

DOI: 10.12357/cjea.20240407

CSTR: 32371.14.cjea.20240407

陈卫洪, 刘纯, 马志懿. 数字能力对农户农药施用强度影响的研究——基于 CRRS 微观调查数据分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(11): 1843-1856

CHEN W H, LIU C, MA Z Y. Impact of digital capabilities on farmers' pesticide application intensity: Analysis based on CRRS microscopic survey data[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(11): 1843-1856

# 数字能力对农户农药施用强度影响的研究\*

## ——基于 CRRS 微观调查数据分析

陈卫洪<sup>1,2</sup>, 刘纯<sup>1\*\*</sup>, 马志懿<sup>1</sup>

(1. 贵州大学经济学院 贵阳 550025; 2. 贵州省丹穴山朴门永续发展有限公司 长顺 550700)

**摘要:** 数字能力是农户获取并使用信息资源的重要技能, 对促进农药减量增效与加快农业发展方式绿色转型具有重要作用。本文基于 2020 年中国乡村振兴综合调查 (CRRS) 数据, 从数字接入条件、数字资源需求和数字应用能力 3 个维度构建数字能力指标体系, 实证检验农户数字能力对农药施用强度的作用机制。研究结果表明: 1) 农户数字能力提升显著降低农药施用强度, 该结论在经过一系列稳健性检验后仍成立。2) 数字接入条件、数字资源需求和数字应用能力 3 个维度的数字能力均能显著降低农户农药施用强度, 并且综合测度数字能力的影响作用远大于单一维度。3) 机制分析结果表明, 数字能力能够通过农药机械作业、组织能力优化和生态素养提升 3 个机制显著降低农户农药施用强度。4) 异质性分析结果表明, 农户数字能力提升对高龄组、小规模种植组与一般村庄的农户农药施用强度影响效应更大。为此, 应加快推进数字乡村建设, 健全数字基础设施全覆盖及信息服务体系, 构建农户数字能力提升培育体系, 强化数字农业技术推广服务体系, 助推农业发展方式绿色转型。

**关键词:** 数字能力; 农药施用强度; 农药减量; 绿色农业; 中国乡村振兴综合调查 (CRRS) 数据库

**中图分类号:** F323

## Impact of digital capabilities on farmers' pesticide application intensity: Analysis based on CRRS microscopic survey data\*

CHEN Weihong<sup>1,2</sup>, LIU Chun<sup>1\*\*</sup>, MA Zhiyi<sup>1</sup>

(1. School of Economics, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Guizhou Danxueshan Permaculture Development Co., Ltd., Changshun 550700, China)

**Abstract:** In the context of the digital economy, digital capability is an important skill for farmers to acquire and utilize information resources. This capability plays a crucial role in promoting pesticide use reduction and efficiency improvement as well as accelerating the green transformation of agricultural development. This study, therefore, constructed a theoretical analysis framework to exam-

\* 国家自然科学基金项目 (BGX230346)、国家自然科学基金项目 (71963006)、教育部新农科研究与改革实践项目 (2020347)、贵州省科技平台及人才团队计划项目 (黔科合平台人才 [2017]5647)、贵州省教育厅人文社会科学研究项目 (2024RW321) 和中国社会科学院重大经济社会调查项目 (GQDC2020017) 资助

\*\* 通信作者: 刘纯, 研究方向为农业经济管理和生态经济。E-mail: liuchun1126@126.com

陈卫洪, 研究方向为农林经济理论与政策、气候变化与低碳经济、资源环境与区域发展、数字经济与农业大数据。E-mail: 2423760452@qq.com

收稿日期: 2024-07-09 接受日期: 2024-08-27

\* This study was supported by the National Social Science Foundation of China (BGX230346), the National Natural Science Foundation of China (71963006), the New Agricultural Research and Reform Practice Project of Ministry of Education of China (2020347), Guizhou Science and Technology Platform and Talent Team Project (Guizhou Science Platform Talents [2017] 5647), the Humanities and Social Science Project of Department of Education of Guizhou Province (2024RW321) and Major Economic and Social Investigation Project Funded by the Chinese Academy of Social Sciences (GQDC2020017).

