

基于 Super-SBM 模型的《大气污染防治行动计划》 省级环保投资绩效评估

薛英岚^{1,2,3} 张 伟^{2,3} 刘 宇¹ 蒋洪强^{2,3} 张 静^{2,3,*} 吴文俊^{2,3}

(1. 中国科学院 科技战略咨询研究院, 北京 100190; 2. 生态环境部环境规划院 国家环境保护环境规划与政策模拟重点实验室, 北京 100012; 3. 生态环境部环境规划院 京津冀区域生态环境研究中心, 北京 100012)

【摘 要】在《大气污染防治行动计划》(简称“大气十条”)全面收官和我国大气污染治理取得阶段性进展之际,开展“大气十条”污染治理投入绩效评估,对提高未来大气环保投资的效益和效率具有重要意义。在此背景下,利用数据包络分析的 Super-SBM 模型,以省为尺度,对我国“大气十条”实施期间污染治理投入绩效进行评估。结果表明,我国“大气十条”实施期间综合效率均值为 0.768,仅 2013、2014 年达到 DEA 有效;大气污染治理投入规模较低的青海、海南等省份综合效率最高,而“大气十条”重点区域省份效率普遍偏低,在一定程度上出现了投入冗余。产业调整与工业治理和能源清洁与结构调整两项措施的投入冗余相对较重,未来应着重提高这两类措施的治理资金利用效率,避免盲目立项和投资。基于大气污染治理投入绩效评估结果,将各省分为四类,针对每一类省份的投入绩效和冗余特征提出了具有针对性的未来大气污染治理投资政策建议。

【关键词】大气污染防治;大气十条;环保绩效评估;数据包络分析

【中图分类号】X323

【文献标识码】A

0 引言

21 世纪以来,随着我国工业化和城镇化进程的加速,我国大气污染物排放量逐年上升,大气环境质量也随之迅速恶化,并在“十二五”期间达到最为严重的程度。为治理大气环境污染,改善大气环境质量,国务院于 2013 年 9 月发布了《大气污染防治行动计划》(以下简称“大气十条”),对未来五年的大气污染治理确定了具体的目标,并从十个方面制定了大气污染防治工作实施方案^[1-2]。2013-2017 年期间,国家和地方累计投资 1.8 万亿元,有效遏制了我国大气环境质量恶化的趋势,但京津冀、汾渭平原等重点区域的大气环境质量仍未能全面达到《大气环境质量标准》(GB 3095-2012)中的二级标准^[3-4],且全国的 PM_{2.5} 浓度等指标与世界卫生组织(WTO)规定的健康空气标准尚存在较大差距^[5]。2018 年 7 月,国务院发布《打赢蓝天保卫战三年行动计划》,同时,在生态文明的国策下,“建设美丽中国”也对未来我国的大气环境污染治理提出了更高的要求,大气污染防治的资金需求仍会不断增长^[6]。因此,在我国环境保护投资有限的情况下,开展“大气十条”环保投资的绩效评估研究,有利于提高环保投资资金的效益和效率,避免低效投资等问题的出现。

目前,多位学者从不同视角对大气污染治理进行了绩效评估。罗知和李浩然^[7]从北方冬季供暖政策角度,基于双重差分模型对我国北方地区冬季供暖实施“煤改气”、“改进燃煤锅

炉”等措施的环境效益和成本进行了对比分析,结果显示在同等空气质量改善目标下,实行集中供热并采用先进的燃煤锅炉的成本更低。李春瑜^[8]、李丽和孙文远^[9]采用“压力—状态—响应”模型(Pressure-State-Response, PSR)和主成分分析法,分别对 2011—2013 年全国各省和 2013-2015 年江苏省的大气污染治理进行绩效评价,结果显示,大多数省份的大气污染治理投资主要关注“减排管理”,投资绩效在区域间呈现出两极分化的不平衡状态。赵亦婷^[10]以在我国新出台的“大气十条”和修订的《大气污染防治法》为背景,对研究区大气污染治理的财政资金使用绩效进行评估,构建了基于大气污染治理环保投资绩效的环境审计体系。以上学者从微观和宏观视角,对近年来我国大气污染治理的绩效进行了探讨和研究;而“大气十条”作为我国“十二五”和“十三五”期间最为重要的大气环境污染治理行动,投资金额巨大,且由于各省的产业结构、能源结构、自然条件等差异明显,不同区域的大气污染治理产生的环境效益参差不齐。因此,有必要在省尺度,对“大气十条”在近年来的大气污染治理环保投资政策实施绩效进行客观的量化和评估,以提高环保资金利用效率,同时为“蓝天保卫战”和“建设美丽中国”的大气污染投入方向和建设路径提供政策建议。

数据包络分析(Data Envelopment Analysis, DEA)是一种对多投入和多产出情况下不同决策单元(Decision Making Units, DMUs)相对效率进行评估的非参数方法,由 Charnes 等^[11]在 1978 年首次提出。与传统评价方法相比,DEA 不需要考虑投入变量与产出变量间的关系,亦无需预先确定参数权重,避免主观因素对评价结果的影响^[12]。由于其具备的客观、高效等优点,DEA 评价方法已被成功应用于政府管理^[13]、医保改革^[14]、财政支出^[15]等领域的绩效分析,结果均显示,DEA 能够较为客观准确地反映投资和政策实施的绩效,为提高投资效率和管理水平提供实际的技术支撑。Super Slack Based Measure

