

一个兼顾公平与效率的污染物减排新思路： 基于六大高耗能行业二氧化硫减排的模拟

周亦¹, 沈子玥², 魏楚¹

(1. 中国人民大学应用经济学院, 北京 100872; 2. 北京小桔科技有限公司, 北京 102299)

摘要 环境污染的治理是中国发展的重要议题, 污染物的减排必然面对一定的成本。在环境保护与经济发展的权衡取舍下, 减排责任的合理分配成为了环境政策制定的关键抓手。然而, 如何通过减排责任的最优分配来实现全社会减排成本的最小化? 这一核心问题仍然缺乏理论回答。对此, 本文提出了一个“效率优先, 公平补偿”的兼顾公平与效率的污染物减排新思路, 并基于中国六大高耗能行业的二氧化硫减排进行模拟分析。利用企业级数据和方向距离函数方法, 本文测算了边际减排成本并构建了边际减排成本曲线, 以此定量验证了本文减排新思路下减排总成本的最小化和福利改进。结果表明: 按照六大行业每年减排 1% 的目标计算, 相比于“按排放比例分配减排量”的传统方案, 本文的“两步走”方案能够使社会总体和每一个排放主体都节省高达 97.67% 的减排成本。此外, 污染物边际减排成本的行业间异质性得以凸显, 边际减排成本曲线的应用价值得到体现。在减排责任分配的方案设计和边际减排成本的微观估计方面, 本文提供了有益的参考。

关键词 减排分配; 边际减排成本; 方向距离函数; 二氧化硫; 高耗能行业

A New Idea of Pollutant Abatement Considering Both Equity and Efficiency: Simulation Based on Sulfur Dioxide Abatement in Six Major Energy-intensive Industries

ZHOU Yi¹, SHEN Ziyue², WEI Chu¹

(1. School of Applied Economics, Renmin University of China, Beijing 100872, China; 2. Beijing Xiaoju Technology Co., Ltd., Beijing 102299, China)

收稿日期: 2022-09-14

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(72261147760); 中国人民大学科学研究基金(中央高校基本科研业务费专项资金)(23XNH158)

Supported by International (Regional) Cooperation and Exchange Program of the National Natural Science Foundation of China (72261147760); Fundamental Research Funds for the Central Universities, and the Research Funds of Renmin University of China (23XNH158)

作者简介: 周亦, 博士研究生, 研究方向: 环境效率分析, E-mail: yizhou0111@foxmail.com; 沈子玥, 北京小桔科技有限公司数据分析师, E-mail: shenzyue@didiglobal.com; 通信作者: 魏楚, 中国人民大学应用经济学院教授, 研究方向: 能源与资源效率、环境外部性、能源需求管理, E-mail: xiaochu1979@gmail.com.

Abstract The control of environmental pollution is an important issue for China's development, while the reduction of pollutant emissions will inevitably face some cost. Under the trade-off between environmental protection and economic development, the rational allocation of emission reduction responsibilities has become a breakthrough in the formulation of environmental policies. However, how to minimize the abatement cost for the whole society through the optimal allocation of emission reduction responsibilities? This core question still lacks a theoretical answer. In this regard, this paper proposes a new idea of "priority for efficiency, compensation for equity" for pollutant abatement that takes both equity and efficiency into account, conducting a simulation analysis based on the sulfur dioxide abatement in six major energy-intensive industries in China. Using firm-level data and directional-distance-function-based method, this paper estimates the marginal abatement cost and constructs the marginal abatement cost curve, quantitatively verifying the minimization of total abatement cost and the improvement of social welfare under this paper's new idea. The results show that, assuming that the six major industries have an annual abatement target of 1%, compared with the traditional plan that "allocating reduction responsibilities according to the emission ratios", the "two-step" scheme in this paper can save the abatement cost up to 97.67% for the whole society and each emission subject. In addition, the inter-industry heterogeneity in the marginal abatement cost of pollutants is highlighted, and the application value of the marginal abatement cost curve is reflected. This paper provides a useful reference for the scheme design of responsibility allocation and the estimation of marginal abatement cost at the micro level.

Keywords emission reduction allocation; marginal abatement cost; directional distance function; sulfur dioxide; energy-intensive industry

1 引言

近年来,随着中国经济持续增长,环境问题也日益严峻.化石燃料大量燃烧使得中国的空气污染问题逐渐突出,在长期中会带来巨大的经济损失(Wang et al. (2019)),威胁居民生命健康.化石燃料燃烧会产生多种污染物,二氧化硫便是其中之一.二氧化硫及其导致的酸雨、硫酸盐等长期破坏中国生态环境,危害人类健康.据生态环境部报告,465个监测降水的城市(区、县)酸雨频率平均为8.5%,出现酸雨的城市比例为30.8%(生态环境部(2021b)).

中国政府近年来不断加强对环境问题的重视.习近平总书记提出“绿水青山就是金山银山”,既要保证经济持续发展,也要兼顾生态环境的保护.为了治理空气污染,减少二氧化硫排放,中国政府做出了大量努力,采取了一系列措施.例如,“十二五”(2011–2015)规划针对全国二氧化硫排放作出了特别规定,要求其排放量必须在2015年相比2010年减少8%(国务院(2011)).“十三五”(2016–2020)规划要求二氧化硫排放量必须在2020年相比2015年减少15%(国务院(2016)).到“十四五”(2021–2025)时期,二氧化硫退出约束性指标,体现出二氧化硫治理的一定成效(国务院(2021),生态环境部(2021a)).此外,中国第一部综合性大气污染防治规划《重点区域大气污染防治“十二五”规划》还对不同行业制定了不同的脱硫要求:火电行业燃煤机组全部安装脱硫设施,确保燃煤电厂综合脱硫效率达到90%以上;对

于钢铁、石化等行业的烟气二氧化硫治理,所有烧结机和位于城市建成区的生产设备需要配套建设脱硫设施,综合脱硫效率达到70%以上;石油炼制行业催化裂化装置要配套建设烟气脱硫设施,硫磺回收率要达到99%以上;有色金属冶炼行业要提高冶炼烟气中硫的回收利用率,对二氧化硫含量大于3.5%的烟气采取制酸或其他方式回收处理(环境保护部等(2012))。

为了实现政府制定的减排目标,势必需要付出一定的成本。据测算,在过去一段时间内,中国空气污染的环境治理成本占国民经济收入比重接近10%(中国工程院和环境保护部(2011))。经济发展与环境保护之间如何权衡取舍?这一直是理论界探讨的重要现实问题。企业是现代社会生产活动的基本决策单元,是污染物排放的主要微观来源。为了减少排放,企业一方面需要投入一定的资金升级技术,降低排放强度;另一方面,如果设备投入成本过高,企业可能通过减少生产的方式来减少排放。企业每减少一单位排放,相应地就会付出一定的边际减排成本,它不仅包含企业升级技术、购买设备付出的现实成本,还涵盖为了达到减排目标牺牲的所有收入。每个企业由于所处行业、生产规模、技术水平等方面的差异,减排成本都会有所不同。即使是同一个企业,在产量不同时,也面临着边际减排成本的变化。从全社会的角度来说,只有将减排任务合理地分配在不同行业企业之间,优先安排边际减排成本较低的企业进行减排,才能实现全社会的效用最大化或成本最小化,实现经济发展与环境保护的协调统一。

因此,是否可以通过减排责任的最优分配来实现全社会减排成本的最小化?本文即是对这一现实问题的探索和回应。“公平”与“效率”是评价政策方案的两个重要视角,一个成功的政策方案必须在二者之间求得合理平衡。一方面,在总量控制下,限制污染物排放将在短期内对经济产生一定冲击,因而在分配上要格外注重公平,从而获得各参与主体的广泛支持;另一方面,对污染物排放进行数量控制也需要符合实际,尽可能实现激励相容,以最小的实施成本达到预期的政策效果。对此,本文在兼顾公平与效率的思想原则下,提出一个“效率优先,公平补偿”的污染物减排新思路,即先有效分配,再通过转移支付保障公平性,充分实现全社会减排成本最小化和福利改进的政策目标。当然,该思路方案的实施需要若干前置条件,其中最关键的就是科学测算各生产决策单元的边际减排成本。以此为基础,方能对不同决策单元进行减排成本比较,借助边际减排成本曲线,优先让边际减排成本较低者承担减排任务,以此实现对减排成本的节约。

现有文献针对相关问题已开展较多研究。然而一方面,兼顾公平与效率的减排责任分配研究多从宏观区域视角出发,较少聚焦企业这一微观基本单元,且对边际减排成本这一概念缺乏关注与利用(王文举和陈真玲(2019))。另一方面,边际减排成本测算领域较为火热,方向距离函数方法逐渐成为主流手段(Ma et al. (2019), Zhou et al. (2014)),但相关研究较少构建边际减排成本曲线,较少进一步探讨减排责任分配和社会减排总成本最小化的问题。

为了回应上述现实问题、填补相关研究空白,本文提出了一个“效率优先,公平补偿”的污染物减排新思路,并基于石油加工、化学制品、矿物制品、黑色金属、有色金属以及电力热力这中国六大高耗能行业进行减排模拟分析。具体而言,本文利用微观企业级数据和方向距离函数方法,科学测算了六大高耗能行业的二氧化硫边际减排成本,进一步构建了边际减排成本曲线,并在此基础上验证了本文减排新思路下减排总成本最小化目标和福利改进的实现。本文主要在两方面具有边际贡献:一是提出了一个兼顾公平与效率的减排新思路,并借助边

际减排成本测算及其曲线构建, 定量验证了该思路下社会减排总成本的最小化和每一个主体的福利改进, 为减排目标设定与责任分配提供了科学参考. 二是结合经济普查数据和环保部调查数据, 在企业层面测算边际减排成本并进行多行业比较, 弥补了相关研究在微观层面上的不足.

