

黄河流域工业绿色水资源效率时空差异及驱动因素研究

苗峻瑜

Spatial and temporal differentiation and influencing factors of industrial green water resources efficiency in the Yellow River Basin

MIAO Junyu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20220405002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

气候变化下黄河流域未来水资源趋势分析

The future water resources regime of the Yellow River basin in the context of climate change

水利水运工程学报. 2020(2): 1 <https://doi.org/10.12170/20200216001>

黄河流域典型流域水文气象变化与径流过程模拟

Typical hydro-meteorological changes and runoff process simulation in Yellow River basin

水利水运工程学报. 2019(5): 36 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.05.005>

黄河流域砒砂岩区地貌-植被-侵蚀耦合研究进展

Research progress of spatial distribution about geomorphology-vegetation-water erosion in Pisha stone area of Yellow River

水利水运工程学报. 2020(4): 64 <https://doi.org/10.12170/20191229002>

水资源利用效率频谱分析方法及应用

Spectrum analysis method for assessing water use efficiency

水利水运工程学报. 2019(6): 132 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.06.015>

变化环境下考虑物理机制的SD需水预测研究

System dynamics model-based water demand prediction under changing environment with consideration of physical mechanism

水利水运工程学报. 2021(3): 84 <https://doi.org/10.12170/20200416001>

黄河下游生态型引黄灌区水资源承载力研究

Study on water resources carrying capacity of ecological diversion irrigation district in the lower reaches of the Yellow River

水利水运工程学报. 2020(2): 22 <https://doi.org/10.12170/20200209001>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20220405002

苗峻瑜. 黄河流域工业绿色水资源效率时空差异及驱动因素研究 [J]. 水利水运工程学报, 2023(5): 85-94. (MIAO Junyu. Spatial and temporal differentiation and influencing factors of industrial green water resources efficiency in the Yellow River Basin[J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(5): 85-94. (in Chinese))

黄河流域工业绿色水资源效率时空差异及驱动因素研究

苗峻瑜

(东北财经大学 产业组织与企业组织研究中心, 辽宁 大连 116025)

摘要: 科学评估工业绿色水资源效率并识别其驱动因素, 是化解水资源供需矛盾、推动工业绿色转型、推进黄河流域生态保护和高质量发展的基础。基于非期望产出的超效率 EBM 模型, 以黄河流域九省(区)为研究对象, 测算 2010—2019 年黄河流域工业绿色水资源效率; 利用 GML 指数分析工业绿色水资源效率动态变化; 最后通过地理探测器模型, 对工业绿色水资源效率驱动因子进行探究。研究发现: 2010—2019 年黄河流域工业绿色水资源效率整体均值只有 0.585, 未达到有效状态, 但呈现出稳定上升趋势, 各省(区)间差异明显, 陕西最高, 宁夏最低, 呈东高西低态势。黄河流域工业绿色水资源效率 GML 指数的提高是技术进步指数和技术效率指数共同推动的结果。自然、社会、经济及环境是黄河流域工业绿色水资源效率的一级驱动因子, 科技创新水平、工业用水强度、人口素质水平是驱动力最强的二级指标。

关键词: 工业水资源效率; 绿色发展; 超效率 EBM; GML 指数; 地理探测器; 黄河流域

中图分类号: F062.1; TV213.9

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2023)05-0085-10

随着水资源短缺日益凸显及生态环保理念不断普及, 国内外学者愈发关注水资源利用效率问题。研究内容主要包括: (1)水资源效率的测度。主要应用随机前沿分析法^[1]、指标体系构建评价法^[2]和数据包络分析法^[3-5]。水资源效率研究中, 数据包络法应用较多, 但是传统 DEA(data envelopment analysis)模型没有考虑非期望产出的影响。近年来, 有学者在模型中考虑更贴合水资源利用现状的非期望产出来定量分析水资源效率^[6]。有研究进一步延伸至工业水资源效率测度中, 在指标选择上考虑水环境污染等非期望产出, 将其定义为工业绿色水资源效率^[7], 如选择工业废水排放量^[8]及更微观的工业 COD(chemical oxygen demand)排放量^[9]和工业氨氮排放量^[7]作为非期望产出。(2)水资源效率的驱动因素。多应用 Tobit 模型和地理探测器模型分析水资源效率的驱动因素^[10-12]。研究发现产业结构、经济发展水平及地区水资源禀赋对水资源利用效率均有显著影响, 在工业水资源效率的影响因素里又增加了工业发展水平、工业用水强度等产业特征及政府规制等政策性因素, 且强调了技术进步的作用^[13-14]。既有文献在研究层面上多聚焦于全国、省域和城市层面上的水资源效率分析, 鲜有学者从黄河流域层面探讨工业绿色水资源效率; 在研究内容上多考虑环境污染排放等非期望产出, 对治污带来的社会成本较少涉及; 在研究方法上主要通过 DEA 模型、SBM(slack based model)模型、SFA(stochastic frontier approach)模型等对工业水资源效率进行静态测度, 缺少对同样达到生产前沿面的效率值进行进一步比较, 且对效率进行动态测度的成果相对匮乏。

