

DOI: 10.16843/j. sswc. 2023014

2007—2020 年黄河流域农业灌溉用水效率 ——基于 3 阶段 DEA 模型和 Malmquist 指数

焦雨萌, 曹建军[†], 陈洁, 王海茹, 李育梅
(西北师范大学地理与环境科学学院, 730070, 兰州)

摘要: 为使黄河流域农业灌溉水资源得到合理利用, 采用 3 阶段 DEA 模型和 Malmquist 指数方法, 分析 2007—2020 年黄河流域各省区在剔除外部环境影响因素下的实际农业灌溉用水效率。结果表明: 1) 黄河流域农业灌溉用水效率低下主要受制于经济水平和水资源禀赋, 尽管政府的重视对其效率具有一定的促进作用, 但效果不显著。2) 在消除外部影响因素后, 2007—2020 年黄河流域灌溉用水的纯技术效率平均值被低估(0.931), 综合技术效率平均值(0.733)和规模效率平均值(0.792)被高估。在省域尺度上, 除河南省农业灌溉用水效率位于有效前沿面外, 其余省区的农业灌溉用水投入均未得到有效利用。3) 通过 Malmquist 指数分析发现, 2007—2020 年黄河流域农业灌溉用水效率整体呈波动上升趋势, 平均增长率为 10.3%。其中, 技术进步变化 > 1, 规模效率变化与 Malmquist 指数变化趋势相似。综上, 黄河流域应在灌溉技术水平较高的基础上高度重视农业灌溉用水中规模效率的潜力, 以进一步提升灌溉用水效率。

关键词: 农业灌溉用水效率; 3 阶段 DEA 模型; Malmquist 指数; 黄河流域

中图分类号: F323.2; S17 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-2673(2024)01-0070-07

引用格式: 焦雨萌, 曹建军, 陈洁, 等. 2007—2020 年黄河流域农业灌溉用水效率: 基于 3 阶段 DEA 模型和 Malmquist 指数[J]. 中国水土保持科学, 2024, 22(1): 70–76. JIAO Yumeng, CAO Jianjun, CHEN Jie, et al. Agricultural irrigation water efficiency in the Yellow River Basin from 2007 to 2020: Based on the three-stage DEA model and Malmquist index[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2024, 22(1): 70–76.

Agricultural irrigation water efficiency in the Yellow River Basin from 2007 to 2020: Based on the three-stage DEA model and Malmquist index

JIAO Yumeng, CAO Jianjun, CHEN Jie, WANG Hairu, LI Yumei

(College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, 730070, Lanzhou, China)

Abstract: [Background] Currently, the Yellow River Basin contributes one-third of China's total grain production, but its agricultural water management is inefficient, with irrigation water accounting for over 90% of total usage. Efficient utilization of agricultural irrigation water is crucial for sustainable agricultural development and environmental conservation. Implementing efficient irrigation system improves crop yield and quality, enhances drought resistance and adaptability, reduces costs, and mitigates soil salinization. Therefore, efficient agricultural irrigation water usage is necessary to promote sustainable agricultural development and ecological protection. [Methods] This article employed the three-stage DEA model and Malmquist index to conduct static and dynamic analysis of agricultural

收稿日期: 2023-02-13 修回日期: 2023-11-06

项目名称: 甘肃省教育科技创新项目“气候和土地利用变化背景下甘肃省水资源—能源—粮食—环境耦合协调度研究”(2022B-090)

第一作者简介: 焦雨萌(1996—), 女, 硕士研究生。主要研究方向: 资源环境经济与生态变化。E-mail: 2020212736@nwnu.edu.cn

[†] 通信作者简介: 曹建军(1974—), 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 区域生态与环境经济学。E-mail: caojj@nwnu.edu.cn