本文余下部分安排如下: 第二部分对相关文献进行回顾和总结; 第三部分论述兼顾公平与效率的减排新思路; 第四部分介绍模拟分析的模型和数据; 第五部分呈现模拟分析的结果和讨论; 最后是全文结论.

2 文献回顾

2.1 边际减排成本及其测算方法

污染减排与短期经济行为之间存在替代情形, 经济产出带给地方政府的收益, 会弱化企业的减排激励 (周权雄 (2009)). 从经济学角度来说, 全面衡量某个决策的成本需要考虑机会成本的概念 (曼昆 (2015)), 即决策过程中面临多项选择, 当中被放弃的价值最高的选择. 根据机会成本的含义, 为了减少一单位排放而付出的直接支出或者由此减少的产出的经济价值, 即是边际减排成本.

边际减排成本的科学测算是实现减排责任有效分配的根本前提, 测算边际减排成本主要有基于技术测算 (Kesicki and Strachan (2011))、基于特定经济模型推算 (Ellerman et al. (1998)) 和基于方向距离函数估计三类方法. 第一类方法存在忽略机会成本的局限性, 第二类方法往往依赖于大量参数假设. 对比而言, 基于方向距离函数估计减排成本, 其主要思想是基于生产技术计算排放和产出的边际替代率, 得到污染物减排的机会成本. 其首先通过生产函数刻画一定生产技术约束下排放和产出的关系, 然后定义一个反应生产单元效率的方向距离函数, 进而利用方向距离函数和收益函数之间的对偶关系, 令产出和污染物排放的边际替代率等于二者的价格之比, 最终得到污染物的影子价格, 即边际减排成本 (周鹏和安超 (2022), Färe et al. (1993)). 线性规划法是基于方向距离函数估计边际减排成本的最基础的方法 (Aigner and Chu (1968)), 有学者在该方法基础上进行扩展, 使其能够将非合意产出也包含在模型中 (Färe and Primont (1995)), 促进了该方法的广泛应用 (涂正革等 (2022), 张宁 (2022), Ma et al. (2019), Zhou et al. (2014)). 总的来说, 该方法通过最优化目标函数得到污染物的边际减排成本, 考虑到了减排造成的潜在经济影响, 并且不需要大量参数假设, 不要求对经济系统内各部门进行建模, 可操作性较强. 综合考虑数据可得性, 以及边际减排成本服务于减排责任分配的目的, 本文选择此方法测算污染物的边际减排成本.

2.2 中国二氧化硫边际减排成本

针对中国的二氧化硫边际减排成本, 大量文献应用方向距离函数方法予以测算. 一方面, 许多文献基于地区级的数据, 测算了不同省、市的边际减排成本. 这类测算往往是将地区的 GDP (gross domestic product, 国内生产总值) 总量作为合意产出, 衡量地区排放总量与当地 GDP 之间的权衡取舍 (Ji and Zhou (2020), Ke et al. (2008), Tang et al. (2016)). 基于省、市进行测算的文献能够将不同地区的边际减排成本进行对比, 也可以反映地区边际减排成本随时间的变化趋势. 这类文献视角较为宏观, 通常是站在地区全局的角度上衡量减排成本, 但

不足在于无法反映更多的细节,例如行业间或企业间减排成本的差异性。同一地区内的不同企业在经济贡献、排放量以及排放强度上均存在较大异质性,将所有企业放在一起测算则相当于假设生产技术在该地区内的无差异性,这有利于对边际减排成本进行宏观把握,却不利于开展更微观的分析。另一方面,一些文献基于特定行业的微观数据,测算了企业层面的边际减排成本。其通常着眼于高耗能行业企业,例如火电企业 (Nakaishi (2021), Wei and Zhang (2020)) 和化工企业 (陈醒和徐晋涛 (2021)) 等。在这类研究中,作为合意产出的通常是企业的收入或者产值,故计算出的边际减排成本直接反映了企业减排一单位需要减少的产出,相比于地区宏观结果颗粒度更细,具有更高的可参考性。然而,受限于微观数据的可得性,过往文献较少涉及其他行业乃至多行业的企业,微观层面仍存在较大的研究空白 (张宁和刘青君 (2022))。

2.3 边际减排成本曲线与减排责任分配

在边际减排成本测算的基础上,边际减排成本曲线是定量分析分配方案成本有效性的关键工具,而其中边际减排成本的影响因素是该曲线的核心元素。一些文献对此进行了研究。魏楚 (2014) 基于中国 104 个地级市 2001–2008 年的数据研究发现,二氧化碳边际减排成本与排放强度呈现非线性的 U 型关系,U 型曲线最低点左侧的城市,随着排放强度下降,边际减排成本越来越高,而最低点右侧的城市则反之。Du et al. (2015) 则比较了不同函数形式下二氧化碳边际减排成本与排放强度关系的拟合曲线,发现用二次函数形式描述二者关系最为恰当,且曲线呈现 U 型。其他影响因素,如企业规模、经营年限、煤炭消费占比、国有控股与否等,均被发现对火电企业的二氧化碳边际减排成本存在显著影响 (Wei et al. (2013))。此外,还有文献基于中国省级污染物边际减排成本测算结果,利用因素分解的方法探究技术变化、规模变化以及效率变化对边际减排成本的影响,发现规模变化对二氧化硫的边际减排成本具有重要影响,而技术变化和效率变化则对化学需氧量的边际减排成本具有较大影响 (Wu et al. (2021))。基于中国不同地区火电厂的研究还显示,相对于中部地区,东部地区的企业二氧化碳边际减排成本更高,而西部地区的企业边际减排成本相对较低 (Du and Mao (2015))。

减排责任的最优分配是本文的动机,公平性和有效性是评价减排方案的重要标准。虽然公平与效率是一个古老而又常新的话题,但在污染物减排量分配的议题下,将公平与效率原则明确纳入考虑的研究并不多见。一方面,在此类相关文献中,“公平原则”和“效率原则”的概念定义与量化方式差异较大 (谭显春等 (2022)),且边际减排成本的必要作用和减排成本最小化的社会目标较少得到关注 (宋杰鲲等 (2017),王倩和高翠云 (2016),武佳倩等 (2018),郑立群 (2013),周迪等 (2019))。吴贤荣等 (2015) 在评估中国农业碳减排潜力时,将二氧化碳边际减排成本纳入效率原则视角,构建公平与效率综合指数以对各区域实现分类分析;然而,边际减排成本在其中仅作为指标元素,不同减排方案间缺乏成本的定量对比,未能进一步将社会减排成本最小化作为方案选择的依据。另一方面,相关文献均侧重于省级二氧化碳减排责任的分摊,基于微观层面数据、涉及其他非合意产出的研究较为匮乏。

综上所述,可以发现现有文献存在如下不足之处:第一,方向距离函数作为测算边际减排成本的热门方法,在中国的实际应用重于宏观地区视角,疏于微观企业层面,限制了相关结果的政策参考价值。第二,在减排责任分配的议题下公平与效率的探讨仍然不足,边际减排成本

和社会总成本最小化原则缺乏关注, 且同样重于宏观而疏于微观. 对此, 本文减排新思路的提出和微观层面二氧化硫减排的数值模拟, 构成了本文的两个主要边际贡献.

3 兼顾公平与效率的减排新思路

减排责任的合理分配是环境政策制定的关键抓手. 一个成功的污染物减排分配方案必须同时满足公平原则和效率原则: 既能获得广泛理解与主动支持, 也能以最低的代价取得最佳的实施效果.

公平原则是保证分配方案可接受、可实施的政治基础. 具体可以从两方面阐述: 第一, 着眼于未来, 充分考虑各排放主体的发展权与发展空间. 控制污染物排放往往要减少能源消费或淘汰落后技术, 在某种程度上是对生产单元的成长发展“踩刹车”. 因此, 对于发展水平较低、未来将保持较快发展的行业企业, 要保障其正常发展所需的排放空间; 对于发展水平较高、未来增长主要依赖于创新驱动的行业企业, 应加快推动其结构优化, 适当减少排放配额以敦促其转型发展. 第二, 着眼于过去, 充分考虑已有的排放规模. 历史排放较多的行业企业为了维持其现有生产规模与发展增速, 仍然对资源能源拥有较大需求, 短期内难以实现快速转型, 无法实现排放的大幅度逆转. 因此, 前期排放较多的行业企业需要分配较多的初始排放额度; 反之亦然.

效率原则用以保证约束性目标达成的成本最小化, 或实施效果最大化. 具体可以从两方面阐述: 第一, 就产出而言, 充分考虑排放的经济产出效率. 排放效率越高的生产单元, 其单位排放的经济产出也就越高. 排放强度可作为排放效率的量化指标, 因此, 从经济产出最大化的角度看, 应给予排放效率较高、排放强度较低的行业企业更多的排放配额; 反之亦然. 第二, 就成本而言, 充分考虑污染物的减排成本. 在保证排放效率的前提下, 减排成本越低的行业企业应承担越多的减排责任, 从而降低全社会的减排总成本.

