

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2021.03.020

# 基于 SBM-Tobit 模型的中部 6 省环境效率分析

叶文显

陕西国际商贸学院 管理学院, 陕西 咸阳 712046

**摘要:** 环境保护是事关社会发展与人类生存的重大问题. 选取 80 个地级以上城市 2014—2018 年的面板数据, 定量测度了中部 6 省的环境效率及其影响因素. 结果表明: ① 整体上中部 6 省的环境效率值偏低, 且存在环境 EKC (Environmental Kuznets Curve) 曲线, 6 省环境效率呈现一定的空间溢出效应和集聚效应. ② 湖南和湖北为典型的高环境效率-高差异省份, 安徽为典型的低环境效率-低差异省份. ③ 中部 6 省的全要素环境效率发生了由衰退到提升的演变, 其诱因由技术进步的单因素驱动演变为技术进步、技术效率提升兼有的双因素驱动. ④ 产业结构和人均 GDP 对环境效率有促进作用, 财政支出、研发投入强度与外商直接投资对环境效率有抑制作用.

**关键词:** 环境效率; SBM (Slack Based Model) -Tobit 模型; 中部 6 省; GML (Global Malmquist Luenberger) 指数

中图分类号: F062.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2021)03-0139-08

环境保护是事关社会发展与人类生存的重大问题, 而环境效率评价是制定环保政策、进行环境治理的重要前提. 随着环保督察常态化与地方官员“河长制”“问责制”的相继实施, 我国环境保护的监管与投入力度不断增强, 自然生态状况呈逐年改善趋势. 但是, 随着城镇化与工业化的快速推进, 大量自然资源被过度开发, 土壤水体污染、固体垃圾围城、雾霾天气频发等问题突出. 总体上我国的生态环境安全形势较为严峻, 环境保护与经济社会发展的矛盾仍旧突出, 开展相关环境效率评价工作已经成为当前亟待解决的一个重大社会问题.

为了有效应对愈发严重的环境污染问题, 许多学者开展了环境治理与环境效率评价方面的研究工作. 从研究方法来看, DEA 相关模型已经成为环境效率评价的一种常用方法, 薛静静等<sup>[1]</sup>运用径向 DEA 模型分析了相关区域的环境效率; 李占风等<sup>[2]</sup>运用非径向 DEA 模型分析了相关行业的环境效率; Xie 等<sup>[3]</sup>将环境污染物作为 DEA 模型分析的一种投入变量; 蔡婉华等<sup>[4]</sup>则将环境污染物作为一种坏产出变量进行 DEA (Data Envelopment Analysis) 分析. 从研究的区域范围来看, 主要的研究对象集中在国家<sup>[5]</sup>、西部地区<sup>[6]</sup>、省域<sup>[7]</sup>、长江经济带<sup>[8]</sup>、长三角城市群<sup>[9]</sup>、京津冀城市群<sup>[10]</sup>、地级市<sup>[11]</sup>等层面. 从研究的行业(对象)范围来看, 主要的研究对象有电力行业<sup>[12]</sup>、交通运输业<sup>[13]</sup>、种植业<sup>[14]</sup>、水资源<sup>[15]</sup>、工业资源<sup>[16]</sup>、水泥行业<sup>[17]</sup>、畜牧业<sup>[18]</sup>等. 从研究主题来看, 主要的研究内容集中在环境效率的大小测度<sup>[19]</sup>、影响因素分析<sup>[20]</sup>、差异与演变分析<sup>[2]</sup>、全要素生产率分析<sup>[14]</sup>、Kuznets 曲线的存在性<sup>[21]</sup>等. 已有研究成果已经较为丰富, 但缺少中部地区地级以上城市动态与静态相结合的环境效率评价成果. 鉴于此, 本文分别采用非期望产出的 SBM 模型和 GML 生产率指数测度中部地区的静态环境效率与动态环境效率, 采用面板 Tobit 模型分析环境效率的主要影响因素, 以期改善中部地区环境效率提供有益的政策参考.

收稿日期: 2019-11-18

基金项目: 陕西省社会科学界 2019 年度重大理论与现实问题研究项目(2019C015); 教育部人文社会科学研究项目(18YJCJW001).

作者简介: 叶文显, 硕士, 副教授, 主要从事区域经济学研究.

