农业资源与环境学报 CSCD核心期刊 中文核心期刊 中国科技核心期刊
JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT
欢迎投稿 http://www.aed.org.cn

数农融合能促进农业绿色发展吗?——基于农业绿色全要素生产率的视角

王利荣, 杨婷

引用本文:
王利荣, 杨婷. 数农融合能促进农业绿色发展吗?——基于农业绿色全要素生产率的视角[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(6): 1687-1700.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13254/j.jare.2024.0788

王利荣, 杨婷. 数农融合能促进农业绿色发展吗? 基于农业绿色全要素生产率的视角[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(6): 1687-1700.

WANG L R, YANG T. Can the integration of digital agriculture promote the green development of agriculture? Perspectives based on green total factor productivity in agriculture[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2025, 42(6): 1687-1700.

开放科学 OSID

数农融合能促进农业绿色发展吗?
——基于农业绿色全要素生产率的视角

王利荣, 杨婷

(南通大学商学院, 江苏 南通 226019)

摘 要:为探讨数字经济与农业融合(数农融合)对农业绿色发展的影响,并进一步探究其作用机制,本研究从农业绿色全要素生产率的视角,基于2011—2021年我国30个省份的省级面板数据,使用熵值法和超效率EBM-GML指数分别测算数农融合水平和农业绿色全要素生产率,运用双向固定效应模型、非线性中介效应模型深入探究数农融合与农业绿色全要素生产率之间的关系。结果表明:数农融合与农业绿色全要素生产率之间存在显著的正"U"形关系;进一步研究发现,数农融合主要通过提高绿色技术效率进而提升农业绿色全要素生产率,对绿色技术进步的促进作用并不显著;对绿色创新水平进行检验发现,数农融合能够提升绿色技术创新水平。异质性分析结果表明,数农融合对农业绿色全要素生产率在不同地区的影响具有差异性,对东部地区呈显著的正"U"形影响。因此,建议大力提高数字技术在农业领域的应用,并制定差异化的区域发展战略,重视绿色创新技术在农业领域的转化应用。

关键词:数字经济;农业转型;数农融合;农业绿色全要素生产率;EBM-GML模型

中图分类号:F323 **文献标志码**:A **文章编号**:2095-6819(2025)06-1687-14 **doi**: 10.13254/j.jare.2024.0788

Can the integration of digital agriculture promote the green development of agriculture? Perspectives based on green total factor productivity in agriculture

WANG Lirong, YANG Ting

(School of Business, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: From the perspective of agricultural green total factor productivity, this study discussed the impact of digital agriculture integration on the green development of agriculture at a macro level, and further explored its mechanism, so as to provide a reference for accelerating the realization of agricultural green transformation and developing green agriculture. Based on the panel data of 30 provinces in China from 2011 to 2021, the entropy method and the super-efficient EBM-GML productivity index were used to measure the level of digital agriculture integration and agricultural green total factor productivity. The relationship between digital agriculture integration and agricultural green total factor productivity was deeply explored by using the two-way fixed effect model and the nonlinear mediating effect model. The results indicated that there was a significant positive U-shaped relationship between the integration of digital agriculture and agricultural green total factor productivity. Further research found that the integration of digital agriculture had no significant effect on the progress of green technology, and the total factor productivity of agriculture could be improved mainly by improving the efficiency of green technology. However, the mediating effect test of the level of green innovation showed that the integration of digital agriculture could improve the level of green technology innovation. The results of heterogeneity analysis showed that the impact of digital agriculture integration on agricultural green total factor productivity in different regions was different. It had a significant positive U-shaped impact on the eastern region. Therefore, it should vigorously improve the application of digital technology in the agricultural field, formulate

收稿日期:2024-10-09 **录用日期**:2024-12-17

作者简介:王利荣(1970—),女,山西晋城人,博士,教授,研究方向为农业经济。E-mail:jcwlr@126.com

基金项目:江苏省社会科学基金项目(22GLB027)

Project supported: Social Science Foundation of Jiangsu Province, China(22GLB027)

differentiated regional development strategies, and attach importance to the transformation and application of green innovative technologies in the agricultural field.

Keywords: digital economy; agricultural transformation; integration of digital agriculture; agricultural green total factor productivity; EBM-GML model

推动经济社会发展绿色化、低碳化是实现高质量发展的关键环节。农业是我国的基础产业，同时也是我国碳排放主要来源之一，2024年7月31日，《中共中央 国务院关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》中特别强调要推动农业农村绿色发展。长期以来，传统“高投入、高消耗、高排放”的农业生产方式，带来了资源约束、环境污染、生态破坏等问题，阻滞了农业的可持续发展。近年来，农业减污降碳措施虽已取得一定成效，但距离实现农业绿色发展仍存在较大差距。现有农业生产要素的驱动力逐渐殆尽，外加资源环境的硬性约束使农业可持续发展的压力叠增[1]，传统农业生产方式已无力支撑农业的可持续发展，亟需新一轮生产要素为农业由粗放式增长向绿色低碳增长转变提供动力。国家持续高度重视农业绿色发展，2021年《“十四五”全国农业绿色发展规划》中将绿色发展作为乡村振兴的重要导向，并制定发展目标。2022年《农业农村减排固碳实施方案》进一步对推进绿色低碳的生产方式提出了明确要求。2022—2024年中央“一号文件”多次强调坚持绿色兴农，以推动农业高质量发展。

近年来，数字技术的快速发展为农业转型升级提供了途径。理论上看，数字经济的强渗透性、普惠性、非排他性等特点能够通过将数据资源这一关键要素纳入农业生产，进而引导各生产要素的跨界自由流动与合理配置，提升资源利用效率，赋能农业生产过程的数字化改进，促进农业生产的绿色化发展。同时信息渠道的畅通有利于为农业生产供给更多技术与服务，支持实现农业生产方式的创新，并增强农户对农业绿色发展的认识，转变生产理念，进而驱动农业绿色化转型。国家层面对加快推进农业数字化、绿色化协同转型发展给予高度重视，出台的《加快经济社会发展全面绿色转型的意见》《数字乡村发展战略纲要》《数字农业农村发展规划（2019—2025年）》《“十四五”规划和2035年远景目标纲要》等文件擘画了以数字化推进传统农业升级，引领数字经济与农业渗透融合，赋能传统产业绿色低碳转型的蓝图。那么实践过程中，数字经济与农业融合（数农融合）能否促进农业绿色发展？科学探究这一问题，对于加快农业现代化发展进程和农业绿色发展、实现农业发展的经济效益和生态环境保护的协调统一具有重要意义。农业全要素生产率是监测农业高质量发展的核心指标[2]，考虑环境资源约束后将传统全要素生产率拓展为绿色全要素生产率，既能衡量农业发展又能反映农业减排固碳效果，更能全面反映农业现代化及绿色发展，因此以农业绿色全要素生产率来衡量农业绿色发展水平[3]。为此，本研究主要探究数农融合能否提升农业绿色全要素生产率？其影响方向和程度如何？数农融合通过何种路径作用于农业绿色全要素生产率？旨在为我国农业转型升级提供有价值的参考。

本研究的主要贡献体现在以下3个方面：①研究视角上，本研究重点从数农融合的角度来研究二者的关系，能更精准地评估数字技术在农业领域应用深度及其对农业绿色发展的贡献；②在研究方法上，将农业碳汇生产量纳入农业绿色全要素生产率的测度指标，采用超效率EBM-GML指数提高测试准确性，并利用非线性双向固定效应模型探究数农融合与农业绿色全要素生产率之间的关系；③厘清了数农融合促进农业绿色全要素率提升的作用机制，为大力支持农业技术创新成果的转化、促进数农融合提升农业绿色全要素生产率提供了支撑。

