

引用格式:张峰,薛惠锋.基于绿色发展的工业全要素水资源效率时空特征[J].资源科学,2021,43(5):964-973.[Zhang F, Xue H F. Spatiotemporal characteristics of industrial total factor water resource efficiency based on green development[J]. Resources Science, 2021, 43(5): 964-973.] DOI: 10.18402/resci.2021.05.10

# 基于绿色发展的工业全要素水资源效率时空特征

张峰<sup>1</sup>,薛惠锋<sup>2</sup>

(1. 山东理工大学管理学院,淄博 255012;2. 中国航天系统科学与工程研究院,北京 100048)

**摘要:**提高工业水资源效率既是缓解水资源短缺的重要举措,也是促进工业绿色转型升级的内在要求。在全要素生产框架下,本文基于绿色发展内涵构建共同前沿与群组前沿函数模型,分析2000—2018年工业绿色全要素水资源效率的时序变迁特点,并对群组前沿下的工业绿色全要素水资源效率进行空间收敛效应检验。结果表明:①不同地区工业绿色全要素水资源效率存在显著差异,在共同前沿下,效率整体上呈现“东部领先、中部追赶和西部落后”的空间格局;而在群组前沿下,效率测度过程能够克服共同前沿中总样本估计偏差的弊端,从而更为真实地反映效率实际变化,尤其是在东、中部地区效率均值排序中表现更为明显;②东部地区技术落差比最高(98.9%),与共同前沿最接近,中、西部地区技术落差比相对较为接近,但都显著低于东部,而多数地区效率均值低于0.65,说明工业节水减排依然具有较大提升潜力;③从空间收敛性来看,全国和中、西部地区效率均表现出 $\sigma$ 收敛和绝对 $\beta$ 收敛的特点,而东部地区存在内部效率差距逐渐被扩大的可能性;另外,全国和东、中、西部地区效率都具有条件 $\beta$ 收敛的趋势,其中,加快产业结构调整,促进节水减排技术创新和提高环境规制质量尤为迫切。研究结果可为不同区域制定差异化的工业水资源效率驱动策略提供科学依据。

**关键词:**工业绿色全要素;水资源效率;群组前沿;收敛效应;时空特征

DOI: 10.18402/resci.2021.05.10

## 1 引言

自1977年第一次联合国水资源大会以来,水危机已然成为全球性的焦点难题,按照联合国2019年发布的《世界人口展望》,到2050年全球人口将增长至97亿,水资源供需矛盾将愈发紧张。对于人口基数庞大的中国而言,人均水资源量远不及世界平均水平的1/3,同时多个重点流域超出水资源承载限值、水质污染事件屡见不鲜等客观事实无不透露出“中国水危机”的严重性,而随着城镇化与工业化进程加快,严峻的水资源形势将会进一步蔓延并对国内经济造成严重的损失<sup>[1]</sup>。因此,提高用水效率是保障社会可持续发展的必然选择。尤其是综观作为国内“第二大取水户”的工业用水,其取水规模已达到全社会取水总量的1/4,而《关于实行最严格水

资源管理制度的意见》中也明确提出到2030年要将万元工业增加值用水量控制到40 m<sup>3</sup>以内<sup>[2]</sup>。可以看出,无论是从社会发展需求还是国家政策导向要求,提高工业用水效率已成为现阶段促进工业转型升级与水资源管理的必然选择。

如何更为全面地认识和驱动工业用水效率的提升?针对上述焦点,一些学者分别从不同的研究视角对其作出了诸多探索。主要集中在3个方面:其一,工业用水效率内涵的变迁。以往的相关研究中将水资源作为工业发展的非强制规划性投入要素,其效益产出中主要衡量对经济增长的贡献程度<sup>[3]</sup>,显然在资源环境约束下,这种评价方式与社会进步要求之间的匹配性越来越弱<sup>[4,5]</sup>。近年来,部分学者根据循环经济和生态化理念,在评估工业用水

收稿日期:2020-03-16,修订日期:2020-06-09

基金项目:国家自然科学基金青年项目(71904108);国家自然科学基金重点项目(U1501253)。

作者简介:张峰,男,山东济南人,副教授,研究方向为系统工程与工业工程。E-mail: glxyzf@163.com

2021年5月

的产出要素时进一步考虑环境污染排放等非期望产出,这在很大程度上扭转了传统仅以经济效益为主要衡量方式的不足<sup>[6,7]</sup>。在此基础上,国内相关研究还探索了以新型工业化的发展经济学概念为依据,从工业经济与水资源复合系统的角度重新阐释了工业用水效率的基础内涵<sup>[8]</sup>。其二,工业用水效率的测度。重点包括用水效率的评价方式和驱动要素两个方面,其中,效率的评价主要涵盖比值分析法和全要素测算法<sup>[9]</sup>。比值分析法是通过水资源消耗系数等微观指标间接表征用水效率的大小,而全要素测算是依据用水效率内涵,采用随机前沿参数模型或数据包络非参数模型进行定量评估<sup>[10,11]</sup>。在驱动要素检验中,地区经济、产业结构、城镇化水平、技术进步等对工业用水的异质性影响机制得到了不同程度的揭示<sup>[12,13]</sup>。其三,工业用水效率空间效应的检验。空间聚集、收敛与溢出效应是水资源空间配置问题分析中的焦点<sup>[14]</sup>,其中,空间聚集效应反映了不同地区之间的用水状态关联特征,空间收敛效应揭示用水效率落后地区向优势地区收敛发展的趋势<sup>[15]</sup>,而空间溢出效应可检验地区内外部用水效率变化差异<sup>[16]</sup>,但遗憾的是这类问题在工业用水效率方面的探索深度尚显不足。

