

长江经济带城市大气污染排放效率与产业结构变迁

蒋姝睿¹, 余琅², 杨瑄¹, 唐祎繁¹, 马中¹, 何雷鸣¹, 王力^{1,3*}

1. 中国人民大学环境学院, 北京 100872

2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044

3. 生态环境部环境与经济政策研究中心, 北京 100029

摘要 基于非期望产出的超效率SBM-DEA模型, 评价了2007—2017年长江经济带108个城市的大气污染排放效率。通过耦合协调度模型和Tobit模型, 验证了该区域产业结构变迁与大气污染排放效率的影响关系, 结果发现: (1) 仅有6个城市的大气污染排放效率均值达效率前沿面, 大气污染排放效率均值从高到低依次为下游、中游和上游地区; (2) 中上游地区城市的大气污染排放效率和产业结构合理化、产业结构高级化耦合协调度显著低于下游城市; (3) 产业结构合理化、产业结构高级化有利于提高长江经济带各城市大气污染排放效率。应针对未实现大气污染排放效率和产业结构耦合协调发展的城市, 重点制定产业结构发展和环境保护的一体化发展策略。

关键词 长江经济带; 大气污染; 排放效率; 产业结构

长江经济带覆盖了中国上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、云南和贵州11个省市, 因此建设长江经济带对提升我国综合实力具有重要的战略意义。然而, 长江经济带横跨中国东中西3个区域, 各地区之间经济发展差异显著, 部分城市面临经济发展模式粗放、能源消耗过快、环境容量超载等资源环境挑战^[1]。2014年9月, 国务院印发《关于依托黄金水道推动长江经济带发展的指导意见》, 提出要构建经济高效、生态良好的长江

经济带。2016年9月印发的《长江经济带发展规划纲要》进一步指出了长江经济带发展所面临的严峻生态环境状况。随着经济社会不断发展, 长江经济带的大气污染问题日益凸显, 污染物排放量长期巨大^[2-3], 阶段性的雾霾污染将严重影响居民健康^[4-6]。解决长江经济带的大气污染治理与经济发展之间的矛盾, 实现空气质量改善, 已成为该区域经济向绿色发展转型的迫切要求。

为了更有效地解决中国面临的大气环境问题,

收稿日期: 2021-03-04; 修回日期: 2021-06-23

作者简介: 蒋姝睿, 博士研究生, 研究方向为环境经济与管理, 电子信箱: jiangshurui@ruc.edu.cn; 王力(通信作者), 博士研究生, 研究方向为环境经济政策, 电子信箱: 13701077591@163.com

引用格式: 蒋姝睿, 余琅, 杨瑄, 等. 长江经济带城市大气污染排放效率与产业结构变迁[J]. 科技导报, 2022, 40(4): 42-54; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.04.005

有关大气污染排放效率的研究始终是相关研究领域研究人员的关注焦点。数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)方法由于可以有效区分决策单元有效和无效^[7-9],在这一领域得到了广泛的应用和不断改进^[10-13]。超效率SBM-DEA模型可以再分解有效决策单元,避免信息损失,相较其他传统DEA方法更为准确,适合环境效率研究^[14-15]。该方法也已经得到了研究人员在绿色经济^[16-17]、碳排放^[18-19]、水资源利用^[20]等领域的普遍应用。就研究的分析框架来说,有关大气污染排放效率的研究可以分为2类。一些研究人员将大气污染物排放视为投入^[21-22],但更多研究人员认为污染是一种产出^[23],因此这一方法缺乏准确。另一些研究人员将大气污染物排放视作非期望产出指标^[24],认为资本、劳动力、能源等生产要素投入后,不仅会得到经济增加值等期望产出,还会得到污染物等非期望产出^[25-26]。优化的目标就是要在增加期望产出的同时,减少非期望产出和生产要素的投入^[27]。基于上述文献总结,本研究采取非期望产出的超效率SBM-DEA模型测算研究区域大气污染排放效率。

产业结构转型升级是确保经济稳定发展和环境质量改善的重要战略之一,研究人员也针对产业结构变迁与大气污染关系开展了大量研究。部分研究关注产业结构与大气污染的耦合关系^[28]。例如马丽等^[29]利用脱钩理论发现,京津冀地区工业发展与工业SO₂排放实现了绝对脱钩,但与工业烟尘排放仍处于相对脱钩状态。周迪等^[30]利用拓展的耦合模型考察了中国省级层面碳排放与产业结构升级的耦合关系,发现中国碳排放效率和产业结构升级水平的时空格局和地区分布均存在差异。然而,现有关于大气污染排放效率和产业结构变迁交互耦合关系的文献较少,且关注城市层面的研究仍有空缺。评估长江经济带城市层面产业变迁和大气污染排放效率的耦合协调程度,有利于了解各城市不同的发展阶段特征,为各城市提供差异化、精细化的发展策略。此外,也有研究人员关注产业结构变迁对大气污染排放效率的线性关系,这对于探究大气污染治理和产业经济的协调发展路径具有重要意义^[31]。例如汪克亮等^[32]利用面板Tobit模型

分析了2006—2014年间中国30个省份的大气污染排放效率影响因素,发现第三产业增加值占GDP比重对大气污染排放效率的提升具有促进作用。陈浩等^[33]选取第二产业增加值占GDP比重作为产业结构的指标,证明了2003—2013年京津冀地区13个城市的产业结构将对该地区环境效率产生负面影响。然而,这些研究均是单一产业增加值占GDP比重衡量产业发展的静态结构,未能从动态角度把握产业结构变迁的相关特征^[34-35],特别是有关产业结构变迁对大气污染排放效率影响的研究尚有空缺。

