

# 从“污染天堂”到绿色增长<sup>\*</sup>

## ——区域间高耗能产业转移的调控机制研究

汤维祺 吴力波 钱浩祺

**内容提要:**我国正在经历快速的产业布局调整:高耗能、高排放的重化工业逐渐从东南沿海向中西部地区转移。碳市场的建立是否会加剧高耗能产业内移的趋势,强化中西部的“污染天堂”效应?能否通过优化碳交易机制的设计,降低“污染天堂”效应,促进地区协调发展?本文首先通过理论分析,对比了不同减排政策机制对排放主体的激励作用。同时,借助区域间CGE模型(IRD-CGE)对理论分析的结果进行模拟和验证。分析表明,相比于强度减排目标,建立碳市场不仅能够有效降低“污染天堂”效应,还能够提高中西部工业化转型地区的经济增长。不同的排放权分配方式也会对产业转移造成影响:通过拍卖分配排放权更有利于降低高耗能产业向中西部地区的集聚,同时普遍地提高各地区,尤其是中西部地区经济增速,从而实现区域协调和可持续发展。

**关键词:**碳市场 排放权分配 产业转移 结构调整 多区域CGE

### 一、引言

“十一五”和“十二五”期间,我国以能源消费强度目标和碳排放强度目标作为控制能耗与排放过快增长的主要政策工具,加快了节能减排的进程、降低了经济运行的总体能源消费和碳排放水平,<sup>①</sup>但具体到各地区的效果却不尽相同。目前我国的强度减排目标以各地区原有排放强度为基础设定,这使正处于快速工业化过程中、重化工业占比较大、能源效率较低的中西部省市获得了较大的排放空间。统计数据表明,青海、新疆、内蒙、四川、重庆、湖南、广西等省区经济增长的能耗与碳排放强度较高,且工业,尤其是高耗能的重化工业占比逐年提高,导致其能源消费和碳排放总量增速远超全国平均水平。此外,这些省区在工业化转型的推动下,经济增速也大多高于全国平均,在“十一五”和“十二五”期间上述地区承担的减排任务也较宽松,因而实际上得到了较大的能耗与排放空间。上述因素共同作用,强化了中西部地区对高耗能产业的吸引力,也加剧了能耗和碳排放向这些地区的集聚。此外,高耗能、高排放行业往往是高污染行业,其在部分地区的集聚会带来“环境污染—健康损害—收入下降”的恶性循环,影响地区经济增长的可持续性,引起区域间发展的失衡(郭子琪和温湖炜,2015)。

“十三五”期间,我国将全面推进碳排放许可交易机制,在有效控制温室气体排放总量的同时,实现社会减排总成本的最优化。在碳交易机制下,控排企业无论自身减排还是购买排放许可,均需承担减排成本,因此碳排放许可价格在区域间将趋于均等,许可的供应与需求在空间上可以高度分

<sup>\*</sup> 汤维祺,复旦大学发展研究院金砖国家研究中心,邮政编码:200082,电子信箱:tangwq@fudan.edu.cn;吴力波,复旦大学经济学院、复旦大学大数据学院,邮政编码:200082,电子信箱:wulibo@fudan.edu.cn;钱浩祺,复旦大学经济学院,邮政编码:200082,电子信箱:qianhaoqi@fudan.edu.cn。作者感谢匿名评审人的良好意见和建议,文责自负。

<sup>①</sup> 化石能源是我国目前二氧化碳排放最主要的来源。下文如无明确说明,“减排”即指“减少化石能源燃用导致的二氧化碳排放”。

离,而不再由减排目标的分配直接决定。同时,随着中西部地区城镇化进程的加速,高耗能产品的需求更多向中西部转移;而东部沿海地区劳动力、土地等要素价格逐渐提高,也推动高耗能产业内移。在工业内移的趋势下,引入碳交易机制是否会加快内移的过程,进而强化中西部的“污染天堂”<sup>①</sup>效应?能否通过调整交易机制的设计,降低“污染天堂”效应?

本文旨在通过理论分析厘清碳减排政策对于高耗能产业转移的作用机制,并利用一般均衡模型进行细化的数量模拟,对强度减排约束和碳交易机制下高耗能产业的转移进行对比和研究,并重点对碳交易机制下不同排放权分配机制的影响展开分析,为我国碳市场的交易机制以及排放权分配机制的设计提供参考。

## 二、理论与文献综述

减排政策影响地区产业结构的路径包括生产侧和需求侧两个方面。从生产侧看,减排政策限制企业的排放,提高能源投入的边际成本。不同行业由于其排放强度不同,生产成本受到的影响也有差异,从而引发资本积累路径和产业结构的调整。从需求侧看,政策冲击会通过价格机制向下游产业和消费者传导。与此同时,不同的政策机制隐含差异化的收入流过程,会影响商品价格或居民收入,进而影响商品的需求,从另一个侧面决定减排政策的效果。在没有碳交易的情景下,外生设定的地区减排目标直接决定了各地区的排放;在可交易情景下各生产者面对均等的边际减排成本,此时由于高耗能产业能源成本占比较高、产出和需求受政策影响较为显著,因此一般认为高耗能产业集中区域的排放降幅会高于其他地区,降低碳排放的集聚。

然而现实是,减排政策的作用过程及效果受很多因素的影响。首先,在多区域的经济系统中,减排政策提高能源使用成本,促使资本、劳动等非能源要素向其他区域流动。这一方面降低能源与其他要素的相对价格,弱化了要素投入结构的变化;另一方面则会提高生产成本,从而降低总需求、加快产业外移。两种机制对排放的作用相反,其净效应取决于能源与非能源要素的供需特征及其跨区域可流动性。其次,我国不同地区间生产技术差异大,高收入地区部分行业的能源利用效率几乎接近国际先进水平,而在中西部工业化中期的地区则大大落后。在产业转移过程中,生产技术也随之转移,但同时,由技术进步带来的生产成本的变化又会反过来刺激高耗能产业在中西部地区的增长。气候政策、产业转移和技术转移三者之间的循环反馈机制不仅影响气候政策的效果,更影响着我国产业技术进步和经济增长的长期路径。最后,区域间的交通运输及其他贸易成本也是决定产业转移的重要影响因素。当成本较低时,要素的跨区域流动性提高,产业转移成本较低;同时商品贸易成本较低,区域间贸易能够很快弥合生产与消费的地区布局差异,导致产业向部分地区集中。而产业转移的方向则取决于要素流动与商品贸易的相对成本:当要素流动成本较高时,产业布局受要素供给结构影响较为显著;而当商品贸易成本较高时,产业布局受需求分布的影响较为显著。由于交通运输部门是重要的能源密集型产业,因此减排政策同样会对交通运输成本造成影响,进而影响产业转移的强度、路径甚至方向。

现有的相关文献中,较大部分研究利用实证分析解释了我国碳排放的区域特征以及排放绩效的地区差异,均指出各地区产业结构的变化以及区域间的产业转移是影响地区排放绩效的重要因素(张雷等 2010;王群伟等 2010;陈诗一 2012;邹秀萍和宋敦江 2013;李方一和刘卫东 2014),但只有为数不多的研究分析了产业转移、技术转移与排放转移之间的内在关联(张翼和卢现祥, 2015),更少从减排政策出发,分析不同政策设计对产业和排放转移趋势的影响(成艾华和魏后凯, 2013;苑清敏和李想 2015)。刘佳骏等(2013)分析了要素粘性(锁定效应)对产业转移以及地区排