irrigation water use efficiency in the Yellow River Basin from 2007 to 2020. The three-stage DEA model can eliminate the impact of non-operational factors (including external environment and random errors) on agricultural irrigation water use efficiency, thereby more accurately reflecting the internal management level of decision units. The Malmquist index can analyze the trend changes in agricultural irrigation water use efficiency, which helps to better understand the development trend of agricultural irrigation water use efficiency. [Results] The First Stage of the DEA model revealed that, from 2007 to 2020, the annual average comprehensive efficiency, pure technical efficiency, and scale efficiency of agricultural irrigation water use in the Yellow River Basin were 0.786, 0.913, and 0.864, respectively. The regression outcomes from the Second Stage of SFA revealed that the regression coefficients of per capita gross domestic product (GDP) and per capita water resources with respect to the input slack variables associated with effective irrigated area pass the 1% significance test. In contrast, input slack variables associated with agricultural water use and personnel employment did not pass the significance test. Furthermore, fiscal expenditures on agricultural and forestry water affairs did not exhibit significance in relation to any of the input slack variables. In the Third Stage, the results of the DEA model indicate that, after controlling for external factors and random errors, the annual average comprehensive efficiency for this period decreased by 5.2%, while pure technical efficiency increased by 1.8%, and scale efficiency declined by 7.2%. The annual average comprehensive efficiency, pure technical efficiency, and scale efficiency in Henan province all remained above 1, reaching their maximum values. The Malmquist index revealed that, from 2007 to 2020, the overall trend in irrigation water use efficiency in the Yellow River Basin demonstrated a fluctuating upward trajectory with an average growth rate of 10.3%. Specifically, the change in technical progress exceeded 1, and the variation in scale efficiency corresponded to the changes observed in the Malmquist index. [Conclusions] Based on the above conclusions, the agricultural irrigation technology in the Yellow River Basin is at an advanced level. However, the pure technical efficiency of agricultural irrigation water use is underestimated, and the scale efficiency is overestimated, leading to the inappropriate scale of agricultural irrigation. Therefore, while ensuring the adoption of advanced irrigation technologies, it is imperative to prioritize the exploration of the scale efficiency potential in agricultural irrigation water use. This approach will further enhance the efficiency of irrigation water use, promoting the sustainable development of water and soil resources in the region.

Keywords: agricultural irrigation water use efficiency; three-stage DEA model; Malmquist index; The Yellow River Basin

水资源在自然植被生长和人类社会经济发展中发挥着关键作用。目前,全球农业用水占人类用水总量>85%,其中灌溉农业是耗水量最大的农业生产活动,世界上约70%的淡水用于作物灌溉^[1]。因灌溉用水可控制土壤中盐分积累、降低土壤渗透阻力并增加土壤湿度,因此提高其效率对保障农业水土资源可持续发展和粮食安全起着不容忽视的作用^[2]。

由于数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)不需要预估参数就可评价多个投入和多个产出之间相对有效性的方法,而随机前沿分析法(stochastic frontier approach, SFA)能够揭示各因素对产

出的影响机制,因此二者通常被很多学者用于评价农业灌溉用水效率。例如,Tran等^[3]采用DEA模型研究发现,越南罗布斯塔咖啡树种植规模达到最优水平后,全国可节省25%的灌溉用水。刘维哲等^[4]利用SFA模型发现,推广滴灌技术、维修灌渠、提高水价等措施有利于陕西关中地区小麦灌溉用水效率的提高。王学渊^[5]通过对比DEA和SFA模型计算得出的农业灌溉用水效率结果,发现他们具有显著的一致性。然而,上述研究中,DEA模型均假设管理无效率导致无效率项的产生,很少考虑外部环境和随机误差对效率值的影响;同样,SFA模型虽然考虑外部环境因素和随机误差,但由于要为假设的生

产前沿函数设定偏差,从而无法分辨随机性和无效率问题^[6]。

针对以上问题,笔者采用 3 阶段 DEA 模型^[7]对近 15 a 黄河流域的农业灌溉用水效率进行深入研究。具体过程如下:第 1 阶段,将原始投入产出变量带入 DEA 模型进而测算农业灌溉用水效率;第 2 阶段,采用 SFA 模型对外部环境因素和随机误差进行回归,调整第 1 阶段 DEA 模型的结果;第 3 阶段,测算剔除环境因素和随机误差后的农业灌溉用水效率。虽然 3 阶段 DEA 模型增强数据的准确性,但该方法不能对连续年份效率变化进行评价,而 Malmquist 指数是在时间维度上对效率进行纵向对比分析的最常用模型之一^[8]。因此,将其与 3 阶段 DEA 模型进行结合,对 2007—2020 年黄河流域 9 省区的农业灌溉用水效率进行静态和动态分析,进而为黄河流域农业灌溉用水效率做出更准确的判断,并为保障该流域水资源安全和粮食安全提供更可靠的依据。