1 材料与方法

1.1 文献综述

关于农业绿色发展的研究，大多将农业绿色全要素生产率作为衡量农业绿色发展水平的指标，并取得了较为丰富的研究成果。研究内容主要涉及对农业绿色全要素生产率的测度及其影响因素的相关研究。在农业绿色全要素生产率的测度方面，测度方法选取和测度指标构建存在较大分歧。在测度方法上，农业绿色全要素生产率的测度方法主要分为参数估计的随机前沿生产函数（SFA）和非参数法估计的数据包络分析法（DEA），DEA分析方法因其无需提前设定具体函数形式得到广泛应用。常用的DEA方法有MinDS超效率-MetaFrontier-Malmquist模型、SBM-GML指数、EBM模型等。在测度指标体系上，多数学者在投入指标的选取上大多保持一致，但对非期望产

出的选取存在较大差异。其中，赖斯芸等[4]、陈敏鹏等[5]是将农业面源污染作为衡量非期望产出的指标，李波等[6]是将农业碳排放作为非期望产出，目前已被学界广泛认可。而郑甘甜等[7]为充体现农业非期望产出的影响，将农业面源污染和农业碳排放均纳入测算体系。随着农业绿色全要生产率指标的不断完善，沈洋等[8]、周月书等[9]从期望产出和碳排放角度对已有的测算指标体系进行扩充，将农业生产碳汇量纳入期望产出，在碳排放中补充了CH_4、N_2O等温室气体。

在影响农业绿色全要素生产率的因素方面，已有研究从农业生产条件、政策影响等方面对农业绿色全要素生产率展开了丰富研究。其中，王翌秋等[10]研究发现，农业机械化在推进农业向现代化发展的同时，阻碍了农业绿色全要素生产率的提高；杜建国等[11]、金绍荣等[12]从农村人口老龄化角度进行了研究，前者认为农村人口老龄化会抑制农业绿色全要素生产率的提升，后者则得出相反结论。刘慧敏等[13]、李晓慧等[14]则讨论了政府政策的影响，研究发现加速农地流转、实施高标准农田建设政策对提升农业绿色全要素生产率具有积极影响。随着数字经济的重要性和创新性不断凸显，数字经济对农业绿色全要素生产率的影响也得到了学者的关注。Wang等[15]基于OECD数据，分析得出数字经济能够通过提高非化石能源的使用比及优化产业结构赋能我国的绿色发展。王菲等[16]则运用动态面板实证研究，发现数字经济发展对农业绿色集约化水平存在显著的正“U”形影响。金绍荣等[17]、林玉妹等[18]基于农业农村数字化角度，利用省级面板数据，验证了乡村数字化和农业数字化转型对农业绿色全要素生产率的促进作用。

综上所述，当前学界主要聚焦于数字经济、数字乡村、农业数字化与农业绿色生产的关系，但关于数农融合对农业绿色全要素生产率的影响研究成果较少，王定祥等[19]对数字经济与农业融合发展水平进行了测度，本研究在其基础上借鉴其指标构建思路，进一步探究数农融合对农业绿色全要素生产率的影响。

1.2 理论分析与研究假说

1.2.1 数农融合对农业绿色全要素生产率的直接影响

数农融合是新时代实现农业数字化、绿色化转型的重要途径。数农融合是指将大数据、物联网、人工智能等数字技术与农业农村发展深度结合，对农业进行技术、信息等数字化要素供给，创新传统农业要素配置和农业生产方式，以新要素和新技术打造农业发展新模式，推动农业现代化发展的过程[19]。具体主要通过对农业采购、生产、经营、销售、后续管理等各环节进行数字化改造，同时配备相应的数字技术服务，以高效实现农业数字化转型的过程。也就是说，数农融合是对农业全产业链的数字化改造，从生产端和消费端赋能农业绿色发展。在生产端引进数字技术提高农业生产效率，转变农业生产方式，实现减污降碳。同时消费端的反向传导机制将市场对农产品的绿色需求传递至生产端，倒逼农业生产绿色转型，提升农业绿色全要素生产率。

数农融合能够从生产端推进农业生产标准化、生态化，阻滞资源错配并提高要素的利用效率，提升农业绿色生产水平，实现从源头上减污降碳。首先，数字技术融入农业可以精准把控农业生产各环节，合理配置生产要素，提高生产效率；数农融合可以实现生产资料共享，从而降低生产成本，减少资源浪费。其次，农业生产现已进入大规模机械作业阶段，高能耗、高排放农业机械的大量使用会加剧污染物排放，增加生态负担。数农融合依托绿色生产技术改造传统老旧生产机械，利用数据新要素打造智能化节能机械设备，提升机械作业精准度，兼顾机械化、绿色化发展，还可以实现对农业生产过程中产生的废弃物进行可视化处理并回收利用，实现有效减污，推动农业生态价值转化，提高农业绿色全要素生产率。最后，数农融合通过互联网、大数据技术提高了普惠金融的覆盖率，促进金融服务下沉至农村，不仅可以缓解农民的融资约束，为农民尝试新技术提供资金支持[20]，还通过农业保险服务为农业生产提供风险保障，减少农民采用先进技术进行绿色生产的后顾之忧。

数农融合能够从消费端发展平台经济，反向影响农业生产，提升农业绿色发展效率。首先，数农融合推动农村电商的发展，为农业生产者与大市场的对接提供途径。农业生产主体能够通过平台及时获取消费端市场信息，市场的绿色需求信号也能够快速传递给生产端，有利于农业生产主体及时调整生产决策以迎合消费者的高品质需求，提升生产者的绿色生产意识。其次，电商平台提供了丰富的产品信息，带有绿色有机标签的农产品更易受消费者青睐，绿色农产品的溢价和优质效应为生产者创造了更大的利润空间，有助于引导农业生产的绿色化转型。消费者对绿色农产品的认可将促进农产品打造绿色品牌，提升农产品销量，以点带面，进而带动其他观望者进行绿色生产，扩大农业绿色发展的影响。最后，数字平台打通

了供销之间的流通环节，能够实现农产品的精准直供，提高了农产品流通效率，降低了中间交易成本，减少了流通环节的资源浪费，促进农业绿色发展。

需要注意的是，数农融合的发展是长期累积性的过程。数农融合发展初期，由于农村数字基础设施落后，农业比较收益低，农业尚不具备技术承接能力，数字技术与农业融合进程缓慢。而实现农业绿色发展的前期投入较大，发展周期较长，需要长期大量的投入才能获得后期生产边际收益递增的回报。因此，数农融合的初级阶段难以获得积极效应，反而由于需要消耗大量的农业农村资源，会抑制农业绿色全要素生产率的提升；只有数农融合发展至一定水平，对农业绿色全要素生产率的促进效应才能体现出来。当推进数农融合所必需的设备、资本、高素质劳动力累积到一定规模，数字经济才能发挥与农业生产要素的协同作用，充分释放生产潜力，激励农业生产向绿色低碳转型，提高农业绿色全要素生产率。

基于以上分析，提出研究假说H1：数农融合对农业绿色全要素生产率的影响呈正“U”形。

1.2.2 数农融合对农业绿色全要素生产率的影响机制分析

全要素生产率包含技术进步、制度优化、管理改进、教育和技能改进、规模经济等，在实践中常被划分为技术进步和技术效率两大部分。为进一步阐释数农融合对农业绿色全要素生产率的影响路径，参考Oh等[21]、邹静等[22]的做法，将绿色全要素生产率分解为绿色技术进步和绿色技术效率，并从这两方面分析数农融合对农业绿色全要素生产率的影响机制。

（1）绿色技术进步的中介效应

数农融合通过促进农业绿色技术进步进而提升农业绿色全要素生产率。一是数字通信技术融入农业，可以打通农业产业链上各环节间的信息壁垒，解决农业生产中的信息不对称问题，实现整条产业链的信息流通与共享。各节点的知识、绿色技术溢出使得绿色技术创新呈现链条式传递，一些龙头企业和新型经营主体的先进绿色生产方式也将引起其他生产主体效仿，推动生产模式的绿色转型，进而带动整个农业产业链的绿色技术进步。二是数农融合能够通过数据平台提高消费者在农业生产过程中的参与度，借助数字网络的系统性和信息的完整性，利用溯源机制监督农产品生产过程，可以实现对农产品生产、加工、流通各环节的追踪，间接地将绿色生产理念传递到农业生产中。同时，人民生活质量的日益提升对农产品质量提出了更高要求，消费者更加偏好绿色优质农产品，这一需求的变动通过数据平台反馈至生产端，引起各生产主体对农业绿色生产的重视，以此倒逼供给侧加大对绿色技术的研发投入与绿色生产技术的应用，从而促进绿色技术进步。

