








基于距离函数的中国二氧化碳减排边际成本经济学研究评述

马春波^a, Atakelty 海陆, 超英 优^b  

展示更多 

 大纲 |  分享  引用

<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.104533> 

获得权利和内容 

强调

- 回顾了基于DF的中国CO₂排放MAC估算的文献。
- 讨论了现有研究的一些重要的方法论问题。
- 解释了不同方法选择的后果和局限性。

抽象的

在过去几年中, 大量文献迅速涌现, 这些文献使用参数或非参数距离函数方法估算中国二氧化碳(CO₂)排放的边际减排成本或影子价格。这在很大程度上是由于中国已成为世界上最大的碳排放国, 因此面临越来越大的国内和国际减排压力。迫切需要政策来模拟和预测各种缓解情景的成本负担。关于CO₂边际减排成本的一致信息排在解决这一需求方面发挥着至关重要的作用。然而, 现有文献存在各种问题, 严重削弱了这些研究可能为合理决策提供的科学支持。本文对这一迅速兴起的文献进行了全面而批判性的回顾, 并确定了最需要学者关注的重要研究方向。



JEL分类

Q52; Q53; Q54; Q58; D24; D61

关键词

边际减排成本; 二氧化碳排放量; 距离函数; 影子价格; 中国

1. 介绍

中国已成为全球最大的碳排放国, 国内外减排压力不断加大。因此, 迫切需要政策来模拟和预测各种缓解情景的成本负担。这是因为, 关于二氧化碳(CO₂)排放的边际减排成本(MAC)以及预先指定的减缓目标的总合规成本的信息在设定减缓目标水平和承诺必要资源方面起着重要作用。

然而, 估算中国 CO₂ 减排成本的迅速涌现的文献遇到了一些问题, 这些问题严重削弱了这些研究可能为决策者提供的有效性和科学支持。Kesicki 和 Ekins (2012 年) 对 MAC 的使用或滥用提出警告, 并概述了一些需要解决的重要问题: 忽略温室气体排放的附带好处减少, 以有限的方式处理不确定性, 排除跨期动态和基本假设缺乏必要的透明度。基于减排措施的个别评估的 MAC 曲线存在其他缺点, 例如未考虑相互作用和非财务成本、可能不一致的基线、重复计算和对行为方面的有限处理。

估计 CO₂ 排放的 MAC 的研究大致有两条路线: 基于综合评估模型 (IAM) 的研究和基于距离函数 (DF) 的研究。虽然自 20 世纪 80 年代初期以来各种 IAM 已被用于研究 CO₂ 的社会成本 (例如 Nordhaus, 1982 年; Edmonds 和 Reilly, 1983 年), 但使用 DF 估算不良产出的 MAC 的方法开发得晚得多。使用各种 DF 估计 MAC 的开创性工作包括 Färe 等人。 (1993), Turner (1995), Boyd 等人。 (1996)、Coggins 和 Swinton (1996)、Hailu 和 Veeman (2000) 以及 Färe 等人。 (2005)。尽管 Kesicki 和 Ekins (2012) 中讨论的问题主要是指基于 IAM 的 MAC 研究, 但一些包括省略辅助收益、理论假设缺乏透明度和重复计算等问题也适用于基于 DF 的 MAC 研究。本着 Kesicki 和 Ekins (2012 年) 的精神, 本文对估算中国 CO₂ 排放量 MAC 的文献进行了全面而批判性的回顾。具体来说, 由于三个原因, 该综述排除了基于 IAM 的研究并侧重于基于 DF 的研究。

首先, 基于 IAM 的 MAC 研究文献得到了很好的调查 (Repetto 和 Austin, 1997 年; Lasky, 2003 年; Fischer 和 Morgenstern, 2006 年; Kuik 等人, 2009 年; Vermont 和 De Cara, 2010 年)。IAM 中的假设及其对估计成本的影响也得到系统评估 (Weyant 等人, 2006 年; Hope, 2008 年; Nordhaus, 2008 年; Anthoff 和 Tol, 2013 年)。

其次, 使用两种不同方法估计的 MAC 不能直接比较。借助 IAM, MAC 通常会在一组假设下针对各种未来缓解情景进行估算, 而 DF 使用历史数据来分析过去和现在。因此, 有一些关键问题需要审查, 这些问题是基于 DF 的 MAC 研究的文献所独有的。

第三, 在过去十年左右的时间里, 关于估算中国 CO₂ 排放量 MAC 的文献迅速涌现, 这些文献主要以基于 DF 的研究为主。有些人采用了参数化方法 (例如 Chen, 2010 年; Liu 等人, 2011 年; Lee 和 Zhang, 2012 年; Wei 等人, 2013 年; Wang 等人, 2014 年; Wei, 2014 年; Zhang 等人, 2014 年; Chen 和 Yang, 2015 年; Zhou 等人, 2015 年; Du 等人, 2015a; Du 等人, 2015b; Du 和 Mao, 2015 年; He, 2015 年; Du 等人, 2016 年; Du 等人, 2016 年; 马海璐, 2016; 唐等, 2016; 海陆和马, 2017a; 海陆和马, 2017b; Wang 等人, 2017 年), 而其他人则对 DF 进行了非参数估计 (Chen, 2010 年; Chen, 2011 年; Wang 等人, 2011 年; Choi 等人, 2012 年; Wei 等人, 2012 年; Yuan 等人, 2012; Chen, 2013; Wang 和 Wei, 2014; Wei 2014; Zhang 和 Xie, 2015; Zhou 等, 2015; Sun 等, 2016; Wang 等, 2016a; 王等, 2016b; 马和吴, 2017 年; 吴和马, 2017)。尽管使用 DF 估计中国的 MAC 越来越受欢迎, 但还没有对这种不断增长的文献进行系统的审查。

在某种程度上, 基于 DF 的研究的流行源于其易于应用和现成的软件包。然而, 易用性对于训练有素的人来说是一把双刃剑。任意的研究实践可能会严重削弱估计的有效性, 从而削弱这些研究本可以为决策提供的科学支持。因此, 不一致的结果和不正确的解释可能会提供有关减排成本和政策建议的误导甚至错误信息。

在论文的第二部分, 我们简要描述了基于 DF 的 MAC 估计的理论框架。第三部分回顾了一些困扰快速增长的文献的重要方法论问题。有些为研究人员所熟知, 但从未进行过系统审查, 而另一些则在很大程度上被研究人员忽略了。第四部分随后讨论了实证工作中不同方法选择的一些后果, 以及估计 MAC 的相关解释和局限性。通过彻底和批判性地审查这些问题, 本文还希望确定对研究人员具有直接重要性的研究方向。

2. MAC 估计的理论框架

MAC 衡量理想产出和不良产出之间的权衡, 或者简单地, 为减少一个单位的不良产出而放弃的理想产出的价值。在文献中, MAC 通常被称为影子价格或理想产出与不良产出之间的边际转换率 (Färe 等人, 1993 年; Swinton, 1998 年; Färe 等人, 2005 年; Sueyoshi 和 Goto, 2012 年; Sueyoshi 和元, 2016 年)。

通常, MAC 的估计始于环境生产技术前沿的构建。我们审查的大多数初步研究都采用了将污染处理为弱可支配产出的技术的表述。对于使用输入向量的生产者 $x = (x_1, \dots, x_N) \in \mathcal{R}_+^N$ 产生一个理想的向量 $y = (y_1, \dots, y_M) \in \mathcal{R}_+^M$ 和不良输出 $b = (b_1, \dots, b_J) \in \mathcal{R}_+^J$, 生产技术由以下生产可能性集描述:

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

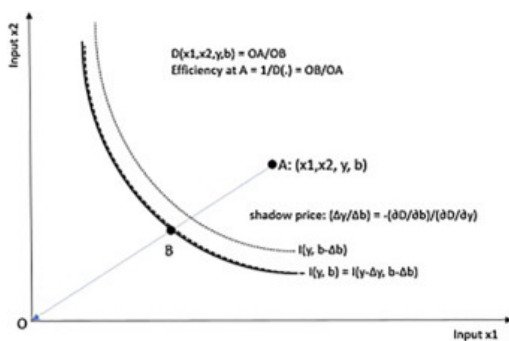
除了传统的新古典主义假设, 例如输入和理想输出的紧凑性和自由可处置性之外, 该技术通常对输出集强加两个关键假设, 即零联合假设和弱可处置性假设。零联合假设表明, 合意的输出是与非合意的输出共同产生的。形式上, 它假设如果 $(y, b) \in P(x)$ 和 $b = 0$, 然后 $y = 0$, 这意味着如果不产生不期望的输出, 就不能产生期望的输出。弱可处置性假设假定按比例减少可取和不可取的输出是可行的。形式上, 它假设如果 $(y, b) \in P(x)$ 和 $0 \leq \theta \leq 1$, 然后 $(\theta y, \theta b) \in P(x)$, 这意味着减少不良输出的成本很高。

给定生产可能性集，可以定义不同的距离函数。Shephard 的径向输入距离函数 (IDF) 和输出距离函数 (ODF) 以及输出方向距离函数 (DDF) 是文献中最常用的 DF。IDF 被定义为输入向量可以按比例收缩同时仍然能够产生输出向量的最大量：

$$D_I(x, y, b) = \sup\{\theta : (y, b, x/\theta) \in P(x)\} \quad (2)$$

根据定义，IDF 值是基于投入的技术效率衡量指标的倒数。IDF 值为 1 表示该单元在技术上是高效的，而大于 1 的值表示它是低效的。Hailu 和 Veeman (2000) 提供了 IDF 属性的详细描述。

出于说明目的，图 1 描述了 IDF 如何在生产技术的情况下以不同方式衡量决策单元 (DMU) 的效率，其中两个输入用于产生理想的输出 y 和不良的输出 b 。技术效率是根据在给定技术前沿的情况下可以减少的比例来定义的。对于在 A 点运行以产生 y 和 b 水平的期望输出的生产者或决策单元 (DMU)，输入距离函数值是 OA/OB ，即点处的输入束 (x_1, x_2) 的因子 A 可以按比例减少到技术前沿，在这种情况下是等产量线 (y, b) 。A 的技术效率是 IDF 值的倒数，即 OB/OA 。不受欢迎的产出的影子价格是根据技术隐含的权衡来定义的。减少不需要的产出代价高昂，意味着投入需求或等产量线向上移动，如图 1 所示。保持输入需求不变（即保持等产量在其原始位置）所需的相应的理想输出变化是不希望的输出减少的影子价格。并且如图所示，这个影子价格可以计算为输入距离函数的导数与不希望和期望输出的比值。当乘以理想产出的价格时，该比率提供了以货币形式计算的边际减排成本 (MAC) 的估算值。