<sup>①</sup> “污染天堂”直译自英文“Pollution Haven”一词。也有国内研究将之译作“污染避难所”“污染庇护所”。

放结构的影响;郑鑫和陈耀(2012)分析了运输成本对产业转移的影响;黄国宾和周业安(2014)则分析了减排政策的收入流转机制,尤其是财政分权制度对减排政策效果的影响。这些研究为我们探究减排政策对产业转移的影响提供了非常重要的参考,但要系统地分析减排政策对产业布局的影响,不仅需要能够刻画减排政策在供给与需求两方面的共同作用,同时还需要能够定量地模拟要素和商品的流动,以及技术转移内在过程,因而对分析框架的完整性、系统性提出了较高的要求。

可计算一般均衡模型(CGE)非常适合本文的研究目标,遗憾的是现有基于CGE模型的相关研究更多关注国际间的产业转移与排放转移(谢来辉和陈迎,2007;牛玉静等,2012),而较少针对国内的研究。其主要原因在于我国多区域CGE模型研究尚处于起步阶段,细分至省市层面的模型非常有限(李善同,2010;石敏俊和张卓颖,2012),而且对区域间经济关联的刻画往往聚焦于贸易,缺少对要素市场以及区域间要素流动过程进行细致的模拟,因而难以有效地刻画我国经济结构转型和产业转移的内在动力机制,而是通过人为地校准各地区、各行业差异化的生产效率变化路径,使模拟结果与实际经济增长路径相匹配。这样的方法尽管能够再现实际经济增长路径,但缺乏对结构调整和产业转移内在动力与实现机制的刻画,严重削弱了模型的预测能力与应用价值。此外,现有研究常常采用“准碳税”的形式笼统地模拟减排政策的效果,模糊了不同减排政策在收入流转上的差异,无法细化减排政策对不同行业、不同地区的实际影响。

本文首先利用一般均衡分析框架进行定性分析,将气候政策影响地区碳排放的作用机制分解为投入结构效应和需求效应两部分,分别从要素相对价格变化以及收入流转机制两个角度,解释不同政策设计的差异。在此基础上,构建中国多区域动态可计算一般均衡模型(IRD-CGE),通过刻画各地区劳动力、人力资本、实物资本、土地等要素的供给和动态积累过程,以及要素、商品和技术跨区域流动等地区间经济关联机制,捕捉了我国产业和技术转移的潜在趋势及其内在的动力。同时本文对强度减排约束和排放权交易机制下的不同收入流转过程进行了模拟,尤其对碳交易机制下不同的排放权分配方式和标准进行了分析。

### 三、理论框架

气候政策一方面通过改变企业能源投入的显性或隐含成本,引导生产者的能源投入决策。另一方面,不同的政策设计会形成差异化的收入流转机制,对经济主体的行为产生不同的激励,从而影响产业转移的趋势。从政策作用机理看,减排政策可等价于一定总量约束与收入流转机制的结合。比如,强度约束下,能源投入边际成本(影子价格)因政策约束而提高了,但生产者在强度目标内使用能源却不涉及额外的成本,相当于在总量约束政策下向生产者免费发放了由自身产出决定的一定量的排放权。在碳交易机制下,生产者则需要为每一单位排放支付额外的成本,但在免费分配排放权(祖父制)的情景下,生产者可以出售配额,因而相当于获得了相应价值的补贴。当排放权以拍卖的方式分配时,拍卖所得不再直接回流向生产者,而是成为政府(广义的消费者)的收入,进而在原有消费结构基础上增加总需求。此时生产者获得的潜在补贴为消费者因收入提高而增加的对商品的支付意愿。

#### 1. 理论模型

本节构建了一个 $2 \times 2 \times 2$ (2地区、2要素、2部门)经济模型,包含两地区(本地 $h$ 和外地 $f$ ,用 $*$ 表示外地变量);两种要素(劳动和能源);厂商利用两种要素,生产工业品 $M$ 和服务 $S$ ,用于满足消费者的效用 $U$ 。记本地劳动力供给为 $L$ 、外地的劳动力供给为 $L^*$ ;能源要素仅分布于本地但可以出口,总量为 $E$ 。两地区生产的同类商品同质,但跨区域贸易涉及一定的贸易成本。由于模型中存在多种可贸易的商品和要素,贸易流向会随两地区要素相对丰裕程度、贸易成本和生产效率差异而改变,存在多种可能性( $2^4 = 16$ 种)。此外,由于商品同质,因此特定商品的生产布局也可能出现

角点解,即由一个地区专业化生产。为了简化分析,假定均衡状态下的贸易结构满足如下条件:本地能源要素充裕,在能源密集型产品的生产上具有比较优势,因此向外地出口能源  $E$  和工业品  $M$ ,同时从外地进口服务品  $S$ 。劳动力流动成本大于两地工资差异,即劳动力本地供给。同时假定工业品在两地区同时生产,而服务品则在外地专业化生产。

能源与工业品贸易存在冰山成本,分别记为  $\tau_E > 1$  和  $\tau_M > 1$ ,服务贸易无成本。记本地能源价格为  $e$ ,则外地市场能源价格  $p_{E^*} = \tau_E e$ 。商品价格之间存在如下关系:

$$\tau_M p_M = p_{M^*}; p_S = p_{S^*} \quad (1)$$

两种商品的生产均服从柯布一道格拉斯(C-D)形式。本地和外地工业品产量分别为  $M$  和  $M^*$ ,服务产量分别为  $S$  和  $S^*$ ,则生产函数可以表示为:

$$M = A \cdot DE_M^\alpha DL_M^{1-\alpha}; M^* = A^* DE_{M^*}^\alpha DL_{M^*}^{1-\alpha}; S^* = B^* DE_{S^*}^\beta DL_{S^*}^{1-\beta} \quad (2)$$

$DE$  和  $DL$  表示生产过程中的能源和劳动投入; $\alpha > \beta$  表明工业品的能源密集性高于服务品; $A, A^*$  和  $B^*$  表示全要素生产率(TFP),令  $A, B^* = 1, A^* > 1$  表明外地厂商生产工业品的效率高于本地厂商。记  $\bar{A} = 1/[\alpha^\alpha(1-\alpha)^{1-\alpha}]$ ,  $\bar{B} = 1/[\beta^\beta(1-\beta)^{1-\beta}]$ ,同时令本地劳动力价格  $p_L = 1$ ,外地劳动力价格  $p_{L^*} = w$ ,则两种产品在各地区的平均生产成本为:<sup>①</sup>

$$C_M = \bar{A}e^\alpha; C_{M^*} = \frac{\bar{A}}{A^*}\tau_E^\alpha e^\alpha w^{1-\alpha}; C_{S^*} = \bar{B}\tau_E^\beta e^\beta w^{1-\beta} \quad (3)$$