本文基于超效率 EBM(epsilon-based measure)模型结合 GML(global-malmquist-luenberger)指数, 对考

收稿日期: 2022-04-05

作者简介: 苗峻瑜(1987—), 男, 山东青岛人, 博士研究生, 主要从事环境经济与产业发展研究。

E-mail: miaojunyu-0909@163.com

虑治污社会成本的黄河流域工业绿色水资源效率进行静态和动态分析,通过地理探测器模型探究效率驱动因子,以期为黄河流域工业水资源绿色高效利用提供科学参考及数据支撑。

1 研究区概况与数据来源

黄河流域横跨我国东中西部,流域总面积约为 79.5 万 km^2 ,是重要的生态安全屏障。黄河的突出特点是“水少沙多、水沙异源”,具体表现为流域人均水资源量少,水资源分布严重不均,南北降雨量之比大于 5,远超国内其他流域,降水量年际变化极不稳定。上中游大部分地区位于 400 mm 等降水量线以西,气候干旱少雨,多年平均降水量 446 mm,仅为长江流域的 40%;多年平均水资源总量 647 亿 m^3 ,不到长江的 7%;水资源开发利用率高,高达 80%,远超 40% 的生态警戒线^[15]。黄河流域九省(区)经济总量约占全国的四分之一,主导产业包括能源化工、装备制造及农业,皆属于高用水产业行列,工农业发展对水资源需求持续增强,水资源供需矛盾已成为制约黄河流域高质量发展的最大瓶颈。

选择 2010—2019 年为研究年份,研究指标数据主要来自 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,少量缺失数据由插值法补充。

2 研究方法

2.1 超效率 EBM 模型

水资源效率测算多使用 DEA 模型,通常包括传统径向模型和非径向的 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实际值与前沿值之间的径向比例信息。Tone 等^[16]提出的 EBM 模型,兼顾径向与非径向两种方法的优点,较好地解决了上述问题。本文基于 EBM 模型,借鉴相关文献^[17],构建非期望产出的超效率 EBM 模型测算工业绿色水资源效率,以解决无法对 EBM 模型下大量效率值为 1 的有效决策单元进行深层次比较的问题。模型计算式如下:

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

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

式中: γ^* 为待测度省(区)的工业绿色水资源效率值; k 为决策单元的数量; x_{ik} 、 y_{rk} 、 b_{pk} 分别为第 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^{b-} 分别为投入、期望产出和非期望产出的松弛变量; w_i^- 、 w_r^+ 、 w_p^{b-} 分别为投入、期望产出和非期望产出指标的权重系数; θ 和 ϕ 为 γ^* 中的径向成分; ε 为取值(0~1)的关键参数,代

表非径向部分的重要程度,当 ε 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^[18]。

本文将黄河流域九省(区)作为决策单元,参考相关研究^[7-9,13-14],结合黄河流域工业水资源绿色的利用现状,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投资价格指数和工业生产者出厂价格指数折算为 2010 年的不变价格)。非期望产出指标有 3 项,分别是工业废水处理设施运行费用、工业废水中化学需氧量及氨氮排放量。

2.2 GML 指数

GML 指数相较于传统的 Malmquist 指数,其优势是兼顾诸如环境污染、资源短缺等负效应导致的非期望产出影响,还能弥补 ML 指数不具传递性和线性规划无可行解的缺陷。基于 EBM 模型的混合距离函数,用 GML 指数分析黄河流域工业绿色水资源效率从 t 到 $t+1$ 时期的动态变化,GML 指数公式^[19]为:

$$I_{GML,t,t+1}(x_{t+1},y_{t+1},b_{t+1},x_t,y_t,b_t) = \frac{D(x_{t+1},y_{t+1},b_{t+1})}{D(x_t,y_t,b_t)} \quad (3)$$

GML 指数可分解为效率变化指数 GEC(global technical efficiency change)和技术变化指数 GTC(global technological change),其表达式如下:

$$I_{GEC,t,t+1}(x_{t+1},y_{t+1},b_{t+1},x_t,y_t,b_t) = \frac{D_{t+1}(x_{t+1},y_{t+1},b_{t+1})}{D_t(x_t,y_t,b_t)} \quad (4)$$

$$I_{GTC,t,t+1}(x_{t+1},y_{t+1},b_{t+1},x_t,y_t,b_t) = \frac{D(x_{t+1},y_{t+1},b_{t+1})}{D_{t+1}(x_t,y_t,b_t)} \frac{D_t(x_t,y_t,b_t)}{D(x_t,y_t,b_t)} \quad (5)$$

式中: $D_t(x_t,y_t,b_t)$ 是 EBM 模型中的混合距离函数。

在规模报酬可变条件下,将效率变化指数 GEC 分解为纯技术效率变化指数 GPEC(global pure technical efficiency change)和规模效率变化指数 GSEC(global scale technical efficiency change),表达式如下:

$$I_{GPEC,t,t+1}(x_{t+1},y_{t+1},b_{t+1},x_t,y_t,b_t) = \frac{D_t(x_{t+1},y_{t+1},b_{t+1}|\text{VRS})}{D_t(x_t,y_t,b_t|\text{VRS})} \quad (6)$$

$$I_{GSEC,t,t+1}(x_{t+1},y_{t+1},b_{t+1},x_t,y_t,b_t) = \frac{D_{t+1}(x_{t+1},y_{t+1},b_{t+1}|\text{CRS})}{D_{t+1}(x_{t+1},y_{t+1},b_{t+1}|\text{VRS})} \frac{D_t(x_t,y_t,b_t|\text{VRS})}{D_t(x_t,y_t,b_t|\text{CRS})} \quad (7)$$

