

# “双碳”目标下湖北省农业绿色全要素生产率空间特征和核心要素研究

涂维亮 娄君庭

**【摘要】**：按地理地貌细分区域，选取绿色全要素投入和产出指标，对产出碳排放量测算，运用SBM模型和GML指数，对湖北省农业绿色全要素生产率进行测度，再通过建立固定效应模型，选取技术改造投资、高新技术产业发展水平、第二三产业发展水平等指标对影响湖北省农业绿色全要素生产率增长的核心要素进行研究。结果发现：“双碳”目标下，湖北省年均农业绿色全要素生产率从时序看呈振荡波动变化状态，区域空间分布不均衡，差异特征显著，且机械化程度和高新技术产业增加值等核心要素决定着农业绿色全要素生产率的增长。综合核心要素及区域差异特征分析，建议提高农业主推技术到位率，加大农业技术创新力度，以要素减量增效为重点，降低农业碳排放量，完善农业基础设施建设等策略全面提升农业绿色全要素生产率。

**【关键词】**：农业绿色全要素生产率；农业基础设施；碳排放

**【中图分类号】**：F323.7 **【文献标识码】**：A **【文章编号】**：1003-8477（2023）01-0065-09

**【DOI】**：10.13660/j.cnki.42-1112/c.016029

## 一、引言

为全面推进乡村振兴，“十四五”规划强调了绿色发展理念，党的二十大报告的第四部分《加快构建新发展格局，着力推动高质量发展》中指出：“着力提高全要素生产率，着力提升产业链供应链韧性和安全水平，着力推进城乡融合和区域协调发展，推动经济实现质的有效提升和量的合理增长。”目前中国多数地区农业发展方式仍显粗放，与资源利用高效、生态系统稳定、产品质量安全的现代农业绿色发展新格局还有一定的差距。为了真实地反映国家粮食安全和农业区域经济发展的综合竞争力，“双碳”目标下，需要科学评价农业绿色全要素生产率，并采取有效的应对策略。

对绿色全要素生产率的研究，Charnes等<sup>[1] (p429-440)</sup>提出的数据包络分析（DEA）和Douglas等<sup>[2] (p1399-1414)</sup>提出的Malmquist指数成为绿色全要素生产率的测算基础模型和分析方法，并衍生出Banker等<sup>[3] (p1078-1092)</sup> Coelli等<sup>[4]</sup>的CCR、BCC等径向距离函数和Chung等<sup>[5] (p229-240)</sup>推出的方向性距离函数；Tone等<sup>[6] (498-509)</sup>解决了投入产出等比例改进和松弛改进问题，提出了非径向距离函数的SBM模型；随着研究的深入，Pastor<sup>[7] (p197-266)</sup>等提出了Global测算技术，Oh<sup>[8] (p183-197)</sup>将其应用到ML指数中，形成了GML指数。从区域视角，Nanere<sup>[9] (p350-362)</sup>等测算了澳大利亚的绿色全要素生产率；Oh和Heshmati<sup>[10] (p1345-1355)</sup>等衡量了26个经合组织国家在1970—2003年期间的环境敏感生产率增长；Choi<sup>[11] (p1017-1043)</sup>等衡量了中国区域的环境敏感全要素生产率。在绿色全要素生产率影响因素的研究上，Fare<sup>[12] (p66-83)</sup>等发现技术变革和技术效率能够影响一个国家的生产率增长水平；Rezek和Perrin<sup>[13] (p346-369)</sup>研究发现技术变革越来越偏向于环境友好型生产，技术变革下的环境调整有助于提升总体生产率增幅。国内学者对农业绿色全要素生产率的研究，王兵等<sup>[14] (p95-109)</sup>运用SBM方向性距离函数和Luenberger生产率指数法对绿色全要素生产率进行了测度分析；吴传清和宋子逸<sup>[15] (p35-41)</sup>运用SBM模型和GML指数相结合来测度农业绿色全要素生产率；邓灿辉等<sup>[16] (p12-19)</sup>使用了SBM-ML指数模型与DEA-Malmquist指数来测算绿色全要素生产率。纪成君和夏怀明<sup>[17] (p136-143)</sup>对我国农业绿色全要素生产率进行了区域差异和收敛性分析；肖琴等<sup>[18] (p119-128)</sup>对长江经济带的农业绿色全要素生产率及时空分异特征进行了考察；陈婷<sup>[19] (p216-220)</sup>研究认为人均农业产出增加和工业化会对农业全要素生产率产生影响。

