

我国区域空气污染治理效率及其影响机制 ——基于超效率 SBM 模型和门槛回归模型

杨刚强^{1,2}, 季轶凡^{1,2}, 王 嵩^{1*}, 孟 珊¹

(1. 武汉大学中国中部发展研究院, 武汉 430072; 2. 武汉大学长江经济带发展研究中心, 武汉 430072)

【摘要】 随着人民对美好生活需求的日益增长, 政府空气污染治理的效率问题日益得到重视。本文从地方政府空气污染治理效率及其影响因素的视角入手, 以全国 30 个省份为研究对象, 运用超效率 SBM 模型测算 2003—2015 年各省级区域的空气污染治理效率。在此基础上, 运用门槛回归模型分析政府空气污染治理效率的影响机制。研究表明: ①地区间空气污染治理效率差异性较为显著。中部、西部空气污染治理效率整体呈下降趋势。东部和东北地区空气污染治理效率则上升比较平稳。②政策规划、碳源、污染物排放和环境治理投入表现出双重门槛特征, 其中碳源对空气污染治理效率影响显著, 而以碳为首的能源消费结构则主要对中部和西部空气污染治理效率产生影响。落后地区政府应注重产业升级, 财政上应对碳税等税目进行征收, 产业上应鼓励企业创新, 并对落后企业进行倒逼升级。

【关键词】 空气污染治理效率; 影响机制; 超效率 SBM 模型; 门槛回归模型

【中图分类号】 F124.5; X321

【文献标识码】 A

【文章编号】 1674-6252 (2020) 01-0071-09

【DOI】 10.16868/j.cnki.1674-6252.2020.01.071

引言

改革开放以来, 我国经济发展速度一直处于较高的水平, 但我国的空气污染治理水平与经济发展速度不相匹配。2016 年“全球环境绩效指数”(Environmental Performance Index, EPI) 显示, 我国在 178 个国家中排名第 109 位, 空气质量更是排名倒数第二, 得分仅为 23.81。《2016 年中国环境公报》显示我国 75.1% 城市环境空气质量超标, 酸雨城市比例为 19.8%。北方空气质量形势更为严峻, 雾霾一度困扰人们的日常生活。党的十九大后, 社会的主要矛盾发生了改变, 党的十九大报告紧盯环境保护重点领域、关键问题和薄弱环节, 提出了加强大气、水、土壤等污染治理的重点任务和举措。在此背景下, 空气污染治理迫在眉睫。2017 年 12 月中央经济工作会议指出, 打赢“蓝天保卫战”是今后三年污染防治的重点, 要求大幅减少主要污染物排放总量, 进而改善生态环境质量。那么地方政府的空气污染治理效率如何? 效率问题背后的影响机制如何? 这是新时代贯彻新发展理念, 实现生态优化、绿色发展必须时刻关注的问题。

1 文献综述

在经济社会发展的不同阶段, 国内外关于空气污染治理的研究侧重点不同。早期研究以微观层面的产业为主要研究对象, 继而逐步扩展到国家宏观层面的区域空气污染治理。在以产业为主要研究对象的相关研究中, 国外学者普遍认为产业转移会减少空气污染, 但同时还会产生“避难所效应”^[1]。特别是产业发展到一定规模时, 如果拥有足够的资本进行产业升级, 国家就会进行总体上的空气污染治理把控, 大量的国外文献集中于对监管的自发性与否进行讨论。Blackman 认为, 自愿监管对发展中国家空气治理绩效总体不显著, 需要强大的背景监管压力协助^[2]。国内的学者将财政作为治理的考察部分, 认为进行财政分权不利于治理空气污染, 甚至会加剧本地区及周边地区的空气污染^[3]。开征环保税、硫税、碳税等能够在未来提高空气质量, 但是会在一定程度上影响经济发展^[4]。官员考核机制也是重要的研究方向, 在谋求晋升的过程中, 地区的投资决策会导致官企合谋, 导致废气排放屡禁不止, 影响空气治理^[5]。

资助项目: 国家社科基金一般项目 (19BJY010)。

作者简介: 杨刚强 (1979—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为公共服务资源配置、区域经济协调发展, E-mail: 553670552@qq.com。

*** 责任作者:** 王嵩 (1991—), 男, 博士, 主要研究方向为区域发展、科技创新, E-mail: 358619681@qq.com。

随着发展阶段的变化及研究的继续深化,一些学者开始从城市化等中观层面对空气污染进行深刻思考。很多国外学者指出,城市化会对PM₁₀和碳排放产生影响,进而影响空气污染治理^[6],不过Abdallh认为,持续的城市化有助于减少人均碳排放量对空气质量的影响^[7]。而国内学者朱相宇和乔小勇指出,北京空气污染的重要来源是生活污染和城市发展新区^[8]。

在方法上,普遍采用数据包络分析方法(Data Envelopment Analysis, DEA)进行空气污染治理效率测度。定向距离函数以及传统的DEA被Mandal和Madheswaran用来研究农村环境污染治理效率受农村工业污染二氧化碳排放量的影响程度^[9]。在国内的研究方面,我国农村绿色发展绩效的空间差异由谢里和王瑾瑾运用多种DEA模型从投入和产出导向两个角度进行评价^[10]。也有一些国内学者利用门槛回归模型对环境污染进行研究,如胡宗义和李毅采用面板门槛回归模型研究金融发展对环境污染的门槛特征^[11]。

