

黄河流域农业用水效率的时空格局及影响因素研究

刘建华^{1,2}, 高新科^{1,2}, 施天乐^{1,2,3}, 黄亮朝³

(1. 郑州大学 管理学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 黄河生态保护与区域协调发展研究院, 河南 郑州 450001;
3. 克劳斯塔尔工业大学 地下能源系统研究所, 德国 下萨克森州 克劳斯塔尔-采勒费尔德 38678)

摘要:【目的】揭示黄河流域农业用水效率时空格局及影响因素, 推进黄河流域农业高质量发展。

【方法】基于2013—2022年的面板数据, 首先利用非期望产出超效率SBM模型对黄河流域各地市的农业用水效率进行测度和分析, 然后采用Tobit模型分析农业用水效率的影响因素, 最后运用时空地理加权回归模型分析各因素的影响程度及时空差异性。【结果】①黄河流域农业用水效率近年得到很大提升, 但仍处于较低水平, 在空间上存在较大差异, 呈“东高西低”“南高北低”的分布特征。②人均水资源量、地表水供水占比、节水灌溉面积占比和人均农产值是农业用水效率的主要影响因素。③黄河流域农业用水效率的影响因素存在明显的时空分异性, 人均水资源量以负向影响为主, 但影响程度由东向西逐渐减弱, 并在部分地区呈现正向影响; 地表水供水占比的负向影响先增后减, 空间上呈现“西高东低”的分布特征; 节水灌溉面积占比的正向影响逐年增强, 呈“两边高、中间低”的分布特征; 人均农产值的影响存在显著的空间分异性, 在黄河中下游为正向影响且逐渐增强, 呈“东高西低”的分布特征, 而在黄河上游部分地区则为负向影响。【结论】黄河流域农业用水效率近年有所提升, 但仍处于较低水平, 且空间差异明显, 受人均水资源量、地表水供水占比、节水灌溉面积占比和人均农产值的影响较大, 体现出复杂的时空动态特征。

关键词: 黄河流域; 农业用水效率; 影响因素; 时空演化

中图分类号: TV93; F323.3

文献标识码: A

文章编号: 2096-6792(2025)06-0023-11

黄河流域是中国的生态安全屏障, 是中国经济发展和生态保护的重要区域, 也是中国重要的农业主产区^[1-2]。近年来, 黄河流域面临着农业用水效率低下、水资源短缺、水土流失严重等问题^[3]。如何优化黄河流域水资源配置、推动流域的高质量发展已经成为社会关注的一项重大议题^[4]。《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》指出, 要加强全流域水资源节约集约利用, 加大农业节水力度, 筑牢“中华水塔”^[5]。党的二十大报告提出, “统筹水资源、水环境、水生态治理, 推动重要江河湖库生态保护治理”^[6]。2024年9月, 习近平总书记在兰州市召开的全面推动黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上表示, 要实施最严格的水资源保护利用制度, 提高水资源节约集约利用水平^[7]。研究黄河流域农业用水效率及其影响因素, 对提升水资源节约水平和促进高质量发展具有重要意义。

农业水资源利用效率研究主要集中于评价方式和测度方法。农业水资源利用效率的评价方式包括单要素评价和全要素评价, 其中全要素评价方法更为全面, 不仅考虑水资源投入, 还兼顾其他关键生产要素的投入, 得到了广泛应用^[8]。农业水资源利用效率的测度方法主要为参数法和非参数法。在参数法中, 随机前沿分析法(Stochastic Frontier Approach, SFA)较为常用, 该方法建立在明确的函数模型之上, 在分离统计误差等方面具有独特的优势。朱文静^[9]利用SFA对新疆维吾尔自治区的农业水资源利用效率进行了测度, 发现该地区的农业用水效率落后于生产技术效率。非参数法中较为常见的是数据包络分析(Data Envelopment Analysis, DEA), 其优点在于无需事先设定具体的函数模型^[10], 适用于处理具有多投入多产出的多目标决策系统。

收稿日期/Received: 2024-07-16

修回日期/Revised: 2024-10-28

基金项目: 河南省杰出外籍科学家工作室资助项目(GZS2024001); 河南省软科学重大项目(242400411004); 国家社会科学基金后期资助项目(21FGLB092)。

第一作者: 刘建华(1963—), 男, 教授, 博导, 博士, 从事区域经济方面的研究。E-mail: ljh@zzu.edu.cn。

通信作者: 施天乐(1999—), 男, 博士研究生, 从事区域经济和双碳管理方面的研究。E-mail: 18914386937@163.com。

用水效率影响因素研究多为实证研究,包括自然、经济和社会等方面的因素。研究方法主要有 Tobit 模型^[11]、杜宾模型^[12]和时空地理加权模型^[13]等。任玉芬等^[14]利用 Tobit 回归模型,研究了土地利用结构、经济水平和供水用水结构等对水资源利用效率的影响。李佳佳和鲜帛彤^[15]利用杜宾模型等空间计量模型,分析了经济发展、产业结构、科技创新、用水状况和环境管制这 5 个因素对我国水资源利用效率的影响。魏婕和杨超^[16]利用空间模型,研究了水资源占有量、水资源利用结构、经济发展水平和科技创新能力等对水资源利用效率的影响及其在空间上的分异情况。

对于黄河流域农业用水效率问题,学者们已经进行了较为丰富的研究。研究内容主要聚焦于农业用水效率测算和节水潜力评估等方面,农业用水效率的影响因素方面关注相对较少。研究尺度主要集中在区域或省级层面上,对黄河流域市域层面的研究相对较少。农业用水效率的测算方法主要利用传统的 DEA 模型和 SBM (Slacks-Based Measure) 模型,对农业生产中潜在的非期望产出,如农业碳排放、水质污染和土壤化学化等问题的关注较少^[17]。为提升黄河流域的农业用水效率,促进黄河流域农业新质生产力提升和农业高质量发展,本文基于前人研究成果,选取黄河流域 78 个地市作为研究对象,将农业碳排放作为非期望产出,利用非期望产出超效率 SBM 模型对黄河流域的农业用水效率进行测算,利用 Tobit 模型对农业用水效率的主要影响因素进行识别,并利用 GTWR (Geographically and Temporally Weighted Regression) 模型对农业用水效率影响因素的时空分异进行分析。

1 研究方法

1.1 非期望产出超效率 SBM 模型

传统 DEA 模型对无效率程度的测量仅考虑投入或产出的等比例缩减或扩增的情形,忽略投入产出的松弛性问题和实际生产过程中的非期望产出,导致决策单元的效率值偏高。为解决这一问题, TONE K^[18]创新性地引入了非期望产出超效率 SBM 模型,该模型实现了对高效决策单元 (Decision Making Unit, DMU) 间细微差异的有效比较,克服了投入产出的松弛性问题。本文测算的农业用水效率是在给定其他投入要素和产出条件下,最优农业用水投入量与实际农业用水投入量之比。黄河流域各地市投入和产出规模报酬并非保持不变,所以选择规模报酬可变的投入导向型非期望产出超效