总体而言，对绿色全要素生产率的研究主要是测算方法的不断改进，且集中在空间尺度的差异及影响因素方面的研究。因此，在“双碳”目标下，需要创新研究视角：一是将农业面源污染和碳排放纳入农业非期望产出指标体系中，更加全面地反映环境约束下的农业绿色发展效率；二是要克服传统的径向 DEA 模型在短期观测值波动的情况下测度结果不准确的弊端。党的二十大报告提出：到 2035 年广泛形成绿色生产生活方式，碳排放达峰后稳中有降，生态环境根本好转的远景目标；湖北省十二次党代会报告强调：坚持降碳、减污、扩绿、增长协同推进，加快布局“双碳”发展新赛道，建立健全绿色低碳循环发展经济体系，把生态价值转化为经济价值、生态优势转化为经济优势。所以，通过对湖北省农业绿色全要素生产率的测度，研究其空间分布特征，分析影响农业绿色全要素生产率的核心要素，准确地认清不同区域农业资源的利用情况，探索碳达峰、碳中和与农业绿色全要素生产率的关系，有利于对现代农业发展进行科学的研判，补充完善湖北省农业绿色全要素生产率的研究内容短板，并预期对中国其他区域“双碳”目标下农业绿色全要素生产率的提升有一定的价值导向作用。

## 二、农业绿色全要素生产率的空间特征判读

### (一) 研判方法选择和指数构建

#### 1. 非径向 SBM 模型的选择

传统径向 DEA 模型其松弛改进在效率值的测量中没有得到体现，Tone<sup>[6]</sup>提出的 SBM 模型解决了径向模型对无效率测量没有包含松弛变量的问题。据此选用非径向 SBM 模型更可靠，假设样本中有  $K$  ( $K=1, 2, \dots, k$ ) 个决策单元 (DMU)， $x$ 、 $y$ 、 $u$  ( $x \in R^M, y \in R^N, u \in R^I$ ) 分别代表决策单元的投入、期望产出和非期望产出，其中， $M$ 、 $N$ 、 $I$  分别表示每个决策单元的投入、期望产出和非期望产出， $\rho^*$  表示被评价 DMU 的效率值，从投入和产出角度同时对无效率状况进行评价，

于是构建决策单元  $k^t(x^t, y^t, u^t)$  在  $t$  时期的 SBM 方向性距离函数：

$$\rho^*(x_m^k, y_n^k, u_i^k) = \min \frac{1 - \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{s_m^k}{x_m^k}}{1 + \frac{1}{N+I} \left( \sum_{n=1}^N \frac{s_n^y}{y_n^k} + \sum_{i=1}^I \frac{s_i^u}{u_i^k} \right)} \quad (1)$$

式 (1) 中分子和分母分别代表决策单元的实际投入、产出与生产前沿面的平均距离，

$$\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{s_m^k}{x_m^k}$$

和  $\frac{1}{N+I} \left( \sum_{n=1}^N \frac{s_n^y}{y_n^k} + \sum_{i=1}^I \frac{s_i^u}{u_i^k} \right)$  分别表示 DMU 投入和产出的无效率均值； $s_m^x, s_n^y, s_i^u$  ( $s_m^x \geq 0, s_n^y \geq 0, s_i^u \geq 0$ ) 分别表示

投入松弛变量、期望产出松弛变量和非期望产出松弛变量； $x_m^k, y_n^k, u_i^k$  分别表示各决策单元的实际投入、期望产出和非期望产出值， $\lambda_k$  为各个决策单元的权重比，其约束条件为：

$$\begin{aligned}
 x_m^k &= \sum_{k=1}^k \lambda_k x_m^k + s_m^k, \quad m = 1, 2, \dots, M; \\
 y_n^k &= \sum_{k=1}^k \lambda_k y_n^k - s_n^k, \quad n = 1, 2, \dots, N; \\
 u_i^k &= \sum_{k=1}^k \lambda_k x_i^k + s_i^k, \quad i = 1, 2, \dots, I;
 \end{aligned}$$

$s_m^x \geq 0, s_n^y \geq 0, s_i^u \geq 0, \lambda_k \geq 0$ 。当目标函数  $\rho^* = 1$  时 ( $\rho^* \in [0, 1]$ )，被评价 DMU 为强有效，此

时  $s_m^x = s_n^y = s_i^u = 0$ ；，表示 DMU 没有出现投入剩余或产出不足；当  $\rho^* < 1$  时，表明 DUM 存在效率损失，需要在投入和产出上做进一步调整。

## 2. Malmquist 指数构建

Malmquist 用来分析 DMUK 在不同时期的生产率变化，需建立 GML 指数参考集， $S^G = S^1 \cup S^2 \cup \dots \cup S^T = \{(x_k^1, y_k^1)\} \cup \{(x_k^2, y_k^2)\} \cup \dots \cup \{(x_k^T, y_k^T)\}$ ，式中 G 为全局基准，T 为时期数，由于各期以全局基准为参考，因而 GML 指数具备可累乘性和传递性，而被评价 DMU 包含在全局内。所以，构建 GML 指数为：

$$\begin{aligned}
 M_{GJ}^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, u^{t+1}; x^t, y^t, u^t) &= \\
 \frac{1 + E^G(x^t, y^t, u^t)}{1 + E^G(x^{t+1}, y^{t+1}, u^{t+1})}; M_{GJ}^{t+1} &= TC_{GJ}^{t+1} \times EC_{GJ}^{t+1} \\
 TC_{GJ}^{t+1} &= \frac{1 + E^G(x^{t+1}, y^{t+1}, u^{t+1})}{1 + E^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, u^{t+1})} \times \\
 \frac{1 + E^t(x^t, y^t, u^t)}{1 + E^G(x^t, y^t, u^t)}; \\
 EC_{GJ}^{t+1} &= \frac{1 + E^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, u^{t+1})}{1 + E^t(x^t, y^t, u^t)}
 \end{aligned}$$