由上可见,既有相关研究为诠释工业用水效率提升路径提供了重要的理论支持,也为政府制定水资源相关调控政策提供了参考依据。但是在新时期治水兴水理念和工业转型方向均着重提倡以绿色化为导向的形势下,工业增长中水资源利用也应充分考虑“绿色发展”的重要内涵,不仅要水资源使用纳入到工业增长的内在驱动要素,而且也要以生态环境容量为基础。值得注意的是,以往的研究中尚存以下问题亟待解决:一是如果忽视地区之间工业发展水平及技术差距等,而直接利用总样本估计工业用水效率,难以准确地衡量各地区真实的效率状态;二是尽管环境污染作为工业用水效率的生态环境容量考察方式备受学者们的关注,但对于其空间尺度下收敛效应存在性及特征有待检验。据此,本文在参考Hu等<sup>[17]</sup>对全要素资源效率定义基础上,通过构建可以反映生态环境容量的指标体系,引入共同前沿与群组前沿函数,利用投入导向的规模收益可变数据包络(VRS-DEA)模型测度2000—

2018年中国30个省(市、区)(不含西藏、港澳台地区,下同)工业绿色全要素水资源效率,揭示时空特征变迁规律和空间收敛性,从而更加系统地摸清各地区的工业水资源利用状况,为相关决策提供更为有效的依据。

## 2 研究方法设计

### 2.1 模型构建

鉴于绿色全要素水资源效率测度的对比需求,本文引入共同前沿与群组前沿模型,其构建思路是针对一般DEA模型缺乏对不同地区生产前沿上差异性的考虑,按照既定标准把决策单元(DMU)分类成不同群组,选取随机前沿函数刻画DMU的共同和群组前沿,通过分别计算各前沿技术效率,取得相应技术落差比(TGR)<sup>[18]</sup>。其中,共同前沿是对全体DMU潜在技术水平的描述,群组前沿是对分类取得的各组DMU实际技术水平的刻画,两者的区别关键在于各自所参照的技术集合不同。据此,本文考虑地区工业发展的同质性和经济梯度差异,并参照国家统计局分类标准<sup>[19]</sup>,将研究区域30省(市、区)划分为东、中、西部群组。设定融合非期望产出的共同技术集合 $T^m$ :

$$T^m = \{(x, y^a, y^b): x \geq 0, y^a \geq 0, y^b \geq 0; x \rightarrow (y^a, y^b)\} \quad (1)$$

式中: $m$ 指技术集合种类; $x$ 指投入要素; $y^a$ 、 $y^b$ 分别表示期望与非期望产出, $a$ 、 $b$ 指产出种类。该集合描述了要取得既定产出集合 $P^m(y^a, y^b)$ 所需投入及其技术条件。

共同前沿的距离函数 $D^m$ 表达式为:

$$D^m(x, y^a, y^b) = \sup_{\gamma} \{\gamma > 0: (x/\gamma) \in P^m(y^a, y^b)\} \quad (2)$$

群组前沿的距离函数 $D^i$ 可表示为:

$$D^i(x_i, y_i^a, y_i^b) = \sup_{\gamma} \{\gamma > 0: (x_i/\gamma) \in P^i(y_i^a, y_i^b)\}, \quad (3)$$

$$i = 1, 2, 3$$

式中: $\gamma$ 表示径向距离; $P^m(y^a, y^b)$ 、 $P^i(y_i^a, y_i^b)$ 分别描述共同与群组前沿下的产出集合。

按照距离函数,可进一步计算共同与群组不同前沿下的工业绿色全要素水资源效率比值,并将其定义为 $TGR$ ,且 $TGR \in [0, 1]$ ,该指标值越大,说明实际和潜在生产效率越接近,而且群组划分必要性越强,反之则越低。为求解上述前沿函数,本文采用

Banker等<sup>[20]</sup>提出的VRS-DEA模型,并参考汪克亮等<sup>[21]</sup>研究思路,将共同与群组前沿的非期望产出作为产出效益的资源环境投入成本,归入到投入要素集合。模型如下:

假定对于各DMU<sub>i</sub>( $i=1, 2, \dots, N$ )均通过 $K$ 项投入取得 $M$ 项产出,则前沿面可利用以下模型取得:

$$\begin{aligned} & \text{Min}_{\theta, \lambda} \theta \\ & \text{s.t. } -y_i + Y\lambda \geq 0 \\ & \quad \theta x_i - X\lambda \geq 0 \\ & \quad e\lambda = 1 \\ & \quad \lambda \geq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $x_i$ 、 $y_i$ 指DMU<sub>i</sub>投入与产出向量; $X$ 、 $Y$ 指全部DMU投入与产出向量构成 $K \times N$ 和 $M \times N$ 矩阵; $\lambda$ 指系数向量; $X\lambda$ 、 $Y\lambda$ 指全部DMU投入与产出向量线性组合; $e$ 指常数向量; $\theta$ 指第 $i$ 个DMU相对效率得分,涵盖纯技术效率和规模效率,当 $\theta=1$ 时,表示DMU生产技术有效率。

参考Hu等<sup>[17]</sup>对全要素资源效率定义,本文对工业绿色全要素水资源效率描述为:将环境污染和水资源、资本、劳动一起作为投入要素,借助VRS-DEA模型求解各决策单元所对应前沿面上的最优工业水资源投入,将其与实际工业水资源投入的比值定义为工业绿色全要素水资源效率。即:

$$TFWE_{i,t} = \frac{u_{i,t}}{U_{i,t}} \quad (5)$$

式中: $TFWE_{i,t}$ 指DMU<sub>i</sub>在 $t$ 期的工业绿色全要素水资源效率; $u_{i,t}$ 指位于前沿面上的最优工业水资源投入; $U_{i,t}$ 指实际工业水资源投入。基于上述模型,可进一步取得各地区工业绿色全要素水资源效率。