绿色技术进步是缓解当下农业资源约束、解决农业环境污染问题的重要手段。一方面利用数字化手段提高农业生产绿色化水平，精准调控农业生产过程中要素投入使用情况，实时监测各项灾害风险，能有效减少农业面源污染，降低农业风险损失，助力农业实现稳产增效，推进农业绿色发展。另一方面，绿色技术进步将生态环保理念融入农业技术研发中，通过对农机设备的绿色升级，改良化肥农药品质等以减少污染排放和能源消耗，从而提升农业绿色全要素生产率。

基于以上分析，提出研究假说H2：数农融合通过促进绿色技术进步提升农业绿色全要素生产率。

（2）绿色技术效率的中介效应

绿色技术效率是指在一定的投入组合下实际产出与最大产出之比，反映在现有技术水平下，组织管理水平及各生产要素的利用效率，即要素配置的优化情况。数农融合通过改善绿色技术效率提升农业绿色全要素生产率。一是数农融合能够通过减少中间消耗、优化生产要素投入提升绿色技术效率。数农融合将研发、产储销、服务等环节的利益主体联结起来为实现共同目标而进行资源的合理配置。通过采集农业生产过程中的投入产出信息，并利用大数据、云计算技术进行分析，优化生产要素投入，缓解农户仅依靠经验和习惯进行低效生产而引发的资源错配问题，提高要素生产效率，减少资源浪费。化肥、农药和农膜的减量投入使得农业生产更加环保，降低了非期望产出，促进农业绿色全要素生产率的发展。二是数农融合通过信息技术加速农地流转，推进农业规模化经营，提升绿色技术效率。数字化交易平台能降低土地交易中间环节的成本，流转过程更加公开透明，小农户的流转收益得到保障，提升农地流转效率。相较于小农户分散经营，规模化经营能够负担使用新技术、新机器的高额成本，实现农业生产过程的精准化、集约化、绿色化，提高生产者管理水平，降低农业碳排放，提高绿色技术效率从而促进农业绿色全要素生产率提升。三是数农融合有利于加速农业人力资本的累积，从而提升绿色技术效率。数字技术与农业跨界融合为农村带来新思想、新知识。基于内生增长理

论，优质教育资源向农村延伸扩散，增强了农业生产主体与数字新技术的适配度，既能提高农业生产效率，也能够提高农民的生态意识[23]。互联网技术的应用降低了农民的学习成本，增加了学习机会，有助于提高农户对农业绿色发展必要性、紧迫性的认识，增强农户采纳绿色技术、进行绿色生产的外部推力。农民通过参加实践培训、专业技术指导等途径学习绿色先进生产方式，提升生产技术和管理水平，促进农业绿色发展。

需要注意的是，数农融合水平的高低对绿色技术效率的影响不同。数农融合处于较低水平时，并不能提升绿色技术效率，只有数农深度融合即两者融合水平较高时才对绿色技术效率起促进作用。这是因为在初始阶段，支撑数农融合的各项数字基础设施等硬件设备、专业技术人员配备、相关政策规范等尚未落实到位，引进数字技术的高额成本和对生产资源的占用反而会降低农业生产效率，且农民需要弥补在农业生产中运用数字技术带来的额外成本，容易导致农民过度投入化肥、农药、机械等加剧农业面源污染，降低绿色技术效率。随着数农融合程度的加深，数字经济在农业领域获得嵌入式发展和深层次应用，数字技术服务体系日趋完善，相关技术的供应和售后市场较为成熟，降低了农业生产主体应用数字技术的门槛，数农融合应用的普及度升高，通过精准把控农业生产过程，减少投入端的资源消耗，实现农业化学品的减量，推进资源的有效配置，提高绿色农产品的产量，实现绿色技术效率的优化。

基于以上分析，提出研究假说H3：数农融合通过提升绿色技术效率而促进农业绿色全要素生产率提升，且数农融合对绿色技术效率呈正“U”形影响。

1.3 研究设计与数据

1.3.1 数农融合水平的测算

数农融合赋能传统农业转型升级，激发农业农村内生动力。数农融合水平仅用单一变量无法全面衡量，本研究以相关政策文件为指引，参考王定祥等[19]、朱红根等[24]、慕娟等[25]的指标构建思路，构建出涵盖3个子系统14个变量的数农融合水平综合评价指标体系，并利用熵值法进行测算，为体现数农融合的渗透程度，除农村数字普惠金融指数外各变量均以比例的形式纳入体系进行计算，体系构建见表1。

数字化载体是推动数农融合的必要条件和技术支撑。农村移动手机普及率、农村计算机拥有量、农村互联网普及率、农村有线广播电视覆盖率等指标在一定程度上能够反映出农村数字基础设施的投资建设情况和信息工具的普及度，农业气象观测站数量、农村物流建设投递线路密度分别衡量农业生产服务设施和农村物流设施的建设水平。

产业数字化发展是促进数农融合的核心体现，以数字化交易、设施农业发展密度及农村网络支付数量及规模来衡量数字经济在农业生产销售环节的应用

表1 数农融合水平综合评价指标体系（2011—2021年）

Table 1 Comprehensive evaluation index system of digital agriculture integration level (2011—2021)

一级指标 Primary indicator	二级指标 Secondary indicator	指标解释 Indicator explanation	指标属性 Indicator attibute
数字化载体	农村移动手机普及率	农村居民家庭平均每百户移动电话拥有量（部）	正向
	农村计算机拥有量	农村居民家庭平均每百户家用电脑拥有量（台）	正向
	农村互联网普及率	农村互联网宽带接入用户（万户）/互联网宽带接入用户（万户）	正向
	农村有线广播电视覆盖率	农村有线广播电视入户率（%）	正向
	农业气象观测站	农村气象观测业务（个）/市级数量（个）	正向
	农村物流建设投递线路密度	农村投递路线长度（km）/城市和农村投递路线总长度（km）	正向
产业数字化发展	数字化交易	农村电子商务销售额和采购额（亿元）/人均GDP（元）	正向
	数字基地	所有行政村中淘宝村占比	正向
	国家现代农业示范项目	国家现代农业示范区和产业园数量、现代国家农业科技园、国家农村产业融合发展示范园数量、农业产业强镇、农业优势特色产业集群及龙头企业数量（个）/地（县）级区划数量（个）	正向
	设施农业发展密度	设施农业温室面积（m^2）/乡村人口数（人）	正向
	农村网络支付数量及规模	农村数字普惠金融指数	正向
农业数字化服务水平	数字服务消费水平	农村居民人均交通通信消费支出（元）/农村居民人均消费支出（元）	正向
	农业数字人才比例	农业科技活动人员数（人）/第一产业从业人员数（人）	正向
	农业物联网等信息技术服务能力	每一邮政网点平均服务人口（万人·个$^{-1}$）	负向

情况和农村普惠金融的发展水平。数字基地可以体现出各地区电商平台的发展，国家现代农业示范基地是以物联网等现代科学技术和数智化装备为支撑的农业发展新模式，体现新兴农业数字化发展业态的载体数量，与数字基地指标一同反映产业数字化的发展环境。

农业数字化服务水平是加速数农融合的外在动力，用数字服务消费水平、农业物联网等信息技术服务衡量农村居民对数字产品的消费能力和数字服务的渗透度。用农业数字人才比例来衡量高素质农业劳动力的投入水平，反映了发展数农融合的人才储备度。三个子系统间相互联系、相互影响，从不同维度共同赋能传统农业的数字化转型，综合体现数字技术与农业生产、销售、服务环节的渗透融合水平。

1.3.2 农业绿色全要素生产率的测度

种植业在农业产业结构中的重要性不言而喻，加之种植业生产过程中化学品和机械的大量投入造成土壤、大气和水污染等影响农业绿色可持续发展等问题亟待解决，本研究将研究对象定位为狭义农业，即种植业。本研究参考周祎庆等[26]、王菲等[16]的方法，采用超效率EBM-GML指数测算农业绿色全要素生产率。具体指标体系见表2。