1 研究区概况

黄河流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南和山东 9 个省区,是我国北方地区的“母亲河”。其地势自西向东形成由高到低的三级阶梯(图 1)。

根据各省区统计年鉴显示,2007—2020 年黄河流域其粮食产量占全国粮食产量的比例由 2007 年 34.63% 上升至 2020 年的 35.63%。农业总用水量年均均为 11 578.4 亿 m³, 占总用水量的 66.26%。根据 2020 年水资源公报可知,当前黄河流域农业用水方式较为粗放,其中灌溉用水占农业用水总量的 90% 以上,而有效灌溉面积比例约为 39.25%, 因此提高灌溉用水效率在农业生产方面起着重要的作用。

2 数据与方法

2.1 3 阶段 DEA 模型

1) 第 1 阶段笔者通过选用 DEA 模型中的 BCC 模型,即考虑规模报酬可变(variable returns to scale, VRS) 情况下,对众多决策单元(decision making units, DMU) 的多项投入和产出指标进行评价运算。并选取以投入为导向的 DEA 方法,即最大限度地利用资源、减少投入从而达到既定的产出水平来节约农业灌溉水资源,从而确定 DEA 有效生产前沿面,具体公式参考卢曦等^[7]研究。

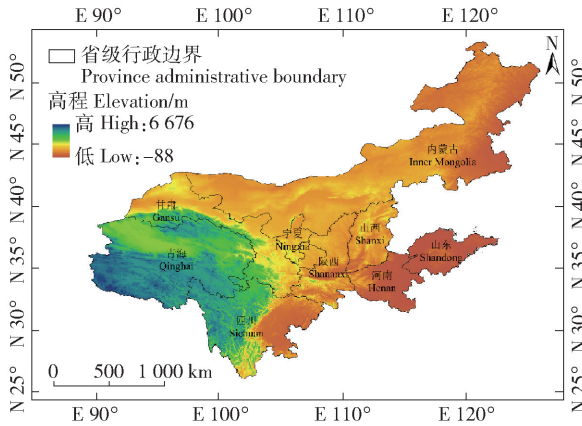


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location map of the study area

2) 第 2 阶段采用 SFA 回归模型。Fried 等^[9]提出引入投入松弛变量的方法,即通过松弛变量表示约束条件的松弛程度或剩余量,以衡量不同 DMU 存在的资源浪费或不足情况,并通过调整松弛变量的值,提高目标函数值,为进一步提高农业灌溉用水效率提供参考。但投入松弛变量易受其他因素的影响,SFA 回归模型^[7]将农业灌溉用水效率视为由随机因素(例如自然灾害、技术误差等)和确定因素(例如技术、资本和劳动力等)共同决定的随机变量。通过消除随机因素,该模型全面的评估仅由管理无效率造成的 DMU 效率缺陷,从而提高农业灌溉水资源利用效率和决策效果^[10]。笔者对每个 DMU 的投入松弛变量进行分析,具体构建 SFA 回归方程式参考王韧等^[10]研究。

3) 第 3 阶段是将第 2 阶段调整后的投入值和产出值,再次带入传统 DEA 模型进行效率评价,此时得到的效率值因为消除外部环境因素和随机误差,可以更为准确地反映农业灌溉用水效率。

2.2 Malmquist 指数

Malmquist 指数动态效率评估方法,利用距离函数的比值来计算投入产出效率,测量 DMU 的动态效率值^[8]。当 Malmquist 指数的值 > 1 时,说明全要素生产率指数为增长趋势;若 = 1,说明全要素生产率指数正好在生产前沿面上;若 < 1,则说明全要素生产率指数呈现下降趋势。

全要素生产率在 t 期到 t + 1 期的变化指数公式如下:

$$T_t^{t+1} = T_{\text{tech}} T_{\text{sech}} T_{\text{techh}} \circ$$

式中: T_t^{t+1} 为 t 期到 t + 1 期的全要素生产率指数; T_{tech} 为纯技术变化; T_{sech} 为规模效率变化; T_{techh} 为技术变化指数。各量纲均为 1。

