

中国省域工业用水效率评价及区域差异分析

孙付华^{1,2,3}, 张林林^{2,3,4}, 吕 犇⁵, 沈菊琴^{1,2,3}

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学环境会计与资产经营管理研究所, 江苏 南京 211100; 4. 河海大学商学院, 江苏 南京 211100;
5. 江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司, 江苏 苏州 215128)

摘要: 基于改进的三阶段 SBM-DEA 模型对中国大陆除西藏外的 30 个省(区、市)工业用水效率进行评价, 并利用泰尔指数探究全国工业用水效率的区域差异。研究表明: 外部环境和随机干扰是不可忽视的重要影响因素, 经济发展水平、环境规制、人均水资源量对提升工业用水效率有积极作用, 工业化程度、对外开放程度表现为明显的负向抑制作用; 修正后全国工业用水效率大幅提高且呈增长态势, 区域工业用水效率由“东高中低”空间分布演化为“东高西低”, 流域工业用水效率呈现为黄河流域效率大于长江流域的空间格局; 低工业用水效率组省(区、市)数量最多, 高工业用水效率组仅包括北京和天津; 我国工业用水效率空间差异性有减小的趋势, 为实现区域协调发展需重点关注东部地区和西部地区内部各省(区、市)工业用水状况。

关键词: 工业用水效率; 三阶段 SBM-DEA 模型; 效率评价; 泰尔指数

中图分类号: F407.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-9511(2022)01-0021-08

2021 年全国两会中, 关于“十四五生态环境保护规划”指出, 水环境保护与治理是生态环境保护的头等大事, 为切实解决水资源短缺、水环境污染、水生态受损问题, 要统筹“水资源、水生态、水环境”保护与治理, 深入打好污染防治攻坚战, 这不仅关系到废水排放总量, 与工业用水效率亦直接相关。由于人口增长、经济发展和消费方式的转变, 对用水需求增长贡献率最大的因素是农业和工业用水行为^[1]。随着水资源供需矛盾的加剧, 工业用水效率的提升成为推动水资源持续利用的关键路径。工业是我国国民经济发展的支柱, 也是仅次于农业用水的第二用水大户。水利部公布的 2020 年《中国水资源公报》显示工业用水量为 1 030.46 亿 m³, 占总用水量的 17.73%。我国用水模式较为粗放, 大部分省(区、市)工业用水效率偏低, 与西方发达国家相比, 我国工业水循环次数和工业用水重复率都处于较低水平, 工业用水浪费现象也较为严重。在此背景下, 如何提升工业用水效率, 促进我国工业经济的高质量发展和绿色发展是急需研究的重要课题。

工业用水效率从投入产出角度选取指标测算工

业用水的相对效率, 衡量的是在多种要素投入前提下, 投入相同时产出的最大水平或者既定产出下所消耗的最小资源量。近年来, 水效率测度方法主要围绕随机前沿分析(SFA)和数据包络分析(DEA)展开。王济干等^[2]和雷玉桃等^[3]用 SFA 方法分别研究了长三角地区的全要素水资源效率和中国的工业用水效率, 并从时间和空间的双重视角分析了区域间的效率差异。由于随机前沿生产函数方法需要明确生产函数的形式, 因此不需要提前设定生产函数的数据包络分析方法(DEA)被众多学者所采用, 并经过不断发展演化出了多种形式。部分学者基于考虑非期望产出的 SBM 模型从不同的空间尺度上测算了中国大陆各省(区、市)、京津冀城市群、长江经济带等地区的工业用水效率^[4-6]。张永凯等^[7]将 DEA 模型和 Malmquist 指数结合将水效率分解为技术进步率和技术效率, 以探究不同地区的水资源利用特点。李珊等^[8]采用 Super-SBM 模型测算了中国大陆 31 个省(区、市)的工业用水效率。李静等^[9]利用 MinDS 模型测算了资源与环境的双重约束下中国工业用水效率。考虑到环境因素和随机因素的

影响,卢曦等^[10]和江丽丽等^[11]基于传统的三阶段DEA模型分别测度了长江经济带的用水效率和江苏省生产用水效率。

提升工业用水效率的关键是识别驱动因素,确定其作用机制。Wang等^[12]研究发现水效率的提升得益于技术进步,认为科技创新是提高水资源利用效率的主要途径。Liu等^[13]研究发现产业结构、研发强度和高等教育是用水效率的主要驱动因素。冯俊华等^[14]研究发现工业用水效率与人均水资源量、年均人均国内生产总值正相关,与工业用水年增长率负相关。童纪新等^[15]研究发现环境规制对水资源利用效率存在单一门槛效应。章恒全等^[16]基于固定效应的Tobit回归模型探究了浙江省工业水资源绿色效率的影响因素,发现对外开放能积极地促进工业水资源绿色效率的提升,而严厉的环境规制则产生相反的作用。Zhang等^[17]研究发现工业增加值用水量和GDP增长率对水环境效率均存在显著的负向影响。刘波等^[18]以万元工业增加值用水量衡量工业用水效率,从空间视角探究了工业用水效率与节水水平、用水压力 and 经济发展之间的匹配关系,不同区域匹配关系有较大差异。