基金项目:国家重点研发计划“大气环境管理的经济手段和行业政策研究”(2018YFC0213700)

*** 通讯作者:**张静(1986-),女,山东人,博士,生态环境部环境规划院副研究员,研究方向为环境规划与政策模拟, E-mail: zhangjing@caep.org.cn。

(Super-SBM) 方法是对 C^2R 、 BC^2 等传统 DEA 模型的改进, 在充分考虑松弛变量的基础上还可在有效的决策单元 (效率值大于 1) 中做出进一步比较。在“大气十条”作为我国近年最重要的大气污染防治行动已全面收官之际, 本研究采用 Super-SBM 评价方法, 以省为尺度, 对其环保投资绩效进行评估, 分析其投资效率, 探讨影响绩效的主要因素, 并对未来我国大气污染治理的投资方向、实施方案提出政策建议。

1 方法与数据

1.1 基于 DEA 的大气污染治理环保投资绩效评估方法

1978 年, 美国运筹学家 Charnes、Cooper 和 Rhodes 以“相对效率”概念为基础, 提出固定规模报酬下的多投入、多产出的数据包络分析 (DEA) 模型^[11], 其原理在于通过数学优化方法确定相对有效的生产前沿面, 通过保持决策单元的输入或输出不变, 将各决策单元投影到生产前沿面上, 之后根据决策单元偏离生产前沿面的程度对它们的相对有效性进行判断, 是一种非参数的评估方法。早期传统的 DEA 方法包括规模收益固定的 C^2R 模型和规模收益可变的 BC^2 模型^[16]。

在多投入和多产出情况下, 可能产生投入要素过剩和产出不足的情况, 造成投入要素的“拥挤或松弛” (congestion or slacks)^[17], 传统的 C^2R 和 BC^2 模型对此有所忽视。为解决松弛问题, Tone 提出一个基于投入松弛测度的 DEA 模型 (Slack-based Measure, SBM)^[18], 有效解决了由于松弛变量产生的绩效核算误差问题。尽管 SBM 模型解决了传统 DEA 模型的松弛变量问题, 但在实际应用中往往存在一个以上的 DEA 有效决策单元, SBM 模型无法对这些决策单元的绩效进行进一步比较和排序。鉴于此, Tone 又提出了超效率 SBM (Super-SBM) 模型^[19], 如式 (1) 所示:

$$\min \delta = \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i / x_{i0}}{\frac{1}{s} \sum_{r=1}^s y_r / y_{r0}} \quad \text{式 (1)}$$

$$s.t. \begin{cases} \bar{x} \geq \sum_{j=1, j \neq 0}^n \lambda_j x_j \\ \bar{y} \leq \sum_{j=1, j \neq 0}^n \lambda_j y_j \\ \bar{x} \geq x_0, \bar{y} \leq y_0 \\ y > 0, \lambda > 0 \end{cases}$$

式中: n 为决策单元 (Decision Making Unit, DMU) 个数, 每个 DMU 由 m 个投入指标 (x_i) 和 s 个产出指标 (y_r) 构成, 在本文中, 投入指标为各省每年根据“大气十条”采取的各项治理措施投入成本, 产出指标为产生的环境效益; δ 为 DMU 与生产前沿面的距离, 即大气污染治理投资绩效; λ 为权重向量。

式 (1) 的最优解中 δ^* 通常用综合效率值 (TE) 表示, 可分解如式 (2) 所示:

$$TE = PTE \cdot SE \quad \text{式 (2)}$$

式中: PTE 为纯技术效率值, SE 为规模效率值。在三种效率中, 综合效率值 (TE) 反映“大气十条”大气污染治理投

资实施的整体水平。纯技术效率 (PTE) 内涵为假定各项投资规模不变时, “大气十条”大气污染治理投资实施过程中治理技术和管理水平的绩效。规模效率值 (SE) 内涵为治理技术和管理水平不变时, 现有投资规模与最佳投资规模间的差异^[17]。

1.2 投入和产出指标

本文在总结相关研究的基础上^[20], 将“大气十条”的环保投资分为产业结构与工业污染治理、能源清洁与结构调整、面源污染治理、监管能力建设四个大项, 作为投入指标, 具体措施及其投资额核算方法如表 1 所示。

表 1 “大气十条”治理措施投资分类

投资分类	具体治理措施	核算方法	数据来源
产业结构调整与工业污染治理	淘汰落后产能、压减过剩产能	根据淘汰产能、工业产品价格和各省对淘汰压减产能的补贴系数确定	各省《生态环境状况公报》、各省《大气污染防治行动计划》、各省统计年鉴中工业产品价格
	“散乱污”企业升级改造	根据“散乱污”企业数量和平均改造成本确定	各省环境统计数据、文献 [21]
	电力、钢铁、水泥、有色金属冶炼、玻璃五大重点行业工业污染治理	电力行业根据超低排放升级改造投资成本确定; 其他重点行业根据治理和运行的年均投资额确定	《中国电力年鉴》、文献 [22-26]
能源清洁与结构调整	散煤清洁利用	根据洗煤厂的建设及运行成本, 以及洁净煤配煤中心建设成本确定	文献 [27]
	燃煤“双替代”	根据“煤改气”和“煤改电”投资确定	文献 [28-30]
	油品升级及配套改造	根据单位油品升级成本和汽油、柴油消费量确定	文献 [31-33]
	建筑节能	根据建筑节能改造面积和单位面积改造费用确定	文献 [34]
面源污染治理	黄标车、老旧车淘汰	根据淘汰车辆数和补贴额度确定	文献 [35-36]
	新能源汽车推广	根据扬尘治理面积和清扫率确定	文献 [20]
监管能力建设	建筑 and 道路扬尘治理	根据大气污染能力建设投入确定	文献 [20]

