DOI:10.20069/j.cnki.DJKX.2026017

数字化如何赋能农业绿色发展

史常亮
湖南省社会科学院 经济研究所，湖南 长沙 410003

移动端阅读

摘要：数字化是现代农业发展的重要趋势，也是推动农业绿色发展的新生动能。基于省级层面数据测算农业数字化水平，实证检验数字化对农业绿色发展的赋能效应及其影响机制。研究发现，数字化显著促进了农业绿色发展，且主要通过推动农业绿色技术进步实现。机制检验表明，数字化通过提高劳动力和土地要素的配置效率赋能农业绿色发展。异质性分析显示，数字化促进农业绿色发展在高分位地区比低分位地区更为显著，同时其赋能效果在东部地区、土地规模化程度和农村人力资本水平较高的省份明显更强。调节效应检验发现，数字化对农业绿色发展的赋能效果有赖于数字鸿沟的缩小，在跨越数字鸿沟后，数字化对农业绿色发展表现出更强的促进作用。据此提出加速传统农业数字化改造，强化要素配置中介路径传导作用，夯实数字化赋能农业绿色发展的基础条件，推进区域农业数字化协同发展等政策建议。

关键词：数字化；农业绿色发展；农业绿色技术进步；绿色全要素生产率；要素配置效率；数字鸿沟

文献标识码：A **文章编号：**1002-2848-2026(02)-0131-15

一、问题提出

在解决食品供给问题和农民收入问题后，中国农业迈入生产方式变革的新阶段[1]。一方面，中国农业资源禀赋先天不足，人均耕地占有量和人均水资源量均远低于世界平均水平；另一方面，长期以来高投入、高消耗、高污染的粗放式生产方式导致资源环境约束趋紧，农业生态系统结构失衡加剧。在此背景下，农业生产方式现代化变革不仅要求实现生产过程和产成品的绿色化发展，更需要全面整合相关要素和资源，优化资源配置，提升农业绿色全要素生产率[2]。因此，如何提升农业绿色全要素生产率，成为中国农业生产方式现代化变革的重要命题[3]。

传统生产管理方式难以满足农业部门减排降碳与经济增长协同推进的需要，在一定程度上加大了农业绿色转型的难度[4]。近年来，随着数字经济向农业农村领域渗透，依托物联网、大数据、云计算、人工智能、遥感技术等底层科技，将数字技术与农业绿色发展战略有机结合，以数字化路径促进农业绿色转型成为可能。作为一种赋能技术，数字技术以其强大的信息集成、智能化管理和决策优化功能，深度融入农业生产、流通和消费各个环节，实现“环境可测、生产可控、质量可溯”，为农业绿色发展提供技术支撑。2021年12月，国务院印发《“十四五”数字经济发展规划》，提出要快速推进农业数字化转型，在数字化转型过程中推进绿色发展。2024年7月，中共中央、国务院印发《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》，进一步强调要深化人工智能、大数据、云计算、工业互联网等在农业生产领域的应用，实现数字技术赋能绿色转型。

基金项目：国家社会科学基金青年项目(19CJL019)。

作者简介：史常亮，男，湖南省社会科学院经济研究所副研究员，研究方向为农业经济理论与政策，电子邮箱为scl2313@126.com。

然而，相较于工业与服务业，中国农业数字化进程相对滞后。根据《中国数字经济发展研究报告（2023年）》，截至2022年，中国农业数字经济渗透率（即数字经济占行业增加值比重）仅为10.5%，比工业低13.5个百分点，比服务业低34.2个百分点。数字化赋能农业绿色发展不仅面临数字基础设施不完善不平衡、数字技术应用不广泛不充分等现实障碍，还存在数字化手段与农业产业融合效率低、农业产业数字化转型难等困境。数字化能否成为重塑农业发展模式、推进农业绿色转型的新引擎，仍有待深入研究和检验。与此同时，中国数字经济发展不平衡，这不仅体现在数字基础设施建设方面，也体现在数字技术的有效利用上。《县域数字乡村指数（2020）研究报告》显示，中国数字乡村发展的区域鸿沟明显，且呈现数字鸿沟与经济鸿沟空间交叠现象[5]。数字鸿沟的存在和持续扩大，势必导致落后地区农民无法接触和使用数字技术，进而妨碍数字化对农业绿色发展赋能效应的发挥。

本文利用2000—2022年省级面板数据，实证检验数字化对农业绿色发展的影响及其作用机制，并探讨数字鸿沟在两者关系中的调节作用。本文的边际贡献体现在三个方面。一是从农业生产要素错配的现实视角切入，将数字化、要素配置与农业绿色发展纳入同一框架，从理论和实证上剖析数字化对农业绿色发展的影响效果与作用机制，拓展了农业数字化转型经济后果的研究领域。二是从“接入鸿沟”和“使用鸿沟”两个方面厘清数字鸿沟在数字化影响农业绿色发展过程中的调节机制，为更好发挥农业数字化赋能作用提供政策靶向。三是就识别策略而言，采用因果中介效应模型进行机制分析，避免了传统三步法中介效应分析中可能存在的混淆问题；在标准工具变量基础上，构造基于异方差的Lewbel工具变量作为联合工具变量共同缓解内生性偏误，增强估计结果的可靠性。此外，利用Ghosh投入产出模型对各省份农业数字经济增加值规模进行测算，相较于普遍使用的数字经济指数，能够更加直观地反映农业数字化发展水平。

二、文献综述与理论分析

（一）文献综述

与本文研究主题密切相关的一支文献致力于农业数字化的量化测度。已有研究主要采用综合指数法，即从农业农村数字基础设施、数字技术应用等方面选取若干评价指标，合成数字经济指数以反映地区农业数字化发展状况[6-7]。指数法的优势在于通过较为系统、全面的指标设置，从不同侧面反映农业数字化的发展水平，但其缺点是指标选取与权重设定存在主观性，且忽略了农业对相关数字产品和服务的利用效率。高一铭[8]利用Ghosh投入产出模型，从增加值入手构建了农业数字化发展水平的测度指标与方法。相较于指数法，增加值法能够更直观地反映数字经济规模以及数字化对宏观经济的贡献程度。然而，目前相关研究仍主要集中于数字经济整体规模的测度，分行业核算数字经济规模的研究相对较少，尤其是关于农业数字经济规模测度的研究较为欠缺。

与本文主题密切相关的另一支文献聚焦数字化对农业绿色发展的影响。自党的十八届五中全会首次提出绿色发展理念以来，农业绿色发展问题日益受到重视，如何实现农业绿色转型成为学界和政策制定者关注的焦点。数字技术具有通用性、可扩展性和清洁性等特点，能够促进技术、劳动与绿色要素的联结融合，为农业绿色转型注入新动能。基于农户层面的研究表明，数字化促进了农业的精细化管理，使农民能够更有效地使用化肥与农药，从而减少农业废弃物。Rajkhowa等[9]对印度的调查发现，相较于未采纳数字推广服务的农户，采纳服务的农户生产投入减少了15%～20%。Beriya[10]研究发现，由于自动化流程的采用，杀虫剂和除草剂的投入成本下降了25%～30%。Suwandej等[11-12]的研究显示，与传统喷洒方法相比，无人机可节省高达90%的农业用水和20%～30%的农用化学品。毛慧等[13]对陕西苹果主产区的研究显示，使用数字推广服务以后农户亩均化肥施用费用和施用量均显著更低。

