

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*

吴力波 钱浩祺 汤维祺

内容提要:微观企业面对减排约束时的行为选择对于减排成本产生直接影响,从而导致不确定性条件下数量控制与价格控制政策实施的有效性出现差异。本文将这一机制的理论模型纳入一般均衡分析框架,构建中国多区域动态一般均衡模型,模拟分析了各省市从2007年至2020年的边际减排成本曲线,并就其对温室气体控排的碳排放权交易与碳税政策的选择进行了研究。本文发现,一方面边际减排成本曲线的斜率会随着减排行动的推进而逐渐增大,另一方面也会出现拐点并进一步上翘,且不同省市其边际减排成本曲线上翘的幅度以及出现拐点的位置均存在差异。由于在信息不完全条件下,数量政策更适用于边际减排成本较为平缓的情况,中国各省市边际减排成本曲线的动态特征说明碳排放权总量控制与交易机制更适用于现阶段中国实际;随着未来减排力度的加强,则要进一步考虑将碳税政策引入低碳政策体系中。

关键词:动态边际减排成本曲线 碳排放权总量控制与交易 碳税

一、引言

为了应对全球气候变化,我国已经开始实施温室气体排放强度控制政策。目前主要针对与能源相关的二氧化碳排放设定了两个约束性目标:2020年的碳强度要比2005年下降40%—45%、2015年的碳强度要比2010年下降17%。在我国经济增速总体仍维持较高水平、区域发展阶段差异较大的现实下,强度目标的实现需要基于市场机制的政策手段来实现全社会减排成本的优化,以克服传统命令式政策的缺陷。目前通行的两种基于市场的碳减排措施分别是碳排放权交易和碳税,前者规定了碳排放许可的限额,后者则规定了碳排放许可的价格。由于我国的环境税体系尚未确立、污染物总量控制与交易政策也仅在部分区域针对二氧化硫等工业污染物展开,因此对于温室气体控制究竟应该选择哪种政策机制缺乏相关政策实践的参考。发达国家的政策实践同样无法就这两种措施的成本—有效性、成本—效率性达成一致,碳税与碳排放权交易机制的政策适用边界成为政策和理论界关注的焦点。

就理论而言,在信息完全对称的竞争性市场条件下,碳税与碳排放权交易的政策效果是相同的,均可实现帕累托最优。然而由于政府往往不能够获得完全信息,如何设计最优碳税水平以使排放总量达到预期目标,或者如何确定最优排放许可水平以使社会福利获得改进,就成为理论难题。尤其是对于中国这样一个处于快速转型期的新兴市场国家而言,政府与市场边界不清晰导致资源品的市场化配置能力孱弱、能源环境基础统计数据不完备导致政府、企业等市场主体之间信息不对

* 吴力波、钱浩祺,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, qianhaoqi@fudan.edu.cn;汤维祺,德国欧洲经济研究中心,电子信箱:tangwq@fudan.edu.cn。作者感谢匿名评审人的意见和建议,文责自负。

称。要提高碳减排政策的有效性,更加需要考虑在上述不确定性因素的前提下对碳排放权交易和碳税机制的选择给出判别依据,这将直接关系到中国低碳转型的路径选择。

本文将从边际减排成本曲线的动态特征出发,通过理论模型构建和政策仿真模拟,对不确定条件下碳排放权交易与碳税机制的适用条件、调整边界等做出分析,为我国未来低碳政策体系的构建和优化提供理论支撑。本文第二部分为文献综述,对碳减排政策选择的理论和实证研究予以回顾总结;第三部分针对减排企业的行为选择机制构建了边际减排成本的理论模型;第四部分将该微观模型引入多区域动态一般均衡模型,并就资本、劳动和商品的跨区域流动机制予以刻画;第五部分就各省市 2007 年至 2020 年期间的动态边际减排成本曲线特征进行了比较,明确了碳排放权与碳税选择机制的数量依据;第六部分对模型的稳健性进行了检验;第七部分就相关结论和政策建议给予了总结。

二、文献综述

国内外已有众多学者针对碳税和碳交易的政策设计问题进行了研究,一部分是针对两种政策机制所进行的理论与定性研究,如 Weitzman(1978)、Mandell(2008)、Stranlund & Ben-Haim(2008)、谢来辉(2011)等。另一部分则是使用 CGE 模型和计量模型等工具进行的定量与实证研究,如 Pizer(1999,2002)、Parry et al.(1999)、石敏俊等(2013)和曹静(2009)等。在上述研究中,Weitzman(1974)所提出的数量政策与价格政策的选择机制被普遍认为是判定政策有效性的重要标准。Weitzman 定理指出,在比较数量政策和价格政策时,两者所导致的效率损失较小者为较优政策,而效率损失则由边际收益(marginal benefit,下称 MB)曲线和边际减排成本(marginal abatement cost,下称 MAC)曲线的形状共同决定(Weitzman,1974)。根据该定理,如果 MB 曲线斜率绝对值小于 MAC 曲线斜率绝对值,则价格政策(如碳税)更有效,反之则数量政策(如碳交易)更有效,并且有效性将随着两者斜率差异的增大而增加。然而在已有文献的数量研究中,均没有针对碳减排的 MAC 曲线形状本身进行深入辨析,特别是没有考虑到两者随着经济增长和技术进步可能发生的动态变化。因此,基于简化条件下采用 Weitzman 定理所得到的政策比较结论存在较大的不确定性。

关于 MB 曲线的形状,学界具有较为一致的结论,即碳减排的 MB 曲线较为平缓。Kolstad(1996)的研究认为每年全球温室气体的排放流量所造成的实际影响非常小,且温室气体的负面影响主要体现在它们的存量效应上,在这种情况下,实施温室气体减排的政策所带来的边际减排收益将会呈现出一条较为平缓的曲线。在 MB 曲线形状较为确定的情况下,MAC 曲线的形状成为决定采用数量政策还是价格政策的关键。但在现有的研究中,对 MAC 曲线形状本身的讨论甚少,主要集中在基于 MAC 曲线的不同情景下边际减排均衡成本的点估计。

在现有对 MAC 曲线进行的研究中,Klepper & Peterson(2006)研究了世界能源价格对主要国家 MAC 曲线的影响,在他们的分析过程中,假定了 MAC 曲线的可微性,并且从其研究结果中也可以看到,不同国家的 MAC 曲线的形状除了光滑可微之外,无论是在减排百分比还是减排绝对量尺度上,各个国家 MAC 曲线的斜率都存在着巨大不同。Morris et al.(2012)利用 EPPA 模型对世界主要国家的 MAC 曲线及其动态变化进行的研究表明,无论是 MAC 曲线的形状还是斜率均会随着时间以及减排政策的不同而改变,并且他们所得到的 MAC 曲线也不满足光滑可微的条件。

从这些对 MAC 曲线的研究可以得到两个较为明显的结论。第一,MAC 曲线的斜率确实不同国家和地区存在差异,这是由它们本身的经济结构所决定的,因此采用数量政策还是价格政策是不能下定论的,并且由于 MAC 曲线还存在动态变化特性,不同政策的适用性也不是一成不变的。

第二,MAC 曲线可能会存在不可微的情况(如曲线存在拐点、跳跃点等),在 MAC 曲线的形状及其性质尚不明晰的情况下,利用一些简化的理论模型所做的政策选择结论可能会存在偏差。

在对 MAC 曲线的微观形成机制研究中,McKitrick(1999)以微观企业和行业为主体建立最优化模型,当行为主体面对减排约束时,拥有投入减排行为或直接减少产出这两种减排措施选择,行为主体可根据两种措施的边际成本进行自由选择。他的研究结论表明,在实际经济活动中,存在着极大的可能性会促使企业在面临不同减排压力时做出不同的选择,从而造成 MAC 曲线产生拐折而不可微的结果。这一理论模型对于碳减排政策的选择机制有着重要的意义,本文正是从 McKitrick 所提出的理论模型出发,明确了将其纳入可计算一般均衡分析框架的合理性,并对其进行了必要的理论修正。在此基础上建立中国的多区域动态一般均衡模型,对各省市在碳减排目标约束下的动态边际减排成本曲线进行了仿真模拟。

