人工智能试验区政策赋能农业数字化：效应、机制与异质性

罗明忠[a,b]，李元豪[a]

（华南农业大学 a. 经济管理学院；b. 乡村振兴实验室，广东 广州 510642）

摘　要：人工智能技术嵌入农业数字化发展，是农业现代化的必然趋势。文章将国家新一代人工智能创新发展试验区政策视为一项准自然实验，基于 2011—2022 年中国 274 个地级市的面板数据，测算了农业数字化发展指数，并运用双重机器学习方法（DML）分析人工智能试验区政策对农业数字化的影响及其作用机制。结果表明：农业数字化发展整体上升趋势明显，且呈现多极化现象；基准回归结果显示，政策实施对农业数字化具有显著促进作用，且通过了稳健性和内生性检验；机制分析显示，政策实施能够通过农业技术创新和农业社会化服务路径促进农业数字化发展；异质性分析表明，政策实施能够显著促进特大城市、数字鸿沟较小城市、高水平人工智能创新发展及高水平数字产业集聚城市的农业数字化发展。据此，应加快拓宽人工智能在农业领域的应用场景，创新农业社会化服务发展模式，实施区域差异化发展策略，以推动农业数字化发展与农业农村现代化进程。

关键词：人工智能；农业数字化；农业技术创新；农业社会化服务

中图分类号：F303.2　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1672－0202（2026）03－0134－15

一、引言

以人工智能为核心的数智技术，为现代农业高质量发展注入新动能。2025 年中央一号文件明确指出，要推进农业科技力量协同攻关，支持发展智慧农业，拓展人工智能、数据、低空等技术应用场景。2025 年《国务院关于深入实施“人工智能＋”行动的意见》进一步提出，要加快农业数智化转型升级，加快人工智能驱动农业领域智能应用。党的二十届四中全会通过的《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》再次明确指出，要全面实施“人工智能＋”行动，加强人工智能同产业发展相结合，抢占人工智能产业应用制高点。“人工智能 ＋ 农业”不同于传统农业数字化仅停留在数据采集、传输与业务流程数字化的发展阶段，其可依托算法模型构建从数据感知、智能分析到自主决策与执行的完整闭环[1]，现已逐步成为农业数字化转型升级的核心驱动力。

学界围绕人工智能对农业数字化发展的助推机制已展开大量研究。相关研究指出，人工智能

收稿日期：2025－11－07　　**DOI：**10.7671/j.issn.1672－0202.2026.03.011

基金项目：国家哲学社会科学基金重大项目（23&ZD112）；广东省哲学社会科学规划乡村振兴研究专项重点项目（GD25ZX03）

作者简介：罗明忠（1969—），男，江西永新人，华南农业大学经济管理学院教授、广东省哲学社会科学重点实验室－华南农业大学乡村振兴实验室执行主任，主要研究方向为农村经济、劳动经济。E-mail：luomingzhong@scau.edu.cn

通讯作者：李元豪（1997—），男，山东潍坊人，华南农业大学经济管理学院博士研究生，主要研究方向为农业数字化、农村经济。E-mail：wyyhaoli@163.com

技术通过促进农业生产、加工流通、销售服务等全链条数字化闭环，推动农业产业数字化发展[2-3]。而数据要素作为人工智能的关键生产要素，其有效利用是农业数字化转型的基础[4]，通过数据重构农业生产要素配置方式、提升配置效率，则是农业数字化转型创新的重点[5]。也有研究从具体应用场景层面展开，梳理人工智能在种子与土壤管理、作物病虫害检验检测、资源优化、产量预测、农业食品安全等方面的实现路径，着力拓宽农业数字化的应用场景[6-8]。然而，在“人工智能 +”的国家战略背景下，既有研究尚未聚焦人工智能创新发展政策对农业数字化的影响，难以从理论与实证层面为优化政策设计、提升政策执行精准度以及明晰现代农业数字化发展方向提供有力支持。鉴于此，本文基于 2011—2022 年中国 274 个地级市的面板数据，将国家新一代人工智能创新发展试验区政策视为一项准自然实验，运用双重机器学习方法剖析人工智能试验区政策实施对农业数字化的影响及其作用机制，以期为深化人工智能与农业产业融合发展、助力农业数字化转型升级提供理论与决策参考。

二、政策背景与分析框架

（一）政策背景

为抢抓人工智能战略先机，全面实施“人工智能 +”行动，2017 年国务院发布《新一代人工智能发展规划》，明确推动人工智能与各行业融合创新。在智慧农业领域，推进农业智能传感与控制系统、智能化农业装备、农机田间作业自主系统的研发，通过建立典型农业大数据智能决策分析系统，开展人工智能应用场景的集成应用示范。随后，2019 年科技部发布《国家新一代人工智能创新发展试验区建设工作指引》，有序开展国家新一代人工智能创新发展试验区建设，为探索促进人工智能与经济社会发展深度融合，在制造、农业农村、物流等领域开展人工智能技术应用示范，拓展应用场景。2022 年科技部以新一代人工智能创新发展试验区为依托，发布《科技部关于支持建设新一代人工智能示范应用场景的通知》，通过运用智能自主无人作业的农业智能化装备等关键技术，构建智慧农场的典型应用场景，助力农业数字化高质量、智能化发展。

2019—2021 年，通过三批建设，全国已有 18 个城市成功建设国家新一代人工智能创新发展试验区。国家新一代人工智能创新发展试验区正在强化人工智能的技术研发与创新应用，丰富人工智能的应用场景，逐渐推进人工智能与经济社会发展的深度融合。一方面，在创新驱动发展战略的实施过程中，国家新一代人工智能创新发展试验区正在加大推进数字基建、算力、算法的迭代升级，为人工智能技术创新夯实底座。同时，依托通用 AI 大模型，深入推动农业领域人工智能技术的创新与应用，为传统农业数字化向智能应用转型提供技术创新支撑。另一方面，在人工智能创新发展政策的推动支持下，聚焦农业全产业链数字化管理、智能农场、无人机应用、农业生产物联监测、农产品质量安全管控等智能场景落地，不断丰富人工智能在农业数字化领域的应用实践。

