

引用格式: 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 Y Q Yuan P. Measurement and spatial econometrics analysis of provincial industrial ecological efficiency in China[J]. *Resources Science*, 2017, 39(7): 1326-1337.] DOI: 10.18402/resci.2017.07.10

中国省域工业生态效率及影响因素的空间计量分析

卢燕群, 袁 鹏

(西南财经大学工商管理学院, 成都 611130)

摘 要: 本文采用 VRS_DEA 模型测算了 2005-2014 年间中国 30 个省域的工业生态效率, 并在此基础上采用空间计量模型检验其影响因素。测算结果表明: 研究期间, 中国大部分省域的工业生态效率呈现波动上升的趋势, 省际差异明显, 呈现出自西向东逐渐增强的空间发展格局。实证检验发现: 工业发展和科技创新对工业生态效率具有正向促进作用; 而环境规制、对外开放与财政分权的影响显著为负; 产业集聚与工业生态效率呈现“倒 U”型关系; 由于高污染行业所带来的污染排放与经济效益并存, 导致工业结构对工业生态效率的影响不显著, 但并不能由此忽略工业结构变化带来的环境污染问题。此外, 在空间交互作用方面, 工业生态效率的空间滞后项系数显著为正, 表明地方政府可能在环境治理方面具有互相借鉴与模仿的行为; 工业发展水平的二次项具有正向的空间溢出效应; 财政分权与工业结构的空间溢出效应显著为负; 产业集聚的空间滞后项与工业生态效率呈现“正 U”型关系, 因此对相邻地区工业生态效率的影响呈现先抑制后提升的关系。

关键词: 工业生态效率; 数据包络模型; 空间效应; 空间计量

DOI: 10.18402/resci.2017.07.10

1 引言

改革开放以来, 中国工业经济规模不断攀升, 工业增加值从 1978 年的 1602 亿元增长到 2014 年的 72 165 亿元(按 1978 年不变价格折算), 成为推动中国经济飞速发展的引擎。总体而言, 中国已经完成从建国初期的农业大国向工业体系较为完善的工业大国的历史性转变。然而, 中国工业发展主要依赖高投入、高消耗和高污染排放的传统增长模式, 资源过度消耗、环境污染和生态失衡等问题日益加剧, 已成为制约中国工业进一步发展的重要因素。不转变这种粗放型的发展模式, 中国将难以实现从工业大国向工业强国转变的目标。

从包括中国在内的各国经验来看, 在工业化初期, 由于技术水平落后, 经济资源总量有限, 不得不以牺牲环境为代价来换取经济增长。但是, 随着工业化的深入, 经济系统的良性循环使得人类可以将

更多的技术、资源用于改善和保护生态环境, 而良好的生态环境使得资源的再生能力可以满足经济增长的需要, 实现经济与生态环境的良性互动。当前, 中国正处于工业转型升级的关键阶段, 如何处理好工业发展与生态环境之间的关系, 提高经济发展过程中的生态效率是亟需解决的重要问题。党的十八大报告对生态文明建设进行了专题论述, 强调要把生态文明建设摆在总体布局的高度来对待。这就要求要把经济发展与环境割裂开来的传统增长模式彻底摒弃, 在经济社会生产、消费、流通等各个环节以更小的资源环境消耗产生更大的经济效益, 同时将更多的资源运用于环境治理, 实现工业发展与生态环境承载能力相协调, 切实提高工业生态效率。因此, 研究中国工业的生态效率及其影响因素, 对于制定污染减排政策, 转变工业发展模式, 促进工业与生态环境协调发展, 实现建设生

收稿日期: 2016-09-20; 修订日期: 2017-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(71203018); 中央高校基金项目(JBK160110); 中央高校基金项目(JBK1607036)。

作者简介: 卢燕群, 女, 四川宜宾人, 博士生, 主要研究方向为产业发展理论与政策。E-mail: luyanqun666@163.com

通讯作者: 袁鹏, E-mail: ypfeyu@swufe.edu.cn

2017年7月

态文明的目标具有重要的现实意义。

2 文献回顾

生态效率的概念最早由 Schaltegger 等于 1990 年提出,用于衡量经济活动的环境绩效^[1]。1992 年,世界可持续发展工商业联合会(WBCSD)对其概念进行了推广界定,即“在提供有价格竞争优势的产品和服务以满足人的基本需求和提升生活质量的同时,在全生命周期内逐步减少产品的环境影响和资源的消耗强度,使之至少达到与估算的地球承载力相一致的水平”^[2]。生态效率的概念强调资源与环境相协调的绿色发展,旨在创造价值的同时降低对环境造成的负面影响。国际经济合作与发展组织(OECD)将生态效率定义为“为符合人类需求而使用生态资源的效率”^[3]。因此,可将生态效率视为经济产出与环境投入的比值,产出指所有满足人类需求的合意产出,而经济系统产生的污染物、对环境造成的压力即负面影响等非合意项即可视为环境投入。提升生态效率就是要提高资源利用效率,尽可能地降低环境投入而最大化经济产出,实现经济的可持续发展。

学者对环境问题关注已久,较为普遍的做法是构建一个考虑环境质量的绿色生产率的综合指标,这类研究基于生产理论将环境污染作为非期望产出,纳入生产技术效率的评估模型中,对环境约束下资源的利用效率进行研究^[4-5]。这类研究的主要特点是将环境投入与其他经济资源同时纳入环境全要素生产率的计算与研究中,不能将生态效率区分出来进行独立分析。而生态效率将环境要素作为投入指标,直接计算经济增长与环境投入之间的变化关系,能对环境问题进行更直接、更有针对性的分析。

生态效率的提出为研究经济增长和环境问题提供了科学的评判标准^[6],引发了学者的关注与研究。最早,生态效率在国外被用于衡量企业运营的生态环境绩效^[7],但由于环境污染具有很强的外部性,如果仅从企业层面出发,生态环境问题难以得到有效解决。因此,生态效率的研究则更多地转向产业层面以及区域较为宏观的层面,国外研究也大部分集中于工业园区、城市、区域甚至国家等几个层面^[8,9]。随着中国环境问题的加速恶化,中国的生

态效率问题也吸引了大量研究。其中,大多数研究围绕生态效率的测算进行实证分析。这类研究所采用的技术方法大致分为两类:第一类是通过建立相应的指标体系,构建生态效率的综合指数^[10,11],这类研究的关键问题是要对各项污染物指标进行科学赋权,难点在于指标权重的确定具有主观性和随意性;第二类是采用数据包络方法(DEA)对生态效率进行测算^[12,13],这类研究通过内生最优权重可以对非价格指标以及难以主观确定权重的指标进行分析,避免了主观赋权的随意性,但由于 DEA 模型的参数设置略有不同,所得结果也存在一定差异。