## 1 研究方法 with 变量选择

本文使用的研究方法包括 GML 生产率指数、SBM-Undesirable 模型和面板 Tobit 模型。

### 1.1 GML 生产率指数

假设方向向量为  $(f_x, f_y, f_d) = (-x, y, -d)$ ,  $\vec{D}_0^F(x^t, y^t, d^t; f^t)$  为方向性距离函数, 采用全局 GML 指数构建下列环境全要素生产率 TFP, 并将其分解为技术进步 TECH 和技术效率变动 EFF, 即  $TFP = TECH \times EFF$ , 计算公式为

$$TFP_t^{t+1} = [1 + \vec{D}_0^F(x^t, y^t, d^t; f^t)] \div [1 + \vec{D}_0^F(x^{t+1}, y^{t+1}, d^{t+1}; f^{t+1})] \quad (1)$$

$$TECH_t^{t+1} = [1 + \vec{D}_0^F(x^t, y^t, d^t; f^t)] \times [1 + \vec{D}_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, d^{t+1}; f^{t+1})] \div [1 + \vec{D}_0^F(x^t, y^t, d^t; f^t)] \div [1 + \vec{D}_0^F(x^{t+1}, y^{t+1}, d^{t+1}; f^{t+1})] \quad (2)$$

$$EFF_t^{t+1} = [1 + \vec{D}_0^F(x^t, y^t, d^t; f^t)] \div [1 + \vec{D}_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, d^{t+1}; f^{t+1})] \quad (3)$$

TFP 或 EFF 小于 1、等于 1 和大于 1 分别代表  $t \sim t+1$  期间全要素生产率或技术效率下降、不变和上升; TECH 小于 1、等于 1 和大于 1 分别代表  $t \sim t+1$  期间技术水平退步、不变和进步。

### 1.2 非期望产出的 SBM 模型

假设存在  $N$  个决策单元, 每个单元有  $a(a=1, \dots, A)$  种投入要素,  $b(b=1, \dots, B)$  种期望产出和  $c(c=1, \dots, C)$  种非期望产出, 其对应指标矩阵分别表示为  $X \in R^a, Y \in R^b, D \in R^c$ , 在考虑非角度、非径向与规模报酬不变的 SBM-Undesirable 模型下的生产可能集为

$$P(x) = \{(x, y, d) \mid x \geqslant XW, y \leqslant YW, d \geqslant DW, W \geqslant 0\} \quad (4)$$

对于某决策单元  $DMU_0$  的环境效率  $\delta$  为

$$\delta = \min(B + C) \left( A - \frac{\sum_{a=1}^A s_a^-}{x_{a0}} \right) / \left[ A \left( B + C + \frac{\sum_{b=1}^B s_b^y}{y_{b0}} + \frac{\sum_{c=1}^C s_c^d}{d_{c0}} \right) \right] \quad (5)$$

$$\text{s. t. } d_0 = DW + s^d, x_0 = XW + s^-, y_0 = YW + s^y, W \geqslant 0, s^d \geqslant 0, s^- \geqslant 0, s^y \geqslant 0$$

式(5)中  $s^-, s^y$  和  $s^d$  分别为投入要素、期望产出以及非期望产出的松弛量,  $W$  为权重矩阵,  $C, B, A$  分别为非期望产出、期望产出和投入要素的变量个数.  $\delta$  为环境效率值,  $0 \leqslant \delta \leqslant 1$ ,  $\delta$  小于 1 时, 决策单元无效;  $\delta$  等于 1 时, 决策单元有效。

### 1.3 Tobit 模型

考虑到环境效率的取值范围介于  $0 \sim 1$  之间, 本文采用了面板 Tobit 模型分析环境效率的影响因素, 具体模型为

$$Y_{it} = Y_{it}^* = a_i + \sum \beta_i X_{it} + \epsilon_{it} \quad (6)$$

式(6)中当  $Y_{it}^* \leqslant 0$  或  $Y_{it}^* > 1$  时,  $Y_{it} = 0$ .  $Y_{it}, Y_{it}^*$  和  $X_{it}$  分别为因变量、潜变量和解释变量,  $\epsilon_{it}, \beta_i$  和  $a_i$  分别为扰动项、参数项和截距项,  $i$  代表各地市,  $t$  代表年份. 考虑到研发投入、产业结构、经济发展水平、财政投入和外资投入是影响环境效率的主要因素, 本文选择了以下解释变量: ①研发投入强度(YFTR), 用研发投入与 GDP 的比值表示. ②产业结构(CYJG), 用第二产业的产值占比表示. ③经济发展水平(GDPP), 用人均 GDP 表示. ④财政投入(CZZC), 用政府财政支出表示. ⑤外资投入(FDI), 用外商直接投资表示. 鉴于因变量是一种相对值, 同时为了克服可能的异方差, 本文对部分变量进行了对数化处理, 处理后的 Tobit 模型为

$$Y_{it} = a_i + \beta_1 YFTR_{it} + \beta_2 CYJG_{it} + \beta_3 \text{Ln}(GDPP_{it}) + \beta_4 \text{Ln}(CZZC_{it}) + \beta_5 \text{Ln}(FDI_{it}) + \epsilon_{it} \quad (7)$$

### 1.4 变量与数据

选取我国中部地区 6 个省份的 80 个地级以上城市作为研究对象, 包括河南 17 市、湖北 12 市、江西 11 市、安徽 16 市、山西 11 市以及湖南 13 市. 80 个城市中仅有武汉为副省级城市, 其余城市均为一般地级市