竞争性市场上各商品的价格即为其生产成本。根据式(1)和式(3)可以得到  $w$  的约束条件:

$$w = (A^* \tau_M / \tau_E^\alpha)^{1/(1-\alpha)} \quad (4)$$

由式(2)可进一步求得商品生产过程中对能源的需求:

$$DE_M = \alpha \bar{A} e^{\alpha-1} M; DE_{M^*} = \alpha \bar{A} (\tau_E e)^{\alpha-1} w^{1-\alpha} M^*; DE_{S^*} = \beta \bar{B} (\tau_E e)^{\beta-1} w^{1-\beta} S^* \quad (5)$$

两地区消费者在各自收入  $I = eE + L$  和  $I^* = wL^*$  约束下,最大化效用  $U = DM^\mu DS^{1-\mu}$  和  $U^* = (DM^*)^\mu (DS^*)^{1-\mu}$ 。则两地区对工业品和服务的需求分别为:

$$DM = \mu I / p_M; DS = (1-\mu) I / p_S; DM^* = \mu I^* / p_{M^*}; DS^* = (1-\mu) I^* / p_{S^*} \quad (6)$$

## 2. 不考虑收入流转的政策效应分析

本小节只考虑政策约束提高能源投入成本,而没有相应的收入流转(即居民收入水平不变、商品销售价格等于生产成本)时不同行业、地区能源投入的变化。首先从生产侧出发,分析能源约束对要素投入结构的影响。不考虑商品需求量(也即产量)的变化,则根据式(5)可得各厂商能源投入对能源成本的弹性:

$$\varepsilon_M^I = \frac{\partial DE_M / \partial e}{DE_M / e} = \alpha - 1; \varepsilon_{M^*}^I = \frac{\partial DE_{M^*} / \partial e}{DE_{M^*} / e} = \alpha - 1; \varepsilon_{S^*}^I = \frac{\partial DE_{S^*} / \partial e}{DE_{S^*} / e} = \beta - 1 \quad (7)$$

注意到  $\alpha - 1$  和  $\beta - 1$  均小于0,表明能源成本提高将促使生产者减少能源投入、增加劳动投入。同时  $|\alpha - 1| < |\beta - 1|$  表明能源密集型行业投入结构的调整对能源成本的敏感性较低。因此投入结构效应会使高耗能产业集聚地区(本地)能耗在全国的占比进一步提高。

其次从消费侧出发,分析商品消费量的变化。假定总收入不变,则根据式(6)可得两地消费者商品需求对能源成本的弹性:

<sup>①</sup> 由于生产函数设定为规模报酬不变,且没有不变成本,因此对于完全竞争市场的单一生产者而言,平均成本也是其边际生产成本。

$$\begin{aligned} \varepsilon_M^D &= \frac{\partial DM/\partial e}{DM/e} = -\alpha; \varepsilon_{M^*}^D = \frac{\partial DM^*/\partial e}{DM^*/e} = -\alpha; \\ \varepsilon_S^D &= \frac{\partial DS/\partial e}{DS/e} = -\beta; \varepsilon_{S^*}^D = \frac{\partial DS^*/\partial e}{DS^*/e} = -\beta \end{aligned} \quad (8)$$

由于两地商品需求对于能源成本的弹性均等,因此全国总需求对能源价格的弹性同样为 $-\alpha$ 和 $-\beta$ 。由于 $w$ 受式(4)的边界条件约束而保持不变,因此不论 $e$ 的取值如何,式(1)所述的贸易条件始终成立,即不考虑收入流转时,能源约束收紧导致各地区产量等比例变化:

$$\frac{\partial M/\partial e}{M/e} = \frac{\partial M^*/\partial e}{M^*/e} = -\alpha; \frac{\partial S^*/\partial e}{S^*/e} = -\beta \quad (9)$$

注意到 $-\alpha$ 和 $-\beta$ 均小于0,表明能源成本的提高使产品价格上涨,导致需求下降。 $|-\alpha| > |-\beta|$ 表明由于高耗能产业成本变化幅度较大,因此其需求量对于能源成本变化较为敏感。从需求侧考虑,则能源约束会降低高耗能产业集聚地区(本地)的能耗占比。

综合生产测与需求侧的分析,可以推导地区能源消费对能源成本的弹性。记本地能源投入量 $DE = DE_M$ ,外地能源投入量 $DE^* = DE_{M^*} + DE_{S^*}$ ,则:

$$\begin{aligned} \varepsilon_E &= \frac{\partial DE/\partial e}{DE/e} = \underbrace{(\alpha - 1)}_{\text{投入结构效应}} + \underbrace{(-\alpha)}_{\text{需求效应}} = -1 \\ \varepsilon_{E^*} &= \frac{\partial DE^*/\partial e}{DE^*/e} = \underbrace{[(\alpha - 1) - \Delta]}_{\text{投入结构效应}} + \underbrace{[-\alpha + \Delta]}_{\text{需求效应}} = -1 \end{aligned} \quad (10)$$

式中 $\Delta = [(\alpha - \beta)\beta\bar{B}e^{\beta-1}S^*(A\tau_M/\tau_E)^{(1-\beta)/(1-\alpha)}]/DE^* > 0$ 。从式(10)可以看到,如果不考虑收入流转,则减排政策对于能源消费的地区分布是中性的——随着能源约束的收紧,两个地区能源投入的占比不变。然而将减排政策的效果分解成两部分:一部分是由于能源成本提高,导致生产者调整要素投入结构造成的节能效果: $\varepsilon_{E^*}$ 的投入结构效应绝对值大于 $\varepsilon_E$ ,表明要素投入结构效应对于高耗能产业占比较低的地区影响较显著;减排政策的另一部分效应来自于产品价格的变化导致的对商品需求量的变化。由于工业品能源成本占比较高,因此其价格变化幅度较大,导致较大的需求降幅,进而导致高耗能产业集聚的地区能耗降幅也较大。两项效应互相抵消,最终产生中性的净效应。

### 3. 减排政策收入流转机制的影响

下文进一步分析和比较强度约束、总量约束下祖父制分配排放权以及总量约束下拍卖分配排放权,这三种政策设计所隐含的收入流转机制对地区能源投入的影响。首先需要指出的是不论收入如何流转,生产者投入能源的实际成本为能源成本加上政策约束的影子价格,因此从生产侧看,投入结构效应并不会受到影响。由于不同的收入流转机制会使市场价格与生产成本产生偏离,因此对需求效应会造成直接的影响。

用 $\lambda$ 表示能源约束的影子价格,用 $\theta < 1$ 表示政策目标(在强度约束下,表示能耗强度下降为原强度的一定百分比;在总量约束下表示总能耗下降为原有总能耗的百分比)。在强度指标约束下,生产成本与市场价格之间的关系可以表述为(由于下式对两个地区均成立,忽略表示地区的\*)<sup>①</sup>: $p_M - C_M = \lambda\theta DE_M/M$ , $p_S - C_S = \lambda\theta DE_S/S$ 。将式(3)和式(5)代入可得:

$$p_M = (1 + \lambda\theta\alpha/e)C_M; p_S = (1 + \lambda\theta\beta/e)C_S \quad (11)$$