式中:VRS 和 CRS 分别是规模收益可变模型和规模收益固定模型。

GML 指数的总体表达式可以简单表示为:

$$I_{GML} = I_{GEC}I_{GTC} = I_{GPEC}I_{GSEC}I_{GTC} \quad (8)$$

GML 指数大于 1 表明效率水平比上期提高,反之则下降。 I_{GEC} 为技术效率指数,具体指 $t+1$ 期的实际投入量与 t 期的实际投入量之间的比较,反映了决策单元对现有技术的应用程度,其值大于 1 时表示对现有技术的应用程度较高,反之则有待增强。 I_{GTC} 为技术进步指数,具体指在投入量不变时 $t+1$ 期与 t 期的距离函数的比较,反映的是技术进步、组织创新等无形要素的影响,其值大于 1 时表明黄河流域工业节水生产技术不断升级,使得工业增加值提高的同时工业用水量减少及废水污染物排放量降低。 I_{GPEC} 表示用水技术对水资源利用带来的产出增加及环境污染等非期望产出减少的效果, I_{GSEC} 表示用水规模的合理性及是否发挥规模效应。

2.3 地理探测器

地理探测器是相对新颖的统计学模型,具有测度结果均为显著因子,且探测因子影响力比 Tobit 模型所得结果更稳定且误差小的优势^[20],广泛应用于区域经济与生态环境领域。本文选用地理探测器模型探究研究区内自然、社会、经济及环境等一级因子及其细分指标对黄河流域工业绿色水资源效率的影响,模型公

式^[12]如下:

$$P=1-\frac{1}{N\sigma^2}\sum_{i=1}^hN_i\sigma_i^2$$

(9)

式中: P 为工业绿色水资源效率空间差异驱动因素探测力指标,其值大小代表该因素对黄河流域工业绿色水资源效率空间分异驱动力的强弱; h 为自变量的分类个数(分层或分区); N 和 N_i 分别为整体和各因素类型 i 的样本个数; σ^2 和 σ_i^2 分别为整个区域和各类型 i 的离散方差。

本文借鉴相关研究^[12,21-22],认为黄河流域工业绿色水资源效率的驱动因子包括自然(水资源禀赋)、社会(工业用水强度、人口素质水平、科技创新水平)、经济(经济发展水平、工业化程度、工业集聚程度)以及环境(环境规制程度、市场化程度、对外开放程度)。其中,水资源禀赋(x_1)以人均水资源量表示;工业用水强度(x_2)以万元工业用水量表示;人口素质水平(x_3)以高等教育毕业生人数表示;科技创新水平(x_4)以R&D投入强度表示;经济发展水平(x_5)以人均GDP表示;工业化程度(x_6)以当年工业增加值/GDP表示;工业集聚程度(x_7)以规模以上工业企业数量表示;环境规制程度(x_8)以工业污染治理投资完成额/工业增加值表示;市场化程度(x_9)以个体及私营就业人数占总就业比重表示;对外开放程度(x_{10})以进出口总额/GDP表示。

3 结果与分析

3.1 黄河流域工业绿色水资源效率静态分析

基于2010—2019年黄河流域省级面板数据,运用MaxDEA8.0软件,选择非导向非期望产出的超效率EBM模型测算工业绿色水资源效率,将结果整理汇总见表1。

表 1 黄河流域工业绿色水资源效率

Tab. 1 Industrial green water resources efficiency in the Yellow River Basin

省份(区)	不同年份工业绿色水资源效率及其均值										
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	均值
甘肃	0.413	0.484	0.453	0.495	0.449	0.501	0.596	0.730	1.004	0.824	0.595
河南	0.426	0.439	0.416	0.404	0.413	0.431	1.001	0.895	1.007	1.022	0.645
内蒙古	0.270	0.281	0.302	0.323	0.341	0.394	0.450	0.547	0.633	0.633	0.417
宁夏	0.268	0.306	0.292	0.294	0.300	0.325	0.355	0.417	0.424	0.445	0.343
青海	0.251	0.269	0.272	0.280	0.300	0.336	0.511	0.427	0.504	0.562	0.371
山东	0.641	0.598	0.712	0.745	0.778	1.001	1.003	1.010	0.854	1.007	0.835
山西	0.518	0.522	0.529	0.578	0.608	0.571	0.666	1.020	1.003	1.021	0.703
陕西	0.561	0.605	0.769	0.746	1.002	0.760	1.031	0.954	1.013	1.019	0.846
四川	0.333	0.333	0.412	0.501	0.512	0.561	0.600	0.526	0.621	0.664	0.506
流域内	0.409	0.426	0.462	0.485	0.523	0.542	0.690	0.725	0.785	0.799	0.585