（1）投入变量

投入指标选取劳动力、土地、水资源、机械总动力、化学品投入，其中劳动力投入用农业总产值占农林牧渔总产值的比例与第一产业从业人员数的乘积表示；土地投入以农作物总播种面积表示；水资源投入用有效灌溉面积表示；机械动力投入同劳动力投入的处理方式，以农业总产值占农林牧渔总产值的比例乘以农业机械总动力分离出本研究的狭义农业机械动力投入；化学品投入用化肥、农药、农膜使用量来表示，鉴于投入产出指标量过多会导致降低对效率的识别，因此参照李谷成[27]利用熵值法将化肥折纯量、农药、农膜使用量三者综合为化学品投入指数。

（2）期望产出变量

期望产出选取农业总产值及农业生产碳汇量两个指标。农业总产值调整为以2011年不变价的农业总产值表示；农业生产碳汇量用农作物净初级生产量表示，计算公式为：

$$C=\sum_{i}^{m}C_i=\sum_{i}^{m}Y_i\times c_i\times(1-w_i)/HI_i \quad (1)$$

式中：C表示农作物碳吸收总量，t；C_i为某种农作物的碳吸收量，t；m代表核算的农作物种类总数；Y_i为作物经济产量，t；c_i为第i种作物的碳吸收率；w_i为第i种作物经济产品部分的含水量；HI_i为作物的经济系数。为便于计算，主要经济作物的经济系数、含水量、碳吸收率等不考虑地区的差异性，数据来源于田云等[28]（表3）。

（3）非期望产出变量

非期望产出变量选取农业碳排放和农田化肥污染，囿于农药污染数据可获得性差和测算难度大，文中未考虑。其中，碳排放计算方法参考李波等[6]的测算方法，土壤排放的N_2O及稻田排放的CH_4转化为标准碳进行测算。关于土壤N_2O排放量，本研究综合各地资源禀赋情况，选取6种主要农作物测算其N_2O排放量，品种和N_2O排放系数（kg·hm^{-2}）分别为稻谷（0.24）、春小麦（0.40）、冬小麦（2.05）、大豆（0.77）、玉米（2.53）、蔬菜（4.21）。关于水稻CH_4排放，利用各省

表2 农业绿色全要素生产率测算指标体系

Table 2 Measurement index system of agricultural green total factor productivity

指标类别 Indicator category	指标名称 Indicator name	指标解释 Indicator explanation
投入指标	劳动力	第一产业从业人员数（万人）×（农业总产值/农林牧渔总产值）
	土地	农作物总播种面积（10^3 hm^2）
	水资源	有效灌溉面积（10^3 hm^2）
	农业机械总动力	农业机械总动力（10^4 kW·h）×（农业总产值/农林牧渔总产值）
	化肥使用量	化肥折纯量（10^4 t）
	农药使用量	农药使用总量（t）
	农膜使用量	农膜使用总量（t）
期望产出	农业总产值	农业总产值（亿元）（以2011年为基期不变价）
	农业生产碳汇量	农作物碳吸收量（10^4 t）
非期望产出	农业碳排放量	化肥、农药、柴油、农膜、灌溉等农业生产活动及水稻CH_4排放、土壤N_2O排放转换为标准碳排放的农业碳排放量（10^4 t）
	农田化肥污染	氮肥、磷肥、复合肥中总氮、总磷的排放量（10^4 t）

表3 主要作物的经济系数、含水量及碳吸收率

Table 3 Economic coefficients, water content and carbon uptake rates of major crops

指标 Indicator	小麦 Wheat	稻谷 Rice	玉米 Corn	豆类 Bean	油菜籽 Rapeseed	花生 Peanut	棉花 Cotton	薯类 Potato	甘蔗 Sugarcane	蔬菜 Vegetable	瓜类 Melon
经济系数	0.40	0.45	0.40	0.34	0.25	0.43	0.10	0.70	0.50	0.60	0.70
含水率	0.12	0.12	0.13	0.13	0.10	0.10	0.08	0.70	0.50	0.90	0.90
碳吸收率	0.49	0.41	0.47	0.45	0.45	0.45	0.45	0.42	0.45	0.45	0.45

水稻种植面积乘以对应的水稻CH_4排放系数，该系数参考相关研究[28]可得。

关于化肥污染，采用单元调查评估法来计算污染排放量，具体公式为：

$$E=\sum E_{ij}=\sum EU_{ij}\times\eta_{ij}=\sum T_i\times\rho_{ij}\times\eta_i \quad (2)$$

式中：E为化肥污染排放总量，t；E_{ij}为单元i产生并流失造成水体污染的第j种污染物的排放量，t；EU_{ij}为单元i产生的造成潜在污染的第j种污染物量，t，即产污量；T_i为氮肥、磷肥、复合肥的施用折纯量，t；ρ_{ij}为产污系数，参考相关研究，氮肥、磷肥和复合肥的总氮产污系数分别为1、0和0.33，总磷产污系数分别为0、0.44和0.15；η_i为产污单元i的污染排放系数（%），用各省的化肥流失系数来表示[30]。

1.3.3 计量模型设定

为考察数农融合水平对农业绿色全要素生产率的影响，选择面板回归模型进行实证分析，LM检验、F检验及Huasman检验的结果均拒绝采用随机效应模型的原假设，因此本研究选取固定效应模型进行实证研究，并用稳健标准误修正异方差问题。利用我国30个省（市、区）2011—2021年的数据，构建双向固定效应模型如下：

$$GTFP_{it}=\alpha_0+\alpha_1 dig_{it}+\alpha_2 dig^2_{it}+\alpha_3 control_{it}+\mu_i+\delta_t+\varepsilon_{it} \quad (3)$$

式中：$GTFP_{it}$为i省（市、区）第t年的农业绿色全要素生产率；dig_{it}表示核心解释变量i省（市、区）第t年数农融合水平；dig^2_{it}表示核心解释变量数农融合的二次项；$control_{it}$代表模型中的控制变量；μ_i、δ_t分别代表个体和时间固定效应；ε_{it}表示随机扰动项；α_0、α_1、α_2、α_3为待估参数。

为进一步分析数农融合对农业绿色全要素生产率的作用路径，借鉴江艇[31]、王菲等[16]的做法，采用两步法检验其中介效应，设定模型如下：

$$Media_{it}=\beta_0+\beta_1 dig_{it}+\beta_2 dig^2_{it}+\beta_3 control_{it}+\mu_i+\delta_t+\varepsilon_{it} \quad (4)$$

式中：$Media_{it}$为中介变量，本研究的中介变量为绿色技术进步和绿色技术效率；其他变量含义同公式（3）。

1.3.4 变量选取

（1）被解释变量

本研究的被解释变量为农业绿色全要素生产率（*GTFP*），由上文投入产出指标体系测算得出并转换为以2011年为基期的定基指数。

（2）核心解释变量

核心解释变量为数农融合水平，通过构建综合指标体系由熵值法测算得出。

（3）中介变量

参考周月书等[9]的做法，将农业绿色全要素生产率的分解项绿色技术进步指数和绿色技术效率指数作为中介变量。

（4）控制变量

根据已有研究，选取的控制变量为：农业产业结构用农业总产值占农林牧渔总产值的比例来表示；农业种植结构用粮食种植面积与农作物播种面积之比表示；农产品贸易开放度根据当期汇率转换为人民币的农业进出口总值占农林牧渔业生产总值的比例来表示；农业机械化程度以农业机械总动力与第一产业从业人员数的比值取对数来表示。农业经济发展水平用各省乡村人均农林牧渔总产值的对数表示；政府支农投入用农林水事务支出的对数表示；乡村用电水平用农业用电总数的对数值衡量。

1.3.5 数据来源与描述性统计结果

我国数字经济自“十二五”时期以来迅速发展，考虑到数据的连续性和可得性，以2011年为起始年度开展研究。鉴于DEA方法对异常数据的敏感性，剔除数据缺失较多的西藏，同时样本不包括港澳台地区。基于此，本研究选取2011—2021年我国30个省（市、区）的面板数据进行研究。国家现代农业示范项目数据来源于农业农村部、国家发改委、科技部等部门网站；淘宝村数据来源于《中国淘宝村研究报告（2009—2019）》和阿里研究院；绿色专利数据来源于CNRDS数据库；农村数字普惠金融发展指数来源于北京大学数