（二）人工智能试验区政策对农业数字化发展的直接影响

人工智能试验区政策通过对人工智能技术创新发展的应用和支持，依靠数据要素价值释放，统筹资源整合、赋能人工智能决策系统，破解传统农业数字化的“信息茧房”约束与发展边界，将重构传统农业数字化全链条运行范式。首先，人工智能试验区政策的实施，推动人工智能技术加速向农业数字化领域渗透，通过实现农业气象、土壤、作物病虫害和市场信息等海量数据的收集、关联与预测分析，推动农业决策从简单数据量化、经验驱动转为数据驱动和数智驱动[9-10]。同时，依靠算力、算法和数据三大要素将传统农业数字化收集的非结构数据与环境动态数据纳入人工智能决策分析过程，实现传统农业数字化的数据采集向智能化决策分析转变[11]。其次，人工智能试验区政策的实施，加速推动人工智能技术的跨空间渗透性，可有效破解传统农业全产业链各环节的

零散数据化状态,通过发挥数据要素的乘数效应,实现农业全产业链的数字化发展闭环[2]。特别是人工智能试验区政策鼓励并支持将 AI 大模型嵌入农业全链条数字化发展过程,有利于打通各环节的数据壁垒与信息茧房,有效实现农业全产业链条的数据互联互通,降低信息不对称现象,促进产供销一体化的农业全产业链协同数字化运行。最后,人工智能试验区政策的实施,推动人工智能技术创新与要素重构,催生农业数字化发展新业态,有利于拓宽传统农业数字化的发展边界。传统农业数字产业多集中于基础农业数据采集设施设备、农业机械化设施设备、农产品市场信息服务等相关低附加值产业。人工智能试验区政策加速人工智能技术的创新赋能,有利于催生相关智能农机设备研发、农业 AI 大模型开发和农产品市场信息预测分析等新业态的出现,并依靠数据价值链的传导作用,通过专业化、规模化的发展模式促进农业相关数字产业集群的形成,有效拓宽农业数字化发展的市场边界。

(三)人工智能试验区政策对农业数字化发展的间接影响

1. 人工智能试验区政策助力农业技术创新,推动农业数字化发展

技术创新理论指出,技术创新是新生产要素与生产条件的全新结合。人工智能试验区政策推动新技术与农业智能装备在农业领域的大规模应用,实现农业生产由粗放式向精准化转变[12]。传统农业技术创新存在投入成本高、周期长、适配性差等缺点,难以满足现阶段农业数字化发展的需求。人工智能试验区政策深入推动自然语言处理、知识图谱和数据孪生等技术创新形式嵌入农业装备、生产和管理的全过程,突破了传统农业技术创新的技术瓶颈,为农业数字化应用提供物质载体[13]。一方面,人工智能试验区政策推动农机设备的智能化升级,为农业数字化发展提供强劲动力。在实际农业技术创新过程中,通过传统农机与物联网、传感器、北斗卫星系统的融合应用,能够将传统农机设备升级为自动收割机、精准植保无人机等智能设备[14],有效实现农业技术的创新发展与应用示范,从而为农业数字化发展提供直接物质载体。另一方面,依托人工智能试验区政策,农业 AI 大模型的推广应用有效拓宽了农业数字化的应用边界。政策有效支撑 AI 大模型嵌入农业的应用场景,通过研发调整农业 AI 大模型以适配农业各类复杂场景,突破原有的农业技术瓶颈。适配的农业 AI 大模型,能够突破传统数字技术在农业领域的应用边界,推动农业领域数据互联互通,迅速拓宽农业数字化的应用场景。

2. 人工智能试验区政策促进农业社会化服务,推动农业数字化发展

服务作为连接技术与农户的核心纽带,直接决定人工智能应用层的渗透和普及[15]。农业数字化发展不仅需要技术创新驱动,还需要数字化服务供给。农业社会化服务滞后是农业数字化转型的重要制约因素[16]。传统的农业社会化服务多聚焦于单一服务环节,无法满足农业数字化发展的规模化、精准化和智能化需求。人工智能试验区政策鼓励并支持将人工智能技术嵌入农业社会化服务中,驱动农业社会化服务由单一化向全链条服务转变。在产前服务环节,智能化设施设备租赁服务的供给,不仅为农业产前数据收集提供基础支撑,破解农业数字化转型中的数据获取难题,还能够依靠农业社会化服务载体的数字化转型,降低农户使用智能设施设备的准入门槛与交易成本,实现智能农业装备应用的普惠性。在产中服务环节,政策实施有利于推进 AI 大模型嵌入农业社会化服务线上平台,在数据采集基础上运用多模态 AI 技术,为不同农业生产经营主体提供个性化和专业化的技术服务指导以及精准化的作物种植方案。通过数据推动的服务决策方式,能够提升农业数字化覆盖的广度与深度,从而保障农业生产的智能化、精准化[3]。在产后服务环节,数字化产销服务对接平台的建立,推动农业相关数据整合与信息服务,实现农业社会化服务延伸至经营服务领域,拓宽农业数字化的发展边界。本文的逻辑分析框架如图 1 所示。