下载: 下载高分辨率图像 (43KB)

下载: 下载全尺寸图像

图 1。IDF 的生产效率。

Shephard ODF 被定义为输出向量可以按比例缩小并且仍然可以使用给定输入向量生成的最小量：

$$D_o(x, y, b) = \inf\{\theta : ((y, b)/\theta) \in P(x)\} \quad (3)$$

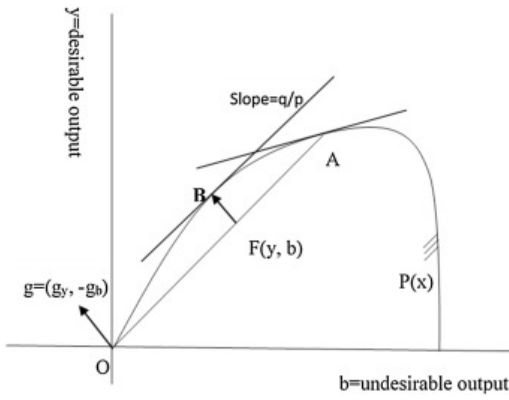
根据定义，ODF 值与基于产出的技术效率衡量标准相同。ODF 值为 1 表示该单元在技术上是高效的，而小于 1 的值表示它是低效的。Hailu 和 Veeman (2001b) 将 ODF 和 IDF 作为环境敏感生产力分析的两种替代方法进行了描述和比较。

面向输出的方向距离函数 (DDF) 概括了 ODF。它是根据沿预先指定方向的平移来定义的 $g = (g_y, -g_b) \in \mathbb{R}^M \times \mathbb{R}^J$ ，并测量输入输出向量可以转换并保持技术可行性的最大量：

$$\vec{D}_o(x, y, b; g_y, -g_b) = \sup\{\beta : (y + \beta g_y, b - \beta g_b) \in P(x)\} \quad (4)$$

当单元处于边界或有效时，DDF 取零值。DDF 的正值表示该点效率低下。效率的方向性度量可以定义为 DDF 值的负值。Färe 等人。 (1993) 和钱伯斯等人。 (1996) 提供了 ODF 和 DDF 属性的详细描述。

为了便于说明，图 2 描述了 ODF 和 DDF 如何在一种理想输出 y 和一种非理想输出 b 的情况下以不同方式衡量决策单元 (DMU) 的效率。具有输出束 (y, b) 的 DMU F 在输出集的边界之下，这意味着它的生产效率低下。DMU F 的效率用 OF/OA 和 ODF 来衡量。如果期望产出和非期望产出都增加了 OA/OF 因子，也就是说，如果产出束 (y, b) 按比例扩展到 A 点，那么生产将处于边界（有效）。DDF 概括了 ODF。效率可以沿从 F 点到生产边界的任何方向定义。例如，在图 2，如果输出束 (y, b) 沿预先指定的方向 $(g_y, -g_b)$ 移动到点 B，则生产将被判断为有效。请注意，无论选择的 DF 如何，有效点始终是位于生产前沿。



下载: 下载高分辨率图像 (87KB)

下载: 下载全尺寸图像

图 2。ODF 和 DDF 的生产效率。

如前所述，一旦定义了距离函数，就可以利用距离函数与收入函数或成本函数之间的对偶性来获得不良产出的MAC（即影子价格）。假设第 m 个期望输出的价格 p^m 被观察到，MAC 作为第 j 个不良输出的影子价格 q^j 可以从以下公式推导出：

$$\begin{aligned} IDF: \frac{q^j}{p^m} &= -\frac{\partial D^I(x, y, b)/\partial b^j}{\partial D^I(x, y, b)/\partial y^m} \\ ODF: \frac{q^j}{p^m} &= -\frac{\partial D^O(x, y, b)/\partial b^j}{\partial D^O(x, y, b)/\partial y^m} \\ DDF: \frac{q^j}{p^m} &= -\frac{\partial \vec{D}_o(x, y, b; g_y, -g_b)/\partial b^j}{\partial \vec{D}_o(x, y, b; g_y, -g_b)/\partial y^m} \end{aligned} \quad (5)$$

期望产出和非期望产出的相对影子价格等于距离函数对产出的偏导数之比，简单地讲就是期望产出和非期望产出之间的边际转换率。在图 2 中，与生产前沿上的 A 点和 B 点相切的直线的斜率分别表示在 ODF 和 DDF 下产出束 $F(y, b)$ 的相对影子价格。

在文献中，参数和非参数估计方法都被用于计算效率得分和 DF 的偏导数。对于参数估计，需要指定 DF 的函数形式。IDF 和 ODF 通常被指定为具有 translog 函数形式 (Christensen et al., 1973)，而 DDF 通常被指定为具有二次函数形式以满足平移特性 (Chambers, 1998)。形式上，第 k 个 DMU 的输入和输出数据的 translog 和二次函数形式可以指定如下：

$$\begin{aligned} \ln D(x^k, y^k, b^k) &= \alpha_0 + \sum_{n=1}^N \alpha_n \ln x_{nk} + \sum_{m=1}^M \beta_m \ln y_{mk} + \sum_{j=1}^J \gamma_j \ln b_{jk} \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^N \alpha_{nn'} \ln x_{nk} \ln x_{n'k} + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^M \beta_{mm'} \ln y_{mk} \ln y_{m'k} \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{j=1}^J \sum_{j'=1}^J \gamma_{jj'} \ln b_{jk} \ln b_{j'k} + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \delta_{nm} \ln x_{nk} \ln y_{mk} + \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J \eta_{nj} \ln x_{nk} \ln b_{jk} \\ &+ \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J \mu_{mj} \ln y_{mk} \ln b_{jk} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
 \vec{D}_o(x_k, y_k, b_k; g) &= \alpha_0 + \sum_{n=1}^N \alpha_n x_{nk} + \sum_{m=1}^M \beta_m y_{mk} + \sum_{j=1}^J \gamma_j b_{jk} + \frac{1}{2} \\
 &\sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^N \alpha_{nn'} x_{nk} x_{n'k} \\
 &+ \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^M \beta_{mm'} y_{mk} y_{m'k} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^J \sum_{j'=1}^J \gamma_{jj'} b_{jk} b_{j'k} + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \delta_{nm} x_{nk} y_{mk} + \\
 &\sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J \eta_{nj} x_{nk} b_{jk} \\
 &+ \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J \mu_{mj} y_{mk} b_{jk}
 \end{aligned} \tag{7}$$

一旦指定了函数形式, 通常会通过求解Aigner 和 Chu (1968)提出的线性规划模型来估计 DF 的参数, 该模型旨在最小化估计距离函数与其边界的偏差之和。应施加约束以反映 DF 的特性, 例如可行性、单调性、同质性、平移和对称性等。形式上, IDF、ODF 和 DDF 的线性规划模型指定为:

$$IDF : \min \sum_{k=1}^K [\ln D^I(x^k, y^k, b^k) - \ln 1] \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. (i)} & \ln D^I(x^k, y^k, b^k) \geq 0; k = 1, \dots, K \\ \text{(ii)} & \partial \ln D^I(x^k, y^k, b^k) / \partial y^{mk} \leq 0; m = 1, \dots, M, k = 1, \dots, K \\ \text{(iii)} & \partial \ln D^I(x^k, y^k, b^k) / \partial b^{jk} \geq 0; j = 1, \dots, J, k = 1, \dots, K \\ \text{(iv)} & \partial \ln D^I(x^k, y^k, b^k) / \partial x^{nk} \geq 0; n = 1, \dots, N, k = 1, \dots, K \\ \text{(v)} & \sum_{n=1}^N \alpha^n = 1 \\ & \sum_{n=1}^N \beta^{nm'} = 0, n' = 1, 2, \dots, N \\ & \sum_{n=1}^N \delta^{nm} = 0, m = 1, 2, \dots, M \\ & \sum_{n=1}^N \eta^{nj} = 0, j = 1, 2, \dots, J \\ \text{(vi)} & \alpha^{nn'} = \alpha^{n'n}; n \neq n' \\ & \beta^{mm'} = \beta^{m'm}; m \neq m' \\ & \gamma^{jj'} = \gamma^{j'j}; j \neq j' \end{aligned}$$

$$ODF : \min \sum_{k=1}^K [\ln 1 - \ln D^O(x^k, y^k, b^k)] \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. (i)} & \ln D^O(x^k, y^k, b^k) \leq 0; k = 1, \dots, K \\ \text{(ii)} & \partial \ln D^O(x^k, y^k, b^k) / \partial y^{mk} \geq 0; m = 1, \dots, M, k = 1, \dots, K \\ \text{(iii)} & \partial \ln D^O(x^k, y^k, b^k) / \partial b^{jk} \leq 0; j = 1, \dots, J, k = 1, \dots, K \\ \text{(iv)} & \partial \ln D^O(x^k, y^k, b^k) / \partial x^{nk} \leq 0; n = 1, \dots, N, k = 1, \dots, K \\ \text{(v)} & \sum_{m=1}^M \beta^m + \sum_{j=1}^J \gamma^j = 1 \\ & \sum_{m'=1}^M (\beta^{mm'} + \sum_{j=1}^J \mu^{mj}) = 0, m = 1, 2, \dots, M \\ & \sum_{m=1}^M \mu^{mj} + \sum_{j'=1}^J \gamma^{jj'} = 0, j = 1, 2, \dots, J \\ & \sum_{m=1}^M \delta^{nm} + \sum_{j=1}^J \eta^{nj} = 0, n = 1, 2, \dots, N \\ \text{(vi)} & \alpha^{nn'} = \alpha^{n'n}; n \neq n' \\ & \beta^{mm'} = \beta^{m'm}; m \neq m' \\ & \gamma^{jj'} = \gamma^{j'j}; j \neq j' \end{aligned}$$

