

李成宇, 张士强, 张伟. 中国省际工业生态效率空间分布及影响因素研究[J]. 地理科学, 2018, 38(12): 1970-1978. [Li Chengyu, Zhang Shiqiang, Zhang Wei. Spatial Distribution Characteristics and Influencing Factors of China's Inter Provincial Industrial Eco-efficiency. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(12): 1970-1978.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.12.004

中国省际工业生态效率空间分布及影响因素研究

李成宇¹, 张士强^{1,2}, 张伟²

(1. 山东科技大学经济管理学院, 山东 青岛 266590; 2. 济南大学绿色发展研究院, 山东 济南 250022)

摘要: 将中国30省市(不含港、澳、台和西藏地区)作为研究对象, 进行省际工业生态效率空间分布及影响因素研究。首先构建中国省际工业生态效率评价指标体系, 其次利用DEA-BCC模型结合Malmquist指数对2006~2015年中国30省市在时空两个维度上的工业生态效率进行测算, 再次运用Geoda软件分析中国工业生态效率的空间分布特征, 最后通过空间误差模型对中国工业生态效率的影响因素进行检验。研究结果表明: ① 中国工业生态效率虽呈现小幅度下降趋势, 但整体效率水平较高; 30省市之间存在明显差异性, 呈现出东部>中部>西部的分布格局。② 中国工业生态效率Malmquist指数增长率水平较高; 30省市Malmquist指数均为正向增长, 呈现出稳定增长趋势; 技术进步效率是Malmquist指数的主要推动力。③ 中国30省市工业生态效率呈现正向空间自相关性, 且存在明显的集聚状态, 近邻效应显著。④ 中国省际工业生态效率的主要影响因素有经济发展水平、产业结构、政府规制、技术进步、外商投资和产业集聚。

关键词: 工业生态效率; BCC模型; Malmquist指数

中图分类号: F205; F062.2; X22

文献标识码: A

文章编号: 1000-0690(2018)12-1970-09

改革开放以来, 中国工业发展迅速, 现已成为中国经济腾飞的重要推动力。然而, 近30 a来, 中国工业主要依靠高消耗、高污染的粗放式发展模式, 这种模式在推动中国工业发展的同时, 也会产生严重的环境污染、生态破坏等问题。随着时间的推移, 这些问题已逐渐凸显出来, 成为制约中国工业发展的重要因素, 如不及时转变这种粗放式发展模式, 中国工业强国的目标将难以实现。当前, 中国正处于工业转型升级的关键期, 处理好工业发展与生态环境之间的关系, 提高发展过程中的生态效率成为急需解决的问题。因此, 研究中国工业生态效率, 对于制定相关政策、转变工业发展模式、促进工业生态和谐发展具有现实意义。

1990年美国学者Schaltegger等提出生态效率的概念^[1], 1996年BASE集团从产品生产角度界定生态效率的概念, 1998年DECD将概念扩大到政府、工业企业及其他组织^[2]。至此, 生态效率得到学术界和企业界广泛认可和接受, 成为衡量经济

与环境协调发展的重要参考。现阶段, 生态效率的研究主要集中在应用和测算两方面。在生态效率应用方面, 国内外学者已将其广泛的应用到区域^[3,4]、城市^[5,6]、产业^[7,8]、行业^[9,10]、工业园区^[11]、产品^[12]等不同领域, 已取得一些成果。在生态效率测算方面, 按照技术方法可分为两类; 一类是建立生态效率指标体系, 构建综合指数^[13,14]的研究; 一类是采用DEA及其扩展方法对生态效率进行测算^[4,15,16]。关于工业生态效率方面的研究也已趋于成熟, 研究尺度以区域、城市为主, 研究方法则以DEA及其扩展方法为主, 同时大多数研究能够在测算工业生态效率的基础上进行工业生态效率影响因素的分析, 使研究具有一定深度^[14,17-21]。可以看出, 现有文献对中国工业生态效率的研究已较为深入, 但仍存在以下几个不足之处: 一是工业生态效率指标体系不完善, 仅选取少数几个指标作为资源环境消耗投入, 不能全面的反映工业生态效率的真实水平; 二是研究多以静态工业生态效率为主, 缺少

收稿日期: 2017-11-28; **修订日期:** 2018-01-29

基金项目: 国家社科重大项目(15ZDB163)、教育部人文社会科学研究规划基金项目(15YJAZH110)资助。[Foundation: Major Program of National Social Science Foundation of China (15ZDB163), Funding Project of Education Ministry for the Development of Liberal Arts and Social Sciences (15YJAZH110).]

作者简介: 李成宇(1990-), 男, 山东青州人, 博士研究生, 主要从事能源经济研究。E-mail: 852981624@qq.com

动态工业生态效率方面的研究,无法从时、空两个维度出发来反映工业生态效率;三是工业生态效率影响因素的检验以Tobit、多元线性回归等传统计量模型为主,利用空间计量模型进行检验的研究少。基于此,本文首先构建中国省际工业生态效率评价指标体系,然后利用DEA-BCC模型结合Malqumist指数模型测算2006~2015年间中国30省市在时空两个维度上的工业生态效率,随后通过空间自相关模型探讨中国工业生态效率的空间特性,最后采用空间计量模型检验中国工业生态效率的影响因素。

1 研究方法 & 数据说明

1.1 研究方法

1) DEA模型。DEA模型包括CCR模型和BCC模型,1978年Charnes等人提出CCR模型,用于测算规模报酬不变下的效率,随后Banker等人又对CCR模型进行修正,提出考虑规模报酬可变的BCC模型。DEA作为一种非参数分析模型,具有精确、可比、易分解等优势,并能很好地体现不同区域间效率的差别,本文选择DEA模型来进行静态测算,以期科学准确的体现中国省际工业生态效率的真实水平。又因为投入量要远比起产出量更容易控制,因此本文选择投入导向型DEA-BCC模型,具体详见参考文献[22,23]。