资料来源: 作者整理

“大气十条”的主要目标为降低大气环境中的细颗粒物 ($PM_{2.5}$)^[1], 此外, 二氧化硫 (SO_2) 和氮氧化物 (NO_x) 也是表征大气环境污染的典型特征污染物。因此, 本文选取 SO_2 、 NO_x 和 $PM_{2.5}$ 比上一年降低的年均浓度作为产出变量, 来评价的“大气十条”实施的环境质量提升效果。各省年均污染物浓度根据各省历年的《生态环境状况公报》确定。

本文以省为尺度, 对“大气十条”实施期间 (2013-2017 年) 的环保投资绩效进行评估, 投入和产出指标数据的描述性统计见表 2。由于西藏、台湾、香港和澳门的数据获取难度较大, 因此未对其进行评估。

1.3 基于大气环保投资绩效的 k-均值聚类分析

为提出更有针对性的我国未来大气污染治理政策, 根据对

表 2 投入和产出指标描述性统计

指标类型	指标名称	样本总量	最小值	最大值	平均值
投入指标	产业结构调整与工业污染治理投资额(亿元)	150	0	248.21	45.75
	能源清洁与结构调整投资额(亿元)	150	0	318.69	42.12
	面源污染治理投资额(亿元)	150	0.06	80.55	17.07
	监管能力建设投资额(亿元)	150	0.001	8.40	1.59
产出指标	SO ₂ 浓度下降值(μg/m ³)	150	-33.2	80.9	6.8
	NO _x 浓度下降值(μg/m ³)	150	-6.9	34.5	4.0
	PM 2.5 浓度下降值(μg/m ³)	150	-34.9	93.5	9.9

各省历年大气环境保护投资绩效的评估结果,以综合效率(TE)、纯技术效率(PTE)、规模效率(SE)以及各投入产出变量的松弛变量为聚类要素,对各省进行k-均值聚类分析。k-均值聚类算法首先从n个数据对象(各省份)中随机选取k个对象作为初始聚类中心点,然后计算其他对象与所选k个中心点的相似度(距离)分别分配给其最相近的类别^[37],相似度计算方法如式(3)所示:

$$d(x_i, Z_k(I)) = \min\{d(x_i, Z_j(I))\} \quad \text{式(3)}$$

式中 $Z_j(I)$ 为选取的k个省份作为初始聚类中心, $j=1,2,\dots,K$, I 为迭代计算次数,初始值为1; $d(x_i, Z_k(I))$ 为每个省份到k个聚类中心的距离。如果满足式(3),则 x_i 属于第j类。将每个省份与初始聚类中心的距离计算完毕后,得到误差平方和准则函数 $J_c(I) = \sum_{i=1}^n \sum_{x \in k} |x - Z_j(I)|^2$ 。

令 $I=I+1$,对重新选取的k个新聚类中心核算其距离 $d(x_i, Z_k(I))$ 和误差平方和准则函数 $J_c(I)$,直到 $|J_c(I) - J_c(I-1)| < 10^{-6}$,则聚类算法结束,得到每个省份所属的最相近类别。根据每一类省份的大气环保投资绩效与松弛变量特征,结合区域具体环境质量水平,对每类省份提出未来大气污染治理的政策建议。

2 结果与讨论

2.1 “大气十条”投入与污染物浓度降低水平

图1和图2分别展示了“大气十条”实施期间全国和各省的大气污染治理投入成本。全国的大气污染治理投入成本从2013年的2036亿元增至2017年的5491亿元;治理措施从以

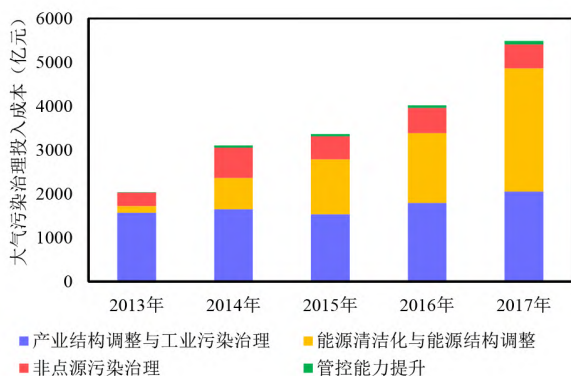


图1 2013-2017年全国各项大气污染治理措施投入成本

资料来源：作者自绘

工业污染治理为主转向以能源清洁化与结构调整为主(2017年占比51.2%)。各省治理投入对比显示,随着“大气十条”的实施,大多数省份的大气污染治理投入均有显著增加,以河北、山东、山西、江苏、广东等省增幅最大,覆盖了“大气十条”的重点治理地区(京津冀、长三角、珠三角)。

