

效率视角下中国产业部门隐含碳配额及 边际减排成本研究

胡剑波¹, 李潇潇¹, 王 蕾²

(1. 贵州财经大学经济学院, 贵州 贵阳 550025;

2. 中国社会科学院工业经济研究所, 北京 100006)

摘 要: 二氧化碳排放配额及边际减排成本的合理评估是发挥碳交易市场减排效用的先导性工作。基于 2002—2020 年中国产业部门投入产出数据, 以非竞争型投入产出模型为基础, 采用 ZSG-DEA 模型、方向距离函数与随机前沿分析对产业部门隐含碳配额及边际减排成本进行较为合理的测度与分析。研究发现: 产业部门间隐含碳排放效率、配额及边际减排成本均呈现不同程度的差异, 这种差异表征了不同产业部门所具有的减排空间、减排潜力; 建筑业, 其他服务业隐含碳配额占比超过 50%, 配额较小的多为资源密集型产业; 边际减排成本较大的多为采矿业, 制造业, 较小的多为服务业, 但部分产业间减排成本差异过大, 资源配置存在严重扭曲的现象。从产业关联的视角以隐含碳排放为着眼点研究配额及减排成本问题, 研究结论对现实中碳配额分配、碳排放权定价与行业有序纳入全国碳市场都具有一定的参考意义。

关键词: 产业部门; 隐含碳; 碳配额; 边际减排成本

中图分类号: F062.9

文献标识码: A

文章编号: 1005-0566(2023)12-0134-09

Embodied carbon quota and marginal abatement cost of Chinese industrial sector from the perspective of efficiency

HU Jianbo¹, LI Xiaoxiao¹, WANG Lei²

(1. School of Economics, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, China;

2. Institute of Industrial Economy, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100006, China)

Abstract: Reasonable assessment of carbon dioxide emission allowances and marginal abatement costs is a precursor work to the effectiveness of carbon markets in reducing carbon emissions. Base in China's industrial sector input-output data from 2002 to 2020, on the basis of the non-competitive input-output model, using ZSG-DEA model, quadratic directional distance function and stochastic frontier analysis of industrial sector embodied carbon quotas and marginal abatement cost more for the reasonable measure and analysis. Study found that embodied carbon efficiency between sectors, quotas and marginal cost are different degree, these differences represent the different sectors of emission reduction, reduction potential space; Construction, construction and other service industries accounts for more than 50%, carbon quota smaller for more resource intensive industries; Marginal abatement cost is bigger for the mining, manufacturing, much smaller for the services sector, excessive differences in abating costs of carbon emission between

收稿日期: 2023-08-24 修回日期: 2023-11-10

基金项目: 国家社会科学基金项目“中国隐含碳全要素生产率动态演进与提升策略研究”(23XJY022)。

作者简介: 胡剑波(1982—), 男, 四川泸州人, 博士(后), 贵州财经大学经济学院教授、博士生导师, 研究方向为低碳经济与绿色发展。

some industries, so that there are significant distortions in the allocation of resources. This article studies the issue of quotas and marginal abatement cost from the perspective of industry correlation, focusing on embodied carbon emissions, research conclusion to the real carbon quota allocation, carbon emission rights pricing and orderly industry into the unified national carbon markets have a certain reference significance.

Key words: industrial sector; embodied carbon; carbon quotas; marginal abatement cost

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出二氧化碳(CO₂)排放的激增是气候变化的主要原因,且对自然环境、社会经济已造成严重影响^[1]。当前,中国经济社会的可持续发展越加受到CO₂问题的制约。据2023年《BP世界能源统计年鉴》显示,中国CO₂排放量为118亿t左右,在全球碳排放总量中占有较大份额^[2]。为有效控制碳排放,积极探索绿色低碳增长新路径,中国逐步形成以碳强度、总量上限等约束性指标为主的行政命令式的减排模式,并辅以碳排放权、用能权交易为代表的市场化减排机制。其中,碳交易作为一种市场激励型的减排措施,近年来在推动节能降碳、经济绿色转型中发挥了重要作用^[3]。碳交易的核心在于排放配额的合理分配以及排放权的科学定价,因此研究碳配额与边际减排成本对于厘清减排空间有几何?减排成本有多大?进而完善全国碳交易市场、如期实现碳达峰碳中和目标有着重要的现实意义。

产业部门作为生产性活动的主体,也是能源消耗和CO₂等温室气体排放的集中源头,积极推进产业部门碳减排成为中国破解资源环境约束,实现经济高质量发展的重要抓手。目前,全国碳交易市场已纳入发电行业,“十四五”时期将进一步扩大交易范围。在此背景下,为高效发挥碳交易市场将外部性内化的倒逼机理与市场机制优化要素资源配置的作用^[4-5],务必对各产业部门所需碳配额及边际减排成本进行更为合理的测度与分析。目前,针对碳配额与边际减排成本的研究往往聚焦于投入要素直接消耗所导致的碳排放^[6],且研究维度多集中于行业^[7]、城市^[8]及省域^[9]。然而,随着产业分工的细化,宏观经济生产侧可以视作具有高度关联的生产部门组成集合,产品的生产既包含要素资源使用及生产加工中产生的直

