

# 黄河流域九省(区)工业水资源效率时空分异及影响因素

苗峻瑜,张春英\*

东北财经大学产业组织与企业组织研究中心, 大连 116025

**摘要** 基于非期望产出的超效率EBM模型、ML指数和Tobit模型分析了黄河流域九省(区)2010—2019年工业水资源效率时空分异及影响因素。结果表明:黄河流域九省(区)工业水资源效率整体均值为0.77,未达到有效水平,但呈现出波动上升态势,各省(区)间差异明显,山东效率最高,宁夏最低。ML指数提高的主驱动力源自技术进步,部分省(区)的规模效率阻碍了技术效率对ML指数的正向调节。技术水平和工业化程度对工业水资源效率攀升有促进作用;水资源禀赋、工业用水强度和政府管制强度的负面效应显著。

**关键词** 工业水资源;用水效率;时空分异;黄河流域

中共中央、国务院印发的《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》指出,黄河流域最大的矛盾是水资源短缺。习近平总书记“十六字”治水思路立足“节水优先”,强调要精打细算用好水资源,从严从细管好水资源。足见水资源如何高效利用是黄河流域高质量发展亟待解决的问题。黄河流域经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东9个省区(黄河流域九省(区)),流域大部分地处于旱半干旱区,人均水资源占有量仅是全国平均水平的27%,且产业结构以耗水量巨大的工农业为主。工业是仅次于农业的第二用水大户,水资

源是工业发展的基础性资源,工业化的快速推进使得工业生产生活对水资源的消耗急剧增加,同时水资源短缺及水环境污染反向加剧了对工业生产生活的影响。黄河流域水资源的供需矛盾和经济的高质量发展要求工业生产必须“节水降耗减排”。在此背景下,科学高效利用水资源,稳步协调提升工业水资源效率,是推动黄河流域生态保护和高质量发展的现实意义。

水资源效率是衡量水资源投入产出关系的重要指标<sup>[1]</sup>,具体指通过利用水资源而获取的产出与相关生产要素投入的比值<sup>[2]</sup>。随着水资源匮乏现

收稿日期:2022-04-12;修回日期:2022-08-30

作者简介:苗峻瑜,博士研究生,研究方向为环境经济与产业发展,电子信箱:miaojunyu-0909@163.com;张春英(通信作者),教授,研究方向为产业经济学,电子信箱:399152429@qq.com

引用格式:苗峻瑜,张春英.黄河流域九省(区)工业水资源效率时空分异及影响因素[J].科技导报,2022,40(19):71-80;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.19.008

象的日趋严峻以及生态环保意识的不断普及,国内外研究愈发聚焦水资源利用效率问题。现有成果集中在3方面:(1)水资源效率的测度方法。主要包括随机前沿分析法<sup>[3]</sup>(Stochastic Frontier Approach, SFA)、指标体系构建评价法<sup>[4]</sup>和数据包络分析法<sup>[5-7]</sup>(Data Envelopment Analysis, DEA)。其中,数据包络法应用较多,但是传统DEA模型没有考虑非期望产出的影响,这与现实情况存在偏差。为使研究更贴合水资源利用现状,有学者基于DEA模型框架,在构建的SE-SBM(Slack based model)评价模型中纳入非期望产出指标来定量分析水资源效率<sup>[2]</sup>。(2)水资源效率的影响因素。该领域研究人员多用Tobit模型和地理探测器模型分析水资源效率的影响因素<sup>[8-10]</sup>,研究发现产业结构、经济发展水平以及地区水资源禀赋对水资源利用效率均有显著影响,但具体效应及作用程度存在差异。(3)农业和工业水资源效率测度。与前两方面有2点差别,一是在测度指标上普遍选择了环境污染等非期望产出,但具体指标细化程度不同。农业方面研究起步早且文献较多,农业碳排放量<sup>[11]</sup>和综合性农业面源污染指数<sup>[12]</sup>作为非期望产出指标较常见。工业方面研究相对较少,主要选择工业废水中化学需氧量<sup>[13]</sup>和工业废水排放量<sup>[14]</sup>作为非期望产出;二是在测度效率影响因素上,增加了产业发展水平、产业用水强度等工农业产业特征以及政府管制等政策性因素,且强调了技术进步的作用<sup>[15-17]</sup>。

以上研究取得了阶段进展,但仍有待完善:在研究层面上,既有文献多聚焦于全国、省域和城市层面上的综合水资源效率或农业用水效率分析,亦有基于区域协调发展的角度涉足城市群和长江流域的水资源效率分析,却鲜有学者从黄河流域层面探讨工业水资源效率。在研究方法上,现有研究主要是通过DEA模型、SBM-DEA模型、SFA模型等对工业水资源效率进行测度,用超效率 epsilon-based measure(EBM)模型测度黄河流域九省(区)工业水资源效率的成果相对匮乏。本研究构建超效率EBM模型结合Malmquist-Luenberger(ML)指数对黄河流域九省(区)工业水资源效率进行静态和动态分析,通过Tobit模型识别效率影响因素。

