

中国电力行业环境效率及其影响因素研究

——基于2008—2017年省级面板数据

潘建均^{1,2}, 侯光明¹, 王俊鹏¹

(1.北京理工大学 管理与经济学院, 北京 100081; 2.中核战略规划研究总院有限公司, 北京 100048)

摘要:本文采用SBM超效率模型,对2008—2017年中国30个省份电力行业环境效率进行测度,并开展空间差异和空间自相关分析。结果表明:中国电力行业环境效率还比较低;呈现出东部高于西部、西部高于中部的走势;各年度不同省份的电力行业环境效率差异显著;且存在空间依赖性。通过Tobit回归实证显示:中国电力行业环境效率的影响因素存在区域显著性差异;经济规模水平、电源结构、技术水平、燃煤效率对中国电力行业环境效率具有促进作用;人口水平对中国电力行业环境效率具有反向作用。最后提出了提升中国电力行业环境效率的政策建议。

关键词:电力行业;环境效率;SBM超效率模型;空间演化;影响因素

中图分类号:F206 **文献标志码:**A **文章编号:**1002—980X(2021)06—0020—11

一、引言

电力行业关系国计民生,是能源行业的核心,更是人类科技与文明进步的重要动力。但长期以来,电力是全球及中国CO₂排放最大的行业。自2011年起,中国超过美国成为全球第一大电力消费国。以煤炭为主的电源结构对中国电力行业碳减排带来了巨大压力。2020年3月,独立气候智库Ember发布题为《全球电力回顾》报告指出,中国燃煤发电量逆势增长,其发电量已占全球燃煤发电总量的一半。中国作为负责任大国,郑重承诺2030年前碳达峰,2060年前碳中和。电力行业的CO₂排放量位居所有行业之首,是实现碳达峰、碳中和目标的关键行业。

为保证未来中国电力需求,并实现碳达峰和碳中和的目标,提升中国电力行业环境效率势在必行。提升电力行业环境效率是促进低碳发展的关键,科学合理评价电力行业环境效率是解决电力行业环境问题的基础。同时,识别电力行业环境效率的关键影响因素,进而采取有效措施、制定科学合理对策,对提升电力行业环境效率,推动电力行业碳减排具有重要意义。

二、文献综述

数据包络法分析法(date envelopment analysis, DEA)是电力行业环境效率测度的常用方法。1978年,Charnes et al(1978)创建了最基本的DEA模型——CCR模型。1984年,Banker et al(1984)提出了BCC模型(估计规模效率的DEA模型,简称BCC模型)。在此基础上,国内外学者对CCR和BBC模型进行了拓展和改进,分别采用DEA模型对电力行业环境效率进行测度(姜雯昱,2018;王艳红和叶文明,2015;Bi et al,2014;Munisamy 和 Arabi,2015;Goto 和 Takahashi,2017;Lu et al,2019;Zeng et al,2020)。

电力行业环境效率的影响因素是学术界的研究热点,国内外学者从不同角度作了深入的研究。Zhou et al(2013)研究得出企业的创新能力、燃煤发电厂的发电比例和发电能力对环境效率有显著的正向影响,排污费和工业污染治理投资与环境效率呈负相关。Xie et al(2014)研究得出燃料结构变化和技术进步是推动动态环境效率提高的主要动力,此外,经济形势和能源价格的变化也会对动态环境效率产生显著影响。

收稿日期:2021—04—20

基金项目:国家软科学研究计划重大项目“当代决策理论和方法及其在重大决策中的应用研究”(2008GXS1B021);“当代决策理论和方法深化研究”(2013GXS3B055)

作者简介:潘建均,北京理工大学博士研究生,中核战略规划研究总院有限公司高级工程师,研究方向:战略管理与科技政策、标准化;侯光明,博士,北京理工大学管理与经济学院教授,博士研究生导师,研究方向:决策理论与方法等;(通讯作者)王俊鹏,博士,北京理工大学管理与经济学院讲师,硕士研究生导师,研究方向:技术创新与组织管理、技术经济及评价。

Zhao et al(2015)研究得出市场化法规和政府补贴对效率的提高和二氧化碳的减少有积极的影响。Halkos和Polemis(2018)研究得出在全球总污染物的前提下,环境效率与区域经济增长呈稳定的N型关系;而在局部污染物的前提下,环境效率与区域经济增长呈倒N型关系。Xie et al(2018)研究得出人均GDP和产能利用率对提高环境效率具有积极的促进作用。Sun et al(2019)研究得出市场分割阻碍了技术创新,是影响电力行业环境效率的重要因素;在制度效果较弱的省份,市场分割对电力产业环境效率的抑制作用更为显著。Qin et al(2020)研究得出市场分割对环境效率的负面影响显著且强烈。Xie et al(2020)研究得出装机容量增长率、碳排放交易试点实施情况、经济增长率、企业所有权等因素都会影响我国发电企业在研究期间的动态环境效率。

综上所述,对电力行业环境效率的影响因素研究以实证分析为主,涉及经济发展、产业结构因素、技术进步因素、对外开发因素、政府行为等多个因素。不同文献对于电力行业环境影响因素的实证结果存在着较大差异,其主要原因是不同学者选择的研究区域、样本时期、评价指标等的差异,都将影响研究结论的不同(Ang和Zhang,2000)。同时,现有成果对影响因素的分析,未能充分考虑电力行业环境效率的空间特征,仅仅关注了空间差异,忽视空间相关性。因此,为进一步剖析环境效率的影响因素,还应充分利用面板数据,从空间差异和空间相关性两个维度再进行更加全面的研究。

三、中国电力行业环境效率测度

(一)测度模型

Tone(2020)提出了考虑非期望产出的SBM超效率模型(slacks-based measure of super-efficiency),具体如下。

$$\min \theta = \frac{1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{S_i^-}{x_{i0}}}{1 - \frac{1}{s} \sum_{r=1}^s \frac{S_r^+}{y_{r0}}} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} x_0 \geq \sum_{j=1, \neq 0}^n X_{ij} \lambda_j - S_i^-, i = 1, 2, \dots, m \\ y_0 \leq \sum_{j=1, \neq 0}^n Y_{rj} \lambda_j - S_r^+, r = 1, 2, \dots, s \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \lambda_j \geq 0, S^+ \geq 0, S^- \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中: θ 为目标效率值; m 和 s 分别为投入和产出指标个数; x_0 和 y_0 为投入和产出向量; X_{ij} 和 Y_{rj} 分别为决策单元的投入和产出矩阵; x_{i0} 和 y_{r0} 分别是向量 x_0 和 y_0 的元素; S^- 和 S^+ 分别为投入和产出的松弛变量; S_i^- 和 S_r^+ 分别表示第 i 种投入的松弛变量和第 r 种产出的松弛变量; λ_j 为权重向量。