式中  $M_{GJ}^{t+1}$  表示农业绿色全要素生产率， $E^G(x^t, y^t, u^t)$  表示 t 时期的 DMU 效率值。

Malmquist 指数分为绿色技术进步指数  $(TC_{GJ}^{t+1})$  和绿色技术效率指数  $EC_{GJ}^{t+1}$ 。当  $M_{GJ}^{t+1} > 1$  时，表示农业绿色全要素生产率有所增长；当  $M_{GJ}^{t+1} < 1$  时，表明绿色技术有所退步、绿色技术效率有所下降；当  $M_{GJ}^{t+1} = 1$  时，表明农业绿色全要素生产率、绿色技术、绿色技术效率保持不变。

### (二) 指标选取与数据来源

## 1. 指标选取及描述

(1) 农业绿色全要素投入指标。将种植业、畜牧业和渔业均纳入研究中，选取劳动力、土地、农业机械、灌溉、农药、化肥、农膜、农用柴油等 8 个投入指标。(2) 农业绿色全要素产出指标。期望产出(万元)为不变价农业总产值；非期望产出(万吨)为农业生产活动中产生的各种面源污染，主要包括总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD)、碳排放量、农药农膜的流失残留量。农业污染测算借鉴赖斯芸等<sup>[20](p1184-1187)</sup>的单元调查法，剔除不完全依赖于农业生产活动的农业人口产污，增加水产养殖产污，从农业化肥、农药、养殖、农作物、农膜 5 个板块对农业面源污染进行估算，指标集如表 1 所示。

由于产污单元影响因子不同，单元的产污强度有所差异，具体计算详见表 2。其中畜禽产污来源为生猪、牛、羊等主要养殖禽畜；水产养殖产污系数选取鲫鱼、鳊鱼、草鱼、泥鳅等 7 类养殖品种的产污系数平均值。对碳排放量测算，参考李波等<sup>[21](p80-86)</sup>的研究成果，分别从农作物总播种面积、有效灌溉面积、农用柴油使用量、农用化肥施用折纯量、农药使用量以及

农药塑料薄膜使用量等 6 种碳排放源进行核算，计算公式： $E = \sum E_i = \sum T_i \times \sigma_i$ 。式中，E 表示农业总碳排放量；E<sub>i</sub> 表示各种碳源的碳排放量；T<sub>i</sub> 表示各类碳排放源的实际产量；σ<sub>i</sub> 表示各类碳源的碳排放系数，排放系数如表 3 所示。

表 1 农业面源产污指标集

类别	产污要素	调查指标	单位	污染物
农业化肥	N 肥、P 肥、复合肥	施用量折纯	万吨	TN、TP
养殖	水产养殖	总产量	万吨	TN、TP、COD
	牛、羊、猪	存栏量/出栏量	万头	TN、TP、COD
农作物	稻谷、玉米、小麦	总产量	万吨	TN、TP、COD
农药	农药	使用量	万吨	农药流失
农膜	农膜	使用量	万吨	农膜残留

表 2 单元产污强度计算方程列表

类别	计算方程
化肥	氮肥产污强度 (t/t) = 1 × (1 - 氮利用率)
	磷肥产污强度 (t/t) = 1 × (1 - 磷利用率) × 43.66%
	复合肥产氮强度 (t/t) = 1 × 复合肥氮含量 × (1 - 氮利用率)
	复合肥产磷强度 (t/t) = 1 × 复合肥磷含量 × (1 - 磷利用率) × 43.66%
畜禽	畜禽产污强度 (kg · 头 <sup>-1</sup> · a <sup>-1</sup> ) = 1 × 饲养周期 × 粪(尿)排放系数 × 粪(尿)污染物排泄系数
水产养殖	水产养殖产污强度 (t/t) = 1 × 水产养殖产污系数
农作物	农作物产污强度 (t/t) = 1 × 农作物草谷比 × (1 - 农作物可利用系数) × 秸秆有机物含量
农药	农药流失量 (t/t) = 1 × 农药流失系数
农膜	农膜残留量 (t/t) = 1 × 农膜残留系数

注：所涉及的相关系数源于第一次全国污染源普查及相关文献数据。

2. 数据来源说明。农业面源产污要素产量、农作物总播种面积、有效灌溉面积、第一产业从业人数、机械总动力、农用塑料薄膜施用量、化肥施用量 等在内的投入产出数据，主要来自 2009—2018 年《湖北农村统计年鉴》及湖北省各地级市统

