



研究文章

中国如何以最小成本实现碳排放达峰目标？影子价格与碳排放优化配置的研究视角

知味奥阿,日隆飞^{a b 1} 郝伟江^魏,凌霄崔^c,朱一新

展示更多

大纲 | 分享 引用

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116458>
[获得权利和内容](#)

强调

- 本文提供了一种使碳减排成本最小化的方案。
- 估算了碳排放的影子价格和边际成本。
- 中国可以实施更全面的碳交易市场。

抽象的

中国政府在第75届联合国大会上宣布，中国将提高自主贡献，采取更有力的措施，使碳排放在2030年前达到峰值。然而，如此严格的减碳政策执行势必带来成本牺牲经济发展。在这样的背景下，本文尝试用影子价格来衡量减排的平均社会成本、边际减排成本基于非径向距离函数刻画碳减排压力，基于变系数模型给出省级减排最优方案，使全国减排成本最小化。结果表明：一是影子价格平均值为15.91，地区间差异较大，平均减少一单位碳排放量将牺牲15.914元的经济产出，存在跨地区碳交易的可能性；其次，一方面，随着时间的推移，大部分地区的碳排放边际减排成本呈现上升趋势，这意味着未来经济发展需要牺牲更大的经济成本；另一方面，经济水平高的地区边际减排成本远高于经济欠发达地区，这表明减少碳排放的难度越来越大，经济发达地区的经济成本会更高；三、可选择的分配方案本研究得出的CO2减排在减排成本最小化方面优于 Grandfathering 和 Benchmarking 本文的结果表明，中国可以实施更大的碳交易市场来经济地履行碳排放达峰的承诺。



关键词

影子价格; 边际减排成本; 可选配置; 碳排放达峰

缩略语

决策单位, DMU; 定向距离函数, DDF; 非径向定向距离函数, NDDF; 边际减排系数, 苹果

1. 介绍

中国作为世界上最大的二氧化碳排放国和最大的发展中国家，理应为全球CO₂减排做出相应的贡献。在第75届联合国大会上，中国提出到2030年碳排放达峰、2060年实现碳中和，并写入中国制约国民经济和社会发展的中长期发展战略。(., 2021a; 林和朱, 2021)。然而，减少碳排放必然会降低理想产出并减缓经济增长，因为它必须为温室气体控制和减排付出一些成本 (Shen et al., 2021; Silva et al., 2019)；张等, 2021；朱和林, 2021)。此外，当碳减排的成本高于经济增长的回报时，提高碳排放效率会加剧碳减排与经济增长之间的矛盾 (Song et al., 2022; Yu et al., 2022; Zhang et al., 2022; Zhang et al., 2021 年；朱和林, 2021 年)。

碳交易市场被认为是应对碳减排的一个很好的途径 (Shi et al., 2022; Wu, 2022; Xian et al., 2020)，这在理论上源于“科斯定理”(Bridel, 2020; Carlier和Dana, 2013 年；Tsionas, 2018 年)。在实践中，欧盟碳等式权交易系统 (EU-ETS) 是最早的碳市场在世界上，其作用和地位得到广泛认可。此外，英国排放交易集团 (ETG)、芝加哥气候交易所 (CCX) 和加州碳市场 (CA-ETS) 等也是碳交易市场的典范。2011年，中国开始在北京、天津、上海、重庆、湖北、广东、深圳等7个地区开展碳交易试点。2021年7月，中国在经过10年的试点工作后，备受瞩目的全国碳排放权交易市场建设正式启动。这是中国应对气候变化进程中的里程碑事件，不仅有利于中国实施低碳经济转型战略，也有助于提升中国在国际谈判中的地位和权力。尽管如此，

中国CO₂排放总量在过去几年呈上升趋势，从2000年的30.524亿吨增加到2017年的98.66亿吨，各省之间差距明显。按照减排目标，到2030年单位国内生产总值碳排放量比2005年下降65%以上，中国目前的碳排放量至少要减少30%。中国各省要为完成这项任务承担一定的减排责任。但是，地区之间的经济发展水平、技术水平、能源效率、能源结构等方面存在巨大差异，导致不同地区的碳减排成本存在差异 (Du et al., 2021a; 杜和李, 2019; 张等, 2021; 朱林, 2021)。因此，科学制定高效、公平、经济的碳减排分配策略对中国至关重要。通常没有明确的价格来衡量碳排放量，因为它不能直接在市场上交易。在这种情况下，影子价格作为社会成本的代表，准确地反映了碳排放对经济的交易成本。因此，本研究试图分析三个主要问题。首先，为了验证区域间减排成本的差异，我们基于非径向距离函数计算了每个省份的影子价格和边际减排系数；其次，我们基于非线性规划得到各省减排量的最优分配模型和总量减排约束；第三，我们比较了本研究得出的最优配置方法与“祖父法”和“基准法”的行政控制方式在减排方面的优越性。综上所述，通过对这些问题的研究，进一步推动我国在现有试点地区基础上扩大碳排放交易规模，实现全社会减排成本最优。

2. 文献综述

碳减排研究主要集中在碳排放效率、减排成本和减排策略三个方面。

碳排放效率是碳减排成本的基础，被认为是提高环境绩效的重要参考 (Du et al., 2014, 2022)。研究方法主要包括两大类：单要素效率指数和全要素效率指数。第一个常被学者用碳强度和碳生产率来衡量碳排放效率 (Tang et al., 2021a, 2021c; Zhou et al., 2020)。但该方法忽略了不同生产要素之间的替代效应，不能反映被评价决策单位实际污染排放量与其潜在最低排放量之间的差距。在这种情况下，第二种方法应运而生，即利用生产前沿分析技术模拟生产环境。票价等。(1993)首先使用Shepherd距离函数来表征生产技术，并使用数据包络法估计不良产出效率，从而推导出影子价格。在此基础上，Chung 等人。(1997)提出了一种方向距离函数，它允许增加所需的输出，同时减少不需要的输出。然而，这种方法会高估环境效率的真实价值。周等。(2012)提出了一种基于DDF方法的非径向方向距离函数，允许输入和输出按不同比例变化，被越来越多的学者用来估计环境效率 (Cao et al., 2021; Liu et al., 2022; Wang et al., 2013; Yao et al., 2015; Zhang et al., 2013)。一些学者使用松弛变量模型进行相关效率计算 (Cecchini等, 2018; 崔等人, 2012 年；福山和韦伯, 2009 年；宋、王, 2018)。一些研究人员应用各种参数距离函数来推导全要素排放效率 (Tang et al., 2016; Yang and Tang, 2017)。此外，分解方法也被用于推导多因素效率 (Wu et al., 2021; Yang et al., 2018)。

目前，碳减排成本的核算主要采用碳排放的影子价格来衡量。估计方法有三种：第一种是基于专家评估的方法，由于主观性强，尚未得到广泛应用。第二种是基于经济-能源模型，通过将CO₂约束纳入局部或全球均衡模型来计算碳排放的影子价格。该方法具有很强的理论基础，但计算复杂，需要更多的假设。三是通过非参数数据包络分析对生产工艺进行建模，实现碳排放影子价格的估算。方法 (DEA)、参数随机前沿 (SFA)、参数线性规划 (LP) 和参数数学规划。它具有理论假设少、符合实际生产过程的优点 (Chen and Jia, 2017; Choi et al., 2012; Lameh et al., 2022; Sun et al., 2016; Tang et al., 2016, 2020, 2021b; Tang和Ma, 2022; Wächter, 2013; Xie 等, 2021; Zhou等, 2014)。

减少碳排放的典型政策有三类：政府直接控制、征收碳税和建立碳排放权交易市场。与行政控制相比，后两种方式是市场引导的，更容易激发企业节能减排的积极性，从而可能导致更有效的市场结果 (Atherton et al., 2021; Dugan et al., 2022; Feng 等人, 2022 年；Lopez 等人, 2022 年；Moz-Christofolletti 和 Pereda, 2021 年；Nong 等人, 2021 年；Reanos 和 Lynch, 2022 年；Sadayuki 和 Arimura, 2021 年；Tarufelli 等人, 2021 年；王等, 2021)。对于碳税法，税率相对稳定，易于操作，但不能确定碳排放总量，在实践中对减排效果也存在不确定性。相比之下，碳交易市场为每个市场主体在给定的碳减排量下提供了更灵活的策略 (Atherton et al., 2021; Feng et al., 2022; Sadayuki and Arimura, 2021)。该方法需要计算排放单位的减排责任。在实践中处理这个计算问题一般有两种方法：祖父法和基准法方法。祖父法根据历史排放量分配排放权，使得排放水平较高的主体在未来可以获得更多的排放权，有助于减轻排放主体的压力 (Zhou和Wang, 2016)。标杆法是根据一定的基准分配碳排放权的方法 (Rogge et al., 2011)。这种方式使减排绩效好的主体在未来获得更多的排放权，对排放主体具有激励作用。

从文献综述可以看出，科学揭示市场参与者的碳减排潜力和成本，对于实现从行政监管到市场交易的转变至关重要。碳排放的影子价格可以直接反映各经济主体减少碳排放的潜力和实施成本，可以作为政府和相关机构进行环保决策的重要参考。与以往的研究相比，本文主要从三个方面做出了以下理论和实践贡献：首先，本文在处理线性规划模型时使用非径向方向距离函数方法来衡量碳排放效率，碳减排成本在此基础上。与以往的Shephard Distance Function或Direction Distance Function相比，该方法可以得到更准确的结

果，因为它克服了DDF方法的期望输出和非期望输出的比例变化带来的测量偏差；二、借助变系数模型，本文给出了碳减排成本最小的优化问题的解，即与边际减排成本大的省份相比，边际减排成本小的省份应该承担更多的减排责任。与实践中的 Grandfathering 和 Benchmarking 方法相比，本文得出的减排成本可以小得多，理论上可以优化。第三，我们的实证结果表明，我国地区间碳排放效率和影子价格存在较大差异，通过地区间碳交易，可以为全国实现更好的经济效率，以最小的价格获取经济利益。因此，理论可行性分析为我国在更大范围内实施碳交易市场而开展。

3. 研究方法

3.1。1环保生产技术下的碳排放效率

假设有D个决策单元（以下简称DMU）。对于每个 DMU，输入向量 $x_m = (x_1, x_2, \dots, x_m) \in R_+^M$ 代表M种输入，输出向量 $y_s = (y_1, y_2, \dots, y_s) \in R_+^S$ 代表S种期望输出， $b_k = (b_1, b_2, \dots, b_j) \in R_+^K$ 表示K种不良输出。在这些假设下，用等式（1）表示的可行生产集来描述环境生产技术。

$$T(x) = \{(x, y, b) : x \text{ can produce } (y, b)\} \quad (1)$$

根据Du 和 Li (2019)，T是一个有界闭集，有四个公理：Null-jointness：如果 $(x, y, b) \in T(x)$ 和 $b = 0$ ，然后 $y = 0$ ；弱可处置性：如果 $(x, y, b) \in T(x)$ and $0 \leq \theta \leq 1$ ，然后 $(x, \theta y, \theta b) \in T(x)$ ；强可处置性：如果 $(x, y, b) \in T(x)$ 和 $y' \leq y$ ，然后 $(x, y', b) \in T(x)$ ；自由处置：如果 $x \leq x'$ ，然后 $T(x) \subseteq T(x')$ 。可行生产集的描述反映了环保生产技术的概念，规定了可能的边界，但不能直接解决碳排放效率问题。一些研究使用传统的方向距离函数（简称DDF）结合环境生产集来探索碳排放效率，但其存在输入输出按比例变化的缺陷，可能导致评估有偏（Chen et al., 2021；Granado-Diaz 等人，2020 年；Hu 和 Xiong，2021 年；Tavana 等人，2021 年；Zhang 等人，2018 年）。从技术上讲，非径向方向距离函数（简称NDDF）是DDF方法的改进。由于其双重输入输出方向弥补了DDF方法的不足（Mahlberg 和 Sahoo，2011 年；Molinos-Senante 等人，2016 年；Shetty 等人，2012 年；Zhang 等人，2018 年；Zhou 等人，2016 年）。它由方程(2)定义。

$$\vec{D}(x, y, b, g) = \sup \{w^T \beta : ((x, y, b) + g \times \text{diag}(\beta)) \in T\} \quad (2)$$