SBM超效率模型的特点是:①最优解无量纲;②效率值可以超过1。因此,这两条性质可以鉴别出决策单元的排名和差别程度(王艾敏,2009)。

(二)指标选取

构建评价指标体系是测度电力行业环境效率的核心内容。本文将中国电力行业环境效率测度指标分为投入指标和产出指标。产出指标又进一步分为期望产出指标和非期望产出指标。

在投入产出指标选择上,现有的文献根据研究目的和侧重点的不同而有所差异,从总体来看,文献主要考虑人、财、物三类投入,发电量等期望产出,以及污染物等非期望产出。

本文选取8个指标构建电力行业环境效率测度指标体系,其中人的指标为劳动力投入,财的指标为资产投入,物的指标为能源投入,并满足指标数量 $\leq 1/3$ 个决策单元的条件(狄乾斌等,2020)。指标体系见表1。

表1 环境效率测度指标体系

指标类型	一级指标	二级指标
投入指标	劳动力(人)	电力行业从业人员数
	资产(财)	装机容量
	能源(物)	能源耗量
产出指标	期望产出指标	发电量
	非期望产出指标	CO ₂
		SO ₂
		氮氧化物

(三)数据来源

从业人员数来自《中国劳动统计年鉴》,由于缺少电力行业人力资源投入的专门统计,本文采用电力、热力生产和供应业就业人数替代电力行业从业人员数;装机容量、能源耗量、发电量来自各年度的《中国电力年鉴》;CO₂没有公开数据,按照各地区能源平衡表中的化石能源消费量来计算CO₂的排放量(王文举,2017;任志娟,2018);现有文献中对于地区电力行业产生的SO₂没有公开数据,本文采用如下方法计算(范玉仙和袁晓玲,2015)。

$$\text{电力行业SO}_2\text{排放总量} = \text{地区SO}_2\text{排放总量} \times \frac{\text{地区发电消耗煤炭}}{\text{地区消耗煤炭总量}} \quad (3)$$

其中:地区SO₂排放量来自于国家统计局官网,地区发电消耗煤炭和地区消耗煤炭总量来自各年度的《中国能源统计年鉴》。

(四)测度结果分析

运用MaxDEA8.0软件,计算得出2008—2017年中国省份电力行业环境效率、纯技术效率及规模效率,其中环境效率=纯技术效率×规模效率。环境效率测度结果见表2(因篇幅有限,未提供纯技术效率及规模效率测度结果)(由于数据缺失,西藏、港澳台地区未列入研究范围)。

表2 中国省份电力行业环境效率(2008—2017年)

省(市区)	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	均值	排名
北京	1.027	1.03	1.031	1.035	1.041	1.042	1.055	1.118	1.171	1.223	1.077	1
江苏	1.041	1.043	1.035	1.046	1.076	1.031	1.031	1.032	1.057	1.041	1.043	2
湖北	1.086	1.065	1.08	1.077	1.076	1.003	1.002	0.838	0.858	1.001	1.009	3
浙江	1.004	1.002	1.006	1.004	1.004	1.006	1.007	1.036	1.011	1.005	1.009	4
青海	1.069	1.108	1.135	1.141	1.108	1.086	1.046	1.027	0.617	0.595	0.993	5
云南	0.724	0.721	0.723	1.003	1.002	1.01	1.059	1.094	1.083	1.092	0.951	6
上海	0.851	1.001	1.001	1.004	1.003	1.006	1.002	0.775	0.776	1.077	0.950	7
福建	1	1.002	0.916	0.902	1.002	0.925	0.935	0.677	1.002	1.002	0.936	8
四川	0.64	0.691	0.718	1.012	1.003	1.018	1.023	1.028	1.076	1.039	0.925	9
海南	0.761	0.714	0.756	0.88	0.829	0.938	1.007	0.773	1	0.936	0.859	10
宁夏	1.015	0.646	0.635	0.774	0.707	1.023	1.018	0.797	0.751	1.001	0.837	11
广东	0.776	0.782	0.794	0.908	0.86	0.748	0.742	0.727	0.743	0.85	0.793	12
安徽	0.66	0.794	0.764	0.803	0.759	0.798	0.824	0.787	0.758	0.784	0.773	13
天津	0.75	0.672	0.787	0.736	0.67	0.74	0.705	0.776	0.781	0.824	0.744	14
山西	0.799	0.755	0.758	0.743	0.713	0.796	0.753	0.696	0.672	0.669	0.735	15
广西	1.004	0.771	0.692	0.755	0.737	0.672	0.684	0.702	0.557	0.616	0.719	16
山东	0.698	0.708	0.702	0.664	0.631	0.714	0.673	1.006	0.712	0.657	0.717	17
内蒙古	0.66	0.664	0.661	0.693	0.667	0.738	0.748	0.728	0.696	0.717	0.697	18
贵州	0.701	0.741	0.652	0.634	0.693	0.604	0.656	0.707	0.628	0.633	0.665	19
河北	0.649	0.64	0.65	0.655	0.613	0.696	0.651	0.64	0.619	0.639	0.645	20
河南	0.608	0.659	0.64	0.663	0.627	0.666	0.616	0.581	0.572	0.573	0.621	21
新疆	0.577	0.548	0.53	0.556	0.539	0.621	0.653	0.736	0.7	0.719	0.618	22
辽宁	0.637	0.602	0.557	0.566	0.558	0.612	0.618	0.623	0.633	0.634	0.604	23
陕西	0.528	0.552	0.573	0.64	0.642	0.65	0.655	0.584	0.594	0.612	0.603	24
甘肃	0.698	0.64	0.633	0.659	0.634	0.584	0.492	0.496	0.501	0.506	0.584	25
湖南	0.54	0.578	0.575	0.62	0.608	0.629	0.613	0.528	0.529	0.565	0.579	26
江西	0.488	0.484	0.512	0.559	0.571	0.588	0.57	0.602	0.638	0.636	0.565	27
重庆	0.516	0.553	0.542	0.583	0.53	0.586	0.599	0.559	0.594	0.571	0.563	28
吉林	0.538	0.589	0.543	0.54	0.525	0.525	0.52	0.48	0.493	0.499	0.525	29
黑龙江	0.516	0.516	0.517	0.538	0.491	0.502	0.477	0.472	0.46	0.469	0.496	30

