

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20210420

黄河流域工业水资源利用效率测度与时空分异

单是豪¹, 倪红珍¹, 汪党献²

(1. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038;

2. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100020)

摘要:工业水资源利用效率是影响工业用水的核心问题, 测度并分析其时空特征可为黄河流域生态保护和高质量发展提供评价依据。将工业用水及水污染排放纳入测度体系, 建立非期望产出 MinDS 窗口模型测算黄河流域工业水资源利用效率, 采用核密度估计与变异系数法分析其时空变化, 结果表明: 2010—2019年黄河流域9省区整体工业水资源利用效率呈现波动性上升的“N”型趋势, 总体效率水平有所提高。空间上高效率中心长期位于中下游地区, 表现出东高西低的分布态势, 效率空间格局非均衡性逐年减弱, 分化程度降低。山东、陕西省工业水资源利用效率在流域内处于较高水平, 其年平均效率值均超过0.9, 2019年流域内中高效率省份占比由2010的44%增加至78%, 除青海、甘肃外, 均达到中高效率水平。

关键词:黄河流域; 工业水资源利用效率; 非期望产出 MinDS 模型; DEA 窗口分析; 时空分异

中图分类号:TV213.4; TV11; P333 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0852(2023)03-0071-05

0 引言

黄河是中国第二长河, 在我国经济社会发展格局中处于重要地位^[1]。黄河流域作为“能源流域”及能源重化工基地, 是我国重要的工业带, 承载了全国5.3%的工业总产值, 流域自地表水、地下水的工业取水量占比分别为10%、18.3%, 虽然同农业用水相比占比较低, 但净化容纳工业废水需要更多的水资源, 导致的水环境问题更为严重^[2], 如何缓解这一问题的核心就是提升工业水资源利用效率。自黄河流域生态保护和高质量发展成为国家战略后, 流域的生态治理, 尤其是用水治理步入新阶段^[3]。在坚持生态优先, 绿色发展的背景下, 考虑水污染影响的黄河流域工业水资源利用效率如何测算? 其在时空上的分异特征如何? 回答上述问题可为实现工业水资源绿色高效利用、推进水生态文明建设及黄河流域生态保护和高质量发展提供评价依据。

目前, 关于水资源利用效率的研究成果颇多。从

模型选择上看, 基于目标规划的数据包络分析(Data Envelopment Analysis, DEA)广受青睐。其中, 传统的径向CCR^[4]、BCC模型^[5]以及非径向的至前沿最远距离模型(Slack Based Measure, SBM)模型^[6]应用广泛, 此外, 部分文献将面板数据拆分成截面数据, 逐年测算决策单元效率, 使得不同年份结果不具可比性^[7]。从评价区域及对象上看, 相关文献多集中于全国^[8]、长江经济带^[9], 黄河流域也多集中在整体水资源利用效率^[10]、农业用水效率^[11]的测算分析, 而对于黄河流域工业水资源利用效率的研究较少。

为此, 本文在考虑CCR、BCC模型会忽略松弛变量影响以及SBM模型评价无效单元时会低估其实际表现的不足之处, 运用有效前沿最近距离模型(Minimum Distance to Strong Efficient Frontier, MinDS)弥补其缺陷; 其次, 采用适宜面板数据分析的DEA窗口分析法, 基于投入产出指标对黄河流域九省区(以下简称“九省区”)工业水资源利用效率进行测度, 并利用核密度估计法与变异系数分析法探究其时空差异。

收稿日期: 2021-10-14

网络首发日期: 2023-06-13

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/11.1814.P.20230612.1349.012.html>

基金项目: 中国水利水电科学研究院基本科研项目(WR110156B0042023); 国家重点研发计划项目(2021YFC3200204)

作者简介: 单是豪(1994—), 男, 江苏宿迁人, 博士研究生, 主要研究方向为水资源管理。E-mail: shanyanwei2021@163.com

通信作者: 倪红珍(1966—), 女, 江苏金坛人, 正高级工程师, 博士, 主要研究方向为水利经济及水资源管理。E-mail: nhz6969@iwhr.com

