

钱浩祺等：从“鞭打快牛”到效率驱动：中国区域间碳排放权分配机制研究

从“鞭打快牛”到效率驱动： 中国区域间碳排放权分配机制研究*

钱浩祺 吴力波 任飞州

内容提要：设计合理的区域间碳排放权分配机制对于中国温室气体达峰目标的实现和减排成本的优化具有重要的理论与现实意义。本文提出了一个考虑技术异质性在内的多因素碳排放权分配理论模型，明确了全国碳减排总量目标、本地区排放总量、本地区碳排放强度以及本地区碳排放效率四个因素对碳排放权分配的影响机制。利用中国企业级低碳专利数据作为低碳技术水平的代理变量，考虑碳市场试点的政策冲击，本文基于消费侧和生产侧碳排放视角，利用随机前沿模型估计了各地区的碳排放效率，并使用估算效率值对碳排放权的地区分配进行了数值模拟。结果显示，当碳排放基于消费侧责任计算时，基于产出或排放量的分配机制将分别比基于多因素的分配机制额外带来 1.61% 和 0.47% 的工业总产出损失，而当碳排放基于生产侧责任计算时，仅基于产出或排放量的分配机制将分别比基于多因素的分配机制额外带来 0.68% 和 0.21% 的工业总产出损失。与此同时，当分配机制中考虑了碳排放效率时，基于消费侧和生产侧的不同分配会使部分地区产生较大的分配差异，能源生产省份在生产侧核算下需要承担更高碳减排量，以内蒙古为例，其减排量比消费侧核算下高出约 65%，而电力调入省份在消费侧核算下需要承担更高碳减排量，以河北为例，其减排量比生产侧核算下高出约 83%。

关键词：碳排放权分配 碳排放效率 随机前沿分析 低碳专利

一、引言

《巴黎协定》所构建的全球气候变化治理机制以各个缔约方提交的国家自主贡献(nationally determined contributions, NDCs)作为减排责任依据。中国政府的 NDC 提出了温室气体排在 2030 年左右达峰、碳排放强度相较 2005 年下降 60%—65% 等减排目标。碳排放权总量控制与交易机制(碳市场)作为典型的数量规制政策，是中国政府所确定的推动低碳转型、统筹国内环境治理需求的主要政策工具。中国碳市场自 2013 年起首先在 7 个省市进行试点，并于 2017 年末正式启动全国范围的碳市场建设。^①碳市场的构建涉及总量设定、部门覆盖、初始配额分配、交易标的选择等若干政策要素，其中碳排放初始配额的分配往往是最具争议性的政策问题。

碳排放的配额分配首先需要确定分配维度：从区域、部门再到企业。全国碳市场将针对控排行

* 钱浩祺，复旦大学全球公共政策研究院、复旦大学经济学院，邮政编码：200433，电子信箱：qianhaoqi@fudan.edu.cn；吴力波（通讯作者），复旦大学经济学院、复旦大学能源经济与战略研究中心，邮政编码：200433，电子信箱：wulibo@fudan.edu.cn；任飞州，复旦大学经济学院博士研究生，邮政编码：200433，电子信箱：17110680019@fudan.edu.cn。作者感谢国家自然科学基金青年科学基金项目“碳排放峰值约束下的中国绿色电力转型研究——基于电力大数据与中国多区域 CGE 模型”（71703027）、中国博士后科学基金特别资助项目“信息不对称与技术进步视角下的碳排放权分配机制研究”（2017T100257）的资助，感谢匿名审稿人的宝贵建议，文责自负。

① 2013 年 11 月建设全国碳市场被列入全面深化改革的重点任务之一。2014 年 12 月国家发改委发布《碳排放权交易管理暂行办法》，确立全国碳市场总体框架。2015 年 9 月《中美元首气候变化联合声明》提出，中国于 2017 年启动全国碳排放交易体系。2017 年 12 月国家发改委发布《全国碳排放权交易市场建设方案（发电行业）》，这标志着全国碳市场完成总体设计，正式启动。

业进行自上而下的分配,行业分配如何在地区层面协调效率与公平的双重考量,成为目前政策设计的难点。配额分配其次要确定的是分配依据:根据历史排放水平、产出水平或排放强度进行分配。中国碳市场试点阶段采用的分配依据基本是历史排放量,而进入到全国碳市场阶段,则将首先采用“基线法”作为分配依据。配额分配的第三个决定因素是无偿分配还是有偿拍卖,受限于经济发展阶段、地区发展差异和碳市场建设能力水平,以免费分配为主是我国碳市场起步阶段的首选(Zhang et al. 2014)。因此在这一前提下,配额分配模式的选择就要解决三个问题:(1)如何确保碳市场的有效性,即实现总体控排目标。(2)如何提升碳市场的效率性,即实现全社会减排成本的最小化。(3)如何兼顾碳市场的公平性,即是否可以在确保环境政策目标实现的同时寻求社会公平的适度平衡。

以碳排放总量或者碳排放强度作为分配依据,容易产生“鞭打快牛”的逆向选择结果(Groenenberg & Blok 2002; Zhou & Wang 2016)。首先是高排放区域获得更多的配额,抑制了低排放区域的减排动力,大大减缓了减排效率提升;另一方面则体现在行业层面,例如企业新增投资、新进入企业往往被施加更为严格的配额总量供给,导致对拥有清洁技术的新企业投资下降,同样不利于整个行业的减排(Quirion 2009; Zhou & Wang 2016)。基于产出的分配方式相比基于历史排放分配法,缓解了“鞭打快牛”问题,但是会令污染向生产过程中的中间品转移,出现额外的社会成本和效率损失,同时难以控制污染总量(Quirion 2009)。

基线法对不同的工业过程、不同的技术类型采取不同的基线标准,尽管一定程度上克服了“鞭打快牛”的情况,但却无法实现有效的总量控制。^①而基线法基于单位物理产出的排放水平来分配配额的特点,使其无法解决高耗能、高排放企业向中西部转移的同时提升环境效率的问题(汤维祺等 2016)。不仅如此,基线法会导致企业技术选择倾向于固化在基线标准较低的技术上,无法通过投资优化提升减排效率(Jotzo et al. 2018)。中国碳市场现阶段的制度设计仍然有改进空间,要考虑在无偿分配条件下将区域总量控制与排放效率最优化作为双重目标来约束,就要解决“基线法”所无法实现的效率最优和总量控制的双重目标。

在环境有效性和效率性之外,公平性也是环境规制实施经常需要考量的问题。根据丁伯根法则,政策工具的数量至少要等于政策目标的数量,因此若需要同时达成减排、技术进步和社会公平等多个目标,碳减排政策需要搭配多种政策工具才能实现(Sorrell & Sijm 2003; Lehmann 2012)。乔晓楠和段小刚(2012)提出,中国减排指标分配应该尽可能地达到碳减排目标,而地区公平目标可以另外制定相对独立的经济政策来实现,后者正是国际间碳排放分配与国内区域间碳排放分配的最大差别。^②故在考虑我国区域间碳排放权分配时,应当在达到最高碳减排效率的前提下,尽可能地降低与碳排放责任核算相关的区域公平问题。事实上,我国自“十二五”以来,国家主管部门对各个地区的省级碳排放强度下降目标进行规制,主要是以“支付能力原则”这一公平性指标来平衡区域层级的差异化特征,而对区域间的减排效率差异基本不做考虑(Ni et al. 2015)。这样的政策机制客观上带来了高耗能产业在经济相对落后地区的集聚,所带来的环境污染对于当地经济发展的负面影响显然与最初的政策初衷大相径庭。

正是基于上述考量,本文将着力于探讨如何通过基于效率的分配框架,解决总量控制与排放效率最优化的双重目标。通过对碳排放权分配机制理论框架的构建,本文明确了全国碳减排总量目

^① 此外, Groenenberg & Blok(2002)指出基线法需要极高的基础数据要求,并且往往仅限于针对特定工艺流程和产品进行分配。

^② 由于国际间各国很难达成可以实现国际间公平的经济政策(例如国际间支付转移、技术补贴等政策),因此国际间碳减排责任分担需要在效率和公平间进行权衡。

标、本地区排放总量、本地区碳排放强度以及本地区碳排放效率四个因素对碳排放权分配的影响机制。基于该理论框架,本文进一步在估算效率值基础上,对碳排放权的地区分配进行了数值模拟。考虑到基于消费侧和生产侧的碳排放核算视角是导致区域减排责任分担差异的主要原因,本文模拟比较了两种核算方法对区域分配的差异,明确了在确保环境效率最优化的前提之下,不同的核算视角所带来的配额分配差异和相关经济影响。