2) Malmquist指数模型。Malmquist指数模型由瑞典经济学家Sten Malmquist提出,后经Fare等人的发展,使得Malmquist指数得到广泛应用。由于BCC模型仅能通过截面数据进行单期效率比较分析,无法运用面板数据,从时间维度上测度效率动态变化趋势,而Malmquist指数模型则能很好的弥补这一不足,本文选择Malmquist指数模型来进行动态测算,以期更好的反映中国省际工业生态效率的动态变化趋势,具体详见参考文献[24]。

3) 空间自相关分析。空间自相关作为检验空间单元属性聚集程度的度量方法,分为全局和局部两类。全局反映整个研究区域内空间相关性的总体趋势,局部反映区域间的空间关系。空间自相关作为定量研究区域空间问题的重要方法,能够将数据与图形有效结合,全面展示空间分布差异性 & 相似性,真正做到数值与二维空间上的统一,因此,本文选择Moran's I来测度全局空间自相关,以此来反映中国省际工业生态效率的空间

分布特征,具体公式详见参考文献[25]。

4) 空间计量模型。空间计量模型是一种能够有效解决被考察变量之间存在的空间依赖性及空间相关性问题的分析工具,主要包括空间滞后模型和空间误差模型。由于普通回归模型会因空间因素影响低估或高估某些因素的影响作用,使得结果不够准确,鉴于此,本文选择能够考虑空间因素的空间计量模型来检验中国省际工业生态效率的影响因素,具体详见参考文献[26]。

1.2 研究指标及数据选取

1.2.1 评价指标体系构建

工业生态效率的核心思想“少投入多产出”符合DEA对投入产出指标的要求。因此,本文参考前人研究^[5,27],将资源消耗、环境污染作为投入指标,将工业增加值作为产出指标,构建科学可比的中国省际工业生态效率评价指标体系,如表1所示。

表1 中国省际工业生态效率评价指标体系

Table 1 Index system for evaluation of industrial ecological efficiency in China

指标	类别	具体指标	说明
投入指标	资源消耗	能源消耗	工业能源消费量
		土地消耗	工业用地面积
		水资源消耗	工业用水总量
		劳动力消耗	工业就业人数
		电力消耗	工业用电量
	环境污染	废水排放	工业废水排放量
			工业化学需氧量排放量
			工业氨氮排放量
			工业二氧化碳排放量
		废气排放	工业二氧化硫排放量
产出指标	经济发展总量		工业烟粉尘排放量
			工业废气排放量
		固体排放	工业固体废物排放量
		经济发展总量	工业增加值

1.2.2 空间计量影响因素选取

工业生态效率的影响因素众多,本文参考已有文献^[17-21],选择经济发展水平、产业集聚、产业结构、对外开放程度、政府规制、技术进步和外商投资7个指标,作为影响工业生态效率的因素。其中经济发展水平以人均GDP衡量,产业集聚以区位熵计算结果衡量,产业结构以第二产业占GDP比重衡量,对外开放程度以规模以上企业出口交货值衡量,政府规制以工业污染治理投资额衡量,技

技术进步以发明专利拥有数衡量,外商投资以外商直接投资占GDP比重衡量。

1.3 数据来源及处理

所有数据均来历年《中国统计年鉴》^[28]、《中国能源年鉴》^[29]、《中国工业经济年鉴》^[30],并结合30省市相关统计资料进行修正。考虑到港澳台及西藏地区数据可获取性差,故未作考虑。由于DEA测算要求数据样本数量要满足大于投入产出指标之和的3倍或投入产出指标乘积的要求,但本文年度样本数量有限,且环境污染指标过多,因此参考吴琦^[31]的处理方法利用主成分分析法对环境污染指标进行降维处理,将其拟合成1个指标。

2 工业生态效率测算

本文从静态和动态两个角度测算中国省际工业生态效率变化情况。静态测算反映的是生态效率的水平;动态测算则反映的是生态效率的增长率变动趋势,数值大于1说明提高,小于1表示降低。

2.1 静态测算

从图1可以看出,2006~2015年间中国工业生态效率虽呈现出小幅度下降趋势,但整体效率水平较高,各项效率值都较为平稳,其中综合效率在0.75~0.80之间波动,纯技术效率都处于0.8~0.9之间,规模效率则始终保持在0.9以上的高位状态。

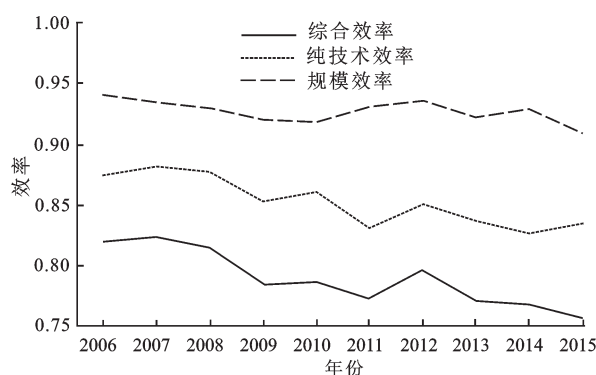


图1 2006~2015年中国省际工业生态效率整体变动趋势

Fig.1 The provincial industrial ecological efficiency in China in 2006-2015

进一步观察表2可知,中国工业生态效率的综合效率均值、纯技术效率均值、规模效率均值分别为0.790、0.853、0.927,说明当前中国工业生态效率处于较高水平。具体各省市来看,北京、天津、

