

中国省际最优碳配额及减排成本研究

——基于效率视角下的碳总量控制情景

李江龙 韩蓉*

摘要:作为世界上最大的能源消费国和碳排放国,如何高效公平地将碳排放配额分解到各省份是实现国家节能降碳总体目标的关键问题之一。本文先基于预测数据评估各省份2030年碳排放效率,再运用零和收益数据包络分析模型对各省份能源消费和二氧化碳排放进行重新分配,使各省份达到有效前沿即效率视角下的最优配额,尤其考虑了产业异质性。然后基于效率视角下的最优配额测算了各省份二氧化碳边际减排成本,探讨配额机制的经济效益。结果表明,东南沿海和北京等效率高的发达地区减排成本高,在效率优先的“局部最优”情景下,可以获得更多配额;相反,宁夏、新疆等效率低的欠发达地区,可减排空间比较大,其较低的减排成本意味着获得的配额相对较少。相比于公平优先的配额分配方案,效率视角下的配额分配方案意味着经济落后的地区将承担较大的节能降碳任务。本文的研究结论为建立有效的体制机制,将全国减排总成本节约带来的收益实现公平分配,更高质量地兼顾地区经济发展与全国节能降碳的双重目标提供经验借鉴。

关键词:二氧化碳排放;产业异质性;最优配额;边际减排成本

一、引言

2019年中国能源消费量和二氧化碳排放量分别占世界总量的24%和28%,均居世界第一。作为负责任的大国,中国在控制能源消费总量、调整能源结构以及减少二氧化碳排放等方面承担了巨大责任和压力。为此,中国逐步制定了一系列节能降碳目标,并在国际上做出

*李江龙(通讯作者),西安交通大学经济与金融学院,邮政编码:710061,电子邮箱:lijianglong@mail.xjtu.edu.cn;韩蓉,西安交通大学经济与金融学院,邮政编码:710061,电子邮箱:hanrong913@126.com。

本文系研究阐释党的十九届六中全会精神国家社会科学基金重点项目“实现碳达峰碳中和目标的路径优化、政策引导与风险管控研究”(22AZD096)的阶段性成果。感谢匿名审稿人提出的宝贵意见。文责自负。

减排承诺。特别是,2020年第75届联合国大会上,中国提出了“3060”双碳目标^①。在量化目标上,到2030年,中国承诺能源消费总量控制在60亿吨标煤,碳排放强度^②相比2005年下降65%以上,非化石能源占比达到25%。这些目标为中国制定具体的节能降碳方案指明了方向,对于推动中国绿色经济发展和能源结构转型有重要意义(何建坤,2021)。

中国为了实现上述节能降碳目标,需要将总体节能降碳目标分解为区域目标,并对其完成情况进行评估,如“能耗双控”目标^③。在碳达峰碳中和背景下,2021年底中央经济工作会议提出要推动“能耗双控”向碳排放总量和碳排放强度“双控”转变。另一方面,中国已正式启动全国碳交易市场,通过市场交易以成本有效的方式减少温室气体排放(钱浩祺、吴力波,2022),而碳排放初始配额不仅影响公平性和碳减排成本的有效性,而且对于碳交易市场的建立和顺利运行,乃至国家实现总体碳减排目标非常关键(傅京燕、黄芬,2016),而不合理的配额分配可能使节能降碳目标完成情况大打折扣(Han et al.,2022)。以目前实际运行的“能耗双控”政策为例,现阶段全国整体基本达到了双控的目标要求,但每年仍有少数省份难以完成年度考核目标。造成这种结果的原因,除了各省份主观努力程度上的差异,也可能是由于中央下达给各省份的目标实现难度不同。这种减排目标实现难度的不同在很大程度上体现为效率的差异:效率高的地区和产业进一步减排较为困难,边际减排成本高;而效率低的地区和产业可减排空间则比较大,边际减排成本低。成本有效的配额分配方案需要考虑到这种不同效率所导致的减排难度差异。因此,本文聚焦于效率视角,充分考虑各地区减排潜力,对各省份能源消费和碳排放配额进行量化评估,有助于国家结合减排难度因地制宜地检验地区目标完成情况,推动以成本有效的方式实现全国总体节能降碳目标。

公平和效率一直被认为是进行能源消费和碳配额分配的重要准则(Tian et al.,2022)。图1(a)展示了欧盟国家2020年二氧化碳减排目标与人均GDP的关系。可以看出,基于公平准则,欧盟国家人均GDP与碳排放下降目标的联系非常密切,即人均GDP越高,基本上意味着碳减排目标越高。对比中国各省份的能源强度下降目标(图1(b)),我们发现,中国人均GDP越高的省份对应的能源强度下降目标总体上趋向于更严格,但并不存在与欧盟类似的高度正相关关系。这可能是因为在中国特色节能降碳政策制定中,除了公平性,效率准则也是要重点考虑的内容,特别是考虑到各省份产业结构的巨大差异。从全要素生产率的角度,一个地区能源强度高,并不一定意味着能源效率低,有可能是因为在区域经济分工中,其经济结构更加重化(例如电解铝产业、黄磷产业等),就算能源得到了高效率利用,其能源强度依然相对较高,

①中国力争2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和。

②碳排放强度定义为单位经济产出(GDP)的碳排放量;与此类似,能源强度是能源消费强度的简称,定义为单位经济产出(GDP)的能源消费量。

③能源消费量和能源强度的控制目标。

对应的碳排放量也大。因此,有必要在考虑各省份产业结构差异的基础上聚焦于效率视角来考察中国碳排放最优配额分配问题。

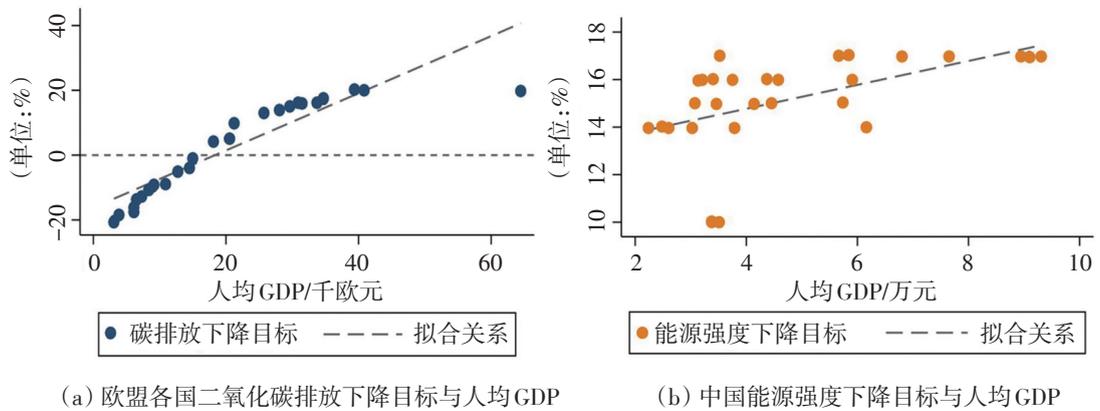


图1 能源消费、碳排放控制目标与人均GDP^①

此外,由于各省份不同产业的投入产出结构和节能降碳潜力存在巨大差异,造成了各省份节能降碳成本的不同。如果不考虑各省份产业结构的异质性,最优配额方案可能会被扭曲且不具有经济性(Sun & Huang, 2020)。为实现国家总体减排目标,中央政府将二氧化碳排放总量控制目标分解到各省份,各省份分别承担自己相应的减排责任。各省份可以通过购进先进的生产设备、部分关厂停产来达成减排目标。但是这些方法或需要高昂的成本费用,或带来部分产出的损失,不利于地区经济的可持续发展。因此,对碳减排成本进行量化分析可以为各省份制定减排策略提供决策参考。

二、文献综述

世界各国相继设立控制能源消费总量和碳排放目标,使能源消费量和碳排放的地区分配受到广泛关注。为了实现能源消费和碳排放的最优分配,学者专家们提出了各种分配方法。有不少学者从透明和公平性的角度分析各国或各省份控制能源消费的最优方案。该方法主要是提高各国或各省份间能源消费(碳排放)配额的透明度和公平性,强调减轻发达国家与发展中国家之间或国内各省份之间在控制能源消费及碳排放问题上的矛盾(Ding et al., 2010)。然而,上述研究没有对分配效率进行足够的重视。相关研究表明不同国家或省份的经济发展、资源禀赋和能源利用效率差异较大,基于分配效率的能源消费或碳配额可以降低交易成本(Guo et al., 2019)。

^①(a)2020年相比于2005年欧盟各国碳排放下降目标与人均GDP,资料来源于“Commission of the European Communities, Impact Assessment: Package of Implementation Measures for the EU's Objectives on Climate Change and Renewable Energy for 2020”;(b)2020年相比于2005年中国能源强度下降目标与人均GDP,资料来源于《“十二五”节能减排综合工作方案》《“十三五”节能减排综合工作方案》。

随着研究的深入,不少文献开始着手纳入效率分析视角研究二氧化碳排放和能源消费的最优配额。Yi等(2011)基于公平性和效率性原则,建立了能源强度分配模型,对中国二氧化碳减排目标进行区域配额分配。但是该模型只能处理能源强度分配问题,不能解决总量配额问题。Wei等(2012)基于松弛变量测度的模型(Slack-Based Measure Model,以下简称SBM),在同时考虑公平性和效率性的情况下,估计了1995—2007年中国各省份的二氧化碳减排潜力和边际减排成本,从而评估各省份的二氧化碳减排负担,但是该研究只评估各省份是否有能力(需求)增加(或减少)减排负担,并不确定具体分配额度。