综上所述,一方面,国内外关于空气污染的研究均只选取部分相关变量进行探究,缺乏综合指标进行客观、系统的测度,甚至得出了截然相反的结论;另一方面,国内文献普遍选取空气质量指数(AQI或加上单项污染指数)作为被解释变量,但是其时间跨度小且不具有代表性(AQI指标从2013年12月开始统计),不利于了解某一地区的长期空气治理过程。本文利用超效率评价模型(Super Slack-Based Measure, SBM)测算各地区空气污染治理效率,是基于变量多元化,并运用D-S证据综合各因素作为解释变量来探析影响机制,以期决策者制定政策提供有力支撑,为经济高质量发展与生态文明建设提供借鉴。

2 研究方法 with 数据

2.1 研究方法

2.1.1 超效率 SBM 模型

数据包络分析(DEA)是一种效率评价方法。传统径向、角度DEA方法忽略了两个重要因素:①松弛量对于效率测度的影响;②随机误差以及外部环境对各主体的影响。而基于松弛的超效率SBM模型解决了投入与产出存在非零的松弛问题和生产过程中的非期望产出问题,同时区分了有效决策单位效率大小^[12]。不仅如此,它还符合本文效率计算需要考虑非期望产出,以及克服传统DEA效率值超过1后无法比较的模型缺陷(传统DEA一般在效率达到1后便保持为1,而超效率SBM模型可以比较达到1的决策

单元)。较之于其他文献选择三阶段DEA模型,本文更多的是要将更多因素纳入分析框架之中,而超效率SBM模型不需要剔除环境变量更符合我们的研究需求。基于此,本文最终选择上述模型作为计算效率的模型,其数学表达式为:

$$\rho^* = \min \rho = \min \frac{1 - \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{s_n^x}{x_n^k} \right)}{1 + \left[\frac{1}{M+I} \left(\sum_{m=1}^M \frac{s_m^y}{y_m^k} \right) + \sum_{i=1}^I \frac{s_i^b}{b_i^k} \right]} \quad (1)$$

$$\text{约束条件: } \begin{cases} \sum_{k=1}^K z_k^y y_m^k - s_m^y = y_m^k, & m=1, \dots, M \\ \sum_{k=1}^K z_k^b b_i^k + s_i^b = b_i^k, & i=1, \dots, I \\ \sum_{k=1}^K z_k^x x_n^k + s_n^x = x_n^k, & n=1, \dots, N \\ z_k^i \geq 0, s_m^y \geq 0, s_i^b \geq 0, s_n^x \geq 0, & k=1, \dots, K \end{cases} \quad (2)$$

式中, s_m^y 、 s_i^b 、 s_n^x 表示投入、产出的松弛变量; y_m^k 、 b_i^k 、 x_n^k 表示第k个生产单元t时期的投入产出值; ρ^* 表示要计算的空气污染治理的效率值; N 、 M 、 I 分别表示投入、期望产出、非期望产出的个数; z_k^y 、 z_k^x 分别表示各投入产出值的权重。目标函数 ρ 关于 s_m^y 、 s_i^b 、 s_n^x 严格单调递减,且 $0 < \rho < 1$;当 $\rho = 1$ 时,综合效率有效;当 $\rho < 1$ 时,决策单元是无效率的,存在改进投入产出的必要性来改善效率。

2.1.2 计量回归模型

考虑到经济发展、技术水平等方面的差异,我国各区域的空气污染治理效率存在时序演化、省际差异性以及非均衡空间分布的特征,因而表现出空气污染治理效率与治理影响因素存在非线性关系,即存在一定门槛特征。空气污染治理效率会受某一因素影响在跨过门槛前后呈现不同的特征。为此,本文采用Hansen发展的门槛面板模型^[13],对于不同省份空气污染治理效率与其影响因素之间的联系进行研究。设定如下单一门槛回归模型:

$$Y_{it} = \alpha X_{it} + \beta_1 T_{it} I(T_{it} \leq \gamma_1) + \beta_2 T_{it} I(T_{it} > \gamma_1) + C + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

其中, i 表示省份; t 表示年份, Y_{it} 和 T_{it} 分别表示被解释变量和解释变量; X_{it} 表示对被解释变量有显著影响的控制变量; T_{it} 也是门槛变量,随解释变量的不同进行变化; γ 为特定的门槛值; α 表示相应的系数向量; β_1 、 β_2 分别表示门槛变量 T_{it} 在 $T_{it} \leq \gamma_1$ 、 $T_{it} > \gamma_1$

对被解释变量 Y_{it} 的影响系数； C 为常系数； ε_{it} 为随机扰动项， $\varepsilon_{it} \sim i.i.d. N(0, \sigma^2)$ ； $I(\cdot)$ 表示示性函数。在得到各参数估计值后，本文需要进行两个方面的检验：①检验门槛效果是否显著；②检验门槛估计值与其真实值是否相等。此外，模型（3）假定仅存在一个门槛，但可能会存在两个及以上门槛，需要根据数据进行调整。

2.2 指标数据选取与处理

2.2.1 效率指标选取

在区域空气污染治理效率中，投入指标选择各地区环境污染治理投资额、环保从业人数和造林面积三项指标，分别代表资本、人力和土地对空气污染治理的投入。产出指标分为期望产出和非期望产出，期望产出选择地区生产总值，并以2003年为基期使用GDP平减指数对其进行数值平减^①，从而消除价格因素影响；参考相关研究^[14]，非期望产出选择各地区的SO₂排放量和碳排放量。

2.2.2 影响因素指标选取

随着经济的不断发展、社会的不断进步，人们对美好生活需求的日益增长，逐步涉及经济、社会、生态和能源的各个方面。因此，本文分别从经济发展、社会进步、能源消耗和生态环境四个方面，通过选取相应的二级指标并通过主客观分析法设权作为影响因素来量化这一需求（表1）。