此时式(10)改写为:

<sup>①</sup> 尽管本地没有S部门,但本地可以从外地进口S用于消费,同时由于不存在贸易成本,因此本地的价格就等于外地的价格;而本地消费的S在进口过程中没有额外的成本,所以其生产成本也就等于外地的生产成本。所以对于本地来说,依然可以将生产成本与市场价格之间的关系表示为 $p_s - c_s$ 。

$$\varepsilon_E = - \left( 1 - \frac{\alpha^2 \lambda \theta}{e + \alpha \lambda \theta} \right); \varepsilon_{E^*} = - \left( 1 - \frac{\alpha^2 \lambda \theta}{e + \alpha \lambda \theta} + \Omega \right) \quad (12)$$

$$\Omega = \frac{(\alpha - \beta) \{ 1 - 1 / [(1 + \alpha \lambda \theta / e) (1 + \beta \lambda \theta / e)] \} \beta \bar{B} e^{\beta - 1} S^* (A \tau_M / \tau_E)^{(1 - \beta) / (1 - \alpha)}}{DE^*} > 0, \text{因而} |\varepsilon_E| < |\varepsilon_{E^*}|,$$

表明在强度约束下,非高耗能行业集聚的地区(外地)对减排政策较为敏感,即在执行减排政策后高耗能行业集聚地区(本地)的能耗在全国总量中的占比会趋于上升,能耗进一步集聚。

在总量约束下免费分配排放权时,生产者获得的排放权市场价值即可视为其获得的潜在补贴。记无政策约束条件下的产量和能源投入分别为  $M^0$ 、 $S^0$ 、 $DE^0$  和  $DE^0$ ,则此时生产成本与市场价格之间的关系可以表述为:  $(p_M - C_M)M = \lambda \theta DE^0$ 、 $(p_S - C_S)S = \lambda \theta DE^0$ ,进而可得:

$$p_M = \left( 1 + \alpha \frac{\lambda \theta M^0}{e M} \right) C_M; p_S = \left( 1 + \beta \frac{\lambda \theta S^0}{e S} \right) C_S \quad (13)$$

同理可得在以祖父制分配排放权的碳交易机制下,减排政策同样会导致能源消费进一步向高耗能产业集聚的地区集中,导致污染天堂效应。

而当排放权以拍卖的形式分配时,生产成本与市场价格之间不存在直接的背离。但是由于消费者收入提高,对商品的潜在支付意愿也相应提高。由此导致的潜在补贴可以表述为:  $(p_M - C_M)M = \mu \lambda \theta (DE_M + DE_S)$ 、 $(p_S - C_S)S = (1 - \mu) \lambda \theta (DE_M + DE_S)$ 。由于潜在补贴由消费结构决定,与各行业、各地区的能源投入水平无关,因此不改变商品需求对能源成本的弹性,也即减排政策的效果依然为中性,并不会导致能耗向某一地区集聚。

#### 四、IRD-CGE 模型

为了更好地模拟我国经济产业结构调整 and 转型的过程,本文在标准的多区域 CGE 模型基础上进行了拓展,引入了细分的劳动力、人力资本、资本、土地等要素,模拟了各要素的地区供给、价格决定机制,同时细化了区域间贸易以及要素流动和技术溢出的机制。通过上述设定,本文模型能够再现(Replicate)2007年到2012年间我国各地区、各行业的经济增长,准确地刻画了我国经济与产业的结构转型与地区转移的内在动力机制,从而为本文分析提供了坚实的基础。

本文构建的中国多区域、多部门递归动态一般均衡模型(IRD-CGE)以2007年地区“投入—产出表(I-O)”为基础,包含了30个地区(不包含港、澳、台及西藏)42个部门。模型模拟的时间维度为2007—2020年,其中2007—2012年用于校准模型动态路径。

##### 1. 要素供给与价格

模型包含三类基础要素:劳动、土地和资本,其中劳动又分为农业劳动力( $L_r^{ur}$ )、城镇非技术劳动力( $L_r^{us}$ )以及城镇技术劳动力,也即人力资本( $L_r^s$ );土地分为农业土地( $Land^{ag}$ )与非农土地( $Land^{na}$ );资本具有地区和行业属性,也即  $K_{r,i}$  表示  $r$  地区  $i$  部门的存量资本。

农业部门只雇用当地农业劳动力,非农部门则可以同时雇用城镇技术与非技术劳动力。农业劳动力可以向城镇非技术劳动力转移,同时城镇非技术劳动力可以跨区域流动,但是劳动力的跨区域流动涉及交通成本以及额外的生活成本,及由于语言、文化等造成的劳动生产率折价,这三方面因素共同决定了地区间的工资水平差异以及劳动力的区域间流动规模和方向。本文借助《第六次人口普查》(2010年)中的各地区之间平均工资差异,公路交通距离、生活成本差异等数据,通过回归估计区域间交通成本、生活成本差异,以及劳动力折价等因素对区域间工资水平的影响,<sup>①</sup>并据

<sup>①</sup> 地区间交通成本和生活成本差异的系数从回归系数中直接得到,而回归残差反映了地区间工资差距中无法由交通成本和生产成本差异解释的部分。

此设定模型参数。

农用地供应量外生不变<sup>①</sup>,而非农用地则参照世界银行开发的 LKAGE 模型(van der Mensbrugge, 2004),设定其供给由潜在可用土地总量(LAND)与土地价格 $P^{land}$ 共同决定: $land_{r,i} = LAND_r - (c_r + \xi_r)(P_{r,i-1}^{land})^{-\sigma}$ 。根据各地土地供应量以及地价水平,可以估计得到上式中的参数 $c_r$ 和 $\sigma$ 。模型设定的各行业土地需求也有所区别:农业部门直接投入农用地;工业部门直接投入非农土地;而服务业中,房地产业直接投入非农土地,其他服务业通过投入房地产业的产出品间接使用土地。

模型假定存量资本不能流动,而前期储蓄在形成当期新增资本之前具有跨行业、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资本的折旧和新增资本的形成逐渐完成(即 Quasi-Putty-Clay 机制)。各期投资总量由前一期各地储蓄规模决定(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(Dixon et al. 2005)。

### 2. 技术转移与溢出

产业转移对地区经济增长路径的影响不仅体现在产业结构的变化,同时也会带来生产技术的转移与溢出。受限于投入产出表的数据结构,各地区同行业的生产者加总为同一个部门,无法区分不同的生产技术。此外,由于产业转移大多通过合资入股、交叉持股等方式实现,伴随着复杂的股权结构和资产结构的改变,难以对每一单位产能明确界定其转移来源。注意到生产设备和装备是生产技术的实现载体,而产业转移会带动跨区域贸易流向的改变,由此可以间接地通过跟踪生产设备的跨区域贸易流向揭示技术转移的路径与过程。而这也是目前多区域 CGE 建模领域较为常用的处理方法(Copeland & Taylor, 2003; Diao et al., 2005; Gerlagh & Kuik, 2014; Carraro et al., 2010; Hübler, 2011; Carraro & De Cian, 2013)。