由于不同的时间截面生产技术存在很大差异,仅从空间位置的维度对生态效率进行静态评估并不能反映其动态变化。为此,杨文举将生态效率的测算从静态分析推广到了动态分析层面,认为生态效率变化主要来自于希克斯中性技术进步与相对生态效率恶化^[14]。张子龙等则通过对工业生态效率的动态变化进行研究,发现工业生态效率在不同的地理位置上存在很大的差异性,且空间差异存在“收敛效应”^[15]。随着空间统计学的广泛应用,成金华等采用空间探索分析方法对生态效率的区域差异和空间关联模式进行了分析^[16]。

综上所述,针对中国生态效率的研究已较为丰富。然而,已有研究普遍存在的局限在于没有考虑生态效率及其影响因素的空间效应问题。虽然成金华等对生态效率的空间效应进行了探索性统计分析,但尚未有文献建立空间面板计量模型对其影响因素进行检验^[16]。Anselin、Cliff 等认为经济现象存在高度的区域互动性,空间效应的存在使得某一区域的工业生态效率不仅受自身经济变量的影响,还会受到相邻区域的经济变量影响,因此,工业生态效率在地理空间上可能并不服从独立随机分布,忽略空间效应的传统计量模型对影响因素的检验将会出现偏差^[17,18]。

鉴于此,本文首先利用规模报酬可变的数据包络分析法构建工业生态效率评价模型,对 2005-2014 期间中国省域工业生态效率进行测算。在此基础上,为避免传统计量模型处理空间效应的局限性,采用空间计量模型对工业生态效率的影响因素进行了检验。

3 工业生态效率测算

3.1 生态效率的测算方法

根据 WBCSD 和 OECD 对生态效率的定义,生态效率度量了某一企业、产业或区域创造单位经济价值时对环境或生态系统造成破坏与影响的大小,表示如下^[2]:

$$EP = \frac{y}{\text{Environmental Pressure}} \quad (1)$$

式中 EP 为工业生态效率值; y 为经济价值; $\text{Environmental Pressure}$ 为对环境的影响,体现为环境污染排放造成的环境压力,加入污染权重以后,公式(1)可转化为:

$$EP_k = \frac{y_k}{f(p_{ik})} = \frac{y_k}{\sum_{i=1}^n w_i \times p_{ik}} \quad (2)$$

式中 EP_k 为第 k 个区域的生态效率值; y_k 为经济价值; p_{ik} 为第 k 个区域的第 i 种污染排放物; w_i 为权重。对于某一特定生产单元,要在既定技术水平下实现生态效率最大化,即:

$$\max \frac{y_k}{\sum w_i p_{ik}} \quad (3)$$

Kuosmanen 等提出了应用 DEA 模型对生态效率进行测算的思路^[19]。因此,本文在 DEA 框架下采用规模报酬可变的 DEA 模型(以下简称 VRS_DEA)对生态效率进行测算^[20]。假设有 n 个决策单元(DMU),每个决策单元产生的经济价值为 y_k ,有 m 种环境污染排放物 p ,则决策单元 k 的生态效率可用如下分数规划表示:

$$\begin{aligned} \max EP_k &= \frac{y_k}{\sum_{i=1}^m w_i p_{ik}} \\ \text{s.t.} \quad \frac{y_k}{\sum_{i=1}^m w_i p_{ik}} &\leq 1 \\ \sum_{i=1}^m w_i &= 1 \\ w_i &\geq 0 \\ i &= 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (4)$$

式中 EP_k 为工业生态效率,用环境投入与经济价值产出比表示;通过施加 $w_i > 0$ 的约束将生态效率值控制在 $[0, 1]$ 。公式(4)中目标函数和约束条件属于

非线性规划,将其进行线性化处理转化为对应的对偶模型:

$$\begin{aligned} \min \quad & \theta \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{j=1}^n \lambda_j p_{ij} + s_i^- = \theta p_{ik} \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j y_j - s^+ = y_k \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \\ & \lambda \geq 0 \\ & i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (5)$$

式中 λ 为决策单元的线性组合系数; s^- , s^+ 为松弛变量; θ 为生态效率的对偶值;模型的最优解为 θ^* , $1 - \theta^*$ 表示在不降低产出情况下,环境投入能缩减的最大程度,取值范围为 $(0, 1]$ 。 θ^* 取值越大表示生态效率越高,等于 1 表示被评价决策单元位于效率前沿面上;小于 1 则表示生态效率未达到有效率的状态。

3.2 数据来源与处理

本文选取工业增加值作为工业经济活动产生的经济价值指标,以工业废水、废气排放总量及固体废弃物的产生量作为生态压力指标,数据来源于 2006-2015 年间的《中国工业统计年鉴》^[21]和《中国统计年鉴》^[22]。为便于比较分析,选取了 2005-2014 年期间中国大陆 30 个省级地区作为研究样本(不包括港澳台数据,西藏数据缺失较多,也不包括在样本中)。为消除价格水平波动的干扰,以 2005 年为基期对工业增加值进行平减。以上 4 项指标的描述性统计见表 1。

3.3 测度结果分析

基于 VRS_DEA 测算模型,在测算过程中,采用了 DEA-Windows 模型处理面板数据的思路,将所有时期的样本汇总形成总的参考集进行效率测算,使效率值更具可比性^[4],结果见表 2。2005-2014 年

表 1 指标描述性统计

Table 1 Descriptive statistics

变量	最大值	最小值	均值	标准差
工业增加值/亿元	79 121	860	16 734	13 464
工业废水排放量/万 t	296 318	5 782	76 744	65 374
工业废气排放量/亿 m ³	45 625	127	8 047	7 528
固体废弃物产生量/万 t	24 224	156	5 108	4 793

2017年7月

期间,大部分地区的工业生态效率呈现出波动向上的趋势。在2005年,全国工业生态效率均值为0.475,0.70以上的仅有海南、广东、青海等3个省市;到2014年,全国工业生态效率均值增加到0.553,0.70以上的省市增至包括广东、北京、天津、上海、山东、青海、江苏、海南等在内的8个省市,这反映中国工业生态效率整体上正在逐步改善。从工业生态效率的年均值来看,排名前五位的地区依次广东、海南、北京、天津、青海,均超过了0.70,其中,除青海以外全部位于东部区域;排名后五位的地区为广