经济水平分为经济发展和产业结构。经济水平分别从微观、宏观两个层面进行指标选取，微观层面选取城镇、农村居民人均可支配收入来反映人们的经济生活水平以及对生活层面的需求。而在宏观层面，对外贸依存度等贸易因素是影响环境标准与环境政策制定的社会经济因素。这是因为在促进经济活动规模扩大的过程中，自由贸易可能会增加污染物排放总量，也有可能由于需要“清洁”生产实现了技术革新与结构变化进而减少污染。而人均GDP等则反映地区的经济发展水平，同时又能影响政府在环境污染治理方面的决策。产业结构反映地区的发展水平高低和所处阶段，表1中所示的六个指标体现了各地区产业结构的合理程度，通过二、三产业变动来反映产业结构对空气污染治理的影响。

社会进步分为人民生活水平和政策规划。人民生

活水平中人口分布对空气污染产生显著正向影响。部分学者认为，社会发展通过城市化与人口变化情况两个重要传导渠道来影响空气污染的水平与强度^[15]，因此本文选择上述指标。而政策规划方面，R&D经费支出占比反映各地区研发投入强度，各项支出收入反映地区发展水平，同时也能对未来地区发展进行参考与预测。

能源消耗分为碳源和污染物排放。参考吕学都等关于低碳经济指标体系的设计架构，鉴于当前我国的能源消费结构仍以煤为主，所以选取碳源为二级指标^[16]。碳源中的一些指标，如能源强度是一次能源使用总量或最终能源使用与地区生产总值之比，反映地区的能源消耗水平。污染物排放方面，考虑到上述的能源消费结构，所以对于以碳和硫造成的污染物排放，选取对应的指标，能更好地测度当前的污染水平，也可以较好地解释空气污染治理效率。

生态环境分为环境治理投入和生态现状。环境治理投入涉及对污染源头和过程的改善，其中工业废水排放达标率、工业固体废物综合利用率反映了地区的工业污染处理能力，其余废气治理投资等六项指标反映了地区对污染治理的决心和治理效果。生态现状立足于当前生态环境的现实状态，通过强调生态涵养能力来测度目前环境水平，这些同样对空气净化起至关重要的作用。

2.3 数据选取及处理

本文的研究对象为我国30个省、自治区、直辖市^②。其中，碳排放量根据IPCC 2006中的方法进行具体测算^[17]，产业调整系数和比较劳动生产率的计算参考张建清等的研究^[18]，其余数据来自各年的《中国统计年鉴》《中国环境统计年报》《中国环境统计年鉴》和《中国能源统计年鉴》。

在影响因素框架中，每个指标的单位 and 重要程度不同，故本文采用主客观相结合的方法来处理影响因素数据。主客观权重评价分别采用层次分析法（Analytic Hierarchy Process, AHP）和熵值法，综合权重采用D-S证据合成理论，具体计算方法参照相关文献^[19-21]。影响因素的框架及权重见表1。

① 本文凡是涉及物价的指标均采用GDP平减指数。

② 香港、澳门和台湾由于在各统计数据中指标不一致等因素而被剔除，西藏则因为相关数据缺失较为严重故也不在本文研究之列。

表1 地区生态发展指标体系

系统	子层面	具体指标	单位	指标正负	权重		
					AHP	熵值	D-S
A 经济水平	A1 经济发展	城镇居民人均可支配收入	元/人	+	0.200	0.145	0.222
		农村居民人均可支配收入	元/人	+	0.200	0.148	0.227
		人均GDP	万元/人	+	0.200	0.107	0.164
		GDP增长率	%	+	0.150	0.047	0.054
		人均固定资产存量	万元/人	+	0.100	0.093	0.071
		对外贸易依存度	—	+	0.100	0.224	0.172
	人均FDI	元/人	+	0.050	0.236	0.090	
	A2 产业结构	第二产业比重	%	+	0.177	0.116	0.126
		第二产业贡献率	%	+	0.235	0.096	0.139
		第三产业比重	%	+	0.177	0.207	0.225
		第三产业贡献率	%	+	0.235	0.199	0.289
		产业调整系数	—	+	0.118	0.230	0.167
比较劳动生产率		—	+	0.059	0.151	0.055	
B 社会进步	B1 人民生活水平	人口自然增长率	%	-	0.067	0.124	0.053
		城乡人口比	%	+	0.133	0.665	0.567
		人口密度	人/km ²	-	0.200	0.055	0.070
		城市化率	—	+	0.333	0.101	0.215
		城镇登记失业率	—	-	0.267	0.056	0.095
	B2 政策规划	人均道路面积	m ² /人	+	0.125	0.048	0.035
		每万人拥有公交车数	标准台/万人	+	0.042	0.067	0.017
		人均教育经费	万元/人	+	0.083	0.124	0.061
		地方一般公共预算支出	亿元	+	0.167	0.106	0.105
		R&D经费支出占比	%	+	0.208	0.469	0.579
		环境投资在GDP中占比	%	+	0.208	0.076	0.094
		排污费占财政收入	—	+	0.167	0.111	0.110
C 能源消耗	C1 碳源	万元GDP耗水量	m ³ /万元	-	0.200	0.033	0.057
		万元GDP耗电量	kW·h/人	-	0.200	0.067	0.115
		人均电力消耗量	万kW·h/人	-	0.100	0.097	0.083
		能源工业投资	亿元	+	0.100	0.478	0.410
		能源强度	吨标准煤/万元	-	0.100	0.069	0.060
		万元GDP工业废气排放	标准m ³ /元	-	0.200	0.066	0.113
		煤炭占能耗比重	%	-	0.100	0.191	0.164
	C2 污染物排放	单位GDP碳排放	—	-	0.333	0.148	0.214
		万元GDP SO ₂ 排放强度	—	-	0.333	0.199	0.287
		人均碳排放	—	-	0.222	0.383	0.369
		工业废水排放总量	万t	-	0.111	0.270	0.130
		工业废水排放达标率	%	+	0.111	0.023	0.019
D 生态环境	D1 环境治理投入	工业固体废物综合利用率	%	+	0.185	0.057	0.080
		废气治理投资	亿元	+	0.222	0.197	0.335
		人均排污费	—	+	0.037	0.146	0.042
		污水处理能力	万m ³ /日	+	0.111	0.183	0.156
		污水处理总量	万t	+	0.111	0.205	0.175
		城市污水处理率	%	+	0.074	0.041	0.023
		环境从业人数占比	%	+	0.148	0.149	0.169
		人均公园绿地面积	m ² /人	+	0.308	0.042	0.106
	D2 生态现状	自然保护区面积占辖区面积比重	%	+	0.154	0.113	0.144
		森林覆盖率	%	+	0.077	0.676	0.429
		建成区绿地覆盖率	%	+	0.231	0.052	0.098
		人均绿地覆盖率	%	+	0.231	0.117	0.222