\*\* Corresponding author, E-mail: liuchun1126@126.com

Received Jul. 9, 2024; accepted Aug. 27, 2024

ine the impact of farmers' digital capability on pesticide application intensity. It revealed the pathways through which the digital capability of farmers affect pesticide application intensity, thereby offering crucial insights and serving as an important reference for enhancing green and high-quality agricultural development. Based on the 2020 China Rural Revitalization Survey (CRRS) Database, this study constructed a digital capability index system specifically for farmers. The multiple linear regression models and mechanism testing models were used to explore the impact of farmers' digital capability on pesticide application intensity. The innovation of this study lay in the use of a factor analysis method to construct a digital capability indicator system for farmers based on three dimensions — digital access condition, digital resources demand, and digital application capability. A total of 13 secondary indicators were selected to characterize farmers' digital capability, which can effectively address the limitations of existing researched that relied solely on single indicators, such as Internet or cell phone access, as proxy variables for digital capability. This approach can provide a reference for future studies. The results indicated the following: First, the improvement of digital ability can significantly reduce the intensity of pesticide application by farmers, and this conclusion still held after considering endogeneity issues and conducting a series of robustness tests. Second, the three dimensions of digital access condition, digital resources demand, and digital application capability significantly reduced the intensity of pesticide application by farmers. Specifically, the impact of digital resources demand was greater than those of digital access condition and digital application capability, and the comprehensive measurement of the impact of digital capability was much greater than that of a single dimension. Third, the mechanism analysis results indicated that digital capability significantly reduced farmers' pesticide application intensity through three pathways — pesticide machinery operation, organizational capability optimization, and ecological literacy improvement. Fourth, the heterogeneity analysis results indicated that the improvement in farmers' digital capability had a more significant impact on the reduction in pesticide application intensity among farmers in elderly group, small scale planting group, and ordinary village. Based on these conclusions, this study proposed the following policy recommendations: to accelerate the construction of digital rural areas and ensure the full coverage of digital infrastructure and information service systems, to establish a cultivation system to enhance the digital capability of farmers, and to improve farmers' digital capability.

**Keywords:** Digital capability; Pesticide application intensity; Pesticide reduction; Green agriculture; China Rural Revitalization Survey (CRRS) Database

推进农药减量化是促进农业高质量发展和加快农业全面绿色转型的必然要求,也是保障农产品质量和加强生态文明建设的重要举措。长期以来,农药作为保障型生产资料,对农业稳产起着“保驾护航”的重要作用。自 2015 年起,我国粮食产量已连续 9 年稳定在 6.5 亿吨以上 ([https://www.gov.cn/yao wen/liebiao/202312/content\\_6920992.htm](https://www.gov.cn/yao wen/liebiao/202312/content_6920992.htm))。但在农业生产过程中,农药过量施用与利用率较低的现象仍广泛存在<sup>[1]</sup>。截至 2020 年底,我国化学农药利用率仅为 40.6% ([https://www.gov.cn/xinwen/2021-01/17/content\\_5580555.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2021-01/17/content_5580555.htm))。未被农作物吸收的农药微粒扩散至大气,或通过雨水和灌溉水残留于水体和土壤中,造成农业面源污染。农药残留通过食物链进入人体或者农药暴露导致人类健康风险等问题<sup>[2]</sup>,因此,农药减量增效行动迫在眉睫。为此,2022 年农业农村部发布《到 2025 年化学农药减量化行动方案》,重点强调水稻 (*Oryza sativa*) 和小麦 (*Triticum aestivum*) 等主要粮食作物化学农药使用强度力争比“十三五”期间降低 5%;2024 年中央“一号文件”进一步提出扎实推进化肥农药减量增效的目标与要求。因此,深入探究降低农药施用强度和推进农药减量增效的具体实施路径,对于促进农业高质量发展,加快农业发展方式绿色转型具有重要意义。

