

中国农业绿色水资源利用效率及时空分异研究

马骏^{1,2}, 于倩文¹

(1. 河海大学商学院, 江苏 南京 211100; 2. 沿海开发与保护协同创新中心, 江苏 南京 210098)

摘要:为全面客观了解我国农业绿色水资源利用效率的时空分异特征,推动水生态文明建设和农业绿色用水,运用包含非期望产出的SE-SBM模型,以农业面源污染作为非期望产出,测算了2002—2020年中国31个省级行政区的农业绿色水资源利用效率,并采用ML指数、泰尔指数、“效率-生产率”方阵分析了水资源效率的时空分异特征。结果表明:26个省级行政区的农业绿色水资源利用效率呈平稳波动状态,且大小顺序为东部地区、东北地区、中部地区、西部地区,跨期动态发展各具优劣势;ML指数先减小后增大,73.68%的研究期内EC与TC呈“此消彼长”状态;水资源效率总体差距的62.11%来自主要由西部地区构成的区域内差距,但区域间差距也不可忽视。

关键词:农业水资源利用效率;农业面源污染;SE-SBM模型;ML指数;泰尔指数

中图分类号:TV213.9

文献标志码:A

文章编号:1003-9511(2023)03-0016-07

党的二十大报告提出“中国式现代化是人与自然和谐共生的现代化”。水资源是生态环境资源和战略经济资源的重要组成部分,是现阶段践行城市高质量发展的战略支撑和重要保障^[1]。我国水资源稀缺且空间分布不均衡,农业用水长期在用水部门中位列第一,2021年农业用水占用水总量的61.5%,是最主要的耗水产业^[2-3],提高环境约束下的农业水资源利用效率是解决水资源供需矛盾和水环境污染的关键^[4]。水资源利用效率是指单位水资源投入带来的经济效益^[5],测算农业绿色水资源利用效率要同时考虑单位农业用水带来的经济效益和环境影响,其内涵主要包括经济、生态环境、社会3个层面。随着点源污染逐渐得到治理与改善,农业面源污染日益成为环境污染的主要组成部分^[6],将其纳入农业绿色水资源利用效率的核算体系,更加契合我国现阶段的农业绿色发展理念。在推动建设中国式现代化的新定位下,发展与完善中国农业绿色水资源利用效率的相关研究,对持续改善水生态环境,推动绿色高质量发展具有重要的理论意义与实践价值。

1 文献综述

近年来,水资源利用效率的相关研究逐渐受到广泛关注,现有研究主要集中于效率测算与影响因

素研究。在水资源利用效率的测算研究方面,倾向以省级行政区,或某行业尤以工业居多为研究对象,利用不同的DEA模型测算。对各省的研究中,邓洪中等^[2,4,7-10]引入非期望产出,通过EBM模型、SBM模型、ML指数等测算各省市的水资源效率。对行业的研究中,刘悦等^[11-12]基于SBM模型与GML生产率指数、EBM模型测算并分析长江经济带的工业水资源效率。农业的相关研究较少,如陆泉志等^[13]基于SBM模型和ESDA方法,测度分析污染排放约束下广西种植业的用水效率。现有研究发现,西部地区整体水资源效率较低,水资源效率的区域间、产业间差距较显著。在水资源效率的影响因素研究方面,部分学者根据水资源效率的区域差距、产业差距等分析其影响因素。丁绪辉等^[2,4,8,9]认为经济发展水平、水资源利用结构、环境规制等会对水资源效率产生方向、力度与显著性不同的影响;汪克亮等^[12]认为工业水资源效率的主要影响因素包括工业化程度、工业用水强度、科技进步等;刘渝等^[3,14-15]认为农业水资源效率的主要影响因素包括节水技术、作物种植结构、农田水利建设水平等。

综上所述,现有研究成果为分析中国农业绿色水资源利用效率及其时空分异特征提供了良好的基础,但也存在以下不足:①农业绿色水资源利用

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(B210207028);沿海开发与保护协同创新中心标志性成果培育专项(2092-B2106120)

作者简介:马骏(1970—),男,副教授,博士,主要从事资源与环境经济研究。E-mail:majun1807@163.com

效率的相关研究很少,仅有极少部分聚焦农业生态用水^[15]或农业绿色用水效率^[3,14,16-17],且更侧重于水资源效率的影响因素研究,系统分析水资源效率时空分异特征的较少。②目前农业环境污染主要是面源污染,但现有研究涉及的非期望产出多以废水排放量、化肥流失量、污染物排放量等为主,而且农业废水排放量的相关数据只能追溯到2011年^[3]。鉴于此,本文以农业面源污染作为非期望产出构建农业绿色水资源利用效率测度体系,基于SE-SBM模型、ML指数、泰尔指数、效率-生产率方阵等测算并分析2002—2020年我国31个省级行政区农业绿色水资源利用效率的时空差异与发展状况,以期为提高绿色水资源利用效率,推动中国区域经济高质量发展提供参考。