山东、广东、内蒙古、黑龙江6省市的综合效率值为1,处于前沿面上,其他24个省市均存在不同程度的无效率状态。江苏、福建、浙江、河北、新疆、云南6省综合效率值水平也比较高,均在0.8之上,而宁夏、贵州、甘肃3省的综合效率值最低,均低于0.6,其他省份的综合效率值则处于0.6~0.8之间。可以看出,中国各省市之间存在明显的差异性,效率高的省市集中在东部地区,而效率低的省市集中在中部和西部地区,呈现出东部>中部>西部的分布格局。东部地区优越的地理位置,雄厚的经济、工业、科技实力,在纯技术效率和规模效率上有很大优势。中部地区作为中国重要的工业基地,工业化程度高,在规模效率上具有优势,但缺少先进管理经验、技术工艺的支持,在纯技术效率方面存在不足。西部地区经西部大开发战略耕耘,在技术、管理、人才等方面已有长足进步,纯技术效率和规模效率都有很大提升,但整体上仍低于东中部地区。

2.2 动态测算

本文选用Malmquist指数法测算分析中国省际工业生态效率的动态变化趋势,得到2006~2015年中国省际工业生态效率Malmquist指数变动趋势(图2)以及2006~2015年中国省际工业生态效率的Malmquist指数及分解结果(表3)。

从图2可知,2006~2015年中国工业生态效率的Malmquist指数增长率增幅较快,但整体趋势不够稳定,上下波动明显,其中,2006~2011年期间呈现波动增长趋势,2011年达到峰值,随后开始下降,2014年下落至最低点,2015年又开始反弹。分解来看,技术进步效率均为正,虽上下变化较为剧烈,但增长率水平较高,技术效率、纯技术效率、规模效率则均出现负增长。可以看出,技术进步效率呈现出强增长趋势,且变动趋势与Malmquist指数增长率变动趋势保持一致,明显是Malmquist指数增长的主要推动力。

从表3可知,中国30省市的Malmquist指数均为正,呈现出稳定增长趋势。具体省市来看,Malmquist指数排名靠前的省份有辽宁、天津、内蒙古、甘肃、陕西、青海、海南、山西、河南,其增长率均在10%以上,Malmquist指数排名靠后的省份则有江苏、河北、广东、福建、重庆、浙江、上海、江西、新疆,其增长率都均低于8%,其他省市增长率则处于8%~10%之间。可以看出,中国各省市、各地区之间的Malmquist指数存在差异性,增长率高

表2 2006~2015年中国省际工业生态效率均值及分解结果

Table 2 Chinese inter-provincial industrial ecological efficiency mean value and decomposition results in 2006-2015

省份	综合效率	纯技术效率	规模效率	省份	综合效率	纯技术效率	规模效率	省份	综合效率	纯技术效率	规模效率
北京	1	1	1	云南	0.819	0.847	0.966	广西	0.677	0.688	0.985
天津	1	1	1	河北	0.816	0.983	0.829	重庆	0.674	0.715	0.942
山东	1	1	1	陕西	0.804	0.811	0.991	湖北	0.622	0.661	0.939
广东	1	1	1	吉林	0.798	0.816	0.977	山西	0.618	0.627	0.985
黑龙江	1	1	1	河南	0.795	0.995	0.798	安徽	0.605	0.615	0.984
内蒙古	1	1	1	海南	0.762	1	0.762	甘肃	0.58	0.644	0.901
上海	0.998	1	0.998	青海	0.757	1	0.757	贵州	0.512	0.64	0.812
江苏	0.922	0.997	0.925	江西	0.752	0.756	0.994	宁夏	0.502	0.832	0.618
福建	0.892	0.942	0.946	辽宁	0.735	0.815	0.904	东部	0.906	0.966	0.937
浙江	0.838	0.889	0.94	湖南	0.696	0.726	0.957	中部	0.736	0.775	0.954
新疆	0.827	0.855	0.964	四川	0.688	0.729	0.945	西部	0.713	0.796	0.898

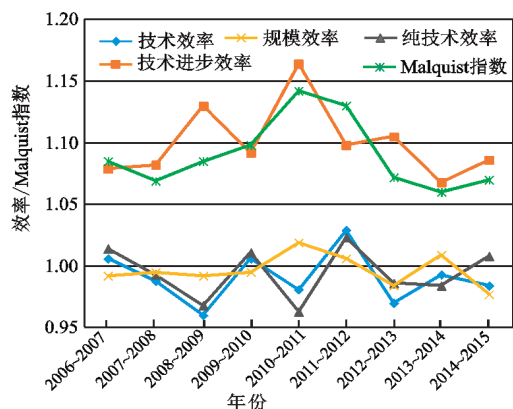


图2 2006~2015年中国工业生态效率 Malmquist 指数变动趋势

Fig.2 The change trend of the Malmquist index of China's inter-provincial industrial ecological efficiency in 2006-2015

的省市集中在西部地区,增长率低的省市则集中在东中部地区,呈现出与静态效率相反的空间分布格局。这主要是因为东中部地区开发时间早,工业化水平高,在管理、技术、规模等方面已趋于完备,提高空间有限,而西部地区由于开发较晚,工业化、现代化程度较低,在技术、管理、教育、规模等方面仍有广阔的提高空间,加上国家西部大开发战略的支持,使其 Malmquist 指数增长率有一个较快的增幅。此外,30个省市技术进步效率均为正,且增长率高,而技术效率、纯技术效率、规模效率的增长率偏低,很多省市甚至出现负增长,再次说明技术进步效率是 Malmquist 指数增长的主要推动力。