字普惠金融指数报告;农业科技活动人员数以农林牧渔业总产值占地区生产总值的比例乘以研发人员数来表示;农业进出口总值数据来源于各年中国农产品出口月度统计报告,根据当期汇率转换为人民币为单位核算。上海市2013、2014年的部分数据来源于《光辉七十载——上海历史统计资料汇编》,其他数据均来源于EPS数据库、《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国劳动统计年鉴》《中国科技统计年鉴》以及国家统计局网站等。对于部分缺失的数据,本研究采用线性插值法和5年平均增长率法补齐。

从描述性统计结果(表4)来看,农业绿色全要素生产率的最大值和最小值差距较大,说明各地区农业绿色发展水平相差较大,发展较慢的地区农业绿色全要素生产率为0.603,而个别发展较好的地区可达1.693,可见区域差异化明显。数农融合水平的数值整体不高且差异较大,最大值和最小值分别0.490和0.071,可见不同地区的数农融合水平也呈现出较大差距。

2 结果与讨论

2.1 基准回归分析

基准回归结果如表5所示,列(1)、列(2)是数农融合对农业绿色全要素生产率的线性影响,无论是否加入控制变量,结果均不显著。将数农融合二次项加入方程回归发现,此时核心解释变量的结果显著,可能呈正"U"形,如列(3)所示。参照何祚宇等[32]、王菲等[16]的做法,本研究根据Haans等[33]提出的验证"U"形曲线的方法对回归结果是否呈现正"U"形进行检验,判断其是否满足以下三个条件:第一,回归中一次项系数为负,二次项系数显著为正;第二,自变量左端点处的斜率为负,右端点处的斜率为正;第三,曲线拐点的横坐标($-a/2b$)应位于自变量的数据范围内。此外,本研究还借鉴Lind等[34]的做法,采用Utest命令对"U"形关系进行再次检验,以避免当变量之间的关系为凸且单调时,二次项系数也会显著为正的情况而产生误导。检验结果如下:

表5列(3)中显示数农融合水平的一次项系数为负,二次项系数为正,符合第一项条件。其次,数农融合水平取值范围为[0.071,0.490],左右端点处的斜率分别为-1.132、0.696,满足第二个条件。最后,经计算曲线拐点为0.330,位于核心解释变量数农融合的取值范围内,满足第三个条件,证实正"U"形关系存在。Utest检验结果表明,slope下限为-1.131,上限为0.698,t统计量为1.73,P值为0.047,在5%的水平上拒绝原假设。极值点为0.330,与通过回归系数计算得到的拐点值相同,位于数农融合取值范围内,说明存在正"U"形关系(本研究实证中的非线性关系也将采用上述检验步骤进行验证),即数农融合水平对农业绿色全要素生产率存在正"U"形影响,假说H1得到证实。说明在数农融合初期,数字经济与农业初步接洽的过程中面临资源错配、数字基础较为薄弱等问题。农民短时间内难以转变粗放传统的生产观念,对新兴技术的接受度不高,此时数字经济和农业生产的适配度较低。数字技术的引入成本也会增加各农业主体经济压力,可能导致化学品的大量投入以增加农业产出,提高经济收益,对农业绿色全要素生产率的

表4 变量描述性统计结果

Table 4 Descriptive statistical results of variables

变量分类 Variable classification	变量名称 Name	变量含义 Meaning	均值 Mean	标准差 SD	最小值 Min	最大值 Max
被解释变量	*GTFP*	农业绿色全要素生产率	0.973	0.123	0.603	1.693
解释变量	*dig*	数农融合水平	0.181	0.074	0.071	0.490
控制变量	*str*	农业产业结构	53.026	8.608	35.974	73.605
	grow	农业种植结构	64.839	14.194	35.500	97.100
	open	农产品贸易开放度	0.382	1.132	0.004	8.075
	mac	农业机械化程度	5.037	0.527	3.485	6.469
	agdp	农业经济发展水平	9.814	0.433	8.550	11.006
	gov	政府支农投入	6.078	0.551	4.519	7.046
	elec	乡村用电水平	4.886	1.292	1.601	7.543
中介变量	*GTC*	绿色技术进步	0.989	0.140	0.451	1.376
	GEC	绿色技术效率	1.004	0.204	0.676	2.234
	Gpatent	绿色技术创新	0.038	0.017	0.002	0.114

表5 数农融合对农业绿色全要素生产率的基准回归结果

Table 5 Benchmark regression results of digital agriculture integration on agricultural green total factor productivity

变量Variable	（1）	（2）	（3）
dig	0.003	0.043	−1.442**
	（0.012）	（0.159）	（−2.485）
dig^2			2.186**
			（2.469）
str		0.010***	0.010***
		（3.206）	（3.337）
grow		0.003	0.004
		（0.919）	（1.230）
open		0.035	0.042
		（1.209）	（1.491）
mac		−0.212***	−0.210***
		（−2.831）	（−2.820）
agdp		0.317*	0.368**
		（1.963）	（2.233）
gov		0.054	0.070
		（1.045）	（1.306）
elec		0.010	0.008
		（0.833）	（0.763）
常数项	1.000***	−1.983	−2.483
	（29.167）	（−1.283）	（−1.566）
N	330	330	330
R^2	0.260	0.510	0.529
省份数	30	30	30
省份固定	是	是	是
年份固定	是	是	是

注：*、**、***分别表示在10%、5%、1%的显著性水平，括号内为*t*值，下同。

Note: *, **, and *** represent significance levels of 10%, 5%, and 1%, respectively, with *t*-values in parentheses. The same below.

发展起抑制作用。当数字技术与资本、土地等农业生产要素融合水平提高到一定程度后，此时数农融合的规模化、集约化等生产优势充分显现，能够引导农业绿色化、智能化发展，进而提高农业绿色全要素生产率。“U”形曲线的拐点为0.330，与研究期内各省（市、区）的数农融合水平进行比较，发现只有广东、山东、浙江、福建、江苏、北京6个省（市），在2017年后出现了数农融合水平跨越了拐点的现象，大部分省（市、区）都位于拐点的左侧。

控制变量的回归结果显示，农业产业结构和农业经济水平分别在1%和5%的水平上正向影响农业绿色全要素生产率，农业产业结构的优化可以促进生产资源的合理部署提升农业生产效率。农业经济发展水平为推进农业绿色生产技术创新提供了资金保障，能够提高地区的绿色创新水平，推广农业绿色生产方式。农业机械化程度在1%的显著性水平上对于农业绿色全要素生产率产生负向影响，可能是因为目前农户分散种植增加了机械设备的重复使用，加之传统农业机械设备的科技水平较低，农业机械设备大量投入使用产生的废油废气造成了环境污染，制约了农业绿色发展。

2.2 稳健性检验

为保证实证结果的稳健性，从以下三个层面进行检验：①调整样本期间。为避免样本两端存在极端值对模型结果产生干扰，本研究将样本研究时间调整为2012—2020年。②考虑样本选择偏差。考虑到我国北京、天津、上海、重庆四个直辖市经济水平较高且农业发展空间有限，农业发展情况及地区资源禀赋与其他省份差异较大，参照周月书等[9]的做法，剔除四个直辖市后对样本重新回归。③替换被解释变量的计算方法。利用SBM-GML指数重新测算农业绿色全要素生产率。如表6所示，三种检验方式的结果均显示数农融合对农业绿色全要素生产率均存在正“U”形影响，核心解释变量的系数依然显著，与上述回归结果基本保持一致，说明研究结果具有可靠性。