基于此,本研究将测算2007—2017年间长江经济带108个地级市的大气污染排放效率。考虑到SO₂是我国重点控制的工业污染物之一^[36],会对居民健康造成威胁^[37],本研究采取工业SO₂排放量作为大气污染的代理变量,将其纳入产出指标来构建非期望产出的超效率SBM-DEA模型,以期将研究尺度聚焦城市层面,更为深入精准地评价大气污染排放效率。同时,从产业结构合理化和产业结构高级化指标两个维度,评测研究区域产业结构变迁与大气污染排放效率的耦合协调度,探究产业结构变迁对大气污染排放效率的影响效应。

1 数据与方法

1.1 非期望产出的超效率SBM-DEA模型

Tone^[14]构建了非径向、非角度的SBM-DEA模型,在目标函数中纳入了松弛变量,解决了传统DEA模型无法考虑非期望产出的问题。研究进一步采用非期望产出的超效率SBM-DEA模型,将SBM-DEA模型中效率值为1的有效决策单元再分解,使得决策单元的效率值不受[0,1]的限制,避免了信息损失,从而更有效地反映了实际生产过程^[15],模型如下:

$$\rho^* = \min \rho = \frac{\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \frac{s_i^-}{x_{ir}}}{\frac{1}{E+U} \left(\sum_{j=1}^E \frac{s_j^+}{y_{jr}} + \sum_{k=1}^U \frac{s_k^-}{z_{kr}} \right)} \quad (1)$$

$$s.t. \begin{cases} s_i^- \geq \sum_{t=1, t \neq r}^n \lambda_t x_{it}, i = 1, 2, \dots, I \\ s_j^+ \geq \sum_{t=1, t \neq r}^n \lambda_t y_{jt}, i = 1, 2, \dots, E \\ s_k^- \geq \sum_{t=1, t \neq r}^n \lambda_t z_{kt}, i = 1, 2, \dots, U \\ s_i^- \geq x_{ir} \\ s_j^+ \geq y_{jr} \\ s_k^- \geq z_{kr} \\ \lambda_i \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, ρ^* 为决策单元的效率值; I 、 E 、 U 分别为每个决策单元有 I 种投入、 E 种期望产出和 U 种非期望产出; s_i^- 、 s_j^+ 、 s_k^- 分别为投入、期望产出、非期望产出的松弛变量; λ_i 为决策单元的权重。

当 $\rho < 1$ 时, 决策单元无效; 当 $\rho \geq 1$ 时, 决策单元有效, 且 ρ 值越大效率越高。

1.2 Tobit 模型

由于决策单元效率值需大于或等于 1 才有效, 依据非期望产出的超效率 SBM-DEA 模型计算出的大气污染排放效率值, 大气污染排放效率应满足条件:

$$Efficiency = \begin{cases} 0, \rho^* < 1 \\ \rho^*, \rho^* \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

Tobit 模型是因变量满足某种约束条件下取值的模型, 相较其他模型更加适用于本研究^[32]。为考察产业结构变迁对长江经济带 108 个地级市大气污染排放效率的影响, 结合既往文献^[34], 研究将从产业结构合理化、产业结合高级化 2 个维度进行验证, 构建线性回归模型如下:

$$Efficiency_i = \beta_0 + \beta_1 TL_i + \beta_2 TS_i + \alpha X_i + u_i \quad (4)$$

式中, TL_i 和 TS_i 分别表征产业结构合理化和产业结

合高级化, X_i 为其他控制变量, β_0 、 β_1 、 β_2 和 α 是变量系数, u_i 为误差项, 服从 $N(u, \sigma_u^2)$ 。

为消除量纲影响, 回归中所有解释变量均采用对数形式。

1.3 耦合协调度模型

耦合协调度模型可以反映两个系统之间的协调发展水平, 基于耦合度进行计算^[38-39]。耦合度用于描述大气污染排放效率和产业结构变迁之间相互作用关系, 计算公式为

$$C = \sqrt{\frac{X \times Y}{\left(\frac{X + Y}{2}\right)^2}} \quad (5)$$

式中, C 为产业结构变迁和大气污染排放效率的耦合度指数, X 和 Y 分别表示产业结构变迁指标和大气污染排放指标。

为了进一步准确反映排放效率和产业结构变迁指标的耦合协调发展水平, 基于文献经验建立耦合协调度模型^[38-39]:

$$D = \sqrt{C \times (\alpha X + \beta Y)} \quad (6)$$

式中, D 为产业结构变迁和大气污染排放效率的耦合协调度, α 和 β 分别为大气污染排放效率和产业结构变迁指标的权重。

考虑到长江经济带的资源环境和产业发展同等重要, 本研究中 α 和 β 取值均为 0.5。耦合协调度 (D) 取值范围为 [0, 1], 研究根据数值大小, 将耦合协调度 (D) 划分为 4 个耦合协调阶段, 10 个细分阶段, 如表 1 所示。