1 研究方法

1.1 非期望产出 MinDS 模型

首先,将被评价决策单元(Decision Making Unit, DMU)的标杆限制位在同一超平面内,经SBM模型判定为有效的DMU的集合为 E ,SBM模型求解参见Tone Kaoru等^[12]的研究。其次,借助混合整数线性规划自动以有效子集 E 作为参考集^[13],避开测试所有子集,采用强有效前沿上距离最近的点作为投影点,求得MinDS模型效率值。

假设共有 n 个省区,第 k 个省区的工业共有 m 种投入 $x_{ik}(i=1,2,\dots,m)$, q_1 种期望产出 $y_{rk}(r=1,2,\dots,q_1)$, q_2 种非期望产出 $b_{tk}(t=1,2,\dots,q_2)$,建立规模收益不变的非期望产出MinDS模型为:

$$\max \rho = \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (1 - s_i^- / x_{ik})}{\frac{1}{q_1} \sum_{r=1}^{q_1} (1 + s_r^+ / y_{rk}) + \frac{1}{q_2} \sum_{t=1}^{q_2} (1 + s_t^{b-} / b_{tk})} \quad (1)$$

$$s.t. \sum_{j \in E} x_{ij} \lambda_j + s_i^- = x_{ik}; s_i^- \geq 0$$

$$\sum_{j \in E} y_{rj} \lambda_j - s_r^+ = y_{rk}; s_r^+ \geq 0$$

$$\sum_{j \in E} b_{tj} \lambda_j + s_t^{b-} = b_{tk}; s_t^{b-} \geq 0$$

$$\lambda_j \geq 0, j \in E$$

$$-\sum_{i=1}^m v_i x_{ij} + \sum_{r=1}^{q_1} \mu_r y_{rj} - \sum_{t=1}^{q_2} \beta_t b_{tj} + d_j = 0$$

$$v_i \geq 1; \mu_r \geq 1; \beta_t \geq 1 \quad (2)$$

$$d_j \leq M b_j; \lambda_j \leq M(1 - b_j)$$

$$b_j \in \{0, 1\}; d_j \geq 0$$

式中: ρ 为效率评价值; s_i^- 、 s_r^+ 、 s_t^{b-} 分别为投入、期望产出及非期望产出的松弛变量; λ_j 为每个省区权重; v_i 、 μ_r 、 β_t 分别为投入、期望产出及非期望产出的权数; b_j 为0~1变量; M 为一足够大的正数。

1.2 DEA窗口分析法

DEA窗口分析方法可弥补将面板数据拆分成截面数据单独测算的不足,使得测算结果在年际间具有可比性;其原理是将一定宽度的时间段内所有DMU整体作为参考集,从而使参考集内的数值点成倍增加,避免因为DMU数量不足而影响效率测度准确性。

通过数据时间序列长度为10,确定最佳窗口宽度为3a,滑动构造8个时间窗口,则每个窗口包括27个DMU,采用MinDS模型对每个窗口的省区效率进行测算。

1.3 核密度估计法

核密度估计属于非参数估计方法^[14],能够更为真实地反映出九省区工业水资源利用效率的分布及演进。要估计随机变量 X 在 x 处的概率密度 $f(x)$,采用二次核函数,见式(3),得到的核密度估计量如式(4)所示。

$$K(x) = \frac{3}{4}(1 - z^2) \cdot \mathbf{1}(|z| < 1) \quad (3)$$

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left[\frac{X_i - x}{h}\right] \quad (4)$$

式中: $K(\cdot)$ 为核函数; $z = \frac{X_i - x}{h}$, X_i 为效率值, x 为效率值的均值; h 为带宽; $\mathbf{1}(\cdot)$ 为示性函数,括号内表达式为真时,取值为1,反之为0; n 为效率值个数。

1.4 变异系数分析法

变异系数分析方法常用于空间差异性研究^[15],本文采用变异系数评价九省区工业水资源利用效率的差异及变化。计算公式如下:

$$C = \frac{1}{E} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}{N - 1}} \quad (5)$$