二、文献综述

由于初始排放权分配方式的不同会带来碳市场运行效率的巨大差异,进而影响收入分配和长期低碳投资,各种分配方式差异的度量以及如何在传统的分配方式上进行优化,是近年来的研究热点。部分学者提出根据排放效率与能源效率进行分配更具成本效益,可以更好解决各国减排责任问题(Evans et al. 2013)。Yi et al. (2011) 提出对于中国区域间排放分配除历史排放与经济发展外,还需要考虑各地区减排潜力以兼顾公平与效率。乔晓楠和段小刚(2012)总结了“十二五”期间我国减排方案,指出环保部在综合考虑各地区经济发展总量、潜在新增量和产业结构情况外,还会根据各地区潜在减排量适度调整配额分配。Zhang et al. (2016) 则提出应该根据中国各区域工业部门二氧化碳排放效率,也即减排潜力进行排放权分配。这些研究表明,基于历史排放分配方法最关键的一点是没有考虑区域减排潜力(即碳排放效率)从而造成了效率扭曲。因此,需要将区域碳排放效率纳入碳排放权分配的框架中,来提升分配方法的经济效率。

从效率角度而言,若一个碳排放权分配方案能够以最小的经济成本实现既定减排目标,则该方案具有最高的经济效率,此时,各个地区的边际减排成本(marginal abatement cost, MAC)也实现了均等化。因此,准确刻画边际减排成本曲线(marginal abatement cost curve, MACC)的特征成了重要的研究内容。从Weitzman(1974)和Roberts & Spence(1976)起,便已开始对MACC进行定量研究。随着气候变化问题受到越来越高的重视,低碳技术也得以不断进步与突破,并对MACC本身产生巨大的影响,但是过去的一些研究都未能将低碳技术这一因素考虑在内。其中McKittrick(1999)的研究从生产者行为最优化的角度出发,指出当企业的生产行为中引入减排技术投入时,其MACC的形状将发生改变并产生拐点,在这种情况下,基于MACC的均衡结果将发生改变。吴力波等(2014)使用中国多区域可计算一般均衡模型,模拟得到了McKittrick所提出的这一类MACC,表明了技术投入对减排行为的重要影响。

在现有的文献中,低碳技术进步往往以碳排放效率的形式予以表征,即某一地区或某一行业所测算的碳排放效率越高,表明其既有的低碳技术水平越高,相应的减排潜力也就越低。在效率分析理论的发展下,数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)和随机前沿分析(stochastic frontier analysis, SFA)是目前主要的两种测算效率的工具。近年来,有大量研究利用DEA方法对中国分区域的碳排放效率进行了测算(苗壮等 2013; 张伟等 2013; Meng et al. 2016),同时也有一些研究使用SFA方法对中国分区域的碳排放效率进行了测算(谌莹和张捷 2016; 张成等 2017)。基于测算所得的碳排放效率,可以揭示各个区域的潜在碳减排量,并进而利用线性规划等方法直接求解成本最小化时的区域分配结果,然而这些研究并没有明确提出碳排放效率与MAC之间的关联关系,即我们无法得知各区域的碳排放配额与其碳排放效率之间的具体影响机制,这种“黑箱”式的分配方式降低了现实的政策激励效果。

此外,基于不同核算视角计算的地区碳排放量将对碳排放效率的测算产生影响,从而在一定程度上产生地区不公平性。目前的研究大多集中在从消费侧责任和生产侧责任来核算国际间不同地区的碳减排责任(彭水军等 2015, 2016),这一方法主要考虑了由于国际贸易所带来的隐含碳转

移,来明确各个国家应该承担的减排责任。近年来,随着中国省际间投入产出表的完善,这一方法也逐渐被用来核算国内省际间的减排责任(徐盈之和张赞,2013; Su & Ang, 2014),这些研究均发现基于两种视角下所核算的各地区碳排放量存在一定的差异。然而,目前我国区域间投入产出表的构建主要以贸易引力模型为基础(李善同,2010; 张亚雄和齐舒畅,2012; 刘卫东等,2014),由于区域间贸易量的估算存在着较大的不确定性,进而对区域间隐含碳的估算产生影响。Qu et al. (2017) 基于能源平衡表和区域间电力流动重新测算了各省电力消费的隐含碳排放。他们指出,由于电力生产部门对我国二氧化碳排放具有重要的贡献,且针对电力部门二氧化碳排放进行核算的准确性不断提升,因此在考虑区域间的排放核算公平性时,可以重点关注电力隐含碳排放所带来的区域排放责任差异。而且从数据可得性角度来看,基于能源平衡表的排放测算能够克服投入产出表数据频率较低的不足。

通过总结以上研究,本文旨在构建一个将碳排放效率纳入碳排放权分配标准的理论框架,并利用实证分析方法将这一理论框架应用于实际的地区间分配。本文的研究结论对于现有的文献主要有两方面的贡献:第一,碳排放权分配的理论框架能够明确历史排放、产出水平、碳排放效率等因素与碳排放权分配额之间的影响机制;第二,利用最新的低碳专利数据库来测度不同地区的碳排放效率,明确了低碳技术的进步路径,同时也验证了理论框架的可行性。

三、碳排放权分配的理论框架

(一) 有效碳排放水平、潜在减排量与碳排放效率

在现实经济活动中,由于生产、管理、技术或者客观因素等,导致能源消耗无法达到完全利用的水平,因而造成不必要的二氧化碳排放。在既定生产要素投入和既定产出水平下,能源消耗实现了完全利用时所对应的二氧化碳排放量,即为有效碳排放水平,以 e^* 表示。根据有效碳排放水平的定义,一个地区的实际碳排放水平(以 e^r 表示)往往高于该地区的有效碳排放水平,这时候,两者之间的差异称之为最大潜在减排量,以 r^* 表示:

$$r^* = e^r - e^* \quad (1)$$

此时,有效碳排放水平与实际碳排放水平的比率则定义为全要素碳排放效率(张伟等,2013),以 TE 表示,其表达式为:

$$TE = \frac{e^*}{e^r} \quad 0 \leq TE \leq 1 \quad (2)$$

在现有的文献中,魏楚等(2010)、周五七和聂鸣(2012)以及 Zhang et al. (2016) 均采用了相同的碳排放效率定义。在上述定义之下,一个地区的碳排放效率越高便意味着该地区的最大潜在减排量越低,其进一步减排的空间和潜力就越小。

(二) 边际减排成本曲线

McKittrick(1999)的研究指出,当企业投入减排行动(即减排技术研发行为)时,将改变 MACC 的形状,使之出现拐点,并产生斜率绝对值不同的两个部分。当企业面临较宽松的减排总量约束时,可以仅通过降低产出水平来实现减排目标,即 MAC 相对较低时,对应拐折 MACC 中斜率较高的部分。而当减排总量约束更加严格时,企业的 MAC 超过了减排技术投入的成本,从而企业会选择增加减排技术投入来实现减排,此时则对应拐折 MACC 中斜率较低的部分。如图 1 所示,高斜率线段①对应 MACC 第一阶段,减排与技术改进无关,为潜在碳减排量。P 点表示企业达到最大潜在减排量 r^* ,排放达到有效碳排放水平 e^* 。P 点后的部分对应 MACC 第二阶段,企业达到有效碳排放水平后,减排与技术改进相关,MACC 发生了拐折。其中虚线线段②和实线线段③分别表示拐折后为线性的 MACC 情形 1 与拐折后为非线性的 MACC 情形 2。

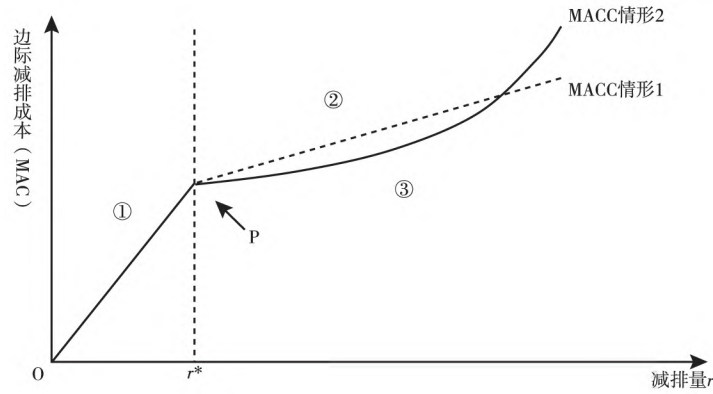


图1 拐折 MACC 与碳减排潜力对应关系

本文假定每个地区具有一个代表性的生产企业,其产出水平与二氧化碳排放量之间的关系可以表示为:

$$Y_i = f_i(e_i) \quad (3)$$

其中下标 i 表示不同地区, Y_i 表示总产出水平, e_i 表示二氧化碳排放水平, $f_i(\cdot)$ 表示总产出与二氧化碳排放水平之间的函数映射,其中 $f_i(0) = 0$, $f_i(e_{i0}) = Y_{i0}$, Y_{i0} 和 e_{i0} 分别表示未减排时的总产出水平与排放量水平,对于除拐点外的排放量满足 $f_i' > 0$, $f_i'' < 0$,拐点处一阶导数连续而二阶导数不存在。

