来减少CO<sub>2</sub>排放,从而使得这些地区具有更小的减排难度与减排成本,因此,预期煤炭的消费比重越高,边际减排成本越低,两者呈负相关关系.

3) 人力资源水平(HR),从广义角度而言,人力资源分为数量和质量两个方面.然而由于人力资源质量涵盖的范围比较复杂,相对较为难以精准的衡量,虽然已有学者们采用了劳动收入、受教育年限、识字率、师生比等多个指标来度量人力资源质量水平,但这些指标仍存在一定的争议,只能部分的代表人力资源质量水平.相比之下,人力资源数量则直观明了且较易度量<sup>⑤</sup>,因此本文主要考虑使用人力资源数量(HRQT1)来代表人力资

⑤ 而从狭义的角度,人力资源数量水平的已有度量已经较为接近人力资源的定义,这也是本文只考虑使用人力资源数量来代表人力资源水平的另一个重要原因.

源水平<sup>⑥</sup>，并采用各省份劳动人口的对数值来表示，同时为了进一步保证结果的可靠性，采用了各省份劳动人口占其总人口的比重(*HRQT2*)作为其稳健性的代理变量。

4) 产业结构(*IS*)，采用三大产业的细分产业来衡量。在三大产业当中，我国第二产业由于广泛使用化石燃料而产生大量的污染排放，可以通过使用清洁能源来减少第二产业对于化石燃料的依赖，或者发展碳排放较小的第三产业来促进经济，因此，第二产业比重较高的省份，其边际减排成本会较小，两者呈负相关关系。

5) 相关碳排放政策(*CEP*)，采用虚拟变量来表示我国的碳排放政策<sup>⑦</sup>。由于我国碳排放政策推出相对较晚，直至2011年11月，国家发改委才批准7个省市建立试点碳市场。故在本文的时间样本区间内，有关的碳排放政策对边际减排成本可能产生较大影响的包括2009年11月“国务院决定将‘2020年单位国内生产总值二氧化碳比2005年下降40%~45%’作为约束性指标纳入国民经济和社会发展中长期规划”这一政策<sup>⑧</sup>，因此对于政策虚拟变量，本文将2010年之前取值为0，2010年及之后取值为1。

6) 城市化水平(*UL*)，使用城市人口占总人口的比重来表示。Yang等<sup>[30]</sup>在研究城市化水平对CO<sub>2</sub>排放量影响时指出，城市化对CO<sub>2</sub>排放的影响是不确定的。一方面，由于城市里的人口密度较大，汽车等生活、工作设施相对完备，工业的快速发展使得城市的碳排放量高于农村。但另一方面，城市可以通过优化能源结构、改进技术、使用清洁能源来减少CO<sub>2</sub>的排放。因此，城市化水平对减排成本的作用方向尚未明确。

7) 研发强度(*RD*)，这一指标用各省的实验与研发经费在各省GDP中的占比来表示。研发强

度增加推动了技术进步，而技术的改进则提高社会生产力，促进经济增长。同时，相关的研究表明，技术进步导致了边际减排成本上升(Bauman<sup>[31]</sup>；Heal等<sup>[32]</sup>)。此外，申萌等<sup>[32]</sup>讨论了技术进步与CO<sub>2</sub>排放的关系，通过“技术进步—经济增长—CO<sub>2</sub>排放”和“技术进步—CO<sub>2</sub>排放”两条路径检验技术进步对我国CO<sub>2</sub>排放的影响，发现在过去的经济发展中，我国技术进步的直接效应为负，即是技术进步减少了CO<sub>2</sub>排放量。根据污染物规模效应，排放水平与边际减排成本成反向变动<sup>[16]</sup>，因此，技术进步在减少了CO<sub>2</sub>排放水平的同时，导致了CO<sub>2</sub>边际减排成本的增加。此外，在其他因素确定的情况下，技术进步可以减少供、产、销环节转变和转换的能源损耗，提高效率，这使得通过改进技术来减少排放的可能性将会更小。因此，本文预期研发强度越大的省份，减排成本将会越大。

8) 私人汽车拥有量(*PC*)，本文使用各省份的总私人汽车数量除以各省人口总数来衡量。汽车尾气排放是碳排放的主要来源之一，预期人均汽车拥有量越高，尾气排量越大，由于可以更多地通过使用新型能源汽车来减少尾气排放，因此，私人汽车拥有量越高的地区，其CO<sub>2</sub>边际减排成本也越低，两者呈负相关关系。

上述8大影响因素的相关数据来源于相关年份的《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》、《中国人口统计年鉴》、《中国科技统计年鉴》、《中国汽车市场年鉴》、《国家统计局》以及各省的《统计年鉴》。

### 2.3 边际减排成本影响因素的先验分析

首先画出各个省份的CO<sub>2</sub>排放浓度(*CI*)、能源消费结构(*ECS*)、汽车私人拥有量(*PC*)以及研发强度(*RD*)的柱状图(见图3)，作为检

⑥ 从理论上来看，人力资源水平与经济发展很可能具有高度的相关性，且相关系数分析结果显示它们的相关系数为0.834，故为了避免多重共线性等问题，本文在考虑之后剔除了原来的经济发展水平变量。

⑦ 由于本文中政策变量为时间虚拟变量，无法放入截面数据和滚动面板数据中回归，因此后文中只在普通面板中加入了碳排放政策变量进行回归，以考察其对CO<sub>2</sub>边际减排成本的影响。

⑧ 相关碳排放政策的参考来源于中国碳排放交易网，网址为<http://www.tanpaifang.com>。

验潜在影响因素的直观判断和先验分析<sup>⑨</sup>。由图3中“a. 各省 CO<sub>2</sub> 排放浓度 (CI)”可以清楚地看出, 各省份 CO<sub>2</sub> 排放浓度 (CI) 总体上呈现出东南低, 西北高的分布, 这和边际减排成本分布大致相反; 图3 中的研发强度 (RD) 呈现出东部沿海高, 中部和西部低的分布, 这和边际减排成本的分布基本上相同。此外, 由各省能源消

费结构分布图可以看出, 中部省份 (山西、河南、安徽、湖南、吉林等) 的煤炭消费在总能源消费中所占的比例最高。最后, 根据图3 中“c. 各省私人汽车拥有量 (PC)”发现东部的各省份 (北京、天津、江苏、河北、广东等) 拥有较高的私人汽车拥有量, 而中西部省份的私人汽车拥有量偏低。