## 1 研究方法 with 指标数据

### 1.1 研究方法选取

#### 1.1.1 超效率EBM模型

水资源效率测算往往使用DEA模型,通常包括传统径向的CCR、BCC模型和非径向的SBM模型,但皆有不足。其中,径向模型假设投入产出要素需要以同比例进行扩张或缩减,不符合现实情况;非径向模型考虑了松弛问题,但无法比较投入产出前沿值与实际值之间的径向比例信息。Tone等<sup>[18]</sup>提出的EBM模型,兼顾径向与非径向两种方法的优势,较好地解决了上述问题。本研究借鉴相关文献,在EBM模型基础上构建非期望产出的超效率EBM模型测算工业水资源效率,以解决EBM模型无法对大量效率值为1的有效决策单元进行深层次比较的问题。模型规划式如下<sup>[19]</sup>:

$$\gamma^* = \min \frac{\theta - \varepsilon^- \sum_{i=1}^m \frac{w_i^- s_i^-}{x_{ik}}}{\phi + \varepsilon^+ \left( \sum_{r=1}^s \frac{w_r^+ s_r^+}{y_{rk}} + \sum_{p=1}^q \frac{w_p^u s_p^u}{u_{pk}} \right)} \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, m; r = 1, 2, \dots, s; p = 1, 2, \dots, q$$

$$\begin{cases} s.t. \sum_{j=1, j \neq k}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^- \leq \theta x_{ik} \\ \sum_{j=1, j \neq k}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+ \geq \phi y_{rk} \quad \lambda_j \geq 0, s_i^-, s_r^+, s_p^u \geq 0 \\ \sum_{j=1, j \neq k}^n \lambda_j u_{pj} + s_p^u \leq \phi u_{pk} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\gamma^*$ 为待测度省(区)的工业水资源效率值, $k$ 表示决策单元的数量; $x_{ik}$ 、 $y_{rk}$ 、 $u_{pk}$ 分别表示第 $k$ 个决策单元的投入、期望产出和非期望产出; $s_i^-$ 、 $s_r^+$ 、 $s_p^u$ 分别代表投入、期望产出和非期望产出的松弛变量; $w_i^-$ 、 $w_r^+$ 、 $w_p^u$ 代表各投入、期望产出和非期望产出指标的权重系数; $\theta$ 和 $\phi$ 是 $\gamma^*$ 中的径向成分; $\varepsilon$ 是取值范围为(0~1)的关键参数,代表非径向部分的重要程度,当 $\varepsilon$ 取值为0时,超效率EBM模型相当于径向模型;当 $\theta=\varepsilon=1$ 时,超效率EBM模型相当于非径向模型。

#### 1.1.2 ML指数

ML指数是Malmquist-Luenberger指数的缩写,

相较于传统的 Malmquist 指数, ML 指数的优势在于不仅可以测算类似工业增加值等期望产出的影响, 还能兼顾诸如环境污染、资源短缺等负效应导致的非期望产出影响。超效率 EBM 模型只能测算静态效率的情况, 文章用 ML 指数来分析黄河流域九省(区)工业水资源从  $t$  到  $t+1$  时期效率的动态变化。以第  $k$  个决策单元在  $t$  时期到  $t+1$  时期的 ML 指数为例, 具体表达式为<sup>[20]</sup>:

$$ML_{i,t+1}^k = \left[ \frac{1 + \overline{D}_t^k(x_t^k, y_t^k, z_t^k; g_t^k)}{1 + \overline{D}_t^k(x_{t+1}^k, y_{t+1}^k, z_{t+1}^k; g_{t+1}^k)} \times \frac{1 + \overline{D}_{t+1}^k(x_t^k, y_t^k, z_t^k; g_t^k)}{1 + \overline{D}_{t+1}^k(x_{t+1}^k, y_{t+1}^k, z_{t+1}^k; g_{t+1}^k)} \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{1 + \overline{D}_t^k(x_t^k, y_t^k, z_t^k; g_t^k)}{1 + \overline{D}_t^k(x_{t+1}^k, y_{t+1}^k, z_{t+1}^k; g_{t+1}^k)} \times \left[ \frac{1 + \overline{D}_{t+1}^k(x_t^k, y_t^k, z_t^k; g_t^k)}{1 + \overline{D}_{t+1}^k(x_{t+1}^k, y_{t+1}^k, z_{t+1}^k; g_{t+1}^k)} \right]^{\frac{1}{2}} = EC \times TC \quad (3)$$

