引用格式：袁世一，杨淼，韩林峰. 农业数字技术流动对农业区域协调发展的影响研究[J]. 技术经济，2026，45(5)：1-12.
Yuan Shiyi，Yang Miao，Han Linfeng. Study on the impact of agricultural digital technology flow on coordinated regional development of agriculture[J]. Journal of Technology Economics，2026，45(5)：1-12.

产业技术经济

农业数字技术流动对农业区域协调发展的影响研究

袁世一[1]，杨 淼[2]，韩林峰[3]
（1. 中国农业科学院农业信息研究所，北京 100081；2. 北京工商大学商学院，北京 100048；
3. 河南农业大学经济与管理学院，郑州 450046）

摘 要：在数字经济与乡村振兴战略深度赋能的背景下，农业数字技术正在成为协同推进农业现代化与区域协调发展的核心动能。将农业数字技术流动置于农业区域协调发展视角下，以2001—2023年的农业数字技术专利为研究对象，系统考察农业数字技术流动对农业区域协调发展的影响。研究发现，农业数字技术的跨区域流动呈现非均衡特征，形成了以少数发达城市为核心枢纽，大量中小城市位于技术扩散与接收边缘的“中心-边缘”网络格局。定向农业数字技术流动能够有效缩小区域间差距，逆向流动引发的“虹吸效应”不利于缩小区域差距。需求适配性的中介效应大于技术适配的中介效应。从区域异质性来看，东部地区间的技术流动的协调作用有限，中西部地区间的农业数字技术流动协调效应最强，东部向中西部的定向流动效果最优。在农业发展梯度差距较小、农业数字产业基础相对完善及初始化水平相近的地区，定向的农业数字技术流动具有显著的促进作用。研究结论为引导农业数字技术有序流动、促进区域农业均衡发展提供了参考。

关键词：农业数字技术流动；跨区流动；定向流动；逆向流动；需求适配；技术适配
中图分类号：F49；F327 **文献标志码**：A **文章编号**：1002-980X(2026)05-0001-12
DOI：10.12404/j.issn.1002-980X.J25101702

一、引言

党的十八大以来，中国全面推进乡村振兴战略，农业现代化快速发展，但区域发展差距仍是新时期制约我国农业全面现代化的因素之一。2024年的政府工作报告强调全面推进乡村振兴，加快建设农业强国，把缩小农业地域发展差距作为统筹地区农业协调发展的重要内容。《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》明确提出要增强区域发展协调性，促进区域联动发展，深化产业协作。农业数字技术作为农业现代化的核心力量，正在与中国农业生产进行深度融合[1-2]。大数据、物联网、人工智能等数字技术的赋能作用不断凸显。农业数字技术究竟通过怎样的机制影响农业区域协调发展，以及农业数字技术的作用效果是否依赖于需求适配性和技术吸收能力，这些问题的机制性研究尚未得到开展。回答这些问题，不仅有益于丰富和拓展农业数字技术的理论内涵与边界，也为科学全面实施农业强国战略目标提供理论支撑。鉴于此，本文立足于农业区域协调发展的战略视角，通过构建农业数字技术“区域对”，综合利用农业专利数据，系统考察农业数字技术流动对农业区域协调发展的作用机制和影响效应，为优化农业数字技术跨区域配置，促进农业区域协调发展提供理论支持。

从生产要素视角来看，学者们在肯定数字技术对加速数字要素与传统农业生产要素融合方面的突出作

收稿日期：2025-10-17
基金项目：国家自然科学基金“基于大数据技术的粮食安全监测预警研究”(62103418)；中国农业科学院农业信息研究所基本科研业务费“农业数据要素应用能力与供应链韧性研究”(JBYW-AII-2026-17)
作者简介：袁世一(1988—)，博士，中国农业科学院农业信息研究所副研究员，研究方向：数字农业；杨淼(1989—)，博士，北京工商大学商学院讲师，硕士研究生导师，研究方向：技术创新与应用；韩林峰(1997—)，河南农业大学经济与管理学院硕士研究生，研究方向：数字农业。

用的同时发现数字技术不仅优化了乡村的生产要素配置,还提高了农民的收入[3-4]。刘传明和赵书晨[5]认为数字技术通过信息流带动各类生产要素向农村集聚,并发挥积极的作用。黄朝椿[6]指出数字技术激活了生产要素的价值潜能和利用效率,为乡村经济发展提供了新的动能。从适配性视角来看,有学者指出夯实乡村数字基础设施和重视数字技术、产品及平台的嵌入与赋能,是提高数字技术与乡村社会基础的适配性的重要途径[7]。数字技术、数字要素的多元化需求间接促进了数字乡村对乡村振兴的适配性,并为数字乡村的发展提供基础和战略指引[8]。也有学者指出为提升低收入农户人力资本与数字技术的适配性,可针对低收入农户开办数字技术培训班,或者让数字化水平较高的区域率先获取并应用前沿的农业数字技术及管理经验,然后再通过人才流动、技术协作、产业梯度转移等途径向邻近区域扩散[9-10]。卿菁和拓佳辛[11]认为当智能灌溉系统与农业无人机等数字化装备与农业生产场景的适配性不足时,会导致数字技术与传统农事活动难以实现有效耦合。焦晋鹏和左方舟[12]认为数字技术与乡村发展的适配性不足主要体现在标准化数字基建与多样化农村情态脱节、数字技术供给与农户真实需求的割裂,以及数字素养培育受阻。从价值协同的视角来看,李媛和阮连杰[13]认为数字技术在计划、协调、组织和控制生产经营等农业各环节可以推动价值增值和价值创造。李鹏[14]认为数字技术正在对传统线性分工进行解构,从而实现价值创新。也有学者认为乡村数字技术应用是实现价值创造的有力支撑[15]。张燕和潘亚楠[16]指出数字技术与数据要素通过创新性资源编排行为实现了价值创造。王海飞和钱茜[17]认为数字技术为农村产业融合的价值创造提供了机制。