在数字经济时代下,农村地区数字基础设施不断完善,数字技术对传统农业进行了全方位和全链条的改造,不断影响着农业生产与农村生活等多个场景<sup>[3]</sup>。截至 2023 年 12 月,我国网民规模达 10.92 亿人,互联网普及率达 77.5%,其中农村网民规模达 3.26 亿人(第 53 次《中国互联网络发展状况统计报告》)。以互联网为基础的数字化生活方式逐渐成为常态,农户思维模式与认知能力因数字赋能悄然发生改变<sup>[4]</sup>。作为数字时代重要的新型人力资本,数字能力是农户获取与利用信息资源的重要素养与技能,是解决市场中信息不均衡分布与不完全传递困境的“钥匙”,为促进农药减量增效和推动农业绿色发展注入原动力。基于“大国小农”的基本国情农情,小农户数量占农业经营主体的 98% 以上(2017 年第三次全国农业普查数据),小农户是农药减量施用的关键主体<sup>[5]</sup>。在数字经济时代下,数字能力作为人力资本的重要组成部分,能否成为降低农药施用强度的内生动力?数字能力在影响农户思维模式与认知水平的同时,通过何种路径间接降低农药施用强度?农户数字能力提升进而降低农药施用强度的影响效应是否存在异质性?以上关键问题亟须展开系统深入的理论阐释与实证检验。

从目前国内外关于数字能力的研究成果来看,

学界主要聚焦于理论研究与实证研究两个方面。一方面, 数字能力的理论主要内容集中于内涵定义与框架构建。国际话语体系结构中数字能力的概念呈多元化发展态势, 从早期 Zurkowski<sup>[6]</sup> 提出信息素养 (information literacy) 后, 学界接踵提出数字素养 (digital literacy)<sup>[7-8]</sup> 和数字技能 (digital skills)<sup>[9]</sup> 等概念, 进一步丰富与拓展了数字能力的内涵定义。其中, 颇具权威性的是 2022 年欧盟修订发布的《公民数字能力框架》<sup>[10]</sup>, 将公民数字能力概括为信息数据素养、沟通协作、数字化内容创作、安全与问题解决 5 个方面。另一方面, 数字能力的实证研究主要集中于指标测算与驱动效应研究。随着数字技术快速迭代更新, 数字能力测算及指标体系构建呈综合性、动态性和开放性的特点。王小华等<sup>[4]</sup> 从数字接入、数字使用和数字创造 3 个维度构建并测度数字能力指数, 进一步探讨数字能力对家庭风险金融资产配置的影响效应。苏岚岚等<sup>[11]</sup> 采用主成分分析法从数字化通用素养、数字化社交素养、数字化创意素养和数字化安全素养 4 个维度测度农民数字素养综合水平。此外, 在数字经济时代, 数字能力的驱动效应备受关注。目前, 已有研究聚焦数字能力的增收效应<sup>[12]</sup>。互联网基础设施不断完善虽然缩小了数字接入鸿沟, 但同时触发了数字红利差异<sup>[13]</sup>, 数字能力悬殊引致的“二级数字鸿沟”成为主要矛盾, 使得增收效应不具备包容性, 从而可能导致数字不平等问题<sup>[14]</sup>。在乡村建设的驱动效应上, 部分研究表明数字能力对促进农民参与乡村数字治理具有显著的正向效应<sup>[15-16]</sup>, 同时能够增强乡村贫困人口的生计抗逆力和乡村持续减贫水平<sup>[17]</sup>。

