

引用格式: 邓宗兵, 李莉萍, 王炬, 等. 技术异质性下中国工业生态效率地区差异及驱动因素[J]. 资源科学, 2022, 44(5): 1009-1021. [Deng Z B, Li L P, Wang J, et al. Regional differences and driving factors of China's industrial ecological efficiency: Based on technology heterogeneity[J]. Resources Science, 2022, 44(5): 1009-1021.] DOI: 10.18402/resci.2022.05.11

技术异质性下中国工业生态效率地区差异及驱动因素

邓宗兵^{1,2}, 李莉萍¹, 王 炬¹, 曹宇芙¹

(1. 西南大学经济管理学院, 重庆 400715; 2. 西南大学普惠金融与农业农村发展研究中心, 重庆 400715)

摘 要: 探究不同技术水平下工业生态效率地区差异及影响因素, 是实现协同建设工业生态文明建设的基本前提。本文在考虑地区技术异质性的基础上, 基于共同前沿理论, 运用非期望产出 SBM 模型, 测度 2008—2018 年中国 30 个省(市、区)工业生态效率和区域间技术差距, 并从无效率根源和外部环境两个维度检验了工业生态效率损失根源和外部影响因素。结果发现: ①共同前沿下的中国工业生态效率整体呈上升趋势, 年均值由 2008 年的 0.589 上升至 2018 年的 0.603, 依然存在一定的改善空间。②中国地区工业技术水平存在显著差异, 总体表现为内陆经济区明显低于沿海经济区, 其中 5 个内陆经济区与全国最优技术水平存在 30.0% 以上的技术差距。③无效率分解发现, 南部沿海和北部沿海为高管理无效低技术无效型, 其余经济区及全国为低管理无效高技术无效型; 30 个省(市、区)无效率类型各异, 但主要由技术无效率所致。④经济水平、环境规制、产业集聚对全国工业生态效率提升有促进作用, 而能源结构、外商投资有抑制作用; 环境因素对八大经济区的影响方向和程度明显不同, 其中北部沿海“波特假说”成立、长江中游和西南区“污染天堂假说”成立。本文可为探寻工业生态效率提升路径提供新视角, 为协同建设工业生态文明提供经验参考。

关键词: 工业生态效率; 技术异质性; 地区差异; 驱动因素; 共同前沿理论; 非期望产出 SBM 模型; 中国

DOI: 10.18402/resci.2022.05.11

1 引言

改革开放 40 余年来, 中国工业经济取得显著成效, 跃居世界第一制造业大国, 但这一增长付出了巨大的生态代价。统计数据显示, 2019 年工业颗粒物排放量占颗粒物排放总量比重达 85.1%, 工业二氧化硫排放量占二氧化硫排放总量比重高达 86.5%, 工业固体废物排放量占固体废物排放总量比重达 83.1%, 而一般工业固体废物综合利用率为 55.9%。这一以高消耗、高污染和高排放为特征的增长方式难以适应建设美丽中国的要求。早在 2012 年, 党的十八大就明确指出, 转变工业发展方式, 推进工业生态文明建设, 是实现由工业大国向

工业强国转变的关键举措, 是建设美丽中国的重要内容。在此背景下, 本文尝试回答以下问题: 目前全国及各地区工业生态效率究竟怎样? 不同地区的工业生态效率和工业技术水平存在怎样的差异? 存在多大的提升空间? 造成全国及各地区工业生态效率损失根源是什么? 又有哪些外部因素影响并制约了全国及各地区工业生态效率提升? 解答上述问题, 可为挖掘中国工业生态效率的改善潜力, 探究影响中国工业生态效率外部环境因素, 进而因地制宜设计工业生态效率提升策略提供决策参考。

Schaltegger 等^[1]于 1990 年提出“生态效率”概

收稿日期: 2021-11-03, 修订日期: 2022-01-31

基金项目: 教育部人文社会科学研究规划基金项目(19YJA790005); 重庆市社会科学规划项目(2021NDYB058); 西南大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(SWU2009221)。

作者简介: 邓宗兵, 男, 安徽长丰人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为区域经济技术经济研究。E-mail: 1299858480@qq.com

念,并认为生态效率是指经济增加值与其环境影响之间的比值,其核心思想是统筹经济效益和环境效益,以较少的资源消耗和环境影响创造较大的社会效益。具体到工业领域而言,工业生态效率是指在保证工业产品数量与质量满足社会需求的前提下,兼顾工业经济效益最大化和生态负面效益最小化。目前针对工业生态效率研究主要围绕以下几方面展开:①工业生态效率测度分析。学者们采取了主成分分析法、环境资源比值法、物质流分析法、随机前沿法(SFA)和数据包络分析法(DEA)等分析工具,对不同对象的工业生态效率进行了测度。数据包络分析法(DEA)和随机前沿法(SFA)应用最为广泛,但DEA具有明显的优势,无需设定生产函数,且能同时处理多投入多产出。为了解决投入产出变量的松弛问题,Tone等^[2]在DEA模型的基础上,将松弛变量纳入目标函数之中,构建了非径向非角度的SBM模型,逐渐成为测度生态效率的主流模型;后经一系列扩展,形成超效率SBM模型、非期望产出SBM模型等模型。②工业生态效率地区差异研究。早期研究主要针对不同地区工业生态效率进行结果描述和对比分析^[3],但是由于生产技术在不同时间截面上存在异质性,单从空间角度静态评价工业生态效率难以揭示工业生态建设的动态变化及地区间差异的演变特征。随着探究的深入,数据空间可视化、核密度、泰尔指数、空间马尔科夫链、探索性空间分析等空间分析方法被应用于考察工业生态效率地区差距和分布动态演进^[4-6],研究层次也涉及到全国、省域、特殊经济区、城市等不同尺度^[7-9]。③工业生态效率影响因素研究。已有研究涵盖了产业结构、经济水平、政府规制、对外开放等各方面,且通常采用DEA-Tobit模型考察上述影响因素对工业生态效率的影响^[10],或者基于工业生态效率客观存在的空间异质性特征,分区域考察工业生态效率影响因素^[11]。

学术界对于中国工业生态效率及其影响因素的研究逐渐深入,但仍存在以下可拓展的空间:①以往研究很少考虑不同组群间的技术异质性问题,然而现实中“技术同质”假定并不成立。就本文而

言,中国区域发展不平衡严重,区域间的资源禀赋、经济水平、生产技术、管理方式都存在很大差异,因而同一时期不同地区的工业技术水平是不同的。近年,学者们开始关注到不同组群间的技术异质性,但多采用传统地理区域划分组群(三大地区)。早在2005年,国务院发展研究中心就指出,东中西部区域划分已不合时宜,并提出了八大经济区^①设想。如果不考虑技术异质性或组群划分不合理,将难以诊断中国工业生态低效率深层次原因,导致决策失误。②已有研究多采用传统DEA模型测算效率,但传统DEA模型忽略了投入产出松弛变量、径向和角度选择偏差对测算结果的影响,且未考虑非期望产出,导致测算结果与真实值存在偏差。③以往研究主要关注工业生态效率测算与比较,而忽略对不同组群的工业技术差距、工业生态效率损失根源及外部影响因素等的探究。