在研究方法上,基于效率视角的最优分配研究,大部分基于投入-产出的数据包络分析(Data Envelopment Analysis,以下简称DEA)模型评估分配效率(Yu et al., 2019; Cai & Ye, 2019)。但是,最初的DEA模型假设投入产出在各决策单元间独立进行,不存在各个决策单元间的相互制约关系(Zofío & Prieto, 2001; Lozado & Gutierrez, 2008)。考虑到待分配的能源消费总额与碳排放量是固定的,Lins等(2003)基于传统的DEA模型首先提出了零和收益数据包络分析(Zero-Sum Gains Data Envelopment Analysis,简称ZSG-DEA)模型。此后,ZSG-DEA模型在碳排放和能源消费的配额分配方面得到了广泛应用。例如,Cucchiella等(2018)运用ZSG-DEA模型分析欧盟的经济和社会可持续发展绩效,并对2030年欧盟能源结构目标实现进行评估。Wang等(2013)、Wen和Zhang(2016)运用ZSG-DEA模型,结合中国各省份经济发展状况、碳排放量、能源消费量等,以效率优先原则,将碳排放总量分配给各省份,从而提出了2020年有效地分配碳排放配额的优化方案。Xiong等(2017)运用ZSG-DEA模型,结合中国区域经济差异得到了能源消费配额结果,并与政策目标进行了比较分析。Sun等(2022)基于ZSG-DEA模型分析了中国可再生能源配额的省份间最优分配。

值得注意的是,现有关于能源消费和碳排放的配额研究更多集中在全社会经济层面,少有研究考虑到不同国家或区域在产业结构上存在的巨大差异。因此,本文重点考虑产业结构的异质性,先运用马尔科夫预测模型对投入产出指标的2030年产业结构进行预测,然后聚焦效率优先的视角,对中国各省份分产业的能源消费和碳排放进行配额分配,最后进行汇总分析,使结果更具可靠性。

这种基于效率优先视角的分配方案,其内在逻辑是效率高的地区和产业由于进一步减排较为困难(减排成本高),于是可以获得更多配额;相反,效率低的地区和产业由于可减排空间比较大(减排成本低),获得的配额则相对较少。因此,这种分配方案对应于不同地区和产业的减排成本差异。目前,已有大量研究开展对二氧化碳边际减排成本的测度,为国际气候谈判、区域碳排放配额以及政策目标规划提供参考。影子价格是常用的边际减排成本测度指标。Färe等(1993)最先利用谢波德距离函数结合超越对数函数测度非期望产出的影子价格。随后方向距离函数由于能够同时实现期望产出的增加和非期望产出的减少,可以更灵活

测算非期望产出的影子价格而被广泛使用,同时二次函数主要用于方向距离函数的参数化。Färe 等(2005)利用方向距离函数测算了美国 209 家电厂的二氧化硫影子价格。Liu 和 Li (2017)利用方向距离函数的二次函数形式测度中国各省份二氧化碳边际减排成本。相比于参数方法需要估计大量的参数,非参数方法具有灵活性,主要运用 DEA 来测度。Boyd 等(1996)提出通过 DEA 估计方向距离函数,但是运用 DEA 模型估计方向距离函数测度结果可能存在正负不定的情况。因此,还有一些学者提出 SBM 模型来测度污染物的影子价格。Wang 等(2015)建立 SBM 模型研究中国区域工业系统的用水效率和减排成本。与此类似,在基于效率视角的 2030 年碳配额基础上,本文运用 SBM 模型构建影子价格模型测度各省份各产业二氧化碳边际减排成本,并与 2019 年情况对比,验证二氧化碳排放配额机制的经济有效性,实现控制目标和经济效益的结合。本文从新视角扩展了关于二氧化碳排放最优配额的后续相关研究,为国家节能降碳策略及碳达峰碳中和愿景的实现提供参考。



图2 本文研究框架

本文的边际贡献体现在以下四个方面:(1)考虑产业结构的异质性进行分产业的能源消费和二氧化碳排放配额分配,以建立更有效的配额机制;(2)分别将化石能源消费和非化石能源消费作为投入引入 ZSG-DEA 模型中进行配额研究,从而可以同时考虑 2030 年国家非化石能源占比目标;(3)运用 ZSG-DEA 模型对中国各省份分产业的能源消费和二氧化碳排放进行配额分配,从效率性角度确定各省份 2030 年控制目标;(4)引入松弛测度的数据包络分析模

型对各省份分产业的二氧化碳边际减排成本进行测算,并将二氧化碳配额机制的政策目标和二氧化碳减排潜力的经济效益相结合。图2为本文研究框架。

三、模型分析

(一)理论模型

1. CCR-DEA 模型

DEA 是一种运用线性规划方法,对同类型单位的多种指标投入或产出的相对效率进行评价的方法。其中,CCR-DEA 模型是DEA 模型中最基本、最重要的方法。CCR-DEA 模型假定规模收益不变。假设有 N 个决策单元(Decision Making Unit,简称DMU),每个DMU 都有投入 M 个,产出 R 个。运用如下的模型对每个DMU 进行效率评价:

$$\begin{aligned} & \text{Min} \theta & (1) \\ & \text{s.t.} \sum_{j=1}^N \lambda_j y_{jr} \geq \theta y_{sr}, r=1, \dots, R; \\ & \sum_{j=1}^N \lambda_j x_{ji} \leq \theta x_{si}, i=1, \dots, M; \\ & \lambda_j \geq 0, j=1, \dots, N \end{aligned}$$

上式中, θ 为各DMU 的效率,估计值在0到1之间,估计值越小,DMU 效率越低; λ_j 是每个DMU _{j} 在系统的权重; x_{ji} 为第 j 个DMU 对第 i 种投入的投入量; y_{jr} 为第 j 个DMU 对第 r 种产出的产出量。

2. ZSG-DEA 模型

传统的DEA 模型(CCR-DEA 等)假设各个DMU 之间的投入(或产出)不会相互影响。但在一些情况下,一些投入(或产出)的总额一定,如本文中的化石能源、非化石能源和二氧化碳排放,为了保证总量不变,各个DMU 的投入之间必须相互联系。此时假设投入(或产出)独立就不能对投入(或产出)重新分配整合以达到有效边界,因此是不合理的。

考虑到这些情况,Lins 等(2003)基于传统的DEA 模型首先提出了ZSG-DEA 模型,运用比例缩减法或迭代法重新分配投入或产出,使DMU 达到有效边界。具体来说,低效的DMU 必须缩减一定的投入(或者增加一定的产出)以提高效率,而为了保证总额不变,其他DMU 以各自的初始值为基础,按比例增加一定的投入或缩减一定的产出,从而实现各DMU 的资源整合和再分配,最终全部DMU 形成一个新的前沿面。ZSG-DEA 模型反映了在总量控制的前提下,各决策单元通过竞争或协调实现分配的方法,因此在能源紧缺、气候变化的背景下,广泛应用于各国或各省份的能源消费与二氧化碳排放的研究中。本文选用投入导向的ZSG-DEA 模型。假设有 N 个DMU,每个DMU 都有 M 个投入指标和 R 个产出指标。

$$\begin{aligned}
 E_{ZSG} &= \text{Min} \left\{ \sum_{i=1}^M w_i \vartheta_i \right\} & (2) \\
 \text{s.t.} & \sum_{j=1}^N \lambda_j y_{jr} \geq y_{sr}, r=1, \dots, R \\
 & \sum_{j=1}^N \lambda_j x_{ji} \left(1 + \frac{x_{si}(1-\vartheta_i)}{\sum_{j=1, j \neq s}^n x_{ji}} \right) \leq \vartheta_i x_{si}, i=1, \dots, M \\
 & \sum_{i=1}^M w_i = 1, w_i > 0 \\
 & \lambda_j \geq 0, j=1, \dots, N
 \end{aligned}$$

上式中, x_{ji} 表示第 j 个 DMU 对第 i 种投入指标的投入量; y_{jr} 表示第 j 个 DMU 对第 r 种产出指标的产出量。另外, λ_j 是与每个 DMU_j 相关联的强度变量, 表示 DMU 的权重。在假设各投入总和固定不变的约束下, ϑ_i 为各 DMU 的第 i 种投入的 ZSG-DEA 效率值, w_i 为指定的第 i 种投入的 ZSG-DEA 效率的权重, E_{ZSG} 为各 DMU 的加权平均效率。

若 DMU_s 为非 ZSG-DEA 有效的 DMU, 为了实现 DEA 有效, DMU_s 必须减少投入 i , 则 $x_{si}(1-\vartheta_i)$ 为分配给其他 DMU 的多余的投入量, 按照比例缩减法, DMU_s 给 DMU_j 的投入 i 的分配值为:

$$x_{ji} \frac{x_{si}(1-\vartheta_i)}{\sum_{j=1, j \neq s}^n x_{ji}} \tag{3}$$

待所有 DMU 同时进行投入的比例缩减调整分配结束, 投入 i 对 DMU_j 的再分配值为:

$$x'_{ji} = \sum_{s \neq j} \left[x_{ji} \frac{x_{si}(1-\vartheta_i)}{\sum_{j=1, j \neq s}^n x_{ji}} \right] - x_{ji}(1-\vartheta_i) \tag{4}$$

通过多次迭代, 对投入进行多次分配, 最终得到使每个 DMU 达到效率为 1 的最佳分配方案, 所有 DMU 都达到有效边界。上述过程在投入总量恒定的情况下, 通过再分配使所有 DMU 均达到有效边界。本文决策单元为中国 30 个省份, 由于西藏、台湾、香港和澳门数据缺失, 没有将其纳入研究范围。选用各省份分产业的实际增加值 (Y) 作为期望产出, 就业人员 (L)、资本存量 (K)、非化石能源 (NE) 和化石能源 (FE) 以及碳排放 (C) 作为生产投入要素^①。

