

# 中国农业用水绿色效率时空分异及其驱动因素

刘诗祥, 曹健

(新疆农业大学, 经济管理学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

**摘要:** [目的] 探究中国农业用水绿色效率的时空分异及演变特征, 分析中国农业发展现状, 为进一步推进农业高质量发展提供科学参考。[方法] 利用超效率(evidence-based model, EBM)模型测算 2001—2020 年中国大陆 31 个省区(不含港澳台地区)的农业用水绿色效率。在此基础上运用核密度(kernel density estimation, KDE)估计法进行非参数检验, 并通过 ArcGIS 图示法探究全国不同地区农业用水绿色效率的时空分异及演进特征, 最后利用地理探测器考察不同驱动因素对农业用水绿色效率的综合影响。[结果] ①2001—2020 年全国农业用水绿色效率(各省年平均)经历了先上升后下降的变化。②全国的农业用水绿色效率在空间上呈现出“北低南高”“西低东高”的现象。③全国农业用水绿色效率地区差距呈缩小态势, 存在动态收敛性特征, 各个省份内部的农业用水绿色效率均存在不同程度的两极分化现象, 其中西北地区的核密度曲线最为平缓, 两极分化现象最为严重。④技术水平、资源禀赋、生态环境对中国农业用水绿色效率的影响程度整体高于经济发展水平。[结论] 各省区应结合自身优势, 从农业技术水平、农村社会福利等方面出发, 推动提升农业用水绿色效率。

**关键词:** 农业用水绿色效率; 超效率 EBM-geodetector 模型; 核密度估计; 时空分异; 驱动因素

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2023)06-0346-12

**中图分类号:** F326

**文献参数:** 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. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2023.06.040; Liu Shixiang, Cao Jian. 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.

## Spatiotemporal Differentiation and Driving Factors of Green Efficiency of Agricultural Water Use in China

Liu Shixiang, Cao Jian

(College of Economics and Management, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

**Abstract:** [Objective] The spatiotemporal differentiation and evolution characteristics of the green efficiency of agricultural water use in China and the current status of Chinese agricultural development were analyzed in order to further promote high-quality development of agriculture. [Methods] The super-efficiency evidence-based model (EBM) was used to estimate the green efficiency of agricultural water in 31 provinces and cities during 2001—2020. On this basis, kernel density estimation (KDE) was used to conduct non-parametric tests, and ArcGIS graphics were used to explore the spatiotemporal differentiation and evolution characteristics of the green efficiency of agricultural water use in different regions of China. Finally, the geographical detector method was used to investigate the comprehensive influence of different driving factors on the green efficiency of agricultural water use. [Results] ① From 2001 to 2020, the national green efficiency of agricultural water use (the annual average of each province) initially increased and then decreased. ② The national green efficiency of agricultural water use showed a spatial pattern of “lower in the north and higher in the south”, “lower in the west and higher in the east”. ③ The regional gap of the green

收稿日期: 2023-01-03

修回日期: 2023-04-22

资助项目: 新疆维吾尔自治区“十四五”重大专项“智慧灌区与现代农业产业绿色发展模式研究与示范”(2020A01003-4)

第一作者: 刘诗祥(1999—), 男(汉族), 湖北省随州市人, 硕士研究生, 研究方向为区域经济。Email: 273617679@qq.com。

通信作者: 曹健(1983—), 男(汉族), 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市人, 博士, 副教授, 主要从事区域优化布局、水利经济方面的研究。Email: 59423111@qq.com。

efficiency of water use in China showed a narrowing trend, with dynamic convergence characteristics. The green efficiency of agricultural water use in each province was polarized to varying degrees, among which the nuclear density curve in Northwest China was the most gentle, and the polarization was the most serious. ④ Technical level, resource endowment, and ecological environment had greater influence on the green efficiency of agricultural water use than economic development level. [Conclusion] Each province should combine its own advantages and promote the green efficiency of agricultural water use from the aspects of agricultural technology level and rural social welfare.

**Keywords:** agricultural water use green efficiency; super-efficiency EBM-geodetector model; kernel density estimation; spatiotemporal differentiation; driving factors

据水利部统计,2020 年中国水资源总量达  $3.16 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,全国用水总量  $5.81 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ,是世界上用水量最多的国家。与 2019 年相比,中国的用水效率和结构进一步提升和优化。但基于庞大的人口基数,中国在节水事业所面临的挑战依然非常严峻。为促进水资源高效利用,诸多学者对水资源利用效率进行了研究。研究大体分为两类,一是只考虑经济效益的水资源利用效率<sup>[1-4]</sup>,二是同时考虑经济效益与环境效益的水资源利用效率<sup>[5-8]</sup>。水资源绿色效率相比水资源利用效率,不仅综合考虑经济因素和环境因素,并在此基础上,纳入社会发展指数作为衡量社会效益的产出指标<sup>[9]</sup>。目前,已有诸多学者<sup>[10-15]</sup>对中国省际的水资源绿色效率进行研究。水资源利用效率方面的研究通常考虑农业用水、工业用水,生活用水等多部门的综合用水效率,而农业用水效率方面的研究则单独考察农业部门。

农业用水效率主要包括农业用水经济效率、环境效率、绿色效率。农业用水绿色效率是关于农业用水经济效率和环境效率的延伸与发展,其在环境效率的基础上进一步考虑了社会效益,旨在追求经济、生态、社会效益的协调统一<sup>[16-17]</sup>。目前关于农业用水效率方面的研究主要集中在以下几点:①效率的测度。现有文献中关于农业用水效率的测度方法主要包括 DEA (data envelopment analysis) 模型、Malmquist 指数、基于期望或非期望产出的 SBM (slack based measure) 模型、SFA (stochastic frontier approach) 模型等<sup>[18-24]</sup>,以上方法虽然运用较为广泛,但均存在不足之处。例如,传统 DEA 模型对松弛变量及损失效率前沿投影值原始比例信息缺少考虑<sup>[25]</sup>,在确定前沿的同时,把无效率的部分全部归于技术的无效率。相比于 DEA 模型,随机前沿生产函数同时考虑到技术因素及随机误差的无效率,但 SFA 模型不便处理多产出的情况,且投入指标过多时,会影响结果的可靠性。SBM 模型对非径向松弛变量有所考量,但无法确定投入产出指标实际值与目标值的比例<sup>[26]</sup>。对

此,包含径向和非径向的 EBM 模型<sup>[27]</sup>,有效解决了上述不足。但是 EBM 模型无法有效评价效率值为 1 的 DMU。而超效率 DEA 模型能够对有效决策单元进行计算<sup>[28]</sup>。②效率的空间效应,主要包括利用 VAR (vector autoregression) 框架下的脉冲响应函数、空间滞后模型、Durbin 模型及 Moran's *I* 指数等方法,研究农业用水效率的空间效应<sup>[16,29-33]</sup>。③效率的影响因素。已有学者运用 Tobit 模型、Durbin 模型,研究了不同省域农业灌溉用水效率的影响因素<sup>[32-36]</sup>。目前关于农业用水效率方面的研究中,诸多学者<sup>[22-24]</sup>只考虑经济效益<sup>[16,18-21]</sup>,少数学者同时考虑经济效益和环境效益,极少有学者<sup>[9,17]</sup>进一步考虑社会效益,对农业用水绿色效率进行研究。

农业用水绿色效率在环境效率的基础上进一步考虑社会发展程度差异性。目前,该领域相关研究较少,且暂未有学者对全国范围的农业用水绿色效率进行分析。因此,本文参考前人研究,利用超效率 EBM 模型,综合考虑农业用水的经济、环境和社会效益,对近年来中国大陆 31 个省区(不含港澳台地区)的农业用水绿色效率在时间及空间上的变化特征进行研究,并通过地理探测器对影响效率变化的相关驱动因素进行分析,以求找到提升中国农业用水绿色效率的有效对策,为改善农业节水效果、农村社会福利水平及农业面源污染等问题提供参考。