式中,  $\overline{D}_t^k$ 、 $\overline{D}_{t+1}^k$  是方向性距离函数, 分别代表以第  $t$  期和  $t+1$  期的技术水平作为参照<sup>[21]</sup>,  $x$  代表投入要素,  $y$  代表期望产出,  $z$  代表非期望产出,  $g$  代表产出的方向向量。ML 指数  $>1$  时, 表明工业水资源效率高于上一期, ML 指数  $<1$  时表示工业水资源效率比上一期低。EC 为技术效率指数, 具体指决策单元对现有技术的应用程度, EC  $>1$  时表示对现有技术的应用程度较高, 资源管理水平改善, 规模效应显著, 反之则有待增强。TC 为技术进步指数, TC  $>1$  时表明技术出现创新, 生产水平不断升级。

此外, ML 指数中的技术效率指数(EC)可以分解为纯技术效率(PEC)和规模效率(SEC)的乘积, 表达式为:

$$ML = EC \times TC = PEC \times SEC \times TC \quad (4)$$

### 1.1.3 Tobit 模型

在测算得到黄河流域九省(区)工业水资源效

率结果后, 以此效率值作为被解释变量, 各潜在影响因素为解释变量来构建计量模型, 进一步考察黄河流域九省(区)工业水资源效率的影响机制。最终, 经过文章测算, 黄河流域九省(区)工业水资源效率值均大于 0, 属于非负截断离散数据, 直接使用普通最小二乘法(OLS)进行回归分析可能会导致参数估计有偏且不一致, 而 Tobit 模型较为适宜解决此类回归问题。因此, 选择 Tobit 模型分析黄河流域九省(区)工业水资源效率的影响因素。该模型公式为:

$$Y_{it}^* = \alpha + \beta X_{it} + \mu_{it} \quad (5)$$

$$Y_{it} = \begin{cases} 0 & Y_{it}^* \leq 0 \\ Y_{it}^* & Y_{it}^* > 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $i$  表示为省(区),  $t$  为年份,  $Y_{it}^*$  为潜变量,  $Y_{it}$  为超效率 EBM 模型测算得出的  $i$  省(区)  $t$  年份的工业水资源效率值,  $X_{it}$  为工业水资源效率的各影响因素,  $\alpha$  代表常数项,  $\beta$  表示回归系数向量,  $\mu$  为随机干扰项。

对解释变量  $X$ , 借鉴以往研究成果<sup>[14-16]</sup>, 认为黄河流域九省(区)工业水资源效率与水资源禀赋、社会发展水平、工业化程度、工业用水强度、技术水平、政府管制强度等因素相关。其中, 水资源禀赋因素以人均水资源量(本地水资源)来表示; 社会发展程度以人均 GDP 来表示; 工业化程度以各省(区)当年工业增加值与 GDP 比值来表示; 工业用水强度以各省(区)万元工业耗水量来表示; 技术水平以各省(区)R&D 投入强度来表示; 政府管制强度以各省(区)工业污染治理投资完成额与工业增加值的比值来表示。同时, 为避免量纲影响, 对于影响因素指标中包含数值型和比值型的情况进行相应的对数化处理。

### 1.2 指标选取与数据来源

将黄河流域九省(区)作为决策单元, 参考以往相关研究<sup>[13-16]</sup>, 结合研究区域工业水资源现实情况, 考虑数据的科学性和可得性, 从投入产出的角度, 选择工业用水量、工业固定资产投资和劳动力(工业从业人数)作为投入指标; 各省(区)的工业增加值作为期望产出指标(其中, 为剔除价格变化影响, 工业固定资产投资和工业增加值指标分别按照

固定资产价格指数和出厂价格指数折算为2010年的不变价格)。非期望产出指标有2项,分别是工业废水中化学需氧量以及氨氮排放量。考虑疫情影响因素,选择2010—2019年作为研究年份。以上指标数据主要来自2011—2020年《中国统计年

鉴》、《中国工业统计年鉴》和《中国环境统计年鉴》,部分数据从中经网统计数据库和国家统计局网站获得。工业水资源效率投入产出指标具体情况如表1所示。

表1 工业水资源效率投入产出指标

类型	类别	指标名称	单位	数据来源
投入指标	资源投入	工业用水总量	亿m <sup>3</sup>	中国统计年鉴
	资本投入	工业固定资产投资	亿元	中国工业统计年鉴
	劳动力投入	工业从业人数	万人	中国工业统计年鉴
产出指标	期望产出	工业增加值	亿元	中国统计年鉴
	非期望产出	工业废水中化学需氧量	万t	中国环境统计年鉴
		工业废水中氨氮排放量	万t	中国环境统计年鉴

## 2 实证分析

### 2.1 黄河流域九省(区)工业水资源效率分析

基于2010—2019年黄河流域九省(区)的面板数据,运用MaxDEA8.0软件,选择非导向非期望产出的超效率EBM模型测算工业水资源效率。为更好比较黄河流域九省(区)工业水资源效率以及考察流域内部的区域差异性,参考赵明亮等<sup>[22]</sup>的研究,结合中国地理区划,将黄河流域分为上游(青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古)、中游(陕西、山西)和