或省会城市，为叙述方便本文统一表述为“地级以上城市”。选取全社会用电量(*ELEC*)、固定资产投资(*INVE*)和从业人数(*EMPL*)作为投入变量，它们分别描述能源、资本和劳动力的投入量；选取工业烟尘排放量(*DUST*)、废水排放量(*WATER*)和经济增长(*GDP*)作为产出变量，它们分别代表非期望产出与期望产出。上述变量数据来源于2015—2019年的《中国城市统计年鉴》和各地市统计年鉴(说明：2019年出版的年鉴，数据截止年份是2018，文中数据是2014—2018年，所以年鉴应该是2015—2019年)。

## 2 实证分析

### 2.1 环境污染的总体分析

《中国统计年鉴2019》显示，中部地区废水排放总量为154亿吨，约占全国废水排放量的22%，河南、湖南、湖北、安徽、江西、山西6省的废水排放比例依次为3.03：2.23：2.02：1.73：1.40：1.00，单位*GDP*所产生的废水排放比例依次为1.20：1.16：1.00：1.13：1.24：1.14。6省工业烟尘排放总量161万吨，约占全国烟尘排放量的20%，山西、安徽、江西、河南、湖南和湖北的烟尘排放比例依次为2.31：1.49：1.48：1.19：1.10：1.00，单位*GDP*所产生的烟尘排放比例依次为5.55：2.06：2.78：1.00：1.21：1.05。从各地级以上城市的环境污染情况来看，废水排放量较大的5个城市有武汉、新乡、马鞍山、郑州、九江，较小的5个城市有张家界、随州、阳泉、池州和忻州；单位*GDP*所产生的废水排放较大的5个城市有马鞍山、淮南、景德镇、新乡和鹤壁，较小的5个城市有张家界、随州、长沙、永州和信阳。工业烟尘排放量较大的5个城市有马鞍山、临汾、宜春、吕梁和武汉，较小的5个城市有随州、漯河、开封、濮阳和周口；单位*GDP*所产生的烟尘排放较大的5个城市有临汾、忻州、马鞍山、阳泉和吕梁，较小的5个城市有周口、开封、随州、濮阳和长沙。综合以上分析可知，河南为典型的高废水污染省份，山西为典型的高烟尘污染省份；新乡和马鞍山为典型的高废水污染城市，张家界和随州为典型的低废水污染城市；马鞍山、临汾和吕梁为典型的高烟尘污染城市，随州、开封、濮阳和周口为典型的低烟尘污染城市。

### 2.2 环境效率分析

构建SBM-Undesirable模型计算80个地级以上城市的环境效率，得到各省份环境效率的平均值(表1)。整体上中部6省的环境效率值偏低，平均效率值仅为0.424，无环境效率有效省份，2014—2017年期间6省环境效率均值呈明显下降趋势，2018年效率值有所回升。2014—2018年期间绝大部分省份的环境效率值低于0.6，具有较大的污染减排潜力。湖南的环境效率值较高，其环境效率均值为0.587，山西的环境效率值较低，其环境效率均值仅为0.305。湖南和湖北的环境效率均值高于其他4省，山西和安徽的环境效率均值则明显低于其他4省，整体上6省环境效率呈现出典型的“马太效应”。依据曾贤刚等<sup>[11]</sup>的研究结论可知，2018年湖南的环境效率高于全国平均水平，湖北的环境效率与全国平均水平持平，其余省份的环境效率低于全国平均水平。2014—2018年期间随着人均*GDP*不断增长，各省份环境效率值均出现先降后升的“U”型演变趋势，其中山西、安徽和江西的环境效率在2018年出现上升趋势，河南、湖北和湖南在2017年出现上升趋势，说明中部6省可能存在一定的环境EKC曲线，环境保护与经济增长之间的矛盾均呈先突出后缓解的演变过程。总的来说，中部6省中湖南为高水平环境效率，湖北与江西为中等偏高水平环境效率，河南与安徽为中等偏低水平环境效率，山西为低水平环境效率。6省环境效率在空间上呈中部靠南3省明显高于中部靠北3省的局面，说明中部6省的环境效率存在一定的空间溢出效应与集聚效应。湖南与湖北属于典型的效率溢出省份，山西与安徽属于典型的效率渗入省份，河南和江西的环境效率出现较大波动，属于典型的效率溢出兼渗入省份。

比较各省域环境效率的变异系数后发现，山西、安徽与河南(除2018年)所辖地级以上城市的环境效率差异较小，湖南和湖北所辖地级以上城市的环境效率差异较大，它们是导致中部地区环境效率差异的主要因素。安徽和湖南所辖地级以上城市的环境效率差异呈明显的下降趋势，说明这2个省份的环境效率存在一定的 $\sigma$ 收敛，其他省份以及中部6省整体的环境效率差异均呈现出升降交替的演变趋势，说明它们并不存在 $\sigma$ 收敛。结合各个省份的环境效率值及其变异系数均值，本文得出，湖南和湖北为典型的高环境效率-高差异省份，安徽为典型的低环境效率-低差异省份，山西为低环境效率-中差异省份，江西为中环境效率-中差异省份，河南为中环境效率-低差异省份。