在绿色发展背景下，农业绿色全要素生产率的提升不仅关乎农业经济发展的质量，也是突破资源环境约束、推动农业绿色转型的关键动力。已有大量文献从绿色全要素生产率视角检验了数字化对农业绿色发展的影响，但结论尚未一致。尽管大部分研究认为数字化有助于提升农业绿色全要素生产率[14-15]，并且这种效应随时间推移愈发显著[16]，但也有研究指出，这一效应在中西部地区[17]、非规模经营地区[18]

以及人力资本和信息化水平较低的地区[19-20]并不显著。还有研究发现，数字经济与农业绿色全要素生产率呈U型关系，即只有数字经济发展水平达到一定程度后，其促进作用才会显著[3]。

已有研究为本文提供了重要的思路借鉴，但仍有进一步深化的空间。第一，现有研究侧重检验数字化对农业绿色发展的直接影响，而较少关注要素配置在二者之间的中介作用。与多数发展中国家相似，中国农业生产领域内部存在较高的要素错配[21]。数字化引发的资源配置机制变革不仅有助于缓解农业生产中的要素错配，提高各类要素资源的配置效率，以更少投入实现更多产出，还能够在一定程度上消除要素配置扭曲导致的化学品过度使用与污染问题，从需求和供给两端为农业绿色发展注入新动能。第二，现有研究较少考虑地区间数字鸿沟在数字化与农业绿色发展关系中的调节作用。当不同群体或地区在获取信息和通信服务方面存在不平等时，便会形成数字鸿沟[22]。当前学界虽然普遍认可数字化对中国农业绿色发展的促进作用，但对数字鸿沟问题关注不足，更缺乏对其调节效应的细致检验。第三，从方法论角度看，已有文献多基于多维评价指标体系，通过构建综合指数来间接测度农业数字化转型程度和绿色发展水平。由于被解释变量与核心解释变量均为多指标生成，当二者包含相同指标或共同受到某一指标影响时，可能面临人为构造显著性及固有内生性的问题。

（二）理论分析与假说

从经济学角度看，农业绿色发展意味着在尽量减少非合意产出（即“减排”）的同时，保证合意产出的稳定或持续增长（即“增效”）。数字技术在农业生产中的渗透能够促使技术、劳动与绿色要素联结融合，不仅为农业部门减排提供新的路径，也有利于农业的精细化管理，推动农业生产由粗放型向集约型转变，从增效维度实现绿色转型。据此，可以从对合意产出的影响和对非合意产出的影响两个方面理解数字化对农业绿色发展的赋能作用，如图1所示。

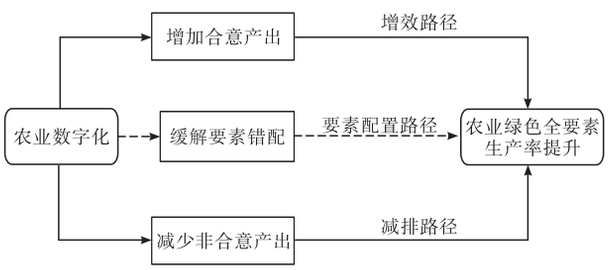


图1　数字化促进农业绿色发展的作用机制

1.数字化对农业绿色发展的影响

一方面，数字化有助于提升农业生产效率、增加农业合意产出。首先，数字化通过应用传感、云计算、全景成像等物联网技术，对农业生产各环节实现精准控制和智能优化，能够有效减少农业生产和流通环节的冗余成本，提高产出效率。其次，数字技术的普及推动了农业生产方式变革，催生数字农业、精准农业、智慧农业等新业态，从而促进农业技术进步和技术效率提升。最后，农村电子商务的发展，尤其是淘宝村、盒马村等电商平台的兴起，促进了农产品销售的多元化和市场化，提高了农产品流通效率和附加价值，有助于实现农产品供需的有效匹配，提升交易效率和盈利能力。

另一方面，数字化能够有效降低农业生产中的非合意产出。首先，数字技术与农业生产过程的深度融合，有助于推动农业从粗放型向智能化精细化转变，实现化肥农药、灌溉用水等要素的精准配比与适量使用，从源头减少污染排放。其次，数字技术可对土壤、水源和气候等环境因素进行实时监测和分析，为种植结构优化、病虫害防治、灌溉和施肥等提供科学依据；物联网技术还能对农业废弃物进行量化管理，指导其无害化处理和资源化利用，促进循环农业和资源节约型农业的发展。最后，政府可通过数字化平台开展节能减排宣传，提升农户的绿色生产意识，并为其提供在线技术服务，帮助农户采用环保、低碳的生产方式，促进农户生产绿色转型。基于上述分析，本文提出如下假说：

假说1：数字化有助于促进农业绿色发展。

2.要素配置的中介效应

在经济学中，“有效配置”是指能够使社会整体产出最大化的要素配置方式，而“错配”则是对最优配置状态的偏离。要素错配不仅造成总量全要素生产率损失，还会对农户生产要素投入产生负反馈，引致化肥、农药等污染性要素的非理性使用，阻碍农业绿色发展。首先，要素错配意味着土地、资本、劳动力等要素未能配置到效率最高的环节，而低效生产往往伴随较低产出和较高资源消耗与污染排放。其次，要

素错配阻碍低效率农户退出、限制高效率农户进入，使原本应被市场淘汰的粗放式经营模式得以延续甚至扩张，从而固化高能耗、高排放、高污染的传统模式。最后，要素错配导致要素价格信号失真，使资源稀缺性无法通过市场价格得以体现，农户因资源使用成本偏低而倾向于过量投入，缺乏采用绿色生产技术和管理方式的动力，导致先进绿色生产技术的推广和应用受阻，从而影响绿色创新扩散。

数字技术与农业的深度融合为改善要素错配提供了契机。首先，农业的数字化改造能够将科技、人才、信息与资本等要素精准嵌入农业产业链，提高要素供需双方的信息匹配效率，缓解因信息不对称导致的资源配置扭曲。其次，依托数字技术和互联网平台，农户能够及时获取天气、市场需求和价格等信息，从而科学安排农事活动，并合理调整土地、劳动力和资本投入，减少无效或低效的资源配置。最后，数字赋能促进生产要素的数字化，有助于突破传统资源要素的稀缺性和排他性，实现信息与知识的低成本扩散，从而缓解传统生产中因“信息孤岛”“信息盲区”造成的资源错配。基于此，本文提出如下假说：

假说2：数字化能够通过优化要素配置促进农业绿色发展。

3.数字鸿沟的调节效应

数字技术应用的扩散也催生了另一种不平等——数字鸿沟。数字鸿沟是指不同国家、地区和个体在数字技术可及性和使用上的差异，一般包括数字接入鸿沟和数字使用鸿沟两类：前者关注数字技术是否能被个体获取，后者则关注群体间在数字技术使用能力、水平和程度方面的差距[22]。数字鸿沟的存在及其持续扩大，不仅限制了部分地区和农民享受数字红利的机会，也可能加剧农业绿色发展进程中的不平衡不充分。一方面，从接入鸿沟层面看，宽带网络等数字基础设施是农业数字化转型的先决条件，也是数字技术发挥作用的基础。一些地区由于数字基础设施建设滞后，当地农民难以获得必要的数字技术支持，从而无法受益于数字化带来的生产效率提升与减排效应，限制了该地区农业绿色转型的潜力。另一方面，从使用鸿沟层面看，相较于发达地区，欠发达地区农民因受教育程度较低，更缺乏数字技术使用的基本知识和技能，这直接影响其利用数字技术优化资源配置、改善生产管理的能力，进而影响农业向可持续模式转变的速度与范围。基于此，本文提出如下假说：