与以往研究相比,本文的边际贡献包括:①研究视角。从技术异质性视角出发,综合考虑区域差异问题,采用国务院发展研究中心提出的八大经济区划分组群,区分30个省(市、区)的技术异质性,力求解决组群间技术异质性或组群划分不合理的问题。②研究方法。将共同前沿理论和非期望产出SBM模型相结合,对全国及八大经济区的工业生态效率和区域间技术差距进行测度分析,弥补了传统DEA模型弊端,在一定程度上有效控制了测算结果与真实值的偏差。③研究内容。基于技术异质性分析不同组群和30个省(市、区)工业生态效率和工业技术差距的地区差异;并从效率损失根源和外部环境因素两个维度,系统分析和检验了全国和八大经济区工业生态效率的无效率根源和影响因素。不仅有助于深化对技术异质性下工业生态效率地区差异的理论认识,而且有助于系统揭示中国工业生态低效率的形成原因。

2 模型构建、变量设定与数据来源

2.1 模型构建

2.1.1 考虑非期望产出的SBM模型

借鉴Tone等提出的SBM模型建模思路,本文构建了单个期望产出和多个非期望产出的生产可

① 八大经济区分别为东北(黑龙江、吉林、辽宁)、北部沿海(北京、天津、河北、山东)、东部沿海(上海、江苏、浙江)、南部沿海(福建、广东、海南)、黄河中游(陕西、山西、河南、内蒙古)、长江中游(湖北、湖南、江西、安徽)、西南(云南、贵州、四川、重庆、广西)、西北(甘肃、青海、宁夏、西藏、新疆)。

2022年5月

能性集,对中国省际(DMU)工业生态效率进行评价,模型如下:

$$F = \min \frac{1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{s_i^x}{x_{i_0}}}{1 + \frac{1}{M+K} \left(\sum_{r=1}^M \frac{s_r^y}{y_{r_0}} + \sum_{r=1}^K \frac{s_r^b}{b_{r_0}} \right)} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} x_i = \lambda X + s^x \\ y_i = \lambda Y - s^y \\ b_i = \lambda B + s^b \\ \lambda, s^x, s^y, s^b \geq 0 \end{cases}$$

式中: F 为工业生态效率值,取值范围为 $[0, 1]$; x 、 y 、 b 分别为投入、期望产出与非期望产出的要素; r 为第 r 个 DMU, r_0 为待求的 DMU; N 、 M 、 K 分别为投入、期望产出与非期望产出的要素数量; s^x 、 s^y 、 s^b 分别为要素投入、期望产出和非期望产出的松弛变量值; X 、 Y 、 B 分别为投入、期望产出与非期望产出的构成矩阵; λ 为所对应的投入与产出指标的权重。

2.1.2 基于共同前沿的非期望产出 SBM 模型

O'Donnell 等^[12]提出对存在明显技术异质的 DMU 可以计算出组群前沿效率值、共同前沿效率值和技术落差比率,借鉴该思路,本文构造了如下的组群前沿和共同前沿:

设定共同 DMU 的技术集合 T^u :

$$T^u = \{(x, y, b) | x \geq 0, y \geq 0, b \geq 0; \\ x \text{ can produce } (x, y, b)\} \quad (2)$$

式中: u 为技术集合的种类; T^u 代表取得产出 $P^u(y, b)$ 的投入和技术水平。共同 DMU 的生产可能集为:

$$P^u(x) = \{(y, b) | (x, y, b) \in T^u\} \quad (3)$$

则考虑非期望产出的共同距离函数的表达式 (D^u) 为:

$$D^u(x, y, b) = \inf_{\theta} \left\{ \theta > 0 \left| \left(\frac{(y, b)}{\theta} \right) \in T^u \right. \right\} = MOE(x, y, b) \quad (4)$$

组群距离函数的构建与共同距离函数构建类似,则组群 g 考虑非期望产出的组群距离函数的表达式 (D^g) 为:

$$D^g(x, y, b) = \inf_{\theta} \left\{ \theta > 0 \left| \left(\frac{(y, b)}{\theta} \right) \in T^g \right. \right\} = GOE(x, y, b) \quad (5)$$

式中: θ 表示径向距离; $GOE(x, y, b)$ 、 $MOE(x, y, b)$

分别表示组群前沿效率值和共同前沿效率值。按照距离函数 D^u 和 D^g , 分别用共同前沿和组群前沿下的式(1)进行测算。

2.1.3 技术落差比率

技术落差比率 (TGR) 刻画的是组群前沿和共同前沿之间的技术异质性程度,用共同前沿效率和组群前沿效率的比值来衡量。第 g 组的技术落差比率如式(6)所示:

$$0 \leq TGR = \frac{D^u}{D^g} = \frac{MOE}{GOE} \leq 1 \quad (6)$$

式中: TGR 值介于 $[0, 1]$ 之间。 TGR 越小,说明 DMU 的实际生产技术与潜在最优生产技术的水平差距越大。

2.1.4 无效率分解模型

为了挖掘各地区工业生态效率损失根源,本文参考 Chiu 等^[13]的做法,进一步将共同前沿下的地区工业生态无效率 ($MOEI$) 分解为技术无效率 ($TGRI$) 与管理无效率 (MI)。分解如下:

$$TGRI = GOE \times (1 - TGR) = GOE - MOE \quad (7)$$

$$MI = 1 - GOE \quad (8)$$

$$MOEI = TGRI + MI = 1 - MOE \quad (9)$$

式中: $TGRI$ 表示共同前沿与组群前沿间工业生产技术水平差距导致的无效率; $MOEI$ 表示地区工业生态效率与有效水平的差距; MI 表示地区工业管理水平或效率未达到组群最优导致的无效率。

2.2 变量设定

2.2.1 投入产出变量

基于数据可获得性考虑,本文将要素投入、期望产出、非期望产出设定如下:要素投入包括水资源、能源、劳动力和资本,分别选取地区的工业用水量、工业能源消耗总量、第二产业就业人口、第二产业固定资产投资额 4 个指标近似表示;期望产出选取地区工业增加值近似表示;非期望产出从“三废”排放角度出发选取地区的工业二氧化硫排放量、工业废水排放量、一般工业固体废物产生量 3 个指标近似表示。

2.2.2 影响因素变量

为了探寻影响工业生态效率的环境因素,检验工业生态效率影响机制,参考相关研究成果,选取以下影响因素。①经济水平 (ECO)。环境库兹涅茨曲线 (EKC) 认为,经济水平的提高可能会加剧环