率 SBM 模型。构建的非期望产出超效率 SBM 模型如下:

$$E_{kt} = \min \frac{1/m \sum_{i=1}^m (\bar{x}/x_{ik})}{1/(s_1 + s_2) \left(\sum_{p=1}^{s_1} \bar{y}^d/y_{pk}^d + \sum_{q=1}^{s_2} \bar{y}^u/y_{qk}^u \right)}$$

$$s. t. \begin{cases} \bar{x} \geq \sum_{j=1, j \neq k}^n x_{ij} \lambda_j; \bar{y}^d \leq \sum_{j=1, j \neq k}^n y_{pj}^d \lambda_j; \bar{y}^u \leq \sum_{j=1, j \neq k}^n y_{qj}^u \lambda_j; \\ \sum_{j=1, j \neq k}^n \lambda_j = 1, \lambda_j \geq 0; \\ \bar{x} \geq x_{ik}; \bar{y}^d \leq y_{pk}^d; \bar{y}^u \leq y_{qk}^u; \\ j = 1, \dots, n (j \neq k); p = 1, \dots, s_1; \\ q = 1, \dots, s_2; i = 1, \dots, m. \end{cases} \quad (1)$$

式中: E_{kt} 为第 k 个 DMU 在第 t 期的农业用水效率值,当 $E_{kt} < 1$ 时, DMU 处于无效率状态,当 $E_{kt} \geq 1$ 时, DMU 有效,且 E_{kt} 值越大,效率越高; s_1 为期望产出的数量; s_2 为非期望产出的数量; m 为投入要素的种类数量; $\bar{x}$ 为被评估的 DMU 在效率前沿上的投影点的投入值; x_{ij} 为第 j 个 DMU 的第 i 个投入; x_{ik} 为第 k 个 DMU 的第 i 个投入; $\bar{y}^d$ 为期望产出的投影值; $\bar{y}^u$ 为非期望产出的投影值; y_{pj}^d 为第 j 个 DMU 的第 p 项期望产出的观测值; y_{pk}^d 为第 k 个 DMU 的第 p 项期望产出的观测值; y_{qk}^d 为第 k 个 DMU 的第 q 项期望产出的观测值; y_{qj}^u 为第 j 个 DMU 的第 q 项投入的观测值; y_{qk}^u 为第 k 个 DMU 的第 q 项投入的观测值; λ_j 为强度变量。

1.2 Tobit 模型

本文的农业用水效率值通过非期望产出超效率 SBM 模型计算得出,是大于 0 的截断数据,而 Tobit 模型能够处理被限制在某个范围内的观测值,适用于处理截断数据。采用 Tobit 模型可以避免最小二乘回归方法 (Ordinary Least Squares, OLS) 产生的估计误差,提高研究的可信度。本文运用随机效应 Tobit 模型对农业用水效率的影响因素进行研究,建立的 Tobit 回归模型如下:

$$\begin{cases} Y' = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \varepsilon; \\ Y = \begin{cases} Y', Y' \geq 0; \\ 0, Y' < 0. \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中: Y' 为原始因变量,即农业用水效率的实际测算值; Y 为截断因变量; X_i 为驱动因子 i 的值; β_0 为常数项; β_i 为驱动因子 i 的回归系数; n 为驱动因子数量; ε 为误差项,独立且服从正态分布。

1.3 时空地理加权回归模型

地理加权回归模型 (Geographically Weighted Regression, GWR) 通过建立空间范围内每个点的回归方程,探索研究对象在某一尺度下的空间变化及相关驱动因素。由于 GWR 考虑到研究对象的具体坐标,其结果更具准确性。基于地理加权模型缺乏对时间因素的考量,HUANG B 等^[19]将时间因素引入地理加权模型,构成了时空地理加权回归模型 (Geographically and Temporally Weighted Regression, GTWR)。为了研究黄河流域各地市农业用水效率及其影响因素的空间异质性,引入 GTWR 模型,对农业用水效率影响因素的空间异质性进行研究。该模型如下:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_{i=k}^n \beta_k(u_i, v_i, t_i) x_{ik} + \varepsilon_i \circ$$

(3)

式中: y_i 为第 i 个样本点的因变量; x_{ik} 为第 k 个自变量在第 i 个样本点处的观测值; n 为样本点的个数; (u_i, v_i, t_i) 为第 i 个样本点的时空坐标位置; $\sum_{i=k}^n \beta_k(u_i, v_i, t_i)$ 为第 k 个自变量在第 i 个样本点处的回归系数; $\beta_0(u_i, v_i, t_i)$ 为第 i 个样本点的时空截距; ε_i 为残差。

1.4 核密度估计法

核密度估计是一种分析空间非均匀分布特性的有力工具,通过构建密度函数图景,直观展现变量在不同时间跨度上的分布形态变化^[20]。基于估计出的核密度,绘制核密度图描绘 GTWR 模型求

算出的影响因素拟合系数的动态分布轨迹及其随时间的演变趋势。

2 指标体系构建与数据来源

2.1 农业用水效率测度指标体系构建

农业生产的核心投入要素涵盖土地、劳动力与资本等维度。其中,资本、劳动力以及自然资源是推动人类生产活动发展的关键因素^[21]。本文借鉴陈杰等^[22]、陆泉志等^[23]、刘渝等^[24]相关研究成果,结合黄河流域农业水资源利用现状,以农用地面积代表土地投入,以农业用水量和单位面积生态用水量代表水资源投入,以农业劳动力人数代表劳动力投入,以农业机械总动力和高新技术企业年末从业人员占比代表技术进步投入,以农用物资施用量代表资本投入,选取农业总产值为期望产出,农业碳排放总量为非期望产出,建立农业用水效率评价指标体系,见表 1。其中农业碳排放没有直接统计数据,本文根据李波等^[21]的研究方法进行计算。农业碳排放量计算公式为:

$$C = \sum_{i=1}^6 C_i = \sum_{i=1}^6 T_i \delta_i \circ$$

(4)

式中: C 为农业碳排放量; $C_i (i=1, 2, \cdots, 6)$ 分别为各碳排放源的农业碳排放量; $T_i (i=1, 2, \cdots, 6)$ 分别为化肥使用量、农药使用量、农用薄膜使用量、柴油使用量、农业灌溉面积、农业翻耕面积; $\delta_i (i=1, 2, \cdots, 6)$ 为各类碳排放源的碳排放系数,取值分别为 0.895 6 kg/kg、4.93 kg/kg、5.18 kg/kg、0.59 kg/kg、20.47 kg/hm²、312.6 kg/m²。

表 1 农业用水效率评价指标体系
Tab.1 Evaluation indicator system for agricultural water use efficiency