## 1 方法与指标

### 1.1 研究方法

1.1.1 超效率 EBM 模型 本文参考前人研究<sup>[9,17]</sup>,构建超效率 EBM 模型对中国农业用水绿色效率进行测算,模型表达式为:

$$\gamma^* = \min \frac{\theta - \epsilon_{i \approx 1} \sum_{i \approx 1}^n \frac{\omega_i^- s_i^-}{x_{ik}}}{\varphi + \epsilon^+ \left( \sum_{r \approx 1}^s \frac{\omega_r^+ + s_r^+}{y_{rk}} + \sum_{p \approx 1}^q \frac{\omega_p^{u^-} - s_p^{u^-}}{u_{pk}} \right)} \quad (1)$$

( $i=1,2,3 \cdots m$ ;  $r=1,2, \cdots s$ ;  $p=1,2,3 \cdots q$ )

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1, j \neq k}^n \lambda_j x_{ij} + S_i^- \leq \theta_{xik} \\ \sum_{j=1, j \neq k}^n \lambda_j y_{rj} - S_r^+ \geq \varphi_{yrk} \\ \sum_{j=1, j \neq k}^n \lambda_j u_{pj} + S_p^+ \leq \varphi_{upk} \\ \lambda_j \geq 0, S_i^-, S_r^+, S_p^+ \geq 0 \end{cases}$$

式中： $\gamma^*$  为农业用水绿色效率值； $x_{ik}, y_{rk}, u_{pk}$  分别表示第  $k$  个决策单元的投入、期望产出和非期望产出； $S_i^-, S_r^+, S_p^+$  为松弛变量； $w_i^-, w_r^+, w_p^+$  为指标权重。在超效率 EBM 模型中，效率值  $\geq 1$  时为有效决策单元，当其  $< 1$  时，表示该决策单元无效率。 $\theta$  和  $\varphi$  是  $\gamma^*$  中的径向成分； $\varepsilon$  是一个关键参数，表示非径向部分的重要程度。

1.1.2 核密度估计 通过构建核密度估计模型，对农业用水绿色效率的动态演进趋势进行分析，核密度估计的函数表达式<sup>[37-39]</sup>为：

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_h(x - x_i) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (2)$$

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}x^2\right) \quad (3)$$

式中： $K$  为核函数； $h$  为带宽 (bandwidth)，是一个平滑的参数，其值大于零，反映函数曲线的平滑程度和精准度。

1.1.3 地理探测器 通过构建地理探测器模型，在相关研究的基础上<sup>[9,17]</sup>，对影响农业用水绿色效率的不同类型驱动因素进行分析，模型表达式为：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (4)$$

式中： $L$  为各类驱动因素； $N_h$  为层  $h$  的单元数； $N \sigma^2$  为全区总方差； $N_h \sigma_h^2$  为层内方差； $q$  表示各驱动因素的影响力， $q$  值越大，表明该因素对中国农业用水绿色效率的解释力越强。

## 1.2 指标体系

1.2.1 农村社会发展指数 农村社会发展指数 (RSDI)，是在前人研究的社会发展指数及其纳入农业用水绿色效率指标体系合理性的基础上<sup>[9,13,17]</sup>，结合本研究实际情况构建的指标体系 (表 1)。

表 1 农村社会发展指数 (RSDI) 指标体系

Table 1 Rural social development index (RSDI) indicator system

目标层	指标层	计算方式	指标属性
农村社会发展指数	人口自然增长率/%	年鉴数据	正
	农村人均用电量/(kW/人)	各省市农村用电量/各省市乡村人口数	正
	人均农业机械总动力/(kW/人)	各省市农机总动力/各省市乡村人口数	正
	农村人均可支配收入/元	年鉴数据	正
	城乡收入比/%	城镇居民总收入/农村居民总收入	负
	每千农业人口村卫生室人员/(人/千人)	年鉴数据	正
	农村居民受教育程度/(a/人)	(大专及以上文化程度 $\times 16$ + 高中 $\times 12$ + 初中 $\times 9$ + 小学 $\times 6$ + 文盲 $\times 0$ ) / 乡村总人口数	正
	农村居民最低生活保障人数比例/%	各省市农村居民最低生活保障人数/各省市乡村人口数	负

1.2.2 农业用水绿色效率指标体系 本文参考已有研究对绿色用水效率及农业用水绿色效率内涵的界定与指标体系的构建思路<sup>[9,13,17]</sup>，结合本研究实际情况，构建中国农业用水绿色效率指标体系 (表 2)。

表 2 中国农业用水绿色效率指标体系

Table 2 Green efficiency index system of agricultural water use in China

目标层	指标名称	指标说明
投入指标	农业投资额	各省农林水财政支出额
	农业劳动力	各省第一产业从业人员数
	农业用水量	各省农业用水量
产出指标	农业产值 (期望产出)	各省农林牧渔总产值
	社会发展指数 (期望产出)	指标体系见表 1
	农业灰水足迹 (非期望产出)	计算公式 (5)

其中，农业灰水足迹，是为使水资源达到相关水质标准，对农业生产过程中产生的污水进行稀释所需的水资源量<sup>[40]</sup>。灌溉造成的面源污染是农业部门最主要的水污染源<sup>[41]</sup>，本文参考曾昭<sup>[42]</sup>对农业灰水足迹的计算方法：

$$WF_{\text{agr-grey}} = \frac{L}{C_{\text{max}} - C_{\text{nat}}} = \frac{\alpha \times \text{Appl}}{C_{\text{max}} - C_{\text{nat}}} \quad (5)$$

式中： $WF_{\text{agr-grey}}$  为农业灰水足迹； $L$  为氨氮等污染物排放量； $C_{\text{max}}$  为达到环境水质标准情况下污染物浓度的最高值，本文以《地表水环境质量标准基本项目标准限值》<sup>[40]</sup> 中 III 类水的氨氮标准限值为依据； $C_{\text{nat}}$  为接纳水体的初始浓度； $\alpha$  为氮肥淋失率。Appl 表示施用的氮肥总量。

1.2.3 驱动因素指标体系 农业用水绿色效率受经

济、社会、环境等多方面因素影响,本文参考相关研究<sup>[9,17]</sup>,将驱动因素分为社会经济、科技水平、资源禀

赋、生态环境 4 种类型,并构建相应的指标体系(表 3)。

表 3 中国农业用水绿色效率驱动因素指标体系

Table 3 Indicator system of green efficiency drivers of agricultural water use in China