(10)

$$\begin{aligned}
DDF : \min & \sum_{k=1}^K (\vec{D}_o(x_k, y_k, b_k; g) - 0) \\
\text{s.t.} & (i) \vec{D}_o(x_k, y_k, b_k; g) \geq 0, k = 1, \dots, K \\
& (ii) \frac{\partial \vec{D}_o(x_k, y_k, b_k; g)}{\partial b^{jk}} \geq 0, j = 1, \dots, J; k = 1, \dots, K \\
& (iii) \frac{\partial \vec{D}_o(x_k, y_k, b_k; g)}{\partial y^{mk}} \leq 0, m = 1, \dots, M; k = 1, \dots, K \\
& (iv) \frac{\partial \vec{D}_o(x_k, y_k, b_k; g)}{\partial x_{nk}} \leq 0, n = 1, \dots, N; k = 1, \dots, K \\
& (v) \vec{D}_o(x_k, y_k, 0; g) < 0, k = 1, \dots, K \\
& (vi) g_y \sum_{m=1}^M \beta_m - g_b \sum_{j=1}^J \gamma_j = -1 \\
& g_y \sum_{m'=1}^M \beta_{mm'} - g_b \sum_{j=1}^J \mu_{mj} = 0, m = 1, \dots, M \\
& g_y \sum_{m=1}^M \mu_{mj} - g_b \sum_{j'=1}^J \gamma_{jj'} = 0, j' = 1, \dots, J \\
& g_y \sum_{m=1}^M \delta_{nm} - g_b \sum_{j=1}^J \eta^{nj} = 0; n = 1, \dots, N \\
& (vii) \alpha_{n,n'} = \alpha_{n',n}, n \neq n' \\
& \beta_{mm'} = \beta_{m'm}, m \neq m' \\
& \gamma_{jj'} = \gamma^{j'j}, j \neq j'
\end{aligned}$$

也可以使用随机前沿分析 (SFA) 进行估计。例如, DDF 在基于平移特性进行转换后可以转换为 SFA 模型 (Färe et al., 2005)。具体来说, SFA 规范采用以下形式

$$0 = \vec{D}_o(x_k, y_k, b_k; g) + \varepsilon^k \quad (11)$$

在哪里 $\varepsilon^k = v^k + u^k$ 和 $v^k \sim N(0, \sigma_v^2)$ 和 $u^k \sim N^+(0, \sigma_u^2)$ 。使用翻译属性, 我们可以在左侧编写一个输出的函数, 并将该函数估计为随机生产边界。

$$-\alpha^k = \vec{D}_o(x_k, y_k + \alpha^k g^y, b_k - \alpha^k g^b; g) + \varepsilon^k \quad (12)$$

可以使用修正的普通最小二乘法 (OLS) 或最大似然估计方法来估计该计量经济学模型。

除参数模型外, 非参数数据包络分析 (DEA) 方法也可用于估计不良产出的影子价格。对于规模报酬不变的情况, IDF、ODF和DDF的DEA估计求解如下线性规划问题:

$$IDF : D^I(x, y, b) = \max \theta \quad (13)$$

$$\text{s.t.} \sum_{k'=1}^K z^{k'} y^{mk'} \geq y^{mk}, m = 1, 2, \dots, M$$

$$\sum_{k'=1}^K z^{k'} b^{jk'} = b^{jk}, j = 1, 2, \dots, J$$

$$\sum_{k'=1}^K z^{k'} x^{nk'} \leq \frac{x^{nk}}{\theta}, n = 1, 2, \dots, N$$

$$z^{k'} \geq 0, k' = 1, 2, \dots, K$$

$$ODF : D^O(x, y, b) = \min \theta \quad (14)$$

$$\text{s.t.} \sum_{k'=1}^K z^{k'} y^{mk'} \geq \frac{y^{mk}}{\theta}, m = 1, 2, \dots, M$$

$$\sum_{k'=1}^K z^{k'} b^{jk'} = \frac{b^{jk}}{\theta}, j = 1, 2, \dots, J$$

$$\sum_{k'=1}^K z^{k'} x^{nk'} \leq x^{nk}, n = 1, 2, \dots, N$$

$$z^{k'} \geq 0, k' = 1, 2, \dots, K$$

$$DDF : \vec{D}^O(x^k, y^k, b^k) = \max \beta \quad (15)$$

$$\text{s.t.} \sum_{k'=1}^K z^{k'} y^{mk'} \geq y^{mk} + \beta g^y, m = 1, 2, \dots, M$$

$$\sum_{k'=1}^K z^{k'} b^{jk'} = b^{jk} - \beta g^b, j = 1, 2, \dots, J$$

$$\sum_{k'=1}^K z^{k'} x^{nk'} \leq x^{nk}, n = 1, 2, \dots, N$$

$$z^{k'} \geq 0, k' = 1, 2, \dots, K$$

输出约束的对偶值是方程式中所需导数的估计。(5)用于影子价格的计算 (Boyd, 1996)。

3. 方法论问题

3.1. 生产技术

MAC 估计值是通过在给定生产技术结构假设的情况下估计 DF 获得的, 因此受到生产边界形状 (斜率) 的严重影响, 而生产边界的形状 (斜率) 进一步取决于不良产出的建模方式。我们审查的大多数研究都将污染视为第2节中所述的弱可支配产出。在参数距离函数中使用弱一次性公式没有争议。另一方面, 对于 DEA 等非参数形式, 长期以来一直存在争议。正如 Hailu 和 Veeman (2001a) 所论证的那样, 以技术平等约束为代表的弱可处置性假设允许污染的负影子价格和正影子价格。从经济学的角度来看, 污染的负影子价格意味着污染的生产创造了额外的收入, 这与污染给社会带来成本的普遍观点相矛盾 (Dakpo 等, 2016)。

鉴于弱可处置性假设的局限性, 一些研究人员建议将污染作为一种输入 (Reinhard 等人, 2000 年; Hailu 和 Veeman, 2001a; Hailu 2003; Yang 和 Pollitt, 2009 年; Mahlberg 和 Sahoo, 2011 年)。这种方法背后的主要论点是, 污染可以被视为对污染物处理所必需的环境容量的使用 (Hailu 2003)。由于自由处置假设对不良产出施加了不平等约束, 因此它可以保证影子价格估计为正号 (Zhou et al., 2015)。然而, 这种做法也并非没有批评。一种批评是, 不良产出不是投入, 不良产出的自由处置假设不能反映真实的生产过程 (Seiford 和 Zhu, 2002 年)。另一种批评是, 假设输入的可自由处置性和不良输出将意味着有限数量的输入会产生无限量的不良输出, 从而违反质量守恒定律 (Podinovski 和 Kuosmanen, 2011 年)。此外, 将不良输出建模为弱可支配输出和自由可支配输入都因违反材料平衡原则而受到批评 (Coelli 等人, 2007 年; Hoang 和 Coelli, 2011 年)。

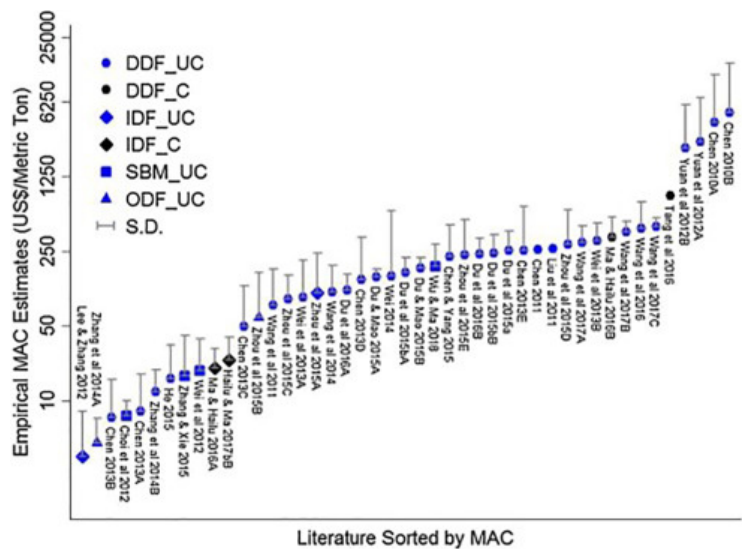
More recently, [Murty et al. \(2012\)](#) point out that the pollution-generating technologies which treats pollution as a freely disposable input or as a weakly disposable output, may generate unacceptable implications for the trade-offs among inputs, outputs and pollution. Alternatively, they proposed a new approach to modelling pollution-generating technologies, which they refer to as a by-production technology. The by-production technology is obtained as an intersection of two technologies: an intended-production technology and a residual-generation technology. The former is a standard technology that describes how inputs are transformed into intended (desirable) outputs in production. The latter reflects nature's residual generation mechanism which is a relationship between pollution and inputs that cause pollution. The by-production approach assumes cost disposability with respect to undesirable outputs, which implies that it is possible to pollute more given the levels of pollution-causing inputs. The by-production technology can better capture the observed trade-offs in production than the usual input and output approaches to modelling pollution-generating technologies. It appears to be a promising method in the modelling of pollution-generating technologies ([Dakpo et al., 2016](#)). However, this by-production approach is relatively new and has not been considered in the empirical literature of China's MAC estimation. The bulk of empirical literature on China's MAC has chosen to treat pollution as either a freely disposable input or as a weakly disposable output. In fact, little attention has been paid to the choice and the consequences of the choice of various production technologies.

3.2. Arbitrary choice of DFs

Estimating the MACs as the shadow value of CO₂ abatement using various DFs has become increasingly popular among Chinese researchers due to its relative ease of application.¹ However, the choice of distance function in the empirical work has been very much arbitrary. Input distance function (IDF), output distance function (ODF), directional output distance function (DDF) and slack-based measures (SBM) are all commonly used methods with various advantages and disadvantages.

Most empirical studies have justified the choice of DF from different (but understandably advantageous) angles. Proponents of IDF have argued that the ODF measure of productivity growth can be ambiguous in the presence of undesirable output such as CO₂ emissions. This is because a proportional expansion of desirable and undesirable outputs is not necessarily socially beneficial. On the other hand, with outputs held constant, savings in inputs can always be "an unambiguous indicator" of beneficial social change ([Hailu and Veeman, 2000](#)). Radial measures including IDF and ODF have been criticized for lack of information regarding the specific inputs and outputs, relative weak discriminating power in ranking assessed entities and inability to deal with non-proportional input excess and output shortfall. This has led to the development and application of SBM ([Zhou et al., 2006](#); [Choi et al., 2012](#)). Recently, many have argued that the DDF is more appropriate in the presence of undesirable output under mitigation regulation. In the most common specification, the DDF imposes simultaneous growth of desirable output and reduction of undesirable output ([Färe et al., 1993](#); [Färe et al., 2005](#)).