中国农业区域发展的非均衡性十分突出,东部地区的数字化水平、人才支撑与信息通达性方面具有显著优势;中西部地区则受限于自然条件与技术人才,数字化发展相对滞后,单靠技术引入难以打破资源禀赋约束与发展壁垒。部分学者根据经典的增长理论认为资本、劳动力、土地等生产要素的差异是导致区域发展分化的根本原因[18-20]。涂淑涵[21]指出当前中国农业数字技术研发短板明显,区域发展水平相差较大,农民数字素养匮乏等问题突出。尹义臣和何艳荣[22]认为农业数字技术的区域差异化应用需要结合具体落地场景及农村社会结构进行具体的分析和研究。也有部分学者认为数字化程度高、农业数字技术服务体系健全、农业数字化意识先进的东部地区和粮食主产区在推进数农融合进程中表现出较强的“干中学”效应[23]。此外,农业知识和技术扩散往往遵循从科研院所、核心示范区向周边辐射的中心-外围模式,致使偏远地区与欠发达区域长期滞留在技术洼地,难以摆脱低端锁定的发展困境[24-25]。然而,大多数文献虽然聚焦于农业发展的异质性,但尚未同时把农业数字技术、技术流动、区域协调三者纳入整体分析框架内。已有的研究普遍把农业数字经济作为变量引入,未能有效识别及揭示农业数字技术的作用机制及农业数字技术流动对农业区域发展的影响。特别是在区域异质性视角下,农业数字技术的协调作用机制尚不明确。鉴于此,本文将农业数字技术流动置于农业区域协调发展视角下,量化农业专利数据,探究农业数字技术流动对农业区域协调的影响。

本文研究的边际贡献为:第一,将技术系统与农业经济学相结合,对农业数字技术概念进行界定,拓展对数字技术与农业研究结合的解释维度;第二,借助农业数字专利和区域引文数据,构建跨区域的农业数字技术流动指标,揭示中国当前跨区域农业数字技术的网络格局;第三,分别从技术匹配性与需求匹配性视角,对农业数字技术流动破解资源禀赋约束、促进区域协调发展的作用机制进行了阐释,为农业高质量发展提供参考。

二、理论分析与研究假设

(一)农业数字技术的界定

广义上来说,数字技术是一切以计算机和数字系统为媒介对信息进行采集、存储、处理和传输的技术的统称[26]。当具有通用性的数字技术应用到农业领域时,会对农业的生产对象、生态环境及生产过程进行数字化改造,形成新的生产模式、技术体系和产业形态。根据数字技术与产业融合程度,先后演化出数字农业、智慧农业、精准农业等层层递进的技术范式与产业图景。随着农业数字化应用场景持续优化,农业数字技术的内涵也在不断地丰富。与传统农业生产依赖生产经验不同,农业数字技术以数据作为关键生产要素,通过算法模型对农业生产进行全系统化的数字表征,实现生产一体化、可视化和数字化[27]。农业数字技

术的应用不仅基于数据采集、传输、处理与分析，还可以实现对复杂农业生产体系的精准“镜像”映射，从根本上实现农业系统数字化。

从技术系统论视角看，农业数字技术可界定为在农业生产经营体系中能够整合数据采集、传输、集成、决策与服务的技术体系。作为新一轮科技革命的核心驱动力，农业数字技术兼具工具属性与生态属性[28]。从工具属性来看，农业数字技术不仅能提升农业生产效率，而且能够连接并重构产业主体、资源与规则，形成开放创新的技术体系。更为重要的是，农业数字技术可以实现技术范式、管理模式与实践操作的低成本复制与快速扩散。从生态属性来看，农业数字技术依托智能传感器、遥感监测、智能滴灌、无人机巡航等技术，使得农业生产打破时空限制与经验依赖，有效提升资源利用效率，推动农业生产向资源节约、环境友好的可持续发展模式转型。

（二）农业数字技术与区域协调发展

1. 农业数字技术流动

农业区域协调发展一直是农业发展的核心内容。近年来，国家层面从政策引导、技术投入、人才培育等多方面着力推进农业区域均衡发展，特别是在农业数字技术的不断发展下，正积极探索技术引入与知识扩散的优化途径。农业数字技术是数字技术理论在农业领域的具体应用。因此，农业数字技术既具有数字技术的共性特征，又具有农业产业的生态属性。农业数字技术的可复制性与网络连通性，可以弥补传统生产要素的空间不可移动性带来的局限，缩小农业不同区域之间在信息资源获取、智能决策能力与市场接入机会存在的数字鸿沟，在实现农业生产要素的优化重组基础上，推动农业全要素生产率的协同提升[29]。区域发展理论与技术扩散理论都认为，当具有通用性、渗透性与强溢出效应的技术实现跨区域流动，尤其在技术引入与当地生产要素条件相匹配时，能够有效改变传统区位条件的约束，激发后发地区的潜在优势与内生动力，实现区域间的协同发展。

农业数字技术由技术较高的势能区向技术较低的势能区流动，被视为赋能区域协调发展的重要力量。作为技术流，农业数字技术具有渗透性、可复制性和溢出性，能够打破地理与技术壁垒，将先进的农业生产技术、管理知识与创新模式进行空间转移，帮助欠发达农业区绕过传统技术演进路径中某些高成本、长周期的技术积累阶段，实现跨越式或并联式发展，从而在更大空间尺度上优化农业资源配置效率，促进形成优势互补、分工协同的农业区域发展新格局[30]。作为数字流，农业数字技术具备的流动性、可适应性和系统性，可以通过优化决策、精准配置资源和重塑产业链，提高农业全要素生产率与抗风险能力，为传统农业转型提供新型基础设施[31-32]。农业数字技术所具有的渗透性、溢出性使其在定向流动过程中，能够广泛、深入地与接收地进行融合，激发欠发达农业区的发展动力和增长潜力。

基于此，提出研究假设：

由发达农业区向欠发达农业区定向流动的农业数字技术，对促进农业区域协调发展具有促进作用（H1）。

2. 农业数字技术的适配性

农业数字技术定向流动所带来的积极效应并非自然产生，其作用的有效发挥与价值实现，在很大程度上依赖于接收地区与外来技术相匹配的产业基础，以及本地化的技术消化、吸收与再创新能力[33]。农业数字技术的价值创造高度依赖应用场景与本地化转化，只有与接收地的自然资源禀赋、技术应用环境及社会经济组织条件相适应，农业数字技术的效能才能真正实现。若农业数字技术引入地区缺乏必要的产业基础，即便引入了先进的农业数字技术，也无法实现有效转化，也就不能产生新的价值。因此，农业数字技术流动发挥区域协调作用的一个重要前提，即农业数字技术与流入地之间存在适配性。近年来，中国多地在政策推动下纷纷引进大田精准灌溉、无人机植保等技术。当同样一种作物的智能管理技术，在东北地区、新疆等大规模集约化种植区呈现显著节本增效的功能时，西南丘陵山区等以小农户为主导、地形破碎、经营小规模地区，则可能因高成本、低效能等原因，面临“最后一公里”落地难题，导致技术悬置或应用效果大打折扣[34]。