2 研究方法

2.1 SE-SBM 模型

Tone^[18-19]提出的结合超效率DEA模型和SBM模型的超效率SBM模型,即SE-SBM模型,既可对多个决策单元(DMU)的效率值进行比较和排序,也解决了要素松弛问题,并考虑到了非期望产出问题^[3,7,13]。假设生产系统有 n 个决策单元,每个决策单元有 m 种投入 x , r_1 种期望产出 y_g 和 r_2 种非期望产出 y_b ,其中 $x, y_g, y_b > 0$ 。设定模型如下:

$$\min \rho = \frac{1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{ik}}}{1 - \frac{1}{r_1 + r_2} \left(\sum_{r=1}^{r_1} \frac{s_{gr}^+}{y_{grk}} + \sum_{t=1}^{r_2} \frac{s_{bt}^-}{y_{btk}} \right)} \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} \sum_{j=1, j \neq k}^n x_{ij} \lambda_j - s_i^- \leq x_{ik} \\ \sum_{j=1, j \neq k}^n y_{grj} \lambda_j + s_{gr}^+ \geq y_{grk} \\ \sum_{j=1, j \neq k}^n y_{btj} \lambda_j - s_{bt}^- \leq y_{btk} \\ 1 - \frac{1}{r_1 + r_2} \left(\sum_{r=1}^{r_1} \frac{s_{gr}^+}{y_{grk}} + \sum_{t=1}^{r_2} \frac{s_{bt}^-}{y_{btk}} \right) > 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中 $s^-, s_b, s_g, \lambda_j > 0 \quad i=1, 2, \dots, m$
 $r=1, 2, \dots, r_1 \quad t=1, 2, \dots, r_2$
 $j=1, 2, \dots, n (j \neq k)$

式中: ρ 为效率, $\rho < 1$ 表示该DMU处于无效率状态, $\rho \geq 1$ 表示该DMU相对有效; λ_j 为权重; $s_i^-, s_{gr}^+, s_{bt}^-$ 分别为第 i 项投入、第 r 项期望产出、第 t 项非期望产出的松弛值; x_{ij}, y_{grj}, y_{btj} 分别为第 j 个DMU的第 i 项投入、第 r 项期望产出、第 t 项非期望产出; k 为被评价单元; x_{ik}, y_{grk}, y_{btk} 分别为第 k 个被评价单元的第 i 项投入、第 r 项期望产出、第 t 项非期望产出。

基于MATLAB软件与SE-SBM模型测算2002—2020年我国31个省级行政区的农业绿色水资源利用效率,并引入变异系数显示各省级行政区研究期间水资源效率的波动与变异程度,计算公式为

$$V = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\% \quad (3)$$

式中: V 为变异系数; σ 为标准差; μ 为平均值。 V 越小则变异程度越小。

2.2 ML 指数与分解

ML指数的理论基础是环境技术可行性集和方向距离函数理论^[20],主要思想是在两个时期内通过方向距离函数分别计算DMU与生产前沿面的距离,再利用方向距离函数和混合方向距离函数计算两个时期效率的变化情况,即ML指数^[7,21]。假设 t 期的投入、期望产出、非期望产出、松弛变量为 $(x_t, y_t, b_t; g_t)$,则 t 至 $t+1$ 期的ML指数 $I_{t,t+1}$ 计算公式如下:

$$I_{t,t+1} = \frac{1 + D_t(x_t, y_t, b_t; g_t)}{1 + D_t(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}; g_{t+1})} \cdot \left[\frac{1 + D_{t+1}(x_t, y_t, b_t; g_t)}{1 + D_t(x_t, y_t, b_t; g_t)} \cdot \frac{1 + D_{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}; g_{t+1})}{1 + D_t(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}; g_{t+1})} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中: $D_t(x_t, y_t, b_t; g_t), D_{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}; g_{t+1})$ 分别为 t 期、 $t+1$ 期的距离函数; $D_t(x_{t+1}, y_{t+1}, b_{t+1}; g_{t+1})$ 为基于 t 期技术水平的 $t+1$ 期混合距离函数; $D_{t+1}(x_t, y_t, b_t; g_t)$ 为基于 $t+1$ 期技术水平的 t 期混合距离函数。 $I_{t,t+1} < 1$ 和 $I_{t,t+1} > 1$ 分别表示DMU的跨期动态效率下降和提高。