境恶化,表现为环境负外部性,但达到一定水平后,生态保护和环境建设被关注,表现出对环境的正外部性^[14]。使用人均GDP对数表示。②环境规制(ER)。环境规制的生态效应取决于“创新效应”和“成本效应”。波特假说认为,适当的环境规制能促进企业技术创新,产生显著“创新效应”,弥补企业部分甚至全部的环境治理成本,从而促进企业生产率的提高^[15];而“遵从成本”理论认为,环境规制会增加企业生产成本,影响企业竞争力和生产率的提升^[16],不利于环境建设。使用工业污染治理完成投资对数表示。③能源结构(NC)。能源结构对工业经济的环境绩效有重要影响。工业发展过度依赖化石能源消耗,忽视能源间的替代效应,会增加生态环境污染,而低碳环保型能源的使用能够推动经济向低碳绿色方向发展^[17]。使用工业煤炭消耗占工业能源消耗比重表示。④产业集聚(IC)。产业集聚能够产生规模效应和知识溢出效应,可促进技术创新,淘汰落后产能,进而实现经济的质量变革和效率变革^[18];同时,在产业集聚过程中也有可能产生大量的污染物,并对邻近区域产生污染溢出效应^[19],且聚集的企业数量超过阈值会造成拥堵效应。使用地区GDP占全国GDP比重表示。⑤外商投资(FDI)。外商投资对工业生态文明建设是一把“双刃剑”。“污染天堂假说”认为,外资企业通常将污染密集型产业或高能耗项目转移至东道国,导致东道国生态环境被破坏^[20];“污染光环假说”认为,外资进入可以带来技术示范和产生知识外溢,有助于东道国生态环境质量改善^[21]。使用外商直接投资额对数表示。

2.3 数据来源

本文选取全国30个省(市、区)为研究对象(因缺少资料,不包括西藏、港澳台地区),数据主要来源于2009—2019年的《中国统计年鉴》《中国工业统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国能源统计年鉴》以及各省(市、区)年鉴,相关数据转化为2008年可比价,同时部分缺失的数据采用线性趋势法进行模拟补齐。

3 结果与分析

3.1 两种前沿下中国工业生态效率测度及差异分析

3.1.1 两种前沿下的工业生态效率测度结果与比较

表1展示了两种前沿下的全国、八大经济区和

30个省(市、区)工业生态效率值。可知,若以全国共同前沿为参照标准,2008—2018年,全国工业生态效率波动上升,但年均值仅0.616,这意味着按照共同前沿测算,全国工业生产要素投入削减38.4%后,也能达到当前的效率水平,进而表明如果能达到共同前沿省份的技术水平,则全国工业生态效率存在38.4%的提升空间。相较之下,若以组群前沿为参考标准,全国工业生态效率的年均值可达到0.967,明显高于共同前沿下的效率值(0.616)。可能的解释是:两者参考标准的不同造成了测度结果的差异。具体而言,根据共同前沿理论,组群潜在最优工业技术水平包络于共同前沿潜在最优工业技术水平之下,因而各DMU投入产出数据集与组群前沿的距离较小,从而造成了组群前沿下的效率值大于共同前沿下的效率值。同时也说明如果忽视不同组群的技术异质性,将所有DMU纳入同一个评价标准所测得的结果是有偏的。从省域层面来看,除北京、天津、山东、上海、广东、海南和重庆7省(市)外,其余23个省份两种前沿下效率值差异明显,均表现为共同前沿效率不高于组群前沿效率的特征。以安徽为例,2008—2018年,共同前沿下的效率均值为0.284,而组群前沿下的效率均值为0.950,差异显著,表明若以全国潜在最优工业技术水平为标准,改进空间达到71.6%,而以组群潜在最优技术水平为参考,改进空间仅为5.0%。为了进一步检验共同前沿和组群前沿下两种效率值的差异性,运用Wilcoxon符号秩检验法对其进行检验,结果显示, $Z=-11.667$, $p=0.000$,表明两种前沿下的效率值差异性显著的,再次验证了基于共同前沿理论下效率测算结果的稳健性。

3.1.2 工业生态效率的区域差异分析

组群前沿下的工业生态效率值是由不同组群潜在最优工业技术水平所决定,因此不同组群前沿的效率值不具可比性,因而将基于共同前沿效率值对中国工业生态效率的区域差异进行讨论。

从区域层面看,八大经济区工业生态效率呈现“沿海经济区高、内陆经济区低”的显著性差异,且差异随时间波动。从年均值看(表1),东部沿海、北部沿海和南部沿海区的均值相对较高,分别为0.915、0.868和0.808;内陆经济区的年均值相对偏低,尤其是长江中游、西南和黄河中游区,分别仅为

2022年5月

表1 2008、2013、2018年两种前沿下的工业生态效率测度结果

Table 1 Results of industrial ecological efficiency under two fronts, 2008, 2013 and 2018

地区	2008年		2013年		2018年		均值	
	MOE	GOE	MOE	GOE	MOE	GOE	MOE	GOE
黑龙江	0.485	1.000	0.315	1.000	0.154	1.000	0.302	1.000
辽宁	1.000	1.000	1.000	1.000	0.340	1.000	0.831	1.000
吉林	0.332	1.000	0.458	1.000	0.253	1.000	0.606	1.000
东北区	0.606	1.000	0.591	1.000	0.249	1.000	0.580	1.000
北京	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
天津	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
河北	0.474	0.474	0.492	0.492	0.304	0.392	0.470	0.478
山东	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
北部沿海区	0.869	0.869	0.873	0.873	0.826	0.848	0.867	0.870
上海	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
江苏	0.563	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.919	1.000
浙江	1.000	1.000	0.667	1.000	1.000	1.000	0.826	1.000
东部沿海区	0.854	1.000	0.889	1.000	1.000	1.000	0.915	1.000
福建	0.389	0.451	0.416	0.504	0.414	1.000	0.424	0.595
广东	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
海南	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
南部沿海区	0.796	0.817	0.805	0.835	0.805	1.000	0.808	0.865
陕西	0.405	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.802	1.000
山西	0.397	1.000	0.316	1.000	0.224	1.000	0.310	1.000
河南	0.545	1.000	0.472	1.000	1.000	1.000	0.598	1.000
内蒙古	0.282	1.000	0.215	1.000	0.227	1.000	0.239	1.000
黄河中游区	0.407	1.000	0.501	1.000	0.613	1.000	0.487	1.000
湖北	0.306	1.000	0.453	1.000	0.471	1.000	0.462	1.000
湖南	0.294	1.000	0.373	1.000	1.000	1.000	0.474	1.000
安徽	0.223	1.000	0.323	1.000	0.259	0.741	0.284	0.950
江西	0.248	1.000	0.288	1.000	0.215	1.000	0.264	1.000
长江中游区	0.268	1.000	0.359	1.000	0.486	0.935	0.371	0.988
云南	0.247	1.000	0.219	1.000	0.134	1.000	0.195	1.000
贵州	0.236	1.000	0.213	1.000	0.156	1.000	0.202	1.000
四川	0.286	1.000	0.401	1.000	0.247	1.000	0.338	1.000
重庆	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
广西	0.262	1.000	0.292	1.000	0.274	1.000	0.283	1.000
西南区	0.406	1.000	0.425	1.000	0.362	1.000	0.404	1.000
甘肃	0.256	0.634	0.218	1.000	0.227	1.000	0.222	0.967
青海	0.435	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.949	1.000
宁夏	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.950	1.000
新疆	1.000	1.000	0.294	1.000	0.199	1.000	0.534	1.000
西北区	0.673	0.909	0.628	1.000	0.607	1.000	0.664	0.992
全国	0.589	0.952	0.614	0.967	0.603	0.971	0.616	0.967

