

汪克亮 孟祥瑞 杨宝臣 等. 技术异质下中国大气污染排放效率的区域差异与影响因素[J]. 中国人口·资源与环境 2017 27(1): 101-110. [WANG Keliang, MENG Xiangrui, YANG Baochen, et al. Regional differences and influencing factors of China's air pollution emission efficiency considering technological heterogeneity [J]. China population, resources and environment, 2017 27(1): 101-110.]

技术异质下中国大气污染排放效率的区域差异与影响因素

汪克亮¹ 孟祥瑞¹ 杨宝臣² 程云鹤¹

(1. 安徽理工大学经济与管理学院, 安徽 淮南 232001; 2. 天津大学管理与经济学部, 天津 300072)

摘要 近年来中国雾霾天气的频繁发生给人们的生产、生活以及身体健康构成巨大威胁。提高大气污染排放效率, 深入挖掘大气污染减排潜力是改善中国大气环境质量, 减少和消除雾霾天气发生的重要途径。本文根据生态效率理论, 充分考虑到不同区域发展的不平衡因素与技术异质性特征, 在共同前沿方法框架下科学测算 2006—2014 年间中国 30 个省份的大气污染排放效率, 在此基础上分析效率的区域差异, 利用“技术差距比(TGR)”这一指标衡量东部、中部与西部三大区域之间大气污染排放技术的差距, 并从“技术”与“管理”两个维度进一步将各省份大气污染排放无效率分解为“技术差距无效率(TGI)”与“管理无效率(GMI)”, 以此定位各省份大气污染防治的薄弱环节, 进而构建策略矩阵, 将全国各省份归入四个不同排放效率特征的方阵, 并给出相应的优化路径与措施; 深入揭示大气污染排放效率与排放强度之间的内在联系, 提出“大气污染排放强度效率”这一全新概念并考察其演化趋势; 利用面板 Tobit 回归模型检验影响我国省际大气污染排放效率与排放技术的外部环境因素。实证结果表明: ①中国大气污染排放效率整体水平偏低, 年均仅为 0.493, 减排潜力巨大; ②中国大气污染排放效率与排放技术的地区差异显著, 无论是大气污染排放效率还是排放技术水平, 东部地区都是明显高于中部与西部地区; ③中国大气的实际排放强度明显高于潜在排放强度, 这表明大气污染排放强度还存在很大的改进空间; ④经济发展、产业结构升级与科技创新对大气污染排放效率与排放技术的提升均有显著促进作用, 煤炭消费比重上升与人口密度过大则对其有显著抑制作用; ⑤本文的研究结论支持“波特假说”与“污染避难所”假说。

关键词 大气污染排放效率; 技术异质性; 影响因素; 共同前沿; 区域差异

中图分类号 X323; F205 文献标识码 A 文章编号 1002-2104(2017)01-0101-10 doi: 10.3969/j.issn.1002-2104.2017.01.012

近年来, 中国的大气环境质量持续恶化, 雾霾天气频繁发生。特别是进入 2013 年以来, 中国出现了入冬以来持续时间最长、影响范围最广、强度最大的雾霾天气过程, 污染范围覆盖 270 万 km² 国土, 涉及到 17 个省市自治区和 40 余个重点城市, 影响人口达到 6 亿人, 对人民群众的身体与健康与生产生活造成了严重影响^[1]。这不仅引发社会公众对环境质量的广泛担忧, 也引起各界对中国经济发展模式的质疑, 更是凸显了中国生态文明建设的重要性、必要性、紧迫性与艰巨性。为了改善大气环境质量, 减少和消除雾霾天气, 中国政府付出了巨大努力, 采取了一些有针对性的对策与措施。2013 年 6 月, 李克强总理主持召开国务院常务会议, 专门部署了大气污染防治的十条措施, 并特别指出大气污染防治关系民生福祉, 必须付出坚持不懈的努力。2013 年 9 月, 国务院颁布《大气污染防治

行动计划》, 拉开了中国新一轮大气污染防治的序幕。计划明确提出了大气污染治理阶段性目标: 到 2017 年全国地级以上城市可吸收颗粒物浓度要比 2012 年要下降 10% 以上, 京津冀、长三角与珠三角等区域细颗粒物浓度分别要下降 25%、20% 与 15% 左右。力争用五年或更长时间, 逐步消除重污染天气, 全国空气质量明显好转。根据科学论证及评估, 这项行动计划共需投入 1.75 万亿元, 相当于“十二五”期间中国环境保护总投入的一半, 充分显示了中国政府着力改善大气环境的坚定决心。然而, 由于中国区域发展严重不平衡, 使得不同地区在经济基础、技术水平、能源结构及制度模式等方面都存在很强的异质性, 因而大气污染排放效率与防治技术等方面也必然存在明显差异。因此, 必须要充分考虑到这种差异性, 制定体现地区异质性的大气污染防治对策, 使政策效果得以充分发

收稿日期: 2016-06-12

作者简介: 汪克亮, 博士, 副教授, 主要研究方向为资源经济与环境管理、效率与生产率分析。E-mail: klwang@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金青年项目“生产网络化与技术异质性下的区域节能减排效率评价及政策优化研究”(批准号: 71403003); 教育部人文社会科学研究青年基金项目“节能减排效率视角下我国省区低碳经济评价与政策优化仿真研究”(批准号: 13YJC790136); 安徽省高校优秀青年人才支持计划重点项目“效率分析视角下我国大气污染排放绩效测度、影响因素与治理政策研究”(批准号: gxyqZD2016075)。

挥,以实现大气污染防治目标。

1 文献综述

雾霾危机的持续爆发使得大气污染防治再次成为国内外学术界关注的焦点。但是,已有研究多是基于工程技术层面,专门探讨中国大气污染排放效率的文献则很少。本文尝试从生态效率这一全新视角来考察中国省际大气污染排放效率。“生态效率(Eco-efficiency)”指标最先由OECD提出,被定义为用来满足人类需求的生态资源利用效率,在数值上可以表征为经济单元的经济产出(产品或服务)与环境影响的比值,强调在获取经济产出时应最大限度减少环境影响,反映经济发展与生态环境保护之间的平衡关系^[2]。当前,生态效率评价已经成为一种强有力的分析工具,可以为企业与政府制定实施环境政策提供有效的决策支持。生态效率测度方法较多,其中应用最为广泛的方法是数据包络分析(DEA),如Kuosmanen等首次提出DEA框架下生态效率指标的构建方法与理论基础^[3];Kortelainen将生态效率测算从静态拓展至动态维度,首次利用Malmquist指数与谢波德(Shephard)距离函数提出跨期生态效率变化指标——动态环境绩效,并进一步将其分解为生态效率变化与环境技术进步指数,以此定位环境绩效变动的驱动机制^[4];Camarero等基于生态效率视角考察22个OECD国家1980—2008年三种污染物的排放效率并分析效率的收敛特征^[5];Picazo-Tadeo等拓展了文献^[4]的研究,综合采用DEA、方向距离函数(DDF)与Luenberger生产率指标对欧盟28个国家1990—2011年的温室气体排放效率变化进行实证考察,并指出环境技术进步是驱动效率提升的主要因素,而生态效率变化则起到了阻碍作用^[6]。