2.3 泰尔指数与结构分解

泰尔指数最大的优点是可将区域的总体差距分解为区域内差距和区域间差距,并衡量两者在总体差距中的重要性贡献率,解析区域差距形成的主要来源^[12,22]。本文借鉴汪克亮等^[12]对泰尔指数及其结构分解的方法,分析中国四大经济区域农业绿色水资源利用效率的区域差异。泰尔指数计算公式及其分解方法如下:

$$T = T_w + T_b \quad (5)$$

$$T_w = \sum_{p=1}^4 \left(\frac{n_p}{n} \frac{\bar{e}_p}{\bar{e}} \right) T_p \quad (6)$$

$$T_b = \sum_{p=1}^4 \frac{n_p}{n} \left(\frac{\bar{e}_p}{\bar{e}} \right) \ln \left(\frac{\bar{e}_p}{\bar{e}} \right) \quad (7)$$

其中 $T_p = \frac{1}{n_p} \sum_{p=1}^{n_p} \frac{e_{pi}}{\bar{e}_p} \ln \frac{e_{pi}}{\bar{e}_p}$

式中: T, T_w, T_b 分别为全国农业绿色水资源利用效率总体差距、区域内差距、区域间差距的泰尔指数;

T_p 为某区域各省级行政区效率总体地区差距的泰尔指数; n_p 为某区域省级行政区个数($p=1,2,3,4$); n 为全国省级行政区个数; e_{pi} 为各省级行政区农业绿色水资源利用效率值; \bar{e}_p, \bar{e} 分别为某区域、全国的效率均值。泰尔指数介于0~1之间,指数越大则区域差距越大,反之则差距越小^[12]。

2.4 效率-生产率方阵

采用刘悦等^[11]构建的“效率-生产率”方阵综合分析体系可探讨各地区在农业绿色水资源利用上的优势与不足,有利于各地区找准定位、扩大优势、弥补不足。本文以农业绿色水资源利用的静态效率指征“效率”,以跨期动态效率(ML指数)指征“生产率”。将31个省级行政区ML指数高于均值的划分为H组,低于均值的划分为L组,构建效率-生产率方阵。H-H方阵表示农业绿色水资源利用效率和跨期动态效率都较高,农业绿色用水发展状况良好,前景可观;H-L方阵表示效率较高,但跨期动态发展水平较差,即该地区目前发展较好,但可持续性较差;L-H方阵表示效率较低,但跨期动态发展水平可观,表明该地区针对目前发展较为落后的境况采取了相应措施且初见成效或预期能取得较好效果;L-L方阵表示静态效率和动态效率都较低,表明该地区处于落后地位。

3 结果与分析

3.1 指标选取与数据来源

本文主要基于柯布-道格拉斯生产函数和农业经济学理论^[23],构建农业绿色水资源利用效率的投入产出体系,投入指标包括水资源投入、劳动力投入和农业机械投入,产出指标包括期望产出和非期望产出。各指标及其含义如下:①水资源投入:选取农业生产用水量为衡量指标,表征自然资源要素;②劳动力投入:选取第一产业从业人数为衡量指标。③农业机械投入:选取农业机械总动力为衡量指标,表征对农业生产的资本要素投入^[3,13-15];④期望产出:选取农林牧渔业实际总产值为衡量指标(2002年为不变价)^[3];⑤非期望产出:选取农业面源污染水平为衡量指标。借鉴赵连阁等^[6,24]研究成果,紧扣农业面源污染的概念与形成机理,运用均等权重法,将农业面源污染的主要来源——化肥、农药、农用地膜和畜禽粪便的权重均设为0.25,以各来源污染物排放量与权重的乘积之和测度农业面源污染水平,避免泛化指标的干扰,确保各污染源总体维度的一致性。化肥、农药、农用地膜只有流失或残留在土壤中并流入水体的那部分会形成污染,故以单位播种面积的化肥施用量、农药使用量和农膜使用量与

对应流失率或残留率(化肥流失率65%,农药流失率90%,农膜残留率70%)的乘积测算流失量或残留量。畜禽粪便排放量通过生猪、牛、羊、家禽的饲养量、饲养周期(生猪199d,牛、羊各365d,家禽210d)与粪便排泄系数(生猪5.3kg/d,牛30kg/d,羊2.6kg/d,家禽0.12kg/d)的乘积之和测算^[6]。

样本选取中国31个省级行政区2002—2020年的数据,原始数据来源于历年《中国统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国农村统计年鉴》,以及省级行政区统计年鉴、国家统计局、中国经济信息网统计数据数据库等,极个别缺失数据由均值法补齐。