从所选择的角度来看, 这些理由似乎都是合理的; 然而, [图 3](#)表明对于 DF 的选择还没有达成共识。有趣的是, 当不同的 DF 在单独的分析中使用, 同一研究人员的研究选择不同的观点也并不少见。随着近年来国家对环境法规的加强, DDF 已成为更受欢迎的方法 ([图 3](#))。DDF 的流行源于其在环境监管下模拟生产率调整的能力, 以及在输入和输出可能好或坏的情况下估算多输入和多输出生产的灵活性。然而, 正如我们稍后展示的那样, 很少有人考虑 DDF 的普遍采用的规范是否与国家的监管实践一致。



下载 :[下载高分辨率图像 \(166KB\)](#)
[下载全尺寸图像](#)

图 3。中国CO₂排放量的实证MAC估算 | 注： **UC**——无条件 MAC 估计； **C**——条件 MAC 估计； **DDF**——输出方向距离函数； **IDF**——输入距离函数； **ODF** – Shephard（输出）距离函数； **SBM**——基于松弛的方法； **SD**—— MAC 估计值的标准差； 小写字母表示主要研究（例如 2015a、2017b），大写字母表示同一主要研究中的不同估计（例如 2017A、2017B）； 数据来源：作者收集。

3.3 。DF 的参数与非参数估计

DF 可以通过参数和非参数方法进行估计。对于参数估计，IDF和ODF通常用translog函数形式指定，而DDF通常用二次函数形式指定。这是因为 IDF/ODF 和 DDF 的同质性和平移特性可以分别使用 translog 和二次形式在全局范围内施加。参数估计的优点是距离函数是可微的，有利于影子价格的估计和结果的解释。DF 的参数可以通过求解确定性线性规划模型来导出（Aigner 和 Chu, 1968 年）寻求最小化具有特定约束的估计距离函数与其边界的偏差之和，或者通过估计考虑误差项并允许进行假设检验的 SFA 模型。然而，SFA 方法的使用通常需要更大的数据集，并且可能无法完全满足单调性（Zhou et al. 2015）。

对于非参数估计，DEA 模型已被广泛用于估计 DMU 性能和不良产出的影子价格，其中生产可能性集被构造为所有观察到的输出和输入的分段线性组合。非参数 DEA 估计的优点是它允许免除 DF 的预定函数形式规范，因此更加灵活。然而，这种方法不能保证距离函数的可微性，并且受到许多其他问题的困扰，例如异常值的存在（Vardanyan 和 Noh, 2006 年）。

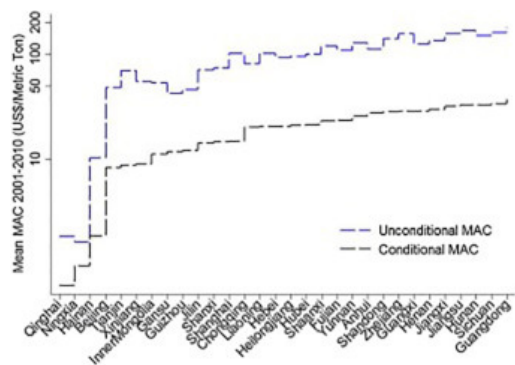
而且，几乎所有的实证研究都从更有利的角度证明了参数或非参数方法的选择。同一位研究人员的研究从不同的角度争论以证明在不同的分析中做出不同的选择也并不少见。如图4所示，参数和非参数估计方法都在该文献中广泛使用，并且随着时间的推移，在实证工作中没有明显的趋势表明一种方法优于另一种方法。从 MAC 估计分布的角度来看，我们也没有发现参数估计和非参数估计之间存在显著差异。



3.4。有条件与无条件 MAC

旨在减少一种空气污染物的环境政策可能具有减轻其他空气污染物的附带好处。对于像中国这样能源消耗严重依赖煤炭的国家来说尤其如此。具体而言，旨在减少碳排放通常会带来减少二氧化硫、煤烟和灰尘等其他污染物的附带好处（[Kesicki 和 Ekins, 2012 年](#)）。尽管最近的经济研究已经开始评估对多种污染物的监管效果，同时考虑到不同污染物缓解活动之间的相互作用（[Greenstone, 2003 年](#)；[Burtraw 等人, 2003 年](#)；[甘珀-拉宾德兰, 2006 年](#)；[Considine and Larson, 2006](#)），大多数现有的关于中国的研究都是通过单独考虑 CO₂排放来估算无条件 MAC。在旨在同时减轻多种空气污染物的当前政策实践的背景下，无条件 MAC 在满足多个缓解目标的总体合规成本方面的信息较少。

图 5 表明，碳排放的无条件 MAC 可能与基于其他相关污染物排放的条件估计的 MAC 大不相同。图 5 显示了 2001-2010 年期间使用相同中国省级数据集的两个 IDF 规范²的 CO₂ 排放估计 MAC 一种规范仅考虑 CO₂ 排放作为不良输出，而另一个包括多种污染物。在这种情况下，无条件 MAC 明显高于有条件 MAC。更重要的是，使用无条件 MAC 来评估减轻多种污染物的总体合规成本必然会涉及重复计算。这是因为如果多种污染物共同产生，那么与碳排放量变化相关的生产力影响也应该与其他共同产生的污染物的变化相关联。



下载: 下载高分辨率图像 (72KB)

下载: 下载全尺寸图像

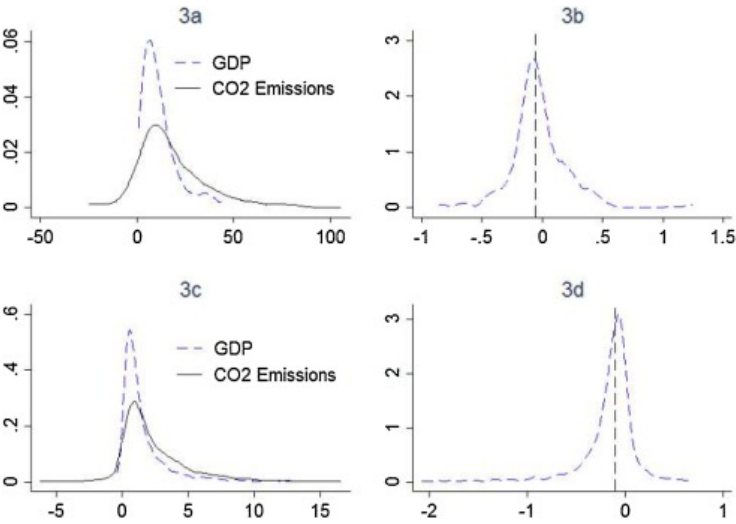
图 5。有条件与无条件MAC估计| 注：各省按 2001-2010 年期间平均条件 MAC 估计的升序排序；y 轴是对数刻度的；数据来源：马海璐（2016）。

3.5 。监管环境

如图3所示，DDF是最流行的DF方法。许多人认为，在缓解监管下出现不希望有的输出时，DDF 比其他 DF 更合适；然而，很少有人考虑到中国目前实施的相关规定的性质。通常，DDF 中的方向被任意选择为 1 表示好的输出，-1 表示坏的输出（Atkinson 和 Tsionas, 2016 年）。因此，该方向强加了绝对的 CO₂减排，这与中国目前的 CO₂减排政策不一致。

迄今为止，中国的碳减排政策被定性为相对减排。具体来说，缓解目标被指定为强度目标。例如，中国的第十一个五年计划 (FYP) 旨在将能源强度在 2005 年的基础上降低 20%（国家发改委, 2011 年），省级目标为 15% 至 22%。同样，中国的“十二五”规划规定在 2010 年的基础上进一步降低 16% 的能源强度和 17% 的碳强度（CSC, 2011）。最近，中国的“十三五”规划宣布了在 2015 年的基础上将碳强度降低 18% 的目标（CSC, 2016 年）。中国向巴黎联合国气候变化大会提交的国家自主贡献预案是到 2030 年单位国内生产总值 CO₂ 排放比 2005 年下降 60-65%，也是一个强度目标。中国的五年规划还为中国最大的 CO₂ 排放国电力行业设定了减排目标。这些目标还根据降低热耗率进行了具体说明，并且基本上是强度目标（即到 10、11、12 和十三五规划）。虽然最近的 13^日 五一规划还规定了到 2020 年能源消耗总量（但不是 CO₂ 排放总量）的上限，遵守该上限将抑制但不会降低能源消费的增长。总而言之，这些目标都没有强制要求能源消耗或 CO₂ 排放量绝对减少。作为相对减缓目标，强度降低并不一定转化为 CO₂ 排放量的实际减少。

图 6 显示了省级 GDP 和 CO₂ 排放量的年度变化分布（面板 3a）和地级市 GDP 和 CO₂ 排放量的年度变化分布（面板 3c）。省级和地级市 CO₂ 排放强度的相应分布分别显示在面板 3b 和 3d 中。虽然大多数地区都遵守了相对减缓（即减少 CO₂ 排放强度），如位于零左侧的中位数所示（面板 3b 和 3d），还观察到大多数人还增加了而不是减少了绝对 CO₂ 排放量（面板 3a 和 3c）。因此，施加绝对 CO₂ 减少的定向矢量 (DV) 与中国的 CO₂ 法规和观察到的缓解实践不一致。



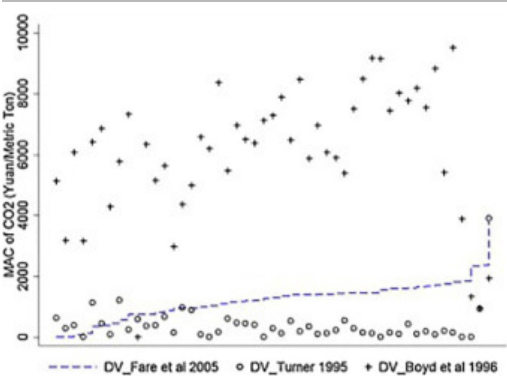
下载: 下载高分辨率图像 (205KB)
下载: 下载全尺寸图像

图 6. 地区GDP、CO₂排放量和CO₂强度年度变化分布| 注: a图: 2003-2010年各省GDP (10¹⁰元) 和CO₂排放量 (10⁶吨) 年度变化分布; 图b: 2003-2010年各省CO₂强度年变化分布 (吨/10⁴元); 图c: 2004-2013年各州GDP (10¹⁰元) 和CO₂排放量 (10⁶吨) 年变化分布; 面板d: 各州CO₂的年度变化分布强度 (吨/10⁴元), 2004-2013; 图b和d中的垂直虚线表示中位数; 数据来源: Hailu 和 Ma (2017b); 黄等. (2018)。