表 1 耦合协调度阶段分类

耦合协调阶段	D	阶段细分	协调水平	耦合协调阶段	D	阶段细分	协调水平
低水平耦合	0~0.3	0~0.1	极度失调	磨合阶段	0.5~0.8	0.5~0.6	勉强协调
		0.1~0.2	严重失调			0.6~0.7	初级协调
		0.2~0.3	中度失调			0.7~0.8	中级协调
拮抗阶段	0.3~0.5	0.3~0.4	轻度失调	高水平耦合	0.8~1.0	0.8~0.9	良好协调
		0.4~0.5	濒临失调			0.9~1.0	优质协调

1.4 指标选取

研究选取了 2007—2017 年长江经济带 11 个省市共 108 个地级市 (毕节、铜仁除外) 面板数据作为

研究样本。选取的投入、产出指标和 Tobit 模型中的解释变量如表 2 所示。投入指标包括长江经济带 108 个地级市的固定资产投资额、单位从业人员

数和能源消费总量,分别表征资本、劳动和能源要素投入。囿于数据可得性,地级市能源消费总量数据是以各地级市夜间灯光数据作为权重,利用各省

能源消费总量折算所得。产出指标为长江经济带108个地级市的地区生产总值和工业SO₂排放量。

表2 城市大气污染排放效率评价及其影响因素的指标选取

指标	指标说明	符号	选取变量
投入指标	资本要素投入	<i>K</i>	固定资产投资额
	劳动要素投入	<i>L</i>	单位从业人员数
	能源要素投入	<i>E</i>	能源消费总量
产出指标	期望产出	<i>G</i>	地区生产总值
	非期望产出	<i>P</i>	工业SO ₂ 排放量
	产业结构合理化	<i>TR</i>	泰尔指数的倒数
	产业结构高级化	<i>TS</i>	第三产业产值与第二产业产值的比值
Tobit模型	科学技术水平	<i>TE</i>	地方财政支出中科学支出占比
	交通运输水平	<i>RC</i>	公路客运量
	对外开放水平	<i>FDI</i>	外商直接投资与地区生产总值的比值
	城市化水平	<i>UR</i>	城镇化率

Tobit模型相关的解释变量包括以下几个维度:

1) 产业结构合理化。产业结构合理化指的是同一地区不同产业之间的协调程度,体现了当地资源有效利用程度。借鉴于春晖等^[34]、孙攀等^[40-41]的做法,泰尔指数可以用于度量产业结构合理化,具体公式为

$$TL = \sum_{i=1}^n \left(\frac{Y_i}{Y} \right) \ln \left(\frac{Y_i}{L_i} / \frac{Y}{L} \right) \quad (7)$$

式中,*TL*为泰尔指数;*Y*为地区产值;*L*为就业;*i*为产业(*i*=1,2,3)。

TL=0意味着经济处于均衡状态;*TL*不为0,表示产业结构偏离了均衡状态,且*TL*值越大,产业结构越不合理。为保证指标的正向化,研究采用泰尔指数的倒数进行计算,即:

$$TR = \frac{1}{TL} \quad (8)$$

式中,*TR*表示泰尔指数的倒数,即产业结构合理化的度量指标,*TR*数值越大,产业结构越合理。

2) 产业结构高级化。随着社会发展进步,特别是信息技术革命的发展,与具有服务性质的第三产业相比,工业化已经逐渐丧失优势。参考文献经验^[34-42],研究采用第三产业增加值与第二产业增加值的比值来度量产业结构高级化,评估一个地区服

务产业和传统工业产值的比较优势,从而清晰地体现产业结构是否朝着“服务化”的方向转型升级。

3) 其他控制变量。考虑到各地级市之间科技进步、交通运输、对外开放和城市化等因素之间的差异可能会导致被解释变量之间的差异,研究选取地方财政支出中科学支出占比来表征科学技术水平;选取公路客运量来表征交通运输水平;选取外商直接投资与地区生产总值的比重来表征对外开放水平;选取城镇化率来表征城市化水平。

1.5 数据来源

研究选取2007—2017年长江经济带108个地级市(毕节市和铜仁市除外)的投入产出数据进行分析,评估得出各城市考虑环境污染作为非期望产出的大气污染排放效率,并在此基础上探究了产业结构变迁因素对各城市大气污染排放效率的影响。其中,各地级市夜间灯光数据来源于DMSP/OLS和VIIRS/DNB夜间灯光影像的栅格数据,并通过相互校正进行拟合,最终得到2007—2017年长时间序列数据。各省能源消费量来源于《中国能源统计年鉴》(2008—2018)。城镇化率来源于各省份、地级市历年统计年鉴。其他数据主要来源于《中国城市统计年鉴》(2008—2018),部分缺失数据参考各省、地级市历年统计年鉴。

最高值(赣州为0.536)和最低值(新余为0.238)之间相差0.298。云南省各城市排放效率的最高值(玉溪为0.626)和最低值(丽江为0.209)之间相差0.417。

从地理分布上来看,长江经济带上、中和下游地区之间差异较大。大气污染排放有效率的的城市集中在下游地区,大气污染排放效率较低的城市集中在中游和上游地区。2007—2017年间的平均效率值呈现下游最高、中游次之、上游最低的特征。其中,下游城市的平均效率值最高、为0.724;中游和上游城市的平均效率值依次为0.472和0.434,仍有很大提升空间。