式中: C 为变异系数; E_i 为第 i 省区工业水资源利用效率; \bar{E} 为省区效率均值; N 为省区个数。

2 指标构建与数据来源

2.1 指标构建

需要指出的是,此处的工业水资源利用效率是相对于各省共同前沿的效率,其体现的是在既定产出水平下消耗的水资源量最小,获得的工业经济效益最大。工业废水中的污染物是水资源利用后的伴生产物,会对水环境产生不良影响,将其也纳入测度体系将反映出工业水资源利用的绿色内涵。基于此分析,选择工业用水量、工业固定资产投资、工业行业从业人数作为投入指标,以工业增加值为反映生产价值的产出指标,将工业废水中的主要污染物COD及氨氮作为非期望产出指标(见表1)。

表1 工业水资源利用效率投入产出指标体系

Table1 The input-output indicators system of industrial water resource utilization efficiency

类型	指标	说明
投入	工业用水量	水资源投入
	工业固定资产投资	资产投入
	工业行业从业人数	劳动力投入
期望产出	工业增加值	经济效益
非期望产出	工业废水COD、氨氮排放量	环境承载

2.2 数据来源

投入指标中,工业用水量数据来源于九省区《水资源公报》(2010—2019年),工业固定资产投资、工业行业从业人数源于九省区《统计年鉴》(2010—2019年)。产出指标中,工业增加值、工业废水中的COD及氨氮排放量数据,分别源于《中国统计年鉴》《生态环境统计公报》(2010—2019年),非期望产出指标由于部分年份数据缺失,根据各省在全国总量历史占比推算得出。由上述指标体系测算黄河流域九省区工业水资源利用效率。

3 结果与分析

3.1 黄河流域工业水资源利用效率时序演化特征

基于九省区投入产出指标数据,运用非期望产出MinDS窗口模型,建立窗宽为3a的8个窗口,计算每个窗口下27个DMU的相对效率值。限于篇幅,仅列出整理窗口分析结果后得到的2010—2019年九省区效率值(见表2)。

3.1.1 黄河流域工业水资源利用效率评价

九省区工业水资源利用效率2010—2019年间呈现出波动性上升特征,总体效率从2010年的0.66提升至2019年的0.84,表明“三条红线”、节水型社会建设等政策制度倒逼效果显著,在工业发展同时水环境质量得到不断改善。

黄河流域中上游省区包括青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古;中下游省区包括山西、陕西、河南、山东^[3]。流域内部视角效率演化趋势如图1所示,九省区年均效率值形态表现为大“N”型,中上游及中下游省区效率变化趋势与之基本一致。评价期内出现2个变化节点,2010—2014年属于“稳增期”,总体效率均值由0.66增至0.75,得益于流域水资源管理与技术投入的不断加大;2015—2016年属于“微落期”,总体效率均值降至0.69,原因是工业发展在受到水资源和环境的持续约束下,发生适应性调整。具体来看,是因为中上游省区受到周边发达地区及中下游省区影响,加快了以技术资金密集型工业重心向内转移,流域内400毫米等水量线西侧高耗水产业集聚,导致水资源及环境承载力较前期略有下降。同时,中下游省区效率值2015年出现下调,2016年效率值首次低于0.8,由于快速工业化使得投入和产出比例未及时协调和适应,导致二者匹配度轻微降低,从而效率值下降;2017—2019年属于“提速期”,总体效率均值介于

0.77~0.84之间,达到总体效率值的最高区间,经济发展使得工业水循环利用、工业废水资源化利用、节水设备处理能力等技术创新投入进一步加快,效率得以再次提升,这与《工业绿色发展规划(2016—2020年)》要求的提质、减排、增效工业绿色发展主基调也密切相关。

表2 2010—2019年九省区工业水资源利用效率

Table2 Industrial water resource utilization efficiency in 9 provinces from 2010 to 2019