3.6。外源强加的 DV 与内源缓解

众所周知, 方向向量 (DV) 的选择对于估计不良输出的影子值至关重要 (Vardanyan 和 Noh, 2006)。该文献中的大多数实证研究都遵循外生强加一种常用 DV 的做法 (例如Turner, 1995 年; Boyd 等人, 1996 年; Coggins 和 Swinton, 1996 年; Färe 等人, 2005 年)。然而, DV 的选择在很大程度上是任意的, 理由往往过于宽泛, 与特定的政策背景和缓解措施无关。这种任意选择有时会对估计的 MAC 产生重大影响。

使用中国钢铁厂的相同数据集, Wang 等人. (2017)检查了使用三种不同 DV 的影响 (即 $g=(g_y, 0)$, 如Turner, 1995 年; $g=(0, -g_b)$, 如Boyd 等人, 1996 年; $g=(g_y, -g_b)$ 如Färe 等人, 2005 年) 估计的 CO₂排放量 MAC。这总结在图7中。植物根据 DV 按 MAC 估计的升序绘制: Färe 等人使用的 $g=(g_y, -g_b)$ 。(2005). 还标记了使用其他两个 DV 的同一工厂的相应 MAC 估计值。很明显, DV 的任意选择会显着影响估计的 MAC 的大小、顺序和异质性。那么要问的相关问题是, 哪种 DV 选择 (或者可能都不是) 更能反映实际的监管环境/缓解措施, 或者在什么不同情况下估计的 MAC 可以提供信息。这些是必须回答和解决的一些问题。



下载: 下载高分辨率图像 (54KB)
下载: 下载全尺寸图像

图 7. 外加 DV 的影响| 注: 植物根据 Fare 等人使用的 DV, 按 MAC 估计值的升序水平排序。(2005, $g=(g_y, -g_b)$, 标记为蓝色); 基于Turner (1995, $g=(g_y, 0)$) 和Boyd 等人使用的 DV, 每个工厂的相应 MAC 估计。(1996, $g=(0, -g_b)$) 也被绘制出来 (标记为黑色); 数据来源: 王等. (2017) (有关此图例中对颜色的引用的解释, 读者可参阅本文的网络版)。

当然，可以使用一组常用的 DV 进行稳健性检查，但是，正如Wang 等人。(2017)表明，结果往往有很大差异。更重要的是，DV 选择的任意性仍未得到解决。或者，可以将 DV 内生化以与缓解法规、实际缓解实践或最佳实践保持一致。在第一种情况下，内生 DV 将说明如果实体遵守缓解法规，MAC 会是什么。在第二种情况下，内生 DV 将有助于揭示 MAC 实际上是什么。例如，利用韩国发电厂在生产和环境方面的年度计划，Lee 等人。(2002) 表明，平均而言，发电厂同时减少了可取和不可取的输出，这意味着 DV 为 $g=(-g_y,-g_b)$ 。在供应、需求或监管受到重大冲击期间，同时减少理想和良产出可能是合理的，但没有一种程式化的 DV（例如，Turner, 1995 年；Boyd 等人，1996 年；Coggins 和 Swinton, 1996 年；Färe et al., 2005）能够捕捉到这种实际的缓解实践。在第三种情况下，方向被内生化以反映实体最佳执行时 MAC 的情况（Zofio 等人，2013 年；Färe 等人，2013 年；Hampf 和 Krüger, 2014 年；Atkinson 和 Tsionas, 2016 年，2018 年；Färe等人，2017 年）。

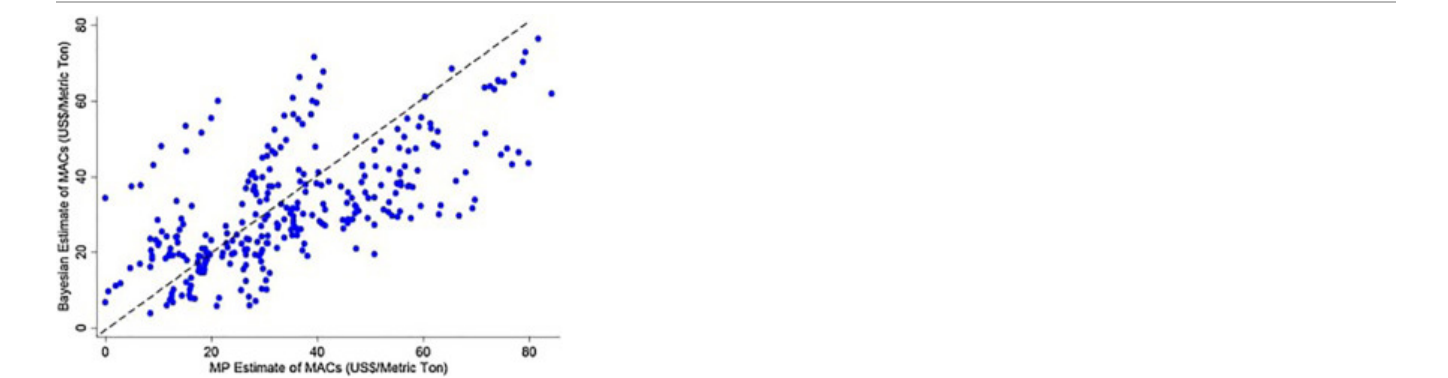
由于实体的生产和缓解选择基本上是内生的，因此可以预期横截面、时间和技术的异质性。就内源化 CO₂减排实践中的多维异质性而言，内源化 DV 明显优于程式化 DV；然而，它们很少在实证 DF 文献中被考虑。

3.7。不受约束的理论约束

研究通常使用一组理论假设来指定 DF 模型，以确保 DF 表现良好。然而，一些重要的假设，尤其是曲率约束，仅针对理论模型指定，而从未在经验上强加。如果不施加这些约束，就无法保证估计的 DF 表现良好并且隐含的影子值有意义。

例如，IDF 是输入的非递减函数，并且在输入中是一阶齐次的。如果使用灵活的 translog 函数来参数化 IDF，还需要施加对称条件。IDF 在输入上也是凹的，在输出上是准凹的（Shephard, 1970 年；Färe 和 Primont, 1995 年；Hailu 和 Veeman, 2000 年）。施加单调性、均匀性和对称性条件相对简单，但施加曲率条件具有挑战性，因此在经验估计中经常被忽略。

在最近的一项研究中，Hailu 和 Ma (2017b)表明强曲率条件会对 CO₂排放的估计 MAC 产生重大影响。该研究使用两种不同的技术来估计参数化 IDF：数学规划 (MP) 和贝叶斯估计。两种估计都施加了单调性、同质性和对称性条件，但只有贝叶斯估计施加了曲率条件。各省 CO₂排放影子值估算如图8所示。虽然在某些情况下这两个值相似（沿 45 度虚线），但这些仅限于影子值相对较低的情况，其中大部分低于 40 美元。对于大多数情况，以及根据 MP 估计，对于几乎所有超过 40 美元的影子价值估计，发现贝叶斯估计值较低。



下载: 下载高分辨率图像 (103KB)
下载: 下载全尺寸图像

图 8。曲率约束估计与无约束估计| 注：贝叶斯估计和 MP 估计都是单调性、同质性和对称性约束的；贝叶斯估计进一步施加了凹曲率条件；单位：美元/公吨，2010年价格；数据来源：Hailu 和 Ma (2017b)。

通过使用对估计施加凹（曲率）条件的贝叶斯方法，该研究获得的 MAC 估计值低于使用最常用方法（即 MP）获得的估计值。请注意，对实证文献普遍表达的一种担忧是，中国 CO₂排放量的估计 MAC 通常过高，有时远高于市场观察值。图 8 中的插图似乎表明，凭经验施加曲率约束可能是一种有前途的方式，可以调和文献中观察到的高 MAC 估计值和碳市场中观察到的低价格。但是，并非所有 DF 规范都必须如此。然而，施加曲率约束的含义值得进一步研究。

4. 结果解释和核对

4.1。广泛不同的估计

CO₂减排行动的政策决策依赖于预测成本和收益。不幸的是，众所周知，这些估计值差异很大（Fischer 和 Morgenstern, 2006 年；Kuik 等人，2009 年）。即使对于同一个国家，估计也可能相差很大。Meng（2017 年）评论说，最近的美国气候政策辩论依赖于综合评估模型 (IAM)，该模型迄今已对 CO₂减缓产生了广泛的成本估算。然而，Meng (2017) 中引用的估计范围与本研

图 3 中显示的范围相比相形见绌。中国 CO₂ MAC 的现有 DF 估算排放量从每公吨几美元到几千美元不等。这种巨大的可变性严重破坏了对政策制定的科学支持，因为政策制定者通常（并且正确地）不愿意在没有充分了解真实成本的情况下实施强制性 CO₂ 减排政策。

即使是经济学家，更不用说政策制定者了，发现调和广泛不同的估计极具挑战性。对于那些试图和解的人来说，理由往往不会带来太多的经济洞察力。例如，发现使用 DDF 估计的 MAC 明显高于使用 Shephard ODF 估计的 MAC。一个经常被引用的差异解释是，与 ODF 相比，DDF 中低效的观测值被投影到更陡峭的边界部分。这种解释在数学上是直观的，因为影子值是从 DF 的导数中推断出来的；然而，这样的解释不太可能解释所观察到的巨大差异，并且提供的关于经济影响的有用信息很少，可以帮助更好地制定政策。

图 3、图 4 还呈现了使用不同 DF（图 3）和估计方法（图 4）的 MAC 的分散统计。由于两个图中的 y 轴均为对数刻度，该图似乎表明产生较大 MAC 估计平均值的研究在其估计中也呈现出较大的可变性。考虑到之前关于与 DDF 相关的更大 MAC 估计的讨论，分散统计还意味着 DDF 不仅产生更大的值，而且产生更大的 MAC 可变性。这种额外的可变性对建立共识和有用的政策参考构成了更加严峻的挑战。