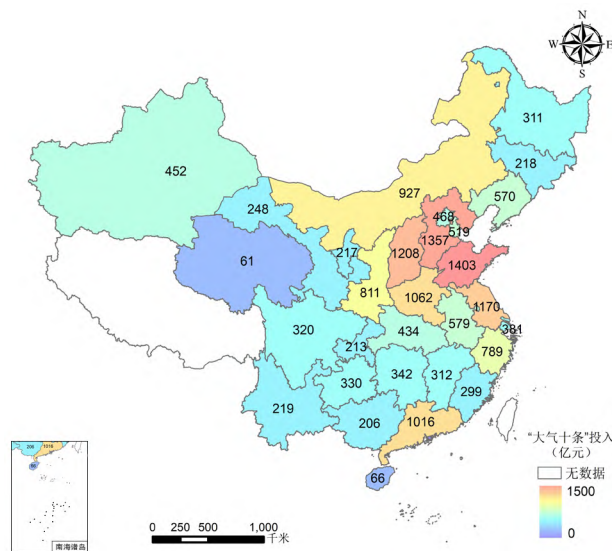


图2 “大气十条”实施期间各省投入费用

资料来源：作者自绘

大气污染治理效果方面,图3为2013-2017年各省SO₂、NO_x和PM_{2.5}三种污染物年均浓度降低值。整体而言,2013-2017年期间SO₂和PM_{2.5}浓度均有显著降低,而NO_x的降低幅度略小,在有些省份甚至没有出现明显下降。省际差异方面,SO₂和PM_{2.5}有着相似的浓度下降程度分布,河北、河南、山东的浓度降低最为显著,其次为湖北、重庆、四川、陕西等内陆工业省份;而NO_x的下降以湖北、江西、广西等省份为主,南方比北方下降程度偏高。



图3 2013-2017年各省大气污染物年均浓度降低值

资料来源：作者自绘

2.2 效率值评估结果

2.2.1 全国效率值评估结果

基于数据包络分析的Super-SBM模型,采用产出导向模式得到全国的综合效率(TE)、纯技术效率(PTE)和规模效率(SE),计算结果如图4所示。2013-2017年,全国“大气十条”环保投入的综合效率均值为0.768,仅2013、2014年为DEA有效,其他诸年综合效率均未达到最优。在2013、2014年“大气十条”刚开始实施时,效率达到最高,2014年以后大气污染治理的边际效应明显,综合效率逐年降低,到2017年达到最低值(0.330)。

2013—2017年,全国“大气十条”环保投入的纯技术效率均值为0.689,水平相对较低,且有显著的下降趋势;规模效率均值为1.029,水平相对较高。结合纯技术效率和规模效率

特征,我国大气污染防治投入综合效率的非有效性主要来自纯技术非有效性,即“大气十条”实施后期的边际效应主要由污染控制技术提升投入过多、出现冗余而导致。对照“大气十条”的具体措施,技术提升的措施主要包括“散乱污”企业升级改造、散煤清洁利用、燃煤“双替代”等。根据环保投资绩效的分析结果,对这些措施的投资水平和结构在未来需要调整和优化。

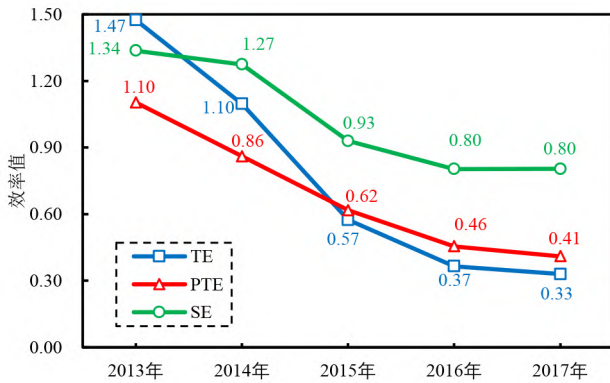


图4 全国“大气十条”环保投入绩效

资料来源：作者自绘

2.2.2 各省效率值评估结果

各省“大气十条”环保投入的绩效评估结果如图5所示。由于投入结构与规模、环境质量水平、经济与技术水平的不同,各省在“大气十条”实施过程中的环保投入绩效差异较大。整体而言,大部分省份在2013、2014年的综合效率较高,在2014年出现了峰值。2015年以后综合效率出现了显著的下降趋势,边际效应逐步显现。省间对比结果显示,大气环境本底较好的地区(如海南、青海)在“大气十条”方面投入的相对较少,且这些地区的工业不够发达、气象扩散条件优越,大气污染治理难度较小,因此这些省份的“大气十条”环保投入绩效值最高(分别为0.621和0.737)。重点治理区域方面,京津冀在“大气十条”实施期间的整体环保投入绩效(0.469)要高于“长三角”和“珠三角”(分别为0.439和0.383)。就政策侧重点而言,北方地区由于冬季需要取暖,因此在燃煤“双替代”、散煤清洁化利用等能源结构调整方面的投入更多,而工业化水平较高的“长三角”和“珠三角”区域,在工业污染治理方面投入更多,政策的差异性也决定了“大气十条”绩效的不同。