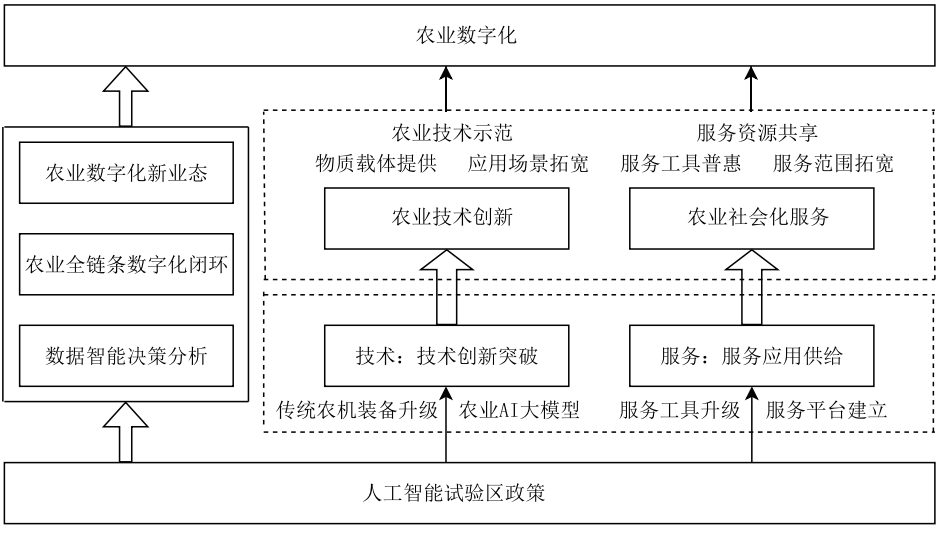


图 1　人工智能试验区政策对农业数字化影响的逻辑分析框架

三、研究设计

（一）变量选取与说明

1. 被解释变量：农业数字化发展指数

农业数字化是以数字化的农业知识与信息作为关键生产要素，推动数字技术与农业产业链各环节深度融合，从而实现传统农业生产方式向现代农业生产方式的转变[17-18]。《数字农业农村发展规划（2019—2025 年）》要求，以产业数字化、数字产业化为发展主线，着力建设基础数据资源体系，加强数字生产能力建设，加快农业农村生产经营、管理服务数字化改造。因此，本文从农业数字基础设施、农业产业数字化和农业数字产业化 3 个维度，选取农业数字化水平测度指标。在数字基础设施建设中，农村信息化率是农业数字化发展的基础底座，农业气象观测站点可实现农田自然环境要素的数据感知，为农业生产数字化提供基础支撑。因此，在数字基础设施层面，本文主要选取农村信息化率、农业气象观测两个指标进行衡量[19]。农业产业数字化是数字技术在农业领域的具体实践，推动数字技术创新在农业各环节的渗透与扩散，实现农业从研发到销售领域的数字化转型[20]。本文主要从农业科技研发、农业生产机械化和农产品数字化交易层面，测度农业产业数字化水平[17]。而农业数字产业化是数字技术发展到一定阶段的产物，体现了农村数字产业的发展程度[21]。因此，本文将农村网络支付、淘宝村数量和农村居民数字产品消费作为农业数字产业化的衡量指标[20]。

基于上述所建构的指标体系，本文采用熵值法进行综合测算，以保障农业数字化发展指数测度结果的客观性。本文所构建的农业数字化发展评价指标体系如表 1 所示。

表 1　农业数字化发展评价指标体系

目标层	准则层	指标层	测度方式	单位
农业数字化发展	农业数字基础设施	农村信息化率	开通互联网宽带业务的行政村比重	%
		农业气象观测	农业气象观测业务站点个数	个
	农业产业数字化	农业科技研发投入	R&D 经费支出×（农业总产值/地区生产总值）	万元
		农业机械化水平	农业机械总动力	万千瓦
		农产品数字化交易	农产品电子商务销售额	万元

续表

目标层	准则层	指标层	测度方式	单位
	农业数字产业化	农村网络支付	农村数字普惠金融指数	
		农业农村数字基地	淘宝村数量	个
		数字产品与服务消费	农村居民数字化产品和服务的消费支出占比	%

2. 处置变量:人工智能试验区政策

基于科学技术部发布的国家新一代人工智能创新发展试验区城市名单,设置人工智能试验区政策组别虚拟变量与时间虚拟变量,构造政策交互冲击变量(Treat × Post)。Treat 变量对应样本城市是否为试点城市,如果是试点城市,则设置为 1,否则设置为 0;Post 是一个时间虚拟变量,对于每个试点城市,在人工智能试验区政策实施年份及其之后取值为 1,否则为 0。

3. 控制变量

为了控制其他因素对农业数字化产生的影响,主要选取以下控制变量:(1)农业产业发展水平。农业产业发展水平越高的地区,农业的规模化和市场化集聚程度越高,对于数字化转型的需求也更为迫切,从而对农业数字化发展产生影响。本文采用第一产业增加值占 GDP 比重测度农业产业发展水平[22]。(2)城镇化水平。城镇化发展水平上升,意味着农业从业人员将进一步减少,农业数字化的发展成为必然趋势[14]。城镇化水平的提升,还能够有效实现人工智能技术的集中研发,从而推动人工智能技术落地应用。本文选取地区城镇人口占总人口比重表征城镇化水平。(3)农地经营规模。农地的规模化经营,降低了农业生产的数字化设施设备使用成本,成本的降低有利于农业的利润水平提升,从而实现农业数字化发展规模的扩张。本文通过农作物总播种面积与农业从业人数之比对农地规模经营进行测算。(4)财政支农力度。政府财政支农的资源投入会推动农业数字化发展项目,资金的投入会直接促进农业数字化发展[23]。本文通过地区财政农林水支出金额测算财政支农力度,并取对数。(5)非农就业结构。劳动力非农就业的发展,会导致农业劳动力的阶段性短缺,倒逼农业生产采纳数字技术,推动农业数字化转型。本文通过二三产业从业人数与农业从业人数之比测算非农就业结构,并取对数[24]。(6)农业劳动生产率。地区农业劳动生产率水平越高,表明该区域的技术发展基础越好,农业数字化的转型难度越低,也更容易推动人工智能技术在农业领域的落地应用。本文通过农业总产值与农业从业人数之比测算农业劳动生产率。

4. 机制变量:农业技术创新和农业社会化服务

根据前文理论分析,基于“技术供给 - 服务应用”的传导链条,选取农业技术创新和农业社会化服务两个变量开展机制检验。(1)农业技术创新。专利数量是衡量技术创新的重要成果,具备商业的应用潜力,本文主要采用涉农专利数量加 1 取对数衡量。(2)农业社会化服务。农林牧渔服务业是指投入到农、林、牧、渔业生产中的各种支持性服务活动,单位播种面积承载的社会化服务产值,能够反映农业社会化服务的覆盖密度与投入强度。本文主要参考相关文献[24-25]的做法,采用农林牧渔服务业总产值与农作物总播种面积之比予以衡量。

(二)数据来源与描述性统计

本文选取 2011—2022 年中国 274 个地级市的面板数据进行研究。其中,国家新一代人工智能创新发展试验区的名单及批复信息,来源于科技部官方网站;其余指标数据均来自相关年份的《中国城市统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国区域经济统计年鉴》及地方统计年报、国家知识产权局统计数据、中国淘宝村研究报告和北京大学数字普惠金融指数,极个别地级市的部分缺失数据采用插值法和邻近均值法予以补齐。变量的描述性统计结果见表 2。

表 2　变量描述性统计结果

变量类型	变量名称	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
被解释变量	农业数字化发展指数	3288	0.07	0.05	0.01	0.63
处置变量	人工智能试验区政策	3288	0.02	0.13	0.00	1.00
控制变量	农业产业发展水平	3288	12.01	7.84	0.03	49.89
	城镇化水平	3288	0.57	0.15	0.18	1.00
	农地经营规模	3288	7.60	1.49	2.09	11.96
	财政支农力度	3288	3.62	0.89	0.70	14.16
	非农就业结构	3288	5.31	1.70	−0.23	10.29
	农业劳动生产率	3288	15.81	1.53	10.83	19.57
机制变量	农业技术创新	3288	4.16	1.48	0.00	8.40
	农业社会化服务	3288	0.01	0.08	0.00	1.85