4.2 。估计的 MAC 排名不一致

由于 MAC 估计值存在如此大的可变性，主要研究之间的大多数比较和协调都集中在平均值的差异上。到目前为止，很少有人关注排名问题——即确定低成本和高成本的缓解方案。然而，排名问题对政策制定具有非常重要的影响。一致的 MAC 估计序列将有助于确定低成本减排机会（即容易实现的成果），不仅可以评估整体效率效果，还可以评估各种缓解政策的分配效果。研究中估计顺序的不一致会进一步削弱对政策变化的科学支持。例如，一项研究将实体 A 确定为实体 A，而另一项研究将实体 B 确定为减排成本最低的机会。

图 9 显示了使用相同数据集但两个不同 DF 的 CO₂ 排放省级 MAC 的估计值。IDF 估计显示出逐步增加的曲线，因为各省按基于 IDF 的估计的升序排序。然而，从 DDF“曲线”中无法观察到可辨别的模式。显然，两次估计的 MAC 顺序不一致。如果我们要帮助决策者确定一些低成本省份来试点碳交易计划，这些估计将无法提供有力的指导。



下载 :[下载高分辨率图像 \(202KB\)](#)
下载 :[下载全尺寸图像](#)

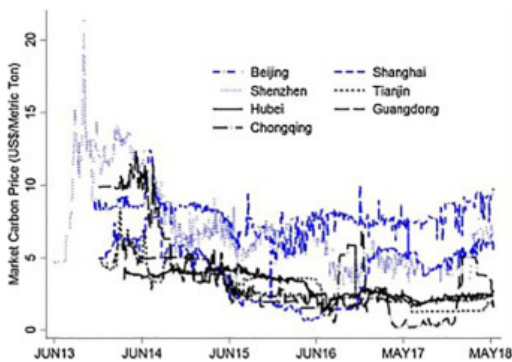
图 9。使用不同 DF 的估计之间的顺序一致性| 注：各省按 2001-2010 年期间基于 IDF 的平均 MAC 估计的升序排序；y 轴是对数刻度的；数据来源：马海璐（2016）。

当实体靠近边界时，MAC 的估计受 DF 规范选择的影响较小。这是因为影子价格将在边界上一个非常有限的地方计算，而不管 DFs。理想情况下，不同平滑估计的 DF 之间的局部导数差异将是最小的。但是，如果样本中有许多远离边界的低效实体，则在采用不同的 DF 规范时，估计的 MAC 的顺序可能会非常不同。因此，在使用不同 DF 规范的研究中，MAC 的顺序缺乏一致性是可以预料的。然而，图 9 所示的结果强调了前面部分讨论的任意选择模型规范的潜在影响。如果模型规范没有适当的理由，影子值的隐含顺序的解释就会变得模棱两可。

4.3 。缺乏市场基准

由于估计的 MAC 可以解释为碳交易市场中 CO₂ 排放许可或配额的价值（Coggins 和 Swinton, 1996 年），因此人们总是可以将估计的 MAC 与市场上观察到的碳交易价格进行比较，以评估 DF 规范和经验估计的其他参数。尽管国内和国际市场的价格观察很容易获得，但很少有研究尝试进行市场基准测试。

缺乏市场基准的一种解释可能是许多经验估计远高于国内和国际市场观察，这使得市场基准和协调变得困难。文献中观察到的 MAC 估计值从每公吨 CO₂ 排放几美元到几千美元不等（图 3）。然而，欧洲和澳大利亚观察到的碳价格以及美国最近基于市场的估计均远低于每公吨 50 美元（Meng, 2017 年；Hailu 和 Ma, 2017a）。从中国七个试点碳交易市场观察到的碳价格甚至在每公吨 0-20 美元的范围内下降（图 10）。



下载: 下载高分辨率图像 (107KB)

下载: 下载全尺寸图像

图 10。2013-2018年中国排放权交易试点每日碳价| 数据来源: <http://k.tanjiaoyi.com/>。

一些人将 MAC 估计与市场观察之间的差异归因于微观或宏观数据以及样本周期，但这些因素本身并不能完全解释差异。如前几节所示，即使使用相同的数据集，模型规范的变化也会显著改变估计 MAC 的大小、顺序和异质性。基于 DF 的 MAC 估计与观察到的市场价格之间的巨大差距现在是一个公认的问题，破坏了估计的有效性。适当的协调和合理的解释对于这些快速增长的文献对更好的政策制定做出有益的贡献具有直接的重要性。

4.4。经济学解释

文献中最需要的是合理的经济解释，以调和高且范围广泛的 MAC 估计与观察到的低市场碳价。也许第一个值得注意的问题是并非所有 MAC 估计都可以直接与市场碳价格进行比较。

关于基于 DF 的 MAC 估计的一项常见观察是，基于 DDF 的 MAC 估计大大高于基于 IDF 或 ODF 的估计。Ma 和 Hailu (2016 年) 认为，径向 (IDF 和 ODF) 而不是非径向 DF (DDF) 更有可能提供短期 MAC 估计，这些估计可直接与市场对碳价格的观察进行比较。³这是因为径向和非径向 DF 在输入或输出向量投影到技术前沿的方式上有所不同。ODF 和 IDF 将输出和输入混合固定在当前比例，而像 DDF 这样的非径向测量不会在到边界的投影中保留当前混合。由于燃料间和要素间替代的弹性在长期大于短期，投入结构的重大调整在长期比短期更有可能发生。同样，由于市场约束，产出结构的剧烈调整在短期内比在长期内更受制约。因此，基于径向和非径向 DF 的估计可能有非常不同的解释。

第二次协调可能来自这样一个事实，即 MAC 是针对实证研究中的所有抽样实体进行估计的。然而，观察到的碳价格仅反映参与交易者的边际减排成本，这些交易通常是减排成本较低的实体。如果实体间的 MAC 是异质的，那些减排成本高的实体就不需要在碳交易市场中为适度的减排目标参与任何减排活动。Ma 和 Hailu (2017a) 表明，对于适度的 CO₂ 5% 的减排目标，只有九个减排成本相对较低的省份需要参与真正的减排活动。从这个意义上说，也许可以很好地预期初步研究将提供范围广泛的 MAC 估计值，其中一些值大大高于观察到的市场价格。为了验证初步研究的结果，更相关的问题是估计范围的下限是否接近观察到的市场价格。

4.5。MAC 与 MAC 曲线 (MACC)

该研究机构的一个共同局限性是，所有 MAC 都是根据观察到的（过去或现在的）排放水平估算的，而没有提供关于边际成本如何随着更严格的减缓目标而增加的信息。该文献中的一种常见做法是通过将估计的影子价格按照估计的影子价格的大小从小到大的顺序连接起来生成一条“曲线”（例如图5、图7、图9），然后隐式或显式地将其称为边际减排成本曲线 (MACC) (Du 等人, 2015a)。这种构造的“曲线”在概念上与 MACC 通常定义或经验估计的方式不一致，例如在基于 IAM 的 MAC 研究中 (Repetto 和 Austin, 1997; 拉斯基, 2003; 菲舍尔和摩根斯坦, 2006 年; Kuik 等人, 2009 年; 佛蒙特州和德卡拉, 2010 年; Kesicki 和 Ekins, 2012 年)。

这种做法存在严重缺陷。首先，“曲线”显示了观察到的边际减排成本，但没有提供有关如果减排更深，一个实体的减排成本与另一个实体的减排成本相比如何的信息。例如，一个相对便宜的减排来源可能会在更高级别的缓解下迅速变得相对昂贵——也就是说，单个实体的 MAC 可能会交叉。

其次，跨实体的不相关点估计的简单合并不会导致超出边际的任何减少的真实 MAC 曲线。构建适当的国家 MAC 曲线需要了解每个实体的 MAC 曲线，显示实体的 MAC 将如何随着减排的深入而上升。然后，国家 MAC 曲线将结合各个 MAC 曲线中的信息，得出整个国家的最低成本减排轨迹时间表。这是迄今为止基于 DF 的 MAC 研究进展甚微的研究领域。然而，在构建适当的 MACC 方面取得的进展对于支持广泛的模拟分析（包括各种气候政策选项的效率和分配影响）非常有价值。

5. 结论

对各种减缓情景的成本负担进行建模和预测的迫切政策需要引发了大量关于估算中国 CO₂ 减排成本的研究。最近的大部分研究都使用了 DF 方法，这主要是因为它易于应用和现成的软件包。本文对这一重要且发展迅速的文献进行了全面而批判性的回顾。它表明该领域的许多现有研究都存在各种方法论和实证问题。审查还确定了重要的方向，以提供对中国 CO₂ 的理论一致和经验可靠的估计减排成本。如果估计之间存在差异，审查还提出了协调方法。通过这样做，本文旨在帮助改进该领域当前的研究实践，并加强进一步研究可以为合理决策提供的科学支持。

一些问题，包括 DF 的选择、市场基准和政策情境化建模，可以通过改进研究实践立即得到解决。然而，条件性和理论约束对实证 MAC 估计和合理经济解释的影响需要额外的新证据。内生 DF 和在 DF 框架下构建真正的 MACC 是研究非常有限的领域，但也是可能对政策制定产生重大影响的有前途的主题。

本文件中审查和讨论的问题肯定不是包罗万象的。例如，在处理技术低效和多维异质性方面存在不一致。该论文讨论了市场基准，但也缺乏跨文献基准。一个重要的外部有效性检查是将使用 DF 估计的 MAC 与使用不同方法的替代估计进行比较。尽管本综述侧重于使用 DF 方法的研究中的 MAC，但根据 IAM 估计的 MAC 为此类跨文献比较提供了一个很好的候选者。虽然基于 IAM 的研究通常为未来情景提供成本预测，但基于 DF 的估计主要基于历史数据，因此可以为基于 IAM 的估计提供经验验证。最后，虽然我们关注的是中国的 MAC，

致谢

马春波感谢西澳大利亚大学通过奖学金支持奖(PG. 10100061)、广东省通过珠江教授职位和中国国家自然科学基金(71873057)提供的资金支持。

推荐文章

参考

艾格纳和楚, 1968 DJ 艾格纳、朱顺丰 _

关于产业生产函数的估计

是。经济。修订版, 58 (4) (1968 年), 第826 - 839页

[谷歌学术](#)