从流域现状看,2010—2019年黄河流域工业绿色水资源效率均值是0.585,远小于有效水平(即效率值1),表明黄河流域整体工业绿色水资源效率为无效状态,未实现工业经济与水资源绿色利用的协调发展。从流域内各省(区)来看,2010—2019年流域内各省(区)工业绿色水资源效率均值都小于1,但从2014年开始,陆续有部分省(区)的工业绿色水资源效率达到有效状态,且其数量和效率呈现出较为稳定的“双增”状态。流域内各省(区)的工业绿色水资源效率存在差异,其中陕西效率均值最高(0.846),宁夏最低(0.343)。

从时间发展看,黄河流域整体年均工业绿色水资源效率呈稳定上升趋势,效率值由2010年的0.409提

高到 2019 年的 0.799, 增幅 95.3%。其中 2010—2015 年表现为平稳增长, 2016—2019 年增长较快。这与国家的环保政策直接相关。

为直观体现黄河流域工业绿色水资源效率演变过程, 通过 ArcGIS 软件对 2010、2013、2016 和 2019 年数据进行可视化表达。根据表 1 数据将效率值分为 5 类, 分别是低效率水平 [0.001, 0.399]、中低效率水平 [0.400, 0.599]、中效率水平 [0.600, 0.799]、中高效率水平 [0.800, 0.999] 和高效率水平 (≥ 1.000), 具体见图 1。根据效率水平分类, 2010 年黄河流域只有山东达到中效率水平, 其余省(区)中低效率水平和中低效率水平各占一半; 2013 年中效率水平和中低效率水平省(区)数量均有所增加, 低效率水平省(区)数量减少; 2016 年出现明显变化, 各省(区)效率水平提升幅度较大, 超效率水平省(区)数量增至 3 个, 低效率水平省(区)只有 1 个; 图 1 中明显可见黄河流域整体区域颜色逐年加深, 反映整体工业绿色水资源效率呈上升态势; 2019 年中效率水平以上省(区)数量由 2010 年的 1 个增至 7 个, 未达中效率水平的省(区)仅有青海和宁夏, 其中青海已接近中效率水平。总体上, 各省(区)效率值呈稳定增长趋势, 且黄河流域工业绿色水资源效率始终为“东部>西部”。省(区)间的最大效率差(当年效率最高值与最低值的差值)由 2010 年的 0.390 提高到 2019 年的 0.577, 表明黄河流域整体工业绿色水资源效率质量未得到提升, 省(区)间效率空间差异增大。

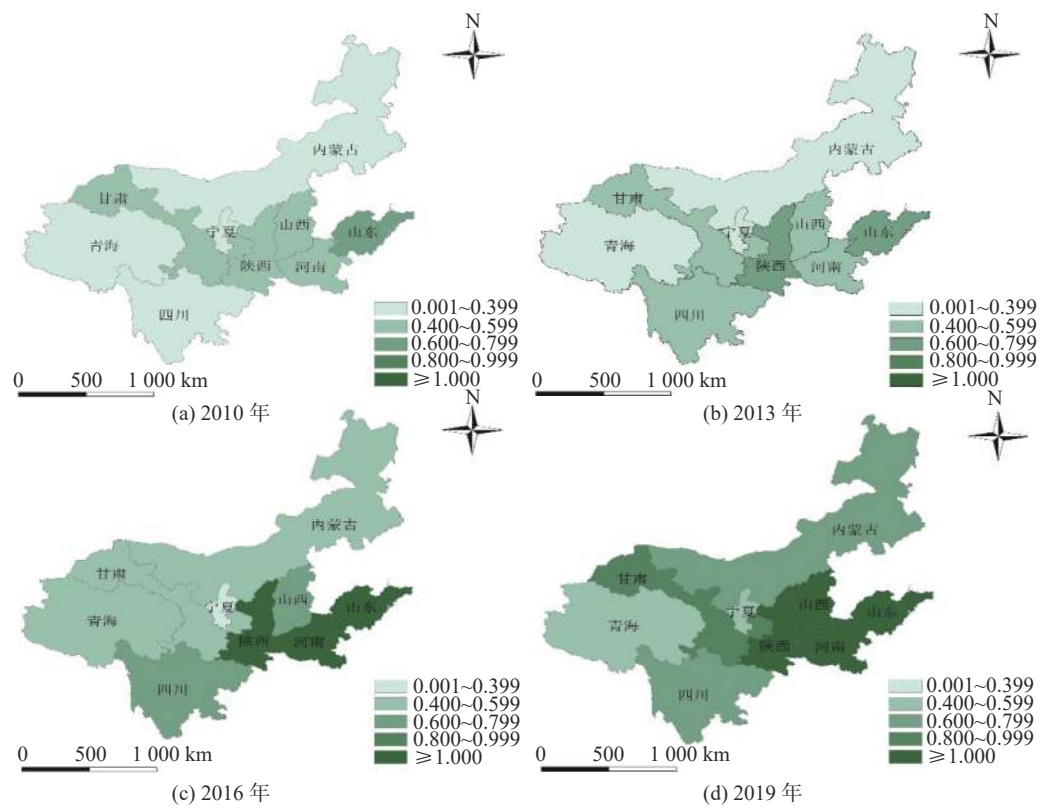


图 1 黄河流域内 2010、2013、2016 和 2019 年工业绿色水资源效率空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of industrial green water resources efficiency in nine provinces in the Yellow River Basin in 2010, 2013, 2016 and 2019