基于此，提出研究假设：

适配性是农业数字技术促进农业区域协调发展的关键前提，若适配性不足，农业数字技术的正向促进

作用会被削弱(H2)。

3. 区域异质性

内生增长理论认为技术进步与知识积累是经济持续增长的核心动能,农业数字技术流动的深层价值不仅在于技术本身的转移,更在于其所承载的隐性知识与创新能力对接收地农业生产的系统性提升[35]。当适配性得以满足时,农业数字技术通过技术流动将发达农业区生产中的经验与情境化实践进行空间转移。欠发达农业区通过引入农业数字技术可以实现跨越式发展。一方面,农业数字技术作为新型高级要素,可以弥补传统生产要素在信息处理、智能决策与精准管控等方面的短板;另一方面,农业数字技术可以显著提升土地、劳动力、资本等传统要素的配置与使用效率。从发达农业区流入的农业数字技术往往还包含已被验证的管理范式、优化的算法模型与成熟的商业模式,能够使欠发达农业区以更低的试错成本,更快地构建起更好的生产与管理能力[36]。当欠发达农业区通过引进、消化和再创新,直接提升要素组合的质量与效率时,即使在资本、劳动力等传统要素禀赋存量不足的情况下,也能实现生产率的跃升。

基于此,提出研究假设:

在满足适配性的前提下,农业数字技术流动对区域协调发展的促进作用,受到区域间农业发展梯度、农业产业基础及农业初始技术水平的影响(H3)。

农业数字技术流动机制如图1所示。

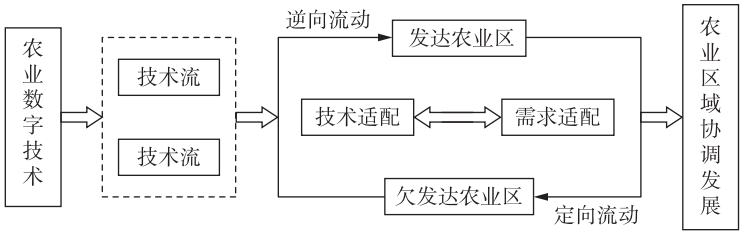


图1　农业数字技术流动机制

三、研究设计

(一)样本选择与数据来源

为系统刻画农业数字技术跨区域流动特性和对农业区域协调发展的影响,本文选取2001—2023年的农业数字技术专利文本为研究样本,研究范围涵盖31个省份(因数据缺失,未包函港澳台地区),共293个地级市(不包含自治州、盟、地区),共形成42778个城市对。农业数字技术专利数据来自国家知识产权局公布的专利数据库及相关公告信息;夜间灯光数据来自美国国家海洋和大气管理局(NOAA)发布的稳定夜间灯光影像;农业经济与人口数据整理自《中国农村统计年鉴》和《中国县域统计年鉴》;农村互联网普及率数据来自工业和信息化部及主要通信运营商发布的年度统计报告;专利引用数据来自国家知识产权局数据库;区域划分以民政部2023年发布的县以上行政区划代码为依据。在剔除关键变量缺失严重的样本后,构建非平衡区域对面板数据集。为控制极端值对估计结果可能造成的干扰,所有连续变量均在1%和99%分位数处进行了缩尾处理。

(二)研究模型

为检验农业数字技术流动对农业区域协调发展的影响,借鉴马述忠等[37]及吴丹等[38]的研究思路,构建"区域对"。为检验农业数字技术流动的方向性,构建基准模型如式(1)所示。

$$Cda_{ijt}=\alpha_0+\alpha_1\ln DT_in_{ijt-1}+\alpha_2\ln DT_Out_{ijt-1}+\beta X_{ijt-1}+\lambda_{ij}+\mu_t+\epsilon_{ijt} \quad (1)$$

其中:i和j为"区域对"中的两个区域;t为年份;Cda_{ijt}为被解释变量,为区域对i、j在t年的农业协调发展水平;$\ln DT_in$为定向流动取对数,即农业数字技术从技术研发能力强、基础设施完善的发达农业区,向技术应用需求大、存在数字化水平差距的欠发达农业区的流动定义为定向流动;$\ln DT_Out$为逆向流动取对数;α、β为待估系数;X为控制变量;λ_{ij}和μ_t分别为区域对固定效应和年份固定效应;ϵ_{ijt}为随机扰动项。为缓解反

向因果问题，对所有解释变量进行滞后一期处理。考虑到双向技术流动可能存在共线性，以净流动作为核心解释变量构建模型如式(2)所示。

$$Cda_{ijt} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln DT_net_{ijt-1} + \beta X_{ijt-1} + \lambda_{ij} + \mu_t + \epsilon_{ijt} \quad (2)$$

其中：$\ln DT_net_{ijt-1}$ 为区域对中的净流动，由于净流动为负时无法进行取对数处理，因此净流动的计算方法为 $\ln DT_in$ 和 $\ln DT_Out$ 的差值。

(三)变量设计

1. 被解释变量：区域对的农业协调发展水平

借鉴 Henderson 等[39]的研究方法，将人均农业经济灯光亮度作为农业发展水平的代理变量。将农业总产值与国家地球系统科学数据中心发布的夜间灯光数据进行逐年横截面回归，估算出单位灯光亮度所蕴含的农业经济价值。再通过该系数将各市县的总灯光亮度转化为农业经济灯光亮度，与地区农业人口相除，得到人均农业经济灯光亮度，最终形成欠发达农业区与发达农业区的农业发展水平比值。