2.3 松弛变量与投影分析

对DEA模型的投入产出的松弛变量分析,可以对影响各决策单元DEA无效的主要因素进行识别^[38],也可以通过投影理论基于松弛变量进一步得到投入产出变量的调整值。设DEA无效的决策单元DMU0(x_0, y_0)在有效前沿面上投影点为(x_0^*, y_0^*),则投入和产出变量的调整值如式(4)所示^[39]:

$$\begin{cases} \Delta x_0 = x_0 - x_0^* = (1 - \theta^*)x_0 + S^{*-} \\ \Delta y_0 = y_0 - y_0^* = S^{+*} \end{cases} \quad \text{式(4)}$$

式中 Δx_0 和 Δy_0 分别为投入和产出变量的调整值,即参考目前的“大气十条”投入结构,为达到DEA有效投入变量需要降低的值,表征政策投入的优化潜力; S^{*-} 和 S^{+*} 分别为投入和产出松弛变量,表征投入或产出变量的冗余程度; θ^* 为综合效率值。由于本文的研究目的为分析大气污染治理投入的

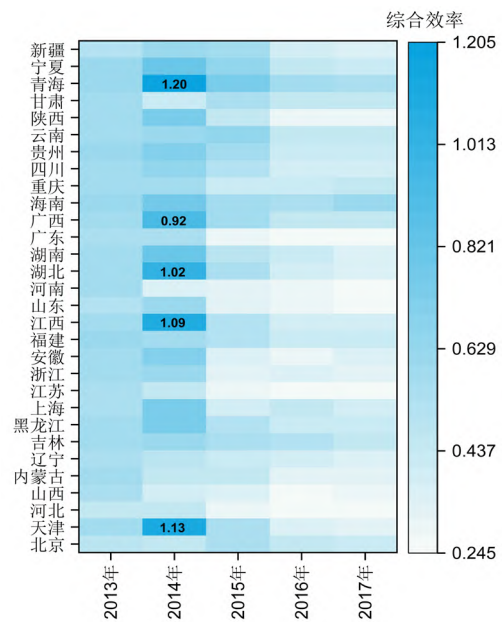


图5 各省大气污染治理投入绩效评估结果

资料来源：作者自绘

效率,因此主要从投入松弛变量角度进行分析。

“大气十条”实施期间全国的投入松弛变量和调整值如表3所示。可以看出,在全国尺度,2013、2014年为DEA有效,2015-2017年的大气污染治理均存在冗余,其中,产业调整与工业治理的冗余情况最为严重,且能源清洁与能源结构调整在2015、2017年也存在一定冗余情况,因此未来应着重提高这两类措施的治理资金利用效率,避免盲目立项和投资。面源污染治理和监管能力建设的松弛程度较低,说明这两类在大气污染治理中的效果相对较好。根据结果,效率最低的2017年非

表3 “大气十条”实施期间全国投入松弛变量与调整值

年份	投入变量	松弛变量 (亿元)	调整值 (亿元)
2013年	产业调整与工业污染治理	0	-
	能源清洁与结构调整	0	-
	面源污染治理	0	-
	监管能力建设	0	-
2014年	产业调整与工业污染治理	0	-
	能源清洁与结构调整	0	-
	面源污染治理	0	-
	监管能力建设	0	-
2015年	产业调整与工业污染治理	769.05	142.10
	能源清洁与结构调整	944.60	147.95
	面源污染治理	0	22.30
	监管能力建设	116.19	13.75
2016年	产业调整与工业污染治理	1184.61	232.28
	能源清洁与结构调整	0	101.15
	面源污染治理	268.78	63.13
	监管能力建设	48.06	8.60
2017年	产业调整与工业污染治理	1241.16	261.47
	能源清洁与结构调整	1521.26	340.62
	面源污染治理	0	36.71
	监管能力建设	69.81	12.46

资料来源：作者整理

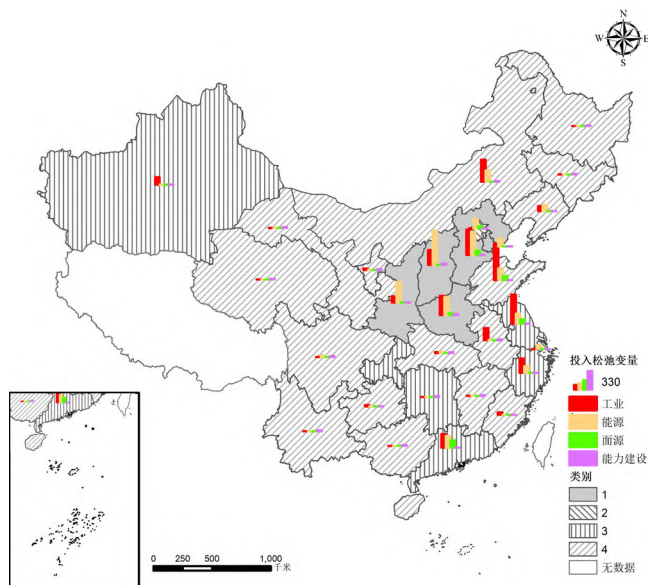


图6 基于大气污染防治投入绩效的聚类与各省松弛变量

资料来源：作者自绘

DEA 有效年份中投资优化的潜力最大，产业调整与工业污染治理、能源清洁与结构调整、面源污染治理和监管能力建设的年投入分别降低 261.47、340.62、36.71 和 12.46 亿元。