为了兼顾公平与效率, 本文提出一个“效率优先, 公平补偿”的污染物减排新思路. 鉴于公平和效率原则的满足难以一步到位, 该思路采用“两步走”的方式: 不“同时”考虑公平和效率原则, 而是采取“错时”策略, 即首先只考虑效率原则, 其后再纳入公平原则.

该思路的具体方案是: 先基于效率原则有效分配——考虑各排放主体不同的减排成本, 按照减排总成本最小化的原则进行排放配额或减排责任的初始分配; 再诉诸公平原则转移支付——政府对排放效率高、减排成本高的行业企业征税, 然后通过资金补偿转移支付给排放效率低、减排成本低的行业企业, 从而保护各生产单元的发展空间和减排积极性. 这是一种基于庇古税的单边转移支付制度, 相比于传统的仅基于公平原则的分配方案, 该方案在保障公平性的同时, 能够实现社会减排总成本的最小化, 对全社会和每一个主体而言都是一个福利改进.

由此可以发现, 边际减排成本的科学测算和边际减排成本曲线的合理构建是实施该方案的重要前置条件, 减排总成本最小化和福利改进的验证是该方案的核心支撑. 因此, 本文余下部分利用具体模型和数据, 按照边际减排成本测算与对比、边际减排成本曲线构建与估计、不同方案下减排成本计算与福利对比的顺序, 基于中国六大高耗能行业的二氧化硫减排进行模拟分析.

4 模拟分析模型与数据

4.1 边际减排成本及其曲线模型

本文基于方向距离函数模型 (Chung et al. (1997)) 测算边际减排成本, 具体模型见附录 A. 该模型估计出的边际减排成本是在特定的投入产出集合下计算出来的离散值, 为进行减排责任的有效分配, 需要获得边际减排成本的总体特征, 或者说需要构建边际减排成本曲线.

现有文献中讨论最多、最重要的边际减排成本影响因素之一是排放强度, 本文选取其作为边际减排成本的核心解释变量. 关于排放强度如何影响边际减排成本, 相关研究通常认为二者之间存在非线性的关系. 例如, 魏楚 (2014) 基于中国城市碳排放的研究发现, 边际减排成本和排放强度之间呈现 U 型关系.

一个基本的边际减排成本曲线计量模型构建为 $q_i = f(x_i) + nZ_i + \varepsilon_i$. 其中, q_i 代表基于方向距离函数求出的污染物边际减排成本, x_i 代表污染物的排放强度, 并且考虑了不同函数形式来捕捉非线性关系, Z_i 是其他可能影响污染物边际减排成本的因素, ε_i 是随机误差项.

为了更好地捕捉边际减排成本和排放强度之间的非线性关系, 本文使用表 1 中四种常见的非线性函数分别进行回归分析和最优模型识别.

表 1 非线性函数计量模型设定

非线性函数形式	计量模型设定
二次函数	$q_i = c + ax_i^2 + bx_i + nZ_i + \varepsilon_i$
对数函数	$q_i = c + \ln(x_i) + nZ_i + \varepsilon_i$
指数函数	$\ln(q_i) = c + ax_i + nZ_i + \varepsilon_i$
幂函数	$\ln(q_i) = c + a \ln(x_i) + nZ_i + \varepsilon_i$

4.2 减排方案模型

本文模拟分析旨在表明, 在“效率优先, 公平补偿”的新思路下, 社会减排总成本将达到最小, 且每一个主体都得到了福利改进. 对此, 本部分首先推导出减排成本的计算公式, 其次构建一个基准方案以备比较, 最后构建出本文“效率优先, 公平补偿”的方案模型.

假设排放主体的产出为 out 且维持不变, 排放量为 $emis$, 排放强度 $int = emis/out$, 则反映边际减排成本 MAC 随排放强度变化的曲线可用 $f(int)$ 表示: $MAC = f(int) = f(emis/out)$. 记 $f(int)$ 的原函数为 $F(int)$, 则 $\int f(int)d(int) = F(int)$.

由此可以得到排放主体从排放水平 $emis_2$ 减排到 $emis_1$ 的减排成本 $cost$, 即为边际减排成本曲线下方面积与产出的乘积:

$$\begin{aligned}
 cost &= \int_{emis_1}^{emis_2} f(emis/out)d(emis) \\
 &= out \times \int_{emis_1/out}^{emis_2/out} f(emis/out)d(emis/out) \\
 &= out \times \int_{int_1}^{int_2} f(int)d(int) \\
 &= out \times F(int) \Big|_{int_1}^{int_2}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

作为基准方案, 方案一是现有政策实践的写照: 在达到预定减排目标的条件下, 不区分各行业企业的减排成本差异, 按照主权准则 (又称祖父准则) (谭显春等 (2022)), 根据现有排放量的比例来分配减排量。

方案二即是本文“效率优先, 公平补偿”的“两步走”方案: 先按照效率原则即成本最小化目标分配减排任务, 再遵循公平原则在各主体之间实施转移支付。第一步的减排量 red 分配可以通过如下优化模型表示并求解:

$$\begin{aligned} \min_{red_k} \quad & \sum_{k=1}^K out_k \times F(int) \Bigg|_{\substack{int_{k,2} \\ int_{k,1}}} = \sum_{k=1}^K out_k \times F(int) \Bigg|_{\substack{int_{k,2} \\ (emis_{k,2} - red_k)/out}} \\ \text{s.t.} \quad & \text{(i) } \frac{\sum_{k=1}^K red_k}{\sum_{k=1}^K emis_{k,2}} \geq \text{target}, \\ & \text{(ii) } 0 \leq red_k \leq emis_{k,2}, \quad k = 1, 2, \dots, K, \end{aligned} \quad (2)$$

其中, k 是排放主体的序号, red_k 作为决策变量以最小化社会减排总成本。约束条件 (i) 表示社会减排总量至少达到预定减排目标。约束条件 (ii) 表示减排量非负 (即不允许增排), 且不超过当期排放量 (即下一期排放量非负)。

依据该模型分配各排放主体的最优减排量之后, 相比于基准方案, 必然会存在某一些主体减排任务的加重和另一些主体减排任务的减轻。因此, 第二步即是基于公平原则, 通过转移支付的方式对受益主体适当征税, 再以资金形式补偿给受损主体, 最终使得所有主体相比于基准方案都得到净福利改进。转移支付 $trans_k$ 的数额 (正为补偿, 负为征税) 可以通过如下方程组求解:

$$\begin{cases} cost_k^{\text{min-first}} - trans_k = cost_k^{\text{min-final}}, \\ \frac{cost_k^{\text{min-final}}}{cost_k^{\text{BM}}} = \frac{\sum_{k=1}^K cost_k^{\text{min-final}}}{\sum_{k=1}^K cost_k^{\text{BM}}} = \frac{\sum_{k=1}^K cost_k^{\text{min-first}}}{\sum_{k=1}^K cost_k^{\text{BM}}}, \end{cases} \quad (3)$$

其中, 转移支付数额 $trans_k$ 、方案二最终减排成本 $cost_k^{\text{min-final}}$ 是两个待解未知数, 方案二第一步后减排成本 $cost_k^{\text{min-first}}$ 、方案一 (基准方案) 减排成本 $cost_k^{\text{BM}}$ 是已知数, 可通过公式 (1) 计算。第一个方程描述了最终减排成本的形成, 即第一步分配后的减排成本减去转移支付的资金收支。第二个方程要求相比于基准方案, 每一个排放主体的最终减排成本都拥有相同的改进比例, 即所有主体的“相对”最终减排成本均相同, 且都等于“相对”最终减排总成本。值得说明的是, 第二个方程中的第二个等号要求转移支付的总收入与总支出平衡, 这保证了转移支付不会改变社会减排总成本。

综合上述“两步走”方案模型, 可以发现第一步的减排量分配实现了社会减排总成本的最小化, 第二步的转移支付在不改变减排总成本的前提下实现了每一个主体的福利改进。事实上, 第一步的成本最小化减排分配已经实现了一个帕累托最优配置, 但通过基准方案的参考和第二步的转移支付, 最终结果达到了帕累托集中合同曲线 (contract curve) 的其中一点, 保证了每一个主体相比于基准方案都实现了净福利改进。

4.3 数据

本文模拟分析采用的企业级数据包含三项投入和两项产出。其中,投入数据包含企业的固定资产净值、劳动力和能源消费,产出数据包含企业的工业总产值和二氧化硫排放。企业固定资产净值、劳动力和工业总产值数据来自于2008年经济普查数据;能源消费和二氧化硫排放数据来自于环保部2008年调查数据。本文根据企业的唯一组织代码将两个数据库中的企业进行匹配。本文选定的行业为国家规定的六大高耗能行业,包括:石油加工、炼焦及核燃料加工业,化学原料及化学制品制造业,非金属矿物制品业,黑色金属冶炼及压延加工业,有色金属冶炼及压延加工业,电力热力的生产和供应业。为了便于阅读,下文将对这六大行业以简称代替全称,分别简称为石油加工业、化学制品业、矿物制品业、黑色金属业、有色金属业以及电力热力业。

数据的描述性统计如表2所示¹。上述六大行业的固定资产净值的均值为5,510万元;企业雇佣劳动力的均值为303人,能源消费的均值为39,230吨标煤,工业总产值平均为9,140万元,二氧化硫排放的均值为341吨。其中在工业总产值方面,有色金属业工业总产值均值最高,矿物制品业均值最低;在二氧化硫排放方面,电力热力业排放均值最高,化学制品业均值最低。