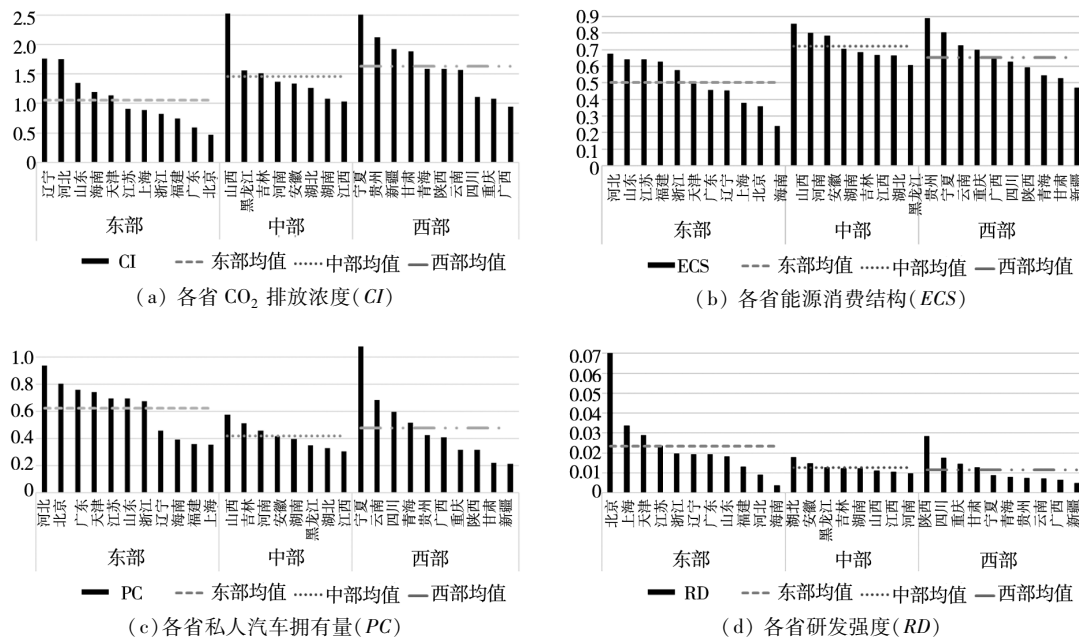


图3 边际减排成本影响因素的先验分析

Fig. 3 Apriori analysis of factors influencing marginal emission reduction

### 2.4 CO<sub>2</sub> 边际减排成本影响因素的截面回归分析

在上述先验分析的基础上, 对 CO<sub>2</sub> 边际减排成本的潜在影响因素进行回归分析。本文采用逐步回归法的研究思路, 即逐一增加解释变量以对各影响因素进行统计检验。首先将 CO<sub>2</sub> 排放浓度 (CI) 放入回归模型, 并通过逐一增加变量以观察新的解释变量是否具有统计意义上的显著性。此外, 为了控制地区差异可能带来的影响, 引入了虚拟变量“东部 (East)”和“中部 (Central)”作为控制变量, 并将回归结果列于表 6。基于表 6 的检验结果可以发现, CO<sub>2</sub> 排放浓度 (CI) 和能源消费结构 (ECS) 与 CO<sub>2</sub> 边际减排成本呈显著的负相关关系, 这就意味着: CO<sub>2</sub> 排放浓度与其边际减排成本之间的确存在着规模效应, 即排放浓度越大, 其减

排成本越小; 同时, 使用煤炭能源比重较大的地区, 其边际减排成本较小。这与 2.2 节关于能源结构与减排成本关系的讨论结果一致。

与之相反的是, CO<sub>2</sub> 排放浓度二次项 (CI<sup>2</sup>) 和研发强度 (RD) 则与 CO<sub>2</sub> 边际减排成本之间存在显著的正相关关系, 这意味着在进一步考虑排放浓度的平方项之后, 其与 CO<sub>2</sub> 边际减排成本的规模效应是存在着阈值的, 超过这一阈值后, 两者间的关系会呈现出与原来相反的变化趋势。减排成本与排放浓度呈 U 型关系的结论, 与魏楚<sup>[16]</sup>的研究结果相一致; 此外, 表 6 显示研发强度与减排成本呈显著正相关关系, 这验证了 2.2 节的相关讨论, 也与 Bauman<sup>[31]</sup> 以及 Heal 等<sup>[32]</sup> 的研究结论相一致。

⑨ 为了节省论文空间, 没有报道出所有影响因素的省际分布图, 有兴趣的读者可向作者索取。

表6 边际减排成本影响因素的截面分析

Table 6 Cross-sectional analysis of factors affecting marginal reduction costs

解释变量	模型 I	模型 II	模型 III	模型 IV	模型 V	模型 VI	模型 VII	模型 VIII
截距项	0.280 *** (0.033)	0.390 *** (0.066)	0.326 *** (0.061)	0.315 *** (0.071)	0.201 *** (0.068)	0.274 ** (0.105)	0.264 ** (0.113)	0.266 ** (0.118)
<i>CI</i>	-0.093 *** (0.017)	-0.252 *** (0.080)	-0.194 *** (0.066)	-0.191 *** (0.068)	-0.227 *** (0.064)	-0.226 *** (0.069)	-0.215 *** (0.072)	-0.218 ** (0.082)
<i>CI</i> <sup>2</sup>		0.052 ** (0.024)	0.036 * (0.020)	0.035 (0.021)	0.054 ** (0.022)	0.055 ** (0.024)	0.051 ** (0.024)	0.052 * (0.027)
<i>RD</i>			1.188 * (0.615)	1.225 * (0.608)	1.192 * (0.603)	1.856 ** (0.738)	1.747 ** (0.678)	1.773 ** (0.775)
<i>ECS</i>				0.014 (0.060)	-0.098 * (0.056)	-0.132 * (0.066)	-0.165 * (0.082)	-0.168 * (0.094)
<i>HRQT1</i>					0.027 *** (0.006)	0.022 ** (0.008)	0.023 ** (0.008)	0.023 ** (0.009)
<i>UL</i>						-0.102 (0.093)	-0.102 (0.088)	-0.106 (0.106)
<i>PC</i>							0.037 (0.038)	0.037 (0.040)
<i>IS</i>								0.013 (0.122)
<i>East</i>	-0.022 (0.019)	-0.031 (0.020)	-0.036 * (0.018)	-0.035 * (0.020)	-0.052 *** (0.018)	-0.040 * (0.022)	-0.050 * (0.027)	-0.050 * (0.026)
<i>Central</i>	0.008 (0.017)	0.009 (0.019)	0.009 (0.018)	0.008 (0.019)	0.002 (0.018)	0.012 (0.021)	0.015 (0.021)	0.015 (0.022)
AdjustedR <sup>2</sup>	0.474	0.540	0.566	0.547	0.614	0.620	0.614	0.592