3.2 测度结果分析

根据式(1)(2)(3)计算得出2002—2020年我国31个省级行政区农业绿色水资源利用效率的测度结果与变异系数,见表1。结果表明:①只有天津、黑龙江、上海、江西、宁夏5个地区的变异系数大于15%,其余26个地区在研究期间农业绿色水资源利用效率无大幅变动,整体处于平稳波动状态;上海的农业绿色水资源利用效率波动幅度最大,变异系数为35.24%,效率下降幅度达0.884,从相对有效率变为相对无效率,与上海近年来农林牧渔业实际总产值即期望产出下降有关,虽然上海农业面源污染水平也有所下降,但不足以抵消期望产出大幅下滑给农业绿色水资源效率带来的损失。②农业绿色水资源利用效率存在地区差距,部分地区的农业绿色水资源利用效率较高,如北京、辽宁、江苏等效率值多年位于1.0~1.3之间,处于相对有效率状态;但部分地区的效率值很低,小于0.6,甚至小于0.3,如山西、湖北、西藏等处于相对无效率状态。

3.3 时间分异分析

3.3.1 均值变动趋势分析

通过对比全国与各地区农业绿色水资源利用效率均值的趋势线(图1),探究效率的时间序列变动趋势。由图1可见:①全国层面:2002—2020年全国平均农业绿色水资源利用效率呈先增加后减小再增加的三次多项式形式,但变动幅度较小。②四大经济区域:东部地区效率均值呈周期为2的移动平均线,表现为先小幅波动下降,再呈U形变化,2020年达到相对有效率状态;中部地区呈U形的二次多项式形式,2012年为最低点,处于相对无效率状态,2014年后逐渐处于中等水平;西部地区和东北地区的变动趋势线均为三次多项式,效率均值先增加后减小再增加,但西部地区整体处于相对无效率状态,且变动幅度很小,而东北地区则处于中等偏上水平,且波动幅度稍大。③分异情况:随着时间的推移,各地区的农业绿色水资源利用效率的变化方向、强度

表1 2002—2020年中国31个省级行政区农业绿色水资源利用效率与变异系数

省级行政区	农业绿色水资源利用效率										V/%
	2002年	2004年	2006年	2008年	2010年	2012年	2014年	2016年	2018年	2020年	
北京	1.041	1.130	1.162	1.136	1.108	1.127	1.120	1.058	1.137	1.189	3.33
天津	0.526	0.653	0.587	0.583	0.658	0.626	0.584	0.495	0.670	1.054	22.11
河北	1.002	0.856	1.008	0.849	0.791	0.766	0.722	0.708	0.688	0.918	14.17
山西	0.363	0.371	0.335	0.334	0.305	0.298	0.306	0.293	0.370	0.351	9.17
内蒙古	0.597	0.590	0.619	0.541	0.479	0.496	0.488	0.497	0.504	0.473	9.12
辽宁	1.085	1.066	1.074	1.081	1.079	1.097	1.097	1.084	1.071	1.063	1.11
吉林	0.650	0.650	0.716	0.688	0.608	0.570	0.564	0.557	0.557	0.478	11.41
黑龙江	0.618	0.663	1.021	1.032	1.018	0.692	0.648	0.672	0.593	0.614	23.88
上海	1.289	1.229	1.217	1.224	1.244	1.104	1.019	0.529	0.493	0.405	35.24
江苏	1.022	1.067	1.070	1.029	1.070	1.130	1.142	1.166	1.124	1.071	4.38
浙江	0.835	0.844	0.808	0.797	1.007	1.016	0.879	1.015	1.009	1.119	11.37
安徽	0.682	0.618	0.564	0.546	0.546	0.542	0.572	0.529	0.475	0.566	9.75
福建	1.081	1.091	1.080	1.090	1.083	1.074	1.073	1.092	1.100	1.132	1.48
江西	0.728	0.640	0.589	0.509	0.493	0.485	0.685	0.769	0.775	0.812	18.32
山东	1.052	1.063	1.041	1.056	1.046	1.062	1.081	1.086	1.094	1.085	1.70
河南	1.040	1.027	1.040	1.021	1.039	1.011	1.045	1.015	1.036	1.024	3.33
湖北	0.761	0.712	0.637	0.571	0.574	0.542	0.600	0.721	0.678	0.735	10.82
湖南	0.674	0.653	0.641	0.665	0.692	0.668	0.646	0.625	0.520	0.649	8.16
广东	1.072	1.063	1.081	1.060	1.077	1.083	1.088	1.103	1.104	1.125	1.52
广西	0.471	0.456	0.457	0.439	0.430	0.416	0.410	0.448	0.424	0.490	5.61
海南	1.034	0.898	1.030	1.043	1.074	1.070	1.083	1.143	1.142	1.066	5.36
重庆	1.158	1.189	1.193	1.197	1.179	1.109	1.102	1.074	1.038	1.014	5.44
四川	1.178	1.187	1.181	1.186	1.166	1.108	1.100	1.084	1.079	1.125	3.92
贵州	0.486	0.452	0.398	0.397	0.343	0.412	0.434	0.484	0.492	0.578	12.28
云南	0.487	0.482	0.514	0.530	0.527	0.505	0.536	0.573	0.673	0.743	13.90
西藏	0.154	0.166	0.144	0.132	0.134	0.146	0.132	0.129	0.157	0.151	9.56
陕西	0.442	0.471	0.477	0.470	0.472	0.454	0.468	0.471	0.490	0.514	3.92
甘肃	0.253	0.255	0.265	0.245	0.252	0.250	0.254	0.289	0.3030	0.310	8.85
青海	0.120	0.155	0.170	0.173	0.176	0.179	0.176	0.166	0.1840	0.214	12.38
宁夏	0.101	0.120	0.135	0.150	0.144	0.158	0.162	0.170	0.206	0.187	20.17
新疆	0.461	0.442	0.480	0.418	0.348	0.334	0.342	0.368	0.357	0.316	13.30