## 2.2 指标解释与数据说明

按照柯布-道格拉斯生产函数,将资本、劳动力和水资源作为投入要素,经济增长作为产出要素,而近年来的考虑环境污染的相关研究中,进一步将工业废水排放量等指标作为非期望产出。为提高与现有相关结论的比较,本文选取被多数文献普遍接受的指标,但根据绿色全要素水资源效率的内涵对其产出指标给予必要修正。具体如下:

投入要素:包括资本、劳动、水资源、环境成本投入。其中,劳动投入采用工业企业从业人数表示,水资源投入利用工业用水量表示,环境成本采

用工业化学需氧量(COD)排放和氨氮排放量表示。资本投入以工业资本存量表示,用永续盘存法测算,公式为:

$$K_{it} = (1 - \ell_{it})K_{it-1} + I_{it}/P_{it} \quad (6)$$

式中: $K_{it}$ 表示当期资本存量; $K_{it-1}$ 是按照2000年为不变价格转换的基期实际资本存量; $\ell_{it}$ 为折旧率系数,采用张健华等<sup>[22]</sup>的思路设定; $I_{it}$ 为当期新增固定资产投资额; $P_{it}$ 为固定资产投资价格指数。

产出要素:工业增长。与以往研究不同,本文工业增长不利用增加值和主营业务收入衡量,而选取净利润表示,原因是在既定资源投入强度下,原材料、人工、销售成本等会导致工业增加值或主营业务收入与产品增加非同比例变化,甚至相悖的现象,难以准确揭示实际产出状态<sup>[23]</sup>。但按照边际生产理论,产品增加并非是企业发展的最终目的,企业要维持生存则还是要依赖利润的获取,因此,从企业发展的角度考虑产出时,净利润作为企业生产经营活动的目标体现,更能客观反映企业可持续发展的经济能力。本文按照出厂价格指数折算为2000年不变价格,并将其作为产出指标。

本文研究样本为2000—2018年中国30个省(市、区)(因数据缺失,不含西藏、港澳台地区),数据主要源于《中国统计年鉴》<sup>[24]</sup>、《中国工业统计年鉴》<sup>[25]</sup>、《中国环境统计年鉴》<sup>[26]</sup>、《中国水资源公报》<sup>[27]</sup>及各省(市、区)统计年鉴及公报资料。为保障数据的可靠性,本文根据第四次全国及各省(市、区)经济普查公报确定2018年投入产出数据,并结合第三次经济普查数据,采用趋势离差法<sup>[28]</sup>对2014—2018年历史数据进行修正,考虑到在现有统计资料中国国家统计局部门已基于第三次经济普查结果对2000—2013年数据进行了修正,因此,不再调整该区间数据。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同前沿距离函数下效率测度与对比

根据群组前沿分类,分别利用东、中、西部地区共同与群组前沿函数进行工业绿色全要素水资源效率的测算(图1),并测度TGR值(表1),观察工业绿色全要素水资源效率的实际变迁特点。其中,表1中列举了纯技术效率大于或等于规模效率的省



2021年5月

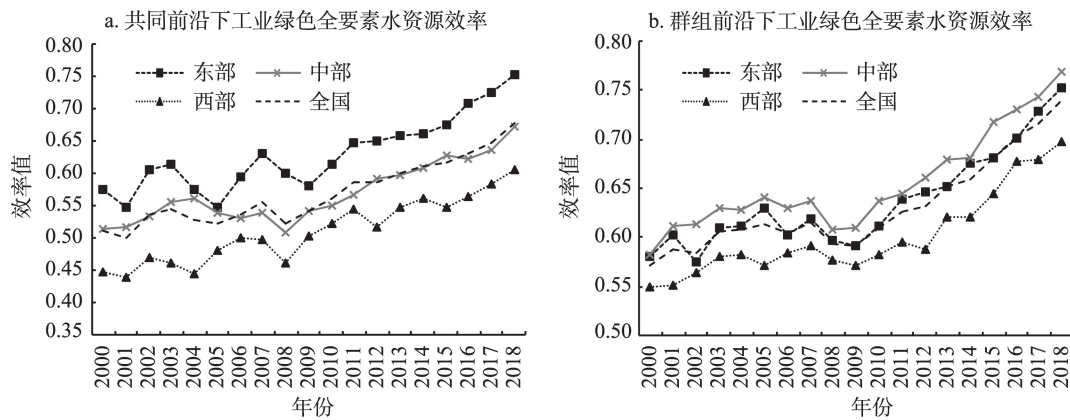


图1 2000—2018年共同与群组前沿下的工业绿色全要素水资源效率

Figure 1 Industrial total factor water resource efficiency under the common frontier and the group frontier, 2000-2018

表1 共同与群组前沿下的工业绿色全要素水资源效率及其技术落差比均值

Table 1 Average value of industrial total factor water resource efficiency and its technical gap ratio under the common and group frontiers

东部地区	共同前沿	群组前沿	TGR	中部地区	共同前沿	群组前沿	TGR	西部地区	共同前沿	群组前沿	TGR
	TFWE	TFWE			TFWE	TFWE			TFWE	TFWE	
北京	0.676	0.676	1.000	山西	0.571	0.694	0.823	四川	0.507	0.575	0.882
天津	0.688	0.688	1.000	吉林	0.545	0.602	0.905	重庆	0.566	0.641	0.883
河北	0.574	0.591	0.971	黑龙江	0.574	0.598	0.959	贵州	0.469	0.545	0.860
辽宁	0.606	0.616	0.983	安徽	0.515	0.626	0.823	云南	0.547	0.607	0.901
上海	0.664	0.664	1.000	江西	0.604	0.689	0.876	陕西	0.526	0.589	0.893
江苏	0.594	0.617	0.962	河南	0.695	0.696	0.998	甘肃	0.441	0.544	0.811
浙江	0.601	0.610	0.985	湖北	0.516	0.626	0.824	青海	0.547	0.631	0.867
福建	0.586	0.600	0.976	湖南	0.541	0.624	0.867	宁夏	0.560	0.633	0.884
山东	0.661	0.661	1.000					新疆	0.450	0.545	0.825
广东	0.665	0.665	1.000					广西	0.486	0.557	0.873
海南	0.615	0.615	1.000					内蒙古	0.515	0.577	0.892
平均值	0.630	0.637	0.989	平均值	0.570	0.645	0.884	平均值	0.510	0.586	0.870