接碳排放,又有中间投入产品消耗引致的间接碳排放。因而,从隐含碳角度出发,既包括已有研究中对直接碳排放问题的探讨,也涵盖了鲜有涉及的间接碳排放的研究,从而更为真实地反映产业部门从中间投入到最终使用整个生命周期过程中的要素利用效率。基于此,本文在经济开放条件下,立足于产业关联视角,通过研究隐含碳配额及边际减排成本,以期为全国碳交易市场的发展与完善以及制定科学的减排政策提供针对性的理论参考。

一、文献回顾

在“双碳”及“双控”等多期目标叠加之下,CO₂的排放权作为一种稀缺资源促使碳交易在推动中国经济增长与碳排放脱钩的进程中承担着愈发重要的角色。碳交易市场运行的基础与前提在于如何分配排放份额。2021年颁布的《全国碳排放权交易管理办法》提出“排放配额分配初期以免费分配为主,适时引入有偿分配,并逐步提高有偿分配的比例”,由于分配原则与方法的多样化,至今尚未形成统一分配方案^[10]。目前,主流的研究方法为基于效率视角的DEA模型^[11]。考虑到在资源总量不变的前提下使不同个体生产效率最大化,将零和博弈的思想引入传统的DEA模型之中建立了针对稀缺资源分配的ZSG-DEA模型。该模型突破了传统DEA模型中决策单元相互独立的假设,反映了在总量控制之下,稀缺资源优化调整的过程,契合“双碳”“双控”目标的现实需求,因而广泛应用于碳配额的研究^[12-13]。然而,已有文献仅从生产要素直接消耗产生的CO₂入手,忽略产业部门之间的关联性,值得注意的是各产业部门碳配额的大小并非由要素消耗及生产加工一次决定,而需将CO₂排放嵌入资源消耗与产品生产的全周期中^[14],所以从隐含碳出发研究配额问题更能体现中间投入过程对碳配额的贡献。

碳配额衡量了经济个体具有的减排空间,而边际减排成本则直观反映了实现减排目标所需付出成本的大小,表征了在既定的生产技术水平下,每减少一单位污染排放所带来的产出减少量或投入增加量^[15]。科学评估 CO₂ 边际减排成本是实现减排机制由政府命令型向市场激励型转变的关键,更可为碳交易市场初始价格的设定提供基准参考^[7]。当前,测度 CO₂ 边际减排成本的方法主要有两种:其一为构造以环境—能源—经济为基本框架的一般均衡模型,通过施加或改变约束条件,进而评价不同边际减排成本曲线下减排潜力或减排施策效果^[16]。其二为以生产理论为基础,借助各类距离函数,通过建立环境生产技术集构造 CO₂ 边际减排成本的测度模型^[17]。第一种方法依赖过多假设,且计算过程复杂,在实际应用中存在诸多障碍。第二种方法无需过度假设,从生产理论出发直接进行技术建模,所得边际减排成本的概念与表达式直观明了,具有较强的可操作性。与当前针对碳配额的研究类似,已有文献较少涉及将产业部门及隐含碳排放纳入边际减排成本的分析中,这种忽视间接碳排放所得的减排成本无疑会偏离实际情况。

综上所述,已有研究存在以下不足:第一,当前文献在分析碳配额及边际减排成本时往往忽视中间投入过程中的间接碳排放。第二,在研究维度上,较少涉及针对产业部门的相关研究,缺乏产业部门减排空间、减排潜力的量化评估。第三,已有文献未能考虑开放经济条件下因国际贸易导致的碳泄漏问题,忽视因贸易活动对碳排放产生的影响将使得测度结果的有效性大打折扣。因此,本文的边际贡献可以总结为:第一,以产业部门隐含碳为主线,提出隐含碳配额及隐含碳边际减排成本的概念。与已有研究相比,该概念能够较为真实地反映各产业部门从中间消耗到最终消费整个过程的减排空间、减排潜力。第二,研究对象立足于中国 28 个产业部门,补充了现有研究重视宏观整体与微观个体而相对忽视中观层面的不足。第三,在开放经济背景下剔除进口因素对产业部

门隐含碳排放的影响,使得测度结果更为真实稳健。

二、模型构建、数据来源及处理

(一) 中国产业部门隐含碳排放测度模型构建

投入产出法的基本思想为:总产出 = 中间投入 + 最终使用,用公式则表示成如下形式:

$$X = AX + Y \text{ 或 } X = (I - A)^{-1}Y \quad (1)$$

式(1)中, A 为直接消耗系数矩阵; $(I - A)^{-1}$ 为完全消耗系数矩阵; X 、 Y 分别为各产业部门的总产出与最终使用。

首先计算各产业部门的直接碳排放,根据 IPCC 提供的碳排放系数法,计算公式如下:

$$C_i = \sum_{k=1}^n C_{i,k} = \sum_{k=1}^n (\theta_{i,k} \times \varphi_k) \quad (2)$$