笔者所有投入产出数据、环境变量数据均来源于 2007—2021 年黄河流域各省区统计年鉴和水资源公报。

2.3 投入产出指标选取

为了研究农业灌溉用水的投入和产出关系,笔者选取 3 个投入指标,包括农业从业人员、有效灌溉面积和农业用水量(表 1)。这些指标分别从灌溉技术和管理水平、土地实际受益于灌溉的面积和土壤水分状况 3 方面来反映农业生产过程中的灌溉用水投入。此外,笔者将农业生产总值作为农业灌溉用水效率的输出指标,以体现灌溉用水效率对农业经济效益的贡献^[7]。

表 1 黄河流域农业灌溉用水效率评价指标体系

Tab.1 Evaluation index system for agricultural irrigation water use efficiency in the Yellow River Basin

变量 Variable	指标 Index
投入变量 Input variables	A
	B
	C
产出变量 Output variables	D
环境变量 Environmental variables	E
	F
	G

注:A:农业用水量,10⁸ m³;B:有效灌溉面积,1 000 hm²;C:农业从业人员,万人;D:农业生产总值,亿元;E:人均国内生产总值,元/人;F:人均水资源量,m³/人;G:国家财政农林事务水支出,亿元。下同。
Notes: A: Agricultural water use, 10⁸ m³. B: Effective irrigated area, 10³ hm². C: Agricultural employed persons, 10,000 persons. D: Gross agricultural product, 10⁸ Yuan. E: Per capita gross domestic product, Yuan per person. F: Per capita water resources, m³/person. G: State finance agriculture and forestry affairs water expenditure, 10⁸ Yuan. The same below.

2.4 环境变量选取

由于当地经济水平、水资源丰富程度以及政府对农业的重视程度难以直接控制和改变,但对农业灌溉用水效率产生影响,因此笔者分别选取人均 GDP、人均水资源量和国家财政农林水事务支出作为环境变量(表 1)^[7]。

3 结果分析

3.1 3 阶段 DEA 实证分析

3.1.1 第 1 阶段传统 DEA 的实证结果 第 1 阶段运用 DEAP 2.1 测算黄河流域 9 个省区 2007—2020 年每年的综合技术效率、纯技术效率和规模效率。由于年限较长,因此呈现的仅为各省区 2007—2020 年的年平均值,如图 2 所示。在不考虑环境因素和随机误差的影响下,各省区综合技术效率值排序为:

河南 > 山东 > 陕西 > 内蒙古 > 宁夏 > 四川 > 山西 > 甘肃 > 青海。其中纯技术效率排序为:山东 = 河南 = 宁夏 = 青海 > 陕西 > 内蒙古 > 山西 > 四川 > 甘肃,规模效率排序:河南 > 山东 > 内蒙 > 陕西 > 甘肃 > 四川 > 宁夏 > 山西 > 青海。

3.1.2 第 2 阶段 SFA 回归结果 建立 SFA 回归模型,通过运行 Frontier 4.1 软件,得到回归结果。总体而言,2007—2020 年每年的 SFA 回归结果变化不大,故只以 2020 年为例。由表 2 可见,广义似然比检验 T 值均大于分布的临界值 2.706,拒绝原假设,说明模型适宜使用 SFA 进行回归分析。其中 γ 趋近于 1,表明在混合误差项中投入松弛变量主要受管理因素影响。

研究发现,人均 GDP 和人均水资源量相似,对农业用水量和有效灌溉面积的投入松弛变量的回归系数均为正,其中对有效灌溉面积的投入松弛变量通过 1% 的显著性检验,对农业从业人员的投入松弛变量为负且未通过显著性检验。这说明,在经济水平较高且水资源丰富的地区,农业用水量和有效灌溉面积的投入松弛变量显著增加,这不利于提高农业灌溉用水效率。然而可以减少农业从业人员的数量,从而有助于提高农业灌溉用水效率。财政农林事务水支出对农业用水量投入松弛变量的回归系数为正,对有效灌溉面积和农业从业人员的投入松弛变量为负,且均未通过显著性检验。政府对水资源的重视会导致农业用水量增加,这不利于提高农业灌溉用水效率,但可以控制有效灌溉面积无节制加大和农业从业人数,从而有助于提高农业灌溉用水效率。