2007—2017年,长江经济带108个城市大气污

染排放效率的变化趋势如表3所示。其中杭州、苏州、上海等55个城市大气污染排放效率值有不同程度的提高。无锡、温州、台州等53个城市在这期间大气污染排放效率值有不同程度的下降,大气环境治理政策应有所倾斜,重点关注这部分城市的大气污染排放,防止效率值的进一步下降。此外,除合肥和南昌以外,长江经济带的省会城市和直辖市的大气污染排放效率普遍上升,主要原因是作为各省市经济和政治的中心,这类城市更加注重大气污染物减排。合肥和南昌虽是省会城市,但其对应省份(安徽和江西)均为所属中游地区中整体效率值较低的省份,这2个城市的效率降低与各自省份对大气污染缺乏重视,整体环境政策过于宽松有关。

表3 2007—2017年长江经济带108个城市对应的大气污染排放效率变化趋势

分类	城市名称									
效率值上升的城市	杭州	苏州	上海	丽水	滁州	随州	安庆	成都	常州	宁波
	资阳	自贡	长沙	雅安	南京	武汉	怀化	镇江	岳阳	徐州
	绵阳	荆州	永州	扬州	衢州	邵阳	宜宾	嘉兴	遵义	蚌埠
	泸州	株洲	九江	淮安	益阳	张家界	咸宁	郴州	遂宁	乐山
	上饶	芜湖	眉山	昆明	连云港	池州	曲靖	舟山	普洱	重庆
效率值下降的城市	广元	丽江	贵阳	新余	六盘水					
	无锡	温州	台州	金华	常德	盐城	玉溪	绍兴	黄山	南充
	黄冈	荆门	巴中	襄阳	亳州	德阳	宜昌	赣州	宣城	南通
	六安	南昌	湖州	十堰	泰州	宿州	衡阳	合肥	娄底	阜阳
	宿迁	广安	吉安	达州	孝感	昭通	抚州	内江	宜春	黄石
	马鞍山	景德镇	湘潭	保山	临沧	萍乡	攀枝花	鄂州	鹰潭	铜陵
	安顺	淮南	淮北							

基于此,研究进一步分析各城市对应省市的大气污染排放效率在2007—2017年间的变化趋势(图2)。可以看出,安徽、江西、湖北、湖南和云南5个省份的大气污染排放效率均呈现下降趋势。相应省份需强调大气污染减排,提高大气污染物减排力度,从而实现整体效率值的提升。贵州、江苏、上海和重庆4个省份的大气污染排放效率呈现波动上升,四川和浙江2个省份的大气污染排放效率呈现年际波动但整体保持平稳。这些省份应在维持现有大气排放效率的基础上,进一步削减污染物水平,实现更多城市达到效率前沿面。

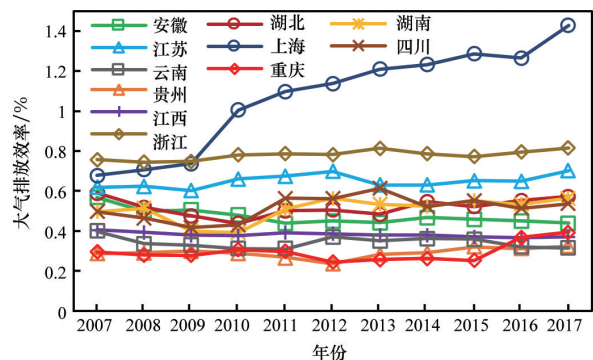


图2 2007—2017年长江经济带11个省市大气污染排放效率变化趋势

3 产业结构变迁与大气污染排放效率的关系

3.1 长江经济带产业结构变迁的特征

在研究产业结构变迁对大气污染排放效率的影响之前,研究首先分析了长江经济带 2007—2017 年间产业合理化和产业结构高级化 2 个指标的变化趋势特征(图 3),发现 2007—2017 年长江经济带的产业结构变迁表现出显著的波动性,这和我国产业结构变迁的整体趋势相符合^[34]。随着经济社会不断深化发展,对外开放不断加深,长江经济

带各城市都迎来了产业发展的浪潮。一方面 TR 值在 2007—2014 年间呈现波动趋势,自 2015 年以来不断上升,表明近几年产业结构趋于合理,产业之间发展不平衡有所缓解;另一方面,TS 值在 2007—2017 年间波动起伏显著,表明第二产业和第三产业产值的比较优势呈现波动状态,但就近几年来说,第三产业发展势头强劲,TS 值连年上升。此外,产业结构高级化和产业结构合理化的演变趋势存在较显著差异,从合理化和高级化 2 个维度分析产业结构变迁对大气污染排放效率的影响很有必要。