2.3 机制检验

本研究进一步检验数农融合与农业绿色全要素生产率之间的传导机制。两者间的理论逻辑为：数农融合通过促进绿色技术进步和提高绿色技术效率，从而提升农业绿色全要素生产率。检验结果如表7所示，表7中列（1）的被解释变量为绿色技术进步，数农融合对绿色技术进步的影响并不显著，假说2未得到证实。可能的原因是数字技术应用于农业生产的使用成本较高，“大国小农”的国情使得目前只有小部分实现大规模机械化、数字化生产的农业经营主体能够承担使用绿色技术的成本，多数小农户依然采用传统方式进行耕作，绿色农业技术尚未在农业生产实践中进行广泛应用。考虑到技术进步这一结果需要经过研发创新-推广应用-优化进步这一过程才能实现，技术创新并不意味着一定能带来技术的进步，从专利到农地的转化仍需进一步落实技术的应用。因此，借鉴王香艳等[35]选取绿色发明专利申请数占专利申请总数的比值来表示绿色创新水平进行机制检验。列（2）表明在10%的显著性水平上，数字经济与农业的融合能够显著提高绿色创新水平。列（1）（2）结果表明，数农融合促进了绿色技术创新，但绿色技术创新并没有得到充分转化，从而影响了绿色技术进步。

表6 稳健性检验结果

Table 6 Robustness test results

变量 Variable	调整样本期间 Adjustment of sample period	剔除直辖市样本 Exclusion of municipality samples	替换被解释变量的测算方法 Measurement with replacement of explanatory variables
dig	−1.426**	−1.393*	−2.124**
	(−2.078)	(−1.937)	(−2.131)
dig^2	2.202**	2.315**	3.390*
	(2.152)	(2.183)	(2.040)
str	0.009***	0.011***	0.015**
	(3.164)	(3.446)	(2.579)
grow	0.002	0.004	0.005
	(0.716)	(1.281)	(1.025)
open	0.043	0.578	0.082
	(1.533)	(1.425)	(1.486)
mac	−0.187**	−0.161**	−0.370***
	(−2.520)	(−2.337)	(−2.811)
agdp	0.336**	0.424**	0.704**
	(2.062)	(2.132)	(2.134)
gov	0.072	0.080	0.119
	(1.408)	(1.351)	(1.091)
elec	−0.011	0.028	0.017
	(−0.298)	(1.177)	(0.922)
常数项	−2.112	−3.540*	−5.540
	(−1.405)	(−1.821)	(−1.652)
N	270	286	330
R^2	0.464	0.565	0.506
省份数	30	26	30
省份固定	是	是	是
年份固定	是	是	是

列(3)为数农融合水平对绿色技术效率指数的回归结果,数农融合水平在5%的水平上显著为负,其二次项在5%的水平上显著为正,说明数农融合能通过绿色技术效率影响农业绿色全要素生产率,且数农融合与绿色技术效率二者的关系呈正“U”形。为避免存在伪正“U”形关系,利用Haans等[33]提出的检验方法及Utest检验进行验证,结果满足Haans等检验的三个条件。且Utest检验表明,在10%的水平上拒绝单调或倒“U”形关系的原假设,极值点为0.374,与用Haans等检验方法计算的拐点值一致,且位于自变量数农融合的取值范围内,两种方法均证实数农融合水平与绿色技术效率间存在正“U”形关系(图1),假说H3得以验证。即数农融合能够优化农业资源配置,提高农业绿色技术效率,促进农业绿色转型。

表7 中介效应检验结果

Table 7 Results of mediation effect test

变量 Variable	(1) *GTC*	(2) *Gpatent*	(3) *GEC*
dig	0.079	0.049*	−2.415**
	(0.299)	(1.758)	(−2.118)
dig^2			3.232**
			(2.129)
控制变量	是	是	是
N	330	330	330
R^2	0.295	0.629	0.168
省份数	30	30	30
省份固定	是	是	是
年份固定	是	是	是

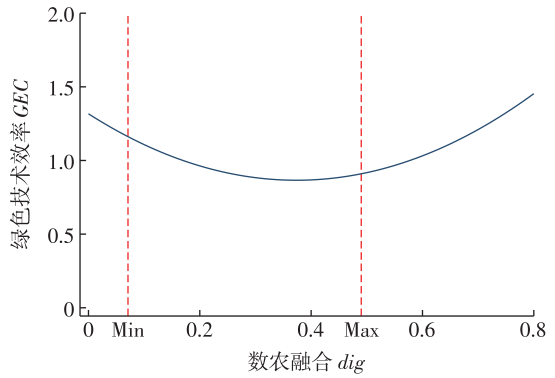

图1 数农融合与绿色技术效率“U”形关系图

Figure 1 “U”-shaped relationship between the integration of digital agriculture and the efficiency of green technologies

2.4 内生性检验

本研究通过加入控制变量试图弱化因遗漏变量所带来的内生性问题,并选取固定效应模型来解决不随时间变化且不可观测变量所导致的内生性偏误,考虑到数农融合是长期性、连续性发展过程,对农业绿色全要素生产率的影响或许存在滞后效应,但仍可能存在内生性问题。此外,研究过程中可能遗漏影响数农融合和农业绿色全要素生产率的相关变量,继而引发内生性问题,故采用工具变量法来缓解内生性问题。关于工具变量的选取,选取滞后一期的数农融合水平作为工具变量,利用两阶段最小二乘法(2SLS)再次检验数农融合对农业绿色全要素生产率的影响。选取滞后一期作为工具变量的合理性在于前期的数农融合水平为当期的融合发展奠定了良好基础,两者存在相关性;前期的数农融合水平不受当期的农业绿色全要素生产率的影响,符合外生性要求。

表8的检验结果表明在第一阶段中,数农融合水

表8 工具变量检验结果

Table 8 Test results of instrumental variables

变量 Variable	第一阶段 Stage Ⅰ		第二阶段 Stage Ⅱ
	dig	dig^2	*GTFP*
滞后*dig*	1.088*** (6.193)		
滞后dig^2		0.728*** (3.765)	
dig			−1.805*** (−2.904)
dig^2			2.636*** (2.998)
控制变量	是	是	是
N	330	330	330
Kleibergen-Paaprk LM			54.66***
Kleibergen-Paaprk Wald Fstatistic			87.36
Cragg-Donald Wald Fstatistic			123.36

平及其平方项的滞后一期通过了1%的显著性检验，正向影响数农融合水平且*F*值大于10，表明工具变量能较好地解释核心解释变量。检验结果Kleibergen-Paaprk LM统计量为54.66，在1%的水平上拒绝了原假设，说明工具变量有效；Kleibergen-Paaprk Wald *F*和Cragg-Donald Wald *F*检验统计量分别为87.36、123.36，大于Stock-Yogo10%显著水平上的临界值19.93，拒绝原假设，因此不存在弱工具变量问题。第二阶段回归结果显示，考虑内生性问题后，数农融合与农业绿色全要素生产率之间依然存在显著的正“U”形影响，表明回归估计结果稳健。

2.5 基于不同地区的异质性分析

我国地区间发展不平衡、不充分问题突出，东中西部地区的发展模式、农业资源禀赋及数字化水平差异较大，对地区农业绿色全要素生产率的影响不同，故采用东中西部地区的子样本数据进行回归。从表9的(1)~(3)列可知，东部地区的数农融合水平对农业绿色全要素生产率存在显著的正“U”形影响，Haans检验和Utest检验表明“U”形关系确实存在；而中西部地区数农融合对当地的农业绿色全要素生产率的发展并不显著。可能的原因是东部地区的经济发展水平较高，为当地发展数字经济提供了有利的资本及人才支撑，数字经济发展愈发成熟，使得东部地区数农融合水平普遍高于其他地区，有利于促进其农业的绿色化、低碳化发展。

异质性分析结果表明数农融合对农业绿色全要素生产率影响具有显著的区域差异性，为进一步探究

表9 不同地区异质性分析结果

Table 9 Heterogeneity analysis results in different regions

变量 Variable	(1) 东部 Eastern region	(2) 中部 Central region	(3) 西部 Western region
dig	−1.423** (−2.491)	0.341 (0.152)	−1.529 (−0.767)
dig^2	2.176** (2.849)	−4.515 (−0.928)	3.871 (0.777)
控制变量	是	是	是
N	121	88	121
R^2	0.532	0.685	0.781
省份数	11	8	11
省份固定	是	是	是
年份固定	是	是	是