^① 将非期望产出作为投入引入模型的方法在现有文献中被经常采用, 如 Considine 和 Larson (2006), Chen (2009), Forslid 等 (2018)。把非期望产出变量作为投入进行处理在 ZSG-DEA 模型相关文献中使用较广, 如 Wang 等 (2013)。

由于投入要素的可替代性,我们仅考虑非化石能源、化石能源和碳排放的省份间分配,从而避免与资本和劳动的无效率产生混淆(林伯强、杜克锐,2013)。模型结构如下:

$$\begin{aligned}
 E_{ZSG} &= \text{Min} \{ w^{FE} g^{FE} + w^{NE} g^{NE} + w^C g^C \} & (5) \\
 \text{s.t.} & \sum_{j=1}^{30} \lambda_j y_j \geq y_s; \sum_{j=1}^{30} \lambda_j k_j \leq k_s; \sum_{j=1}^n \lambda_j l_j \leq l_s; \\
 & \sum_{j=1}^n \lambda_j x_j^{FE} \left(1 + \frac{x_s^{FE} (1 - g^{FE})}{\sum_{j=1, j \neq k}^n x_j^{FE}} \right) \leq g^{FE} x_s^{FE}; \\
 & \sum_{j=1}^n \lambda_j x_j^{NE} \left(1 + \frac{x_s^{NE} (1 - g^{NE})}{\sum_{j=1, j \neq k}^n x_j^{NE}} \right) \leq g^{NE} x_s^{NE}; \\
 & \sum_{j=1}^n \lambda_j x_j^C \left(1 + \frac{x_s^C (1 - g^C)}{\sum_{j=1, j \neq k}^n x_j^C} \right) \leq g^C x_s^C; \\
 & w^{FE} + w^{NE} + w^C = 1; w^{FE}, w^{NE}, w^C > 0; \\
 & \lambda_j \geq 0; j = 1, \dots, 30
 \end{aligned}$$

上式中, g^{FE} 、 g^{NE} 、 g^C 分别代表化石能源、非化石能源消费和二氧化碳排放的ZSG-DEA效率, w^{FE} 、 w^{NE} 、 w^C 为化石能源、非化石能源消费和二氧化碳排放的ZSG-DEA效率指定权重,假定在评估统一效率 E_{ZSG} 时三者具有相同的重要性,因此,本文中三者均设为1/3。模型表明,在同样的增加值、劳动力和资本存量的前提下,能源消费和二氧化碳排放量越低的省份越有效率。

3. 马尔科夫预测模型

本文运用马尔科夫预测模型推测2030年增加值、资本存量、就业人员、能源消费以及碳排放的产业结构,从而得到各省份2030年各产业的数据并进行分产业的研究。马尔科夫预测模型是运用马尔科夫链研究经济现象的未来发展变化,并进行预测的方法。马尔科夫预测的基本模型为: $S(n+T) = S(n) \times P^T$, 其中, $S(n)$ 为第 n 期增加值、就业人口、资本存量、非化石能源消费、化石能源消费和二氧化碳排放六种指标的产业结构, P 为 $S(n)$ 到 $S(n+T)$ 的转移概率矩阵。

马尔科夫转移概率矩阵的建立遵循以下几个步骤(林伯强、李江龙,2015),以产业结构为例,转移矩阵为:

$$P = \begin{pmatrix} P_{1 \rightarrow 1}(n) & P_{1 \rightarrow 2}(n) & P_{1 \rightarrow 3}(n) \\ P_{2 \rightarrow 1}(n) & P_{2 \rightarrow 2}(n) & P_{2 \rightarrow 3}(n) \\ P_{3 \rightarrow 1}(n) & P_{3 \rightarrow 2}(n) & P_{3 \rightarrow 3}(n) \end{pmatrix} \quad (6)$$

(1)计算保留概率元素值。保留概率元素就是主对角线元素,表示产业结构保持原有份额的概率。从 n 时刻转移到 $n+T$ 时刻,如果第一产业的增加值增加,则第一产业的保留概率为 1,反之为 $n+T$ 时刻增加值与 n 时刻的增加值之比。

$$\begin{aligned} & \text{当 } S(n+T) \geq S(n), \text{ 则 } P_{1 \rightarrow 1}(n) = 1 \\ & \text{当 } S(n+T) < S(n), \text{ 则 } P_{1 \rightarrow 1}(n) = S(n+T)/S(n) \end{aligned} \quad (7)$$

(2)保留概率为 1 的元素所在行的其他转移概率元素为 0。因为若第一产业的保留概率值为 1,那么说明的第一产业增加值增加或不变,故不存在向其他产业的转移。

$$P_{1 \rightarrow 1}(n) = 1 \rightarrow P_{1 \rightarrow 2}(n) = 0, P_{1 \rightarrow 3}(n) = 0 \quad (8)$$

(3)保留概率小于 1 的元素所在列的其他转移概率元素为 0。因为若第一产业的保留概率小于 1,说明第一产业增加值减少,不可能从其他产业吸收。

$$P_{1 \rightarrow 1}(n) < 1 \rightarrow P_{2 \rightarrow 1}(n) = 0, P_{3 \rightarrow 1}(n) = 0 \quad (9)$$

(4)保留概率小于 1 的元素所在行的其他非零转移概率元素值为:

$$P_{1 \rightarrow i}(n) = \left\{ [1 - P_{1 \rightarrow 1}(n)] \times [S_i(n+T) - S_i(n)] \right\} / \left\{ \sum_{i(P_{1 \rightarrow i}(n) \neq 0)} [S_i(n+T) - S_i(n)] \right\}, i = 2, 3 \quad (10)$$

4. 边际减排成本测度模型

二氧化碳边际减排成本的测算包含参数法和非参数法,参数法易于解释,但是缺乏灵活性,需要估计大量的参数。非参数法相对较为灵活,非参数法的影子价格模型中的松弛测度模型 SBM 在近年来得到广泛应用。本文运用边际减排成本模型测度中国 2030 年各省份的边际减排成本,并与 2019 年实际边际减排成本对比,分析基于效率视角的碳配额机制在实现政策目标前提下的经济效益。

边际减排成本测度模型表达式如下:

$$\begin{aligned} & \text{Min} \frac{1 - \frac{1}{M} \left(\sum_{m=1}^M \frac{S_m^x}{X_{mn}} \right)}{1 + \frac{1}{I+J} \left(\sum_{i=1}^I \frac{S_i^d}{D_{in}} + \sum_{j=1}^J \frac{S_j^u}{U_{jn}} \right)} \quad (11) \\ & \sum_{n=1}^N \lambda_n X_{mn} + S_m^x = X_{mn}, m = 1, 2, \dots, M \\ & \sum_{n=1}^N \lambda_n D_{in} - S_i^d = D_{in}, i = 1, 2, \dots, I \\ & \sum_{n=1}^N \lambda_n U_{jn} + S_j^u = U_{jn}, j = 1, 2, \dots, J \\ & S_m^x, S_i^d, S_j^u, \lambda_n \geq 0, n = 1, 2, \dots, N \end{aligned}$$

上式中, $X=(x_1, x_2, \dots, x_M)$ 、 $D=(d_1, d_2, \dots, d_I)$ 、 $U=(u_1, u_2, \dots, u_J)$ 为投入、期望产出、非期望产

出, λ_n 为强度变量。 s_m^x, s_i^d, s_j^u 定义为各决策单元相应变量的松弛变量。当所有的松弛变量为 0, 此时生产技术集位于生产前沿面上, 那么该生产技术集是有效的。

本文研究中国 2030 年各省份分产业的二氧化碳边际减排成本, 投入变量为就业人员 (L)、资本存量 (K) 和能源消费 (E), 期望产出变量为实际 GDP (Y), 非期望产出变量为二氧化碳排放 (C)。对应的 SBM 模型为公式 (12):

$$\begin{aligned} & \text{Min} \frac{1 - \frac{1}{3} \left(\frac{s_k}{K_n} + \frac{s_l}{L_n} + \frac{s_e}{E_n} \right)}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{s_y}{Y_n} + \frac{s_c}{C_n} \right)} \quad (12) \\ & \sum_{n=1}^{30} \lambda_n K_n + s_k = K_n; \quad \sum_{n=1}^{30} \lambda_n L_n + s_l = L_n; \\ & \sum_{n=1}^{30} \lambda_n E_n + s_e = E_n; \quad \sum_{n=1}^{30} \lambda_n Y_n - s_y = Y_n; \\ & \sum_{n=1}^{30} \lambda_n C_n + s_c = C_n; \\ & s_k, s_l, s_e, s_y, s_c, \lambda_n \geq 0 \end{aligned}$$

为方便求解, 我们将公式 (12) 转换为对偶形式:

$$\begin{aligned} & \text{Max} A \\ & A + r_k K_n + r_l L_n + r_e E_n - r_y Y_n + r_c C_n = 1; \\ & \sum_{n=1}^{30} r_y Y_n - \sum_{n=1}^{30} r_c C_n - \sum_{n=1}^{30} r_k K_n - \sum_{n=1}^{30} r_l L_n - \sum_{n=1}^{30} r_e E_n = 0; \\ & r_k \geq \frac{1}{3K_n}; r_l \geq \frac{1}{3L_n}; r_e \geq \frac{1}{3E_n}; r_y \geq \frac{A}{2Y_n}; r_c \geq \frac{A}{2C_n} \quad (13) \end{aligned}$$

