DOI:10.20040/j.cnki.1000－7709.2026.20250549

基于DEA-MLR模型的宁夏水资源利用效率与产业耗水动态协同机制研究

张登毓[1],何进宇[1,2,3],鲍宪远[1],李思凯[1],唐瑞山[4],吕娜娜[5],杨海林[1],杨青青[1]

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院,宁夏 银川 750021; 2. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心,宁夏 银川 750021; 3. 宁夏回族自治区黄河水联网数字治水重点实验室,宁夏 银川 750021;
4. 宁夏红寺堡扬水管理处,宁夏 吴忠 755100; 5. 陕西水务发展供水集团有限公司,陕西 西安 710018)

摘要:为深入探究水资源利用与产业耗水之间的动态演化规律,推动产业间的协同发展,以宁夏为例,基于数据包络分析方法(DEA)和多元线性回归模型(MLR)深入探究投入要素与全要素生产率之间的内在联系。结果表明,在仅考虑基础资源作为主要投入要素时,生产导向对全要素生产率影响较小,全要素生产率主要受规模报酬的影响;耗水量变化对第一、二、三产业全要素生产率均未产生显著影响,第一产业发展仍存在广阔的提升空间,在致力于减少耗水量的同时,应着重提升全要素生产率;第二产业投入要素的变动普遍对全要素生产率呈现出显著的负向效应,需着力提升创新水平,积极调整投入比例;第三产业固定资产投入已出现一定程度的冗余,应转变发展策略,在扩大内需、增强发展潜力的同时节约用水。围绕宁夏第一、二、三产业水资源动态配置效率,以及投入要素对全要素生产率的影响展开了深入分析,将为区域可支配水资源的产业化合理配置、产业的稳健发展以及水资源的可持续利用提供一定的理论支撑。

关键词:水资源;数据包络分析;回归分析;全要素生产率;动态配置效率

中图分类号:TV213.9 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-7709(2026)02-0069-05

Research on Dynamic Synergistic Mechanism Between Water Use Efficiency and Industrial Water Consumption in Ningxia Based on DEA－MLR Model

ZHANG Deng-yu[1], HE Jin-yu[1,2,3], BAO Xian-yuan[1], LI Si-kai[1], TANG Rui-shan[4], LYU Na-na[5], YANG Hai-lin[1], YANG Qing-qing[1]

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Engineering Research Center for Efficient Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Arid Regions, Ministry of Education, Yinchuan 750021, China; 3. Key Laboratory of the Internet of Water and Digital Water Governance of the Yellow River, Yinchuan 750021, China; 4. Hongsibu Water-Lifting Management Office in Ningxia, Wuzhong 755100, China; 5. Shaanxi Water Affairs Development & Water Supply Group Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: To investigate the dynamic evolution between water resource utilization and industrial water consumption and to promote synergistic development among industries, this study explored the intrinsic relationships between input factors and total factor productivity (TFP) in Ningxia by employing data envelopment analysis (DEA) and multiple linear regression (MLR) models. The results showed that when only basic resources were considered as the main input factors, production orientation exerted a minimal impact on TFP, which was predominantly influenced by returns to scale. Changes in water consumption showed no significant impact on TFP of the primary, secondary, and tertiary industries. The primary industry demonstrated substantial potential for improvement; while striving to reduce water consumption, it should focus on enhancing TFP. Changes in the input factors of the secondary industry generally exhibited significant negative effects on TFP; it is necessary to actively improve innovation levels and adjust the input mix. The tertiary industry

收稿日期:2025-03-27,**修回日期**:2025-05-05,**接受日期**:2025-05-10

基金项目:国家自然科学基金项目(黄河水科学联合基金)(U2243601);宁夏高等学校一流学科建设项目(NXYLXK2021A03)