下游(河南、山东)3部分,将各省(区)及上中下游的效率均值整理成表2。

结果显示:2010—2019年的黄河流域九省(区)工业水资源效率均值是0.77,整体未达到有效水平,没有实现工业经济与水资源保护的协调发展。效率均值超过1的省(区)只有山东、陕西和山西,其余6省(区)的效率均值都小于0.84,未达到效率前沿面(即数值1),处于无效状态。不同省(区)间效率均值差异显著,效率均值最低的宁夏只有0.424,与效率均值最高的山东相差0.64。从时

表2 黄河流域九省(区)工业水资源效率

省份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	均值
甘肃	0.672	0.572	0.544	0.554	0.544	0.553	0.595	0.660	1.006	1.006	0.671
河南	0.732	0.764	0.690	0.659	0.664	0.699	1.046	1.054	1.022	1.031	0.836
内蒙古	0.573	0.494	0.475	0.469	0.494	0.561	0.543	1.002	0.621	1.009	0.624
宁夏	0.450	0.429	0.394	0.382	0.398	0.410	0.429	0.469	0.412	0.469	0.424
青海	0.365	0.400	0.387	0.364	0.381	0.395	0.519	0.487	0.461	0.552	0.431
山东	1.075	1.086	1.089	1.086	1.082	1.094	1.038	1.046	1.020	1.023	1.064
山西	1.023	1.016	0.951	1.003	1.006	0.914	1.006	1.094	1.085	1.093	1.019
陕西	1.040	1.028	1.036	1.039	1.030	1.046	1.047	1.044	1.061	1.044	1.042
四川	0.686	1.011	1.019	1.034	1.047	1.048	0.661	0.568	0.553	0.603	0.823
上游	0.549	0.581	0.564	0.561	0.573	0.593	0.549	0.637	0.611	0.728	0.595
中游	1.032	1.022	0.994	1.021	1.018	0.980	1.027	1.069	1.073	1.069	1.031
下游	0.904	0.925	0.890	0.873	0.873	0.897	1.042	1.05	1.021	1.027	0.95
全流域	0.735	0.756	0.732	0.732	0.738	0.747	0.765	0.825	0.805	0.870	0.770

间和空间来看,黄河流域九省(区)整体的年均工业水资源效率处于波动上升趋势,由2010年的0.735提高到2019年的0.87,增幅18.4%。其中,2010—2011年出现小幅上升,2011—2013年表现为小幅下降,2013—2019年开始平稳上升。尤其是2015年后,效率值增幅较大,这与2015年施行的《中华人民共和国环境保护法》和2016年中央开始实行的全国性环保督察有关。国家统计局发布的历年数据显示,2016年全国废水中主要污染物里化学需氧量比2015年减少52.9%,数据出现断崖式下降,凸显环境保护法实施以及中央环保督察带来的高成效,表明环保政策监管可以通过“治污防污促减排”对水资源效率产生直接影响。在实行环保法以及全国环保督察的大环境下,如无其他外部影响,全国各省区皆应出现上述政策法规实施所带来的水资源效率提升效果。事实上,根据表2数据,黄河流域九省(区)中大多数省份的水资源效率的提升时段与政策法规实施的时段存在对应关系,即实施环保政策法规对水资源效率有提升效果。但是,四川和青海2省的水资源效率值从2015年起不增反降,与其他省(区)情况迥异。这可能与其他省(区)是国家级或省级水权交易试点相关,因为水权交易政策能够显著提升水资源利用效率<sup>[23]</sup>。超效率EBM模型测度的是相对效率,享有水权试点政策的省份可以开展水市场交易,水市场的开展有利于水资源的优化配置,进而提升水资源效率。因此,其他条件保持不变的前提下,无此试点政策省份的水资源效率自然会相对降低。另外,2010年黄河流域九省(区)达到有效状态的省(区)只有山东、山西和陕西3省,无效状态的省(区)比例达到2/3;在2019年,有6个省(区)达到有效状态,有效状态的省(区)比例占到2/3,比2010年的有效状态省(区)数量翻了一番。由此可见,2010年,黄河流域九省(区)多数省份处于工业水资源效率无效状态,2019年多数省份则已达有效水平,效率质量提升显著。