用 r_i 表示总减排量,则定义边际减排成本 $MAC_i(r_i)$ 为每增加一单位减排量对总产出造成的影响,即:

$$MAC_i(r_i) = \partial f_i(x) / \partial x_{i,x=e_{i0}-r_i} \quad (4)$$

其中下标表示 $MAC_i(r_i)$ 在 $x = e_{i0} - r_i$ 处取值,且 $MAC_i(\cdot) > 0$, $MAC_i' > 0$, $MAC_i'' \geq 0$ 。根据图1所示的对应关系,MACC 将由分段函数表示,其中与技术无关的部分,参考吴力波等(2014)利用 CGE 模型模拟得到的拐折 MACC,采用线性函数来表示。而与技术有关的部分,我们借鉴 Weitzman (1974) 中有关 MAC 的处理方法,分别使用一阶泰勒展开和二阶泰勒展开来表示两类不同的 MACC,用于比较本文结论的稳健性。于是,公式(4)中的 MAC 可以分别表示为:

$$MAC_i(r_i) = \begin{cases} m_{i,1}r_i & 0 \leq r_i \leq r_i^* \\ m_{i,1}r_i^* + m_{i,2}(r_i - r_i^*) & r_i^* < r_i \leq e_{i,0} \end{cases} \quad (5)$$

$$\widetilde{MAC}_i(\widetilde{r}_i) = \begin{cases} \widetilde{m}_{i,1}\widetilde{r}_i & 0 \leq \widetilde{r}_i \leq r_i^* \\ \widetilde{m}_{i,1}r_i^* + \widetilde{m}_{i,2}(\widetilde{r}_i - r_i^*) + \widetilde{m}_{i,3}(\widetilde{r}_i - r_i^*)^2 & r_i^* < \widetilde{r}_i \leq e_{i,0} \end{cases} \quad (6)$$

其中第二类 MAC 通过附加上标“~”符号加以区分, $m_{i,1}$, $m_{i,2}$, $\widetilde{m}_{i,1}$, $\widetilde{m}_{i,2}$ 分别为两类 MACC 的形状参数,令 $m_{i,2} = k_1 \times m_{i,1}$, $\widetilde{m}_{i,2} = k_2 \times \widetilde{m}_{i,1}$, $\widetilde{m}_{i,3} = k_3 \times \widetilde{m}_{i,1}$,则 k_1 , k_2 和 k_3 为形状自由参数,满足 $0 < k_1 < 1$, $0 < k_2 < 1$, $k_3 > 0$ 。自由参数的不同组合刻画了不同的 MACC 拐折情况和斜率情况。 r_i^* 则表示地区 i 的最大潜在减排量,因而得到碳排放效率 $TE_i = (e_{i0} - r_i^*) / e_{i0}$ 。

对式(5)和式(6)进行积分运算,并通过代入边界条件,可以求解得到函数 $f_i(\cdot)$ 在两种情形下的表达式分别为:

$$f_i(r_i) = \begin{cases} -\frac{1}{2}m_{i,1}r_i^2 + Y_{i0} & 0 \leq r_i \leq r_i^* \\ -m_{i,1}r_i^*(r_i - r_i^*) - \frac{1}{2}m_{i,2}(r_i - r_i^*)^2 + c_i & r_i^* < r_i \leq e_{i,0} \end{cases} \quad (7)$$

$$\tilde{f}_i(\tilde{r}_i) = \begin{cases} -\frac{1}{2}\tilde{m}_{i,1}\tilde{r}_i^2 + Y_{i,0} & 0 \leq \tilde{r}_i \leq r_i^* \\ -\tilde{m}_{i,1}r_i^*(\tilde{r}_i - r_i^*) - \frac{1}{2}\tilde{m}_{i,2}(\tilde{r}_i - r_i^*)^2 - \frac{1}{3}\tilde{m}_{i,3}(\tilde{r}_i - r_i^*)^3 + d_i & r_i^* < \tilde{r}_i \leq e_{i,0} \end{cases} \quad (8)$$

其中 c_i 和 d_i 分别为积分运算后得到的常数项。

(三) 纳入效率的区域间碳排放权分配框架

假定社会决策者的目标是最大化各地区的总产出,因此该问题可以表示为:

$$\begin{aligned} \max_{\{r_i^a\}} & \sum_{i=1}^n f_i(r_i^a) \\ \text{s. t.} & \sum_{i=1}^n r_i^a \geq T, \rho \leq r_i^a \leq e_{i,0} \end{aligned} \quad (9)$$

其中 r_i^a 表示分配给地区 i 的减排量, T 表示全国减排总量目标,将式(7)与式(8)代入式(9),根据各地区 MAC 均等化的一阶条件,以及式(7)与式(8)所求得的形状参数^①,可以求得两种情形下各地区的最优碳减排量,进而求得各地区的碳排放权分配额 A 为^②:

$$A_i = e_{i,0} - r_i^a = e_{i,0} \left\{ 1 - \frac{T}{2C_1} \frac{e_{i,0}}{Y_{i,0}} [1 + (k_1 - 1) TE_i^2] \right\} \quad (10)$$

$$\tilde{A}_i = e_{i,0} - \tilde{r}_i^a = e_{i,0} \left\{ 1 - \frac{T}{6C_2} \frac{e_{i,0}}{Y_{i,0}} [3 + 3(k_2 - 1) TE_i^2 + 2\bar{k}_3 TE_i^3] \right\} \quad (11)$$

其中 C_1 和 C_2 均为近似常数参数^③。由式(10)和式(11)可以看到,区域间碳排放权的分配额由四个因素共同决定:全国碳减排总量目标 T 、本地区排放总量 $e_{i,0}$ 、本地区碳排放强度 $e_{i,0}/Y_{i,0}$ 以及本地区碳排放效率 TE_i 。四个因素对分配额的具体影响机制分别为:

第一,全国碳减排总量目标 T 与本地区分配额呈负相关关系,即当其他因素保持不变时,减排总量目标上升,各个地区分配的碳排放权数量将下降(亦即碳减排量会上升,下文同)。这个性质也为全国减排总目标的动态调整提供了一条简单的分配规则,即碳减排量的动态调整部分可以按照既有的地区间减排量比例进行分配,而不会产生额外的效率损失;

第二,各地区二氧化碳排放总量 $e_{i,0}$ 与本地区分配额呈正相关关系,即当其他因素保持不变时,本地区排放量越高,其所应当获得的碳排放权数量越多。该原则即为被广泛运用的祖父制分配方法;

第三,各地区二氧化碳排放强度 $e_{i,0}/Y_{i,0}$ 与本地区分配额呈负相关关系,即当其他因素保持不变时,本地区碳排放强度越低,其所应当获得的碳排放权数量越多;

第四,碳排放效率 TE_i 与本地区碳排放权分配额在一定条件下呈正相关关系,可以证明,只要形状自由参数满足 $k_2 + \bar{k}_3 \leq 1$ 的关系,上述结论就一定成立^④,此时,若一个地区的碳排放效率越高,其所获得的碳排放权数量将越高。通过引入碳排放效率这一因素,能够将不同地区前期的减排

① 由于篇幅限制,感兴趣的读者可向作者索取完整的推导过程。

② 其中 $\bar{k}_3 = k_3 e_{i,0}$,由于 \bar{k}_3 表示的是拐折 MACC 右侧的上升速度,其几何性质不会随排放量单位的变化而改变,因此这里定义的 \bar{k}_3 对应的是百分比减排量的无量纲 MACC。

③ 实际上 C_1 与 C_2 均为近似常数参数,因为这两个参数对地区 i 的参数并不敏感。其中 $C_1 = \sum_i (1/m_{i,1})$, $C_2 = \sum_i (1/\tilde{m}_{i,1})$ 。将它们视为常数不会对本文主要结论产生影响。

④ 由包含碳排放效率的括号项对碳排放效率进行求导,可得其导数为 $6TE[k_2 - 1 + \bar{k}_3 TE]$,由 $TE > 0$ 且 $\bar{k}_3 > 0$,可知 $k_2 + \bar{k}_3 \leq 1$ 时,导数必然小于 0,因而 TE 上升将减少碳减排量分配额,即碳排放权分配额增加。由拐折 MACC 的几何含义可知, k_2 表示右侧曲线最低点位置,而 \bar{k}_3 表示 MACC 右侧部分的上升速度,当减排主体在投入有效减排技术之后会面临一段边际减排成本缓慢上升的过程,此时对应的 k_2 和 \bar{k}_3 较小,即拐点右侧斜率远小于拐点左侧斜率,因而很容易满足 $k_2 + \bar{k}_3 \leq 1$ 的条件,这一条件也与现实情况相符。

技术投入充分考虑在内，从而避免“鞭打快牛”的结果。

基于这一理论框架进行碳排放配额分配，可以在对地区碳排放效率进行测算的基础上，综合考虑国家碳减排总量、地区排放总量与排放强度效应，得到效率驱动的多因素配额分配方法。

四、中国省级碳排放效率测算

本文第三部分所提出的碳排放权分配机制，即以式(10)和式(11)为核心的分配规则，在实际应用中最关键的环节在于对各地区碳排放效率的测算。本文采用SFA模型来测算我国30个地区的碳排放效率，可以避免DEA模型因非参数特性导致的影响因素不确定以及无法进行绝对效率分析这两个弊端(朱承亮等2011；张成等2017)。此外，由于我国的碳排放权交易市场从电力部门起步并逐渐扩大到其他工业部门，同时考虑到工业部门的碳排放总量占总排放量的绝大多数，因此本文的实证分析将以各省市的工业部门作为研究对象，以便更好地为建设全国统一碳排放权交易市场给出数据支撑。