省份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
青海	0.464	0.551	0.585	0.577	0.588	0.551	0.550	0.560	0.638	0.687
四川	0.658	0.657	0.670	0.722	0.892	0.720	0.630	0.791	0.929	1.000
甘肃	0.601	0.605	0.563	0.611	0.643	0.659	0.646	0.610	0.581	0.574
宁夏	0.451	0.555	0.528	0.500	0.522	0.549	0.566	0.678	0.761	0.803
内蒙古	0.498	0.454	0.460	0.490	0.535	0.556	0.707	0.713	0.762	0.753
陕西	0.807	0.865	1.000	0.994	1.000	0.881	0.862	0.877	1.000	1.000
山西	1.000	1.000	0.905	0.809	0.815	0.698	0.664	1.000	1.000	1.000
河南	0.653	0.754	0.751	0.752	0.776	0.741	0.757	0.754	0.757	0.750
山东	0.825	0.863	1.000	1.000	1.000	0.897	0.898	1.000	0.946	1.000

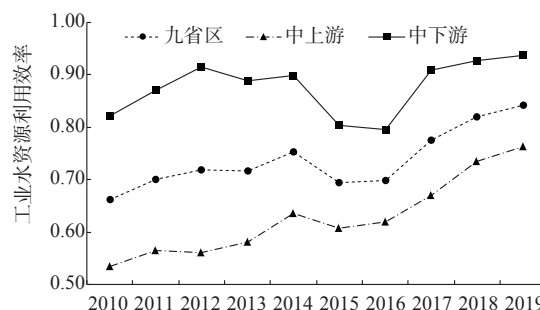


图1 九省区工业水资源利用效率演化趋势
Fig.1 Trend of change of industrial water resource utilization efficiency in 9 provinces

3.1.2 黄河流域工业水资源利用效率核密度分析

依据测算结果,考虑时序均匀划分的原则,以3年为时间跨度,基于Stata16绘制2010年,2013年、2016年及2019年对应核密度曲线,分析其整体演进情况(见图2)。

从位置上看,九省区工业水资源利用效率核密度曲线存在整体向右移动趋势,随着时间推移曲线对应的效率低值区数量下降,高值区数量上升。从形状上看,九省区工业水资源利用效率存在不同程度的偏态分布性,并非严格单峰或双峰分布。2010年效率存在明显拖尾现象,这是由于青海、宁夏、内蒙古等地区在考虑水污染影响时的工业用水存在不合理情况,与山东、陕西等高效率省区具有明显差距所致。2013及2016年年核密度曲线均呈现不规则的正偏态分布,是

由于低中效率省份比重较大,其中2016年的效率高度集中在0.55~0.78之间。2010年以后核密度曲线存在一高一低双波峰,说明省区工业水资源利用效率仍存在分化现象,但分化程度逐渐变低,至2019年除青海、甘肃两省外,其余省区效率值均介于0.7~1.0之间。从峰度上看,九省区工业水资源利用效率核密度曲线由2010年的宽峰向后期的窄峰演变,说明效率水平正在提高。波峰高度在2016年明显升高后降低,省区间极化趋势减弱。随着时间推移,这种效率非均衡性也逐渐由强变弱。

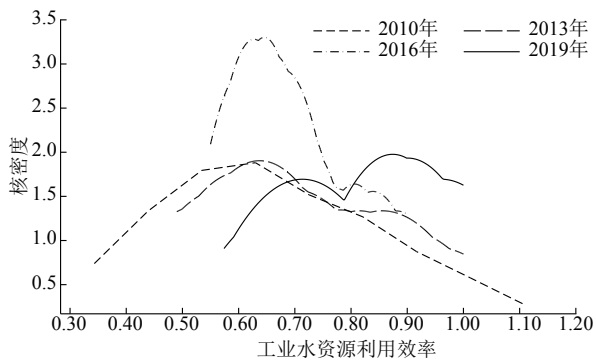


图2 九省区2010年、2013年、2016年及2019年核密度曲线
Fig.2 Kernel density estimation map of industrial water resource utilization efficiency in 2010,2013,2016 and 2019 in 9 provinces