一级指标	二级指标	可测度指标
投入	土地资源投入	农用地面积/(10 ³ hm ²)
	水资源投入	农业用水量/(亿 m ³) 单位面积生态用水量/(亿 m ³ /万 m ²)
	劳动力投入	农业劳动力/(万人)
	技术进步投入	农业机械总动力年末拥有量/(万 kW) 高新技术企业年末从业人员占比/%
	资本投入	农用物资施用量/(万 t)
产出	期望产出	农业总产值/(亿元)
	非期望产出	农业碳排放总量/(万 t)

2.2 农业用水效率影响因素指标选取

为深入探究黄河流域农业水资源利用效率的影响因素,借助随机效应 Tobit 模型对影响农业用水效率的各影响因素进行研究。参考前人研究成果,从水资源禀赋、供水结构、用水结构、农作物种植结构、农业节水技术、农业经济水平这 6 个方面

展开探讨,农业用水效率的具体影响因素指标见表 2。

在水资源禀赋方面,以人均水资源量和年降水量表征水资源的富裕程度,水资源过于充沛会降低农民的节水意识,从而导致水资源的浪费和农业用水效率的降低^[25]。

在供水结构、用水结构方面,以地表水占总供水量的比重表征供水结构,以农业用水量占用水总量的比重表征用水结构^[26]。

在农作物种植结构方面,以粮食作物种植面积占总体播种面积的比例作为衡量标准,粮食作物通常具有较高的水分消耗特性,其种植比例的扩大会加剧水资源的使用压力,导致不必要的用水冗余,对农业用水的整体效率产生负面影响^[27]。

在农业节水技术方面,以节水灌溉面积占总播种面积的比重表征农业节水技术,节水技术有助于节省农业用水量,从而提升农业用水效率^[28]。

在农业经济水平方面,人均农产值是关键指标,可以体现一个地区的农业经济状况,农业经济实力的增强能带动农业管理水平的提升和农业用水技术的升级,促进农业用水效率的优化^[29]。

表 2 农业用水效率影响因素指标

Tab.2 Indicators of influencing factors of agricultural water use efficiency

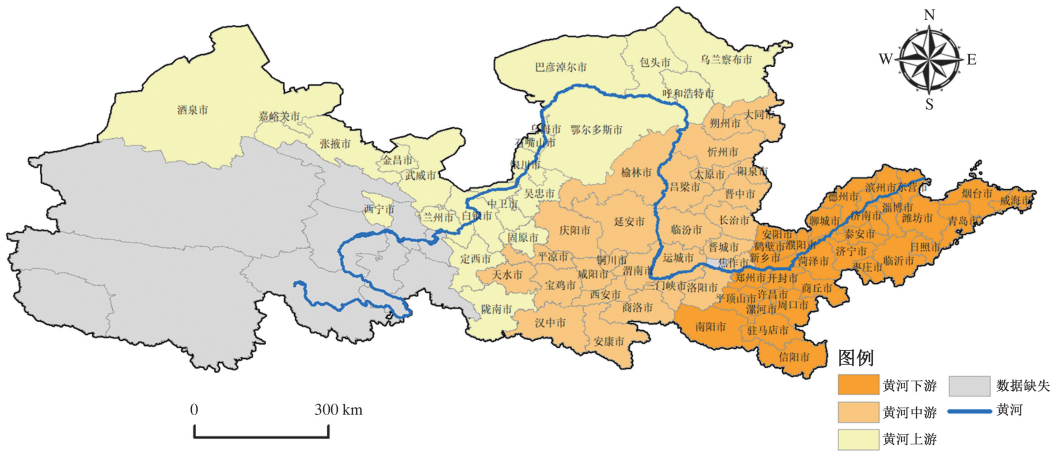
影响因素	变量	变量描述
水资源禀赋	人均水资源量/(亿 m ³ /人)	水资源总量/总人口
	年降水量/mm	年均降水量
供水结构	地表水供水占比/%	地表水供水量/供水总量
用水结构	农业用水占比/%	农业用水量/用水总量
农作物种植结构	粮食作物种植面积占比/%	粮食作物种植面积/总播种面积
农业节水技术	节水灌溉面积占比/%	节水灌溉面积/总播种面积
农业经济水平	人均农产值/(万元/人)	农业总产值/总人口

2.3 研究区概况及数据来源

2.3.1 研究区概况

充分考虑黄河流域政府规划和经济社会发展

的关联性,选取位于黄河流域的 78 个地级市作为研究对象,并将黄河流域划分为上游、中游及下游三大区域,如图 1 所示。



注:该图根据自然资源部 GS(2020)4619 号(审图号)标准地图制作,底图无修改。

图 1 研究范围及区域划分

Fig.1 Scope of study and regional division

2.3.2 数据来源及描述性统计

研究数据来源于各省市的统计年鉴、农村统计

年鉴、国民经济与社会发展公报以及《中国水利统计年鉴》,本文所用数据的描述性统计结果见表 3。

表 3 农业用水效率数据描述性统计

Tab.3 Descriptive statistics of agricultural water use efficiency data

影响因素	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
农业用水效率	780	0.37	0.30	0.08	1.17
人均水资源量/(亿 m ³ /人)	780	223.60	84.24	2.99	390.37
年降水量/mm	780	575.65	256.84	81.70	1 785.50
地表水供水占比/%	780	0.60	0.16	0.38	0.87

续表					
影响因素	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
农业用水占比/%	780	0.55	0.17	0.08	0.68
粮食作物种植面积占比/%	780	0.75	0.34	0.69	1.00
节水灌溉面积占比/%	780	0.24	0.24	0.19	0.79
人均农产值/(万元/人)	780	5.56	1.38	0.30	8.13