3 工业生态效率空间自相关分析

利用 2006~2015 年中国 30 省市工业生态效率,在一阶 rook 空间矩阵的基础上,运用 GeoDa1.6 软件,计算 Moran's I 值。从表 4 可知 2006~2015 年间中国工业生态效率的全局 Moran's I 指数均为正,且均通过显著性水平检验,表明中国 30 省市工业生态效率存在显著的正向空间自相关,高(低)相邻省际单元相对集聚,呈现出很强的空间集聚模式。同时,2006~2015 年 Moran's I 值出现微弱增长,且期间出现较大波动,则说明中国省际工业生态效率空间相关显著性虽有所增强,但分布格局还不太稳定,易发生变动。

为更好体现中国省际工业生态效率的空间集聚状态及变化特征,结合 Moran 散点图,利用 Arc-GIS 软件绘制代表性年份的 Moran 散点空间分布图(图 3)。

从图 3 可知,位于 H-H 象限的省市集中在东部地区,如北京、上海、福建,随着时间推移该象限地区范围逐渐扩展至东北地区。位于 L-L 象限的省市数量众多,集中在西部地区,如陕西、四川、贵州,随着时间推移该象限地区范围有向中部地区扩散的趋势。位于 H-L 象限的省市数量少,呈零星分散状态,如内蒙古、河南、广东,并未形成明显扩散趋势。位于 L-H 象限的省市开始集中在中部地区,如山西、安徽、江西,随着时间推移该象限范围逐渐向东部地区转移。可以看出,东部和西部地区表现出相似的空间关联性(“高-高”或“低-

表3 中国省际工业生态Malmquist指数及分解结果

Table 3 China's inter-provincial industrial ecological efficiency Malmquist index and decomposition results

省份	技术效率	技术进步效率	纯技术效率	规模效率	Malmquist效率指数	省份	技术效率	技术进步效率	纯技术效率	规模效率	Malmquist效率指数
辽宁	1.017	1.118	1.025	0.992	1.137	湖南	0.988	1.094	0.996	0.992	1.081
天津	1.000	1.124	1.000	1.000	1.124	安徽	0.984	1.097	0.983	1.001	1.080
内蒙古	1.000	1.123	1.000	1.000	1.123	湖北	0.970	1.114	0.988	0.982	1.080
甘肃	1.004	1.116	1.007	0.998	1.121	广西	0.972	1.111	0.971	1.001	1.080
陕西	1.013	1.098	1.013	1.000	1.112	江苏	0.995	1.084	1.000	0.995	1.079
青海	1.000	1.107	1.000	1.000	1.107	河北	0.966	1.115	0.988	0.978	1.077
海南	0.999	1.106	1.000	0.999	1.106	广东	1.000	1.073	1.000	1.000	1.073
山西	1.005	1.100	1.005	1.000	1.105	福建	0.988	1.082	1.000	0.988	1.069
河南	0.993	1.109	1.001	0.992	1.101	重庆	0.985	1.084	0.985	1.000	1.068
吉林	1.014	1.084	1.011	1.002	1.099	浙江	0.961	1.109	0.983	0.979	1.066
宁夏	0.981	1.116	0.957	1.026	1.095	上海	0.998	1.061	1.000	0.998	1.059
四川	1.003	1.090	1.019	0.985	1.094	江西	0.979	1.081	0.976	1.003	1.058
贵州	0.974	1.122	0.983	0.991	1.093	新疆	0.953	1.105	0.959	0.993	1.052
黑龙江	1.000	1.093	1.000	1.000	1.093	均值	0.990	1.100	0.994	0.996	1.090
山东	1.000	1.093	1.000	1.000	1.093	东部	0.993	1.095	1.000	0.994	1.088
云南	0.973	1.117	0.976	0.997	1.087	中部	0.992	1.097	0.995	0.997	1.087
北京	1.000	1.084	1.000	1.000	1.084	西部	0.987	1.108	0.988	0.999	1.094

表4 2006~2015年中国省际工业生态效率的Moran's I检验

Table 4 Moran's I test of China's inter-provincial industrial ecological efficiency in 2006-2015

年份	Moran's I	Z值	P值	年份	Moran's I	Z值	P值
2006	0.2172	2.0300	0.0360	2011	0.2900	2.8303	0.0050
2007	0.2774	2.6464	0.0070	2012	0.1177	1.3371	0.0980
2008	0.3231	2.9812	0.0060	2013	0.2414	2.4640	0.0130
2009	0.3612	3.1835	0.0050	2014	0.2359	2.3488	0.0150
2010	0.3695	3.2529	0.0040	2015	0.2196	2.1692	0.0190

低”),而中部地区则表现出非相似的空间关联性(“低-高”或“高-低”),这说明中国省际工业生态效率的空间依赖性与差异性并存,但以空间依赖性为主。

4 工业生态效率影响因素分析

4.1 模型选择

空间计量模型主要分为空间滞后模型和空间误差模型两类。在实证研究中可以通过LM检验来判断具体模型的选择,本文通过MATLAB软件对2006~2015年中国30省市面板数据进行检验。通过LM检验可知,LM-lag、LM-err系数分别为9.281 7和13.642 9,均通过1%下的显著性水平检验,且LM-err值大于LM-lag值,同时Robust-LM-err系数为4.943 5,通过了在5%下的显著