3.2 黄河流域工业水资源利用效率空间差异特征

根据表2测算结果,整理得九省区年平均工业水资源利用效率值(见表3),并结合图1。可以看出,中下游地区工业水资源利用效率始终优于中上游地区,效率中心长期位于黄河流域中下游,呈现出东高西低的分布特征。山东、陕西多年平均效率值在0.9以上,处于流域内1~2位次,工业水资源利用效率显著优于其他地区,说明这两个省区工业用水处于效率前沿,与其较好的工业结构基础及经济发展水平有关。山西、河南、四川年平均效率值在0.7以上,山西、四川在2014—2016年效率值出现波动,其他时期均处在中高效率水平,河南效率值年际变化稳定。甘肃多年平均效率值在0.6左右。内蒙古、宁夏、青海多年平均效率值较为接近,但均在0.6以下,表明较其他省区而言,这三个省区存在更大程度投入冗余。

按照效率值的高低将其分成无效率组(<0.5)、低效率组(0.5~0.7)、中效率组(0.7~0.9)和高效率组(0.9~1.0)。2010年,无效率组省份2个,低效率组省份3个,中效率组省份3个,高效率组省份1个;至2019年无效率组省份减至0个,低效率组省份减至2个,中效率组保持不变,高效率组省份增至4个,工业水资源利用中

高效率省份占比由2010年的44%提升至2019年的78%。九省区工业水资源利用效率变异系数总体呈现下降趋势(见图3),由2010年的0.280下降至2019年的0.194,空间差异性逐渐降低。2010—2016年期间下降幅度最大,表明各省工业水资源利用效率此期间差距缩小较快;2016年下降至最低值0.174,随后波动性较小,此期间各省效率差距保持稳定。

表3 九省区工业水资源利用效率均值排名

Table3 Average value and ranking of industrial water resource utilization efficiency in 9 provinces

省份	山东	陕西	山西	四川	河南	甘肃	内蒙古	宁夏	青海
均值	0.943	0.929	0.889	0.767	0.744	0.609	0.593	0.591	0.575
排名	1	2	3	4	5	6	7	8	9

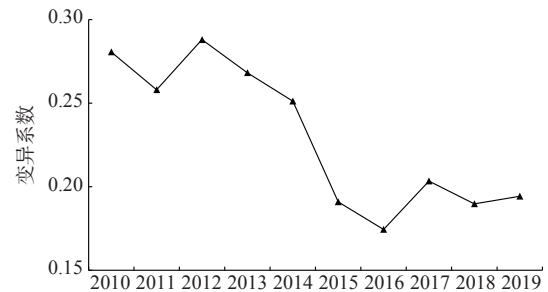


图3 九省区工业水资源利用效率变异系数
Fig.3 Variation coefficient of industrial water resource utilization efficiency in 9 provinces

4 结论与建议

通过构建投入产出指标体系,基于非期望产出MinDS窗口模型测度黄河流域九省区工业水资源利用效率,结合核密度估计、变异系数分析法探究九省区效率时空分异特征,分析发现:

从时序变化看,九省区整体效率上呈现出“N”型上升趋势,总体效率水平有所提高。从空间差异看,高效率中心长期位于中下游地区,表现出东高西低的分布态势。山东、陕西省工业水资源利用效率在流域内长期处于较高水平,年平均效率值均超过0.9,至2019年除青海、甘肃外,整体达到中高效率水平。从阶段差距看,2010—2016年黄河流域9省区地区工业水资源利用效率差异逐步缩小,无效率、低效率、中效率组集中,高效率组占比极少。2017—2019年九省区效率差距波动小,其空间格局非均衡性逐年减弱,至2019年中高效率组占比由2010的44%增加至78%。

上述研究结论蕴含重要含义:

(1)黄河流域9省区工业水资源利用效率在整体处于中高水平的前提下,要重点关注仍然处于低效率

状态的地区,如青海、甘肃两省,需进一步优化工业产业结构,建设完备的工业水处理体系,提升工业循环水利用率,继续推进工业领域深度节水和水污染防治双控策略。

(2)流域工业水资源利用效率要长期处于中高效率水平,必须下好化解其下降风险的“先手棋”,要严格区域产业准入,适当降低高耗水和高排放的工业结构比重,深挖节水潜力,持续坚持绿色发展理念,全面实行最严格水资源管理考核制度。