3 结果与分析

3.1 黄河流域农业用水效率的时空特征分析

3.1.1 黄河流域农业用水效率的均值分析

黄河流域 2013—2022 年农业用水效率均值如图 2 所示。

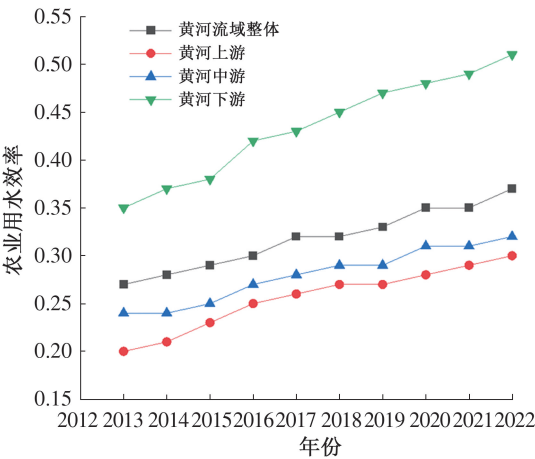
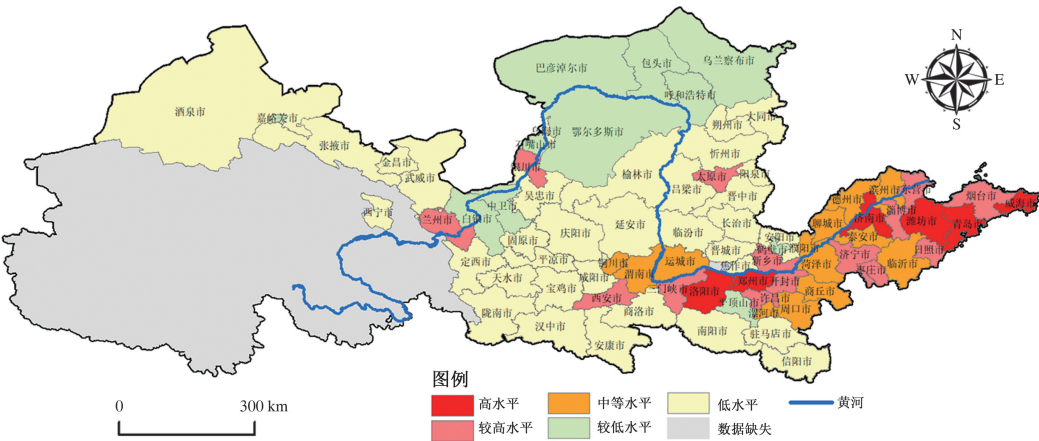


图 2 黄河流域农业用水效率均值
Fig. 2 Mean agricultural water use efficiency in Yellow River Basin

由图 2 可知:在 2013—2022 年,黄河流域的农业用水效率均值呈现持续上升趋势,从 2013 年的 0.267 增长到 2022 年的 0.370,年均增长率为 3.84%;不同区域之间存在明显差异,下游的农业用水效率均值显著高于上游和中游的,年均增长率达到 4.71%。这主要得益于下游地区较强的农业技术和经济条件优势,而黄河中上游的农业用水效率相对较低,这可能与当地节水技术较为落后有关。不过,自 2016 年以来,中上游的农业用水效率也在不断上升。具体来看,上游农业用水效率从 2016 年的 0.251 增长至 2022 年的 0.301,中游农业用水效率则由 0.275 增至 0.316,年增长率为 1.51%。这一增长趋势反映了近年来农业技术的提升、普及以及政府实施的节水政策的成效。

运用 ArcGIS 软件,选用自然断点法将黄河流域农业用水效率的均值划分为高水平、较高水平、中等水平、较低水平、低水平共 5 个等级,如图 3 所示。



注:该图根据自然资源部 GS(2020)4619 号(审图号)标准地图制作,底图无修改。

图 3 黄河流域农业用水效率均值空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of mean agricultural water use efficiency in Yellow River Basin

由图 3 可见,黄河下游的山东省和河南省农业用水效率较高,其中 6 个高水平城市及大部分中等水平城市都在这两个省。下游地区具备先进的农业技术与区位优势,因此农业用水效率较优。相对而言,黄河上游和中游的农业用水效率较低,大部分城市处于较低或低水平。这可能与当地经济和

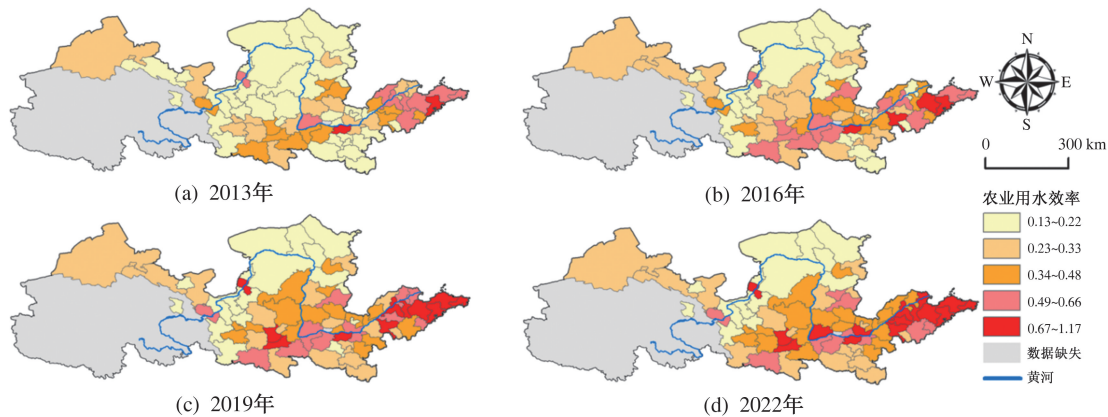
区位条件落后有关,低经济水平导致灌溉设施不足、节水技术滞后,从而影响农业用水效率。省会城市(自治区政府所在地)通常具有较高的农业用水效率,例如济南、郑州、西安的农业用水效率均处于高水平。而在农业用水效率偏低的黄河上游地区,兰州和银川的农业用水效率却相对较高。这主

要是因为省会城市通常享有更高的经济发展水平和政策优势,能够获得更多资金和技术支持来推动农业节水技术的进步。此外,省会城市还可享受财政投入和技术推广等优厚政策,这些因素共同提高了其农业用水效率。

3.1.2 黄河流域农业用水效率的时空演化分析

为分析黄河流域农业用水效率的空间演化情况,等间隔抽取了 2013 年、2016 年、2019 年和 2022 年的数据,并利用 ArcGIS 软件进行空间可视化分析,结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,2013 年黄河流域的农业用水效率普遍较低,仅有郑州和青岛两个高值单元。这是因为这两个城市具有区位优势,

交通便利且高新技术产业集聚,使其更易获取节水技术和设备,从而提高农业用水效率。到 2016 年,黄河流域的农业用水效率有所提升,高于 0.67 的单元增加至 4 个,主要分布在黄河下游地区。此现象与下游经济快速发展及基础设施早期完善有关。2019 年,高值单元主要集中在山东省东部和陕西省东部。到了 2022 年,农业用水效率普遍提高,山东省的高值单元呈现“面状”分布。总体上看,2013—2022 年,黄河流域的农业用水效率呈上升态势,用水效率高值经历了点状散布到片状集聚的过程。



注:该图根据自然资源部 GS(2020)4619 号(审图号)标准地图制作,底图无修改。

图 4 黄河流域农业用水效率时空演化图

Fig. 4 Spatiotemporal evolution of agricultural water use efficiency in Yellow River Basin

3.2 黄河流域农业用水效率影响因素研究

3.2.1 Tobit 模型回归结果

为深入探究黄河流域农业用水效率的影响因素,选取求算出的农业用水效率为因变量,人均水资源量、农业用水占比、年降水量、地表水供水占比、粮食作物种植面积占比、节水灌溉面积占比和

人均农产值为自变量,基于 Stata 17.0 软件,利用随机效应 Tobit 回归模型对黄河流域农业用水效率影响因素进行分析。黄河流域 2013—2022 年农业用水效率影响因素的面板 Tobit 模型回归结果见表 4。表中, t -value 值用于衡量估计系数的可靠性, P -value 值用于判断统计结果的显著性。