（三）模型构建

本文将国家新一代人工智能创新发展试验区政策视为准自然实验，借助双重机器学习模型（DML），评估该政策对农业数字化发展的影响。相较于传统计量模型，双重机器学习模型结合了机器学习等算力算法，能够通过预测分析与智能决策，自动筛选关键变量、捕捉变量之间的非线性关系，不需要预设函数，并摆脱了“维度诅咒”与多重共线性问题[26]，从而可以更加精准地识别国家人工智能试验区政策对农业数字化的影响。考虑到变量之间可能存在非线性影响，为避免函数形式设定偏误、提高模型识别精度，本文在基准回归模型中引入控制变量二次项。

基于前文研究分析，并参考张涛和李均超[27]的研究，本文构建部分双重机器学习模型，如下所示：

$$DA_{it} = \alpha AI_{it} + g(X_{it}) + U_{it} \tag{1}$$

$$E(U_{it} \mid AI_{it}, X_{it}) = 0 \tag{2}$$

式中，i、t 分别表示城市与年份；DA_{it} 为被解释变量，表示 t 年 i 城市的农业数字化发展水平；AI_{it} 为处置变量，表示人工智能试验区政策冲击变量，$AI_{it}=1$ 表示该时点 i 城市已被列入国家新一代人工智能创新发展试验区，$AI_{it}=0$ 则表示该时点 i 城市未被列入；待估计参数 α 为处置变量（AI_{it}）的回归系数，用于评估人工智能试验区政策对农业数字化的影响；X_{it} 为高维控制变量集合；$g(X_{it})$ 是被解释变量对高维控制变量的系数；U_{it} 为随机误差项，满足条件零均值假设。对公式（1）和公式（2）进行估计，得到人工智能试验区政策变量的估计系数如下：

$$\hat{\alpha} = \left(\frac{1}{n}\sum_{i\in I, t\in T} AI_{it}^2\right)^{-1} \frac{1}{n}\sum_{i\in I, t\in T} AI_{it}(DA_{it} - \hat{g}(X_{it})) \tag{3}$$

公式（3）中，$\hat{\alpha}$ 为处置变量的估计系数，n 为样本容量，$\hat{g}(X_{it})$ 为机器学习算法估计的函数拟合值。双重机器学习模型在第一阶段的正则化估计可能引入偏差，导致 α 的估计量不满足无偏性要求。为缓解正则化偏差、保证估计结果的一致性，本文进一步构建辅助回归如下：

$$AI_{it} = m(X_{it}) + V_{it} \tag{4}$$

$$E(V_{it} \mid X_{it}) = 0 \tag{5}$$

其中，$m(X_{it})$ 是处置变量（AI_{it}）对高维控制变量 X_{it} 的条件期望函数，本文运用机器学习模型估计其具体形式 $\hat{m}(X_{it})$；V_{it} 为误差项。具体通过三步法得到无偏的估计系数：第一步，估计辅助回归 $\hat{m}(X_{it})$，取其残差 $\hat{V}_{it} = AI_{it} - \hat{m}(X_{it})$；第二步，估计 $\hat{g}(X_{it})$，将主回归的形式改为 $DA_{it} - \hat{g}(X_{it}) = \alpha AI_{it} + U_{it}$；第三步，将 $\hat{V}_{it}$ 作为 AI_{it} 的工具变量进行回归，最终得到的无偏的估计系数 $\breve{\alpha}$ 为：

$$\check{\alpha} = \left(\frac{1}{n}\sum_{i\in I,t\in T}\widehat{V}_{it}\,AI_{it}\right)^{-1}\frac{1}{n}\sum_{i\in I,t\in T}\widehat{V}_{it}\left(DA_{it}-\hat{g}(X_{it})\right) \tag{6}$$

四、实证检验结果与分析

（一）农业数字化发展水平动态分析

基于熵值法测算的市域农业数字化发展指数，本文运用高斯核密度估计方法对全国及东中西三大区域的农业数字化发展趋势进行分析。本文设定 $F(x)$ 为农业数字化发展水平的密度函数[28]，其公式为：