表 1 中部 6 省地级以上城市环境效率的平均值及变异系数

年份	所辖市效率值平均值							所辖市效率值变异系数						
	山西	安徽	江西	河南	湖北	湖南	6 省	山西	安徽	江西	河南	湖北	湖南	6 省
2014	0.326	0.409	0.462	0.398	0.456	0.630	0.445	0.190	0.166	0.404	0.150	0.451	0.421	0.398
2015	0.310	0.398	0.449	0.384	0.432	0.580	0.424	0.183	0.152	0.413	0.152	0.440	0.432	0.388
2016	0.289	0.393	0.437	0.375	0.428	0.577	0.416	0.180	0.148	0.434	0.131	0.448	0.428	0.399
2017	0.286	0.373	0.367	0.377	0.434	0.581	0.404	0.247	0.133	0.097	0.163	0.449	0.426	0.386
2018	0.311	0.390	0.383	0.444	0.488	0.566	0.433	0.262	0.132	0.130	0.398	0.511	0.368	0.396
均值	0.305	0.393	0.420	0.396	0.447	0.587	0.424	0.213	0.146	0.296	0.199	0.460	0.415	0.393

为了进一步说明污染物对环境效率的影响,本文测度了不考虑污染物排放时 CCR(3 个运筹学家名字缩写: Charnes A, Cooper W W, Rhodes E)模型的产出效率值,如表 2 所示. 2014—2018 年期间中部 6 省的产出效率值均大于 0.5,所有省份的产出效率值大致分为 3 档,第 1 档省份仅有湖南 1 省,平均产出效率为 0.829,远高于其他省份;第 2 档省份包括安徽、江西、湖北和河南 4 省,平均产出效率在 0.7 左右;第 3 档省份仅有山西 1 省,平均产出效率只有 0.618. 加入非期望产出的污染物后,中部 6 省的产出效率均呈明显的下降趋势,山西降幅高达 50.6%,安徽降幅为 47.0%,这充分说明了环境污染显著降低了中部地区的产出效率值,特别是山西和安徽,用较大的环境代价换取了经济增长. 比较各省份 DEA 效率值的减少量可知,2015 年以后湖南、湖北、河南和安徽 4 省的效率减少量呈下降趋势,而山西与江西的效率减少量呈先降后升的波动趋势,说明湖南、湖北、河南和安徽 4 省在发展经济的同时,较好地控制了环境污染,抑制了传统的产出效率值与考虑污染物的环境效率值之间的差值;而山西与江西 2 省没能较好地控制环境污染,导致 DEA 效率减少量的波动变化.

表 2 DEA 效率值及其减少量

年份	不考虑污染物的 DEA 效率值							考虑污染物后的 DEA 效率值减少量						
	山西	安徽	江西	河南	湖北	湖南	山西	安徽	江西	河南	湖北	湖南		
2014	0.668	0.766	0.743	0.743	0.724	0.873	0.341	0.357	0.282	0.345	0.268	0.242		
2015	0.656	0.765	0.738	0.737	0.709	0.838	0.346	0.367	0.288	0.353	0.277	0.258		
2016	0.557	0.749	0.700	0.681	0.681	0.821	0.268	0.355	0.263	0.306	0.254	0.244		
2017	0.587	0.703	0.676	0.657	0.676	0.815	0.301	0.330	0.309	0.279	0.243	0.234		
2018	0.619	0.719	0.690	0.652	0.693	0.801	0.308	0.329	0.308	0.207	0.206	0.234		
均值	0.618	0.740	0.709	0.694	0.697	0.829	0.313	0.348	0.290	0.298	0.249	0.242		

不同环境效率区间内的地级以上城市数量如表 3 所示.

表 3 不同环境效率区间内的地级以上城市数量

年份	山西				安徽				江西				河南				湖北				湖南			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
2014	2	9			15	1			9	1	1		15	2			10	1	1		7	2	4	
2015	1	10			16				10		1		16	1			10	1	1		8	2	3	
2016	1	10			16				10		1		17				11		1		8	2	3	
2017	4	7			16				11				16	1			10	1	1		9	1	3	
2018	1	10			15	1			11				15		2		8	2	2		8	3	2	

注: I, II, III, IV 分别代表效率区间(0, 0.25], (0.25, 0.5], (0.5, 0.75], (0.75, 1].