三、区域 MAC 曲线及其性质

在 McKitrick 的模型中,参与减排的企业(或行业)的目标是利润最大化,并且处于完全竞争市场。在其决策函数中,加入了一个减排努力成本的变量,因此其目标变为:

$$\begin{aligned} \max \pi_i(p_i, y_i, w_i, a_i) &= p_i y_i - c_i(w_i, y_i, a_i) \\ \text{s. t. } \bar{e}_i &= e_i(y_i, a_i) \end{aligned} \quad (1)$$

其中,下标 i 代表了不同的减排企业, a_i 代表了不同企业为了参与减排而采取的行为,且 $a_i \geq 0$ 。在这里, a 的含义是抽象的,它可以是为了达到减排目标而新增减排设备的投资,也可以是开发新节能技术而投入人力物力等研发成本。此外, e_i 是外生给定的排放量,是企业必须实现的减排目标。 $c_a(w, y, 0) = 0$ 时,减排努力成本的零下限约束并不会影响企业的最优决策路径。而当 $c_a(w, y, 0) > 0$ 时,由于减排努力成本存在为零的下限约束,企业的最优决策路径将会发生拐折,可以在一定的减排区间内,仅通过降低产出而不采取任何减排措施来达到减排目的,进而引起 MAC 曲线发生拐折。

该模型是从微观的角度论述了 MAC 曲线存在拐折的可能性,但是要将其纳入可计算一般均衡的分析框架中时,就会涉及到微观企业生产函数加总的问题。KIM(2005)在分析企业生产函数加总的问题时指出,当企业生产函数或其对偶成本函数存在位似性和可分性时,便存在一个加总的生产函数或对偶成本函数来代表企业整体的生产技术:

$$C(p, y_i) = \alpha(p) + \beta(p)h_i(y_i) \quad (2)$$

其中 $C(p, y_i)$ 表示企业 i 的对偶成本函数, p 为投入要素的价格向量, $\alpha(p)$ 和 $\beta(p)$ 均为投入要素价格的齐次凹函数, $h_i(y_i)$ 是产出的任意函数。

对于具有 n 个投入要素的 CES 形式的生产函数来说,其对偶成本函数的形式为:

$$C(p, y_i) = \theta_0 \left[\sum_{k=1}^n \theta_k p_k^{1-\sigma} \right]^{1/(1-\sigma)} y_i \quad (3)$$

其中 θ_k 表示第 k 个投入要素所占的份额, σ 为投入要素之间的替代弹性。从式中可以看出, CES 形式生产函数的对偶成本函数满足式的可加总条件,因此必然存在一个可以代表整体生产技术的加总生产函数。

因此,将此微观模型纳入一般均衡分析框架的条件之一是在生产函数的设定上,需要采用 CES 生产结构,以保证每个区域存在一个加总的生产技术。对于多区域 CGE 模型,需假定每个区域的企业都是同质的,即它们都具有相同的生产技术,以保证可加总性。

在这样的条件下,McKitrick 的模型所展示的结论同样可以运用于分区域的 MAC 曲线研究。不同区域的 MAC 曲线是否存在拐折以及拐折点位于什么位置,便取决于不同区域其自身的加总生

产技术和其边际减排投入成本 $c_a(w, y, 0)$ 的大小。在实际经济中,实施减排政策的初期由于各区域的减排潜力较大,因此各区域的边际减排投入成本 $c_a(w, y, 0)$ 都较小甚至接近零,因此各区域的 MAC 曲线均不会出现非常明显的转折;而在实施减排政策的后期,各区域面临的减排压力不断增大,且由于不同区域的经济结构以及生产技术不同,其边际减排投入成本 $c_a(w, y, 0)$ 会不断增加且出现差异化,①各区域的 MAC 曲线也因此出现拐点以及不同程度的差异化。

当我们从宏观层面来分析 MAC 曲线的问题时,模型中的减排行为变量 a 的受限区间也会存在相应的变化。由于存在宏观政策因素,一个区域当面临一定的减排压力时,往往会带有一定的最低减排行为要求,在这种情况下, a 的下限约束将会随着减排约束的变动而变动,这里一个较为合理的假定为: $a_j \geq r_j(\bar{e}_j)$, 其中下标 j 表示不同的区域, \bar{e}_j 为排放约束, $r_j(\cdot)$ 为单调递减函数,它所表达的意义是:当第 j 个区域的允许总排放越小时,伴随着更高的最低减排行为要求。在这个假定之下,各地区的最优生产路径和 MAC 曲线的对应关系也发生了相应的改变,如图 1 所示。

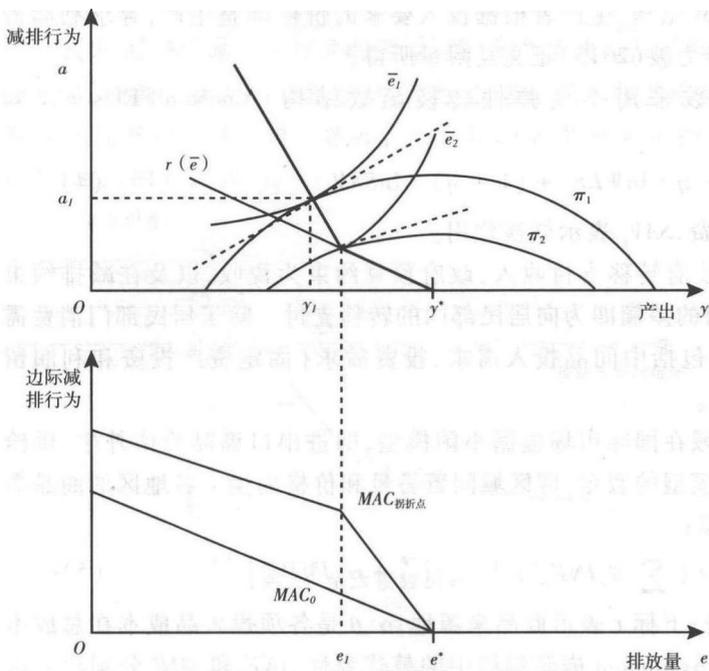


图 1 宏观视角下的拐折 MAC 曲线

图 1 中, \bar{e}_1 和 \bar{e}_2 曲线代表等排放曲线且 $\bar{e}_2 > \bar{e}_1$, π_1 和 π_2 曲线代表等利润曲线且 $\pi_2 > \pi_1$, $r(\bar{e})$ 则代表了不同排放约束下的最低减排行为。从图中可以看到, MAC 曲线在 e_1 处产生了拐点,且位于 (e_1, e^*) 区间内的 MAC 曲线斜率绝对值将增大,即这一段 MAC 曲线变得更为陡峭。若将上述推导过程中的变量加上代表不同主体的 i 下标和代表时间的 t 下标,则 MAC 曲线拐点两边的斜率以及拐点产生的位置也将随着主体的不同和时间的变化而产生变化。

四、动态区域一般均衡模型

1. 数据

本文基于汤维祺、吴力波(2013)所建立的静态中国多区域一般均衡模型,以《2007 年地区投入产出表》(国家统计局,2011)作为基准情景计算模型参数,扩展构建了一个递归动态多区域 CGE 模型。模型包含 30 个区域(各省、市、自治区,不包括西藏和港澳台地区);每个地区包含 42 个生产部门(对应于我国 42 部门投入产出表),一个政府部门,一个居民部门,两种生产要素包括资本和劳动。

使用 MPSGE 子系统构建 CGE 模型的基础是构建一个被称为“微观一致矩阵”(Micro-consistent Matrix, MCM; Rutherford, 1998)的数据集,与行业完全对称的社会核算矩阵(Social Accounting Matrix, SAM)不同的是, MCM 数据集是行列非对称的,而且 MCM 中存在负数。但是

① $a = 0$ 时的边际投入成本即初始减排投资成本,在现实中初始减排都需要较高的投资成本,根据联合国发布的《中国人类发展报告 2009/10》,为了实现控排情景和减排情景,在电力、交通、建筑、钢铁、水泥和化工与石油化工等六大部门中需要有 62 种关键的专门技术和通用技术的支撑,而对于其中 43 种技术,中国目前并不掌握核心技术。这意味着若要实现减排目标,中国必须从国外进口关键技术或加大相关技术研发力度,这些都大大地提高初始减排投资成本。