西、山西、云南、安徽、新疆,均位于中西部地区,工业生态效率年均值低于0.230(见表2)。

进一步地,本文按照《中国统计年鉴》^[22]将全国分为东部、中部、西部和东北四大区域,分析工业生态效率的区域差异及变化趋势,见图1。东部地区省市的工业生态效率高于全国平均水平,在波动变化中呈现逐步上升的趋势;中、西部地区省市的工业生态效率值相差不大,呈现上下交替变化发展趋势,整体水平偏低;东北地区省份的工业生态效率总体上呈现上升趋势。2009年以后,东部、东北地

表2 2005–2014年中国大陆30省市工业生态效率水平

Table 2 Industrial ecological efficiency of China's 30 provincial regions from 2005 to 2014

区域	省(市、区)	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	年均值
东北地区	辽宁	0.206	0.193	0.259	0.220	0.334	0.423	0.430	0.499	0.630	0.556	0.375
	吉林	0.412	0.429	0.466	0.494	0.474	0.494	0.451	0.521	0.590	0.653	0.498
	黑龙江	0.647	0.629	0.550	0.580	0.448	0.535	0.583	0.541	0.537	0.461	0.551
东部地区	北京	0.676	0.743	0.840	0.925	0.906	1.000	0.980	1.000	0.952	1.000	0.902
	天津	0.577	0.545	0.635	0.702	0.737	0.685	0.775	0.852	1.000	1.000	0.751
	河北	0.218	0.183	0.180	0.254	0.260	0.325	0.397	0.434	0.541	0.578	0.337
	上海	0.622	0.634	0.675	0.671	0.661	0.672	0.689	0.757	0.825	0.871	0.708
	江苏	0.527	0.514	0.610	0.631	0.646	0.629	0.488	0.557	0.651	0.735	0.599
	浙江	0.636	0.605	0.591	0.628	0.614	0.629	0.630	0.659	0.723	0.294	0.601
	福建	0.568	0.586	0.497	0.561	0.518	0.480	0.479	0.560	0.571	0.556	0.538
	山东	0.488	0.532	0.499	0.526	0.542	0.522	0.642	0.711	0.779	0.830	0.607
	广东	0.907	1.000	0.944	0.888	0.876	0.949	0.837	0.982	0.997	1.000	0.938
	海南	1.000	1.000	1.000	0.972	0.845	1.000	0.855	0.782	0.868	0.732	0.905
	内蒙古	0.284	0.263	0.315	0.298	0.320	0.297	0.339	0.457	0.462	0.448	0.348
西部地区	广西	0.232	0.245	0.201	0.248	0.240	0.263	0.155	0.175	0.245	0.297	0.230
	重庆	0.462	0.283	0.290	0.341	0.303	0.380	0.521	0.602	0.573	0.560	0.432
	四川	0.396	0.357	0.191	0.385	0.440	0.375	0.423	0.515	0.661	0.659	0.440
	贵州	0.430	0.447	0.520	0.546	0.475	0.463	0.331	0.297	0.308	0.231	0.405
	云南	0.340	0.307	0.276	0.290	0.264	0.270	0.179	0.220	0.221	0.227	0.259
	陕西	0.454	0.481	0.461	0.353	0.333	0.329	0.359	0.443	0.469	0.482	0.416
	甘肃	0.380	0.390	0.411	0.406	0.405	0.451	0.342	0.356	0.350	0.360	0.385
	青海	0.798	0.807	0.790	0.818	0.695	0.654	0.690	0.677	0.724	0.739	0.739
	宁夏	0.327	0.343	0.291	0.292	0.279	0.267	0.307	0.360	0.382	0.397	0.325
	新疆	0.375	0.376	0.357	0.363	0.314	0.300	0.275	0.262	0.229	0.239	0.309
	山西	0.249	0.194	0.218	0.231	0.227	0.202	0.257	0.246	0.251	0.243	0.232
中部地区	安徽	0.359	0.328	0.247	0.242	0.286	0.307	0.242	0.287	0.332	0.385	0.301
	江西	0.486	0.468	0.444	0.404	0.419	0.425	0.302	0.354	0.371	0.396	0.407
	河南	0.381	0.426	0.447	0.497	0.484	0.540	0.463	0.524	0.604	0.610	0.498
	湖北	0.333	0.326	0.376	0.388	1.000	0.467	0.342	0.448	0.484	0.474	0.464
	湖南	0.479	0.553	0.433	0.474	0.447	0.415	0.433	0.507	0.512	0.589	0.484
	全国平均	0.475	0.473	0.467	0.488	0.493	0.492	0.473	0.520	0.561	0.553	0.499

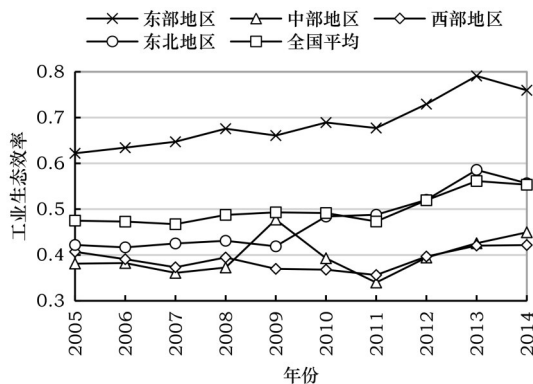


图1 2005–2014年工业生态效率平均值的变化趋势

Figure 1 Changes in average value of regional industrial efficiency from 2005 to 2014

区省份与中部和西部省份之间的工业生态效率发展差距较为稳定,而中部和西部省份工业生态效率基本处于相同水平。综上,中国工业生态效率的省域差异明显,呈现出自西向东逐渐加强的空间发展格局,这说明省域工业生态效率可能与地理位置之间存在显著的空间效应。因此,如果忽视地区之间的空间效应,可能导致影响因素的参数估计出现偏差,从而得出错误的结论。

4 影响因素设定与模型设定

4.1 影响因素设定

空间效应的存在使得研究样本不再满足高斯-马尔科夫经典假设,传统计量模型不再适用^[17]。本文参考相关文献,选取设定7项适用于空间面板计量模型的影响因素:工业发展水平、环境规制、对外开放、科技创新、财政分权、产业集聚与工业结构。

(1)工业发展水平(*IS*)。环境EKC理论认为,工业发展水平较低时,更多的资源被用于维持经济发展,但当发展到一定阶段时,可以将更多资源用于维持和保护生态环境^[23]。

(2)环境规制(*REGUL*)。环境污染具有外部不经济性,而环境保护作为公众需求具有非竞争性和非排他性^[24],依靠市场调节难以实现环境质量的持续改善,需要政府加以规范和调节。