从表3的行业代表性²来看,本文选择的六个行业的二氧化硫排放总量占到工业行业二氧化硫排放总量的77.35%,故从排放的角度来看,本文选择的六个行业可以很好地代表工业行业。从工业销售产值的角度来看,本文选择的六个行业占到工业行业销售总产值的31.04%,对工业产值有较大贡献。因此,本文所选择的这六个行业不仅是污染排放密集行业,也在国民经济中占有重要地位。

5 模拟分析结果与讨论

5.1 边际减排成本

本文采用GAMS软件对边际减排成本模型中的未知参数进行了求解。考虑到不同行业生产技术有较大差异,本文对不同行业分别进行估计,得出相应的生产前沿和方向距离函数,方向距离函数和边际减排成本结果如表4所示。

从表4可以发现,矿物制品业无效率程度最高,其方向距离函数值平均为0.40;电力热力业和有色金属业的方向距离函数值并列最小,说明这两个行业平均来看是生产效率最高的。二氧化硫的边际减排成本相当于减少一单位二氧化硫排放需要付出的机会成本,可以看出

¹本文进行了一些必要的数据处理。一方面,原始数据集中存在一部分产值较低的小型企业,例如一些小规模的供热公司,其二氧化硫排放水平明显低于行业内的其他企业。这部分企业在生产技术、生产规模上都与其他企业有较大差距,容易造成估计结果的偏差。因此,为了确保结果的准确性,本文只保留了年产值在1,000万元以上的企业样本。另一方面,本文采用方向距离函数估计边际减排成本,其原理是通过行业内的企业样本拟合出一条反映生产前沿的曲线,然后计算基于该生产前沿的产出-排放边际替代率。因此,行业内效率最高的企业对生产前沿面的位置有着很大的影响,如果存在一些效率水平异常高的企业样本,那么基于该方法衡量的其余企业的效率水平就会异常低,为估计出的边际减排成本带来较大不确定性。为了克服这一问题,本文计算出企业的产出-排放之比,并依据核密度图剔除了远离均值的极端观测值,使排放强度的分布尽量接近正态分布,以减小极端值对前沿面估计产生的影响。

²综合考虑二氧化硫减排的约束性目标和数据可得性,以2015年数据为例。

表 2 数据描述性统计

变量	均值	标准差	最小值	最大值
固定资产净值 (百万元)	55.10	175.31	0.20	2,515.37
劳动力 (人)	303.34	386.15	10.00	3,573.00
能源消费 (千吨标煤)	39.23	102.02	0.14	1,158.11
工业总产值 (百万元)	91.40	294.95	10.00	4,900.00
-石油加工业	186.96	188.96	25.20	612.17
-化学制品业	81.17	145.30	10.00	954.68
-矿物制品业	48.01	47.46	10.00	269.26
-黑色金属业	229.43	356.83	10.00	1,141.81
-有色金属业	443.97	1,290.35	16.00	4,900.00
-电力热力业	73.47	177.94	10.35	636.78
二氧化硫排放 (吨)	341.05	912.94	10.02	13,434.85
-石油加工业	550.13	499.60	51.20	1,926.25
-化学制品业	163.58	270.31	10.02	1,268.41
-矿物制品业	218.56	324.22	19.75	3,764.64
-黑色金属业	950.08	1,344.03	25.60	4,238.25
-有色金属业	681.65	1,583.56	30.00	5,872.33
-电力热力业	1,635.88	3,733.15	127.58	13,434.85

数据来源: 2008 年中国经济普查、2008 年环保部企业调查.

表 3 行业代表性

行业	二氧化硫排放量 (万吨)	排放量占比 (%)	工业销售产值 (亿元)	产值占比 (%)
工业行业总计	1,556.70	100.00	1,104,026.70	100.00
石油加工业	65.32	4.20	34,304.56	3.11
化学制品业	134.56	8.64	83,256.38	7.54
矿物制品业	203.78	13.09	59,988.20	5.43
黑色金属业	173.63	11.15	61,257.31	5.55
有色金属业	120.93	7.77	46,480.99	4.21
电力热力业	505.83	32.49	57,451.07	5.20
六大行业合计	1,204.06	77.35	342,738.51	31.04

数据来源: EPS 数据平台中国环境数据库、中国工业经济数据库.

各个行业的边际减排成本差异很大. 电力热力业的二氧化硫边际减排成本是最低的, 平均为 6.71 万元/吨; 黑色金属业的二氧化硫边际减排成本为 20.34 万元/吨; 有色金属业为 49.12 万元/吨; 石油加工业为 50.71 万元/吨; 矿物制品业为 61.72 万元/吨; 而边际减排成本最高的是化学制品业, 平均为 76.43 万元/吨.

对比相关文献可以发现, 基于距离函数估计的中国工业二氧化硫边际减排成本从几万元到几十万元不等, 并且在不同年份、不同地区、不同行业之间存在较大差异, 本文的结果是在合理范围内的. 例如, 涂正革 (2010) 估算出省级二氧化硫边际减排成本从 1999 年的 0.31 万元/吨上升到 2002 年的 37.9 万元/吨, 2005 年又下降到 3.64 万元/吨. Kaneko et al. (2010)

表4 分行业方向距离函数和边际减排成本估计结果

行业	均值	标准差	最小值	最大值
方向距离函数				
石油加工业	0.20	0.30	0.00	1.42
化学制品业	0.16	0.36	0.00	2.72
矿物制品业	0.40	0.61	0.00	5.21
黑色金属业	0.02	0.03	0.00	0.07
有色金属业	0.01	0.01	0.00	0.03
电力热力业	0.01	0.03	0.00	0.11
边际减排成本 (万元/吨)				
石油加工业	50.71	12.35	25.75	82.45
化学制品业	76.43	18.74	4.58	96.26
矿物制品业	61.72	14.16	2.94	98.75
黑色金属业	20.34	7.79	0.48	29.23
有色金属业	49.12	27.13	4.21	83.30
电力热力业	6.71	3.54	0.32	12.46

估算出火电行业 2003 年的边际减排成本为 2.07 万元/吨, 2006 年升至 4.73 万元/吨. 袁鹏和程施 (2011) 估计出城市级边际减排成本平均为 5.2 万元/吨, 其变动区间为 0.087~409.2 万元/吨. Xie et al. (2016) 的结果显示, 从 1998 到 2011 年二氧化硫边际减排成本从 42 万元/吨增长到了 150 万元/吨. 周永文 (2017) 发现广东的平均边际减排成本从 1998-2006 年的 0.69 万元/吨上升到 2007-2014 年的 8.23 万元/吨. Wei and Zhang (2020) 估计出火电厂的二氧化硫边际减排成本平均为 2,525 美元/吨. 附录 B 对研究中国工业二氧化硫边际减排成本的相关文献进行了详细对比.

此外, 部分文献从减排付出的直接金钱支出角度进行研究, 结果显示电力、钢铁行业的边际减排直接支出通常为几千元到几万元不等 (毕军等 (2007), 吴丹等 (2019)). 从实际支出的角度来说, 基于不同的技术, 综合考虑固定、可变两部分减排成本能够在一定程度上反映企业在减排过程中的支出. 然而, 方向距离函数方法在求解边际减排成本时, 是先将该生产单元沿着方向向量, 移动到由效率最高的一部分企业构成的生产前沿面上, 再求解前沿面上该点产出和排放的边际替代率. 因此, 基于方向距离函数求解出的边际减排成本, 其含义不同于减排过程中实际付出的金钱支出, 二者结果的差异性不可避免.

5.2 边际减排成本曲线

在估计边际减排成本曲线之前, 需要对边际减排成本的其他影响因素进行识别, 以作为模型中的控制变量.

第一个影响因素是企业规模, 它可能通过两个方面影响边际减排成本. 首先, 企业规模影响了企业采用的技术, 企业规模越大, 可能采用的技术就越先进, 进一步减排的边际成本就可能越高. 其次, 在减排过程中可能存在规模效应, 即减排量越大, 单位污染物的边际减排成本就越低. Murty et al. (2007) 即发现企业在减排时确实有规模效应存在. 本文通过企业当年的工业增加值来反映企业的规模.

第二个影响因素是资本劳动比, 它在一定程度上反映了企业的生产方式. 资本劳动比越高, 行业越偏向于资本密集型行业, 重工业的属性越强. 陈诗一 (2010) 基于 1998-2008 年的工业行业数据研究发现, 资本劳动比越低的行业, 其污染物边际减排成本越高. 因此本文将资本劳动比纳入考量.

第三个影响因素是企业的经营年限, 它往往会影响企业的生产技术水平. 由于技术一定程度上通过固定资产来承载, 而固定资产的更新换代具有一定的周期, 因此经营年限较久的企业更可能采用效率偏低的生产设备和技术, 进而对污染物的边际减排成本产生影响. 例如, Du et al. (2015) 研究发现, 企业的经营年限越长, 其污染物的边际减排成本就越低. 本文也在模型中控制了该变量.

经济学文献也揭示出国有企业往往效率更低, 因此相对来说可能具有更低的边际减排成本和更大的改进空间, 故本文控制了企业所有权变量. 但是 Wei et al. (2013) 基于火电厂的研究曾发现, 国有控股企业的二氧化碳边际减排成本显著高于非国有企业, 这说明所有权的影响方向仍待探讨. 本文设置了一个 0-1 虚拟变量以评估所有权的影响.