农户作为农药施用的关键主体, 现有研究针对农药施用行为展开丰富讨论。就内部影响因素而言, 农户个体与家庭特征<sup>[18]</sup> 和风险感知<sup>[19]</sup> 等因素均会对农药施用行为产生影响。就外部环境因素而言, 社会规范<sup>[20]</sup>、友好型标签<sup>[21]</sup>、社会化服务<sup>[22]</sup> 和农药施用技术培训<sup>[23]</sup> 等已被证实是农药减量的重要驱动因素。数字能力作为数字时代的新型人力资本, 鲜有研究深入探讨数字能力对农药施用强度的影响效应。进一步挖掘与此议题相关的研究成果发现, 现有研究业已证实电商参与<sup>[24]</sup> 和互联网使用<sup>[25-27]</sup> 等数字能力的某一维度能够显著促进农户采纳绿色生产行为或绿色农业技术, 这为本文的进一步拓展与深化提供了丰富的前期研究基础。但应当注意的是, 随着我国乡村地区数字基础设施不断完善, 数字接入鸿沟趋向填平, 农户应用数字技术和参与数字经济的

能力, 是决定其分享数字红利的关键因素。而上述研究多以互联网或智能手机的接入与使用作为数字能力的代理变量, 在当前数字鸿沟问题主要矛盾进一步深化的现实背景下, 农户数字能力的准确刻画有待完善。

综上所述, 在已有探讨数字能力与农药施用强度相关研究的基础上, 仍存在可拓展与深化的空间。本文的边际贡献在于: 第一, 在农户数字能力的指标体系构建与测度方面, 通过因子分析法从数字接入条件、数字资源需求和数字应用能力 3 个维度构建农户数字能力指标体系, 选取 13 项二级指标对数字能力进行刻画, 能够有效弥补现有研究以互联网或智能手机的接入与使用等单一指标作为数字能力代理变量的缺陷, 为后续研究提供可参考的指标构建范式。第二, 现有研究聚焦农户数字能力对化学农药施用强度影响效应的研究相对较少, “农户数字能力—农药施用强度”理论逻辑的内在机理尚需进一步剖析。鉴于此, 本文构建农户数字能力, 提升对农药施用强度影响效应的理论分析框架, 通过实证检验农药机械作业、组织能力优化与生态素养提升 3 个理论机制, 揭示农户数字能力对农药施用强度的影响效应与作用机制, 以期相关政策制定与实践提供科学依据。

## 1 理论分析与研究假说

农户作为“理性经济人”, 其行为决策在于对成本投入和预期收益的考量, 即是否能够实现经济利益最大化<sup>[28]</sup>。但农药过量施用显然偏离“理性经济人”假设, 处于“非理性均衡”状态<sup>[29]</sup>。发展经济学理论认为, 较高的风险规避程度是小规模农户的重要特征<sup>[30]</sup>; 同时, 作为保障型生产资料, 农户对农药具有较强的刚性需求<sup>[31]</sup>, 在遭遇病虫害侵袭风险时, 降低农药施用强度可能导致短期作物减产和收益降低等生产经营风险, 因此农药施用强度居高不下<sup>[1]</sup>。此外, 农村地区兼业化程度加深, 留守劳动力弱质化使其在市场交易中面临明显的信息不对称, 知识与技术的有限性约束着农户对农药的质量甄别与用量判断能力<sup>[5]</sup>, 农户倾向于增加农药等劳动替代性生产资料的投入强度。根据舒尔茨人力资本理论, 数字能力作为数字经济时代的新型人力资本, 为破除农药过量施用的“非理性均衡”状态注入了新动力。首先, 以互联网为基础的数字化生产生活逐渐成为常态, 农业大数据、物联网和人工智能等新兴数字技术极大地改变了农村社会经济形态, 农户的思维模式与

认知能力因数字赋能悄然发生改变<sup>[4]</sup>。其次,数字能力是农户获取与利用信息资源的重要素养与技能,是破解市场中信息不均衡分布与不完全传递困境的“钥匙”。农户数字能力提升能够促进其与外界的信息共享传播,借助互联网实现高效、实时和低成本的资源整合、信息传递和便捷交流,农户借助信息优势可以显著降低信息搜寻、获取和共享的成本<sup>[11]</sup>。具体而言,本文将从农药机械作业、组织能力优化与生态素养提升 3 条路径阐述数字能力影响农药施用强度的内在机理(图 1)。基于上述理论分析,提出假说 H1。