$$F(x)=\frac{1}{Nh}\sum_{i=1}^{N}k\left(\frac{x_i-x}{h}\right) \tag{7}$$

其中，N 是观测值的个数，$k(\cdot)$ 是核函数，x_i、x 分别为独立同分布的观测值和均值，h 为带宽。

为更直观地反映农业数字化发展的动态分布与时空演变特征，通过绘制三维核密度分布图（见图2），揭示农业数字化发展空间变化趋势。

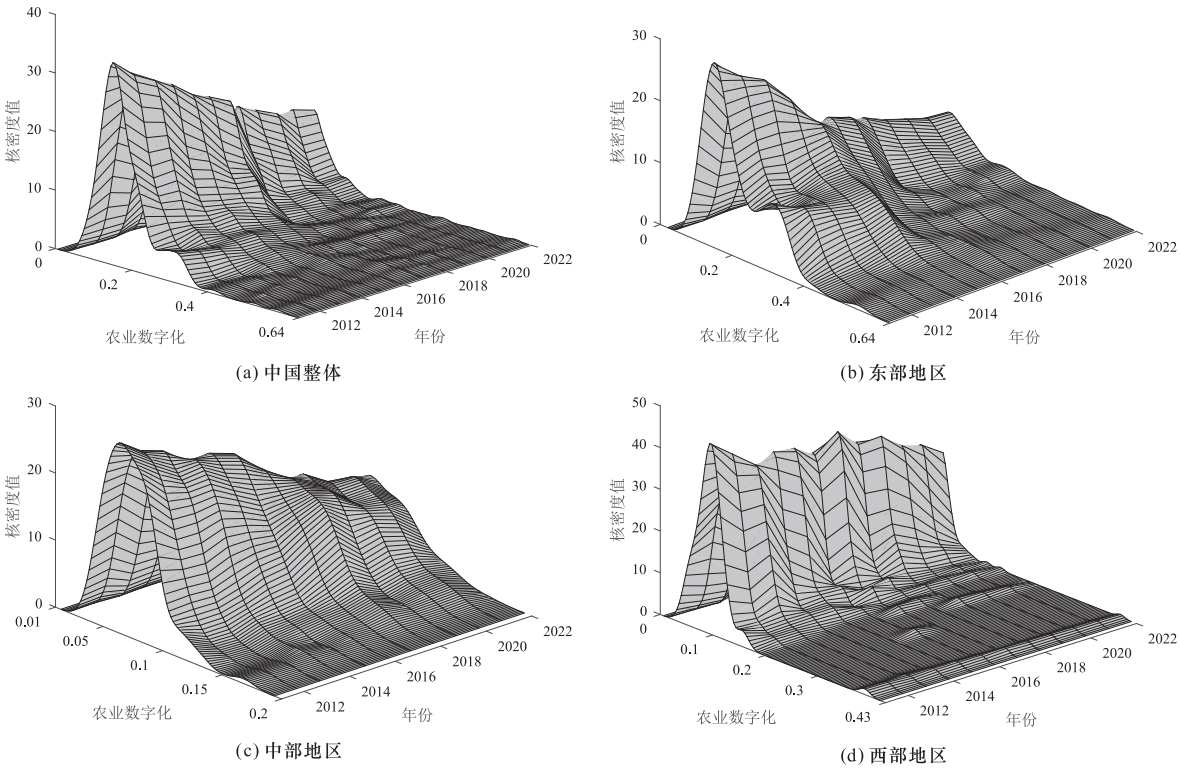


图2 2011—2022年农业数字化发展水平的三维核密度分布

从全国市域层面看，农业数字化发展水平的总体核密度曲线随时间变化向右偏移，表明发展水平呈现逐渐上升趋势；核密度曲线峰值逐渐下降，曲线宽度由窄变宽，且呈现多峰的发展分布态势，表明市域间农业数字化发展差距逐渐扩大，发展格局出现多极化现象。

分区域看，东部地区农业数字化发展水平位于0～0.64之间，核密度曲线峰值下降明显，曲线宽度由窄向宽迅速发展，且呈现多峰的分布态势，这表明随时间推移东部地区市域之间农业数字化发展差距不断扩大。中部地区农业数字化发展水平位于0～0.2之间，核密度曲线右移峰值逐步下降，曲线宽度由窄向宽发展，呈现由双峰向单峰演进趋势，这表明中部地区农业数字化发展水平

逐步上升，市域间农业数字化发展差距呈现明显扩大趋势。西部地区农业数字化发展水平位于0～0.43之间，核密度曲线右移峰值虽在2013年和2016年略有下降，但整体曲线趋于平稳，曲线宽度未有较大变化，呈现多峰的分布态势，这表明西部地区市域间农业数字化发展并未出现明显差异，但市域农业数字化发展内部出现极化趋势。

总体而言，我国市域农业数字化发展水平上升趋势明显，且呈现多极化现象；东部和中部地区市域间农业数字化发展差距均出现扩大趋势，西部地区市域间农业数字化发展差异不明显。

（二）基准回归分析

首先，本文运用双重机器学习模型中的随机森林算法，选择1∶4的样本分割比例进行回归分析。考虑到变量之间的非线性关系，为进一步提升模型的拟合精度，本文采用逐步回归的方式，并引入控制变量二次项、城市与时间固定效应进行分析，回归结果如表3所示。列（1）中未加入控制变量，仅考察人工智能试验区政策对农业数字化的基准影响，结果表明，政策实施对农业数字化的促进作用在1%的水平上显著。在逐步加入控制变量一、二次项及双向固定效应后［列（2）～（4）］，人工智能试验区政策对农业数字化的正向促进作用仍然显著。根据列（4）最终回归结果可知，在尽可能控制遗漏变量并提升模型拟合精度之后，政策变量对农业数字化影响的估计系数为0.046，在1%统计水平下显著正向影响农业数字化发展。

表3　人工智能试验区政策对农业数字化影响的基准回归结果

变量	农业数字化发展			
	（1）	（2）	（3）	（4）
人工智能试验区政策	0.064***（0.005）	0.045***（0.011）	0.046***（0.012）	0.046***（0.011）
控制变量一次项	否	是	是	是
控制变量二次项	否	否	否	是
城市固定效应	是	否	是	是
时间固定效应	是	否	是	是
Cons	−0.012***（0.001）	−0.001（0.001）	0.001**（0.000）	0.001**（0.000）
N	3288	3288	3288	3288

注：***、**、*分别表示在1%、5%和10%水平下显著；括号内为稳健的标准误。下表同。

（三）稳健性检验

1. 更换模型

为检验回归结果稳健性，本文将双重机器学习模型更换为一般的交互式模型进行分析。模型设定为：

$$DA_{it} = g(AI_{it}, X_{it}) + U_{it} \tag{8}$$

$$AI_{it} = m(X_{it}) + V_{it} \tag{9}$$

获得处理效应的估计系数如下：

$$\breve{\alpha} = E\left[g\left(AI_{it} = (1, X_{it}) \right) - g\left(AI_{it} = (0, X_{it}) \right) \right] \tag{10}$$

根据稳健性检验结果［表4列（1）］可知，在更换为交互式模型重新进行估计后，政策实施对农业数字化的促进作用仍在1%的水平下显著。

2. 更换机器学习算法

本文将随机森林算法更换为套索回归和梯度提升算法，重新对模型进行预测求解。根据表4列（2）、（3）的稳健性检验结果可知，在更换机器学习算法重新进行估计后，人工智能试验区政策仍正向显著推动农业数字化发展。

3. 更换样本分割比例

本文将机器学习模型中的样本分割比例重新划分为1∶3与1∶5进行预测分解。如表4列(4)、(5)所示,在将双重机器学习中的样本分割比例重新进行划分后,政策实施仍对农业数字化发展具有显著正向促进作用。

表4 稳健性检验结果

变量	交互式模型 (1)	套索回归 (2)	梯度提升 (3)	样本分割比例1∶3 (4)	样本分割比例1∶5 (5)
人工智能试验区政策	0.085***(0.002)	0.045***(0.008)	0.048***(0.017)	0.042***(0.012)	0.038***(0.011)
控制变量一次项	是	是	是	是	是
控制变量二次项	是	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是	是
Cons		0.000(0.001)	0.000(0.001)	0.001**(0.001)	0.001**(0.000)
N	3288	3288	3288	3288	3288

变量	并行政策1 (6)	并行政策2 (7)	城市-时间趋势项 (8)
人工智能试验区政策	0.046***(0.011)	0.048***(0.011)	0.019**(0.009)
控制变量一次项	是	是	是
控制变量二次项	是	是	是
城市固定效应	是	是	是
时间固定效应	是	是	是
Cons	0.001**(0.000)	0.001**(0.000)	0.002***(0.000)
N	3288	3288	3288