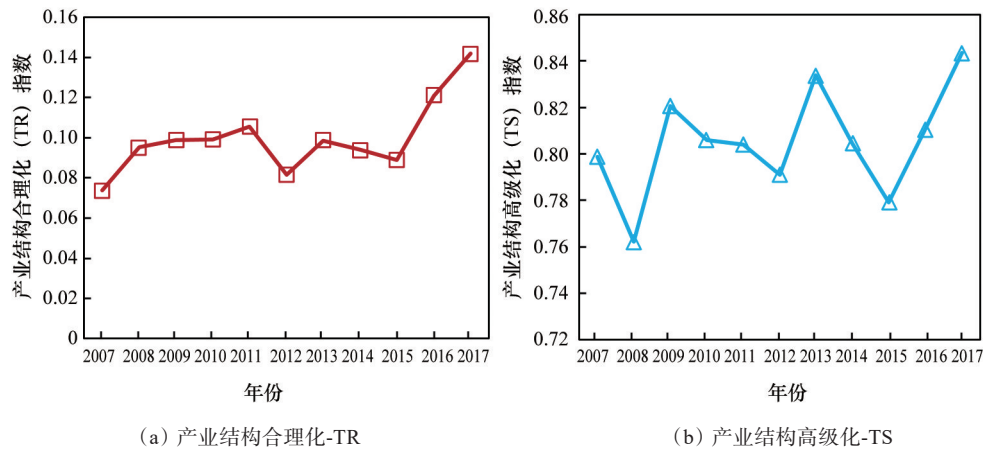


图 3 2007—2017 年长江经济带产业结构变迁

3.2 产业结构变迁与大气污染排放效率的耦合协调分析

研究测算了 2007—2017 年间长江经济带 108 个城市的大气污染排放效率和产业结构合理化和

高级化指标的耦合协调度,并计算出均值。就地理分布而言,长江经济带各省份大气污染排放效率和产业结构变迁指标的耦合协调度仍有较大提升空间(表 4)。除上海市大气污染排放效率和产业结

表 4 2007—2017 年间长江经济带 11 省市大气污染排放效率与产业结构变迁指标的耦合协调度均值

地区	省份	Efficiency 与 TR 耦合协调度	地区	省份	Efficiency 与 TR 耦合协调度
上游地区	重庆	0.534	上游地区	重庆	0.516
	四川	0.613		四川	0.695
	贵州	0.435		贵州	0.432
	云南	0.499		云南	0.528
中游地区	安徽	0.582	中游地区	安徽	0.629
	江西	0.600		江西	0.604
	湖北	0.670		湖北	0.686
	湖南	0.642		湖南	0.623
下游地区	江苏	0.766	下游地区	江苏	0.744
	浙江	0.797		浙江	0.781
	上海	0.947		上海	0.764

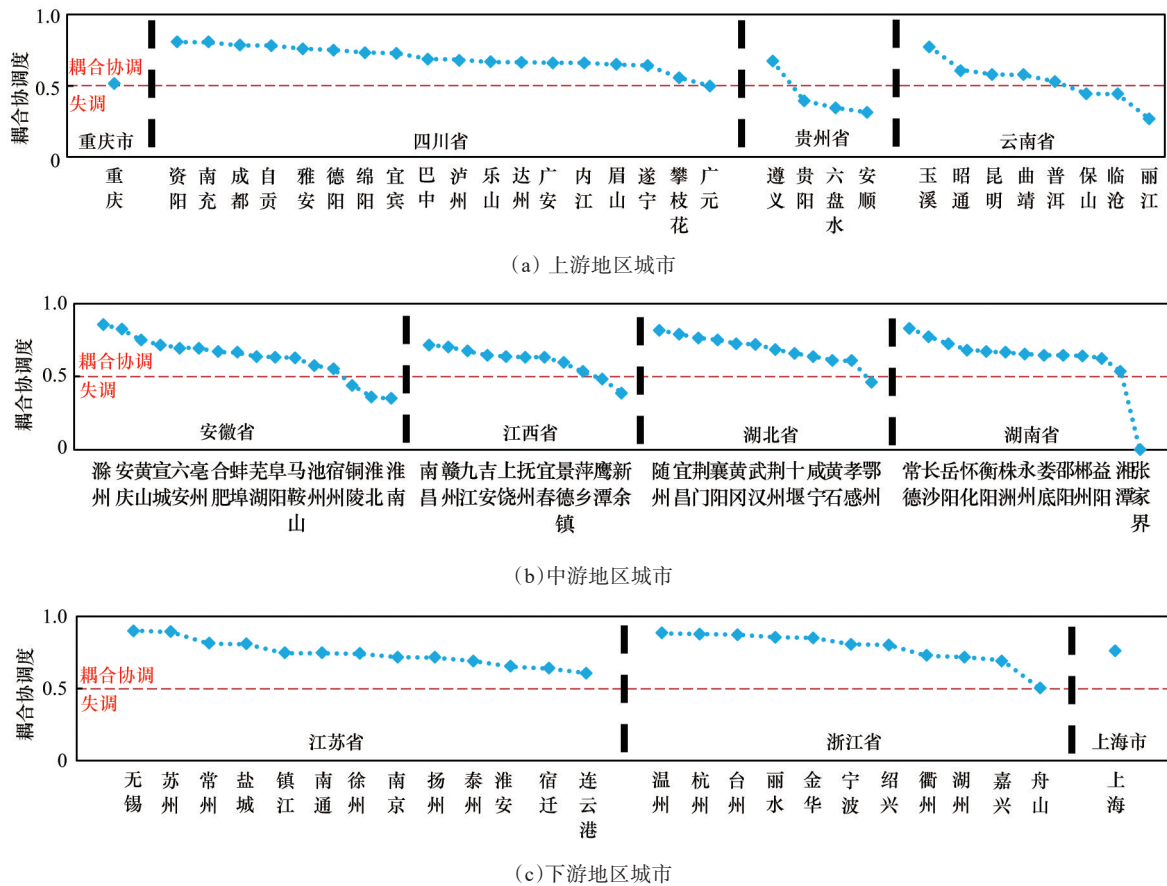


图5 2007—2017年长江经济带108城市大气污染排放效率和产业结构合理化耦合协调度

强协调水平。

共有17个城市未能实现大气污染排放效率和产业结构合理化指标的耦合协调。处于拮抗阶段的城市包括昭通等15个城市。其中昭通(0.481)、湘潭(0.474)、鹰潭(0.467)、铜陵(0.443)、保山(0.440)、贵阳(0.439)、广元(0.419)和鄂州(0.410)8个城市为濒临失调水平;新余(0.393)、临沧(0.386)、遂宁(0.365)、淮南(0.350)、六盘水(0.343)、安顺(0.332)和淮北(0.308)7个城市为轻度失调水平。处于低水平耦合阶段的城市包括丽江(0.267)和亳州(0.244)2个城市,均为中度失调水平。