综上所述,我国学者针对工业用水效率测度展开了较为丰富的研究,但以下方面有待改进:①大多数学者在测度工业用水效率时,未能克服外界环境和随机变量的干扰,致使结果产生偏差。部分研究采用传统的三阶段DEA模型将这两个因素考虑进来,但传统三阶段模型中BBC模型或CCR模型无法对非期望产出进行衡量,随着我国低碳经济、绿色经济的发展,有必要引入非期望产出,因此选择SBM模型对传统三阶段模型进行改进。②现有外部因素,大多考虑自然、经济、社会等因素,未考虑政府作用,政府环境治理中具有举足轻重的作用,工业水污染治理对水循环和重复利用具有直接影响,因此本文进一步将政府因素纳入剔除范围。基于此,运用三阶段SBM-DEA模型测算中国30个省(区、市)的工业用水效率,在此基础上探究外部环境对工业用水效率的影响以分析工业用水效率的驱动机制,并结合泰尔指数探究效率差异的原因,为制定差异化的节水措施提供建议。

1 研究方法

1.1 三阶段SBM-DEA模型

a. 第一阶段:传统三阶段模型中的第一阶段多采用BBC模型和CCR模型且无法对非期望产出进行分析。Tone^[19]建立了考虑松弛变量和非期望产出的SBM模型,具体形式如下:

$$\left\{\begin{aligned} \min \rho &= \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^x}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{r=1}^{s_1} \frac{s_r^y}{y_{r0}} + \sum_{r=1}^{s_2} \frac{s_r^u}{u_{r0}} \right)} \\ \text{s. t. } x_0 &= X\lambda + S_x \\ y_0 &= Y\lambda - S_y \\ u_0 &= U\lambda + S_u \\ S_x &\geq 0 \\ S_y &\geq 0 \\ S_u &\geq 0 \\ \lambda &\geq 0 \end{aligned}\right. \quad (1)$$

式中: λ 为权重向量,共有 m 个投入, s 个产出(其中 s_1 个期望产出, s_2 个非期望产出); n 为决策单元的数量; S_x 、 S_y 、 S_u 分别为投入、期望产出和非期望产出的松弛变量; x 、 y 、 u 分别为投入、期望产出和非期望产出值; X 、 Y 、 U 分别表示投入、期望产出和非期望产出对应的矩阵; ρ 表示工业用水效率,当 $\rho=1$ 时,表示决策单元完全有效;当 $0<\rho<1$ 时,表示决策单元无效。

b. 第二阶段:以第一阶段得到的投入松弛变量为因变量,进行SFA回归以剔除环境因素和随机噪声。首先,进行SFA回归,SFA回归函数为

$$S_{ij} = f(Z_j; \beta_i) + v_{ij} + \mu_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J) \quad (2)$$

式中: S_{ij} 为第 j 个决策单元第 i 项投入的松弛变量; Z_j 为环境变量; β_i 为环境变量的系数; $v_{ij} + \mu_{ij}$ 为混合误差项, v_{ij} 为随机噪声; μ_{ij} 是管理无效率。其次,分离环境因素、随机噪声和管理无效率,分离方法借鉴罗登跃^[20]的研究成果:

$$E(\mu/\varepsilon) = \sigma_* \left[\frac{f\left(\lambda \frac{\varepsilon}{\sigma}\right)}{\varphi\left(\lambda \frac{\varepsilon}{\sigma}\right)} + \frac{\lambda \varepsilon}{\sigma} \right] \quad (3)$$

其中 $\sigma_* = \frac{\sigma_v \sigma_\mu}{\sigma}$, $\sigma = \sqrt{\sigma_v^2 + \sigma_\mu^2}$, $\lambda = \frac{\sigma_\mu}{\sigma_v}$, $\varepsilon = v_{ij} + \mu_{ij}$

因此随机误差项的分离公式

$$E[v_{ij}/(v_{ij} + \mu_{ij})] = S_{ij} - f(Z_j; \beta_i) - E[\mu_{ij}/(v_{ij} + \mu_{ij})] \quad (4)$$

最后,对投入变量进行调整,将所有的决策单元置于同一外部环境中,调整公式如下

$$X_{Aij} = X_{ij} + \{ \max[f(Z_j; \beta_i)] - f(Z_j; \beta_i) \} + [\max(v_{ij}) - v_{ij}] \quad (5)$$

式中: X_{Aij} 为调整后的投入变量; X_{ij} 为调整前的投入变量。

c. 第三阶段:以调整后数据为基础,再次测算各省(区、市)工业用水效率,得到更准确的效率评价结果。

1.2 效率差异测算及分解模型

为了对各省(区、市)的工业用水效率差异进行分析,本文采用泰尔指数对该差异进行测度。泰尔指数通过熵计算收入不平等,用来分析地区收入水平差距,取值越大,表明差异性越强。与基尼系数和变异系数相比,泰尔指数能够更好地将总体的差距分解为组间和组内差距,计算公式为

T = T_w + T_b (6)