本文参照 ICES 模型(Parrado & De Cian, 2014),设定各地区各行业能源要素生产率的进步速率 $a_{r,i}^f$ 与该地区“通用、专用设备”的调入量增速 $N_{r,i}^{M\&E}$ 线性相关,相关系数 $\zeta_{r,i}^f = \chi^f CS_{r,i} CR_r MS_r$ ,其中 $CS_{r,i}$ 表示 $r$ 地区投入 $i$ 部门的外省调入机器设备占该地区调入设备的比例,该指标表征特定行业吸收技术溢出的能力; $CR_r$ 表示 $r$ 地区调入的机器设备占全国各省市总调入量的比例,表征特定地区吸收技术溢出的能力;而 $MS_r$ 表示 $r$ 地区“通用、专用设备制造业”产出占全国该行业总产出的比重; $\chi^f$ 为调整系数。

### 3. 地区间商品贸易

现有多区域 CGE 模型对区域间贸易一般简化处理,即设置一个虚拟的地区作为贸易中转:所有地区的调出均流入该地区,而所有地区的调入同样全部来自该地区。这样的简化在一定程度上解决了区域间贸易数据缺失的困难,但却忽略了地区消费偏好结构、区域间贸易成本等差异化的因素,而这些因素在决定贸易流向的过程中都有着非常重要的影响。为了更加细化地模拟区域间的经济关联与互动关系,必须构建“区域间”CGE 模型,对地区间的双边贸易及其推动机制进行刻画。我们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(Robinson & El-Said, 2000)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(李善同, 2010)。在此基础上,本文参照 Armington(1969),采用嵌套的常转换弹性函数(Nested CET)来模拟跨区域的商品需求偏好结构。

运输成本以“冰山成本”的形式引入模型,即一单位贸易品从一个省市运出,到另一个省市之间,会发生一定比例的损耗,由此反映贸易成本的支出。本文采用交通部、统计局发布的现有数据

<sup>①</sup> 根据《土地管理法》以及《全国土地利用总体规划纲要(2006—2020)》,我国的耕地面积已经逼近 18 亿亩的红线,因此即便非农用地价格快速上涨,农用地向非农转换的空间和途径也非常有限,而目前我国尚未开发的土地面积也已非常有限,因此本文模型设定农用地供给面积外生不变。

对我国各类商品的国内运输成本进行了估算,并根据“交通运输部门”的产品成本变化率调整运输成本,从而反映减排政策的影响。

### 五、模拟结果与分析

本节从两个层面对减排政策情景进行模拟:第一个层面区分减排政策的约束机制,包括目前我国主要采用的强度约束,以及“十三五”期间即将广泛试点的排放总量与交易机制;第二个层面针对碳交易机制,分析排放权初始分配方式(拍卖分配与免费分配)的作用。

根据我国目前的政策实践,强度减排约束与碳市场将在一定时间内共存,而随着“十三五”期间碳市场试点的逐渐铺开,前者将逐渐被后者取代。从欧洲碳市场的发展经验来看,较为合理可行的排放权分配方式为免费发放为主逐渐向部分拍卖转变,而免费发放的标准则综合采用历史排放和基线法。在我国现有基础上,普遍采用基线法较为困难,因而历史排放分配将是大部分地区和行业分配排放权的主要标准。而部分碳交易试点市场也正在探索拍卖分配的可能。因此本文设定了三种政策情景,基准情景、拍卖分配的碳市场情景,以及按历史排放分配的碳市场情景。此外,模型还设定了一个无政策情景,用以评估减排政策总体影响。各情景的命名规则与设定如下:

(1) 无政策情景(NULL):没有任何减排政策约束,作为参考情景;

(2) 基准情景(BAU):按照现有政策和规划,设定各区域的减排强度目标。具体而言,2007—2010年间各地区的强度减排约束参照国家发改委和统计局联合发布的《关于“十一五”各地区节能目标完成情况的公告》设定;<sup>①</sup>2011年到2015年则根据国务院发布的《“十二五”控制温室气体排放工作方案》中的地区节能目标进行设定;最后2016年到2020年间,设定各地区之间的相对强度减排幅度保持2005年到2015年间的水平,同时调整总体的减排幅度,以实现到2020年单位GDP排放比2005年下降40%的“哥本哈根承诺”。各地区具体减排目标的设定如表1所示。

表1 BAU情景下地区二氧化碳强度减排目标(2007年为基年)

省份	2010	2015	2020	省份	2010	2015	2020
北京	83.07%	68.12%	54.14%	河南	87.39%	72.53%	60.35%
天津	86.81%	70.32%	56.85%	湖北	86.37%	71.69%	59.18%
河北	87.40%	71.67%	58.91%	湖南	87.19%	72.36%	60.12%
山西	85.71%	71.14%	58.43%	广东	89.80%	72.29%	59.40%
内蒙	85.74%	72.02%	59.88%	广西	90.57%	76.08%	65.61%
辽宁	87.46%	71.72%	58.99%	海南	92.53%	82.35%	76.33%
吉林	86.12%	71.48%	58.90%	重庆	86.84%	72.08%	59.73%
黑龙江	86.95%	73.04%	61.30%	四川	87.27%	71.99%	59.49%
上海	87.47%	70.85%	57.57%	贵州	87.43%	73.44%	61.86%
江苏	87.17%	70.61%	57.24%	云南	89.16%	74.45%	63.15%
浙江	87.46%	70.84%	57.56%	陕西	87.30%	72.46%	60.25%
安徽	87.23%	72.40%	60.17%	甘肃	87.30%	73.33%	61.71%
福建	89.78%	74.07%	62.37%	青海	89.40%	80.46%	73.70%
江西	87.44%	72.58%	60.41%	宁夏	87.41%	73.42%	61.84%
山东	86.09%	70.59%	57.45%	新疆	87.41%	73.42%	69.50%

<sup>①</sup> 《关于“十一五”各地区节能目标完成情况的公告》的基准年度为2005年,报告了各地区从2005年到2010年的能耗强度降幅。为了与本文模型的基准年度相匹配,我们假设每年各地区的碳排放强度以不变的速率按指数下降,由此得到各年相对于前一年的碳强度降幅,再以2007年为基期,折算各年相对于2007年的降幅。

(3) 拍卖分配排放权的碳交易情景(AUC):为保证情景间的可比性,记录BAU情景中地区排放量,并作为地区减排总量目标。同时引入全国性的排放权交易机制,实现各地区的排放权市场价格均等化。排放权的拍卖收益通过转移支付的形式进入消费者的总收入。

(4) 免费分配排放权的碳交易机制(GDF):在AUC情景设定的地区总量约束条件下,按照各生产者基期排放量占地区总排放量的比重,分配各期排放权,并免费发放给生产者。

表2 政策情景列表

代码	含义	可交易	分配方式
NULL	无政策情景	否	/
BAU	基准情景	否	/
AUC	拍卖分配的碳交易	是	拍卖
GCF	免费分配的碳交易	是	按基期排放量比例分配

1. 减排政策的影响

在产业梯度转移过程中,制造业,尤其是高能耗、高排放的产业逐渐从东部沿海发达地区向劳动、土地和能源成本较低的中部以及西部地区转移。模型的模拟结果验证了这一趋势。从图1<sup>①</sup>第一张小图可以看出:江、浙、沪、闽