安索夫和托尔, 2013 D. Anthoff, RS 托尔

碳社会成本的不确定性：基于基金的分解分析

爬升。变化, 117 (3) (2013), pp. 515 - 530

[正在查找 PDF...](#) [交叉引用](#) [在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)

阿特金森和 Tsionas, 2016 年 SE 阿特金森, MG Tsionas

方向距离函数：最佳内生方向

J.经济学。 , 190 (2016 年), 第301 - 314页

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

阿特金森和 Tsionas, 2018 年 SE 阿特金森, MG Tsionas

具有不良影响的阴影方向距离函数：最优方向和效率的 GMM 估计

经验经济学。 , 54 (2018 年), 第207 - 230页

[正在查找 PDF...](#) [交叉引用](#) [在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)

博伊德等人, 1996 年 G. Boyd、JC Molburg、R. Prince

边际减排成本估算的替代方法：非参数距离函数

USAAE/IAEE 第 17 次会议记录 (1996 年), 第86 - 95页

[在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)

Burtraw 等人, 2003 年 D. Burtraw、A. Krupnick、K. Palmer、A. Paul、M. Toman、C. Boyd

电力部门温和的温室气体减排政策减少美国空气污染的附带好处

J.环境。经济。管理。 , 45 (2003 年) , 第650 - 673页

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

钱伯斯等人, 1996 年 R. Chambers , Y. Chung , R. Färe

收益和距离函数

J.经济学。理论, 70 (1996) , pp. 407 - 419

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

钱伯斯, 1998 R. 钱伯斯

输入输出指标

R. Färe、S. Grosskopf、RR Russell (编辑), 纪念Sten Malmquist 的索引编号, Kluwer Academic Publishers, 波士顿 (1998 年) , 第241 - 272页

[在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)

陈, 2010 陈思远

工业碳排放的影子价格: 参数和非参数方法

世界经济。 , 8 (2010 年) , 第93 - 111页

[在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)

陈, 2011 陈思远

边际减排成本与中国环境税改革

China Soc. Sci. , 3 (2011), pp. 85-100

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

Chen, 2013 S.Y. Chen

What is the potential impact of a taxation system reform on carbon abatement and industrial growth in China?

Econ. Syst. , 37 (2013), pp. 369-386

 [View PDF](#) [View article](#) [View in Scopus](#) [Google Scholar](#)

Chen and Yang, 2015 L.Y. Chen, Q. Yang

The marginal carbon abatement cost forecast for Chinese Provinces

J. Arid Land Resour. Environ. , 29 (5) (2015), pp. 1-5

 [View PDF](#) [View article](#) [Google Scholar](#)

Choi et al., 2012 Y. Choi , N. Zhang , P. Zhou

中国能源相关 CO₂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](#)

克里斯滕森等人, 1973 年 LR Christensen , DW Jorgensen , LJ Lau

超越对数生产边界

经济学牧师。状态。 , 55 (1973 年) , 第28 - 45页

[交叉引用](#) [谷歌学术](#)

Coelli 等人, 2007 年 T. Coelli , L. Lauwers , G. Van Huylenbroeck

环境效率测量和物料平衡状态

J. 产品。肛门。 , 28 (1) (2007) , pp. 3 - 12

[交叉引用](#) [在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)

科金斯和斯文顿, 1996 年 JS 科金斯 , JR 斯文顿

污染价格：评估 SO_2 配额的双重方法

J.环境。经济。管理。 , 30 (1) (1996) , 第58 - 72页

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

Considine 和 Larson, 2006 年 TJ 康斯戴恩, DF 拉尔森

环境作为生产要素

J.环境。经济。管理。 , 52 (2006 年) , 第645 - 662页

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

CSC, 中国国务院, 2011 CSC, 中国国务院

“十二五”期间 (2011-2015) 节能减排综合工作方案, 北京 (2011 年)

[谷歌学术](#)

CSC, 中国国务院, 2016 CSC, 中国国务院

“十三五” (2016-2020 年) 节能减排综合工作方案, 北京 (2016 年)

[谷歌学术](#)

Du 等人, 2015a L. Du , A. Hanley , C. Wei

估算中国 CO_2 排放的边际减排成本曲线：省级面板数据分析
能源经济学。 , 48 (2015 年) , 第217 - 229页

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

Du 等人, 2015b L. Du , A. Hanley , C. Wei

中国二氧化碳减排的边际成本：参数分析

环境。资源。经济。 , 61 (2) (2015) , 第191 - 216页

[交叉引用](#) [在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)

杜等, 2016 L. Du , A. Hanley , N. Zhang

中国燃煤电厂的环境技术效率、技术差距和影子价格：参数元前沿分析
资源。能源经济学。 , 43 (2016 年) , 第14 - 32页

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

杜与毛, 2015 L. 杜, J. 毛

估算中国燃煤电厂的环境效率和边际 CO_2 减排成本
能源政策, 85 (2015 年) , 第347 - 356页

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

埃德蒙兹和赖利, 1983 年 JA 埃德蒙兹, JM 赖利

到 2050 年的全球能源和二氧化碳 $_2$
能源杂志, 4 (3) (1983) , 第21 - 47页

[在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)

Färe 等人, 1993 年 R. Färe 、 S. Grosskopf 、 CAK 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 年) , 第374 - 380页

[交叉引用](#) [谷歌学术](#)

Färe 等人, 2005 年 R. Färe 、 S. Grosskopf 、 DW Noh 、 W. Weber

污染技术的特点：理论与实践

J.经济学。 , 126 (2) (2005) , 第469 - 492页

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

Färe 等人, 2013 年 R. Färe , S. Grosskopf , G. Whittaker

定向输出距离函数：基于外生归一化约束的内生方向

J. 产品。肛门。 , 40 (2013 年) , 第267 - 269页

[交叉引用](#) [在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)

Färe 和 Primont, 1995 年 R. Färe , D. 普里蒙

多产出生产与二元性：理论与应用

Kluwer 学院, 波士顿 (1995 年)

[谷歌学术](#)

Färe 等人, 2017 年 R. Färe , C. Pasurka , M. Vardanyan

基于参数方向距离函数的模型中内生方向向量

欧元。 J. 歌剧。 水库。 , 262 (1)(2017) , 第361 - 369页

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

菲舍尔和摩根斯坦, 2006 年 C. Fischer , RD 摩根斯坦

碳减排成本：为何估算范围如此之广？

能源杂志, 27 (2) (2006 年) , 第73 - 86页

[在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)

甘伯-拉宾德兰, 2006 年 S. Gamper-Rabindran

EPA 的自愿性工业毒物计划是否减少了排放？分配影响的 GIS 分析和替代的媒体分析

J.环境。经济。管理。 , 52 (2006 年) , 第391 - 410页

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

绿石, 2003 M. 格林斯通

估计监管引起的替代：清洁空气对水和地面污染的影响

是。经济。修订版, 93 (2003 年) , 第442 - 448页

[在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)

海陆和马云, 2017a A. 海陆, C. 马

中国碳减排政策的效率和分配效应：距离函数分析

西澳大学农业与环境学院工作论文 (2017 年)

[谷歌学术](#)

海陆和马云, 2017b A. 海陆, C. 马

中国碳减排成本估算

第11章

T. Ancev (主编) , 环境调整生产力和效率测量, Edward Elgar (2017 年)

[谷歌学术](#)

海陆和维曼, 2000 A. 海陆, TS 维曼

1959 年至 1994 年加拿大纸浆和造纸业的环境敏感生产率分析：输入距离函数方法

J.环境。经济。管理。 , 40 (3)(2000) , 第251 - 274页

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

海陆和维曼, 2001a A. 海陆, TS 维曼

具有不良输出的非参数生产率分析：在加拿大纸浆和造纸工业中的应用

是。J.农业。经济。 , 83 (3)(2001) , 第605 - 616页

[交叉引用](#) [在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)

海陆和维曼, 2001b A. 海陆, TS 维曼

环境敏感生产力分析的替代方法

农业.经济。 , 25 (2001 年) , 第211 - 218页

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

海陆, 2003 A. 海陆

具有不良输出的非参数生产率分析：回复
是。J.农业。经济。 , 85 (2003 年) , 第1075 - 1077页

[交叉引用](#) [在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)

汉普夫和克鲁格, 2014 年 B. 汉普夫, JJ 克鲁格

定向距离函数的最佳方向：温室气体减排潜力的探索
是。J.农业。经济。 , 97 (2014 年) , 第920 - 938页

[在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)

他, 2015 十、何

中国CO₂减排成本的地区差异
能源政策, 80 (2015 年) , 第145 - 152页

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

Hoang 和 Coelli, 2011 V.-N. Hoang , T. Coelli

结合环境因素衡量农业全要素生产率增长：营养平衡方法
J.环境。经济。管理。 , 62 (3)(2011) , 第462 - 474页

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

希望, 2008 连续波 希望

最佳碳排放量和不确定性下碳随时间的社会成本
综合评估。 , 8 (1)(2008) , 第107 - 122页

[在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)

Kesicki 和 Ekins, 2012 年 F. Kesicki , P. 埃金斯

边际减排成本曲线：警告
爬升。政策, 12 (2)(2012) , pp. 219 - 236

[交叉引用](#) [在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)

Kuik 等人, 2009 年 O. Kuik , L. Brander , RSJ Tol

温室气体排放的边际减排成本：荟萃分析
能源政策, 37 (2009) , pp. 1395 - 1403

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

拉斯基, 2003 M· 拉斯基

减少温室气体排放的经济成本：经济模型调查
国会预算办公室, 华盛顿特区 (2003 年)

[谷歌学术](#)

李和张, 2012 M. Lee , N. Zhang

中国制造业技术效率、二氧化碳排放影子价格与能源可替代性
能源经济学。 , 34 (5)(2012) , 第1492 - 1497页

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

刘等, 2011 刘梅林,朱丽玲,范颖 _ _ _

中国各省碳排放绩效评价与边际CO₂减排成本估算：非参数距离函数法
中国软科学。 , 3 (2011 年) , 第106 - 114页

[在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)

马海璐, 2016 C. 马, A. 海陆

中国碳排放的边际减排成本
能源杂志, 37 (SI1) (2016 年) , 第111 - 127页

[谷歌学术](#)

马和吴, 2017 马成, 吴建新

中国CO₂排放边际减排成本的收敛性：排放加权连续状态空间法
西澳大学农业与环境学院工作论文 (2017 年)

[谷歌学术](#)