0.371、0.404和0.487。从变化趋势看,八大经济区与全国整体工业生态效率变化趋势存在差异。全国变化趋势较为稳定,徘徊于0.580~0.660之间。就经济区而言,东部沿海、南部沿海、黄河中游和长江中游区呈现出上升的趋势,但上升幅度存在较为明显的差异,其中,长江中游增幅最大(81.3%),黄河中游次之(50.6%),南部沿海最小(1.1%),表明近几年生态较为脆弱的长江中游和黄河中游区在加大生态环境保护的条件下,工业生态效率得到较大提升,未来应继续加大保护力度;东北、北部沿海、西南和西北区呈现出下降的趋势,其中,东北降幅最大(58.9%),西南次之(10.8%),北部沿海最小(4.9%),表明在一些重工业占比较大的东北、西南等地区,即使国家给予了相应的政策支持,也没有从根本上解决其工业污染的问题。

从省域层面看,30个省(市、区)工业生态效率水平差异更加显著(表1),其中,2008—2018年,北京、天津、山东、上海、广东、海南和重庆7个省(市)的效率值始终为1.000,一直处于有效状态,代表了中国工业的最优技术水平。北京、天津、上海和广东得益于明显的区位优势、优秀的研发人才和雄厚的工业基础,工业生态文明建设走在全国前列;重庆得益于较好的工业基础和较强的内生潜力,加之“西部大开发”“一带一路”等深入推进,以及国家对“成渝双城经济圈”的政策扶持,促进了工业绿色发展水平不断提升;山东则主要依靠区位优势、经济优势和资源优势,其在资源节约利用、生态环境建设和产业结构优化等方面取得了一定成效;海南得益于政府“信息化+工业化”融合政策的有利推动,节能减排工作的有力推进,工业污染物排放较低。

此外,工业生态效率相对较低的省份主要有云南、贵州、甘肃和内蒙古,效率年均值分别仅为0.195、0.202、0.222和0.239,上述省份受诸多方面制约,尤其面临区位优势不佳、经济基础薄弱、技术人才相对匮乏、技术创新不足等困境,与共同前沿面的距离较远,效率提升潜力巨大,因此国家在未来政策的制定和倾斜上应该予以重点关注。

3.2 两种前沿下的中国工业技术差距分析

依据式(6)计算出全国及八大经济区的工业技术落差比率(表2),在此基础上,利用Kruskal-Wallis法对八大经济区技术落差比率的差异性进行检验,检验结果 $\chi^2=133.983$,且在1%的水平上显著,表明中国八大经济区工业技术水平存在明显落差。从均值来看,沿海经济区工业技术水平显著高于内陆经济区,其中,北部沿海区为0.995,东部沿海区为0.915,南部沿海区为0.920,这意味着3个沿海经济区的工业技术水平达到全国最优技术水平的90.0%以上,存在较小的提升空间;东北、黄河中游、长江中游、西南和西北区的技术落差比率均值分别为0.580、0.487、0.376、0.403和0.670,与全国最优技术水平有30.0%以上的技术差距,存在较大的提升空间。究其原因在于:3个沿海经济区具有良好的区位优势和政策支持,在引进国外先进的绿色工业技术和吸引优秀的管理和科研人员上有较大的优势,其工业绿色创新能力也位于全国先进行列,而西南区、黄河中游区等5个经济区区位优势不足,研发投入不够,削弱了工业生态技术革新力度。

从变动趋势来看,各经济区的技术落差比率变动趋势各异。对于沿海经济区而言,东部沿海区波动上升,2016年就达到1.000,实现全国潜在最优工

表2 2008—2018年全国及八大经济区工业技术落差比率

Table 2 Technological gap rate (TGR) of China and its eight major economic regions, 2008-2018

地区	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	均值
东北区	0.606	0.568	0.787	0.807	0.781	0.591	0.575	0.537	0.537	0.339	0.249	0.580
北部沿海区	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.944	0.995
东部沿海区	0.854	1.000	0.763	0.906	0.881	0.889	0.883	0.888	1.000	1.000	1.000	0.915
南部沿海区	0.954	0.948	0.951	0.953	0.944	0.942	0.937	0.935	0.927	0.828	0.805	0.920
黄河中游区	0.407	0.399	0.419	0.433	0.518	0.501	0.481	0.454	0.495	0.637	0.613	0.487
长江中游区	0.267	0.275	0.295	0.345	0.359	0.359	0.355	0.339	0.359	0.671	0.509	0.376
西南区	0.406	0.390	0.396	0.422	0.436	0.425	0.417	0.398	0.389	0.397	0.362	0.403
西北区	0.740	0.672	0.808	0.809	0.659	0.628	0.621	0.599	0.606	0.619	0.607	0.670
全国	0.627	0.629	0.653	0.682	0.671	0.645	0.637	0.621	0.639	0.673	0.622	0.645

2022年5月

业技术水平,北部沿海区 TGR 值徘徊于 1.000,基本达到全国潜在最优工业技术水平,而南部沿海区波动下降,2018 年下降到 0.805,尚未达到全国潜在最优工业技术水平。对于内陆经济区而言,变动趋势差异更加明显,其中,东北区呈显著下降趋势,2018 年下降到 0.249,逐渐远离全国最优工业技术水平;黄河中游和长江中游区呈逐步上升趋势,分别累计上升了 50.6% 和 89.9%,与全国最优工业技术水平的缺口逐渐缩小;而西南和西北区呈稳定下降趋势,分别累计下降了 10.8% 和 18.0%,与全最优工业技术水平的缺口正在扩大。

为了进一步探究各经济区间技术差距,将八大经济区技术落差比率进行两两相减,并绘制部分变化趋势图(图 1)。从图 1 可知,八大经济区间技术差距存在明显差异。从整体看,沿海与内陆经济区间的技术差距较大,介于 0.350~0.500 之间,且未有缩小趋势。进一步比较发现,部分沿海与内陆经济区间的技术差距更大,如以北部沿海区为例,北部沿海和西南区的技术差距介于 0.550~0.610 之间,且保持较为稳定的状态。以上结果表明,沿海与内陆经济区间可能存在较高的技术壁垒,沿海的高技术很难扩散到内陆地区。相比而言,沿海经济区间的技术差距较小,两两的技术差距均在 0.200 以下,说明沿海经济区间存在较小的技术壁垒,技术转移和知识外溢能够实现技术共享。而内陆经济区间的技术差距较为复杂,以西南区为例,与东北和西北区的差距缩小,与黄河中游和长江中游区的差距扩

大,表明缩小内陆经济区间的技术差距和实现技术共享依然任重道远。

3.3 中国工业生态效率损失根源诊断

3.3.1 区域层面

表 3 展示了中国八大经济区工业生态无效率分解结果^②。从表 3 可知,2008—2018 年全国 $MOEI$ 均值为 0.384,其中, $TGRI$ 均值为 0.351,占比 91.4%; MI 均值为 0.033,占比 8.6%,这表明全国工业生态无效率是管理无效和技术无效共同导致,比较而言,技术无效是效率损失的主要根源,未来应通过吸收先进的工业绿色技术、升级污染处理设备、加强清洁生产技术推广等手段来改善工业生态效率。从八大经济区看,工业生态效率损失根源各异。具体而言,东北、黄河中游、西南和东部沿海区的 $TGRI$ 占比达到 100.0%,表明这 4 个经济区的工业生态无效率全部由技术无效导致,未来提升效率的根本出发点是加强工业绿色技术研发,提高工业技术水平。北部沿海区的 $TGRI$ 、 MI 占比分别为 1.5% 和 98.5%,表明管理无效是北部沿海区工业生态效率损失的主要根源,未来重点是提高管理效率。长江中游区的 $TGRI$ 、 MI 占比分别 98.0% 和 2.0%;西北区的 $TGRI$ 、 MI 占比分别 97.6% 和 2.4%,表明技术无效是这两个经济区工业生态效率损失的主要根源,未来重点是提高工业技术水平和缩小工业技术差距,同时兼顾管理效率提升。南部沿海区的 $TGRI$ 、 MI 占比分别 29.7% 和 70.3%,表明技术无效和管理无效共同导致了南部沿海区工业生态无效率,未来须双