注:限于篇幅,以2年为间隔列出农业绿色水资源利用效率测算结果。



图1 农业绿色水资源利用效率均值变化趋势

等不尽相同。虽然全国、西部和东北地区的趋势线均为三次多项式,但趋势线的幅度、极大值与极小值的位置不同,东部地区的变动稍复杂,而中部地区则呈U形特征。各地区效率时间序列变化的分异与其资源禀赋条件、农林牧渔业经济产值、农业面源污染水平等实际情况不同有关,地区发展状况的不同使投入产出要素对效率变化的影响方向和程度不同。

3.3.2 ML 指数分析

通过 MATLAB 软件测算 ML 指数,并将其分解为技术效率变化指数 (EC) 与技术进步变化指数 (TC) 的乘积,探析我国农业绿色水资源利用效率的跨期动态变动情况。图2为ML指数及其分解指数动态演变趋势,可见:①除2016年ML指数表现出明显异常值外,2002—2020年全国31个省级行政区的ML指数均值先减小后增大,且2020年ML指数均值显著高于2003年,表明我国近年整体农业绿色

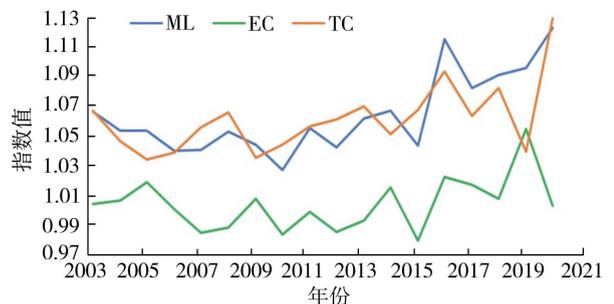


图2 ML 指数均值及其分解指数动态演变

水资源发展与经济、社会、生态环境等达到了一定程度的协调发展状态,跨期动态效率发展势头较好,发展前景可观。②EC与TC均大于1,多呈“此消彼长”趋势,共同影响着我国农业绿色水资源利用效率的变化。2003—2005年、2009年、2014年、2019年EC增大,TC减小;2006—2008年、2010年、2012年、2015年、2018年、2020年EC减小,TC增大,在农业绿色水资源利用上,73.68%的研究期内未能同时实现技术进步与技术的良好利用,近几年虽整体动态效率逐渐提高,但技术进步与技术效率的矛盾仍较突出,是未来提升农业绿色水资源利用效率需要改善之处。要切实了解政策实行过程中导致技术进步与技术效率矛盾的症结所在,制定并采取行之有效的措施加以应对和改善。此外,2011年、2013年、2016年的EC和TC均增大,即在农业水资源利用上不仅出现技术进步,如农业种养技术提升、设备升级、农业面源污染防治技术提升等,也表现了对现有技术的良好利用,体现为农业种养模式优化、农民专业素质提升等,使得这3年ML指数显著增长,尤以2016年为最。2017年EC和TC均下降,但随后重新表现为“此消彼长”,说明异常值后2017年的短暂下滑并未明显改变我国农业绿色水资源利用效率的跨期提升趋势。