式(2)中, C_i 为第 i 个产业部门直接碳排放; $\sum_{k=1}^n C_{i,k}$ 为第 i 个产业部门使用第 k 种化石能源导致的直接碳排放总量; $\theta_{i,k}$ 表示第 i 个产业部门对化石能源的消费量; φ_k 表示化石能源的碳排放系数。通过完全消耗系数矩阵求解隐含碳排放系数矩阵 (F_t) 为:

$$F_t = \frac{C_{i,t}}{X_{i,t}} (I - A_t)^{-1} \quad (3)$$

考虑到经济开放条件下因国际贸易产生的碳泄漏问题,借鉴胡剑波等^[18]剔除中间投入的做法,构造进口系数矩阵 $M_{i,t}$, 其中 $M_{i,t} = IM_{i,t} / (X_{i,t} + IM_{i,t} - EX_{i,t})$, $IM_{i,t}$ 、 $EX_{i,t}$ 分别为第 i 个产业部门在 t 时期的进口与出口,则直接消耗系数矩阵为 $A_t^d = (I - M_t)A_t$, 此时消除进口因素的隐含碳排放系数矩阵 F_t^d 可以表示为:

$$F_t^d = \frac{C_{i,t}}{X_{i,t}} (I - A_t^d)^{-1} \quad (4)$$

由此得出产业部最终使用所引致的隐含碳排放 $C_{i,t}^e$ 的计算公式为:

$$C_{i,t}^e = Y_{i,t} \times F_{i,t}^d \quad (5)$$

(二) 中国产业部门隐含碳配额测度模型构建

根据 2002—2020 年发布的《中国投入产出表》《中国投入产出延长表》,并结合《国民经济行业分类标准 (GB/T 4754—2021)》,将产业部门进

行合并分类,最终整理为 28 个产业部门。假设每个产业部门作为一个决策单元,将资本(K)、劳动(L)与能源(E)投入生产,得到期望产出产业增加值(Y)、非期望产出隐含碳排放(C),且 $K, L, E, Y, C \in R_+$ 。则产业部门的环境生产技术集可以定义为:

$$T = \{(K, L, E, Y, C) : (K, L, E) \text{ 可以生产 } (Y, C)\} \quad (6)$$

在“双碳”“双控”目标的严格约束之下,碳交易赋予 CO_2 成为一种稀缺资源的属性,正是由于这种属性使得 CO_2 可以作为投入要素在决策单元间再分配,将非期望产出视为投入变量也是 ZSG-DEA 模型的主流做法^[19]。根据环境生产技术集的定义构造用于分析产业部门隐含碳配额的 ZSG-DEA 模型如式(7)所示,其中 φ_i 为第 i 个产业部门的技术效率, $\lambda_n \geq 0$ 表示规模报酬不变的生产技术。ZSG-DEA 模型进行碳配额分配时的核心思想为当隐含碳总量不变时,一个产业部门隐含碳排放增加时,其他产业部门必须减少相等数量的隐含碳排放。

$$\begin{aligned} \min \varphi_i \\ \text{s. t. } \begin{cases} \sum_{n=1}^N \lambda_n K_n \leq K_i \\ \sum_{n=1}^N \lambda_n L_n \leq L_i \\ \sum_{n=1}^N \lambda_n E_n \leq E_i \\ \sum_{n=1}^N \lambda_n Y_n \geq Y_i \\ \sum_{i=1}^N \lambda_i' \times C_i \left[1 + \frac{(1 - \varphi_c^i) C_i}{\sum_{n=1, n \neq i}^N C_n} \right] = \varphi_c^i C_i \\ \lambda_n \geq 0; n = 1, \dots, N \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

本文采用比例法对隐含碳排放进行重新分配,经一次调整之后,第 m 个产业部门增加了 $C_m(1 - \varphi_c^i) C_i / \sum_{n=1, n \neq i}^N C_n$ 单位的隐含碳排放。当所有产业部门均调整完毕后,第 m 个产业部门调入的隐含

碳排放为 $\sum_{n \neq i}^N [C_m(1 - \varphi_c^i) C_i / \sum_{n=1, n \neq i}^N C_n]$, 从第 m 个产业部门调出的隐含碳排放为 $(1 - \varphi_c^m) C_m$, 则第 m 个产业部的隐含碳配额如式(8)所示:

$$\begin{aligned} C'_m &= C_m - (1 - \varphi_c^m) C_m + \sum_{n \neq i} \frac{C_m(1 - \varphi_c^i) C}{\sum_{n=1, n \neq i}^N C_n} \\ &= C_m \varphi_c^m + \sum_{n \neq i} \frac{C_m(1 - \varphi_c^i) C}{\sum_{n=1, n \neq i}^N C_n} \end{aligned} \quad (8)$$

(三) 中国产业部门隐含碳边际减排成本分析模型构建

本文根据 Färe 等^[20]提出的随机前沿分析结合方向距离函数求解污染物影子价格的方法分析中国产业部门隐含碳边际减排成本。此处以 x 表征各种投入要素, y, b 分别表示期望与非期望产出,则方向距离函数可以定义为:

$$\vec{D}(x, y, b; g_y, -g_b) = \max \{ \theta : (y + \theta g_y, b - \theta g_b) \in T(x) \} \quad (9)$$