此外, 能源结构通常对污染物排放量具有重要影响, 进而可能影响边际减排成本. 本文以统一换算为标准煤后的煤炭消费占比作为反映能源结构的变量, 探究企业能源结构对二氧化硫边际减排成本的影响.

上述变量的描述性统计如表 5 所示.

根据表 1 的不同计量模型进行回归, 边际减排成本曲线的估计结果如表 6 所示.

在四个函数模型中, 排放强度的系数稳定显著为负. 在第一列的二次函数估计中, 由于排放强度一次项显著为负, 二次项显著为正, 故得到一个开口向上的 U 型曲线, 并可以计算出 U 型曲线最低点对应的排放强度, 而此时对应的边际减排成本最低. 该最低点左侧, 排放强度越低, 边际减排成本越高; 最低点右侧, 排放强度越低, 边际减排成本也越低. 可计算出最低点对应的二氧化硫排放强度为 62.5 吨/百万元, 但样本中没有企业位于 U 型曲线的右侧, 这表明对于样本中的企业来说, 随着污染物排放强度的降低, 边际减排成本会逐渐上升. 此外, 工业增加值、资本劳动比两个变量的系数显著为负, 经营年限变量在 10% 水平上显著为正, 所有权、能源结构变量不显著. 在第二列的对数函数估计中, 排放强度对数项显著为负, 意味着对于样本企业来说, 排放强度越低, 边际减排成本会越高. 其他变量系数与第一列相近. 在第三列的指数函数估计中, 排放强度系数同样显著为负, 此外, 经营年限变量不显著, 而所有

表 5 计量模型变量描述性统计

变量	样本数	均值	标准差	最小值	最大值
边际减排成本 (百万元/吨)	320	0.60	0.21	0.00	0.99
排放强度 (吨/百万元)	320	5.13	5.63	1.00	52.31
企业规模 (百万元)	320	69.00	113.88	10.00	1,141.80
资本劳动比 (千元/人)	320	141.16	231.11	0.05	2,458.31
经营年限 (年)	320	11.45	10.62	0	55
所有权 (1 = 国有企业, 0 = 其他)	320	0.14	0.35	0	1
能源结构	320	0.95	0.20	0.00	1.00

表6 边际减排成本曲线估计结果

变量	二次函数	对数函数	指数函数	幂函数
排放强度	-0.024*** (-6.97)		-0.069*** (-14.78)	
排放强度的平方	0.0002** (2.06)			
排放强度的对数		-0.132*** (-10.64)		-0.429*** (-10.80)
企业规模	-0.001*** (-10.87)	-0.001*** (-10.69)	-0.003*** (-12.23)	-0.003*** (-10.80)
资本劳动比	-0.0001*** (-3.53)	-0.000*** (-4.48)	-0.001*** (-5.88)	-0.001*** (-6.86)
经营年限	0.002* (1.91)	0.002** (2.07)	0.003 (1.33)	0.004 (1.32)
所有权	-0.036 (-1.35)	-0.033 (-1.24)	-0.129* (-1.68)	-0.113 (-1.32)
能源结构	-0.041 (-0.94)	-0.045 (-1.02)	-0.183 (-1.43)	-0.207 (-1.45)
截距	0.814*** (17.41)	0.882*** (18.28)	0.145 (1.10)	0.393** (2.56)
样本数	320	320	320	320
调整 R^2	0.459	0.439	0.581	0.481

注: 括号中为 t 统计量, *, **, *** 分别表示在 10%、5%、1% 水平上显著。

权变量在 10% 水平上为负。在第四列的幂函数估计中, 排放强度对数的系数仍然在 1% 水平上显著, 其他变量的显著性与其他模型估计一致。

通过上述回归, 可以发现, 从模型整体的拟合优度来看, 指数函数模型的拟合优度最高, 之后依次是幂函数、二次函数以及对数函数模型。企业规模在各个模型中均展现显著的负向影响, 这符合减排规模效应的预期。资本劳动比在回归中也始终表现为负向影响, 说明越“重”的行业边际减排成本越低。经营年限因素在二次函数和对数函数模型中体现为正向影响, 说明经营年限越久, 边际减排成本越高; 但其在指数函数和幂函数模型中影响不显著, 故该因素的影响有待进一步验证。此外, 企业所有权仅在指数函数模型中显著为负, 能源结构因素在所有模型中均不显著。

5.3 减排成本与福利

根据边际减排成本曲线估计结果, 假设各行业产出均维持不变, 即可以通过公式 (1) 计算减排成本。根据本文上一部分模型拟合优度结果, 选取相对最优的指数函数形式边际减排成本曲线。若将协变量设置在其平均值大小, 则可得曲线表达式为: $MAC = f(int) = e^{-0.069int - 0.164}$ 。

根据边际减排成本曲线以及各行业的排放量和产值数据, 本部分对“按排放比例分配减排量”和“效率优先, 公平补偿”这两种减排方案进行数值模拟。综合考虑二氧化硫减排的约

束性目标和数据可得性, 以 2015 年排放和产值数据 (见表 3) 为例, 得六大高耗能行业合计排放二氧化硫 1,204.06 万吨. 假设产出水平维持不变, 每年六大高耗能行业减排二氧化硫 1%, 即六大行业合计减排 12.04 万吨, 那么通过公式 (1) (2) 和 (3) 可计算出两种方案下六大行业的减排量、减排成本以及福利变化, 结果如表 7 所示.

在方案一的基准情景下, 假如根据各行业排放量之比来分配 12.04 万吨的减排量, 那么应当分配电力热力业减排 5.06 万吨, 矿物制品业减排 2.04 万吨, 黑色金属业减排 1.74 万吨, 化学制品业减排 1.35 万吨, 有色金属业减排 1.21 万吨, 石油加工业减排 0.65 万吨. 如果各行业按排放比例如此分配减排量, 则总体的减排成本为 10,880.34 亿元.

在方案二“效率优先, 公平补偿”的情景下, 就第一步而言, 如果希望最小化全社会的减排成本, 则直观上应该让减排成本较低的主体先减排, 减排成本较高的主体后减排. 根据边际减排成本曲线和行业排放强度, 边际减排成本最低的是电力热力业, 因此应该优先减排. 具体而言, 本文采用 GAMS 软件对公式 (2) 的模型进行求解, 得出在 1% 的总体减排目标下, 为了实现社会减排总成本的最小化, 12.04 万吨应该都由电力热力业来减排. 此时, 总体的减排成本为 253.28 亿元. 在此基础上, 结合基准方案减排成本, 可根据公式 (3) 求解出第二步中电力热力业的资金补偿数额、其余五大行业的征税数额以及各行业的最终减排成本. 由于转移支付并不改变社会减排总成本, 所以该“两步走”方案下最终的总体减排成本仍为 253.28 亿元.

当然需要说明的是, 上述减排方案的具体数值仅是模拟分析下的结果, 如果考虑到不同行业对于国民经济的重要程度, 则仅由电力热力行业承担减排任务可能不是最优的结果. 事实上, 模拟分析的结果取决于模型对现实的一系列简化抽象, 其具体结果会受到前提假设、目标函数以及约束条件等的影响. 但最重要的是, 本文的初衷是提出一个能够实现社会减排总成本最小化和所有主体福利改进的减排方案, 而上述模拟分析的直观结果表明, 这一初衷已经实现.

表 7 不同减排方案下各行业减排量及成本计算

行业	方案一 (基准):		方案二:				方案一 → 方案二	
	按排放比例分配		效率优先, 公平补偿				净福利变化	
	减排量 (万吨)	减排成本 (亿元)	第一步: 按成本最小化分配	第二步: 转移支付	收支数额 (亿元)	最终减排成本 (亿元)	变化数额 (亿元)	变化比例 (%)
石油加工业	0.65	1,496.83	0.00	0.00	-34.84	34.84	+1,461.99	+97.67
化学制品业	1.35	3,727.84	0.00	0.00	-86.78	86.78	+3,641.06	+97.67
矿物制品业	2.04	1,680.62	0.00	0.00	-39.12	39.12	+1,641.49	+97.67
黑色金属业	1.74	2,153.47	0.00	0.00	-50.13	50.13	+2,103.34	+97.67
有色金属业	1.21	1,718.71	0.00	0.00	-40.01	40.01	+1,678.70	+97.67
电力热力业	5.06	102.88	12.04	253.28	+250.89	2.39	+100.49	+97.67
合计	12.04	10,880.34	12.04	253.28	0.00	253.28	+10,627.06	+97.67

注: 排放强度 = 排放量/工业销售产值.

6 结论

本文围绕“如何通过最优分配来实现社会减排总成本的最小化”这一核心问题, 提出一个兼顾公平与效率的“效率优先, 公平补偿”的污染物减排新思路, 进一步聚焦中国六大高耗能行业, 应用参数化方向距离函数方法和企业级微观数据, 分行业测算并对比了边际减排成本, 构建并估计了四种函数形式下的边际减排成本曲线, 最后通过不同减排方案的成本对比直观验证了本文新思路下社会减排总成本最小化和福利改进的实现. 本文主要有以下几点发现:

首先, “效率优先, 公平补偿”的“两步走”方案能够节约社会减排总成本和每一个排放主体的最终减排成本, 实现社会总体和所有主体的福利改进. 相比于传统的按排放比例分配的方案, 该方案要求边际减排成本低的行业率先减排, 再通过转移支付的方式达到帕累托集中合同曲线的其中一点. 在六大行业每年减排 1% 的假定目标下, 能够实现社会总体和每一个排放主体 97.67% 的福利改进.