2.4 基于大气污染防治投入绩效的聚类分析

根据各省“大气十条”实施期间大气污染防治投入松弛变量，并结合其对应的综合效率、纯技术效率和规模效率，对全国各省进行 k-均值聚类分析，将 30 个省份（不含西藏和港澳台地区）分为四类，结果如图 6 所示。

第一类包括河北、天津、山西、陕西和河南，其共同特征为大气污染防治投入绩效较低，产业调整与工业污染治理和能源清洁与能源结构调整的投资冗余较为明显。这些省份是我国的工业和能源产业大省，多属于“大气十条”的重点治理地区，且山西和陕西所在的汾渭平原也是《打赢蓝天保卫战三年行动计划》的重点区域^[6]。因此，第一类省份在未来有必要对工业能源清洁化、固定源污染治理等大气污染防治投入措施进行优化调整，在保证治理效果的前提下提高技术效率，推动技术革新对污染物排放的抑制作用。

第二类包括北京和上海，其共同特征为综合效率处于中等水平，投资冗余主要体现在面源治理方面。北京和上海是我国社会经济发展水平最高的区域，目前境内的工业已基本实现转移或超低排放改造，在“大气十条”实施期间主要着眼于新能源汽车推广、建筑道路扬尘治理等面源污染控制^[40]。同时，二者也同处于“京津冀”和“长三角”两大重点治理区域。因此，建议第二类省份在未来持续优化大气面源污染控制措施，发挥治理措施的试点优势，同时有效提高监管能力和机制体制建设。

第三类包括新疆、广东、湖南、江苏、浙江和重庆。这些省份的综合效率处于中等水平，且产出变量的松弛程度较高。结合大气环境质量状况，部分南方省份（湖南、浙江、重庆等）处于酸雨区，新疆由于气候原因其 PM_{2.5} 浓度较高。虽然从投入松弛变量来看大气污染防治措施尚存在一定冗余，但其大气污染防治力度和规模在未来仍需要进一步提高。

第四类为剩余的 17 个省份。从 DEA 绩效评估结果来看，这些省份的综合效率相对较高，投入和产出松弛程度也相对较

低，“大气十条”实施效果较好。在未来，《打赢蓝天保卫战三年行动计划》和“美丽中国”都对我国的大气环境质量提出了进一步的要求，因此，第四类省份在保持目前大气环境治理投入效率较高的基础上，应有序制定近期、远期的治理目标和实施方案，进一步提升区域环境质量水平。

2.5 不确定性讨论

本文对我国大气污染防治投入绩效评估的不确定性主要体现在评估方法和数据获取两方面。

首先，DEA 方法主要针对历史和现状的情况评估 DMUs 的相对效率，是一种回顾性评价。在未来随着我国大气污染防治工作的进一步深入，各省的治理投入绩效值可能会发生变动^[41]；DEA 有效的省份，其各措施的投入规模与结构依然有改进的空间。

其次，本文从宏观视角以省为尺度对近年的大气污染防治费用进行核算，为了将“大气十条”中的治理措施尽可能纳入核算框架中，不同措施可能采用了不同的数据源，这也对 DEA 评估结果和分析产生了一定的不确定性。

3 结论

本文采用数据包络分析的 Super-SBM 模型，分别以“大气十条”实施投入费用和污染物浓度降低程度为投入和产出变量，以省为尺度对我国“大气十条”实施期间各省的环保投资绩效进行了评估，得到以下结论：

我国“大气十条”实施的综合环保投资绩效均值为 0.768，水平相对不高，仅实施前期的 2013—2014 年达到 DEA 有效。在“大气十条”刚开始实施时，效率达到最高，2014 年以后大气污染防治的边际效应明显，综合效率逐年降低；非有效性主要来自纯技术非有效性，即“大气十条”实施后期的边际效应主要由污染控制技术提升投入过多、出现冗余而导致。实现空气质量改善是一项长期而艰巨的工作，随着治理措施实施的逐渐深入，大气环境质量改善的难度在增大。

整体而言，大部分省份在 2013、2014 年的综合效率较高，在 2014 年出现了峰值。2015 年以后综合效率出现了显著的下降趋势，边际效应逐步显现。大气环境本底较好的地区（海南、青海）在“大气十条”方面投入的相对较少，且这些地区的工业不够发达、气象扩散条件优越，大气污染防治难度较小，因此这些省份的“大气十条”环保投入绩效值最高。京津冀在“大气十条”实施期间的整体环保投入绩效高于“长三角”和“珠三角”，北方地区以燃煤“双替代”、散煤清洁化利用等能源结构调整为主的治理措施和“长三角”、“珠三角”以工业污染治理为主的治理措施，决定了“大气十条”实施绩效的差异。

在全国尺度，2015—2017 年的“大气十条”投入存在冗余。其中，面源污染治理和监管能力建设的松弛程度较低，说明这两类在大气污染防治中的效果相对较好；产业调整与工业治理的冗余情况最为严重，且能源清洁与能源结构调整在 2015 和 2017 年也存在一定冗余情况，因此未来应着重提高这两类措施的治理资金利用效率，避免盲目立项和投资。在 2017 年“大气十条”收官之际，大气污染防治的边际递减效应逐步显现，亟需优化和调整大气污染防治的投入方向，如火电厂燃煤问题已得到初步控制，但燃煤锅炉、居民用煤等分散源的污染问题尚未解决，此外，乡镇小产业集群问题、交通结构调整问题等