假说3：数字鸿沟在数字化赋能农业绿色发展中起到负向调节作用。

三、研究设计

（一）实证模型设定

本文构建如下回归模型以检验数字化是否能够促进农业绿色发展：

$$GTFP_{it}=\alpha+\beta DT_{it}+\kappa X_{it}+\lambda_i+\eta_t+\varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中，下标i代表省份，t代表年份；被解释变量$GTFP_{it}$表示农业绿色发展水平；核心解释变量DT_{it}表示农业数字化程度；X_{it}表示影响被解释变量且随i与t变动的一系列控制变量；λ_i表示省份固定效应，η_t表示年份固定效应；ε_{it}为随机误差项；α、β、κ为待估计参数。

为进一步考察数字化是否通过提高要素配置效率进而促进农业绿色发展，构建以下回归模型：

$$AE_{it}=\alpha+\delta DT_{it}+\kappa X_{it}+\lambda_i+\eta_t+\varepsilon_{it} \quad (2)$$

其中，AE_{it}代表要素配置效率。根据江艇[23]的研究，当机制变量和被解释变量的因果关系在理论上比较直观时，直接考察政策变量对机制变量的影响即可视为达到了检验作用渠道的目的。因此，若系数δ显著为正，则表明数字化能够通过提升要素配置效率促进农业绿色发展。

在式(1)(2)的基础上，本文进一步采用Imai等[24]提出的因果中介效应分析方法，以更准确识别要素配置是否为数字化影响农业绿色发展的因果传导机制。该方法基于潜在结果和反事实分析框架，将处理变量（数字化）对结果变量（农业绿色发展）的影响分解为直接效应与通过机制变量（要素配置效率）传递的中介效应。与传统三步法中介效应分析方法相比，因果中介效应分析能够更清晰地阐述处理变量如何通过机制变量影响结果变量的因果路径，并通过计算中介效应在总效应中的贡献率，揭示不同机制变量在因果机制中的相对重要性。其效应分解如下：

$$\tau_i(t)=Y_i\{t,M_i(1)\}-Y_i\{t,M_i(0)\} \tag{3}$$

其中，$M_i(1)$与$M_i(0)$分别表示观察样本i处于干预状态$t=1$和$t=0$时机制变量的潜在取值；$Y_i\{t,M_i(t)\}$表示干预状态为t、机制变量为M时的潜在结果；$\tau_i(t)$表示当干预状态为t时，机制变量从反事实情形下的值$M_i(0)$到干预状态下实际观察到的值$M_i(1)$的1个单位的变化，所导致的相应的结果变量的变化，即因果中介效应。

最后，为检验数字鸿沟在数字化与农业绿色发展关系中的调节作用，利用交互项构建以下调节效应模型：

$$GTFP_{it}=\alpha+\beta_1 DT_{it}+\beta_2 GAP_{it}+\beta_3 DT_{it}\times GAP_{it}+\kappa X_{it}+\lambda_i+\eta_t+\varepsilon_{it} \tag{4}$$

其中，GAP_{it}表示数字鸿沟。本文重点关注交互项系数β_3的显著性和大小，若$\beta_3<0$且通过显著性检验，则表明数字鸿沟削弱了数字化对农业绿色发展的促进作用，即发挥负向调节作用。

（二）变量选取与测度

1.被解释变量：农业绿色发展

如前文所述，农业绿色发展是“减排”和“增效”协同的过程，强调既要在供给侧提高全要素生产率的贡献度，又要尽可能地减少对环境的污染，其本质在于优化绿色全要素生产率。因此，可以使用绿色全要素生产率作为农业绿色发展水平的良好代理指标。本文采用基于方向性距离函数的全局Malmquist-Luenberger（GML）生产率指数方法，对各省份农业绿色全要素生产率进行测算。合意产出用不变价第一产业增加值表示。非合意产出用农业碳排放量表示，相比文献中普遍使用的农业面源污染物排放量，碳排放中不包含氮、磷等营养物质，属于纯污染物；农业生产中的各种污染均可用碳排放量代理。

本文采用碳排放系数法估算农业碳排放量，碳排放源包括水稻生长、农地翻耕、农用物资使用（包括化肥、农药、农膜）、农业机械燃烧化石能源（主要是农用柴油）、农业灌溉用电和畜禽养殖（包括猪、羊、牛和家禽），对应的碳排放系数取自吴贤荣等[25]的研究。投入要素包括土地、劳动力和资本，分别用农作物总播种面积、第一产业从业人员数和第一产业资本存量表示。其中，第一产业资本存量参考史常亮[26]的处理方式，采用永续盘存法估算。另外，基于GML指数测算得到的绿色全要素生产率实为增长率，直接回归可能导致“伪回归”问题，本文以2000年为基期进行累乘处理，将其转换为累计增长率形式。

2.核心解释变量：农业数字化

本文在Ghosh投入产出模型框架下，以农业数字经济增加值占行业总增加值的比重度量各省份农业数字化水平。数字化可分为数字产业化和产业数字化，从增加值核算的角度，产业数字化属于经济学中的“远距离”作用影响，并不形成新的数字产品和服务，不宜直接纳入数字经济规模。因此，本文主要从数字产业化角度对各省份农业数字经济增加值规模进行测算①，即实际上测度的是农业增加值中依赖数字产品和服务投入得到的部分。参考高一铭[8]的做法，本文首先根据各行业营业收入占其所属父行业营业收入的比例（即数字经济调整系数），对数字经济核心产业进行剥离和归并，得到包含数字经济的五部门简化投入产出表；然后利用Ghosh逆矩阵，结合各行业的增加值率，计算当数字经济初始投入变化时，各行业增加值的变化量；最后通过设定仅考虑数字经济初始投入边际影响，得到农业增加值中依赖数字产品和服务最初投入的部分，即农业数字经济增加值。

3.机制变量：要素配置效率

要素配置效率以农业生产要素错配指数反向衡量，包括资本、劳动力和土地三种。借鉴白俊红等[27]的做法，本文从要素价格相对扭曲系数的视角对地区层面的农业生产要素错配指数进行测度。以劳动力要素为例，省份i第t年的劳动力要素价格相对扭曲系数$\gamma^*_{L_{it}}$可以表示为：

① 这也是本文测算结果与中国信息通信研究院存在出入的原因，后者包括产业数字化部分。

$$\gamma^{*}_{L_{it}}=(L_{it}/L_t)/(p_{it}\beta_{L_i}/\beta_L) \tag{5}$$

其中，$p_{it}=G_{it}/G_t$表示省份i第t年农业产出G_{it}占当年全国农业总产出G_t的份额；β_{L_i}表示省份i的劳动力要素投入产出弹性；$\beta_L=\sum_i p_{it}\beta_{L_i}$表示经过产出加权的劳动力要素总投入产出弹性；$L_{it}/L_t$代表省份$i$第$t$年农业劳动力人数$L_{it}$占当年全国农业劳动力总人数$L_t$的实际比例；$p_{it}\beta_{L_i}/\beta_L$表示在要素有效配置时农业劳动力投入的理想比例；两者之比$\gamma^{*}_{L_{it}}$反映了劳动力要素配置的偏离程度。当$\gamma^{*}_{L_{it}}=1$时，说明农业劳动力实际投入数量恰好等于其理论值，此时劳动力要素配置处于有效均衡状态；而当$\gamma^{*}_{L_{it}}$偏离1时，则说明劳动力要素配置存在着扭曲，且偏离值越大，配置扭曲程度越严重。由此，地区间的劳动力要素错配程度可以用公式表示为：

$$\tau_{L_{it}}=\left|\gamma^{*}_{L_{it}}-1\right| \tag{6}$$

其中，$\tau_{L_{it}}$为劳动力要素错配指数，其值越大，表示劳动力要素错配程度越严重。为计算式(5)(6)，需要首先确定各要素的投入产出弹性。借鉴史常亮[26]的思路，本文通过构建包含省份虚拟变量与各要素投入交互项的柯布—道格拉斯生产函数，利用最小二乘虚拟变量法估计得到各省份差异化的要素投入产出弹性。