根据大气污染排放效率和产业结构高级化指标的耦合协调度均值,处于高水平耦合阶段的城市包括无锡等17个城市。其中无锡(0.901)为优质协调水平,位于下游地区,该城市的大气环境和产业

结构升级之间实现协调发展;苏州(0.891)、温州(0.883)、杭州(0.876)等15个城市为良好协调水平。处于磨合阶段的包括宜昌等77个城市,占长江经济带108个城市中的绝大部分。其中,宜昌(0.792)、成都(0.784)和自贡(0.780)等26个城市为中级协调水平;六安(0.697)、亳州(0.696)和嘉兴(0.693)等40个城市为初级协调水平;景德镇(0.595)、昆明(0.579)和曲靖(0.577)等11个城市为勉强协调水平。

14个城市未能实现大气污染排放效率和产业结构高级化指标的耦合协调。处于拮抗阶段的城市包括广元等12个城市。其中广元(0.497)、鹰潭(0.486)、鄂州(0.460)、保山(0.443)、临沧(0.441)和铜陵(0.440)等6个城市为濒临失调水平,贵阳(0.394)、新余(0.391)、淮北(0.361)、淮南(0.350)、六盘水(0.345)和安顺(0.316)等6个城市为轻度失

调水平。处于低水平耦合阶段的城市包括丽江(0.270)和张家界(0.000)等2个城市,分别为中度失调水平和极度失调水平。

3.3 产业结构变迁与大气污染排放效率的Tobit模型回归

长江经济带108个城市的产业结构变迁指标与大气污染排放效率的耦合协调度仍有较大上升空间。在此基础上探究产业结构变迁对大气污染排放效率的影响效应,有利于有针对性地制定二者协调发展的策略。因此研究采取Tobit模型对长江经济带108个城市的大气污染排放效率和相关解释变量进行回归分析,结果见表5。

表5 Tobit模型回归结果

解释变量	回归结果	解释变量	回归结果
$\ln TR$	0.040*** (0.012)	$\ln RC$	-0.019 [*] (-0.011)
$\ln TS$	0.128*** (-0.026)	$\ln UR$	0.119** (-0.048)
$\ln TE$	0.051*** (-0.016)	Constant	-0.120 -0.253
$\ln FDI$	-0.023*** (-0.008)		

注:*** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$ 。

选取的产业结构合理化指标和产业结构高级化指标,均对大气污染排放效率在1%水平上具有显著正向影响,意味着产业结构的平衡、产业结构的“服务化”升级均有利于提升该地区大气污染排放效率,实现二者耦合协调发展。无论是产业结构调整使其趋于合理,还是产业结构升级使经济结构向“服务化”方向转型,产业结构变迁往往伴随落后产业的淘汰和新兴产业的发展,该过程也实现了资源投入产出效率的提升和大气污染物的削减和控制,产业结构合理化和产业结构高级化对大气污染排放效率的正向效应是合理的。针对上文中大气污染排放效率和产业结构合理化、高级化指标失调的城市,应予以特别关注,重点制定产业结构发展和环境保护的一体化发展策略,合理平衡产业结构,促进产业结构升级,以产业结构转型带动大气

环境效率提升,实现大气治理和产业发展的耦合协调。其余仍有提升空间的城市,应借鉴已达优质协调水平的先进城市经验,广泛开展技术和人才交流,利用先进政策经验,稳步协调提升大气环境效率和地区产业经济发展。

其他控制变量中,科学技术水平和城市化水平分别在1%和5%水平上正向显著。科技进步带来了效率的提升,同样产出的污染物排放会相应减少,从而提升了大气污染排放效率。环境问题是城市建设重点关注的一个环节,城市化水平的提升意味着城市建设水平的提高,从而也促使城市大气污染排放效率得到提高。这也与之前论述省会城市和直辖市的大气污染排放效率在2007—2017年间普遍提升的现实情况相符。对外开放水平和交通运输水平分别在1%水平和10%水平上对大气污染排放效率具有负向影响。这是由于各城市地方政府在引资过程中,过分追求经济增长,忽略了环境保护需求,导致大量的污染密集型外企进入国内,降低了城市大气污染排放效率。交通运输体现了一个地区的人口、资源流动,但同时也会带来更多的污染排放,阻碍城市大气污染排放效率的提升。因此,一方面需要提升资金引进的环保门槛,防止过多的污染密集型企业进入,另一方面应该推进绿色化、清洁化的交通运输模式,减少大气污染物的排放,提升城市大气污染排放效率。

4 结论

基于非期望产出的超效率SBM-DEA模型,测算了2007—2017年长江经济带108个城市大气污染排放效率,评估了该区域产业结构变迁指标和大气污染排放效率的耦合协调关系,并探究了产业结构变迁指标对大气污染排放效率的影响效应。研究的主要结论如下。

1) 2007—2017年长江经济带108个城市大气污染排放平均效率值为0.520,未达效率前沿面。平均效率值实现DEA有效的城市包括杭州、无锡、温州、上海、苏州和台州等6个城市,占总城市数量