3.1.3 第 3 阶段调整投入后的 DEA 测算结果 消除外部环境因素和随机误差后的结果见图 3。通过对比图 2 和图 3 发现,流域内各省区间农业灌溉用水效率存在显著不同。在第 3 阶段中,宁夏与四川相对比第 1 阶段综合技术效率变化最大,其中宁夏综合技术效率被高估主要由于规模效率被高估 27.2%;而四川综合技术效率被低估主要受纯技术效率被低估 12.6%。河南省在消除外部环境影响因素前后综合技术效率、纯技术效率和规模效率均达到农业灌溉有效前沿面。青海综合技术效率值相对黄河流域 9 省区最低(0.350),其中纯技术效率值和规模效率值为别为 1 和 0.350。

3.2 基于 Malmquist 指数的农业用水效率的分析

笔者采用 Malmquist 指数模型,进一步研究黄河流域农业灌溉用水效率近 14 年的发展趋势,利用 DEAP 2.1 软件将第 3 阶段的投入变量和初始产出变量带入 Malmquist 指数模型进行计算。

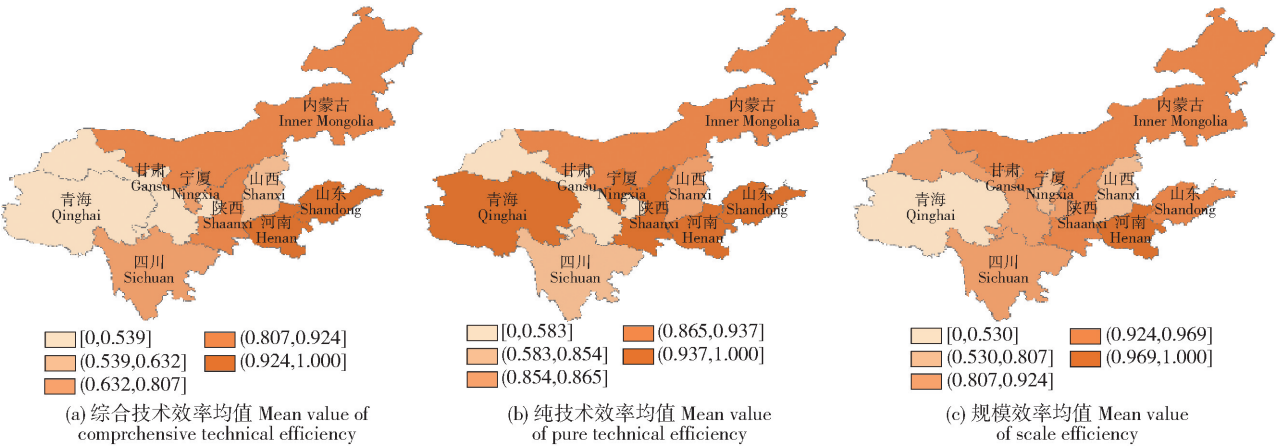


图2 第1阶段:2007—2020年9省区农业灌溉用水综合技术效率均值、纯技术效率均值及规模效率均值

Fig.2 In the First Stage: Mean values of comprehensive technical efficiencies, pure technical efficiencies, and scale efficiencies for agricultural irrigation water use in 9 provinces from 2007 to 2020

表2 第2阶段:2020年SFA回归结果

Tab.2 In the Second Stage: Results of the 2020 SFA regression

自变量 Independent variable	因变量 Dependent variable		
	农业用水量松弛变量 Agricultural water use slack variable	有效灌溉面积松弛变量 Effective irrigated area slack variable	农业从业人员松弛变量 Agricultural employed persons slack variable
<i>H</i>	-25.670 5 ***	-1 107.956 3 ***	25.957 8 ***
<i>E</i>	0.000 4	0.016 5 ***	-0.000 3
<i>F</i>	0.000 4	0.016 1 ***	-0.001 1
<i>G</i>	0.002 7	-0.015 1	-0.029 3
<i>I</i>	1 295.510 4 ***	666 551.540 0 ***	30 376.458 0 ***
γ	0.999 9 ***	0.999 9 ***	0.999 9 ***
<i>J</i>	-37.436 8	-66.871 7	-52.248 5
<i>K</i>	6.812 2	4.131 4	5.332 9

注:*H*:常数项;*I*:标准差; γ :常数项;*J*:Log 值;*K*:单边广义似然比检验;*** 代表1%的显著水平。Notes: *H*: Constant item. *I*: Sigma-squared. γ : Constant item. *J*: Log value. *K*: One-sided generalized likelihood ratio test. *** indicates the significant levels of 1%.