也是未来大气环境治理需要重点投入的方向, 需要根据区域污染特点和治理技术水平, 制定具有地区针对性的治理行动计划。

基于大气污染治理投入绩效评估结果, 将 30 个省份(不含西藏和港澳台地区)分为四类。其中第一类省份(京津冀和汾渭平原)建议对工业能源清洁化、点源污染治理等大气污染治理投入措施进行优化调整, 提高技术效率; 第二类省份(北京和上海)建议提高大气污染监管能力和机制体制建设; 第三类省份(新疆、长三角、珠三角、重庆)建议其进一步提高大气污染治理的力度和规模; 第四类省份(其他省份)建议有序制定近期、远期的治理目标和实施方案, 进一步提升区域环境质量水平。△

【参考文献】

- [1] 国务院. 国务院关于印发大气污染防治行动计划的通知 [EB/OL]. 北京: 中国政府网, 2013-09-13[2020-01-30]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2013-09-13/content_4561.htm.
- [2] 王韵杰, 张少君, 郝吉明. 中国大气污染治理: 进展·挑战·路径 [J]. 环境科学研究, 2019, 32(10): 1755-1762.
- [3] 王金南, 雷宇, 宁森. 改善空气质量的“中国模式”: “大气十条”实施与评价 [J]. 环境保护, 2018(2): 7-11.
- [4] 常玲利, 邵龙义, 杨书中, 等. 大气污染综合治理攻坚行动前后北京市 PM_{2.5} 质量浓度变化特征研究 [J]. 矿业科学学报, 2019, 4(6): 539-546.
- [5] 武卫玲, 薛文博, 王艳丽, 等. 《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估 [J]. 环境科学, 2019, 40(7): 2961-2966.
- [6] 国务院. 国务院关于印发打赢蓝天保卫战三年行动计划的通知 [EB/OL]. 北京: 中国政府网, 2018-06-27[2020-01-30]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2018/content_5306820.htm.
- [7] 罗知, 李浩然. “大气十条”政策的实施对空气质量的影响 [J]. 中国工业经济, 2018, 366(9): 138-156.
- [8] 李春瑜. 大气环境治理绩效实证分析——基于 PSR 模型的主成分分析法 [J]. 中央财经大学学报, 2016(3): 104-112.
- [9] 李丽, 孙文远. 基于 PSR 模型的大气污染治理绩效审计研究——以江苏省为例 [J]. 2018, 632(8): 19-22.
- [10] 赵亦婷. 大气污染治理环境绩效审计研究——以 B 市大气污染治理政策落实审计为例 [D]. 哈尔滨商业大学, 2018.
- [11] CHARNES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision making units [J]. *European Journal of Operational Research*, 1978, 2(6): 429-444.
- [12] 张家瑞, 杨逢乐, 曾维华, 等. 滇池流域水污染防治财政投资政策绩效评估 [J]. 环境科学学报, 2015, 35(2): 596-601.
- [13] DOUMPOS M, COHEN S. Applying data envelopment analysis on accounting data to assess and optimize the efficiency of Greek local governments [J]. *Omega: The International Journal of Management Science*, 2014, 46: 74-85.
- [14] DE NICOLA A, GITTO S, MANCUSO P, et al. Healthcare reform in Italy: An analysis of efficiency based on nonparametric methods [J]. *The International Journal of Health Planning and Management*, 2014, 29(1): 48-63.
- [15] EL MEHDI R, HAFNER C M. Local government efficiency: the case of Moroccan municipalities [J]. *African Development Review*, 2014, 26(1): 88-101.
- [16] BANKER R D, CHARNES A, COOPER W W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis [J]. *Management Science*, 1984, 30(9): 1078-1092.
- [17] 侯孟阳, 姚顺波. 1978-2016 年中国农业生态效率时空演变及趋势预测 [J]. 地理学报, 2018, 73(11): 2168-2183.
- [18] TONE K. A Slacks-Based Measure of Efficiency in Data Envelopment Analysis [J]. *European Journal of Operational Research*, 2001(130): 498-509.
- [19] TONE K. A Slacks-Based Measure of Super-efficiency in Data Envelopment Analysis [J]. *European Journal of Operational Research*, 2002(143): 32-41.
- [20] ZHANG J, JIANG H, ZHANG W, et al. Cost-benefit analysis of China's Action Plan for Air Pollution Prevention and Control [J]. *Frontiers of Engineering Management*, 2019, 6(4): 524-537.
- [21] 彭菲, 於方, 马国霞, 等. “2+26”城市“散乱污”企业的社会效益和环境治理成本评估 [J]. 环境科学研究, 2018, 31(12): 13-19.
- [22] YANG Z D, JI P D, LI Q Y, et al. Comprehensive understanding of SO₃ effects on synergies among air pollution control devices in ultra-low emission power plants burning high-sulfur coal [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 239: 1-9.
- [23] 张世兵. 完善钢铁工业城市大气污染防治长效机制的措施探索 [J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(10): 125-127.
- [24] 刘徽, 王菲菲, 林立清. 蓝天保卫战背景下的水泥企业大气污染防治技术实例研究 [J]. 轻工科技, 2019, 35(10): 110-111.
- [25] 梁博隆. 河北省玻璃行业大气污染防治技术评估方法及应用研究 [D]. 河北大学, 2017.
- [26] 任锋. 有色行业执行大气污染物特别排放限值的思考 [J]. 环境与发展, 2018(5): 78-81.
- [27] OETARI P S, HADI S P, HUBOYO H S. Trace elements in fine and coarse particles emitted from coal-fired power plants with different air pollution control systems [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 250: 1-9.
- [28] 于玉良, 肖华琴, 王利民. 北京市农村“煤改气”村民的使用成本分析 [C]// 中国燃气运营与安全研讨会(第十届)暨中国土木工程学会燃气分会 2019 年学术年会论文集(中册), 2019.
- [29] 刘泓汛, 陈佳琪, 李江龙. 电厂排放改造和居民散煤替代的成本效益分析——以陕西省为例 [J]. 厦门大学学报(哲学社会科学版), 2019, 256(6): 107-121.
- [30] 中国工程院. 《大气污染防治行动计划》实施情况中期评估报告 [R]. 北京, 中国工程院, 2016.
- [31] 刘菊荣, 宋绍富. 我国车用汽油质量标准升级特征与国 VI 汽油生产对策 [J]. 石油化工应用, 2018, 37(12): 1-6.
- [32] 戚爱玲. 车用柴油机满足国 IV 排放阶段技术路线分析 [J]. 上海汽车, 2010(2): 59-62.
- [33] 高晓冬, 张登前, 李明丰, 等. 满足国 V 汽油标准的 RSDS-III 技术的开发及应用 [J]. 石油学报, 2015(2): 482-486.
- [34] 李秀芳, 傅庆阳. 厦门市建筑节能措施对建筑成本的影响研究 [J]. 厦门理工学院学报, 2010(03): 17-21.
- [35] 卢亚灵, 周佳, 程曦, 等. 京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估 [J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2566-2575.
- [36] 张海斌, 盛昭瀚, 孟庆峰. 新能源汽车市场开拓的政府补贴机制研究 [J]. 管理科学, 2015, 28(6): 122-132.
- [37] 贾紫牧, 陈岩, 王慧慧, 等. 流域水环境承载力聚类分区方法研究——以湟水流域小峡桥断面上游为例 [J]. 环境科学学报, 2017, 37(11): 348-355.
- [38] 郭四代, 仝梦, 郭杰, 等. 基于三阶段 DEA 模型的省际真实环境效率测度与影响因素分析 [J]. 中国人口·资源与环境, 2018,