MCM 和 SAM 同样都能够反映整体经济中各个部门间的投入产出关系和各个主体间的价值流向关系。本模型即以《2007 年地区投入产出表》为基础,利用交叉熵方法(Robinson & El-Said,2000)对数据进行调平,进而构建分地区的 MCM 数据集,。

此外,我们也为连接不同地区的经济关联模块构建了对应的贸易矩阵数据集。首先利用引力模型分析区域间贸易流向的决定因素,并以此为依据构建初步的区域间贸易矩阵。最后,结合交叉熵方法对区域间贸易矩阵以及各地区投入产出表进行调整,以保证数据的一致性(贸易矩阵的估计方法参见李善同,2010)。

2. 模型基础功能模块

模型的基础功能模块包括生产模块、需求模块、能源排放模块、区域经济关联模块以及递归动态模块。

生产模块采用多层嵌套的不变弹性生产函数(Nested CES Production Frontier)刻画各生产部门的生产行为,嵌套结构遵循主流的 KLEM 结构,生产者根据投入要素的价格调整生产,寻求利润最大化,具体模块及参数设置由汤维祺、吴力波(2013)正文及附录所得。

需求模块,居民消费的效用函数采用不变弹性转换函数结构(Constant Elasticity of Transmission, CET):

$$\max_{\{WLF_r, SAV_r\}} U_r = \eta \cdot \ln WLF_r + (1 - \eta) \cdot \ln SAV_r \quad (4)$$

式中 WLF_r 表示 r 地区居民的总消费, SAV_r 表示储蓄效用。

预算约束为资本、劳动收入,以及政府转移支付收入;政府预算约束为税收,以及在减排约束下,排放权收入,政府消费与总收入之间的差额即为向居民部门的转移支付。除了居民部门消费需求 and 政府部门消费需求外,市场需求还包括中间品投入需求、投资需求(固定资产投资和利润留存),以及外部需求(出口、区域间调出)。

在区域间贸易模块,模型设定各区域在国际市场遵循小国模型,即进出口商品价格外生,供给和需求无限;而在国内市场则遵循大国模型的假定,即区域间贸易量和价格内生。各地区的商品需求偏好采用嵌套的 CET 需求函数来模拟:

$$c_i = \{ \alpha_{i1} [\alpha_{i2} D_i^{-\phi} + \alpha_{i3} ((\sum_j \theta_{ij} INF_{ij}^{-\delta})^{-1/\delta})^{-\phi}]^{-\rho} + \alpha_{i4} IMP_i^{-\rho} \}^{-1/\rho} \quad (5)$$

其中 c_i 表示非能源商品 i 的总消费;下标 r 表示商品来源地; α, θ 是各项投入品成本在总成本中的份额系数;而 ϕ, ρ 和 δ 表示不同的 Armington 嵌套层级中的替代弹性, INF 和 IMP 分别代表区域间商品流动及商品进出口。

能源商品的需求偏好因标准化程度较高而不进行差异化设定:

$$c_e = (\alpha_{e1} DS_e^{-\epsilon} + \sum_r \theta_{er} INF_{er}^{-\epsilon} + \alpha_{e4} IMP_e^{-\epsilon})^{-1/\epsilon} \quad (6)$$

在能源与碳排放模块,根据 IPCC 碳清单核算指导方法,对终端能源使用过程中所包含的碳排放量进行跟踪和核算。模型引入碳强度(EM)的虚拟变量来模拟各地区的碳排放强度,通过里昂惕夫生产函数形式将碳强度变量与能源投入和产出进行耦合,为碳排放量和产出之间建立内生的约束关系,并由各地区的排放强度路径决定该约束的强度。

除此之外,我们加入了一项新的变量 EA 来表示式中的减排行为,由于在 CGE 模型中无法直接加入具体的减排行为变量,因此在我们的模型中,将减排行为设定为一个类似与排放权的变量,其总量供给由模型循环时不断变化的排放上限 \bar{e}_i 决定。在这样的设定下,当 EA 的总供给随着循环不断减少时,经济中剩余的需求将推高 EA 的价格,使得投入生产的 EA 总价值增加,进而提高了生产的成本,且 EA 变量对应的价格同时反应了边际减排成本的变化。通过这种机制设计,使得企业面临排放约束时的最优行为在 CGE 模型中得到了完整的刻画。

在上述设定之下,得到能源集束 EEG:

$$EEG = \theta (\sum \delta \cdot EC_i^\gamma)^{1/\gamma} = \theta (\sum \delta \cdot (\min(E_i, EM, EA))^\gamma)^{1/\gamma} \quad (7)$$

3. 区域间资本流动模块设定

本模型中引入了差异化资本的设定,即存量固定资产不能跨行业流动,而新增资本在形成固定资产之前具有完全的跨行业、跨区域流动性。因此产业结构与产业分布的调整只能通过存量固定资产的折旧和新增资本的形成逐渐完成(资本粘性调整,即 Quasi-Putty-Clay 机制)。各期投资总量由前一期各地区储蓄规模的总和决定,即新古典主义宏观闭合条件。而总投资在行业和地区间的分配,由行业和地区的资产回报率决定。参照 Dixon(2002)构建的 MONASH 模型,本文采用 Logit 函数模拟收益率与资本积累速率之间的关系:

$$g_{r,i}^k = \frac{\bar{g}_{r,i}^k + \underline{g}_{r,i}^k \cdot e^{cgk(RI_{r,i} - \bar{RI})} \cdot (\bar{g}_i^k - \underline{g}_i^k) / (\bar{g}_i^k - \underline{g}_i^k)}{1 + e^{cgk(RI_{r,i} - \bar{RI})} \cdot (\bar{g}_i^k - \underline{g}_i^k) / (\bar{g}_i^k - \underline{g}_i^k)} \quad (8)$$

其中 $g_{r,i}^k$ 为 r 地区 i 行业的期望固定资产增速, \bar{g}_i^k 、 \underline{g}_i^k 和 \bar{g}_i^k 分别为各行业增速的上限、下限和均衡水平,分别取值 0.3、0 和 0.16;^①而 RI 表示资本收益率的均衡值,由 2007 年投入产出表计算得到; e 为自然对数底。图 2 显示了这个 Logit 函数所表示的预期资本回报率(RI')与资本积累速率($g_{r,i}^k$)之间的对应关系。

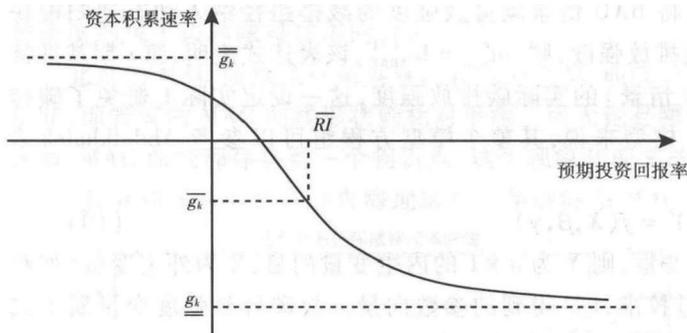


图 2 资本积累示意

4. 区域间劳动力流动模块

本模型中引入了区域间劳动力流动作为刻画区域间关联的另一个特征。由于投入产出表中的增加值部分未区分农村劳动力和城市劳动力,因此本模型仅假定了单一种类的劳动力,劳动力在地区间的流动数量将根据本地区上一年劳动力总量、不同地区的劳动工资差异以及其他外生参数决定。

本文采用了拓展的刘易斯模型,考虑了劳动力不完全自由流动的情形,参照许召元、李善同(2008)的劳动力流动模型,设定劳动力转移方程为:

$$LM'_{d,r} = \Theta_{d,r} \cdot \phi'_{d,r} \cdot \left[\frac{(\mu_{d,r} - c_{d,r}) W_r^{t-1}}{W_d^{t-1}} \right]^\sigma \cdot L_d^{t-1} \quad (9)$$