利用方向距离函数的转换性将式(9)恒等变形为式(10):

$$\vec{D}(x, y + \alpha g_y, b - \alpha g_b; g_y, -g_b) = \vec{D}(x, y, b; g_y, -g_b) - \alpha \quad (10)$$

这里采用二次型函数将抽象的方向距离函数转化为具体的参数方程式(11)。

$$\begin{aligned} \vec{D}(x, y, b; g) &= \alpha_0 + \sum_{n=1}^3 \alpha_n x_n + \beta_1 y_1 + \gamma_1 b_1 + \\ &\frac{1}{2} \sum_{n=1}^3 \sum_{n=1}^3 \alpha_{nn}' x_n x_n' + \frac{1}{2} \beta_{11} y_1^2 + \frac{1}{2} \gamma_{11} b_1^2 + \sum_{n=1}^3 \delta_{n1} x_n y_1 + \\ &\sum_{n=1}^3 \eta_{n1} x_n b_1 + \mu_{11} y_1 b_1 \end{aligned} \quad (11)$$

根据 Zhang 等^[21]求解思路,将随机误差项 v 与无效率项 μ 引入参数式中,令参数 $\alpha = b_1$, 方向向量设定为 $g = (1, -1)$, 可将式(11)化简为如下形式:

$$\begin{aligned} -b_1 &= \alpha_0 + \sum_{n=1}^3 \alpha_n x_n + \beta_1 (y_1 + b_1) + \\ &\frac{1}{2} \sum_{n=1}^3 \sum_{n=1}^3 \alpha_{nn}' x_n x_n' + \frac{1}{2} \beta_{11} (y_1 + b_1)^2 + \sum_{n=1}^3 \delta_{n1} x_n (y_1 + b_1) y_1 + v - u \\ \gamma_1 &= 1 + \beta_1; \beta_{11} = \gamma_{11} = \mu_{11}; \delta_{n1} = \eta_{n1} \end{aligned} \quad (12)$$

根据 Zhang 等^[21]的研究,本文将隐含碳边际减排成本的测度公式表示为:

$$q_i = -p_i \frac{\partial \vec{D}_i(x, y, b; g) / \partial b_i}{\partial \vec{D}_i(x, y, b; g) / \partial y_i} \quad (13)$$

式(13)中, q_i 为隐含碳边际减排成本; p_i 为产业增加值的价格。式(13)表征了期望产出与非期望产出在生产前沿面上的边际转化率,将 p_i 取值 1,通过式(11)分别对 y_i, b_i 求偏导并带入式(13)得到隐含碳边际减排成本的具体表达式:

$$q_i = - \frac{\gamma_1 + \gamma_{11}b_1 + \sum_{n=1}^3 \eta_{n1}x_n + \mu_{11}y_1}{\beta_1 + \beta_{11}y_1 + \sum_{n=1}^3 \delta_{n1}x_n + \mu_{11}b_1} \quad (14)$$

(四)数据来源及处理

基于数据的可获得性及可靠性,本文所采用数据主要源自《中国投入产出表》《中国投入产出延长表》《中国统计年鉴》等。所需变量及处理方式如下:①资本(亿元),借鉴陈诗一^[22]的研究方法,以 2002 年产业部门固定资产净值作为基期资本存量,采用永续盘存法得到各产业部门资本存量。②劳动(万人),各产业部门年末平均就业人数。③能源(万 t),选取煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料、天然气 8 种化石能源,并剔除加工转换过程中能源的投入量与损失量,并统一转换为万 t 标准煤。④产业增加值(亿元),各产业部门增加值,并以 2002 为基期的农产品出厂价格指数、工业行业分工业品出厂价格指数、交通价格指数等对其进行平减处理。⑤隐含碳排放(万 t),以产业部门能源消耗数据为基础通过非竞争型投入产出模型计算得出。

三、实证结果与分析

(一)中国产业部门隐含碳配额分析

1. 中国细分产业部门隐含碳排放效率变化趋势分析

中国细分产业部门隐含碳排放效率变化趋势如图 1 所示,由初始效率可知,各产业部门隐含碳排放效率存在较大差异,28 个产业部门中仅有 10 个产业部门效率水平达到或接近 1,表明产业部门隐含碳排放效率的整体水平有待提升。然而,产

业间效率水平的差异同样体现了潜在的减排空间,高效率的产业部门产出效率更优,在生产经营中可以消纳更多的隐含碳配额,减排空间巨大;而低效率产业部门为实现减排不得不制定更为严格的排放目标,减排空间较小。ZSG-DEA 模型以隐含碳排放效率为依据,进行产业间隐含碳配额的调整与分配,从而实现总量既定下每一个产业部门隐含碳排放效率的优化提升。由图 1 可知,经历 4 次迭代、调整之后,所有产业部门的隐含碳排放效率都趋近于 1,此时在总量不变的前提下,各产业部门的隐含碳配额得到优化调整。值得注意的是初始效率为 1 的产业部门,如农业、煤炭开采和洗选业、石油和天然气开采、金属矿采选业等经历迭代、调整之后其效率值仍处于生产前沿面上,在整个过程中无需降低隐含碳排放,相反还要增加隐含碳排放配额,尽管隐含碳排放有所增加,但依靠技术水平、管理效率等优势,依然在调整之后保持了相对有效的效率值。