在等式(2)中， $w = (w^x, w^y, w^b)^T$ 表示归一化权重向量； $g = (g^x, g^y, g^b)^T$ 代表衡量政策变化的方向向量， $g \neq 0$ 总是举行； $\beta = (\beta^x, \beta^y, \beta^b)^T$ 表示投入减少、期望产出增加和非期望产出减少的比例。具体来说， β^b 表示与生产边界相比可以减少的不良产出的比例。的价值越高 β^b ，可以减少的不良产出越多，碳排放效率就越低。

本文采用非参数数据包络分析（DEA）方法求解非径向方向距离函数，由于其不需要对函数进行先验假设，可能导致估计有偏（Du et al., 2021 年b）。这里我们采用弱可处置性公理，即在减少不良产出的同时，理想产出也会按相同比例减少。正是因为中国工业严重依赖化石能源，减少CO₂排放并非易事。因此，弱可处置性公理更符合中国当前的技术条件和潜在的降低成本（Lin and Zhu, 2021；Zhu and Lin, 2021），最终函数的线性规划如方程(3)中所捍卫的那样：

$$\vec{D}(x, y, b, g) = \max \{w_m^x \cdot \beta_m^x + w_s^y \cdot \beta_s^y + w_k^b \cdot \beta_k^b\} \quad (3)$$

$$s. t. \begin{cases} \sum_{n=1}^N z_n \cdot x_{mn} \leq x_m - \beta_m^x \cdot g_m^x \quad (m = 1, 2, \dots, M) \\ \sum_{n=1}^N z_n \cdot y_{sn} \geq y_s + \beta_s^y \cdot g_s^y \quad (s = 1, 2, \dots, S) \\ \sum_{n=1}^N z_n \cdot b_{kn} = b_k - \beta_k^b \cdot g_k^b \quad (k = 1, 2, \dots, K) \\ z_n \geq 0; n = 1, 2 \dots N; \beta_m^x, \beta_s^y, \beta_k^b \geq 0 \end{cases} \quad \text{###}$$

为了识别不希望有的产出效率随时间的变化，引入了技术前沿，包括所有年份所有 DMU 所包围的共同前沿。这样，用于计算不良输出效率的全局非径向方向距离函数定义在等式(4)中：

$$GCP = \frac{(b_k - \beta_k^b b_k) / (y_s + \beta_s^y y_s)}{b_k / y_s} = \frac{1 - \beta_k^b}{1 + \beta_s^y} \quad (4)$$

3.2。利润函数和影子价格

加强环境管理，在资源投入和生产技术不变的情况下，合意产出会减少，非合意产出会减少。这意味着污染物排放的减少牺牲了潜在可取产出的增长，这可以用影子价格的概念来评价。在本研究中，碳排放的影子价格可以解释为减少额外单位碳排放量的可减少的可取产出，即碳排放的边际减排成本。

输入、期望输出和非期望输出价格的价格向量被描述为 P_X 、 P_Y 和 P_B 分别，利润函数定义为式（5）：

$$R(x) = P_Y \cdot Y - P_X \cdot X - P_B \cdot B \quad (5)$$

本文基于上述Global NDDF方法计算碳排放的影子价格，使利润函数最大化，可描述为式（6）

$$\begin{aligned} & \text{Max } P_Y \cdot Y - P_X \cdot X - P_B \cdot B \\ & \text{s. t. } D((1 - \beta_m^x) X, (1 + \beta_s^y) Y, (1 - \beta_k^b) B) = 1 \end{aligned} \quad (6)$$

公式（6）是一个带有辅助约束条件的极值问题，可以用指定为公式（7）的拉格朗日乘数法来解决：

$$\begin{aligned} & \text{Max } P_Y \cdot Y - P_X \cdot X - P_B \cdot B \\ & + \lambda (D((1 - \beta_m^x) X, (1 + \beta_s^y) Y, (1 - \beta_k^b) B) - 1) \end{aligned} \quad (7)$$

在哪里 λ 表示为拉格朗日乘数。取Y、X、B和的导数 λ ，我们在等式(8), (9), (10)中得到它们的一阶条件方程。

$$P_Y + \lambda \frac{\partial D((1 - \beta_m^x) X, (1 + \beta_s^y) Y, (1 - \beta_k^b) B)}{\partial Y} (1 + \beta_s^y) = 0 \quad (8)$$

$$-P_X + \lambda \frac{\partial D((1 - \beta_m^x) X, (1 + \beta_s^y) Y, (1 - \beta_k^b) B)}{\partial X} (1 - \beta_m^x) = 0 \quad (9)$$

$$-P_B + \lambda \frac{\partial D((1 - \beta_m^x) X, (1 + \beta_s^y) Y, (1 - \beta_k^b) B)}{\partial B} (1 - \beta_k^b) = 0 \quad (10)$$

$$D((1 - \beta_m^x) X, (1 + \beta_s^y) Y, (1 - \beta_k^b) B) - 1 = 0 \quad (11)$$

为保证决策单元处于生产技术前沿，式(11)不可或缺。参考Fare等人。(2008)；Fare和Karagiannis (2014)，我们提出了一个解决不期望产出的影子价格的方案，如方程式（12）：

$$\frac{P_B}{P_Y} = - \frac{\partial D((1 - \beta_m^x) X, (1 + \beta_s^y) Y, (1 - \beta_k^b) B) / \partial B}{\partial D((1 - \beta_m^x) X, (1 + \beta_s^y) Y, (1 - \beta_k^b) B) / \partial Y} \cdot \frac{1 - \beta_k^b}{1 + \beta_s^y} \quad (12)$$

在哪里 $\frac{\partial D((1 - \beta_m^x) X, (1 + \beta_s^y) Y, (1 - \beta_k^b) B) / \partial B}{\partial D((1 - \beta_m^x) X, (1 + \beta_s^y) Y, (1 - \beta_k^b) B) / \partial Y}$ 是期望输出对非期望输出的边际转换率，并且 $(1 - \beta_k^b) / (1 + \beta_s^y)$ 是方程(4)中求解的不良输出的效率。通过设置 P_Y 为1元RMB，则可以计算出二氧化碳的影子价格。

3.3。基于边际减排系数的最优减排策略

由于每个省份面临的碳减排情况不同，如果要求所有地区均等地承担相同数量的碳减排量，则很可能导致区域公平和效率的失衡。社会经济发展的公平性和效率失衡。本节进一步基于影子价格估算各地区CO₂的边际减排系数（简称MAC），有助于最小化碳减排的整体成本。

影子价格，也称为边际减排成本，可以解释为减少额外单位CO₂的成本。可以想象，随着边际减排成本的增加，碳减排的难度不断加大。因此，边际减排成本曲线，应该是减排率比值的增函数。我们跟随Cui等人。(2014)并采用Eq（13）来描述边际减排成本曲线的特征。

$$MC_d(\beta_d^b) = \gamma_d \times \ln(1 - \beta_d^b) \quad (13)$$

其中，d代表各省区($d = 1, 2, \dots, D$)和 β_d^b 表示区域d碳排放减少的比例。 $MC_d(\beta_d^b)$ 表示当减排率为 β_d^b ，和 γ_d 是一个参数，边际减排系数，它描述了边际减排成本曲线的陡峭程度，并反映了减少碳排放的难度，需要进行估算。鉴于MAC因地区而异，我们应用可变系数面板数据模型来估计系数 γ_d ，如式(14)所示。

$$MC_d(\beta_{d,t}^b) = \gamma_d \times \ln(1 - \beta_{d,t}^b) + \varepsilon_{d,t} \quad (14)$$

在基准测试中，假设区域d的碳排放总量为 E_d ，需要减少的碳排放量为 A_d ，因此，碳排放量的减少比例为 $\beta_d^b = A_d / E_d$ 。减少CO₂排放的成本 A_d 地区单位可估算，全国碳减排量 C_k 可由式(15)推导出推导出：

$$\begin{aligned} C_k &= \int_0^{A_k} \left[\gamma_k \times \ln\left(1 - \frac{x}{E_k}\right) \right] dx \\ &= x \left[\gamma_k \times \ln\left(1 - \frac{x}{E_k}\right) \right]_0^{A_k} - \int_0^{A_k} \left[\gamma_k x \frac{-1/E_k}{1 - x/E_k} \right] dx \\ &= -\gamma_k (E_k - A_k) \ln\left(1 - \frac{A_k}{E_k}\right) - \gamma_k A_k \end{aligned} \quad (15)$$

在国家减排目标的约束下，最佳的减排配置方案应使总成本最小化。这个设计可以通过以下数学过程来计算：

$$\begin{aligned} & \text{Min } \sum_{d=1}^D \left[\gamma_d (E_d - A_d) \ln\left(1 - \frac{A_d}{E_d}\right) + \gamma_d A_d \right] \\ & \text{s. t. } \sum_{k=1}^K A_k = \bar{A} \end{aligned} \quad (16)$$

在等式(16)中， \bar{A} 表示国家需要减少的碳排放目标量。通过求解上述非线性优化模型，可以得到各省域碳减排量的最优分配。

4. 实验结果

考虑到数据的可用性，本文使用了2000年至2017年中国30个省份的面板数据集，不包括西藏、香港、澳门和台湾。以区域资本存量、劳动力和能源消耗为投入指标，GDP和CO₂排放量分别被选为理想输出和不良输出。资本存量采用固定资产投资总额采用“永续盘存法”求得，并以2000年为基准转化为实际变量。劳动力数据来自《中国统计年鉴》和各省统计年鉴（2001-2018）。能源消费量摘自《中国能源统计年鉴（2001-2018）》。GDP数据取自《中国统计年鉴（2001-2018）》，并以2000年为基准处理成实际变量。CO₂排放数据来自CEIC数据库。详细信息见[表1](#)。