的5.56%,94.44%的城市未达效率前沿面。从地理分布来看,平均效率值呈现下游地区最高、中游地区次之、上游地区最低的特征。下游、中游和上游城市的平均效率值分别为0.724、0.472和0.434,大气污染排放效率的提升空间较大。

2) 2007—2017年间,杭州、苏州、上海等55个城市大气污染排放效率值有不同程度的提高,大气污染减排效果明显。无锡、温州、台州等53个城市大气污染排放效率值有不同程度的下降,应重点关注污染物削减情况,防止效率值的进一步下降。省会和直辖市大气污染排放效率提升显著。

3) 大气污染排放效率和产业结构合理化、产业结构高级化耦合协调度较高的城市均集中在长江下游地区,中上游地区城市的耦合协调度较低。未能实现大气污染排放效率和产业结构合理化指标耦合协调发展的城市包括昭通、湘潭、鹰潭、铜陵、保山、贵阳、广元、鄂州、新余、临沧、遂宁、淮南、六盘水、安顺、淮北、丽江和亳州17个城市;未能大气污染排放效率和产业结构高级化指标耦合协调发展的城市包括广元、鹰潭、鄂州、保山、临沧、铜陵、贵阳、新余、淮北、淮南、六盘水、安顺、丽江和张家界14个城市。

4) 产业结构合理化和产业结构高级化对大气污染排放效率具有积极影响。政府在制定产业结构政策时,应该首先强调产业结构合理化,特别是在经济相对薄弱的上中游地区,通过合理的产业调整促进经济发展新动力的产生;同时,需要因地制宜地积极推进产业结构高级化,结合资源禀赋和区位优势,发展适合当地的第三产业,促进产业结构优化升级。针对未实现大气污染排放效率和产业结构合理化、高级化指标耦合协调的城市,应重点制定产业结构发展和环境保护的一体化发展策略。

5) 为提高大气污染排放效率,可以加大科学技术的资金支持,促进科技进步;加大城市化建设力度,提升城市环境保护考核标准;提升外资引进门槛,优先引进绿色化、清洁化的生产资金和技术;发展以公共交通为核心的绿色出行模式,促进物流运输的清洁化、高效化。

参考文献 (References)

- [1] 孙亚梅, 郑伟, 宁森, 等. 论长江经济带大气污染防治的若干问题与防治对策[J]. 中国环境管理, 2018, 10(1): 75-80.
- [2] Fan S, Liu C, Xie Z, et al. Scanning vertical distributions of typical aerosols along the Yangtze River using elastic lidar[J]. Science of The Total Environment, 2018, 628-629: 631-641.
- [3] Yang W, Yuan G, Han J. Is China's air pollution control policy effective? Evidence from Yangtze River Delta cities [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 220: 110-133.
- [4] Beelen R, Raaschou-Nielsen O, Stafoggia M, et al. Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: An analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project[J]. The Lancet, 2014, 383(9919): 785-795.
- [5] Chen Z, Wang J N, Ma G X, et al. China tackles the health effects of air pollution[J]. The Lancet, 2013, 382 (9909): 1959-1960.
- [6] Guan W J, Zheng X Y, Chung K F, et al. Impact of air pollution on the burden of chronic respiratory diseases in China: time for urgent action[J]. The Lancet, 2016, 388 (10054): 1939-1951.
- [7] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. European Journal of Operations Research, 1978, 2(6): 429-434.
- [8] Zhou Z, Xu G, Wang C, et al. Modeling undesirable output with a DEA approach based on an exponential transformation: An application to measure the energy efficiency of Chinese industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 236: 117717.
- [9] Xie B C, Duan N, Wang Y S. Environmental efficiency and abatement cost of China's industrial sectors based on a three-stage data envelopment analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 153: 626-636.
- [10] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 130(3): 498-509.
- [11] Cecchini L, Venanzi S, Pierri A, et al. Environmental efficiency analysis and estimation of CO₂ abatement costs in dairy cattle farms in Umbria (Italy): A SBM-DEA model with undesirable output[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 197: 895-907.
- [12] 蒋姝睿, 谭雪, 石磊, 等. 京津冀大气污染传输通道城