其中, t 代表年份,下标 d 和 r 分别代表当地和目标省区; $LM'_{d,r}$ 代表 t 期从本地区转移至 r 地区的劳动力数量,是 $t-1$ 期本地区劳动力总量 L_d^{t-1} 的一定比例; W_d 和 W_r 代表两地区的工资收入水平; $\mu_{d,r}$ 代表两地区劳动力素质差异,本模型中设定 $\mu_{d,r} = 1$, $c_{d,r}$ 代表劳动力迁移成本的大小,表现为目标地区工资水平的一定百分比,本模型中设定 $c_{d,r} = 0.05$; σ 代表了劳动力不完全自由流动的程度,本模型中设定 $\sigma = 0.8$ 。

$\Theta_{d,r}$ 代表了劳动力从本地区迁移至目标省区的迁移强度系数,是不随时间变化的常数,该系数由《中国 2010 年人口普查资料》的数据计算得到。 $\phi'_{d,r}$ 是一个条件虚拟变量,它决定了是否存在正

^① Logit 函数的特殊形状使得资本积累速率的上下限对最终结果的影响很小,因为当经济趋向收敛时,内生变量 RI 的波动范围处于均衡值附近,而均衡值附近的曲线形状受资本积累速率上下限大小的影响非常小。

的劳动力流动,即当存在劳动力流动时,取值为1,反之则为0。

5. 动态情景设定

在2005年至2010年间,我国按照“十一五”规划的要求推进了节能减排工作,并在“十二五”规划中,进一步规定了单位GDP能耗下降18%、单位GDP碳排放下降17%,为了落实“十二五”节能减排目标,国务院发布了《“十二五”控制温室气体排放工作方案》,对各地区2010—2015年间的减排目标作出了明确的规定。而根据我国“哥本哈根”承诺,在2020年之前我国将进一步推进节能减排,实现单位GDP排放比2005年下降40%的目标。

参照上述国家和地区层面上的各项减排政策目标,可以推算在2007年到2020年间我国各地区碳排放强度的变化路径的基准情景(Business as usual,BAU情景)。

在这种BAU情景的设定下,边际减排成本如何确定成了关键。在传统的递归动态模型中,在每一年的递归路径中,除了生产要素进行动态积累外,其他参数将按照一条外生设定的路径进行动态调整,这样得到的结果将是相对于基准年份(本模型中为2007年)变化结果,而这种特性对于分析边际减排成本显然是不合适的。原因在于边际减排成本对经济结构和要素边际产出率是十分敏感的,而传统的递归动态模型在很大程度上并没有实际改变要素的边际产出率和整体的经济运行结构,因此,在这种设定下的边际减排成本曲线会随着年份的推移而产生巨大的偏误。

为了避免这类偏误,在我们的模型中,将BAU情景碳排放强度的减排路径纳入动态递归模块予以考虑。第一步,若设定变量Int表示碳排放强度,则 $Int_{base}^t = Int_{BAU}^{t-1}$,该表达式表明,第t期基准情景的碳排放强度约束为第t-1期(即BAU情景)的实际碳排放强度,这一设定实际上避免了碳排放强度出现回弹效应的现象。对于CGE模型来说,其整个模型方程组可以参考Abdelkhalak & Dufour(1998)的方法:

$$Y = f(X, \beta, \gamma) \tag{10}$$

其中,假定CGE模型共包含n个内生变量,则Y为n×1的内生变量向量,X为外生变量(如政策变量)向量,β为自由参数向量,γ为通过校准计算得到的参数向量。故碳排放强度变量属于式中的外生变量向量,因此第t期的基准二氧化碳排放总量计算公式为:

$$e_{base,t}^{*j} = EF \cdot f(X, \beta, \gamma | Int_{base}^t = Int_{base}^{t-1}), Int_{base}^t \subset X \tag{11}$$

其中, e_{base}^{*j} 即为前文MAC曲线推导过程中的各地区的j×1初始排放总量向量,EF为内生变量向量对应的j个地区的j×n排放系数矩阵,①Int为j个区域的j×1排放强度向量。第二步,计算

$$MAC_t^j \Leftarrow f(X, \beta, \gamma | e \leq (1 - target)e_{base}^{*j}, Int^t \leq Int_{base}^t) \tag{12}$$

其中,target代表不同区域j的j×j总量约束目标对角矩阵。在这种动态排放强度约束下,才能够得到真正意义的动态边际减排成本曲线,如图3所示。从图3可以看到,BAU情景之下的碳排放路径将低于不实施任何政策的NULL情景(即不实施碳政策的经济自然递归情景)。

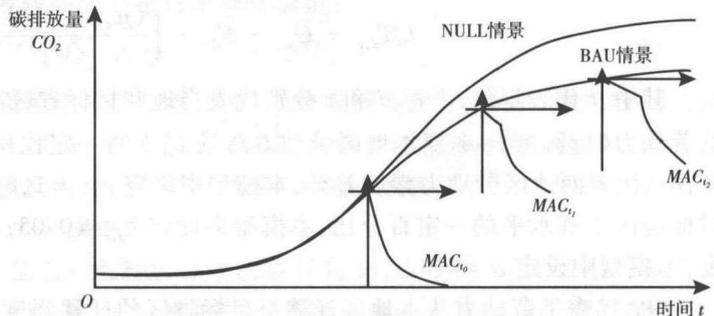


图3 基于BAU情景的动态MAC曲线

① 由于内生变量向量包含了CGE模型的所有内生价格变量以及内生数量变量,因此排放系数矩阵EF中只有对应内生能源数量变量的数值为正,对应其他类型内生变量的数值均取零。且排放系数矩阵EF中的每一行代表一个地区的排放系数。

五、模拟结果及分析

在上文假设的模型设定下,采用 GAMS 软件及 PATH 求解器来求解动态一般均衡模型,得到了各地区从 2007 年至 2020 年的动态 MAC 曲线,如图 4 所示:

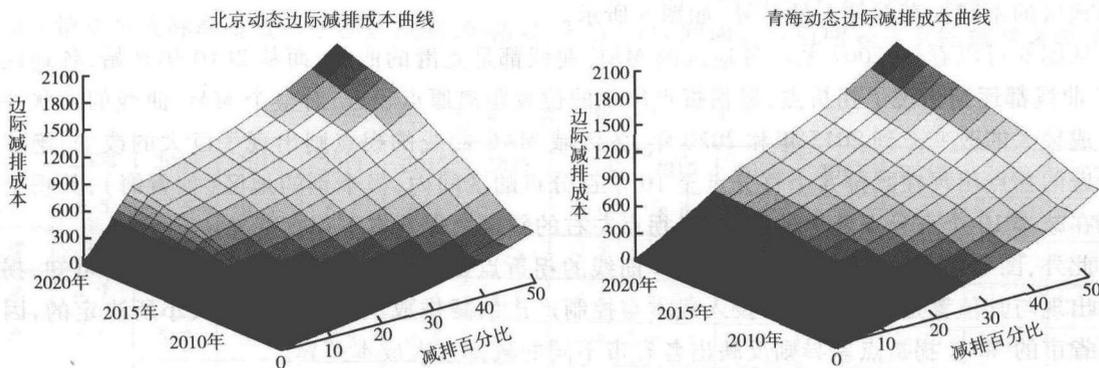


图 4 北京和青海动态 MAC 曲线曲面

图 4 所展示的动态 MAC 曲线的三维图,其中 x 轴代表碳减排百分比, y 轴代表年份,而 z 轴代表了边际减排成本的大小。每一年不减排所对应的边际减排成本为零,这与前文所假定的碳排放强度约束下边际减排成本的含义一致。

北京的 MAC 曲线是一条具有代表性的 MAC 曲线,它和绝大多数地区的 MAC 曲线具有相同的形状,而青海的 MAC 曲线形状则相对平缓。但无论是哪种形状的 MAC 曲线,从特定年份的横截面来看,MAC 曲线都存在着一个拐点,这个现象和前文的理论推导一致,图 5 则更清晰的展示了这一点,其分别展示了北京和青海地区每一年的静态 MAC 曲线:

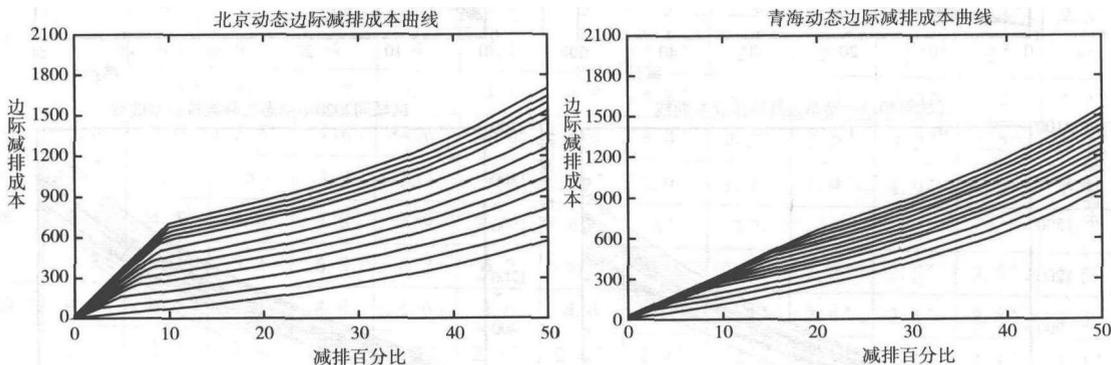


图 5 北京和青海动态 MAC 曲线截面

注:图中自下而上为 2007 年至 2020 年在不同减排幅度下的边际减排成本。

由 CGE 模型的模拟结果,可以看到动态 MAC 曲线呈现出两个明显特征:

第一,MAC 曲线随着时间的推移而不断上升。这意味着对于同一个减排百分比目标而言,年份越远,其减排成本就越高,这一结果和常识是一致的。而且由于在设定的 BAU 情景中,每一年的排放强度约束是非递减的,因此从技术上而言,各地区的碳减排难度必然会不断增加,促使 MAC 曲线不断上移;

其次,MAC 曲线出现拐点,且拐点位置随时间推移而右移。由于存在控制产出规模与增加减排投入两种减排途径,因此各省市在进行减排时会权衡两者的成本大小进行选择。一方面,随着初始减排投入成本逐渐超出控制产出的成本,MAC 曲线因此而出现拐点;另一方面,随着减排难度的

不断增加,初始减排投入的成本不断上升,结合图 1 可以看到,圆心位置不断下移使得拐折点的位置产生移动,通过控制产出来进行减排的区间余地不断增加,因此 MAC 曲线的拐点位置随着时间的推移而发生右移。

从区域间的比较来看,不同地区的拐点出现位置也存在着较大差异,而且拐点两边的斜率差异也因地区的不同而存在较大的差异,如图 6 所示。

从图 6 可以看到,2007 基年各地区的 MAC 曲线都是光滑的曲线,而从 2010 年开始,各地区的 MAC 曲线都逐渐出现了拐折点,但拐折点出现的位置距离原点较近,对整个 MAC 曲线的形状并没有造成较大的改变。到 2015 年和 2020 年,各区域 MAC 曲线的拐点则出现了巨大的改变,绝大部分地区的拐点出现在减排 5 个百分点至 10 个百分点的区间内,极个别的地区(如青海),其拐折点出现在减排 10 个百分点之上的区间,且拐点左右斜率之间基本不存在差异。

此外,图 6 同时反映出不同省市 MAC 曲线的拐折点出现位置的差异。由前文分析可知,拐折点的出现与其位置是由初始减排投入成本与控制产出的减排成本之间的相对大小所决定的,因此不同省市的 MAC 拐折点差异则反映出各省市不同的减排投入成本差异。

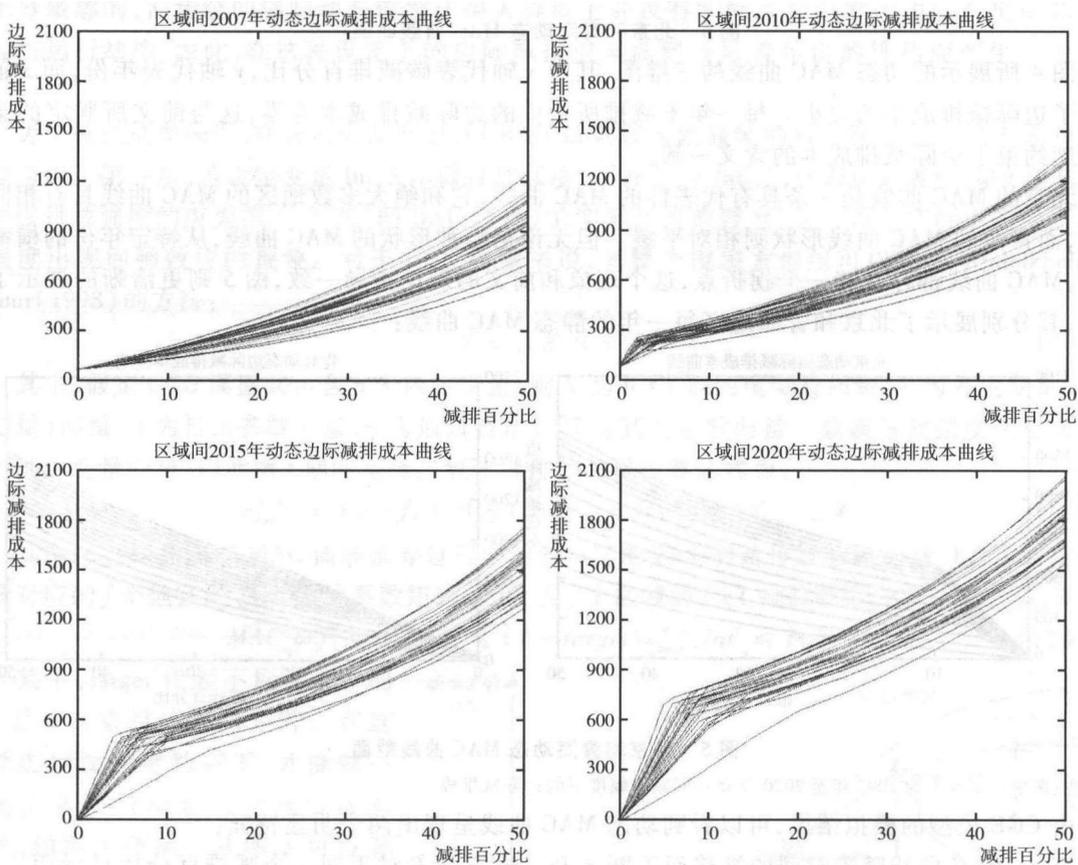


图 6 不同区域间动态 MAC 曲线比较

注:图中自下而上为各个省市在相应年份、不同减排幅度下的边际减排成本。

根据 Weitzman 定理,当 MAC 曲线的斜率较小即 MAC 曲线呈现出较为平坦的形状时,采取诸如排放权交易等数量政策将会更为有效;而当 MAC 曲线的斜率较大时,即当 MAC 曲线呈现出较为陡峭的形状时,采用诸如碳税等价格政策将更有效。从本文的模拟结果来看,MAC 曲线不仅存在着拐折点,且拐折点会随着时间的推移发生右移,因而在实施低碳政策时,必须考虑到这一现象的存在,

且需要根据实际减排数值来确定到底是采取数量政策还是价格政策。

为了看到这一点,我们计算了BAU情景(碳排放强度为 Int'_{BAU} 的碳排放量)下每一年各地区的实际二氧化碳减排百分比(相对于碳排放强度为 Int'_{base} 的碳排放量),通过对比实际减排百分比和拐点出现位置进行比对,得到如表1所显示的BAU情景下的实际减排百分比的位置。带*号表示在BAU情景下实际减排量位于拐点左侧,即落在 (e_1, e^*) 区间内。空白则表示实际减排量位于拐点的右侧。