表 1。我们在本文中使用的数据集的[描述性统计](#)。

| 多变的 | 意思是 | 标准 | 组间标准 | 最小值 | 最大限度 | 中位数 |
|-----------|----------|----------|----------|---------|-----------|----------|
| 国内生产总值/亿元 | 984.413 | 1038.133 | 870.978 | 26.368 | 6203.921 | 667.335 |
| 二氧化碳/百万吨 | 237.99 | 181.8017 | 166.7153 | 8.70 | 842.20 | 189.55 |
| 资金/亿元 | 2898.011 | 3118.77 | 2071.174 | 151.747 | 18777.130 | 1878.347 |
| 劳动力/万人 | 2509.23 | 1700.87 | 1712.765 | 275.50 | 6767.00 | 2060.20 |
| 能量/千吨 | 111101.9 | 79915.9 | 73795.0 | 4800.0 | 388990.0 | 89340.0 |

[国家碳减排目标是设计省际碳减排分配方案](#)的最重要因素之一，影响着整体碳减排力度和各省碳减排责任。而这一目标是中国政府在去年12月的气候雄心峰会上宣布的，即到2030年中国单位国内生产总值碳排放比2005年下降65%以上。

4.1 。碳排放效率

需要估算碳排放效率，因为它决定了影子价格的值 对于式 [\(3\)](#)，[方向向量](#) $g=(gx, gy, gb)$ 被设置为输入和输出的最优调整方向，权重向量设置为 $w=(1/9,1/9,1/9,1/3,1/3)$ 参考[Du 和 Li \(2019\)](#)和[Liu 等人。\(2019\)](#)。从而得到用于估算CO₂效率的参数，不同地区的平均值如[表2](#)所示。

表 2。的平均值 β_1^b 和 β_1^g 基于NDDF方法的估计。

| 地区 | 均值 β_1^b | 均值 β_1^g |
|-----|----------------|----------------|
| 北京 | 0.00000 | 0.00000 |
| 天津 | 0.31011 | 0.00000 |
| 河北 | 0.50519 | 0.66391 |
| 山西 | 0.69217 | 0.69897 |
| 内蒙古 | 0.67591 | 0.42846 |
| 辽宁 | 0.41075 | 0.14664 |
| 吉林 | 0.50429 | 0.33914 |
| 黑龙江 | 0.35481 | 0.01190 |
| 上海 | 0.00000 | 0.00000 |
| 江苏 | 0.39591 | 0.00000 |
| 浙江 | 0.36665 | 0.00000 |
| 安徽 | 0.50724 | 0.28526 |
| 福建 | 0.24261 | 0.00000 |
| 江西 | 0.37940 | 0.19803 |
| 山东 | 0.50421 | 0.05113 |
| 河南 | 0.42821 | 0.33237 |
| 湖北 | 0.47583 | 0.25120 |
| 湖南 | 0.42001 | 0.05733 |
| 粤 | 0.02833 | 0.00000 |

| 地区 | 均值 β_1^g | 均值 β_1^y |
|----|----------------|----------------|
| 广西 | 0.39630 | 0.25439 |
| 海南 | 0.32291 | 0.11991 |
| 重庆 | 0.49621 | 0.02169 |
| 四川 | 0.41593 | 0.14429 |
| 贵州 | 0.58841 | 1.04805 |
| 云南 | 0.33712 | 0.57400 |
| 陕西 | 0.40031 | 0.62617 |
| 甘肃 | 0.44306 | 0.81644 |
| 青海 | 0.29578 | 1.37401 |
| 宁夏 | 0.70053 | 1.64612 |
| 新疆 | 0.52050 | 0.83901 |

在表 2 中， β_1^g 反映在和可以减少的碳排放的平均比例 β_1^y 反映了与最优生产边界相比可以增加的 GDP 的平均比例。可见，北京、上海、广东这几个地区基本没有进一步减碳的空间，而河北、山西、内蒙古、吉林、安徽、山东、贵州、宁夏、新疆的减碳潜力更大。而河北、山西、贵州、云南、甘肃、宁夏、新疆等地区GDP增长空间较大，相对东中部地区相对落后。

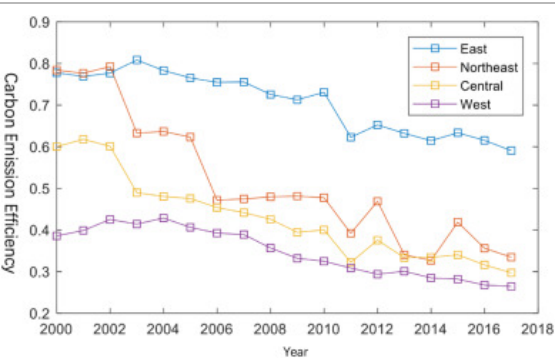
进一步地，我们可以根据式（4）计算研究期内各DMU的碳排放效率值。限于篇幅，我们报告2011-2017年的结果，这也是中国环境监管的重要时期。从表3可以看出，北京、上海、广东属于技术领先，碳排放值基本为1。天津、江苏、浙江、福建等东部沿海省份的碳排放效率值较高，为在 0.4 和 0.8 之间。相比之下，宁夏新疆贵州西部地区的碳排放效率值较低。

表 3。中国的碳排放效率，2011-2017。

| 地区 | 2011年 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015年 | 2016年 | 2017年 |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 北京 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 天津 | 0.5459 | 0.6856 | 0.6814 | 0.6642 | 0.7069 | 0.7530 | 0.7523 |
| 河北 | 0.2998 | 0.3016 | 0.2908 | 0.2733 | 0.2684 | 0.2478 | 0.2486 |
| 山西 | 0.1947 | 0.1827 | 0.1821 | 0.1710 | 0.1790 | 0.1711 | 0.1593 |
| 内蒙古 | 0.1891 | 0.1837 | 0.2072 | 0.1927 | 0.1943 | 0.1924 | 0.1747 |
| 辽宁 | 0.3448 | 0.4799 | 0.3305 | 0.3211 | 0.4362 | 0.4097 | 0.3851 |
| 吉林 | 0.3747 | 0.4268 | 0.3161 | 0.3114 | 0.3406 | 0.3292 | 0.3057 |
| 黑龙江 | 0.4568 | 0.4996 | 0.3747 | 0.3485 | 0.4799 | 0.3295 | 0.3138 |
| 上海 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 江苏 | 0.4997 | 0.4859 | 0.4491 | 0.4440 | 0.4303 | 0.4259 | 0.4020 |
| 浙江 | 0.5241 | 0.5443 | 0.5229 | 0.5244 | 0.5452 | 0.5182 | 0.4869 |
| 安徽 | 0.3233 | 0.3217 | 0.2897 | 0.2859 | 0.2985 | 0.2756 | 0.2611 |
| 福建 | 0.5264 | 0.5619 | 0.5633 | 0.5385 | 0.5970 | 0.6128 | 0.5491 |
| 江西 | 0.4073 | 0.4322 | 0.3527 | 0.3485 | 0.3520 | 0.3318 | 0.3072 |
| 山东 | 0.3641 | 0.4895 | 0.3930 | 0.3799 | 0.3787 | 0.3531 | 0.3507 |
| 河南 | 0.2979 | 0.4353 | 0.3456 | 0.3590 | 0.3614 | 0.3233 | 0.3240 |
| 湖北 | 0.3070 | 0.4472 | 0.3878 | 0.3913 | 0.4130 | 0.3872 | 0.3575 |
| 湖南 | 0.4028 | 0.4344 | 0.4432 | 0.4501 | 0.4388 | 0.4081 | 0.3741 |
| 粤 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 0.9102 | 1.0000 | 0.8341 | 0.7457 |
| 广西 | 0.3582 | 0.3578 | 0.3432 | 0.3473 | 0.2792 | 0.3343 | 0.3060 |

| 地区 | 2011年 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015年 | 2016年 | 2017年 |
|----|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 海南 | 0.4677 | 0.4564 | 0.4226 | 0.4108 | 0.4102 | 0.4082 | 0.3723 |
| 重庆 | 0.4020 | 0.4247 | 0.4999 | 0.4596 | 0.4279 | 0.4827 | 0.4603 |
| 四川 | 0.4419 | 0.4364 | 0.4128 | 0.4156 | 0.4565 | 0.4485 | 0.4354 |
| 贵州 | 0.2139 | 0.2017年 | 0.2147 | 0.2094 | 0.2155 | 0.1949 | 0.1809 |
| 云南 | 0.3918 | 0.3888 | 0.4250 | 0.4111 | 0.4379 | 0.3992 | 0.3425 |
| 陕西 | 0.3752 | 0.3420 | 0.3262 | 0.2929 | 0.2924 | 0.2809 | 0.2722 |
| 甘肃 | 0.3160 | 0.2930 | 0.2978 | 0.2760 | 0.2776 | 0.2631 | 0.2589 |
| 青海 | 0.3470 | 0.2895 | 0.2864 | 0.2693 | 0.2600 | 0.0976 | 0.2560 |
| 宁夏 | 0.0965 | 0.0990 | 0.0985 | 0.0930 | 0.0956 | 0.0990 | 0.0790 |
| 新疆 | 0.2630 | 0.2152 | 0.1968 | 0.1678 | 0.1650 | 0.1532 | 0.1427 |
| 东方 | 0.6228 | 0.6525 | 0.6323 | 0.6145 | 0.6337 | 0.6153 | 0.5908 |
| 东北 | 0.3921 | 0.4688 | 0.3405 | 0.3270 | 0.4189 | 0.3561 | 0.3349 |
| 中央 | 0.3222 | 0.3756 | 0.3335 | 0.3343 | 0.3404 | 0.3162 | 0.2972 |
| 西方 | 0.3086 | 0.2938 | 0.3008 | 0.2850 | 0.2820 | 0.2678 | 0.2644 |
| 中国 | 0.4244 | 0.4472 | 0.4218 | 0.4089 | 0.4246 | 0.4021 | 0.3868 |

从区域的角度来看，从图 1中可以清楚地观察到东部、东北、西部、中部地区碳排放效率呈下降趋势，这与Wang 等人的研究结果一致。(2020)，随着时间的推移，中西部和东北地区的碳排放效率差距在逐渐缩小，而与东部地区的差距在拉大。此外，这四个地区的碳排放效率排序与其经济发展水平相一致。



下载 :[下载高分辨率图像 \(244KB\)](#)
下载 : [下载全尺寸图像](#)

图 1。不同地区随时间变化的区域碳排放效率。

4.2 。影子价格

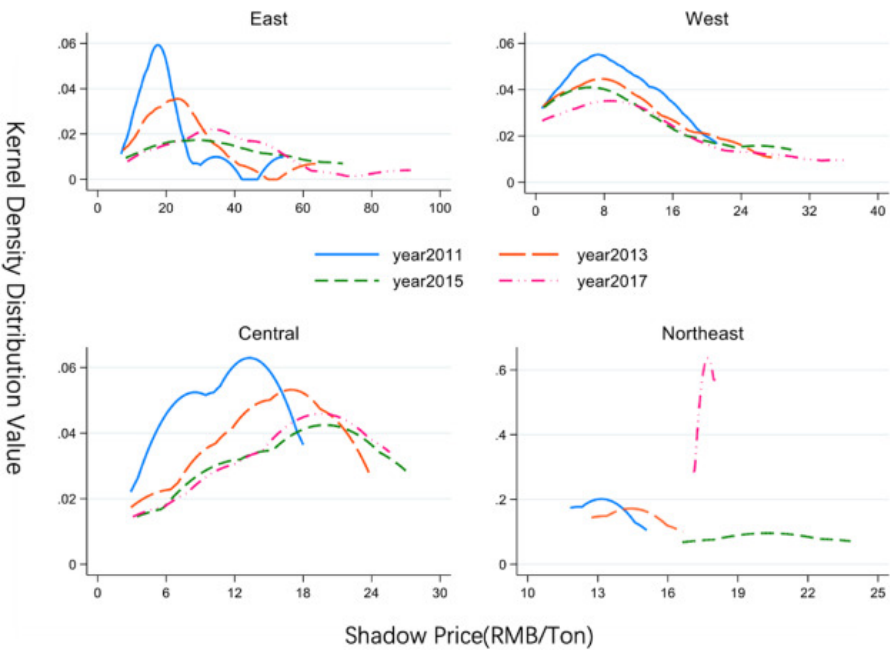
基于上述碳排放效率，可根据式（12）计算各DMU的影子价格。该指标可直接反映各地区边际碳减排成本，为节能减碳计划提供重要参考。