2008—2017年电力行业环境效率均值排名前五的地区是北京、江苏、湖北、浙江、青海,排名后五的地区是湖南、江西、重庆、吉林、黑龙江;2008—2017年电力行业纯技术效率均值排名前五的地区是海南、青海、北京、江苏、湖北,排名后五的地区是重庆、湖南、江西、吉林、黑龙江;2008—2017年电力行业规模效率排名前五的地区是浙江、河南、辽宁、河北、湖南,排名后五的地区是宁夏、广东、天津、青海、海南。

四、中国电力行业环境效率空间演化分析

(一)空间差异分析

1. 全国电力行业环境效率空间分布

根据电力行业环境效率的测度结果,得出2008—2017年30个省份各年度的电力行业环境效率、纯技术效率和规模效率均值,参照吴鸣然和马骏(2016)、郭莉等(2020)等学者做法,各年度均值即为全国各年度的

电力行业环境效率、纯技术效率和规模效率值,见表3,中国电力行业环境效率、纯技术效率和规模效率总体水平在0.7~1之间,表明中国电力行业三类效率仍具有提升的空间。

2008—2017年,电力行业环境效率、纯技术效率和规模效率的平均值分别是0.761、0.904和0.926,规模效率、纯技术效率的值相差不大,高于环境效率;环境效率、纯技术效率和规模效率均呈现上下波动的走势,如图1所示。

运用Eviews7.2软件,构建三者相关性分析图,开展电力行业环境效率、纯技术效率、与规模效率之间的关系分析,如图2所示。电力行业纯技术效率与环境效率之间关联效应显著,具有负相关关系,表明2008—2017年间电力行业环境效率主要受到了纯技术效率负影响。电力行业环境效率与规模效率之间的关联效应显著,具有正相关关系,表明电力行业环境效率主要受到了规模效率的正影响。

表3 中国电力行业环境效率、纯技术效率、规模效率(2008—2017年)

效率	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	均值
环境效率	0.752	0.742	0.737	0.780	0.764	0.785	0.781	0.754	0.743	0.773	0.761
纯技术效率	0.950	0.931	0.887	0.899	0.877	0.886	0.875	0.921	0.935	0.875	0.904
规模效率	0.932	0.925	0.921	0.938	0.931	0.941	0.949	0.892	0.896	0.938	0.926

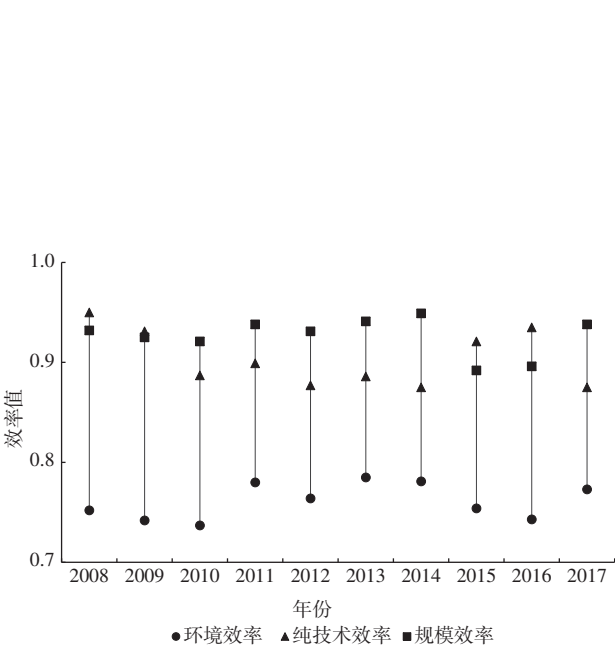


图1 中国电力行业环境效率、纯技术效率、规模效率(2008—2017年)

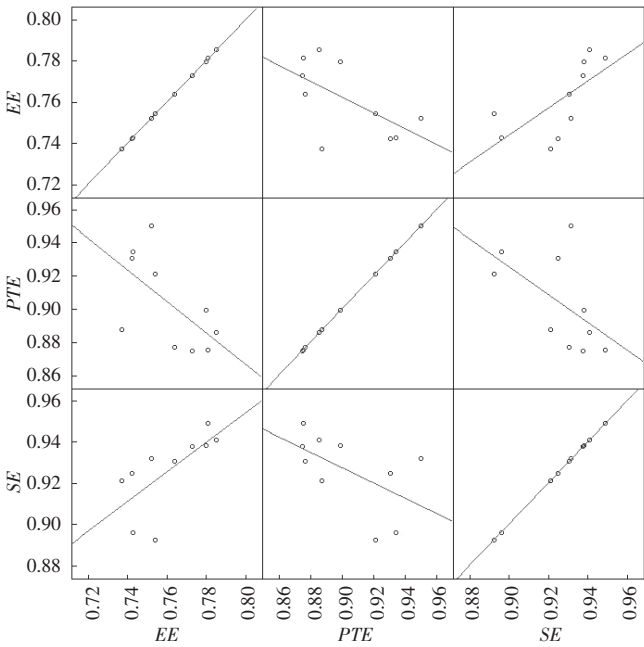


图2 中国电力行业环境效率(EE)、纯技术效率(PTE)、规模效率(SE)关系图(2008—2017年)

2. 区域电力行业环境效率空间分布

根据电力行业环境效率测度结果,得出2008—2017年东部、中部和西部三大地带的电力行业环境效率、纯技术效率和规模效率,见表4。三大地带的电力行业环境效率、纯技术效率、规模效率都呈现波动的发展状态,如图3所示。

表4 三大地带电力行业环境效率、纯技术效率、规模效率(2008—2017年)