从上中下游层面来看,2010—2019年黄河流域工业水资源的上中下游效率均值从大到小依次是中游(1.031)、下游(0.95)和上游(0.595)。中游

区域的平均效率在黄河流域3大区域中最高,这与大众普遍认知不同。中游区域的陕西和山西两省都是曾经的重工业城市,都有过重污染的历史。近10年来,随着环保理念的深入、各项优化产业结构的政策实施以及科技水平的提升,陕西和山西两省的工业用水量、工业从业人数以及工业资本投入在维持平稳甚至减少的基础上,工业增加值得到了大幅的提升,工业废水中的化学需氧量和氨氮排放量的减排程度大幅领先其余省份,如2019年山西省工业废水中化学需氧量和氨氮排放量分别比2010年减少了93%和95.8%。下游区域的山东和河南两省份是黄河流域工业经济最为发达的省份,但是其工业水资源效率并非最高。这反映出相对于中游区域,下游的工业水资源效率仍有待提升。下游工业水资源效率低于中游的原因在于尽管其工业经济相对发达,但是其产业内部结构多为高污染高能耗的产业,如化工、装备制造以及食品加工等。加之产业集聚化程度不高,并未产生预期的规模效益,出现了资源配置失衡的现象。同时,下游区域人口数量大,人口密度高,人均水资源量低于中上游区域,加之下游区域农业亦较为发达,更加剧了工业水资源的利用压力。上游区域5省份的人均水资源量最高,但是其工业水资源效率最低。上游多数省份的工业并不发达,且工业结构多以低附加值高能耗的能源及有色冶金产业为主,耗水量巨大,工业产值低,工业废水中污染物的减排力度以及工业增加值增幅都较低,以上情形抑制了工业水资源效率的提升。

## 2.2 黄河流域九省(区)工业水资源效率动态演变

为进一步分析黄河流域九省(区)工业水资源效率的动态变化趋势以及各细化指标特征,本研究对黄河流域九省(区)2010—2019年投入产出数据进行了ML指数测算和分解。根据ML指数测算的数据整理可得2010—2019年黄河流域九省(区)各年份平均工业水资源效率(表3)以及年均工业水资源效率(表4)的ML指数及其分解结果。

总体分析来看,2010—2019年黄河流域九省(区)各年份的工业水资源效率ML指数都大于1,呈现出年均增长率为14.3%的逐年上升态势。从

表3 2010—2019年黄河流域九省(区)各年份  
平均工业水资源效率ML指数及其分解

年份	ML	TC	EC	PEC	SEC
2010—2011	1.190	1.169	1.017	1.084	0.939
2011—2012	1.038	1.080	0.961	0.871	1.104
2012—2013	1.045	1.052	0.993	1.023	0.970
2013—2014	1.042	1.027	1.014	0.966	1.050
2014—2015	1.052	1.029	1.022	0.957	1.068
2015—2016	1.446	1.392	1.039	0.900	1.154
2016—2017	1.272	1.179	1.079	1.716	0.629
2017—2018	1.130	1.170	0.966	0.856	1.128
2018—2019	1.069	0.969	1.103	0.992	1.112
均值	1.143	1.119	1.022	1.041	1.017

分解指标来看,2010—2019年黄河流域九省(区)整体技术进步指数、技术效率指数、纯技术效率指数和规模效率指数的均值分别是1.119、1.022、1.041和1.017。可见,黄河流域九省(区)工业水资源效率的提升主要得益于技术进步带来的创新效应,技术效率的相对影响较小。技术效率指数进行分解可得,纯技术效率和规模效率都大于1,且纯技术效率对于技术效率的贡献略高于规模效率,表明整体上黄河流域九省(区)工业水资源开发利用管理水平改善以及投入规模增强对水资源效率提升具有正向作用。但是,在2010—2019年的多数年份中,纯技术效率小于规模效率且小于1,说明这些年份存在工业水资源开发管理利用不善阻碍

水资源效率提升的情况;在1/3的时段中,则是规模效率小于纯技术效率且小于1,出现了投入规模不足阻碍水资源效率提升的现象。同时,在这10年当中,纯技术效率和规模效率从未同时大于1,呈现一种“非此即彼”的替代效应,说明工业水资源开发利用与投入规模难以协调,尤其在2016—2017年,纯技术效率和规模效率的差值极大,表明水资源规模配置严重失调。黄河流域九省(区)整体规模效率虽处于逐年上升态势,但年均增长缓慢,年均增长率仅为1.7%,表明黄河流域九省(区)的现有工业水资源产业规模体系有待进一步完善。TC大多数年份都大于1且大于EC,而EC在1/3的年份小于1,且只有在2018—2019年TC值小于EC值,表明除2018—2019年度外,其他年份水资源效率提升的主要驱动因素为技术进步。技术效率的驱动力不足反映出黄河流域九省(区)工业现有节水技术需要改造升级,工业废水治理设施建设亟待加强,工业用水重复利用率有待提高。

从区域差异视角分析,2010—2019年黄河流域九省(区)的年均工业水资源效率ML指数均大于1,其中ML指数最高的河南省是1.238,最低的山东省是1.025,2省相差0.213,可见黄河流域九省(区)整体上工业水资源效率提升态势良好,但省(区)间提升速度差异显著。由表4可知,技术进步指数对工业水资源效率ML指数的贡献最大,且都大于1,这进一步说明技术进步是黄河流域九省