目标层	指标层	计算方式	指标属性
社会经济 发展	经济发展水平	各省 GDP/总人口数	正
	城镇化水平	各省城镇常住人口/总人口数	正
	人均教育财政支出	各省教育财政支出/总人口数	正
	人均农业财政支出	各省农业财政支出/乡村人口数	正
	人均医疗财政支出	各省医疗财政支出/总人口数	正
	单位农业增加值用水	各省农业用水量/各省农业增加值	正
	农村居民人均可支配收入	年鉴数据	正
	RD 比例	各省 R&D/各省 GDP	正
	人均耕地有效灌溉面积	各省耕地有效灌溉面积/各省乡村人口数	正
科技 水平	每 10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup> 农作物种植用水量	各省农业用水量/各省农作物总种植面积	正
	节水灌溉面积比例	节水灌溉面积/耕地有效灌溉面积	正
	喷、滴灌溉面积比例	各省喷、滴灌溉面积/耕地有效灌溉面积	正
	每 10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup> 农业用地产值	各省农林牧渔总产值/耕地有效灌溉面积	正
资源 禀赋	人均水资源量	各省水资源量/总人口数	负
	人均地表水资源量	各省地表水总量/总人口数	负
	人均地下水资源量	各省地下水总量/总人口数	负
	农业用水比例	各省农业用水量/总用水量	正
	年降水量	年鉴数据	正
	人均耕地面积	各省耕地面积/第一产业从业人员数	正
生态 环境	每 10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup> 农作物化肥施用折纯量	各省施用化肥折纯量/农作物总播种面积	负
	每 10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup> 农作物农药使用量	各省农药使用量/农作物总播种面积	负
	每 10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup> 农作物农用塑料薄膜使用量	各省农用塑料薄膜使用量/农作物总播种面积	负
	水土流失治理面积	年鉴数据	负
	单位产值主要污染物排放量	(废水中化学需氧量排放量+废水中氨氮排放量)/各省农林牧渔业总产值	负
	农作物受灾面积比重	各省农作物受灾面积/农作物总播种面积	负

### 1.3 数据来源

本研究使用的数据来源于 2001—2020 年《中国农村统计年鉴》《中国统计年鉴》《中国环境统计年鉴》及中国各省水资源公报和中国各省统计年鉴。

## 2 结果与分析

### 2.1 农业用水绿色效率测度结果

本文通过超效率 EBM 模型测算了全国 31 个省区(不含港澳台地区)2001—2020 年农业用水绿色效率。表 4—5 分别为 2001—2010 年的测度结果与 2010—2020 年的测度结果。

根据表 4—5 可知,2001—2020 年,全国平均效率值均小于 1。北京、天津、上海、山东、福建、重庆、海南等地区常年处于高效率状态,且超过全国平均水平。山西、内蒙古、湖南、江西、广东、四川、云南、辽宁、广西、甘肃、西藏等省区的效率值常年低于全国平均值。浙江、贵州和陕西省的效率整体呈上升趋势,其中浙

江省的上升态势最明显;贵州省的效率值在 2016 年以前低于全国平均值,自 2016 年起逐渐超过全国平均值;陕西省的效率值在 2012 年以前低于全国平均水平,自 2012 年起逐渐达到全国平均水平。安徽、河北省的效率整体呈下降趋势,且降幅较大。吉林、青海、宁夏、河南地区的效率整体呈不规则波动变化,其中河南省常年高于全国平均水平。新疆、湖北、江苏、黑龙江地区的效率整体呈先上升后下降的态势。可以发现,中国农业用水绿色效率整体呈“北低南高”“西低东高”的现象。这一结论与前人研究相符<sup>[9,17]</sup>。特殊的是,广东作为南部地区经济技术水平相对较高的省份,其效率值却常年低于全国平均值。主要原因为:①广东省经济社会发展水平较高,加快推动了区域产业结构升级,产业结构由以第一产业为主逐渐向以第二、第三产业为主转变。虽然地区的农业资本投入逐年增长,但农业劳动力和水资源的投入却逐年下降,经济社会发展进程中对农业重视程度的降低导致

广东省效率常年低下。②广东省农业资本投入和农业产值逐年增加,但农村社会发展指数却无明显上

升。对农村社会发展的重视程度较低也是导致广东省效率低下的原因之一。

表 4 中国各省 2001—2010 年农业用水绿色效率

Table 4 Green efficiency of agricultural water use in different provinces in China, 2001—2010

分区	省区	农业用水绿色效率									
		2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年
华北	北京	1.114	1.087	1.094	1.096	1.067	1.050	1.108	1.121	1.134	1.081
	天津	1.026	1.011	1.094	1.122	1.162	1.136	1.147	1.112	1.053	1.042
	河北	1.020	0.934	1.013	0.842	0.866	0.759	0.876	0.950	0.855	0.926
	山西	0.441	0.498	0.557	0.602	0.561	0.550	0.611	0.665	0.691	0.661
	内蒙古	0.338	0.370	0.440	0.390	0.420	0.435	0.533	0.616	0.655	0.642
华东	上海	1.086	1.022	1.000	1.000	1.000	1.054	1.028	1.032	1.033	1.053
	江苏	0.370	0.410	0.453	0.573	0.464	1.003	1.004	1.008	1.012	1.009
	浙江	0.528	0.474	0.563	0.727	0.707	0.701	0.728	0.799	0.885	0.907
	山东	1.011	1.003	1.020	1.030	1.029	1.035	1.053	1.045	1.053	1.034
	安徽	0.915	0.776	0.775	0.723	0.749	0.656	0.601	0.705	0.580	0.630
东北	辽宁	1.015	1.017	0.745	0.781	0.638	1.009	1.016	1.019	1.023	1.020
	吉林	0.515	0.540	0.783	0.777	0.634	0.617	0.747	0.842	0.708	0.718
	黑龙江	0.371	0.369	0.414	0.486	0.442	0.391	0.472	0.614	0.704	0.612
华中	湖北	0.849	0.601	0.614	0.667	0.657	0.579	0.564	0.740	0.729	0.806
	湖南	0.726	0.501	0.478	0.457	0.456	0.425	0.518	0.683	0.609	0.697
	河南	1.031	1.045	1.030	1.025	1.038	1.016	1.005	0.934	0.760	1.007
	江西	0.863	0.679	0.610	0.527	0.542	0.494	0.486	0.579	0.602	0.633
华南	广东	0.305	0.337	0.352	0.390	0.375	0.399	0.434	0.683	0.645	0.717
	广西	0.706	0.582	0.481	0.494	0.606	0.549	0.581	0.656	0.589	0.627
	海南	1.026	1.040	1.055	1.044	1.024	1.059	1.025	0.988	1.002	1.006
	福建	1.006	1.004	1.000	1.000	1.004	1.000	1.004	1.025	1.031	1.018
西南	四川	0.509	0.525	0.641	0.509	0.499	0.568	0.672	0.673	0.682	0.681
	重庆	1.038	1.034	1.019	1.034	1.013	1.041	1.038	1.053	1.048	1.027
	贵州	0.560	0.536	0.548	0.411	0.400	0.427	0.427	0.453	0.510	0.482
	云南	0.312	0.365	0.355	0.390	0.361	0.430	0.462	0.482	0.465	0.502
	西藏	1.000	0.636	1.036	1.073	1.015	1.050	0.493	0.513	0.567	0.538
西北	陕西	0.508	0.477	0.532	0.505	0.471	0.471	0.523	0.574	0.605	0.719
	甘肃	0.587	0.555	0.446	0.344	0.383	0.365	0.391	0.473	0.477	0.474
	青海	0.626	1.009	1.007	0.503	0.464	0.492	0.474	0.557	1.005	1.006
	宁夏	1.010	1.004	1.000	0.624	0.553	0.663	0.806	1.005	1.011	0.848
	新疆	0.580	0.566	0.630	0.636	0.602	0.610	0.566	0.610	0.705	1.009
全国	0.742	0.710	0.735	0.703	0.684	0.711	0.722	0.781	0.788	0.811	

## 2.2 农业用水绿色效率演进趋势分析

图 1 为 2001—2020 年中国农业用水绿色效率平均值变化趋势图。由图 1 可知,中国农业用水绿色效率(各省年平均)的演变整体呈 W 形,效率值自 2001—2005 年呈下降趋势,在 2005 年达到最低值(0.684)。2005—2011 年,效率值稳步上升且幅度较大,在 2011 年达到最高值(0.812)。2005 年,农业税条例被依法废止,农业劳动者的社会保障水平得到提升,极大地激发了农业劳动者的生产积极性,为后续农业用水绿色效率的稳步提升创造了前提。2011—2013 年,效率处于较高水平,变化较为平缓。2013—