注:限于表格容量与篇幅,不列举综合技术效率、纯技术效率和规模效率;“—”表示纯技术效率大于或等于规模效率的省(市、区);字体加粗的省(市、区)表示综合技术效率低于绿色全要素水资源效率0.3以上的地区。

(市、区),以及综合技术效率低于绿色全要素水资源效率0.3以上的地区。可以看出,除了北京、天津、上海等这类同时具备较高纯技术效率和绿色全要素水资源效率以外,工业经济发展相对落后的青海、宁夏和海南等也取得了较高的绿色全要素水资源效率测度值,但是其规模效率和综合技术效率水平明显偏低,这说明:其一,直接使用综合技术效率替代工业绿色全要素水资源效率并不合理,难以客观体现不同生产要素之间的作用关系;其二,工业绿色全要素水资源效率的高低不仅取决于经济发展和技术水平,也与其产业结构存在重要的内在关

系,例如青海、宁夏重点发展的是农牧业和旅游业,而海南则是以旅游业和房地产业等为主,其共性特点在于地区经济发展并不依赖于资源消耗度较大的工业,因此取得了较好的绿色全要素水资源效率,而反观河北、江苏、吉林等虽然都具备相对良好的工业发展基础,在综合技术效率上具有较高的规模效率,但是工业绿色全要素水资源效率却仅处于中等或较低水平。

根据图1a和表1,可以看出在共同前沿的测度下,工业绿色全要素水资源效率的整体变迁状态呈现为“东部领先、中部追赶和西部落后”的空间格

局。其中,东部表现出较高的绿色全要素水资源效率,总体上保持了相对稳定的提升趋势;中部效率处于东西部地区之间,且在全国平均效率曲线上下波动,同时2009年之后逐渐展露“后来居上”的增长态势;相比之下,西部地区整体效率值较低,虽然呈现了上涨趋势但增速偏缓。上述现象揭示出:其一,中西部工业绿色全要素水资源效率距离共同前沿的距离相对较远,而东部相对较近,说明中西部工业水资源利用尚存较大程度的绿色技术改进潜力;其二,各效率曲线的共性“拐点”出现在2008—2010年期间,说明以金融危机引发的负向冲击和以国家加快中西部承接产业转移带来的绿色技术创新效应,对绿色全要素水资源效率的共同前沿影响显著。根据群组前沿的结果(图1b),工业绿色全要素水资源效率的均值排序发生了一定变化,即中西部效率变化较为明显,中部效率值达到最高,而东部变化幅度较小。这在一定程度上解释了基于不同群组前沿进行考察的必要性,同时表明中西部地区的最高决策单元能够有效建立其前沿面,但由于西部地区工业结构普遍偏弱,新构成的前沿包络面效率依然较低,而东部地区则是因为其接近共同前沿面,在群组前沿下绿色全要素水资源效率变化较小。

从技术落差比的均值比较中,东部地区最高,达到共同前沿用水技术的98.9%,原因可能在于东部工业产业和水资源的双重空间聚集分布使其具有资源禀赋优势,同时良好的经济水平促进了技术创新与溢出效应的发挥,因此与共同前沿贴近度更高。相比之下,中西部地区技术落差比相对较为接近,但要显著低于东部,两者分别达到共同前沿用水技术的88.4%和87.0%,说明两区域与东部尚存在一定差距,尤其是国内水资源空间分配呈东多西少,中西部工业结构与资本、人力基础要素均相对落后等,都加大了其提升工业绿色全要素水资源效率的难度。此外,共同前沿下的工业绿色全要素水资源效率表明东、中、西部地区尚具有一定的改善空间,其效率改善空间分别为37.0%、43.0%和49.0%,在群组前沿下,工业绿色全要素水资源效率的改善空间依次为36.3%、35.5%和41.4%,可见群

组前沿下其效率水平更高,并更能客观真实地反映出工业绿色全要素水资源效率的变化趋势。

由上可知,工业绿色全要素水资源效率在共同与群组前沿下表现出了较大差异性,主要诱因在于各地区在差异化的生产前沿下工业水资源利用具有较为显著的技术缺口,造成地区间绿色全要素水资源技术水平出现较大差距。总体而言,东、中、西部及各地区工业绿色全要素水资源效率均值都小于1,而且仅有较少数的省(市、区)效率值达到0.65以上,说明从绿色发展的角度重新审视国内工业用水效率时,其发展状态并不容乐观,这也进一步印证了当前加快推进工业绿色节水减排的紧迫性。

### 3.2 空间收敛分析

为了更好地揭示工业绿色全要素水资源效率的空间格局变化,需要进一步解答其是否存在空间收敛效应。“收敛”不等于“均等”,收敛性意味着区域效率差距存在由强到弱、由高到低的空间格局变化,但是这并非是指绝对的横向均等,而是在时间尺度下不断缩小的过程,因此,工业绿色全要素水资源效率的空间收敛性本质上是检验其效率区域差异随着时间推移而出现的演变趋势与动态特征,常用的检验方法主要包括 $\sigma$ 收敛、 $\beta$ 收敛<sup>[29,30]</sup>。模型分别如下:

$$\sigma_t = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \ln TFWE_{i,t} - \sum_{i=1}^n \ln TFWE_{i,t} / n \right)^2 / n - 1} \quad (7)$$