2014—2018 年期间,山西所有城市的环境效率值均低于 0.5,2017 年有 4 个城市的环境效率值低于 0.25,环境效率平均值较高的城市为朔州和太原,较低的城市为大同和忻州;安徽只有阜阳(2014 年)和合肥(2018 年)2 市的环境效率值超过 0.5,其他城市的环境效率值均低于 0.5,环境效率平均值较高的城市为合肥和黄山,较低的城市为淮南和六安;2014—2016 年江西新余的环境效率

值始终为 1, 2014 年南昌的环境效率值超过 0.5, 其余年份各地市的环境效率值均低于 0.5, 环境效率平均值较高的城市为新余和鹰潭, 较低的城市为宜春和九江; 河南环境效率较高的城市为周口和开封, 较低的城市为新乡和商丘, 该省每年约有 93% 的城市环境效率值低于 0.5; 湖北环境效率较高的城市为武汉和随州, 较低的城市为孝感和鄂州; 整体上湖南的环境效率值较高, 其中长沙和张家界的环境效率值均为 1, 常德的环境效率值为 0.943, 环境效率较低的城市为娄底和湘潭, 该省每年约有 61.5% 的城市环境效率值低于 0.5. 总的来说, 80 个地级以上城市中环境效率平均值排名最靠前的 5 座城市为长沙、张家界、武汉、常德和新余, 排名最靠后的 5 座城市为忻州、大同、运城、晋城和孝感, 城市环境效率的高低与地区 GDP 之间存在一定的正相关关系.

### 2.3 全局 GML 指数分析

为了进一步分析中部 6 省环境效率的演变趋势及其驱动因素, 本文选取全局 GML 指数测度环境全要素生产率  $TFP$  及其分解结果技术进步  $TC$ 、技术效率变动  $EC$ (表 4). 从表 4 可知, 2014—2018 年期间, 中部 6 省的环境全要素生产率  $TFP$  出现了明显的增长趋势, 整体上其均值由 2014—2015 年的 0.939 增长到 2017—2018 年的 1.079, 年均增长 4.74%, 且 2014—2016 年的  $TFP$  小于 1, 2016—2018 年的  $TFP$  大于 1, 表明中部 6 省的全要素环境效率在 2014—2018 年期间发生了由衰退到提升的演变. 环境效率指数在 2014—2016 年期间有所下降, 而在 2016—2018 年期间得到了明显提升, 其提升诱因则由 2015—2016 年的技术进步单因素驱动演变到 2017—2018 年的技术进步与技术效率提升兼有的双因素驱动. 整体上经济增长与环境污染的矛盾关系呈逐年改善趋势, 尤其是 2016 年以来, 大部分城市改变了高污染、高能耗的粗放型增长模式. 从其分解结果来看, 技术效率变动  $EC$  的平均值由 2014—2015 年的 0.973(小于 1)调整到 2017—2018 年的 1.036(大于 1), 技术进步  $TC$  的平均值由 2014—2015 年的 0.965(小于 1)调整到 2017—2018 年的 1.041(大于 1). 中部 6 省环境技术效率与技术进步在 2014—2018 年期间均有所提高, 其中环境技术效率值发生了由降低到提升的演变, 而技术水平发生了由衰退到进步的演变. 整体上,  $EC$  的均值为 0.985(小于 1),  $TC$  的均值为 1.016(大于 1), 表明中部 6 省环境生产率上升的主要诱因是技术进步.

表 4 中部 6 省环境生产率指数及其分解结果

省份	2014—2015			2015—2016			2016—2017			2017—2018			均 值		
	$TFP$	$EC$	$TC$	$TFP$	$EC$	$TC$	$TFP$	$EC$	$TC$	$TFP$	$EC$	$TC$	$TFP$	$EC$	$TC$
山西	0.906	0.955	0.949	0.875	0.872	1.005	1.062	1.011	1.054	1.096	1.068	1.027	0.985	0.976	1.009
安徽	0.981	1.002	0.979	0.986	0.973	1.013	1.023	0.949	1.080	1.088	1.024	1.062	1.020	0.987	1.034
江西	0.963	0.972	0.993	0.950	0.946	1.004	1.006	0.968	1.041	1.065	1.023	1.041	0.996	0.977	1.020
河南	0.936	0.976	0.959	0.935	0.916	1.022	1.043	1.017	1.027	1.097	1.056	1.040	1.003	0.991	1.012
湖北	0.927	0.974	0.953	0.963	0.957	1.007	1.050	0.999	1.051	1.098	1.050	1.045	1.009	0.995	1.014
湖南	0.920	0.961	0.957	0.984	0.975	1.010	1.038	0.996	1.043	1.027	0.998	1.029	0.992	0.983	1.010
整体	0.939	0.973	0.965	0.949	0.940	1.010	1.037	0.990	1.049	1.079	1.036	1.041	1.001	0.985	1.016