2016 年,效率值呈下降趋势,主要原因在于青海、宁夏、新疆地区的效率值降幅较大。2013—2016 年,吉林、黑龙江省的农业资本投入逐年增加,但农业产值却不见明显增长,在对资源长期较高强度的利用下,东北黑土区逐渐显现诸如黑土层薄弱化、土壤有机物含量降低、土壤生态退化等一系列制约农业高质量发展的问題,同时东北地区的农业灰水足迹呈上升趋势,对土地资源的过度使用与农业面源污染的增加导致农业用水绿色效率下降。受气候和地理环境影响,西北地区地域辽阔、干旱缺水,农业发展受水资源的制约较强。另外,农业部门对资本、劳动及水资源的

协调利用程度较低,导致 2013—2016 年,青海、宁夏、新疆地区农业总产值虽呈上升趋势,但农业用水绿色效率却逐年下降。农业灰水足迹上升与农业面源污染加重也是导致效率下降的重要原因。

表 5 中国各省 2010—2020 年农业用水绿色效率

Table 5 Green efficiency of agricultural water use in different provinces in China, 2010—2020

分区	省区	农业用水绿色效率									
		2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
华北	北京	1.100	1.128	1.101	1.102	1.121	1.105	1.114	1.153	1.135	1.218
	天津	1.035	1.035	1.018	1.024	1.008	1.049	1.103	1.103	1.129	1.054
	河北	0.911	0.849	0.853	0.651	0.536	0.481	0.515	0.517	0.544	0.572
	山西	0.640	0.650	0.653	0.662	0.610	0.519	0.504	0.492	0.480	0.581
	内蒙古	0.598	0.605	0.554	0.508	0.464	0.453	0.439	0.436	0.460	0.501
华东	上海	1.062	1.007	1.091	1.086	1.102	1.092	1.075	1.057	1.031	1.054
	江苏	1.025	1.028	1.001	1.006	1.017	1.004	0.735	0.632	0.606	0.582
	浙江	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.003	1.004	1.010	1.011	1.014
	山东	1.034	1.031	1.036	1.027	1.030	1.018	1.027	1.031	1.011	1.010
	安徽	0.642	0.601	0.579	0.565	0.548	0.553	0.532	0.554	0.599	0.534
东北	辽宁	1.023	1.025	1.013	1.003	1.006	0.652	0.796	0.837	0.784	0.825
	吉林	0.728	0.728	0.687	0.664	0.553	0.443	0.430	0.491	0.527	0.595
	黑龙江	0.664	0.896	1.015	1.002	0.604	0.531	0.615	0.580	0.591	0.613
华中	湖北	0.899	1.006	1.000	1.000	1.000	0.637	0.762	0.648	0.679	0.683
	湖南	0.713	0.680	0.654	0.574	0.515	0.514	0.529	0.492	0.567	0.608
	河南	0.958	1.001	0.895	1.000	0.824	0.801	0.731	0.715	0.781	1.009
	江西	0.651	0.578	0.547	0.477	0.469	0.467	0.478	0.534	0.557	0.540
华南	广东	0.701	0.630	0.590	0.655	0.510	0.612	0.671	0.586	0.658	0.567
	广西	0.673	0.646	0.815	0.784	0.639	0.547	0.534	0.611	0.606	0.545
	海南	1.028	1.028	1.045	1.051	1.085	1.053	1.045	1.032	1.005	1.055
	福建	1.015	1.013	1.016	1.019	1.003	1.024	1.029	1.052	1.065	1.073
西南	四川	0.665	0.594	0.541	0.473	0.478	0.452	0.438	0.409	0.473	0.493
	重庆	1.028	1.018	1.029	1.025	1.032	1.039	1.029	1.035	1.044	1.048
	贵州	0.502	0.593	0.603	0.657	0.729	0.705	0.743	0.724	0.629	1.000
	云南	0.533	0.523	0.567	0.534	0.504	0.477	0.503	0.487	0.467	0.539
	西藏	0.558	0.561	0.569	0.548	0.578	0.599	0.626	0.647	0.651	0.615
西北	陕西	0.768	0.818	0.810	0.779	0.751	0.720	0.723	0.712	0.707	0.731
	甘肃	0.478	0.410	0.401	0.380	0.336	0.326	0.347	0.335	0.365	0.381
	青海	0.794	0.789	0.798	0.764	0.752	0.652	0.601	0.608	0.551	1.015
	宁夏	1.009	0.786	1.004	0.749	0.767	0.641	0.650	0.730	0.707	1.000
	新疆	0.741	0.780	0.672	0.601	0.519	0.470	0.506	0.492	0.455	0.475
全国	0.812	0.808	0.811	0.786	0.745	0.698	0.704	0.701	0.706	0.759	

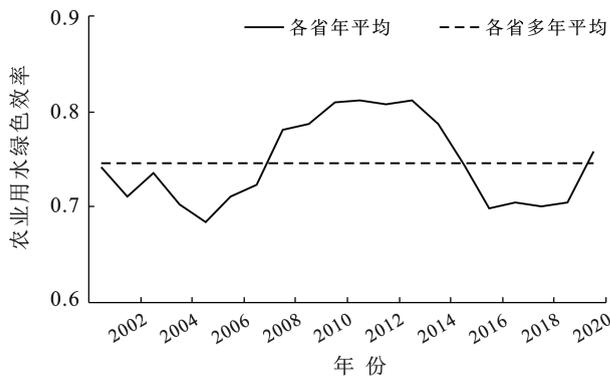


图 1 中国各省 2001—2020 年农业用水绿色效率平均值变化趋势

Fig.1 Average trend of green efficiency of agricultural water use in different provinces in China from 2001 to 2020

图 2 为 2001—2020 年不同地区农业用水绿色效率变化趋势图。由图 2 可知,华东地区的效率值常年位于全国前沿水平;2001—2013 年华北地区的效率值高于华南地区,2013—2020 年,华南地区高于华北地区;西南地区的效率值总体较低且变化平缓;西北地区效率值总体较低但变化幅度较大;研究时间段内,东北地区的效率变化先上升后下降,呈倒“U”形;与其他地区相比,华中地区效率值常年处于中等偏低水平且变化幅度不大。华东地区农业用水绿色效率位于全国前沿水平。华东地区主要地形为丘陵、盆地、平原,适合大面积传统农业发展,其中福建、山东、上海、江苏、浙江地处沿海,气候湿润水资源较为富裕,且经济发展水平与农业技术水平较高,农业劳动

力和资本能够得到更高效的利用。西北地区的效率整体较低,其变动趋势呈 W 形,与全国平均水平较为相似。与内陆沿海地区相比,西北地区气候干旱,水土资源较不协调,农业发展受自然地理条件制约较强,且经济发展水平与技术水平相对落后,不同省份节水技术存在一定差异,滴灌、管灌等节水灌溉方式的利用率较低,诸多因素叠加制约了西北地区农业用水绿色效率的提升。西南地区贯穿多条流域,山地坡地较多,人均耕地面积较少,水资源较为丰富,从西北到东南的温度和降水差异较大,因此不同区域农业发展水平存在差异。但由于农业结构趋于同质化,农业部门对生产资料的集聚能力较弱,规模效益不显著,导致西南地区整体农业用水绿色效率低下。