H1: 农户数字能力提升能够降低农药施用强度。

### 1.1 农药机械作业

农户数字能力提升能够通过农药机械化作业实现劳动力要素替代,进而降低农药施用强度。具备数字能力的农户能够熟练运用网络平台进行信息检索与识别,突破就业信息壁垒<sup>[32]</sup>,以较低成本获取非农就业岗位信息,使农村劳动力从事非农工作的机会成本与职业竞争力同步增加。然而,农村地区剩余劳动力不断向第二、三产业转移,劳动力成本逐渐攀升诱致农户利用机械作业替代劳动<sup>[33]</sup>。病虫害防治属于技术密集型环节,对施药者能力与技术要求较高<sup>[34]</sup>,当留守劳动力对精准施药的决策知识超出经验性知识范围时,将出现盲目用药或过量施药行为<sup>[23]</sup>。而机械作业具备施药均匀、作业规范和精准性强等优势,能有效避免因个体主观因素导致的施

药不规范,从而降低农药施用强度。此外,农村地区数字基础设施不断完善,互联网使用提高了农村劳动力接受非正规教育的便利性<sup>[35]</sup>,形成明显的人力资本积累效应,农户数字能力提升有助于增强其内生发展能力。农户能够自发地利用数字平台接收到新药剂、新机械及新技术等农药减量控害的信息。具备数字能力的农户可利用数字平台优化劳动、土地和资本等投入要素的配置效率,缓解采纳农药机械作业的要害禀赋约束<sup>[36]</sup>,减少农药过量施用的冗余成本,从而降低农药施用强度。

### 1.2 组织能力优化

网络信息的快速传播构建了一个高效沟通的平台,有效打破了社群网络在地理位置上的固化问题。农户数字能力提升有助于拓宽社会资本和丰富社会网络,特别是以微信为代表的社交媒体能够提升社会网络内部信息沟通的便捷性,使社会关系的建立和维护成本大幅降低<sup>[37]</sup>,助推农户加入正式组织或非正式组织。合作社作为由农户自愿组织、共同所有与管理的合作经济组织,与农户日常生活紧密相关,是组织能力优化的首要选择。一方面,现有研究已证实加入合作社能促进农户农药与化肥减量施用<sup>[38]</sup>。同时,合作社作为一种农业合作组织,具有较强的组织与规模效应,在要素市场上拥有更高的议价能力,能够显著降低个体在采用精准施药技术或更换高效、低毒和低残留农药等农药减量措施时面临的风险和成本问题<sup>[22]</sup>。另一方面,中国传统农村是