从表 4中，可以得出一些重要的结果。首先，CO₂的影子价格因省而异。北京影子价格最高，均值为47.300，宁夏影子价格最低，均值为1.011；其次，CO₂的影子价格大部分省份总体呈上升趋势。增长最快的前五位地区分别是黑龙江、江西、辽宁、天津和广东，平均增速依次为200.17%、119.13%、62.21%、47.02%和38.25%。而增速最低的最后五个地区分别是新疆、海南、陕西、河北和山西，平均增速依次为-3.98%、-0.69%、-0.04%、1.62%和2.00%。第三，从区域来看，东部地区的影子价格最高，其次是中西部和东北地区。我们描绘了每个区域影子价格值的核密度分布，如图 2 所示。可以看到，东部地区的影子价格主要以20为中心，右尾很长，说明有很多非常大的数值。中心区域也是以20为中心，没有长长的左右尾巴。西部和东北地区的CO₂影子价格分布也有一条长右尾，但分布在(0, 20)区间。

表 4。中国二氧化碳的影子价格，2011-2017。

| 地区 | 2011年 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015年 | 2016年 | 2017年 | 意思是 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 北京 | 54.290 | 56.786 | 63.647 | 68.958 | 71.625 | 81.825 | 91.416 | 47.300 |
| 天津 | 18.939 | 28.050 | 22.851 | 28.748 | 34.680 | 38.183 | 39.688 | 20.494 |
| 河北 | 6.860 | 7.672 | 7.437 | 7.611 | 8.177 | 7.913 | 8.717 | 7.178 |
| 山西 | 2.894 | 2.816 | 2.917 | 2.948 | 3.439 | 3.367 | 3.090 | 2.578 |
| 内蒙古 | 2.731 | 2.846 | 3.774 | 3.746 | 4.049 | 4.261 | 3.715 | 2.986 |
| 辽宁 | 12.559 | 19.174 | 13.904 | 14.217 | 20.418 | 19.316 | 18.048 | 11.540 |
| 吉林 | 11.816 | 15.365 | 12.724 | 13.330 | 16.617 | 17.733 | 17.087 | 11.779 |
| 黑龙江 | 15.090 | 19.463 | 16.643 | 16.315 | 23.824 | 17.681 | 18.004 | 11.863 |
| 上海 | 34.546 | 42.164 | 38.700 | 47.826 | 52.822 | 55.410 | 57.927 | 35.228 |
| 江苏 | 16.136 | 20.090 | 20.071 | 21.492 | 21.254 | 23.930 | 24.203 | 19.062 |
| 浙江 | 22.437 | 25.007 | 26.941 | 29.608 | 33.027 | 35.055 | 35.613 | 24.734 |
| 安徽 | 11.346 | 11.587 | 10.685 | 11.275 | 12.761 | 12.428 | 12.468 | 10.610 |
| 福建 | 16.930 | 26.422 | 30.185 | 31.293 | 38.595 | 46.055 | 43.794 | 31.087 |
| 江西 | 18.013 | 21.218 | 15.839 | 16.752 | 17.749 | 18.010 | 17.253 | 15.227 |
| 山东 | 13.928 | 19.649 | 18.521 | 19.255 | 20.142 | 20.398 | 22.492 | 16.255 |
| 河南 | 9.634 | 16.329 | 15.207 | 15.545 | 17.523 | 17.107 | 19.190 | 12.068 |
| 湖北 | 10.234 | 16.862 | 19.140 | 21.118 | 24.429 | 24.539 | 23.373 | 15.707 |
| 湖南 | 17.290 | 20.579 | 23.915 | 27.021 | 27.143 | 27.249 | 25.589 | 18.451 |
| 粤 | 14.408 | 2.016 | 11.006 | 44.823 | 68.360 | 47.154 | 43.866 | 29.262 |
| 广西 | 13.932 | 14.535 | 14.993 | 16.636 | 11.140 | 18.294 | 17.122 | 14.522 |
| 海南 | 20.275 | 20.980 | 21.760 | 23.269 | 24.102 | 27.266 | 25.345 | 24.508 |
| 重庆 | 17.551 | 19.991 | 28.384 | 27.257 | 25.246 | 34.707 | 35.976 | 20.519 |
| 四川 | 21.201 | 21.633 | 21.696 | 23.823 | 29.854 | 32.925 | 34.663 | 22.458 |
| 贵州 | 3.492 | 3.431 | 4.054 | 4.422 | 4.981 | 4.670 | 4.666 | 3.239 |
| 云南 | 11.716 | 12.746 | 16.036 | 17.766 | 22.759 | 22.039 | 19.112 | 15.081 |
| 陕西 | 10.844 | 10.387 | 10.842 | 10.233 | 11.036 | 11.921 | 12.619 | 11.631 |
| 甘肃 | 7.622 | 7.237 | 7.799 | 7.685 | 8.617 | 9.164 | 9.403 | 7.680 |
| 青海 | 9.192 | 7.066 | 7.213 | 7.315 | 7.251 | 1.097 | 7.979 | 7.211 |
| 宁夏 | 0.711 | 0.827 | 0.853 | 0.872 | 0.980 | 1.128 | 0.760 | 1.011 |
| 新疆 | 5.279 | 3.905 | 3.406 | 2.841 | 2.920 | 2.701 | 2.480 | 6.156 |
| 东方 | 21.875 | 24.884 | 26.112 | 32.288 | 37.273 | 38.319 | 39.306 | 25.511 |
| 东北 | 9.479 | 9.509 | 10.823 | 11.145 | 11.712 | 11.992 | 13.499 | 10.227 |
| 中央 | 11.568 | 14.898 | 14.617 | 15.777 | 17.174 | 17.117 | 16.827 | 12.440 |
| 西方 | 13.155 | 18.001 | 14.424 | 14.621 | 20.286 | 18.243 | 17.713 | 11.727 |
| 中国 | 14.396 | 16.561 | 17.038 | 19.467 | 22.184 | 22.784 | 23.189 | 15.914 |
| 区域标准 | 10.119 | 11.852 | 12.385 | 14.652 | 17.300 | 17.823 | 18.760 | / |

注：限于篇幅，本文仅展示2011-2017年的预估结果。

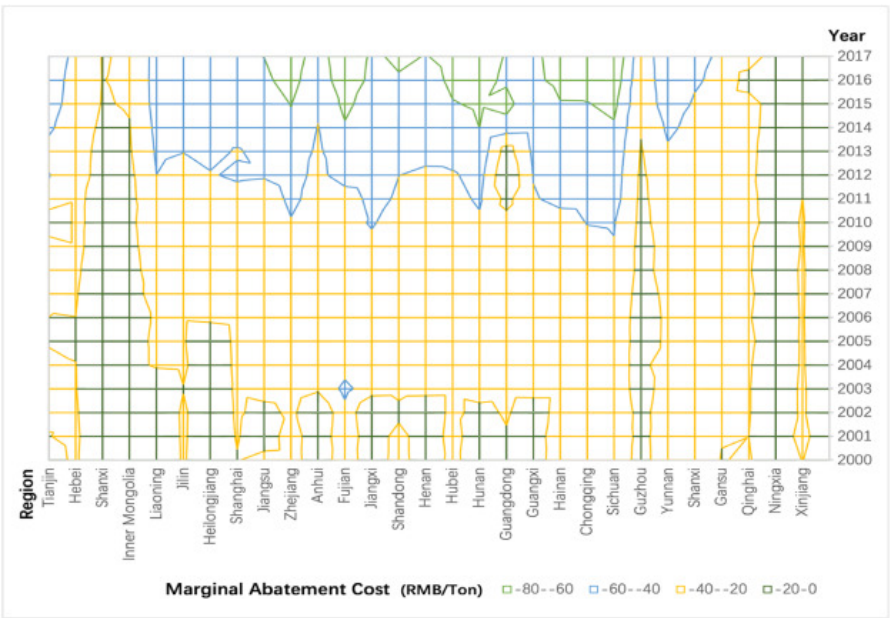


[下载: 下载高分辨率图像 \(438KB\)](#)
[下载: 下载全尺寸图像](#)

图 2。影子价格的核密度图。

CO₂影子价格的巨大差异表明地区间碳排放边际减排成本存在巨大差异。因此，根据不同地区的特点制定科学的减排计划，对于最大限度地降低经济增长的整体成本至关重要。

此外，本节还根据式（14）报告了各省CO₂的边际减排系数，结果如图3所示。可以观察到MAC值在研究期间不断增加。2012年之前，MAC的取值大部分在-40~-20之间，2012年以后，主要在（-60，-40）区间。对于北京、浙江、福建、海南和重庆等一些地区，MAC值甚至高于60。这意味着它们进一步减排的成本将相当高。相比之下，青海、新疆、吉林、海南、云南、湖北和四川的数值相对较小，使得这些地区进一步减排相对容易。



[下载: 下载高分辨率图像 \(800KB\)](#)
[下载: 下载全尺寸图像](#)