4.调节变量：数字鸿沟

根据前文定义，本文将数字鸿沟分为接入鸿沟和使用鸿沟，分别进行测量。接入鸿沟反映不同省份在信息可及性方面的差异，主要与数字基础设施建设有关。因此，本文考察通信基础设施供给情况，选取人均互联网宽带接入端口数、人均移动电话基站数和人均移动电话交换机容量三项指标进行衡量。使用鸿沟反映不同省份在数字技术应用方面的差异，考察居民对数字基础设施的利用情况，选取每百人互联网宽带接入用户数和户均移动互联网接入流量两项指标进行衡量。借鉴张新红[28]的思路，本文采用相对差距法对不同省份之间的数字鸿沟进行测算。计算公式为：

$$GAP_j=[\max(dd_j)-dd_j]/\max(dd_j) \tag{7}$$

其中，下标j表示用于衡量数字鸿沟的第j项指标；dd_j为观察对象在指标j上的具体数值；$\max(dd_j)$为指标j在样本期内的最大值，作为参照对象；GAP_j表示观察对象与参照对象在指标j上的相对差距，即数字鸿沟系数，其取值范围为0～1，系数越大表明鸿沟越深。

5.控制变量

农业绿色发展受地区农业生产条件、经济结构和政策支持力度等多方面因素影响。为提高研究结论的外部效度，结合已有研究，本文选取三类控制变量。一是农业生产条件。农业对资源禀赋依赖性较强，农业基础设施、劳动力素质与自然条件等对农业绿色发展具有直接影响，选取耕地灌溉率、农民受教育程度和自然灾害率三项变量。二是经济结构。经济结构既影响农业内部调整，也通过产业关联影响农业发展，选取种植业产值比重、粮食种植比例和工业化率三项变量。三是农业政策。政府政策通过多种途径和手段，从资金、市场等渠道影响农业绿色发展，选取财政支农力度和农业对外开放度两项变量。

(三)数据来源

本文选取中国31个省份(不含港澳台)2000—2022年的平衡面板数据展开实证分析，此阶段亦是中国农业信息化建设逐步发展的重要时期。各指标数据来源如下：农业碳排放测算所需基础数据来自《中国农业年鉴》《中国农村统计年鉴》；农业资本存量测算所需的第一产业固定资本形成总额数据来自《中国国内生产总值核算历史资料(1952—2004)》；第一产业从业人员数来自各省份统计年鉴；各省份投入产出表来自国家统计局发布的《中国地区投入产出表》；移动电话基站数来自工业和信息化部发布的《通信业统计公报》；农村各阶段文化程度人口比重数据来自《中国人口和就业统计年鉴》；农产品进出口总额数据来自《中国农业年鉴》《中国农产品进出口月度统计报告(12月)》；其余指标均来自《中国统计年鉴》和国家统计局数据库。本文变量的定义与描述性统计结果见表1。

表1　变量定义与描述性统计结果

变量名称	变量定义或测算方法	观测值数	均值	标准差
农业绿色发展	农业绿色全要素生产率指数，取对数	713	0.054	0.143
农业数字化	农业数字经济增加值/农业总增加值	713	0.007	0.005
要素配置效率	资本要素错配指数	713	1.073	1.516
	劳动力要素错配指数	713	1.596	1.548
	土地要素错配指数	713	3.369	12.840
数字接入鸿沟	人均互联网宽带接入端口数	527	0.842	0.123
	人均移动电话基站数	310	0.649	0.257
	人均移动电话交换机容量	682	0.685	0.156
数字使用鸿沟	每百人互联网宽带接入用户数	372	0.543	0.218
	户均移动互联网接入流量	279	0.761	0.230
耕地灌溉率	耕地灌溉面积/农作物播种总面积	713	0.427	0.187
受教育程度	6岁及以上农村人口加权平均受教育年限，年	713	7.452	0.902
自然灾害率	农作物受灾面积/农作物总播种面积	713	0.212	0.159
种植业产值比重	种植业产值/农林牧渔业总产值	713	0.654	0.131
粮食种植比例	粮食作物播种面积/农作物总播种面积	713	0.286	0.923
工业化率	工业增加值/地区生产总值	713	0.523	0.087
财政支农力度	财政农业支出/地方一般公共预算支出	713	0.097	0.039
农业对外开放度	农产品进出口总额/农林牧渔业总产值	713	0.378	0.123

注：1. 未上过学、小学、初中、高中（中专）、大专及以上文化程度对应折算的受教育年限分别设定为1、6、9、12和16年。

2. 表中涉及的人均指标均以当年常住人口为基准计算获得。

四、实证结果与分析

（一）基准回归

数字化对农业绿色发展影响的基准回归结果见表2。其中，第（1）列未加入任何控制变量，第（2）列在第（1）列的基础上加入耕地灌溉率、受教育程度等控制变量，第（3）列进一步控制年份固定效应。核心解释变量农业数字化的估计系数均在1%的水平下显著为正，表明数字化对农业绿色发展具有显著且稳健的促进作用。根据第（3）列的完整模型估计结果，在其他条件不变的情况下，农业数字化水平每提高1%，以绿色全要素生产率衡量的农业绿色发展水平将提高3.97%。其经济意义在于：农业数字经济增加值占比变动1个标准差，将推动农业绿色发展水平提升13.87%个标准差[①]。由此可见，无论是在统计意义还是经济意义上，数字化均能显著促进农业绿色发展。

表2　基准回归估计结果

变量	（1）绿色全要素生产率	（2）绿色全要素生产率	（3）绿色全要素生产率	（4）绿色技术进步指数	（5）绿色技术效率指数	（6）绿色规模效率指数
农业数字化	4.462***	4.258***	3.968***	3.701**	0.011	0.256
	（1.081）	（0.865）	（0.837）	（1.577）	（0.987）	（1.319）
控制变量	否	是	是	是	是	是
省份固定效应	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	否	否	是	是	是	是
R^2	0.032	0.491	0.157	0.084	0.133	0.083
观测值数	713	713	713	713	713	713

注：1. ***和**分别表示1%和5%的显著性水平。

2. （）内为聚类稳健标准误。

3. 控制变量与常数项回归结果留存备索。

① 经济显著性计算公式为：解释变量回归系数×解释变量标准差/被解释变量标准差。

基于规模报酬可变假设，绿色全要素生产率变化可分解为绿色技术进步、绿色技术效率变化和绿色规模效率变化。技术进步反映创新和技术改进带来的正面影响；技术效率变化是指在现有技术水平下，通过优化农业生产过程带来的效率提升；规模效率变化则由生产规模调整引起。为进一步识别数字化对农业绿色发展的赋能效应究竟源自绿色技术的引入与推广，还是源于绿色技术效率或绿色规模效率的提升，表2第(4)～(6)列将被解释变量依次替换为上述3个分指数并分别进行回归。结果显示，数字化仅对绿色技术进步指数的影响在5%的水平下显著为正，而对绿色技术效率指数和绿色规模效率指数的影响均不显著。这表明，数字化主要通过引导农业技术进步朝绿色方向发展，从而促进地区农业绿色发展。