二氧化碳边际减排成本为 (Färe et al., 2005):

$$p_c = p_y \times r_c / r_y \quad (14)$$

其中, p_c 为非期望产出二氧化碳边际减排成本, p_y 为期望产出实际 GDP 的价格。

(二) 数据来源与预测

1. 历史数据来源

本文采用的历史数据整理如下: (1) 2005—2019 年各省份三大产业增加值和就业人员, 整理自历年《中国统计年鉴》, 其中, 各省份增加值平减到 2005 年不变价。(2) 2005—2019 年各省份三大产业资本存量, 根据 Wu (2016) 计算整理的各省份 2005—2013 年三大产业资本存量, 采用永续盘存法延展到 2019 年, 各省份折旧率来源于向娟 (2011)。(3) 2005—2019 年各省份三大产业能源消费, 由历年《中国能源统计年鉴》中的地区能源平衡表中各种类型的能源消费量统一转换为标准煤单位, 再加总计算得到。各省份非化石能源消费数据由各省份可再生能

源电力消纳量结合当年全国的供电煤耗计算而得,然后按照各省份能源消费产业结构将非化石能源消费量分摊到三大产业。最后两者相减得到化石能源消费量。(4)2005—2019年各省份三大产业碳排放数据来自 CEADs 数据库。具体数据说明及来源汇总如表 1 所示。

表 1 数据说明及来源

指标名称	符号	单位	数据来源
增加值	<i>Y</i>	十亿人民币	《中国统计年鉴》
资本存量	<i>K</i>	十亿人民币	《中国统计年鉴》、CEIC 数据库 Wu(2016)
就业人员	<i>L</i>	百万人	《中国统计年鉴》
能源消费	<i>E</i>	万吨标准煤	《中国能源统计年鉴》
非化石能源消费	<i>NE</i>	万吨标准煤	《中国能源统计年鉴》 《可再生能源电力发展监测评价报告》
化石能源消费	<i>FE</i>	万吨标准煤	《中国能源统计年鉴》
碳排放	<i>C</i>	百万吨	CEADs 数据库

2. 2030年数据预测与处理

基于中国各省份三大产业增加值、就业人口、资本存量、化石能源消费、非化石能源消费和二氧化碳排放的 2005—2019 年的实际情况,结合中国各省份上述指标的增长率,预测 2030 年中国各省份的相关指标数值及在产业间的分布。具体预测过程如下:

2030 年各变量的产业间分布:考虑到 2030 年各省份增加值、资本存量、就业人员、化石能源消费、非化石能源消费以及二氧化碳排放量的产业间分布与 2019 年相比会发生一定变化,结合历史产业结构与未来政策规划,本文采用马尔科夫链的转移概率矩阵,通过对 2010—2019 年各省份各指标数据分步求解状态转移矩阵并取均值,最终得到 2030 年增加值、资本存量、就业人员、化石能源与非化石能源消费及二氧化碳排放的产业间分布。

2030 年各省份增加值:基于 2019 年中国各省份的实际 GDP 并根据李雪松等(2016)的研究,预测 2030 年各省份实际 GDP,再结合上文马尔科夫预测模型得到的各省份的产业结构,预测 2030 年的各省份三大产业的增加值。

2030 年资本存量:根据王小鲁和周伊晓(2017)的预测,2020—2030 年中国资本存量的年均增长率为 7.3%。根据 2019 年各省份资本存量数据预测 2030 年各省份资本存量,再结合马尔科夫模型预测的 2030 年资本存量产业间分布,可以得到各省份分产业资本存量。

2030 年就业人员:根据《国家发展人口规划(2016—2030)》,预计 2030 年中国总人口为 14.5 亿人。假设就业人口占比维持基本稳定,可以得到 2030 年中国总就业人口约 8.0 亿人。利用 2019 年各省份三大产业的就业人口数据和 2010—2019 年就业人口产业结构,预测 2030 年各省份分产业的就业人员数。

2030 年能源消费:假设各省份的能源消费占比不变,按照 2019 年各省份能源消费总量占全国总能源消费的比例分配到各省份得到 2030 年各省份能源消费量初始配额。另外,根据

2030年非化石能源占比达到25%,所以各省份三大产业的非化石能源消费数据可由前述2030年能源消费量及能源结构计算得到。最后两者相减得到化石能源消费量。

2030年二氧化碳排放:中国提出2030年与2005年相比单位碳排放降低65%的目标。我们基于2005年碳排放强度预测得到2030年中国碳排放强度,结合2030年实际GDP预测值,可以得到2030年中国二氧化碳排放量。结合各省份二氧化碳排放的产业间分布,得到2030年各省份三大产业的二氧化碳排放量。

四、结果分析

(一)中国2030年二氧化碳排放初始分配效率分析

根据2030年的预测数据,本文首先运用CCR-DEA模型测算了2030年中国30个省份三大产业的初始碳排放效率。图3显示,第三产业达到有效状态的最多,有10个省份的初始效率值为1,第二产业达到有效状态的省份最少,只有2个。另外,第三产业的各省份平均初始效率最高,为0.71,第一产业次之为0.59,第二产业为0.41。说明第三产业能源消费和二氧化碳排放更接近生产前沿面,初始效率更高,而工业建筑业等初始效率较低。由此可见,不同产业的初始效率有较大差异,分产业的研究对于能源消费和二氧化碳配额机制建立很有必要。

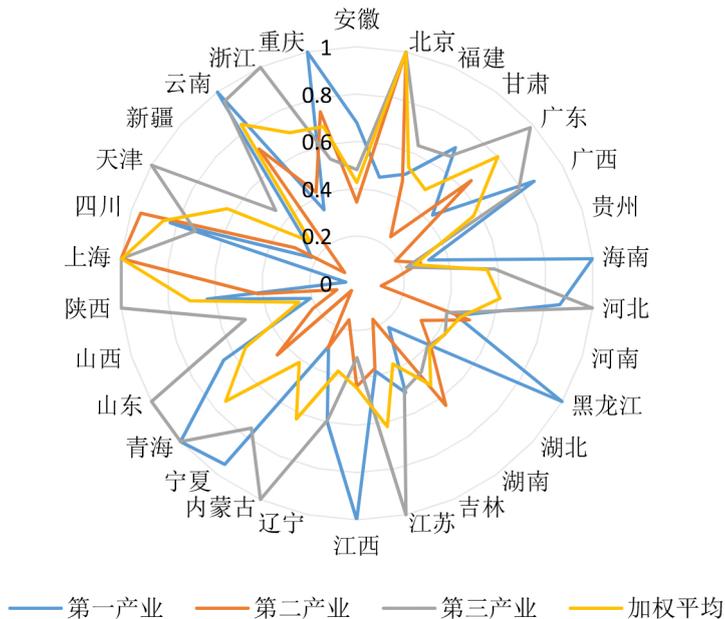


图3 2030年中国各省份三大产业及加权平均初始效率

基于GDP加权平均后发现,全国2030年加权平均初始碳排放效率仅为0.57,且各省份之间的效率差距较大。其中,北京和上海的初始碳排放效率接近1(0.99),基本处于有效状态,其碳排放配额仅达到全国二氧化碳排放量的2.44%;其次,四川(0.86)、云南(0.83)、广东(0.80)的初

始效率为0.8以上;其余25个省份在全部或部分产业均处于较低效状态。贵州、山西和新疆初始效率最低,三大产业的平均初始效率均为0.26。综合而言,三大产业的初始效率差异很大,而大部分省份基于经济体量的加权平均初始效率处于低效状态,且存在很大差异。因此,考虑产业的异质性,对各省份能源消费和二氧化碳排放重新分配配额以建立基于效率视角的配额机制对于实现国家总体节能降碳目标至关重要。特别是,基于效率视角的分配方案使得减排成本高(初始效率高)的地区和产业获得更多配额,减排成本低(初始效率低)的地区和产业得到的配额则相对较少。因此,基于效率视角的分配方案有助于以成本有效的方式实现总体节能降碳目标。

(二)中国2030年二氧化碳排放最优配额分析

应用ZSG-DEA模型对各省份三大产业的二氧化碳排放进行重新配额,使各省份的ZSG-DEA效率均达到了有效边界(见图4)。

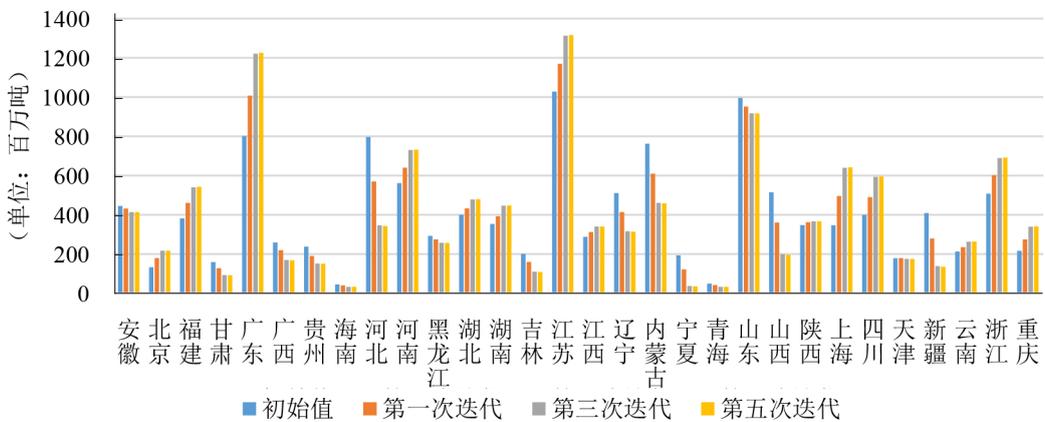


图4 2030年中国各省份二氧化碳排放最优配额迭代过程

经过五次迭代过程,我们得到了效率视角下2030年各省份分产业能源消费和二氧化碳排放的最优配额。通过将各省份基于ZSG-DEA模型的分产业的化石能源消费、非化石能源消费与二氧化碳排放配额加总计算,得到各省份2030年最优能源消费配额、二氧化碳排放配额以及非化石能源占比、能源强度与碳排放强度配额(见表2)。