以中部 6 省环境生产率与环境效率的平均值为临界值, 大于平均值的省份为高生产率(效率)省份, 小于平均值的省份为低生产率(效率)省份, 可以得到如表 5 所示的环境“生产率-效率”状况表. 2018 年河南和湖北为高生产率-高效率省份, 它们处于环境效率高且提升迅速的良好阶段; 江西为低生产率-低效率省份, 其处于环境效率低且提升困难的不良阶段; 安徽和山西为高生产率-低效率省份, 它们处于环境效率低但提升迅速的追赶阶段; 湖南为低生产率-高效率省份, 其处于环境效率高但增长缓慢的特殊阶段. 在 2014—2018 年期间, 湖北和湖南均为环境高效率, 湖北的环境生产率经历了“低-高-高-高”的演变, 而湖南的环境生产率则经历了“低-高-高-低”的演变, 总体上 2 省变动趋势较为接近; 江西的环境“生产率-效率”状况由“高生产率-高效率”转变为“低生产率-低效率”, 而河南则由“低生产率-低效率”状况转变为“高生产率-高效率”, 总体上河南的环境“生产率-效率”状况呈明显改善趋势, 而江西则出现明显恶化趋势; 山西和安徽均为环境低效率, 山西的环境生产率经历了“低-低-高-高”的演变, 而安徽的

环境生产率则经历了“高-高-低-高”的演变。

表 5 中部 6 省环境“生产率-效率”状况表

省份	2015	2016	2017	2018
山西	低生产率低效率	低生产率低效率	高生产率低效率	高生产率低效率
安徽	高生产率低效率	高生产率低效率	低生产率低效率	高生产率低效率
江西	高生产率高效率	低生产率高效率	低生产率低效率	低生产率低效率
河南	低生产率低效率	低生产率低效率	高生产率低效率	高生产率高效率
湖北	低生产率高效率	高生产率高效率	高生产率高效率	高生产率高效率
湖南	低生产率高效率	高生产率高效率	高生产率高效率	低生产率高效率

## 2.4 环境效率的影响因素分析

为了探究导致中部地区环境效率变动的内部影响机制,本文采用面板 Tobit 模型进行分析.参考已有研究成果,并结合数据的可获取性,本文选取 80 个地级以上城市的环境效率值作为因变量,选择研发投入强度( $YFTR$ )、产业结构( $CYJG$ )、经济发展水平( $GDPP$ )、财政支出( $CZZC$ )和外商直接投资( $FDI$ )作为自变量,依据式(7)构建面板 Tobit 模型.运用 STATA 15.0 软件估计采用最大似然法的随机效应 Tobit 模型,结果如表 6 所示.在不考虑人均收入  $GDPP$  平方项的情况下,财政支出( $CZZC$ )和外商直接投资( $FDI$ )的回归系数不显著,其他变量均在 10%的水平上显著;加入  $GDPP$  平方项后,各变量的显著性与回归系数符号基本没变,  $\ln GDPP$  和  $\ln^2 GDPP$  均通过 10%的显著性水平;加入财政支出( $CZZC$ )和外商直接投资( $FDI$ )的交互项后,所有解释变量(包括交互项和常数项)以及 Wald  $\chi^2$ 均已显著,且回归系数符号与前 2 个模型一致,可以认为加入交互项后的估计结果是稳健的、较优的.

表 6 Tobit 模型估计结果

解释变量	$YFTR$	$CYJG$	$\ln GDPP$	$\ln^2 GDPP$	$\ln CZZC$	$\ln FDI$	$c. \ln CZZC \# c. \ln FDI$	cons	Wald $\chi^2$	rho
无 $GDPP$ 平方项模型	-0.083 1* [0.037 0]	0.177 0* [0.079 6]	0.095 3** [0.034 7]		-0.005 6 [0.027 5]	-0.009 3 [0.010 2]		0.004 3 [0.372 4]	14.86**	0.841 6
有 $GDPP$ 平方项模型	-0.074 7* [0.037 0]	0.169* [0.079 1]	0.709* [0.304 8]	-0.085 3* [0.042 0]	-0.002 08 [0.027 7]	-0.009 78 [0.010 1]		-1.147 [0.679 9]	19.06***	0.850 3
有交互项模型	-0.092 7* [0.037 0]	0.172* [0.079 0]	0.706* [0.303 7]	-0.083 9* [0.042 0]	-0.475** [0.155 9]	-0.644** [0.212 5]	0.044 0** [0.014 3]	5.868* [2.383 2]	29.94***	0.819 9

注:中括号内为标准误,\*\*\*,\*\*,\*,\*代表 1%,5%和 10%水平差异具有统计学意义. cons, Wald  $\chi^2$ , rho 分别为常数项, Wald 检验和扰动项自相关系数.