表1 各地区实际减排百分比及转移趋势

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
北京	9.5	9.5	9.5	6.1	6.1	6	5.9	5.9	2.7*	2.6*	2.6*	2.6*	2.6*
天津	6	6	6	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	2.3*	2.3*	2.3*	2.3*	2.3*
河北	4.7	4.8	4.9	4.4	4.4	4.5	4.5	4.6*	2.1*	2.1*	2.1*	2.1*	2.1*
山西	5.6	5.7	5.8	4.3	4.3	4.3	4.4	4.4*	2.1*	2.1*	2.1*	2.1*	2.1*
内蒙	5.8	5.8	5.8	4	4	4	4.1	4.1	2.1*	2.1*	2.1*	2.1*	2.1*
辽宁	6.5	6.4	6.4	5.7	5.6	5.6	5.6	5.5	2.5*	2.5*	2.5*	2.5*	2.5*
吉林	5.5	5.6	5.7	4.3	4.3	4.4	4.4	4.4*	2.1*	2.1*	2.2*	2.2*	2.2*
黑龙江	6.1	6.1	6.2	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7*	2.4*	2.4*	2.4*	2.4*	2.4*
上海	4.8	4.8	4.9	4.7	4.7	4.7	4.7	4.8*	2*	2.1*	2.1*	2.1*	2.1*
江苏	5.4	5.4	5.5	5.1	5.1	5.1	5.1	5.2	2.2*	2.2*	2.2*	2.2*	2.2*
浙江	5.6	5.6	5.7	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	2.3*	2.3*	2.3*	2.3*	2.3*
安徽	4.8	4.8	4.9	4	4.1	4.1	4.1	4.1*	2*	2*	2*	2*	2*
福建	4.9	4.9	4.8	5.1	5.1	5.1	5	5	2.3*	2.3*	2.3*	2.3*	2.3*
江西	4.7	4.7	4.8	4	4	4.1	4.1*	4.1*	2*	2*	2*	2*	2*
山东	5.5	5.6	5.7	4.7	4.7	4.8	4.8	4.8*	2.2*	2.2*	2.2*	2.2*	2.2*
河南	5.6	5.6	5.5	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6*	2.2*	2.2*	2.2*	2.2*	2.2*
湖北	5	5	5	3.9	3.9	3.9	3.9*	3.9*	1.9*	1.9*	1.9*	1.9*	1.9*
湖南	4.4	4.5	4.6	3.8	3.9	3.9*	4*	4*	2*	2*	2*	2*	2*
广东	5.3	5.3	5.3	6.3	6.3	6.2	6.2	6.1	2.6*	2.6*	2.5*	2.5*	2.5*
广西	4.5	4.4	4.4	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6*	2.4*	2.4*	2.4*	2.4*	2.3*
海南	2.2	2.3	2.4	2.2*	2.3*	2.3*	2.4*	2.4*	2*	2.1*	2.1*	2.1*	2.1*
重庆	5.2	5.3	5.4	4.3	4.3	4.4	4.4	4.4*	2.2*	2.2*	2.2*	2.2*	2.2*
四川	5	5	5	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3*	2*	2*	2.1*	2.1*	2.1*
贵州	6	6	6	4.7	4.7	4.7	4.6	4.6*	2.4*	2.4*	2.4*	2.4*	2.4*
云南	5.1	5.1	5.1	4.8	4.7	4.7	4.7	4.7	2.3*	2.3*	2.3*	2.3*	2.3*
陕西	5.5	5.6	5.7	4.8	4.8	4.9	4.9	4.9	2.4*	2.4*	2.4*	2.4*	2.4*
甘肃	5.4	5.5	5.5	4.3	4.3	4.4	4.4	4.4	2.3*	2.3*	2.3*	2.3*	2.3*
青海	3.8	3.8	3.9*	2.2*	2.2*	2.2*	2.2*	2.2*	1.9*	1.9*	2*	2*	2*
宁夏	5.8	5.9	5.9	4.7	4.7	4.8	4.8	4.8*	2.5*	2.5*	2.5*	2.5*	2.5*
新疆	4.9	5	5	3.9	4	4	4*	4	2.1*	2.1*	2.1*	2.1*	2.1*

注:*表明在该地区在这一年份的实际排放百分比进入了MAC曲线拐点左侧。

从表 1 可以发现,绝大多数地区都在 2015 年或 2016 年,开始进入 MAC 曲线的“高斜率”区间,仅海南、青海两地区早在 2010 年和 2011 年便进入了此区间。减排所对应的边际成本落入哪个区间,一方面取决于减排幅度,另一方面取决于拐点位置。本文所模拟的动态路径显示,之所以在 2015 年前后会有上述变化,一方面是由于在 2015 年和 2020 年的强度目标之下,各省市在 2015 年之前减排压力较大,每一年需要实现的二氧化碳减排百分比较高;而 2015 年之后减排速度放缓,每一年需要实现的二氧化碳减排百分比较低。另一方面则是拐点位置随着时间推移发生移动。拐点位置取决于在不同减排目标下控制产出规模与增加减排直接投入的成本比较,随着减排潜力的收紧和减排直接投入的成本不断上升,使用控制产出规模进行减排的余地增加,MAC 曲线的拐折点不断右移。

在上述两个因素的作用下,实际减排百分比与 MAC 曲线的拐折点在动态过程中产生交叉,相对位置发生转变。因此大部分省市的实际减排百分比都会在 2015 年或 2016 年进入拐点左侧区域。由于拐点左侧区域相较右侧区域斜率更大,实施总量控制政策面临的不确定性会更大,而实施碳税政策的风险则相对较小。

六、不确定情景下的稳健性分析

根据前文所述,对 MAC 曲线的估计存在一定的不确定性,CGE 模型也不例外。对本文的模拟结果来说,任何不确定性都有可能对均衡结果的区域发生变化,从而改变最终的结论,因此必须对模型的不确定性进行更深入的审视。CGE 模型的不确定性主要来自于三方面:(1)模型设定的不确定性;(2)模型校准过程中的参数计算;(3)自由参数的不确定性。本文所使用的 CGE 模型采用了学界所公认的嵌套 CES 函数结构,因此第一种不确定性的影响非常小。其次,CGE 模型的校准是基于可获得的社会核算矩阵所进行的,虽然这种单点估计的方式会受基准年份数据的影响,但在现有数据可获得性及质量情况下,对模型系数的校准过程改进的难度也很大。最后,只有针对自由参数选择的不确定性进行分析是最可行的,因为自由参数(即要素替代弹性、进出口商品替代弹性等)的选择存在较大主观性,取不同的值往往会对整个模型结果产生较大的影响(Mansur & Whalley, 1984)。

自由参数的选择一般采用计量方法通过对历史数据进行回归所得到,或者从已有的文献中选择合适的参数值。由 CGE 模型的一阶条件表明,替代弹性等自由参数的大小直接决定了模型中相对价格的大小,由于边际减排成本与不同能源种类的选择偏好之间存在着直接的关联,因此本文将针对不同能源种类间的替代弹性参数进行不确定性分析。

在 CGE 模型中,CES 函数的替代弹性取值范围为 $\sigma \in (0, +\infty)$,在标准的 CGE 分析框架下,常常采用 $\sigma = 1$ 的柯布道格拉斯函数形式,常见的计量回归估计结果基本处于 $[0, 6]$ 的区间内。可见,替代弹性存在着边界,我们的稳健性分析也将基于此假定进行分析。

针对 CGE 模型自由参数选择的不确定性,国外的研究者曾提出了多种不同的稳健性分析方法(Wigle, 1991; Wigle et al., 1993; Harrison et al., 1993),但国内则较少进行这方面的研究。这些所提出的稳健性分析方法可以大致分为五类:有限敏感性分析、条件系统敏感性分析、非条件系统敏感性分析、贝叶斯法以及极值法。考虑到本文的研究目标,我们采用的是有限敏感性分析法来进行稳健性分析,即取有限个自由参数作为具有不确定性的随机变量(这里选择的是不同能源种类间的替代弹性),来分析它的不同取值对最终结果的影响大小。

CGE 模型所采用的能源间替代弹性 $\sigma_e = 0.5$,假定 σ_e 存在不确定性,有限敏感性分析法需要为其设定一个先验的概率分布。正态分布是最常见的一类分布(Touhami, 1998),但是在 CES 函数中,替代弹性的取值具有 0 下界,因此采用正态分布便会存在一定的问题。故本文采用 beta 分布作为能源间替代弹性的先验分布(Wang & Chen, 2006)来处理这类参数有界性问题, beta 分布函数