4. 剔除并行政策

为剔除同期政策对农业数字化发展的影响,本文对样本期间实施的“宽带中国”和“智慧城市”政策分别构建政策虚拟变量,并纳入回归分析过程中。由表4列(6)~(7)可知,在剔除同期两种并行政策后,回归结果仍在1%的水平下显著,基准回归结果的稳健性得到验证。

5. 考虑城市的时间变化趋势

考虑到各地市农业发展水平、农业数字基础设施建设以及外部环境的时序变化会对所在市域产生影响,本文在模型中引入城市-时间趋势项,以进一步验证人工智能试验区政策对农业数字化的作用。表4列(8)的结果显示,在加入城市-时间趋势项后,政策实施对农业数字化的正向影响仍然显著,基准回归结果的稳健性得到进一步验证。

(四)内生性处理

人工智能试验区政策能够促进农业数字化发展,而农业数字化基础较好地区可能被优先纳入政策试点地区,由此引发估计偏误。为有效缓解内生性问题,本文采取政策变量滞后一期与工具变量法进行内生性处理。构建的部分工具变量模型如下:

$$DA_{it} = \alpha AI_{it} + g(X_{it}) + U_{it} \tag{11}$$

$$IV_{it} = m(X_{it}) + V_{it} \tag{12}$$

其中,IV_{it}为工具变量。本文借鉴刘传明和马青山[29]的做法,以城市地形起伏度与时间虚拟变量的交互项作为本文的工具变量。选择该变量为工具变量的原因是:一方面,城市的地形起伏度

越大,政府与企业对数字基建的投入成本越高,数字基础建设的难度增加,从而影响人工智能政策的渗透与实施,满足相关性要求;另一方面,地形起伏度由自然演化形成,不受农业数字化的影响,满足外生性要求。内生性处理结果表明(见表 5),在控制内生性偏误后,人工智能试验区政策仍能够显著促进农业数字化的发展。

表 5　内生性检验结果

变量	滞后一期 (1)	工具变量 (2)
人工智能试验区政策	0.054***(0.013)	0.069***(0.022)
控制变量一次项	是	是
控制变量二次项	是	是
城市固定效应	是	是
时间固定效应	是	是
Cons	0.001***(0.001)	0.001*(0.000)
N	3014	3288

(五)传导机制检验

基于前文理论分析,农业技术创新供给与农业社会化服务保障在人工智能试验区政策赋能农业数字化发展过程中发挥中介传导作用。为进一步检验政策对农业数字化发展的作用机制,构建部分中介效应模型如下:

$$ME_{it} = \alpha AI_{it} + g(X_{it}) + U_{it} \tag{13}$$

$$E(U_{it} \mid AI_{it}, X_{it}) = 0 \tag{14}$$

公式(13)中,ME_{it}为中介变量,表示农业技术创新和农业社会化服务;$g(X_{it})$为中介变量对高维控制变量 X_{it}的函数。

1. 农业技术创新的路径检验

人工智能技术所带来的颠覆性技术变革,正在推动农业技术的革命性突破。农业技术的创新发展将进一步提升农业生产的数智化水平,促进农业全产业发展的数字化进程。表 6 列(1)报告了人工智能试验区政策对农业技术创新的回归结果。结果显示,该政策能够显著提升农业技术创新水平。这表明,人工智能试验区政策的实施,有利于农业技术的研发与投资,推动农业技术创新的发展与应用,助力农业生产工具的智能化升级,加速数据要素价值释放,从而为农业数字化转型提供关键技术支撑。

表 6　传导机制分析结果

变量	农业技术创新 (1)	农业社会化服务 (2)
人工智能试验区政策	0.227**(0.115)	0.011***(0.004)
控制变量一次项	是	是
控制变量二次项	是	是
城市固定效应	是	是
时间固定效应	是	是
Cons	−0.011(0.012)	−0.000(0.001)
N	3288	3288

2. 农业社会化服务的路径检验

农业社会化服务的发展,正在通过“技术+服务”的发展模式为农业生产者提供产前、产中、产后的全过程服务,依靠服务模式创新推动农业产业全链条的数字化转型,有效提升农业产业链附加值。由表6列(2)的结果可知,人工智能试验区政策在1%统计水平下显著促进农业社会化服务的发展。这表明,政策实施能够推动农业社会化服务的专业化、精准化和智能化,为农业经营主体提供技术服务保障,有效支撑农业数字化发展。

五、拓展分析

(一)市域发展基础异质性分析

1. 市域规模异质性分析

鉴于不同城市资源禀赋存在显著差异,人工智能试验区政策在赋能农业数字化过程中会出现区域异质性。为此,本文依据国务院发布的《关于调整城市规模划分标准的通知》,以500万人口作为界定标准,将城市样本划分为大中城市与特大城市两组①进行分组回归分析。根据表7列(1)、(2)的分析结果可知,政策实施显著促进了特大城市的农业数字化发展,但对大中城市农业数字化发展的影响并未通过显著性检验。究其可能原因,特大城市经济发展水平较高,往往具备较为完善的数字基础设施,能为人工智能试验区政策赋能农业数字化发展提供数字基础保障,而大中城市的数字化普及率与特大城市相比仍有待加强,从而限制了人工智能技术在其农业发展过程中的应用。此外,特大城市通常具备“虹吸效应”,人才、资金、技术优势明显,在人工智能技术研发与投入中具备明显资源优势,且享有技术创新的政策倾斜,能够首先推进人工智能技术在农业领域的渗透,促进农业数字化发展。因此相较于大中城市而言,特大城市能够快速响应人工智能政策红利,加快推动人工智能技术应用于农业发展全过程,扩大人工智能技术在农业领域的应用场景,从而推动农业数字化发展。

表7 市域发展异质性分析结果

变量	市域规模		数字鸿沟	
	大中城市(1)	特大城市(2)	较小(3)	较大(4)
人工智能试验区政策	0.032(0.022)	0.051***(0.011)	0.032***(0.010)	0.031(0.020)
控制变量一次项	是	是	是	是
控制变量二次项	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是
Cons	0.000(0.000)	0.001(0.001)	0.002(0.001)	0.001**(0.000)
N	2081	1207	1217	2071

2. 数字鸿沟异质性分析

区域数字鸿沟的差异会直接影响各地区经营主体对人工智能技术的应用程度。由于人工智能试验区政策对不同数字鸿沟地区的农业数字化影响存在明显异质性,本文借鉴付阳奇和朱玉春[30]的做法,使用地区互联网普及率作为地区数字鸿沟的代理变量,将互联网普及率高于均值的