3.4 空间分异分析

3.4.1 空间差异分析

如图1所示,从地区整体分异情况看,我国各地区农业绿色水资源利用效率的区域差异显著,且大小顺序依次为东部地区、东北地区、全国、中部地区、西部地区,东部地区效率均值在1.0上下波动,东北和中部地区的效率处于中等水平,西部地区相对无效率。东部地区持续推进现代化发展,经济发展水平较高,发展韧性强、活力足,自然资源禀赋条件较好,市场机制与产业结构合理完善,使得同等要素投入可能取得更高的经济产出,且因污染处理设施建设相对完善,使得水资源利用的非期望产出整体较低,技术进步、水资源供需平衡等使得水资源的利用效率较高;在西部大开发背景下,西部地区仍以农业经济为主,且高耗水农业(如水稻种植)占比较大,农业用水量较大,但灌溉用水有效利用率较低,且总产值不高,经济发展与科技水平较低,产业结构和基础设施建设不尽完善,从而使其水资源利用效率较低。

从各省级行政区分异情况看:①农业绿色水资源利用相对有效的地区主要集中在北京、江苏、河南、重庆、四川等地,多位处区位优势显著的东部沿海地区;北京、江苏逐步限制高耗水农作物生产;河南水资源总量相对匮乏,但农业产业结构完善,2020

年以全国排名第13的农业用水投入取得了全国排名第2的农业经济产值,且无过量农业面源污染;四川和重庆位处西南亚热带季风气候区,夏季降水量与径流量大,幅员辽阔,现代化农业生产技术水平持续向好发展。②甘肃、内蒙古、云南等地位处于干旱地区,长期水资源匮乏,农业基础设施建设和技术水平落后,使其长期相对无效率。③黑龙江在2008年相对有效率,但随后回到研究初期的中等偏低水平。主要原因是黑龙江水资源的管理与利用水平有待提高,存在降水分布不均、春旱与夏涝等影响农业生产等问题,且粮食产业整体经济效益较低。短暂的相对有效状态源于粗放式的农业发展使经济效益提高,但同时农业面源污染水平的提升制约着农业生产的自然资源条件。

3.4.2 泰尔指数与结构分解

利用泰尔指数与结构分解揭示农业绿色水资源利用效率地区差距的形成机理,见表2。①从泰尔指数看,2002—2020年全国农业绿色水资源利用效率的泰尔指数虽然呈现先下降再上升再下降的趋势,即总体差距先减小再增加再减小,但波动幅度不大。说明总体差距有所扩大后,各地区积极采取措施补短板、平衡发展,总体差距的小幅波动显示出效率偏低地区的效率提升力度和效率领先地区的继续发展动力不足,地区差距长期维持在平稳波动的水平。②从分解结果看,区域内差距对总体效率差距的贡献率稍高,为62.11%,即我国农业绿色水资源利用效率区域差距形成的主要原因是区域内差距,但区域间差距也不可忽视。与其余3个地区相比,西部地区总体差距的泰尔指数明显较大,几乎是多数年份东部地区的10倍以上,中部地区的3~5倍。细究发现,西部地区的重庆和四川相对有效率,但其余省份效率均较低,甚至曾低于0.2,如西藏、甘肃等,这与西部地区各省所处地理位置、经济发展状况、产业模式等有关。除四川和重庆外,其余多位于干旱或半干旱地区,农业用水投入与产出不均衡,农业生产方式相对落后,经济产出偏低且环境不友好,导致这些地区农业绿色水资源利用效率低下。因此,西部地区绿色水资源效率严重的“两极分化”导致西部地区泰尔指数较大且在全国层面呈现出区域内差距是总体差距形成的主要原因。区域间差距的形成主要归结于地区发展的不均衡、不协调,包括经济发展、基础设施、技术水平、人力资本等,以及发展相对落后地区的产业结构不合理、生产模式落后等。