3 实证研究

3.1 中国区域空气污染治理效率分析

根据超效率 SBM 模型公式 (1) 及其约束条件公式 (2), 本文利用 MaxDEA Pro 软件计算了全国 30 个省、自治区、直辖市的空气污染治理供给效率, 根据 2003—2015 年全国各地区空气污染治理效率, 按照地域划分为四个板块, 对每个区域进行时空上的比较推演, 结果如表 2 所示。

在时间维度上: ①中西部地区空气污染治理效率整体呈现波动下降趋势, 但是地区变动幅度较小。②中部地区整体治理效率下降趋势明显, 是由于存在承接产业转移, 同时伴有粗放型经济生产方式的情况导致。③东部地区的上海、江苏、浙江、山东、海南, 东北地区的辽宁、吉林, 西部地区的重庆、四川、甘肃效率存在上升趋势, 其余各省份的空气污染治理效率则出现了一定幅度下降。

在空间维度上: ①东部地区空气污染治理效率整体上显著高于其它地区, 反映出后工业经济阶段的特征, 这些地区普遍经济水平较高、产业结构优化, 但是不同省份仍有较大差异。②东部、中部地区的效率水平普遍较低, 因而其内部的相对差异较小。③西部地区不同省份效率存在差异, 但是由于整体水平较

低, 所以其绝对差异不明显。

从图 1 也能清楚地看到在时间维度上除了东部地区, 其他地区总体波动且效率低, 中西部效率逐渐趋同; 在空间维度上, 东部在每个时间点上均领先于其他地区, 而其余三个地区相互交织, 差异接近。

3.2 影响机制分析

空气污染的治理效率受地区现实情况时空变化的影响, 呈现出不同变化趋势。为深入研究该效率的影响因素及其具体作用强度, 本文将空气污染治理效率作为被解释变量, 同时从指标体系中选取四个二级指标作为核心解释及门槛变量, 包括政策规划、碳源、污染物排放、环境治理投入, 余下的四个二级指标: 经济发展、产业结构、人民生活水平、生态现状将作为控制变量。

基于模型 (1)、(2) 以及考虑到解释变量的具有滞后效应, 在参考 Hansen^[13] 的论文模型之后, 本文设定实际双门槛回归模型为 (限于篇幅, 单一门槛、三重门槛不在此处赘述, 同时以政策规划为例进行带入):

$$E_{it} = \varphi X_{it} + k_1 Policy_{it-1} \times I(Policy_{it-1} \leq \tau_1) + k_2 Policy_{it-1} \times I(\tau_1 < Policy_{it-1} \leq \tau_2) + k_3 Policy_{it-1} \times I(Policy_{it-1} > \tau_2) + C + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

同理, 其余公式皆可相应推导, 对核心解释变量 ($Policy$ 等) 进行替换; X_{it} 涵盖所有上文所涉及的控制变量; φ 、 k 分别为控制变量组; τ_1 、 τ_2 为双门槛值; C 、 ε_{it} 分别为常数项和随机扰动项。

为进一步检验理论框架下各指标对地区空气污染治理效率的影响, 本文根据空气污染治理效率计算结果以及各项指标的合成数据, 借助 Stata13.1 软件, 采用省际面板进行回归分析, 结果见表 3~表 5。

3.3 模型回归结果

分别对不同的回归方程进行 Hausman 检验, 得到卡方统计量值和对应的 P 值。由表 3 可知四个变量显著拒绝原假设, 因此本文采用固定效应模型。在此模型基础上, 依次运用门槛回归模型对各因素进行检验和统计。