的参数设定为:①期望值为0.5,标准差为0.3,上界和下界分别为0和2。

由此得到标准beta分布的两个参数值 $a=11/6$ 和 $b=33/6$ 。当 $\sigma_{e,i}$ 取不同的beta分布随机值 $\sigma_{e,i}$ 时,将由CGE模型计算得到不同的边际减排成本。考虑到模型的复杂度,以2010年减排10%碳排放量为代表,进行1000次蒙特卡罗模拟,得到北京市的边际减排成本概率分布如图7所示:

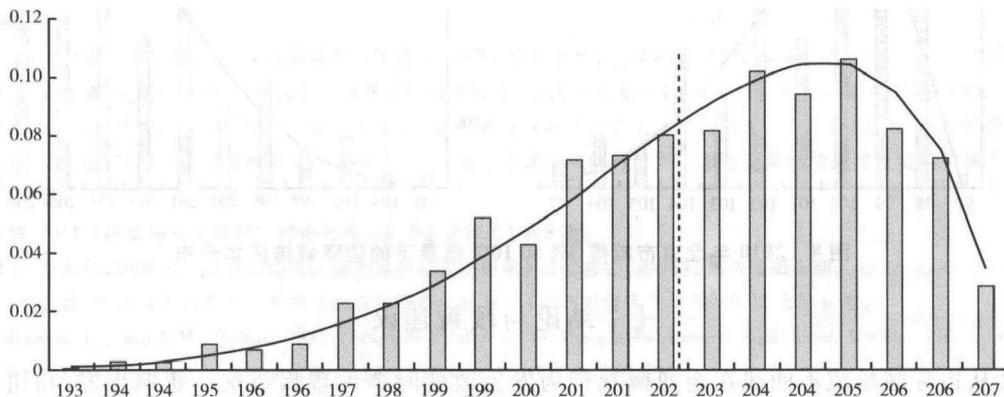


图7 2010年北京市碳减排10%情景下的边际减排成本分布

表2 减排成本线性回归结果

	常数项	斜率
参数估计值	206.791***	-9.074***
参数标准差	(0.00849)	(0.01444)

注:***表明在1%的水平上显著。

表3 蒙特卡罗结果统计信息汇总表

指标	实际值	样本值	期望值
均值	202.14	202.29	202.25
标准差	N/A	2.86	2.72
变异系数	N/A	0.014	0.013

[-3.0%, 2.0%],处于容许的区间范围内。

图8展示了2010年以北京为例减排3%和减排10%的边际减排成本分布。

从图8中我们发现,自5%的减排量起,不仅MAC曲线发生了转折,能源间替代弹性和边际减排成本之间的线性映射关系也发生了逆转,边际减排成本由原来的右偏转变为左偏。不同减排百分比情景下的偏误如表4所示:

表4 不同减排百分比对应的偏误大小

减排百分比	置信区间(95%)		偏误区间	
	下界	上界	下界	上界
2%	63.06	75.62	-7.6%	10.8%
4%	129.40	132.50	-0.9%	1.4%
6%	164.45	172.80	-2.9%	2.0%
8%	179.94	189.14	-3.0%	2.0%
10%	196.12	206.19	-3.0%	2.0%

图7中的柱状图代表由CGE计算所得边际减排成本分布情况,实线则由标准beta分布的线性变换得到,该线性变换基于边际减排成本对 $\sigma_{e,i}$ 的线性回归结果,回归结果如表2所示。

由此可以得到这1000个随机样本的统计信息如表3所示。

可以看到,由CGE计算得到的边际减排成本收敛于期望值,且波动率相对较小,变异系数也仅为0.014,处于较低的水平。根据线性回归结果,可以得到边际减排成本在95%的显著性水平下的置信区间为[196.03, 206.21],对应的偏误为

从表4可以看到,偏误区间迅速收敛至一个较小的百分比,达到了可接受的范围。此时,若对比实际减排百分比,2010年北京市实际减排百分比为9.5%,其对应的偏误区间已处于稳定收敛状态,即边际减排成本估计的不确定性处于容许的区间范围内。因此,区域CGE模型所得到的估计结果是相对比较稳健的。

① 从本文的稳健性分析结论来看,这里beta分布的参数设定范围变化不会对最终结果产生显著偏差,因此只要参数设定范围是在合理范围内,其结果依然是具有借鉴意义的。

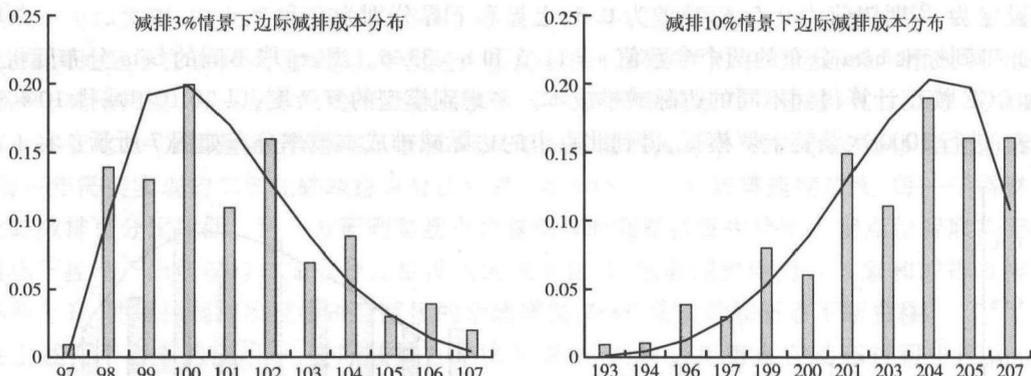


图8 2010年北京市减排3%和10%情景下的边际减排成本分布

七、结论与政策建议

本文从边际减排成本曲线在企业微观行为发生改变时会出现拐折这一机制出发,利用包含了资本、劳动与商品动态流动的中国多区域CGE模型,模拟分析了在哥本哈根和“十二五”碳强度目标情景下中国各省市的动态边际减排成本曲线,根据相关变化特征就碳减排政策的选择进行了研究。

本文发现各省市的边际减排成本曲线随时间推移而不断向上移动,进入2015年后边际减排成本的上升幅度增大、省市之间的差异也进一步扩大。随着碳强度的不断下降,各省市的碳减排潜力逐渐降低,减排难度不断增加,导致边际减排成本不断上升。

其次,各省市的边际减排成本曲线均出现拐折的情况,不同省市拐折点出现的位置不同,且边际减排成本曲线的斜率不同。当面临排放约束时,最优决策也必须进行相应调整,通过对减排投入与控制产出的成本进行权衡,做出新的最优决策。对于中国而言,虽然处于经济高速增长阶段,但是无论从社会发展还是技术发展水平来看,仍然处于较低的水平。这就决定了在当下中国进行减排的初始投入成本较高,边际减排成本曲线会因此分为两段,一段将采用成本较低的控制产出规模来进行减排,而另一段则采用成本相对较高的减排投资。进一步地看各省市之间由于技术发展水平与减排难度的差异,使得减排投资成本存在差异,因此拐折点的位置也不尽相同。

第三,各省市的边际减排成本曲线的拐折位置不断地右移,使得实际碳减排百分比落入拐折点左侧区域。随着碳减排的难度不断增加,减排所需要的初始投资成本也不断增加,使得各地区的边际减排成本曲线的拐折点均向右移动,与此同时,以2015年为分界的两个阶段不同强度的碳减排政策使得实际碳减排百分比逐渐下降。在这两个因素的同时作用下,大部分省市于2015年或2016年进入了斜率较高的拐折点左侧区域。当大部分地区进入了斜率较高的区域,即2016年时,在存在诸多不确定因素的情况下,采用碳税政策将优于采用碳交易政策,因为碳税政策可以把不确定因素下的效率损失降到最低。