表 4 农业用水效率影响因素 Tobit 回归结果

Tab. 4 Tobit regression results of influencing factors of agricultural water use efficiency

影响因素	回归系数	标准误差	t -value 值	P -value 值
人均水资源量/(亿 m^3 /人)	-0.031	0.014	-2.214	0.027 **
年降水量/mm	-0.001	0.002	-0.471	0.617
地表水供水占比/%	-0.124	0.050	-2.340	0.013 **
农业用水占比/%	0.003	0.001	0.757	0.451
粮食作物种植面积占比/%	0.005	0.001	0.545	0.588
节水灌溉面积占比/%	0.359	0.081	4.427	0.000 ***
人均农产值/(万元)	0.048	0.011	4.324	0.001 ***

注: *、**、*** 分别表示在 10%、5%、1% 的水平上显著。

由表 4 可知,人均水资源量、地表水供水占比、节水灌溉面积占比和人均农产值的 P -value 值通过

了显著性检验,即水资源禀赋、供水结构、节水技术和农业经济水平是影响农业用水效率的主要因素。

其中:节水灌溉面积占比和人均农产值的回归系数为正,表示节水灌溉面积占比和人均农产值增加,农业用水效率提高;人均水资源量和地表水供水占比的回归系数为负,表示人均水资源量和地表水供水占比增加,农业用水效率降低。基于此,选择通过显著性检验的人均水资源量、地表水供水占比、节水灌溉面积占比和人均农产值这 4 个变量作为黄河流域农业用水效率的影响因素,并对其时空分异情况进行研究。

3.2.2 农业用水效率影响因素的时间变化趋势

为进一步研究农业用水效率的影响因素,利用 GTWR 模型对人均水资源量、地表水供水占比、节水灌溉面积占比和人均农产值对农业用水效率的影响进行分析,得到每年各地不同影响因素的相关系数值。为了分析农业用水效率的影响因素随时间的变化趋势,对各变量相关系数进行了核密度估计,并基于估计出的核密度值,绘制对应的核密度图,如图 5 所示。

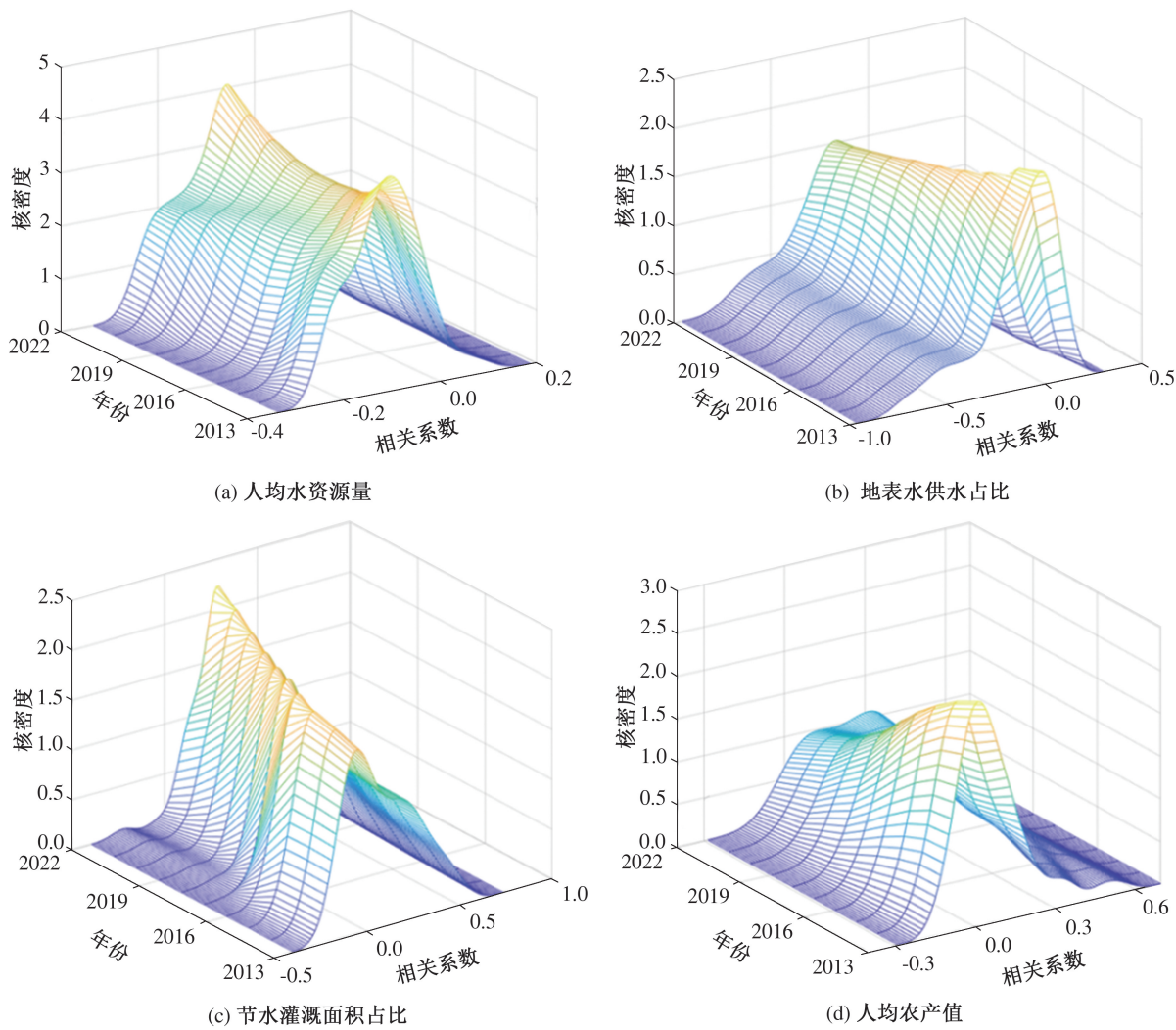


图 5 影响因素拟合系数的分布动态与演变趋势

Fig. 5 Distribution dynamics and evolution of fitting coefficients of influencing factors

由图 5 可知:

1) 人均水资源量的相关系数在研究期间主要为负值,农业用水效率与人均水资源量呈负相关,人均水资源量增加导致农业用水效率降低。过多的水资源可能会导致农业生产中的浪费,例如使用漫灌等粗放的灌溉方式使农业用水的效率降低。相关系数随着时间的推移呈现向右移动的趋势,在 2013 年和 2022 年分别出现了显著的波峰,其数值

分别为-0.10 和-0.06,这表明农业用水效率有所提升。

2) 地表水供水占比的相关系数在研究期间同样为负值,农业用水效率与地表水供水占比呈负相关,地表水供水占比的增加导致农业用水效率降低。水资源配置不均和节水技术落后必然导致用水效率降低,而较依赖地表水供应的地区往往缺乏先进的灌溉和节水技术,限制了农业用水效率的提