T_p = 1/n_p * sum_{p=1}^{n_p} (e_{pi}/e_p) ln (e_{pi}/e_p) (7)

T_w = sum_{p=1}^3 ((n_p/30) * (e_p_bar/e)) T_p (8)

T_b = sum_{p=1}^3 ((n_p/30) * (e_p_bar/e)) ln (e_p_bar/e) (9)

式中:T为工业用水效率总体差距的泰尔指数;T_b、T_w分别为工业用水效率区域间差距与区域内差距的泰尔指数;n_p(p=1,2,3)分别为东部、中部和西部地区包含的省(区、市)数量;e_p_bar(p=1,2,3)分别为东部、中部和西部地区工业用水效率的平均值;e为工业用水效率平均值;e_{pi}为东部、中部和西部地区各省(区、市)的工业用水平均效率值。

1.3 指标选取和数据来源

工业用水效率评价指标主要包括投入产出变量和环境变量。投入变量中,在对水效率的评价中大多数学者将资源、劳动和资本相结合作为工业生产的投入,因此本文参考大多数文献的做法,将工业用水量、工业从业人员和固定资产投资额作为投入指标。产出变量的确定中,选取工业增加值作为期望产出,对于非期望产出指标,以往研究多选取化学需氧量为非期望产出,但近几年该指标不再进行公布,工业废水排放量能综合反映水污染的情况,因此本文选取工业废水排放量为非期望产出。

在选择环境变量时,已有研究多从自然、经济、社会等方面选取水资源禀赋、经济发展水平、产业结构等指标作为环境变量^[21-22]。水资源禀赋表示一个地区所拥有的资源量,用水效率和水资源禀赋有密切联系;经济发展的动力之一是资源的投入,经济发展模式的不同对水资源的需求量也不同;产业结构中工业发展对用水效率有直接影响,工业化程度的实现方式有两种,资源节约型、技术先进型、环境友好型的产业集聚能通过规模经济降低单位成本,从而提高工业用水效率;资源消耗型、劳动密集型、环境污染型的产业集聚可能引发“结构性缺水”和“结构性污染”等问题,从而使规模经济不能发挥正向作用,降低工业用水效率。基于以上分析,本文将上述指标纳入环境变量选择范围。此外,笔者认为

政府因素也是不能忽略的重要外部环境因素,选择环境规制和对外开放水平两个指标来反映政府对工业用水效率的管控,环境规制表示对一个地区的环境保护力度,对工业企业有引导和约束作用;对外开放水平在研发合作、人才流动、技术引进等方面对工业用水效率有重要影响。

综上,本文确定的有关指标及具体变量见表1。

表1 变量定义

变量分类	变量名称	指标名称
投入产出变量	投入变量	工业用水量
		工业从业人员
	期望产出变量	固定资产投资额
		工业增加值
		工业废水排放量
环境变量	非期望产出变量	工业废水排放量
	水资源禀赋	人均水资源量
	经济发展水平	人均GDP
	工业化程度	工业增加值/地区生产总值
	环境规制	工业废水治理完成投资额/工业增加值
	对外开放水平	外商直接投资/地区生产总值

本文所用数据均来自2006—2019年《中国统计年鉴》《中国工业统计年鉴》《中国环境统计年鉴》、各省(区、市)统计年鉴及相关数据库,部分地区缺失数据取平均值代替,以货币度量的指标均以2006年为基期进行平减。因数据缺失严重,本文研究对象不包含西藏、香港、澳门和台湾。

2 工业用水效率测算

2.1 第一阶段工业用水效率分析

本文以2006—2019年除西藏外的中国大陆30个省(区、市)为研究对象,根据公式(1)计算各省(区、市)第一阶段的工业用水效率,按地区划分为东部、中部和西部三大板块,其效率值演变规律如图1所示。

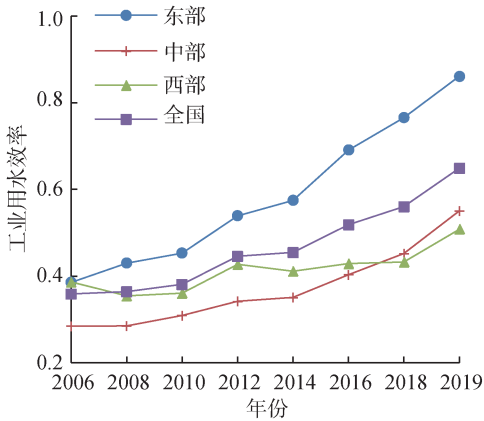


图1 全国及区域第一阶段工业用水效率演变趋势

从全国来看,2006—2019年我国工业用水效率虽存在涨幅波动但整体呈上升趋势,说明在国家宏观调控和市场驱动综合作用下,水环境保护治理与工业结构升级有良好的发展趋势。从效率值来看,