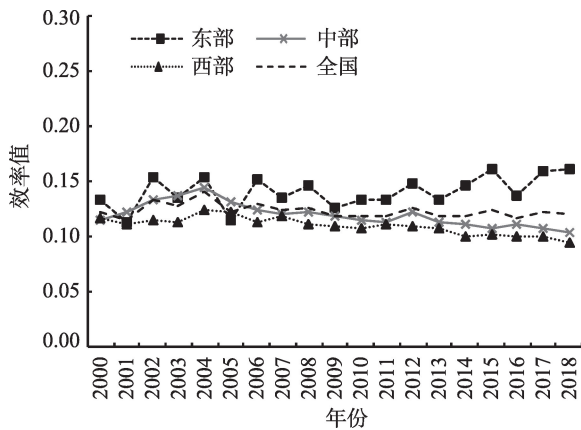
$$\ln(TFWE_{i,t+1}/TFWE_{i,t})/\varpi = \alpha + \beta \ln TFWE_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (8)$$

$$\ln(TFWE_{i,t+1}/TFWE_{i,t})/\varpi = \alpha + \beta \ln TFWE_{i,t} + \sum_{\rho=1}^n v_{\rho} Cont_{\rho,i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (9)$$

式中: $\sigma$ 表示对数标准差; $n$ 为样本地区数量; $TFWE_{i,t+1}$ 、 $TFWE_{i,t}$ 分别指地区*i*在*t+1*期和*t*期的工业绿色全要素水资源效率; $\varpi$ 指研究时段年份数,为保障收敛检验的连续性,取 $\varpi=1$ ; $\alpha$ 为常数项; $\beta$ 为收敛系数,当其显著为负时,表示存在绝对 $\beta$ 收敛; $\varepsilon$ 为误差项; $v_{\rho}$ 表示第 $\rho$ 项控制变量的弹性系数; $Cont$ 表示控制变量。

按照模型(7),首先检验工业绿色全要素水资源效率的 $\sigma$ 收敛,结果见图2。可发现样本期内全

2021年5月

图2 工业绿色全要素水资源效率 $\sigma$ 收敛变化Figure 2 The  $\sigma$  convergence trend of industrial total factor water resource efficiency

国、中西部地区的总体收敛均呈稳定减小趋势,说明从全国整体层面的工业绿色全要素水资源效率区域差异随着时间的推移而逐步下降,中西部地区内部的效率差异变化与之相似。与上述地区形成鲜明对比,东部地区 $\sigma$ 收敛波动明显,且总体上出现上涨态势,说明其内部效率差异变化幅度较大,并存在差距逐渐被扩大的可能性。进一步对比不同群组的 $\sigma$ 收敛均值,发现最大值和最小值分别出现在东部与西部地区,而中部地区与全国层面的 $\sigma$ 收敛均值相差较小,说明东部内各地区之间的工业绿色全要素水资源效率平均差异要显著高于其他区域,揭示了东部地区虽然总体上具备较高的工业集聚优势,但各省(市、区)工业基础与技术水平参差不齐,水资源空间分布不均,如黄河三角洲等地区淡水资源匮乏,环境差异相对较大,造成工业总体规模较大情况下的工业绿色全要素水资源效率呈发散状态。西部地区工业基础、技术水平和水资源禀赋等与东部存在差距,同时区域内部四川、重庆等地区的工业发展及其水资源状况要明显优于青海、宁夏等,但正如前文给出的解释,青海、宁夏等在主体产业结构并非为工业的情况下,其效率并未给西部整体水平造成显著制约。相比而言,中部地区各省(市、区)之间的工业发展及其水资源状况相对均衡,特别是中部腹地的省(市、区)在工业化

进程和水资源承载力等方面具有很大相似性,使其绿色全要素水资源效率的 $\sigma$ 收敛显著。

利用模型(8)检验工业绿色全要素水资源效率的绝对 $\beta$ 收敛性,在基于Hausman检验确定选取固定效应模型的基础上,取得绝对 $\beta$ 收敛估计结果(表2)。可知,不同群组下的工业绿色全要素水资源效率均表现为显著性负值,说明从全国宏观层面和区域中观层面来看,工业绿色全要素水资源效率均具有绝对 $\beta$ 收敛的趋势,该结果印证了地区之间的效率差异并非不可协调和缓解,当工业发展条件和水资源利用水平达到一定程度并趋同的情况下,工业绿色全要素水资源效率能够达到稳定持续性增长的状态。综合前文对 $\sigma$ 收敛的检验结果,可以看出全国和中西部地区同时支持了 $\sigma$ 收敛和绝对 $\beta$ 收敛假说,认为这些样本区工业绿色全要素水资源效率具有空间收敛现象。

此外,考虑不同区域工业用水系统一般存在差异性的演化路径及稳态水平,可进一步通过模型(9)引入相关控制变量检验工业绿色全要素水资源效率的条件 $\beta$ 收敛性。为增强结论的对比性,本文在梳理现有相关研究基础上,选取控制变量包括:水资源禀赋(可用水资源量对数表示)、地区经济水平(人均GDP对数表示)、产业结构(第二产业比重表示)、技术进步(技术市场成交额对数表示)、环境规制(排污达标指数表示<sup>①</sup>)。在利用Hausman检验确定使用固定效应模型的基础上,取得条件 $\beta$ 收敛性检验结果(表2)。