表4 2010—2019年黄河流域九省(区)年均工业水资源效率ML指数及其分解

省份	ML	TC	EC	PEC	SEC
甘肃	1.209	1.156	1.046	1.000	1.046
河南	1.238	1.192	1.039	1.004	1.035
内蒙古	1.206	1.133	1.065	1.052	1.012
宁夏	1.101	1.096	1.005	1.002	1.003
青海	1.185	1.132	1.047	1.100	0.952
山东	1.025	1.030	0.994	0.997	0.998
山西	1.084	1.076	1.007	1.009	0.998
陕西	1.068	1.067	1.000	1.000	1.001
四川	1.124	1.140	0.986	1.000	0.986
上游	1.165	1.1314	1.0298	1.0308	0.9998
中游	1.076	1.0715	1.0035	1.0045	0.9995
下游	1.1315	1.111	1.0165	1.0005	1.0165
全流域	1.138	1.114	1.021	1.018	1.003

(区)工业水资源效率提高的主导因素,但是绝大部分省(区)的规模效率指数都较低,甚至有接近一半的省(区)小于1,反映出部分地区工业水资源规模化水平有待提高,工业用水产业规模需要调整。在黄河流域九省(区)中,大部分省(区)技术进步指数和技术效率指数都大于1,而且各省(区)的技术进步指数皆高于技术效率指数,只有山东和四川2省的技术效率指数小于1,表明黄河流域九省(区)工业水资源效率提升源自生产技术进步和技术效率的共同驱动,但主要依赖于技术进步,而山东和四川两省的技术效率因素阻碍了当地工业水资源效率的提升步伐。山东省工业产业经济发达,高耗水的大型化工企业众多,产业内部的水资源管理水平不足可能导致水资源效率下降;四川省水资源总量多但分布不均,人口、耕地和经济总量占全省80%的盆地腹部区水资源总量仅占20%。高耗水产业往往聚集在省内相对贫水区,水资源配置失调和工业企业无序集聚导致水资源效率难以提高。另外,黄河流域大多数省(区)工业水资源效率提升的动力不均衡,即存在生产技术进步但技术效率恶化,或者技术效率改善但是生产技术恶化的情况。研究期内工业水资源效率水平持续改善最佳的省份是河南,但有1/2的时间TC和EC背道而驰。2018—2019年,仅河南、山东和山西3省份的TC和EC同时大于1,其他7省(区)TC和EC未能实现协同

助力,存在不同程度的EC改善TC恶化或者TC改善EC恶化的现象。所以,此类省(区)须根据数据暴露出的效率短板,来制定针对性政策,推动工业水资源效率改善。

从上中下游层面分析,不同于工业水资源效率的高低排序,2010—2019年黄河流域的上中下游区域水资源效率的ML指数从高到低分别为上游、下游和中游。上游区域的ML指数最高,一方面在于其效率基数低,在全国性的科技进步状态下,更容易获得较高的效率增长率;另一方面表明技术进步和水资源管理水平提高带来的效率增长效应在上游区域更为显著。下游区域的ML指数次之,但是规模效率最高,反映出下游的产业集聚程度呈现出加强趋势,工业水资源的配置水平在不断升级。中游区域的ML指数最低,但是其均值是1.076,仍然是大于1的,这反映出中游区域的水资源利用效率水平始终较平稳。另外,中游区域的技术进步指数和技术效率指数也是最低,这表明中游区域提升工业水资源效率的关键在提高技术水平。

### 2.3 黄河流域九省(区)工业水资源效率影响因素分析

通过Tobit面板回归模型对2010—2019年黄河流域九省(区)工业水资源效率与影响因素进行分析,结果见表5。各影响因素具体作用分析如下。

表5 Tobit模型分析结果

因素变量	系数	标准差	t统计量	P值
水资源禀赋	-0.086*	0.051	-1.68	0.096
社会发展水平	-0.0089	0.021	-0.41	0.681
工业化程度	1.0166***	0.366	2.78	0.007
工业用水强度	-0.0054***	0.001	-3.93	0.000
技术水平	0.124***	0.041	3.01	0.003
政府管制强度	-32.21***	9.846	-3.27	0.002
Cons	0.583**	0.258	2.25	0.027

注:\*,\*\*,\*\*\*分别表示在10%、5%、1%的水平下显著。

水资源禀赋系数为负,在10%的水平下显著。说明人均水资源越丰富,工业水资源效率反而越低,出现了水资源“富足的矛盾”现象。原因在于工业用水成本过低和当地工业企业节水意识淡薄,导致用水方式粗放,加之节水设备落后和节水措施不