全国工业用水效率至 2019 年仅为 0.649,说明在工业绿色转型及水资源有效配置上仍有较大的提升空间。从地区来看,东部地区工业用水效率较高,2006—2019 年效率值增长幅度达 123.64%。东部地区经济发达,基于良好的工业基础产业升级较快,耗水多污染重的企业被取缔,随着节水技术的发展也提高了工业用水重复利用率,因此工业用水效率较高。中部地区和西部地区工业用水效率由低等提升到中等水平,但效率水平仍低于全国平均水平。中部地区长期作为东部地区的能源和原材料供应地,高新技术产业化进程不够且污染企业较多。西部地区 2006—2019 年工业用水效率上升幅度最小,地理位置带来的劣势的外部环境成为效率提升的最大制约因素。

表 2 进一步展示了研究期内各省(区、市)工业用水效率均值。从表 2 中可以看出,北京市、天津市和山东省工业基础较为稳定且工业发展模式较为成熟,因此效率值较高;海南省主要以第三产业为支柱产业,2019 年第三产业占地区生产总值比例为 59%,工业占地区生产总值比例为 11.1%。2019 年《海南省统计年鉴》显示,低碳制造业为重点发展的 12 个产业之一,同时海南省是所有省(区、市)中废水排放量最低的省份,因此工业用水投入较少且严格的水污染防治措施使得海南工业水资源配置较为有效。青海省由于特殊的地理位置,工业发展规模受限,在西部地区中投入和产出都比较少,工业用水集中度较高,工业内部结构转变和当地节水措施的积极推进密切相关,如对重点监控的企业安装计量设施、改进用水工艺、废水综合处理等,因此效率值较高。效率值最低的是山西省,历年来工业用水效率均值仅为 0.301。山西省是我国的老工业基地,主要以高耗水、高污染的煤炭、钢铁等行业为主,产能过剩且工业增加值不高,投入多且污染严重,造成山西工业用水效率持续位于低位。

表 2 2006—2019 年第一阶段中 30 个省(区、市)工业用水效率均值

省(区、市)	效率值	省(区、市)	效率值	省(区、市)	效率值
北京	0.673	海南	0.937	宁夏	0.483
天津	0.764	内蒙古	0.380	新疆	0.320
河北	0.445	广西	0.334	山西	0.301
辽宁	0.346	重庆	0.448	吉林	0.393
上海	0.413	四川	0.344	黑龙江	0.317
江苏	0.432	贵州	0.323	安徽	0.332
浙江	0.475	云南	0.333	江西	0.325
福建	0.462	陕西	0.412	河南	0.404
山东	0.727	甘肃	0.328	湖北	0.394
广东	0.548	青海	0.735	湖南	0.408

2.2 第二阶段 SFA 回归分析

在第二阶段分别以工业用水量、工业从业人员、固定资产投资额冗余值为因变量,以选取的 5 个环境变量为自变量进行 SFA 回归分析,回归结果见表 3。

表 3 第二阶段随机前沿回归分析结果

指标	工业用水量冗余 相关系数	工业从业人员冗余 相关系数	固定资产投资冗余 相关系数
常数值	5.813 (0.995)	47.037 ** (2.352)	1412.534 *** (3.242)
水资源禀赋	-0.0004 (-1.081)	-0.004 *** (-2.834)	-0.147 ** (-2.549)
经济发展水平	-2.209 *** (-4.936)	-11.965 *** (-7.542)	-86.222 ** (-2.552)
工业化程度	0.205 ** (1.962)	1.317 *** (2.991)	-16.072 (-1.538)
环境规制	-32.802 *** (-4.472)	-194.130 *** (-5.758)	-2341.708 *** (-8.039)
对外开放水平	0.481 (0.894)	7.745 *** (3.483)	80.187 (1.562)
σ^2	1440.679 *** (4.020)	30200.168 *** (4279.369)	8851750.500 *** (8749859.300)
γ	0.902 *** (36.052)	0.907 *** (133.029)	0.794 *** (54.753)
LR 单边 误差检验	758.308 ***	580.578 ***	317.084 ***

注:括号中数据为 T 值,*、**、*** 分别表示在 10%、5%、1% 的水平上显著。

冗余值为投入原始值与目标值的差值,即为达到最优效率值所应减少的投入,因此如果环境变量与冗余值负相关,表明外部环境有利于效率值的提高,反之则对效率的提升有抑制作用。

投入冗余的单边广义似然比检验结果均大于临界值,表明拒绝原假设,管理无效率存在,使用 SFA 回归合理。

水资源禀赋与工业从业人员、固定资产投资冗余均负相关,表明丰富的水资源能推动要素聚集而形成规模效应,降低了工业用水的单位成本,提升了工业用水效率,即表明存在“资源祝福”假说^[23]。

经济发展水平和投入冗余均显著负相关,表明经济发达地区的水资源投入和资本投入更少,有利于工业用水效率的提高。经济发达地区的工业发展模式更为稳定,激烈的市场竞争也要求工业企业走节约集约发展之路,在生产过程中会节约包括水在内的各项资源以降低运营成本,通过资源的优化配置实现了水效率的提升。

工业化程度和工业用水量、工业从业人员冗余分别在 5% 和 1% 的水平上正相关,和固定资产投资冗余不相关,表明第二产业的增加会带来水资源和劳动力的增加。表明工业规模经济并非必然对工业用水效率产生正向作用,不同类型产业单位耗水量