虽然Shepard距离函数与DDF在能源环境效率测度中得到了广泛应用,但这两种距离函数均未考虑到不同组群之间存在的技术异质性^[7-10],都是基于“技术同质”这一假定,而这在现实中并不成立。由于不同决策单元的外部环境存在差异,因而所面临的技术也不可能相同。就本文而言,中国幅员辽阔,区域发展严重不平衡,不同省份的地理位置、经济结构、生产技术、管理模式以及人文传统等各种固有属性都存在很大差异,因而同一时期不同省份的大气污染减排技术是不同的。如果不考虑技术异质性,将会无法获悉效率缺失的深层次原因,进而导致决策失误。为了解决这个问题,Battese等基于随机前沿分析(SFA)提出了共同前沿(Meta-frontier)生产函数的分析框架,并利用其研究了技术异质性下不同企业组群的环境效率^[11];O'Donnell等首次采用DEA方法代替SFA方法,主要是基于DEA方法能够更便捷地处理多产出问题^[12];Chiu等根据收入水平将所有国家分为4个组群,通过结合DDF与

共同前沿方法考察了2003—2007年90个国家的环境效率,并从管理与技术两个层面对各国环境无效率进行分解^[13];Hang等同时考虑非径向松弛与非期望产出,在共同前沿框架下分析了中国209个城市的能源效率,发现经济发展与能源效率之间呈明显正相关,高收入城市的组群前沿更接近最佳生产前沿,管理无效与技术无效对能源利用无效率的贡献率分别为42%与58%^[14]。上述研究表明共同前沿理论较好地克服了传统效率测度方法的局限,为效率分析提供了一个更为深入的维度。该理论一经提出,就在诸多领域得到了广泛运用,其中包括资源环境领域^[15-17]。然而,基于共同前沿理论框架研究中国大气污染排放效率的文献在国内外还未见报道。当前中国所面临的大气污染形势是极其严峻的,而且在未来还可能持续恶化。有效遏制大气污染,消除雾霾天气是一项长期而又艰巨的任务,需要不同省份之间的共同努力与政策协同。鉴于此,本文充分考虑到中国不同区域的技术差距,在技术异质框架下科学测算各省份大气污染排放效率,并深入揭示效率差异性形成机理,准确定位各省份大气污染防治的薄弱环节,分析影响大气污染排放效率与技术差距的外部环境因素,以期为各地区因地制宜地制定与实施大气污染防治政策提供决策支持。

2 研究方法

假设 $j(j=1, 2, \dots, J)$ 个决策单元在时间 $t(t=1, 2, \dots, T)$ 内的经济产出为 v ,同时排放出 $n(n=1, 2, \dots, N)$ 种大气污染物,即 $p=(p_1, p_2, \dots, p_n)$ 。本文根据文献^{[3]-[6]}等使用的生态效率指标来衡量大气污染排放效率(APEE),也即将大气污染排放效率定义为决策单元的经济增加值与其产生的大气污染物总量之比。本文定义决策单元时期 t 的经济增加值与大气污染排放物的所有可能组合为“大气污染排放技术集(Air Pollution Generating Technology Set(APGTS))”:

$$APGTS(v, p) = \{ (p, v) \in R^{N+1} \mid \text{产生经济增加值 } v \text{ 会伴随大气污染排放物 } p \} \quad (1)$$

基于技术异质假定,首先按照一定标准将决策单元划分为具有不同技术水平的 K 个组群,将每个组群下各单元的投入产出归属同一技术集合 $APGTS^k(k=1, \dots, K)$,其上界即为“组群前沿”, K 个子技术集合均运作于共同技术集合下 $APGTS^m$,则

$$APGTS^m = \{ APGTS^1 \cup APGTS^2 \cup \dots \cup APGTS^K \} \quad (2)$$

$APGTS^m$ 的上界即为“共同前沿”。很显然,共同前沿是组群前沿的包络曲线。本文以中国30个省份(包括自治区、直辖市,统称省份。由于数据所限,西藏、台湾、香港及澳门不包括在分析样本中)为决策单元,运用共同前沿

方法测算大气污染排放效率。基于共同前沿的 DDF 可以表示为:

$$\vec{D}^m\{v, \mathbf{p}; \mathbf{g} = (g_v, \dots, -g_p)\} = \sup\{\beta | (v + \beta g_v, \mathbf{p} - \beta \mathbf{g}_p) \in APGTS^m(v, \mathbf{p})\} \quad (3)$$

其中, $APGTS^m(v, \mathbf{p})$ 为共同技术集合, 假定所有决策单元都位于一个共同的大气污染排放技术环境下。 $\vec{D}^m(\cdot)$ 可以衡量各省份实际污染排放与共同前沿面之间的差距, 反映了该省份相对全国潜在最佳排放技术下的排放无效率程度。当且仅当 $\vec{D}^m(\cdot) = 0$ 时, 该省份位于共同技术前沿之上, 实现了排放的完全有效率。

根据大气污染排放技术的相似性特征, 本文按照一定标准将中国 30 个省份划分为 K 个组群, 基于组群前沿的 DDF 可以表示为:

$$\vec{D}^k\{v, \mathbf{p}; \mathbf{g} = (g_v, \dots, -g_p)\} = \sup\{\beta | (v + \beta g_v, \mathbf{p} - \beta \mathbf{g}_p) \in APGTS^m(v, \mathbf{p})\} \quad (4)$$

$k = 1, \dots, K.$

其中 $\vec{D}^k(\cdot)$ 可以衡量待评省份实际大气污染排放与所在组群前沿排放之间的差距, 反映了该省份相对于组群潜在最优排放技术下排放无效率水平。当且仅当 $\vec{D}^k(\cdot) = 0$ 时, 表明该省份位于组群前沿之上, 在组群内实现了最优的排放水平。

考虑到经济增长仍然是当前中国最重要的宏观经济目标, 因此本文追求实现经济产出最大化前提下排放最少的大气污染, 兼顾增长与减排双重目标。因此, 本文选取的方向向量为 $\mathbf{g}_i = (v, \dots, -\mathbf{p})$, 则规模报酬不变假定下 (CRS) 组群前沿与共同前沿下待评省份 o 的大气污染排放无效率可以通过求解 (5)、(6) 式两个线性规划来实现, 即:

$$\begin{aligned} APEI_o^k &= \vec{D}^k(v, \mathbf{p}; \mathbf{g}) = \max \beta^k \\ \text{s. t. } & \sum_{h=1}^{H^k} z_h p_{hn} \leq (1 - \beta^k) p_{no} \\ & \sum_{h=1}^{H^k} z_h v_h \geq (1 + \beta^k) v_o \\ & z_h \geq 0, \beta^k \geq 0, n = 1, \dots, N. \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} APEI_o^m &= \vec{D}^m(v, \mathbf{p}; \mathbf{g}) = \max \beta^m \\ \text{s. t. } & \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^{H^k} \lambda_h p_{hkn} \leq (1 - \beta^m) p_{kn} \\ & \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^{H^k} \lambda_h v_{hk} \geq (1 + \beta^m) v_{ok} \\ & \lambda_h \geq 0, \beta^m \geq 0, n = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (6)$$