升。相关系数随着时间的推移先右移后左移,在 2013 年达到峰值,其值为 -0.15 ,这是由于黄河流域的供水结构得到了优化。

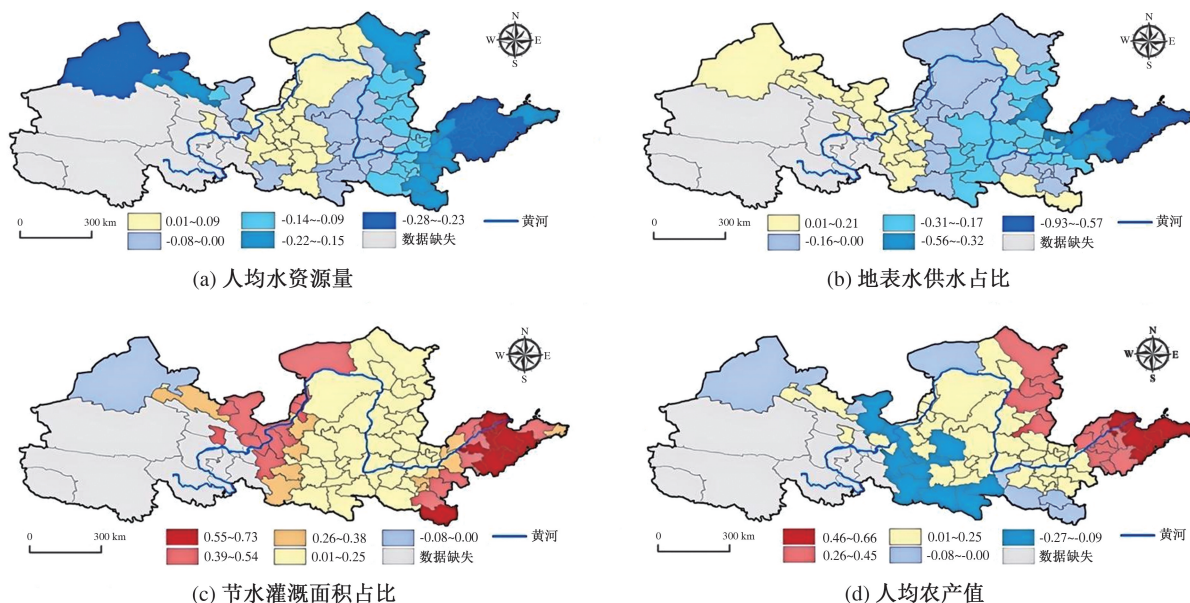
3) 节水灌溉面积占比的相关系数大多为正值,农业用水效率与节水灌溉面积占比呈正相关,节水灌溉面积占比的增大使得农业用水效率提升。由于节水灌溉能提高水资源的利用效率,例如滴灌、喷灌系统能准确控制水量,使农业用水效率得以提升。节水灌溉面积占比的相关系数随着时间的推移向右移动,在 2022 年出现了显著的波峰,峰值为 0.29 。这表明农业用水效率和节水灌溉面积占比的相关系数随时间逐渐增大,这是由于近年来滴灌、喷灌等高效节水系统的应用有所增加,农业生产方式也向着更加科技化、智能化和可持续发展。

4) 人均农产值的相关系数大多为正值,农业用

水效率与人均农产值呈正相关,人均农产值的提高使得农业用水效率增加。农业经济发展和人均农产值增加使农民的收入增加和农业生产结构优化,进而提高农业用水效率。人均农产值的相关系数随着时间的推移向右移动,在 2013 年达到峰值,其值为 0.05 ,表明农业用水效率与人均农产值的相关系数逐渐增大。这可能是由于农业技术不断进步,从而提高了农业用水效率,例如精准灌溉系统和现代化农业管理实践的应用提高了单位水资源利用的农产品产量。

3.2.3 农业用水效率影响因素的空间异质性

为了研究农业用水效率的影响因素在空间上的异质性,计算黄河流域各地市在 2013—2022 年影响因素相关系数均值,并借助 ArcGIS 软件,用自然间断点分级法对相关系数均值进行分级,结果如图 6 所示。



注:该图根据自然资源部 GS(2020)4619 号(审图号)标准地图制作,底图无修改。

图 6 各影响因素拟合系数的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of fitting coefficients for various influencing factors

由图 6 可知:

1) 人均水资源量与农业用水效率的相关系数以负值为主,在数值上存在着明显的空间分异性,其绝对值从东到西逐渐增大,其数值由负值向正值转变。其中,相关系数为负值的城市主要集中在黄河中下游,负值绝对值较大的城市主要集中在山东省与河南省,这些地区人口密集且农业用水需求量较大,水资源分配不足。而且,由于水资源的过度开采,导致人均水资源量与农业用水效率呈负相关。

2) 地表水供水占比的相关系数大多为负值,在

空间上呈现“西高东低”的分布特征,其数值由负值转变为正值。其中,山东省东部的相关系数为负,且绝对值最大,表明地表水供水占比对该地区的农业用水效率影响最大。这可能是由于山东省的农业用水需求较大,较高的用水需求与有限的地表水供给之间的不平衡使得地表水供水占比与农业用水效率呈负相关。相关系数为正值的城市主要集中在西北地区的甘肃省和宁夏回族自治区,是因为这些城市近年来引进了先进的灌溉技术,例如兰州市引入先进的滴灌和微灌技术,有效提高了农田的水资源利用效率。

3) 节水灌溉面积占比的相关系数以正值为主,其数值在空间上呈现“两边高、中间低”的分布特征。山东省中部和东部的相关系数值最大,该地区的经济水平较高,交通便利,对节水灌溉技术的投入和节水设施的引进方便。甘肃省和内蒙古自治区西部大多数城市的相关系数值也相对较大,这些城市的经济较为落后,农业经济占据重要地位,多数城市面临水资源短缺的问题,当地农户采用节水灌溉技术的积极性比较高。因此,农业用水效率得到了提升。

4) 人均农产值与农业用水效率的相关系数正负各半,其数值的空间分异性也非常明显。正值的区域主要集中在黄河下游和黄河中游以及内蒙古自治区的东部,负值的区域主要集中在黄河上游和陕西省。山东省的相关系数为正且高于黄河流域其他地区的。青岛、济南和烟台等城市在近年来根据市场需求进行了蔬菜种植结构调整,增加了高附加值的绿色有机蔬菜种植比例,提高了农产品的附加值和市场竞争力,这种结构优化提高了农业用水效率。黄河上游和陕西省的相关系数为负值,是由于这两个区域部分地区的灌溉设施相对落后,导致水资源浪费和低效利用,同时该地区的农业生产结构也相对落后,其作物种植结构较为传统,这些作物可能对水量需求大且用水效率低。