3.2 黄河流域工业绿色水资源效率动态分析

为进一步分析黄河流域工业绿色水资源效率的动态变化特征, 对黄河流域各省(区)2010—2019 年投入产出数据进行 GML 指数测算和分解, 探明相邻时段效率内部变化情况。根据测算的数据整理可得 2010—2019 年黄河流域整体年均及各省(区)年均工业绿色水资源效率(表 2)的 GML 指数及分解结果。

表 2 2010—2019 年黄河流域各年份及九省（区）平均工业绿色水资源效率 GML 指数及其分解

Tab. 2 Average industrial green water resources efficiency GML index and its decomposition for each year and nine provinces (regions) in the Yellow River Basin from 2010 to 2019

年份或省份(区)	I_{GML}	I_{GTC}	I_{GEC}	I_{GPEC}	I_{GSEC}	年份或省份(区)	I_{GML}	I_{GTC}	I_{GEC}	I_{GPEC}	I_{GSEC}
2010—2011	1.051	0.980	1.073	0.796	1.347	甘肃	1.080	1.056	1.022	1.003	1.019
2011—2012	1.063	1.185	0.898	1.176	0.763	河南	1.102	1.099	1.003	1.001	1.002
2012—2013	1.053	1.092	0.964	1.042	0.925	内蒙古	1.099	1.033	1.064	1.054	1.010
2013—2014	1.054	1.004	1.050	1.020	1.030	宁夏	1.058	1.051	1.006	1.002	1.004
2014—2015	1.056	1.037	1.019	0.924	1.102	青海	1.093	1.045	1.046	0.802	1.305
2015—2016	1.275	1.284	0.993	0.813	1.221	山东	1.051	1.056	0.996	0.998	0.998
2016—2017	1.056	0.971	1.088	1.135	0.958	山西	1.078	1.072	1.005	1.007	0.999
2017—2018	1.094	1.118	0.978	0.966	1.013	陕西	1.069	1.069	1.000	1.000	1.000
2018—2019	1.026	0.894	1.147	1.081	1.061	四川	1.080	1.032	1.047	1.039	1.007
均值	1.081	1.063	1.023	0.995	1.047	流域内	1.079	1.057	1.021	0.989	1.038

由表 2 可见, 2010—2019 年黄河流域各年份的工业绿色水资源效率 GML 指数均大于 1, 呈年均增长率为 8.1% 的逐年上升态势。分解指标显示技术进步指数和技术效率指数的均值分别为 1.063 和 1.023, 表明黄河流域工业绿色水资源效率提升主要源于技术进步带来的创新效应, 技术效率作用相对较小。技术效率指数分解后显示, 规模效率大于 1 且纯技术效率小于 1, 反映规模效率对技术效率的正向贡献, 但纯技术效率阻碍技术效率的提升, 表明黄河流域整体工业水资源投入方面规模增强及资源优化配置对其效率提升具有正向作用, 但其开发利用管理水平相对较弱。在 2010—2019 年的多数年份, 纯技术效率小于规模效率且小于 1, 说明多数年份存在工业水资源管理不善阻碍水资源效率提升的情况; 在三分之一的时段中, 则是规模效率小于纯技术效率且小于 1, 反映投入规模不足阻碍水资源效率的提升。同时, 研究期内纯技术效率和规模效率只有 2 年同时大于 1, 其余年份皆呈“非此即彼”的替代效应。黄河流域整体规模效率虽呈逐年上升态势, 但年均增长缓慢, 年均增长率为 4.7%, 反映黄河流域现有工业水资源投入规模需进一步扩大。技术进步指数一半以上的年份(都大于 1)大于技术效率指数, 表明大部分年份工业绿色水资源效率提升的主要驱动力源于技术进步。技术效率的驱动力不足, 反映黄河流域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。从区域差异角度分析, 2010—2019 年黄河流域各省(区)的年均工业绿色水资源效率 GML 指数均大于 1, 其中河南 GML 指数最高(1.102), 山东最低(1.051), 可见黄河流域整体上工业绿色水资源效率提升态势稳定, 但省(区)间提升速度存在差异。黄河流域大部分省(区)的技术进步指数高于技术效率指数且同时大于 1, 说明其工业绿色水资源效率提升由生产技术进步和技术效率共同决定, 但主要依赖技术进步。只有山东的技术效率指数小于 1, 分解而成的纯技术效率和规模效率都小于 1, 表明纯技术效率和规模效率协同抑制其工业绿色水资源效率的提升。山东工业经济发达, 大型化工企业较多, 降污减排压力较大, 技术创新不足和产业内部的水资源配置失衡可能导致工业绿色水资源效率下降。与多数省(区)不同的是, 内蒙古、青海、四川三省(区)的技术效率指数略高于技术进步指数, 反映技术效率指数对以上三省(区)工业绿色水资源效率提升贡献较大。由分解技术效率指数可知, 对内蒙古和四川技术效率贡献较大的是纯技术效率, 说明提升节水技术, 有效控制工业水资源污染排放有助于提高效率; 青海则是规模效率贡献更明显, 且与纯技术效率(小于 1)间差值较大, 反映青海地区工业水资源的配置未达到最优, 工业水资源利用存在浪费现象, 难以发挥规模效应。综上, 各省(区)需立足各自效率短板制定针对性政策, 推动工业绿色水资源效率改善。