2. 核心解释变量：农业数字技术的净流动

根据《数字经济及其核心产业统计分类(2021)》，分别构建包含人工智能、大数据、物联网、无人机等数字技术的关键词集和包含耕作、灌溉、施肥、种植等农业场景的关键词集。人工审核后形成包含 125 个数字技术关键词和 89 个农业应用场景的数据库。然后将中国国家知识产权局公告的、IPC 标准的主分类号属于 A 部(农林牧渔)的发明专利和实用新型专利的标题、摘要及权利要求书文本作为基础数据源与分析语料，利用文本挖掘与语义分析方法进行多关键词匹配与交叉识别，识别出同时包含数字技术关键词与农业场景关键词的专利数据。关于农业数字技术流动方向的界定：对于任意区域，若区域 B 引用了区域 A 的任一农业数字技术专利，则记为一次从区域 A 到区域 B 的农业数字技术流动。为探究农业数字技术流动对区域协调发展的影响，构建以下三个核心解释变量。一是定向技术流动，指从发达农业区流向欠发达农业区的农业数字技术流量；二是逆向技术流动，指从欠发达农业区反向流入发达农业区的农业数字技术流量；三是净技术流动，为发达农业区净流入欠发达农业区的农业数字技术量，即定向技术流动与逆向技术流动之差。此外，关于发达农业区与欠发达农业区的划分标准参考李瑞鹏和魏后凯[40]的研究思路，将在人均生产总值、农村居民人均可支配收入和人均地方财政收入三项中，至少两项位列全国后 1/3 的县市作为欠发达农业区。未达到上述标准的地区县域，若其农村居民人均可支配收入低于全国平均水平的 60%，也被列别欠发达农业区。

3. 控制变量

分别从区域需求、技术适配与全要素生产率维度选取可能影响区域农业协调发展的关键因素作为控制变量。地方政府财政支农水平(FUA)，参考徐孝新等[41]的研究方法，选取区域对中两城市在 $t-1$ 年的农林水事务支出占一般公共预算支出比重的平均值进行测度。农业通信网络基础设施(CNI)，选取区域对中两城市在 $t-1$ 年的农村互联网普及率的平均值进行测度。农业全要素生产率(ATF)，借鉴肖尧和彭桥[42]的研究方法，采用 DEA-Malmquist 指数法进行测度，为匹配到区域对层面，将省级生产率指数根据农业产值加权分解至地市层面并计算区域对平均值。

四、实证分析与结果

(一)描述性统计分析

农业协调发展水平的均值为 0.345，表明在多数“区域对”中，欠发达农业区的农业水平低于其配对的发达农业区；标准差为 0.211，表明“区域对”之间的发展差距具有较大异质性。定向技术流动的均值高于逆向技术流动，净技术流动为正值，表明农业数字技术跨区域流动方向并不对称，当前仍以从发达农业区向欠发达农业区的技术流动为主。净技术流动变量的标准差均超过其均值，表明区域对间的农业数字技术流动相对频繁。地方政府财政支农水平均值为 0.255，表明“区域对”的地方政府将约四分之一的公共预算用于支持农业农村发展。农业通信网络基础设施均值为 0.096，表明“区域对”间的互联网普及率仍处于较低水平，数字鸿沟现象依然存在。农业全要素生产率的均值为 1.025，表明多数区域农业全要素生产率呈现出一定程度的改善趋势。主要变量描述性统计结果见表 1。

表 1　变量描述性统计

变量名称	变量符号	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
农业协调发展水平	*Cda*	45550	0.345	0.211	0.101	0.905
定向技术流动	ln*DT_ in*	45550	4.251	7.811	0	58.025
逆向技术流动	ln*DT_ out*	45550	1.120	3.051	0	25.231
净技术流动	ln*DT_ net*	45550	3.131	6.500	−18.145	55.135
地方政府财政支农水平	*FUA*	45550	0.255	0.126	0.068	0.524
农业通信网络基础设施	*CNI*	45550	0.096	0.081	0.017	2.106
农业全要素生产率	*ATF*	45550	1.025	0.057	0.526	1.421

(二)农业数字技术流动强度

表 2 展示了农业数字技术流动强度。农业数字技术流动在空间分布上呈现显著的非均衡特征。零流动“区域对”占比较高,净技术流动的中位数远低于均值,表明绝大多数“区域对”之间的技术联系较弱,只有少数区域对之间流动活跃。前 10%的“区域对”贡献约 70%的定向技术流量。前 20%的“区域对”占比高达约 85%的流量,表明农业技术流动具有高度的集聚性。从动态演变来看,净技术流动的年均复合增长率达到 14.1%,表明农业数字技术的跨区域流动正处于持续深化与加速阶段。逆向技术流动也保持相近的高增长态势。尽管欠发达农业区在技术输出方面基础较弱,但是技术吸收能力与技术转化能力正在逐渐加强。因此,当前中国农业数字技术流动已形成一种以少数发达城市核心枢纽节点为主导,大量中小城市位于边缘节点,多数技术流动需经由核心枢纽进行中转与配置的网络格局。在“中心-边缘”网络结构特点下,边缘地区能否有效引入技术流动并实现其本地化转化与价值创造,依赖于流入的农业数字技术与当地资源禀赋、产业基础和需求的适配性。

表 2　农业数字技术流动强度

指标	定向流动(%)	逆向流动(%)	净流动(%)
零流动“区域对”占比	35.450	17.825	17.625
前 10“区域对”流量占比	68.518	42.134	26.384
前 20“区域对”流量占比	85.227	48.626	36.601
年均复合增长率	13.534	12.801	14.100

(三)基准回归

表 3 展示了基准回归结果。(1)列包含核心变量和年份固定效应,(2)列和(3)列加入区域对的固定效应和控制变量。(4)列则是基于模型(2),以净技术流动作为核心解释变量的估计结果。表 3 结果显示,由发达农业区流向欠发达农业区的农业数字技术系数均在 1%水平上显著为正,表明定向的农业数字技术流动能够有效缩小区域间农业发展差距。逆向技术流动变量的系数显著为负,可能是因为农业数字技术容易向发达农业区集聚,强化了发达农业区在农业数字技术发展中的虹吸效应,加剧了区域间的技术差距。在(4)列中,净技术流动的系数同样在 1%水平上显著为正,确认了农业数字技术向欠发达农业区净转移对促进农业协调发展的积极作用。控制变量在 5%和 10%的结果上显著,表明结果具有稳健性,验证了假设 H1。