表 2 各地区空气污染治理效率评价

年份 地区	2003	2007	2011	2015	年份 地区	2003	2007	2011	2015
东部					均值	0.247	0.248	0.198	0.168
北京	1.095	0.734	1.029	1.084	东北				
天津	0.611	0.683	0.500	0.660	辽宁	0.148	0.190	0.137	0.193
河北	0.187	0.163	0.124	0.159	吉林	0.215	0.318	0.264	0.265
上海	0.543	1.030	1.141	1.039	黑龙江	0.230	0.293	0.191	0.212
江苏	0.250	0.308	0.393	1.033	均值	0.198	0.267	0.197	0.224
浙江	0.456	0.449	0.518	0.549	西部				
福建	0.791	0.405	0.307	0.325	内蒙古	0.169	0.157	0.096	0.085
山东	0.222	0.283	0.277	0.264	广西	0.248	0.203	0.165	0.150
广东	1.016	1.061	1.001	1.035	重庆	0.195	0.238	0.161	0.349
海南	0.683	1.093	1.034	1.009	四川	0.150	0.197	0.265	0.249
均值	0.585	0.621	0.632	0.716	贵州	0.202	0.251	0.195	0.177
中部					云南	0.229	0.284	0.166	0.188
安徽	0.220	0.222	0.155	0.120	陕西	1.333	0.856	0.105	0.457
山西	0.183	0.164	0.132	0.122	甘肃	0.184	0.246	0.226	0.196
江西	0.264	0.291	0.148	0.171	青海	1.005	0.563	0.620	0.379
河南	0.249	0.237	0.282	0.242	宁夏	1.004	0.313	0.256	0.300
湖北	0.244	0.283	0.178	0.213	新疆	0.239	0.179	0.193	0.163
湖南	0.320	0.289	0.296	0.137	均值	0.451	0.317	0.223	0.245

注: 限于篇幅, 本文选取 2003 年、2007 年、2011 年、2015 年的数值

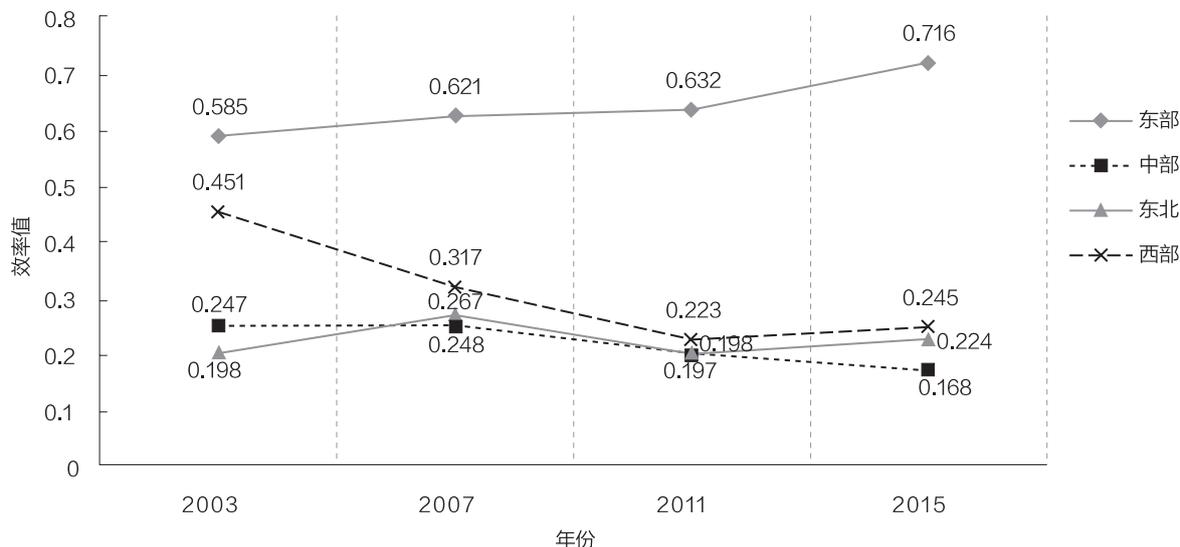


图1 区域空气污染治理效率时间变化趋势

本文首先检验门槛个数，以便确定模型的形式，检验结果如表3所示。四个核心解释变量分别在5%、1%、1%和1%水平下通过单一门槛效果显著性检验，在1%水平下均通过双重门槛检验，前三个变量没有通过三重门槛检验，虽然第四个变量“环境治理投入”通过三重门槛检验，但是在检验过程中发现，三重门槛的门槛变量与其他门槛共线，故而被剔除，最终本文选用双重门槛模型。表4为各个门槛估计值。

表3 门槛效果检验

指标	政策规划	碳源	污染物排放	环境治理投入
单一门槛检验	7.716**	85.338***	42.271***	14.627***
双重门槛检验	33.553***	54.581***	45.962***	20.846***
三重门槛检验	0.000	0.000	0.000	7.192***

注：1. 由于文章篇幅限制，上述变量名均指其滞后项，下同；
2. ***、**和*分别表示在1%、5%和10%水平下显著，下同

表4 各个门槛估计值

门槛变量	门槛估计值		门槛变量	门槛估计值	
	估计值 1	估计值 2		估计值 1	估计值 2
政策规划	0.055	0.175	污染物排放	0.834	0.963
碳源	0.516	0.566	环境治理投入	0.109	0.291

3.4 门槛回归分析

模型参数估计结果如表5所示，具体分析如下：

(1) 政策规划的滞后项对空气污染治理效率的影响存在显著的双重门槛特征，且影响程度、方向与门槛值大小和正负有关。当政策规划水平低于0.055时，其对地区空气污染治理效率的弹性系数为4.946；当跨过这一门槛后，其对空气污染治理效率的系数变为-1.162；当跨过第二门槛0.175之后，系数变为