效率	区域	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	均值
环境效率	东部	0.836	0.836	0.840	0.855	0.844	0.860	0.857	0.835	0.864	0.899	0.852
	中部	0.654	0.680	0.674	0.693	0.671	0.688	0.672	0.623	0.623	0.695	0.667
	西部	0.739	0.694	0.681	0.768	0.751	0.781	0.785	0.769	0.709	0.736	0.741
纯技术效率	东部	1.343	1.268	1.162	1.118	1.082	1.071	1.045	1.150	1.294	1.108	1.164
	中部	0.668	0.699	0.689	0.701	0.685	0.698	0.677	0.637	0.631	0.654	0.674
	西部	0.763	0.762	0.757	0.824	0.812	0.837	0.850	0.900	0.796	0.803	0.810
规模效率	东部	0.855	0.886	0.875	0.894	0.882	0.900	0.918	0.816	0.807	0.896	0.873
	中部	0.981	0.975	0.978	0.988	0.980	0.985	0.991	0.977	0.986	0.993	0.983
	西部	0.973	0.927	0.927	0.946	0.943	0.950	0.949	0.907	0.920	0.939	0.938

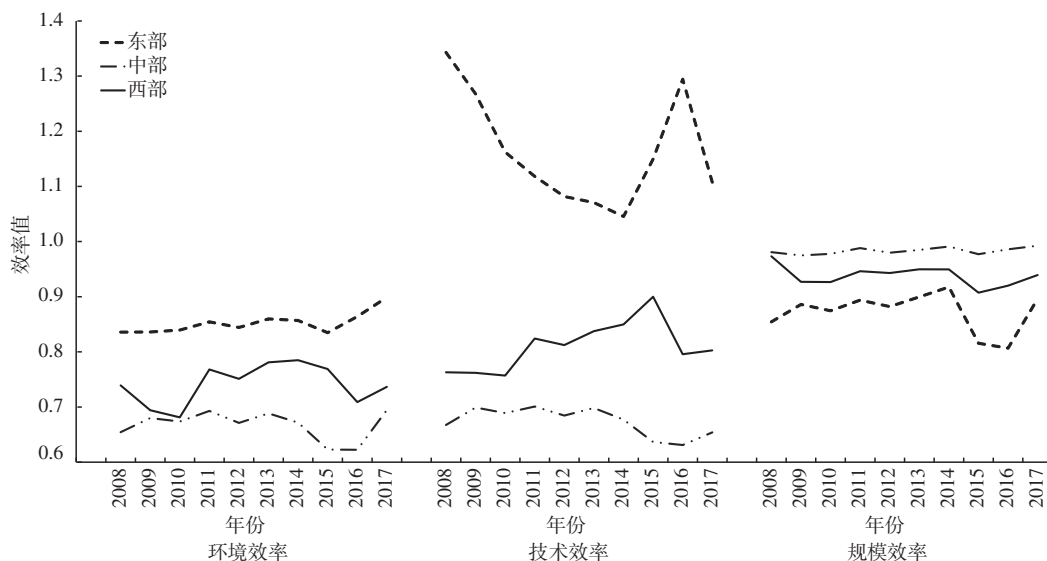


图3 三大地带电力行业环境效率、纯技术效率、规模效率(2008—2017)

环境效率呈现出东部高于西部、西部高于中部的走势。纯技术效率呈现出东部高于西部、西部高于中部的走势。规模效率呈现出中部高于西部、西部高于东部的走势。

通过西电东送等跨省区重点输电通道建设,东部、中部、西部地区的电力能够从整体上实现科学布局,东部缺电的局面得以改善,西部地区除了满足本地区的需求外,还将向中部地区输送,中部地区作为西电东送的枢纽,起到了重要作用(邓英芝,2015)。这一结果印证了电力生产基地建设在一定程度上取得了成功,并已经反映到三大地带电力环境效率值的变化中。

(二)空间自相关分析

本文采用莫兰指数(Moran's I)来衡量全局空间的依赖性及空间集聚程度,对30个省市电力行业环境效率进行全局空间自相关分析(P. A. P., 1950)。

运用GeoDa1.12软件,通过Moran's I 指数的计算并以Moran's I 散点图的可视化来进行分析,得到中国电力行业2008—2017年各地区环境效率平均值的Moran's I 指数散点图,如图4所示。

结果表明:“Moran's I :0.0699704”即Moran's I 指数值为0.0699704,即Moran's I 散点图中斜线的斜率为0.0699704,可以得出中国电力行业2008—2017年各省环境效率在空间分布上具有正向的空间自相关关系,存在空间依赖性,分布具有差序化特征。

Moran's I 散点图分为四个象限,横坐标为各省电力行业环境效率值标准化后的数值,纵坐标为其空间权重矩阵所决定的空间滞后项。散点图中的散点一一对应的是相应的省份。说明省份电力行业环境效率在空间分布上并不是随机分布的,而是表现出集聚现象,较高的电力行业环境效率的省趋于和较高的电力行业环境效率的省相靠拢,较低的电力行业环境效率的省趋于和较低的电力行业环境效率的省相靠拢。具体归纳见表5。

综上所述,中国电力行业环境效率形成东部高值、中部低值、西部中值的空间差异分布格局,各省份的电力行业环境效率差异较大;同时还存在空间依赖性,呈现空间集聚现象。

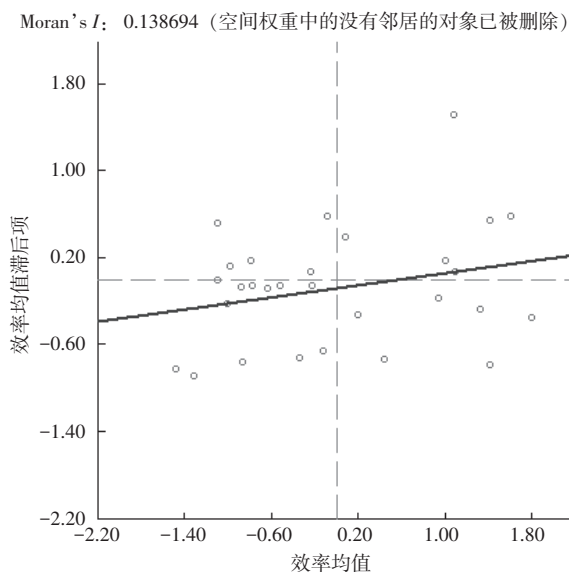
图4 中国省份电力行业环境效率(EE)平均值Moran's I 散点图(2008—2017年)

表5 中国电力行业环境效率空间集聚分布(2008—2017年)