(3)对外开放(*FDI*)。“污染避难所假说”认为污染密集型产业倾向于往环境规制标准较低的地区或国家转移,污染企业通过外资渠道会对东道主造成严重的环境污染^[25],但也有研究发现对外开放会引入先进技术,降低资源消耗,改善生态环境^[26,27]。

(4)科技创新(*R&D*)。创新可提高资源利用效

率,减少污染物排放。魏艳旭等^[28]证明通过降低单位GDP的能源消耗,间接降低了污染物的排放。

(5)财政分权(*FP*)。财政分权程度越高,地方政府处理经济事务的自主性越强,在晋升激励体制下,地方政府为实现经济增长可能会导致资源过度消耗和损害环境^[29]。

(6)产业集聚(*AGG*)。一方面集聚可能具有环境正外部性,可以通过规模效应和绿色技术溢出等途径提高资源利用效率;但另一方面,集聚具有较强的环境负外部性,可能会加剧资源的消耗^[30],造成环境污染问题。

(7)工业结构(*HP*)。产业结构的演化会引发环境质量的相应变化^[31],经济的现实发展也表明,不同行业的资源利用率及污染物排放存在较大差异,因此,工业结构的差异可能会影响区域的生态效率。

4.2 空间计量模型设定

通常地,空间计量的基本模型包括空间滞后(Spatial Lag Model, SLM)和空间误差模型(Spatial Error Model, SEM)两种^[17]。Lesage等提出了较为一般化的空间杜宾模型(Spatial Durbin Model, SDM),同时包含因变量与自变量的空间滞后项^[32]。实证研究中,可以通过Wald检验(Wald test_spatial lag、Wald test_spatial error)与LM检验(LM_spatial lag test, LM_spatial error test)判断应该采用何种模型。当Wald统计量显著时,选用SDM模型;Wald统计量不显著则依据LM统计量在SLM与SEM两种模型中选择;否则,应采用传统计量模型。考虑到特定情况下,SDM模型有可能退化为SLM或SEM模型。因此,首先构建了工业生态效率的SDM型,如下:

$$\begin{aligned}
 EP_{it} = & c_0 + \alpha_i + \beta_1 \ln(IS_{it}) + \beta_2 \ln^2(IS_{it}) \\
 & + \beta_3 REGUL_{it} + \beta_4 FDI_{it} + \beta_5 R\&D_{it} \\
 & + \beta_6 FP_{it} + \beta_7 AGG_{it} + \beta_8 AGG_{it}^2 AGG_{it}^2 \\
 & + \beta_9 HP_{it} + \rho \sum_j W_{ij} EP_{jt} + \eta_1 \sum_j W_{ij} \ln(IS_{jt}) \\
 & + \eta_2 \sum_j W_{ij} \ln^2(IS_{jt}) + \eta_3 \sum_j W_{ij} REGUL_{jt} \\
 & + \eta_4 \sum_j W_{ij} FDI_{jt} + \eta_5 \sum_j W_{ij} R\&D_{jt} \\
 & + \eta_6 \sum_j W_{ij} FP_{jt} + \eta_7 \sum_j W_{ij} AGG_{jt} \\
 & + \eta_8 \sum_j W_{ij} AGG_{jt}^2 + \eta_9 \sum_j W_{ij} HP_{jt} + \xi_{it} \\
 \xi_{it} = & \lambda \sum_j W_{ij} \xi_{jt} + \varepsilon_{it}
 \end{aligned} \quad (6)$$

2017年7月

式中 EP_{it} 为第 i 地区第 t 年的工业生态效率; c_0 与 α_i 分别为常数项与个体效应; IS 为工业发展水平, 定义为人均工业 GDP, 为减少异方差影响, IS 取对数, 为验证环境库 EKC 理论, 二次项 $\ln^2 IS$ 也进入方程; $REGUL$ 为环境规制, 用工业污染治理投资占工业 GDP 比重衡量; FDI 为对外开放, 以地区实际利用外资总额占 GDP 比重表示; $R \& D$ 为科技创新, 用地区研发支出占 GDP 比重衡量; FP 为财政分权程度, 定义为地方人均财政支出/(地方人均财政支出+中央人均财政支出)^[33]; AGG 为产业集聚水平, 采用区位熵计算, 定义^[34]为 $AGG = (X_{it}/X_t)/(Q_{it}/Q_t)$, 其中 X_{it} 为 i 地区第 t 年的工业 GDP, X_t 为第 t 年的全国工业 GDP, Q_{it} 为 i 地区第 t 年的地区 GDP, Q_t 为第 t 年的全国 GDP。已有研究表明, 产业集聚与环境污染并不呈现线性关系^[30, 34], 因此加入二次项 AGG^2 。 HP 为工业结构, 用污染物排放量较大的纺织、造纸、化学原料和化学制品制造、黑色金属加工以及电力等行业的工业产值比重衡量^[35]; W 为 $n \times n$ 的空间矩阵, 采用 Queen 标准构建 W , 即当区域共边或同顶点时 W_{ij} (表示矩阵 W 的第 i 行第 j 列, 用以表示两个区域的邻接关系) 等于 1, 否则为 0。 $\beta_1 - \beta_9$ 分别为各个变量的回归系数; ρ 为滞后被解释变量的回归系数; $\eta_1 - \eta_9$ 分别为各个滞后解释变量的回归系数; ξ 为随机误差项; ε 为空间误差项。

以上变量所需数据来自 2006-2015 年间的《中国环境统计年鉴》^[36]、《中国工业统计年鉴》^[21]、《中国统计年鉴》^[22] 以及《中国科技统计年鉴》^[37], 各变量的描述性统计见表 3。

4.3 回归结果分析

首先, 应用传统面板回归技术对工业生态效率

的影响因素进行检验, 并考察残差是否存在显著的空间效应。为便于比较, 本文给出了传统混合回归、个体固定与时间固定效应模型的估计结果, 见表 4。通过 F 检验发行个体固定效应更佳, 且拟合优度更高, 因此, 个体固定效应模型更为可靠。通过 LM 检验发现个体固定效应的 LM_spatial lag test 和 LM_spatial error test 的值均显著, 空间效应明显。进一步通过 Wald 检验发现 SDM 模型不能退化为 SLM 或 SEM 模型, 同时, SDM 模型的拟合优度最高。因此, 在本研究中, SDM 模型的估计结果最为可靠, 后文的分析将采用其估计结果(见表 4)。