正，回升到0.306。说明政策规划的滞后效应与空气污染治理效率存在非线性关系，这一关系与其门槛水平有关，且当政策规划跨过不同门槛后，空气污染治理效率受其影响的程度与方向将发生改变。通过对样本的分析，本文发现，随着时间推移，虽然整体上政策规划呈上升趋势，但是门槛值反映出政策规划的不稳定性。探究其形成原因可能是政策在发展阶段的倾向问题。各省份在发展初期，开发力度较小，政策规划在第一门槛前对空气污染治理产生了较大的影响；但当进入发展的重要时期，政策规划重心放在经济发展上，对空气污染治理产生负向作用；随着发展水平的提升，政府越来越关注环保问题，进而在跨过第二门槛之后，政策的倾斜使其对空气质量产生了正向作用。在发展的过程中，东部的北京、江苏、广东，西部的陕西、新疆、宁夏跨过政策规划对空气污染治理效率的第二门槛值；而在未跨过第二门槛的省份中，东部沿海地区的浙江、山东、天津、河北、上海接近第二门槛值，仅次于这一区域的是中部的山西、安徽、江西、湖南，东北地区的辽宁、黑龙江。值得注意的是，西部地区整体距离第二门槛还有一定差距。

(2) 碳源的滞后项对空气污染治理效率的影响存在显著的正向双重门槛特征。当碳源低于0.516时，其对空气污染治理效率的系数为3.794；随着碳源的增加，这一系数降至1.206，说明随着碳消耗的增多，空气污染治理效率降低；当跨过第二门槛0.566时，这一系数进一步下降到0.808。尽管其系数为正，但这一动态过程与预期相符，即随着碳消耗量增加，当跨过相应门槛后，整体的空气污染治理效率减弱；反

表5 模型参数估计结果

政策规划	系数	碳源	系数	污染物排放	系数	环境治理投入	系数
$P \cdot I(P \leq \tau_1)$	4.946 ^{***}	$Ca \cdot I(Ca \leq \theta_1)$	3.794 ^{***}	$Co \cdot I(Co \leq \epsilon_1)$	0.360 [*]	$E \cdot I(E \leq \omega_1)$	2.018 ^{***}
	(3.69)		(9.99)		(1.68)		(2.76)
$P \cdot I(\tau_1 < P \leq \tau_2)$	-1.162 ^{***}	$Ca \cdot I(\theta_1 < Ca \leq \theta_2)$	1.206 ^{***}	$Co \cdot I(\epsilon_1 < Co \leq \epsilon_2)$	0.0971	$E \cdot I(\omega_1 < E \leq \omega_2)$	-0.227
	(-2.89)		(6.40)		(0.54)		(-0.78)
$P \cdot I(\tau_2 < P)$	0.306 [*]	$Ca \cdot I(\theta_2 < Ca)$	0.808 ^{***}	$Co \cdot I(\epsilon_2 < Co)$	0.458 ^{**}	$E \cdot I(\omega_2 < E)$	0.179
	(1.80)		(5.18)		(2.53)		(0.91)
经济发展	1.069 ^{***}	经济发展	0.982 ^{***}	经济发展	0.982 ^{***}	经济发展	1.079 ^{***}
	(6.62)		(6.53)		(6.07)		(6.13)
产业结构	-0.110	产业结构	-0.418	产业结构	0.0564	产业结构	-0.415
	(-0.38)		(-1.57)		(0.19)		(-1.32)
生活水平	0.388 ^{**}	生活水平	0.312 ^{**}	生活水平	0.390 ^{**}	生活水平	0.392 ^{**}
	(2.43)		(2.12)		(2.43)		(2.28)
生态现状	-0.316	生态现状	-0.187	生态现状	-0.553 ^{***}	生态现状	-0.509 ^{**}
	(-1.61)		(-1.05)		(-2.82)		(-2.29)
Constant	0.195 [*]	Constant	-0.413 ^{***}	Constant	-0.0266	Constant	0.255 ^{**}
	(1.94)		(-3.18)		(-0.14)		(2.17)
R^2	0.344	R^2	0.443	R^2	0.337	R^2	0.268

注：① P 、 Ca 、 Co 、 E 分别代表政策规划、碳源、污染物排放、环境治理投入四个解释变量；② 为做区分， τ_1 、 θ_1 、 ϵ_1 、 ω_1 分别为相应回归的门槛值；③ 括号内为各系数对应的 t 值，为系统输出结果

之，当碳源逐渐减少，第二门槛 0.566 变为第一门槛 0.516，系数从 1.206 变为 3.794，说明整体空气污染治理效率逐渐变高，这一过程反映出不同阶段促进作用存在差异。全国大部分地区碳源数据呈先上升、后下降的趋势，这也与本文的实证结果具有高度一致性。对于中部和西部、东北地区整体而言，碳消耗水平要领先于其他地区，处在第二门槛附近，究其原因是一些地区产业结构单一，粗放型生产较多，同时承接东部地区产业转移，因而整体的空气污染治理效率受碳源的影响相较于其他地区而言不高。对比之下，东部地区整体碳消耗水平相对而言较低，考虑到这些地区在发展的过程中，面临诸如技术进步、产业转型升级、转移等因素推动，碳消耗的减少使得空气污染治理效率有了显著提升。综上所述，我国大部分地区处于第二门槛附近，而东部则处于第一门槛水平，这种碳消耗上的差距也体现在空气污染治理效率上，显而易见，东部地区的空气污染治理效率要明显高于其他地区。

(3) 污染物排放的滞后项对空气污染治理效率的影响存在显著的双重门槛特征。当污染物排放低于 0.834 时，其对地区空气污染治理效率的弹性系数为 0.360；随着空气污染物的增多，当跨过第一门槛时，空气污染治理效率下降，但这一结果不显著；当来到第二门槛 0.963，其对空气污染治理效率的影响有所提升，回归系数为 0.458，大于跨越门槛前的系数