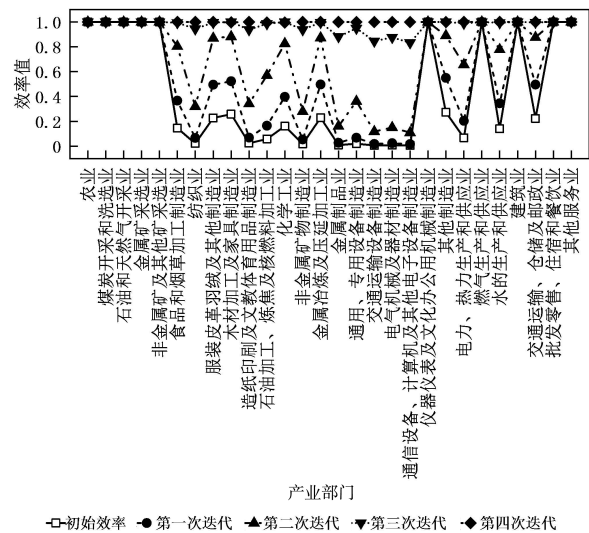


图 1 中国产业部门隐含碳排放效率变化趋势

2. 中国细分产业部门隐含碳排放最终配额分析

中国细分产业部门隐含碳排放最终配额如表 1 所示,隐含碳配额最高的 3 个产业分别是建筑业,其他服务业,批发零售、住宿和餐饮业,且这 3 个产业部门在调整的过程中均保持较高的效率值,其隐含碳配额分别为 596 732.62 万 t、261 532.13 万 t、

41 206. 24 万 t。建筑业作为非金属矿物制造业,金属制品业等产业部门的下游产业,其中间投入品的消耗引致过量隐含碳排放,应是下一阶段全国碳交易市场纳入的重点行业。2023 年 6 月 27 日,建材行业纳入全国碳交易市场专项研究会议传达了生态环境部应对气候变化司关于建材行业有序进入全国碳交易市场的相关要求,表明了政府对全国碳交易市场的进一步布局。虽然现有文献缺乏产业部门隐含碳配额的研究,但从国家政策导向来看也间接说明应用 ZSG-DEA 模型对产业部门隐含碳配额的评估具有一定的参考意义。长期以

表 1 中国产业部门隐含碳配额分配结果

编号	产业部门	初始配额	最终配额	调整量
1	农业	26 294. 72	31 799. 80	5 505. 08
2	煤炭开采和洗选业	226. 95	274. 46	47. 51
3	石油和天然气开采业	243. 10	294. 00	50. 90
4	金属矿采选业	455. 28	550. 59	95. 32
5	非金属矿及其他矿采选业	650. 14	786. 26	136. 11
6	食品和烟草加工制造业	18 590. 56	8 139. 09	-10 451. 46
7	纺织业	3 619. 72	281. 93	-3 337. 79
8	服装皮革羽绒及其他制造业	10 449. 72	6 197. 30	-4 252. 42
9	木材加工及家具制造业	5 382. 13	3 391. 52	-1 990. 61
10	造纸印刷及文教体育用品制造业	5 307. 40	438. 62	-4 868. 79
11	石油加工、炼焦及核燃料加工业	2 174. 22	430. 21	-1 744. 01
12	化学工业	22 353. 80	10 590. 44	-11 763. 35
13	非金属矿物制造业	4 261. 30	274. 79	-3 986. 51
14	金属冶炼及压延加工业	11 526. 27	6 883. 63	-4 642. 64
15	金属制品业	8 901. 22	284. 12	-8 617. 10
16	通用、专用设备制造业	26 352. 01	2100. 77	-24 251. 24
17	交通运输设备制造业	20 045. 71	415. 40	-19 630. 31
18	电气机械及器材制造业	16 703. 92	467. 63	-16 236. 29
19	通信设备、计算机及其他电子设备制造业	16 799. 30	327. 92	-16 471. 39
20	仪器仪表及文化办公用机械制造业	4 452. 11	5 384. 20	932. 09
21	其他制造业	981. 33	652. 87	-328. 47
22	电力、热力生产和供应业	26 755. 42	6 437. 85	-20 317. 57
23	燃气生产和供应业	6 788. 37	8 209. 58	1 421. 21
24	水的生产和供应业	1 982. 52	821. 93	-1 160. 59
25	建筑业	493 439. 41	596 732. 62	103 293. 21
26	交通运输、仓储及邮政业	24 084. 46	14 245. 94	-9 838. 52
27	批发零售、住宿和餐饮业	34 072. 74	41 206. 24	7 133. 50
28	其他服务业	216 257. 98	261 532. 13	45 274. 15