注：1. \*\*\*、\*\*及\*分别表示通过1%、5%及10%的显著性水平检验。

2. 括号为标准差。

## 2.5 边际减排成本影响因素的面板回归分析

考虑到上述的回归分析是基于29个省份的横截面数据,样本量较小,为了保证结果的可靠性与合理性,先对CO<sub>2</sub>边际减排成本的影响因素进行了面板检验.与截面回归部分保持一致,仍然采用逐步回归的检验方法,将CO<sub>2</sub>排放浓度等潜在影响因素逐一放入面板回归模型,由此进行面板分析.首先基于全国的样本数据展开分析,同样地,与前文相一致,本文引入了东部

(*East*)和西部(*West*)的虚拟变量以控制地区差异,具体地回归结果列于表7的Panel A.此外,对人力资源水平变量进行了替换,以进一步考察检验结果的稳健性,并将结果列于表7的Panel B.无论是基于Panel A还是Panel B的回归结果,都可以清楚地看到,CO<sub>2</sub>排放浓度及其二次项、研发强度以及能源消费结构等关键变量与CO<sub>2</sub>边际减排成本的关系同前文截面数据的分析结果保持一致.

表 7 CO<sub>2</sub> 边际减排成本影响因素的普通面板分析 (基于全国样本)

Table 7 General panel analysis of CO<sub>2</sub> marginal emission reduction cost influencing factors (Based on the national sample)

Panel A									
解释变量	模型 I	模型 II	模型 III	模型 IV	模型 V	模型 VI	模型 VII	模型 VIII	模型 IX
截距项	0.272 *** (0.012)	0.378 *** (0.026)	0.334 *** (0.023)	0.339 *** (0.028)	0.214 *** (0.032)	0.211 *** (0.030)	0.268 *** (0.037)	0.266 *** (0.037)	0.265 *** (0.037)
CI	-0.088 *** (0.007)	-0.243 *** (0.031)	-0.204 *** (0.025)	-0.205 *** (0.026)	-0.229 *** (0.026)	-0.225 *** (0.026)	-0.221 *** (0.026)	-0.222 *** (0.026)	-0.218 *** (0.027)
CI <sup>2</sup>		0.051 *** (0.009)	0.040 *** (0.007)	0.041 *** (0.008)	0.055 *** (0.008)	0.054 *** (0.008)	0.053 *** (0.008)	0.054 *** (0.008)	0.054 *** (0.009)
RD			0.806 *** (0.250)	0.792 *** (0.253)	0.743 *** (0.241)	1.002 *** (0.223)	1.517 *** (0.268)	1.636 *** (0.269)	1.583 *** (0.279)
ECS				-0.006 (0.024)	-0.101 *** (0.023)	-0.099 *** (0.022)	-0.120 *** (0.023)	-0.103 *** (0.023)	-0.096 *** (0.026)
HRQT1					0.026 *** (0.003)	0.026 *** (0.003)	0.022 *** (0.003)	0.021 *** (0.003)	0.022 *** (0.003)
CEP						-0.022 *** (0.007)	-0.025 *** (0.006)	-0.014 * (0.007)	-0.013 * (0.007)
UL							-0.080 *** (0.029)	-0.079 *** (0.030)	-0.073 ** (0.033)
PC								-0.021 ** (0.010)	-0.021 ** (0.010)
IS									-0.031 (0.036)
East	-0.019 *** (0.007)	-0.027 *** (0.007)	-0.031 *** (0.007)	-0.031 *** (0.008)	-0.046 *** (0.007)	-0.049 *** (0.007)	-0.038 *** (0.009)	-0.033 *** (0.009)	-0.032 *** (0.009)
Central	0.009 (0.006)	0.010 (0.007)	0.010 (0.007)	0.011 (0.007)	0.004 (0.007)	0.003 (0.006)	0.011 (0.007)	0.009 (0.007)	0.009 (0.007)
Adjusted R <sup>2</sup>	0.381	0.447	0.461	0.459	0.511	0.530	0.541	0.546	0.545
Panel B									
截距项	0.272 *** (0.012)	0.378 *** (0.026)	0.334 *** (0.023)	0.339 *** (0.028)	0.280 *** (0.032)	0.272 *** (0.030)	0.329 *** (0.035)	0.319 *** (0.035)	0.320 *** (0.035)
CI	-0.088 *** (0.007)	-0.243 *** (0.031)	-0.204 *** (0.025)	-0.205 *** (0.026)	-0.220 *** (0.027)	-0.217 *** (0.027)	-0.213 *** (0.026)	-0.216 *** (0.027)	-0.214 *** (0.028)
CI <sup>2</sup>		0.051 *** (0.009)	0.040 *** (0.007)	0.041 *** (0.008)	0.049 *** (0.008)	0.048 *** (0.008)	0.049 *** (0.008)	0.050 *** (0.008)	0.050 *** (0.009)
RD			0.806 *** (0.250)	0.792 *** (0.253)	0.635 ** (0.259)	0.903 *** (0.242)	1.526 *** (0.275)	1.655 *** (0.277)	1.628 *** (0.283)
ECS				-0.006 (0.024)	-0.045 * (0.024)	-0.045 ** (0.023)	-0.079 *** (0.024)	-0.059 ** (0.024)	-0.055 ** (0.027)
HRQT2					0.163 *** (0.039)	0.181 *** (0.037)	0.140 *** (0.036)	0.146 *** (0.036)	0.149 *** (0.035)
CEP						-0.024 *** (0.006)	-0.027 *** (0.006)	-0.013 * (0.007)	-0.012 * (0.007)
UL							-0.093 *** (0.026)	-0.089 *** (0.027)	-0.087 *** (0.028)
PC								-0.027 *** (0.009)	-0.027 *** (0.009)
IS									-0.016 (0.037)
East	-0.019 *** (0.007)	-0.027 *** (0.007)	-0.031 *** (0.007)	-0.031 *** (0.008)	-0.034 *** (0.008)	-0.038 *** (0.008)	-0.027 *** (0.008)	-0.021 ** (0.008)	-0.021 ** (0.008)
Central	0.009 (0.006)	0.010 (0.007)	0.010 (0.007)	0.011 (0.007)	0.012 * (0.007)	0.012 * (0.006)	0.019 *** (0.007)	0.016 ** (0.007)	0.016 ** (0.007)
Adjusted R <sup>2</sup>	0.381	0.447	0.461	0.459	0.486	0.508	0.525	0.533	0.532