力,使得工业用水浪费严重,抑制工业水资源效率攀升。

社会发展水平的系数为负,说明社会发展水平的提高没有带动工业水资源利用效率同步上升,反而在一定程度上表现为下降作用,尽管这一指标并

不显著,但是也从侧面反映出,部分地区在发展的同时以环境污染作为代价,导致社会发展水平越高污染越严重,考虑环境负效应的工业水资源利用效率自然随之下降。

工业化程度系数为 1.02,通过 1% 的显著性检验,说明在其他条件保持不变时,工业化程度每提高 1%,工业水资源效率会相应提高 1.02%。工业化程度的提高伴随着产业规模效应提高,产业集聚效果明显,工业内部结构得以优化,工业水资源效率得以有效提升。

工业水资源效率与用水强度呈显著负相关。工业用水强度越高,万元工业增加值用水量越高,表示达到相同工业产值所需的水资源消耗就越大,水资源效率自然会降低,这符合现实情况。2022 年 3 月 11 日,水利部、国家发展改革委印发“十四五”用水总量和强度双控目标的通知,严控用水强度,明确要求各省(区)万元国内生产总值用水量和万元工业增加值用水量比 2020 年下降 10% 以上。加快水循环利用设施建设,提高工业用水重复利用率是降低工业用水强度的重要抓手。

技术水平升级对于工业水资源效率的提高有显著的正效应,在 1% 的水平下显著。区域研发投入经费的提高引起节水技术变革,带动水资源高效利用和水污染防治等领域的技术升级,引致节水省水新工艺和无污染技术等水资源开发利用方面的成果落地转化,直接对水资源效率产生提升效果。

政府管制强度的增加并没有提高工业水资源效率。相反,回归结果显示,政府管制强度与工业水资源效率表现为显著负相关,在 1% 的水平下显著。原因可能包括以下 3 点:(1) 区域工业废水排放量越高,污染治理投资越高,重事后治理轻事前预防的投资方式可能导致投资高收益小。(2) 工业污染治理其他方面的投资挤占了用于工业废水治理领域的投资,所以造成了投资多反而效率低的情况。如全国范围内工业污染治理投资完成额中占比最高的是废气治理,废水治理投资额占比只有 10% 左右,而黄河流域九省(区)的占比可能会更低。(3) 工业污染治理投资属于宏观调控,调控力度越高,对市场经济的影响越大,越容易造成工业

企业生产效率以及工业水资源效率的降低,这与张兆方等<sup>[9]</sup>提出的政府影响力越高的地区,水资源利用效率越低的结论一致。

### 3 结论

应用超效率 EBM-ML-Tobit 分析方法,科学评估黄河流域九省(区)工业水资源效率,在分析效率静态和动态变化的基础上识别其影响因素,得出结论如下:2010—2019 年黄河流域九省(区)工业水资源效率呈现波动上升态势,由 2010 年的 0.735 提高到 2019 年的 0.87,增幅 18.4%。整体效率均值为 0.77,未达到有效水平,各省(区)间存在差异,效率值最高的山东比效率值最低的宁夏高 0.62。工业化程度和技术水平两项因素显著促进效率值的改善,水资源禀赋、工业用水强度和政府管制强度严重制约了效率值进一步提高,经济发展水平也与效率值的提高呈负相关关系,但结果不显著。

基于黄河流域生态保护和高质量发展的目标,针对黄河流域九省(区)工业水资源效率的影响因素,提出建议如下:(1) 注重地区差异,因城施策。各省(区)应按照“宜农则农、宜工则工”原则,在确定适合发展工业的前提下,根据其工业水资源利用实际情况,深入研究效率短板成因,合理规划制定效率发展目标,精准分类分区域施策,避免出现“一刀切”的情况,保证政策能落地见实效。(2) 多措并举,推动工业企业节水转型。对工业企业加强宣传引导,树立养成良好的节水观念和用水习惯。探索完善工业水价形成机制,解决工业水价过低导致的企业主动节水降成本内生动力不足问题。奖罚并举,让工业企业主动作为,优化生产工艺,向节水型企业转型升级。(3) 坚持以水定产,调整工业结构布局。继续提高各省(区)产业规模集聚效应,优化工业产业内部结构,支持环保产业和诸如新基建、光伏新能源等节水减排高产值型高新技术产业项目,逐步淘汰落后高耗水项目,鼓励引导地方金融机构信贷资源偏好转移到符合绿色发展理念的产业。(4) 优化政府投资结构,提高技术进步水平。黄河流域九省(区)工业水资源效率提升的关键在

于技术进步,应适当加大地方科学研究与试验发展的投入和工业污水治理事前防治方面的投资。支持节水和污染防治技术创新,发挥技术创新的协同效应。支持产学研成果转化,推广先进适用节水和污染防治技术。鼓励各省(区)进行工业“节水降耗减排”领域的交流合作,推动全流域先进“节水降耗减排”技术共享。(5) 坚持水市场改革,推进普及水权交易工作。完善水权交易制度,明确各地可用水量,将试点地区的先进经验总结积累后适时逐步推广至非试点地区,通过市场交易完善流域水资源的优化配置。