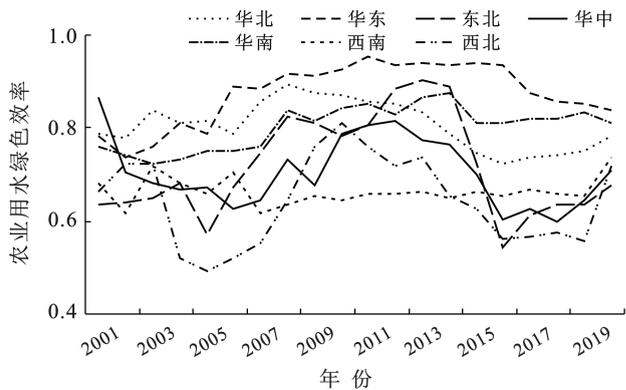


图 2 中国不同地区 2001—2020 年农业用水绿色效率变化趋势

Fig.2 Changes in green efficiency of agricultural water use in different regions in China from 2001 to 2020

### 2.3 区域动态演进特征分析

对全国及不同地区的农业用水绿色效率进行核密度估计(图 3)。分析效率值的绝对差异,能够有效克服参数的不确定性。研究时段内,全国的核密度曲线先向右偏移后向左偏移,农业用水绿色效率呈先上升后下降的态势,2005 年波峰出现明显右偏移,效率达到最低水平,此后效率逐年上升;2011 年效率达到最高水平,曲线开始向左移动;核密度曲线整体分布呈右偏态,波峰数量逐年减小且垂直高度逐年上升,说明核密度呈下降趋势,全国农业用水绿色效率的区域差异逐年缩小,存在动态收敛性特征。上述分析与前文结论保持一致。①西北地区核密度曲线整体变化呈“左—右—左—右”的态势,效率最高值出现在 2010 年,曲线的波峰高度呈不规则下降趋势,右拖尾总体上逐年拉长,曲线形态存在明显双峰现象与不规则的左右偏移现象,分布延展性呈拓宽趋势。这说明西北地区农业用水绿色效率在不同省域之间分化明显,核密度趋于向数值增加的方向移动,效率波动程

度较大,空间差异逐步扩大。②华北地区核密度曲线整体变化呈“右—左”的态势,农业用水绿色效率先上升后下降。研究时段内,曲线形态存在持续且明显的双峰现象,右拖尾略微拉长,水平宽度稍有增加,分布延展性存在拓宽趋势。这说明华北地区农业用水绿色效率存在较为显著的两极分化现象,核密度趋于向数值增加的方向移动,效率的空间差异较大且略微呈现继续扩大的趋势,效率波动程度较小。③华东地区核密度曲线整体变化呈“右—左”的态势。研究时段内,曲线首先出现显著的右偏移,2016 年后出现轻微左偏移,农业用水绿色效率呈先增加后下降的态势。具体而言,2001—2005 年,核密度曲线形态由双峰逐渐向单峰演变,右拖尾稍有缩短,分布延展性呈缩短趋势;2005—2016 年,右侧波峰逐年升高,右拖尾无明显变化;2016—2020 年,右侧波峰逐渐下降,曲线向双峰形态演变,并向左偏移,水平宽度稍有增加,右拖尾略微拉长,分布延展性存在略微拓宽趋势。这表明华东地区核密度先减小后趋向于增加,效率的区域差异与两极分化现象呈先减小后增大的趋势,存在先增强后减弱的动态收敛性特征。④华南地区核密度曲线在研究时间段内的某些时间节点中存在左偏移现象,但整体变化更倾向于向右移动。这说明华南地区农业用水绿色效率整体呈上升趋势。华南地区核密度曲线的双峰现象较为明显,说明农业用水绿色效率存在持续多年且较为显著的两极分化现象,并且尚未得到有效改善。曲线右拖尾无明显变化,分布延展性与波峰数量无明显变化,故华南地区农业用水绿色效率的空间差异持续存在,且总体上不存在动态收敛性特征。⑤华中地区核密度曲线整体变化呈“左—右—左”的态势。研究时段内,曲线首先出现明显的左偏移,后出现轻微的右偏移和明显的双峰现象,最后出现左偏移,双峰向单峰演变。这说明农业用水绿色效率整体变化呈“下降—上升—下降”的趋势,且在效率上升阶段,两极分化现象明显。2019—2020 年,核密度曲线由双峰向单峰演变,核密度数值减小。此时华中地区农业用水绿色效率存在动态收敛性特征,两极分化现象减弱,地区差距呈缩小态势。⑥东北地区核密度曲线整体变化呈现出“左—右—左—右”来回波动的态势,且无明显的双峰现象。这说明农业用水绿色效率整体呈现出“下降—上升—下降—上升”的波动态势,且不存在两极分化现象。曲线右拖尾随时间演进略微拉长,波形水平宽度增加,分布延展性在一定程度上存在拓宽趋势,核密度数值趋于增加。这说明东北地区效率值的空间差距逐年扩大,且不存在动态收敛。⑦西南地区的核密度曲线首先由双峰