和污染排放量存在差异,过去粗放式的工业发展模式所导致的工业水资源消耗规模偏高、水体污染严重等问题仍存在。同时,我国技术创新能力不高,工业节水技术效率优势并未形成,具有较大的提升空间,因此要进一步优化工业结构、调整产业布局、淘汰落后产能、推行节能减排。

环境规制和投入冗余均在 1% 的水平上显著负相关,能有效提升工业用水效率。当环境规制强度增加时(如提高排污费、加重违规行政处罚力度等措施),对工业企业的生产活动影响增加,且强度越大,企业的合规成本越高。作为理性的经济人,合规成本越高,工业企业继续进行高耗水、高污染生产的可能性越小。同时环境规制在增加企业运营成本的同时也会倒逼企业进行技术革新,以抵消合规成本的增加,在外部环境约束、内部技术改进双重措施下,有效提升了工业用水效率。

对外开放水平和工业从业人员冗余显著正相关,表明目前对外开放程度在一定程度上抑制了工业用水效率的提升。主要是由于我国在招商引资的过程中引进了一些发展层次不高、劳动密集型的企业,企业准入门槛较低、相关政策不完善使得企业面临的资源与环境约束较低,因此在促进我国经济发展的同时也在一定程度上降低了工业用水效率。

2.3 第三阶段调整效率值分析

剔除环境因素和随机误差的影响后,将调整后的投入产出数据再次代入模型得到的第三阶段效率值,其与第一阶段效率值对比分析的结果见图 2,各省(区、市)名称以简称表示。

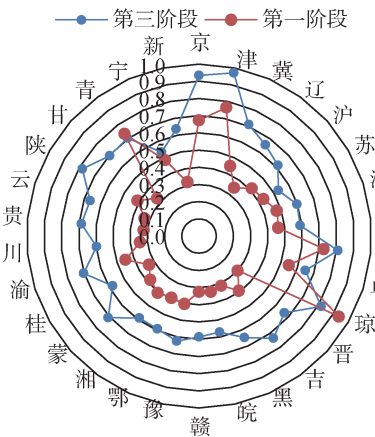


图 2 第一阶段和第三阶段效率值对比

a. 剔除环境因素和随机因素干扰前后对比分析。通过图 2 可知,剔除环境因素和随机因素干扰后,各省(区、市)的工业用水效率发生了较大的变化,调整后的工业用水效率高调整前的水平值。

与调整前相比,全国、东部、中部和西部的上升幅度分别为 49.18%、26.70%、74.49% 和 64.32%,表明中部和西部地区受环境约束较大。效率值下降的省份为海南和青海,表明未调整前其较高的工业用水效率得益于良好的外部环境。剩余 28 个省(区、市)效率值均比未调整前有所上升,上升幅度前 5 位分别为山西、甘肃、贵州、黑龙江、云南。山西省高耗水行业多。黑龙江为我国东北地区的老工业基地,以传统工业为主,科技创新水平不高。甘肃、贵州、云南三地位于我国西部地区经济发展水平较为落后,因此未调整前这 5 个省份工业用水效率受劣势环境的影响较大。基于以上分析可知,各省(区、市)面临的外部环境具有较强的异质性,将所有决策单元置于同一环境进行效率比较是十分有必要的。

b. 调整后全国样本测度。在剔除环境和随机因素后,全国工业用水效率从 2006 年的 0.579 上升至 2019 年的 0.821,上升幅度为 41.80%。如图 3 所示,全国工业用水效率 2006—2015 年在波动中上升,受资源与环境约束影响,工业企业不断调整发展模式导致工业水资源效率较为波动。2015 年之后效率逐步提升,伴随着《中国制造 2025》《工业绿色发展规划(2016—2020 年)》《水污染防治行动计划》等一系列政策的颁布实施,众多工业企业开始转型,资源节约、环境友好、绿色可持续的工业发展模式成为我国工业发展的主基调。

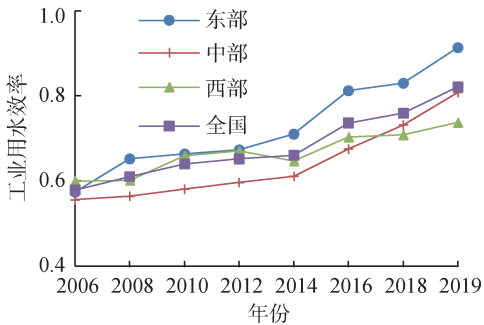


图 3 2006—2019 年全国及东中西部地区工业用水效率均值

c. 省际视角工业用水效率分析。选择 K 均值聚类法将第一阶段和第三阶段工业用水效率划分为高、中、低效率组,如表 4 所示。

从表 4 可以看出北京、天津一直位于高效率组,说明其工业用水效率已达到较优水平,在工业发展中有效的兼顾了资源利用和环境保护,是各省(区、市)学习的标杆。陕西、吉林、内蒙古、山西、甘肃、贵州、云南由低效率组升为中效率组。笔者认为这是两种完全不同的效率类型,陕西、吉林、内蒙古、山