其次, 虽然同为高耗能行业, 但不同行业下企业的二氧化硫边际减排成本存在较大差异. 电力热力业的二氧化硫边际减排成本是最低的, 平均为 6.71 万元/吨; 黑色金属业的二氧化硫边际减排成本平均为 20.34 万元/吨; 有色金属业平均为 49.12 万元/吨; 石油加工业平均为 50.7 万元/吨; 矿物制品业平均为 61.72 万元/吨; 边际减排成本最高的是化学制品业, 平均为 76.43 万元/吨. 企业级别跨行业的边际减排成本测算, 能够为节能减排政策补充微观层面的参考信息.

最后, 边际减排成本曲线对于刻画行业发展阶段具有一定作用. 就六大高耗能行业的企业而言, 边际减排成本和排放强度之间基本呈现负相关关系, 即排放强度越低, 边际减排成本越高, 这说明企业会面对不断上升的减排难度.

本文“效率优先, 公平补偿”的新思路借助“错时”策略兼顾了公平原则与效率原则, 其“两步走”的方案具有一定的政策启示. 一方面, 就第一步而言, 社会福利的巨大改进潜力引人深思. 中国政府为了治理空气污染付出了巨大努力, 然而在减少污染排放的过程中, 如果不能科学合理地分配减排责任, 那么即使排放量降低, 从成本有效和社会福利的角度来看也未必是最优的结果. 本文的模拟分析即直观地表明, 各行业之间边际减排成本差异巨大, 如果让减排成本差别很大的行业承担相同的减排任务, 则会造成社会资源的巨大浪费. 而通过在不同行业企业之间合理分配减排量, 优先让减排成本低的主体减排, 则能够实现全社会减排成本的节约. 环境政策不能简单地一刀切, 政府应该根据行业特征进行精细、合理的安排, 识别出不同行业 and 企业的边际减排成本, 为其设置合理的减排任务, 进而最小化全社会的减排成本. 当然, 本文的减排方案模型也表明, 成本最小化目标下的最优分配会受到约束条件的影响, 更复杂、更细致的约束条件可对实际情景进行更准确的刻画, 以得到更现实可行的分配结果. 例如, 考虑各主体内生的技术特征和减排能力, 可在优化模型的基础上加入各主体的减排量上限; 考虑强度目标的现实和经济增长的需要, 可允许排放量适当增加. 在成本最小化目标的框架下, 这些尝试可为政策制定带来更多启示. 另一方面, 就第二步而言, 转移支付的关键作用令人印象深刻. 相比于现有减排方案的基准水平, 单纯的成本最小化分配结果必然导致一部分主体的受损和另一部分主体的受益. 因此, 单纯止步于“两步走”方案的第一步是

不可接受的. 通过资金转移支付的方式, 方案第二步能够在不改变社会减排总成本的情况下, 实现每一个排放主体相对于基准水平的福利改进, 以此达到一个真正的最优状态. 当然, 本文关于方案第二步的方程组也表明, 转移支付的具体数额选择并不唯一, 若不要求各主体拥有相同的福利改进比例, 则可以在其他现实目标或约束下得出不同的结果. 总而言之, 本文的新思路具有一定的政策参考和探讨价值.

本文的不足之处在于方向距离函数中方向向量的选择, 其不同的选取方式会对边际减排成本的测算结果产生一定影响, 因而测算结果仅能起到相对的参考作用. 此外, 受限于微观数据的可得性, 本文仅基于 2008 年的二氧化硫边际减排成本进行模拟分析, 未来有待于更丰富的数据集以用于动态分析.

参 考 文 献

- 毕军, 周国梅, 张炳, 葛俊杰, (2007). 排污权有偿使用的初始分配价格研究 [J]. 环境保护, (13): 51-54.
- Bi J, Zhou G M, Zhang B, Ge J J, (2007). Study on the Initial Allocation Price for the Paid Use of Emission Rights[J]. Environmental Protection, (13): 51-54
- 陈诗一, (2010). 工业二氧化碳的影子价格: 参数化和非参数化方法 [J]. 世界经济, 33(8): 93-111.
- Chen S Y, (2010). Shadow Price of Industrial Carbon Dioxide: Parametric and Non-parametric Methods[J]. The Journal of World Economy, 33(8): 93-111.
- 陈醒, 徐晋涛, (2021). 化工企业污染物影子价格的估计 —— 基于参数化的方向性距离函数 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 57(2): 341-350.
- Chen X, Xu J T, (2021). Estimation of Shadow Price of Major Pollutants in China's Chemical Firms: An Empirical Analysis Based on Directional Distance Function[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 57(2): 341-350.
- 国务院, (2011). 中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要 [EB/OL]. [2022-09-03]. http://www.gov.cn/2011lh/content_1825838.htm.
- The State Council, (2011). Outline of the Twelfth Five-Year Plan for National Economic and Social Development of the People's Republic of China[EB/OL]. [2022-09-03]. http://www.gov.cn/2011lh/content_1825838.htm.
- 国务院, (2016). 中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要 [EB/OL]. [2022-09-03]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-03/17/content_5054992.htm.
- The State Council, (2016). Outline of the Thirteenth Five-Year Plan for National Economic and Social Development of the People's Republic of China[EB/OL]. [2022-09-03]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-03/17/content_5054992.htm.
- 国务院, (2021). 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要 [EB/OL]. [2022-09-03]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
- The State Council, (2021). Outline of the Fourteenth Five-Year Plan for National Economic and Social Development and the Long-Range Objectives Through the Year 2035 of the People's Republic of China[EB/OL]. [2022-09-03]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
- 环境保护部, 发展改革委, 财政部, (2012). 重点区域大气污染防治“十二五”规划 [EB/OL]. [2022-09-03]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2013/content_2344559.htm.
- Ministry of Environmental Protection, National Development and Reform Commission, Ministry of

- Finance, (2012). The 12th Five-Year Plan for Air Pollution Prevention and Control in Key Regions[EB/OL]. [2022-09-03]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2013/content_2344559.htm.
- 格里高利·N·曼昆, (2015). 经济学原理: 微观经济学分册 [M]. 7 版. 北京: 北京大学出版社.
- Mankiw N G, (2015). Principles of Economics: Microeconomics Volume[M]. 7th ed. Beijing: Peking University Press.
- 生态环境部, (2021a). 生态环境部召开 2 月例行新闻发布会 [EB/OL]. [2022-09-03]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk15/202102/t20210225_822424.html.
- Ministry of Ecology and Environment, (2021a). The Ministry of Ecology and Environment Held a Regular Press Conference for February[EB/OL]. [2022-09-03]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk15/202102/t20210225_822424.html.
- 生态环境部, (2021b). 中国生态环境状况公报 [R].
- Ministry of Ecology and Environment, (2021b). Report on the State of the Ecology and Environment in China[R].
- 宋杰鲲, 张凯新, 曹子建, (2017). 省域碳排放配额分配 —— 融合公平和效率的研究 [J]. 干旱区资源与环境, 31(5): 7-13.
- Song J K, Zhang K X, Cao Z J, (2017). Provincial Allocation of Carbon Emission Quotas — Under the Fusion of Fairness and Efficiency[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 31(5): 7-13.
- 谭显春, 程永龙, 顾佰和, (2022). 中国碳总量控制新进展: 省域碳配额分配研究综述 [J]. 气候变化研究进展, 19(1): 1-13.
- Tan X C, Cheng Y L, Gu B H, (2022). New Progress in Controlling the Total Volume of Carbon Emissions in China: A Review on the Allocation of Provincial Carbon Emission Allowances[J]. Climate Change Research, 19(1): 1-13.
- 涂正革, (2010). 工业二氧化硫排放的影子价格: 一个新的分析框架 [J]. 经济学 (季刊), 9(1): 259-282.
- Tu Z G, (2010). The Shadow Price of Industrial SO₂ Emission: A New Analytic Framework[J]. China Economic Quarterly, 9(1): 259-282.
- 涂正革, 王昆, 谌仁俊, (2022). 经济增长与污染减排: 一个统筹分析框架 [J]. 经济研究, 57(8): 154-171.
- Tu Z G, Wang K, Shen R J, (2022). Economic Growth and Pollution Reduction: An Integrated Analytical Framework[J]. Economic Research Journal, 57(8): 154-171.
- 王倩, 高翠云, (2016). 公平和效率维度下中国省际碳权分配原则分析 [J]. 中国人口·资源与环境, 26(7): 53-61.
- Wang Q, Gao C Y, (2016). Analysis of Allocation Principles for China's Provincial Carbon Emission Allowance Under the Equity and Efficiency Dimension[J]. China Population, Resources and Environment, 26(7): 53-61.
- 王文举, 陈真玲, (2019). 中国省级区域初始碳配额分配方案研究 —— 基于责任与目标、公平与效率的视角[J]. 管理世界, 35(3): 81-98.
- Wang W J, Chen Z L, (2019). Research on Initial Carbon Quota Allocation Scheme in China's Provincial Regions — Based on the Perspective of Responsibility and Goal, Equity and Efficiency[J]. Journal of Management World, 35(3): 81-98.
- 魏楚, (2014). 中国城市 CO₂ 边际减排成本及其影响因素 [J]. 世界经济, 37(7): 115-141.
- Wei C, (2014). Marginal Abatement Cost of CO₂ and Its Influencing Factors in China's Cities[J]. The Journal of World Economy, 37(7): 115-141.
- 吴丹, 列毓颖, 刘利, 张玲, 杨展翼, (2019). 京津冀和珠三角地区二氧化硫减排成本评估及政策启示 [J]. 环境