等地区已逐渐进入工业化后期,产业结构轻型化导致高耗能产业占比下降;而湘、鄂、豫、青、甘等中西部省市,以及新疆、内蒙、山西等能源大省的占比却显著提高。各地区差异化的产业结构调整路径在全国层面上便表现为高耗能产业由东向西、从高收入地区向中低收入地区转移的趋势(如图1第二张小图)。其中以江、浙、沪为代表的东部沿海地区是最主要的产业移出地,而晋、冀、鲁、豫等能源与重工业的传统重镇,以及广大西部地区则凭借较低的土地、能源等要素成本,成为了主要的移入地,吸引高耗能产业集聚。受限于生产技术水平,中西部地区能源效率与排放效率相对于东部发达地区均较低,同时中西部地区原本便是重化工业相对集中的地区,产业结构重型化带来能源消费与污染排放较为集中,在梯度转移过程中,中西部地区碳强度进一步提高(图1第二张小图)。可见放任高耗能产业进一步向中西部地区集聚,将会导致这些地区形成“污染天堂”,牺牲经济增长可持续性,降低地区间经济增长和发展的协调与平衡。

根据前文分析,强度减排目标隐含了对生产者产出的实际补贴,新疆、青海、甘肃、四川等西部省区,以及山西、河北、河南等中部能源与工业大省原本高耗能产业规模较大、占比较高,因此隐含的补贴规模较大。此外,从“十一五”和“十二五”节能和减排目标分配来看,上述工业大省大多节能指标较松,在不可交易的情景下,进一步降低了这些地区的能源成本。两方面因素同时作用,导致强度减排目标(BAU情景)下,高耗能产业向中西部地区集聚的趋势得到强化。图2左图显示了BAU情景下2020年高耗能产业的地区布局(地区产值占相应行业全国产值比重)相比于无政策情景(NULL)的变化情况。从中可以看到,BAU情景下高耗能产业向西部以及部分中部地区的集聚程度甚至高于NULL情景(图中实心圆点表示的地区)。这一结果表明,强度减排目标会进一步推动高耗能产业向中西部地区转移,一定程度上加剧中西部地区的“污染天堂”效应。而与此同时,图2右图则表明引入减排政策使各地区经济产出普遍下降,但对照不同地区受影响的程度可以看到,陕西、甘肃、青海、新疆、宁夏等西部省区受到的影响最显著,GDP产出降幅最大。高耗能产业的进驻并未对西部地区经济增长带来刺激作用,相反由于这些产业附加值率低,且西部地区相对技术较为落后、生产效率低下,导致其产出受减排政策的影响更甚于其他地区——“污染天堂”带来了环境与经济的双重损害。

引入碳市场后,由于中西部地区减排成本相比于东南沿海的部分发达省区较低,因此可以通过向后者出售排放配额实现更高的收益,交易的结果是使中西部地区能耗降低、东南沿海地区能耗增加,直至各地区边际减排成本(即碳价)均等。图3中的第一列两张小图表明在引入碳交易的两种

① 图中地图仅为作者自己制作的示意图。图2、图3和图4同。

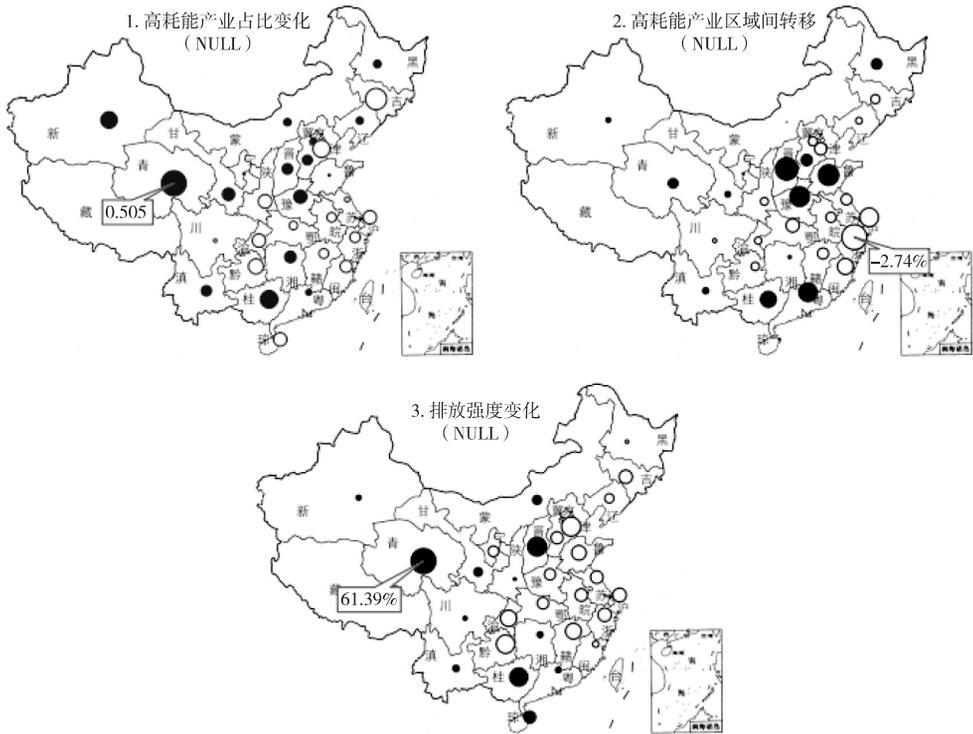


图1 地区产业结构调整与区域间产业转移的潜在趋势

注: 第一张小图中气泡大小表示2007—2020年间各省市高耗能产业产值在本地经济总产值中的占比变化,反映产业结构变化;第二张小图表示同时期各省市高耗能产业产值在全国相应行业总产值中的占比变化,反映产业布局转移;第三张小图反映各省市单位GDP碳排放量的变化;图中实心气泡表示增加,空心气泡表示下降。各图表中最大的气泡标注了对应数值,以反映比例尺。

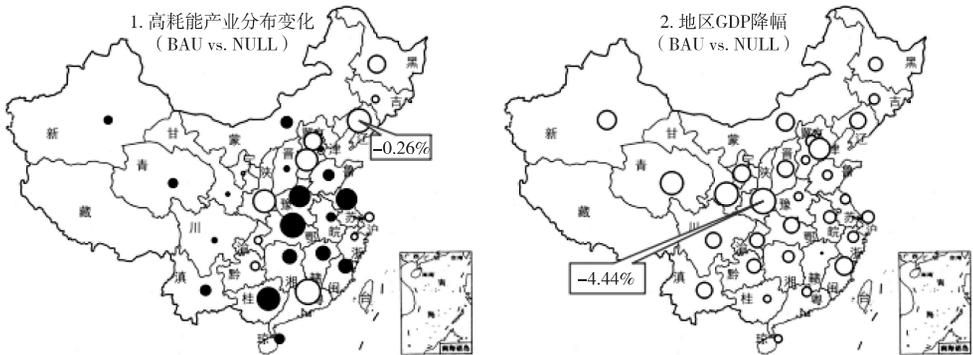


图2 强度减排政策对高耗能产业地区布局以及地区经济产出的影响

注: 左图中气泡大小表示目标情景(BAU)下各地区高耗能及制造业产值占全国相应部门产值的比例相对于对照情景(NULL)相应值的变化率;右图中气泡大小表示目标情景(BAU)下各地区GDP比对照情景(NULL)的变化率;实心气泡表示增加,空心气泡表示下降。