3.4.3 基于“效率-生产率”方阵的综合分析

基于“效率-生产率”方阵综合对比分析我国31个省级行政区农业绿色水资源利用的优势与不足,

表2 2002—2020年全国农业绿色水资源利用效率的泰尔指数及结构分解

年份	T_w		T_b		T				
	数值	贡献率/%	数值	贡献率/%	全国	东部地区	中部地区	西部地区	东北地区
2002	0.080	65.09	0.043	34.91	0.123	0.020	0.041	0.228	0.035
2003	0.076	63.70	0.044	36.30	0.120	0.013	0.041	0.226	0.032
2004	0.075	64.00	0.042	36.00	0.117	0.014	0.041	0.217	0.028
2005	0.071	61.05	0.045	38.95	0.117	0.013	0.052	0.205	0.018
2006	0.074	61.20	0.047	38.80	0.121	0.016	0.052	0.213	0.015
2007	0.077	61.47	0.049	38.53	0.126	0.017	0.062	0.218	0.019
2008	0.078	61.52	0.049	38.48	0.127	0.018	0.057	0.221	0.018
2009	0.076	61.62	0.048	38.38	0.124	0.019	0.056	0.211	0.020
2010	0.078	58.22	0.056	41.78	0.135	0.013	0.066	0.228	0.029
2011	0.075	56.19	0.058	43.81	0.133	0.014	0.072	0.206	0.034
2012	0.074	57.09	0.056	42.91	0.130	0.014	0.065	0.203	0.040
2013	0.076	59.97	0.051	40.03	0.126	0.018	0.047	0.209	0.045
2014	0.076	60.93	0.049	39.07	0.124	0.018	0.058	0.201	0.044
2015	0.081	64.61	0.044	35.39	0.126	0.030	0.058	0.199	0.044
2016	0.082	67.34	0.040	32.66	0.122	0.038	0.060	0.186	0.042
2017	0.074	64.39	0.041	35.61	0.115	0.034	0.054	0.164	0.046
2018	0.075	65.39	0.040	34.61	0.114	0.032	0.057	0.165	0.048
2019	0.071	63.21	0.041	36.79	0.112	0.029	0.062	0.159	0.037
2020	0.072	63.11	0.042	36.89	0.115	0.028	0.048	0.169	0.058
均值	0.076	62.11	0.047	37.89	0.122	0.021	0.055	0.201	0.034

可得出以下结论:①河北、黑龙江、浙江、河南位于“效率-生产率”的第一方阵(H-H 方阵),平均农业绿色水资源利用效率高于整体均值,且以 ML 指数为代表的跨期动态效率较高,具有双重优势,是近年来我国农业绿色水资源利用的领先者。这4个地区或拥有深厚的农业发展基础和底蕴,或地理位置优越,水资源丰厚,发展动力充足。②天津、江西、湖南、云南、青海、宁夏位于第二方阵(L-H 方阵),不足之处在于静态水资源效率较低,但因动态跨期效率较高,未来发展潜力较大,应准确把握现有优势,提升农业用水的技术水平和有效灌溉率,合理采用节水技术,减少农业面源污染对生态环境的损害,发挥提升水资源效率的韧性和潜力。③北京、辽宁、上海、江苏、福建、山东、广东、海南、重庆、四川位于第三方阵(H-L 方阵),效率较高但效率增长乏力,提升速度缓慢,应探寻增长乏力的原因并着力改善,积极推行农业绿色生产和现代化农业发展,调动利益相关主体参与节水治污的积极性和主观能动性,构建能够持续推动绿色农业用水效率稳步提升的政策体系,提升水资源效率优势的稳定性。④山西、内蒙古、吉林、安徽、湖北、广西、贵州、西藏、陕西、甘肃、新疆位于第四方阵(L-L 方阵),水资源效率较低且提升速度缓慢,应借鉴其他地区的农业绿色用水节水治污经验,结合当地历史发展特色,引进先进的农业生产技术和污染处理设施,在尽量减少水生态损害的基础上,提高农业用水效率与发展潜力。

4 研究结论与政策启示

4.1 研究结论

a. 26个省级行政区的农业绿色水资源利用效率整体处于平稳波动状态,无大幅变动,但各地区间存在一定的差异。

b. 时间分异方面,东部、中部、西部和东北地区效率均值的趋势线形式与变动幅度有所不同;2002—2020年全国水平上 ML 指数的均值呈现波动的先减小后增加,且整体最终有所增加,2020年 ML 指数较2002年增加约5.26%;约73.68%的时期 EC 与 TC 通过“此消彼长”的变动方式影响着 ML 指数的变动。

c. 空间分异方面,东部、东北、中部、西部地区的农业绿色水资源利用效率依次递减,效率较高的地区主要位于东部沿海地区和3个位于中西部地区的省份,东部地区的静态效率约是西部地区的2倍;区域差距形成的主要原因是区域内差距,对总体差距的平均贡献率为62.11%,且主要是西部地区产生的区域内差距,但区域间差距的存在仍然不可忽视;在“效率-生产率”方阵综合分析中,河北、黑龙江、浙江、河南同时表现出较高的农业绿色水资源利用静态效率和跨期动态效率,山西等11个省级行政区则劣势明显。