集聚区域	省份	特征
高高集聚	上海、江苏、浙江、云南、安徽、福建	电力行业环境效率水平高,并被电力行业环境效率水平高的省份包围,在空间上呈现显著的溢出效应
低高集聚	新疆、江西、甘肃、天津、山东	电力行业环境效率水平明显低于周边的省份,这些省份容易受到周边高水平省份的影响,具有被同化的优势
低低集聚	黑龙江、山西、河南、湖南、贵州、广西、吉林、辽宁、陕西、内蒙古、重庆、河北	电力行业环境效率水平低,并被电力行业环境效率水平低的省份包围
高低集聚	宁夏、湖北、广东、北京、青海、四川	电力行业环境效率水平明显高于周边的省份,被电力行业环境效率水平低的省份包围,但其自身的电力行业环境效率水平还有提高的潜力

五、中国电力行业环境效率影响因素实证研究

(一)回归模型

James Tobin(1958)首次提出Tobit模型。计算如下:

$$\rho_i^* = \alpha_0 + \sum_{j=1}^i \alpha_j x_{ij} + \varepsilon_i \tag{4}$$

$$\rho_i = \rho_i^*, \quad 0 \leq \rho_i^* \leq 1 \tag{5}$$

$$\rho_i = 0, \quad \rho_i^* < 0 \tag{6}$$

$$\rho_i = 1, \quad \rho_i^* > 1 \tag{7}$$

其中: ρ_i^* 为潜变量,潜变量大于0时,能被观测到,取被解释变量值; ρ_i 为实际被解释变量; x_{ij} 为解释变量; α_0 表示常数项; α_j 为相关系数向量; ε_i 为扰动项,服从 $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$ 。

在前人研究的基础上,本文主要从9个方面来研究电力行业环境效率影响因素,进而构建Tobit回归模型:

$$EE = C + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_7 X_7 + \beta_8 X_8 + \beta_9 X_9 + \varepsilon \tag{8}$$

其中: EE 为环境效率; X_1 为GDP比重; X_2 为第二产业增加值在各地GDP中所占比重; X_3 为非火电比重; X_4 为研发经费值比重; X_5 为人口比重; X_6 为对外开放程度; X_7 为燃煤效率; X_8 为环境污染治理投资占GDP比重; X_9 为原煤产量比重; ε 为误差项; β_i 为自变量的回归系数, β_i 取值越大,说明相关关系越强。变量具体含义见表6。

表6 变量符号及含义

变量	变量符号	变量定义
被解释变量	环境效率	EE 电力行业环境效率
解释变量	经济规模	X_1 地区GDP占全国GDP比重
	产业结构	X_2 第二产业增加值占GDP的比重
	电源结构	X_3 非火力发电装机容量占全国非火力发电装机容量
	技术水平	X_4 R&D投入费用占全国总的R&D投入费用比重
	人口水平	X_5 人口数量占全国人口数量的比重
	对外开放程度	X_6 进出口贸易总额占该地区生产总值的比重
	燃煤效率	X_7 发电标准煤耗的倒数
	环境规制水平	X_8 环境污染治理投资占GDP比重
	资源水平	X_9 地区原煤产量占全国原煤产量比重

(二)数据来源

数据主要来源于国家统计局官网,2008—2017年历年《中国电力年鉴》《中国科技统计年鉴》《中国贸易外经统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国能源统计年鉴》。

(三)影响因素检验

1. 全国及三大地带

运用Eviews7.2软件,采用Tobit回归估计模型,首先对中国电力行业环境效率的影响因素进行检验,进而对东部、中部、西部三大地带电力行业环境效率的影响因素进行了检验,具体回归估计结果见表7。

表 7 全国及区域电力行业环境效率影响因素 Tobit 回归结果(2008—2017 年)

因素	全国		东部		中部		西部	
	系数	Z-Stat	系数	Z-Stat	系数	Z-Stat	系数	Z-Stat
C	-0.151	-0.752	0.301	1.243	-0.071	-0.313	-0.095	-0.233
X_1	3.820	3.687***	7.018	4.709***	6.454	1.744*	-16.985	-2.826***
X_2	0.151	1.057	-0.086	-0.504	0.635	4.104***	1.480	4.192***
X_3	0.433	9.237***	0.243	1.971**	0.156	1.718*	0.528	6.381***
X_4	1.408	3.469***	0.271	0.757	15.186	9.187***	-0.655	-0.478
X_5	-5.006	-5.094***	-8.802	-4.510***	-8.692	-3.080***	12.264	3.074***
X_6	0.046	1.442	-0.006	-0.127	-0.003	-0.147	-0.060	-0.251
X_7	205.692	4.322***	149.547	2.602***	27.983	0.436	-63.719	-0.650
X_8	0.516	0.353	0.255	0.109	6.185	2.980***	4.262	1.909*
X_9	0.151	0.852	-1.438	-0.926	0.710	3.977***	0.898	2.187**

注:***、**、*分别表示 1%、5% 和 10% 的显著性水平。

(1)地区 GDP 比重(X_1)检验结果。从全国范围看,经济规模水平指标地区生产总值比重系数为正,且对电力行业环境效率具有显著正影响。

从区域来看,经济规模水平指标对东部、中部地区电力行业环境效率具有显著正影响,GDP 比重提升 1%,东部地区电力行业环境效率将提升 7.018%,中部地区电力行业环境效率将提升 6.454%;对西部地区电力行业环境效率具有显著负影响。

一般而言,经济规模的提升对电力行业环境效率的提升具有积极作用,结果表明:在全国、东部和中部地区,经济规模与电力行业环境效率存在显著的正向影响关系。而西部经济规模对电力行业环境效率的提升带来抑制效应,与我国西部地区所处的发展阶段有关,西部地区仍处在大开发的关键时期,对电力资源的依赖程度仍然较高,必然会对电力行业环境效率水平的提升产生影响。这也与我国当前的经济发展不平衡的现状相符。

(2)第二产业增加值占 GDP 的比重(X_2)检验结果。从全国范围看,产业结构影响因素第二产业增加值占 GDP 的比重未通过显著性假设检验。

从区域来看,产业结构影响因素对中部和西部地区的电力行业环境效率具有显著正影响,第二产业增加值占 GDP 的比重提升 1%,中部地区电力行业环境效率将提升 0.635%,西部地区电力行业环境效率将提升 1.48%;对东部地区的电力行业环境效率影响未通过显著性假设检验。

这符合中国区域产业发展不均衡的现状。我国东部地区的工业化程度较高,其对电力行业环境效率的影响已经不显著;而中部和西部地区的工业化程度正在不断提升,随着工业的不断发展,新工艺、新技术不断应用与电力行业,必然带动电力行业环境效率的提升。