注:隐含碳配额的单位为万 t。

来,采矿业,制造业等是降碳减排的重点部门,以服务业为主的第三产业的减排作用并未获得有效释放。随着中国城镇化进程的加速推进,服务业在国民经济中的比重将会进一步提升,且生产侧与消费侧息息相关,居民消费市场的日益繁荣也会间接驱动隐含碳排放的快速上升。其他服务业,批发零售、住宿和餐饮业拥有充裕的减排空间,如何发挥其在整体减排目标中的作用也是全国碳交易市场有待挖掘的地方。隐含碳配额最低的 3 个产业部门为:煤炭开采和洗选业,非金属矿物制造业,纺织业,隐含碳配额分别 274. 46 万 t、274. 79 万 t、281. 93 万 t。首先,煤炭开采和洗选业作为制造业的上游产业,其产品大多作为中间投入供其他产业消耗,产业本身排放的温室气体多为甲烷,且“十三五”期间供给侧结构性改革对该产业去产能的作用明显,煤炭开采机械化、智能化水平的推广应用也在一定程度上提升了整个产业的生产效率。从图 1 可知,非金属矿物制造业,纺织业的隐含碳排放初始效率处于较低水平,且同属于要素投入密集型产业,其初始隐含碳配额较高,分别为 4 261. 30 万 t、3 619. 72 万 t,这类产业必须制定严格的减排目标才能协调推进整体的降碳进程。

(二) 中国产业部门隐含碳边际减排成本分析

1. 中国产业部门整体隐含碳边际减排成本分析

产业部门隐含碳配额衡量了各个产业部门的减排空间,在确定减排空间的基础上需要进一步探究减排成本,即出让排放配额的成本,也就是为隐含碳排放权定价。对式(12)进行参数估计,估计结果如表 2 所示,将所得参数估计值带入式(14)中即可求得产业部门隐含碳边际减排成本。整体来看,观测期内中国产业部门平均隐含碳边际减排成本为 4. 105 1 千元/t(见表 3)。这表明在当前的生产技术水平下,产业部门平均每降低 1 吨隐含碳排放就会损失 4. 105 1 千元的产业增加值。由于当前文献缺乏产业部门隐含碳边际减排成本的研究,本文只能通过类似研究进行比较。蒋伟

杰等^[7]评估中国工业行业各部门 CO₂ 边际减排成本为 5.480 千元/t,与本文结果较为接近。除分析对象选择不同之外,其研究年限为 1998—2011 年,而在 2010 年后国家对于能源消耗及 CO₂ 排放提出新的要求。2011 年,国务院颁布《“十二五”控制温室气体排放工作方案》强调“到 2015 年全国单位国内生产总值二氧化碳排放比 2010 年下降 17%”,“十二五”时期对资源环境的约束性指标更为严格,党的十八大以来确立了“创新、协调、绿色、开放、共享”的五大发展理念,以及“三去一补一降”为主线的供给侧结构性改革重塑产业格局,这均使得本研究中的产业部门隐含碳边际减排成本处于更低的水平。

表 2 随机前沿分析参数估计值

系数	变量	估计值
α_0	常数项	-1.76e-06 (0.220 9)
α_1	x_1	-0.001 5 *** (0.000 2)
α_2	x_2	-0.009 9 *** (0.000 0)
α_3	x_3	-0.006 1 *** (0.000 0)
β_1	$y_1 + b_1$	-0.066 8 *** (9.70e-06)
α_{11}	$1/2x_1^2$	0.000 0 *** (9.10e-09)
α_{22}	$1/2x_2^2$	8.60e-07 *** (3.13e-10)
α_{33}	$1/2x_3^2$	-2.69e-06 *** (6.70e-10)
β_{11}	$1/2(y_1 + b_1)^2$	-1.30e-06 *** (3.31e-11)
δ_{11}	$x_1(y_1 + b_1)$	-2.51e-06 *** (1.47e-09)
δ_{21}	$x_2(y_1 + b_1)$	-0.000 0 *** (5.08e-10)
δ_{31}	$x_3(y_1 + b_1)$	-5.08e-06 *** (7.20e-10)

注:括号内为标准误;***表示在 $p < 0.01$ 上有统计学意义。

2. 中国细分产业部门隐含碳边际减排成本分析

在得知中国产业部门整体隐含碳边际减排成本基础上进一步探究细分产业部门的边际减排成本。隐含碳边际减排成本直接反映了产业部门减排潜力,边际减排成本越高意味着产业部门实现减排目标所支付的机会成本越大,边际减排成本

越低则可以说明产业部门减排成本较小、具有更大的减排潜力。由表 3 可知,各产业部门隐含碳边际减排成本存在较大差异,揭示了不同产业部门减排潜力的迥异以及各个产业部门完成降碳减排的复杂程度,同时也表明了各产业部门纳入全国碳交易市场的顺序,此外边际减排成本还为政府或企业相机抉择减排措施提供一定的信号参考。隐含碳边际减排成本最高的 3 个产业部门分别为非金属矿及其他矿采选业、燃气生产和供应业、仪器仪表及文化办公用机械制造业,其减排成本均值依次是 9.243 6 千元/t、9.130 4 千元/t、9.127 8 千元/t,这些产业部门减排难度巨大。而隐含碳边际减排成本最低的 3 个产业部门为其他服务业,交通运输、仓储及邮政业,电力、热力生产和供应业,