4.2 政策启示

a. 优化农业生产结构。构建与地区水资源禀赋相匹配的农业生产结构与格局,优化各种投入要

素的资源配置,提高农业灌溉用水的有效利用率,减少农业生产对生态环境的损害;农作物种类单一地区完善农业产业结构,发挥地区的比较优势;季节性降水量较大地区选择并推广生长阶段和需水量与降水季节性特征相契合的农作物,充分利用地域气候特征。

b. 因地制宜,加强跨区域交流合作。东部地区发挥领头优势,积极发展环境友好型农业;中部地区深入贯彻“中部崛起”战略,提高利益相关主体的水生态保护意识;西部地区找准方位优势,推动观光农业等特色农业发展,缩小地区差距;打破行政管理壁垒,依托长江流域等发展先进地区的区位优势和“黄金水道”的带动效应,带动后发地区发展,形成区域间、流域间农业发展的良性互促互动,提高治理效率。

c. 推动农业绿色水资源利用效率进一步提升。以尽可能同时保证技术进步与技术良好利用为着力点,推广农业绿色生产技术,完善水利基础设施建设,实施相应的激励或补偿措施以提高先进技术的有效利用率和农户对农业面源污染的治理意愿,如完善农业面源污染治理的生态补偿路径与机制设置,适当开展宣传教育普及活动以提高利益相关主体采用新技术、新设备的主动性和积极性,从而提高农业绿色用水效率提升的活力和可持续性。

参考文献:

[1] 吴旭晓. 城镇化、环境规制与水资源福利绩效关系研究:以河南省 18 个地市为例[J]. 城市问题, 2021(11): 61-69.

[2] 丁绪辉, 贺菊花, 王柳元. 考虑非合意产出的省际水资源利用效率及驱动因素研究:基于 SE-SBM 与 Tobit 模型的考察[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(1): 157-164.

[3] 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.

[4] 李德山, 苟晨阳. 环境规制对西部地区水资源利用效率的影响研究:基于产业部门和资源依赖度异质性视角[J]. 地理科学, 2021, 41(12): 2203-2212.

[5] 郭炳南, 唐利, 张浩. 中国八大综合经济区水资源利用效率的区域差异及影响因素研究[J]. 生态经济, 2022, 38(1): 153-161.

[6] 赵连阁, 徐建芬, 王学渊. 浙江省农业面源污染的库兹涅茨曲线验证[J]. 浙江农业学报, 2012, 24(6): 1079-1085.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 高孟菲, 于浩, 郑晶. 黄河流域绿色水资源效率及空间驱动因素研究[J]. 生态经济, 2020, 36(7): 44-50.

[10] 马骏, 彭苏雅. 新型城镇化、水资源利用效率与经济增长的关系研究[J]. 水利经济, 2021, 39(4): 8-13.

[11] 刘悦, 汪克亮, 孟祥瑞, 等. 长江经济带工业水资源效率的时空分异及动态演进[J]. 水电能源科学, 2018, 36(9): 55-59.

[12] 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.

[13] 陆泉志, 陆桂军, 范稚莲, 等. 污染排放约束下广西种植业用水效率及其时空格局研究:基于超效率 SBM-Undesirable 模型与 ESDA 方法[J]. 中国农村水利水电, 2018(9): 7-11.

[14] 沈晓梅, 谢雨涵. 农业绿色水资源利用效率及其影响因素研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(3): 13-18.

[15] 刘涛, 崔永正, 李继霞. 基于水污染视角的中国农业生态用水效率及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2021, 28(5): 301-307.

[16] 郝铭, 段琳琼, 陈常优, 等. 黄河流域与长江经济带农业水资源利用效率与影响因素的差异性研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 267-277.

[17] 苏喜军, 纪德红, 何慧爽. 黄淮海平原农业水资源绿色效率时空差异与影响因素研究[J]. 生态经济, 2021, 37(3): 106-111.

[18] TONE K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis [J]. European Journal of Operational Research, 2002, 143(1): 32-41.

[19] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis [J]. European Journal of Operational Research, 2001, 130(3): 498-509.

[20] CHAMBERS R G, FÄURE F, GROSSKOPF S. Productivity growth in APEC countries[J]. Pacific Economic Review, 1996, 1(3): 181-190.

[21] 赵金彩, 范思盈, 冯敬燕, 等. 黄河中下游地区水资源利用效率时空分异特征[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2022, 50(06): 37-44.

[22] 安慧, 汪永豪, 安敏, 等. 长江经济带沿线城市水资源绿色效率及节水减排潜力时空演变[J]. 长江流域资源与环境, 1-18.

[23] 杜书, 梁彦庆, 张梦, 等. 河北省农业水资源利用效率时空分异特征及影响因素研究[J]. 节水灌溉, 2021(6): 74-80.

[24] 姜松, 周洁, 邱爽. 适度规模经营是否能抑制农业面源污染:基于动态门槛面板模型的实证[J]. 农业技术经济, 2021(7): 33-48.

(收稿日期:2022-09-14 编辑:骆超)