(一) 随机前沿模型

本文的随机前沿模型采用随机成本前沿设定，对于生产集 $M = \{Y, X\}$ 中给定的总产出水平 Y_i 和生产要素投入组合 X_i ，存在一个最低的二氧化碳排放水平 e_i^* （即有效排放水平），生产集 M 中所有元素对应的有效二氧化碳排放水平组成二氧化碳的排放前沿曲线。假定地区 i 的代表性企业生产函数为 $Y_{i,t} = f(X_{i,t})$ ，其中 $Y_{i,t}$ 是 t 时期地区 i 的总产出， $X_{i,t}$ 表示 t 时期的包括能源在内的生产要素投入向量。由生产者利润最大化条件可以得到能源要素的条件要素需求函数为 $E_{i,j,t} = g_j(Y_{i,t}, p_{i,t})$ ，其中 $p_{i,t}$ 表示 t 时期投入要素价格向量，下标 j 表示第 j 种能源投入， $E_{i,j,t}$ 表示地区 i 第 j 种能源投入在 t 时期的需求量。定义 $j \times 1$ 维的能源投入需求向量 $E_{i,t} = (E_{i,1,t}, E_{i,2,t}, \dots, E_{i,j,t})'$ ，则可以得到最优条件下，地区 i 在 t 时期的二氧化碳有效排放量为 $e_{i,t}^* = ef \cdot E_{i,t}$ ，其中 ef 是 $1 \times j$ 维的能源排放因子向量。根据式(2)的定义，我们得到地区 i 在 t 时期其实际排放、有效排放与排放效率之间的关系为：

$$e_{i,t}^r TE_{i,t} = e_{i,t}^* \quad 0 \leq TE_{i,t} \leq 1 \quad (12)$$

根据SFA理论，设定排放效率的形式为 $TE_{i,t} = \exp(-u_{i,t})$ ， $u_{i,t} \geq 0$ 。其中 $u_{i,t}$ 为衡量排放效率的无效率项，且与地区 i 的低碳技术发展水平相关，以 $u_{i,t} = h(w_{i,t})$ 表示， $w_{i,t}$ 为地区 i 的 $1 \times q$ 维低碳技术发展水平向量。结合式(12)以及对排放效率的定义，经过取对数并进行一阶泰勒展开，得到面板随机前沿回归模型为：

$$\ln e_{i,t}^r = \alpha_0 + \alpha_1 \ln Y_{i,t} + \sum_{j=1}^m \beta_j \ln p_{j,t} + u_{i,t} + v_{i,t} \quad (13)$$

其中 $w_{i,t}$ 是排放前沿曲线存在的随机干扰项，服从分布 $v_{i,t} \sim N(0, \sigma_v^2)$ 。根据Greene(2005)提出的SFA建模理论，本文针对前沿方程(13)进行Hausman检验，确定建立随机效应模型。^① 无效率项为随机变量且由下式表示：

$$u_{i,t} = \gamma_0 + \sum_{j=1}^m \gamma_j w_{i,j,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (14)$$

其中 $w_{i,j,t}$ 表示影响无效率项的相关变量。^② $\varepsilon_{i,t}$ 为无效率项的随机扰动项，服从截尾正态分布 $\varepsilon_{i,t} \sim N^+(-\gamma_0 - \sum_{j=1}^m \gamma_j w_{i,j,t}, \sigma_\varepsilon^2)$ 。利用Battese & Coelli(1995)提出的效率计算公式，可以求得地区 i 在时期 t 的二氧化碳排放效率的估计值 $\widehat{TE}_{i,t} = \exp(E(u_{i,t} | \varepsilon_{i,t}))$ 。将该排放效率估计值代入式(10)和式(11)用以计算各地区的最优碳排放权分配额。

^① Hausman 检验结果显示，卡方统计量为 13.99，小于自由度为 12 时且 5% 显著性水平所对应的临界值 21.03，因而无法拒绝原假设，模型存在随机效应。

^② 本文的无效率方程中，与低碳技术相关的变量取对数形式，与政策相关的变量为哑变量形式。

(二) 变量选取与数据来源说明

由于《京都议定书》于2005年正式生效,中国可以通过清洁发展机制(clean development mechanism, CDM)引进国际先进低碳技术等途径来进行低碳技术升级,从而逐步提升二氧化碳排放效率,因此研究所选取的时间跨度为2005—2015年。主要选取的变量包括:

1. 碳排放变量及数据来源

本文碳排放变量分别基于消费侧责任与生产侧责任进行核算。消费侧责任碳排放量为各省工业部门终端能源使用所产生的二氧化碳排放量,由中国区域能源平衡表中包括原煤、原油、汽油、天然气、热力和电力等主要能源品种在内的30种细分能源品种基于碳排放核算的部门法(sectoral approach)计算而来,其中各省市的电力间接排放因子根据全国跨省电力调入调出数据进行重新计算,^①并充分考虑了特高压输送可再生能源发电的因素。^②生产侧责任碳排放量为各省工业部门直接能源使用所产生的二氧化碳排放量,由中国区域能源平衡表中用于火力发电、供热的能源投入量,加上非原料用途的工业终端能源使用计算而来(热力与电力除外)。

2. 总产出变量及数据来源

总产出变量采用各地区规模以上工业企业总产值数据。2005—2012年的总产值数据直接来自于各年份的《中国工业统计年鉴》,因年鉴中没有直接公布2013—2015年的总产值数据,我们使用工业销售产值数据经过一定调整计算来代替这两年的工业总产值,^③接着使用各地区工业生产者出厂价格总指数(producer price indices, PPI)对名义工业总产值进行平减得到实际总产值,分地区2005—2015年PPI指数均来自于《中国价格统计年鉴2015》。

3. 投入要素价格变量及数据来源

投入要素价格变量采用各地区劳动力价格、资本价格以及全部9类原材料、燃料、动力购进价格分类指数(purchasing price index of raw material, fuel and power, PPIRM)。^④各地区劳动力价格由各地区平均劳动报酬经过各地区居民消费价格指数平减而来,平均劳动报酬来自《中国劳动统计年鉴》,居民消费价格指数来自《中国价格统计年鉴》。各地区资本价格由贷款利率与折旧率两部分相加组成,各地区贷款利率选取加权平均5年期贷款利率,权重为各地区金融机构贷款上下浮动区间占比,贷款数据来自Wind资讯,折旧率由各地区规模以上工业企业本年折旧除以固定资产原价计算得到,^⑤数据来自《中国工业经济统计年鉴》。2005—2011年的PPIRM数据来自于《中国城市(镇)生活与价格年鉴》,2012—2015年的数据来自于《中国价格统计年鉴》。

4. 低碳技术发展水平变量及数据来源

低碳技术发展水平变量采用低碳专利申请数据。低碳专利数据来自于国家知识产权局的专利数据库。对于低碳专利的界定,我们根据国际专利分类(international patent classification, IPC)委员会制定的环境友好型专利技术(environmentally sound technologies, ESTs)的完整分类目录(IPC

^① 在Qu et al. (2017)的研究中,采用了省际间电力流动完全消耗系数矩阵来计算省际间电力的隐含碳。但是考虑到电力与一般商品贸易不同,其生产和消费具有瞬时性、不可储存的特征,因此本文在计算电力间接排放因子时,假设电力的流动是单向且不可循环的,即采用的是电力流动直接消耗矩阵。

^② 电力间接排放因子采用国家发展和改革委员会应对气候变化司发布的《2010年中国区域及省级电网平均二氧化碳排放因子》中所提出的方法进行计算,跨省电力传输数据来源于2006—2015年《电力工业统计资料汇编》,各个能源品种的热值来自各年度《中国能源统计年鉴》以及《公共机构能源资源消耗统计制度》(2011年7月),含碳量与碳氧化率来自《省级温室气体清单编制指南(试行)》(2011年5月)。特高压输送可再生能源发电数据来自国家能源局《2016年度全国可再生能源电力发展监测评价报告》。

^③ 具体调整公式为:工业总产值=工业销售产值+当年末存货-去年末存货。

^④ 9个子类指数分别为:燃料动力类、黑色金属材料类、有色金属材料类、化工原料类、木材及纸浆类、建材类、其他工业原料类、农副产品类和纺织原料类。

^⑤ 对于缺少本年折旧数据的年份,则由前后年份进行插值运算得到缺失折旧率数据。

green inventory) 将属于该目录专利整理形成低碳专利数据库。截至 2015 年 12 月 31 日,低碳专利数据库中中共包含 1087088 条专利申请数据。我们首先将所有低碳专利根据申请人所在地进行省级区域的归类,其余专利全部归为国外申请专利,在此基础上,代表低碳技术发展水平的变量可以主要分为 3 类:第一类是代表本地区低碳技术发展水平的变量,以本地区低碳专利总数表示;第二类是代表国内低碳技术溢出水平的变量,以国内除本地区之外所有地区低碳专利总数表示;第三类是代表国际低碳技术溢出水平的变量,以国外低碳专利总数表示。