计年鉴，对于缺失的数据采取：本年度变量数据=上一年度变量数据×(1+上一年度增长率)进行处理。

### (三) 测度结果与分析

#### 1. 县域空间特征判读及差异解析

应用 2009—2018 年湖北省 12 个地级市投入产出数据，采用 MAXDEA7.0 软件测度各年度 12 个地级市农业绿色全要素生产率指数。

(1) 自然区域空间特征判读及解析。按地理地貌细分区域，将湖北省划分为鄂东（武汉、黄石、鄂州、黄冈、咸宁），鄂中（荆州、荆门、孝感、随州）和鄂西（十堰、宜昌、襄阳）三大区域。对 2009—2018 年湖北省年均农业绿色全要素生产率指数测算的结果显示（如表 4）：湖北省鄂东、鄂中、鄂西年均农业绿色全要素生产率指数均有所下降，分别为 0.959、0.964 和 0.946，下降率为 4.1%、3.6% 和 5.4%。其中，鄂西地区的年均农业绿色全要素生产率指数下降幅度最大，但 2009—2012 年鄂西地区的年均农业绿色全要素生产率大于全省平均水平，年均农业绿色全要素生产率增长最高达 44.4%；2013 年鄂东和鄂中年均农业绿色全要素生产率赶超鄂西地区，2017—2018 年鄂东和鄂中年均农业绿色全要素生产率分别增长 31.3% 和 8.3%，鄂西地区反而下降 22.9%。这可能是由于鄂西地区具有优良的农业自然资源优势，前些年的年均农业绿色全要素生产率增长势头迅猛，环境规制变化、农村劳动力外流等因素，使得农业产业结构和农业生产条件没有得到优化升级，致使农业绿色全要素生产率出现停滞不前甚至倒退；而鄂东地区在后期凭借武汉城市群主导，将当地资源与绿色技术相互结合，对第一产业进行了升级改造，使资源得以合理配置，提升了该区域农业绿色全要素生产率；鄂中地区由于在地理上毗邻鄂东地区，受到了来自鄂东地区强势经济的带动，加上鄂中地区后自然地理和区位优势，农业绿色全要素生产率得到了较快的提升。

(2) 行政区域空间特征判读及解析。2009—2018 年湖北省各地级市年均农业绿色全要素生产率指数（见表 5），在 2009—2018 年期间，只有武汉市、咸宁市、襄阳市和宜昌市的年均农业绿色全要素生产率指数大于 1，农业绿色全要素生产率增长率分别为 18.4%、7.6%、11.8% 和 7.1%，均高于全省年均农业绿色全要素生产率水平，也高于同期全国年均 1.9% 的增长率水平。其他地区的年均农业绿色全要素生产率都有所下降，其中黄冈市和十堰市的年均农业绿色全要素生产率下降幅度分别为 26.8% 和 29.2%，其次是黄石市下降幅度为 12.6%，鄂州市、荆门市、荆州市、随州市和孝感市农业绿色全要素生产率水平变化较小，年均农业绿色全要素生产率水平维持在 0.952—0.996 之间，农业绿色全要素生产率下降幅度维持在 0.4%—4.8%。分阶段来看，2009—2014 年各地级市年均农业绿色全要素生产率均有所提升，其中武汉市的农业绿色全要素生产率增长达 59.6%。在 2015—2016 年阶段，除荆州市外，其他地区的年均农业绿色全要素生产率指数下降 1%—65.8%，其中黄冈市和随州市农业绿色全要素生产率下降 62.8% 和 65.8%，鄂州市下降 1%。在 2017—2018 年阶段，除了荆州市和十堰市，其他地区的年均农业绿色全要素生产率水平都有所回升，其中咸宁市和黄石市农业绿色全要素生产率增长了 76.8% 和 58.1%。

[22] (p84-92) [23] (p125-129)

表 3 碳源排放系数表

碳排放源	化肥(Kg/kg)	农药(Kg/kg)	农膜(Kg/kg)	柴油(Kg/kg)	耕地(Kg/hm <sup>2</sup> )	农田灌溉(Kg/hm <sup>2</sup> )
碳排放系数	0.8956	4.9341	5.1800	0.5927	312.6000	25.0000

表 4 湖北省鄂东中西地区年均农业绿色全要素生产率指数

	2009—2010	2011—2012	2013—2014	2015—2016	2017—2018	2009—2018
鄂东	0.781	1.127	1.095	0.641	1.313	0.959

鄂中	0.834	1.211	0.970	0.784	1.083	0.964
鄂西	0.945	1.444	1.051	0.687	0.771	0.946

## 2. 湖北省农业绿色全要素综合生产率及空间特征

从技术指标看。以几何平均值作为当年湖北省农业绿色全要素生产率指数，测算 2009—2018 年湖北省的年均农业绿色全要素生产率（GTFP）、绿色技术效率（GEC）、绿色技术进步（GTC）指数结果（见表 6），分别下降了 2.8%、0.6%和 1.1%。