表 3 中国产业部门隐含碳边际减排成本均值

编号	产业部门	隐含碳边际减排成本	排序
1	农业	1.944 7	21
2	煤炭开采和洗选业	4.449 2	12
3	石油和天然气开采业	4.500 4	11
4	金属矿采选业	7.785 6	4
5	非金属矿及其他矿采选业	9.243 6	1
6	食品和烟草加工制造业	2.561 0	18
7	纺织业	4.350 5	13
8	服装皮革羽绒及其他制造业	5.804 1	8
9	木材加工及家具制造业	6.896 4	7
10	造纸印刷及文教体育用品制造业	4.954 7	9
11	石油加工、炼焦及核燃料加工业	3.819 2	15
12	化学工业	0.812 0	24
13	非金属矿物制造业	1.909 6	22
14	金属冶炼及压延加工业	0.752 0	25
15	金属制品业	4.837 8	10
16	通用、专用设备制造业	2.216 1	20
17	交通运输设备制造业	2.926 8	17
18	电气机械及器材制造业	3.946 2	14
19	通信设备、计算机及其他电子设备制造业	3.280 1	16
20	仪器仪表及文化办公用机械制造业	9.127 8	3
21	其他制造业	7.651 8	5
22	电力、热力生产和供应业	0.583 1	26
23	燃气生产和供应业	9.130 4	2
24	水的生产和供应业	7.468 1	6
25	建筑业	1.303 6	23
26	交通运输、仓储及邮政业	0.113 0	27
27	批发零售、住宿和餐饮业	2.497 2	19
28	其他服务业	0.077 6	28
	整体	4.105 1	

注:隐含碳边际减排成本的单位为千元/t,排名次序依照降序排列。

减排成本分别为 0.077 6 千元/t、0.113 0 千元/t、0.583 1 千元/t,以上产业部门具备较大的减排潜力。然而,最高的非金属矿及其他矿采选业与最低的其他服务业隐含碳边际减排成本相差 9.166 0 千元/吨,这也间接表现出产业之间存在较为严重的资源配置扭曲。由于市场存在负外部性,使得企业排放污染物的成本远低于社会成本,削弱了价格机制在市场中作用,企业不合理的排污行为加剧了资源要素的进一步扭曲。未来,全国碳交易市场必然纳入更多行业,以隐含碳边际减排成本为参考,发挥价值规律在市场中的作用,可以使碳减排政策更为有效。

四、研究结论与政策建议

(一)主要结论

第一,中国产业部门隐含碳排放效率存在较大差异,且多数产业部门隐含碳排放效率较低,这表明产业部门整体效率水平有待提升。应用 ZSG-DEA 模型经过 4 次迭代、调整后,所有产业部门的隐含碳排放效率都趋近于 1,此时在隐含碳排放总量不变的前提下,各产业部门的隐含碳配额得到优化调整。隐含碳配额最高的 3 个产业分别是建筑业,其他服务业,批发零售、住宿和餐饮业;而隐含碳配额最低的 3 个产业为煤炭开采和洗选业、非金属矿物制造业、纺织业。隐含碳配额较大的产业部门,拥有巨大的减排空间,在未来全国碳交易市场中从事此类产业的企业可能成为潜在最为活跃的交易主体。

第二,中国产业部门平均隐含碳边际减排成本为 4.105 1 千元/t。细分产业部门隐含碳边际减排成本存在较大差异,最高的与最低的产业部门相差 9.166 0 千元/t,表现出较为严重的资源配置扭曲。隐含碳边际减排成本最高的 3 个产业部门分别为非金属矿及其他矿采选业,燃气生产和供应业,仪器仪表及文化办公用机械制造业,这些产业部门减排难度巨大;而隐含碳边际减排成本最低的 3 个产业部门为其他服务业,交通运输、仓储及邮政业,电力、热力生产和供应业,以上产业部门具备较大的减排潜力,可以考虑将这些产业

优先纳入全国碳交易市场。

(二)政策建议

第一,减排施策应重点关注产业之间的关联性,兼顾生产侧与消费侧的低碳化。政府制定减排政策时不但要充分考虑某一产业部门的现实需求与自身特点,更需要把握产业间相互关联的减排逻辑。如电力、热力生产和供应业作为隐含碳配额降低的部门面临较大的减排压力,然而该产业部门位于其他产业上游,若盲目关停势必影响其他产业再生产及长期减排目标。建筑业作为非金属矿物制造业,金属制品业等产业部门的消费侧,在碳交易市场上凭借减排成本优势获得不菲的收益,这也为处于生产侧的产业部门起到示范作用,促使其通过生产工艺革新与低碳技术应用将盈余碳配额进入市场交易,实现从中间投入侧到最终需求侧协同减排的完整回路。

第二,依据产业部门减排空间、减排潜力,优化全国碳交易市场行业纳入顺序。产业部门间隐含碳排放配额及边际减排成本为各个行业有序进入全国碳交易市场提供了基准参考。不同产业部门从产品生产到资源消耗都有其特殊性,这就体现了减排的差异性与复杂性,从隐含碳配额及边际减排成本出发可以较为客观的厘清这一问题。目前,全国碳交易市场中仅纳入电力行业,通过隐含碳配额及边际减排成本可以客观分析行业准入难度。像建筑业等隐含碳边际减排成本较低产业部门,可以利用其减排成本优势优先纳入全国碳交易市场。当然,除了依靠市场调节机制外仍需要结合国家的减排方针与调控策略综合考量。