从各个变量的回归系数符号来看,产业结构( $CYJG$ )的回归系数为正,说明提高第二产业占比对环境效率有促进作用,这主要是因为当前许多中部地区所辖城市仍处于工业化进程中,第二产业在  $GDP$  增长方面的促进作用显著强于由此给环境污染带来的消极影响,进而提高地区的环境效率.人均  $GDP$  ( $GDPP$ )的回归系数为正,表明随着经济的高速增长,人民收入水平逐渐提高,环境质量也会趋于变好,人均  $GDP$  的平方项为负则说明中部 6 省经济增长存在倒“U”型的环境  $EKC$  曲线.研发投入强度( $YFTR$ )、财政支出( $CZZC$ )与外商直接投资( $FDI$ )的回归系数为负,说明这些因素对环境效率的影响是消极的.研发投入强度与政府财政支出的消极影响一方面可能是因为中部地区研发的投入产出比例不协调,科技创新带动经济高速发展的引擎牵动作用还未充分发挥;另一方面政府的研发补贴加剧了企业的寻租行为,导致企业环境投资的减少与资源错配,而政府的财政污染支出则可能陷于了“边污染、边整治”的末端治理“怪圈”;外商直接投资的消极影响可能是因为  $FDI$  流向了高污染、高能耗行业,产生了“污染天堂”效应,由此降低了中部 6 省的环境效率值.值得一提的是,财政支出( $CZZC$ )与外商直接投资( $FDI$ )的交互项系数显著为正,这说明中部地区政府财政支出与外商直接投资之间存在明显的交互效应,而非传统观念上的挤出效应.外商投资者更加青睐于那些政府投入较多、发展潜力巨大的行业(企业),同样政府补贴也会更倾向于那些有外商参与、技术先进的行业(企业),两者间的交互作用提升了中部地区的环境效率.

### 3 结论与建议

本文选取了80个地级以上城市2014—2018年的面板数据,定量测度了中部6省的动态与静态环境效率,并实证分析了导致环境效率变动的主要影响因素,提出如下结论与建议:

主要结论:①河南为典型的高废水污染省份,山西为典型的高烟尘污染省份;新乡和马鞍山为典型的高废水污染城市,马鞍山、临汾和吕梁为典型的高烟尘污染城市。②整体上中部6省的环境效率值偏低,平均效率值仅为0.424,污染减排潜力巨大。6省环境效率呈现一定的空间溢出效应和集聚效应。安徽和湖南所辖地级以上城市的环境效率值存在一定的 $\sigma$ 收敛,山西和安徽用较大的环境代价换取了经济增长。从各省环境效率的差异来看,湖南和湖北为典型的高环境效率-高差异省份,安徽为典型的低环境效率-低差异省份,山西为低环境效率-中差异省份,江西为中环境效率-中差异省份,河南为中环境效率-低差异省份。③在2014—2018年期间,中部6省的全要素环境效率发生了由衰退到提升的演变,其诱因由技术进步的单因素驱动演变为技术进步、技术效率提升兼有的双因素驱动。2018年河南和湖北为环境高生产率-高效率省份,江西为环境低生产率-低效率省份,安徽和山西为环境高生产率-低效率省份,湖南为环境低生产率-高效率省份。④产业结构和人均GDP对环境效率有促进作用,且存在环境EKC曲线;财政支出、研发投入强度与外商直接投资对环境效率有抑制作用,且财政支出与外商直接投资之间存在明显的交互效应。

政策建议:①积极引导中部省市走上低碳、环保的绿色发展道路,促使各省市更加重视节能减排与环境保护。对于新乡和马鞍山要重点做好废水污染的减排工作,对于临汾、吕梁和马鞍山要重点做好烟尘污染的减排工作。②鉴于能源政策在提升环境效率方面发挥着重要作用,中部地区应在调整能源消费结构的同时,提高人力资源与社会用电的利用效率,加强对烟尘和废水排放的行为监督,针对各省市环境效率的地区差异性,因地制宜地实施环保政策。对于山西和安徽2省应在加强污染治理的同时,加大环境整治与减排技术的资金投入,努力提高2省的环境效率;对于环境效率较高的湖南和湖北2省,政府应该给予更多的环境政策优惠,鼓励其高新技术产业向落后省市转移,从而缩小不同省市的环境效率差异;对于环境“生产率-效率”状况较差的江西而言,要在提高环境全要素生产率的同时,努力提高地区环境效率。③加快推进中部地区集约式发展及质量效益型转变,大力推动企业节能减排的技术变革。充分发挥湖南、湖北2省的技术溢出效应与辐射带动效应,加强中部地区省域间、城市间的减排技术与管理经验交流,进一步发挥技术效率与技术进步在提升环境效率过程中的双因素驱动作用,促进中部6省环境效率高速、协调发展。④加快推动中部地区工业化进程,促进工业绿色转型发展,巩固提高欠发达地市第二产业的核心地位,充分发挥产业结构和人均GDP对环境效率的促进作用。提高外资准入环境门槛,积极引导外商投资从高排放、高耗能行业转向高技术制造业与高端服务业;提高企业创新能力,加快科技创新成果转化;逐步改变政府财政支出“边污染、边治理”的末端治理模式,有效克服外商直接投资、研发投入强度和财政支出对环境效率的抑制作用。