性水平检验,而Robust-LM-lag系数为0.582 3,未通过显著性水平检验,因此根据Anselin判别准则^[26],本文选择空间误差模型。在此基础上,本文分别对无固定效应、空间固定效应、时间固定效应、时空双固定效应及随机效应这5种情况下的空间误差模型进行检验,通过对比分析选取其中最为合理的模型,表5为5种效应的检验结果。可以看出,时空双固定效应的空间误差模型的判定系数和Log-L值分别为0.964 2、575.429 2均高于其他4种效应,因此,本文采用时空双固定空间误差模型分析中国省际工业生态效率的影响因素。

4.2 工业生态效率空间计量结果分析

根据表5中时空双固定效应估计结果显示, λ 值显著为正,且通过1%的显著水平检验,说明中国省际工业生态效率存在较强的空间集聚现象,印证了空间因素在模型设定中的必要性和科学性。具体来看经济发展水平、产业集聚、技术进步、外商投资均通过显著性检验,且都显著为正。其中产业集聚和外商投资的系数分别为0.295 6和0.025 3,在1%的显著性水平下通过检验,技术进步系数为0.028 6,在5%的显著性水平下通过检验,经济发展水平系数为0.113 3,在10%的显著性水平下通过检验。经济发展水平系数显著为正,人均GDP每提高1%,能促进工业生态效率提高

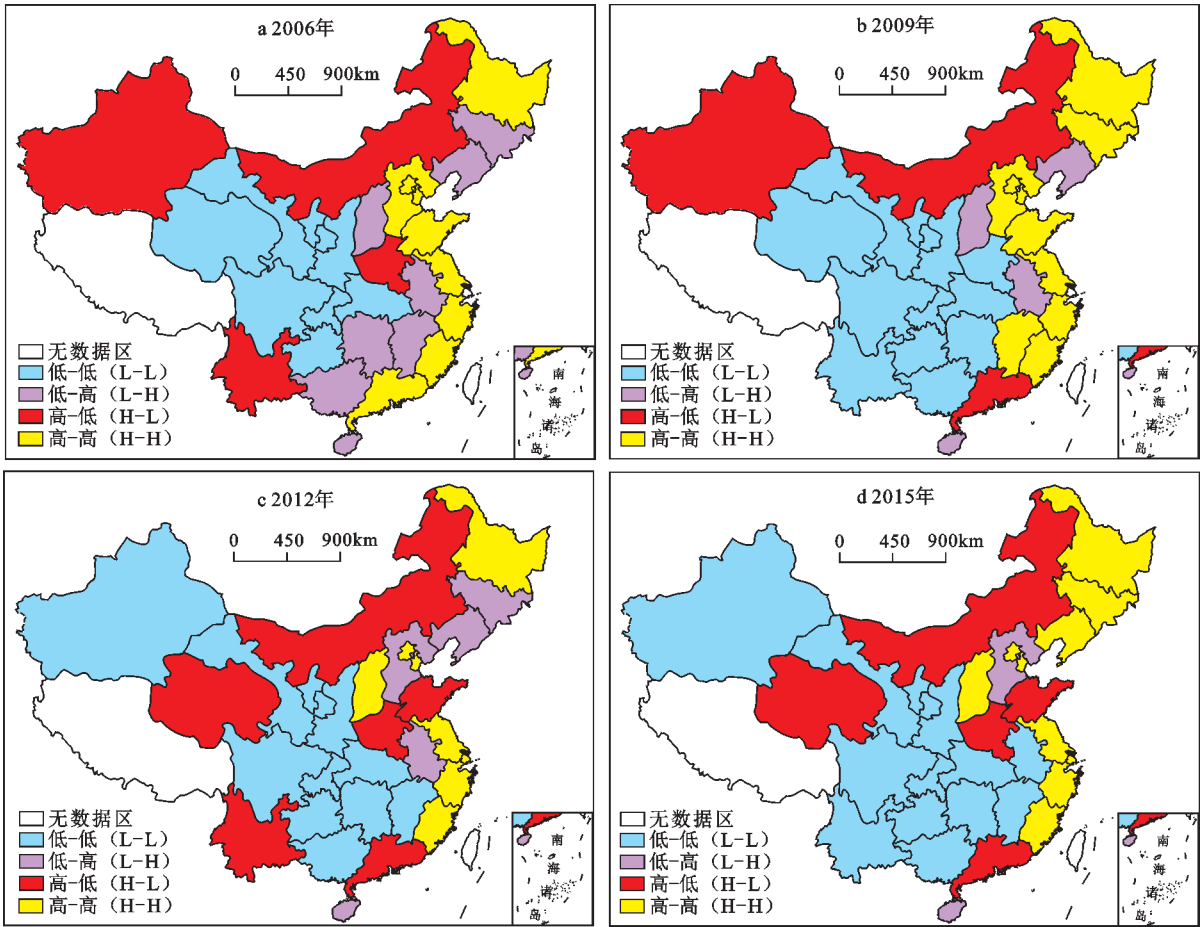


图3 中国省际工业生态效率Moran's I散点空间分布

Fig.3 Chinese inter-provincial industrial ecological efficiency Moran's I spatial distribution of scatter