通过对比各省份2030年能源消费总量、碳排放量、非化石能源消费占比、能源强度与碳排放强度所对应的最优配额(表3列(1)一(5)),发现14个省份的总能源消费配额增加。其中,上海的能源消费配额增加最多,达175.9%,北京其次,达91.55%。可见,初始效率为1的省份能源消费配额增加百分比最多。16个省份的能源消费配额减少,最明显的省份依次为宁夏(-81.9%)、青海(-69.8%)、新疆(-67.1%)、山西(-60.1%)。对应地,这些省份大部分2030年的初始效率相对较低。各省份的能源强度配额结果与2030年预测值相比的变化情况与能源消费配额变化情况基本一致。增幅最大的分别为上海(198.56%)和北京(103.55%),减幅最大的为宁夏(-82.04%)和青海(-70.45%),这与Wang等(2013)的结果较为一致。另外,就各省

表2 效率视角下中国2030年各省份最优配额

省份	2030年最优配额					效率值	
	总能源消费 (万吨标煤)	碳排放量 (百万吨)	能源强度 (吨标煤/万元)	非化石能源占比 (%)	碳排放强度 (吨/万元)	CCR-DEA 效率	ZSG-DEA 效率
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
安徽	18695.74	413.64	0.39	21.77	0.86	0.43	1.00
北京	17145.43	217.60	0.45	18.35	0.58	1.00	1.00
福建	22829.36	542.22	0.41	21.58	0.98	0.54	1.00
甘肃	4714.65	91.52	0.45	22.10	0.87	0.49	1.00
广东	68225.00	1225.57	0.50	27.17	0.89	0.80	1.00
广西	9166.39	168.23	0.40	22.23	0.73	0.57	1.00
贵州	7008.29	151.00	0.32	21.84	0.70	0.26	1.00
海南	2080.52	32.56	0.38	22.57	0.60	0.55	1.00
河北	18245.82	342.22	0.42	22.17	0.79	0.61	1.00
河南	31697.27	732.05	0.43	21.66	0.98	0.46	1.00
黑龙江	11631.22	256.51	0.68	22.75	1.50	0.43	1.00
湖北	21724.68	479.16	0.40	21.78	0.89	0.41	1.00
湖南	21492.59	447.76	0.40	22.78	0.84	0.53	1.00
吉林	5777.05	108.44	0.49	22.18	0.92	0.37	1.00
江苏	61703.01	1316.05	0.49	22.81	1.05	0.62	1.00
江西	13846.87	340.50	0.40	21.49	0.99	0.44	1.00
辽宁	15130.47	314.06	0.61	21.94	1.26	0.38	1.00
内蒙古	27009.06	458.16	1.15	36.12	1.95	0.63	1.00
宁夏	1610.89	35.13	0.43	21.81	0.94	0.41	1.00
青海	1528.49	32.61	0.44	25.36	0.93	0.74	1.00
山东	41091.68	916.48	0.47	21.75	1.05	0.54	1.00
山西	8852.47	196.16	0.55	21.76	1.21	0.26	1.00
陕西	20425.42	366.75	0.69	32.06	1.24	0.71	1.00
上海	42989.06	642.04	0.92	37.82	1.37	1.00	1.00
四川	25033.20	595.42	0.43	21.58	1.02	0.86	1.00
天津	8344.24	175.29	0.56	21.89	1.19	0.63	1.00
新疆	6917.97	135.42	0.44	23.89	0.87	0.26	1.00
云南	11490.29	264.03	0.37	21.68	0.85	0.83	1.00
浙江	39307.23	691.45	0.48	27.44	0.85	0.70	1.00
重庆	14285.63	340.86	0.40	21.57	0.96	0.68	1.00
全国	600000.00	12028.90	0.49	25.00	0.98	0.57	1.00

份的非化石能源消费占比变化情况来看,17个省份的非化石能源消费占比增加,天津非化石能源消费占比增加最多,增加152.68%;13个省份的非化石能源消费占比减少,其中,青海省非化石能源消费占比减少最多,约71.02%。而这13个省份的2030年预测的初始非化石能源占比已经超过国家设定的2030年非化石能源消费占比最低目标。但是,由于我们的研究是基于2030年国家目标假设2030年的非化石能源消费占比达到25%,此时总量一定。所以对

表3 中国2030年各省份配额与2019年对比情况

省份	2030年最优配额与2030年预测值变化情况(%)					2030年最优配额与2019年变化情况(%)				
	总能源消费	碳排放量	能源强度	非化石能源占比	碳排放强度	总能源消费	碳排放量	能源强度	非化石能源占比	碳排放强度
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
安徽	2.36	-8.28	-9.08	45.12	-18.53	32.52	5.69	-33.74	125.65	-47.16
北京	91.55	158.89	103.55	47.02	175.11	147.99	198.31	48.34	128.61	78.45
福建	30.57	72.97	17.36	-13.38	55.48	69.04	99.31	-14.47	34.68	0.85
甘肃	-48.28	-48.95	-42.69	-61.66	-43.44	-33.04	-41.18	-58.23	-40.38	-63.31
广东	55.54	95.90	56.69	-31.61	97.35	101.37	125.73	14.19	6.35	28.01
广西	-36.69	-40.10	-35.12	-48.26	-38.60	-18.04	-30.98	-52.71	-19.54	-60.18
贵州	-46.28	-47.59	-59.49	-31.25	-60.48	-30.45	-39.61	-70.47	6.91	-74.36
海南	-32.23	-31.90	-28.07	76.50	-27.72	-12.27	-21.53	-47.58	174.44	-53.12
河北	-58.24	-66.08	-55.78	142.09	-64.08	-45.94	-60.91	-67.77	276.44	-76.70
河南	19.59	45.78	13.65	9.92	38.54	54.82	67.98	-17.17	70.92	-10.14
黑龙江	1.49	-17.39	37.87	57.71	12.22	31.40	-4.81	0.48	145.23	-27.21
湖北	-0.36	25.26	-8.06	-12.75	15.57	29.00	44.33	-33.00	35.68	-25.03
湖南	10.75	33.68	1.44	-29.26	22.45	43.38	54.04	-26.07	10.00	-20.58
吉林	-30.52	-52.56	-13.25	24.66	-40.77	-10.04	-45.34	-36.78	93.84	-61.58
江苏	39.00	45.71	39.11	42.53	45.83	79.96	67.90	1.39	121.62	-5.41
江西	5.41	27.78	-9.39	-4.61	9.83	36.47	47.23	-33.97	48.33	-28.76
辽宁	-45.76	-47.07	-21.49	118.49	-23.40	-29.78	-39.01	-42.79	239.74	-50.31
内蒙古	-9.17	-49.21	3.10	111.73	-42.35	17.60	-41.47	-24.86	229.23	-62.60
宁夏	-81.95	-85.53	-82.04	-7.93	-85.61	-76.63	-83.33	-86.91	43.16	-90.67
青海	-69.76	-41.21	-70.45	-71.02	-42.53	-60.85	-32.26	-78.46	-54.94	-62.72
山东	-17.21	-12.41	-10.96	96.72	-5.79	7.18	0.93	-35.11	205.89	-38.89
山西	-60.14	-69.35	-50.58	53.53	-62.00	-48.39	-64.68	-63.98	138.74	-75.35
陕西	32.50	12.23	26.82	72.73	7.42	71.55	29.31	-7.57	168.60	-30.33
上海	175.90	205.96	198.56	44.02	231.09	257.20	252.55	117.59	123.95	114.75
四川	2.72	78.67	-4.12	-67.43	66.77	32.99	105.87	-30.12	-49.36	8.17
天津	-14.51	1.91	12.62	152.68	34.26	10.68	17.43	-17.92	292.91	-12.92
新疆	-67.06	-73.40	-66.54	5.34	-72.98	-57.35	-69.35	-75.62	63.80	-82.47
云南	-26.27	30.59	-38.88	-70.22	8.26	-4.54	50.47	-55.45	-53.69	-29.78
浙江	43.41	65.03	39.97	5.32	61.08	85.66	90.15	2.01	63.77	4.48
重庆	36.85	101.18	18.95	-43.63	74.87	77.17	131.81	-13.31	-12.34	13.43
全国	—	—	—	—	—	29.47	15.23	-27.12	55.50	-35.14

于非化石能源消费占比减少的省份,虽然指标分配使得非化石能源消费占比下降,但建议这些省份继续优化能源消费结构,从而使2030年非化石能源消费占比达到更高的水平。在重新分配二氧化碳配额后,我们发现15个省份碳排放配额增加,上海(205.96%)、北京(158.89%)增幅最大。15个省份碳排放配额减少,其中,宁夏(-85.53%)、新疆(-73.4%)、山西(-69.35%)和河北(-66.08%)碳排放配额减幅最大。碳排放配额增加的省份与能源配额增加

的省份大致相同,且初始效率达到有效的省份(上海和北京)的碳排放配额明显增加最多,高于100%。就二氧化碳排放强度而言,各省份配额结果与2030年预测值相比的变化情况与碳排放量基本一致。