接着我们从“审核进度”与“创新程度”两个维度对省级及国外低碳专利进行细分,从“审核进度”维度我们把专利分为“已申请”与“授权”两类,后者是前者的子类;从“创新程度”维度我们把专利分为“发明”(以 pip 表示)与“实用新型”(以 pug 表示)两类。^①为了得到稳健的碳排放效率估计值,通过上述对专利数据进行分类,我们一共得到 6 种不同的低碳技术水平发展水平的测度结果,用以对 SFA 模型的回归结果进行稳健性检验,对应的 6 个 SFA 模型如表 1 所示。

表 1 根据“审核进度”与“创新程度”对各地区专利进行分类及对应模型

		创新程度		
		发明	实用新型	两者加总
审核进度	授权	模型 1	模型 3	模型 5
	已申请	模型 2	模型 4	模型 6

5. 碳排放权交易试点市场设定

我国的碳排放权交易试点工作开始于 2011 年,由国家发展改革委印发《关于开展碳排放权交易试点工作的通知》,并于 2013 年起正式逐步建立碳排放权交易试点市场。截至 2015 年底,共有七个省市已建立了碳排放权交易试点市场。^②在式(14)中,我们引入碳排放权交易市场哑变量来表示这一政策工具,同时考虑到政策发布与实施后可能存在的滞后效应,从 2011 年起至 2015 年每年分别设定一个年份哑变量,其中包含碳排放权交易试点市场的省市为 1,其余省市则为 0。

(三) 地区碳排放效率测算

采用 Battese & Coelli(1995)提出的最大似然估计方法对式(14)的 6 种模型分类分别进行估计,消费侧责任碳排放的回归结果如表 2 所示。^③表 2 的回归结果表明,6 种不同的变量取值对回归结果的影响非常小,前沿方程与效率方程中的系数估计值均较为稳定,说明该 SFA 模型具有较高的稳健性。^④从效率方程的回归结果来看,国内技术溢出变量在 6 个模型中均显著且系数符号为负,这表明国内低碳技术进步将会显著提高碳排放效率。而国外技术溢出变量则相反,在所有 6 个模型中其系数均显著为正,表明国外低碳技术专利申请与授权数量越高,越不利于我国提升碳排放效率。最可能的解释是,跨国专利技术具有很高程度的垄断性,国内各地区没有办法将最先进的技术及时加以利用,并且由于专利技术受知识产权保护,使用相关专利技术需要支付高昂的授权费,从而提高了生产成本,在这双重因素之下,降低了低碳技术的国际溢出效应。从本地技术效应来看,消费侧责任碳排放中来自各个工业部门电力消费中包含的间接碳排放比重较大,因此更容易受到本地技术进步的影响。

^① 这两个维度也是国家知识产权局数据库中对专利的分类标准,其中“创新程度”维度还包括“外观设计”这一分类,但由于低碳数据库中属于该分类的专利数量为 0,因而在省级层面的分类中将该分类排除在外。

^② 七个省市分别为:北京市、上海市、天津市、重庆市、湖北省、广东省和深圳市。

^③ 生产侧责任的回归结果与消费侧责任的结果基本一致,由于篇幅限制而不进行展示,感兴趣的读者可向作者索取回归结果。

^④ 所有系数中仅效率方程中的“国内技术溢出”系数(即 γ_2)存在一定的差异,主要的原因在于对于国内技术溢出专利数据而言,授权类型(对应模型 1、模型 3 和模型 5)和已申请类型(对应模型 2、模型 4 和模型 6)的总量之间存在较大差异。同时我们看到采用同类型专利数据的模型之间,系数变动无显著差异,因而同样说明 SFA 模型是稳健的。

表2 消费侧责任核算碳排放的回归结果

			模型1	模型2	模型3	模型4	模型5	模型6
前沿方程	常数项	α_0	4.36 ^{***} (1.05)	4.15 ^{***} (1.14)	4.57 ^{***} (1.09)	4.52 ^{***} (1.13)	4.52 ^{***} (1.05)	4.40 ^{***} (1.13)
	工业总产值	α_1	0.41 ^{***} (0.06)	0.43 ^{***} (0.06)	0.41 ^{***} (0.06)	0.41 ^{***} (0.06)	0.41 ^{***} (0.06)	0.42 ^{***} (0.06)
	要素控制变量		有	有	有	有	有	有
效率方程	常数项	γ_0	19.84 ^{***} (5.60)	17.66 ^{***} (5.15)	16.90 ^{***} (4.64)	15.47 ^{***} (3.79)	17.61 ^{***} (4.72)	16.23 ^{***} (4.25)
	本地技术	γ_1	-0.24 ^{**} (0.12)	-0.29 ^{**} (0.14)	-0.28 ^{***} (0.11)	-0.30 ^{***} (0.12)	-0.30 ^{***} (0.11)	-0.33 ^{**} (0.13)
	国内技术溢出	γ_2	-0.76 ^{***} (0.26)	-1.91 ^{***} (0.62)	-0.55 ^{**} (0.25)	-1.72 ^{***} (0.51)	-0.58 ^{**} (0.24)	-1.76 ^{***} (0.54)
	国际技术溢出	γ_3	4.74 ^{***} (1.30)	5.61 ^{***} (1.64)	4.02 ^{***} (1.07)	5.02 ^{***} (1.24)	4.20 ^{***} (1.09)	5.22 ^{***} (1.38)
	碳市场 2011	γ_4	-0.01 (0.15)	0.13 (0.16)	0.03 (0.14)	0.13 (0.15)	0.02 (0.14)	0.13 (0.16)
	碳市场 2012	γ_5	-0.14 (0.16)	-0.03 (0.16)	-0.09 (0.15)	-0.01 (0.15)	-0.10 (0.16)	-0.01 (0.15)
	碳市场 2013	γ_6	-0.49 ^{**} (0.23)	-0.54 ^{**} (0.26)	-0.42 ^{**} (0.21)	-0.44 [*] (0.23)	-0.44 ^{**} (0.22)	-0.47 ^{**} (0.24)
	碳市场 2014	γ_7	-0.46 (0.29)	-0.55 [*] (0.28)	-0.37 [*] (0.23)	-0.44 [*] (0.24)	-0.39 [*] (0.21)	-0.47 [*] (0.25)
	碳市场 2015	γ_8	-0.49 [*] (0.27)	-0.37 (0.31)	-0.37 (0.30)	-0.26 (0.27)	-0.41 (0.26)	-0.30 (0.30)
参数		σ^2	0.11 ^{***} (0.03)	0.11 ^{***} (0.03)	0.10 ^{***} (0.02)	0.10 ^{***} (0.02)	0.10 ^{***} (0.02)	0.11 ^{***} (0.04)
		γ	0.89 ^{***} (0.03)	0.89 ^{***} (0.03)	0.89 ^{***} (0.03)	0.89 ^{***} (0.04)	0.89 ^{***} (0.04)	0.89 ^{***} (0.04)

注: ***表示在1%水平上显著, **表示在5%水平上显著, *表示在10%水平上显著, 括号内表示估计系数的标准差, 模型参数的表达式为: $\sigma^2 = \sigma_v^2 + \sigma_e^2$, $\gamma = \sigma_v / \sigma_e$ 。

最后,从碳交易市场效应来看,本文发现政策公布这一事件对于碳排放效率没有显著影响,而碳交易试点市场实施这一事件对碳排放效率产生了显著的影响。由表2可知,2011年和2012年的政策变量系数绝对值较小,且均未能通过显著性检验,但是从2013年起政策效应显著为负,表明碳交易试点市场的正式实施带来了碳排放效率的正向提升,但是该政策效应逐年递减,且显著性水平也逐年下降,表明政策的影响力逐渐下降、不确定性逐渐上升,这可能是由于2013年的政策效应带来了碳排放行为的结构性突变,从而使得后续年份的碳排放量得以下降。

(四) 分地区碳排放效率测算

由各地区的实际数据以及回归结果,本文计算得到了中国30个地区2006—2015年间6个模型分别对应的碳排放效率。表3分别展示了消费侧责任和生产侧责任下分地区主要年份的平均碳

排放效率与平均碳排放效率变异系数(coefficient of variation ,CV) ,^①结果显示由 6 个模型计算的碳排放效率的平均变异系数均处于较低的水平 ,表明本文建立的 SFA 模型计算得到的碳排放效率具有较高的稳健性。从碳排放效率的变动趋势看 ,绝大多数地区在没有碳减排强制约束的“十一五”期间呈现出下降的趋势 ,而在具有强制性碳排放强度约束的“十二五”期间 ,大多数地区的碳排放效率出现了拐点 ,并呈现出逐渐上升的趋势。^② 其中 ,实施了碳排放权交易试点的地区的碳排放效率均呈现出明显提升。