表 3　基准回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
ln*DT_ in*	0.128***(0.024)	0.155***(0.022)	0.189***(0.026)	
ln*DT_ out*	−0.097***(0.011)	−0.243***(0.017)	−0.028***(0.009)	
ln*DT_ net*				0.205***(0.034)
FUA			0.202**(0.040)	0.218**(0.042)
CNI			0.074*(0.039)	0.081*(0.055)
ATF			0.036*(0.026)	0.042*(0.031)
控制变量	否	否	是	是
区域对固定效应	否	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
观测值	45550	45550	37520	37520
R^2	0.012	0.023	0.015	0.024

注:***、**、*表示在 1%、5%、10%水平上显著;括号内为聚类到区域对层面的稳健标准误。

（四）稳健性检验和内生性检验

为应对潜在的内生性问题，确保基准回归结论的可靠性，分别从稳健性检验与内生性检验两个层面进行验证。

1. 替换解释变量

在计算解释变量时采用的是专利引用关系来量化农业数字技术流动，但由于原始数据中可能存在引用滞后、学科分类不匹配等问题。因此，参考侯明利和郝新哲[43]的研究方法，从数字技术接入和数字技术应用两个层面构建农业数字流动指标，选用农村互联网普及率测度农业数字技术接入，选用农业生产信息化管理应用面积测度农业数字技术应用，用面板熵权法测算农业数字技术水平的综合指数，并以区域间该指数的差值衡量技术流动的强度，回归结果见表4的（1）列。净技术流动的系数为0.098，在1%的水平上显著，前述研究结论成立。

2. 剔除直辖市样本

考虑到北京、上海、天津、重庆等直辖市在技术上具有显著的虹吸效应，可能扭曲技术流动的空间格局，难以反映区域间的技术扩散特征；同时，这些地区的农业数字技术流动效应易受行政、金融等非市场因素影响，对估计结果产生一定的干扰。因此，剔除了所有包含上述直辖市的“区域对”样本，重新进行回归，结果见表4的（2）列。净技术流动的系数为0.065，仍在1%水平上显著为正，前述研究结论依然成立。

3. 增加控制变量

为控制可能影响农业区域协调发展但未包含在基准模型中的潜在遗漏因素，在原有控制变量的基础上，引入了农业地区生产总值，结果见表4的（3）列。在控制变量后，解释变量的方向和显著性一致，前述研究结论依然成立。

表4　稳健性检验结果

变量	（1）	（2）	（3）
	替换解释变量	剔除直辖市	增加控制变量
$\ln DT_net$	0.098***（0.007）	0.065***（0.003）	0.081***（0.005）
控制变量	是	是	是
区域对固定效应	是	是	是
年份固定效应	是	是	是
观测值	45550	41185	45780
R^2	0.631	0.598	0.551

注：***、**、*表示在1%、5%、10%水平上显著；括号内为聚类到区域对层面的稳健标准误。

4. 倾向得分匹配法（PSM）

将“区域对”中农业数字技术流入强度高于样本均值的归为处理组，反之归为对照组。以控制变量作为匹配变量，用Logit模型估计倾向评分，采用1:3的近邻匹配法进行样本匹配。根据样本平衡性检验结果，经PSM处理后的控制变量标准化偏差的下降幅度均在85%以上，且t不再显著，表明匹配结果较好，通过了平衡性检验。从表5的（1）列可以看出，回归系数为0.193且在1%的水平上显著，验证了结论。

5. 工具变量法

借鉴已有研究文献，采用地理距离倒数作为农业数字技术流动的工具变量，并运用两阶段最小二乘法进行重新估计。地理邻近性会显著促进知识溢出与技术扩散，但历史或地理上的距离本身并不会直接影响当期的农业区域协调发展水平。第一阶段与第二阶段的回归结果分别见表5的（2）列和（3）列。检验结果显示，LM统计量P为0.000，拒绝工具变量识别不足的原假设；Wald F统计量为24.540，大于10%水平临界值19.930，表明无弱工具变量问题；Hansen J统计量P为0.346，接受扰动项与工具变量无关的原假设，即工具变量不存在过度识别问题。（2）列工具变量的回归系数显著为正，表明符合相关性要求。（3）列净技术流动的系数为正，且在1%的水平上显著，表明在控制潜在的内生性问题干扰之后，研究结论仍然成立。

表5　内生性检验结果

变量	(1)	(2)	(3)
	PSM法	第一阶段:技术流动	第二阶段:协调发展
ln*DT_ net*	0.193**(0.041)	0.142***(0.029)	0.218***(0.065)
控制变量	是	是	是
区域对固定效应	是	是	是
年份固定效应	是	是	是
Kleibergen-Paap rk LM		44.851***[0.000]	
Cragg-Donald Wald *F*		24.540[19.850]	
Hansen *J* (*P*-value)		0.886[0.346]	
观测值		42115	42115
R^2	0.026	0.024	0.022

注:***、**、*表示在1%、5%、10%水平上显著;括号内为聚类到区域对层面的稳健标准误;方括号内是对应统计检验的*P*值。

(五)中介机制检验

为检验技术适配性和需求适配性在农业数字技术流动促进农业区域协调发展过程中是否发挥中介作用,采用Bootstrap法检验中介效应显著性,中介机制模型如式(3)和式(4)所示。

$$M_{it}=\beta_0+\beta_1 \ln DT_net_{it}+\beta_2 X_{ijt-1}+\varepsilon_{it} \tag{3}$$

$$Cda_{ijt}=\gamma_0+\gamma_1 \ln DT_net_{it}+\gamma_2 M_{it}+\gamma_3 X_{ijt-1}+\varepsilon_{it} \tag{4}$$

其中:M为中介变量;γ为待估系数。

1. 技术适配性作用机制

技术适配性机制指农业数字技术流入的实际成效高度依赖于接收地区对其进行消化、应用与再创新的能力,而这些能力的实现主要依托产业基础。因此,采用"区域对"每年新增农业数字技术企业数量的对数之比来衡量技术适配性[44]。从表6的(1)列可以看出,技术适配性的系数显著为正,表明技术适配性对农业区域协调发展具有显著正向影响。