政策情景(AUC和GDF)下,高耗能产业向中西部地区集聚的趋势得到了弱化(西部以及大部分中部地区空心原点,表示这些地区高耗能产业占比下降)。在碳交易机制下,中西部地区,尤其是西部地区的布局占比低于BAU情景,表明碳交易机制有效地降低了“污染天堂效应”。

而从图3第二列可以看到,碳排放机制为部分地区带来正的经济效应。尤其是当采取拍卖分配排放权时,由于拍卖机制优化了排放权的初始分配,绝大部分省市都获得了比强度减排(BAU情景)下更高的长期经济产出水平。对中西部工业化转型省市而言,降低高耗能产业的集聚一方面

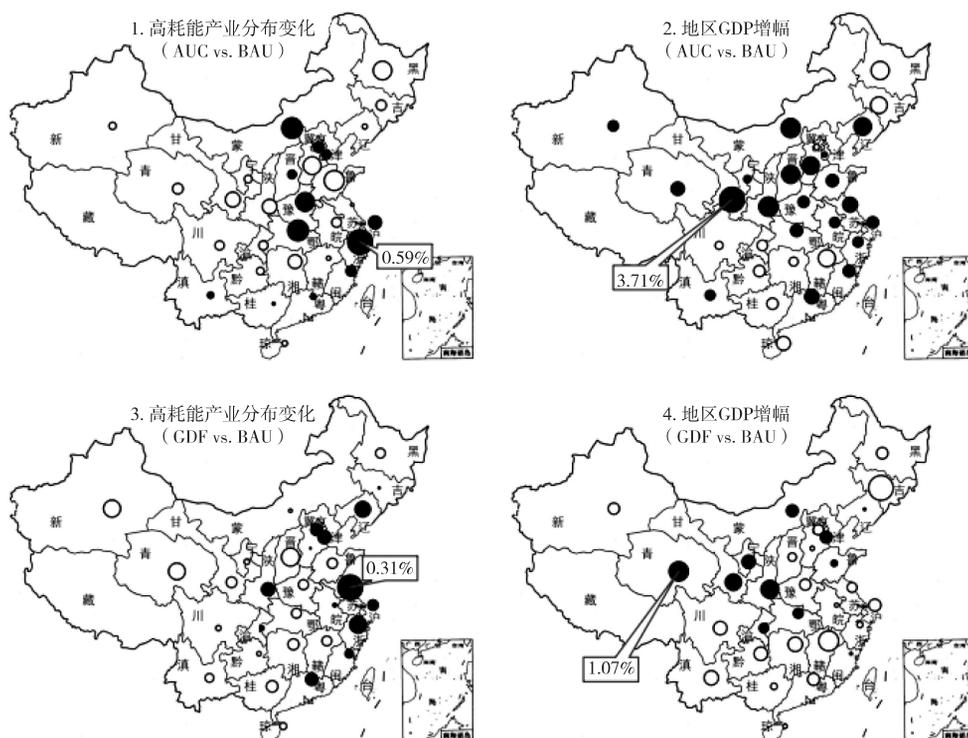


图3 碳市场对高耗能产业布局以及区域经济产出的影响

注: 气泡大小的意义参见图2注释。

意味着本地区部分支柱产业优势的弱化,但另一方面则意味着更多生产要素可以从重化工业中解放出来,促进其他产业的发展,从而实现产业结构的轻型化。

## 2. 排放权分配机制对产业布局的影响

进一步对比排放权交易机制下的两种不同的排放权分配机制(如图4),可以发现在按照基期排放量免费分配排放权(GDF)的情景下,尽管高耗能产业在新疆、青海的分布有所下降,但除此之外,其地区布局更多地倾向于在宁夏、甘肃、陕西等西部中部工业大省,以及黑、吉、辽等东北老工业基地集聚。如前文所述,按基期排放免费发放配额相当于对高能耗、高排放的生产者提供了更多的隐形补贴,而上述省份工业占比较高而能源效率较低,因此其基期能源消费规模较大。不难理解在GDF情景下,这些省区相应行业的生产者获得了较多的潜在补贴,进而吸引重化工业的移入,导致产业集聚。然而这种补贴并没有带来正的经济效益。从图4右图可见,由于对高耗能生产者的补贴扭曲了资源配置,因此在GDF情景下大部分地区的经济产出均低于AUC情景。

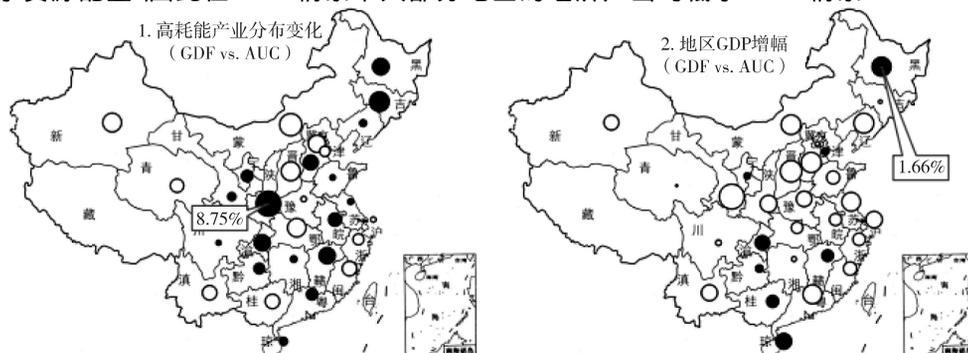


图4 排放权分配机制对产业地区布局的影响对比

注: 气泡大小的意义参见图2注释。

## 六、总结与政策讨论

本文从供给侧和需求侧两方面分析减排政策与产业转移之间的交互影响。在强度减排政策下,生产者在强度约束内使用能源不涉及额外的成本,因此相当于为生产者提供了产出补贴,部分弥补了生产成本的变化,阻碍了减排政策在需求侧的作用,并使碳排放和高耗能产业进一步集聚,形成污染天堂效应。而碳交易机制下,排放与产业转移的趋势取决于排放权的初始分配。

本文发现不同的排放权分配方式会对不同生产者产生差异化的激励作用。现有碳交易试点省市主要依据生产者的“历史排放量”免费分配排放权,这样的分配方式向高耗能、高排放行业,以及能源效率较低、排放强度较高的生产者提供了更多的隐含补贴,从而促进了上述产业和生产者的扩张,削弱了碳交易机制对优化产业布局的部分效果。从地区经济增长的影响来看,按历史强度分配排放权的机制弱化了减排政策对中西部能源大省经济产出的影响。如果按照基期产值、基期消费额等标准进行排放权的初始分配,将使排放权收益大部分流转到服务业等附加值较高的行业,或者终端消费品生产部门。这样的收入流转加快了服务业和轻工业等终端消费品部门的发展,也在很大程度上降低了中西部地区高耗能产业的集聚,但是由于其对经济结构造成了较大的扭曲,因此会造成较大的经济损失,实际上并不利于我国经济的健康、平稳增长。