(3)非火力发电装机容量占比(X_3)检验结果。从全国范围看,电源结构非火力发电装机容量占比系数都为正,且对电力行业环境效率具有显著正影响,非火力发电装机容量占比提升 1%,全国电力行业环境效率将提升 0.433%。

从东部、中部、西部区域范围看,电源结构非火力发电装机容量占比(X_3)系数都为正,且对电力行业环境效率具有显著正影响,非火力发电装机容量占比提升 1%,东部地区电力行业环境效率将提升 0.243%,中部地区电力行业环境效率将提升 0.156%,西部地区电力行业环境效率将提升 0.528%。

中国电源结构以煤电为主,是 CO₂ 等温室气体的主要来源。非火力发电装机容量占比的提升,对电力行业环境效率有着显著的促进作用。

(4)R&D 投入费用占全国总的 R&D 投入费用比重(X_4)检验结果。从全国范围看,技术水平 R&D 投入费用占全国总的 R&D 投入费用比重系数为正,且对电力行业环境效率具有显著正影响,R&D 投入费用占全国总的 R&D 投入费用比重提升 1%,全国电力行业环境效率将提升 1.408%。

从区域来看,技术进步对中部地区的电力行业环境效率具有显著正影响,R&D 投入费用占全国总的 R&D 投入费用比重提升 1%,全国电力行业环境效率将提升 15.186%;对东部和西部地区的电力行业环境效率影响未通过显著性假设检验。

技术进步会推动电力行业环境效率的提升。带来社会科学的发展和劳动力素质的提升,从而降低生产过程的能源消耗和污染排放。

(5)地区人口数量占全国人口数量的比重(X_5)检验结果。从全国范围看,人口水平地区人口数量占全国人口数量的比重系数为负,且对电力行业环境效率具有显著负影响。

从区域来看,人口水平对东部和中部地区的电力行业环境效率具有显著负影响,对西部地区的电力行业环境效率具有显著正影响。人口数量占全国人口数量的比重提升1%,东部地区电力行业环境效率将降低8.802%,中部地区电力行业环境效率将降低8.692%,西部地区电力行业环境效率将提升12.264%。

一般而言人口数量增加会对电力行业环境效率带来压力,影响电力行业环境效率的提升。而我国西部地区人口密度较东部和中部地区低,人口数量的增加可以对电力行业环境效率的提升带来正效应。

(6)对外开放程度(X_6)检验结果。从全国范围看,对外开放程度未通过显著性假设检验。

从区域看,对外开放程度影响因素都未通过显著性假设检验,这表明对外开放对电力行业环境效率未产生显著影响。

(7)燃煤效率(X_7)检验结果。从全国范围看,燃煤效率系数为正,且对电力行业环境效率具有显著正影响,燃煤效率提升1%,全国电力行业环境效率将提升205.692%。

从区域来看,燃煤效率对东部地区的电力行业环境效率具有显著正影响,燃煤效率提升1%,东部地区电力行业环境效率将提升149.547%;对中部和西部地区的电力行业环境效率影响未通过显著性假设检验。

通过燃煤发电,依然是中国电力的主要来源,而燃煤效率的提升对于降低污染物的排放起到了重要作用,进而提升了电力行业环境效率。

(8)地区环境污染治理投资占GDP比重(X_8)检验结果。从全国看,地区环境污染治理投资占GDP比重影响因素未通过显著性假设检验。

从区域来看,环境规制水平对东部地区的电力行业环境效率影响未通过显著性假设检验,对中部和西部地区的电力行业环境效率具有显著正影响,环境污染治理投资占GDP比重提升1%,中部地区电力行业环境效率将提升6.185%,西部地区电力行业环境效率将提升4.262%。

一般来说,提升环境规制水平地区环境污染治理投资占GDP比重会提升电力行业环境效率,中部和西部地区的检验结果符合这一规律。全国范围、东北地区未通过显著性假设检验,说明中国应继续提升环境污染治理投资比重。

(9)地区原煤产量占全国原煤产量比重(X_9)检验结果。从全国看,原煤产量占全国原煤产量比重影响因素未通过显著性假设检验。

从区域来看,地区资源水平对东部地区的电力行业环境效率影响未通过显著性假设检验,对中部和西部地区的电力行业环境效率具有显著正影响,原煤产量占全国原煤产量比重提升1%,中部地区电力行业环境效率将提升0.71%,西部地区电力行业环境效率将提升0.898%。中部和西部地区煤产量形成了规模优势,对于中部和西部地区的电力行业环境效率的提升产生了促进效应。

2. 空间集聚区域

2008—2017年中国电力行业各省环境效率在空间分布上具有正向的空间自相关关系,存在集聚现象,通过回归估计检验中国电力行业环境效率空间集聚区域的影响因素,具体回归估计结果,见表8。

表8 空间集聚区域电力行业环境效率影响因素Tobit回归结果(2008—2017年)

因素	高高集聚		低高集聚		低低集聚		高低集聚	
	系数	Z-Stat	系数	Z-Stat	系数	Z-Stat	系数	Z-Stat
C	0.991	2.205	-0.277	-0.727	0.331	1.861	0.252	0.510
X_1	-0.005	-1.147	3.729	1.006	-2.087	-1.917*	-4.897	-1.109
X_2	-0.112	-0.319	0.368	0.810	0.281	2.623***	0.204	0.461
X_3	0.116	1.250	-0.123	-0.740	0.265	4.944***	0.152	1.117
X_4	-0.533	-0.667	0.769	0.821	-0.754	-1.251	0.517	0.911
X_5	4.129	1.920*	-7.351	-1.690*	3.792	4.799***	2.903	0.787
X_6	0.002	0.042	-0.096	-0.541	0.027	1.522	0.017	0.106
X_7	-11.235	-0.103	264.469	3.935***	-14.739	-0.292	188.657	1.979**
X_8	-1.314	-0.350	-2.268	-1.294	1.487	1.236	-0.676	-0.175
X_9	-7.848	-4.428***	3.694	2.552**	0.735	6.533***	-6.092	-1.776*

注:***、**、*分别表示1%、5%和10%的显著性水平。

(1)地区GDP比重(X_1)检验结果。经济规模水平指标对低低集聚区域的电力行业环境效率具有显著负影响,GDP比重提升1%,该地区电力行业环境效率将降低2.087%;对其他三类集聚区域电力行业环境效率影响不显著。