作者简介:张登毓(1998-),男,硕士研究生,研究方向为黄河水沙资源利用与配置,E-mail:18335057001@163.com

通讯作者:何进宇(1986-),男,博士、副教授,研究方向为水生态与水土资源调控,Email:hejinyu2017@163.com

中国知网 https://www.cnki.net

showed a certain degree of redundancy in fixed asset investment; it should transform its development strategy to stimulate domestic demand and enhance development potential while conserving water. This study conducted an in-depth analysis focusing on the dynamic allocation efficiency of water resources and the impact of input factors on TFP in the primary, secondary, and tertiary industries of Ningxia. The findings provide theoretical support for the rational industrial allocation of regional disposable water resources, industrial stability, and sustainable water utilization.

Key words: water resources; data envelopment analysis; regression analysis; total factor productivity; dynamic allocation efficiency

1 引言

在全球气候变化和人口经济规模扩张双重驱动下，水资源供需矛盾已成为制约区域可持续发展的瓶颈问题[1]。当前我国北方生态脆弱区面临的水资源危机尤为突出，黄河上中游流域作为典型案例，其高耗水产业发展与水资源短缺的矛盾备受关注[2]。在此背景下，通过产业耗水动态调控实现水资源－经济系统的协同优化，成为破解区域发展困局的核心命题。目前针对多产业用水协同机制已开展系统性探索，其中张明斗等[3]聚焦水资源利用效率空间关联网络，发现地理邻近性、经济发展水平差异及对外开放程度是其关键驱动因素；白夏等[4]则围绕区域产业用水需求变化驱动效应展开研究，证实经济水平和用水效率为主要驱动因素。然而，现有研究对水资源动态配置效率演变及其向全要素生产率(TFP)传导的内在机制，仍缺乏系统性解构。鉴此，本文以宁夏为研究区，聚焦第一、二、三产业水资源利用的协同演化规律，以“数据处理—效率测算—机制解析”三阶段研究框架构建数据包络分析法(DEA)和多元线性回模型(MLR)的耦合模型(DEA-MLR 模型)，重点揭示 2000～2022 年间三大产业水资源动态配置效率的时空分异特征，解析投入要素对 TFP 的影响机制。研究结果将为实现黄河流域高质量发展战略目标提供关键决策依据，尤其在优化水资源与能源要素市场配置、推动节水节能技术创新等方面具有参考价值。

2 研究区概况与数据方法

2.1 研究区概况

宁夏(图 1)地处内陆干旱、半干旱地区，其水资源与经济紧密融合，黄河年均过境水量超 $300\times10^8\ m^3$，辅以地下水，支撑灌区用水体系。宁夏全年降水量相对较小且降水主要集中在夏季，蒸发量大，雨热不同期，自产地表水资源远不能满足产业用水需求，经济社会发展对黄河水依赖程度较高。