注: 1. \*\*\*、\*\*及\*分别表示通过1%、5%及10%的显著性水平检验。

2. 括号号为标准差。

而人力资源水平 ( $HRQT2$ )、从碳排放政策 ( $CEP$ )、城市化水平 ( $UL$ ) 以及私人汽车拥有量 ( $PC$ ) 来看,在克服了截面分析小样本的局限性之后,面板分析的结果显示这些解释变量对于  $CO_2$  边际减排成本也有着重要的影响. 其中私人汽车拥有量、碳排放政策、城市化水平的系数均显著为负,原因在于,私人汽车拥有量较高的地区,可以通过推广新型能源汽车或者“绿色出行”的方式来减少污染排放,从而使得此类地区具有较大的减排空间与较低的减排成本. 至于碳排放政策与边际减排成本呈负相关,表明了 2009 年减排政策在实施后的确在一定程度上控制了碳的排放从而有效降低边际减排成本. 此外,城市化水平越高的省份,其  $CO_2$  减排成本越低,可能的原因是城市化程度越高,减排技术以及基础设施的完备性也越高,可以通过改变能源消费结构、充分发挥基础设施的规模效应来减少  $CO_2$  的排放. 与之相反的是,人力资源水平的系数为正,可能的原因在于人力资源水平是现代社会推动经济发展的重要因素 (甚至可以说是第一要素),因此人力资源水平较高的地区,经济发展水平通常越高,而经济越发达的省份,减排一单位的非合意产出所需要付出的经济代价越大,故人力资源水平越高时,其  $CO_2$  减排成本也相应较大.

在前文面板估计的基础上,为了进一步保证结果的科学性和可靠性,采取“滚动面板”分析来对  $CO_2$  边际减排成本的影响因素进行检验. 具体而言,与杨子晖和田磊<sup>[34]</sup> 等人的研究相一致,为了克服横截面回归样本量较小的问题,本文采用“滚动窗口”的方法来构建  $CO_2$  边际减排成本潜在影响因素的面板数据,即对各潜在影响因素进行滚动平均,分别求出各个省份 (直辖市、自治区) 在 2003 年 ~ 2007 年、2004 年 ~ 2008 年…… 2008 年 ~ 2012 年各个潜在影响因素与减排成本的平均值,由此构造出相应的面板数据,并将检验结果列于表 8 的 Panel A. 基于表 8 的 Panel A 的结果,发现各个解释变量的系数符号及显著性的结果与前文普通面板回归的结果基本一致,分析结果表明除了产业结构这个因素,其余的变量均为重要的影响因素,且符号与显著性水平依然保持一致.

此外,考虑到东部省份是  $CO_2$  减排需求最大以及减排成本最高的区域,且地理位置及经济等方面具有高度相关性的区域都可能会对本文的研究结果产生影响,需要加以考虑,因此本文继续使用“滚动窗口”方法对东部地区进行面板检验. 再者,对于高度相关的区域选择了具有代表性的三个热点地区,包括环渤海及其周边地区 (北京、河北、天津、辽宁、山东和山西)、长三角及其周边地区 (江苏、浙江、上海、安徽、山东和福建) 以及泛珠三角邻近地区 (广东、湖南、广西、福建、江西和海南) 进行检验,并将相应的结果列于表 8 中的 Panel B<sup>⑩</sup>. 本文发现除了东部的  $IS$  变量,渤海地区的  $RD$  变量,泛珠三角的  $IS$ 、 $CI$  变量,多数变量的基本结论依然稳健. 此外,Panel B 的结果显示环渤海及周边地区的产业结构对  $CO_2$  边际减排成本有着负向的显著影响. 这是因为环渤海及周边地区包括了不少第二产业占比较大的省份,这些省份因为广泛使用化石燃料而产生大量的污染排放,可以通过使用清洁能源来减少第二产业对于化石燃料的依赖,故其相应的边际减排成本也相对较小.

## 2.6 $CO_2$ 边际减排成本影响因素的稳健性估计

在以上横截面分析以及面板分析的基础上,为了稳健起见,采用了 (半) 偏相关系数等检验方法来对  $CO_2$  边际减排成本与主要影响因素的相关关系 (包括截面和面板检验) 展开进一步分析. 其中,边际减排成本  $a$  与影响因素  $b$  的偏相关系数分析考察的是在其他影响因素保持不变的情况下, $a$  与  $b$  的相关关系; $a$  与  $b$  的半偏相关关系分析考察的则是将其他影响因素从  $b$  中过滤掉的基础上,再进一步来检验边际减排成本  $a$  与影响因素  $b$  之间的相关关系. 与此同时,还做了半偏相关系数的解释份额分析,其中偏相关系数的解释份额衡量的是边际减排成本  $a$  的变动被影响因素  $b$  单独解释的份额,而半偏相关系数的解释份额分析衡量的则是  $a$  中无法被其他因素刻画成分,有多大比重能被  $b$  所解释. 由此可见,基于半偏相关系数等指标的分析可以更加客观地衡量各个主要影响因素对于边际减排成本的“唯一”解释力度与贡献程度.

⑩ 篇幅所限,并未列出东部及热点地区逐步回归法的所有结果,在这类只报道考虑所有变量的最终结果.