引起地区差异的原因，将2015年开始实施的新型城镇化发展政策纳入模型分析。新型城镇化以实现多维度和谐发展为目标，通过优化生产要素配置为地区绿色发展和科技创新拓展了发展空间，对地区数字经济具有积极影响，与绿色发展进程愈发协调[36]。基于此，将设立新型城镇化试点这一政策因素，引入基准回归方程，用虚拟变量D_{it}表示[i代表省(市、区)，t代表年份]，分析其对东中西部地区推进农业绿色发展的影响。根据国家发改委公布的三批国家新型城镇化综合试点名单的时间，将试点时间设定为2015、2016年及2017年，若i省中有市(县)在t年被选为试点，则在t年后的新型城镇化试点中赋值为1，否则赋值为0。回归结果如表10所示，加入新型城镇化试点与数农融合的交互项后，核心解释变量的显著性未改变，但西部地区交互项的系数在1%的水平上显著为正，对其他两个地区的影响并不显著，意味着新型城镇化政策的实施加速了西部地区数农融合，降低了数农融合初期对农业绿色全要素生产率的负面影响。这可能是由于西部地区客观存在数字基础设施较为落后、资源配置效率低下等问题，致使数农融合水平低于其他地区，不利于农业绿色全要素生产率的提升。而新型城镇化试点的开展有效推动西部地区城乡协调发展，发挥城市带动作用，加强农村基础设施建设，促进城乡间各要素的联通与流动，为乡村带来数字技术与产业变革，释放西部地区发展的后发优势，有利于发挥数农融合在提升农业绿色全要素生产率中的促进作用。

通过对数农融合与农业绿色全要素生产率之间的关系进行研究，厘清了数农融合推进农业绿色全要

表10 引入交互项后对不同地区的异质性分析

Table 10 Heterogeneity analysis of different regions after introducing interaction terms

变量 Variable	(1) 东部 Eastern region	(2) 中部 Central region	(3) 西部 Western region
dig	−1.439**	−0.700	−0.743
	(−2.826)	(−0.244)	(−0.378)
dig^2	2.158**	0.384	0.135
	(2.551)	(0.046)	(0.026)
D	−0.155	0.337	−0.774***
	(−1.525)	(1.218)	(−3.955)
D×*dig*	0.025	−1.094	0.704***
	(0.080)	(−0.825)	(3.424)
常数项	−1.251*	0.586	−6.311***
	(−2.176)	(0.389)	(−4.890)
N	121	88	121
R^2	0.532	0.688	0.803
省份数	11	8	11
省份固定	是	是	是
年份固定	是	是	是

素生产率的作用路径，发现了绿色技术效率在其中的贡献，找到了绿色技术进步作用没有发挥出来的原因，为我国进一步深化数农融合，促进农业绿色发展提供了理论支撑。但本研究未对农业绿色技术创新与绿色技术进步的关系做深入研究，后续仍需实证探讨二者之间的关系及转化路径，以期为加快农业科技成果转化落地，充分发挥技术进步对农业绿色发展的促进作用提供参考。

3 结论

（1）数农融合与农业绿色全要素生产率之间存在显著的正“U”形关系，在经过多种稳健性检验后结果依然成立。这说明数农融合水平较低时，由于资源不匹配等问题，增加了农业经营压力，反而会对农业绿色全要素生产率的提升带来阻碍；只有当数农融合水平跨越拐点，数农融合才会推动农业绿色全要素生产率的提升。

（2）从影响机制来看，数农融合主要通过提高绿色技术效率来提升农业绿色全要素生产率，但绿色技术进步的中介作用并不显著。进一步研究发现，虽然数农融合能促进绿色技术创新，但创新技术并没有得到充分转化应用，未发挥促进农业绿色全要素生产率提升的作用。

（3）异质性分析结果显示，数农融合对农业绿色全要素生产率只在经济发展水平较高、数字经济基础较好的东部地区产生显著作用，对中西部地区的作用并不显著。进一步探讨新型城镇化政策的影响，发现由于西部地区数字化基础设施薄弱，该政策的实施促进了数字化技术、数据等现代化要素对当地农业发展的渗透，加速了数农融合的进程，削弱了数农融合初期对农业绿色全要素生产率的负向影响，有利于发挥其对农业绿色全要素生产率的促进作用，但这一政策对东中部地区的影响不显著。

基于上述结论，提出以下对策建议：

（1）大力支持数字技术在农业领域的应用，提高数农融合水平。各级政府要重视数字经济与农业融合对农业绿色发展的促进作用，不断完善数字化发展环境，提升数字农业农村发展的政策支持力度；加强对新型数字基础设施的建设和完善，大力支持数字化服务向农业农村渗透，鼓励农业经营主体积极采用数字技术，有效推动数字经济与农业融合发展。

（2）加快推广绿色创新技术在农业领域转化应用。通过大力支持数字农业创新基地、国家现代农业项目等的建设，加快科技创新成果的转化应用，推广普适性经营模式和生产经验，以点带面形成示范效应，扩大数字技术在农业领域的应用；积极支持建设农业数字技术服务指导中心，为农户提供切实的技术指导。将数农融合发展过程中所需的技术及设备更新升级和数字化服务纳入农业保险覆盖范围，降低数字技术应用风险，提高农户采纳数字技术的积极性。

（3）重点支持中西部地区的农业数字化转型。支持中西部地区新型城镇化，积极推动农业农村数字基础设施建设和完善，改善发展环境；加大农业数字化应用技术的推广力度，支持农民数字技术培训，提升农业经营主体的数字素养，提高地区对数字技术的承接水平；同时在农业现代化项目建设方面向中西部地区倾斜。

参考文献：

[1] 郭海红, 刘新民. 中国农业绿色全要素生产率的时空分异及收敛性[J]. 数量经济技术经济研究, 2021, 38(10): 65-84. GUO H H, LIU X M. Spatial and temporal differentiation and convergence of China′s agricultural green total factor productivity[J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2021, 38(10): 65-84.

[2] 刘亦文, 欧阳莹, 蔡宏宇. 中国农业绿色全要素生产率测度及时空演化特征研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2021, 38(5): 39-56. LIU Y W, OUYANG Y, CAI H Y. Evaluation of China′s agricultural green TFP and its spatiotemporal evolution characteristics[J]. *The*

Journal of Quantitative & Technical Economics, 2021, 38(5): 39-56.

[3] 魏梦升, 颜廷武, 罗斯炫. 规模经营与技术进步对农业绿色低碳发展的影响：基于设立粮食主产区的准自然实验[J]. 中国农村经济, 2023(2): 41-65. WEI M S, YAN T W, LUO S X. The impacts of scale management and technological progress on green and low-carbon development of agriculture: a quasi-natural experiment based on the establishment of major grain-producing areas[J]. *Chinese Rural Economy*, 2023(2): 41-65.

[4] 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, 44(9): 1184-1187. LAI S Y, DU P F, CHEN J N. Evaluation of non-point source pollution based on unit analysis[J]. *Journal of Tsinghua University* (*Science and Technology*), 2004, 44(9): 1184-1187.

[5] 陈敏鹏, 陈吉宁, 赖斯芸. 中国农业和农村污染的清单分析与空间特征识别[J]. 中国环境科学, 2006, 26(6): 751-755. CHEN M P, CHEN J N, LAI S Y. Inventory analysis and spatial distribution of Chinese agricultural and rural pollution[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(6): 751-755.

[6] 李波, 张俊飚, 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, 21(8): 80-86. LI B, ZHANG J B, LI H P. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(8): 80-86.

[7] 郑甘甜, 陈池波, 张开华, 等. 中国农业环境全要素生产率动态演进及收敛性分析[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(1): 40-49. ZHENG G T, CHEN C B, ZHANG K H, et al. Dynamic evolution and convergence analysis of total factor productivity of agricultural environment in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(1): 40-49.