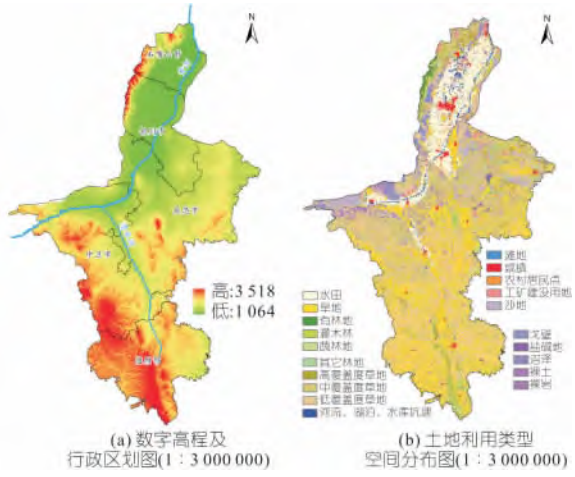

图 1 研究区概况图

Fig. 1 General map of the study area

2.2 数据来源

所用数据来源于 2000～2022 年《宁夏水资源公报》和《宁夏统计年鉴》，研究耗水量指输水、用水过程中消耗且不能回归地表和地下饱和含水层的水量。

2.3 研究方法

(1)DEA-MLR 模型。数据包络分析(DEA)方法，以第一、二、三产业作为决策单元，耗水量、劳动力投入(产业从业人员)、资本投入(固定资产投资)作为投入指标和用水强度作为辅助投入指标，以各产业产值和人均不变价 GDP 作为产出指标。分别在投入导向、产出导向、规模报酬不变(CRS)和规模报酬可变(VRS)的条件下，运用 CCR-Malquist 指数模型在相邻参比和全局参比的条件下分析技术效率、规模效率和技术进步指数，全面评价产业水资源动态配置效率并为多元回归模型(MLR)生成被解释变量全要素生产率(TFP)。DEA 方法通过评估决策单元的相对效率，揭示各产业水资源利用的优化潜力[5]；而 MLR 则进一步量化具体驱动因素的作用程度与方向，将 TFP 与耗水量、劳动力、资本及其交互项进行参数估计，揭示要素贡献度与作用路径，弥补 DEA 在因果解释上的局限。具体模型构建如下。

步骤 1 模型设定与变量选择。被解释变量为全要素生产率(TFP)，通过 DEA-Malmquist 指

中国知网 https://www.cnki.net

数计算得到,反映水资源利用的综合效率。

步骤 2　核心解释变量与投入组合设计。其中:①基准模型。耗水量、劳动力投入、资本投入(固定资产投资);②扩展模型Ⅰ。在初始组合基础上增加用水强度(单位产值耗水量);③扩展模型Ⅱ。进一步纳入研发经费投入,以考察技术创新对效率的边际贡献。

步骤 3　控制变量与交互效应。引入“劳动力×固定资产”“耗水量×劳动力投入”“耗水量×固定资产”等交互项,分析要素协同作用。其中:①基准模型。计算公式为:

$$T_{\mathrm{TFP}_{it}}=\alpha+\beta_1 W_{\mathrm{WC}_{it}}+\beta_2 L_{it}+\beta_3 K_{it}+\epsilon_{it} \quad (1)$$

式中,$T_{\mathrm{TFP}_{it}}$ 为第 i 个产业在 t 时期的全要素生产率;α 为常数项;β_1、β_2、β_3、β_4 为待估计系数;$W_{\mathrm{WC}_{it}}$ 为耗水量;L_{it} 为劳动力投入;K_{it} 为固定资产投入;ϵ_{it} 为随机误差项。②扩展模型Ⅰ。计算公式为:

$$T_{\mathrm{TFP}_{it}}=\alpha+\beta_1 W_{\mathrm{WC}_{it}}+\beta_2 L_{it}+\beta_3 K_{it}+\beta_4 M_{it}+\epsilon_{it} \quad (2)$$

③扩展模型Ⅱ。计算公式为:

$$T_{\mathrm{TFP}_{it}}=\alpha+\beta_1 W_{\mathrm{WC}_{it}}+\beta_2 L_{it}+\beta_3 K_{it}+\beta_4 M_{it}+\beta_5 N_{it}+\epsilon_{it} \quad (3)$$

式中,M_{it} 为用水强度;N_{it} 为研发经费投入;β_5 为待估计系数。

引入交互效应后模型:

$$T_{\mathrm{TFP}_{it}}=\alpha+\beta_1 W_{\mathrm{WC}_{it}}+\beta_2 L_{it}+\beta_3 K_{it}+\beta_4 Q_{it}+\beta_5 W_{\mathrm{WC}_{it}} L_{it}+\beta_6 WC_{it} K_{it}+\beta_7 L_{it} K_{it}+\epsilon_{it} \quad (4)$$

式中,Q_{it} 为地区的创新水平;$W_{\mathrm{WC}_{it}} L_{it}$、$W_{\mathrm{WC}_{it}} K_{it}$、$L_{it} K_{it}$ 分别为各投入指标之间的交互项;β_6、β_7 为待估计系数。