从时序演变来看。2009—2014 年，依靠绿色前沿技术进步驱动，农业绿色全要素生产率为递增趋势，年均增长率为 6.48%，农业绿色技术效率年均增长 3.19%，绿色技术进步年均增长 7.28%。2014—2015 年，年均农业绿色全要素生产率为 0.496，因技术进步对劳动、资本与 GDP 等的偏向性，忽略了非期望产出，致使环境恶化型技术在短期内迅速发展并长时期停留，导致绿色技术发展驱动力不足，农业绿色全要素生产率降低，<sup>[24] (p128-144)</sup> 与前期相比农业绿色全要素生产率下降了 50.4%，农业绿色技术效率和农业技术进步分别下降 61.6% 和 40%。2015—2018 年，因强化绿色发展理念，推动了绿色技术进步，年均绿色技术进步增长 10.61%，农业绿色全要素生产率有一定的回升。但绿色前沿技术倒退，在采用绿色先进技术及改善资源配置过程中，未提升管理组织水平，产生成本和经济损失，导致绿色技术效率下降，年均绿色技术效率下降 5.08%，使年均农业绿色全要素生产率下降了 13.3%，呈现显著的先增后降、再增长的振荡波动上升状态。从空间看，湖北省农业绿色全要素综合生产率的空间分布呈明显分布不均衡特征。

表 5 2009—2018 年湖北省各地级市年均农业绿色全要素生产率指数

	2009—2010 年	2011—2012 年	2013—2014 年	2015—2016 年	2017—2018 年	2009—2018 年
鄂州市	0.938	1.016	1.025	0.990	1.012	0.996
黄冈市	0.535	1.157	0.772	0.372	1.184	0.732
黄石市	0.442	0.929	1.248	0.631	1.581	0.874
荆门市	1.034	1.001	1.002	0.884	1.009	0.985
荆州市	0.561	1.720	0.627	1.333	0.978	0.953
十堰市	0.784	1.126	0.998	0.590	0.343	0.708
随州市	1.379	1.127	1.227	0.342	1.197	0.952
武汉市	1.307	1.679	1.596	0.570	1.164	1.184
咸宁市	1.004	0.991	1.000	0.818	1.768	1.076
襄阳市	1.050	1.646	1.157	0.751	1.161	1.118
孝感市	0.604	1.108	1.150	0.938	1.165	0.966
宜昌市	1.025	1.624	1.006	0.732	1.149	1.071

表 6 2009—2018 年湖北省农业绿色全要素生产率指数与分析

	2009—2010	2010—2011	2011—2012	2012—2013	2013—2014	2014—2015	2015—2016	2016—2017	2017—2018	2009—2018
GTFP	0.837	1.232	1.224	0.915	1.185	0.496	0.980	1.285	0.904	0.972
GEC	1.143	1.175	0.923	0.990	0.954	0.384	3.136	0.539	1.250	0.994
GTC	0.807	1.048	1.327	1.020	1.243	0.600	0.372	3.180	0.899	0.989

从面状空间分布看。依托区域的经济和资源优势，鄂西地区“襄十随神都市圈”先扬后抑滞后显著，鄂东地区以武汉为代表的“武鄂黄黄都市圈”先抑后扬快速提升，鄂中地区“宜荆荆都市圈”依托中部紧随其后，呈增长拉动之势。

从点状分布看。农业绿色全要素综合生产率前期优势的随州、荆门回落，而当前武汉、襄阳、宜昌强势上升，有明显的行政、铁路和经济优势变化特征；但线状分布不明显。

### 3. 综合研判解读分析

可能是取消农业税以及增加农机购置补贴等惠农政策，使2009—2014年期间湖北省各县区农业绿色全要素生产率水平提升较快，2015年随着节能减排兴起，结合“转方式，调结构”等节本增效措施，空间差异明显，低碳区增长较快，中碳区次之，高碳区增长相对较慢，农业绿色全要素生产率得到了改善和提升。结果显示不同区域关系影响下的聚落空间格局演变特征受地形地貌、河流水系等内部驱动力，道路交通、经济发展等外部驱动力，以及城乡发展的综合驱动力的影响，逐渐由核心中心区域向多城市中心拓展，中心城市及城市群等经济优势区域的经济和人口承载能力不断增强，逐步形成了低碳均衡的高农业绿色全要素生产率的空间格局，呈现经济聚集区碳减排弱与农业绿色全要素生产率改善提升并举趋势。

## 三、农业绿色全要素生产率异化的核心要素求证

### （一）指标选取和数据来源

为了进一步分析湖北省农业绿色全要素生产率的空间特征差异的原因，兼顾数据的可得性，选取技术改造投资、高新技术产业发展水平、第二三产业发展水平、对外开放水平、水土流失治理水平、农村人力资本水平、农业机械化程度、化肥投入等8个解释变量（见表7）。数据源自《湖北省统计年鉴》《湖北省农村统计年鉴》及湖北省各地级市统计年鉴。