向单峰转变并表现出明显的左偏移,说明两极分化现象减弱,农业用水绿色效率整体呈下降态势。曲线右拖尾无明显变化,水平宽度与波峰数量先减小后增

加,波峰垂直高度先上升后下降,说明核密度数值呈现先减小后增大的变化,效率的地区差距呈先缩小后扩大的态势。

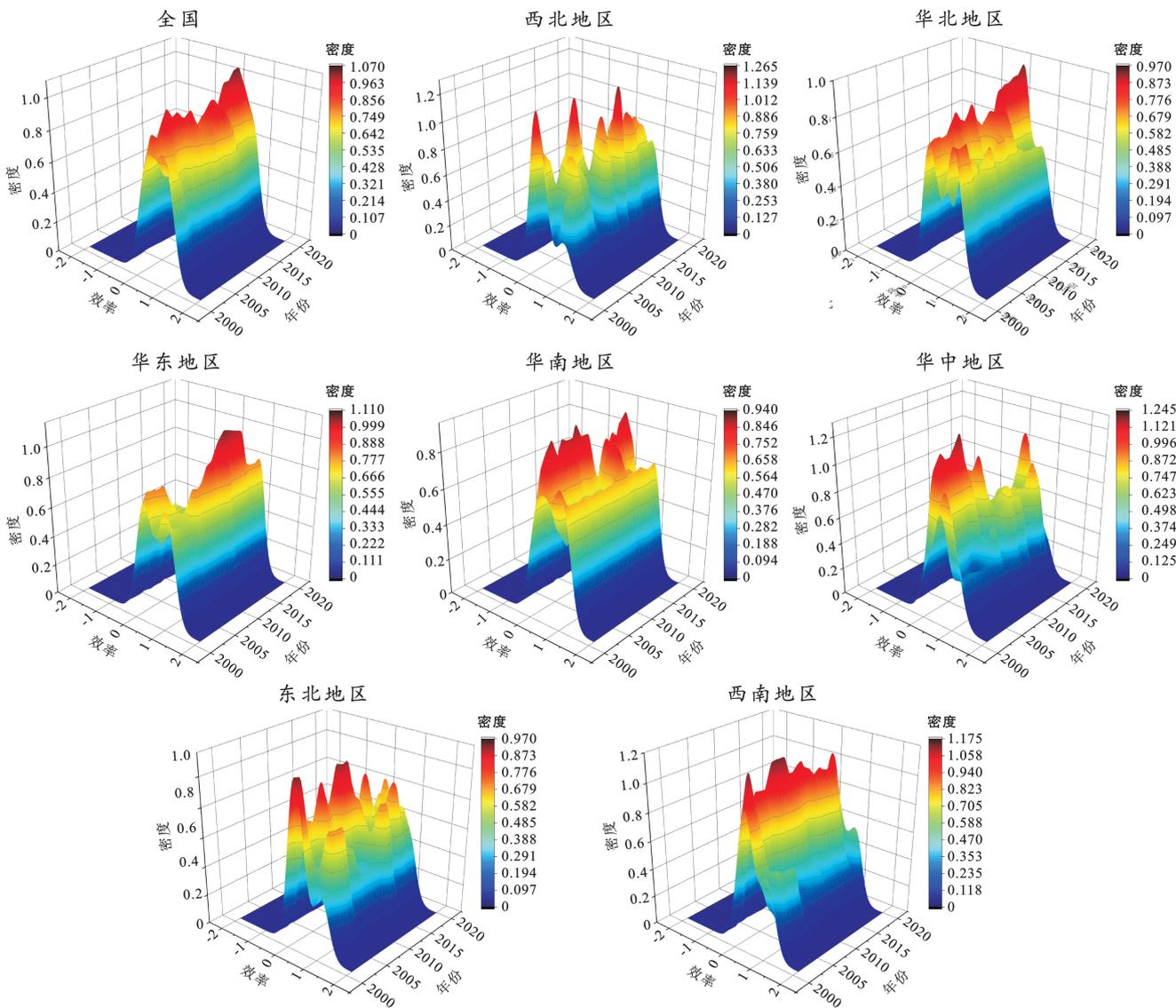


图 3 中国农业用水绿色效率动态演进

Fig.3 Dynamic evolution of green water efficiency in agriculture in China

### 2.4 时空演进分析

运用 ArcGIS 软件对 2001, 2005, 2010, 2015 和 2020 年中国大陆 31 个省的农业用水绿色效率进行分类(图 4)。

根据图 4 可知,效率整体呈现出“东高西低”“南高北低”的分布态势,这与中国水土资源分布和农业技术集约化存在一定的联系。水土资源方面,西北地区土地广袤但干旱缺水,水土资源失调对农业发展产生了较强的制约。西北地区经济技术水平也与东南沿海地区存在一定的差距,无论经济或是技术,都是推进农业发展的重要因素,这也是西北地区农业用水

绿色效率低下的潜在原因之一。另一方面,农业劳动力也是制约农业发展的重要因素,全国农业劳动力的地区分布情况呈现由西北地区向东南地区递增的态势,由此推测东南沿海地区对劳动力的吸引能力强于西北地区。研究时段内,北京、天津、上海、福建、山东、海南、重庆 7 省市常年处于有效率的状态,甘肃、陕西、新疆、黑龙江、内蒙古等省区常年处于无效率状态,这也从侧面印证了上文所述。对比来看,北京市的效率水平常年位于全国前沿,且在 2020 年达到最高值(1.218);天津的效率水平同样常年位于全国前沿,且仅次于北京。这种研究结果与土地资源存在一

定的关系,北京与天津的省域面积相对较小,且经济技术水平相对较高,各类生产资料更为丰富,因此出现了北京与天津的效率水平常年位于全国前沿的情况。在东南沿海地区,各省的效率值均处于较高水平且存在显著的空间溢出效应,这种效应在西北地区并不

明显。从地理上看,西北地区虽地域广袤,但只包含 5 个省份。而中部地区和东南沿海地区的省份较为密集,更有利于区域内资本、技术、劳动等农业生产资料的跨省流动,从而增强了农业用水绿色效率的空间溢出效应。

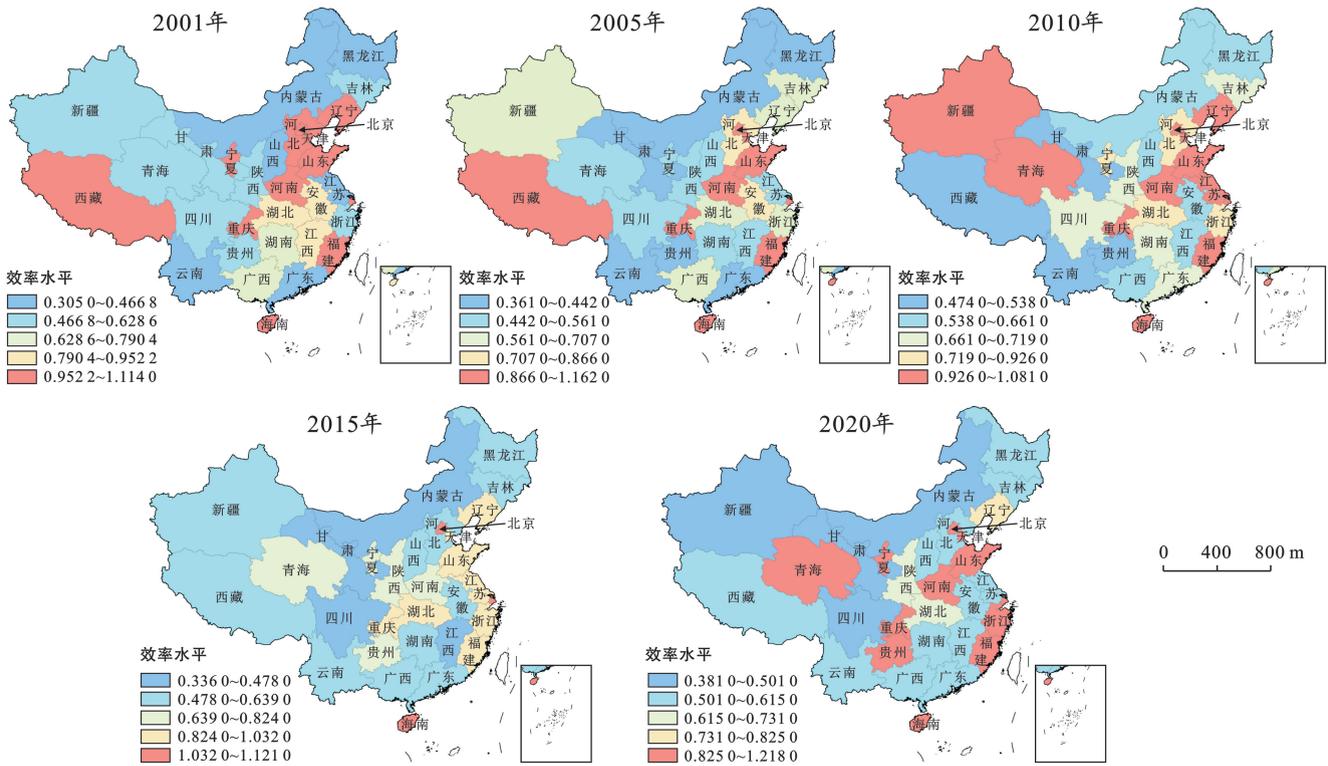


图 4 中国农业用水绿色效率时空分异

Fig.4 Spatial-temporal differentiation of green water efficiency in agriculture in China

## 2.5 驱动因素分析

本文考虑经济、技术、资源、环境多方面因素,通过地理探测器,对 2001,2005,2010,2015 和 2020 年的中国农业用水绿色效率进行驱动因子探测,探测结果详见表 6。根据表 6 可以看出:①从多年平均影响程度看,经济社会发展对效率的综合影响最低,技术水平对效率的综合影响最高。各类因子中,人均地下水资源量的多年平均  $q$  值最高(0.588);农业用水比例的多年平均  $q$  值最低(0.248)。水资源与农业发展密切相关,中国的水土资源多年以来处于较不平衡的状态,西北地区土地广袤却多干旱缺水;东南沿海地区水资源虽较为丰富,但随着城镇化水平的不断提升,耕地面积逐渐减少,导致水土资源失调现象加重。随着技术进步与经济社会发展,资源禀赋对农业用水的影响变得更为显著,包括地下水资源量在内的资源禀赋对农业用水绿色效率的影响相对较强。②经济社会发展方面,各类因子对农业用水绿色效率的影响整体呈下降态势,只有人均教育财政支出对农业用水