图 3。边际碳排放减排系数：2000-2017。

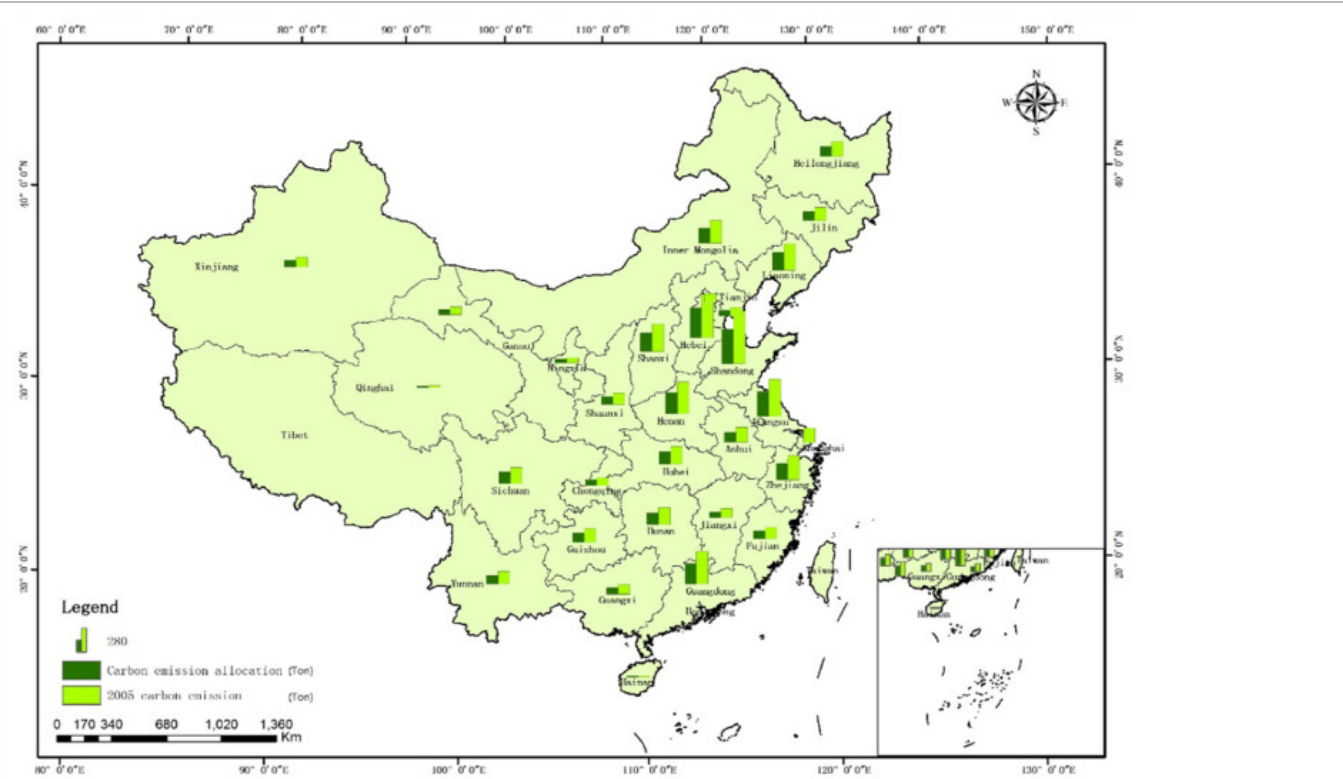
如表 5所示，边际减排系数呈左偏态并且各地区差异很大。东部地区的平均值最小，为-36.37958，其次是中部、西部和东北地区，平均值分别为-30.57366、-28.64861和-26.87597。这些结果表明，东部地区进一步减排比其他地区更难。

表 5。边际减排系数的描述性统计。

| 地区 | 意思是 | 中位数 | 最大限度 | 最小值 |
|----|-----------|-----------|------------|-----------|
| 东方 | -36.37958 | -32.12566 | -2.015872 | -91.41559 |
| 东北 | -28.64861 | -28.24891 | -0.3553584 | -57.3761 |
| 中央 | -30.57366 | -29.72589 | -0.7323912 | -68.39706 |
| 西方 | -26.64504 | -24.55729 | -2.182465 | -79.6083 |
| 中国 | -30.87597 | -29.16348 | -0.3553584 | -91.41559 |

4.3 。CO₂减排优化配置方案

如数据说明中所述，我们以2005年的碳排放量为基准。根据减排目标，到2030年全国CO₂减排量为361848.5万吨。通过求解式（16）中构建的非线性规划模型，可以推导出社会综合成本最小的CO₂最优分配方案。），结果如图 4和表 6所示。山东、河北、江苏、河南和山西是减排量最大的五个地区，承担了总任务的39.8%，减排量垫底的五个省份分别是上海、北京、海南、青海和广东省，只承担了总任务的1.2%。这些结果表明，在以国家减排成本最小为目标的情况下，少数省份会承担大部分的碳减排任务。



下载:下载高分辨率图像 (765KB)

下载: 下载全尺寸图像

图 4。选择性分配法下碳减排量的省级分配。

表 6。各省可选的碳减排量。

| 地区 | 分配 | 地区 | 分配 | 地区 | 分配 |
|-----|---------|----|---------|----|---------|
| 北京 | 2.003 | 浙江 | 171.954 | 海南 | 13.500 |
| 天津 | 60.570 | 安徽 | 107.593 | 重庆 | 58.775 |
| 河北 | 315.180 | 福建 | 86.285 | 四川 | 121.400 |
| 山西 | 197.261 | 江西 | 60.339 | 贵州 | 100.405 |
| 内蒙古 | 162.061 | 山东 | 367.462 | 云南 | 92.317 |

| 地区 | 分配 | 地区 | 分配 | 地区 | 分配 |
|-----|---------|----|---------|----|--------|
| 辽宁 | 187.456 | 河南 | 224.273 | 陕西 | 85.229 |
| 吉林 | 102.001 | 湖北 | 133.864 | 甘肃 | 60.491 |
| 黑龙江 | 108.454 | 湖南 | 121.715 | 青海 | 15.694 |
| 上海 | 0.488 | 粤 | 217.702 | 宁夏 | 39.354 |
| 江苏 | 263.187 | 广西 | 69.975 | 新疆 | 71.495 |

在碳减排任务下，如何分配分配给各责任区域，直接关系到各责任区域的利益，影响整个碳交易市场的有效运行。目前，政府控制的碳排放分配方式有两种，即“祖父法”和“基准法”。

祖父法根据历史碳排放量分配排放份额。具体而言，过去碳排放量较大的省份，未来必须承担更大的减排责任。标杆法根据历史减排绩效对碳排放量进行分配，减排绩效越好的主体未来从分配中获得的收益就越大。这两种方法的原理可以描述为 $CA_i^{new} = TCA \times \frac{CI_i^b}{\sum_i CE_i^b}$ and $CA_i^{new} = TCA \times \frac{CI_i^b}{\sum_i CI_i^b}$ 在哪里 CA_i^{new} 指分配减排量，TCA为全国碳减排总量， CE_i^b 和 CI_i^b 表示第i个省的历史碳排放量l碳强度。

基于以上两个参考标准，本文分别参考2005年、2005-2017年、2013-2017年、2015-2017年和2017年的平均碳排放量和排放强度，考虑5个模拟情景，结果 见表7和表 8。

表 7。祖父法下的碳减排量（单位：MT）。

| 地区 | 场景 1 | 场景 2 | 场景 3 | 场景 4 | 场景 5 |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| 北京 | 59.865 | 41.235 | 34.067 | 33.353 | 31.175 |
| 天津 | 57.85 | 57.128 | 56.315 | 54.502 | 51.714 |
| 河北 | 298.415 | 279.842 | 279.134 | 273.573 | 266.270 |
| 山西 | 188.5 | 177.890 | 175.247 | 170.629 | 178.980 |
| 内蒙古 | 156.325 | 212.563 | 222.482 | 224.709 | 234.362 |
| 辽宁 | 181.74 | 181.921 | 177.755 | 174.457 | 175.680 |
| 吉林 | 93.21 | 85.092 | 79.161 | 75.898 | 74.820 |
| 黑龙江 | 102.765 | 99.327 | 99.515 | 99.550 | 98.659 |
| 上海 | 103.285 | 79.540 | 71.526 | 70.199 | 69.685 |
| 江苏 | 257.465 | 259.374 | 270.855 | 274.986 | 269.938 |
| 浙江 | 166.27 | 150.820 | 141.008 | 139.927 | 140.104 |
| 安徽 | 101.855 | 121.476 | 133.081 | 134.340 | 136.069 |
| 福建 | 80.535 | 86.019 | 85.801 | 83.431 | 84.356 |
| 江西 | 62.66 | 70.721 | 78.383 | 80.210 | 82.155 |
| 山东 | 361.725 | 321.164 | 300.580 | 305.204 | 295.611 |
| 河南 | 218.53 | 204.206 | 190.443 | 188.915 | 181.181 |
| 湖北 | 123.045 | 127.015 | 117.046 | 116.982 | 119.198 |
| 湖南 | 116.025 | 110.545 | 107.367 | 110.663 | 113.697 |
| 粤 | 222.17 | 198.837 | 187.494 | 186.351 | 198.786 |
| 广西 | 64.285 | 76.862 | 83.802 | 86.937 | 81.055 |
| 海南 | 10.725 | 13.783 | 15.308 | 15.400 | 15.404 |
| 重庆 | 53.04 | 59.298 | 58.972 | 60.870 | 57.949 |
| 四川 | 110.565 | 120.473 | 121.732 | 116.685 | 113.330 |
| 贵州 | 94.64 | 88.707 | 89.963 | 91.385 | 93.525 |

| 地区 | 场景 1 | 场景 2 | 场景 3 | 场景 4 | 场景 5 |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|
| 云南 | 86.515 | 78.367 | 71.241 | 68.254 | 71.519 |
| 陕西 | 79.495 | 93.751 | 100.810 | 99.599 | 96.092 |
| 甘肃 | 54.73 | 55.762 | 58.733 | 57.178 | 55.381 |
| 青海 | 12.935 | 19.468 | 25.264 | 29.871 | 19.438 |
| 宁夏 | 33.605 | 47.791 | 55.267 | 56.100 | 64.184 |
| 新疆 | 65.715 | 99.506 | 130.131 | 138.329 | 148.172 |
| 全部的 | 3618.485 | 3618.485 | 3618.485 | 3618.485 | 3618.485 |
| | | | | | |
| | | | | | |

表 8。Benchmarking方法下的碳减排量（单位：MT）。

| 地区 | 场景 1 | 场景 2 | 场景 3 | 场景 4 | 场景 5 |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| 北京 | 50.838 | 38.582 | 30.740 | 29.859 | 27.927 |
| 天津 | 83.624 | 68.746 | 56.899 | 53.561 | 51.551 |
| 河北 | 164.569 | 154.911 | 153.082 | 149.049 | 145.586 |
| 山西 | 261.014 | 253.214 | 250.946 | 248.413 | 263.260 |
| 内蒙古 | 218.198 | 231.271 | 225.078 | 225.492 | 240.139 |
| 辽宁 | 108.633 | 103.817 | 100.676 | 102.815 | 108.942 |
| 吉林 | 136.329 | 113.034 | 96.013 | 91.616 | 91.356 |
| 黑龙江 | 93.315 | 89.764 | 88.713 | 89.110 | 88.991 |
| 上海 | 58.493 | 48.503 | 43.382 | 42.190 | 41.951 |
| 江苏 | 77.538 | 71.754 | 71.216 | 71.068 | 69.469 |
| 浙江 | 69.488 | 64.570 | 59.055 | 57.642 | 57.358 |
| 安徽 | 100.654 | 105.857 | 108.636 | 106.991 | 106.941 |
| 福建 | 60.784 | 58.961 | 53.902 | 50.876 | 50.861 |
| 江西 | 85.385 | 87.027 | 90.512 | 90.180 | 90.910 |
| 山东 | 110.902 | 95.144 | 82.547 | 82.581 | 79.621 |
| 河南 | 119.360 | 107.817 | 93.338 | 90.740 | 86.206 |
| 湖北 | 101.052 | 96.482 | 79.224 | 77.187 | 78.106 |
| 湖南 | 94.955 | 83.634 | 72.439 | 73.203 | 74.652 |
| 粤 | 52.576 | 47.048 | 42.815 | 41.801 | 44.608 |
| 广西 | 87.598 | 92.134 | 95.852 | 98.474 | 91.258 |
| 海南 | 59.748 | 69.259 | 75.708 | 75.093 | 75.009 |
| 重庆 | 83.689 | 79.013 | 66.059 | 65.727 | 60.673 |
| 四川 | 78.483 | 76.840 | 71.171 | 66.722 | 64.138 |
| 贵州 | 267.788 | 232.744 | 204.593 | 199.094 | 197.996 |
| 云南 | 132.556 | 118.620 | 95.787 | 88.915 | 91.496 |
| 陕西 | 120.344 | 119.904 | 119.003 | 115.239 | 110.153 |
| 甘肃 | 147.806 | 146.412 | 148.421 | 142.294 | 140.567 |
| 青海 | 131.564 | 166.359 | 213.163 | 252.469 | 163.841 |
| 宁夏 | 319.841 | 403.304 | 466.899 | 465.364 | 531.029 |

| 地区 | 场景 1 | 场景 2 | 场景 3 | 场景 4 | 场景 5 |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|
| 新疆 | 141.359 | 193.759 | 262.619 | 274.719 | 293.887 |
| 全部的 | 3618.485 | 3618.485 | 3618.485 | 3618.485 | 3618.485 |