- 与可持续发展, 44(3): 56–63.
- Wu D, Lie Y Y, Liu L, Zhang L, Yang Z Y, (2019). Abatement Cost of Sulfur Dioxide in Beijing-Tianjin-Hebei Region and the Pearl River Delta and Its Policy Implications[J]. *Environment and Sustainable Development*, 44(3): 56–63.
- 吴贤荣, 张俊飏, 田云, 薛龙飞, (2015). 基于公平与效率双重视角的中国农业碳减排潜力分析 [J]. *自然资源学报*, 30(7): 1172–1182.
- Wu X R, Zhang J B, Tian Y, Xue L F, (2015). Analysis on China's Agricultural Carbon Abatement Capacity from the Perspective of Both Equity and Efficiency[J]. *Journal of Natural Resources*, 30(7): 1172–1182.
- 武佳倩, 侯胜杰, 关忠诚, (2018). 中国省际能源环境效率评价及碳减排责任分摊 [J]. *系统科学与数学*, 38(4): 406–422.
- Wu J Q, Hou S J, Guan Z C, (2018). Energy Environment Efficiency Evaluation and the Carbon Reduction Responsibility Allocation across Chinese Provinces[J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 38(4): 406–422.
- 袁鹏, 程施, (2011). 我国工业污染物的影子价格估计 [J]. *统计研究*, 28(9): 66–73.
- Yuan P, Cheng S, (2011). Estimating Shadow Pricing of Industrial Pollutions in China[J]. *Statistical Research*, 28(9): 66–73.
- 张宁, (2022). 碳全要素生产率、低碳技术创新和节能减排效率追赶 —— 来自中国火力发电企业的证据 [J]. *经济研究*, 57(2): 158–174.
- Zhang N, (2022). Carbon Total Factor Productivity, Low Carbon Technology Innovation and Energy Efficiency Catch-Up: Evidence from Chinese Thermal Power Enterprises[J]. *Economic Research Journal*, 57(2): 158–174.
- 张宁, 刘青君, (2022). 碳交易对碳达峰、碳中和目标的成本效益机制研究 —— 基于试点省市高耗能行业的模拟 [J]. *广东社会科学*, (2): 46–58.
- Zhang N, Liu Q J, (2022). Study on the Cost-Benefit Mechanism of Carbon Trading on Carbon Peak and Carbon Neutrality Goals — Based on the Simulation of Energy-Intensive Industries in Pilot Provinces and Cities[J]. *Social Sciences in Guangdong*, (2): 46–58.
- 郑立群, (2013). 中国各省区碳减排责任分摊 —— 基于公平与效率权衡模型的研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 27(5): 1–6.
- Zheng L Q, (2013). Sharing the Carbon Emission Reduction Responsibility of Chinese Provinces — Based on the Fairness-Efficiency Trade-off Model[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 27(5): 1–6.
- 中国工程院, 环境保护部, (2011). 中国环境宏观战略研究 [M]. 北京: 中国环境科学出版社.
- Chinese Academy of Engineering, Ministry of Environmental Protection, (2011). *Macro-Strategy Research on China's Environment*[M]. Beijing: China Environmental Science Press.
- 周迪, 郑楚鹏, 华诗润, 黄宇森, (2019). 公平与效率协调视角下的中国碳减排潜力与路径 [J]. *自然资源学报*, 34(1): 80–91.
- Zhou D, Zheng C P, Hua S R, Huang Y S, (2019). The Potentialities and Paths of China's Carbon Emission Reduction Based on the Coordination of Fairness and Efficiency[J]. *Journal of Natural Resources*, 34(1): 80–91.
- 周鹏, 安超, (2022). 二氧化碳影子价格参数化估计: 一个统一框架 [J]. *计量经济学报*, 2(3): 490–509.
- Zhou P, An C, (2022). Estimating the Shadow Price of Carbon Dioxide: A Unified Parametric Framework[J]. *China Journal of Econometrics*, 2(3): 490–509.

- 周权雄, (2009). 政府干预、共同代理与企业污染减排激励 —— 基于二氧化硫排放量省际面板数据的实证检验 [J]. 南开经济研究, (4): 109–130.
- Zhou Q X, (2009). Government Intervention, Common Agency and the Enterprise's Pollution Emission Reduction Incentive: Evidence from the Provincial Panel Data of Industrial Emissions of SO₂[J]. Nankai Economic Studies, (4): 109–130.
- 周永文, (2017). 工业环境污染影子价格研究 —— 以广东省工业 36 个分行业为例 [J]. 产经评论, 8(2): 93–107.
- Zhou Y W, (2017). Study on the Shadow Price of Environmental Pollutants — A Case Study of Guangdong Industry[J]. Industrial Economic Review, 8(2): 93–107.
- Aigner D J, Chu S F, (1968). On Estimating the Industry Production Function[J]. American Economic Review, 58: 826–839.
- Chambers R G, (1998). Input and Output Indicators[C]// Färe R, Grosskopf S, Russell R R. Index Numbers in Honour of Sten Malmquist. Boston: Kluwer Academic Publishers: 241–272.
- Chung Y H, Färe R, Grosskopf S, (1997). Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach[J]. Journal of Environmental Management, 51(3): 229–240.
- Du L, Hanley A, Wei C, (2015). Estimating the Marginal Abatement Cost Curve of CO₂ Emissions in China: Provincial Panel Data Analysis[J]. Energy Economics, 48: 217–229.
- Du L, Mao J, (2015). Estimating the Environmental Efficiency and Marginal CO₂ Abatement Cost of Coal-Fired Power Plants in China[J]. Energy Policy, 85: 347–356.
- Ellerman A D, Jacoby H D, Decaux A, (1998). The Effects on Developing Countries of the Kyoto Protocol and Carbon Dioxide Emissions Trading[J/OL]. [2022-09-03]. <https://ssrn.com/abstract=569250>.
- Färe R, Grosskopf S, (1990). A Distance Function Approach to Price Efficiency[J]. Journal of Public Economics, 43(1): 123–126.
- Färe R, Grosskopf S, Lovell C A K, Yaisawarng S, (1993). Derivation of Shadow Prices for Undesirable Outputs: A Distance Function Approach[J]. The Review of Economics and Statistics, 75(2): 374–380.
- Färe R, Li S K, (1998). Inner and Outer Approximations of Technology: A Data Envelopment Analysis Approach[J]. European Journal of Operational Research, 105(3): 622–625.
- Färe R, Martins-Filho C, Vardanyan M, (2010). On Functional form Representation of Multi-Output Production Technologies[J]. Journal of Productivity Analysis, 33(2): 81–96.
- Färe R, Primont D, (1995). Multi-Output Production and Duality: Theory and Applications[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Hailu A, Veeman T S, (2000). Environmentally Sensitive Productivity Analysis of the Canadian Pulp and Paper Industry, 1959–1994: An Input Distance Function Approach[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 40(3): 251–274.
- Ji D, Zhou P, (2020). Marginal Abatement Cost, Air Pollution and Economic Growth: Evidence from Chinese Cities[J]. Energy Economics, 86: 104658.
- Kaneko S, Fujii H, Sawazu N, Fujikura R, (2010). Financial Allocation Strategy for the Regional Pollution Abatement Cost of Reducing Sulfur Dioxide Emissions in the Thermal Power Sector in China[J]. Energy Policy, 38(5): 2131–2141.
- Ke T Y, Hu J L, Li Y, Chiu Y H, (2008). Shadow Prices of SO₂ Abatements for Regions in China[J/OL]. [2022-09-03]. <https://ssrn.com/abstract=2047646>.
- Kesicki F, Strachan N, (2011). Marginal Abatement Cost (MAC) Curves: Confronting Theory and Practice[J]. Environmental Science and Policy, 14(8): 1195–1204.

- Ma C, Hailu A, You C, (2019). A Critical Review of Distance Function Based Economic Research on China's Marginal Abatement Cost of Carbon Dioxide Emissions[J]. *Energy Economics*, 84: 104533.
- Murty M N, Kumar S, Dhavala K K, (2007). Measuring Environmental Efficiency of Industry: A Case Study of Thermal Power Generation in India[J]. *Environmental and Resource Economics*, 38(1): 31–50.
- Nakaishi T, (2021). Developing Effective CO₂ and SO₂ Mitigation Strategy Based on Marginal Abatement Costs of Coal-Fired Power Plants in China[J]. *Applied Energy*, 294: 116978.
- Tang K, Yang L, Zhang J, (2016). Estimating the Regional Total Factor Efficiency and Pollutants' Marginal Abatement Costs in China: A Parametric Approach[J]. *Applied Energy*, 184: 230–240.
- Wang Y, Song J, Yang W, Dong L, Duan H, (2019). Unveiling the Driving Mechanism of Air Pollutant Emissions from Thermal Power Generation in China: A Provincial-Level Spatiotemporal Analysis[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 151: 104447.
- Wei C, Löschel A, Liu B, (2013). An Empirical Analysis of the CO₂ Shadow Price in Chinese Thermal Power Enterprises[J]. *Energy Economics*, 40: 22–31.
- Wei X, Zhang N, (2020). The Shadow Prices of CO₂ and SO₂ for Chinese Coal-Fired Power Plants: A Partial Frontier Approach[J]. *Energy Economics*, 85: 104576.
- Wu D, Li S, Liu L, Lin J, Zhang S, (2021). Dynamics of Pollutants' Shadow Price and Its Driving Forces: An Analysis on China's Two Major Pollutants at Provincial Level[J]. *Journal of Cleaner Production*, 283: 124625.
- Xie H, Shen M, Wei C, (2016). Technical Efficiency, Shadow Price and Substitutability of Chinese Industrial SO₂ Emissions: A Parametric Approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 112: 1386–1394.
- Zhou P, Zhou X, Fan L, (2014). On Estimating Shadow Prices of Undesirable Outputs with Efficiency Models: A Literature Review[J]. *Applied Energy*, 130: 799–806.