表5 SEM模型估计及检验

Table 5 Estimation and test of SEM model

变量	无空间效应	空间固定效应	时间固定效应	双固定效应	随机效应
lnGDP	-0.0045(-0.2595)	-0.0718**(-2.1989)	0.0276(1.4670)	0.1133*(1.7297)	-0.0554*(-1.8720)
lnAGG	0.0750(0.8302)	0.3491*** (4.0544)	0.1949** (2.0681)	0.2956*** (3.1730)	0.2348*** (2.9109)
lnIS	-0.4162***(-4.5673)	-0.0783(-1.5407)	-0.5736***(-5.7288)	-0.1594***(-2.7114)	-0.0585(-1.1677)
lnOPEN	0.0660*** (7.9470)	-0.0105(-1.3110)	0.0363*** (3.5367)	-0.0102(-1.3655)	0.0004(0.0630)
lnGR	-0.0363***(-3.3549)	-0.0099*(-1.8990)	-0.0307***(-2.5977)	-0.0115**(-2.0178)	-0.0109**(-2.1104)
lnTP	-0.0123(-1.2295)	0.0094(0.8875)	0.0221*(1.7160)	0.0286** (2.4129)	0.0079(0.7945)
lnFDI	0.0354*** (2.7925)	0.0307*** (4.4858)	0.0305** (2.4690)	0.0253*** (3.6698)	0.0323*** (4.6768)
λ	-0.4632***(-5.2806)	0.2587*** (3.4696)	-0.4615***(-5.2604)	0.3182*** (4.4462)	0.2077** (2.5653)
R^2	0.4972	0.9618	0.5487	0.9642	0.9587
log-likelihood	188.4538	565.2325	204.1590	575.2492	466.2652

注: *、**、***分别表示10%、5%、1%的水平上显著,括号内数字为t值。

0.113 3%。一方面,经济发展水平高的地区,政府治污资金投入量大,工业企业的生产技术与工艺也更为清洁环保,有利于工业生态效率的提升。另一方面,高收入水平带来的是与之匹配的高素

质劳动力、高效率管理及高要求的“生态环境质量”,这些正好为提升工业生态效率提供了人才、技术、管理方面的保证。外商投资系数显著为正,外商投资占比每上升1%,工业生态效率就会提高

0.025 3%。外商投资拥有先进的理念、节能减排技术及绿色管理经验,并能够形成有效的技术、知识溢出效应,为地区、企业强化环保意识、提升节能减排技术、培养绿色环保人才提供助力。同时,越来越多的省市开始重视外资质量,积极引进科技含量高、节能环保型的绿色外资,停止引进高污染、高消耗的褐色外资,绿色外资数量的增加,也有利于工业生态效率的改善。技术进步显著为正,技术进步水平每上升1%,工业生态效率就会提高0.028 6%。技术进步的增强有利于创新和改进生产工艺、利用技术以及节能减排技术,以此来提升工业生态效率。产业集聚显著为正,产业集聚水平每上升1%,工业生态效率就会提高0.295 6%。一方面产业集聚使资源、技术、基础设施得到集中配置,既能降低成本,又使相关政策、措施、经验得到广泛普及,间接提升了工业生态效率。另一方面,产业集聚产生的技术溢出,使绿色生产工艺、节能减排技术得以快速推广,从而改善工业生态效率。

产业结构、政府规制通过显著性检验,显著为负。其中产业结构系数为-0.159 4,在1%的显著性水平下通过检验,政府规制系数为-0.011 5,在5%的显著性水平下通过检验。具体来看,产业结构系数显著为负,第二产业比重每上升1%,工业生态效率就能下降0.159 4%。由于第二产业中包含大量高耗能、高污染的重工业行业,这些行业大都采用粗放式发展,资源浪费、环境污染现象严重。因此,地区第二产业比重越高,意味着各种污染物排放量的增加和生态环境的恶化,也就越不利于工业生态效率的提升。政府规制系数显著为负,政府规制水平每上升1%,工业生态效率就能下降0.011 5%。从理论上讲,政府可以通过相关手段来改善经济主体因市场盲目性、非理性以追求利益最大化的特点所造成的生态环境问题,但根据回归结果表明,工业生态效率并没有随着政府规制强度的加强而得以提升。究其原因,一是因为环境治理投资具有“被动性”,企业盲目追求经济利益,忽视生态环境,无法很好的落实政府驱动下的工业污染治理措施及政策。二是因为中国工业污染治理投资与发达国家相比,仍长期处于较低水平,政府规制的强度和力度都不够。对外开放程度系数为-0.010 2,呈负相关,但未通过显著性检验,说明对外开放对工业生态效率的影响不显著。

5 结论与建议

本文基于2006~2015年中国30省市的面板数据,利用DEA-BCC模型结合Malmquist指数模型对中国30省市的工业生态效率进行分析,以此为基础,运用空间自相关方法,分析工业生态效率的空间特性,最后基于空间误差模型,探讨中国工业生态效率的主要影响因素。得出以下结论:①从静态效率测算结果来看,2006~2015年间中国工业生态效率虽呈现小幅度下降趋势,但整体效率水平较高。30省市工业生态效率存在明显差异性,仅有北京、天津、山东、广东、内蒙古、黑龙江6省市工业生态效率值达到1,其他省市均存在不同程度无效率状态,总体呈现出东部>中部>西部的分布格局。②从动态测算结果来看,2006~2015年中国工业生态效率Malmquist指数增长率水平高,但整体趋势不够稳定,上下波动明显。中国30省市Malmquist指数均为正向增长,增长趋势稳定,并呈现出与静态效率相反的空间分布格局。技术进步效率均为正,且增长率水平高,是Malmquist指数增长率的主要推动力。③从空间自相关分析结果来看,中国30省市工业生态效率呈现正向空间自相关性,但分布格局不够稳定,易发生变动。同时,中国30省市工业生态效率在空间上存在明显的集聚状态,其中,东部沿海省市主要体现为“H-H”集聚,西部地区省市体现“L-L集聚”,中部地区省市则主要表现为“H-L”和“L-H”集聚。④从空间计量估计结果来看,中国工业生态效率分别受到经济发展水平、产业结构、政府规制、技术进步、外商投资和产业集聚影响,其中经济发展水平、技术进步、外商投资、产业集聚与工业生态效率呈显著正相关,产业结构和政府规制与工业生态效率呈显著负相关。