马尔伯格和萨胡, 2011 B. Mahlberg , BK Sahoo

Luenberger 生产力指标的径向和非径向分解及其说明性应用
诠释。J. 产品。经济。 , 131 (2) (2011) , 第721 - 726页

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

萌, 2017 KC 孟

使用免费许可规则预测拟议气候政策的边际减排成本
是。经济。修订版, 107 (3) (2017 年) , 第748 - 784页

[交叉引用](#) [在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)

Murty 等人, 2012 年 S. Murty , R. Robert Russell , SB Levkoff

对产生污染的技术进行建模
J. 环境。经济。管理。 , 64 (2012 年) , 第117 - 135页

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

国家发改委、国家发展和改革委员会, 2011 国家发改委、国家发展和改革委员会

国家发改委通知2011年第9号附件——“十一五”（2006-2010年）区域节能减排目标完成情况。国家发展和改革委员会, 北京
(2011 年)

[谷歌学术](#)

诺德豪斯, 1982 WD 诺德豪斯

我们应该以多快的速度掠夺全球公域？
是。经济。修订版, 72 (1982 年) , 第242 - 246页

[在 Scopus 中查看](#) [谷歌学术](#)

诺德豪斯, 2008 WD 诺德豪斯

平衡问题：权衡全球变暖政策的选择
耶鲁大学出版社(2008)

[谷歌学术](#)

Podinovski 和 Kuosmanen, 2011 年 VV Podinovski , T. Kuosmanen

在宽松的凸性假设下对数据包络分析中的弱可处置性建模
欧元。J. 歌剧。水库。 , 211 (3) (2011) , 第577 - 585页

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

莱因哈德等人, 2000 年 S. 莱因哈德、CA 诺克斯洛弗尔、GJ 泰森

具有多个对环境有害的变量的环境效率：用 SFA 和 DEA 估计
欧元。J. 歌剧。水库。 , 121 (2) (2000) , 第287 - 303页

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

Repetto 和 Austin, 1997 年 R. Repetto , D. 奥斯汀

气候保护的代价：困惑指南
世界资源研究所, 华盛顿特区 (1997 年)

[谷歌学术](#)

谢泼德, 1970 年 RW 谢泼德

成本与生产函数理论
普林斯顿大学出版社, 新泽西州普林斯顿 (1970 年)

[谷歌学术](#)

末吉与后藤, 2012 T. Sueyoshi, M.后藤

DEA环评中的规模收益、规模损害、边际转化率和替代率
能源经济学, 34 (4) (2012), 第905 - 917页

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

末吉与元, 2016 T. Sueyoshi, Y. Yuan

DEA环境评估衡量的边际转化率和替代率：欧洲和北美国家的比较
Energy Econ., 56 (2016), pp. 270-287

 [View PDF](#) [View article](#) [View in Scopus](#) [Google Scholar](#)

Sun et al., 2016 Z.R. Sun, R.D. Luo, D.Q. Zhou

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

Sustainability, 8 (28) (2016), pp. 1-20

[Google Scholar](#)

Swinton, 1998 J.R. Swinton

At what cost do we reduce pollution? Shadow prices of SO₂ emissions

Energy J., 19 (4) (1998), pp. 63-83

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

Tang et al., 2016 K. Tang, L. Yang, J.W. Zhang

Estimating the regional total factor efficiency and pollutants' marginal abatement costs in China: a parametric approach

Applied Energy, 184 (2016), pp. 230-240

 [View PDF](#) [View article](#) [View in Scopus](#) [Google Scholar](#)

Turner, 1995 J. Turner

Measuring the Cost of Pollution Abatement in the US Electric Utility Industry: A Production Frontier Approach. Doctoral dissertation

University of North Carolina, Chapel Hill (1995)

[Google Scholar](#)

Vardanyan and Noh, 2006 M. Vardanyan, D.W. Noh

Approximating pollution abatement costs via alternative specifications of a multi-output production technology: a case of US electric utility industry

J. Environ. Manage., 80 (2006), pp. 177-190

 [View PDF](#) [View article](#) [View in Scopus](#) [Google Scholar](#)

Vermont and De Cara, 2010 B. Vermont, S. De Cara

How costly is mitigation of non-CO₂ greenhouse gas emissions from agriculture: a meta-analysis

Ecol. Econ., 69 (2010), pp. 1373-1386

 [View PDF](#) [View article](#) [View in Scopus](#) [Google Scholar](#)

Wang et al., 2014 J.J. Wang, L. Li, F. Zhang, Q.N. Xu

Carbon emissions abatement cost in China: provincial panel data analysis

Sustainability, 6 (2014), pp. 2584-6000

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

Wang and Wei, 2014 K. Wang, Y. Wei

China's regional industrial energy efficiency and carbon emissions abatement costs

Appl. Energy, 130 (2014), pp. 617-631

 [View PDF](#) [View article](#) [View in Scopus](#) [Google Scholar](#)

Wang et al., 2016a K. Wang, Y. Wei, Z. Huang

Potential gains from carbon emissions trading in China: A DEA based estimation on abatement cost savings

Omega, 63 (2016), pp. 48-59

 [View PDF](#) [View article](#) [Google Scholar ↗](#)

[Wang et al., 2016b](#) S. Wang, C. Chu, G. Chen, Z. Peng, F. Li

中国碳排放效率与减排成本：一种非径向定向距离函数法
J. 清洁. 产品. , 113 (2016 年) , 第624 - 634页

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

[王等, 2017](#) K. Wang , L. Che , C. Ma , Y. Wei

中国钢铁行业CO₂排放影子价格
科学. 总环境. , 598 (2017 年) , 第272 - 281页

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

[王等, 2011](#) Q. Wang , Q. Cui , D. Zhou , S. Wang

中国二氧化碳边际减排成本：非参数分析
Energy Procedia , 5 (2011) , pp. 2316 - 2320

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

[魏等, 2012](#) C. Wei , J. Ni , L. Du

中国二氧化碳减排区域分布
中国经济. 修订版, 23 (3) (2012 年) , 第552 - 565页

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

[魏等, 2013](#) C. Wei , A. Löschel , B. Liu

中国火电企业CO₂影子价格的实证分析
能源经济学. , 40 (2013 年) , 第22 - 31页

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

[魏, 2014](#) C. 魏

中国城市碳减排的边际成本及其决定因素
世界经济. , 7 (2014 年) , 第115 - 141页

[谷歌学术 ↗](#)

[Weyant 等人, 2006 年](#) JP Weyant , FC de la Chesnaye , GJ 布兰福德

EMF-21 概述：多气体减缓和气候政策
能源杂志, 27 (S3) (2006) , pp. 1 - 32

[谷歌学术 ↗](#)

[吴与马, 2017](#) 吴建新 , 马成

中国城市CO₂减排边际成本的异质性和决定因素
西澳大学农业与环境学院工作论文 (2017 年)

[谷歌学术 ↗](#)

[杨和波利特, 2009](#) H. Yang , M. Pollitt

将不良产出和不可控变量纳入 DEA：中国燃煤电厂的绩效
欧元. J. 歌剧. 水库. , 197 (3) (2009) , 第1095 - 1105页

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

[袁等, 2012](#) P. Yuan , WB Liang , S. Cheng

中国工业部门CO₂的边际减排成本
Energy Procedia , 14 (2012) , pp. 1792 - 1797

[在 Scopus 中查看 ↗](#) [谷歌学术 ↗](#)

张和谢, 2015 N. 张, H. 谢

迈向绿色 IT: 中国电子信息产业可持续生产特征建模, 1980-2012
技术. 预报. 社会. 变化, 96 (2015 年), 第62 - 70页

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

张等, 2014 XP Zhang , QN Xu , F. Zhang , ZQ Guo , R. Rao

探索中国省级碳排放的影子价格
生态学. 印度语. , 46 (2014 年), 第407 - 414页

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

周等, 2012 P. Zhou , BW Ang , H. Wang

发电中的能源和二氧化碳排放性能: 非径向方向距离函数方法
欧元. J. 歌剧. 水库. , 221 (2012 年), 第625 - 635页

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

周等, 2015 X. Zhou , LW Fan , P. Zhou

边际 CO₂减排成本: 来自上海工业部门替代影子价格估算的结果
能源政策, 77 (2015 年), 第109 - 117页

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

周等, 2006 P. Zhou, B.W. Ang, K.L. Poh

Slack-based efficiency measures for modelling environmental performance
Ecol. Econ., 60 (2006), pp. 111-118

 [View PDF](#) [View article](#) [View in Scopus](#) [Google Scholar](#)

Zofio et al., 2013 J.L. Zofio, J.T. Pastor, J. Aparicio

The directional profit efficiency measure: on why profit efficiency is either technical or allocative
J. Prod. Anal., 40 (3) (2013), pp. 257-266

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

Cited by (32)

Lurking in the shadows: The impact of CO₂ emissions target setting on carbon pricing in the Kyoto agreement period.

2023, Energy Economics

[Show abstract](#) 

Reconfirmation of the symbiosis on carbon emissions and air pollution: A spatial spillover perspective

2023, Science of the Total Environment

[Show abstract](#) 

Monetary valuation of unsorted waste: A shadow price approach

2023, Journal of Environmental Management

[Show abstract](#) 

Unfolding the evolution of carbon inequality embodied in inter-provincial trade of China: Network perspective analysis

2022, Environmental Impact Assessment Review

[Show abstract](#) 

Measurement of China's provincial social cost of carbon under the integrated socioeconomic-climate framework


2022, Journal of Environmental Management

Show abstract ▼

Identifying the endogenous optimization pathways for improving environmental performance

2022, Energy Economics

Show abstract ▼



View all citing articles on Scopus

- 1
- Another main strand of literature estimates the MACs of CO₂ using IAMs. See Clarke et al. (2009) for an excellent review of these models and [Hailu and Ma \(2017a\)](#) for customized results on China.
- 2
- The flexible translog functional form due to [Christensen et al. \(1973\)](#) was chosen for the IDF and parameters were estimated by mathematical programming ([Aigner and Chu, 1968](#))
- 3
- 术语径向在 Shephard 意义上在这里定义 - 即输出或输入的比例变化。因此，DDF 和 SBM 都是非径向测量。[Zhou 等人](#)也使用了类似的术语。[\(2012\)](#)其中非径向是指针对不同的污染物进行不同的效率调整（即非比例）。

© 2019 Elsevier BV 保留所有权利。