(二)作用机制检验

理论分析表明，数字化可通过优化要素配置促进农业绿色发展。为检验该作用机制是否真实存在，对式(2)进行回归，结果如表3所示。其中，第(1)(3)列分别以劳动力要素错配指数和土地要素错配指数作为被解释变量时，农业数字化的估计系数分别在1%和5%的水平下显著为负，表明数字化能降低农业生产中的劳动力和土地要素错配程度，即数字化对农业绿色发展的赋能效应部分是通过提高劳动力和土地要素的配置效率实现的。而在第(2)列以资本要素错配指数作为被解释变量的回归中，农业数字化未通过显著性检验，说明其通过提升资本要素配置效率促进农业绿色发展的机制仍不明确。

表3 影响机制检验估计结果

变量	(1)劳动力要素错配指数	(2)资本要素错配指数	(3)土地要素错配指数
农业数字化	−16.834***	0.209	−20.996**
	(4.569)	(15.257)	(10.658)
R^2	0.111	0.360	0.050
观测值数	713	713	713

注：1. ***和**分别表示1%和5%显著性水平。

2.()内为聚类稳健标准误。

3. 已控制省份和年份固定效应，控制变量与常数项回归结果留存备索。

为进一步确定要素配置效率的中介效应是否具有因果关系，表4采用Imai等[24]提出的因果中介效应模型，分别估计劳动力、资本和土地要素错配的平均因果中介效应。第(1)列结果显示，劳动力要素错配在数字化影响农业绿色发展的过程中发挥了显著的因果中介作用，其中介效应率为7.08%，即数字化对农业绿色发展的总效应中，有7.08%是通过提高劳动力要素配置效率实现的。第(3)列结果显示，土地要素错配同样具有显著的因果中介作用，总效应中有1.89%可归因于土地要素配置效率的提升。相较之下，第(2)列结果显示资本要素错配的中介效应不显著，在数字化对农业绿色发展影响中没有起到显著的因果中介效果，其中介效应占比仅为0.09%。整体来看，因果中介效应结果与前文影响机制检验的结论一致，说明数字化主要是通过提升劳动力和土地要素的配置效率来赋能农业绿色发展。此外，三组回归中直接效应均在1%的水平下显著为正，再次证实了数字化本身也能够直接促进农业绿色发展。

表4 因果中介效应估计结果

效应	(1)劳动力要素错配指数	(2)资本要素错配指数	(3)土地要素错配指数
总效应	3.955***	3.964***	3.957***
	[2.246，5.682]	[2.227，5.697]	[2.280，5.642]
直接效应	4.235***	3.960***	4.032***
	[2.470，5.981]	[2.245，5.657]	[2.325，5.720]
平均因果中介效应	−0.281***	0.003	−0.075**
	[−0.540，−0.088]	[−0.211，0.222]	[−0.174，−0.003]
中介效应率(%)	−7.078	0.087	−1.893
	[−12.489，−4.936]	[0.061，0.156]	[−3.291，−1.330]

注：1. ***和**分别表示1%和5%的显著性水平。

2.[ ]内为估计值对应的95%置信区间，基于1 000次准贝叶斯蒙特卡洛逼近仿真获得。

（三）异质性分析

1.不同分位点

基准回归结果反映的是数字化对农业绿色发展的平均影响效应。为进一步考察数字化在不同农业绿色发展水平下的赋能效果是否存在差异，本文采用基于再中心化影响函数的无条件分位数回归方法，估计数字化在不同分位点处对农业绿色发展的边际影响。从表5结果可见，在25%及以下分位点处，农业数字化的估计系数均不显著；而在50%及以上分位点处，农业数字化的估计系数均显著为正，且随着分位点升高，系数呈增大趋势。这表明数字化对农业绿色发展的赋能效应呈现明显的“马太效应”：绿色发展水平较高的省份更能借助数字化实现绿色转型，而绿色发展水平较低的省份获益有限。这可能是因为农业绿色发展基础薄弱的省份往往市场机制不够成熟或产业链条不完整，数字化技术引入力度受到限制；同时，这些地区数字基础设施建设相对滞后，使得数字化技术难以有效实施，进而制约其促进作用。上述结果表明，数字化对农业绿色发展水平高的地区更具有促进作用，这或将进一步扩大区域间农业绿色发展的不平衡。因此，为推动区域农业绿色协同发展，有必要建立更加包容的数字化发展机制，以确保不同地区的农民均能从农业数字化转型中受益。

表5　不同分位点异质性检验估计结果

变量	被解释变量：农业绿色发展				
	10%分位点	25%分位点	50%分位点	75%分位点	90%分位点
农业数字化	−0.451 （0.429）	0.097 （0.505）	2.576*** （0.649）	4.713*** （1.296）	6.359** （2.483）
R^2	0.060	0.142	0.080	0.075	0.094
观测值数	713	713	713	713	713

注：1.***和**分别表示1%和5%显著性水平。

2.（）内为渐近标准误。

3.已控制省份和年份固定效应，控制变量与常数项回归结果留存备索。

2.不同地理区域

中国农业数字化进程具有明显的空间非均衡性，呈现“东中西”梯次递减格局，这可能导致数字化对农业绿色发展的赋能效应存在区域异质性。为此，本文按东部和中西部地区①划分子样本进行异质性检验。考虑到直接分组回归可能导致观测值丢失，本文采用虚拟变量区分东部和中西部地区②，并在全样本中引入区域虚拟变量和农业数字化的交互项进行分层检验。此做法的另一优点是可直接比较效应的大小。表6第（1）（2）列结果显示，数字化对东部和中西部地区农业绿色发展均具有显著促进作用，但东部地区回归系数明显更高，表明数字化在东部地区的促进效应更为显著。这可能是因为东部地区数字农业起步早、发展水平高，数字技术红利能够得到充分的释放；而中西部地区数字经济起步较晚，数字技术仍处于与传统农业融合初期，其红利效应尚未完全显现，对农业绿色发展的促进作用相对较弱。

3.不同规模化程度

土地规模化经营不仅是促进小农户与现代农业衔接的有效途径，还是农业绿色发展的重要驱动力，也构成农业数字化转型的条件和基础[18]。只有当土地规模化经营达到一定程度，才能为数字化技术的应用提供适宜环境，同时降低数字化投入成本；反之，若土地高度分散，不仅数字化设备安装成本高，而且数字化带来的效率提升可能被劳动内卷抵消甚至超越，从而限制赋能空间。在中国现行土地制度下，土地流转是实现土地规模化经营的主要途径。为检验数字化赋能效果在不同土地规模化程度下的异质性，本文依据各省份2005—2022年土地流转率③年平均值的中位数，将样本划分为规模化程度较高组（大于

① 东部地区包括北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东和海南，其余省份划分为中西部地区。

② 省份位于东部地区时赋值1，其他省份统一赋值0，中西部地区按此方法进行。规模化程度和人力资本水平的分组亦采用类似方法。

③ 土地流转率＝家庭承包耕地流转面积/家庭承包耕地面积。数据来源于农业农村部政策与改革司历年发布的《中国农村经营管理统计年报》。

中位数)与较低组(小于中位数),并在全样本中引入规模化程度虚拟变量与农业数字化交互项进行回归。结果如表6第(3)(4)列所示,在规模化程度较高组,数字化在1%的水平下显著促进了当地农业绿色发展;而在规模化程度较低组,该效应不显著。这表明,土地规模化经营确实是影响农业数字化赋能效应发挥的重要因素,只有土地集中达到一定规模,数字化才能显著推动农业绿色发展。