第三,对重点产业部门需精准施策,提高节能减排政策的有效性。针对隐含碳配额小且边际减排成本较高的产业部门,如非金属矿及其他矿采选业,除了利用市场化的降碳方式更需注重培养减污降碳的内生动力,即通过提高能源利用效率、加大化石能源的消费替代及强化低碳科技项目攻关等。针对隐含碳配额大且边际减排成本较低的产业部门,如建筑业等,一方面利用市场化手段促

进要素在产业间、产业内的优化配置,进一步消除资源扭曲的负面影响;另一方面通过政策倾斜进一步发挥此类产业的减排效应,通过技术资金等要素的聚集推动产业结构迭代升级,同时其扩散效应也能带动上下游产业部门减排的协同联动,从而实现碳达峰碳中和的整体目标。

参考文献:

- [1] IPCC. Summary for policymakers in climate change 2021: the physical science basis. contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021:3-32.
- [2] BP. BP statistical review of world energy 2023 [M]. London: Whitehouse Associates, 2023:14.
- [3] 许文立, 孙磊. 市场激励型环境规制与能源消费结构转型: 来自中国碳排放权交易试点的经验证据[J]. 数量经济技术经济研究, 2023, 40(7): 133-155.
- [4] BAI Q, JIN M, XU X. Effects of carbon emission reduction on supply chain coordination with vendor-managed deteriorating product inventory [J]. International journal of production economics, 2019(208): 83-99.
- [5] 王一雷, 夏西强, 张言. 碳交易政策下供应链碳减排与低碳宣传的微分对策研究[J]. 中国管理科学, 2022, 30(4): 155-166.
- [6] 骆瑞玲, 范体军, 李淑霞, 等. 我国石化行业碳排放权分配研究[J]. 中国软科学, 2014(2): 171-178.
- [7] 蒋伟杰, 张少华. 中国工业二氧化碳影子价格的稳健估计与减排政策[J]. 管理世界, 2018, 34(7): 32-49, 183-184.
- [8] XU L, YANG J, CHENG J, et al. How has China's low-carbon city pilot policy influenced its CO₂ abatement costs? analysis from the perspective of the shadow price[J]. Energy economics, 2022(115): 106353.
- [9] 王文举, 孔晓旭. 基于 2030 年碳达峰目标的中国省域碳配额分配研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2022, 39(7): 113-132.
- [10] 齐绍洲, 徐珍珍, 谭秀杰, 等. 中国碳市场产能过剩行业的碳排放配额如何分配是有效的? [J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(9): 73-85.
- [11] YU A, LIN X, ZHANG Y, et al. Analysis of driving factors and allocation of carbon emission allowance in China [J]. Science of the total environment, 2019(673): 74-82.
- [12] WANG K, ZHANG X, WEI Y M, et al. Regional allocation of CO₂ emissions allowance over provinces in China by 2020 [J]. Energy policy, 2013(54): 214-229.
- [13] 齐绍洲, 徐珍珍, 杨芷萱. 欧盟碳边境调节机制下中国钢铁行业的碳配额分配策略[J]. 资源科学, 2022, 44(2): 274-286.
- [14] 孙慧, 丁辰鑫, 王芝炜, 等. 固定资产引致碳排放与部门完全碳强度: 基于投入产出法的测算与分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(5): 99-112.
- [15] 刘华军, 郭立祥, 乔列成. 减污降碳协同效应的量化评估研究: 基于边际减排成本视角[J]. 统计研究, 2023, 40(4): 19-33.
- [16] 丁冠群, 王铮, 孙翊. 基于多行业 DSGE 模型的中国碳减排政策效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(1): 19-30.
- [17] CHOI Y, ZHANG N, ZHOU P. Efficiency and abatement costs of energy-related CO₂ emissions in China: a slacks-based efficiency measure [J]. Applied energy, 2012(98): 198-208.
- [18] 胡剑波, 罗志鹏, 韩君. 中国产业部门隐含碳生产率的测度及其敛散性[J]. 统计与信息论坛, 2023, 38(3): 56-69.
- [19] YANG M, HOU Y, JI Q, et al. Assessment and optimization of provincial CO₂ emission reduction scheme in China: an improved ZSG-DEA approach [J]. Energy economics, 2020(91): 104931.
- [20] FÄRE R, GROSSKOPF S, PASURKA JR C A, et al. Substitutability among undesirable outputs [J]. Applied economics, 2012, 44(1): 39-47.
- [21] ZHANG N, HUANG X, LIU Y. The cost of low-carbon transition for China's coal-fired power plants: a quantile frontier approach [J]. Technological forecasting and social change, 2021(169): 120809.
- [22] 陈诗一. 中国工业分行业统计数据估算: 1980—2008 [J]. 经济学(季刊), 2011, 10(3): 735-776.

(本文责编: 默 黎)