2. 需求适配性作用机制

农业数字技术的流入并非简单的技术转移,而是欠发达农业区为提升自身农业生产效率、优化产业结构、有效响应市场变化所进行的主动筛选与匹配过程。在市场化条件下,本地实际需求往往最贴合当地资源禀赋、产业特征与发展阶段的技术。因此,采用"区域对"赫芬达尔指数的倒数之比,衡量多样化市场需求能力的代理变量,数值越高,表明需求适配性水平越高[45]。从表6的(2)列可以看出,需求适配性对农业区域协调发展具有显著的正向作用,且作用系数大于技术适配性的系数,表明需求适配性在推动农业区域协调发展中的贡献相对更强。

3. 双重作用机制

将两个中介变量同时纳入中介效应模型,其中技术适配性在10%的水平下显著,需求适配性在1%的水平下显著,可见需求适配性的中介效应更为明显。将中介变量均加入回归模型后,农业数字技术流动对农业区域协调发展的回归系数大于初始模型的回归系数,因而技术适配性与需求适配性均存在中介效应。

表6　农业数字技术流动对农业区域协调发展的中介机制检验结果

变量	(1)	(2)	(3)
	技术适配性	需求适配性	双重中介效应回归
ln*DT_ net*	0.142***(0.034)	0.215**(0.015)	0.227***(0.009)
技术适配性			0.181*(0.018)
需求适配性			0.305***(0.112)
控制变量	是	是	是
个体固定效应	是	是	是
时间固定效应	是	是	是
观测值	45550	45550	45550
R^2	0.418	0.301	0.387

注:***、**、*表示在1%、5%、10%水平上显著;括号内为聚类到区域对层面的稳健标准误。

（六）异质性分析

前述研究证实了农业数字技术流动对农业区域协调发展的作用机制。由于不同地区生产要素与适配性方面存在差异，进一步从区域特征、产业基础与初始化水平三个维度进行异质性分析。

1. 区域特征

根据“区域对”的位置差异，将样本划分为三类区域配对，分别是双方均位于东部地区（*East_East*）、双方均位于中西部地区（*Mi-West_Mi-West*），以及一方属于东部、一方属于中西部（*East_Mi-West*）。在基准模型中引入分组变量与核心解释变量的交互项，从表 7 的（1）列～（3）列可以看出，农业数字技术流动具有显著的空间异质性。在中西部地区内部，交互相系数显著为正，表明在农业发展基础相近的“区域对”，农业数字技术流动容易发挥正向的协同作用；而在东部地区内部，交互项系数显著为负，表明东部地区间的技术流动的协调作用有限，甚至可能存在因技术同质化导致的边际效应递减或竞争效应；在东部-中西部对中，交互项系数显著为正，表明跨区流动对缩小东西部差距、促进区域平衡也具有显著作用。考虑到双向技术流动可能导致效应相互抵消，引入虚拟变量 *East_Dir*，进一步识别东部到中西部的单向流动，当农业数字技术由东部发达农业区单向流向中西部欠发达农业区时取值为 1，否则为 0。从表 7 的（4）列可以看出，交互项显著为正，且系数有所增大，介于中西部内部和东部-中西部之间，表明跨地区的定向技术流动可能受制于区域间显著的发展梯度差异，在适配性与融合过程中面临更高的转化成本。

表 7　异质性检验

变量	（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）
	东部-东部	中西部-中西部	东部-中西部	东部→中西部定向流动	农业数字产业基础	农业初始化水平
ln *DT_ net*	0.121***（0.035）	0.119***（0.029）	0.120***（0.017）	0.116***（0.021）	0.235***（0.014）	0.221***（0.005）
ln*DT_ net* ×*East_East*	−0.048***（−0.011）					
ln*DT_ net* ×*Mi-West_Mi-West*		0.445***（0.201）				
ln*DT_ net* ×*East_Mi-West*			0.268***（0.179）			
ln*DT_ net* ×*East_Dir*				0.353***（0.314）		
ln*DT_ net* ×*Gap_indu*					0.394***（0.018）	
ln*DT_ net* ×*Gap_tech*						−0.102**（−0.008）
控制变量	是	是	是	是	是	是
“区域对”固定效应、年份固定效应	是	是	是	是	是	是
观测值	25550	19235	17638	25550	45550	45550
R^2	0.706	0.616	0.699	0.718	0.717	0.690

注：***、**、*表示在 1%、5%、10%水平上显著；括号内为聚类到区域对层面的稳健标准误。

2. 产业基础

由于农业数字技术有效应的用基础是与本地农业生产体系深度融合，因此农业数字产业基础较好的地区，往往具备完善的硬件设施和成熟的农业数字化应用场景，能有效地将流入的技术转化为本地的生产力和竞争优势。基于上述逻辑，选取农业机械化率、数字基础设施水平及农业数字化装备普及率作为关键指标，构建了农业数字产业基础指数[46]。对各指标进行标准化处理后，计算“区域对”中欠发达农业区与发达农业区在该指数上的比值（*Gap_indu*）。从表 7 的（5）列可以看出，农业数字产业基础与净技术流动交互项的显著为正，且系数大于净技术流动的直接效应，表明在农业数字产业基础相对完善的地区，农业数字技术流动的促进作用显著增强。

3. 初始化水平

为检验“区域对”初始农业发展水平差距对农业数字技术流动效果的影响，选取农业全要素生产率与单位面积农业产值作为衡量指标，构建初始农业技术水平差距变量（*Gap_tech*），采用“区域对”中发达农业区与欠发达农业区在基期农业技术水平比值的对数表征[47]。适度的初始技术差距可以形成技术追赶的“势能”，有利于技术外溢与后发优势的发挥。但在实际操作层面，过大的差距则可能超出欠发达农业区的吸收与学习能力，制约了技术消化与本地化应用。从表 7 的（6）列可以看出，农业初始水平与净技术流动的交互

项的系数显著为负，表明当区域对的初始农业技术水平差距过大时，农业数字技术流动的促进作用会受到抑制，也就是说，地区间初始农业技术水平差距对农业数字技术流动的协调作用具有“双刃剑”作用，适度的差距有利于技术追赶，但过大的差距则会显著抑制其促进作用。验证假设H3。