表6 其他异质性检验估计结果

变量	被解释变量:农业绿色发展					
	(1)东部地区	(2)中西部地区	(3)规模化程度较高组	(4)规模化程度较低组	(5)人力资本水平较高组	(6)人力资本水平较低组
农业数字化	4.415***	2.995***	4.533***	1.823	4.783***	2.064**
	(1.378)	(0.872)	(1.117)	(1.345)	(1.327)	(0.875)
R^2	0.144	0.144	0.146	0.146	0.147	0.147
观测值数	713	713	713	713	713	713

注:1.***和**分别表示1%和5%显著性水平。

2.()内为聚类稳健标准误。

3.已控制省份和年份固定效应,控制变量与常数项回归结果留存备索。

4.不同人力资本水平

数字技术具有知识密集的特征,其赋能效应的发挥不仅取决于技术本身,还与农民的技术应用能力密切相关。一般认为,人力资本水平较高的农民在数字素养上具有优势,能够更好地理解和应用数字技术,从而提高农业生产效率和环境友好性;相比之下,人力资本水平较低的农民往往面临技术和知识障碍,降低其接受和采用数字技术的意愿与能力,难以充分发挥数字技术对农业绿色发展的支撑作用。本文依据中央财经大学人力资本与劳动经济研究中心测算的各省份农村劳动力实际人均人力资本存量①,将人力资本存量年平均值高于中位数的省份划入人力资本水平较高组,反之划入较低组;随后在全样本回归中引入人力资本水平虚拟变量与农业数字化交互项。表6第(5)(6)列结果显示,农业数字化的系数估计值在不同分组中呈现出明显差异,高人力资本组约为低人力资本组的2.32倍,且统计显著性更高。这证实了数字化对农业绿色发展的赋能效应依赖农民的人力资本水平,人力资本水平越高,数字化对农业绿色发展的赋能作用越强。

(四)数字鸿沟的调节作用②

1.数字接入鸿沟

接入鸿沟主要指由于地区间数字基础设施发展不均衡,导致部分地区能够接入数字技术,而其他地区无法接入,从而产生信息可及性差距,更多体现为宽带光缆、网络终端设备等硬件设施的差异。本文以人均互联网宽带接入端口数、人均移动电话基站数和人均移动电话交换机容量衡量接入鸿沟,并检验其调节作用。结果显示,无论采用哪种指标衡量接入鸿沟,交互项系数均至少在5%的水平下显著为负,表明接入鸿沟的扩大确实削弱了数字化对农业绿色发展的赋能效果。这也进一步说明,加强地区间数字基础设施建设的均衡性,有助于增强数字化转型对农业绿色发展的促进作用。

2.数字使用鸿沟

使用鸿沟是指由于不同地区经济主体在数字使用能力上的差异而产生的继发性数字鸿沟,主要体现在互联网普及率和有效使用程度的差异上。本文以每百人互联网宽带接入用户数和人均移动互联网接入流量衡量使用鸿沟,并依次检验其在数字化赋能农业绿色发展过程中的调节作用,结果验证了使用鸿沟在数字化与农业绿色发展关系中也起到负向调节作用。这表明,缩小地区间数字使用鸿沟有助于强化数字化对农业绿色发展的促进作用。

① 该数据基于Johnson-Fraumeni收入法,通过预期终生收入现值测算人力资本水平,综合考虑教育、健康、干中学等多种人力资本要素,更全面综合地反映农村人力资本状况。

② 篇幅限制,结果留存备索。

五、内生性与稳健性检验①

（一）内生性检验

基准回归结果可能面临潜在的内生性问题。一是遗漏变量，即基准模型可能遗漏了一些同时影响农业数字化转型和绿色发展的因素，如制度环境、产业政策等。二是测量误差，由于统计部门仅发布逢2、7结尾年份的省级投入产出表，本文使用广义双边比例调整方法将基准年份投入产出表更新为非编表年份的数据，这可能带来系统性的测量误差。三是双向因果，农业绿色全要素生产率较高的地区，可能本身创新效率较高，数字产业集聚进一步推动了农业数字化发展。为解决模型潜在的内生性问题，本文采用工具变量法。借鉴张倩肖等[29]的思路，选取各省份地形起伏度作为农业数字化的工具变量。一方面，地形起伏度会影响数字技术相关基础设施及相关设备的安装、调试和功效，例如平坦地区更易铺设宽带网络或安装无线传感器，而在山区则面临更多的物理障碍，因此地形起伏度越小，越有利于农业数字化转型，满足相关性要求。另一方面，地形起伏度由自然地理条件决定，不受短期人类活动影响，可视为相对稳定且独立于农业生产的变量，满足外生性要求。由于该指标不随时间变化，为兼顾时间与省份双向特征，本文将其与滞后1期的内生变量进行交互生成面板工具变量。面板两阶段最小二乘（2SLS）第一阶段回归结果表明，工具变量在1%的水平下显著为负，符合预期；第一阶段F统计量大于经验临界值10，表明不存在弱工具变量问题。面板2SLS第二阶段回归结果表明，核心解释变量农业数字化的系数在1%的水平下显著为正，说明处理内生性后本文研究结论仍成立。

在因果关系识别中，由于数据限制很难找到严格外生的工具变量。Lewbel[30]提出基于异方差构造工具变量的估计方法，适用于含内生变量且缺乏外生工具或者其他信息的线性回归方程。生成的工具变量Z_i可以由外生变量x_i的平均中心形式和第一阶段回归残差的乘积构建：$Z_i=(x_i-\overline{x})\omega$，其中$\omega$是内生变量对所有外生变量回归的残差向量，包括一个常数向量。Breusch-Pagan检验和Hansen J检验表明，该方法适用。仅使用Lewbel工具变量的回归结果和同时使用Lewbel工具变量、标准工具变量的回归结果显示，在两种回归中农业数字化的估计系数均至少在5%的水平下显著为正，表明使用Lewbel异方差工具变量法处理内生性后，数字化依旧显著促进农业绿色发展。

（二）其他稳健性检验

为确保基准回归结果的可靠性，本文还从五个方面进行稳健性检验。一是为了克服绿色全要素生产率测算对污染物选取指标的敏感性问题，将非合意产出替换为基于清单分析法测算的农业面源污染物排放量。二是替换核心解释变量为农业数字经济指数。从农业农村数字基础设施建设和数字技术应用两个方面，共选取农村互联网宽带普及率、农村电脑普及率、农村移动电话普及率、农村投递线路密度、农业气象观测业务站点个数、淘宝村个数、数字普惠金融指数等7项指标，构建农业数字经济发展水平评价体系，并对标准化处理后的数据进行变异系数法加权求和，得到农业数字经济指数。三是由于技术进步速度快，数字化对农业绿色发展的影响可能存在时滞效应，将农业数字化取滞后1期重新进行回归。四是新冠病毒感染疫情可能会对研究结论的准确性与可靠性造成干扰，删除2020年及以后的样本。五是使用面板交互固定效应模型进行估计，以对传统固定效应模型中那些既随时间又随个体变化的不可观测因素进行控制。所有回归结果均支持数字化显著促进农业绿色发展的基本结论，进一步验证了基准研究具备稳健性。