其中, (5) 式中 H^k 表示组群 k 内省份的个数; $APEI_o^k = \beta^k$ 表示省份 o 在组群前沿下的大气污染排放无效率水平, (6) 式中 $APEI_o^m = \beta^m$ 衡量的是共同前沿下待评省份的大气污染排放无效率水平, $\sum_{k=1}^K H^k = J$, J 为全国省份个数。

很显然, 由于共同前沿反映的是全国潜在最优的排放技术, 因而 $\beta_k \leq \beta_m$ 。

在共同前沿理论框架下, “技术差距比 (TGR)” 指标用来衡量组群前沿技术与共同前沿技术之间的差距, 在数值上等于决策单元共同前沿技术效率与组群前沿技术效率之比^[20]。本文中, 大气污染排放技术差距比 TGR 可以由式 (7) 计算得到。

$$0 \leq TGR = \frac{APEE^m}{APEE^k} = \frac{MTE}{GTE} = \frac{1 - APEI^m}{1 - APEI^k} \leq 1 \quad (7)$$

其中, MTE 、 GTE 分别为共同前沿与组群前沿下的大气污染排放效率。如前文所述, 由于 $\beta_k \leq \beta_m$, 因此 $MTE \leq GTE$, 所以 $0 \leq TGR \leq 1$ 。TGR 越接近于 1, 表明大气污染排放的组群技术越接近共同前沿排放技术 (全国潜在最优的排放技术), 排放技术异质性程度就越低, 反之亦然。

基于上述分析, 本文采用 TGR 指标来衡量不同省份大气污染排放技术水平的异质性, 同时判断不同组群间污染排放技术差距, 但是据此仍然无法判断大气污染排放无效率的根源。为此, 本文借鉴文献 [13] 与 [14] 的方法, 从管理与技术两个层面将全国共同前沿下各省份的大气排放无效率值 (APEI) 分解为 “管理无效率 (GMI)” 与 “技术差距无效率 (TGI)”, 即:

$$APEI^m = GMI + TGI \quad (8)$$

$$GMI = 1 - APEE^k = 1 - GTE = APEI^k \quad (9)$$

$$TGI = APEI^k \times (1 - TGR) \quad (10)$$

3 样本、变量与数据

大气污染物种类较多, 如 SO_2 、CO、氮氧化物、烟尘、粉尘以及碳氢化合物等。本文一方面考虑到省际污染排放数据的可得性, 另一方面基于不同污染物对大气环境质量的影响程度, 最终选择三类大气污染物: SO_2 、氮氧化物 (NO_x) 与烟粉尘 (Dust)。这三类污染物是中国雾霾天气频发的主要诱因。从本文所选用的 DEA 模型来看, 投入未包括资本、劳动、能源等常规性投入, 这主要是基于大气污染排放效率的定义, 即经济增加值与大气污染排放物的比值, 这样做虽然没有考虑到常规投入对效率的影响, 有一定的局限性, 但效率测算结果在某种程度上能更准确反映经济增长与大气环境保护之间的协调关系。另外, 本文采用各省份 GDP 作为经济产出指标, 并以 2016 年不变价格对其进行换算。各变量数据来源于相应年份《中国统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》以及各省份统计年鉴并经过整理得到。

如何划分组群也是本文的一个重要问题, 选择划分标准关键是要保证组群内各省份排放技术是相同或相似的, 而组群间排放技术则应呈明显异质性。对于这一问题, 文

文献[13]与[14]认为技术水平的高低与收入密切相关,因此他们以人均收入作为标准,采用聚类分析方法来划分组群。文献[17]认为知识溢出效应与知识源距离紧密相关,地理位置是影响技术扩散速度的重要因素,从而导致不同地理位置的技术水平与技术效率出现异质性,因而他的做法是以地理位置为标准将全国划分为东部、中部与西部三大组群。本文通过计算比较发现两类标准下的省份划分情况基本相同,因而仍然选择采用传统上的按照地理位置将全国划分为东部、中部、西部三个不同排放技术水平的组群(其中东部组群包括北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东与海南11省份;中部组群包括山西、吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖北与湖南8省份;西部组群包括内蒙古、广西、重庆、四川、贵州、云南、山西、甘肃、青海、宁夏与新疆11省份)。

4 实证结果

4.1 大气污染排放效率的区域差异分析

根据公式(6),以全国共同前沿作为基准,2006—2014年,中国大气污染排放效率均值仅为0.493,意味着在增加50.667%经济产出的同时,三类大气污染物还可以在现有基础上再减少50.667%的排放量,大气污染排放效率偏低。如果能够达到共同前沿省份的污染排放水平,中国大气污染减排空间是非常可观的。相比之下,如果以组群前沿作为参考标准,中国大气污染排放效率可以达到0.756,明显高于共同前沿下的0.493,主要是因为比较标准存在差异。前者是以全国潜在最优排放技术作为参考标准,而后者是以组群潜在最优排放技术为参考。由于组群前沿不会高于共同前沿,因此各省份大气污染实际排放点与组群前沿的距离不会小于其与共同前沿的距离,由此造成了两类前沿下效率之间的差异。以西部组群的陕西省为例,样本期内其共同前沿大气污染排放效率为0.392,而组群前沿大气污染排放效率达到0.807,两者之间差异巨大。这表明,在全国潜在最佳技术标准下,陕西省的效率改进空间达到60.812%,而在西部组群的潜在最佳技术下的效率改进空间只有19.332%,由此也体现了组群前沿与共同前沿之间的技术落差。为了进一步验证这种差异性,本文采用两样本Wilcoxon秩和检验对样本期内各省份两种前沿下的效率差异性进行统计检验,得到检验 z 值为-4.171,真实概率 p 值为0,表明这种差异性是非常显著的。为了直观刻画不同前沿下中国省际大气污染排放效率的地区差异,本文绘制了中国大气污染排放效率的地理空间分布图(见图1、2)。通过图1与图2对比发现两种前沿下中国大气污染排放效率的差异非常明显。