五、结论与建议

农业数字化是实现农业现代化的重要途径，将农业数字技术流动置于农业区域协调发展的视角下，以2001—2023年的农业数字技术专利为研究对象，系统考察农业数字技术流动对区域协调发展的影响效应。研究结论显示：第一，农业数字技术的跨区域流动具有非均衡特征，当前中国形成了以少数发达城市为核心，中、小城市位于边缘的农业数字技术流动网络格局。第二，定向的农业数字技术流动能够有效缩小区域间差距，逆向流动引发的“虹吸效应”，不利于缩小区域差距。第三，需求适配性的中介效应大于技术适配的中介效应。第四，在中西部地区内部，农业数字技术流动的协调效应最强，东部向中西部的定向流动效果最优；在农业发展梯度差距较小、农业数字产业基础相对完善及初始化水平相近的地区，定向的农业数字技术流动具有显著的促进作用。

基于上述研究结论，提出以下建议：

第一，建立定向引导与精准匹配相结合的农业数字技术流动机制。当前，中国农业数字技术主要是从发达农业区流向欠发达农业区，因此政策的研究和制定应避免采取普适性的思维，重点构建具有针对性的技术引导方案。针对东部和中西部地区，分别建立多层次、精准化的区域农业数字技术协作平台，鼓励东部科研机构和企业对中西部地区开展定向的技术转移与专利授权，对东部参与定向转移的科研机构和企业，给予定向的资金补贴、税收减免和知识产权保护保障等政策支持。同时，扩大东部与中西部地区间常态化、制度化的技术需求与供给信息共享与联合评估，精准分析区域间的技术结构匹配度与产业互补潜力，推动先进技术与中西部地区实际有效对接，防范“技术悬浮”与适配失效。

第二，夯实欠发达农业区的农业数字产业的基础建设。农业数字技术效能的发挥主要依托本地的产业基础与人力条件。若缺乏必要的数字化基础设施与专业的技术人才，即便引入先进技术也难以产生协同效应，实现价值突破。因此，重点加强中西部地区的农业物联网、农业遥感监测等数字化基础设施建设，系统开展新型农民与农业技术人才的培训工作，积极扶持本地数字服务商与数字化农业经营主体成长。通过全面提升技术承接、技术转化能力，夯实农业数字技术赋能的体系建设。

第三，促进技术流与数据流在农业领域的嵌入式发展。农业数字技术对区域协调发展的推动力不再局限于技术本身的扩散，更重要的是通过提升需求适配性有效提高农业综合效益。因此，发展重心从追求技术扩散规模转向增强农业的系统性协调与发展能力。鼓励欠发达农业区的政府发挥主导与协调作用，积极引导社会资本投入并搭建电商平台等数字化平台，鼓励订单农业、定制农业等新业态的发展，构建“农户+平台+市场”的稳定联结机制，帮助小农户精准对接大市场，增加产品的附加值，从而突破传统要素的限制瓶颈，实现从生产到销售的全链条数字化赋能，形成以农业数字技术赋能、市场需求牵引为主的协调发展路径。

参考文献

[1] 孙子烨，宫思羽，余志刚. 数字素养对农户绿色生产技术采纳的影响[J]. 中国农业大学学报，2024，29(4)：12-26.

[2] 赵宁. 科技创新驱动农业高质量发展的内在逻辑与机制构建研究[J]. 经济问题，2025(11)：113-120.

[3] 杨秀勇，焉小宜. 数字技术赋能乡村振兴的实践检视与反思——基于国家乡村振兴示范县典型案例分析[J]. 农林经济管理学报，2025，24(6)：880-888.

[4] 平卫英，王瑶华，张谊瑞. 数字乡村建设、农村居民增收与城乡收入差距——基于国家数字乡村试点的准自然实验[J]. 农业技术经济，2025(8)：80-104.

[5] 刘传明，赵书晨. 数字乡村建设对农民农村共同富裕的影响研究——基于财富创造和普惠共享视角[J]. 财经研究，2025，51(3)：65-79.

[6] 黄朝椿. 数字技术赋能乡村振兴：内在逻辑、现实困境与突破路径[J]. 改革，2024(7)：55-64.

[7] 范贝贝，李瑾. 协同视角下县域数字乡村建设路径——基于河北省肃宁县的案例分析[J]. 农业经济问题，2024(11)：33-47.

[8] 邓熙舜，罗利平，蒋勇. 数字乡村与乡村振兴耦合协调及其障碍因子研究[J]. 世界农业，2023(6)：93-108.