六、结论与政策建议

在资源和环境约束下，如何全力提高绿色全要素生产率是破解中国农业增长困局、加快农业绿色转

① 篇幅限制，结果留存备索。

型面临的核心议题。数字技术具备环境友好的特点，能够促使技术、劳动、绿色等要素联结融合，为推进农业绿色转型提供了新思路。本文基于2000—2022年省级面板数据，从绿色全要素生产率视角检验数字化对农业绿色发展的赋能效应及其机制，并探讨数字鸿沟在其中的调节作用。本文研究发现有五点。第一，数字化显著促进了农业绿色发展，并且其赋能效应主要体现在促进农业绿色技术进步上，而对农业绿色技术效率和绿色规模效率的影响有限。第二，机制检验表明，数字化能够通过有效缓解农业生产中劳动力要素和土地要素的错配程度来促进农业绿色发展，由二者传导的因果中介效果分别占总效应的7.08%和1.89%；而通过缓解资本要素错配进而赋能农业绿色发展的渠道仍需进一步畅通。第三，分位数回归发现，数字化对农业绿色发展的促进作用具有“马太效应”，在高分位地区的影响力显著强于低分位地区。第四，分样本的异质性分析表明，数字化对农业绿色发展的赋能效果在东部地区、土地规模化程度和农村人力资本水平较高的省份更为显著。第五，基于数字鸿沟的调节效应分析发现，接入鸿沟和使用鸿沟同时在数字化赋能农业绿色发展的过程中起到负向调节作用，在跨越数字鸿沟后，数字化对农业绿色发展表现出更强的促进作用。本文的研究结论具有以下政策启示：

第一，加强数字技术在农业生产领域的融合应用，加速传统农业数字化改造。持续推进农村新型信息基础设施建设，推动水利、公路、电力、冷链物流、农业生产加工等传统基础设施的数字化改造升级，大力发展数字农业、智慧农业，推动数字技术和传统农业深度融合。

第二，精准定位数字化赋能农业绿色发展的结合点，探索赋能作用有效发挥的途径。应重视要素配置在数字化赋能农业绿色发展中的中介渠道作用，以激活农村要素资源为抓手，加快推进农村产权流转交易市场规范化建设，不断降低管理和交易成本，切实提高农业生产要素配置效率，打通数字化与农业绿色发展之间的梗阻。

第三，强化有利于农业数字化赋能作用发挥的基础条件。采取切实有效措施，如引导和支持小农户参与土地流转，健全完善农民教育培训体系，以扩大土地经营规模和提高农民人力资本水平，为更好发挥数字化对农业绿色发展的积极作用创造有利条件。

第四，更加重视农业数字化的区域平衡发展。应针对农业数字化过程中存在的数字鸿沟问题以及赋能农业绿色发展可能引发的“马太效应”，加强数字农业发展的顶层设计和统筹协调，因地制宜制定数字农业发展政策。对于中西部偏远落后地区和数字基础设施薄弱的省份，应加快补齐农业农村数字化基础设施短板，提升数字技术应用水平，逐步消除地区间数字鸿沟；对于东部地区和数字农业发达省份，应强化示范引领作用，充分发挥数字经济的网络效应和溢出效应，利用数字技术构建区域农业合作新机制，协同推进农业绿色发展。

参考文献：

[1] 蔡昉，王美艳. 从穷人经济到规模经济：发展阶段变化对中国农业提出的挑战[J]. 经济研究，2016，51(5)：14-26.
CAI F，WANG M Y. Challenges facing China’s agriculture as it moves towards a new development stage[J]. Economic Research Journal，2016，51(5)：14-26.

[2] 李文睿，周书俊. 数字经济背景下我国农业生产方式变革：机理、矛盾与纾解[J]. 西安交通大学学报(社会科学版)，2023，43(1)：65-73.
LI W R，ZHOU S J. Reform of agricultural production mode in China under the background of digital economy：mechanism，contradiction and solution[J]. Journal of Xi’an Jiaotong University (Social Sciences)，2023，43(1)：65-73.

[3] 王菲，孙淑惠，刘天军. 数字经济发展推进了农业生产方式变革吗：来自黄河流域地级市的证据[J]. 中国农村经济，2023，39(9)：122-143.
WANG F，SUN S H，LIU T J. Has the development of digital economy promoted changes in agricultural production methods? Evidence from prefectures in the Yellow River basin[J]. Chinese Rural Economy，2023，39(9)：122-143.

[4] 卢京宇，郭俊华. 数字经济赋能农业绿色发展的碳减排效应[J]. 江西财经大学学报，2024，26(3)：78-90.
LU J Y，GUO J H. The green agricultural development empowered by the carbon emission reduction effect of digital economy[J]. Journal of Jiangxi University of Finance and Economics，2024，26(3)：78-90.

[5] 黄季焜，苏岚岚，王悦. 数字技术促进农业农村发展：机遇、挑战和推进思路[J]. 中国农村经济，2024，40(1)：21-40.

HUANG J K，SU L L，WANG Y. Digital technologies facilitate agricultural and rural development：opportunities，challenges，and future directions[J]. Chinese Rural Economy，2024，40(1)：21-40.

[6] 苏锦旗，潘婷，董长宏. 中国农业数字化发展及区域差异评价[J]. 西北农林科技大学学报(社会科学版)，2023，23(4)：135-144.
SU J Q，PAN T，DONG C H. Study on the development of agricultural digitalization and the evaluation of regional differences in China[J]. Journal of Northwest A&F University (Social Science Edition)，2023，23(4)：135-144.

[7] 张鸿，王浩然，李哲. 乡村振兴背景下中国数字农业高质量发展水平测度：基于2015—2019年全国31个省市数据的分析[J]. 陕西师范大学学报(哲学社会科学版)，2021，50(3)：141-154.
ZHANG H，WANG H R，LI Z. Research on high quality development evaluation of digital agriculture under the background of rural revitalization：based on the data analysis of 31 provinces and cities in China from 2015 to 2019[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Philosophy and Social Sciences Edition)，2021，50(3)：135-144.

[8] 高一铭. 农业数字化发展水平测度及时空特征分析：基于省级时间序列投入产出表[J]. 金融经济，2023，42(6)：59-72.
GAO Y M. Measurement of the level of agricultural digitalization development and analysis of spatio-temporal characteristics：based on provincial time-series input-output tables[J]. Finance Economy，2023，42(6)：59-72.

[9] RAJKHOWA P，QAIM M. Personalized digital extension services and agricultural performance：evidence from smallholder farmers in India[J]. PLOS One，2021，16(10)：0259319.

[10] BERIYA A. Application of drones in Indian agriculture[R]. Institute of Chemical Technology India Working Paper，No.73，2022.

[11] SUWANDEJ N，MEETHONGJAN K，LOEWEN J，et al. The efficiency of using drones to reduce farming costs and yields[J]. Journal of Positive School Psychology，2022，6(5)：1412-1424.

[12] PATHAK H，KUMAR G，MOHAPATRA SD，et al. Use of drones in agriculture：potentials，problems and policy needs [R]. Indian Council of Agricultural Research-National Institute of Abiotic Stress Management Publication，No.300，2020.

[13] 毛慧，刘树文，彭澎，等. 数字推广与农户化肥减量：来自陕西省苹果主产区的实证分析[J]. 中国农村经济，2023，39(2)：66-84.
MAO H，LIU S W，PENG P，et al. Digital extension and farmers' fertilizer reduction：an empirical analysis of China's major apple producing areas in Shaanxi province[J]. Chinese Rural Economy，2023，39(2)：66-84.

[14] 金绍荣，任赞杰. 乡村数字化对农业绿色全要素生产率的影响[J]. 改革，2022，35(12)：102-118.
JIN S R，REN Z J. The impact of rural digitalization on agricultural green total factor productivity[J]. Reform，2022，35(12)：102-118.