① 考虑到小城市与超大城市样本量较少,因此将小城市并入大中城市组,超大城市归入特大城市组。

地区定义为数字鸿沟较小地区，低于均值的地区定义为数字鸿沟较大地区，并进行分组回归分析。根据表 7 列(3)、(4)的回归结果可知，人工智能试验区政策对数字鸿沟较小地区农业数字化的提升效应更为突出，而对数字鸿沟较大地区农业数字化的影响并不显著。可能的原因在于，数字鸿沟较小的地区，数字化普及率更高、数字基础设施更完善，能为农业数字化发展提供基础保障。同时，区域内农业生产经营主体往往具备较高的数字素养，能够借助人工智能政策试点红利，率先推动人工智能技术在农业领域的应用拓展，提升农业数字化发展效率。而数字鸿沟较大的地区，数字基础设施建设相对滞后，农业经营主体的数字素养普遍较低，在推进人工智能技术赋能农业发展过程中存在多重困境，难以承接政策赋能效应，导致人工智能试验区政策对当地农业数字化的提升作用不显著。

(二)市域创新动能异质性分析

1. 创新发展水平异质性分析

本文以地区人工智能专利申请数量的均值为划分标准，将高于均值的城市定义为人工智能创新发展高水平组，低于均值的城市定义为人工智能创新发展低水平组，并据此进行分组回归分析。表 8 列(1)、(2)的回归结果显示，相对于人工智能创新发展低水平组，人工智能试验区政策对人工智能创新发展高水平组的农业数字化发展影响更强。可能的原因是，人工智能创新高水平地区具备技术研发、资金投入优势，在政策支持下能够自主拓展人工智能农业应用场景，推进人工智能技术在农业领域的应用渗透。而人工智能创新低水平地区的创新投入资源有限，资金、技术和人才匮乏，整体智能创新基础薄弱，使得农业领域难以充分共享人工智能发展红利。

2. 数字产业集聚异质性分析

本文选取城市数字产业就业人员规模，采用区位熵法测算各城市数字产业集聚水平，并以样本均值为划分标准，将样本划分为高水平数字产业集聚组与低水平数字产业集聚组，进行分组回归异质性检验。由表 8 列(3)、(4)的回归结果可知，相较于低水平数字产业集聚组，人工智能试验区政策对高水平数字产业集聚地区农业数字化的正向影响更为显著。究其原因，数字产业集聚程度较高的城市，数字化相关产业发展迅速，能够在产业升级进程中有效承接人工智能试验区政策红利，并依靠自身的数字产业规模集聚效应，实现产业数字化转型升级。非农数字产业的发展为农业数字化转型提供技术支撑与设备资源，借助数字经济集聚外溢效应，推动人工智能技术与农业产业融合发展。而数字产业集聚水平较低的城市主要以传统工业和农业为主，数字基础设施建设滞后、数字化应用水平较低，难以有效发挥人工智能试验区政策在农业领域的实施效能，导致政策对该类地区农业数字化发展的促进作用较小。

表 8　市域创新动能异质性分析结果

变量	人工智能技术创新		数字产业集聚	
	高(1)	低(2)	高(3)	低(4)
人工智能试验区政策	0.037***(0.012)	0.043**(0.019)	0.046***(0.014)	0.027*(0.015)
控制变量一次项	是	是	是	是
控制变量二次项	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是
Cons	0.005 (0.003)	0.001**(0.000)	0.001 (0.001)	0.001**(0.001)
N	328	2960	1062	2226

六、结论与政策启示

本文基于2011—2022年中国274个地级市的面板数据，以国家新一代人工智能创新发展试验区为准自然实验，通过熵值法测算农业数字化发展指数，并运用双重机器学习（DML）方法分析该政策试点对农业数字化发展的影响及其作用机制，同时在市域发展基础和创新动能方面进行异质性分析。结果表明：（1）中国市域农业数字化发展水平上升趋势明显，且呈现多极化现象，东部和中部地区市域间农业数字化发展差距均出现扩大趋势，西部地区市域间农业数字化发展差距不明显。（2）基准回归检验结果显示，人工智能试验区政策对农业数字化具有显著促进作用；在经过稳健性检验与内生性处理后，该政策试点仍能显著推动农业数字化发展。（3）作用机制检验结果发现，人工智能试验区政策可通过提升农业技术创新和农业社会化服务水平两条路径，助力农业数字化发展。（4）异质性分析表明，人工智能试验区政策对农业数字化的影响在市域发展和创新动能方面存在明显的异质性特征。发展基础好和创新动能强的地区逐渐成为享受智能政策红利的先行区，与其他地区之间出现明显的智能鸿沟现象。根据上述研究结论，本文得出如下政策启示：

一是要加快农业数智化转型升级、拓宽人工智能在农业领域的应用场景。一方面，积极推动传统农机设备的智能化升级，加快农业科技创新的应用与转化。将农业机器人、智能农机设备应用于农业生产全过程，为提升农业全要素生产率、农产品质量安全和附加值提供关键力量。另一方面，加快推进农业AI大模型的研发与应用，通过研发调整农业AI大模型以适配农业各类复杂场景。将机器学习、深度学习、自然语言处理等人工智能技术嵌入农业创新发展过程，为农业数字化发展提供技术支撑。

二是应创新农业社会化服务模式、推进农业社会化服务全链条数字化转型。一方面，依靠“AI+服务”的发展方式，建立农业社会化数字服务平台，通过线上社会化服务为农业生产者提供个性化、专业化的服务内容，拓宽农业社会化服务边界；另一方面，促进农业全产业链服务体系的数字化转型，将农资供应、农技推广、金融服务和信息服务等统一纳入数字化服务框架，整合农业全产业链服务资源，以服务数字化推动农业数字化发展。

三是需根据区域农业数字化发展差异，实施人工智能区域差异化发展策略。首先，分类部署农业数字基础设施建设，加快建设农业全产业链覆盖网络，根据区域农业数字化发展水平，扩大涉农数据收集的覆盖范围，为AI大模型的数据分析提供基础支撑。其次，对于发展基础雄厚和创新能力强的地区，要充分利用资金、技术和人才优势，加快推进人工智能技术在农业领域的应用场景，实现农业由单一生产向服务功能拓展。对于发展基础薄弱和创新能力弱的地区，应优先推广低成本、见效快和轻量化的人工智能技术，以解决农业数字化发展过程中的痛点。

参考文献：

[1]穆月英，刘景政. 人工智能驱动农业高质量发展：理论逻辑、实践困境与推进路径[J]. 华南农业大学学报（社会科学版），2026（1）：1－11.