表 3 各地区动态平均碳排放效率值及平均变异系数值

	消费侧责任碳排放效率					生产侧责任碳排放效率				
	2006	2009	2012	2015	CV	2006	2009	2012	2015	CV
北京	0.96	0.86	0.75	0.97	1.70	0.97	0.94	0.88	0.98	0.53
天津	0.93	0.68	0.49	0.61	2.31	0.96	0.85	0.59	0.57	1.05
河北	0.96	0.85	0.67	0.81	2.41	0.97	0.95	0.86	0.77	1.04
山西	0.95	0.64	0.49	0.57	2.64	0.96	0.83	0.57	0.56	1.18
内蒙古	0.97	0.84	0.63	0.67	3.64	0.97	0.89	0.67	0.62	1.74
辽宁	0.96	0.87	0.61	0.61	2.14	0.96	0.93	0.75	0.60	1.00
吉林	0.94	0.85	0.64	0.87	1.84	0.97	0.93	0.76	0.79	0.95
黑龙江	0.94	0.86	0.62	0.72	2.36	0.96	0.93	0.75	0.69	0.89
上海	0.92	0.93	0.77	0.93	1.32	0.95	0.95	0.80	0.79	0.78
江苏	0.96	0.94	0.71	0.83	1.82	0.97	0.95	0.72	0.65	0.95
浙江	0.95	0.91	0.83	0.89	0.84	0.96	0.93	0.88	0.80	0.59
安徽	0.95	0.86	0.68	0.79	2.21	0.96	0.84	0.64	0.61	1.46
福建	0.96	0.77	0.59	0.67	2.34	0.97	0.76	0.56	0.51	1.28
江西	0.95	0.89	0.59	0.65	1.84	0.96	0.96	0.82	0.74	1.44
山东	0.96	0.92	0.70	0.81	1.60	0.97	0.94	0.83	0.77	0.82
河南	0.95	0.82	0.83	0.94	1.43	0.96	0.90	0.89	0.95	0.89
湖北	0.86	0.79	0.58	0.89	2.37	0.95	0.93	0.84	0.92	0.72
湖南	0.95	0.91	0.82	0.93	0.96	0.96	0.94	0.87	0.87	0.97
广东	0.95	0.89	0.67	0.86	1.89	0.96	0.93	0.71	0.71	0.88

① 变异系数的计算公式为: 变异系数 = 标准差 / 平均值 × 100 ,该指标反映了变量的离散程度大小。在本文中该指标越小 ,表明由不同 SFA 模型估计得到的碳排放效率的离散程度越小 ,即 SFA 模型得到的效率估计值是稳健的。

② 中国在哥本哈根气候变化会议之后 ,首次提出了控制温室气体排放的行动目标 ,即到 2020 年单位国内生产总值二氧化碳碳排放比 2005 年下降 40%—45% ,并且作为约束性指标纳入国民经济和社会发展中长期规划。

续表 3

	消费侧责任碳排放效率					生产侧责任碳排放效率				
	2006	2009	2012	2015	CV	2006	2009	2012	2015	CV
广西	0.93	0.70	0.52	0.67	2.89	0.95	0.79	0.56	0.60	1.72
海南	0.97	0.88	0.51	0.49	1.43	0.96	0.74	0.47	0.35	1.12
重庆	0.96	0.81	0.70	0.82	2.79	0.96	0.85	0.74	0.73	1.59
四川	0.97	0.77	0.46	0.56	2.42	0.98	0.92	0.67	0.68	1.48
贵州	0.96	0.94	0.69	0.95	1.15	0.96	0.90	0.81	0.93	0.92
云南	0.96	0.91	0.89	0.96	0.70	0.96	0.93	0.91	0.97	0.65
陕西	0.95	0.70	0.55	0.67	3.94	0.97	0.84	0.61	0.60	1.53
甘肃	0.96	0.95	0.66	0.70	4.28	0.97	0.97	0.83	0.73	2.01
青海	0.93	0.81	0.48	0.56	3.48	0.95	0.91	0.71	0.73	1.25
宁夏	0.93	0.62	0.47	0.48	2.45	0.95	0.78	0.50	0.43	1.36
新疆	0.95	0.77	0.29	0.30	2.26	0.96	0.85	0.38	0.26	0.92

五、分地区碳排放权分配机制的数值模拟

结合本文第三部分对碳减排责任分配机制的理论研究和第四部分的实证研究结果,本部分将用中国分地区的实际数据对本文提出的碳排放权分配机制进行数值模拟研究。

(一) 情景设定

表 4 数值模拟中情景设定和参数设定说明

比较对象	排放责任	生产侧责任 消费侧责任
	分配机制	
情景设定	减排总量	减排 5% (S1 情景) 减排 10% (S2 情景)
参数设定	MACC 形式	MACC 情形 1: 边际减排成本线性上升 MACC 情形 2: 边际减排成本非线性上升
	形状参数	$0 < k_1 < 1$ $\rho < k_2 < 1$ $\bar{k}_3 > 0$; 其中 $k_2 + \bar{k}_3 \leq 1$

首先,以 2015 年中国工业部门消费侧责任二氧化碳总排放量 51.84 亿吨为基准,分别设定减排 5% (记为 S1 情景) 和减排 10% (记为 S2 情景) 两个减排情景,(10) 式和(11) 式中的减排总量 T

在两个减排情景下分别为 2.59 亿吨和 5.18 亿吨。而 2015 年基于生产侧责任的二氧化碳总排放量为 73.21 亿吨，其对应的减排百分比为 3.5% 和 7.1%。其次，针对 MACC 中的形状参数，本文设定了不同数值来进行模拟。^①最后，各地区基于多因素的碳排放权分配额由(10)式和(11)式计算得到，此外，本文额外设定了两种常见的分配机制情景来进行比较研究，这两种分配机制分别是基于产出水平分配与基于排放水平分配，两者的分配机制可以表示为：

$$r_i^{op} = \frac{Y_{i\beta}}{\sum_j Y_{j\beta}} \cdot T \quad r_i^{em} = \frac{e_{i\beta}}{\sum_j e_{j\beta}} \cdot T \quad (15)$$

其中， T 表示全国总减排量， r_i^{op} 表示基于产出水平进行分配的地区 i 的碳减排量， r_i^{em} 表示基于排放水平进行分配的地区 i 的碳减排量。此外，由于本文分别测算了基于消费侧责任的碳排放效率和基于生产侧责任的碳排放效率，数值模拟也同时从这两个责任视角对三种分配机制进行了比较。表 4 完整展示了上述情景设定和参数设定。

(二) 不同分配机制的配额分配数量比较

图 2 展示了形状参数 $k_1 = 0.7$ 和减排情景 S1 下各地区分配结果，其中上图为生产侧责任，下图为消费侧责任。配额分配差异是指以基于多因素分配配额为基准，其他分配方式配额的相对变化。^②可以发现，基于产出分配的配额变化与基于排放分配的配额变化方向基本一致。以北京市为例，其基于产出水平分配与基于排放水平分配机制下所能得到的配额数量很少，但由于其碳排放效率较高，基于多因素进行分配将使北京市获得更多的配额。而随着效率的下降，单一指标分配方式相比多因素分配方式的配额差异在整体上呈现出从负变为正的趋势。这一趋势即印证了单一指标分配方式存在“鞭打快牛”的现象，即给碳排放效率低的地区分配了较多的配额。基于多因素分配方式的分配结果则改善了这一现象，通过对高排放效率的地区增加配额分配，来减少效率损失。

图 3 展示的是 MACC 情形 1，形状参数 $k_1 = 0.7$ 以及减排情景 S1 的设定下，碳排放权分配后碳减排量的省际间差异，^③分配差异度表示为基于生产侧责任减排量除以基于消费侧责任减排量。显然在同等减排总量、相同 MACC 参数设定下，不同地区的碳减排量存在一定的差异，而不同碳排放责任下地区需要承担的减排量也会发生变化。对于能源生产大省内蒙古而言，基于生产侧责任分配的碳减排量比基于消费侧责任分配高 64.7%。此外，可以看到黑龙江、宁夏和新疆等传统能源生产省份，以生产侧责任分配都将承担更多的碳减排量。反过来，对于河北、河南、山东和辽宁等省市，以消费侧责任分配将承担更多的碳减排量，主要的原因在于这些省份所消费电力中有较大比例来自于外省市调入，这部分电力所包含的间接碳排放增加了总体碳排放，因此碳减排量分配额上升。以河北省为例，其从山西和内蒙古这两个能源生产大省调入了大量电力，因而导致其基于消费侧责任的碳减排量比基于生产侧责任的碳减排量高近 83%。除此之外，浙江和广东作为能源使用和电力调入大省，由于其调入的大部分是清洁能源或者是低排放电力，因此在两种责任分配下减排量基本一致。如广东电力主要从贵州和云南调入，这两个省份的电力生产以水电和可再生能源发电为主。

① MACC 情形 2 的模拟结果与 MACC 情形 1 基本一致，由于篇幅限制而不进行展示，感兴趣的读者可向作者索取模拟结果。

② 例如，基于产出分配差异 = (基于产出分配配额 - 基于多因素分配配额) / 基于多因素分配配额。

③ 基于两种排放责任视角下的全国工业总排放量存在差异，因此无法对排放权分配结果进行比较，但是在情景 S1 下，两种视角下的全国总减排量均为 2.59 亿吨，因此具有可比性。故在这部分的讨论中着重讨论各区域在排放权分配后所承担减排量的差异。