### （二）模型设定

因存在显著个体效应的固定效应模型（FE）明显优于混合回归模型，且可以随机效应或固定效应形态存在，所以，采用FE进行回归分析适合研究需要，构建模型如下：

$$\ln GTFP_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 \ln TI_{i,t} + \beta_2 \ln TA_{i,t} + \beta_3 \ln DL_{i,t} + \beta_4 \ln OP_{i,t} + \beta_5 \ln SC_{i,t} + \beta_6 \ln HC_{i,t} + \beta_7 \ln ML_{i,t} + \beta_8 \ln FI_{i,t} + \mu_i + \varepsilon_{i,t}$$

### （三）变量描述性统计

为减少异方差影响，对变量进行对数化处理。由于测算GTFP是以年为基期的环比指数，参考李谷成<sup>[25] (p109-116)</sup>等学者的做法，将GTFP处理为以2009年为基期的农业绿色全要素生产率积累变化指数，每一期指数为基期到报告期的环比指数连乘积。 $i$ 代表个体效应， $\mu_i + \varepsilon_{i,t}$ 为复合扰动项，其中 $i=1, 2, \dots, 12$ 。假设 $\{\varepsilon_{i,t}\}$ 与 $\mu_i$ 不相关，为独立同分布， $\mu_i$ 代表个体异质截距，是不可观测的随机变量， $\varepsilon_{i,t}$ 为扰动项，随个体与时间变化，描述性统计如表8所示。

表7 变量指标及解释性描述

指标	解释性描述
农业机械化程度 (ML)	用各地级市农业机械总动力与农作物总播种面积的比值表示
水土流失治理水平 (SC)	用各地级市水土流失治理面积表示
农业化肥投入 (FI)	用各地级市农业化肥施用量表示
技术改造投资 (TI)	用各地级市的技术改造投资额表示
对外开放水平 (OP)	用各地级市进出口总额与地区生产总值的比值表示
农村人力资本水平 (HC)	用各地级市农村初中及以上毕业人数表示
高新技术产业增加值 (TA)	用各地级市的高新技术产业增加值来衡量
第二产业发展水平 (DL)	用各地级市第二产业增加值与地区生产总值的比重表示

表 8 变量描述性统计结果

变量	单位	均值	标准差	最小值	最大值
农业绿色全要素生产率 (GTFP)	—	1.557	1.391	0.041	9.388
农业机械化程度 (ML)	万千瓦/千公顷	0.811	1.020	0.061	8.268
水土流失治理水平 (SC)	千公顷	376.470	407.982	18.19	1757.769
农业化肥投入 (FI)	万吨	24.569	15.393	4.4	60.61
技术改造投资 (TI)	亿元	797.464	2902.844	12.02	275 23.5
对外开放水平 (OP)	%	7.036	5.694	1.902	31.455
农村人力资本水平 (HC)	万人	67.358	32.839	13.66	140.65
高新技术产业增加值 (TA)	亿元	318.581	538.704	13.515	3052
第二产业发展水平 (DL)	%	81.405	18.947	9.061	97.827

#### (四) 实证结果分析

##### 1. 模型的回归结果 (见表 9)

##### 2. 回归结果分析

(1) 核心要素。一是机械化程度、农业化肥投入、农村人力资本水平有显著正向影响，水土流失治理水平、高新技术产业增加值有显著负向影响。良好的农业地理优势，农业机械化程度提升，有利于发展新型生态农业，但农业机械化程度对丘陵山区耕种使用机械化作业的难度较高，影响不显著。近年来集成推广化肥减量增效工作，提高作物施肥的精准度、土壤肥力、作物产出质量，能显著提高农业绿色全要素生产率，但可能是由于施肥不科学，导致土壤生产能力下降，对丘陵山区呈不显著的正向影响。加大农民技能培训的力度，展开农业人才引进政策，培养和选拔出一批服务乡村振兴的外来管理人才，对农业绿色发展有巨大的推动作用，但农村市场机制和现代管理制度尚不健全，会对人力资源相对丰富的区域有不显著的负向影响。受森林覆盖率和土壤肥力保持的影响，水土流失治理标准普遍不高，水土流失复返现象严重，导致农业绿色全要素生产率下降。由于各区域高度重视高新技术产业发展，推动农业科技成果转化和农业产业转型升级，但因农业技术供需不匹配、农村基础条件薄弱、资金不足等原因，农业领域中关键技术的创新成果没能及时转化为实际生产力，技术的时滞效应，影响了农业绿色全要素生产率。

(2) 辅助要素。第二产业发展水平有不显著的正向作用，这可能是新型城镇化的推进，加速了农村一二三产业的融合，

为农业产业的新格局搭建 了良好的成长环境，有利于其农业绿色生产发展； 但第二三产业发展较快，导致优质劳动力流出，从 而对农业生产带来消极影响，在农村服务体系尚不 完善、财税支持力度有限背景下，农业三产融合机 制弱化，抑制了农业绿色全要素生产率。技术改造 投资、对外开放水平有不显著的负向影响。说明在 技术改造投资结构及农业技术成果转化方面有待 进一步优化，技术改造投资外部环境不理想；而对 外开放水平程度不高，进口农产品结构不理想和外 资利用管制偏紧，农业市场受到进口农产品的冲击 较大，从而影响了农业绿色全要素生产率的提高。