由于组群前沿下的效率值是由各自的组群技术所决

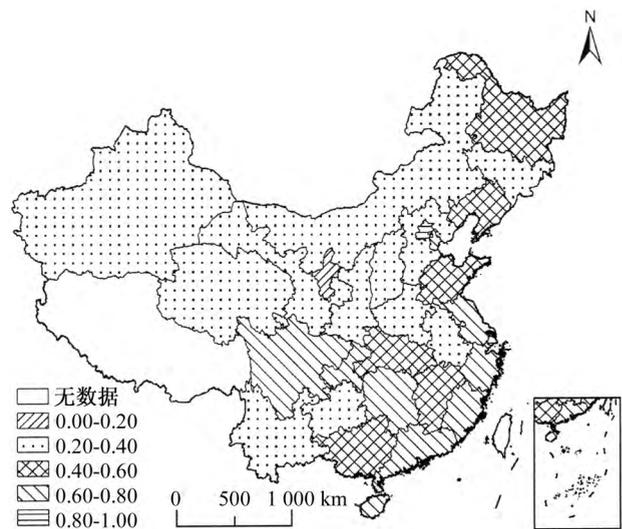


图1 共同前沿下中国各省份大气污染排放效率平均值的空间分布(2006—2014年)

Fig. 1 Spatial distribution of China's average air pollution emission efficiency under meta-frontier during 2006 - 2014

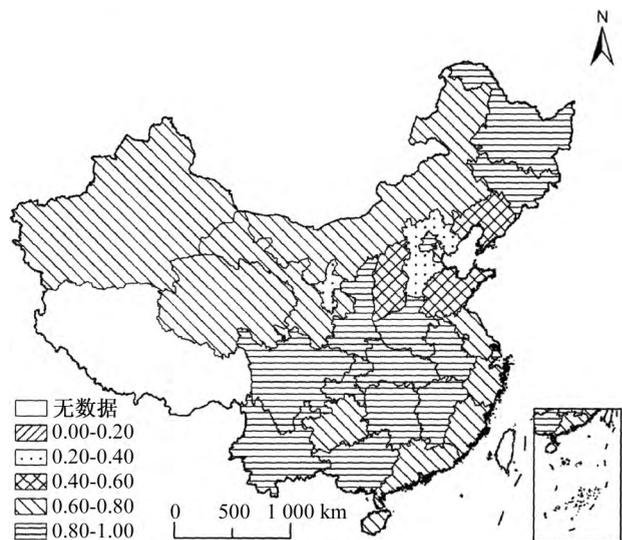


图2 组群前沿下中国各省份大气污染排放效率平均值的空间分布(2006—2014年)

Fig. 2 Spatial distribution of China's average air pollution emission efficiency under group frontier during 2006 - 2014

定的,因此不同组群内省份之间的效率比较没有实际意义,因而本文基于共同前沿来比较中国各省份、区域之间大气污染排放效率的差异性特征。从单个省份来看,研究期内北京一直处于共同前沿之上,代表了中国最高的大气污染排放技术。除北京之外,效率较高的省份还包括上海(0.891)、海南(0.777)、天津(0.737)与广东(0.721),

这些省份均来自于经济发达的东部沿海地区;效率较低的省份有宁夏(0.156)、山西(0.219)、内蒙古(0.221)、新疆(0.226)与青海(0.282),这些省份距离前沿面较远,大气污染减排潜力较大,在未来政策制定中应给予重点关注。从区域层面来看,研究期内东部、中部与西部三大区域的大气污染排放效率均值分别为0.672、0.428与0.362,呈现出与中国区域发展水平相一致的梯度特征,表明区域大气污染排放效率与经济发展水平呈正相关。

4.2 大气污染排放技术差距与大气污染排放无效率的分解

本文采用技术差距比(TGR)这一指标来衡量中国东部、中部与西部三大组群大气污染排放技术差距,并根据公式(8)–(10)将各省份的大气污染排放无效率分解为“技术差距无效率(TGI)”与“管理无效率(GMI)”,定位无效率产生的根源,并由此洞悉各省份大气污染治理的薄弱环节,增加政策制定的针对性。

经测算可知,2006—2014年间东部、中部与西部三大组群的大气污染排放技术差距比分别为1、0.475与0.469。其中,东部组群实现了全国潜在最优排放技术的100%,而中部与西部组群只实现了其中的47.541%与46.872%,中西部地区的大气污染防治技术明显低于东部地区。我们可以对技术差距比进行两两相减,得出三大区域间大气污染排放技术差距。从图3可以看出,中西部技术差距一直维持在0.050之内,差距较小。东部与中西部的技术差距一直徘徊于0.300—0.600之间,技术落差较大且呈扩大态势,这表明中国区域之间可能存在技术转移与扩散的壁垒因素,导致东部先进的污染治理技术无法及时向中西部有效转移,如果这种局面得不到改善的话,中国区域间大气污染排放技术差距将会进

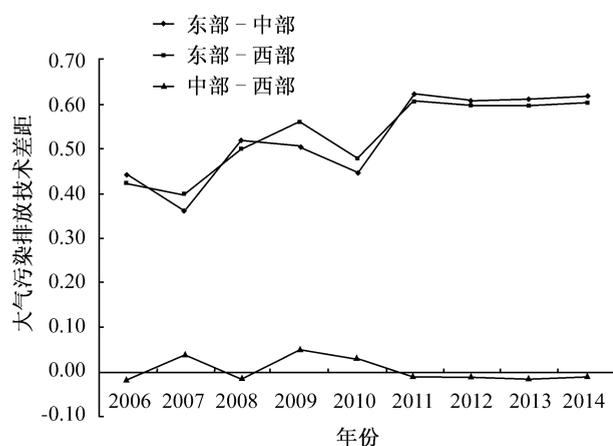


图3 三大组群间大气污染排放技术差距(2006—2014年)

Fig. 3 Technology gap of air pollution emission between China's three groups during 2006—2014

一步扩大。

为了更好地识别大气污染排放无效率的根源,本文从“技术”与“管理”两个维度将共同前沿下大气污染排放无效率进行分解。由分解结果可知,2006—2014年间共同前沿下大气污染排放无效率均值为0.507,其中管理无效率GMI为0.244,占48.119%,技术差距无效率为0.263,占比为51.880%,技术无效的比例略大于管理无效。为了进一步帮助我们找到提升各省份大气污染排放效率的策略与路径,本文根据分解结果建立策略矩阵,如图4所示。分别以GMI与TGI均值为界,各个省份分别被归入下述4个方阵:①处于方阵1的省份GMI与TGI均是高于平均水平,表明这些省份排放技术与管理水平都低于平均水平,要想提升大气污染排放效率必须在缩小排放技术差距的同时提升管理水平;②处于方阵2的省份GMI低于平均水平而TGI高于平均水平,表明这些省份管理水平相对较高但技术水平较为落后,未来应在继续保持管理优势的同时缩小技术差距以提升大气污染排放效率;③处于方阵3的省份GMI与TGI都低于平均水平,表明这些省份排放技术与水平呈现“双高”状态,是中国大气污染防治的引领者,未来应继续努力保持这种双向优势;④方阵4的省份GMI高于平均水平而TGI低于平均水平,意味着这些省份虽然排放技术水平较高但管理效率偏低,未来大气污染防治的重点应置于管理水平的提升。