参照祖父法，减排策略是根据历史排放行为对碳排放主体的“奖赏”或“惩罚”。情景2中，山东省的减排配额位居全国首位。即，以2005-2017年历史平均碳排放量为标准，山东省2035年需减少碳排放量321.164吨。从情景1到情景5，基准期不断前移，因此排放量的变化不同情况下的减排也反映了每个地区的碳排放轨迹。比如北京、天津、河北、上海的历史平均碳排放量都呈现下降趋势，

Benchmarking法根据各主体的历史碳强度确定未来的减排配额。2005-2017年，宁夏省碳强度持续上升，因此在这五种情景中，宁夏面临的碳减排挑战最为严峻。山东省Benchmarkmarking方法下的减排任务小于Grandfathering方法。Scenario4基于2015-2017年的数据，既考虑了数据波动的影响，也考虑了碳排放的近期行为。因此，本节着重对比分析情景4中祖父法和基准法确定的碳减排量分配，以及本研究实证分析得出的最优分配方式。表 9和表 10。需要说明的是，我们使用式（15）来计算总成本碳减排成本。当碳排放量 K_k ,等于或小于减排量 A_k , 还原实体的还原极限为 A_k ,因此减排成本 C_k 等于 $-\gamma_k E_k$.

表 9。祖父法与最优法的区域比较（单位：MT 和 M 元 RMB）。

| 地区 | 减少祖父方法 | 减少最优方法 | 祖父法成本 | 最佳方法的成本 | 减少差异 | 成本差异 |
|-----|----------|----------|-----------|-----------|----------|------------|
| 东方 | 1436.925 | 1498.333 | -11196162 | -211553 | 61.408 | 10,984,609 |
| 东北 | 349.905 | 397.911 | -3128.474 | -3117.664 | 48.006 | 10.8102 |
| 中央 | 801.739 | 845.045 | -2152.417 | -1161.91 | 43.306 | 990.50382 |
| 西方 | 1029.917 | 877.197 | 3069.933 | 4298.787 | -152.720 | 1228.854 |
| 全部的 | 3618.485 | 3618.485 | -11198373 | -211533.8 | 0 | 10986839 |

表 10。Benchmarking 方法与最优方法的区域比较（单位：MT 和 M 元 RMB）。

| 地区 | 减少基准方法 | 减少最优方法 | 基准方法的成本 | 最佳方法的成本 | 减少差异 | 成本差异 |
|-----|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 东方 | 653.720 | 1498.333 | -7077285 | -211553 | 844.613 | 6865732 |
| 东北 | 283.540 | 397.911 | -1566.332 | -3117.664 | 114.370 | -1551.332 |
| 中央 | 686.713 | 845.045 | -1894.99 | -1161.91 | 158.332 | 733.0751 |
| 西方 | 1994.511 | 877.197 | 1930.522 | 4298.787 | -1117.314 | 2368.265 |
| 全部的 | 3618.485 | 3618.485 | -7078816 | -211533.8 | 0 | 6867282 |

可以看出，与祖父法相比，这四个地区分别可以减少碳排放成本109846.09万元、1081.02万元、99050.38万元和122885.4万元，应用可选时总成本达到2115.338亿元。本研究设计的方法。基于祖父情形的东部、东北和中部地区减排分配比基于最优方法的减排任务承担更多，而西部地区则相反，承担的减排任务更少。

此外，与对标法相比，东部、中部和西部地区在优化配置法下可分别减少6865732、7330751、236826.5万元，东北地区需增加155133.2万元。此外，东部、东北和中部地区要承担比对标方式下更多的减排任务。总体而言，与Benchmarking方法相比，最优方法可为国家减少减排成本107861.88亿元。上述研究表明，优化方法下的减排配额可以大大降低总减排成本。

并且最小成本出现在最优方法中。有关分配方法的更多信息，我们提供了表 11。可以看出，在最优配置方式下，河北、山西、内蒙古、吉林、上海、江苏等地较祖父方式下需要降低成本，而北京、河北、内蒙古、吉林、上海,福建将比基准法下的成本降低。天津、辽宁、黑龙江、山东、河南、宁夏等地区在最优方法下必须付出更多的减排成本。这样的方法可以更公平、更合理地实现国家碳减排目标。

表 11。场景4中三种方法的比较（单位：MT和M元RMB）。

| 地区 | 减少祖父方法 | 祖父法成本 | 减少基准方法 | 基准方法的成本 | 减少最优方法 | 最佳方法的成本 |
|----|---------|-------------|---------|------------|---------|------------|
| 北京 | 33.353 | -2642847.88 | 29.859 | -2327059.0 | 2.003 | -138030.07 |
| 天津 | 54.502 | -424.75 | 53.561 | -415.12 | 60.570 | -489.86 |
| 河北 | 273.573 | 1054.81 | 149.049 | 505.89 | 315.180 | 1276.26 |

| 地区 | 减少祖父方法 | 祖父法成本 | 减少基准方法 | 基准方法的成本 | 减少最优方法 | 最佳方法的成本 |
|-----|----------|--------------|----------|------------|----------|------------|
| 山西 | 170.629 | 489.60 | 248.413 | 838.20 | 197.261 | 594.62 |
| 内蒙古 | 224.709 | -1460.65 | 225.492 | -1470.43 | 162.061 | -878.33 |
| 辽宁 | 174.457 | -2133.70 | 102.815 | -1111.57 | 187.456 | -2351.34 |
| 吉林 | 75.898 | 985.05 | 91.616 | 1257.81 | 102.001 | 1458.36 |
| 黑龙江 | 99.550 | -1979.82 | 89.110 | -1712.58 | 108.454 | -2224.68 |
| 上海 | 70.199 | -8533341.38 | 42.190 | -4745500.4 | 0.488 | -49440.39 |
| 江苏 | 274.986 | -2959.89 | 71.068 | -600.65 | 263.187 | -2785.85 |
| 浙江 | 139.927 | -3025.61 | 57.642 | -1078.36 | 171.954 | -3970.74 |
| 安徽 | 134.340 | -597.96 | 106.991 | -425.83 | 107.593 | -429.16 |
| 福建 | 83.431 | 54.93 | 50.876 | 29.38 | 86.285 | 57.56 |
| 江西 | 80.210 | -1894.85 | 90.180 | -2318.02 | 60.339 | -1258.47 |
| 山东 | 305.204 | -1619.62 | 82.581 | -367.17 | 367.462 | -2067.33 |
| 河南 | 188.915 | -586.41 | 90.740 | -246.44 | 224.273 | -735.84 |
| 湖北 | 116.982 | 2629.34 | 77.187 | 1566.27 | 133.864 | 3160.82 |
| 湖南 | 110.663 | -2192.14 | 73.203 | -1309.16 | 121.715 | -2493.90 |
| 粤 | 186.351 | -13323.85 | 41.801 | -2482.03 | 217.702 | -16319.54 |
| 广西 | 86.937 | -1809.42 | 98.474 | -2321.64 | 69.975 | -1298.91 |
| 海南 | 15.400 | 271.30 | 75.093 | -317.33 | 13.500 | 216.92 |
| 重庆 | 60.870 | -186.33 | 65.727 | -209.01 | 58.775 | -177.16 |
| 四川 | 116.685 | 3337.50 | 66.722 | 1648.57 | 121.400 | 3528.22 |
| 贵州 | 91.385 | 453.12 | 199.094 | 968.44 | 100.405 | 515.10 |
| 云南 | 68.254 | 1111.08 | 88.915 | 1568.26 | 92.317 | 1651.88 |
| 陕西 | 99.599 | -494.84 | 115.239 | -634.94 | 85.229 | -393.57 |
| 甘肃 | 57.178 | 284.36 | 142.294 | 546.15 | 60.491 | 307.72 |
| 青海 | 29.871 | 208.80 | 252.469 | 208.80 | 15.694 | 134.88 |
| 宁夏 | 56.100 | 209.08 | 465.364 | 209.08 | 39.354 | 128.10 |
| 新疆 | 138.329 | 1417.24 | 274.719 | 1417.24 | 71.495 | 780.87 |
| 全部的 | 3618.485 | -11198372.88 | 3618.485 | -7078815.6 | 3618.485 | -211533.84 |

这些结果也证实了碳排放的减少量与边际减排成本有关。上海、北京、广东等边际减排成本较高、减排潜力较低的省份往往减排量较小。此外，减排能力还与各地区的碳排放量和碳强度挂钩。对于碳排放量和碳强度较低的省份，虽然其边际减排成本可能并不高，但减排空间仍然有限。青海省和海南省就是这种情况。

5. 结论和政策影响结论

随着温室气体减排问题日益受到关注，制定高效、经济的二氧化碳减排配置方案是中国经济发展质量的重要战略。本文试图估算中国碳排放的减排成本，并构建最优减排策略以最小化综合成本，具有重要的现实意义。我们的研究结果可以总结如下：

首先，中国要完成二氧化碳减排任务，需要付出一定的牺牲经济增长的代价。样本期CO2影子价格平均值为15.914，经历了先下降后上升的过程。同时，CO2的影子价格在各省区之间存在较大差异，这意味着各地区之间碳减排的经济成本差异较大，各省承担相同的减排任务并不能使整体社会成本最小化。其次，地区之间的边际减排系数差异很大，因此面临着不同的碳减排困难。北京、上海、广州等经济水平高的地区边际减排系数高于经济水平低的地区，比如宁夏、甘肃、新疆。从这个意义上说，根据各地区的边际减排系数分配减排配额，可以大大降低经济成本，提高全社会的经济效率。第三，CO2减排的选择性分配表明，山东、河北、江苏、河南和山西等省将承担主体任务，以尽量减少总减排成本。与行政控制的“祖父法”和“标杆法”下的碳减排策略相比，更能降低综合成本，体现碳交易市场的效率和公平性。边际减排系数可以大大降低经济成本，提高全社会的经济效率。第三，CO2减排的选择性分配表明，山东、