综合而言,基于ZSG-DEA模型得到的各省份化石能源、非化石能源消费与二氧化碳排放的最优分配的结果,我们可以得到:(1)初始效率为1的省份获得能源配额和二氧化碳排放配额增加百分比最多,如上海和北京。ZSG-DEA模型在既定的资源总量下调整各省份配额的规模,对于处于有效状态的省份通过减少其他省份的能源消费和二氧化碳排放增加其配额。而处于低效状态的地区则需要减少其能源消费和二氧化碳排放,减少的部分增加了其他省份的能源消费和二氧化碳排放。因此,一定程度上,这是对碳排放效率低下省份的惩罚,从而增加其提高碳排放效率的激励。(2)ZSG-DEA模型对于2030年预测的非化石能源占比未达到国家最低目标的省份要求增加其非化石能源消费占比,而对于达到国家目标的省份则需要维持现状并不断优化此能源结构。

通过对比2019年实际能源消费及二氧化碳排放与2030年最优分配的能源消费及二氧化碳排放数据(表3列(6)一(10)),可以看到相比于2019年,2030年18个省份的能源消费总量增加,其中上海市和北京市变动最大,分别增长257.20%和147.99%,其次广东(101.37%)和浙江(85.66%)的能源消费变动比例超过80%。12个省份的能源消费总量减少,能源强度下降比例较大,分别为宁夏(-86.91%)、青海(-78.46%)、新疆(-75.62%)和山西(-63.98%)。其中,宁夏省2019年能源强度为3.29吨标煤/万元,是30个省份中最高的,青海、新疆次之,能源强度分别为2.02和1.82吨标煤/万元。就二氧化碳排放量而言,17个省份配额增加,其中,上海(252.55%)、北京(198.31%)、重庆(131.81%)、广东(125.73%)和四川(105.87%)碳排放配额增幅超过100%。宁夏(-83.33%)、新疆(-69.35%)、山西(-64.68%)和河北(-60.91%)降幅超过60%。2030年碳排放配额与能源消费配额变动情况大体一致,这是由于能源消费产生的二氧化碳是我国碳排放的主要来源。

就能源强度而言,2030年只有上海、北京、广东、浙江、江苏和黑龙江的能源强度相比于2019年增加,其余省份的能源强度相较于2019年减少。上海、北京、广东、重庆、四川、浙江和福建7个省份的碳排放强度增加,其余省份碳排放强度相较于2019年减少。综合而言,东南沿海地区、北京等经济发达地区将承担较低的削减能源消费总量和二氧化碳排放的压力,因为这些省份经济发展水平和速度相较于全国平均水平更快,初始效率较高;而宁夏、新疆、河北、山西、贵州等省份能源强度与碳排放强度相比于全国平均水平极高,将面临较高的减少能源消费总量和二氧化碳排放的任务。这与Wang等(2013)、Xiong等(2017)研究结论一致。其余经济发展水平中等,能源强度与碳排放强度略高的省份完成节能降碳任务的难度一般。需要特别指出的是,部分省份出现能源强度上升的状况是由于初始效率较高,且2030年全国能源消费总量

限额60亿吨标煤较为富余,导致这些省份“被分配”的能源消费量较大。在碳达峰碳中和目标的背景下,如果全国能源消费总量限额缩减,最优配额下能源强度上升的状况将不会出现。

就非化石能源消费占比而言,2030年24个省份非化石能源的消费比重相较于2019年增加,而青海、云南、四川、甘肃、广西和重庆6个省份非化石能源消费占比相较于2019年下降,这是因为这些省份的非化石能源消费占比超过国家平均水平。虽然模型结果显示这些本身已经达标的省份的最优配额相较于2019年减少,但建议这些省份继续优化能源结构,使2030年非化石能源消费占比达到更高的水平。考虑到天津等省市非化石能源禀赋状况一般,为了优化用能结构并完成其2030年能源消费与二氧化碳排放配额控制,这些省份除优化自身的能源消费结构外,还可以通过跨区购电,帮助消纳其他省份的富余可再生能源。

我们进一步将各省份分为东、中、西三个区域。由于东部地区相比于西部地区有更高的经济发展程度,东部地区2019年与2030年最优配额的能源消费与二氧化碳排放都显著高于中部地区和西部地区。相比于2019年,只有西部地区2030年最优配额的能源消费和二氧化碳排放接近甚至低于2019年(见图5)。这是由于很多中西部地区比较优势行业集中在资源开发和加工领域,具有倚仗自然资源进行粗放式开发的特点(李江龙、徐斌,2018)。因此,基于效率视角,西部地区得到更低的能源消费和二氧化碳配额。2030年最优配额的能源强度和二氧化碳排放强度相比于2019年均有所下降,西部地区下降最多,东部地区下降最少。考虑中部尤其西部地区实现节能降碳目标的难度和未来经济的发展,通过加大对中西部地区城市或企业的财政、技术等支持力度,帮扶西部地区提高能源利用效率,优化能源结构,推进循环经济发展。此外,2019年西部地区非化石能源占比高于东部和中部地区,因此,基于效率性,东部地区非化石能源消费占比增幅大于中西部地区。此外,西部地区预测的2030年非化石能源消费占比已经高于国家整体目标,所以配额结果显示其非化石能源消费占比增加较少。但是考虑到国家整体节能降碳,绿色经济转型战略,建议西部地区维持高非化石能源消费占比,并继续推进新能源发展,以期实现更高水平的节能降碳目标。

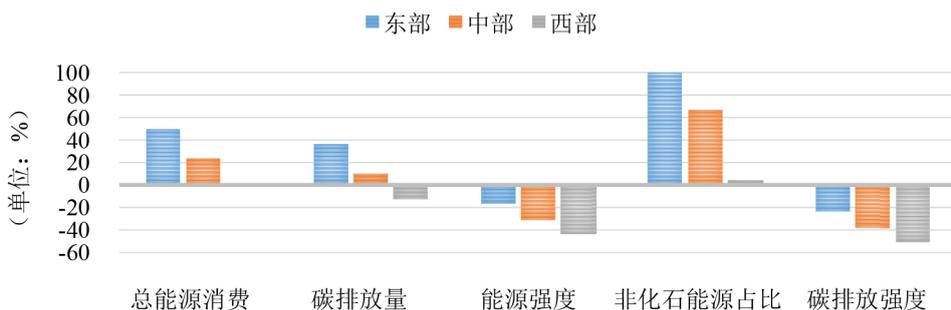


图5 中国2030年各区域各指标变化情况(相比于2019年)

本文考虑产业结构的异质性,对中国2030年各个产业的能源消费、碳排放量、能源强度、

非化石能源占比、碳排放强度进行加总测算,并与2019年实际情况进行对比分析,结果如图6所示。2030年三大产业的能源消费量、二氧化碳排放量相比于2019年均有所增加。其中,第一、第二产业的增加幅度相对较小,接近20%,第三产业增幅最大,能源消费量增加51%,碳排放量增加32%。而就能源强度与碳排放强度而言,第二产业降幅最大,降幅均高于30%。第三产业能源强度降幅为22%,碳排放强度降幅为32%。第一产业的能源强度和二氧化碳排放强度有所增加。此外,2019年三大产业的非化石能源占比差异不大,均处于较低水平。2030年最优配额分配后有所提高,与2019年相比,三大产业2030年非化石能源占比变化幅度均高于50%,第三产业增幅最大。但第二产业的非化石能源占比相比于全国平均水平(25%)较低,可以通过推动制造业绿色转型,并推进能源循环利用,提高能源利用效率,从而助推国家能源消费和二氧化碳排放控制目标的实现。

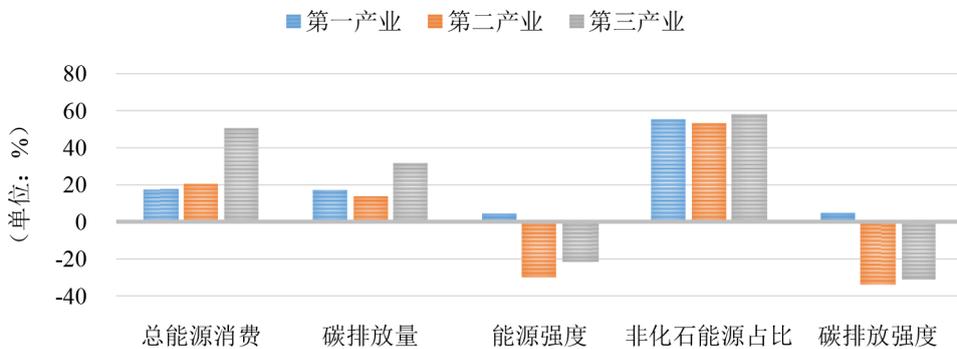


图6 中国2030年三大产业各指标变化情况(相比于2019年)

(三)中国2030年各省份二氧化碳减排成本

首先,根据二氧化碳边际减排成本模型测算结果,2019年中国二氧化碳边际减排成本的均值为1497.1元/吨,与Du等(2014)等研究结果基本一致。需要说明的是,目前大部分学者测算的二氧化碳边际减排成本高于我国现行碳交易价格,这在一定程度上说明了目前我国进行节能降碳工作的难度很大,同时也可能是因为目前的碳交易价格没有真实地反映出碳排放权的实际内在价值。2030年对能源消费和二氧化碳排放进行最优配额后,我们得到2030年二氧化碳边际减排成本的均值为2566.5元/吨,比2019年增长了71.4%。

由图7,2019年各省份的边际减排成本存在巨大差异。2019年北京和上海二氧化碳边际减排成本最高,分别为3815.8、3324.7元/吨,广东、浙江、江苏、重庆、福建次之,二氧化碳边际减排成本超过2000元/吨。可见减排成本较高的省份大部分为相对发达的地区。宁夏边际减排成本最低,仅60元/吨,内蒙古、新疆、山西、河北、青海、贵州等欠发达地区次之,二氧化碳边际减排成本不足1000元/吨。由此可见,经济发达省份的二氧化碳边际减排成本较高,经济欠发达或资源型省份二氧化碳边际减排成本相对较低,与周林等(2020)研究结论一致。