按照上述定义与分类,本文将全国30个省份归入4个不同的方阵(见表1)。根据表1,内蒙古、贵州、甘肃、青海与新疆等5省份位于第1方阵,这些省份大气污染排放技术无效与管理无效的比例均较高,这些省份必须内外兼修,缩小外部技术差距与提升内部管理水平应双管齐下;

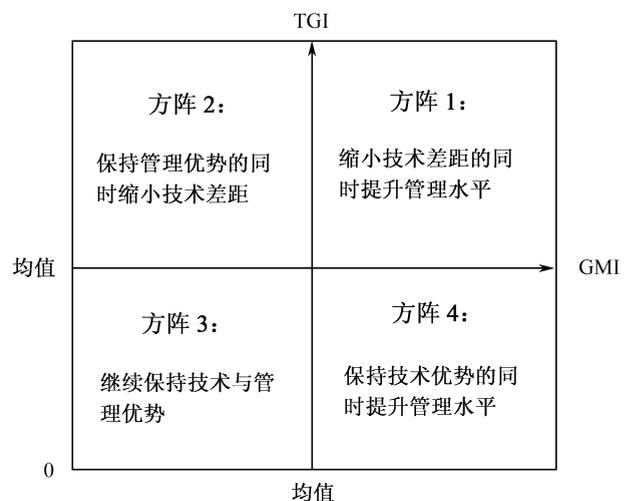


图4 大气污染排放效率提升策略矩阵

Fig. 4 Strategy matrix of improving air pollution emission efficiency

表1 中国各省份大气污染排放效率提升策略的归类
Tab. 1 Classification of improving strategy of China's provincial air pollution emission efficiency

方阵类型	省份
方阵1	内蒙古、贵州、甘肃、青海、新疆
方阵2	吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖北、湖南、广西、重庆、四川、云南、陕西
方阵3	北京、上海、海南
方阵4	天津、河北、辽宁、山西、江苏、浙江、福建、山东、广东、宁夏

吉林、黑龙江等12省份处于第2方阵,这些省份大气污染效率提升的主要制约方面在于排放技术水平较低,未来应通过充分吸收先进的生产与治污技术、改善生产工艺设备以及优化产业结构等手段来改善大气污染排放效率;北京、上海与海南3省份处于第3方阵,这些省份是中国大气污染最优排放技术的代表,未来应继续保持技术与管理两方面优势,做好引领与带头作用,促进中国大气污染排放效率整体水平的提高;处于方阵4的有天津、河北等10省份,这些省份技术水平虽然较高,但较低的管理水平阻碍了其大气污染排放效率的进一步改善,应该将提升管理水平作为未来大气污染防治的重点。

4.3 大气污染排放效率与大气污染排放强度

本文基于DEA模型提出了一种新型的大气污染排放效率指标,该指标可以反映不同污染物之间的相互替代作用,本质上是一种全要素效率指标。然而,传统的大气污染排放效率指标是单要素效率指标,如SO₂排放强度等,这类指标主要优点是易于理解且便于操作,因而一直被沿用至今,但其主要缺陷在于无法反映不同要素之间的相互作用,无法反映技术效率的内涵。当前仍有很多国家和地区采用强度指标作为节能减排目标,中国也提出了节能减排总量与强度的“双控”目标。基于此,本文将考察两类指标之间的内在联系,通过测算共同前沿与组群前沿下各省份大气污染排放无效率值,得到各省份潜在最优的大气污染排放强度值。如某个省份某种大气污染物排放量为 p ,经济产出为 v ,该省份在 k 组群前沿下的大气污染排放无效率值为 β^k ,则根据公式(5),可以得到该省份组群技术前沿下的最佳污染排放量为 $(1-\beta^k) \times p$,最佳的经济产出量为 $(1+\beta^k) \times v$,因而得到该省份在组群前沿下的潜在最佳大气污染排放强度为:

$$PEI^k = \frac{(1-\beta^k) \times p}{(1+\beta^k) \times v} \quad (11)$$

同理,如果该省份在共同前沿下的大气污染排放无效率值为 β^m ,则根据公式(6),本文可以得到该省份共同前

沿下的最佳污染排放量为 $(1-\beta^m) \times p$,最佳的经济产出量为 $(1+\beta^m) \times v$,由此可以得到共同前沿下该省份潜在最佳的大气污染排放强度为:

$$PEI^m = \frac{(1-\beta^m) \times p}{(1+\beta^m) \times v} \quad (12)$$

综上,本文进一步提出“大气污染排放强度效率”这一概念,其在数值上等于实际大气污染排放强度与潜在大气污染排放强度之比,由此可以获悉中国大气污染排放强度的潜在改进空间。图5与图6分别给出了2006—2014年共同前沿下中国三类大气污染物的实际排放强度与潜在排放强度(虚线表示潜在排放强度)以及大气污染排放强度效率的变化趋势。

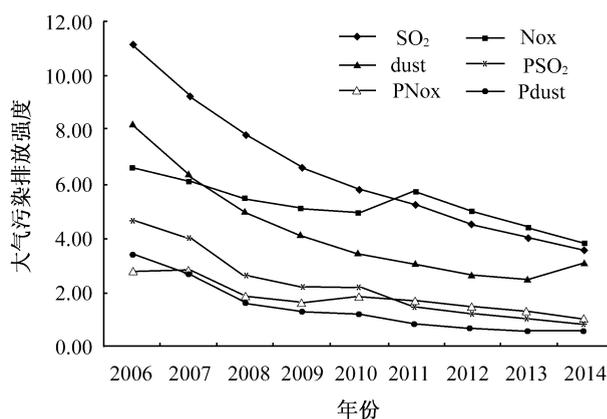


图5 三类大气污染物实际排放强度与潜在排放强度(2006—2014年)

Fig. 5 Practical emission intensity and potential emission intensity of three kinds of air pollution during 2006 - 2014

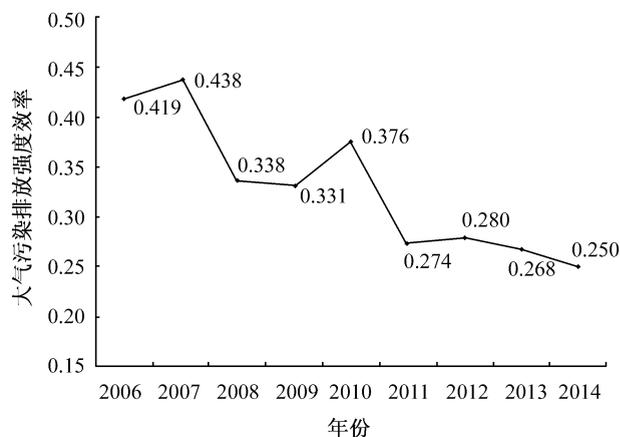


图6 中国大气污染排放强度效率的演变趋势(2006—2014年)