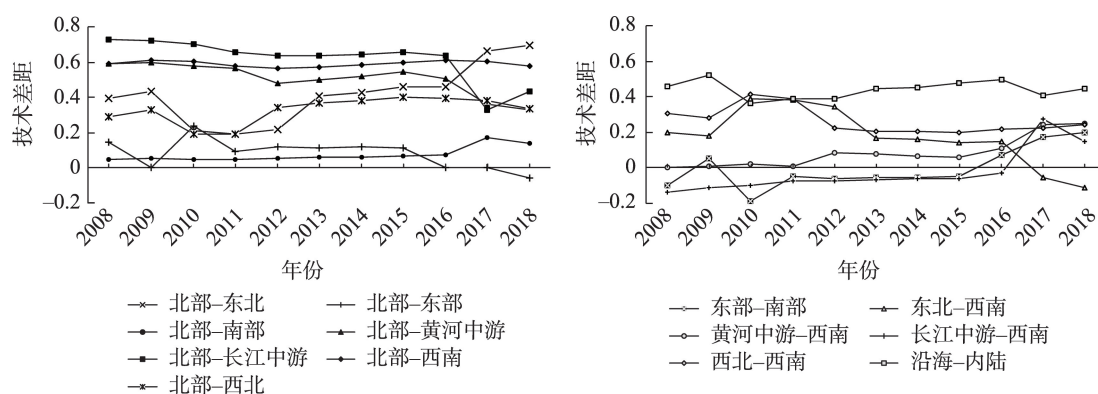


图 1 2008—2018 年八大经济区工业生态效率的技术差距(部分经济区间)

Figure 1 Technological gap of industrial ecological efficiency in eight economic regions (some economic region pairs), 2008-2018

② 由于篇幅限制,30 个省(市、区)工业生态无效率的分解结果未予展示,如有需要,可向作者索取。

表3 八大经济区工业生态效率值分解及重点提升策略

Table 3 Value decomposition of industrial ecological efficiency in eight economic regions and key promotion strategies

省份	MOEI	TGRI		MI		重点提升策略	
	均值	均值	占比%	均值	占比%	技术	管理
东北区	0.420	0.420	100.0	0.000	0.0	**	
北部沿海区	0.133	0.002	1.5	0.131	98.5		**
东部沿海区	0.085	0.085	100.0	0.000	0.0	**	
南部沿海区	0.192	0.057	29.7	0.058	70.3	*	**
长江中游区	0.629	0.616	97.9	0.013	2.1	**	
黄河中游区	0.513	0.513	100.0	0.000	0.0	**	
西南区	0.596	0.596	100.0	0.000	0.0	**	
西北区	0.336	0.328	97.6	0.008	2.4	**	
全国	0.384	0.351	91.4	0.033	8.6	**	

注: TGRI和MI占比属于[20%, 50%), 记为*; 属于[50%, 100%], 记为**。

管齐下, 同步提升工业技术水平和管理效率。

3.3.2 省域层面

为了探寻省域工业生态效率的提升策略, 以全国技术无效率和管理无效率的均值为界, 将30个省(市、区)工业生态无效率特征归纳为4个方阵, 结果如表4所示。由表4可知: ①类别Ⅰ中的安徽的TGRI和MI年均值高于全国平均水平, 表明安徽的管理水平和技术水平都比较落后, 未来需要采取缩小技术差距和提高管理效率的“双管齐下”策略。②类别Ⅱ中的黑龙江、吉林、山西、河南等14个省(区)的TGRI年均值高于全国平均水平, 但是MI年均值低于全国平均水平, 这意味着14个省(区)在管理效率上具有一定的优势, 而导致14个省份无效率的主要根源是工业技术水平较低, 未来需要提高工业技术水平以减少工业生态效率损失。③类别Ⅲ中的辽宁、北京、天津等13个省(市)TGRI和MI年均值皆低于全国平均水平, 其中北京、天津、上海等7个省(市)的TGRI和MI年均值为0.000, 表明13个

省(市)在管理和技术方面发展态势均良好, 具有技术水平优势和管理效率优势, 未来需继续保持这两方面优势, 发挥带头作用。④类别Ⅳ中的福建和河北的TGRI年均值低于全国平均水平, MI年均值高于全国平均水平, 表明这两个省份的工业技术水平较高, 但较低的管理效率制约了效率提升, 未来关注的重点应是提高管理效率。

3.4 中国工业生态效率影响因素分析

3.4.1 回归分析

为了探寻影响地区工业生态效率的外部环境因素, 对工业生态效率的影响机制进行检验。工业生态效率取值范围在0~1之间, 是受限因变量, 如果采用OLS直接回归会产生较大偏误, 而Tobit模型可用于解决受限或截断因变量建模问题。采用极大似然估计方法估计的Tobit模型能够得到与原参数一致的估计量, 因此运用极大似然估计方法估计的Tobit模型对中国工业生态效率影响因素及其影响机制进行考察(表5)。

表4 30个省份工业生态效率改善潜力的提升策略

Table 4 Strategies for improving the potential of industrial ecological efficiency in 30 provinces

类别	无效率成因	省(市、区)	提升策略
I	管理无效率高 技术无效率高	安徽(1个)	缩小技术水平差距 提高工业管理效率
II	管理无效率低 技术无效率高	黑龙江、吉林、山西、河南、内蒙古、湖北、湖南、江西、云南、贵州、四川、广西、甘肃、新疆(14个)	保持管理效率优势 缩小技术水平差距
III	管理无效率低 技术无效率低	辽宁、北京、天津、山东、上海、江苏、浙江、广东、海南、陕西、重庆、青海、宁夏(13个)	保持管理效率优势 保持技术水平优势
IV	管理无效率高 技术无效率低	福建、河北(2个)	保持技术水平优势 提高工业管理效率

2022年5月

表5 全国及八大经济区工业生态效率的影响因素回归结果

Table 5 Regression results of influencing factors of industrial ecological efficiency in China and its eight economic regions