4 结论

运用非期望产出超效率 SBM 模型评价黄河流域 2013—2022 年的农业用水效率,结合 Tobit 模型、GTWR 模型和核密度估计法分析了黄河流域农业用水效率的影响因素,得到以下结论:

1) 黄河流域的农业用水效率在研究期间呈不断上升趋势,总体上仍处于较低水平,在空间上存在较大差异,呈“东高西低”“南高北低”的分布特征。黄河流域各区域的农业用水效率也一直保持高速增长,2017 年以后增长更为迅速,空间上的差异较为明显,增速呈黄河下游>黄河中游>黄河上游的格局。

2) 农业用水效率的主要影响因素包括人均水资源量、地表水供水占比、节水灌溉面积占比和人均农产值。人均水资源量的影响以负向为主,地表水供水占比的影响大多为负向;节水灌溉面积占比的影响以正向为主,人均农产值的影响则存在正负分异。

3) 黄河流域各地区在自然条件和农业生产环境方面有着明显差异,这使得农业用水效率的影响

因素存在显著的时空分异。其中,人均水资源量的负向影响在东部较强,向西减弱;地表水供水占比的负向影响随时间先增大后减小,空间上呈现“西高东低”的分布特征;节水灌溉面积占比的正向影响逐年增强,呈现“两边高、中间低”的空间布局;人均农产值的正向影响在黄河中下游表现显著且逐年增强,呈“东高西低”的分布特征,而在黄河上游和陕西等地则表现为负向影响。

参 考 文 献

- [1] 刘建华,施天乐,黄亮朝. 黄河流域碳排放、科技创新与产业结构优化:基于 Moran's I 与 PVAR 的实证分析[J]. 生态经济,2024,40(3):30-38. [LIU J H, SHI T L, HUANG L C. Carbon emission, technological innovation and industrial structure optimization in the Yellow River Basin: an empirical analysis based on Moran's I and PVAR[J]. Ecological Economy, 2024, 40(3):30-38.]
- [2] 贾绍凤,梁媛. 新形势下黄河流域水资源配置战略调整研究[J]. 资源科学,2020,42(1):29-36. [JIA S F, LIANG Y. Suggestions for strategic allocation of the Yellow River water resources under the new situation[J]. Resources Science, 2020, 42(1):29-36.]
- [3] 刘建华,王慧扬. 黄河流域科技创新与低碳经济耦合协调及障碍因子研究[J]. 人民黄河,2023,45(1):6-12. [LIU J H, WANG H Y. Coupling coordination and obstacle factors of scientific and technological innovation and low-carbon economy in the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2023, 45(1):6-12.]
- [4] 王蕾,许嘉伟,张晟哲. 农业用水效率时空格局演化及驱动因素研究:基于长江经济带与黄河流域的比较[J]. 长江流域资源与环境,2024,33(11):2391-2409. [WANG L, XU J W, ZHANG S Z. Spatial and temporal evolution and driving factors of agricultural water use efficiency: a comparison between the Yangtze River Economic Belt and the Yellow River Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze River Basin, 2024, 33(11):2391-2409.]
- [5] 庞彩艳,文琦,丁金梅,等. 黄河上游流域生态系统服务变化及其权衡协同关系[J]. 生态学报,2024,44(12):5003-5013. [PANG C Y, WEN Q, DING J M, et al. Ecosystem services and their trade-offs and synergies in the upper reaches of the Yellow River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(12):5003-5013.]
- [6] 余洁,吴泉蓉. 黄河流域旅游经济与生态文明耦合协调发展研究[J]. 干旱区资源与环境,2024,38(5):181-189. [YU J, WU Q R. Spatial-temporal pattern of coordinated development of tourism economy and ecological civilization in the Yellow River Basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024, 38(5):181-189.]
- [7] 景晓栋,田贵良. 黄河流域最严格水资源保护利用制度的

- 内涵解析、核心构成及实施路径[J]. 水资源保护, 2025, 41(2): 58-64, 87. [JING X D, TIAN G L. Connotation analysis, core composition and implementation pathways of the strictest water resources protection and utilization system in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(2): 58-64, 87.]
- [8] 孙淑惠, 陈晓楠, 张春梅. 环境约束下农业用水效率的时空演变与地区差异: 基于沿江区域与沿黄区域比较视角[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(2): 339-353. [SUN S H, CHEN X N, ZHANG C M. Spatio-temporal evolution and regional differences of agricultural water use efficiency under environmental constraints: a comparative perspective of the area along the Yangtze River and the Yellow River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(2): 339-353.]
- [9] 朱文静. 基于 SFA 的新疆农业水资源利用效率研究[J]. 能源与节能, 2021(9): 101-102, 167. [ZHU W J. Research on utilization efficiency of agricultural water resources in Xinjiang based on SFA [J]. Energy and Energy Conservation, 2021(9): 101-102, 167.]
- [10] 董战峰, 喻恩源, 裴浪, 等. 基于 DEA 模型的中国省级地区水资源效率评价[J]. 生态经济, 2012(10): 43-47. [DONG Z F, YU E Y, QIU L, et al. Water efficiency evaluation of the provincial regions in China based on DEA model [J]. Ecological Economy, 2012(10): 43-47.]
- [11] 韩颖, 张珊. 中国省际农业用水效率影响因素分析: 基于静态与动态空间面板模型[J]. 生态经济, 2020, 36(3): 124-131. [HAN Y, ZHANG S. Analysis of influencing factors of agricultural water use efficiency in China: based on static and dynamic spatial panel models [J]. Ecological Economy, 2020, 36(3): 124-131.]
- [12] 王保乾, 范哲艳. 高技术产业集聚对绿色水资源效率的影响研究: 基于空间杜宾模型[J]. 资源与产业, 2022, 24(2): 86-96. [WANG B Q, FAN Z Y. Impact of high-tech industry agglomeration on green water resource efficiency based on Spatial Durbin Model [J]. Resources & Industries, 2022, 24(2): 86-96.]
- [13] 张玲玲, 丁雪丽, 沈莹, 等. 中国农业用水效率空间异质性及其影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(4): 817-828. [ZHANG L L, DING X L, SHEN Y, et al. Spatial heterogeneity and influencing factors of agricultural water use efficiency in China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(4): 817-828.]
- [14] 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. [REN Y F, SU X W, HE Y X, et al. Urban water resource utilization efficiency and its influencing factors in eco-geographic regions of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6459-6471.]
- [15] 李佳佳, 鲜帛彤. 中国城市水资源利用效率的测度及影响因素分析[J]. 生态经济, 2022, 38(7): 184-191, 229. [LI J J, XIAN B T. Analysis on the measurement of water resources utilization efficiency and the influencing factors in Chinese cities [J]. Ecological Economy, 2022, 38(7): 184-191, 229.]
- [16] 魏婕, 杨超. 黄河中上游西北地区水资源的利用效率时空演变与驱动因素[J]. 宁夏社会科学, 2022(6): 143-152. [WEI J, YANG C. Spatial-temporal features and driving factors of water resources utilization efficiency in Northwest China along the middle and upper reaches of the Yellow River [J]. Ningxia Social Sciences, 2022(6): 143-152.]
- [17] 方琳, 吴凤平, 王新华, 等. 基于共同前沿 SBM 模型的农业用水效率测度及改善潜力[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(10): 2293-2304. [FANG L, WU F P, WANG X H, et al. Analysis of agricultural water efficiency measurement and improvement potential based on Meta-Frontier SBM Model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(10): 2293-2304.]
- [18] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis [J]. European Journal of Operational Research, 2001, 130(3): 498-509.
- [19] HUANG B, WU B, BARRY M. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(3): 383-401.
- [20] 杜景爱, 向书坚. 中国区域数字经济核心产业规模测算及时空特征研究[J]. 统计与决策, 2024, 40(22): 5-10. [DU J G, XIANG S J. Scale measurement and spatial-temporal characteristics of core industries in China's regional digital economy [J]. Statistics and Decision, 2024, 40(22): 5-10.]
- [21] 李波, 张俊飏, 李海鹏. 中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(8): 80-86. [LI B, ZHANG J B, LI H P. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(8): 80-86.]
- [22] 陈杰, 许朗. 基于面板三阶段 DEA-Malmquist 模型的中国农业绿色水资源利用效率研究[J]. 地理科学, 2023, 43(4): 709-718. [CHEN J, XU L. Utilization efficiency of Chinese agricultural green water resources based on panel three-stage DEA-Malmquist model [J]. Journal of Geographical Sciences, 2023, 43(4): 709-718.]
- [23] 陆泉志, 陆桂军, 范稚莲, 等. 广西农业水资源利用效率及其影响因素研究: 基于 Global 超效率 DEA 与 Tobit 模型[J]. 节水灌溉, 2018(8): 54-58, 65. [LU Q Z, LU G J, FAN Z L, et al. A study on utilization efficiency of agricultural water resources and its influential factors in Guangxi based on Global Super-Efficiency DEA and Tobit Model [J]. Water-Saving Irrigation, 2018(8): 54-58, 65.]
- [24] 刘渝, 宋阳. 基于超效率 SBM 的中国农业水资源环境效率评价及影响因素分析[J]. 中国农村水利水电, 2019(1): 102-107. [LIU Y, SONG Y. Evaluation and influencing factor analysis of agricultural water resource efficiency in China based on Super-efficiency SBM Model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(1): 102-107.]
- [25] 刘诗祥, 曹健. 中国农业用水绿色效率时空分异及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 346-357. [LIU