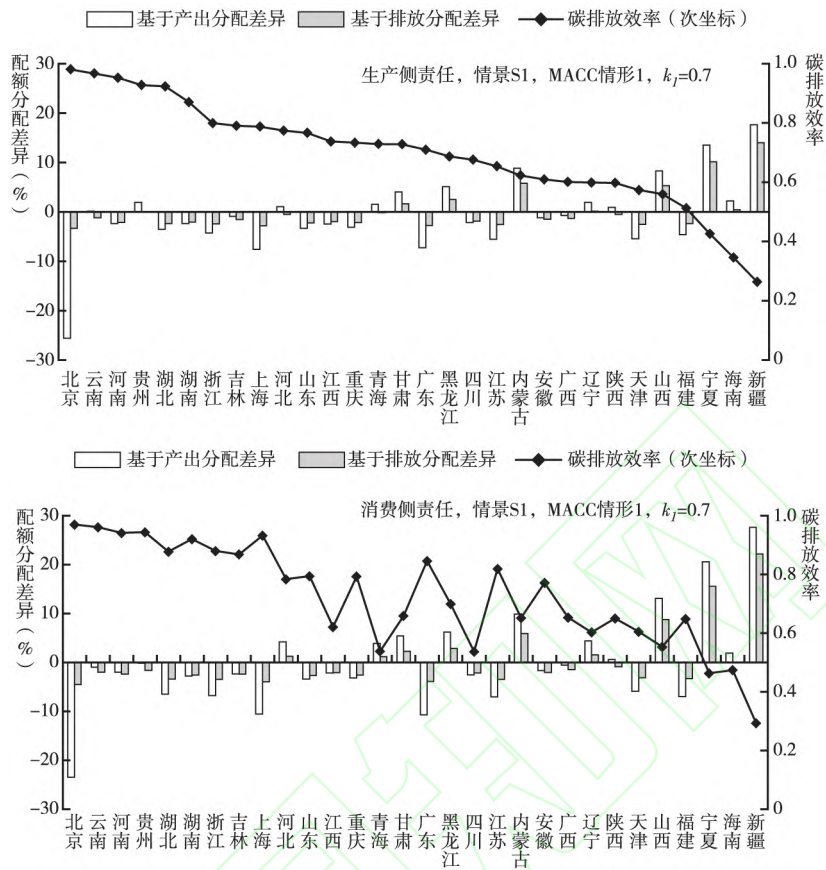


图2 不同排放责任下各地区碳排放分配差异比较

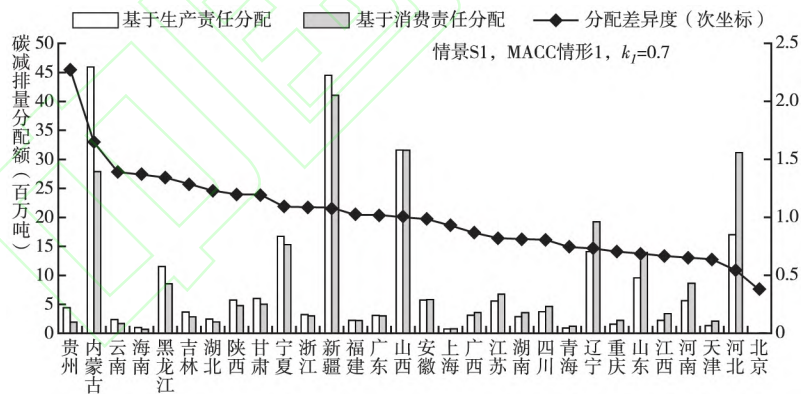


图3 不同排放责任下各地区碳减排量分配额比较

(三) 不同分配机制的经济效率比较

在上述情景设定下,得到不同情景下的全国工业总产值损失模拟结果。图4中给出了MACC情形1下 k_1 取值分别为0.1, 0.2, ..., 0.9时的模拟结果。从模拟结果可以看到,基于产出的分配机制在所有情景下都将导致最大的全国总产值损失,基于排放的分配机制次之,而基于多因素的分配机制的结果最好。在减排情景S1和S2下以上结果均成立。具体来看,在形状参数 k_1 等于0.1、减排情景为S1和MACC情形1的情况下,基于消费侧责任计算时,基于产出分配的工业总产值损失为-1.85%,远高于基于排放分配的-0.71%和基于多因素分配的-0.25%;而基于生产侧责任计算时,基于产出分配的工业总产值损失为-0.79%,同样远高于基于排放分配的-0.31%和基于

多因素分配的-0.10%。这表明无论是采用哪种碳排放效率测算方法，忽视碳排放效率因素进行碳排放权分配均将带来较大的额外效率损失。^①

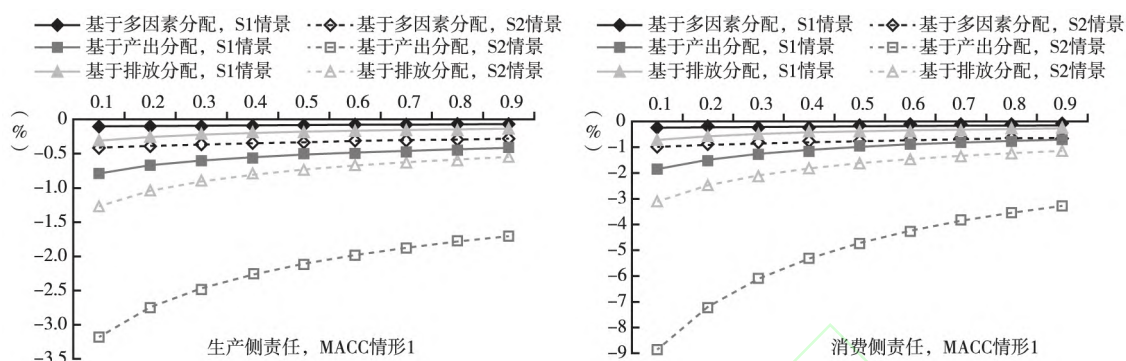


图4 不同情景和不同分配机制下经济效率比较

六、结论及政策建议

基于历史排放水平、产出水平和排放强度的分配方法均存在各自的局限性，由于其未考虑各地区碳排放效率的差异，会产生“鞭打快牛”现象，造成经济效率的扭曲和损失。本文提出了一个考虑碳排放效率异质性的区域间碳排放权分配机制，所构建的理论框架明确了区域间碳排放权分配的四个主要影响因素及其作用机制：碳减排总量和碳排放强度的上升将减少碳排放权分配额，历史排放量上升将增加碳排放权分配额，而碳排放效率越高的地区则将获得更多的碳排放权分配额。

本文构建了我国区域低碳专利数据库，使用低碳专利申请数据作为代理变量来更为准确地表征不同地区的碳排放效率水平高低，实证结果表明国内低碳专利技术发展提升了各地区的碳排放效率，而国外低碳技术存在负向的技术溢出效应。同时，碳交易试点市场的建立也提升了相应地区的碳排放效率。通过将测算得到的碳排放效率引入碳排放分配机制进行数值模拟，本文发现相对于基于产出和基于排放这两种碳排放权分配机制，基于多因素的分配机制将大大减少经济效率扭曲。此外，基于消费侧和生产侧的碳减排量分配存在一定的地区差异，即能源生产省份在基于生产侧责任核算下将承担更多的碳减排量，而电力调入省份在基于消费侧责任核算下将承担更多的碳减排量。

综合本文的研究结论可以得出系列政策意义。第一，我国在考虑碳排放权分配时，要综合考虑产出、历史排放以及技术效率等因素的影响，基于单一指标的分配方式容易产生“鞭打快牛”的现象，带来额外的效率损失。尤其是为了能够实现基于技术进步的长期内生减排机制，更需要将技术效率因素放在重要的位置予以考虑。第二，低碳技术的研发力度增大会显著促进低碳技术进步，在优化的多因素分配框架下也可以获得更多排放许可，从而获得收益。因此有效的碳市场配额分配机制也可促进低碳技术研发的加快。第三，在考虑碳排放效率的同时，基于消费侧责任还是生产侧责任来分配碳排放权会使部分地区产生较大的分配差异，在实践过程中需要充分考虑这方面对区域公平所产生的影响。第四，本文所提出的分配机制不仅可以应用于省市级层面的效率测算与配额分配，同时也适用于在微观企业层面对企业排放效率进行测算，优化企业的碳排放权分配，为未来的碳排放权市场提供理论支撑。

参考文献

谌莹、张捷 2016 《碳排放、绿色全要素生产率和经济增长》，《数量经济技术经济研究》第8期。

^① 除以上几种参数设定外，我们还尝试了满足假设条件下不同参数在不同情景下的模拟结果，发现结果都是稳健的。由于篇幅限制，本文只列出了部分减排情景和几类参数选择下的模拟结果，感兴趣的读者可向作者索取完整结果。