河北、江苏、河南和山西等省将承担主体任务，以尽量减少总减排成本。与行政控制的“祖父法”和“标杆法”下的碳减排策略相比，更能降低综合成本，体现碳交易市场的效率和公平性。边际减排系数可以大大降低经济成本，提高全社会的经济效率。第三，CO2减排的选择性分配表明，山东、河北、江苏、河南和山西等省将承担主体任务，以尽量减少总减排成本。与行政控制的“祖父法”和“标杆法”下的碳减排策略相比，更能降低综合成本，体现碳交易市场的效率和公平性。

根据本文的实证结果，我们在实施碳减排策略时，从减少经济损失的角度提出以下政策建议。

首先，当政府旨在最大限度地降低碳减排成本时，一刀切的方法是有缺陷的，而且一直如此。它不应全面平均各省的减排任务，而应平衡效率和公平。具体来说，就是多分配低成本地区的减排任务，少分配高成本地区的减排任务。同时，可以允许高成本地区通过碳交易市场获得排放权，进行较小的减排甚至增加排放。其次，鉴于中国不同地区边际减排系数差异较大，可以将碳排放交易和行政控排的混合制度混合在一起，可以更有效地降低减排成本。此外，影子价格的区域差异表明，可以尝试更大范围的全国碳交易市场，而不是维持目前的试点省份。三是实现碳减排的宏观目标，各地区要加强区域合作，协同治理，相互借鉴成功的碳减排技术和经验。

作者贡献

Zhiwei Ao: Methodology, Software, Investigation, Rilong Fei: Conceptualization, Formal analysis, Review & Editing, Supervision, Haowei Jiang: Data acquisition, Writing - Original draft, Review & Editing, Lingxiao Cui: Writing - Review & Editing, 检查语言, Yixin Zhu: Review & Editing, 检查语言。

竞争利益声明

作者声明，他们没有已知的可能影响本文报告的工作的竞争经济利益或个人关系。

致谢

该研究得到中央高校基本科研业务费专项资金（[2022VI002-01](#)）和国家社会科学基金重大项目（[19ZDA054](#)）的支持。作者非常感谢编辑和匿名审稿人对本研究的专业和有益的评论。

推荐文章

数据可用性

使用的数据是保密的。

参考

[阿瑟顿等人, 2021 年](#) J. Atherton、WN Xie、LK Aditya、XC Zhou、G. Karmakar、J. Akroyd、S. Mosbach、MQ Lim、M. Kraft
碳税如何影响英国的发电构成？
申请 能源, 298 (2021 年)
[谷歌学术](#)

[新娘, 2020](#) P. 布里德尔
远不止是最优：关于维尔弗雷多·帕累托政治经济学手册的集译本
历史. 政治. 经济., 52 (2020 年), 第188 - 193页
[在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)

[曹等, 2021](#) Q. Cao , W. Kang , MJ Sajid , M. Cao
基于任务分配的中国碳减排效率优化研究
J. 清洁. 产品. , 299 (2021), 第126912条
 [查看PDF](#) [查看文章](#) [在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)

[Carlier 和 Dana, 2013 年](#) G. Carlier , RA 达纳
偏好不完全已知时的帕累托最优和均衡
J. 经济学. 理论. , 148 (2013 年), 第1606 - 1623页
 [查看PDF](#) [查看文章](#) [在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)

[Cecchini 等人, 2018 年](#) L. Cecchini、S. Venanzi、A. Pierri、M. Chiorri
翁布里亚（意大利）奶牛场的环境效率分析和二氧化碳减排成本估算：具有不良输出的 SBM-DEA 模型
J. 清洁. 产品. , 197 (2018 年), 第895 - 907页

 [查看PDF](#) [查看文章](#) [在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)

陈和贾, 2017 L. 陈, G. 贾

中国区域产业环境效率分析：基于数据包络分析（DEA）的方法
J. 清洁。产品。 , 142 (2017 年) , 第846 - 853页

 [查看PDF](#) [查看文章](#) [在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)

陈等, 2021 Y. Chen , MY Wang , CP Feng , HD Zhou , K. Wang

行业异质性和区域异质性下中国制造业全要素能效
资源。保护。回收。 , 168 (2021 年)

[谷歌学术](#)

崔等人, 2012 Y. Choi , N. Zhang , P. Zhou

中国能源相关二氧化碳排放的效率和减排成本：基于松弛的效率测量
申请 能源, 98 (2012) , pp. 198 - 208

 [查看PDF](#) [查看文章](#) [在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)

钟等人, 1997 年 YH Chung , R. Färe , S. Grosskopf

生产力和不良产出：定向距离函数方法
J.环境。管理。 , 51 (1997 年) , 第229 - 240页

 [查看PDF](#) [查看文章](#) [在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)

崔等, 2014 LB Cui , Y. Fan , L. Zhu , QH Bi

排放交易机制将如何为实现中国2020年碳强度降低目标节省成本？
申请 能源, 136 (2014) , pp. 1043 - 1052

 [查看PDF](#) [查看文章](#) [在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)

杜等, 2014 K. Du , H. Lu , K. Yu

中国潜在二氧化碳减排的来源：非参数元前沿方法
申请 能源, 115 (2014) , pp. 491 - 501

 [查看PDF](#) [查看文章](#) [在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)

杜等人, 2021 年 KR Du , YY Cheng , X. Yao

环境规制、绿色科技创新与产业结构升级：中国城市绿色转型之路
能源经济学。 , 98 (2021 年)

[谷歌学术](#)

杜李, 2019 杜可瑞,李建林

迈向绿色世界：绿色技术创新如何影响全要素碳生产率
能源政策。 , 131 (2019 年) , 第240 - 250页

 [查看PDF](#) [查看文章](#) [在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)

杜等, 2022 M. Du , R. Feng , Z. Chen

低碳试点城市的蓝天防御：碳排放效率的空间溢出视角, 卷。846 ,整体环境科学(2022)

杜根等人, 2022 年 A. Dugan 、 J. Mayer 、 A. Thaller 、 G. Bachner 、 KW Steininger

制定低碳客运一揽子政策：权衡和协同作用的混合方法分析
生态学。经济。 , 193 (2022 年)

[谷歌学术](#)

Fare 等人, 1993 年 R. Fare 、 S. Grosskopf 、 C. Lovell 、 S. Yaisawarng

非期望产出的影子价格推导：距离函数法
经济学牧师。状态。 , 75 (1993) , p. 374

[交叉引用](#) [谷歌学术](#)

Fare 等人, 2008 年 R. Fare , S. Grosskopf , V. Zelenyuk

Nerlovian 利润指标的聚合
申请 经济。莱特。 , 15 (2008 年) , 第845 - 847页

[交叉引用](#) [在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)[Fare 和 Karagiannis, 2014](#) R. Fare , G. Karagiannis

Radial and directional measures of the rate of technical change

J. Econ., 112 (2014), pp. 183-199

[CrossRef](#) [View in Scopus](#) [Google Scholar](#)[Feng et al., 2022](#) R. Feng, C. Shen, L.X. Huang, X. Tang

Does Trade in Services Improve Carbon Efficiency? -Analysis Based on International Panel Data, vol. 174, Technol Forecast Soc (2022)

[Fukuyama and Weber, 2009](#) H. Fukuyama, W.L. Weber

A directional slacks-based measure of technical inefficiency

Soc. Econ. Plann. Sci., 43 (2009), pp. 274-287

 [查看PDF](#) [查看文章](#) [View in Scopus](#) [Google Scholar](#)[Granado-Diaz et al., 2020](#) R. Granado-Diaz, J.A. Gomez-Limon, M. Rodriguez-Entrena, A.J. Villanueva

Spatial analysis of demand for sparsely located ecosystem services using alternative index approaches

Eur. Rev. Agric. Econ., 47 (2020), pp. 752-784

[View in Scopus](#) [Google Scholar](#)[Hu and Xiong, 2021](#) W. Hu, Z.X. Xiong

Do stringent environmental regulations help improve the total factor carbon productivity? Empirical evidence from China's industrial sectors

Appl. Econ., 53 (2021), pp. 6398-6411

[CrossRef](#) [View in Scopus](#) [Google Scholar](#)[Lameh et al., 2022](#) M. Lameh, D.M. Al-Mohannadi, P. Linke

Minimum marginal abatement cost curves (Mini-MAC) for CO2 emissions reduction planning

Clean Technol. Environ. Policy, 24 (2022), pp. 143-159

[CrossRef](#) [View in Scopus](#) [Google Scholar](#)[Lin and Zhu, 2021](#) B.Q. Lin, J.P. Zhu

Impact of China's new-type urbanization on energy intensity: a city-level analysis

Energy Econ., 99 (2021)

[Google Scholar](#)[Liu et al., 2019](#) H.X. Liu, K.R. Du, J.L. Li

An improved approach to estimate direct rebound effect by incorporating energy efficiency: a revisit of China's industrial energy demand

Energy Econ., 80 (2019), pp. 720-730

 [查看PDF](#) [查看文章](#) [View in Scopus](#) [Google Scholar](#)[Liu et al., 2022](#) K. Liu, D. Shi, W. Xiang, W. Zhang

How Has the Efficiency of China's Green Development Evolved? an Improved Non-radial Directional Distance Function Measurement, vol. 815, Science of The Total Environment (2022)

[Lopez et al., 2022](#) L.A. Lopez, M.A. Tobarra, M.A. Cadarso, N. Gomez, I. Cazcarro

Eating local and in-season fruits and vegetables: carbon-water-employment trade-offs and synergies

Ecol. Econ., 192 (2022)

[Google Scholar](#)[Mahlberg and Sahoo, 2011](#) B. Mahlberg, B.K. Sahoo

Radial and non-radial decompositions of Luenberger productivity indicator with an illustrative application

Int. J. Prod. Econ., 131 (2011), pp. 721-726

 [查看PDF](#) [查看文章](#) [View in Scopus](#) [Google Scholar](#)[Molinos-Senante et al., 2016](#) M. Molinos-Senante, M. Mocholi-Arce, R. Sala-Garrido

Efficiency assessment of water and sewerage companies: a disaggregated approach accounting for service quality

Water Resour. Manag., 30 (2016), pp. 4311-4328

[CrossRef ↗](#) [View in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Moz-Christofoletti and Pereda, 2021](#) M.A. Moz-Christofoletti, P.C. Pereda

Winners and losers: the distributional impacts of a carbon tax in Brazil

Ecol. Econ., 183 (2021)

[Google Scholar ↗](#)

[Nong et al., 2021](#) D. Nong, P. Simshauser, D.B. Nguyen

Greenhouse gas emissions vs CO₂ emissions: comparative analysis of a global carbon tax

Appl. Energy, 298 (2021)

[Google Scholar ↗](#)

[Reanos and Lynch, 2022](#) M.A.T. Reanos, M.A. Lynch

Measuring carbon tax incidence using a fully flexible demand system. Vertical and horizontal effects using Irish data

Energy Pol., 160 (2022)

[Google Scholar ↗](#)

[Rogge et al., 2011](#) K.S. Rogge, M. Schneider, V.H. Hoffmann

The innovation impact of the EU Emission Trading System – findings of company case studies in the German power sector

Ecol. Econ., 70 (2011), pp. 513-523

 [查看PDF](#) [查看文章](#) [View in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Sadayuki and Arimura, 2021](#) T. Sadayuki, T.H. Arimura