表 8 CO<sub>2</sub> 边际减排成本影响因素的“滚动面板”分析  
Table 8 “Rolling panel” analysis of CO<sub>2</sub> marginal reduction costs

解释变量	模型 I	模型 II	模型 III	模型 IV	模型 V	模型 VI	模型 VII	模型 VIII
Panel A(全国样本)								
截距项	0.271 *** (0.014)	0.377 *** (0.028)	0.324 *** (0.024)	0.330 *** (0.028)	0.222 *** (0.031)	0.284 *** (0.046)	0.291 *** (0.044)	0.287 *** (0.047)
CI	-0.088 *** (0.007)	-0.240 *** (0.034)	-0.192 *** (0.026)	-0.194 *** (0.027)	-0.222 *** (0.027)	-0.223 *** (0.028)	-0.227 *** (0.028)	-0.220 *** (0.030)
CI <sup>2</sup>		0.049 *** (0.010)	0.037 *** (0.008)	0.038 *** (0.008)	0.053 *** (0.009)	0.054 *** (0.009)	0.056 *** (0.009)	0.054 *** (0.010)
RD			0.974 *** (0.268)	0.953 *** (0.265)	0.945 *** (0.259)	1.424 *** (0.332)	1.635 *** (0.322)	1.557 *** (0.338)
ECS				-0.008 (0.023)	-0.098 *** (0.022)	-0.123 *** (0.023)	-0.105 *** (0.023)	-0.095 *** (0.028)
HRQT1					0.023 *** (0.003)	0.019 *** (0.004)	0.018 *** (0.004)	0.019 *** (0.004)
UL						-0.080 ** (0.039)	-0.087 ** (0.039)	-0.076 (0.046)
PC							-0.024 ** (0.011)	-0.023 ** (0.010)
IS								-0.038 (0.043)
East	-0.025 *** (0.008)	-0.033 *** (0.008)	-0.037 *** (0.007)	-0.038 *** (0.008)	-0.052 *** (0.008)	-0.042 *** (0.009)	-0.036 *** (0.009)	-0.035 *** (0.009)
Central	0.005 (0.007)	0.006 (0.007)	0.006 (0.007)	0.007 (0.007)	0.001 (0.007)	0.008 (0.008)	0.007 (0.008)	0.007 (0.008)
Adjusted R <sup>2</sup>	0.465	0.537	0.562	0.559	0.614	0.624	0.631	0.630
Panel B(东部及高度相关地区样本)								
解释变量	东部样本		环渤海及周边地区		长三角及周边地区		泛珠三角临近地区	
截距项	0.531 *** (0.064)	0.398 *** (0.054)	1.350 *** (0.153)	1.443 *** (0.185)	1.378 *** (0.414)	0.550 ** (0.262)	-0.344 *** (0.123)	0.153 (0.143)
CI	-0.481 *** (0.060)	-0.646 *** (0.051)	-0.366 *** (0.051)	-0.341 *** (0.056)	-1.772 (1.153)	-1.734 ** (0.840)	0.200 ** (0.086)	-0.671 *** (0.211)
CI <sup>2</sup>	0.152 *** (0.024)	0.226 *** (0.022)	0.052 *** (0.011)	0.049 *** (0.013)	0.768 (0.489)	0.712 * (0.359)	-0.107 (0.087)	0.290 *** (0.098)
RD	3.549 *** (0.561)	1.720 *** (0.522)	-3.846 ** (1.602)	-3.097 (1.976)	5.161 ** (2.396)	1.880 (2.700)	2.964 ** (1.412)	-0.063 (1.676)
ECS	-0.227 *** (0.056)	-0.204 *** (0.053)	-0.395 *** (0.070)	-0.418 *** (0.092)	-0.611 *** (0.078)	-0.191 (0.192)	-0.208 *** (0.050)	0.016 (0.065)
HRQT1	0.008 (0.007)		0.015 * (0.008)		0.002 (0.067)		0.070 *** (0.007)	
HRQT2		0.495 *** (0.119)		0.093 (0.112)		1.623 ** (0.609)		0.522 *** (0.122)
UL	-0.337 *** (0.062)	-0.175 *** (0.053)	-0.215 * (0.118)	-0.345 *** (0.091)	-0.497 *** (0.137)	-0.004 (0.221)	-0.208 *** (0.071)	0.135 (0.085)
PC	-0.082 *** (0.016)	-0.078 *** (0.015)	-0.075 *** (0.012)	-0.082 *** (0.014)	-0.129 * (0.068)	-0.202 *** (0.049)	-0.099 *** (0.026)	-0.071 ** (0.033)
IS	0.259 *** (0.085)	0.140 * (0.071)	-0.537 *** (0.092)	-0.551 *** (0.148)	0.676 (0.432)	-0.430 (0.325)	0.099 *** (0.034)	0.110 ** (0.049)
East			-0.200 *** (0.040)	-0.188 *** (0.048)	-0.082 (0.130)	0.014 (0.050)	0.068 *** (0.010)	0.002 (0.011)
Central							-0.001 (0.010)	0.006 (0.014)
Adjusted R <sup>2</sup>	0.857	0.877	0.992	0.992	0.720	0.806	0.987	0.954

注: 1. \*\*\*、\*\*及\* 分别表示通过1%、5%及10%的显著性水平检验。  
2. 括号为标准差



首先,基于偏相关分析分别画出各省份(直辖市、自治区)CO<sub>2</sub>排放浓度、人力资源水平、能源消费结构和研发强度与边际减排成本的散点关系图.由图 4a.~图 4d.,可以直观地判断出,无论是 CO<sub>2</sub>排放浓度还是能源消费结构,两者均与边际减排成本呈现出较为明显的负相关关系,而人力

资源水平以及研发强度,则与边际减排成本形成显著的正相关关系,这与前文的检验结果相一致.因此,随着 CO<sub>2</sub>排放浓度以及煤炭能源所占比重的增加,边际减排成本显著下降,然而,随着人力资源水平的提高以及研发强度的加强,边际减排成本则呈现上升的趋势.