(1) $\ln(IS)$ 的影响系数为正, 而 $\ln^2(IS)$ 的系数为负, 但并不显著, 意味着工业生态效率与工业发展呈现出并不明显的“倒 U”型关系。在相当长时期内, 中国工业经济呈现粗放型增长, 污染排放量不断增加^[38], 但当工业发展到一定阶段时, 工业经济的持续发展使得人类可以将更多资源用于治理和控制环境污染^[23]。因此, 在不同发展阶段, 工业发展与工业生态效率的关系不同。总体来看, 大部分省市的工业发展都处于“倒 U”型曲线的上升通道中, 这与环境 EKC 理论描述的环境偏好理论相吻合^[39]。 $\ln(IS)$ 空间滞后项系数为负, 但不显著, 而 $\ln^2(IS)$ 的空间滞后项系数显著为正, 表明工业发展到一定阶段时, 将有利于相邻地区的工业生态效率。

(2) $REGUL$ 系数显著为负。从理论上讲, 市场具有盲目性、非理性以及为了追求利益最大化都会导致经济主体对环境问题的忽视, 因此政府规制应该有利于改善环境。但从回归结果来看, 工业生态效率并没有随着规制强度的加强而得以提升。通过对李胜兰等^[24]、张红凤等^[40]的研究文献进行分析,

表 3 工业生态效率及解释变量描述性统计

Table 3 Descriptive statistics of industrial eco-efficiency and explanatory variables

变量	符号	最大值	最小值	均值	标准差
工业生态效率	EP	1.000	0.155	0.500	0.215
工业规模	IS	4.603	3.276	3.967	0.278
规制强度	$GRGUL$	0.028	0.000	0.004	0.004
研发投入	$R \& D$	0.061	0.002	0.014	0.010
对外开放程度	FDI	0.064	0.000	0.010	0.009
财政分权	FP	0.936	0.635	0.815	0.069
工业集聚	AGG	2.512	0.404	1.613	0.414
工业结构	HP	0.482	0.003	0.259	0.075

表4 传统面板模型与SDM模型的估计结果

Table 4 Estimated results of traditional panel models and SDM

变量	传统混合回归模型	传统个体固定模型	传统时间固定模型	个体固定SDM模型
$\ln(IS)$	-0.028 (-0.107)	0.913**** (2.924)	0.131 (0.348)	0.693* (1.519)
$\ln^2(IS)$	0.023 (0.707)	-0.001 (-0.043)	0.012 (0.231)	-0.035 (-0.871)
<i>REGUL</i>	-10.386**** (-3.302)	-6.069**** (-2.914)	-12.178**** (-3.695)	-4.873*** (-2.357)
<i>FDI</i>	4.649**** (3.842)	0.002 (0.002)	4.294**** (3.343)	-0.194 (-0.176)
<i>R&D</i>	3.602**** (2.735)	14.552**** (5.051)	2.111* (1.490)	11.433**** (2.900)
<i>FP</i>	0.598*** (2.453)	-2.562**** (-8.678)	0.496** (1.883)	-1.897**** (-5.158)
<i>AGG</i>	-0.720**** (-4.880)	-0.017 (-0.180)	-1.082**** (-5.895)	0.488**** (2.647)
<i>AGG</i> ²	0.190**** (4.025)	-0.020 (-0.686)	0.291**** (5.116)	-0.115*** (-2.596)
<i>HP</i>	-0.260** (-1.768)	-0.089 (-0.480)	-0.197* (-1.332)	0.060 (0.342)
$W \times \ln(IS)$	-	-	-	-0.540 (-0.760)
$W \times \ln^2(IS)$	-	-	-	0.113** (1.764)
$W \times REGUL$	-	-	-	1.517 (0.325)
$W \times FDI$	-	-	-	8.514 (1.279)
$W \times R \& D$	-	-	-	3.264 (1.084)
$W \times FP$	-	-	-	-1.085** (-1.648)
$W \times AGG$	-	-	-	-0.672**** (-3.332)
$W \times AGG^2$	-	-	-	0.160**** (3.134)
$W \times HP$	-	-	-	-0.453* (-1.476)
$W \times EP$	-	-	-	0.189*** (2.483)
R^2	0.439	0.883	0.474	0.894
<i>Log likelihood</i>	122.207	357.062	131.830	369.560
固定效应 <i>F</i> 检验	-	34.727***	0.607	-
<i>LM_spatial lag test</i>	12.633**** ($p=0.000$)	12.335**** ($p=0.000$)	1.677* ($p=0.195$)	-
<i>LM_spatial error test</i>	30.507 ($p=0.868$)	6.589**** ($p=0.010$)	3.232** ($p=0.072$)	-
<i>Wald test spatial lag</i>	-	-	-	20.377*** ($p=0.016$)
<i>Wald test spatial error</i>	-	-	-	23.038**** ($p=0.006$)

注:()中数据为T检验值,*、**、***、****分别表示20%、10%、5%和1%的显著性水平。

2017年7月

认为规制系数之所以为负可能在于政府环境规制的失灵,由政府驱动的工业污染治理措施和政策未能得到有效落实,不能有效纠正企业行为给生态环境带来的负外部性。其次,中国工业“先污染、后治理”的发展模式没有发生本质变化,与发达国家相比中国的环境规制强度仍处于较低水平^[41]。*REGUL*的空间滞后项系数未通过显著性检验,空间效应不明显。

(3)*FDI*对工业生态效率的影响并不显著。关于*FDI*对工业生态效率影响的研究结论存在较大差异。如贾军认为对外开放对环境的影响是消极的,不利于生态效率提高^[42]。孟庆雷等则认为对外开放有利于学习外资企业先进的管理经验和利用其技术溢出效应,对工业生态效率的改善有促进作用^[43]。计志英等则认为*FDI*与环境污染存在“倒U”型关系^[44]。不难看出,*FDI*与工业生态效率的关系具有复杂性,在外资引进过程中要注意强化环境规制,才能实现对外开放与环境的协调发展。*FDI*的空间滞后项系数不显著,空间效应不明显。

(4)*R&D*的系数显著为正。科技创新能力增强有利于创新和推广先进生产技术、污染减排技术以及污染治理技术,在推动工业化过程中提高资源利用效率,降低环境污染物的排放和强化污染治理效率,从而实现了工业生态效率的改善^[28]。*R&D*空间滞后项系数未通过显著性检验,空间效应不明显。

(5)*FP*的系数显著为负。吴俊培等、陈宝东等的研究指出财政分权的提高会增加环境污染物排放^[45,46]。这主要是因为中国财政体制不健全,对地方政府主要实行以经济增长为导向的考核机制,地方政府往往会以牺牲环境质量为代价而谋求经济增长,因此出现了地方财政自主权越大,环境污染越严重,越不利于工业生态效率提升的现象。*FP*的空间滞后项系数显著为负,不利于相邻区域的工业生态效率。