[8] 沈洋, 周鹏飞. 农业绿色全要素生产率测度及收敛性分析：基于碳汇和碳排放双重视角[J]. 调研世界, 2022(4): 58-68. SHEN Y, ZHOU P F. Measurement of agriculture green total factor productivity and convergence analysis: based on the dual perspective of carbon sinks and carbon emissions[J]. *The World of Survey and Research*, 2022(4): 58-68.

[9] 周月书, 尹梓鉴. 农业保险是否促进了中国农业绿色发展?[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2024(1): 49-61. ZHOU Y S, YIN Z J. Does agricultural insurance promote the green development of agriculture in China?[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University* (*Social Sciences Edition*), 2024(1): 49-61.

[10] 王翌秋, 徐丽, 曹蕾. "双碳"目标下农业机械化与农业绿色发展：基于绿色全要素生产率的视角[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2023(6): 56-69. WANG Y Q, XU L, CAO L. Agricultural mechanization and agricultural green development under the "dual carbon" goal: a perspective based on green total factor productivity[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University* (*Social Sciences Edition*), 2023(6): 56-69.

[11] 杜建国, 李波, 杨慧. 人口老龄化下农业人力资本对农业绿色全要素生产率的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(9): 215-228. DU J G, LI B, YANG H. Impact of agricultural human capital on agricultural green total factor productivity under population aging [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2023, 33(9): 215-228.

[12] 金绍荣, 王佩佩. 人口老龄化、农地流转与农业绿色全要素生产率[J]. 宏观经济研究, 2023(1): 101-117. JIN S R, WANG P P. Population aging, farmland transfer and agricultural green total factor productivity[J]. *Macroeconomics*, 2023(1): 101-117.

[13] 刘慧敏, 尚杰. 农地流转对农业绿色全要素生产率的影响研究：兼论门槛效应与空间效应[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(9): 1482-1495. LIU H M, SHANG J. Influence of rural land transfer on agricultural green total factor productivity: effect, spatial characteristics and regional heterogeneity[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(9): 1482-1495.

[14] 李晓慧, 李谷成, 高扬. 高标准农田建设提升农业绿色全要素生产率的研究：基于连续型双重差分的实证检验[J]. 中国农业资源与区划, 2024, 45(5): 32-43. LI X H, LI G C, GAO Y. Research on the high standard farmland construction improve agricultural green total factor productivity: empirical test based on continuous difference in difference model[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2024, 45(5): 32-43.

[15] WANG L, CHEN Y, RAMSEY T S, et al. Will researching digital technology really empower green development? [J]. *Technology in Society*, 2021, 66: 101638.

[16] 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(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(9): 122-143.

[17] 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(12): 102-118. JIN S R, REN Z J. The impact of rural digitalization on agricultural green total factor productivity[J]. *Reform*, 2022(12): 102-118.

[18] 林玉妹, 李承翰. 农业数字化转型对农业绿色增长的影响[J]. 中国农业资源与区划, 2024, 45(4): 28-41. LIN Y M, LI C H. The impact of digital transformation in agriculture on green growth in agriculture[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2024, 45(4): 28-41.

[19] 王定祥, 彭政钦, 李伶俐. 中国数字经济与农业融合发展水平测度与评价[J]. 中国农村经济, 2023(6): 48-71. WANG D X, PENG Z Q, LI L L. Measuring and evaluating the integrated development level of digital economy and agriculture in China[J]. *Chinese Rural Economy*, 2023(6): 48-71.

[20] 唐建军, 龚教伟, 宋清华. 数字普惠金融与农业全要素生产率：基于要素流动与技术扩散的视角[J]. 中国农村经济, 2022(7): 81-102. TANG J J, GONG J W, SONG Q H. Digital financial inclusion and agricultural total factor productivity: the role of factor flow and technology diffusion[J]. *Chinese Rural Economy*, 2022(7): 81-102.

[21] OH D H. A global Malmquist-Luenberger productivity index[J]. *Journal of Productivity Analysis*, 2010, 34(3): 183-197.

[22] 邹静, 王强, 鄢慧丽, 等. 数字经济如何影响绿色全要素生产率？来自中国地级市的证据[J]. 软科学, 2024, 38(3): 44-52. ZOU J,

WANG Q, YAN H L, et al. How does the digital economy affect green total factor productivity? Evidence from prefecture-level cities in China[J]. *Soft Science*, 2024, 38(3):44-52.

[23] 孙淑惠, 刘传明, 陈晓楠. 数字乡村、网络溢出和农业绿色全要素生产率[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(9):45-59. SUN S H, LIU C M, CHEN X N. Digital village, network spillover and agricultural green total[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(9):45-59.

[24] 朱红根, 陈晖. 中国数字乡村发展的水平测度、时空演变及推进路径[J]. 农业经济问题, 2023, 44(3):21-33. ZHU H G, CHEN H. Measurement, spatial-temporal evolution and promotion path of digital village development in China[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2023, 44(3):21-33.

[25] 慕娟, 马立平. 中国农业农村数字经济发展指数测度与区域差异[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2021, 20(4):90-98. MU J, MA L P. Measurement of China's agricultural and rural digital economy development index and regional characteristics[J]. *Journal of South China Agricultural University*(*Social Science Edition*), 2021, 20(4):90-98.

[26] 周祎庆, 聂元昆. 中国绿色全要素生产率动态测算与区域特征分解[J]. 统计与决策, 2022, 38(20):37-42. ZHOU Y Q, NIE Y K. Dynamic calculation and regional characteristic decomposition of green total factor productivity[J]. *Statistics & Decision*, 2022, 38(20):37-42.

[27] 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, 13(1):537-558. LI G C. The green productivity revolution of agriculture in China from 1978 to 2008[J]. *China Economic Quarterly*, 2014, 13(1):537-558.

[28] 田云, 张俊飚. 中国农业生产净碳效应分异研究[J]. 自然资源学报, 2013, 28(8):1298-1309. TIAN Y, ZHANG J B. Regional differentiation research on net carbon effect of agricultural production in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(8):1298-1309.

[29] 罗斯炫, 何可, 张俊飚. 增产加剧污染? 基于粮食主产区政策的经验研究[J]. 中国农村经济, 2020(1):108-131. LUO S X, HE K, ZHANG J B. The more grain production, the more fertilizers pollution? Empirical evidence from major grain-producing areas in China[J]. *Chinese Rural Economy*, 2020(1):108-131.

[30] 梁流涛. 农村生态环境时空特征及其演变规律研究[D]. 南京:南京农业大学, 2009:73-75. LIANG L T. Study on the evolution temporal and spatial of rural ecological environment[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009:73-75.

[31] 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(5):100-120. JIANG T. Mediating effects and moderating effects in causal inference[J]. *China Industrial Economics*, 2022(5):100-120.

[32] 何祚宇, 李敬子, 陈强远. 目的市场异质性消费者偏好与中国出口企业创新[J]. 数量经济技术经济研究, 2023, 40(8):131-153. HE Z Y, LI J Z, CHEN Q Y. Non-homothetic preferences of export destination and Chinese export firms' innovation[J]. *Journal of Quantitative & Technological Economics*, 2023, 40(8):131-153.

[33] HAANS R F J, PIETERS C, HE Z L. Thinking about U: theorizing and testing U-and inverted U-shaped relationships in strategy research[J]. *Strategic Management Journal*, 2016, 37(7):1177-1195.

[34] LIND J J, MEHLUM H. With or without U? The appropriate test for a U-shaped relationship[J]. *Oxford Bulletiin of Economics and Statistics*, 2010, 72(1):109-118.

[35] 王香艳, 李金叶. 环境规制、绿色技术创新与产业结构升级:来自中国"一带一路"节点城市的证据[J]. 统计与决策, 2024, 40(3):128-132. WANG X Y, LI J Y. Environmental regulation, green technology innovation and industrial structure upgrading: evidence from China's "Belt and Road" node cities[J]. *Statistics & Decision*, 2024, 40(3):128-132.

[36] 邓毛颖, 韦晓莉, 张国俊. 中国新型城镇化与绿色发展协调演进关系研究[J]. 自然资源学报, 2024, 39(7):1682-1697. DENG M Y, WEI X L, ZHANG G J. Research on the coordinated evaluation relationship between new urbanization and green development in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2024, 39(7):1682-1697.