0.360。这说明，随着污染物排放水平提升，跨过相应的门槛后，政府加大了对空气污染治理的重视，空气污染治理效率明显提升。虽然这是常识，但这一落脚点不仅仅是中央政府这一层级，而更多的应该是在地方政府。我们可以从这一因素中看到各个区域的差异。具体而言，由于不同区域的污染物排放不同，不同区域对于空气污染治理的重视程度亦不尽相同。整体上全国各省份污染物的排放水平均呈下降趋势。与碳源一样呈现出相同的规律，中部的安徽、河南、湖北、湖南、江西，西部的广西、贵州，东北地区的黑龙江、吉林的污染物排放水平高，而东部地区的污染物排放整体水平相较而言更低一些。不过值得注意的是，中部和西部的山西、陕西、宁夏的污染物排放低于第一门槛值。其原因是发展到一定阶段，国家对环境政策的收紧和供给侧结构性改革，引发对落后产能产生污染的严格控制，但是区域差异仍显著。

(4) 环境治理投入的滞后项对空气污染治理效率的影响存在较为显著的双重门槛特征。当空气污染治理投入低于 0.109 时，其对地区空气污染治理效率的弹性系数为 2.018；随着空气污染治理投入不断提高，当跨过第一门槛之后，滞后效应使得空气污染治理投入的增加出现了规模报酬递减，在增加环境治理成本的同时反倒引起系数转变为 -0.227，但并不显著；当空气污染治理投入继续增加，此时治理效率提升，其对地区空气污染治理效率的弹性系数为 0.179，虽然

比起第一门槛之前系数小了很多,但是整体上有所回升。这说明,当空气污染治理投入较小的时候,发展处于起步阶段,环境问题较小,较小的投入能够引起效率提升;而当发展处于GDP导向的时候,由于环境问题较为明显,而且投入又存在一定滞后效应,使得整体效率变低;随着人们环保意识的提升,技术创新驱动和产业高级化带动,整体治理效率正向回升。全国各个省份空气污染治理投入均呈上升趋势。整体而言,由于资本和要素的驱动,以山东、江苏、广东为首的东部地区整体空气污染治理投入领先于其他地区;而中部的湖北、河南、山西等省份,由于加大了治理成本投入,整体空气污染治理效率有所提升。西部和东北地区整体上投入力度与东部和中部存在一定差距。通过回归发现,本文研究结论与环境政策工具发展的三个演化阶段有一定契合。第一阶段为第一门槛前,政府采取以控制型手段为主导的环境政策,进而投入对效率有很大的提升;但是当跨过门槛之后,政府采取以市场经济调节为主导的环境政策,这属于激励型环境政策,在不健全的市场机制背景下,无法充分发挥补贴排污税和排污权交易等手段;另外,存在污染物排放的经济活动主体对上述工具反应和信息反馈需要一个过程,因而这一政策具有一定滞后效应;当跨过第二门槛后,以合作型多元手段为主导的政府社会合作型环境政策出现,这种自愿性的环境规制与投入见效比较慢,但是能够从长远角度解决环境问题,其治理效率也在不断提升。

本文以门槛回归方程为基础,探究了我国区域空气污染治理效率的影响机制,因变量是空气污染治理效率,并以政策规划等四大因素为自变量进行整体回归,从而解得不同解释变量下的门槛值,以分析不同影响机制的作用。通过超效率SBM模型计算效率,有助于量化各省份空气污染治理状况,分析阶段性治理成果。使用门槛变量来决定分界点进行样本研究,通过不断对门槛变量观察值的分段回归找出适合的门槛值,有助于回避构建模型时使用主观分界点这一弊端所造成的分段点的选择性偏误,有助于找出相应的治理阶段,并根据不同阶段影响因素的不同特征进行政策改进。

在本文所研究的四个影响因素中,我们发现在门槛值的三个阶段中,只有碳源在三个门槛域的系数都在1%水平下显著,且系数数值也较大,差异明显(3.794, 1.206, 0.808),其余的系数显著性水平不够,较之碳源说服力不足。这些因素覆盖生产源头、生产过程以及治理过程,通过对比分析有助于我们找出最

为关键的影响因素,进而对我们进行政策上的制定以及环境污染管理更有针对性。

4 结论与政策启示

4.1 主要结论

本文采用2003—2015年我国省级区域相关环境指标数据,基于门槛回归模型对空气污染治理效率影响机制进行了研究。

研究结果表明:全国各省级区域空气污染治理效率呈现出明显的地区差异性和非均衡性,中西部地区由于承接产业转移、经济发展、忽视治理过程进而效率呈下降趋势,东部地区整体高于其他地区。四个影响因素与空气污染治理效率存在非线性关系,反映政府政策的阶段性变化,分别是以政府控制型为主、以市场经济调节为主、以政府社会合作型多元为主的环境政策过渡过程。

4.2 政策启示

在保证经济增长、社会进步的前提下,区域政府作为主体要持续关注并不断提升空气污染治理效率。第一,应时刻将空气污染的预防及解决机制纳入环保与地方发展政策之中。第二,经济欠发达、产业结构单一地区,应转变经济发展方式,逐步减少物质资源消耗,倡导科技进步、管理创新。这表现在用低消耗、低排放、高效益的集约型经济生产方式取代高消耗、高排放、低效益的粗放型经济生产方式,实现经济、生态协调发展。