3.3 地理探测器结果分析

精准识别工业绿色水资源效率驱动因素, 是提升黄河流域工业绿色水资源效率的前提。基于式(9), 利

用地理探测器模型的因子探测功能, 识别黄河流域 2010—2019 年工业绿色水资源效率的主要驱动因子, 结果见表 3。

表 3 地理探测器模型分析结果

Tab. 3 Results of geographic detector model analysis											
因子	不同年份工业绿色水资源效率驱动因素的地理探测器分析结果及其均值										
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	均值
x_1	0.314	0.467	0.552	0.744	0.291	0.321	0.375	0.475	0.684	0.318	0.454
x_2	0.829	0.717	0.787	0.540	0.908	0.643	0.917	0.850	0.576	0.642	0.741
x_3	0.711	0.425	0.664	0.770	0.723	0.607	0.750	0.850	0.586	0.923	0.701
x_4	0.668	0.942	0.921	0.940	0.928	0.881	0.750	0.517	0.497	0.463	0.751
x_5	0.550	0.475	0.429	0.463	0.476	0.393	0.417	0.142	0.428	0.224	0.400
x_6	0.711	0.733	0.776	0.557	0.630	0.536	0.750	0.442	0.428	0.488	0.605
x_7	0.796	0.517	0.653	0.736	0.476	0.821	0.444	0.633	0.368	0.438	0.588
x_8	0.636	0.475	0.026	0.463	0.414	0.786	0.667	0.675	0.664	0.634	0.544
x_9	0.325	0.525	0.698	0.220	0.846	0.631	0.444	0.067	0.497	0.097	0.435
x_{10}	0.454	0.463	0.547	0.463	0.476	0.821	0.625	0.438	0.457	0.668	0.541

按照一级因子驱动力大小排序(限于篇幅, 具体表格省略)为社会因子>经济因子>环境因子>自然因子。社会因子(工业用水强度(x_2))、人口素质水平(x_3)、科技创新水平(x_4))对黄河流域工业绿色水资源效率驱动力最强, 驱动力最弱的是自然因子(水资源禀赋(x_1))。从各因子时序变化看, 社会因子作为对工业绿色水资源效率驱动力最强的因子, 随时间呈现出倒“U”型的演化趋势。经济因子和自然因子的影响力逐步降低, 但过程中略有反复, 环境因子影响力有升高趋势。从单项指标影响力分析, 对黄河流域工业绿色水资源效率的驱动力最强的前 3 项指标是科技创新水平(x_4)、工业用水强度(x_2)、人口素质水平(x_3), 驱动力最强的科技创新水平(x_4)达到 75%, 其余两项指标的驱动力均超过 70%; 平均驱动力最低的是经济发展水平(x_5)只有 40%。

自然因子方面, 只有水资源禀赋(x_1)一个二级指标, 其驱动力的时序演化特征是反复波动, 不同年份间差异较大, 反映黄河流域水资源分布不均, 资源配置失衡, 地区间用水不协调。由于自然环境、工业用水结构及区域节水降耗减排措施的实施力度存在差异, 导致对地区水资源压力的缓解效果不平稳。

社会因子方面, 工业用水强度(x_2)的驱动力总体呈稳中有降趋势, 反映流域整体在工业用水强度方面已有较高控制水平。工业用水强度越高, 相同工业产值下水资源消耗越大, 工业绿色水资源效率越低。人口素质水平(x_3)的驱动力逐年增强, 提升素质水平不仅有助于增强节水观念, 也为节水技术变革提供人才支撑, 为工业绿色发展夯实人力资本, 进而提升工业绿色水资源效率。科技创新水平(x_4)的驱动力呈先增后减趋势。区域研发经费投入的提高激发节水技术变革, 带动水资源高效利用和水污染防治等领域的技术升级, 有利于降低工业用水量 and 污染物排放量, 直接对水资源效率产生提升效果, 但科技创新水平(x_4)驱动力的降低趋势反映科技创新相关投入及技术落地转化存在不足。

经济因子方面, 经济发展水平(x_5)的驱动力呈下降趋势, 说明经济发展水平提高没有带动工业绿色水资源效率同步上升, 反映部分地区经济发展以环境污染为代价, 导致经济越发展污染越严重, 考虑环境负效应的工业绿色水资源效率自然随之下降。工业化程度(x_6)及工业集聚程度(x_7)的驱动力皆呈下降趋势, 工业化程度及工业集聚程度提高对工业经济提升明显。但近年来黄河流域工业发展迅速且集聚效应增强, 产业规模提高后对工业绿色水资源效率的驱动力却降低, 说明工业化及工业集聚导致的环境外部性影响较大, 工业化质量及集聚的工业具体类型亟待优化, 如高用水高污染的重工业项目依然较多, 低耗水低污染高产值的高新技术工业项目相对较少, 工业内部结构需改善。