(6)*AGG*的系数显著为正,*AGG*²的系数显著为负,表明产业集聚与工业生态效率呈现“倒U”型关系。本文进一步验证了李勇刚等^[34]的研究结论,他们认为产业集聚与环境污染物排放存在“正U”型曲线,产业集聚度不高时将显著减少环境污染物,对

应于本文工业生态效率处于上升的发展阶段,而当产业集聚跨过拐点时污染物排放会显著增加,这与本文的研究发现是一致的。*AGG*空间滞后项系数显著为负,而*AGG*²的空间滞后项系数显著为正,表明工业生态效率与产业集聚的空间滞后项存在“正U”型关系。之所以出现这样的结果,可能是因为产业集聚具有“虹吸效应”,集聚地区会吸引其相邻地区的企业投资,降低相邻地区的集聚程度,削弱相邻地区的工业生态效率,但是当其产业集聚达到一定程度时,企业投资又会向相邻地区进行扩散,对相邻地区的工业生态效率产生正向促进作用^[47]。

(7)*HP*的系数未通过显著性检验。直观地,高污染行业占比越高,污染物排放量应该越大,环境质量水平越低。可能的原因在于:高污染行业在引发污染物排放增加的同时也带来了经济价值的大幅增加^[35],由于生态效率测算的是经济价值与生态环境的相对水平,仅从效率分析有可能会掩盖其带来的环境污染问题。值得注意的是,控制空间效应以后*HP*系数由正变负,而*HP*的空间滞后项系数则在20%水平上显著为负,这表明高污染行业不利于相邻区域的工业生态效率,这很有可能是因为高污染行业所造成的污染物排在空间上的扩散效应大于对相邻地区在经济上的溢出效应。因此,应该注重通过优化区域的工业结构来提升生态效率水平,改善环境质量。

最后,*EP*的空间滞后项系数显著为正,表明区域工业生态效率的具有正向溢出效应。这种正向的空间交互作用可能来自于地方政府在环境规制、治理技术以及政策制定等方面存在明显的相互模仿与借鉴行为^[24]。因此,地区之间应该积极合作和交流,共同探索改善工业生态效率的先进技术、经验和环境管理制度,形成地区之间的协同效应,以促进工业生态效率的全面提升。

5 结论与启示

本文采用VRS_DEA方法构建工业生态效率测算模型,考察了2005-2014年期间中国30个省市的工业生态效率动态变化及地区差异;在此基础上,构建了包含空间效应的SDM模型,实证检验了其影响因素。主要结论如下:

(1)在研究期间,中国大部分省市的工业生态

效率呈现出波动中上升的趋势。2005年工业生态效率超过0.70的省市仅有海南、广东、青海等3个,而2014年工业生态效率超过0.70的省市增至广东、北京、天津、上海、山东、青海、江苏、海南等8个。就工业生态效率均值而言,排名靠前的省市主要位于东部地区,而排名靠后的省市主要位于西部地区。

(2)从区域层面上来看,东部地区工业生态效率最高,高于全国平均水平,东北地区次之,中、西部地区工业生态效率存在交替变化,整体水平偏低。在2009年以后,东部、中部、西部地区与全国平均工业生态效率差距基本保持稳定,东北地区与全国平均工业生态效率水平基本一致。总体来看,中国工业生态效率的地区差异性明显,呈现出自西向东逐渐加强的空间变化趋势。

(3)实证结果表明,工业发展水平具有正向作用;科技创新有利于改善工业生态效率;环境规制、对外开放与财政分权的系数显著为负,没有达到改善生态效率的预期目标;产业集聚与工业生态效率呈现“倒U”型关系;工业结构影响不显著,可能是高污染行业所带来的污染与经济效应并存所致。此外,在空间交互作用方面,工业生态效率与工业发展水平二次项的空间滞后项系数显著为正;财政分权与工业结构具有显著负向的空间溢出效应;产业集聚的空间滞后项与工业生态效率呈现“正U”型关系。

根据实证分析的结论,本文提出以下政策建议:

(1)充分发掘科技创新改善工业生态效率的潜力。既然科技创新能够显著提高工业生态效率,那就意味应该继续坚持“科教兴国”战略,推进创新体系建设,加快科技成果转化,同时通过财税、政府采购等方面的政策鼓励企业加大研发投入,强化自主研发、技术引进以及技术改造投入力度,切实降低生产过程中的资源消耗,可以有效减少工业污染物的排放强度和总量,提升工业生态效率。

(2)转换环境污染的治理路径,强化政府环境监督管理制度,切实提升工业污染治理效率。主要是从产业源头上提高环保标准以及执行力度,促使企业技术创新,优化工业内部结构,转变经济发展方式,才能消除环境污染物排放过量的源头达到节

能减排目的,而不是一味地采取先污染后治理的末端治理方式。

(3)从财政分权与环境污染的角度来看,首先要改变单一的GDP考核准则,完善地方政府的考核机制,设计包含科技、人才、环境等因素的多指标考核体系,激励政府在自身利益最大化中谋求经济增长与环境保护,扭转地方政府为实现经济增长而牺牲环境的恶性竞争局面;其次,完善财政预算体制,形成有利于环境改善的硬约束体制,保障地方政府在环境保护上的财力支出。

(4)客观、动态地看待产业集聚与工业生态效率的关系,针对不同地区制定差异性政策。产业集聚与自身工业生态效率呈现“倒U”型关系,与相邻地区工业生态效率呈现“正U”型关系,因此各个地区要合理地引导产业转移,防止集聚度过高引发的外部规模不经济对经济和环境产生负面影响,通过引导产业的适度集聚发挥集聚经济效应的同时,实现经济与环境协同发展的目标。

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] Verfaillie H A, Bidwell R. Measuring Eco-Efficiency: A Guide to Reporting Company Performance[R]. Geneva: World Business Council for Sustainable Development, 2000.
- [3] OECD. Eco-efficiency[R]. Paris: Organization for Economic Co-operation and Development, 1998.
- [4] 王锋,冯根福. 基于DEA窗口模型的中国省际能源与环境效率评估[J]. *中国工业经济*, 2013, (7): 56-68. [Wang F, Feng G F. Evaluation of China's regional energy and environmental efficiency based on DEA window model[J]. *China Industrial Economics*, 2013, (7): 56-68.]
- [5] 李玲,陶锋. 中国制造业最优环境规制强度的选择-基于绿色全要素生产率的视角[J]. *中国工业经济*, 2012, (5): 70-82. [Li L, Tao F. Selection of optimal environmental regulation intensity for Chinese manufacturing industry- based on the green TFP perspective[J]. *Chinese Industrial Economy*, 2012, (5): 70-82.]
- [6] Zhu D J. Eco- efficiency as the appropriate measurement of circular economy[J]. *China Population Resources & Environment*, 2006, 16(5): 1-6.
- [7] Kuosmanen T, Cherchye L, Sipiläinen T. The law of one price in