在不确定性条件下,碳排放权交易与碳税政策执行的风险与边际减排成本曲线的形状密切相关,本文的发现说明碳减排的边际成本曲线的形状会随着减排行动的延续而出现拐折,因此中国的低碳政策体系应该根据这一特征予以调整:早期宜采用碳排放权总量控制与交易机制,后期则应考虑引入碳税。至于是否应实行单一政策还是实行组合型政策,则取决于在相应阶段减排幅度的大小。在减排幅度落入拐点左侧区域情况下,如果各省市边际减排成本差异巨大,则应采取碳税与碳排放权交易混合机制,因为这样可以通过交易有效降低各省市之间边际减排成本的差异,有利于最优碳税水平的确定;如果各省市边际减排成本差异很小,则单一碳税也可达到良好效果。在减排幅度落入拐点右侧区域情况下,如果各省市边际减排成本差异巨大,则实行碳排放权交易机制最为适宜;若边际减排成本差异很小,则要考虑到交易本身不会活跃,如果有充分信息为碳税水平设计提

供参考,则单一碳税或者混合机制都是可以考虑的。本文对碳税和碳排放许可选择机制的讨论仅从边际减排成本的动态特征予以考虑,并没有将其他影响因素纳入分析框架,如交易成本、碳排放许可的收入分配效应、碳税的支付转移效应等,这些问题都有待后续研究。

参考文献

- 曹静,2009:《走低碳发展之路:中国碳税政策的设计及CGE模型分析》,《金融研究》第12期。
- 高鹏飞、陈文颖、何建坤,2004:《中国的二氧化碳边际减排成本》,《清华大学学报(自然科学版)》第44卷第9期。
- 石敏俊、袁永娜、周晨吕、李娜,2013:《碳减排政策:碳税、碳交易还是两者兼之?》,《管理科学学报》第16卷第9期。
- 汤维祺、吴力波,2013:《公平与效率的协调和统一——基于中国区域间可计算一般均衡模型的减排政策模拟研究》,《上海经济研究》第3期。
- 谢来辉,2011:《碳交易还是碳税?理论与政策》,《金融评论》第6期。
- 许召元、李善同,2008:《区域间劳动力迁移对地区差异的影响》,《经济学(季刊)》第8卷第1期。
- 燕安、黄武俊,2010:《人力资本不平等于地区经济增长差异》,《山西财经大学学报》第32卷第6期。
- Abdelkhalek, T., and J. M. Dufour, 1998, "Statistical Inference for Computable General Equilibrium Models, with Application to A Model of the Moroccan Economy", *Review of Economics and Statistics*, Vol. 4, 520—534.
- Dixon, P., and M. Rimmer, 2002, *Dynamic General Equilibrium Modelling for Forecasting and Policy: A Practical Guide and Documentation of MONASH*, Elsevier.
- Harrison, G. W., R. Jones, L. J. Kimbell, and R. Wigle, 1993, "How Robust Is Applied General Equilibrium Analysis?", *Journal of Policy Modeling*, Vol. 15, 99—115.
- Kim, H., 2005, "Aggregation Over Firms and Flexible Functional Forms", *Economic Record*, Vol. 81: 19—29.
- Klepper, G., and S. Peterson, 2006, "Marginal Abatement Cost Curves in General Equilibrium: The Influence of World Energy Prices", *Resource and Energy Economics*, Vol. 28, 1—23.
- Kolstad, C. D., 1996, "Learning and Stock Effects in Environmental Regulation: The Case of Greenhouse Gas Emissions", *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 31, 1—18.
- Mandell, S., 2008, "Optimal Mix of Emissions Taxes and Cap-and-trade", *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 56, 131—140.
- Mansur, A., and J. Whalley, 1984, "Numerical Specification of Applied General Equilibrium Models: Estimation, Calibration, and Data", in H. E. Scarf and J. B. Shoven (eds.), *Applied General Equilibrium Analysis*.
- McKittrick, R., 1999, "A Derivation of the Marginal Abatement Cost Curve", *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 37, 306—314.
- Morris, J., S. Paltsev, and J. Reilly, 2012, "Marginal Abatement Costs and Marginal Welfare Costs for Greenhouse Gas Emissions Reductions: Results from the EPPA Model", *Environmental Modeling and Assessment*, Vol. 17, 325—336.
- Parry, J. W. H., and R. C. Williams III, 1999, "A Second-best Evaluation of Eight Policy Instruments to Reduce Carbon Emissions", *Resource and Energy Economics*, Vol. 21, 347—373.
- Pizer, W. A., 1999, "The Optimal Choice of Climate Change Policy in the Presence of Uncertainty", *Resource and Energy Economics*, Vol. 21, 255—287.
- Pizer, W. A., 2002, "Combining Price and Quantity Controls to Mitigate Global Climate Change", *Journal of Public Economics*, Vol. 85, 409—434.
- Rutherford, Thomas F., 1998, *GAMS/MPSGE Guide*, GAMS Development Corporation, Washington, DC.
- Stranlund, J. K., and Y. Ben-Haim, 2008, "Price-based vs. Quantity-based Environmental Regulation under Knightian Uncertainty: An Info-gap Robust Satisficing Perspective", *Journal of Environmental Management*, Vol. 87, 443—449.
- Wang, C., and J. Chen, 2006, "Parameter Uncertainty in CGE Modeling of the Macroeconomic Impact of Carbon Reduction in China", *Tsinghua Science and Technology*, Vol. 11, 617—624.
- Weitzman, M. L., 1974, "Prices vs. Quantities", *Review of Economic Studies*, Vol. 41, 477—491.
- Weitzman, M. L., 1978, "Optimal Rewards for Economic Regulation", *American Economic Review*, 683—691.
- Wigle, R. M., 1991, "The Pagan-Shannon Approximation: Unconditional Systematic Sensitivity in Minutes", *Empirical Economics*, Vol. 16, 35—49.

(下转第148页)

在较为特殊的情形下,易算得 $\hat{E}[\phi(x)]$ 。如当函数 $\phi(\cdot)$ 为凸函数或凹函数时,可得:

$$\hat{E}[\phi(X)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2}} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(y) \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_1^2}\right) dy; \hat{E}[\phi(X)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0^2}} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(y) \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_0^2}\right) dy \textcircled{1}$$

Measuring and Managing Risk with Random Limit Normal Distribution

Gong Xiaolin^a, Chen Zengjing^a, Zhang Xiaopu^b and Yang Shuzhen^a

(a: Shandong University; b: China Banking Regulatory Commission)

Abstract: The paper introduces a new distribution to improve tail risk modelling. We first demonstrate that the fundamental model of risk metrics, like VaR and ES, which leads to their inability to measure risk in a realistic, dynamic economic environment. Then, random limit normal distribution model is proven to be more effective for measuring and managing risk in the real business world. By employing the new distribution, we then propose more prudential risk metrics —— R-VaR and R-ES.

Key Words: Risk Models; Prudential Risk Management; High Peak and Fat Tails; Value at Risk; Expected Shortfall

JEL Classification: G28, G32, C46

(责任编辑:唐寿宁)(校对:梅子)

(上接第 61 页)

Selection Mechanism between Emission Trading and Carbon Tax based on Simulation of Dynamic Marginal Abatement Cost

Wu Libo^a, Qian Haoqi^a and Tang Weiqi^b

(a: Fudan University; b: Center for European Economic Research, ZEW)

Abstract: When facing with emission constraint, firm's optimal behavior will be changed and thus affect abatement cost directly. As a result, the effectiveness of quantity control policy and price control policy will be different under this situation with uncertainty. This paper introduces this micro-mechanism into the dynamic regional computable general equilibrium model of China to simulate each region's marginal abatement cost curve from year 2007 to 2020 and study the choice between emission trading policy and carbon tax policy. Firstly, the results show that the slopes of each region's MAC curve will increase gradually and MAC curves will occur kink points. Secondly, slopes on both sides of MAC curve are different and kink points will move due to tighter emission constraint. For the reason that quantity control policy is more suitable than price control policy when there exists uncertainty and the slope of MAC curve is flat, the results imply that emission trading scheme is more applicable currently in China. But when emission target becomes more stringent in the future, policy makers should also introduce carbon tax into low carbon policy system.

Key Words: Dynamic Marginal Abatement Cost Curve; Emission Cap and Trading; Carbon Tax

JEL Classification: C68, Q58

(责任编辑:王利娜)(校对:曹帅)

① 该式可通过热方程解的存在唯一性得到。