Do regional emission trading schemes lead to carbon leakage within firms? Evidence from Japan

Energy Econ., 104 (2021)

[Google Scholar ↗](#)

[Shen et al., 2021](#) Z.Y. Shen, K.X. Bai, T.Y. Hong, T. Balezentis

Evaluation of carbon shadow price within a non-parametric meta-frontier framework: the case of OECD, ASEAN and BRICS

Appl. Energy, 299 (2021)

[Google Scholar ↗](#)

[Shetty et al., 2012](#) U. Shetty, T.P.M. Pakkala, T. Mallikarjunappa

A modified directional distance formulation of DEA to assess bankruptcy: an application to IT/ITES companies in India

Expert Syst. Appl., 39 (2012), pp. 1988-1997

 [查看PDF](#) [查看文章](#) [View in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Shi et al., 2022](#) B. Shi, N. Li, Q. Gao, G. Li

Market incentives, carbon quota allocation and carbon emission reduction: evidence from China's carbon trading pilot policy

J. Environ. Manag., 319 (2022)

[Google Scholar ↗](#)

[Silva et al., 2019](#) F.D. Silva, R.K. Perrin, L.E. Fulginiti

The opportunity cost of preserving the Brazilian Amazon forest

Agr Econ-Blackwell, 50 (2019), pp. 219-227

[CrossRef ↗](#) [View in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Song and Wang, 2018](#) M. Song, J. Wang

Environmental efficiency evaluation of thermal power generation in China based on a slack-based endogenous directional distance function model

Energy, 161 (2018), pp. 325-336

 [查看PDF](#) [查看文章](#) [View in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Song et al., 2022](#) Y.L. Song, H.D. Wang, Y. Ma, X. Yin, F. Cao

Energetic, economic, environmental investigation of carbon dioxide as the refrigeration alternative in new energy bus/railway vehicles' air conditioning systems

Appl. Energy, 305 (2022)

[Google Scholar ↗](#)

[Sun et al., 2016](#) Z. Sun, R. Luo, D. Zhou

Optimal path for controlling sectoral CO2 emissions among China's regions: a centralized DEA approach

Sustainability, 8 (2016), p. 28

 [查看PDF](#) [查看文章](#) [CrossRef ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Tang et al., 2016](#) K. Tang, A. Hailu, M.E. Kragt, C. Ma

Marginal abatement costs of greenhouse gas emissions: broadacre farming in the Great Southern Region of Western Australia

Aust. J. Agric. Resour. Econ., 60 (2016), pp. 459-475

[CrossRef ↗](#) [View in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Tang et al., 2020](#) K. Tang, A. Hailu, Y. Yang

Agricultural chemical oxygen demand mitigation under various policies in China: a scenario analysis

J. Clean. Prod., 250 (2020)

[Google Scholar ↗](#)

[Tang et al., 2021a](#) K. Tang, Y. Liu, D. Zhou, Y. Qiu

Urban carbon emission intensity under emission trading system in a developing economy: evidence from 273 Chinese cities

Environ. Sci. Pollut. Res., 28 (2021), pp. 5168-5179

[CrossRef ↗](#) [View in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Tang and Ma, 2022](#) K. Tang, C. Ma

The cost-effectiveness of agricultural greenhouse gas reduction under diverse carbon policies in China

China Agric. Econom. Rev. (2022), [10.1108/CAER-01-2022-0008 ↗](#)

[Google Scholar ↗](#)

[Tang et al., 2021b](#) K. Tang, M. Wang, D. Zhou

Abatement potential and cost of agricultural greenhouse gases in Australian dryland farming system

Environ. Sci. Pollut. Res., 28 (2021), pp. 21862-21873

[CrossRef ↗](#) [View in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Tang et al., 2021c](#) K. Tang, Y. Zhou, X. Liang, D. Zhou

The effectiveness and heterogeneity of carbon emissions trading scheme in China

Environ. Sci. Pollut. Res., 28 (2021), pp. 17306-17318

[CrossRef ↗](#) [View in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Tarufelli et al., 2021](#) B. Tarufelli, B. Snyder, D. Dismukes

The potential impact of the US carbon capture and storage tax credit expansion on the economic feasibility of industrial carbon capture and storage

Energy Pol., 149 (2021)

[Google Scholar ↗](#)

[Tavana et al., 2021](#) M. Tavana, M. Izadikhah, M. Toloo, R. Roostaei

A new non-radial directional distance model for data envelopment analysis problems with negative and flexible measures

Omega-Int. J. Manag. S, 102 (2021)

[Google Scholar ↗](#)

Tsionas, 2018 M.G. Tsionas

A Bayesian approach to find Pareto optima in multiobjective programming problems using Sequential Monte Carlo algorithms

Omega-Int. J. Manag. S, 77 (2018), pp. 73-79

 [查看PDF](#) [查看文章](#) [View in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

Wächter, 2013 P. Wächter

The usefulness of marginal CO₂-e abatement cost curves in Austria

Energy Pol., 61 (2013), pp. 1116-1126

 [查看PDF](#) [查看文章](#) [View in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

Wang et al., 2013 H. Wang, P. Zhou, D.Q. Zhou

Scenario-based energy efficiency and productivity in China: a non-radial directional distance function analysis

Energy Econ., 40 (2013), pp. 795-803

 [查看PDF](#) [查看文章](#) [View in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

Wang et al., 2020 Yong Wang, Hanxiao Yang, Ruixin Sun

Effectiveness of China's provincial industrial carbon emission reduction and optimization of carbon emission reduction paths in "lagging regions": efficiency-cost analysis

J. Environ. Manag. (2020)

[Google Scholar ↗](#)

Wang et al., 2021 M. Wang, H. Yu, Y.K. Yang, X.Y. Lin, H.J. Guo, C.E. Li, Y. Zhou, R. Jing

Unlocking emerging impacts of carbon tax on integrated energy systems through supply and demand co-optimization

Appl. Energy, 302 (2021)

[Google Scholar ↗](#)

Wu et al., 2021 J. Wu, H. Xu, K. Tang

Industrial agglomeration, CO₂ emissions and regional development programs: a decomposition analysis based on 286 Chinese cities

Energy, 225 (2021)

[Google Scholar ↗](#)

Wu, 2022 Q. Wu

Price and scale effects of China's carbon emission trading system pilots on emission reduction

J. Environ. Manag., 314 (2022)

[Google Scholar ↗](#)

Xian et al., 2020 Y. Xian, K. Wang, Y.-M. Wei, Z. Huang

Opportunity and marginal abatement cost savings from China's pilot carbon emissions permit trading system: simulating evidence from the industrial sectors

J. Environ. Manag., 271 (2020)

[Google Scholar ↗](#)

Xie et al., 2021 B.-C. Xie, X.-Y. Tan, S. Zhang, H. Wang

Decomposing CO₂ emission changes in thermal power sector: a modified production-theoretical approach

J. Environ. Manag., 281 (2021)

[Google Scholar ↗](#)

Yang and Tang, 2017 Lin Yang, Kai Tang, et al.

Regional eco-efficiency and pollutants' marginal abatement costs in China: a parametric approach

J. Cleaner Prod. (2017)

[Google Scholar ↗](#)[Yang et al., 2018](#) L. Yang, Y. Yang, X. Zhang, K. Tang

Whether China's industrial sectors make efforts to reduce CO2 emissions from production? - a decomposed decoupling analysis

Energy, 160 (2018), pp. 796-809

 [查看PDF](#) [查看文章](#) [CrossRef ↗](#) [Google Scholar ↗](#)[Yao et al., 2015](#) X. Yao, H. Zhou, A. Zhang, A. Li

Regional energy efficiency, carbon emission performance and technology gaps in China: a meta-frontier non-radial directional distance function analysis

Energy Pol., 84 (2015), pp. 142-154

 [查看PDF](#) [查看文章](#) [View in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)[Yu et al., 2022](#) S.Y. Yu, Y.K. Chen, L.C. Pu, Z. Chen

The CO2 cost pass-through and environmental effectiveness in emission trading schemes

Energy, 239 (2022)

[Google Scholar ↗](#)[Zhang et al., 2021](#) N. Zhang, X.H. Huang, Y.X. Liu

The Cost of Low-Carbon Transition for China's Coal-Fired Power Plants: A Quantile Frontier Approach, vol. 169, Technol Forecast Soc (2021)

[Zhang et al., 2013](#) N. Zhang, P. Zhou, Y. Choi

Energy efficiency, CO2 emission performance and technology gaps in fossil fuel electricity generation in Korea: a meta-frontier non-radial directional distance function analysis

Energy Pol., 56 (2013), pp. 653-662

 [查看PDF](#) [查看文章](#) [View in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)[Zhang et al., 2018](#) Y.J. Zhang, Y.F. Sun, J. Huang

Energy efficiency, carbon emission performance, and technology gaps: evidence from CDM project investment

Energy Pol., 115 (2018), pp. 119-130

 [查看PDF](#) [查看文章](#) [CrossRef ↗](#) [Google Scholar ↗](#)[Zhou et al., 2020](#) D. Zhou, X. Liang, Y. Zhou, K. Tang

Does emission trading boost carbon productivity? Evidence from China's pilot emission trading scheme

Int. J. Environ. Res. Publ. Health, 17 (2020), p. 5522

[CrossRef ↗](#) [Google Scholar ↗](#)[Zhou et al., 2016](#) D.Q. Zhou, Q.W. Wang, B. Su, P. Zhou, L.X. Yao

Industrial energy conservation and emission reduction performance in China: a city-level nonparametric analysis

Appl. Energy, 166 (2016), pp. 201-209

 [查看PDF](#) [查看文章](#) [Google Scholar ↗](#)[Zhou et al., 2012](#) P. Zhou, B.W. Ang, H. Wang

Energy and CO2 emission performance in electricity generation: a non-radial directional distance function approach

Eur. J. Oper. Res., 221 (2012), pp. 625-635

 [查看PDF](#) [查看文章](#) [View in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)[Zhou et al., 2014](#) P. Zhou, Z.R. Sun, D.Q. Zhou

Optimal path for controlling CO2 emissions in China: a perspective of efficiency analysis

Energy Econ., 45 (2014), pp. 99-110

 [查看PDF](#) [查看文章](#) [View in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)[Zhou and Wang, 2016](#) P. Zhou, M. Wang

Carbon dioxide emissions allocation: a review

Ecol. Econ., 125 (2016), pp. 47-59

 [查看PDF](#) [查看文章](#) [View in Scopus ↗](#) [Google Scholar ↗](#)

[Zhu and Lin, 2021](#) 朱若琪,林宝琪 __

中国采矿业能源和碳绩效改善：来自“十一五”和“十二五”规划的证据
能源政策。 , 154 (2021 年)

[谷歌学术 ↗](#)

被 (0) 引用

- 1
- 主要研究方向为能源政策与资源环境经济学。他在能源、可再生和可持续能源评论、欧洲农学杂志、技术预测和社会变革、土地利用政策、农业
- 个
- 用水管理和资源政策上发表了多篇论文。

© 2022 爱思唯尔有限公司。保留所有权利。



版权所有 © 2023 Elsevier BV 或其许可人或贡献者。
ScienceDirect® 是 Elsevier BV 的注册商标