2017年7月

- data envelopment analysis: Restricting weight flexibility across firms[J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 170(3): 735-757.
- [8] Lorenzo-Toja Y, Vázquez-Rowe I, Chenel S, et al. Eco-efficiency analysis of Spanish WWTPs using the LCA+DEA method[J]. *Water Research*, 2015, 68: 651-666.
- [9] Kielenniva N, Antikainen R, Sorvari J. Measuring eco-efficiency of contaminated soil management at the regional level[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 109: 179-188.
- [10] Huang H. Eco-efficiency on the circular economy development pattern in Jiangxi Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, DOI: 10.5846/stxb201306171725.
- [11] 王震, 石磊, 刘晶茹, 等. 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 Z, Shi L, Liu J R, et al. Methodology and application of eco-efficiency analysis on regional industry[J]. *China Population Resources and Environment*, 2008, 18(6): 121-126.]
- [12] 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 E X, Wu C Y. Spatial-temporal differences of provincial eco-efficiency in China based on super efficiency DEA model[J]. *Chinese Journal of Management*, 2011, 8(3): 443-450.]
- [13] 刘巍, 田金平, 李星, 等. 基于DEA的中国综合类生态工业园生态效率评价方法研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, (S1): 93-97. [Liu W, Tian J P, Li X, et al. Eco-efficiency assessment of eco-industrial parks in China with data envelopment analysis[J]. *China Population Resources and Environment*, 2012, (S1): 93-97.]
- [14] 杨文举. 中国地区工业的动态环境绩效: 基于DEA的经验分析[J]. *数量经济技术经济研究*, 2009, (6): 87-98. [Yang W J. The dynamic environmental performance of regional industry in China: an empirical analysis with DEA[J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2009, (6): 87-98.]
- [15] 张子龙, 薛冰, 陈兴鹏, 等. 中国工业环境效率及其空间差异的收敛性[J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(2): 30-38. [Zhang Z L, Xue B, Chen X P, et al. Convergence in spatial difference of industrial environmental efficiency in China[J]. *China Population Resources and Environment*, 2015, 25(2): 30-38.]
- [16] 成金华, 孙琼, 郭明晶, 等. 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 J H, Sun Q, Guo M J, et al. Research on regional disparity and dynamic evolution of eco-efficiency in China[J]. *China Population Resources and Environment*, 2014, 24(1): 47-54.]
- [17] Anselin L. Spatial econometrics: Methods and models[J]. *Studies in Operational Regional Science*, 1988, 85(411): 310-330.
- [18] Cliff A D, Ord J K. Spatial Processes: Models & Applications[M]. London: Pion Ltd., 1981.
- [19] Kuosmanen T, Kortelainen M. Measuring eco-efficiency of production with data envelopment analysis[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2005, 9(4): 59-72.
- [20] Banker R D, Charnes A, Cooper W W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis[J]. *Management Science*, 1984, 30(9): 1078-1092.
- [21] 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, 2006-2015. [National Bureau of Statistics of Industry of China. China Industry Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2006-2015.]
- [22] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006-2015. [National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2006-2015.]
- [23] Maddison D. Environmental Kuznets Curves: a spatial econometric approach[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2006, 51(2): 218-230.
- [24] 李胜兰, 初善冰, 申晨. 地方政府竞争、环境规制与区域生态效率[J]. *世界经济*, 2014, (4): 88-110. [Li S L, Chu S B, Shen C. The local government competition, environmental regulation and regional ecological efficiency[J]. *The Journal of World Economy*, 2014, (4): 88-110.]
- [25] Pasquale P. Investigating the Relationship between FDI and the Environment in OECD Countries: A Sectoral Approach[D]. Durham: Durham University, 2014.
- [26] 林季红, 刘莹. 内生的环境规制: “污染天堂假说”在中国的再检验[J]. *中国人口·资源与环境*, 2013, 23(1): 13-18. [Lin J H, Liu Y. Endogenous environmental regulations: retesting of pollution haven hypothesis in China[J]. *China Population Resources and Environment*, 2013, 23(1): 13-18.]
- [27] 许和连, 邓玉萍. 外商直接投资导致了中国的环境污染吗? 基于中国省际面板数据的空间计量研究[J]. *管理世界*, 2012, (2): 30-43. [Xu H L, Deng Y P. Does foreign direct investment led to the pollution of the environment in China? Space qualitative research based on Chinese provincial panel data[J]. *Management World*, 2012, (2): 30-43.]
- [28] 魏艳旭, 孙根年, 李静. 基于技术进步的中国能源消耗与经济增长: 前后两个30年的比较[J]. *资源科学*, 2011, 33(7): 1338-1345. [Wei Y X, Sun G N, Li J. Energy consumption and economic growth in China due to technological progress: a comparison of two phases (1953-1977 and 1978-2009) [J]. *Resources Science*, 2011, 33(7): 1338-1345.]
- [29] 俞雅乖. 我国财政分权与环境质量的关系及其地区特性分析[J]. *经济学家*, 2013, (9): 60-67. [Yu Y G. The relationship between China's fiscal decentralization and environmental quality, and its regional characteristics analysis[J]. *Economist*, 2013, (9): 60-67.]
- [30] 杨仁发. 产业集聚能否改善中国环境污染[J]. *中国人口·资源*