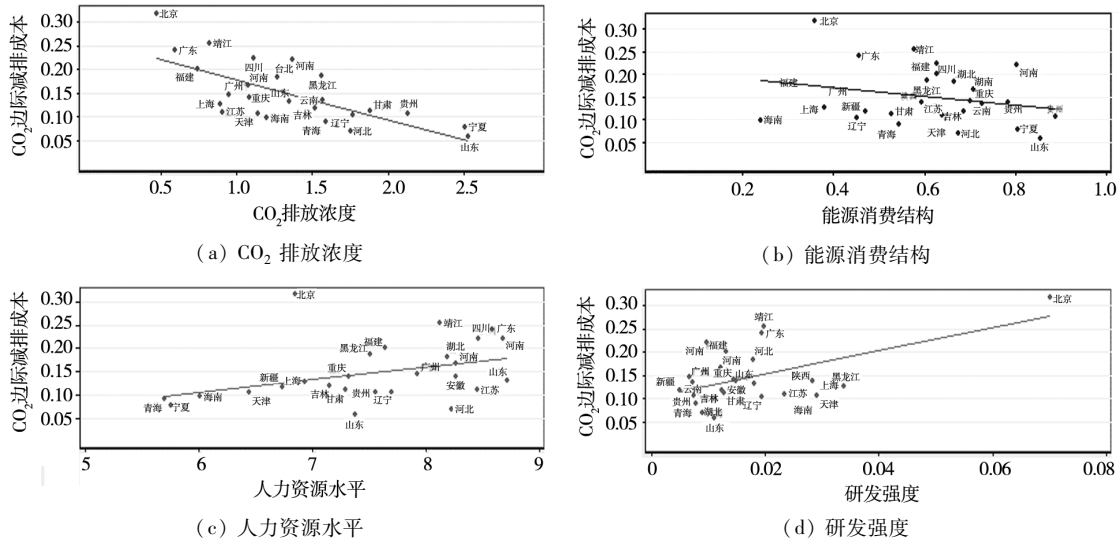


图 4 CO<sub>2</sub> 边际减排成本与影响因素的散点关系图

Fig. 4 Scatter diagram of CO<sub>2</sub> marginal reduction costs and its influencing factors

此外,基于截面的分析结果,无论是偏相关系数还是半偏相关系数分析(见表 9),均得到了一致的结论,即 CO<sub>2</sub>排放浓度与边际减排成本存在明显的负相关关系,相反 CO<sub>2</sub>排放浓度二次项和研发强度与边际减排成本则存在正相关关系,而产业结构与边际减排成本的(半)偏相关系数接近于零,两者关系并不显著.这与前文的截面回归结果相一致.但进一步地面板分析结果则表明,除了上述因素之外,城市化水平与私

人汽车拥有量也与边际减排成本有着显著地负相关关系,而人力资源水平则与边际减排成本存在显著地正相关关系.基于(半)偏相关系数的解释份额分析则表明,CO<sub>2</sub>排放浓度及其二次项、研发强度与私人汽车拥有量对 CO<sub>2</sub>边际减排成本的解释力度高达 4%~13.5%.城市化水平虽然能在一定程度上降低边际减排成本,但其解释力度只达到了 1.8%~3.7%左右.这与前文回归的检验结果基本一致.

表 9 边际减排成本主要影响因素的稳健性分析

Table 9 Robust analysis of the main factors influencing marginal emission reduction costs

解释变量	截面分析				面板分析			
	偏相关系数分析	半偏相关系数分析	解释份额分析(基于偏相关系数)	解释份额分析(基于半偏相关系数)	偏相关系数分析	半偏相关系数分析	解释份额分析(基于偏相关系数)	解释份额分析(基于半偏相关系数)
CI	-0.402	-0.254	0.162	0.064	-0.367	-0.270	0.135	0.073
CI <sup>2</sup>	0.298	0.180	0.089	0.032	0.284	-0.202	0.081	0.041
RD	0.386	0.242	0.149	0.059	0.291	0.208	0.085	0.043
HRQT1	0.249	0.149	0.062	0.022	0.224	0.157	0.050	0.025
UL	-0.261	-0.156	0.068	0.024	-0.192	-0.134	0.037	0.018
PC	-0.114	-0.066	0.013	0.004	-0.279	-0.199	0.078	0.040
IS	-0.067	-0.039	0.005	0.002	-0.083	-0.057	0.007	0.003

### 3 结束语

本文基于我国8种化石能源数据,结合二次型方向性距离函数模型,计算得到我国各省份(直辖市、自治区)CO<sub>2</sub>的方向距离函数值,分析结果表明,具有技术效率的样本仅为6个,这意味着全国各省份的技术效率水平普遍较低。同时,方向性距离函数的估计结果显示,各省份的平均无效率生产程度是25%,因此,通过效率的改善,可以减少未来非合意产出,而提高合意产出,使得代表性省份的减排潜力达到了7 447万t,而产出的提升潜力达到了2 031亿元。研究还发现,全国平均边际减排成本为1 471元/t,因此从整体上看,每减少一吨CO<sub>2</sub>的排放,其经济产出的代价是1 471元。同时边际减排成本整体呈现为“东部>中部>西部”的局面,这为在全国范围内不同省份之间建立碳排放交易市场提供了重要的参考依据。与此同时本文分析表明,与北京、广东等省份相比,作为东部沿海省份——海南省的减排成本相对较低,这是因为传统农业作为海南的支柱产业,是碳排放的主要来源,由于其创造的GDP相对较低,因此减少一单位CO<sub>2</sub>排放所造成的经济损失也相应较小。此外,碳排放的“规模效应”(Murty等<sup>[11]</sup>,魏楚<sup>[16]</sup>)较好地解释了山西作为“高排放省份,其边际减排成本却最低”这一经济现象。

在以上对各个省份(直辖市、自治区)的边际减排成本与技术效率进行分析的基础上,本文深入考察了全国各省份边际减排成本的影响因素。检验结果表明,CO<sub>2</sub>排放浓度、能源结构、人力资源水平、研发程度、碳排放政策、城市化水平、私人汽车拥有量是其主要的因素。首先,排放浓度的估计系数显著为负,这意味着减排具有规模效应,即排放浓度越大,边际减排成本越小。其次,减排成本与能源消费结构、城市化水平和私人汽车拥有量成显著的负相关关系,这就意味着以煤炭为主要消费能源的地区可以通过使用替代性的清洁能源来减少CO<sub>2</sub>排放,其节能减排的代价相对较小;而城市化程度越高的地方通常具有更高的减排技术及完备的基础设施,可以通过优化能源使用结构、充分发挥基础设施的规模效应等来减