绿色效率的影响呈上升趋势。现代农业的发展与科技水平密切相关,农业从业人员需要具有更高的专业素养,教育水平的提升能够有效提升农业从业人员的专业性和创新能力,推动培养科技创新型人才,促进农业部门的高效生产和对水资源的合理利用,因此人均教育财政支出对农业用水绿色效率的影响呈上升趋势。③技术水平方面,各类因子对农业用水绿色效率的影响程度较高但整体却呈下降趋势。随着农业技术水平的提升,喷、滴灌等节水灌溉方式被更为广泛地采用。喷、滴灌等灌溉方式是农业生产过程中的重要节水手段,能够从减少水资源投入的角度达到节水目的,显著影响农业用水绿色效率。④资源禀赋方面,各类因子对农业用水绿色效率的影响程度较高,资源禀赋对农业用水绿色效率的影响程度较高且呈逐年增长趋势,现代智慧农业的兴起与农业科技水平的发展加快推进农业的生产集约化,各类生产资料的利用率普遍提升,从侧面加强了资源禀赋对农业用水绿色效率影响的提升,从另一个角度可以认为农业发

展及农业用水绿色效率的提升受资源禀赋的制约正在逐年加强。⑤生态环境方面, 水土流失治理面积的多年平均  $q$  值最高(0.532)。水土流失治理面积对农业用水绿色效率的影响程度较高, 这与中国的水土资

源分布现状有关, 进一步提升水土流失治理面积能够有效改善耕地面积不足的问题, 进而优化水土资源的协调性。长期来看, 生态环境对于推进农业用水绿色效率的提升更为重要。

表 6 中国农业用水绿色效率驱动因素探测结果

Table 6 Detection results of driving factors of green water efficiency in agriculture in China

指标层	因子	驱动因子影响力( $q$ )					趋势	
		2001 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年		平均
经济社会发展	经济发展水平( $x_1$ )	0.195	0.357	0.624	0.355	0.280	0.362	下降
	城镇化水平( $x_2$ )	0.421	0.642	0.510	0.366	0.381	0.464	下降
	人均教育财政支出( $x_3$ )	0.265	0.464	0.366	0.102	0.362	0.312	增长
	人均农业财政支出( $x_4$ )	0.275	0.499	0.420	0.208	0.242	0.328	下降
	人均医疗财政支出( $x_5$ )	0.687	0.673	0.429	0.323	0.561	0.535	下降
	单位农业增加值用水( $x_6$ )	0.599	0.658	0.237	0.281	0.485	0.452	下降
	农村居民人均可支配收入( $x_7$ )	0.541	0.161	0.224	0.287	0.160	0.275	下降
技术水平	RD 比例( $x_8$ )	0.440	0.564	0.592	0.322	0.418	0.467	下降
	人均耕地有效灌溉面积( $x_9$ )	0.585	0.637	0.590	0.298	0.497	0.522	下降
	每千 $\text{hm}^2$ 农作物种植用水量( $x_{10}$ )	0.333	0.510	0.228	0.757	0.590	0.484	增长
	节水灌溉面积比例( $x_{11}$ )	0.458	0.489	0.360	0.362	0.456	0.425	下降
	喷、滴灌溉面积比例( $x_{12}$ )	0.607	0.305	0.706	0.581	0.542	0.548	下降
资源禀赋	每 1 000 $\text{hm}^2$ 农业用地产值( $x_{13}$ )	0.430	0.114	0.176	0.416	0.502	0.328	增长
	人均水资源量( $x_{14}$ )	0.640	0.656	0.503	0.339	0.478	0.523	下降
	人均地表水资源量( $x_{15}$ )	0.599	0.627	0.520	0.332	0.616	0.539	增长
	人均地下水资源量( $x_{16}$ )	0.517	0.688	0.693	0.480	0.559	0.588	增长
	农业用水比例( $x_{17}$ )	0.107	0.492	0.107	0.298	0.236	0.248	增长
	年降水量( $x_{18}$ )	0.301	0.147	0.465	0.370	0.441	0.345	增长
生态环境	人均耕地面积( $x_{19}$ )	0.595	0.636	0.286	0.296	0.353	0.433	下降
	每 1 000 $\text{hm}^2$ 农作物化肥施用折纯量( $x_{20}$ )	0.181	0.200	0.608	0.574	0.755	0.464	增长
	每 1 000 $\text{hm}^2$ 农作物农药使用量( $x_{21}$ )	0.667	0.229	0.282	0.251	0.466	0.379	增长
	每 1 000 $\text{hm}^2$ 农作物农用塑料薄膜使用量( $x_{22}$ )	0.558	0.508	0.555	0.515	0.514	0.530	下降
	水土流失治理面积( $x_{23}$ )	0.486	0.681	0.627	0.434	0.434	0.532	下降
	单位产值主要污染物排放量( $x_{24}$ )	0.509	0.578	0.404	0.289	0.381	0.432	下降
	农作物受灾面积比重( $x_{25}$ )	0.502	0.488	0.675	0.362	0.480	0.501	下降

### 3 结论与对策

#### 3.1 结论

(1) 从变化趋势来看, 2001—2020 年全国农业用水绿色效率(各省年平均)整体呈 W 形, 农业用水绿色效率经历了先上升后下降的变化。全国农业用水绿色效率值自 2001—2005 年呈现下降趋势; 2005—2011 年, 效率值逐年稳步上升且幅度较大, 在 2011 年效率值(0.812)达到最高水平; 2011—2013 年, 效率处于较高水平, 变化较为平缓; 2013—2016 年, 效率值呈下降趋势; 2016—2019 年, 效率值变化平缓; 2019—2020 年, 效率显著提升。

(2) 从空间分布来看, 全国农业用水绿色效率的

空间分布呈“北低南高”“西低东高”的态势。西北地区效率值在不同省域间分化明显, 空间差异逐渐扩大, 效率波动程度较大; 华北地区效率值呈先上升后下降的态势, 存在较为显著的两极分化现象, 效率的空间差异较大且略微呈现继续扩大的趋势, 效率波动程度较小; 华东地区效率值呈先上升后下降的态势, 效率的区域差异呈现先减小后增大的趋势, 存在先减弱后增强的两极分化现象和动态收敛性特征; 华南地区效率整体呈上升态势且存在持续多年较为显著的两极分化现象; 华中地区效率整体呈“下降—上升—下降”的态势, 在效率上升阶段, 出现明显的两极分化现象; 东北地区效率值的空间差距逐年扩大, 不存在动态收敛性特征; 西南地区效率整体呈下降态势, 效

率的地区差异呈先缩小后扩大的态势。

(3) 从效率的时空演进来看,华东地区的效率值常年位于前沿水平;西南地区效率值较为低下;东北地区的效率处于中等水平,效率值呈先上升后下降态势;西北地区的效率整体较低。2001—2013 年华北地区的效率值高于华南地区,2013—2020 年,华南地区效率值反超华北地区。华中地区效率值常年处于中等偏低水平且变化幅度不大。全国农业用水绿色效率地区差距呈缩小态势,存在动态收敛性特征,各个省份内部的农业用水绿色效率均存在不同程度的两极分化现象,其中西北地区的核密度曲线最为平缓,两极分化现象最为严重。

(4) 从驱动因素来看,经济社会发展对中国农业用水绿色效率的影响程度相对较小,而技术水平、资源禀赋、生态环境对中国农业用水绿色效率的影响程度较大。其中,人均地下水资源量的多年平均  $q$  值在各类因子中最高(0.588)。资源禀赋对农业用水绿色效率的影响程度较高且呈逐年增长趋势。此外,水土流失治理面积对农业用水绿色效率的影响程度同样较高,总体来看生态环境对于推进农业用水绿色效率的提升更为重要。