- S X, CAO J. Spatiotemporal differentiation and driving factors of green efficiency of agricultural water use in China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 346-357.]
- [26] 董洁芳,李德山,张亮林. 中国农业用水效率区域差异与空间交互机理研究[J]. 水生态学杂志, 2023, 44(3): 26-34. [DONG J F, LI D S, ZHANG L L. Regional disparities and spatial interactions of agricultural water use efficiency in China[J]. Journal of Water Ecology, 2023, 44(3): 26-34.]
- [27] 张玲玲,丁雪丽,沈莹,等. 中国农业用水效率空间异质性及其影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(4): 817-828. [ZHANG L L, DING X L, SHEN Y, et al. Spatial heterogeneity and influencing factors of agricultural water use efficiency in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(4): 817-828.]
- [28] 方苗,贺义雄,余晓洋. 水资源丰沛区农业用水效率空间格局及影响因素:以浙江省为例[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(1): 113-124. [FANG M, HE Y X, YU X Y. Spatial pattern and influencing factors of agricultural water use efficiency in water-rich areas: a case study in Zhejiang Province[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2024, 41(1): 113-124.]
- [29] 李贵芳,马恒运,赵翠萍. 黄河下游(河南段)引黄灌区农业用水效率动态演进及驱动因素[J]. 中国农业资源与区划, 2024, 45(9): 64-74. [LI G F, MA H Y, ZHAO C P. The dynamic evolution and driving factors of agricultural water use efficiency in the Yellow River Irrigation Districts: a case study of Henan Province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2024, 45(9): 64-74.]

Research on Spatiotemporal Patterns and Influencing Factors of Agricultural Water Use Efficiency in Yellow River Basin

LIU Jianhua^{1,2}, GAO Xinke^{1,2}, SHI Tianle^{1,2,3}, HUANG Lianghao³

(1. School of Management, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Yellow River Institute for Ecological Protection & Regional Coordinated Development, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;
3. Institute of Subsurface Energy Systems, Clausthal University of Technology, Clausthal-Zellerfeld 38678, Germany)

Abstract: **[Objective]** This study aims to reveal the spatiotemporal patterns and influencing factors of agricultural water use efficiency in the Yellow River Basin and to promote high-quality agricultural development in this region. **[Methods]** Based on panel data from 2013 to 2022, the undesirable output super-efficiency SBM model was first used to measure and analyze the agricultural water use efficiency of various cities in the Yellow River Basin. Subsequently, the Tobit model was used to analyze the influencing factors of agricultural water use efficiency. Finally, the spatiotemporal geographically weighted regression model was used to analyze the degree of influence and spatiotemporal differences of each factor. **[Results]** (1) The agricultural water use efficiency in the Yellow River Basin greatly improved in recent years, but it remained at a relatively low level, with significant spatial differences and a distribution pattern of "higher in the east and lower in the west" and "higher in the south and lower in the north". (2) Per capita water resources, proportion of surface water supply, proportion of water-saving irrigation area, and per capita agricultural output value were the main influencing factors of agricultural water use efficiency. (3) The influencing factors of agricultural water use efficiency in the Yellow River Basin exhibited significant spatiotemporal heterogeneity. Per capita water resources primarily exhibited a negative influence, but the degree of this influence gradually weakened from east to west, and in some regions, it even showed a positive influence. The negative influence of the proportion of surface water supply first increased and then decreased, showing a spatial distribution characterized by "higher in the west and lower in the east". The positive influence of the proportion of water-saving irrigation area gradually increased, showing a distribution pattern of "higher on both sides and lower in the middle". The influence of per capita agricultural output value demonstrated significant spatial heterogeneity. In the middle and lower reaches of the Yellow River, it had a positive influence that gradually intensified, following a distribution pattern of "higher in the east and lower in the west", while in some areas of the upper reaches of the Yellow River, it exhibited a negative influence. **[Conclusion]** The agricultural water use efficiency in the Yellow River Basin has improved in recent years but remains at a relatively low level, with significant spatial differences. It is greatly influenced by the per capita water resources, the proportion of surface water supply, the proportion of water-saving irrigation area, and the per capita agricultural output value, reflecting complex spatiotemporal dynamic characteristics.

Keywords: Yellow River Basin; agricultural water use efficiency; influencing factors; spatiotemporal evolution

(编辑:乔翠平)