表 4 第一阶段和第三阶段工业用水效率聚类分析结果

	高效率组	中效率组	低效率组
第一阶段	天津、北京、海南、青海、山东	河北、重庆、广东、宁夏、浙江、福建、江苏、上海	辽宁、黑龙江、新疆、河南、四川、湖北、湖南、江西、广西、安徽、陕西、吉林、内蒙古、云南、甘肃、贵州、山西
第三阶段	北京、天津	海南、山东、陕西、吉林、河北、内蒙古、青海、重庆、甘肃、贵州、山西、云南	辽宁、广东、黑龙江、新疆、河南、上海、四川、浙江、湖北、福建、湖南、江西、广西、安徽、宁夏、江苏

西工业基础较为稳固,管理模式较为成熟,但工业结构不合理,重工业比重较高,科技含量偏低,导致工业用水效率受限于劣势的外部环境;甘肃、贵州、云南工业基础较为薄弱,在工业发展初期,资源投入的边际效用较高,因此剔除外部环境影响后,工业用水效率开始反弹。上海、江苏、浙江由中效率组降至低效率组,安徽一直位于低效率组。这些省份归属长三角地区,区位优势明显,剔除环境因素后效率值与其经济发展水平不匹配,表明其工业用水效率与外部环境正相关且受外部环境影响较大,需进一步提升纯内部管理效率。

d. 区域视角工业用水效率分析。如图 3 所示,东部、中部、西部地区的工业用水效率在波动中呈上升趋势,效率均值分别为 0.717、0.627、0.663。东部地区大多数年份处于领先地位,在 2012 年之后与中部和西部地区的效率差异不断扩大,在 2019 年效率值达到 0.914。中部地区 2015 年之前效率值平稳上升,2015 年之后开始提速,到 2019 年效率值达到 0.808。西部地区工业发展并不稳定,波动较为频繁,2008—2011 年持续增长至 0.671,2011—2015 年波动中下降至 0.650,2015—2019 年波动中上升,但增长幅度与东部和中部相比较为缓慢。中部地区在 2018 年之后效率值赶超西部地区,主要是因为中部地区高耗水、高污染行业较多,加上东部地区落后产能不断转移到中部地区,致使中部地区资源与环境约束较强,随着国家宏观战略的调整,中部地区的工业开始绿色转型,工业用水效率随之赶超西部地区。

e. 流域视角工业用水效率分析。为增强流域工业用水效率的空间结构特征分析,选取我国两个重大战略发展区域(黄河和长江)进行综合比较,结果如图 4 所示。

在变化趋势上,两大流域的工业用水效率均呈现波动上升。从效率水平上来看,工业用水效率整体上呈现出黄河流域>长江流域的特点。研究期内黄河流域流经省(区、市)中有 6 个省(区、市)万元工业增加值用水量低于全国水平,长江流域流经省份仅浙江省万元工业增加值用水量低于全国平均水平,长江流域的节水空间较大。在幅度调整上,研究期内黄河流域效率值由 0.591 上升至 0.799,上升

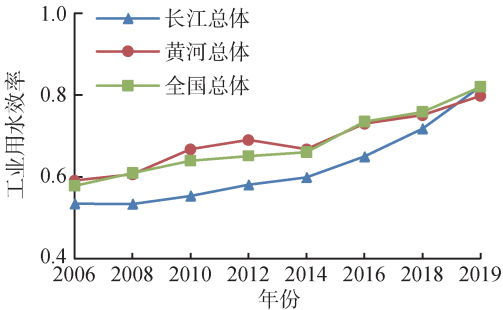


图 4 2006—2019 年全国及黄河流域、长江流域工业用水效率

幅度为 35.19%,长江流域效率值由 0.535 上升至 0.821,上升幅度为 53.46%,全国上升幅度为 41.80%,说明长江流域的纯内部管理效率在不断提高,对黄河流域存在追赶效应。

3 工业用水效率差异及分解

各省(区、市)工业用水效率存在较大差异,为进一步考察差异产生的原因,利用泰尔指数对效率值进行分解,结果如表 5 所示。从表 5 中结果可知,研究期内泰尔指数的波动频率较快,这与各省(区、市)的工业发展战略密切相关。整体上泰尔指数由 2006 年的 0.025 9 下降到 2019 年的 0.0149,工业用水效率的空间差异在减小。区域内泰尔指数由 0.0254 下降为 0.0107,区域间泰尔指数由 0.0005 上升为 0.0042,且近三年差距的变化趋势和整个研究期一致,但每年区域内差距贡献率均高于区域间差异,且区域内泰尔指数均值是区域间的 8.57 倍,因此区域内差距仍是造成整体差距的主要原因。

2006—2019 年间东部、中部和西部地区的省内差异均呈现波动中缩小的趋势,但变化幅度不大,东西部贡献率稳定在 30% 左右,中部贡献率稳定在 20% 左右。三大地区的贡献率均值从高到低排序依次为东部(34.24%)、西部(32.05%)和中部(21.84%)。东部差异较大的原因在于其包含的省(区、市)数量众多,其中天津和江苏分别是工业用水效率最高和最低的省份。东部地区发展较快但不均衡,资源集聚效应、产出效益更多地体现在经济发展较快的省(区、市),如北京、天津、山东等,但同样