3　基于 DEA-MLR 模型的宁夏水资源利用效率与产业耗水动态协同机制研究

3.1　第一、二、三产业水资源动态配置效率分析

设置投入和产出导向为 $R0$、$R1$,相邻和全局参比为 $Q0$、$Q1$,规模报酬不变和可变分别为 $W0$、$W1$,在对应的组合下,第一、二、三产业技术进步变化和全要素生产效率见图 2。产业技术进步变化 e_{effch} 和全要素生产效率 t_{techch} 计算公式分别为:

$$e_{\mathrm{effch}}=\frac{D^{t+1}(x^{t+1},y^{t+1})}{D^{t}(x^{t},y^{t})} \quad (5)$$

$$t_{\mathrm{techch}}=\left[\frac{D^{t}(x^{t+1},y^{t+1})}{D^{t+1}(x^{t+1},y^{t+1})}\,\frac{D^{t}(x^{t},y^{t})}{D^{t+1}(x^{t},y^{t})}\right]^{1/2} \quad (6)$$

$$t_{\mathrm{tfpch}}=e_{\mathrm{effch}}\,t_{\mathrm{techch}} \quad (7)$$

式中,$D^{t}(x^{t},y^{t})$ 为时期 t 的技术下,时期 t 的输入输出效率;$D^{t+1}(x^{t+1},y^{t+1})$ 为时期 $t+1$ 的技术下,时期 $t+1$ 的输入输出效率;$D^{t}(x^{t+1},y^{t+1})$ 为时期 t 的技术下,时期 $t+1$ 的输入输出效率;$D^{t+1}(x^{t},y^{t})$ 为时期 $t+1$ 的技术下,时期 t 的输入输出效率。

投入导向下,三大产业技术效率呈现差异化特征:第一产业技术效率值稳定在 1 附近,表明现有技术下投入压缩空间有限,但规模报酬特性显示存在待释放的规模调整潜力,叠加技术进步呈波动上升趋势,为效率提升创造可能;第二产业技术效率持续趋近 1,反映纯技术效率与规模效率已达动态均衡,需警惕规模报酬可变性中潜在的规模经济失衡风险;第三产业在投入固化格局下,亟需通过规模结构优化突破资源配置瓶颈,实现效率边际改善。

产出导向下第一产业技术效率趋于稳定,现有技术规模下产出弹性有限,但技术进步潜力逐步释放;第二产业技术效率多数接近 1,技术进步显著波动主导全要素生产率弹性,其增长可打开产能空间,衰退则引发投入产出倒挂风险;第三产业效率格局与投入导向高度一致,技术进步对全要素生产率的双重驱动效应突出且持续增强,形成“技术红利+资源配置”的复合增效通道。