环境因子方面,环境规制程度(x_8)的驱动力波动相对平稳,反映环境规制对工业绿色水资源效率具有持久影响。以工业治污投资刻画的环境规制程度能够通过倒逼机制促使工业企业有意识地“节水降耗减排”,进而提升工业绿色水资源效率。市场化程度(x_9)的驱动力波动较大且呈下降趋势,说明黄河流域整体的营商环境欠佳,未能充分激发市场主体活力,难以形成强大经济助力来推动工业水资源的绿色技术创新及扩散。对外开放程度(x_{10})的驱动力呈波动上升态势,反映黄河流域对外开放程度的影响虽有增强但稳定性欠佳,流域内各地区亟待形成更稳定的对外合作路径。

4 结 语

2010—2019 年黄河流域工业绿色水资源效率呈稳定上升态势,但效率均值较低,整体处于无效状态。各省(区)间效率值存在空间差异,部分省(区)变化较大,缺乏稳定性。自然、社会、经济及环境皆是黄河流域工业绿色水资源效率的一级驱动因子,科技创新水平、工业用水强度、人口素质水平是驱动力最强的二级驱动因子。根据地理探测器驱动因素分析结果,建议如下:

(1)自然因子方面。一是扩大再生水及海水等非常规水源的利用,减少常规水源取用,弥补水资源供需缺口。二是对工业企业加强宣传引导,形成良好的节水意识和用水习惯。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。三是坚持水市场改革,大力推进水权交易工作。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。

(2)社会因子方面。加强地方招才引智力度,扩大企业专业技术培训规模,增加培训频次,提升从业人员素质水平。提高黄河流域工业绿色水资源效率的关键在于技术进步,须加大地方 R&D 投入,支持节水和污染防治技术创新,支持产学研转化,推广先进适用节水和污染防治技术。鼓励各省(区)间进行工业“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。

(3)经济因子方面。坚持以水定产,优化各省(区)工业结构布局。继续提高产业规模集聚效应,推动具备雨水集蓄利用、雨污分流等功能的绿色工业园区和节水工业园区建设,发挥其节水及经济集聚效应。调整工业产业内部结构,支持环保产业和诸如新基建、光伏新能源等节水高产值型高新技术产业项目,逐步淘汰落后的高用水项目,鼓励引导地方金融机构信贷资源偏好转移到有利于绿色发展的产业,助推黄河流域经济高质量发展。

(4)环境因子方面。环境规制政策的制定须考虑生态承载力等自然因素,环境规制还具有经济效益异质性,因此,各省(区)须差别化制定环境规制政策,发挥好环境规制的“波特假说”效应,实现产业“节水降耗减排”的绿色升级。优化营商环境,根据各地实际情况制定精细化的市场政策,发挥好政府的服务角色,营造开放包容的市场氛围。因地制宜,积极融入“双循环”战略及“一带一路”建设,根据区域定位精准制定对外开放路径。持续增大招商引资力度,鼓励在水资源效率高的行业引进高质量外资,政府进行政策配套优惠,同时注意防止出现低质量高污染外资进行“污染避难所效应”式的产业转移行为。

参 考 文 献:

- [1] 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, 111-112. (XU Jingrong, HUANG Dechun, FANG Juanmin. Regional total factor water resources utilization efficiency and its influencing factors in China[J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 2021, 23(6): 77-84, 111-112. (in Chinese))
- [2] 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, 87. (HU Linkai. Dynamic evaluation of water resources utilization efficiency in Yunnan Province based on WCA-MEPP model[J].

Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(4): 75-81, 87. (in Chinese))