根据表2,可发现不同群组下 $\beta$ 收敛系数均呈显著性负值,说明工业绿色全要素水资源效率在全国层面和东、中、西部区域层面均具有条件 $\beta$ 收敛的特点,这意味着在工业绿色全要素水资源效率总体趋势呈稳定增长的态势下,不同区域的效率变化将会逐步向各自的平衡点进行收敛。而控制变量的检验则进一步揭示了其条件收敛的动因,尤其是不同群组下的控制变量系数存在一定差异性,说明虽然工业绿色全要素水资源效率存在条件 $\beta$ 收敛

① 目前对环境规制的衡量尚未形成共识,但基于最终规制效果测定其强度的方式得到了广泛应用,因此,采用排污达标综合指数表示:
$$eri_i = \sum_{j=1}^n g_{ij} \delta_{ij} / n, n=1, 2, 3, \dots, m$$
。式中: $eri_i$ 表示地区*i*的环境规制强度; $g_{ij}$ 表示地区*i*工业排污指标*j*的标准化值,与年鉴保持一致,主要涵盖工业废水排放达标率,固废综合利用率,二氧化硫、粉尘和烟尘去除率; $\delta_{ij}$ 指排污权重,采用排污指标与其均值的比值确定。



表2 工业绿色全要素水资源效率  $\beta$  收敛检验Table 2 The  $\beta$  convergence test of industrial total factor water resource efficiency

变量	空间绝对 $\beta$ 收敛				空间条件 $\beta$ 收敛			
	东部	中部	西部	全国	东部	中部	西部	全国
常数项 $\alpha$	0.104** (3.71)	0.138*** (5.72)	0.093** (3.02)	0.125*** (4.41)	0.116*** (3.60)	0.121** (4.03)	0.053** (2.37)	0.085** (2.76)
系数 $\beta$	-0.038*** (-2.84)	-0.054** (-2.96)	-0.072*** (-5.33)	-0.064*** (-3.14)	-0.040** (-2.61)	-0.051*** (-3.72)	-0.074*** (-5.01)	-0.059*** (-4.28)
水资源禀赋 $v_1$					0.026** (1.94)	-0.081 (-0.03)	0.017*** (2.28)	0.062*** (3.40)
地区经济 $v_2$					0.073*** (4.86)	0.020** (2.12)	-0.014 (-0.11)	0.051** (2.73)
产业结构 $v_3$					0.053 (0.16)	-0.013*** (-2.80)	-0.008*** (-1.72)	-0.015** (-2.94)
技术进步 $v_4$					0.039*** (5.01)	0.012** (1.93)	0.007 (0.00)	0.025*** (2.83)
环境规制 $v_5$					-0.014** (-2.21)	0.007 (0.01)	0.011* (1.78)	0.006** (1.63)
Ajusted- $R^2$	0.378	0.306	0.495	0.433	0.472	0.393	0.611	0.502

注：“\*\*\*、\*\*、\*”分别指通过1%、5%、10%显著性检验；“()”指  $t$  统计值。

现象,但是其诱因却不尽相同。其中,水资源禀赋在全国与东、西部地区表现为显著正值,而中部地区弹性系数为非显著性负值,说明虽然可用水资源量的上涨能够提高对工业绿色全要素水资源效率的支撑,但水资源短缺仍是很多地区工业发展的短板约束因素,尤其是随着中部地区承接产业转移规模的增加,其工业用水压力将进一步提升;除西部地区以外,地区经济水平的弹性系数均为显著性正值,说明尽管经济水平上升可能会提高水资源供给的需求,但同时也能工业节水减排技术的升级提供资本支持,而西部地区还需对经济结构作出针对性的优化调整;上述结论在技术进步的弹性系数中也可得以佐证,即仅有西部地区的弹性系数未通过显著性检验,表明加强技术创新是保障绿色全要素水资源效率稳定提升的关键,同时也是促进效率收敛的重要因素;产业结构的弹性系数在东部不具备统计意义上的显著性,其他群组下均呈显著性负值,说明现有工业结构尚不足以支持绿色全要素水资源效率的持续提升,原因在于工业规模较大,但质量不足,尤其是高耗水工业的调整和污染密集型产业的绿色转型迫在眉睫,这与现阶段追求“高质量”发展初衷相一致;环境规制的弹性系数在全国和东、西部具备显著性,但东部为负值,说明虽然提高环境规制可倒逼工业节水减排成效,但也应充分

考虑地区之间的差异,尤其是东部地区工业门类复杂,应从环境规制强度和类别等方面给予系统性分析和改进。

## 4 结论与讨论

基于绿色发展理念,本文在传统工业用水效率评价指标基础上,将生态环境因素纳入到用水效率考察范畴,赋予工业绿色全要素水资源效率更为系统性的内涵,丰富了工业用水效率评价体系。同时,考虑地区差异性对效率评估的影响,引入共同和群组前沿函数,利用 VRS-DEA 模型测度 2000—2018 年中国 30 省(市、区)工业绿色全要素水资源效率,并检验其空间收敛性。研究发现:

(1)共同前沿与群组前沿下工业绿色全要素水资源效率呈差异化的变迁特征。其中,共同前沿下工业绿色全要素水资源效率整体呈“东部领先、中部追赶和西部落后”的空间格局,但在群组前沿下,工业绿色全要素水资源效率均值排序发生明显变化,尤其是中西部地区最为明显,主要诱因在于采用群组前沿测度工业绿色全要素水资源效率时能够考虑各决策单元在不同生产前沿下的技术缺口,从而降低直接选用总样本测度带来的评估误差。分析技术落差比发现,东部地区可达到共同前沿用水技术的 99.4%,中西部技术落差比相对较为接近,但是显著低于东部,两者分别达到共同前沿用水技