- 与环境, 2015, 25(2): 23-29. [Yang R F. Whether industrial agglomeration can reduce environmental pollution or not[J]. *China Population Resources and Environment*, 2015, 25(2): 23-29.]
- [31] 杨文举. 中国省份工业的环境绩效影响因素-基于跨期 DEA-Tobit 模型的经验分析[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2015, 17(2): 40-48. [Yang W J. The influencing factor of the environmental performance of provincial industry in China-an empirical analysis based on inter-temporal DEA-Tobit model[J]. *Journal of Beijing of Technology (Social Sciences Edition)*, 2015, 17(2): 40-48.]
- [32] Lesage J P, Pace R K. Introduction to spatial econometrics. CRC press, Boca Raton, FL[J]. *Spatial Demography*, 2009, 1(1): 143-145.
- [33] 赵领娣, 张磊. 财政分权、人口集聚与民生类公共品供给[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(12): 136-143. [Zhang L D, Zhang L. Fiscal decentralization, pollution cluster and the supply of public goods of the people's livelihood[J]. *China Population Resources and Environment*, 2013, 23(12): 136-143.]
- [34] 李勇刚, 张鹏. 产业集聚加剧了中国的环境污染吗-来自中国省级层面的经验证据[J]. 华中科技大学学报: 社会科学版, 2013, (5): 97-106. [Li Y G, Zhang P. Have industrial agglomeration aggravated environmental pollution- Chinese provincial level empirical evidence[J]. *Huazhong University of Science & Technology: Social Sciences*, 2013, (5): 97-106.]
- [35] 刘炯. 生态转移支付对地方政府环境治理的激励效应-基于东部六省 46 个地级市的经验证据[J]. 财经研究, 2015, 41(2): 54-67. [Liu J. On the incentive effect of ecological transfer payments on environmental governance of local governments: evidence from 46 eastern prefecture-level cities[J]. *Journal of Finance and Economics*, 2015, 41(2): 54-67.]
- [36] 国家统计局, 环境保护部. 中国环境统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006-2015. [National Bureau of Statistics of China, Ministry of Environmental Protection. *China Statistical Yearbook on Environment*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2006-2015.]
- [37] 国家统计局, 科学技术部. 中国科技统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006-2015. [National Bureau of Statistics of China, Ministry of Science and Technology. *China Statistical Yearbook on Science and Technology* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2006-2015.]
- [38] 张卫国, 马瑾, 张立恒. 我国区域工业经济发展与环境污染治理的比较研究[J]. 中国软科学, 2003, (8): 113-117. [Zhang W G, Ma J, Zhang L H. A comparative study on Chinese industry development and pollution prevention[J]. *China Soft Science*, 2003, (8): 113-117.]
- [39] 涂正革. 环境、资源与工业增长的协调性[J]. 经济研究, 2008, (2): 93-105. [Tu Z G. The coordination of industry growth with environment and resource[J]. *Economic Research Journal*, 2008, (2): 93-105.]
- [40] 张红凤, 周峰, 杨慧, 等. 环境保护与经济发展双赢的规制绩效实证分析[J]. 经济研究, 2009, (3): 14-26. [Zhang H F, Zhou F, Yang H, et al. Regulation performance of the win-win of environmental protection and economic development[J]. *Economic Research Journal*, 2009, (3): 14-26.]
- [41] 徐志伟. 工业经济发展、环境规制强度与污染减排效果-基于“先污染, 后治理”发展模式的理论分析与实证检验[J]. 财经研究, 2016, 42(3): 134-144. [Xu Z W. Industrial economic development, environmental regulation intensity and emissions reduction effect: theoretical analysis empirical test based on development pattern after pollution[J]. *Journal of Finance and Economics*, 2016, 42(3): 134-144.]
- [42] 贾军. 基于东道国环境技术创新的 FDI 绿色溢出效应研究-制度环境的调节效应[J]. 软科学, 2015, 29(3): 28-32. [Jia J. Research on FDI green technology spillovers based on the environmental technological innovation of host country[J]. *Soft Science*, 2015, 29(3): 28-32.]
- [43] 孟庆雷, 刘钻扩, 李成豪. FDI 对中国工业生态效益的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(4): 14-21. [Meng Q L, Liu Z K, Li C H. Impact of foreign direct investment on the Chinese industrial ecological benefits[J]. *China Population Resources and Environment*, 2016, 26(4): 14-21.]
- [44] 计志英, 毛杰, 赖小锋. FDI 规模对我国环境污染的影响效应研究-基于 30 个省级面板数据模型的实证检验[J]. 世界经济研究, 2015, (3): 56-65. [Ji Z Y, Mao J, Lai X F. Impact of FDI scale on the effects of environmental pollution in China-based on the empirical test of 30 provincial panel data model[J]. *World Economy Studies*, 2015, (3): 56-65.]
- [45] 吴俊培, 丁玮蓉, 龚旻. 财政分权对中国环境质量影响的实证分析[J]. 财政研究, 2015, (11): 56-63. [Wu J P, Ding W R, Gong M. Empirical analysis about the impact of fiscal decentralization on the China's environmental quality[J]. *Public Finance Research*, 2015, (11): 56-63.]
- [46] 陈宝东, 邓晓兰. 财政分权是否恶化了城市环境质量-基于长三角地区 26 个城市的经验数据[J]. 经济体制改革, 2015, (3): 182-187. [Chen B D, Deng X L. If fiscal decentralization deteriorate city's environmental quality-empirical data from 26 cities in Yangtze River delta region[J]. *Reform of the Economic System*, 2015, (3): 182-187.]
- [47] 阮加, 李欣. 从产业转移与人才转移的互动机制看京津冀区域一体化[J]. 中国行政管理, 2011, (2): 71-75. [Ruan J, Li X. The regional interaction of Beijing, Tianjian and Hebei: a view based on interactive mechanism of industrial transfer and talents transfer[J]. *Chinese Public Administration*, 2011, (2): 71-75.]

Measurement and spatial econometrics analysis of provincial industrial ecological efficiency in China

LU Yanqun, YUAN Peng

(School of Business Administration, Southwest University of Finance Economics, Chengdu 611130, China)

Abstract: The VRS_DEA model was used to estimate industrial ecological efficiency for China's 30 provinces from 2005 to 2014. A spatial econometrics model was also used to test the influencing factors. We found that the industrial ecological efficiency of most provinces shows a trend of increasing fluctuation, and differences between the provinces are obvious. The spatial development pattern was one from western provinces to eastern provinces. Improvement in industrial development levels is beneficial to industrial ecological efficiency, and the capability of scientific and technological innovation have positive effects on industrial ecological efficiency. Environmental regulation, opening to the outside world and fiscal decentralization have significant negative effects on industrial ecological efficiency. Industrial agglomeration and industrial ecological efficiency follow an inverted U type relationship. Because of the co-existence of pollution emissions and economic benefits, the impact of industrial structure on industrial ecological efficiency is not significant, but the environmental pollution caused by change in industrial structure cannot be neglected. In addition, the spatial lag effect of industrial ecological efficiency is positive, indicating that local governments may learn from and imitate each other in environmental governance. The spatial lag effect of quadratic terms of industrial development is positive, while the spatial lag of fiscal decentralization is negative, and the spatial spillover effects of industrial structure are negative. The spatial lag of industrial agglomeration and industrial ecological efficiency follow a positive U type relationship, the effect on industrial ecological efficiency in adjacent areas was first inhibited and then promoted.

Key words: industrial ecological efficiency; VRS_DEA; space effects; spatial econometrics