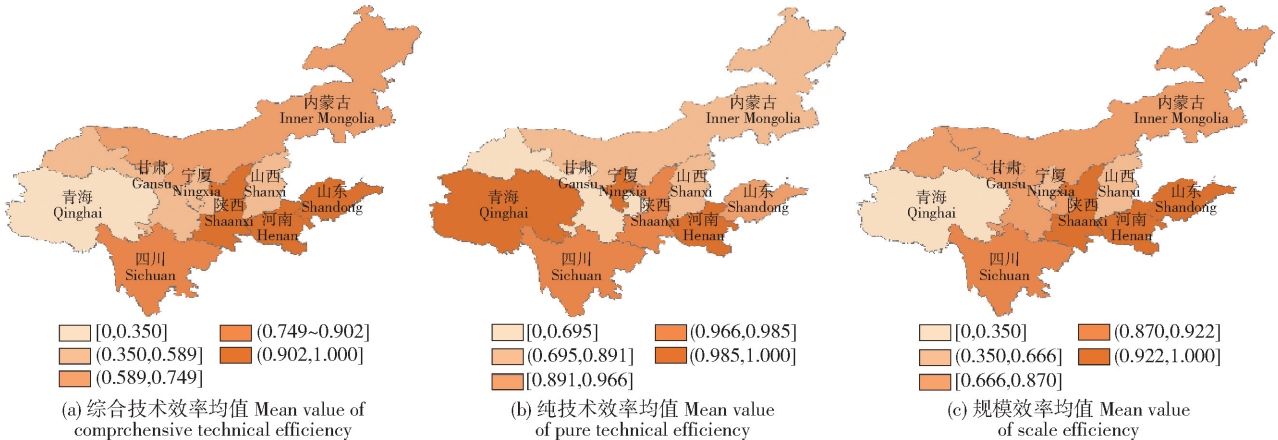


图3 第3阶段:2007—2020年9省区农业灌溉用水综合技术效率均值、纯技术效率均值及规模效率均值

Fig.3 In the Third Stage: Mean values of comprehensive technical efficiencies, pure technical efficiencies, and scale efficiencies for agricultural irrigation water use in 9 provinces from 2007 to 2020

从图 4a 可知,2007—2020 年黄河流域农业灌溉用水效率在 2011—2012 年间该流域全要素生产率达到峰值为 1.250,但 2012 年后农业灌溉用水效率开始大幅下降,在 2013—2014 年间达到最低(0.951),在 2014 年后逐步回升。该整体呈波动上

升趋势,平均值为 1.103,全要素平均增长率为 10.3%。将全要素生产率进行分解发现,技术进步变化均达到有效生产前沿面。图 4b 将技术效率值分解为纯技术效率和规模效率可知,规模效率变化与技术效率变化的走势相似。