2021年5月

术的89.9%和88.4%,上述结果不仅进一步体现了应用群组前沿测度的必要性,也反映出有工业节水减排技术水平仍具有较大的提升潜力。

(2)空间收敛效应检验表明提升工业绿色全要素水资源效率既要注重各省(市、区)之间的协同性,也要依据各自实际特点采取因地制宜的驱动措施。其中, $\sigma$ 收敛揭示了东部内部效率差异变化幅度较大,并存在差距逐渐被扩大的可能性,而全国、中部和西部则与之相反。 $\beta$ 收敛估计发现,全国和东、中、西部地区工业绿色全要素水资源效率均可达到稳定持续性增长的状态,不同区域的效率变化也会逐步向各自的平衡点进行收敛。需要关注的是,条件 $\beta$ 收敛的检验还进一步印证了导致不同群组收敛的诱因不一,东部地区除了要继续发挥资本和技术密集优势等外,还应注意产业结构质量的调整和环境规制的合理性设计,中部地区不仅要注意上述问题,还要着重调控水资源配置,缓解水资源禀赋不足带来的生产约束,西部地区经济发展与技术创新水平偏低,产业结构层次不高,需要借助国家政策导向,积极承接东中部地区产业转移,并吸收先进的工业节水减排技术,从而为绿色全要素水资源效率的提升注入持续性动力。

## 参考文献(References):

- [1] 梁缘毅,吕爱锋.中国水资源安全风险评价[J].资源科学,2019,41(4): 775-789. [Liang Y Y, Lv A F. Risk assessment of water resource security in China[J]. Resources Science, 2019, 41(4): 775-789.]
- [2] 国务院.关于实行最严格水资源管理制度的意见[EB/OL]. (2012-02-15) [2020-03-15]. [http://www.gov.cn/zhuanti/2015-06/13/content\\_2878992.htm](http://www.gov.cn/zhuanti/2015-06/13/content_2878992.htm). [The State Council. Opinions on Implementing the Most Stringent Water Resources Management System [EB/OL]. (2012-02-15) [2020-03-15]. [http://www.gov.cn/zhuanti/2015-06/13/content\\_2878992.htm](http://www.gov.cn/zhuanti/2015-06/13/content_2878992.htm).]
- [3] Gidion D K, Hong J, Adams M Z A, et al. Network DEA models for assessing urban water utility efficiency[J]. Utilities Policy, 2019, 57: 48-58.
- [4] Jin W, Zhang H Q, Liu S S, et al. Technological innovation, environmental regulation, and green total factor efficiency of industrial water resources[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 211: 61-69.
- [5] Skrydstrup J, Larsen S L, Rygaard M. Eco-efficiency of water and wastewater management in food production: A case study from a large dairy in Denmark[J]. Journal of Industrial Ecology, 2020, 24(5): 1101-1112.
- [6] Li J, See K F, Chi J. Water resources and water pollution emissions in China's industrial sector: A green-biased technological progress analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 229: 1412-1426.
- [7] Tarroja B, Chiang F, Aghakouchak A, et al. Assessing future water resource constraints on thermally based renewable energy resources in California[J]. Applied Energy, 2018, 226: 49-60.
- [8] 张峰,王晗,薛惠锋.环境资源约束下中国工业绿色全要素水资源效率研究[J].中国环境科学,2020,40(11): 5079-5091. [Zhang F, Wang H, Xue H F. China's industrial green total factor water efficiency under the constraints of environment and resource [J]. China Environmental Science, 2020, 40(11): 5079-5091.]
- [9] Lu X, Xu C X. The difference and convergence of total factor productivity of inter-provincial water resources in China based on three-stage DEA-Malmquist index model[J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2019, 22: 75-83.
- [10] Yao X L, Feng W, Zhang X L, et al. Measurement and decomposition of industrial green total factor water efficiency in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 198: 1144-1156.
- [11] 邓光耀,张忠杰.基于网络SBM-DEA模型和GML指数的中国各省工业用水效率研究[J].自然资源学报,2019,34(7): 1457-1470. [Deng G Y, Zhang Z J. The study on industrial water use efficiency of Chinese provinces: Based on network SBM-DEA model and GML index[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(7): 1457-1470.]
- [12] Qi Q, Song S B. Measurement and influencing factors of industrial water resource utilization efficiency in Yangtze River Economic Belt[J]. International Journal of Design & Nature and Ecodynamics, 2020, 15(5): 653-658.
- [13] 郑乐,杨法暄,钱会,等.基于超效率DEA模型的宁夏工业水资源利用效率研究[J].水资源与水工程学报,2020,31(2): 81-86. [Zheng L, Yang F X, Qian H, et al. Study on the utilization efficiency of industrial water resources in Ningxia based on super-efficiency DEA model[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(2): 81-86.]
- [14] 孙思奥,汤秋鸿.黄河流域水资源利用时空演变特征及驱动要素[J].资源科学,2020,42(12): 2261-2273. [Sun S A, Tang Q H. Spatiotemporal patterns and driving factors of water resources use in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(12): 2261-2273.]
- [15] 张峰,王晗,薛惠锋.工业绿色全要素水资源效率的空间格局特征[J].软科学,2020,34(10): 43-49. [Zhang F, Wang H, Xue H F.