28(3): 106-116.

- [39] 张家瑞, 杨逢乐, 曾维华, 等. 滇池流域水污染防治财政投资政策绩效评估 [J]. 环境科学学报, 2015, 35(2): 596-601.
- [40] 石敏俊, 李元杰, 张晓玲, 等. 基于环境承载力的京津冀雾霾治理政策效果评估 [J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(9): 66-75.
- [41] SONG M L, ZHANG L L, AN Q X, et al. Statistical analysis and combination forecasting of environmental efficiency and its influential factors since China entered the WTO: 2002-

2010-2012[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 42: 42-51.

作者简介: 薛英岚 (1990-), 男, 辽宁铁岭人, 博士, 中国科学院科技战略咨询研究院, 生态环境部环境规划院国家环境保护环境规划与政策模拟重点实验室, 生态环境部环境规划院京津冀区域生态环境研究中心, 助理研究员, 研究方向为环境规划与管理。

收稿日期: 2021-04-10

Provincial Environmental Protection Investment Performance Assessment of "Air Pollution Prevention Action Plan" based on Super-SBM.

XUE Yinglan, ZHANG Wei, LIU Yu, JIANG Hongqiang, ZHANG Jing, WU Wenjun

【Abstract】 At the time when Air Pollution Prevention Action Plan were completed and China's air pollution control had made a periodic progress, the performance assessment of air pollution control investment is of great significance to improving the effectiveness and efficiency of future air environmental protection investments. Under this background, this paper applies the Super-SBM model of data envelopment analysis to evaluate the performance of China's pollution control investment during the implementation of the Air Pollution Prevention Action Plan at the scale of province. The results show that the average technical efficiency is 0.768 at the country scale, only the years of 2013 and 2014 reached DEA effectiveness; provinces with lower investment in air pollution control have the highest efficiency, such as Qinghai and Hainan, while the efficiency of the key regional provinces in Air Pollution Prevention Action Plan are generally low, which have some investment redundancy. The investment in industrial adjustment and industrial pollutant control and energy cleaning and structural adjustment are relatively redundant, which should be forced to improve the efficiency of fund use and avoid blind project establishment. Based on the results of air pollution control performance evaluation, the provinces are divided into four categories, and targeted investment recommendations for future air pollution control investment policies are proposed according to each type of province's input performance and redundant characteristics.

【Keywords】 Air Pollution Control; Air Pollution Prevention Action Plan; Environmental Protection Investment Performance; Data Envelopment Analysis