少CO<sub>2</sub>的排放,从而降低碳减排成本;至于私人汽车拥有量较高的地区,也可以通过推广新型能源汽车或者“绿色出行”的方式来减少污染排放,从而使得此类地区具有较大的减排空间与较低的减排成本。与此同时还发现,人力资源水平以及研发强度与CO<sub>2</sub>边际减排成本之间存在显著的正相关关系。人力资源水平越高,CO<sub>2</sub>边际减排成本越大,这是由于人力资源水平较高的地区,经济发展水平通常越高,而经济越发达的省份,减排一单位的非合意产出所需要付出的经济代价越大;此外,碳排放的“规模效应”较好地解释了研发强度与减排成本的正相关关系。此外,在其他因素确定的情况下,技术进步可以减少供、产、销环节转变和转换的能源损耗,提高效率,这使得通过改进技术来减少排放的可能性将会更小。因此,研发强度越大的省份,减排成本则越高,这与Bauman<sup>[31]</sup>以及Heal等<sup>[32]</sup>的研究结论相一致。最后,检验结果还发现,2009年减排政策在实施后的确在一定程度上控制了碳的排放从而有效降低边际减排成本。

基于以上的研究,本文得到以下三点启示:

第一、省际间减排成本、排放总量、技术效率存在较大差异,这就为我国构建碳排放交易市场提供了客观的经济条件,可以通过市场化机制来优化污染物排放,并降低可能因“节能减排”而遭受的经济冲击。具体而言,由于西部地区的减排成本低于东、中部地区,且经济发展相对滞后、碳排放量较小,因此,按照比较优势理论,西部省份更适合成为我国碳排放交易市场的出售方,而东部地区则更可能成为交易配额的购买方。此外,未来碳排放交易的定价机制可能会影响产业布局,随着产业结构的优化,东部很可能将高排放的第二产业向中西部逐步转移,并加速发展第三产业。

第二,政府以及相关部门可以考虑施加“有形的手”,即通过改变现有的税收转移支付来降低交易双方的减排成本。值得考虑的做法是,政府可以基于各省份的边际减排成本分布,适当放松对那些经济发达但减排成本高昂省份的减排要求,但与此同时,政府必须对其征收碳税,并使得所收税率低于其自身减排的边际成本。而对于那些经济欠发达、减排成本低廉的省份,政府可以提

高对它们的减排要求,并在事后增加当地的财政转移支付以作为补偿,且使得转移支付高于其自身减排的边际成本,从而实现全社会减排分配的“帕累托改进”。

第三,针对 CO<sub>2</sub>减排的技术以及效率方面,若要使 CO<sub>2</sub>减排成本下降的同时,提升其减排效率,

有必要进行煤炭洁净化,并且在使用煤炭后积极地对其加以回收利用以减少 CO<sub>2</sub>排放,同时,还可以使用可替代的绿色清洁能源,调整以煤炭为主的能源消费结构;此外,还可以通过推广新型能源汽车或者“绿色出行”的方式来减少污染排放,以降低碳减排成本。

### 参 考 文 献:

- [1] 张国兴, 叶亚琼, 管欣, 等. 京津冀节能减排政策措施的差异与协同研究[J]. 管理科学学报, 2018, 21(5): 111-126.
- Zhang Guoxing, Ye Yaqiong, Guan Xin, et al. Difference and collaboration in Jing-Jin-Ji's energy saving and emission reduction policy measures[J]. Journal of Management Sciences in China, 2018, 21(5): 111-126. (in Chinese)
- [2] Kesicki F, Ekins P. Marginal abatement cost curves: A call for caution[J]. Climate Policy, 2012, 12(2): 219-236.
- [3] 石敏俊, 袁永娜, 周晟吕, 等. 碳减排政策: 碳税、碳交易还是两者兼之? [J]. 管理科学学报, 2013, 16(9): 9-19.
- Shi Minjun, Yuan Yongna, Zhou Shenglü, et al. Carbon tax, cap-and-trade or mixed policy: Which is better for carbon mitigation? [J]. Journal of Management Sciences in China, 2013, 16(9): 9-19. (in Chinese)
- [4] Edenhofer O, Kai Land, Kemfert C. Induced technological change: Exploring its implications for the economics of atmospheric stabilization: Synthesis report from the innovation modeling comparison project[J]. Energy Journal, 2006, 27: 57-107.
- [5] Weyant P, John F C, Chesnaye D L, et al. Overview of EMF-21: Multigas mitigation and climate policy[J]. Energy Journal, 2006, 27: 1-32.
- [6] Färe R, Grosskopf S, Lovell C A, et al. Derivation of shadow prices for undesirable outputs: A distance function approach [J]. The Review of Economics and Statistics, 1993, 75: 374-380.
- [7] Lee M. The shadow price of substitutable sulfur in the US electric power plant: A distance function approach[J]. Journal of Environmental Management, 2005, 77(2): 104-110.
- [8] Rezek J P, Campbell R C. Cost estimates for multiple pollutants: A maximum entropy approach[J]. Energy Economics, 2007, 29: 503-519.
- [9] Hailu A, Veeman T S. Environmentally sensitive productivity analysis of the Canadian pulp and paper industry, 1959-1994: An input distance function approach[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2000, 40(3): 251-274.
- [10] Färe R, Grosskopf S, Noh D W, et al. Characteristics of a polluting technology: Theory and practice[J]. Journal of Econometrics, 2005, 126: 469-492.
- [11] Murty M N, Kumar S, Dhavala K K. Measuring environmental efficiency of industry: A case study of thermal power generation in India[J]. Environmental and Resource Economics, 2007, 38: 31-50.
- [12] Matsushita K, Yamane F. Pollution from the electric power sector in Japan and efficient pollution reduction[J]. Energy Economics, 2012, 34(4): 1124-1130.
- [13] Wei C, Löschel A, Liu B. An empirical analysis of the CO<sub>2</sub> shadow price in Chinese thermal power enterprises[J]. Energy Economics, 2013, 40(18): 22-31.
- [14] Du L, Hanley A, Zhang N. Environmental technical efficiency, technology gap and shadow price of coal-fuelled power plants in China: A parametric meta-frontier analysis[J]. Resource & Energy Economics, 2016, 43: 14-32.
- [15] Wang K, Wei Y M. China's regional industrial energy efficiency and carbon emissions abatement costs[J]. Applied Energy, 2014, 130: 617-631.