Fig. 6 Changing trend of China's air pollution emission intensity efficiency during 2006 - 2014

从图 5 可以看出 样本期内中国三类大气污染物实际排放强度整体上都是下降的 意味着经济产出所付出的大气环境代价在不断减小。三类大气污染物的实际排放强度与潜在排放强度变化趋势基本上保持一致 但是实际排放强度明显高于潜在排放强度 表明中国大气污染排放强度还存在很大的降低空间。通过计算发现 样本期内中国大气污染排放强度效率均值仅为 0.331 距离共同前沿还存在 66.951% 的改进潜力。这一结果表明近年来虽然中国大气污染实际排放强度在不断下降 但远未达到最优水平 经济增长所付出的大气环境代价仍然非常高昂。由图 6 还可知 样本期内中国大气污染排放强度效率在 2007 出现最大值为 0.438 然后波动下降至 2012 年的 0.280 最近两年又呈现连续下降态势 2014 年达到谷底的 0.250 年均下降率达到了 6.251% 这进一步表明中国大气污染排放强度的改进空间是巨大的 并且随着时间推移越来越大。相关决策部门应进一步采取有效措施 最大限度挖掘大气污染减排潜力 实现经济发展与大气环境保护的协调。

4.4 影响大气污染排放效率与技术差距的外部环境因素分析

前文分析了中国大气污染排放效率的区域差异特征 但尚未对影响这种差异性的原因做出解释 为此 本部分将系统分析中国大气污染排放效率的影响机制 重点检验外部环境因素的影响作用。从研究领域来看 大气污染排放效率应隶属于环境效率研究的一个分支。虽然国内外有关大气污染排放效率影响因素的文献鲜有报道 但对于环境效率的影响因素分析 现有文献已经进行了大量研究^[18-20]。考虑到研究对象特点 结合已有研究结果以及数据可得性 本文最终选择以下几类外部环境影响因素: ①经济发展水平(*PGDP*) 用各省份不变价的人均 GDP 来表示 为了消除数据非平稳变化趋势 本文对其进行对数化处理($\ln PGDP$); ②产业结构(*INS*) 用各省份第三产业增加值占 GDP 的比重来表示; ③科技创新水平(*R&D*) 用各省份科技活动经费支出占 GDP 比重表示 以验证“波特假说”是否成立; ④能源结构(*ENS*) 用各省份的煤炭消费量占能源消费总量的比重来表示; ⑤政府环境规制力度(*ER*) 用各省份排污费收入占 GDP 比重来表示; ⑥外商直接投资(*FDI*) 用各省份实际利用外商直接投资占 GDP 的比重来表示 主要是为了验证“污染避难所”假说; ⑦人口密度(*POP*) 以各省份每平方公里人数来表示。由于大气污染排放效率与技术差距比的值均处于 0 和 1 之间 属于受限因变量 如果采用普通 *OLS* 会导致参数估计量有偏和不一致 所以本文选择 Tobit 回归模型来解决这一问题。Tobit 模型采用极大似然估计方法 可以得到原参数的一

致估计量。为了分析中国各省份大气污染排放效率以及大气污染排放技术的外部环境影响机制 本文以 2006—2014 年共同前沿下中国各省份大气污染排放效率与大气污染排放技术差距比(*TGR*) 作为被解释变量 上述 7 类外部环境因素为解释变量建立 Tobit 回归模型 表 2 给出了回归结果。为了确保估计结果的有效性 本文重新选取了相关解释变量的指标以及模型的设定形式 以此检验模型估计结果的稳健性 结果表明本文结论基本稳健。计量回归所涉及到的变量数据来源于历年《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》、《中国对外经济统计年鉴》、《中国科技统计年鉴》。为了保持统计口径一致 相关变量数据均以 2006 年不变价格进行了调整。

表 2 的回归结果显示: ①经济发展水平与大气污染排放效率及技术差距比均高度正相关 表明经济发展对大气污染排放效率与大气污染排放技术都有显著促进作用 因为较高的经济发展水平可以为大气污染防治提供人才、技术以及资金方面的保障。②产业结构对大气污染排放效率与排放技术均具有积极影响 回归系数在 1% 检验水平下显著不为零。第三产业增加值占 GDP 的比重每提高 1% 大气污染排放效率与技术差距比将分别提升 0.723% 与 1.213%。由于第三产业以流通服务行业为主 污染排放相对较少 有利于改善大气污染排放效率。同时 提升

表 2 中国大气污染排放效率及技术差距比的 Tobit 回归结果

Tab. 2 Tobit regression result of China's provincial air pollution emission efficiency and TGR

变量	共同前沿大气污染排放效率		大气污染排放技术差距比(TGR)	
	回归系数	标准误差	回归系数	标准误差
常数项	1.346***	0.411	0.833**	0.369
$\ln PGDP$	2.134***	0.332	1.672***	0.432
<i>INS</i>	0.723***	0.127	1.213***	0.259
<i>R&D</i>	3.427***	0.715	4.769***	1.133
<i>ENS</i>	-0.432**	0.205	-0.257***	0.075
<i>ER</i>	-2.326	1.756	1.324*	0.804
<i>FDI</i>	0.453*	0.233	1.328**	0.592
<i>POP</i>	-0.172***	0.051	-0.202**	0.097
对数似然值	-220.982		-252.027	
对数似然值比检验(卡方)	32.581		21.329	
样本数	270		270	

注: **、*、* 分别表示回归系数在 1%、5%、10% 水平上显著。

第三产业比重可以降低单位 GDP 污染排放量,推动排放技术前沿向外拓展,促进大气污染排放技术进步。③科技创新对大气污染排放效率与大气排放技术贡献率显著为正,研发强度每提高 1%,大气污染排放效率与技术差距比将相应提高 3.427% 与 4.769%,可见科技创新对大气污染防治产生了至关重要的影响,这也表明“波特假说”在中国大气污染防治中得到了支持:适当的环境规制刺激企业进行技术创新,从而在降低成本、提升产品竞争力的同时也减少了大气污染物的排放,达到了双赢。④能源结构显著抑制了大气污染排放效率与大气污染排放技术的提升,两方程回归系数分别在 1%、5% 水平下显著。众所周知,燃煤是中国大气污染产生的主要根源,煤炭消费比重提升无疑会对大气污染防治产生不利影响。当前,燃煤设备技术水平低下、燃煤方式落后以及洁净煤技术推广不力等因素都从根本上阻碍了中国大气污染排放效率与防治技术的进一步提升。