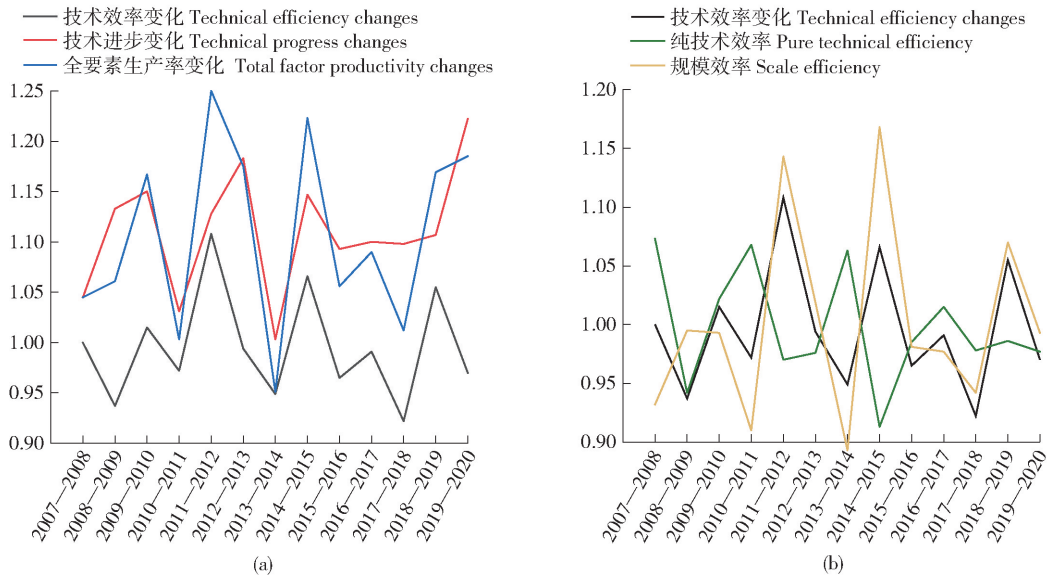


图 4 2007—2020 年黄河流域农业灌溉用水 Malmquist 指数及分解指标

Fig. 4 Malmquist index and decomposition indicators for agricultural irrigation water use in the Yellow River Basin from 2007 to 2020

4 讨论

黄河流域各省区的自然环境特点^[11]和社会经济发展水平^[12]存在显著差异,其中,河南农业灌溉用水效率一直处于有效状态,主要原因为河南地理位置优越,是京广铁路和陇海铁路间重要的交通枢纽,极大促进该省农业灌溉用水技术的提高^[13],其次该省适合农业大规模经营的平原和盆地面积占全省总面积 55.7%。山西和甘肃农业灌溉用水的综合效率相对较低,主要原因是其作为能源大省,产业结构以第二产业为主,工业化和城镇化的快速推进导致农业灌溉面积较少^[7]。青海农业灌溉用水效率值最低,主要因为该省地形复杂,可耕地面积仅占全省面积的 0.76% 且呈碎片化分布^[14],加之水利工程覆盖度低、配套设施薄弱,最终导致农业灌溉用水规模效率较低。

在时间尺度上,黄河流域农业灌溉用水全要素生产率在 2011—2012 年间达到峰值。这是由于 2011 年国务院发布有关加快水利改革发展的“中央一号文件”,推动技术效率和技术变化的大幅增加^[15]。然而 2012—2014 年,随着我国经济高速发展,工业用水和生活用水的需求增加,农业灌溉用水

资源被挤占,导致农业灌溉用水效率大幅下降^[16]。之后,随着社会对粮食安全和淡水资源可持续管理的重视,升级灌溉方式并制定基于农作物生长期需水量的灌溉计划等节水灌溉措施的推行^[17],使农业灌溉用水效率从 2014 年开始逐渐回升。

5 结论与建议

1) 通过 3 阶段 DEA 模型发现,外部环境影响因素和随机误差高估黄河流域农业灌溉用水效率中的综合技术效率均值和规模效率均值,低估纯技术效率均值。

2) 通过 SFA 回归分析发现,地区经济水平和水资源丰富程度对农业灌溉水资源呈显著正相关,说明经济发达地区和水资源充裕地区浪费灌溉水资源现象严重,因此要提高全民对水资源节约和保护意识。政府重视程度对黄河流域农业灌溉水资源影响不明显。

3) 通过对各省区差异分析来看,在消除外部影响因素后,只有河南的农业灌溉用水效率达到生产前沿面。四川、陕西、青海、宁夏、山西要受灌溉规模效率较低影响,而内蒙古、山东和甘肃主要受纯技术效率影响。因此农业灌溉用水管理方式需结合区域

特点,根据实际情况调整农业产业结构以达到农业灌溉用水效率最优化模式。

4)根据农业灌溉用水全要素生产率指数的动态变化发现,黄河流域农业灌溉用水效率主要受规模效率制约。因此黄河流域应进一步扩大农业有效灌溉面积,通过合理分配投入要素来发挥规模效应,这是解决农业灌溉用水效率的关键方法。

6 参考文献

[1] GENNARI P, ROSERO-MONCAYO J, TUBIELLO F N. The FAO contribution to monitoring SDGs for food and agriculture [J]. Nature Plants, 2019, 5(12): 1196.

[2] CHEN Shuai, SONG Chaonan, MAO Xiaomin, et al. Modeling response of spring wheat yield to soil water and salt contents and its application in scheduling brackish water irrigation [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 200: 107216.

[3] TRAN D N L, NGUYEN T D, PHAM T T, et al. Improving irrigation water use efficiency of Robusta Coffee (*Coffea canephora*) production in Lam Dong province, Vietnam [J]. Sustainability, 2021, 13(12): 6603.