基于以上结论,本文提出如下建议:①坚持走新型工业化道路,尽快摒弃高消耗、高污染的粗放式工业发展模式,积极向集约型绿色可持续发展模式转变,既要提升和改善工业发展质量,又要加强对生态环境的保护治理,做到工业发展和生态文明两手抓、两手硬,以此实现工业发展与环境保护之间的双赢。②优化产业结构,降低重工业比重,提高产业关联度高、附加值大的工业比重,倡导发展高、精、尖产业及绿色产业,逐步降低工业对化石能源的依赖性,积极引导水能、风能、太阳能等清洁能源为工业生产服务。③政府应通过税收等政策鼓励

工业企业加大研发投入,强化生产工艺、技术、设备等方面的研发及改造力度。工业企业则应自觉加大科研投入,提高自身研发和创新能力,积极引进国内外先进的生产工艺、技术设备、管理经验,促进技术、知识的有效溢出。④ 政府应加大工业污染治理投资规模,加强对工业污染治理投资的监督,确保投入资金被高效利用。同时,还要积极转变生态环境治理路径,推进工业源头治理,尽量避免先污染后治理的末端治理,加强环境规制执行力度,使工业污染物从源头就能得到有效控制。

参考文献(References):

- [1] Schaltegger S, Sturm A. Ökologische rationalität: Ansatzpunkte zur ausgestaltung von ökologieorientierten management instrumenten[J]. Die Unternehmung, 1990, 44(4):273-290.
- [2] 王恩旭,武春友. 基于超效率DEA模型的中国省际生态效率时空差异研究[J]. 管理学报, 2011, 8(3):443-450.[Wang Enxu, Wu Chunyou. Spatial-temporal differences of provincial eco-efficiency in China based on the super efficiency DEA model. Chinese Journal of Management, 2011, 8(3):443-450.]
- [3] 陈傲. 中国区域生态效率评价及影响因素实证分析——以2000-2006年省际数据为例[J]. 中国管理科学, 2008, 16(S1):566-570.[Chen Ao. Empirical analysis of the evaluation of regional ecology efficiency and influential factors in China: Evidences from provincial data during 2000-2006. Chinese Journal of Management Science, 2008, 16(S1):566-570.]
- [4] 邓波,张学军,郭军华. 基于三阶段DEA模型的区域生态效率研究[J]. 中国软科学, 2011(1):92-99.[Deng Bo, Zhang Xuejun, Guo Junhua. Research on ecological efficiency based on Three-Stage DEA model. China Soft Science, 2011(1):92-99.]
- [5] 付丽娜,陈晓红,冷智花. 基于超效率DEA模型的城市群生态效率研究——以长株潭“3+5”城市群为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 152(4):169-175.[Fu Lina, Chen Xiaohong, Leng Zhihua. Urban agglomerations eco-efficiency analysis based on super-efficiency DEA model: Case study of “Chang-Zhu-Tan” 3+5” urban agglomeration. China Population, Resources and Environment, 2013, 152(4):169-175.]
- [6] 黄雪琴,王婷婷. 资源型城市生态效率评价[J]. 科研管理, 2015, 36(7):70-78.[Huang Xueqin, Wang Tingting. An assessment for the eco-efficiency of resource-based cities. Science Research Management, 2015, 36(7):70-78.]
- [7] Zhang B, Bi J, Fan Z et al. Eco-efficiency analysis of industrial system in China: A data envelopment analysis approach[J]. Ecological Economics, 2008, 68(1):306-316.
- [8] 王宝义,张卫国. 中国农业生态效率测度及时空差异研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(6):11-19.[Wang Baoyi, Zhang Weiguo. A research of agricultural eco-efficiency measure in China and space-time differences. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(6):11-19.]
- [9] 程晓娟,韩庆兰,全春光. 基于PCA-DEA组合模型的中国煤炭产业生态效率研究[J]. 资源科学, 2013, 35(6):180-187.[Cheng Xiaojuan, Han Qinglan, Quan Chunguang. The ecological efficiency of the coal industry based on PCA and DEA modeling [J]. Resources Science, 2013, 35(6):180-187.]
- [10] 姚治国,陈田. 旅游生态效率模型及其实证研究. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(11):113-120.[Yao Zhiguo, Chen Tian. Tourism-meco-efficiency model and an empirical research[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(11):113-120.]
- [11] 武春友,孙源远. 基于生态承载力的工业园区生态效率评价研究[J]. 管理学报, 2009, 6(6):751-754.[Wu Chunyou, Sun Yuanyuan. Study on ecological efficiency evaluation of industrial park based on ecological carrying capacity. Chinese Journal of Management, 2009, 6(6):751-754.]
- [12] Kuosmanen T, Kortelainen M. Measuring eco-efficiency of production with data envelopment analysis[J]. Journal of Industrial Ecology, 2005, 9(4):59-72.
- [13] Huang H. Eco-efficiency on the circular economy development pattern in Jiangxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(9):2894-2901.
- [14] 王震,石磊,刘晶茹. 区域工业生态效率的测算方法及应用[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(6):121-126.[Wang Zhen, Shi Lei, Liu Jingru. Methodology and application of eco-efficiency analysis on regional industry. China Population, Resources and Environment, 2008, 18(6):121-126.]
- [15] 杨佳伟,王美强. 基于非期望中间产出网络DEA的中国省际生态效率评价研究[J]. 软科学, 2017, 31(2):92-97.[Yang Jiawei, Wang Meiqiang. Research on the provincial eco-efficiency evaluation based on Network SEA model with undesirable intermediate Outputs. Soft Science, 2017, 31(2):92-97.]
- [16] 吴振华,唐芹,王亚蓓. 江浙沪地区城市建设用地生态效率评价——基于三阶段DEA与Bootstrap-DEA方法[J]. 生态经济, 2016, 32(4):105-110.[Wu Zhenhua, Tang Qin, Wang Yabei. Evaluation of ecological efficiency of urban construction land in “Jian-gu-Zhe-Hu” Area: Based on Three-Stage DEA and Bootstrap-DEA methods[J]. Ecological Economy, 2016, 32(4):105-110.]
- [17] 汪克亮,黄晴晴,孟祥瑞. 基于环境压力的矿业城市工业生态效率[J]. 系统工程, 2017, 35(2):36-44.[Wang Kelian, Huang Qingqing, Meng Xiangrui. The industrial eco-efficiency of China's mining cities based on environmental pressure. Systems Engineering, 2017, 35(2):36-44.]
- [18] 潘兴侠,何宜庆. 工业生态效率评价及其影响因素研究——基于中国中东部省域面板数据[J]. 华东经济管理, 2014, 28(3):33-38.[Pan Xingxia, He Yiqing. A study on evaluation of industrial eco-efficiency and its influencing factors based on provincial panel data in central and east China. East China Economic Management, 2014, 28(3):33-38.]
- [19] 杨亦民,王梓龙. 湖南工业生态效率评价及影响因素实证分析——基于DEA方法[J]. 经济地理, 2017, 37(10):151-156.[Yang Yimin, Wang Zilong. The empirical analysis of Hunan industrial ecological efficiency evaluation and influencing factors: Based