表 9 湖北省农业绿色全要素生产率影响因素回归结果

影响因素	湖北省	鄂东	鄂中	鄂西
农业机械化程度	0.343** (0.1651)	0.1870 (0.2618)	1.0218*** (0.3534)	0.0164 (0.3144)
水土流失治理水平	-0.1294** (0.0657)	-0.1760* (0.1046)	-3.1815 (2.2047)	-0.0004 (0.1176)
农业化肥投入	0.3879*** (0.1328)	0.7615*** (0.2210)	0.7952*** (0.2350)	-0.4781** (0.2364)
技术改造投资	-0.0634 (0.0539)	0.094 (0.0847)	-0.2585** (0.1148)	-0.1346 (0.0912)
对外开放水平	-0.1232 (0.1669)	-0.5646** (0.2836)	-0.3218 (0.4361)	0.2144 (0.2330)
人力资本水平	0.3894** (0.1959)	-0.1649 (0.3015)	0.6546* (0.3527)	0.7889** (0.3822)
高新技术产业增加值	-0.1279** (0.0617)	-0.1991 (0.1099)	-0.773 (0.1133)	-0.0394 (0.1012)
第二三产业发展水平	0.1332 (0.1615)	-0.2469* (0.2293)	0.3620 (0.2427)	-0.1704 (0.3527)
样本数	120	50	40	30

注：括号内为稳健标准误差，\*、\*\*、\*\*\*分别表示在 10%、5%和 1%的水平下显著。

## 四、结论及对策建议

### （一）研究结论

1. 农业绿色全要素生产率呈振荡波动变化。 依靠绿色前沿技术进步驱动，农业绿色全要素生产率递增；农业绿色全要素生产率出现下降，表现为 农业绿色技术发展驱动力不足，绿色技术和绿色技 术效率产生较大幅度的下降；在农业绿色全要素生 产率有一定的回升时，不容忽视的是绿色前沿技术 倒退和绿色技术效率损失仍然存在。

2. 农业绿色全要素生产率具有较明显的空间 区域差异特征。在自然生态环境较好、以农为主的 丘陵山区，早期依靠绿色 前沿技术进步驱动，年均 农业全要素绿色生产率达到最高水平。在 2013 年 之后，有经济区位优势的区域年均农业绿色全要素 生产率大幅提升，丘陵山区提高率下降。“双碳”目 标下，空间差异明显，低碳区域增长较快，中碳区域 次之，高碳区域增 长相对较慢，2009—2018 年经济 区位优势的低碳地区的年均农业绿色全要素生产 率最高，跃居首位，绿色发展成为经济发展的 核心 支撑。

3. 农业绿色全要素生产率异化受多种因素的影响。农业机械化程度、农业化肥投入、农村人力资本水平具有显著的正向促进作用,水土流失治理水平和高新技术产业增加值有显著的负向阻碍作用。第二三产业发展水平有不显著的正向作用,且不同区域农业绿色全要素生产率的影响因素存在差异,技术改造投资、对外开放水平有不显著的负向影响。

## (二) 对策建议

1. 提高农业主推技术到位率。需要加快落实农业科技成果转化的“最后一公里”,缩短农业技术应用的滞后期,使技术能够及时应用到实际农业生产过程中,推动农业生产方式转变,节省农业生产要素,提高土壤利用率及农作物单产率,“双碳”目标下,严守耕地保护红线,加强高标准农田建设,有效发挥农业主推技术对于农业绿色生产的可持续效益。

2. 加大农业技术创新力度。积极搭建现代农业要素支撑保障和创新平台,推动农村生产要素高效配置,加大农业技术创新投入,鼓励农业科研院所、农技龙头企业、农业专业合作社等多方创新主体联合发展,改革创新激励制度,激活各创新主体的创新活力,促进种业、种植业、养殖业等多领域生产模式更新换代,促进现代农业产业园和农产品加工园区的建设。

3. 完善农业基础设施建设。目前大多数农村的基础设施仍然较为薄弱,这有可能会成为农业产业向现代化迈进的阻力,因此需要加快农村基础设施建设,以“双碳”目标为导向,严守生态保护红线,加强水源涵养和湿地保护工作,提高生态系统稳定性。加大对于农机的创新研发投入,更新替换低端农机装备,推动主要农作物产前、中、后环节机械化率,促进农业机械化高质量发展。