变量	ECO	ER	NC	IC	FDI
全国	0.002 (0.056)	0.001 (0.024)	-0.041** (0.017)	0.965 (1.066)	-0.023 (0.017)
东北区	-1.929*** (0.366)	-0.034 (0.084)	0.222 (0.541)	8.529 (11.182)	0.189** (0.085)
北部沿海区	0.298** (0.149)	0.148** (0.060)	1.099 (0.719)	-3.001 (2.536)	0.275** (0.132)
东部沿海区	0.681*** (0.243)	-0.013 (0.047)	-0.011 (0.585)	5.451*** (1.322)	0.009 (0.059)
南部沿海区	-0.110 (0.301)	-0.060 (0.046)	-2.066*** (0.421)	5.914** (2.314)	-0.127 (0.120)
黄河中游区	1.092*** (0.093)	-0.079 (0.053)	1.905*** (0.244)	-11.090*** (2.971)	0.059 (0.048)
长江中游区	1.735*** (0.362)	0.079 (0.067)	0.657 (0.505)	-32.905*** (8.201)	-0.274*** (0.094)
西南区	0.400* (0.239)	0.080 (0.069)	-0.024 (0.023)	26.435*** (7.291)	-0.326*** (0.071)
西北区	0.283* (0.170)	0.035 (0.050)	1.728*** (0.429)	39.325*** (11.344)	0.100** (0.044)

注:括号内为标准差;“*、**、***”分别表示在10%、5%、1%水平上显著。

(1)经济水平对全国工业生态效率有促进作用,但未通过显著性检验。经济水平对于八大经济区工业生态效率的影响较为复杂,其中,对黄河中游、长江中游、北部沿海、东部沿海、西北和西南区均有显著的正向影响,究其原因:黄河中游和长江中游经济发展水平提高,促使政府有更多的资金用于环境保护,生态破坏和环境污染得到一定的遏制^[22];北部沿海和东部沿海区经济发展水平一直位于国内前列,促使了新能源、新技术、新管理模式不断显现,使得经济增长对环境的正外部性得以凸显,这与张仁杰等^[23]的结果相似;西南和西北区在国家供给侧改革和新能源开发政策的推动下,坚持走绿色发展的道路,从而促使工业生态效率的提高^[24]。经济水平对东北区有负向影响,且通过1%的显著性水平检验。东北区经济发展依赖大量资源要素投入,但技术水平有限,资源利用率较低,不利于工业生态效率提高。

(2)环境规制对全国工业生态效率的影响为正,从整体上看“波特假说”成立,这一结果与杜龙政等^[25]的结论相似,表明适当的环境规制能够产生“创新效应”,弥补部分甚至全部的环境治理成本,促进生态效率的提高。从区域来看,环境规制对东

北、东部沿海、南部沿海和黄河中游区的工业生态效率存在抑制作用,但均未通过显著性水平检验;而环境规制对于北部沿海、长江中游、西南和西北区存在促进作用,其中北部沿海区通过5%的显著性水平检验,可能的原因是:北部沿海区工业化进程较早,在发展过程中环境规制与工业发展水平的适应性不断提高,同时促进区域产业结构优化调整,工业污染水平不断降低^[26],区域“波特假说”成立。

(3)能源结构对全国工业生态效率提升有制约作用,且通过1%的显著性水平检验,可能在于中国工业消耗依旧以煤炭为主的局面并没有发生根本性改变,过度依赖某种化石能源,对工业生态效率的提高具有一定制约。能源结构对于八大经济区效率的影响较为复杂,对东北、北部沿海、黄河中游、长江中游和西北区的工业生态效率存在促进作用,其中黄河中游和西北区通过了1%的显著性水平检验。能源结构对东部沿海、南部沿海和西南区工业生态效率的影响为负,其中南部沿海区通过1%的显著性水平检验,可能原因在于:南部沿海区可使用能源种类逐渐趋向于多元化,天然气、电、太阳能等清洁能源的利用增加,促使对煤炭等化石能

源消耗的依赖性降低,对于工业生态效率的驱动性较为明显。

(4)产业集聚对全国工业生态效率提升有促进作用,但未通过显著性检验。从区域来看,产业集聚对东部沿海、南部沿海、西南和西北区有明显促进作用,且通过1%的显著性水平检验,这与原毅军等^[27]的结论基本一致。产业集聚吸引来的大量人才、高新技术与资源能够有效推动区域工业经济绿色发展。对北部沿海、黄河中游和长江中游区存在抑制作用,其中黄河中游和长江中游区在1%的水平上显著,这与周杰琦等^[28]的研究发现一致。可能原因是:一是产业集聚依然以高耗能产业为主,高排放、高污染、高消耗的发展方式并未发生本质改变,不利于工业生态效率的提高。二是受到技术水平限制,将难以处理集聚过程中产生的大量污染物,由此产生环境破坏、生态污染,甚至可能通过溢出效应污染邻近区域。

(5)外商投资对全国工业生态效率有抑制作用,表明全国层面的“污染天堂假说”成立,原因可能有2个:①为追求经济效益,过分强调外资数量而忽略了质量,致使大量污染密集型产业转入,加剧了生态污染;②大量外商投资进入会挤占部分国内自由资金,致使流向绿色技术研发、新能源开发、环保产品设计等方面的资金相对减少,不利于生态环境建设^[29]。从区域来看,外商投资对八大经济区工业生态效率的影响情况各异。外商投资对东北、北部沿海、东部沿海、黄河中游和西北区存在正向影响,其中东北、北部沿海和西北区通过5%的显著性水平检验。而对南部沿海、长江中游和西南区有负向影响,其中长江中游和西南区通过1%的显著性水平检验,长江中游和西南区引入的外资质量参差不齐,外资流向的管控力度较宽松,更容易进入污染密集型产业,造成较大的环境污染,区域“污染天堂假说”成立。

3.4.2 稳健性检验

考虑到测算方法可能对工业生态效率影响因素的回归结果产生影响,本文进一步利用GMM估计代替极大似然估计法估计的Tobit模型,考察上述结果的稳健性,所有的变量与前文保持一致^③。检验结果显示,全国及八大经济区的影响因素的系数

与前文基本保持一致,显著性也无明显差异,表明工业生态效率影响因素的回归结果具有稳健性。

4 结论与政策建议

4.1 结论

本文基于技术异质性视角,运用共同前沿函数和非期望产出SBM模型测度分析了中国八大经济区工业生态效率及工业技术差距,从管理和技术两个维度将无效率值进行分解,挖掘工业生态效率损失根源并提出具体的改进策略,最后探究了经济水平、环境规制等外部环境因素对于工业生态效率的影响。主要结论如下:

(1)2008—2018年,共同前沿下中国工业生态效率呈现波动上升的趋势,但仍存在一定的改善空间;空间上地区工业生态效率存在显著的非均衡性,呈现出“沿海经济区高、内陆经济区低”的空间分异;省际层面上,北京、天津、山东、上海、广东、海南和重庆7个省(市)一直处于有效状态,而云南、贵州、甘肃、内蒙古等省(区)由于多方因素的制约一直处于低水平。

(2)中国工业技术水平存在显著的空间差异,沿海经济区明显高于内陆经济区,其中,北部沿海区最接近潜在最优工业技术水平,而长江中游区则相差最远;此外,2008—2018年沿海与内陆经济区间的技术差距并无明显缩小趋势,依旧存在较高的技术壁垒。

(3)无效率分解发现,全国总体为低管理无效高技术无效型,效率损失主要来源于技术无效率;八大经济区无效率类型各异,南部沿海和北部沿海区为高管理无效低技术无效型,其余经济区为低管理无效高技术无效型;30个省(市、区)无效率类型存在显著差异,并对应不同的改善策略,但技术无效率是多数省份面临的共同难题。