- [16] 魏 楚. 中国城市 CO<sub>2</sub> 边际减排成本及其影响因素[J]. 世界经济, 2014, (7): 115 – 141.  
Wei Chu. The marginal abatement costs of CO<sub>2</sub> and its determinants in China[J]. The Journal of World Economy, 2014, (7): 115 – 141. (in Chinese)
- [17] Wu J, Ma C. The convergence of China's marginal abatement cost of CO<sub>2</sub>: An emission-weighted continuous state space approach[J]. Environmental and Resource Economics, 2018: 1 – 21.
- [18] Wang Q, Cui Q, Zhou D, et al. Marginal abatement costs of carbon dioxide in China: A nonparametric analysis[J]. Energy Procedia, 2011, 5: 2316 – 2320.
- [19] Wei C, Ni J, Du L. Regional allocation of carbon dioxide abatement in China[J]. China Economic Review, 2012, 23 (3): 552 – 565.
- [20] Zhang X, Xu Q, Zhang F, et al. Exploring shadow prices of carbon emissions at provincial levels in China[J]. Ecological Indicators, 2014, 46: 407 – 414.
- [21] Du L, Hanley A, Wei C. Estimating the marginal abatement cost curve of CO<sub>2</sub> emissions in China: Provincial panel data analysis[J]. Energy Economics, 2015, 48: 217 – 229.
- [22] Du L, Wei C, Cai S. Economic development and carbon dioxide emissions in China: Provincial panel data analysis[J]. China Economic Review, 2012, 23(2): 371 – 384.
- [23] Wang Q, Chiu Y H, Chiu C R. Driving factors behind carbon dioxide emissions in China: A modified production-theoretical decomposition analysis[J]. Energy Economics, 2015, 51: 252 – 260.
- [24] Zhang N, Choi Y. A note on the evolution of directional distance function and its development in energy and environmental studies 1997 – 2013[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 33(2): 50 – 59.
- [25] Perroni C, Rutherford T F. Regular flexibility of nested CES functions[J]. European Economic Review, 1995, 39: 335 – 343.
- [26] Vardanyan M, Noh D W. Approximating pollution abatement costs via alternative specifications of a multi-output production technology: A case of the US electric utility industry[J]. Journal of Environmental Management, 2006, 80(2): 177 – 190.
- [27] Färe R, Martins-Filho C, Vardanyan M. On functional form representation of multi-output production technologies[J]. Journal of Productivity Analysis, 2010, 33(2): 81 – 96.
- [28] 陈诗一. 工业二氧化碳的影子价格: 参数和非参数方法[J]. 世界经济, 2010, (8): 93 – 111.  
Chen Shiyi. The shadow price of industrial carbon dioxide: Parametric and nonparametric methods[J]. The Journal of World Economy, 2010, (8): 93 – 111. (in Chinese)
- [29] Ma C, Hailu A. The marginal abatement cost of carbon emissions in China[J]. The Energy Journal, 2016, 37(1): 111 – 127. (China Special Issue)
- [30] Yang D, Feng L. Examining the effects of urbanization and industrialization on carbon dioxide emission: Evidence from China's provincial regions[J]. Energy, 2017, 125: 533 – 542.
- [31] Bauman Y. The Effects of Environmental Policy on Technological Change in Pollution Control[D]. Seattle: University of Washington, 2003.
- [32] Heal G, Tarui N. Technology diffusion, abatement cost, and transboundary pollution[J]. Ssm Electronic Journal, 2008, 96(11): 1 – 24.
- [33] 申 萌, 李凯杰, 曲如晓. 技术进步、经济增长与二氧化碳排放: 理论和经验研究[J]. 世界经济, 2012, (7): 83 – 100.  
Shen Meng, Li Kaijie, Qu Ruxiao. Technological progress, economic growth and carbon dioxide emissions: Theoretical and empirical research[J]. The Journal of World Economy, 2012, (7): 83 – 100. (in Chinese)
- [34] 杨子晖, 田 磊. “污染天堂”假说与影响因素的中国省际研究[J]. 世界经济, 2017, (5): 148 – 172.  
Yang Zihui, Tian Lei. A panel co-integration analysis of the pollution haven hypothesis and its determinants in China[J].

The Journal of World Economy, 2017, (5): 148 – 172. (in Chinese)

## Marginal cost of emission reduction and regional differences

*YANG Zi-hui*<sup>1</sup>, *CHEN Li-xuan*<sup>1</sup>, *LUO Tong*<sup>2</sup>

1. Lingnan College, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. China Resources Bank of Zhuhai Co. Ltd(Guangzhou Branch), Guangzhou 510627, China

**Abstract:** All the countries in the world are confronted with the challenge of CO<sub>2</sub> abatement. As a nation with a large discharge of CO<sub>2</sub>, China has made a commitment to reduce the emissions by 40% ~ 45% per unit of GDP in 2020, compared with those in 2005. In this background, this paper conducts the research from two major aspects. Firstly, using data of eight categories of fossil fuels, the paper calculates the marginal abatement costs of CO<sub>2</sub> among provinces by adopting the quadratic directional distance function model, and then analyzes the differences in abatement costs and technical efficiency at the provincial, municipal and regional level. As the results show, the abatement costs of Shanxi, which has the lowest cost, are 1/5 of Beijing's who has the highest cost. What's more, the marginal abatement costs of CO<sub>2</sub> varies in provinces. The marginal abatement costs differs regionally; it declines progressively from the East to the Middle and then to the West. This provides an objective economic basis for establishing a carbon trading market among various provinces domestically. Secondly, this paper makes a profound analysis on the reasons of the significant differences in the abatement costs among provinces. The results show that the main factors affecting the marginal abatement costs of CO<sub>2</sub> include emission concentration, research and development degree, human resource level, energy structure, carbon emission policy, and urbanization level. Based on the conclusions above, several suggestions for developing low-carbon economy currently are put forward, as gives this paper important academic value and practical significance.

**Key words:** quadratic directional distance function; marginal abatement costs of CO<sub>2</sub>; determinants analysis