表 5 2006—2019 年中国工业用水效率泰尔指数及贡献率

年份	泰尔指数	区域间贡献率/%	区域内贡献率/%			
			东部	中部	西部	合计
2006	0.0259	1.76	35.72	25.19	37.34	98.24
2007	0.0305	4.85	36.49	23.17	35.49	95.15
2008	0.0273	6.09	36.80	23.15	33.96	93.91
2009	0.0175	5.74	35.87	23.33	35.06	94.26
2010	0.0257	6.13	35.69	22.73	35.45	93.87
2011	0.0164	5.90	35.08	23.31	35.71	94.10
2012	0.0150	8.93	34.50	22.23	34.34	91.07
2013	0.0183	13.27	34.06	20.71	31.96	86.73
2014	0.0129	14.23	33.80	21.16	30.81	85.77
2015	0.0130	20.85	31.71	19.28	28.16	79.15
2016	0.0192	16.78	33.70	20.37	29.15	83.22
2017	0.0146	15.41	33.76	21.29	29.54	84.59
2018	0.0144	17.85	32.93	21.11	28.11	82.15
2019	0.0149	28.40	29.22	18.79	23.59	71.60

经济发展较快的上海、江苏、浙江等地的工业用水效率在东部地区排名较为靠后,这进一步表明上海、江苏、浙江的工业发展模式有待进一步优化。西部地区差异贡献率均值也较高,其中陕西工业用水效率均值为 0.782,位列第 5;宁夏工业用水效率均值为 0.534,位列第 29,宁夏技术效率是导致其工业用水效率较低的主要因素^[24]。中部地区贡献率从 25.19% 下降至 18.79%,地区内各省(区、市)工业用水效率呈现出趋同特征。基于以上分析可知,中国各省(区、市)工业用水效率空间异质性明显,地区间差距有缩小的趋势,如何促进区域间进一步协调发展是效率优化提升的关键。

4 结论与建议

4.1 研究结论

- a. 在不考虑外部环境和随机因素的情况下,大多数省(区、市)工业用水效率被低估,尤其是山西、甘肃、贵州、黑龙江、云南;仅海南和青海两地工业用水效率被高估。
- b. 外部环境对各省(区、市)工业用水效率产生重大影响,经济发展水平较高、环境规制强度较大、人均水资源量丰富的地区能有效提升工业用水效率,工业化程度中工业比重的增加会带来水资源和人力资源的浪费,从而对工业用水效率的提升有抑制作用。对外开放程度也表现出对工业用水效率的负向作用。
- c. 研究期内,全国及三大地区工业用水效率呈上升趋势,且 2015 年之后提速进一步加快。东部地区的工业用水效率处于领先地位,2017 年之后中部地区的工业用水效率赶超西部地区。黄河流域的工业用水效率整体上高于长江流域,但长江流域有赶超的趋势。以吉林、内蒙古为代表的重工业基地受

负面环境影响显著,工业用水效率有较大提升空间;上海、江苏、浙江工业用水效率与经济发展水平不匹配,进一步提升工业发展管理效率是未来工作的重点。

- d. 各省(区、市)工业用水效率差距有减小的趋势,区域内差距是造成工业用水效率分异的主要原因,其中东部和西部区域内省际差异较大,是改善的重点地区。东部地区的北京、天津、海南和西部地区的陕西、内蒙古是区域内各省(区、市)学习的标杆。

4.2 政策建议

- a. 多维并进,依托良好外部环境赋能工业水资源管理。工业用水效率受到不同外部环境的叠加影响,良好的外部环境能减少投入冗余,发挥资源的最优作用。经济方面,不仅要考虑经济发展的速度,更应注重发展的质量,各省(区、市)在进行产业布局时要考虑产业结构的高级化和合理化,减少高耗水、高污染企业的数量,向满足国家政策、水资源使用量较少、水污染产出较少和产值高的产业发展,及时淘汰落后产能。政府方面,将节水工作纳入经济发展规划中,根据制定符合本地区特点的工业发展战略;对内加强工业企业水资源管理,强化监管职能,提高工业企业污染环境的成本,如提升污水排放标准、淘汰污染严重的工业企业等;对外提高引进外资企业的标准,对外开放过程中积极引进专业人才、学习先进的水资源管理经验和技术手段,严格防范高污染企业的进驻。
- b. 因地制宜,结合地区特点优化资源配置。通过三阶段 SBM-DEA 测算,我国各省(区、市)工业用水效率存在较大差异,各地可根据目前效率水平和经济发展水平,制定和实施差异化工业用水机制。具体来看,高效率组可以维持目前工业水资源管理政策和资源投入;中效率组应积极协调外生经济环境,明确经济发展、工业布局变革的内涵,推动工业用水治理和社会转型的耦合协调,引导环境动能流入工业用水治理体系,推动工业用水效率稳步增长;低效率组既要重视外生环境的改善,又要注重内部管理效率的提升,同时关注这两者之间的耦合关系。
- c. 协调发展,借助区域优势打造工业水资源管理新态势。我国各省(区、市)自身经济发展、区位优势不同,工业用水效率存在较大差异。东部地区聚集了大量专业人才、先进技术和充裕的资金,中部地区为主要的能源和原材料供应基地,西部地区待开发水资源丰富。因此各区域间要打破资源流动的束缚,进一步促进人力、物力、资金、技术、经验等要