- Spatial pattern characteristics of industrial green total factor water resources efficiency[J]. *Soft Science*, 2020, 34(10): 43–49.]
- [16] 王保乾, 谢贝. 工业绿色水资源效率动态演进与空间溢出效应研究: 以长江经济带为例[J]. *资源与产业*, 2020, 22(5): 10–18. [Wang B Q, Xie B. Dynamic evolution and spatial spillover effect of industrial green water resource efficiency(igwre): Based on A case study of Yangtze River Economic Zone[J]. *Resources & Industries*, 2020, 22(5): 10–18.]
- [17] Hu J L, Wang S C. Total-factor energy efficiency of regions in China[J]. *Energy Policy*, 2006, 34(17): 3206–3217.
- [18] 闫庆友, 桂增侃, 张文华, 等. 中国能源影子价格和能源环境效率省际差异[J]. *资源科学*, 2020, 42(6): 1040–1051. [Yan Q Y, Gui Z K, Zhang W H, et al. The heterogeneity of regional energy shadow price and energy environment efficiency in China[J]. *Resources Science*, 2020, 42(6): 1040–1051.]
- [19] 国家统计局. 第四次全国经济普查公报(第七号)[EB/OL]. (2019–11–20) [2020–03–15]. [http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201911/t20191119\\_1710340.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201911/t20191119_1710340.html). [National Bureau of Statistics of China. China Economic Census Bulletin (No. 7)[EB/OL]. (2019–11–20) [2020–03–15]. [http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201911/t20191119\\_1710340.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201911/t20191119_1710340.html).]
- [20] Banker R D, Charnes A W, Cooper W W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis [J]. *Management Science*, 1984, 30(9): 1078–1092.
- [21] 汪克亮, 刘悦, 史利娟, 等. 长江经济带工业绿色水资源效率的时空分异与影响因素: 基于EBM-Tobit模型的两阶段分析[J]. *资源科学*, 2017, 39(8): 1522–1534. [Wang K L, Liu Y, Shi L J, et al. Yangtze River Economic Zone spatial and temporal disparities in industrial green water resource efficiency and influencing factors based on two-step analysis of EBM-Tobit Model[J]. *Resources Science*, 2017, 39(8): 1522–1534.]
- [22] 张健华, 王鹏. 中国全要素生产率: 基于分省份资本折旧率的再估计[J]. *管理世界*, 2012, (10): 18–30. [Zhang J H, Wang P. China's growth in total factor productivity: A re-estimation based on provincial capital depreciation rate[J]. *Management World*, 2012, (10): 18–30.]
- [23] 陈关聚, 白永秀. 基于随机前沿的区域工业全要素水资源效率研究[J]. *资源科学*, 2013, 35(8): 1593–1600. [Chen G J, Bai Y X. Regional differences in total-factor industrial water efficiency based on a stochastic frontier approach[J]. *Resources Science*, 2013, 35(8): 1593–1600.]
- [24] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2000–2019. [National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2000–2019.]
- [25] 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, 2001–2017. [Department of Industry Statistics, National Bureau of Statistics of China. China Industry Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2001–2017.]
- [26] 国家统计局, 生态环境部. 中国环境统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001–2018. [National Bureau of Statistics of China, Ministry of Ecology and Environment. China Statistical Yearbook on Environment[M]. Beijing: China Statistics Press, 2001–2018.]
- [27] 国家水利部. 中国水资源公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000–2018. [Ministry of Water Resources of China. China Water Resources Bulletin[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2000–2018.]
- [28] 龙秋波, 贾绍凤, 汪党献. 中国用水数据统计差异分析[J]. *资源科学*, 2016, 38(2): 248–254. [Long Q B, Jia S F, Wang D X. Disparity in China's water use statistics[J]. *Resources Science*, 2016, 38(2): 248–254.]
- [29] 肖磊, 李云, 陈佳蕊. 中国工业绿色水资源效率的区域差异与收敛性研究[J]. *数量经济研究*, 2020, 11(2): 133–149. [Xiao L, Li Y, Chen J R. Regional differences and convergence of industrial green water resources efficiency in China[J]. *The Journal of Quantitative Economics*, 2020, 11(2): 133–149.]
- [30] 陈东景, 孙兆旭, 郭继文. 中国工业用水强度收敛性的门槛效应分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(5): 85–92. [Chen D J, Sun Z X, Guo J W. Threshold effect of the convergence of industrial water use intensity in China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(5): 85–92.]

# Spatiotemporal characteristics of industrial total factor water resource efficiency based on green development

ZHANG Feng<sup>1</sup>, XUE Huifeng<sup>2</sup>

(1. School of Management, Shandong University of Technology, Zibo 255012, China;

2. China Aerospace Academy of Systems Science and Engineering, Beijing 100048, China)

**Abstract:** Improving the efficiency of industrial water resource use is not only an important way to alleviate water shortages, but also an inherent requirement for promoting industrial green transformation and upgrading. Hence, under the framework of total factor production, the common frontier and group frontier function models were constructed based on green development theory, and then the characteristics of temporal change of industrial green total factor water resource efficiency was analyzed. Furthermore, the spatial club convergence effect of industrial green total factor water resource efficiency under the group frontier was tested. The results show that: (1) There are significant differences in the efficiency of industrial green total factor water resource in different regions. Under the common frontier, the average efficiency presents a spatial pattern of “the east is leading, the central is catching up, and the west is lagging behind”. But under the group frontier, the efficiency measurement process can overcome the influence of the total sample estimation deviation under the common frontier, and then reflect the change of efficiency more realistically, especially in the ranking of the mean efficiency in the eastern and central regions. (2) The eastern region has the highest technology gap ratio (98.9%), which is closest to the common frontier, and the technical gaps of the central and western regions are similar but significantly lower than that of the eastern region, and the average efficiency of most regions is lower than 0.65, indicating that industrial water saving and emission reduction still have great potential for improvement. (3) From the perspective of spatial club convergence, the efficiency of the whole country and the central and western regions all show the characteristics of  $\sigma$  convergence and absolute  $\beta$  convergence, while the eastern region has the possibility of gradually widening the internal efficiency gap. In addition, the efficiency of the country and the eastern, central and western regions all have a trend of conditional  $\beta$  convergence. Among them, it is particularly urgent to accelerate the adjustment of industrial structure, promote technological innovation in water saving and emission reduction, and improve the quality of environmental regulations. The research results can provide a scientific basis for the development of differentiated industrial water efficiency driving strategies in different regions.

**Key words:** total green factors of industry; water resource efficiency; group frontier; convergence effect; spatiotemporal characteristics