- 李善同 2010 《2002 年中国地区扩展投入产出表: 编制与应用》, 经济科学出版社。
- 刘卫东、唐志鹏、陈杰、杨波 2014 《2010 年中国 30 省市区区域间投入产出表》, 中国统计出版社。
- 苗壮、周鹏、李向民 2013 《借鉴欧盟分配原则的我国碳排放额度分配研究——基于 ZSG 环境生产技术》, 《经济动态》第 4 期。
- 彭水军、张文城、孙传旺 2015 《中国生产侧和消费侧碳排放量测算及影响因素研究》, 《经济研究》第 1 期。
- 彭水军、张文城、卫瑞 2016 《碳排放的国家责任核算方案》, 《经济研究》第 3 期。
- 乔晓楠、段小刚 2012 《总量控制、区际排污指标分配与经济绩效》, 《经济研究》第 10 期。
- 汤维祺、吴力波、钱浩祺 2016 《从“污染天堂”到绿色增长——区域间高耗能产业转移的调控机制研究》, 《经济研究》第 6 期。
- 魏楚、杜立民、沈满洪 2010 《中国能否实现节能减排目标: 基于 DEA 方法的评价与模拟》, 《世界经济》第 3 期。
- 吴力波、钱浩祺、汤维祺 2014 《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》, 《经济研究》第 9 期。
- 徐盈之、张赞 2013 《中国区域碳减排责任及碳减排潜力研究》, 《财贸研究》第 2 期。
- 张成、史丹、李鹏飞 2017 《中国实施省际碳排放权交易的潜在成效》, 《财贸经济》第 2 期。
- 张伟、朱启贵、李汉文 2013 《能源使用、碳排放与我国全要素碳减排效率》, 《经济研究》第 10 期。
- 张亚雄、齐舒畅 2012 《2002、2007 年中国区域间投入产出表》, 中国统计出版社。
- 周五七、聂鸣 2012 《中国工业碳排放效率的区域差异研究——基于非参数前沿的实证分析》, 《数量经济技术经济研究》第 9 期。
- 朱承亮、岳宏志、师萍 2011 《环境约束下的中国经济增长效率研究》, 《数量经济技术经济研究》第 5 期。
- Battese, G. E., and T. J. Coelli, 1995, “A Model for Technical Inefficiency Effects in a Stochastic Frontier Production Function for Panel Data”, *Empirical Economics*, 20(2), 325—332.
- Evans, J., M. Filippini, and L. C. Hunt, 2013, “The Contribution of Energy Efficiency Towards Meeting CO₂ Targets”, In: Fouquet, Roger (Ed.), *Handbook on Energy and Climate Change*, Edward Elgar Publishing.
- Greene, W., 2005, “Fixed and Random Effects in Stochastic Frontier Models”, *Journal of Productivity Analysis*, 23(1), 7—32.
- Groenening, H., and K. Blok, 2002, “Benchmark-based Emission Allocation in a Cap-and-trade System”, *Climate Policy*, 2(1), 105—109.
- Jotzo, F., V. Karplus, M. Grubb, A. Löschel, K. Neuhoff, L. Wu, and F. Teng, 2018, “China’s Emissions Trading Takes Steps Towards Big Ambitions”, *Nature Climate Change*, 8(4), 265.
- Lehmann, P., 2012, “Justifying a Policy Mix for Pollution Control: A Review of Economic Literature”, *Journal of Economic Surveys*, 26(1), 71—97.
- McKittrick, R., 1999, “A Derivation of the Marginal Abatement Cost Curve”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 37(3), 306—314.
- Meng, F., B. Su, E. Thomson, D. Zhou, and P. Zhou, 2016, “Measuring China’s Regional Energy and Carbon Emission Efficiency with DEA Models: A Survey”, *Applied Energy*, 183, 1—21.
- Ni, J., C. Wei, and L. Du, 2015, “Revealing the Political Decision Toward Chinese Carbon Abatement: Based on Equity and Efficiency Criteria”, *Energy Economics*, 51, 609—621.
- Qu, S., S. Liang, and M. Xu, 2017, “CO₂ Emissions Embodied in Interprovincial Electricity Transmissions in China”, *Environmental Science & Technology*, 51(18), 10893—902.
- Quirion, P., 2009, “Historic Versus Output-based Allocation of GHG Tradable Allowances: A Comparison”, *Climate Policy*, 9(6), 575—592.
- Roberts, M. J., and M. Spence, 1976, “Effluent Charges and Licenses Under Uncertainty”, *Journal of Public Economics*, 5(3—4), 193—208.
- Sorrell, S., and J. Sijm, 2003, “Carbon Trading in the Policy Mix”, *Oxford Review of Economic Policy*, 19(3), 420—437.
- Su, B., and B. W. Ang, 2014, “Input-output Analysis of CO₂ Emissions Embodied in Trade: A Multi-region Model for China”, *Applied Energy*, 114, 377—384.
- Weitzman, M. L., 1974, “Prices vs. Quantities”, *Review of Economic Studies*, 41(4), 477—491.
- Yi, W., L. Zou, J. Guo, K. Wang, and Y. Wei, 2011, “How Can China Reach Its CO₂ Intensity Reduction Targets by 2020? A Regional Allocation Based on Equity and Development”, *Energy Policy*, 39(5), 2407—2415.
- Zhang, D., V. J. Karplus, C. Cassisa, and X. Zhang, 2014, “Emissions Trading in China: Progress and Prospects”, *Energy Policy*, 75, 9—16.
- Zhang, Y. J., J. F. Hao, and J. Song, 2016, “The CO₂ Emission Efficiency, Reduction Potential and Spatial Clustering in China’s Industry: Evidence from the Regional Level”, *Applied Energy*, 174, 213—223.
- Zhou, P., and M. Wang, 2016, “Carbon Dioxide Emissions Allocation: A Review”, *Ecological Economics*, 125, 47—59.

From “Spurring a Willing Horse” to Efficiency Driven: A Study of China’s Regional CO₂ Emission Permit Allocation

QIAN Haoqi , WU Libo and REN Feizhou

(Fudan University)

Summary: Designing a reasonable regional CO₂ emission permit allocation mechanism is important for China to achieve its peak emission goal and to optimize its total emission abatement costs. The Chinese government officially launched the construction of the national emission trading scheme (ETS) at the end of 2017. The national ETS will first cover the electricity generation sector and gradually expand to other industrial sectors. The emission permits will be freely allocated using a benchmark method. There are three key questions for constructing the national ETS. First , how to ensure effectiveness so that the overall emission control target is achieved. Second , how to improve the efficiency of the carbon market to minimize total emission abatement costs. Third , how to balance social equity and the efficiency of environmental policy. To answer these questions , we must study the design of the optimal permit allocation mechanism for China’s national ETS.

In this paper , we start by analyzing the marginal abatement cost curve (MACC) which is separated into two parts by carbon emission efficiency. One region’s potential carbon reduction amount is determined by the part that is not related to low-carbon technology. When the social planner allocates emission permits by maximizing the national total output , economic efficiency is achieved. The marginal abatement cost of each region is equalized under the first-order condition of this optimization problem. The corresponding permit allocation mechanism is a multi-criteria mechanism which includes the total emission reduction target , total emission amount , emission intensity , and carbon emission efficiency.

In the empirical part , patent data related to environmentally sound technologies are used to measure the low-carbon technology development level in each region. Both consumption-based and production-based carbon emission efficiencies are estimated using stochastic frontier models and used in a numerical simulation. Looking at the carbon emission efficiency trend in different provinces , most regions show a downward drift during the 11th Five-Year Plan period. During the 12th Five-Year Plan period , most regions have a turning point in carbon emission efficiency and show a gradual upward trend because of the compulsory carbon emission intensity constraints.

For consumption-based efficiency , output-based allocations (OBA) and emissions-based allocations (EBA) lead to 1. 61 percent and 0. 47 percent larger aggregate output losses than when using the multi-criteria allocation mechanism , respectively. For production-based efficiency , OBA and EBA lead to 0. 68 percent and 0. 21 percent larger aggregate output losses , respectively. The simulated allocation results differ between consumption-based and production-based allocations. Energy production provinces undertake more emission reduction responsibilities using production-based allocation. For example , Inner Mongolia reduces around 65 percent more emissions using consumption-based efficiency. Comparatively , electricity inflow provinces undertake more emission reduction responsibilities using consumption-based allocations. For example , Hebei reduces around 83 percent more emissions using production-based efficiency.

Based on our theoretical analysis and empirical results , we give the following policy suggestions. First , when considering the allocation of carbon emission allowances , China should use multiple criteria such as output , historical emissions , and technological efficiency to avoid “spurring a willing horse”. Second , under the optimal multi-criteria allocation framework , firms invest more in low-carbon technology to obtain more emission permits. Thus , endogenous low-carbon technological progress is realized in the long term. Third , permit allocation results are quite different between consumption-based and production-based allocations for some provinces. Therefore , the impacts of different allocation results on regional equity must be fully considered. Fourth , the multi-criteria allocation mechanism proposed in this paper can also be applied to firm-level permit allocations in the future.

Keywords: CO₂ Emission Permit Allocation; Carbon Emission Efficiency; Stochastic Frontier Analysis; Low Carbon Technology Patent

JEL Classification: C33 , C60 , Q54 , Q58

(责任编辑: 林 一) (校对: 晓 欧)