(4)影响因素检验发现,经济水平、环境规制、产业集聚对全国工业生态效率提升有促进作用,而能源结构、外商投资对全国工业生态效率提升有抑制作用。从区域层面看,经济水平的提升有助于东部沿海、黄河中游、长江中游、西南和西北区的效率提升;环境规制能够有效促进北部沿海区的效率提升,“波特假说”在此处成立;产业集聚对东部沿海、西南和西北区存在显著促进作用;能源结构对南部

③ 因篇幅所限,此处未展示稳健性检验结果,如有需要可向作者索取。

2022年5月

沿海区的效率存在明显抑制作用;外商投资明显抑制长江中游和西南区的效率提升,“污染天堂假说”在此处成立。

4.2 政策建议

根据以上实证结果,本文提出相关政策建议如下:

(1)提升工业生态效率的根本出路在于技术创新和管理创新协同。要在加大绿色技术研发投入,提高清洁技术推广和应用水平,健全工业技术创新体系的同时,创新企业管理模式,优化企业治理机制,完善企业激励约束机制,全力保障工业生态发展。

(2)沿海和内陆经济区间的技术水平差距明显值得关注。要进一步加强区域间的技术合作和交流,破除区域技术壁垒,促进绿色技术、先进管理经验等从沿海经济区向内陆经济区扩散。与此同时,沿海经济区应进一步发挥技术引领和示范带动作用,必要时可以对内陆经济区进行精准帮扶或对口支援,共享技术创新成果,而内陆经济区在模仿和学习的同时,加大研发投入,提高自主创新能力。

(3)充分发挥政府“保障者”与“监督者”角色。政府应加大工业生态文明建设投资,为改善工业生态效率提供资金保障;加大对企业绿色环保绩效考核力度,制定约束方案让高污染企业整改;着眼于污染根源性问题,引导企业技术创新;对内陆经济区给予更多的政策支持和资金保障。

(4)全力推进工业绿色低碳发展。不断优化能源消费结构,倒逼工业结构转型升级;大力发展可再生能源,减少对化石能源的依赖。

(5)严守环境保护的大门,切忌只追求经济效益而牺牲生态效益。既要关注外资数量,更要关注外资质量和流向,对有利于提升技术创新的外资,给予相应的政策优惠,并引导投向环保产业,而对那些转移国际污染密集型产业的外资,应设置较高的准入门槛,以避免中国成为国际污染密集型产业的“避难所”。

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] Tone K, A slacks-based measure of super-efficiency in data envel-

- opment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 143(1): 32-41.
- [3] 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):116-122. [Guo L, Xu S Q. Industrial eco-efficiency with the integration super efficiency DEA: The central six provinces 2003-2013 date as an example[J]. Economic Geography, 2016, 36(6): 116-122.]
- [4] 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 C Y, Zhang S Q, Zhang W. Spatial distribution characteristics and influencing factors of China's inter provincial industrial eco-efficiency [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(12): 1970-1978.]
- [5] 张新林,仇方道,谭俊涛,等.中国工业生态效率时空分异特征及其影响因素解析[J].地理科学,2020,40(3):335-343. [Zhang X L, Qiu F D, Tan J T, et al. Spatial pattern change and influencing factors of China's industrial eco-efficiency[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(3): 335-343.]
- [6] 李在军,胡美娟,张爱平,等.工业生态效率对PM2.5污染的影响及溢出效应[J].自然资源学报,2021,36(3):737-751. [Li Z J, Hu M J, Zhang A P, et al. Influence and spillover effect of industrial eco-efficiency on PM2.5 pollution[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(3): 737-751.]
- [7] 黄和平,李亚丽,王智鹏.基于Super-SBM模型的中国省域城市工业用地生态效率时空演变及影响因素研究[J].生态学报,2020,40(1):100-111. [Huang H P, Li Y L, Wang Z P. Spatio-temporal changes of eco-efficiency and influencing factors of industrial land use at the provincial level of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(1): 100-111.]
- [8] 张樨樨,曹正旭.长江经济带工业生态效率时空演变及影响因素分析[J].长江流域资源与环境,2022,31(3):493-502. [Zheng X X, Cao Z X. Spatio-temporal evolution and analysis of influencing factors of industrial ecological efficiency and in Yangtze River Economic Belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(3): 493-502.]
- [9] 李在军,胡美娟,周年兴.中国地级市工业生态效率空间格局及影响因素[J].经济地理,2018,38(12):126-134. [Li Z J, Hu M J, Zhou N X. The spatial pattern and influencing factors of industrial eco-efficiency in Chinese prefecture-level cities[J]. Economic Geography, 2018, 38(12): 126-134.]
- [10] 董会忠,韩沅刚.开放与绿色理念下如何提升工业生态效率?基于“污染天堂”假说的验证[J].商业研究,2020,(12):75-84. [Dong H Z, Han Y G. How to improve industrial eco-efficiency under the open and green development concept? Based on the verification of the “pollution paradise” hypothesis[J]. Commercial Research, 2020, (12): 75-84.]
- [11] 李贝歌,胡志强,苗长虹,等.黄河流域工业生态效率空间分异特征与影响因素[J].地理研究,2021,40(8):2156-2169. [Li B G, Hu Z Q, Miao C H, et al. Spatio-temporal evolution characteristics and influencing factors of the industrial eco-efficiency in the