[15] CAI Q H，HAN X Y. Impacts and mechanisms of digital village construction on agricultural green total factor productivity[J]. Frontiers in Sustainable Food Systems，2024，8：1431294.

[16] HONG M Y，TIAN M J，WANG J. The impact of digital economy on green development of agriculture and its spatial spillover effect[J]. China Agricultural Economic Review，2023，15(4)：708-726.

[17] 郭海红. 数字乡村建设、资源要素错配与农业绿色全要素生产率[J]. 中国地质大学学报(社会科学版)，2024，24(1)：102-116.
GUO H H. Digital rural construction，misallocation of resource elements，and agricultural green total factor productivity [J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition)，2024，24(1)：102-116.

[18] 杜建军，章友德，刘博敏，等. 数字乡村对农业绿色全要素生产率的影响及其作用机制[J]. 中国人口·资源与环境，2023，33(2)：165-175.
DU J J，ZHANG Y D，LIU B M，et al. Impact of digital village construction on agricultural green total factor productivity and its mechanisms[J]. China Population，Resources and Environment，2023，33(2)：165-175.

[19] WANG J R，YANG G，ZHOU C J. Does Internet use promote agricultural green development? Evidence from China [J]. International Review of Economics & Finance，2024，93(PA)：98-111.

[20] ZENG F J，ZHOU Y Y，WEI B. Empowering sustainable development：revolutionizing agricultural green total factor productivity through rural digitalization[J]. Frontiers in Sustainable Food Systems，2024，8：1455732.

[21] 胡江峰，王钊，黄庆华. 资源错配与农业全要素生产率：损失和原因[J]. 农业技术经济，2023，42(11)：78-98.
HU J F，WANG Z，HUANG Q H. Resource misallocation and agricultural total factor productivity：loss and cause[J]. Journal of Agrotechnical Economics，2023，42(11)：78-98.

[22] 邱泽奇，张樹沁，刘世定，等. 从数字鸿沟到红利差异：互联网资本的视角[J]. 中国社会科学，2016，37(10)：93-115.
QIU Z Q，ZHANG S Q，LIU S D，et al. From digital divide to dividend difference：from the perspective of Internet capital[J]. Social Sciences in China，2016，37(10)：93-115.

[23] 江艇. 因果推断经验研究中的中介效应与调节效应[J]. 中国工业经济，2022，40(5)：100-120.
JIANG T. Mediating effects and moderating effects in causal inference[J]. China Industrial Economics，2022，40(5)：100-120.

[24] IMAI K，KEELE L，TINGLEY D. A general approach to causal mediation analysis[J]. Psychological Methods，2010，15(4)：309-334.

[25] 吴贤荣，张俊飚，田云，等. 基于公平与效率双重视角的中国农业碳减排潜力分析[J]. 自然资源学报，2015，30(7)：1172-1182.
WU X R，ZHANG J B，TIAN Y，et al. Analysis on China's agricultural carbon abatement capacity from the perspective of both equity and efficiency[J]. Journal of Natural Resources，2015，30(7)：1172-1182.

[26] 史常亮. 数字经济赋能农业全要素生产率增长：效应与机制[J]. 华南农业大学学报(社会科学版)，2024，23(3)：94-109.
SHI C L. Digital economy empowers agricultural total factor productivity growth：effect and mechanisms[J]. Journal of South China Agricultural University (Social Science Edition)，2024，23(3)：94-109.

[27] 白俊红，刘宇英. 对外直接投资能否改善中国的资源错配[J]. 中国工业经济，2018，36(1)：60-78.
BAI J H，LIU Y Y. Can outward foreign direct investment improve the resource misallocation of China[J]. China Industrial Economics，2018，36(1)：60-78.

[28] 张新红. 数字鸿沟测算方法比较[J]. 电子政务，2008，5(11)：16-23.
ZHANG X H. Comparison of digital divide measurement methods[J]. E-Government，2008，5(11)：16-23.

[29] 张倩肖，段义学. 数字赋能、市场分割与出口产品质量[J]. 当代经济科学，2024，46(3)：95-110.
ZHANG Q X，DUAN Y X. Digital empowerment，market segmentation and export product quality[J]. Modern Economic Science，2024，46(3)：95-110.

[30] LEWBEL A. Using heteroscedasticity to identify and estimate mismeasured and endogenous regressor models[J]. Journal of Business & Economic Statistics，2012，30(1)：67-80.

编辑：郑雅妮，王磊

How Does Digitalization Empower the Green Development of Agriculture

SHI Changliang

Institute of Economics, Hunan Academy of Social Sciences, Changsha 410003, China

Summary Facing the dual constraints of resource endowment and ecological environment, how to improve green total factor productivity (GTFP) in agriculture and promote a comprehensive green transformation of agricultural development has become an important proposition for modernizing China's agricultural production mode. Digitalization is an important trend in modern agricultural development, and also a new driving force for promoting green agricultural development. At present, although existing literature has examined the impact of digitalization on agricultural green development from the perspective of GTFP, the conclusions are not yet consistent, and few studies have explored the mediating role of factor allocation between the two, as well as the moderating effect of regional digital divides on their relationship.

Using provincial panel data from 2000 to 2022, this paper empirically examines the impact of digitalization on agricultural green development and its mechanism, and discusses the moderating role of the digital divide in the relationship between the two. The results show that digitalization significantly promotes agricultural green development, and its empowering effect is mainly reflected in promoting agricultural green technological progress, while its influence on agricultural green technical efficiency and green scale efficiency is limited. Mechanism tests indicate that digitalization primarily enhances agricultural green development by alleviating the degree of misallocation of labor and land factors, whereas the channel of promoting agricultural green development by alleviating capital factor misallocation remains to be further unblocked. Heterogeneity analysis reveals that the promoting effect of digitalization on agricultural green development exhibits a "Matthew effect"—its impact is significantly stronger in high-quantile regions compared to low-quantile regions. Additionally, the empowering effect is more pronounced in eastern regions and provinces with higher degree of land scale and rural human capital levels. Moderating effect tests find that both the access divide and the usage divide play a negatively moderating role in the process of digitalization empowering agricultural green development. Once the digital divide is bridged, digitalization exhibits a stronger promoting effect on agricultural green development.

Compared with existing research, this study makes expansions in the following aspects. First, existing literature focuses on examining the direct impact of digitalization on agricultural green development, and the mechanistic "black box" remains not fully opened. This paper explores the influence mechanism of digitalization on agricultural green development from the perspective of factor misallocation, and uses a causal mediation effect model to reveal the relative importance of different factor misallocations in the causal mechanism, opening the mechanism black box of this causal chain, and providing a theoretical perspective for subsequent research. Second, existing studies rarely consider the existing digital divide problem, let alone a detailed examination of its moderating role in the relationship between digitalization and agricultural green development. This study measures provincial digital divides using the relative gap approach, and clarifies the negative moderating effect of the digital divide on the relationship between digitalization and agricultural green development from the two aspects of "access divide" and "usage divide," revealing that the expansion of the digital divide will exacerbate regional imbalances in agricultural green development, offering a new perspective for understanding the "inclusiveness" problem in digital economic development.

This paper systematically analyzes the influence mechanism and heterogeneous effects of digitalization empowering agricultural green development, which not only theoretically enriches the economic consequences and mechanism of agricultural digital transformation, but also provides policy targets for better leveraging the empowering role of agricultural digitalization and solving the problems of factor misallocation and digital divide in agricultural green development.

Keywords digitalization; green development of agriculture; agriculture green technological progress; green total factor productivity; factor allocation efficiency; digital divide