从水量配置与水效协同视角分析,2022 年第一产业以 65%的高耗水仅支撑 TFP0.92 的低效产出,显著低于第二产业TFP1.05,而第三产业

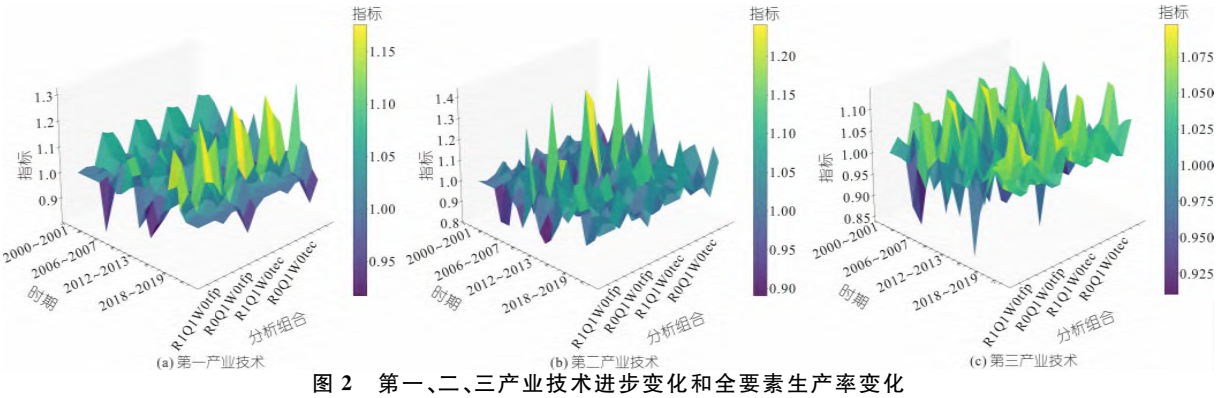

图 2　第一、二、三产业技术进步变化和全要素生产率变化

Fig. 2　Changes in technological progress and total factor productivity in the primary industry, secondary industry and tertiary industry

中国知网　https://www.cnki.net

TFP 年增速 1.2%显示其效率提升潜力，表明存在水量向高增长性第三产业转移的配置优化需求。与此同时，尽管第二产业单位产值耗水量（0.15 m^3/万元）远优于第一产业（1.2 m^3/万元），但结合其固定资产投入冗余率达 18%，暴露出资本驱动模式下“高投入—低水效”的结构性矛盾，表明当前以第二产业为主导的产业结构具有阶段合理性，但已临近转型临界点。

3.2 耗水量对全要素生产率的影响分析

基于第一、二、三产业水资源动态配置效率的分析，投入导向和产出导向在相邻参比时全要素生产率变化并不具有显著差距，规模报酬是否可变为制约全要素生产率的关键因素，分别以规模报酬不变和可变的角度分析耗水量对全要素生产率的影响。

表 1 模型 R^2 值变化

Tab. 1 Changes of R^2 value in model

产业	规模报酬不变			规模报酬可变		
	基准模型	扩展模型Ⅰ	扩展模型Ⅱ	基准模型	扩展模型Ⅰ	扩展模型Ⅱ
第一	0.746 8	0.771 7	0.808 2	0.64	0.66	0.8
第二	0.884 7	0.884 8	0.884 9	0.42	0.53	0.63
第三	0.574 6	0.610 1	0.618 3	0..38	0.39	0.41

在规模报酬不变、可变的情境下，加入用水强度和研发经费后各产业的 R^2 值呈现出多样的变化态势。其中，投入和产出导向规模报酬不变相邻参比时各产业 R^2 值均增加；投入导向规模报酬可变时，虽然各产业 R^2 值都有所增加，但第二产业处于较低水平且提升幅度小，第三产业始终较低；产出导向规模报酬可变时，第一、二产业 R^2 值低且变化不大，第三产业大幅提升，反映出第三产业生产效率在规模报酬可变时与生产发展导向关联更紧密，而第一、二产业受规模报酬变化影响更大。进一步从产业间差异来看，投入导向规模报酬不变时第一产业 R^2 值变化幅度最大，可能因其生产模式受新变量改变影响大；第二产业整体 R^2 值最大但新变量边际贡献有限，需挖掘其他因素；第三产业 R^2 值低且在不同导向和规模报酬下表现各异，其生产效率影响因素复杂多样，单纯的从投入产出角度来评价并不全面。

对规模报酬不变、可变时三个阶段水资源投入系数变化（表 2）分析可知，对于第一产业而言，规模报酬不变时，用水强度提升显著强化耗水量对 TFP 的正向作用，但研发投入削弱其边际效益，反映节水技术改进需与规模适配；规模报酬可变时，耗水量影响微弱且波动小，生产效率受刚性规模约束。对于第二产业，规模报酬不变时，在当前用水强度变化下耗水量变化对全要素生产率的影响逐渐减小；规模报酬可变时，耗水量系数始终为负，表明节水通过技术创新可突破规模限制提升 TFP。对于第三产业，规模报酬不变时，耗水量与 TFP 正向关联增强，反映出粗放扩张特征；规模报酬可变时，耗水量系数变为负数且波动较小，指向结构优化驱动的节水增效路径。综合来看，规模报酬可变性通过改变要素弹性边界，显著调节水资源配置对 TFP 的作用机制，用水强度、研发投入的增效潜力取决于产业规模动态特征。