- 市的工业大气污染排放效率分析—基于三阶段 DEA 方法[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(6): 141-149.
- [13] Zhao C, Zhang H, Zeng Y, et al. Total-factor energy efficiency in BRI countries: An estimation based on three-stage DEA model[J]. Sustainability, 2018, 10(1): 278.
- [14] Tone K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 143(1): 32-41.
- [15] Fang H H, Lee H S, Hwang S N, et al. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis: An alternative approach[J]. Omega, 2013, 41(4): 731-734.
- [16] 卢新海, 杨喜, 陈泽秀. 中国城市土地绿色利用效率测度及其时空演变特征[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(8): 83-91.
- [17] Tao X, Wang P, Zhu B. Provincial green economic efficiency of China: A non-separable input-output SBM approach[J]. Applied Energy, 2016, 171: 58-66.
- [18] 王少剑, 高爽, 黄永源, 等. 基于超效率 SBM 模型的中国城市碳排放绩效时空演变格局及预测[J]. 地理学报, 2020, 75(6): 1316-1330.
- [19] Fan J L, Zhang X, Zhang J, et al. Efficiency evaluation of CO₂ utilization technologies in China: A super-efficiency DEA analysis based on expert survey[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2015, 11: 54-62.
- [20] 石晓然, 张彩霞, 殷克东. 中国沿海省市海洋生态补偿效率评价[J]. 中国环境科学, 2020, 40(7): 3204-3215.
- [21] 尚杰, 魏东方, 吉雪强. 技术进步、农业用水效率与回弹效应——基于我国粮食主产区面板数据的实证研究[J]. 生态经济, 2020, 36(11): 94-100.
- [22] 汪克亮, 杨力, 孟祥瑞. 中国大气环境绩效的空间差异、动态演进及其驱动机制——基于 2006—2014 年省际面板数据的实证分析[J]. 山西财经大学学报, 2016, 38(9): 13-24.
- [23] Wang X, Ding H, Liu L. Eco-efficiency measurement of industrial sectors in China: A hybrid super-efficiency DEA analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 229: 53-64.
- [24] Zhou Z, Guo X, Wu H, et al. Evaluating air quality in China based on daily data: Application of integer data envelopment analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 198: 304-311.
- [25] 汪艳涛, 张娅娅. 生态效率区域差异及其与产业结构升级交互空间溢出效应[J]. 地理科学, 2020, 40(8): 1276-1284.
- [26] Yang W, Li L. Efficiency evaluation of industrial waste gas control in China: A study based on data envelopment analysis (DEA) model[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 179: 1-11.
- [27] 丁镭, 卢滢宇, 叶霜霜. 浙江省大气环境效率评价及区域差异[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(3): 1075-1085.
- [28] 张翱翔, 邓荣荣. 中部六省碳排放效率与产业结构优化的耦合协调度及影响因素分析[J]. 生态经济, 2021, 37(3): 31-37.
- [29] 马丽, 康蕾, 金凤君. 京津冀工业发展与大气污染物排放时空耦合关系分析[J]. 环境影响评价, 2018, 40(5): 51-56.
- [30] 周迪, 王雪芹. 中国碳排放效率与产业结构升级的耦合度及耦合路径[J]. 自然资源学报, 2019, 34(11): 2305-2316.
- [31] 汪克亮, 刘悦, 杨宝臣. 京津冀城市群大气环境效率的地区差异、动态演进与影响机制[J]. 地域研究与开发, 2019, 38(3): 135-140.
- [32] 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.
- [33] 陈浩, 陈平, 罗艳. 京津冀地区环境效率及其影响因素分析[J]. 生态经济, 2015, 31(8): 142-146, 150.
- [34] 干春晖, 郑若谷, 余典范. 中国产业结构变迁对经济增长和波动的影响[J]. 经济研究, 2011(5): 4-16.
- [35] 齐园, 张永安. 产业结构演变与工业二氧化硫排放的关系——以京津冀为例[J]. 城市问题, 2015(6): 54-62.
- [36] Jiao J, Han X, Li F, et al. Contribution of demand shifts to industrial SO₂ emissions in a transition economy: Evidence from China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 164: 1455-1466.
- [37] Ye H, Wang Q, Wang Y, et al. Industrial SO₂ emissions treatment in China: A temporal-spatial whole process decomposition analysis[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 243: 419-434.
- [38] 魏振香, 史相国. 生态可持续与经济高质量发展耦合关系分析——基于省际面板数据实证[J]. 华东经济管理, 2021, 35(4): 11-19.
- [39] 王少剑, 崔子恬, 林靖杰, 等. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究[J]. 地理学报, 2021, 76(4): 973-991.
- [40] 孙攀, 吴玉鸣, 鲍曙明, 等. 经济增长与雾霾污染治理: 空间环境库兹涅茨曲线检验[J]. 南方经济, 2019(12): 100-117.
- [41] 孙攀, 吴玉鸣, 鲍曙明. 产业结构变迁对碳减排的影响研究——空间计量经济模型实证[J]. 经济经纬, 2018, 35(2): 93-98.

[42] 裴耀琳, 郭淑芬. 资源禀赋约束下生产性服务业集聚的产业结构调整效应研究——基于资源型城市和非

资源型城市的对比分析[J]. 软科学, 2021, 35(1): 62-67.

Urban air pollution emission efficiency and the change of industrial structures in the Yangtze River economic belt

JIANG Shurui¹, YU Lang², YANG Xuan¹, TANG Yifan¹, MA Zhong¹, HE Leiming¹, WANG Li^{1,3*}

1. School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China

3. Policy Research Center for Environment and Economy, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029, China

Abstract With the super SBM-Undesirable model, this study evaluates the air pollution emission efficiency in 108 cities of the Yangtze River economic belt from 2007 to 2017. The relationship between the industrial structure evolution and the urban air pollution emission efficiency is confirmed by using the coupling coordination degree model and the Tobit model. The findings are as follows: (1) Only 6 cities reach the efficiency frontier of the average air pollution emission efficiencies. The regions in terms of the average air pollution emission efficiency from high to low are in this order: the downstream region, the midstream region and the upstream region; (2) The coupling coordination of the air pollution emission efficiency and the industrial structure rationalization, the air pollution emission efficiency and the industrial structure upgrading in the midstream and upstream cities are significantly lower than those of the downstream cities; (3) The industrial structure rationalization and the industrial structure upgrading are conducive to the improvement of the air pollution emission efficiency in cities of the Yangtze River economic belt. For the cities that have not achieved the coupling coordination of the air pollution emission efficiency and the industrial structure, the integrated development strategy of the industrial structure development and the environmental protection should be formulated.

Keywords the Yangtze River economic belt; air pollution; emission efficiency; industrial structure ●



(责任编辑 祝叶华)