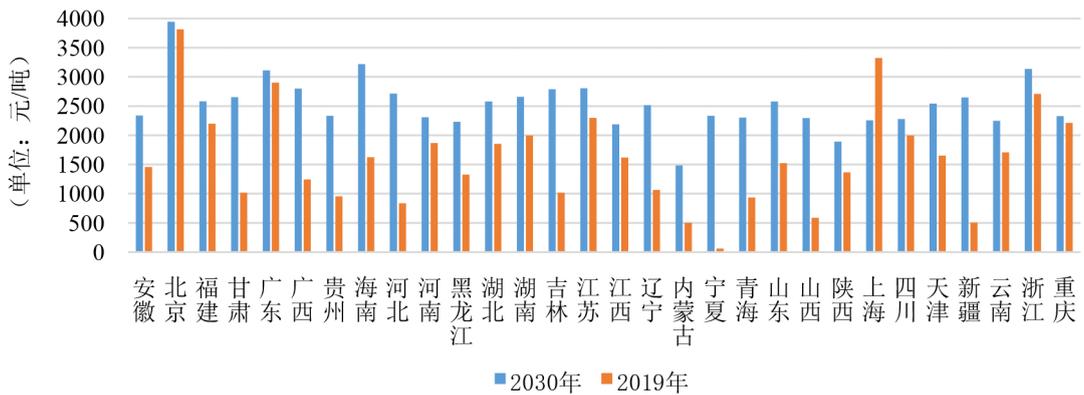


图7 中国2030年与2019年各省份二氧化碳边际减排成本

各省份的二氧化碳边际减排成本经过对二氧化碳排放的最优配额后差异大幅缩小。2030年北京二氧化碳边际减排最高,为3945.0元/吨。浙江、广东与海南的二氧化碳边际减排成本也超过了3000元/吨。内蒙古与陕西省二氧化碳边际减排最低,为1483.6、1893.3元/吨。其余各省份二氧化碳边际减排成本均在2000~3000元/吨之间。各省份边际减排成本的变化主要是因为2030年配额相比于2019年增多或者减少,导致减排成本发生变化。说明配额机制考虑了各省份二氧化碳减排的潜力差异,有利于合理有效地实现节能降碳政策目标。

我们对各区域2030年与2019年的二氧化碳边际减排成本进行对比分析,如图8所示。2019年东部区域的二氧化碳边际减排成本最高,达1874.5元/吨,中部和西部较小,分别为1419.9与979.4元/吨。这是由于东部地区经济发展水平较高,生产技术和设备相对先进,能源利用效率高,且大多省份第三产业占比相比于中西部地区较高,资源型产业较少。而中西部地区经济发展更多依靠煤、电、重化工等能源和资源型产业,具有较大的节能降碳空间。2030年各区域的二氧化碳边际减排成本都有所增加。西部地区增幅最大,达120.6%,中部地区次之,为69.4%,东部地区增幅最小,为49.8%。

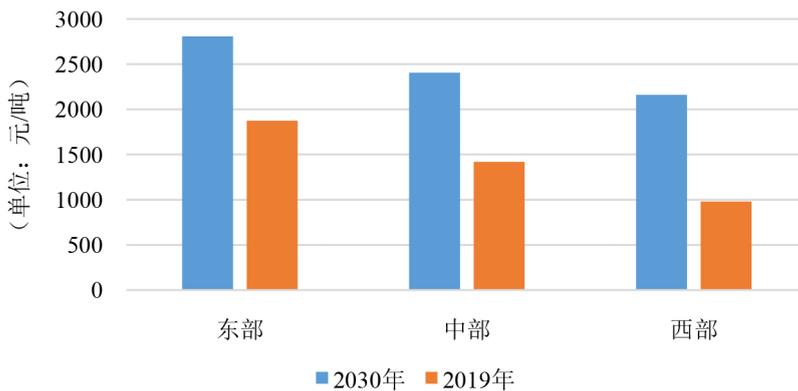


图8 中国2030年与2019年分区域二氧化碳减排成本

通过对2030年与2019年二氧化碳边际减排成本进行分产业研究,我们发现三大产业存在较大差异。如图9所示,以二氧化碳排放量为权重,2019年第一、第二、第三产业的平均二氧化碳边际减排成本为7829.9、815.2、7391.6元/吨。第二产业明显低于第一和第三产业,说明相比于第一和第三产业,第二产业具有较大的减排潜力。这是由于工业、建筑业等在生产过程中能源消费量大、能源利用效率较低,因此存在较大的节能降碳空间。通过提高能源利用效率,可以有效释放节能降碳的潜力,推动国家“3060”双碳目标。对二氧化碳排放进行最优配额后,2030年三大产业的二氧化碳边际减排成本分别为6488.3、1428.6与11133.6元/吨。且2030年绝大部分省份三大产业的二氧化碳边际减排成本高于2019年。相比于2019年,第二产业二氧化碳边际减排成本上升最多,增加75.2%,第三产业次之,增加50.6%,第一产业有少量减少。可见,2030年最优配额分配后,第二产业仍然有较大的减排潜力,是国家节能降碳工作的重点与难点。

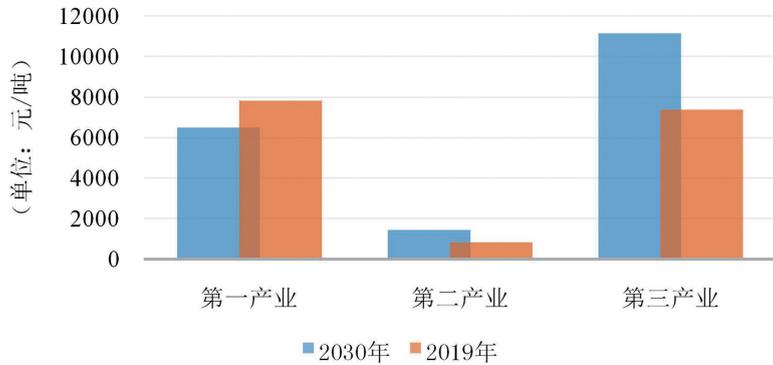


图9 中国2030年与2019年分产业二氧化碳减排成本

五、结论与建议

工业革命以来,人类活动打破了自然生态系统中碳循环的平衡,引发温室效应,带来全球气候变化。世界各地频繁的极端气候事件以及突如其来的新冠疫情更是引发了关于人与自然关系的反思,气候变化问题更加受到重视。习近平总书记提出碳达峰碳中和目标是事关中华民族永续发展和构建人类命运共同体的重大战略决策,一方面是在应对气候变化上体现了大国的责任担当,同时也是推动中国经济社会实现高质量发展的必然要求。为了真正落实节能减碳,中国进一步提出了应对气候变化的几项总量指标。这些目标的实现需要各省市分别承担责任并协同合作,因此如何将总量目标合理、公平、有效地分解到各省份对应的配额,对于实现国家节能降碳整体规划,化解气候变化危机至关重要。这种配额分配需要充分考虑到各地区各行业由于初始效率不同导致减排难度存在的巨大差异,从而因地制宜地设定减排目标,最终以成本有效的方式推动全国实现节能降碳。因此,本文基于效率优先视角,立足中国

2030年节能降碳、优化能源结构的总体目标,对各省分产业的化石能源消费、非化石能源消费以及二氧化碳排放进行最优配额,并基于最优配额结果测算各省份二氧化碳边际减排成本,从而实现经济效益和政策目标的结合,为合理有效的配额机制提供支撑。

本文发现:(1)东南沿海地区、珠三角地区、北京等经济发达地区由于经济发展程度和技术水平更高,初始碳排放效率更高(减排成本高),因此将获得更高的能源消费和二氧化碳排放配额;相反,西部欠发达省份由于初始碳排放效率低(减排成本低),将需要减少更多的能源消费和碳排放。(2)通过分产业分析,第三产业相比于第二产业获得更多的配额增量,第二产业由于其能源密集型特征,能源强度和碳排放强度降幅最大,承担更高的节能降碳压力,成为未来节能降碳工作的重心。(3)在效率视角的最优配额下,2030年各省份二氧化碳边际减排成本的差异大幅缩小,可见配额机制较好地纳入了各省的减排难度差异,有利于全国总体减排目标以总成本较低的方式实现。需要特别指出两点:第一,相比于欧盟国家碳减排目标与人均GDP高度正相关的公平优先配额分配方案,本文基于效率视角下的分配方案意味着经济落后的地区将承担较大的节能降碳任务。如何建立对应的体制机制,将全国减排总成本节约带来的收益实现公平分配,更高质量地兼顾地区经济发展与全国节能降碳的双重目标需要进行多方面的政策分析,帮助找到效率与公平之间的平衡。第二,本文是“基于效率视角”的分配方案,而这种基于效率优先视角的分配方案,只能是从效率角度来考虑的“局部最优”,而不能更进一步理解为包含了社会经济方方面面的“全局最优”。这也导致现实世界中存在的大量约束条件无法纳入到本文的分析框架。如何纳入更多约束条件从而得到更能反映现实国情全局最优配额方案,是未来研究需要进一步努力的方向。

本文的研究结论有如下意义:首先,本文提出考虑各省份产业异质性的碳排放省际最优配额,为国家总节能降碳目标方案设计提供研究参考。其次,本文引入碳减排成本以评估验证配额机制的经济效益,为以成本有效的方式实现国家总量控制目标提供经验借鉴。特别是,经济落后的地区更大地依赖于高耗能产业,能源和碳排放效率较低,基于效率视角的配额分配方案意味着经济落后的地区将承担较大的节能降碳任务。这可能对其经济发展和福利水平造成较大的负面影响。考虑中部尤其西部地区经济发展的迫切需求,更高质量地兼顾经济发展与节能降碳的双重目标需要通过加大对中西部地区或企业的财政、技术等支持力度,帮扶中西部地区提高能源利用效率,优化能源结构,推进其绿色低碳产业发展以及实现存量高碳产业的低碳转型。

参考文献:

[1] 傅京燕,黄芬. 中国碳交易市场CO₂排放权地区间分配效率研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(02): 1-9.