4. 创新新型农民培训引进方式,统筹城乡资源环境协调发展。要加大对当地村民培训力度,培养一批爱农懂农、本领过硬的新型农民群体;同时,各地政府应当进一步推进农业人才引进制度改革,为吸引外来人才、留住本地优质劳动力提供良好的外在保障,增强农民整体素质水平,提升农业主体对新农业技术的接受率与农业资源配置效率,引领农业高质量发展。要统筹城乡区域和资源环境,使城镇化与农业现代化相互协调,使农业绿色全要素生产率空间布局有序均衡发展,推动经济社会发展战略与空间发展布局相适应。

5. 以要素减量增效为重点,降低农业碳排放量。优化农业生产要素配置,做好科学施肥技术集成,推广高效施肥,减少化肥投入,让绿色低碳成为高质量发展的普遍形态。积极研发高效低毒农药,提高施药的质量和效率,减少农药投入。加大对节能环保农业机械的补贴力度,减少高排放农机使用量。加强农业技术人才的培育,以农业绿色低碳发展为核心,开展形式多样、成效明显的绿色低碳农业技术培训,提高农民绿色低碳技术应用水平。还要充分运用农业科技创新提高绿色农产品生产减排固碳的潜能,构建良性的绿色产业链。

## 参考文献:

[1]CharnesA, CooperWW, Rhodes E.Measuringthe efficiency of decision making units[J]. Eur JOper Res, 1978 (, 06) .

[2]Douglas W. Caves, Laurits R. Christensen, W. Eriwin Diewert. The economic theory of index numbers and the measurement of input, out put, and productivity[J]. Econometrica, 1982, (50) .

[3]Banker R D,Charnes A,Cooper W W Somemod- els for estimating technical and scaleinefficiencies in data envelopment analysis[J].Ma nage Sci, 1984, (09) .

[4]CoelliT, JD, SRaosndGetal. Introduction to efficiency andproductivity analysis (2nd ed) [M]. New York: Springer

---

Science Business Media, 2005.

[5] Chung Y H, Fare R, Grosskopf S. Productivity and undesirable outputs: a directional distance function approach[J]. Journal of Environment Management, 1997, (51).

[6] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001, (03).

[7] Pastor J, Lovell A. A Global Malmquist Productivity Index. Economics Letters, 88 (2).

[8] Oh D. A Global Malmquist-Luenberger Productivity Index[J]. Journal of Productivity Analysis, 34 (3).

[9] Nanere M, Fraser I, Quazi A, et al. Environmentally adjusted productivity measurement: an Australian case study[J]. Journal of Environmental Management, 2007, (02).

[10] D H Oh, Heshmati A. A sequential Malmquist-Luenberger productivity index: Environmentally sensitive productivity growth considering the progressive nature of technology[J]. Energy Economics, 2010, (06).

[11] Choi Y, D H Oh, Zhang N. Environmentally sensitive productivity growth and its decompositions in China: a metafrontier Malmquist-Luenberger productivity index approach[J]. Empirical Economics, 2015, (03).

[12] Rolf Fare, Shawna Grosskopf, Mary Norris, et al. productivity growth technical progress, and efficiency change in industrialized countries[J]. The American Economic Review, 1994, (84).

[13] Rezek J P, Perrin R K. Environmentally adjusted agricultural productivity in the great Plains[J]. Journal of Agricultural & Resource Economics, 2004, (02).

[14] 王兵, 吴延瑞, 颜鹏飞. 中国区域环境效率与环境全要素生产率增长[J]. 经济研究, 2010, (05).

[15] 吴传清, 宋子逸. 长江经济带农业绿色全要素生产率测度及影响因素研究[J]. 科技进步与对策, 2018, (17).

[16] 邓灿辉, 马巧云, 魏莉丽. 基于碳排放的河南省粮食绿色全要素生产率分析及对策建议[J]. 中国农业资源与区划, 2019, (09).

[17] 纪成君, 夏怀明. 我国农业绿色全要素生产率的区域差异与收敛性分析[J]. 中国农业资源与区划, 2020, (12).

[18] 肖琴, 周振亚, 罗其友. 长江经济带农业绿色生产效率及其时空分异特征研究[J]. 中国农业资源与区划, 2020, (10).

[19] 陈婷婷. 资源环境约束下我国西部地区农业全要素生产率增长及其影响因素[J]. 贵州农业科学, 2015, (07).

[20] 赖斯芸, 杜鹏飞, 陈吉宁. 基于单元分析的非点源污染调查评估方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, (09).

[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, (08).

---

[22]丁黎黎, 杨颖, 郑慧, 等. 中国省际绿色技术进步偏向异质性及影响因素研究——基于一种新的 Malmquist-Luenberger 多维分解指数[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, (09).

[23]赵路, 高红贵, 肖权. 环境规制对绿色技术创新效率影响的实证[J]. 统计与决策, 2021, (03).

[24]李晗, 陆迁. 产品质量认证能否提高农户技术效率——基于山东、河北典型蔬菜种植区的证据[J]. 中国农村经济, 2020, (05).

[25]李谷成. 中国农业的绿色生产率革命: 1978—2008年[J]. 经济学(季刊), 2014, (02).