低低集聚区域主要包含中部和西部省份,这些省份仍处在经济转型、工业化进程的关键时期,电力消耗大,依赖程度高,必然会对电力行业环境效率水平的提升造成负面影响。

(2)第二产业增加值占GDP的比重(X_2)检验结果。产业结构影响因素对低低集聚区域的电力行业环境效率具有显著正影响,第二产业增加值占GDP的比重提升1%,中部地区电力行业环境效率将提升0.281%;对其他三类集聚区域电力行业环境效率影响不显著。

低低集聚区域的工业化程度正在不断提升,随着工业的不断发展,新工艺、新技术不断应用与电力行业,必然带动电力行业环境效率的提升。

(3)非火力发电装机容量占比(X_3)检验结果。电源结构非火力发电装机容量占比对低低集聚区域电力行业环境效率具有显著正影响,非火力发电装机容量占比提升1%,该区域电力行业环境效率将提升0.265%;对其他三类集聚区域电力行业环境效率影响不显著。

非火力发电装机容量占比的提升,对低低集聚区域电力行业环境效率有着显著的促进作用。

(4)R&D投入费用占全国总的R&D投入费用比重(X_4)检验结果。技术进步对四类集聚区域的电力行业环境效率影响未通过显著性假设检验。

(5)地区人口数量占全国人口数量的比重(X_5)检验结果。人口水平对高高集聚和低低集聚区域的电力行业环境效率具有显著正影响,人口数量占全国人口数量的比重提升1%,高高集聚区域电力行业环境效率将提升4.129%,低低集聚区域电力行业环境效率将提升3.792%;对低高集聚区域的电力行业环境效率具有显著负影响,人口数量占全国人口数量的比重提升1%,该区域的电力行业环境效率将降低7.351%。

(6)对外开放程度(X_6)检验结果。对外开放程度影响因素都未通过显著性假设检验,这表明对外开放对电力行业环境效率未产生显著影响。

(7)燃煤效率(X_7)检验结果。燃煤效率对低高集聚区域和高低集聚区域的电力行业环境效率具有显著正影响,燃煤效率提升1%,低高集聚区域电力行业环境效率将提升264.469%,高低集聚区域电力行业环境效率将提升188.657%;对高高集聚和低低集聚区域的电力行业环境效率影响未通过显著性假设检验。

(8)地区环境污染治理投资占GDP比重(X_8)检验结果。环境污染治理投资占GDP比重影响因素未通过显著性假设检验。

(9)地区原煤产量占全国原煤产量比重(X_9)检验结果。原煤产量占全国原煤产量比重对低高集聚和低低集聚区域的电力行业环境效率具有显著正影响,原煤产量占全国原煤产量比重提升1%,低高集聚区域电力行业环境效率将提升3.694%,低高集聚区域电力行业环境效率将提升0.735%。原煤产量占全国原煤产量比重对高高集聚和高低集聚区域的电力行业环境效率具有显著负影响,原煤产量占全国原煤产量比重提升1%,高高集聚区域电力行业环境效率将降低7.848%,高低集聚区域电力行业环境效率将降低6.092%。

六、结论与建议

(一)结论

本文采用SBM超效率模型,对2008—2017年中国30个省份电力行业环境效率进行测度,并开展空间差异和空间自相关分析;通过Tobit回归检验中国电力行业环境效率的影响因素,最终得出以下主要研究结论。

(1)中国电力行业环境效率还比较低,空间上存在着较大差异,呈现出东部高于西部、西部高于中部的走势。

(2)中国电力行业环境效率存在空间依赖性,30个省份的电力行业环境效率呈现高高集聚、低高集聚、低低集聚、高低集聚4种空间集聚现象。

(3)中国电力行业环境效率影响因素存在区域显著性差异。不同影响因素在不同区域的显著性不同,中国电力行业环境效率的影响因素存在区域显著性差异,具体归纳为以下8个方面。

①从全国范围看,经济规模水平、电源结构、技术水平、燃煤效率对中国电力行业环境效率具有促进作用;人口水平对中国电力行业环境效率具有反向作用。

②从东部地区看,经济规模水平、电源结构、燃煤效率对该地区电力行业环境效率具有促进作用;人口水平对该地区电力行业环境效率具有反向作用。

③从中部地区看,经济规模水平、产业结构、电源结构、技术水平对该地区电力行业环境效率具有促进作用;人口水平对该地区电力行业环境效率具有反向作用。

④从西部地区看,产业结构、电源结构、人口水平、环境规制水平、资源水平对该地区电力行业环境效率具有促进作用;经济规模水平对该地区电力行业环境效率具有反向作用。

⑤从高高集聚地区看,人口水平对该地区电力行业环境效率具有促进作用。

⑥从低高集聚地区看,燃煤效率、资源水平对该地区电力行业环境效率具有促进作用;人口水平对该地区电力行业环境效率具有反向作用。

⑦从低低集聚地区看,产业结构、电源结构、人口水平、资源水平对该地区电力行业环境效率具有促进作用;经济规模水平对该地区电力行业环境效率具有反向作用。

⑧从高低集聚地区看,燃煤效率对该地区电力行业环境效率具有促进作用;资源水平对该地区电力行业环境效率具有反向作用。

(二)建议

为进一步提升中国电力行业环境效率,实现中国电力行业低碳发展,提出以下3条建议。

(1)进一步科学的开展产业结构的调整。对于中部和西部工业化水平较低的地区,应加大第二产业的比重。对于不同省份,应充分考虑其区位条件差异,对于西部等经济不发达、工业基础薄弱地区,应继续加大第二产业的比重;而对于东部工业化水平较高的地区,应不宜在加大第二产业的比重。

(2)进一步加强电力结构调整,加快清洁能源建设。需进一步提升非火力发电的装机容量,应加强核电、风电、太阳能发电等传统清洁能源建设,同时还应加强氢能等清洁能源技术的研发力度,降低煤炭发电比例,是实现碳减排目标的重要措施。

(3)加强技术创新,提升火力发电的燃煤效率。研发投入对中部电力行业环境效率的提升效果显著,其他地区的研发投入对电力行业环境效率的提升效果影响不够显著,还需有待进一步加强。特别是加大燃煤效率领域的技术投入,对于提升中国电力行业环境效率的作用显著。