### 3.2 对策

(1) 各省应该从自身资源禀赋及农业生产条件出发,根据自身特点制定符合地方特色的农业发展模式和方向、农业节水政策及生态环境保护政策,并进一步提升农业部门的节水减排力度及农业从业人员对相关政策的积极性,以此推进农业部门的高效生产,提升农业用水绿色效率。

(2) 充分利用地理区域优势,进一步推进资本、劳动、技术等生产要素的合理跨区域流动,加快农业的规模化和集约化发展,充分发挥农业发展的规模经济。形成规模化节水、规模化生产的高效农业生产模式。

(3) 进一步加快农业生产技术水平的提升,加强科技创新在农业生产过程中的作用,推进农业生产科研基地建设和农业节水技术的研发,以政策补贴鼓励农业从业人员使用农业生产与农业节水的高新技术。

(4) 优化农村社会福利,加大农村教育、医疗等领域的投资,在提升农业从业人员的综合素养和专业水平的同时进一步优化农村社会福利水平,并以此提升农业从业人员对农业发展政策及农业节水政策的响应程度。

### [ 参 考 文 献 ]

[1] 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.

- [2] 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.
- [3] 陈艳萍,刘畅.中国水资源利用效率及其影响因素研究:基于 Shephard 水资源距离函数[J].世界地理研究,2022,31(3):591-601.
- [4] 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.
- [5] 张凯,陆海曙,陆玉梅.三重属性约束的承载力视角下中国省际水资源利用效率测度[J].资源科学,2021,43(9):1778-1793.
- [6] 吴凤平,邱泽硕,邵志颖,等.中国水权交易政策对提高水资源利用效率的地区差异性评估[J].经济与管理评论,2022,38(1):23-32.
- [7] 赵志博,赵领娣,王亚薇,等.不同情景模式下雄安新区的水资源利用效率和节水潜力分析[J].自然资源学报,2019,34(12):2629-2642.
- [8] 高新才,殷颂葵.西北地区城市水资源利用效率时空演变及俱乐部趋同分析[J].经济经纬,2021,38(2):5-13.
- [9] 李青松,张凤太,苏维词,等.长江经济带农业用水绿色效率测度及影响因素分析:基于超效率 EBM-Geodetector 模型[J].中国农业资源与区划,2022,43(5):40-52.
- [10] 孙才志,马奇飞,赵良仕.基于 GWR 模型的中国水资源绿色效率驱动机理[J].地理学报,2020,75(5):1022-1035.
- [11] 孙才志,马奇飞.中国省际水资源绿色效率空间关联网络研究[J].地理研究,2020,39(1):53-63.
- [12] 孙才志,马奇飞,赵良仕.中国东、中、西三大地区水资源绿色效率时空演变特征与收敛性分析[J].地理科学进展,2018,37(7):901-911.
- [13] 孙才志,马奇飞,赵良仕.基于 SBM-Malmquist 生产率指数模型的中国水资源绿色效率变动研究[J].资源科学,2018,40(5):993-1005.
- [14] 孙才志,邵晓雯,赵良仕.“四化”对中国水资源绿色效率的驱动效应研究[J].中国地质大学学报(社会科学版),2018,18(1):57-67.
- [15] 孙才志,姜坤,赵良仕.中国水资源绿色效率测度及空间格局研究[J].自然资源学报,2017,32(12):1999-2011.
- [16] 杨骞,武荣伟,王弘儒.中国农业用水效率的分布格局与空间交互影响:1998—2013 年[J].数量经济技术经济研究,2017,34(2):72-88.
- [17] 薛选登,陈慧杰.黄河流域农业用水绿色效率时空分异及驱动因素[J].中国农业资源与区划,2023,44(5):70-81.
- [18] 佟金萍,马剑锋,王圣,等.长江流域农业用水效率研究:基于超效率 DEA 和 Tobit 模型[J].长江流域资源与环境

- 境,2015,24(4):603-608.
- [19] 佟金萍,马剑锋,王慧敏,等.中国农业全要素用水效率及其影响因素分析[J].经济问题,2014(6):101-106.
- [20] 尚杰,魏东方,吉雪强.技术进步、农业用水效率与回弹效应:基于我国粮食主产区面板数据的实证研究[J].生态经济,2020,36(11):94-100.
- [21] 赵姜,孟鹤,龚晶.京津冀地区农业全要素用水效率及影响因素分析[J].中国农业大学学报,2017,22(3):76-84.
- [22] 屈晓娟,方兰.西部地区农业用水效率实证分析[J].统计与决策,2017(11):97-100.
- [23] 杨扬,蒋书彬.基于DEA和Malmquist指数的我国农业灌溉用水效率评价[J].生态经济,2016,32(5):147-151.
- [24] 王昕,陆迁.中国农业水资源利用效率区域差异及趋同性检验实证分析[J].软科学,2014,28(11):133-137.
- [25] 邓洪中,张玲.长江经济带水资源绿色效率时空演变特征及其影响因素[J].资源科学,2022,44(2):247-260.
- [26] 龙亮军.综合福利视角下中国生态文明建设绩效评价及国际比较[J].自然资源学报,2019,34(6):1259-1272.
- [27] 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.
- [28] Andersen P, Petersen N C. A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis [J]. *Management Science*, 1993,39(10):1261-1264.
- [29] 陈洪斌.我国省际农业用水效率测评与空间溢出效应研究[J].干旱区资源与环境,2017,31(2):85-90.
- [30] 马剑锋,王慧敏,佟金萍.技术进步与效率追赶对农业用水效率的空间效应研究[J].中国人口·资源与环境,2018,28(7):36-45.
- [31] 马剑锋,佟金萍,王慧敏,等.长江经济带农业用水全局技术效率的空间效应研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(12):2757-2765.
- [32] 徐依婷,穆月英,张哲晰.中国粮食生产用水效率的影响因素及空间溢出效应[J].华中农业大学学报(社会科学版),2022(4):76-89.
- [33] 张雄化,钟若愚.灌溉水资源效率、空间溢出与影响因素[J].华南农业大学学报(社会科学版),2015,14(4):20-28.
- [34] 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):1407-1414.
- [35] 梁静溪,张安康,李彩凤.基于权重约束DEA和Tobit模型农业灌溉用水效率实证研究:以黑龙江省为例[J].节水灌溉,2018(4):62-68.
- [36] Jingxue Wei, Yalin Lei, Huajun Yao, et al. Estimation and influencing factors of agricultural water efficiency in the Yellow River basin, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,308(10):127249.
- [37] Downs J, Horner M, Lamb D, et al. Testing time-geographic density estimation for home range analysis using an agent-based model of animal movement [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2018,32(7):1-18.
- [38] Nakaya T, Yano K. Visualising crime clusters in a space-time cube: an exploratory data-analysis approach using space-time kernel density estimation and scan statistics [J]. *Transactions in Gis*, 2010,14(3):223-239.
- [39] 尹章才,康自强.时间地理支持下的核密度估计研究进展[J].地理科学进展,2022,41(1):64-72.
- [40] GB3838-2002,中华人民共和国国家标准:地表水环境质量标准[S].北京:中华人民共和国生态环境部,2002.
- [41] 杨林章,吴永红.农业面源污染防控与水环境保护[J].中国科学院院刊,2018,33(2):168-176.
- [42] 曾昭,刘俊国.北京市灰水足迹评价[J].自然资源学报,2013,28(7):1169-1178.