附录 A: 基于方向距离函数的边际减排成本模型

本文基于方向距离函数模型 (Chung et al. (1997)) 测算边际减排成本. 假定投入 x , 能够获得合意产出 y 和非合意产出 b , 则生产技术通过生产可能集描述为: $P(x) = \{(y, b) : x \text{ 能产出 } (y, b)\}$. 该集合需满足三个特性假设, 即自由处置假设、联合弱处置假设和零结合性假设. 自由处置假设表示为: 若 $(y, b) \in P(x)$ 且 $y' < y$, 则 $(y', b) \in P(x)$; 联合弱处置假设表示为: 若 $(y, b) \in P(x)$ 且 $0 < \theta < 1$, 则 $(\theta y, \theta b) \in P(x)$; 零结合性假设表示为: 若 $(y, b) \in P(x)$ 且 $b = 0$, 则 $y = 0$.

基于生产可能集, 能够推导出对应的距离函数. 距离函数描述了某一个生产单元在特定生产技术下的生产效率, 通常分为三类: 投入距离函数、产出距离函数和方向距离函数. 其中, 方向距离函数是前两种距离函数的改进形式, 如今已得到广泛应用. 为了描述方向距离函数, 首先需要构造一个方向向量 $g = (g_y, -g_b)$, 其描述了某个生产单元的合意产出与非合意产出向生产前沿面移动的方向. 基于某个方向向量, 方向距离函数可以定义为: $\vec{D}_O(x, y, b; g_y, -g_b) = \sup\{\beta : (y + \beta g_y, b - \beta g_b) \in P(x)\}$. 其中, β 表示与生产前沿面上最有效率的产出相比, 某生产单元需要沿方向向量扩张 (缩小) 的程度. 如果 $\beta = 0$, 说明当前的生产单元已经是既有生产技术下最有效率的. β 越大, 说明该生产单元通过效率改进, 合意产出能够增加或非合意产出能够减少的空间越大.

基于方向距离函数与收益函数的对偶性质 (Färe and Grosskopf (1990)), 污染物的影子价格 q 可由合意产出的价格 p 表示出来. 由生产者决策均衡条件可知, 非合意产出与合意产出的价格之比等于其边际转换率, 那么非合意产出的价格就可以进一步表示为边际转换率与合意产出市场价格的乘积 (Färe et al. (1993)), 其含义为特定生产技术下减少一单位非合意产出所必须减少的合意产出价值:

$$q = -p \cdot \frac{\partial \vec{D}_O(x, y, b; g_y, -g_b) / \partial b}{\partial \vec{D}_O(x, y, b; g_y, -g_b) / \partial y}. \quad (4)$$

在该模型基础上, 只需要估计出方向距离函数, 即可计算出边际减排成本. 方向距离函数的估计方法有参数化和非参数化两类. 非参数化估计方法通常采用 DEA 模型, 其优点是无需预先设定距离函数的具体形式, 避免了任意性. 但其局限性在于难以对距离函数进行求导, 因此不便于进行影子价格的求解 (Färe and Li (1998)). 鉴于此, 本文采用参数化估计方法. 参数化方法通常将生产函数赋予一定的形式, 通过方向距离函数具体表示出来, 用以进一步代数处理 (Hailu and Veeman (2000)).

超越对数型和二次型是参数化方向距离函数常用的两种函数形式, 相比于超越对数型, 二次型函数更容易被施加约束以满足相关属性 (Chambers (1998)), 并且表现出更好的逼近性质 (Färe et al. (2010)). 因此, 本文采用二次型方向距离函数形式. 在 N 个投入、 M 个合

意产出和 J 个非合意产出构成的数据结构下, 第 k 个观测值的方向距离函数设定如下:

$$\begin{aligned} \vec{D}_O(x_k, y_k, b_k; g_y, -g_b) = & \alpha_0 + \sum_{n=1}^N \alpha_n x_{nk} + \sum_{m=1}^M \beta_m y_{mk} + \sum_{j=1}^J \gamma_j b_{jk} + \\ & \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^N \alpha_{nn'} x_{nk} x_{n'k} + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^M \beta_{mm'} y_{mk} y_{m'k} + \\ & \frac{1}{2} \sum_{j=1}^J \sum_{j'=1}^J \gamma_{jj'} b_{jk} b_{j'k} + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \delta_{nm} x_{nk} y_{mk} + \\ & \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J \nu_{nj} x_{nk} b_{jk} + \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J \mu_{mj} y_{mk} b_{jk}. \end{aligned} \tag{5}$$

本文取方向向量 $(g_y, -g_b) = (1, -1)$, 采用线性规划算法来求解上式中的未知参数 (Färe et al. (1993)):

$$\begin{aligned} & \min \sum_{k=1}^K [\vec{D}_O(x_k, y_k, b_k; g_y, -g_b) - 0] \\ \text{s.t.} \quad & \text{(i)} \quad \vec{D}_O(x_k, y_k, b_k; g_y, -g_b) \geq 0, \quad k = 1, \dots, K, \\ & \text{(ii)} \quad \frac{\partial \vec{D}_O(x_k, y_k, b_k; g_y, -g_b)}{\partial x_{nk}} \geq 0, \quad n = 1, \dots, N, \quad k = 1, \dots, K, \\ & \text{(iii)} \quad \frac{\partial \vec{D}_O(x_k, y_k, b_k; g_y, -g_b)}{\partial y_{mk}} \leq 0, \quad m = 1, \dots, M, \quad k = 1, \dots, K, \\ & \text{(iv)} \quad \frac{\partial \vec{D}_O(x_k, y_k, b_k; g_y, -g_b)}{\partial b_{jk}} \geq 0, \quad j = 1, \dots, J, \quad k = 1, \dots, K, \\ & \text{(v)} \quad \begin{cases} \sum_{m=1}^M g_{y,m} \beta_m - \sum_{j=1}^J g_{b,j} \gamma_j = -1, \\ \sum_{m'=1}^M g_{y,m'} \beta_{mm'} - \sum_{j=1}^J g_{b,j} \mu_{mj} = 0, \quad m = 1, \dots, M, \\ \sum_{m=1}^M g_{y,m} \mu_{mj} - \sum_{j'=1}^J g_{b,j'} \gamma_{jj'} = 0, \quad j = 1, \dots, J, \\ \sum_{m=1}^M g_{y,m} \delta_{nm} - \sum_{j=1}^J g_{b,j} \nu_{nj} = 0, \quad n = 1, \dots, N, \end{cases} \tag{6} \\ & \text{(vi)} \quad \begin{cases} \alpha_{nn'} = \alpha_{n'n}, n, n' = 1, \dots, N, \quad n \neq n', \\ \beta_{mm'} = \beta_{m'm}, m, m' = 1, \dots, M, \quad m \neq m', \\ \gamma_{jj'} = \gamma_{j'j}, j, j' = 1, \dots, J, \quad j \neq j'. \end{cases} \end{aligned}$$

该算法通过最小化所有生产单元到生产前沿的距离来求解方向距离函数中的待估参数. 约束条件 (i) 保证所有观测点在生产集中是可行的; 约束条件 (ii) (iii) (iv) 分别是对投入、合

意产出和非合意产出的单调性要求; 约束条件 (v) 和 (vi) 则反映方向距离函数的转换属性和对称性.

附录 B: 以往文献测算的中国工业二氧化硫边际减排成本

表 8 以往文献测算的中国工业二氧化硫边际减排成本

文献	时间	样本	行业	方法	结论
涂正革 (2010)	1998-2005	30 个省	工业行业	方向距离函数	边际减排成本从 1999 年的 0.31 万元/吨上升到 2002 年的 37.9 万元/吨, 2005 年又下降到 3.64 万元/吨.
Kaneko et al. (2010)	2003, 2006	30 个省	火力发电	方向距离函数	当脱硫率为 90% 的时候, 2003 年的边际减排成本为 2.07 万元/吨, 2006 年边际减排成本升至 4.73 万元/吨.
袁鹏和程施 (2011)	2003-2008	284 个地级市	工业行业	方向距离函数	2003-2008 年平均为 5.2 万元/吨, 并且在不同城市之间存在巨大差异, 边际减排成本的变动区间为 0.087~409.2 万元/吨.
Xie et al. (2016)	1998-2011	30 个省	工业行业	方向距离函数	从 1998 到 2011 年, 中国的二氧化硫边际减排成本从 42 万元/吨增长到了 150 万元/吨.
周永文 (2017)	1998-2004	广东省 36 个工业行业	工业行业	产出距离函数	平均边际减排成本从 1998-2006 年的 0.69 万元/吨上升到 2007-2014 年的 8.23 万元/吨.
Wei and Zhang (2020)	2005-2010	93 个火电厂	火力发电	方向距离函数	2005-2010 年二氧化硫平均边际减排成本为 2,525 美元/吨.