最后,以拍卖的方式分配排放权的政策情景下,由于排放权的拍卖收益成为消费部门的收入,进而通过提高消费需求、刺激产出——因此各地区的消费结构决定了隐含补贴的流向。由于这种分配机制不偏向于高能耗、低效率的行业和生产者,因此有利于鼓励产业升级和技术进步。对于中西部重化工业较为集中的地区而言,由于重化工业部门的产品在直接消费结构中的占比较低,因此本地生产者在这种政策机制下受到的隐性补贴较低,从而能够进一步降低高耗能产业和制造业等重化工业向中西部地区的集聚。这些产业往往是中西部工业化转型省区产业结构的短板,这样的碳政策设计能够有效地推动这些地区的产业结构升级,从而使得这些地区能够实现较高的经济产出,促进地区间协调、平衡、可持续发展。

### 参考文献

- 陈诗一 2012 《中国各地区低碳经济转型进程评估》,《经济研究》第8期。
- 成艾华、魏后凯 2013 《促进区域产业有序转移与协调发展的碳减排目标设计》,《中国人口·资源与环境》第1期。
- 黄国宾、周业安 2014 《财政分权与节能减排——基于转移支付的视角》,《中国人民大学学报》第6期。
- 李方一、刘卫东 2014 《“十二五”能源强度指标对我国区域经济发展的影响》,《中国软科学》第2期。
- 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。
- 林伯强、黄光晓 2011 《梯度发展模式下中国区域碳排放的演化趋势:基于空间分析的视角》,《金融研究》第12期。
- 刘佳骏、李雪慧、史丹 2013 《中国碳排放重心转移与驱动因素分析》,《财贸经济》第12期。
- 牛玉静、陈文颖、吴宗鑫 2012 《全球多区域CGE模型的构建及碳泄漏问题模拟分析》,《数量经济技术经济研究》第11期。
- 石敏俊、张卓颖 2012 《中国省区间投入产出模型与区际经济联系》,科学出版社。
- 汤维祺、钱浩祺、吴力波 2016 《内生增长下排放权动态分配机制及其增长效应》,《中国社会科学》第1期。
- 王群伟、周鹏、周德群 2010 《我国二氧化碳排放绩效的动态变化、区域差异及影响因素》,《中国工业经济》第1期。
- 肖挺、刘华 2014 《产业结构调整与节能减排问题的实证研究》,《经济学家》第9期。
- 肖雁飞、万子捷、刘红光 2014 《我国区域产业转移中“碳排放转移”及“碳泄漏”实证研究——基于2002年、2007年区域间投入产出模型的分析》,《财经研究》第2期。
- 谢来辉、陈迎 2007 《碳泄漏问题评析》,《气候变化研究进展》第4期。
- 苑清敏、李想 2015 《基于产业梯度的京津冀合作减排分析》,《科技管理研究》第16期。
- 张雷、黄园浙、李艳梅 2010 《中国碳排放区域格局变化与减排途径分析》,《资源科学》第2期。
- 张为付、李逢春、胡雅 2014 《中国CO<sub>2</sub>排放的省际转移与减排责任度量研究》,《中国工业经济》第3期。
- 张翼、卢现祥 2015 《技术交易与产业集聚互动视角的区域二氧化碳减排研究——来自中国省域层面的经验证据》,《财贸研

究》第5期。

郑鑫、陈耀 2012 《运输费用、需求分布与产业转移——基于区位论的模型分析》，《中国工业经济》第2期。

邹秀萍、宋敦江 2013 《中国碳排放的区域差异及驱动因素分解分析》，《生态经济》第1期。

Armington, P. S. , 1969. “A Theory of Demand for Products Distinguished by Place of Production” , *Staff Papers-international Monetary Fund* , Vol. 16(1) , 159—178.

Carraro, C. , and De Cian, E. , 2012, “Factor-augmenting Technical Change: An Empirical Assessment” , *Environmental Modeling and Assessment* , Vol. 18(1) , 13—26.

Copeland, B. R. , and Taylor, M. S. , 2004. “Trade, Growth, and the Environment” , *Journal of Economic Literature* , Vol. 42(1) , 7—71.

Diao, X. , Rattsø, J. , and Stokke, H. E. , 2005, “International Spillovers, Productivity Growth and Openness in Thailand: an Intertemporal General Equilibrium Analysis” *Journal of Development Economics* , Vol. 76 , 429—450.

Dixon, P. B. , Pearson, K. R. , Picton, M. R. , and Rimmer, M. T. 2005, “Rational Expectations for Large CGE Models: A Practical Algorithm and a Policy Application” , *Economic Modelling* Vol. (22) , 1001—1019.

Gerlagh, R. , and Kuik, O. , 2014, “Spill or Leak? Carbon Leakage with International Technology Spillovers: A CGE Analysis” , *Energy Economics* , Vol. 45 , 381—388.

Hübler, M. 2011, “Technology Diffusion under Contraction and Convergence: A CGE Analysis of China” , *Energy Economics* , Vol. 33(1) , 131—142.

Parrado, R. , and De Cian, E. , 2014, “Technology Spillovers Embodied in International Trade: Intertemporal, Regional and Sectoral Effects in a Global CGE Framework” , *Energy Economics* , Vol. 41 , 76—89.

Robinson, S. , and El-Said, M. , 2000, “Gams Code for Estimating A Social Accounting Matrix (SAM) Using Cross Entropy (CE) Methods” , TMD Discussion Paper No. 64.

van der Mensbrugge, D. 2004 , LINKAGE Technical Reference Document , Version 6.0 , mimeo , The World Bank , Washington , DC. Accessible at <http://siteresources.worldbank.org/INTPROSPECTS/Resources/334934—1100792545130/LinkageTechNote.pdf>.

## From Pollution-heaven to Green-growth ——Impact of Carbon-market Relocation of Energy-intensive-sectors

Tang Weiqi , Wu Libo and Qian Haoqi  
( Fudan University)

**Abstract:** China is going through rapid economic restructuring and relocation: energy-and emission-intensive sectors are moving from high-income eastern coastal areas to lower-income mid and western areas of China. Whether emission trading would intensify this trend and cause pollution-heaven in lower-income regions? Is there a proper design of trading mechanism that can mitigate pollution-heaven effect and lead to a more harmonized growth pattern across regions? We established a theoretical general-equilibrium model to analyze the incentives of alternative design of emission reduction policies to emitters; and on that basis , we established an inter-regional CGE model of China to test the results of the theoretical model in the context of Chinese economic structure. We concluded that , compared with regional intensity target , emission trading can mitigate pollution-heaven effect in mid-and western-regions , while the effect can be further amplified when the emission permits are initially allocated among emitters by auction.

**Key Words:** Carbon Market; Permits Allocation; Industrial Transfer; Structural Change; Multi-regional CGE

**JEL Classification:** C68 , I38 , Q48

( 责任编辑: 王利娜) ( 校对: 梅 子)