- on DEA method. *Economic Geography*, 2017, 37(10): 151-156.]
- [20] 郭露, 徐诗倩. 基于超效率DEA的工业生态效率——以中部六省2003~2013年数据为例[J]. *经济地理*, 2016, 36(6): 116-121. [Guo Lu, Xu Shiqian. Industrial eco-efficiency with the integration super efficiency DEA: The central six provinces 2003-2013 data as an example. *Economic Geography*, 2016, 36(6): 116-121.]
- [21] 卢燕群, 袁鹏. 中国省域工业生态效率及影响因素的空间计量分析[J]. *资源科学*, 2017, 39(7): 1326-1337. [Lu Yanqun, Yuan Peng. Measurement and spatial econometrics analysis of provincial industrial ecological efficiency in China. *Resources Science*, 2017, 39(7): 1326-1337.]
- [22] Charnes A, Cooper W W, Rhodes. Measuring the efficiency of decision making units[J]. *European Journal of Operational Research*, 1978, 2(6): 429-444.
- [23] Banker R D, Charnes A, Cooper W W. Some models for estimation technical and scale inefficiencies in data envelopment Analysis[J]. *Management Science*, 1984, 30: 1078-1092.
- [24] Fare R, Grosskopf S, Sorris M. Productivity growth, technical progress and efficiency change in industrialized countries[J]. *American Economic Review*, 1994, 84: 66-83.
- [25] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics[J]. *Geographical Analysis*, 1992, 24(3): 189-206.
- [26] Anselin L, Florax R, Rey S J. Advanced in spatial econometrics: Methodology tools and applications[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2004.
- [27] 成金华, 孙琼, 郭明晶. 中国生态效率的区域差异及动态演化研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(1): 47-54. [Cheng Jinhua, Sun Qiong, Guo Mingjing. Research on regional disparity and dynamic evolution of eco-efficiency in China. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(1): 47-54.]
- [28] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007-2016. [National Bureau of Statistics of China. *China statistical yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2007-2016.]
- [29] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007-2016. [Energy Statistics Division of the National Bureau of Statistics. *China energy statistical yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2007-2016.]
- [30] 国家统计局工业统计司. 中国工业统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007-2016. [Industrial Statistics Division of the National Bureau of Statistics. *China industry statistical yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2007-2016.]
- [31] 吴琦. 中国省域能源效率评价研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010. [Wu Qi. Research on provincial energy efficiency evaluation in China. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.]

Spatial Distribution Characteristics and Influencing Factors of China's Inter Provincial Industrial Eco-efficiency

Li Chengyu¹, Zhang Shiqiang^{1,2}, Zhang Wei²

(1. College of Economics and Management, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China;
2. Institute of Green Development, University of Jinan, Jinan 250022, Shandong, China)

Abstract: Taking 30 provinces and cities of China as research objects, the spatial distribution and influencing factors of inter provincial industrial eco-efficiency are studied. The article sets up the evaluation index system of Chinese provincial industrial eco-efficiency. Combined with the Malmquist index model, the DEA-BCC model is used to measure the industrial eco-efficiency spatio-temporally in 2006-2015. And Goda software is used to analyze the spatial distribution characteristics of industrial ecological efficiency. Finally, the influencing factors of China's industrial eco-efficiency is examined through the spatial error model. The results show that: 1) China's industrial eco-efficiency, although showing a slight downward trend, but the overall high level of efficiency; there are obvious differences between the 30 provinces, showing a distribution pattern of the eastern > Central > West. 2) China's industrial eco-efficiency Malmquist index higher growth rates; Malmquist index of 30 provinces and cities are positive growth, showing a steady growth trend; improve efficiency technology is the main driving force Malmquist Index. 3) China 30 provinces and industrial eco-efficiency presents a positive spatial autocorrelation, and there is a significant gathering state, the neighbor effect is significant. 4) The level of economic development, industrial structure, government regulations, technological progress, foreign investment, and industrial agglomeration are the main factors affecting the eco-efficiency of the provinces.

Key words: industrial ecological efficiency; BCC model; Malmquist index