在影响因素上,政府要主抓碳源这一影响因素,协调推动对其他因素的管控。对于处在第二门槛附近的东北、中部、西部省份的生产活动与方式进行关注,着重改变碳消耗量巨大的生产方式,征收针对化石燃料燃烧(以碳税为首)的环保税税目。同时奖励与补偿使用新型生产工具,与转化率高的设备加强市场化机制在节能减排过程中的建立与完善。碳源使用较少的地区应向上述地区传授经验,实现各地区共同良性发展。

参考文献

- [1] LIST J A, MCHONE W W, MILLIMET D L. Effects of air quality regulation on the destination choice of relocating plants[J]. Oxford economic papers, 2003, 55(4): 657-678.
- [2] BLACKMAN A. Alternative pollution control policies in developing countries[J]. Review of environmental economics and policy, 2010, 4(2): 234-253.
- [3] 沈坤荣, 金刚, 方娴. 环境规制引起了污染就近转移吗?[J]. 经济

- 研究, 2017, 52(5): 44-59.
- [4] 魏巍贤, 马喜立, 李鹏, 等. 技术进步和税收在区域大气污染治理中的作用 [J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(5): 1-11.
- [5] 郭峰, 石庆玲. 官员更替、合谋震慑与空气质量的临时性改善 [J]. 经济研究, 2017, 52(7): 155-168.
- [6] GALLARDO L, BARRAZA F, CEBALLOS A A, et al. Evolution of air quality in Santiago: The role of mobility and lessons from the science-policy interface[J]. *Elementa science of theanthropocene*, 2018, 6(1): 38-38.
- [7] ABDALLH A A, ABUGAMOS H. A semi-parametric panel data analysis on the urbanisation-carbon emissions nexus for the MENA countries[J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2017, 78: 1350-1356.
- [8] 朱相宇, 乔小勇. 北京环境污染治理分析及政策选择 [J]. 中国软科学, 2014(2): 111-120.
- [9] MANDAL S K, MADHESWARAN S. Environmental efficiency of the Indian cement industry: An interstate analysis[J]. *Energy policy*, 2010, 38(2): 1108-1118.
- [10] 谢里, 王瑾瑾. 中国农村绿色发展绩效的空间差异 [J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(6): 20-26.
- [11] 胡宗义, 李毅. 金融发展对环境污染的双重效应与门槛特征 [J]. 中国软科学, 2019(7): 68-80.
- [12] TONE K. Dealing with undesirable outputs in DEA: a Slacks-Based Measure(SBM) approach[R]. Nippon Opereshonzu, Risachi Gakkai ShunkiKenkyuHappyokaiAbusutorakutoshu, 2004: 44-45.
- [13] HANSEN B E. Threshold effects in non-dynamic panels: Estimation, testing, and inference[J]. *Journal of econometrics*, 1999, 93(2): 345-368.
- [14] MIRSHOJAEIAN H H, RAHBAR F. Spatial environmental Kuznets curve for Asian countries: study of CO₂ and PM₁₀[J]. *Journal of environmental studies*, 2011, 37(58): 1-14.
- [15] 李佳佳, 罗能生. 城市规模对生态效率的影响及区域差异分析 [J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(2): 129-136.
- [16] 吕学都, 王艳萍, 黄超, 等. 低碳经济指标体系的评价方法研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(7): 27-33.
- [17] EGGLESTON, SIMON, BUENDIA, et al. 2006. IPCC National Greenhouse Gas Inventory Guide. Institute of Global Environmental Strategy (IGES), Japan, p. 2006.
- [18] 张建清, 张岚, 王嵩, 等. 基于 DPSIR-DEA 模型的区域可持续发展效率测度及分析 [J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(11): 1-9.
- [19] SAATY T L. The modern science of multicriteria decision making and its practical applications: the AHP/ANP approach[J]. *Operations research*, 2013, 61(5): 1101-1118.
- [20] 王嵩, 孙才志, 范斐. 基于共生理论的中国沿海省市海洋经济生态协调模式研究 [J]. 地理科学, 2018, 38(3): 342-350.
- [21] SHAFER G. A Mathematical Theory of Evidence[M]. Princeton: Princeton University Press, 1976: 1-150.

Efficiency and Influencing Mechanism of Regional Air Pollution Governance in China—Based on the Super SBM and the Threshold Regression Model

YANG Gangqiang^{1,2}, JI Yifan^{1,2}, WANG Song^{1*}, MENG Shan¹

(1. Institute for Development of Central China, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Economic Development Research Center of Yangtze River, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: With the increasing demand of people for a better life, the efficiency of air pollution governance by local governments has gradually gained attention. Starting from the perspective of local governments' air pollution governance efficiency and its influencing mechanism, the governance efficiency of 30 provinces in China from 2003 to 2015 is measured by using the Super SBM model in this article. On the basis of that, the threshold regression model is used to analyze the influencing mechanism of local governments' air pollution governance efficiency. The results show that there is obvious regional differences. The efficiency has a downward trend on the whole in the central and western regions. However, the efficiency in the eastern and northeast regions has steady increased. Double threshold character appears in the relation of policy planning, carbon sources, pollutant emissions, and environmental governance input. Among them, carbon sources have a significant impact on efficiency. The energy consumption structure led by carbon mainly affects the air governance efficiency in the central and western regions. The backward regional governments should pay attention to the industrial upgrade and development. In terms of finance, collecting the tax items such as carbon tax. For industry, encouraging enterprises to innovate and upgrade backward enterprises.

Keywords: efficiency of air pollution governance; influencing mechanism; super SBM model; threshold regression model