表 2 耗水量系数变化

Tab. 2 Changes of water consumption cofficient

产业	规模报酬不变			规模报酬可变		
	基准模型	扩展模型Ⅰ	扩展模型Ⅱ	基准模型	扩展模型Ⅰ	扩展模型Ⅱ
第一	−0.001 8	0.006 1	0.003 8	−0.000 2	0.004 3	0.002 1
第二	0.017 6	0.017 1	0.016 8	−0.004 9	−0.011 4	−0.008 6
第三	0.002 7	0.007 1	0.008 9	−0.004 7	−0.006 5	−0.004 7

3.3 综合考虑投入要素间交互作用对全要素生产率影响

在原投入基础上综合考虑投入要素的组合影响并纳入地方创新水平进行分析，将创新水平分解为“研发投入（N_1）”和“专利产出（N_2）”，前者反映创新投入强度，后者体现创新产出能力。结合专家打分与权重计算：邀请 3 位水资源与产业经济领域专家，对 N_1、N_2 的相对重要性打分，构建判断矩阵 $\begin{bmatrix} 1 & 2/3 \\ 3/2 & 1 \end{bmatrix}$。计算特征向量得权重向量（0.4∶0.6），一致性检验 $C_R=0.02<0.1$，通过有效性验证且（0.4∶0.6）的比例与《中国区域创新能力报告》中“创新投入－产出”指标权重体系一致。以研发投入和专利产出作为虚拟控制变量并分别按照 0.4、0.6 的权重来评价地区的创新水平，规模报酬不变和可变的分析结果见表 3。

表 3 规模报酬不变、可变时各投入要素系数变化

Tab. 3 Changes in the coefficients of various input factors under constant and variable returns to scale

规模报酬	产业	α	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	R^2
不变	一	1.084	−0.006	−0.018	−0.034	−0.014	−0.032	−0.006	0.061	0.867
	二	1.057	0.012	−0.076	−0.033	−0.001	−0.023	−0.001	0.006	0.903
	三	1.051	0.002	−0.011	−0.057	−0.017	0.019	0.018	−0.021	0.648
可变	一	0.974	−0.003	−0.012	−0.011	−0.011	−0.001	0.010	0.039	0.853
	二	0.941	0.007	−0.041	−0.012	0.018	0.015	−0.013	0.026	0.829
	三	0.964	0.005	−0.005	−0.342	0.004	−0.010	0.011	0.016	0.672

在规模报酬不变和可变的情况下截距项均表现为显著，这表明在不考虑其他投入因素变化时，各产业存在一个基础的全要素生产率水平，且在规模报酬不变时表现为第一产业＞第二产业＞第三产业，规模报酬可变时表现为第一产业＞第三产业＞第二产业；三个产业水资源投入均表现为不显著，截距项均表现为显著，说明在一定的发展

中国知网 https://www.cnki.net

水平下产业具有了一定的水资源利用稳定性;第一、三产业的劳动力投入系数不显著,而第二产业的劳动力投入系数显著为负;第二、三产业的固定资产投入系数显著为负,第一产业的固定资产投入系数接近显著为负;水资源和劳动力投入的交互项系数在三个产业中均不显著,说明水资源投入与劳动力投入之间的协同作用对全要素生产率影响不明显。