#### 参考文献:

- [1] 薛静静,周扬,史军,等.基于DEA-BCC模型的湖南省煤炭利用生态效率评价[J].中国矿业,2018,27(11):65-70.
- [2] 李占风,张健.资源环境约束下中国工业环境技术效率的地区差异及动态演变[J].统计研究,2018,35(12):45-55.
- [3] XIE H M, SHEN M H, WEI C. Technical Efficiency, Shadow Price and Substitutability of Chinese Industrial SO<sub>2</sub> Emissions: a Parametric Approach [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 1386-1394.
- [4] 蔡婉华,叶阿忠.工业大气环境效率、要素流动与经济产出互动关系研究[J].软科学,2019,33(11):47-52.
- [5] HALKOS G E, TZEREMES N G. Exploring the Existence of Kuznets Curve in Countries' Environmental Efficiency Using DEA Window Analysis [J]. Ecological Economics, 2009, 68(7): 2168-2176.
- [6] 尹传斌,朱方明,邓玲.西部大开发十五年环境效率评价及其影响因素分析[J].中国人口·资源与环境,2017,27(3):82-89.
- [7] WANG K, YU S W, ZHANG W. China's Regional Energy and Environmental Efficiency: a DEA Window Analysis

Based Dynamic Evaluation [J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2013, 58(5/6): 1117-1127.

- [8] 汪克亮, 史利娟, 刘 蕾, 等. 长江经济带大气环境效率的时空异质性与驱动因素研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(3): 453-462.
- [9] 甘 甜, 王子龙. 长三角城市环境治理效率测度 [J]. *城市问题*, 2018(1): 81-88.
- [10] 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.
- [11] 曾贤刚, 牛木川. 高质量发展条件下中国城市环境效率评价 [J]. *中国环境科学*, 2019, 39(6): 2667-2677.
- [12] 姜雯昱. 电力行业区域环境效率时空差异及其影响因素研究 [J]. *统计与决策*, 2018, 34(21): 135-138.
- [13] CHANG Y T, ZHANG N, DANA O D, et al. Environmental Efficiency Analysis of Transportation System in China: a Non-Radial DEA Approach [J]. *Energy Policy*, 2013, 58: 277-283.
- [14] 王耀蕊, 陈 红, 韩哲英. 基于 SBM-Undesirable 模型的中国玉米生产环境效率研究——以黑龙江省为例 [J]. *生态经济*, 2020, 36(5): 93-98, 109.
- [15] 刘 渝, 宋 阳. 基于超效率 SBM 的中国农业水资源环境效率评价及影响因素分析 [J]. *中国农村水利水电*, 2019(1): 102-107.
- [16] 蔺雪芹, 郭一鸣, 王 岱. 中国工业资源环境效率空间演化特征及影响因素 [J]. *地理科学*, 2019, 39(3): 377-386.
- [17] KUMAR M S, MADHESWARAN S. Environmental Efficiency of the Indian Cement Industry: an Interstate Analysis [J]. *Energy Policy*, 2010, 38(2): 1108-1118.
- [18] 杜红梅, 王明春. 中国生猪优势产区规模养殖的环境效率评价——基于非径向、非角度 SE-SBM 模型 [J]. *经济地理*, 2020, 40(9): 176-183.
- [19] AGRELL P J, BOGETOFT P. Economic and Environmental Efficiency of District Heating Plants [J]. *Energy Policy*, 2005, 33(10): 1351-1362.
- [20] 陈 芳, 史慧敏. 市场分割对长江经济带能源环境效率影响研究 [J]. *中国环境管理*, 2020, 12(4): 104-111, 88.
- [21] ZAIM O, TASKIN F. A Kuznets Curve in Environmental Efficiency: an Application on OECD Countries [J]. *Environmental and Resource Economics*, 2000, 17(1): 21-36.

## Environmental Efficiency Analysis of Six Provinces in Central China Based on SBM-Tobit Model

YE Wen-xian

*School of Management, International and Trade Institute of Shaanxi, Xiayang Shaanxi 712046, China*

**Abstract:** Environmental protection is a major issue concerning social development and human survival. The panel data of 80 prefecture-level cities and above of six provinces of central China from 2014 to 2018 are used in this study to quantitatively measure the environmental efficiency and its influencing factors. The results show that on the whole, the environmental efficiency of the six provinces is low, there is an environmental EKC curve, and their environmental efficiency exhibits, in a certain extent, a spatial spillover effect and agglomeration effect; that of the six provinces, Hunan and Hubei are typical provinces with high environmental efficiency and high difference, while Anhui is a typical province with low environmental efficiency and low difference; that their total factor environmental efficiency has evolved from recession to improvement and the incentives have evolved from single-factor (technological advancement) drive to two-factor (technological advancement and technological efficiency) drive; and that industrial structure and per capita GDP have a positive effect on environmental efficiency, and fiscal expenditure, R&D investment intensity and foreign direct investment have an inhibitory effect on environmental efficiency.

**Key words:** environmental efficiency; SBM-Tobit model; six central provinces; GML index