[2]于晓莉，温雪. 人工智能助力乡村产业数字化转型的理论机制与路径对策[J]. 宏观经济研究，2025（10）：46－58.

[3]蒙慧，刘允秀，刘光旭. DeepSeek何以赋能智慧农业高质量发展：内在机理与路径选择[J]. 西北农林科技大学学报（社会科学版），2026（1）：48－58.

[4]崔凯. “数据－场景”互构：农业数字化转型的推动逻辑与实现机制——基于浙江两地产业大脑建设的案例研究[J]. 电子政务，2026（4）：68－79.

[5]谢康，易法敏，古飞婷. 大数据驱动的农业数字化转型与创新[J]. 农业经济问题，2022(5)：37－48.
[6]MISRA N N, DIXIT Y, AL-MALLAHI A, et al. IoT, big data, and artificial intelligence in agriculture and food industry[J]. IEEE Internet of things journal, 2020(9): 6305－6324.
[7]SHAIKH T A, RASOOL T, LONE F R. Towards leveraging the role of machine learning and artificial intelligence in precision agriculture and smart farming[J]. Computers and electronics in agriculture, 2022, 198: 107119.
[8]SHAIKH T A, RASOOL T, MIR W A. Fields of the future: digital transformation in smart agriculture with large language models and generative AI[J]. Computer standards & interfaces, 2025, 94: 104005.
[9]ISSA A A, MAJED S, ABDUL AMEER S, et al. Farming in the digital age: smart agriculture with AI and IoT[C]// STAR2023. E3S web of conferences: Volume 477. Les Ulis: EDP Sciences, 2024.
[10]BHAT S A, HUANG N F. Big data and AI revolution in precision agriculture: survey and challenges[J]. IEEE Access, 2021, 9: 110209－110222.
[11]陈雨露. 数字经济与实体经济融合发展的理论探索[J]. 经济研究，2023(9)：22－30.
[12]崔宁波，刘紫薇，董晋. 智慧农业助力粮食生产减损的内在逻辑与长效机制构建[J]. 农业经济问题，2023(10)：116－128.
[13]黄先海，黄雨晗，虞柳明. 人工智能赋能农业新质生产力：实现逻辑、运行机制与跃升路径[J]. 中国农村经济，2025(7)：3－22.
[14]汝刚，刘慧，沈桂龙. 用人工智能改造中国农业：理论阐释与制度创新[J]. 经济学家，2020(4)：110－118.
[15]李凡略，何可. 人工智能赋能农业现代化大产业建设：内在逻辑、现实基础与优化路径[J/OL]. 西北工业大学学报(社会科学版)，2026－04－24[2026－04－24]. https://link. cnki. net/urlid/61. 1352. c. 20260423. 1119. 002.
[16]王昕天，荆林波，冯章伟. 产业链视角下电商驱动农业数字化转型的理论解构与案例分析——兼论农业“产业大脑”的经验启示[J]. 中国农村观察，2025(1)：43－62.
[17]李旭辉，陈梦伟. 中国乡村数字化转型：测度、区域差异及推进路径[J]. 农业经济问题，2023(11)：89－104.
[18]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(8)：222－233.
[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.
[20]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(4)：135－144.
[21]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(4)：90－98.
[22]王恒，方兰. 中国农业数字化与绿色化时空耦合协调关系及驱动力分析[J]. 长江流域资源与环境，2023(4)：868－882.
[23]李媛，熊婉辰，任保平. 中国农业数字化水平的区域差异、动态演进与形成机理[J]. 经济与管理评论，2025(1)：148－160.
[24]魏滨辉，罗明忠. 数字经济对农业生产性服务业的影响——基于非农就业和要素供给视角[J]. 南京农业大学学报(社会科学版)，2024(1)：154－166.
[25]张恒，郭翔宇. 农业生产性服务业发展与农业全要素生产率提升：地区差异性与空间效应[J]. 农业技术经济，2021(5)：93－107.
[26]CHERNOZHUKOV V, CHETVERIKOV D, DEMIRER M, et al. Double/debiased machine learning for treatment and structural parameters [J]. The econometrics journal, 2018(1): 1－68.
[27]张涛，李均超. 网络基础设施、包容性绿色增长与地区差距——基于双重机器学习的因果推断[J]. 数量经济技术经济研究，2023(4)：113－135.
[28]周正柱，冯博文. 长三角城市群商品流通发展的时空演变特征、区域差异及分布动态演进[J]. 上海交通大学学

报(哲学社会科学版),2024(2):24-47.
[29]刘传明,马青山.网络基础设施建设对全要素生产率增长的影响研究——基于"宽带中国"试点政策的准自然实验[J].中国人口科学,2020(3):75-88.
[30]付阳奇,朱玉春.数字基础设施建设对农产品市场分割的影响——基于"宽带中国"战略试点的准自然实验[J].中国农村经济,2024(1):62-81.

The Empowerment Effect, Mechanism and Heterogeneity of Artificial Intelligence Pilot Zone Policies on Agricultural Digitization

LUO Ming-zhong[a,b], LI Yuan-hao[a]
(*a. College of Economics and Management; b. Rural Revitalization Laboratory, South China Agricultural University, Guangzhou* 510642, *China*)

Abstract: The integration of artificial intelligence technology into agricultural digitization is an inevitable trend of agricultural modernization. Taking the National New Generation Artificial Intelligence Innovation and Development Pilot Zone policy as a quasi-natural experiment, this paper measures the development index of agricultural digitization based on the panel data of 274 prefecture-level cities in China from 2011 to 2022, and adopts the Double Machine Learning (DML) method to analyze the impact of artificial intelligence pilot zone policy on agricultural digitization and its influencing mechanism. The results show that the overall development trend of agricultural digitization is obvious and presents a multi-polar phenomenon. Benchmark regression results indicate that policy implementation has a significant promoting effect on agricultural digitization, which passes robustness and endogeneity tests. Mechanism analysis shows that policy implementation can promote agricultural digitization development through agricultural technological innovation and agricultural socialized services. Heterogeneity analysis suggests that the policy can significantly boost agricultural digitization in megacities, cities with smaller digital divide, cities with high-level artificial intelligence innovation and development and cities with high-level digital industry agglomeration. Accordingly, it is essential to expand the application scenarios of artificial intelligence in agriculture, innovate new development modes of agricultural socialized services and implement regional differentiated development strategies, so as to facilitate agricultural digitization and agricultural and rural modernization.

Key Words: artificial Intelligence; agricultural digitization; agricultural technological innovation; agricultural socialized services

【责任编辑:毛殷】