(3)黄河流域内工业水资源利用效率低水平地区应向高水平地区汲取先进技术与管理经验,破除行政壁垒,中心城市继续扩大辐射带动效应,促进省区间交流合作,实现效率的协同提升,保证黄河流域生态保护和高质量发展行稳致远。

参考文献:

- [1] 任保平,杜宇翔.黄河流域经济增长-产业发展-生态环境的耦合协同关系[J].中国人口·资源与环境,2021,31(2):119-129.
- [2] 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.
- [3] 刘华军,乔列成,孙淑惠.黄河流域用水效率的空间格局及动态演进[J].资源科学,2020,42(1):57-68.
- [4] 赵晨,王远,谷学明,等.基于数据包络分析的江苏省水资源利用效率[J].生态学报,2013,33(5):1636-1644.
- [5] 李莉,刘爽.基于DEA-BC²模型的新疆水资源利用效率时空差异性分析[J].水文,2019,39(2):28-32,43.
- [6] 刘晓君,闫俐臻.基于数据包络模型的西部水资源利用效率及影响因素研究[J].水资源保护,2016,32(6):32-38.
- [7] 左其亭,张志卓,姜龙,等.全面建设小康社会进程中黄河流域水资源利用效率时空演变分析[J].水利水电技术,2020,51(12):16-25.
- [8] 丁绪辉,贺菊花,王柳元.考虑非合意产出的省际水资源利用效率及驱动因素研究:基于SE-SBM与Tobit模型的考察[J].中国人口·资源与环境,2018,28(1):157-164.
- [9] 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.
- [10] 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):37-43,50.
- [11] 崔永正,刘涛.黄河流域农业用水效率测度及其节水潜力分析[J].节水灌溉,2021(1):100-103.
- [12] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis [J]. European Journal of Operational Research, 2001,130(3): 498-509.
- [13] APARICIO J, RUIZ J L, SIRVENT I. Closest targets and minimum distance to the Pareto-efficient frontier in DEA [J]. Journal of Productivity Analysis, 2007,28(3):209-218.
- [14] 关伟,许淑婷,郭岫垚.黄河流域能源综合效率的时空演变与驱动因素[J].资源科学,2020,42(1):150-158.
- [15] 任玉芬,苏小婉,贺玉晓,等.中国生态地理区城市水资源利用效率及影响因素[J].生态学报,2020,40(18):6459-6471.

Measurement of Industrial Water Resource Utilization Efficiency and Its Spatiotemporal Differentiation Analysis in the Yellow River Basin

SHAN Shihao¹, NI Hongzhen¹, WANG Dangxian²

(1. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower, Beijing 100038, China;

2. General Institute of Water Resource & Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resource, Beijing 100120, China)

Abstract: Industrial water resource utilization efficiency is the core issue affecting industrial water use. Measuring and analyzing its temporal and spatial characteristics can provide an evaluation basis for ecological protection and high-quality development in the Yellow River basin. Incorporating industrial water consumption and water pollution emission into measurement system, establishing an undesirable output MinDS window model to measure industrial water resource utilization efficiency, using kernel density estimation method and variation coefficient method to analyze its spatiotemporal changes. The result shows that the overall industrial water resource efficiency in the 9 provinces of Yellow River basin shows an N-type trend of rising volatility from 2010 to 2019, and overall efficiency was improved. In terms of spatial distribution, high efficiency centers were located mid-downstream for a long time, showing a distribution trend of high efficiency in the east and low efficiency in the west. The unevenness of the spatial pattern of efficiency has been yearly weakened, and the degree of differentiation has decreased. The industrial water resource utilization efficiency in Shandong and Shanxi province was at a high level in the basin, with the multi-year average efficiency value exceeding 0.9. In 2019, the proportion of medium-high efficiency provinces in the basin increased from 44% to 78%, and all provinces except Qinghai and Gansu reached the medium-high efficiency level.

Keywords: Yellow River basin; industrial water resource utilization efficiency; undesirable output MinDS model; DEA window analysis; spatiotemporal differentiation