参考文献

- [1] 邓英芝, 2015. 中国电力系统环境效率研究: 考虑松弛变量的网络 DEA 视角[J]. 中国软科学(11): 145-154.
- [2] 狄乾斌, 赵晓曼, 王敏, 2020. 基于非期望产出的中国滨海旅游生态效率评价——以我国沿海城市为例[J]. 海洋通报, 39(2): 160-168.
- [3] 范玉仙, 袁晓玲, 2015. 中国电力行业环境技术效率及影响因素研究——基于 1995—2012 年省级面板数据[J]. 北京理工大学学报: 社会科学版(4): 63-72.
- [4] 郭莉, 南开辉, 王静怡, 等, 2020. 基于 SBM-GML 的电力行业环境效率区域差异分析[J]. 生态经济, 36(4): 44-49.
- [5] 姜雯昱, 2018. 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, 34(21): 135-138.
- [6] 任志娟, 2018. 中国碳排放区域差异与减排机制研究[M]. 北京: 知识产权出版社: 37.
- [7] 王艾敏, 2009. 我国苹果主产区生产效率评价——基于 DEA 的 Malmquist 指数分析[J]. 河南农业科学(7): 110-113.
- [8] 王文举, 2017. 中国碳排放总量确定、指标分配、实现路径机制设计综合研究[M]. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 154.
- [9] 王艳红, 叶文明, 2015. 计及碳排放的电力工业与火电行业生态效率实证分析(2001—2011)[J]. 科技管理研究, 35(3): 215-219.
- [10] 吴鸣然, 马骏, 2016. 中国区域生态效率测度及其影响因素分析——基于 DEA-Tobit 两步法[J]. 技术经济, 35(3): 75-80, 122.
- [11] ANG B W, ZHANG F Q, 2000. A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies[J]. Energy, 25(12): 1149-1176.
- [12] BANKER R D, CHARNES A, COOPER W W, 1984. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis[J]. Management Science, 30(9): 1078-1092.
- [13] BI G B, SONG W, ZHOU P, et al, 2014. Does environmental regulation affect energy efficiency in China's thermal power generation? Empirical evidence from a slacks-based DEA model[J]. Energy Policy, 66(3): 537-546.
- [14] CHARNES A, COOPER W W, RHODES E, 1978. Measuring the efficiency of decision making units[J]. European Journal of Operational Research, 2(6): 429-444.

- [15] GOTO M, TAKAHASHI T, 2017. Operational and environmental efficiencies of Japanese electric power companies from 2003 to 2015: Influence of market reform and Fukushima nuclear power accident[J]. *Mathematical Problems in Engineering* (12): 1-15.
- [16] HALKOS G E, POLEMIS M L, 2018. The impact of economic growth on environmental efficiency of the electricity sector: A hybrid window DEA methodology for the USA[J]. *Journal of Environmental Management*, 211(4): 334-346.
- [17] LU Y H, CHEN K H, CHENG J C, et al, 2019. Analysis of environmental productivity on fossil fuel power plants in the U. S [J]. *Sustainability*, 11(24): 1-27.
- [18] MUNISAMY S, ARABI B, 2015. Eco-efficiency change in power plants: Using a slacks-based measure for the meta-frontier Malmquist-Luenberger productivity index[J]. *Journal of Cleaner Production*, 105(10): 218-232.
- [19] MORAN P A P, 1950. Notes on continuous stochastic phenomena[J]. *Biometrika*, 37(1): 17-23.
- [20] QIN Q, JIAO Y, GAN X, et al, 2020. Environmental efficiency and market segmentation: An empirical analysis of China's thermal power industry[J]. *Journal of Cleaner Production*, 242(1.1): 118560.
- [21] SUN X, ZHOU X, CHEN Z, et al, 2019. Environmental efficiency of electric power industry, market segmentation and technological innovation: Empirical evidence from China[J]. *Science of The Total Environment*, 706(3): 135749.
- [22] XIE B C, CHEN Y F, GAO J, et al, 2021. Dynamic environmental efficiency analysis of China's power generation enterprises: A game cross-Malmquist index approach [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(2): 1697-1711.
- [23] XIE B C, GAO J, SHUANG Z, et al, 2018. The environmental efficiency analysis of China's power generation sector based on game cross-efficiency approach[J]. *Structural Change and Economic Dynamics*, 46(3): 126-135.
- [24] XIE B C, SHANG L F, YANG S B, et al, 2014. Dynamic environmental efficiency evaluation of electric power industries: Evidence from OECD(Organization for Economic Cooperation and Development)and BRIC(Brazil, Russia, India and China) countries[J]. *Energy*, 74(9): 147-157.
- [25] ZENG X, ZHOU Z, LIU Q, et al, 2020. Environmental efficiency and abatement potential analysis with a two-stage DEA model incorporating the material balance principle[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 148: 1-13.
- [26] ZHAO X, YIN H, ZHAO Y, 2015. Impact of environmental regulations on the efficiency and CO₂ emissions of power plants in China[J]. *Applied Energy*, 149(7): 238-247.
- [27] ZHOU Y, XING X, FANG K, et al, 2013. Environmental efficiency analysis of power industry in China based on an entropy SBM model[J]. *Energy Policy*, 57(6): 68-75.

Research on Environmental Efficiency of Power Industry in China and Its Influencing Factors: Based on Provincial Panel Data of 2008-2017

Pan Jianjun^{1,2}, Hou Guangming¹, Wang Junpeng¹

(1. School of Management and Economic, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. China Institute of Nuclear Industry Strategy, Beijing 100048, China)

Abstract: SBM super efficiency model is used to measure the environmental efficiency of the power industry in 30 provinces of China from 2008 to 2017, and spatial differences and spatial autocorrelation analysis are carried out. The results show that the environmental efficiency of China's power industry is still relatively low. The eastern part is higher than the western part, and the western part is higher than the central part. There are significant differences in the environmental efficiency of different provinces in each year, and there is spatial dependence. Through Tobit regression, the empirical results show that there are significant regional differences in the influencing factors of environmental efficiency of China's power industry. The level of economic scale, power structure, technical level and coal efficiency have a promoting effect on the environmental efficiency of China's power industry. The level of population has a reverse effect on the environmental efficiency of China's power industry. Finally, some policy suggestions are put forward to improve the environmental efficiency of China's power industry.

Keywords: power industry; environmental efficiency; SBM super efficiency model; spatial evolution; influencing factors