- Yellow River Basin[J]. *Geographical Research*, 2021, 40(8): 2156–2169.]
- [12] O'Donnell C J. Metafrontier frameworks for the study of firm-level efficiencies and technology ratios[J]. *Empirical Economics*, 2008, 34: 231–255.
- [13] Chiu C R, Liou J L, Wu P I, et al. Decomposition of the environmental inefficiency of the meta-frontier with undesirable output[J]. *Energy Economics*, 2012, 34: 1392–1399.
- [14] 彭红松, 郭丽佳, 章锦河, 等. 区域经济增长与资源环境压力的关系研究进展[J]. *资源科学*, 2020, 42(4): 593–606. [Peng H S, Guo L J, Zhang J H, et al. Research progress and implication of the relationship between regional economic growth and resource environmental pressure[J]. *Resources Science*, 2020, 42(4): 593–606.]
- [15] 陈明华, 王山, 刘文斐. 黄河流域生态效率及其提升路径: 基于100个城市的实证研究[J]. *中国人口科学*, 2020, (4): 46–58. [Chen M H, Wang S, Liu W F. Eco-efficiency and its promotion in the Yellow River Basin: Empirical evidence from 100 cities[J]. *Chinese Journal of Population Science*, 2020, (4): 46–58.]
- [16] 任梅, 王小敏, 刘雷, 等. 中国沿海城市群环境规制效率时空变化及影响因素分析[J]. *地理科学*, 2019, 39(7): 1119–1128. [Ren M, Wang X M, Liu L, et al. Spatio-temporal change and influencing factors of environmental regulation in China's coastal urban agglomerations[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(7): 1119–1128.]
- [17] 熊瑛. 我国工业化中的能源问题与生态文明建设[J]. *宏观经济管理*, 2021, (2): 51–58. [Xiong Y. The energy issues of and ecological progress in China's industrialization[J]. *Macroeconomic Management*, 2021, (2): 51–58.]
- [18] 周鹏飞, 沈洋, 朱晓龙. 制造业产业集聚对城市绿色经济效率的影响: 机理、测度与路径[J]. *城市发展研究*, 2021, 28(3): 92–99. [Zhou P F, Shen Y, Zhu X L. Research on the impact of manufacturing industry agglomeration on the efficiency of urban green economy: Mechanism, measurement and path[J]. *Urban Development Studies*, 2021, 28(3): 92–99.]
- [19] 黄磊. 产业集聚提升了长江经济带城市工业绿色发展效率吗?[J]. *湖北大学学报(哲学社会科学版)*, 2021, 48(1): 115–125. [Huang L. Can industrial agglomeration promote green development efficiency of urban industries of the Yangtze River Economic Belt?[J]. *Journal of Hubei University (Philosophy and Social Science)*, 2021, 48(1): 115–125.]
- [20] 李繁荣, 尚云舟, 薛紫玥. 外商直接投资对我国绿色发展的影响: 基于中国260个地级市的数据验证[J]. *经济问题*, 2022, (4): 75–84. [Li F R, Shang Y Z, Xue Z Y. The impact of foreign direct investment on China's green development: Evidence from 260 prefecture level cities in China[J]. *On Economic Problems*, 2022, (4): 75–84.]
- [21] 霍伟东, 李杰峰, 陈若愚. 绿色发展与FDI环境效应: 从“污染天堂”到“污染光环”的数据实证[J]. *财经科学*, 2019, (4): 106–119. [Huo W D, Li J F, Chen R Y. Study on environmental effects of green development and FDI: Data demonstration from “pollution paradise” to “pollution halo”[J]. *Finance & Economics*, 2019, (4): 106–119.]
- [22] 刘琳轲, 梁流涛, 高攀, 等. 黄河流域生态保护与高质量发展的耦合关系及交互响应[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(1): 176–195. [Liu L K, Liang L P, Gao P, et al. Coupling relationship and interactive response between ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(1): 176–195.]
- [23] 张仁杰, 董会忠. 基于省级尺度的中国工业生态效率的时空演变及影响因素[J]. *经济地理*, 2020, 40(7): 124–132. [Zhang R J, Dong H Z. Spatial and temporal evolution and influencing factors of China's industrial eco-efficiency based on provincial scale[J]. *Economic Geography*, 2020, 40(7): 124–132.]
- [24] 斯丽娟. 西部地区产业生态化时空演进及其驱动机制[J]. *甘肃社会科学*, 2021, (4): 149–156. [Si L J. The spatio-temporal evolution and driving mechanism of industrial ecologicalization in western China[J]. *Gansu Social Sciences*, 2021, (4): 149–156.]
- [25] 杜龙政, 赵云辉, 陶克涛, 等. 环境规制、治理转型对绿色竞争力提升的复合效应: 基于中国工业的经验证据[J]. *经济研究*, 2019, 54(10): 106–120. [Du L Z, Zhao Y H, Tao K T, et al. [Du L Z, Zhao Y H, Tao K T, et al. Compound effects of environmental regulation and governance transformation in enhancing green competitiveness[J]. *Economic Research Journal*, 2019, 54(10): 106–120.]
- [26] 徐成龙, 庄贵阳. 基于环境规制的环渤海地区工业集聚对生态效率的时空影响[J]. *经济经纬*, 2020, 37(3): 11–19. [Xu C L, Zhuang G Y. Spatial and temporal impact of industrial agglomeration on ecological efficiency in Bohai Economic Rim: A study based on environmental regulation[J]. *Economic Survey*, 2020, 37(3): 11–19.]
- [27] 原毅军, 谢荣辉. 产业集聚、技术创新与环境污染的内在联系[J]. *科学学研究*, 2015, 33(9): 1340–1347. [Yuan Y J, Xie R H. Empirical research on the relationship of industrial agglomeration, technological innovation and environmental pollution[J]. *Studies in Science of Science*, 2015, 33(9): 1340–1347.]
- [28] 周杰琦, 张莹. 外商直接投资、经济集聚与绿色经济效率: 理论分析与中国经验[J]. *国际经贸探索*, 2021, 37(1): 66–82. [Zhou J Q, Zhang Y. Foreign direct investment, economic agglomeration and green economy efficiency: Theoretical analysis and China's experience[J]. *International Economics and Trade Research*, 2021, 37(1): 66–82.]
- [29] 王柏杰, 周斌. 货物出口贸易、对外直接投资加剧了母国的环境污染吗? 基于“污染天堂假说”的逆向考察[J]. *产业经济研究*, 2018, (3): 77–89. [Wang B J, Zhou B. Does the export of goods and outward foreign direct investment exacerbate the environmental pollution in the home county? Reverse investigation based on the “pollution heaven hypothesis”[J]. *Industrial Economics Research*, 2018, (3): 77–89.]

Regional differences and driving factors of China's industrial ecological efficiency: Based on technology heterogeneity

DENG Zongbing^{1,2}, LI Liping¹, WANG Ju¹, CAO Yufu¹

(1. College of Economics and Management, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Research Center for Inclusive Finance and Agricultural & Rural Development, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Exploring the regional differences and influencing factors of industrial ecological efficiency in regions with different technological development levels in China is the basic premise for the collaborative construction of industrial ecological civilization. Considering inter-regional technological heterogeneity, this study used the undesirable output slacks-based measure (SBM) model to measure the industrial ecological efficiency and inter-regional technological gap of 30 provinces in China's mainland from 2008 to 2018 based on the meta-frontier theory. From the two dimensions of source of inefficiency and external environment, the causes and external influencing factors of industrial ecological efficiency loss were systematically analyzed and tested. The research findings are: (1) Under the common frontier, China's industrial ecological efficiency shows an overall upward trend, with the annual average rising from 0.589 in 2008 to 0.603 in 2018, and there is still some room for improvement. (2) The imbalance of industrial technological level in the eight major economic regions is obvious. The technological level in the inland economic regions is significantly lower than that in the coastal economic regions. The technological gap between the five inland economic regions and the national optimal technological development level is at least 30%. (3) The decomposition of inefficiency shows that the southern and northern coastal regions are of high management inefficiency and low technological inefficiency, while other economic regions and the whole county are of low management inefficiency and high technological inefficiency; The invalidity types of 30 provinces are different, but it is mainly caused by the technological invalidity rate. (4) Economic development level, environmental regulation, and industrial agglomeration promote the improvement of industrial ecological efficiency, while energy structure and foreign investment inhibit improvement; The direction and degree of the influence of environmental factors on the eight economic regions are clearly different, among which the "Porter hypothesis" in the northern coast has been verified, and the "pollution paradise hypothesis" in the middle reaches of the Yangtze River Basin and the southwest has been verified. This study provides a new perspective for exploring the improvement path of industrial ecological efficiency and a reference for the collaborative construction of industrial ecological civilization.

Key words: industrial ecological efficiency; technological heterogeneity; regional differences; driving factors; meta-frontier theory; undesirable output SBM model; China