在规模报酬不变的情况下,三个产业创新程度系数均不显著;第一产业劳动力投入和固定资产投入系数 0.061 显著为正,这意味着在第一产业中,劳动力投入和固定资产投入之间存在一定的协同促进作用,而在第二、三产业中该交互项系数不显著,说明在这些产业中,劳动力和固定资产的组合方式可能需要进一步优化。同时,耗水量变化对第一产业效率的影响并不显著,而用水强度的降低却可间接推动产业增长。这充分说明第一产业效率提升的核心在于优化要素配置,而非单纯追求耗水量的减少。第二产业的耗水量与固定资产投入交互项系数为−0.023,虽伴随着高耗水,但全要素生产率并未同步提升。这种现象凸显了在"能耗−水耗"双高的背景下,节水技术滞后的问题。第三产业中,创新水平与耗水量系数为 0.019,表明在信息技术、商务服务等低耗水行业的创新发展过程中,对水资源的依赖程度较低。

在规模报酬可变的情况下,第一、二产业创新程度显著且一负一正,说明当前创新程度抑制了第一产业全要素生产率进一步提高,但对第二产业生产率有明显促进作用。水资源和固定资产投入仅在第二产业中显著且系数为负,表明在第二产业中水资源投入与固定资产投入存在一定的相互制约关系;劳动力投入和固定资产投入在第一、二产业中显著为正,说明在这两个产业中合理配置劳动力和固定资产能提高生产效率,存在协同促进作用,但第三产业不显著,意味着该产业需探索更有效的劳动力与固定资产组合方式。

4　结论

a. 生产导向对于三大产业 TFP 影响较小,TFP 主要受规模报酬的影响。

b. 第一产业效率提升重在要素配置优化而非单纯减耗;第二产业 TFP 受"能耗−水耗"双高与节水技术滞后制约;第三产业低耗水行业创新呈现出低水资源依赖与高结构灵活性需求特征。

c. 研究方法适用于干旱、半干旱地区多主体生产效率的对比及其要素影响力分析。

参考文献:

[1] 给水排水 .国家发展改革委等部门发布关于进一步加强水资源节约集约利用的意见[J]. 给水排水, 2023, 59(10): 153. (Water & Wastewater Engineering. The national development and reform commission and other departments issued opinions on further strengthening the conservation and intensive use of water resources[J]. Water & wastewater engineering, 2023,59(10):153. (in Chinese))

[2] 薛继亮. 生态脆弱地区高耗水产业和水权分配协同体系建设研究——以黄河上中游流域为例[J]. 资源与产业, 2014, 16(4): 52-56. (XUE J L. Water-intensive industry and water right allocation collaboration system construction in ecologically vulnerable areas: A case study on the middle and upper reaches of Yellow River[J]. Resources & industries, 2014, 16(4): 52-56. (in Chinese))

[3] 张明斗, 翁爱华. 长江经济带城市水资源利用效率的空间关联网络及形成机制[J]. 地理学报, 2022, 77(9): 2353-2373. (ZHANG M D, WENG A H. Spatial correlation network and its formation mechanism of urban water utilization efficiency in the Yangtze River economic belt[J]. Acta geographica sinica, 2022, 77(9): 2353-2373. (in Chinese))

[4] 白夏, 戚晓明, 潘争伟, 等. 区域产业用水需求变化驱动效应测度及空间分异分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 89-96. (BAI X, QI X M, PAN Z W, et al. Measurement of driving effects and spatial variation analysis for change of regional industrial water utilization[J]. Journal of North China University of water resources and electric power (natural science edition), 2018, 39(4): 89-96. (in Chinese))

[5] 黄臻, 许萍. 基于三阶段 DEA-Malmquist 指数分解的工业用水效率研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(12): 89-93. (HUANG Z, XU P. Research on utilization efficiency of industrial water based on three-stage DEA and malmquist index decomposition[J]. Water resources and power, 2022, 40(12): 89-93. (in Chinese))

中国知网　https://www.cnki.net