- [3] 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.
- [4] 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. (JIAO Shixing, WANG Anzhou, ZHANG Chongchong, et al. Comprehensive measurement and temporal-spatial differentiation of water resources efficiency in Henan Province[J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(2): 48-55. (in Chinese))
- [5] 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. (ZHONG Liwen, ZHANG Jianbing, CAI Yunshuang, et al. Efficiency of water resources utilization and its spatiotemporal characteristics of Guangxi[J]. *Economic Geography*, 2020, 40(6): 193-202. (in Chinese))
- [6] 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. (YANG Gaosheng, XIE Qiuhao. Study on spatial and temporal differentiation of green water resources efficiency in the Yangtze River economic belt[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(2): 349-358. (in Chinese))
- [7] 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 Keliang, LIU Yue, SHI Lijuan, 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. (in Chinese))
- [8] 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. (HU Biao, HOU Shaobo. Temporal and spatial differences of urban industrial water consumption efficiency in Jing-Jin-Ji region[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(7): 1-7. (in Chinese))
- [9] 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. (MAI Yazong, SUN Fuli, SHI Lei, et al. Evaluation of China's industrial water efficiency based on DEA model[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(11): 42-47. (in Chinese))
- [10] 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. (QIAN Wenjing, HE Canfei. China's regional difference of water resource use efficiency and influencing factors[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(2): 54-60. (in Chinese))
- [11] 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, 92-93. (ZHANG Zhaofang, SHEN Juqin, HE Weijun, et al. An analysis of water utilization efficiency of the Belt and Road initiative's provinces and municipalities in China based on DEA-Malmquist Tobit model[J]. *Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences)*, 2018, 20(4): 60-66, 92-93. (in Chinese))
- [12] 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. (LI Jian, XIE Heng. Calculation of green water resources utilization efficiency in Jing-Jin-Ji urban agglomeration and analysis of its spatio-temporal differences and driving factors[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2021, 32(6): 10-18. (in Chinese))
- [13] 谭粤元. 中国工业用水效率研究: 基于SBM模型和Malmquist-Luenberger指数[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018. (TAN Yueyuan. Study on the utilization efficiency of China's industrial water: based on SBM model and Malmquist-Luenberger index[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese))
- [14] 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 Le, YANG Faxuan, QIAN Hui, 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. (in Chinese))
- [15] 中共中央、国务院. 黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要[N]. *人民日报*, 2021-10-09(5). (The CPC Central Committee and the State Council. Outline of ecological protection and high-quality development planning for the Yellow River Basin[N]. *People's daily*, 2021-10-09(5). (in Chinese))
- [16] 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.
- [17] 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. (HAN Jieping, CHENG Xu, YAN Jing, et al. Study on the measurement of urban eco-industrial green development based on network super-efficiency EBM model: taking 47 key cities in Three regions and Ten

- groups as an example[J]. Science and Technology Management Research, 2019, 39(5): 228-236. (in Chinese))
- [18] 曹乃刚, 赵林, 高晓彤. 黄河三角洲县域绿色经济效率的时空演变与驱动机制[J]. 应用生态学报, 2021, 32(9): 3299-3310. (CAO Naigang, ZHAO Lin, GAO Xiaotong. Spatio-temporal evolution and driving mechanism of green economic efficiency at county level in the Yellow River Delta, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(9): 3299-3310. (in Chinese))
- [19] 蒋晚珍. 黄河流域水资源绿色效率测度及提升机制研究[D]. 西安: 西北大学, 2021. (JIANG Wanzhen. Research on green efficiency measurement and promotion mechanism of water resources in the Yellow River Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2021. (in Chinese))
- [20] 黄馨亿, 任向宁, 马涛, 等. 地理探测器与Tobit模型在粤西地区粮食生产效率及影响因子分析中的比较应用[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(6): 818-828. (HUANG Xinyi, REN Xiangning, MA Tao, et al. Comparative application of geographical detector and Tobit model in analysis of grain production efficiency in the western Guangdong region and its influencing factors[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(6): 818-828. (in Chinese))
- [21] 田进明, 孟丽红, 刘友存, 等. 江西省城市水资源利用效率时空演变与驱动因素[J]. 中国农村水利水电, 2022, 479(9): 146-154. (TIAN Jingming, MENG Lihong, LIU Youcun, et al. Spatial-temporal changes of urban Water efficiency in Jiangxi Province and its influencing factors[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022, 479(9): 146-154. (in Chinese))
- [22] 张峰, 宋晓娜, 薛惠锋. 中国工业绿色水资源效率驱动机制的时空非平稳性[J]. 软科学, 2021, 35(6): 97-102. (ZHANG Feng, SONG Xiaona, XUE Huifeng. Temporal and spatial non-stationarity of industrial green water resources efficiency driving mechanism in China[J]. Soft Science, 2021, 35(6): 97-102. (in Chinese))

Spatial and temporal differentiation and influencing factors of industrial green water resources efficiency in the Yellow River Basin

MIAO Junyu

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

Abstract: Scientifically assessing the efficiency of industrial green water resources and identifying its driving factors is one of the important ways to resolve the contradiction between supply and demand of water resources, promote industrial green transformation, and enhance ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin. Based on the super efficiency EBM model of undesirable output, nine provinces (regions) in the Yellow River Basin were taken as the research object to calculate the industrial green water resources efficiency in the Yellow River Basin from 2010 to 2019. Secondly, GML index was used to analyze the dynamic change of industrial green water efficiency. Finally, the driving factors of industrial green water resources efficiency were explored through the geographical detector model. The results show that the overall mean value of industrial green water resources efficiency in the Yellow River Basin from 2010 to 2019 is only 0.585, which does not reach the effective state, shows a steady upward trend. There are obvious differences in the efficiency values among provinces, with Shaanxi province having the highest efficiency and Ningxia province having the lowest efficiency, and showing a pattern of “the east is greater than the west”. The improvement of GML index of industrial green water efficiency in the Yellow River Basin is driven by both the technical progress index and the technical efficiency index. Nature, society, economy and environment are the primary driving factors of industrial green water resources efficiency in the Yellow River Basin, and the level of scientific and technological innovation, industrial water intensity and population quality are the strongest secondary driving factors.

Key words: industrial water resources efficiency; green development; super-efficiency EBM; GML index; geographic detector model; Yellow River Basin