素的合理流动,工业用水效率较低的地区可以选择区域内工业用水效率较高的省(区、市)的效率值为目标值,通过适当的政策引导、财政扶持、税收优惠等手段向目标值靠拢。高效率地区发挥表率作用,主动向低效率的地区传授可复制的成功经验。各省(区、市)应打破地区封锁,协调联动发展,缩小效率差异。

参考文献:

[1] 刘钢,王金秋,杨仕亮. 考虑水-能-粮纽带关系的中国生物质能产业发展对策[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版),2020,22(5):42-51.

[2] 王济干,李颖秋. 基于 SFA-ESDA 的长江三角洲地区全要素水资源利用效率研究[J]. 水利经济,2021,39(2):9-16.

[3] 雷玉桃,黄丽萍. 基于 SFA 的中国主要工业省区工业用水效率及节水潜力分析:1999—2013 年[J]. 工业技术经济,2015,34(3):49-57.

[4] WANG Yousen, BIAN Yiwen, XU Hao. Water use efficiency and related pollutants' abatement costs of regional industrial systems in China: a slacks-based measure approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 101: 301-310.

[5] 胡彪,侯绍波. 京津冀地区城市工业用水效率的时空差异性研究[J]. 干旱区资源与环境,2016,30(7):1-7.

[6] 张熙悦,孙芳城,王怀祖. 基于“生产—治理”两阶段评价的长江经济带工业水资源绿色效率研究[J]. 江西财经大学学报,2020(2):26-36.

[7] 张永凯,孙雪梅. 黄河流域水资源利用效率测度与评价[J]. 水资源保护,2021,37(4):37-43.

[8] 李珊,张玲玲,丁雪丽,等. 中国各省区工业用水效率影响因素的空间分异[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(11):2539-2552.

[9] 李静,任继达. 中国工业的用水效率与决定因素:资源和环境双重约束下的分析[J]. 工业技术经济,2018,37(1):122-129.

[10] 卢曦,许长新. 长江经济带水资源利用的动态效率及绝对 β 收敛研究:基于三阶段 DEA-Malmquist 指数法[J]. 长江流域资源与环境,2017,26(9):1351-1358.

[11] 江丽丽,赵敏. 江苏省生产用水利用效率分析[J]. 水利经济,2019,37(3):72-77.

[12] WANG Shuqiao, ZHOU Li, WANG Hui, et al. Water use efficiency and its influencing factors in China: based on the Data Envelopment Analysis (DEA)—Tobit Model [J]. Water, 2018,10(7):832.

[13] LIU Kaidi, YANG Guoliang, YANG Duogui. Industrial water-use efficiency in China: regional heterogeneity and incentives identification [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,258:120828.

[14] 冯俊华,成尧,张丽丽. 环境规制下工业用水效率及影响因素研究:以陕西省为例[J]. 价格理论与实践,2017(07):141-144.

[15] 童纪新,赵崔妍. 长三角城市群环境规制与水资源利用效率[J]. 水利经济,2021,39(4):1-7.

[16] 章恒全,黄元龙,秦腾,等. 考虑非期望产出的工业水资源绿色效率研究:基于 SBM-Tobit 面板模型[J]. 水利经济,2019,37(5):35-40.

[17] ZHANG Dandan, SHEN Juqin, SUN Fuhua. Evaluation of water environment performance based on a DPSIR-SBM-Tobit model [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020,24(2):1641-1654.

[18] 刘波,汪紫薇,王文鹏,等. 我国城市用水效率关键指标时空格局分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):534-541.

[19] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis [J]. European Journal of Operational Research, 2001,130(3):498-509.

[20] 罗登跃. 三阶段 DEA 模型管理无效率估计注记[J]. 统计研究,2012,29(4):104-107.

[21] 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.

[22] 田贵良,盛雨,吴继云,等. 最严格水资源管理制度对长江经济带水资源利用效率的影响研究[J]. 南京工业大学学报(社会科学版),2020,19(5):90-103.

[23] 朱海滨. 环境约束下长江经济带用水效率的测度及影响因素研究[J]. 河北地质大学学报,2018,41(2):51-57.

[24] 郑乐,杨法喧,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.

(收稿日期:2021-07-24 编辑:陈玉国)

(上接第 12 页)

[21] 王新华,徐中民,李应海. 甘肃省 2003 年的水足迹评价[J]. 自然资源学报,2005(6):115-121.

[22] 何维达,付瑶,陈琴. 产业结构变迁对经济增长质量的影响[J]. 统计与决策,2020,36(19):101-105.

[23] 陶长琪,彭永樟. 人口集聚、绿化水平与环境污染:基于城市数据的空间异质性分析[J]. 江西财经大学学报,

2017(6):21-31.

(收稿日期:2021-03-21 编辑:陈玉国)