### 参考文献(References)

- [1] 魏楚, 沈满洪. 水资源效率的测度及影响因素: 基于文献的述评[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(2): 197-204.
- [2] 杨高升, 谢秋皓. 长江经济带绿色水资源效率时空分异研究——基于SE-SBM与ML指数法[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(2): 349-358.
- [3] 许晶荣, 黄德春, 方隽敏. 中国区域全要素水资源利用效率及其影响[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2021, 23(6): 77-84.
- [4] 胡林凯. 基于WCA-MEPP模型的云南省水资源利用效率动态评价[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(4): 75-81.
- [5] Azad M A S, Ancev T, Hernández-Sancho F. Efficient water use for sustainable irrigation industry[J]. Water Resources Management, 2015, 29(5): 1683-1696.
- [6] 焦士兴, 王安周, 张崇崇, 等. 河南省水资源效率综合测度及时空分异[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 48-55.
- [7] 钟丽雯, 张建兵, 蔡芸霜, 等. 广西水资源利用效率及其时空格局[J]. 经济地理, 2020, 40(6): 193-202.
- [8] 钱文婧, 贺灿飞. 中国水资源利用效率区域差异及影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(2): 54-60.
- [9] 张兆方, 沈菊琴, 何伟军, 等. “一带一路”中国区域水资源利用效率评价——基于超效率DEA-Malmquist-Tobit方法[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2018, 20(4): 60-66.
- [10] 李健, 谢衡. 京津冀绿色水资源利用效率及其时空差异与驱动因素分析[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(6): 10-18.
- [11] 苏喜军, 纪德红, 何慧爽. 黄淮海平原农业水资源绿色效率时空差异与影响因素研究[J]. 生态经济, 2021, 37(3): 106-111.
- [12] 沈晓梅, 谢雨涵. 农业绿色水资源利用效率及其影响因素研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(3): 13-18.
- [13] 买亚宗, 孙福丽, 石磊, 等. 基于DEA的中国工业水资源利用效率评价研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(11): 42-47.
- [14] 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.
- [15] 谭粤元. 中国工业用水效率研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- [16] 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.
- [17] 李明璽. 基于DEA方法的中国农业水资源利用效率研究[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(9): 106-114.
- [18] Tone K, Tsutsui M. An epsilon-based measure of efficiency in DEA: A third pole of technical efficiency[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 207(3): 1554-1563.
- [19] 韩洁平, 程序, 闫晶, 等. 基于网络超效率EBM模型的城市工业生态绿色发展测度研究——以三区十群47个重点城市为例[J]. 科技管理研究, 2019, 39(5): 228-236.
- [20] 谢秋皓, 杨高升. 新型城镇化背景下中国区域绿色发展效率测算[J]. 统计与决策, 2019, 35(24): 132-136.
- [21] 高赢, 冯宗宪. “一带一路”沿线国家低碳发展效率测评及影响因素探究[J]. 科技进步与对策, 2018, 35(21): 39-47.
- [22] 赵明亮, 刘芳毅, 王欢, 等. FDI、环境规制与黄河流域城市绿色全要素生产率[J]. 经济地理, 2020, 40(4): 38-47.
- [23] 吴凤平, 邱泽硕, 邵志颖, 等. 中国水权交易政策对提高水资源利用效率的地区差异性评估[J]. 经济与管理评论, 2022, 38(1): 23-32.

## Temporal and spatial differentiation and influencing factors of industrial water resources efficiency in nine provinces (regions) of the Yellow River Basin

MIAO Junyu, ZHANG Chunying\*

Center for Industrial and Business Organization, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian 116025, China

**Abstract** Improving the efficiency of industrial water resource is one way to alleviate the contradiction between water supply and demand and it is also an important guarantee for ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin. Based on the super-efficiency EBM model, ML index and Tobit model of undesired output, this study analyzes the temporal and spatial differentiation and influencing factors of industrial water resource efficiency in the nine provinces (autonomous regions) of the Yellow River Basin from 2010 to 2019. The results indicate that the overall average value of industrial water resource efficiency in the nine provinces is 0.77, lower than the effective level, but shows a fluctuating upward trend. There are obvious differences among these provinces, with Shandong having the highest efficiency and Ningxia the lowest. The main driving force for the improvement of ML index comes from technological progress, and the scale efficiency of some provinces hinders the positive adjustment of ML index by technical efficiency. The technological level and degree of industrialization have a promoting effect on the increase of industrial water resource efficiency; the inhibitory effects of water resource endowment, industrial water use intensity and government regulation intensity are significant. Finally, the article puts forward some corresponding suggestions.

**Keywords** industrial water resources; water use efficiency; spatiotemporal differentiation; Yellow River Basin ●



(责任编辑 祝叶华)