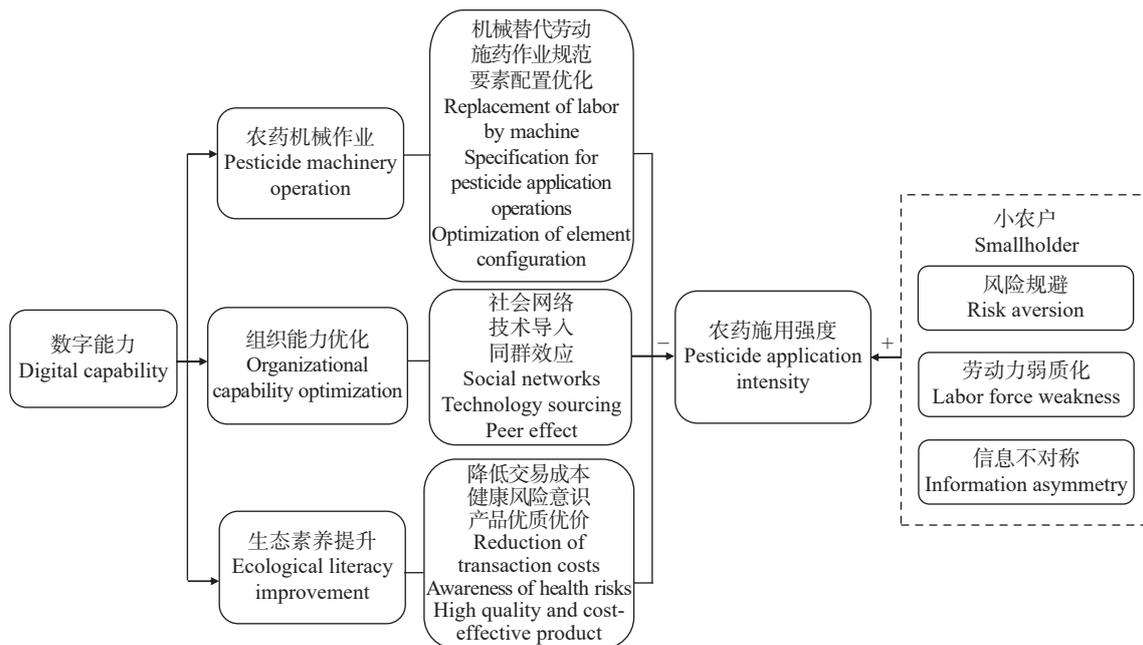


图 1 数字能力影响农户农药施用强度的理论分析框架

Fig. 1 Analysis framework of the impact of digital capability on farmers' pesticide application intensity

典型的“熟人社会”,合作社内部信息共享将强化农户间对农药减量的信息传递与行为模仿,促使农户渴求获得社会认同感和集体归属感,使“同群效应”对降低农药施用强度的促进作用得以发挥<sup>[20]</sup>。同时,农户将置身于更加透明的社会监督中,合作社规章条例的客观规定将有效约束农户施药行为。在社会认同感的主观规范和社会监督的无形约束下,有助于降低农户农药施用强度。

### 1.3 生态素养提升

农户数字能力提升能够促进其树立生态意识,提高生态素养,进而降低化学农药施用强度。从理论上讲,农户数字能力提升有助于增强其内生发展能力,通过提升信息获取、技能学习和经验模仿等能力,形成明显的人力资本积累效应,农户的生态素养与环境感知因数字赋能悄然发生改变,生态素养的提升使农户更倾向于降低农药施用强度。首先,从主观层面而言,互联网广泛传播的农药过量施用所导致的食物安全和农业面源污染信息将通过视频、文字和图片等多种形式传递给农户,使其逐渐建立起生态意识,在主体认知层面上有助于诱发农户的环境情感共鸣和健康风险意识<sup>[27]</sup>,降低了农药施用强度。其次,从消费端而言,农户数字能力的提升能够使其熟练运用数字平台拓宽销路,促进农产品供应链扁平化,增强市场和产品信息的透明度,缓解买卖双方信息不对称问题,将农产品小市场扩展为全国性大市场,进而提升农产品市场的有效性,促进价格机制的有效发挥,使绿色农产品形成质量溢价<sup>[24]</sup>。在市场对绿色农产品“优质优价”的反向激励下,提升农户对绿色农产品的价格预期,且在农产品质量追溯体系不断完善的过程中,形成激励和监督机制,推动并倒逼农户降低农药施用强度。基于上述理论分析,提出假说 H2。

H2: 农户数字能力提升能够通过农药机械作业、组织能力优化和生态素养提升降低农药施用强度。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

本文实证分析数据来自 2020 年中国乡村振兴综合调查 (CRRS),该调查数据依托中国社会科学院重大经济社会调查项目,围绕农民收支、农业生产结构、生产方式、生产环境、农户金融市场参与、信息化与电商发展等乡村振兴领域重大问题开展调查,涵盖本文所需的全部微观指标。2020 年,项目组于广东、浙江、山东、安徽、河南、黑龙江、贵州、

四川、陕西和宁夏 10 个省(自治区)完成调查,调查省份分属东、中、西和东北 4 个经济地区。调研采用分层抽样、等距抽样与随机抽样结合的方法,在实际抽样过程中,首先根据县级人均 GDP 和乡镇行政村经济发展情况进行分层抽样,再根据村庄花名册随机抽取样本农户。调查数据覆盖全国 50 个县(市、区)、156 个乡镇、308 个行政村以及 3833 户农村家庭。样本中近半数农户退出农业生产,剔除关键变量的缺失值与异常值后,共保留 1665 个观测值。