- [2] 何建坤. 碳达峰碳中和目标导向下能源和经济的低碳转型[J]. 环境经济研究, 2021, 6(1):9.
- [3] 李江龙,徐斌. “诅咒”还是“福音”:资源丰裕程度如何影响中国绿色经济增长[J]. 经济研究, 2018, 9(09):151-167.
- [4] 李雪松, 娄峰, 张友国. “十三五”及2030年发展目标与战略研究[M]. 北京:社会科学文献出版社, 2016:19-20.
- [5] 林伯强, 杜克锐. 要素市场扭曲对能源效率的影响[J]. 经济研究, 2013, 9(09):125-136.
- [6] 林伯强, 李江龙. 环境治理约束下的中国能源结构转变——基于煤炭和二氧化碳峰值的分析[J]. 中国社会科学, 2015, 9(09):84-107.
- [7] 钱浩祺, 吴力波. 信息不对称视角下我国工业企业碳排放权分配与定价机制研究[J]. 环境经济研究, 2022, 7(1):36-55.
- [8] 王小鲁, 周伊晓. 中国经济增长预测2020-2030[M]//宋立刚等. 中国经济增长的新源泉(第1卷):改革、资源能源与气候变化. 北京:社会科学文献出版社, 2017:67-73.
- [9] 向娟. 中国城市固定资本存量估算[D]. 长沙:湖南大学, 2011.
- [10] 周林, 刘泓汛, 李江龙, 曹铭. 全国碳排放权交易市场模拟及价格风险[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2020, 40(03):109-118.
- [11] Boyd, G., J. Molburg, and R. Prince. Alternative Methods of Marginal Abatement Cost Estimation: Non-parametric Distance Functions[M]. United States: Argonne National Lab., IL, 1996.
- [12] Cai, W. and P. Ye. A More Scientific Allocation Scheme of Carbon Dioxide Emissions Allowances: The Case from China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 215(4): 903-912.
- [13] Chen, S. Engine or Drag: Can High Energy Consumption and CO₂ Emission Drive the Sustainable Development of Chinese Industry?[J]. Frontiers of Economics in China, 2009, 4(4), 548-571.
- [14] Considine, T. J. and D. F. Larson. The Environment as a Factor of Production[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2006, 52(3), 645-662.
- [15] Cucchiella, F., I. D'Adamo, M. Gastaldi, and M. Miliacca. Efficiency and Allocation of Emission Allowances and Energy Consumption over more Sustainable European Economies[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 182: 805-817.
- [16] Ding, Z., X. Duan, Q. Ge, and Z. Zhang. On the Major Proposals for Carbon Emission Reduction and Some Related Issues[J]. Science China Earth Sciences, 2010, 53(2): 159-172.
- [17] Du, K., L. Huang, and K. Yu. Sources of the Potential CO₂ Emission Reduction in China: A Nonparametric Metafrontier Approach[J]. Applied Energy, 2014, 115(4): 491-501.
- [18] Färe, R., S. Grosskopf, C. Lovell, and S. Yaisawarng. Derivation of Shadow Prices for Undesirable Outputs: A Distance Function Approach[J]. Review of Economics and Statistics, 1993, 75(2): 374-380.
- [19] Färe, R., S. Grosskopf, D. Noh, and V. Weber. Characteristics of a Polluting Technology: Theory and Practice[J]. Journal of Econometrics, 2005, 126(2): 469-492.
- [20] Forslid, R., T. Okubo, and K. H. Ulltveit-Moe. Why are Firms That Export Cleaner? International Trade, Abatement and Environmental Emissions[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2018, 91, 166-183.
- [21] Guo, J., L. Du, and C. Wei. Equity-Efficiency Trade-off in China's Energy Capping Policy[J]. Energy Policy, 2019, 126(3): 57-65.
- [22] Han, R., J. Li, and Z. Guo. Optimal Quota in China's Energy Capping Policy in 2030 with Renewable Targets and Sectoral Heterogeneity[J]. Energy, 2022, 239: 121971
- [23] Lins, M., Gomes, E. G., Soares, D. E., et al. Olympic Ranking Based on a Zero Sum Gains DEA Model[J].

European Journal of Operational Research. 2003, 148(2): 312–322.

[24] Liu, H. and Z. Li. Carbon Cap-and-Trade in China: A Comprehensive Framework[J]. Emerging Markets Finance and Trade, 2017, 53(4): 1152–1169.

[25] Lozado, S. and E. Gutierrez. Non-parametric Frontier Approach to Modelling the Relationships among Population, GDP, Energy Consumption and CO₂ Emissions[J]. Ecological Economics, 2008, 66(4): 687–699.

[26] Sun, J., W. Wen, M. Wang, and P. Zhou. Optimizing the Provincial Target Allocation Scheme of Renewable Portfolio Standards in China[J]. Energy, 2022, 250: 123699.

[27] Sun, S. and C. Huang. Energy Structure Evaluation and Optimization in BRICS: A Dynamic Analysis Based on a Slack Based Measurement DEA with Undesirable Outputs[J]. Energy, 2021, 216(2): 119251.

[28] Tian, M., Y. J. Hu, H. Wang, and C. Li. Regional Allowance Allocation in China Based on Equity and Efficiency towards Achieving the Carbon Neutrality Target: A Composite Indicator Approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 342: 130914.

[29] Wang, K., X. Zhang, Y. Wei, and S. Yu. Regional Allocation of CO₂ Emissions Allowance over Provinces in China by 2020[J]. Energy Policy, 2013, 54(3): 214–229.

[30] Wang, Y., Y. Bian, and H. Xu. Water Use Efficiency and Related Pollutants' Abatement Costs of Regional Industrial Systems in China: A Slacks-based Measure Approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 101(8): 301–310.

[31] Wei, C., J. Ni, and L. Du. Regional Allocation of Carbon Dioxide Abatement in China[J]. China Economic Review, 2012, 23(3): 552–565.

[32] Wen, L. and E. Zhang. Regional Allocation of Carbon Emissions in China Based on Zero Sum Gains Data Envelopment Analysis Model[J]. Environmental Engineering Research. 2016, 21(1): 91–98.

[33] Wu, Y. China's Capital Stock Series by Region and Sector[J]. Frontiers of Economics in China, 2016, 11(1): 156–172.

[34] Xiong, S., Y. Tian, J. Ji, and X. Ma. Allocation of Energy Consumption among Provinces in China: A Weighted ZSG-DEA model[J]. Sustainability, 2017, 9(11): 2115–2115.

[35] Yi, W., L. Zou, J. Guo, K. Wang, and Y. Wei. How can China Reach Its CO₂ Intensity Reduction Targets by 2020? A Regional Allocation Based on Equity and Development[J]. Energy Policy, 2011, 39(5): 2407–2415.

[36] Yu, A., X. Lin, Y. Zhang, X. Jiang, and L. Peng. Analysis of Driving Factors and Allocation of Carbon Emission Allowance in China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 673(7): 74–82.

[37] Zofio, J. and A. Prieto. Environmental Efficiency and Regulatory Standards: The Case of CO₂ Emissions from OECD Industries[J]. Resource and Energy Economics, 2001, 23(1): 63–83.

China's Provincial Carbon Emission Allocation and Abatement Costs in the Context of National Carbon Capping Based on an Efficiency Analysis

Li Jianglong and Han Rong

(School of Economics and Finance of Xi'an Jiaotong University)

Abstract: As the world's largest energy consumer and carbon dioxide emitter, how to effectively and fairly decompose the total carbon emissions into provinces has become the key issue to achieve the national overall goal of energy conservation and carbon reduction. In this paper, we first evaluate the carbon emission efficiency in 2030. Then, we apply the zero-sum gains data envelopment analysis model to reallocate fossil energy consumption, non-fossil energy consumption and CO₂ emissions of each province to reach the frontiers of technology for efficiency-based optimal quota, especially considering the sectoral heterogeneity. Based on the efficiency-based optimal quota, we measure the marginal abatement costs of CO₂ emissions in each province to analyze whether such quota could achieve the economic benefits. The results show that the abatement cost is higher in developed regions with high efficiency, such as the coastal provinces and Beijing, and thus more quotas are allocated to such regions under efficiency-based context. Contrarily, the abatement cost is lower for less-developed provinces with low efficiency such as Ningxia and Xinjiang because of their large potentials for carbon reduction. Hence, few quotas are allocated to such regions. Compared with the fair-based quota scheme, the efficiency-based quota scheme indicates that less developed regions have to undertake higher pressure to control energy consumption and CO₂ emissions. This paper provides references to establish a feasible and effective mechanism to fairly distribute the benefits of cost savings in carbon reduction, and to balance the goals of economic development and carbon reduction in a well-informed manner.

Keywords: Carbon Dioxide Emission; Sectoral Heterogeneity; Optimal Quota; Marginal Abatement Cost

JEL Classification: P28, Q42, Q13

(责任编辑:卢 玲)