其它因素的影响机制如下:①环境规制对大气污染排放效率的影响为负,对技术差距比的影响为正,但回归系数均未通过显著性检验,这与理论预期并不一致。理论上,环境规制会倒逼企业改进生产与治污技术,采用更加环保的生产方式,从而对大气污染防治产生积极影响。然而,本文回归结果并不支持这一理论。究其原因,一方面排污费收入占 GDP 比重也许并不是一个合适的衡量环境规制水平的指标。另一方面也从侧面表明中国当前排污收费制度存在不合理性,政府有必要设计更严格的排污收费政策^[21]。②外商直接投资虽然对大气污染排放效率有正面影响,但回归系数没有通过显著性检验,意味着促进作用不明显,“污染避难所”假说在某种程度上得到支持,这可能是由于外商直接投资对大气污染排放效率的影响具有双向性,一方面外商直接投资的技术溢出与扩散效应有效降低了当地的大气污染排放;另一方面发达国家较为严格的环境标准迫使跨国公司把污染产品的生产环节转移到东道国,从而对当地环境质量的提升产生负面影响^[22]。本文回归结果应该是两种影响相互叠加的结果。相比之下,外商直接投资对大气污染排放技术有显著改善作用,这主要是源于第一种影响,即中国企业通过学习借鉴外资企业的先进技术与管理模式,获得了技术溢出效应,从而有效提升了生产效率与大气污染防治技术水平。③人口密度对大气污染排放效率与技术差距比都有很明显的负面影响。可能原因在于,中国工业主要集中于人口密度较大的城市,城市机动车保有量也远远高于人口密度较低的农村,这些都是导致中国城市大气环境不断恶化的主要根源。事实证明,近年来中国出现的大范围严重雾霾天气也多发生在城市。人口密度越大,经济规模越大,能

源需求越高,大气污染也就越严重。Cropper 等通过研究指出高人口密度可能是造成环境质量下降的主要原因之一^[23],本文回归结果支持这一观点。

5 结论与政策建议

本文充分考虑到区域技术异质性,基于共同前沿与生态效率理论科学测算 2006—2014 年间中国各省份的大气污染排放效率,在此基础上分析其区域差异及大气污染排放技术差距,并从技术与管理两个维度将各省份共同前沿大气污染排放无效率进行解构,定位各省份大气污染防治的薄弱环节并提出具体的改进策略,进而建立大气污染排放效率与大气污染排放强度之间的内在联系,最后采用 Tobit 回归模型检验了影响省际大气污染排放效率的外部环境因素。研究发现:①样本期内中国大气污染排放效率均值仅为 0.493,距离前沿面还存在 50.667% 的改进空间,大气污染减排潜力巨大。②中国大气污染排放效率与大气污染排放技术均存在显著的区域差异性,东部地区远高于中西部地区。无论是共同前沿还是组群前沿,北京在考察年份都一直位于前沿面上,是中国最优大气污染防治技术的代表。③通过大气污染排放无效率的分解发现,技术差距无效率与管理无效率分别占据了 51.880% 与 48.119% 的比例。根据策略矩阵,将 30 个省份归入不同类型的四大方阵,并由此提出各省份大气污染防治的路径。④中国大气污染实际排放强度与潜在排放强度之间落差较大且大气污染排放强度效率呈现下降趋势,表明中国大气污染排放强度还存在很大的改进空间,经济增长与大气环境保护之间有待进一步协调。⑤经济发展与提升第三产业比重显著促进了大气污染排放效率与排放技术。科技创新在有效提升企业产品竞争力的同时也有效降低了大气污染排放,双赢状态的“波特假说”在本文得到验证。煤炭消费比重的提升以及较高的人口密度对大气污染防治造成了明显的不利影响。外商直接投资对大气污染排放效率的正向促进作用并不显著,发达国家的“污染避难所”假说在本文得到一定程度的支持,但外商直接投资对大气污染排放技术有积极贡献。

根据上述结论可引申出如下政策启示:①大气污染防治的根本出路在于转变经济发展方式,要加快产业结构升级,坚决淘汰落后产能,继续大力推进节能减排工作,积极优化能源结构,建立与完善大气污染排放交易体系与排污收费制度。在改善外部技术环境的同时创新内部企业管理模式,做到内外并重。人口密度大的城市应采取合理措施控制机动车保有量,对机动车尾气排放实施严格的监督管理,倡导绿色出行。②加大绿色节能产业的资金支持力度,设立国家大气污染防治重大科技专项,推动大气污染

防治技术与控制对策的科学研究, 积极推动科研成果转化, 促进生产领域与大气污染治理领域的技术创新。中央政府对于研发资金较为缺乏的中西部地区应给予充分的政策支持, 为其提升大气环境治理水平创造更好的技术环境。③东部与中西部地区大气污染排放技术差距不断扩大的现实令人担忧。为了缩小技术差距, 应加强区域之间生产与环保技术领域的交流与合作, 扫除一切技术壁垒, 促进先进技术与管理经验顺利从东部转移扩散至中西部。在技术交流过程中, 东部沿海发达省份应担当“帮扶者”职责, 可以尝试采用“一对一”的对口支援与精准扶贫来帮助中西部省份, 而中西部地区在模仿与学习东部的同时也要不断提高自主创新能力。④对于外资利用应持有理性态度, 切忌只注重经济效益而忽视了环境效益, 必须合理设置资源环境门槛条件, 避免让中国成为发达国家转移污染产业的污染天堂。与此同时, 要充分利用外资的技术溢出效应, 学习借鉴发达国家先进的生产方式与环境保护模式, 让优质外资成为中国产业结构升级的催化剂。

(编辑: 田红)

参考文献(References)