[4] 刘维哲, 常明, 王西琴. 基于随机前沿的灌溉用水效率及影响因素研究: 以陕西关中地区小麦为例 [J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(9): 1407.

LIU Weizhe, CHANG Ming, WANG Xiqin. Irrigation water efficiency based on stochastic production frontier and influencing factors: An empirical study of wheat in Guanzhong region, Shaanxi [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(9): 1407.

[5] 王学渊. 基于 DEA 和 SFA 方法的农户灌溉用水效率比较研究: 以西北地区的实地调查数据为例 [J]. 中国农村水利水电, 2010(1): 8.

WANG Xueyuan. A comparative study of irrigation water efficiency of farmers based on DEA and SFA-by using survey data from Northwest China [J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(1): 8.

[6] AIGNER D, LOVELL C A K, SCHMIDT P. Formulation and estimation of stochastic frontier production function models [J]. Journal of Econometrics, 1977, 6(1): 21.

[7] 卢曦, 许长新. 基于三阶段 DEA 与 Malmquist 指数分解的长江经济带水资源利用效率研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(1): 7.

LU Xi, XU Changxin. Study the utilization efficiency of water resouces in Yangtze River Economic Belt based on Three-Stage DEA and Malmquist index decomposition [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(1): 7.

[8] 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.

CHEN Jie, XU Lang. Utilization efficiency of Chinese ag-

ricultural green water resources based on panel three-stage DEA-Malmquist model [J]. Scientia Geographica Sinica, 2023, 43(4): 709.

[9] FRIED H O, LOVELL C A K, SCHMIDT S S, et al. Accounting for environmental effects and statistical noise in data envelopment analysis [J]. Journal of Productivity Analysis, 2002, 17(1): 157.

[10] 王韧, 李志伟. 面板数据随机前沿分析及其应用 [J]. 统计与决策, 2021, 37(19): 25.

WANG Ren, LI Zhiwei. Stochastic frontier analysis of panel data and its application [J]. Statistics and Decision, 2021, 37(19): 25.

[11] 陈万旭, 梁加乐, 卞娇娇, 等. 黄河流域景观破碎化对土壤保持服务影响研究 [J]. 地理科学, 2022, 42(4): 589.

CHEN Wanxu, LIANG Jiale, BIAN Jiaojiao, et al. Impact of landscape fragmentation on soil conservation services in the Yellow River Basin [J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(4): 589.

[12] 李魁明, 王晓燕, 姚罗兰. 黄河流域农业绿色发展水平区域差异及影响因素 [J]. 中国沙漠, 2022, 42(3): 85.

LI Kuiming, WANG Xiaoyan, YAO Luolan. Regional differences and driving factors of agricultural green development level in the Yellow River Basin [J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(3): 85.

[13] 孟德友, 陆玉麒. 高速铁路对河南沿线城市可达性及经济联系的影响 [J]. 地理科学, 2011, 31(5): 537.

MENG Deyou, LU Yuqi. Impact of high-speed railway on accessibility and economic linkage of cities along the railway in Henan province, China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(5): 537.

[14] 李穗英, 孙新庆. 青海省近 10 年耕地面积动态变化及驱动因子分析研究 [J]. 中国农业资源与区划, 2009, 30(5): 39.

LI Suiying, SUN Xinqing. Studies and analysis on dynamic changes of arable land and driving forces in the past 10 years in Qinghai province [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2009, 30(5): 39.

[15] 孙付华, 陈汝佳, 张兆方. 基于三阶段 DEA-Malmquist 区域农业水资源利用效率评价 [J]. 水利经济, 2019, 37(2): 53.

SUN Fuhua, CHEN Rujia, ZHANG Zhao Fang. Evaluation of utilization efficiency of regional agricultural water resources based on three-stage DEA-Malmquist model [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37(2): 53.

[16] WU Bingfang, TIAN Fuyou, ZHANG Miao, et al. Quantifying global agricultural water appropriation with data derived from earth observations [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 358: 131891.

[17] HE Jinyu, MA Bo, TIAN Juncang. Water production function and optimal irrigation schedule for rice (*Oryza sativa* L.) cultivation with drip irrigation under plastic film-mulched [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 17243.