[9] 孙伯驰，尹含. 数字乡村发展能否促进农户共同富裕——基于收入增长与收入不平等的双重视角[J]. 华东经济管理，2025，39(6)：

35-45.
[10] 黄大湖，冯黎，丁士军，等. 农业数字化对乡村产业振兴的影响机制与空间溢出效应[J/OL]. 中国农业资源与区划，1-12[2026-03-25]. https://link.cnki.net/urlid/11.3513.S.20250918.1543.026.
[11] 卿菁，拓佳辛. 数字乡村建设赋能共同富裕的运行逻辑与实现路径——基于"结构—过程—功能"分析框架[J]. 咨询与决策，2025，5(2)：44-59.
[12] 焦晋鹏，左方舟. 数字乡村发展赋能粮食体系韧性提升的内在逻辑、现实问题与优化路径[J]. 商业经济，2026(3)：108-114.
[13] 李媛，阮连杰. 数字新质生产力赋能农业强国建设的逻辑、机制与路径[J]. 东南学术，2025(6)：25-36.
[14] 李鹏. 数字技术重构乡村旅游产业链的逻辑与路径[J]. 社会科学家，2025(5)：87-93.
[15] 陈海龙，李宛淞，徐倩，等. 数字乡村建设对农业绿色全要素生产率提升效应与机制研究[J]. 农业经济与管理，2025(2)：38-51.
[16] 张燕，潘亚楠. 数实融合下农业产业化价值创造机理：基于资源编排的案例研究[J]. 世界农业，2025(1)：92-102.
[17] 王海飞，钱茜. 数字经济赋能我国农村三次产业融合发展研究[J]. 甘肃社会科学，2024(2)：196-205.
[18] 张颖熙，徐紫嫣. 健康人力资本与经济增长——基于健康预期寿命指标的实证研究[J]. 学习与探索，2021(7)：133-142.
[19] 单菁菁，宋德骞，李文洁. 黄河流域城市群高质量发展研究——基于人与自然耦合视角[J]. 经济与管理，2025，39(5)：48-58.
[20] 刘崇刚，孙伟，张落成. 精明增长视角下乡村复合生态系统优化研究综述[J]. 生态科学，2025，44(1)：278-287.
[21] 涂淑涵. TOE 框架下数字乡村建设绩效的影响因素与提升路径研究[J]. 智慧农业导刊，2025，5(21)：13-16.
[22] 尹义臣，何艳荣. 数字农业发展视域下的农业经济管理要点分析[J]. 中国农业会计，2025，35(15)：103-105.
[23] 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.
[24] DURKIN J T. Falling behind and catching up in a model of north-south trade[J]. Review of International Economics，2010，4(2)：218-233.
[25] HERDE D V，MARECHAL K，BARET V P. Lock-ins and agency：Towards an embedded approach of individual pathways in the walloon dairy sector[J]. Sustainability，2019，11(16)：4405-4405.
[26] 焦冬梅，黄立军. 数字技术投入对农业全球价值链地位的影响研究[J]. 经济体制改革，2025(2)：12-20.
[27] 霍红，钟海岩. 农产品供应链质量安全中区块链技术投入的演化分析[J]. 运筹与管理，2023，32(1)：15-21.
[28] 范合君，潘宁宁. 数字化转型、敏捷响应度与企业韧性[J]. 经济管理，2024，46(7)：36-54.
[29] 仇焕广，王丹丹，于晓华，等. 关于机器学习在农业经济领域应用的若干思考[J]. 农业经济问题，2025(10)：4-25.
[30] 罗必良，耿鹏鹏. 农业新质生产力：理论脉络、基本内核与提升路径[J]. 农业经济问题，2024(4)：13-26.
[31] 张燕妮，张国磊，刘俊茹，等. 数字技术赋能城乡融合发展的实践困境与优化路径——基于"技术—组织—环境"框架分析[J]. 北京理工大学学报(社会科学版)，2026，28(1)：151-165.
[32] 顾丁瑞，汪振，刘滨. 数字农业下小农生产效率悖论与破解之道——基于江西省 736 份稻农数据[J]. 中国农业资源与区划，2025，46(5)：94-104.
[33] 宋默西，洪如玲，王雯溪. 大数据能力对农业科技企业创新的影响：一个有调节的中介效应模型[J]. 技术经济，2023，42(8)：76-88.
[34] 李敬锁，万群. 农业技术创新对农业经济韧性的影响——基于财政支农政策的门槛效应分析[J]. 农业技术经济，2025(3)：4-17.
[35] 阮俊虎，刘天军，冯晓春，等. 数字农业运营管理：关键问题、理论方法与示范工程[J]. 管理世界，2020，36(8)：222-233.
[36] 刘长全. 颠覆性农业技术促进农业现代化的作用机制与实践路径[J]. 学习与探索，2023(8)：141-146.
[37] 马述忠，张道涵，胡增玺. 数字知识流动如何促进区域协调发展——兼论经济增长和平衡发展双重目标[J]. 中国工业经济，2025，(2)：80-98.
[38] 吴丹，吴凤平. 基于水权初始配置的区域协同发展效度评价[J]. 软科学，2011，25(2)：80-83.
[39] HENDERSON J V，STOREYGARD A，WEIL D N. Measuring economic growth from outer space[J]. National Bureau of Economic Research，Inc，2012，102(2)：994-1028.
[40] 李瑞鹏，魏后凯. 中国欠发达地区识别、类型与发展政策[J]. 中国农村经济，2025(5)：16-37.
[41] 徐孝新，孙自敏，刘戒骄. 我国粮食主产区农业高质量发展的区域差异及收敛性分析[J]. 技术经济，2022，41(2)：86-95.
[42] 肖尧，彭桥. 数字乡村建设对农业全要素生产率的影响效应研究[J]. 统计研究，2025，42(12)：101-113.
[43] 侯明利，郝新哲. 数字技术如何推动农业高质量发展——基于要素流动的中介效应与产业结构转型的调节效应[J]. 河南师范大学学报(哲学社会科学版)，2023，50(6)：21-28.
[44] 刘淑琳，马双. 最低工资与数字企业创业:需求创造视角[J]. 经济学动态，2025(3)：128-145.
[45] 刘云强，甄尚松，蓝红星，等. 数字经济发展提升龙头企业联农带农效益的机制与路径——基于交易成本的视角[J]. 中国农村经济，2025(5)：124-144.
[46] 陈冲，刘达. 收入质量属性的构建及其对农村居民消费行为的影响研究——基于经典收入假说消费理论[J]. 兰州财经大学学报，2022，38(1)：85-94.
[47] 李北伟，李麟白，刘为玲. 中国数字产业发展水平与区域科技创新的耦合协调及时空演化趋势[J]. 科技管理研究，2024，44(19)：74-84.

Study on the Impact of Agricultural Digital Technology Flow on Coordinated Regional Development of Agriculture

Yuan Shiyi[1], Yang Miao[2], Han Linfeng[3]

(1. Agricultural Information Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;
2. School of Business, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;
3. School of Economics and Management, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Amid the deep empowerment of the digital economy and the rural revitalization strategy, agricultural digital technology is regarded as a core driving force for simultaneous promotion of agricultural modernization and coordinated regional development. From the perspective of coordinated regional agricultural development, the impact of agricultural digital technology flow was systematically investigated based on patents spanning from 2001 to 2023. Non-equilibrium characteristics were observed in cross-regional technology flow. A "center-periphery" network pattern was formed, where developed cities serve as core hubs and small-medium cities were positioned at the edge of technology diffusion. Regional disparities are effectively narrowed by directional technology flow. Conversely, reverse flow triggers a "siphon effect" detrimental to regional convergence. The mediating effect of demand adaptability is identified to exceed that of technological adaptability. Regional heterogeneity is manifested in coordination effects: limited effects are observed in intra-eastern flows, strongest effects in central-western flows, and optimal outcomes in directional flows from east to central-west. Significant promotional effects are generated by directional flow in regions with minor agricultural development gradients, well-established digital infrastructure, and comparable initialization levels. References are provided for guiding orderly technology flow and balanced regional agricultural development.

Keywords: agricultural digital technology flow; cross-regional flow; directional flow; reverse flow; demand adaptability; technological adaptability