- [1] 薛进军, 赵忠秀. 中国低碳经济发展报告[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2013: 18-20. [XUE Jinjun, ZHAO Zhongxiu. Report of China's low carbon development[M]. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2013: 18-20.]
- [2] 岳媛媛, 苏敬勤. 生态效率: 国外的实践与我国的对策[J]. 科学学, 2004, 22(2): 170-173. [YUE Yuanyuan, SU Jingqin. Eco-efficiency: foreign practice and our measure[J]. Studies in science of science, 2004, 22(2): 170-173.]
- [3] KUOSMANEN T, KORTELAINE M. Measuring eco-efficiency of production with data envelopment analysis[J]. Journal of industrial ecology, 2005, 9(4): 59-72.
- [4] KORTELAINE M. Dynamic environmental performance analysis: a Malmquist Index Approach[J]. Ecological economics, 2008, 64: 701-715.
- [5] CAMARERO M, CASTILLO J, PICAZO-TADEO A J, et al. Eco-efficiency and convergence in OECD countries[J]. Environmental resource economics, 2013, 55: 87-106.
- [6] PICAZO-TADEO A J, CASTILLO-GIMENEZ J, BELTRAN-ESTEVE M. An intertemporal approach to measuring environmental performance with directional distance functions: greenhouse gas emissions in the European Union[J]. Ecological economics, 2014, 100: 173-182.
- [7] HU J L, WANG S C. Total factor energy efficiency of regions in China[J]. Energy policy, 2006, 34(17): 3206-3217.
- [8] ZHOU P, ANG B W. Linear programming models for measuring economy-wide energy efficiency performance[J]. Energy policy, 2008, 36: 2901-2906.
- [9] 钱争鸣, 刘晓晨. 中国绿色经济效率的区域差异与影响因素分析[J]. 中国人口、资源与环境, 2013, 23(7): 104-109. [QIAN Zhengming, LIU Xiaochen. Regional differences in China's green economic efficiency and their determinants[J]. China population, resources and environment, 2013, 23(7): 104-109.]
- [10] 王兵, 吴延瑞, 颜鹏飞. 中国区域环境效率与环境全要素生产率增长[J]. 经济研究, 2010(5): 95-109. [WANG Bing, WU Yanrui, YAN Pengfei. Environmental efficiency and environmental total factor productivity growth in China's regional economics[J]. Economic research journal, 2010(5): 95-109.]
- [11] BATTESE G E, RAO D S P. Technology gap, efficiency and a stochastic metafrontier function[J]. International journal of business and economics, 2002(1): 87-93.
- [12] O'DONNELL C J, RAO D S P, BATTESE G E. Metafrontier frameworks for the study of firm-level efficiencies and technology ratios[J]. Empirical economics, 2008, 34: 231-255.
- [13] CHIU C R, LIOU J L, WU P I, et al. Decomposition of the environmental inefficiency of the meta-frontier with undesirable output[J]. Energy economics, 2012, 34: 1392-1399.
- [14] HANG Y, SUN J S, WANG Q W, et al. Measuring energy inefficiency with undesirable outputs and technology heterogeneity in Chinese cities[J]. Economic modelling, 2015, 49: 46-52.
- [15] OH D H. A metafrontier approach for measuring an environmentally sensitive productivity growth index[J]. Energy economics, 2010, 32: 146-157.
- [16] 王群伟, 周德群, 周鹏. 中国全要素二氧化碳排放绩效的区域差异: 考虑非期望产出共同前沿函数的研究[J]. 财贸经济, 2010(9): 112-117. [WANG Qunwei, ZHOU Dequn, ZHOU Peng. Regional differences of China's total factor carbon dioxide emission performance: a analysis based on metafrontier function considering undesirable output[J]. Finance & trade economics, 2010(9): 112-117.]
- [17] 李胜文, 李大胜, 邱俊杰, 等. 中西部效率低于东部吗? ——基于技术集差异和共同前沿生产函数的分析[J]. 经济学季刊, 2013, 12(3): 777-798. [LI Shengwen, LI Dasheng, QIU Junjie, et al. Is the Middle-West less efficient than the East? [J]. China economic quarterly, 2013, 12(3): 777-798.]
- [18] 李静. 中国区域环境效率的差异与影响因素研究[J]. 南方经济, 2009(12): 24-35. [LI Jing. Eco-efficiency differences and its influential factors across provinces in China[J]. South China journal of economics, 2009(12): 24-35.]
- [19] 袁鹏, 程施. 中国工业环境效率的库兹涅茨曲线检验[J]. 中国工业经济, 2011(2): 79-88. [YUAN Peng, CHENG Shi. Examining Kuznets Curve in environmental efficiency of China's industrial sector[J]. China industrial economics, 2011(2): 79-88.]
- [20] 汪克亮, 杨力, 杨宝臣, 等. 能源经济效率、能源环境绩效与区域经济增长[J]. 管理科学, 2013, 26(3): 86-99. [WANG Keliang, YANG Li, YANG Baochen, et al. Energy economic efficiency, the energy environmental performance and regional

- economic growth [J]. *Journal of management science*, 2013, 26 (3): 86 - 99.]
- [21] 庞瑞芝, 李鹏, 路永刚. 转型期间我国新型工业化增长绩效及其影响因素研究——基于“新型工业化”生产力视角[J]. *中国工业经济*, 2011 (4): 64 - 73. [PANG Ruizhi, LI Peng, LU Yonggang. Study on ‘ new-type ’ industrialization growth performance and its factors during the transitional period [J]. *China industrial economics*, 2011 (4): 64 - 73.]
- [22] 岳书敬, 刘富华. 环境约束下的经济增长效率及其影响因素 [J]. *数量经济技术经济研究*, 2009 (5): 94 - 106. [YUE Shujing, LIU Fuhua. The industrial efficiency and its determinants considering environmental protection [J]. *The journal quantitative & technical economics*, 2009 (5): 94 - 106.]
- [23] CROPPER M, GRIFFITHS C. The interaction of population growth and environmental quality [J]. *The American economic review*, 1994, 84 (2): 250 - 254.

Regional differences and influencing factors of China's air pollution emission efficiency considering technological heterogeneity

WANG Ke-liang¹ MENG Xiang-rui¹ YANG Bao-chen² CHENG Yun-he¹

(1. School of Economics and Management, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001 China;

2. College of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract Frequent occurrence of fog and haze weather in recent years brings a great threat to people's production, life and health. In such circumstance, improving air pollution emission efficiency and tapping the potential of air pollution reduction should be important channels to improve China's air environmental quality and eliminate fog and haze weather. Based on eco-efficiency theory and fully considering regional unbalanced development and technological heterogeneity, this article assessed air pollution emissions efficiency (APEE) for China's 30 provinces during 2006 - 2014 under the framework of meta-frontier, then investigated APEE's regional differences and evaluated the technology gap of air pollution emissions among China's three major areas using the index of technology gap ratio (TGR). In order to explore the vulnerability of controlling air pollution for China's each province, the air pollution emission inefficiency is further decomposed into 'technology gap inefficiency' and 'managerial inefficiency' from the perspective of technology and management, respectively, on basis of which a strategic matrix is built and China's provinces are divided into four categories based on different efficiency improvement strategies. Furthermore, the internal relation is revealed between APEE and air pollution emission intensity, according to which we present a new concept of 'air pollution emission intensity efficiency' and then investigate its changing trend. Panel Tobit regression model is used to investigate the influencing mechanism of the external environmental factors of APEE and air pollution emission technology for China's provinces. The empirical results show that China's APEE is generally low with the average score of 0.493 during 2006 - 2014 and regional differences of APEE and air pollution emission technology are significant, indicating that there is a great potential on air pollution emission reduction. In addition, it is concluded that air pollution emission efficiency and emission technology of China's east area are all significantly higher than that of China's central area and west area. It is also founded that China's practical air pollution emission intensity is significantly higher than potential air pollution emission intensity, showing that there is much room for China to decrease air pollution emission intensity. The regression results of Tobit model demonstrate that economic development, optimizing industrial structure and technological innovation all play positive roles on the improvement of China's APEE and air pollution emission reduction technology, while increasing the proportion of coal consumption and large population density significantly exert negative effects on it, the porter hypothesis and the pollution haven hypothesis are both supported by the empirical results of this paper.

Key words air pollution emission efficiency; technological heterogeneity; influencing factors; meta-frontier; regional differences