### 2.2 变量设置

1) 因变量。因变量为农药施用强度,采用农户单位播种面积的平均农药施用费用表征。事实上,现有研究主要通过单位播种面积平均农药施用量、农药施用费用以及农药施用次数对农药施用强度进行定义。然而,安宁等<sup>[39]</sup>认为农药种类和包装各异,难以识别实际有效施用量,且同一类型农药的药效也可能存在较大差异,使用单位播种面积平均农药施用量和施用次数衡量农药施用强度存在较大误差。此外,经济作物与粮食作物间农药施用强度存在显著差异,本文以粮食作物作为研究对象。不同于经济作物,粮食作物病虫害同质性较强,用于粮食作物的农药价格差异较小。因此,使用“费用”优于“数量”。为缓解异方差影响,对其作对数处理。

2) 核心解释变量。核心解释变量为数字能力。结合农户实际生产生活,依据《提升全民数字素养与技能行动纲要》和《2022 年提升全民数字素养与技能工作要点》等政策文件,从数字接入条件、数字资源需求以及数字应用能力 3 个维度选取 13 项二级指标,使用因子分析法构建数字能力指标体系(表 1)。首先,数字接入条件是农户提升数字能力的根基,智能手机等硬件设备及网络环境的稳定性共同构成完备的数字接入条件<sup>[40]</sup>,二者缺一不可。因此,选取“您家目前是否有电脑”和“您是否使用 4G/5G 手机”衡量农户硬件设备,选取“您家网络条件是否非常好”衡量农户网络环境,并综合构成数字接入条件指标,用以反映农户是否具有使用机会。其次,数字资源需求是农户参与数字网络生活主动性的具体体现,而资源获取的及时性将很大程度影响农户满意度,进而反作用于主体主动性。因此,选取“您是否希望通过手机或网络关注信息”“您重点关注的信息是否能及时获取”和“您是否能通过手机或网络随时获取相关信息”,综合构成数字资源需求指标,从而明晰农户是否具有数字资源需求。最后,数字应用能力是农户数字能力最直观反映。目前,社交、

表 1 农户数字能力指标体系及描述性统计  
Table 1 Digital capability index system of farmers and descriptive statistics

维度 Dimension	测量题项及赋值标准 Measurement items and assignment criteria	均值 Mean value	标准差 Standard deviation
数字接入条件 Digital access condition	您家目前是否有电脑: 是=1, 否=0 Do you currently have a computer at home: yes=1, no=0	0.262	0.440
	您是否使用4G/5G手机: 是=1, 否=0 Do you use a 4G/5G cell phone: yes=1, no=0	0.814	0.389
	您家网络条件是否非常好: 是=1, 否=0 Is the network in good condition at home: yes=1, no=0	0.443	0.497
数字资源需求 Digital resources demand	您是否希望通过手机或网络关注信息: 是=1, 否=0 Do you want to follow information through your cell phone or internet: yes=1, no=0	0.784	0.411
	您重点关注的信息是否能及时获取: 是=1, 否=0 Can you obtain the information you are focusing on in time: yes=1, no=0	0.601	0.490
	您是否能通过手机或网络随时获取相关信息: 是=1, 否=0 Can you access relevant information anytime through your cell phone or internet: yes=1, no=0	0.456	0.498
数字应用能力 Digital application capability	您是否能正常使用4G/5G手机: 是=1, 否=0 Whether you are able to use a 4G/5G cell phone normally: yes=1, no=0	0.432	0.495
	您是否通过微信群交流村内重要公共事务: 是=1, 否=0 Do you communicate about important public affairs in the village through WeChat groups: yes=1, no=0	0.577	0.494
	您是否倾向村委会通过微信等网络手段传递信息: 是=1, 否=0 Do you prefer the village committee to transmit information through online means such as WeChat: yes=1, no=0	0.465	0.499
	您家是否有产品通过网络平台进行交易: 是=1, 否=0 Do you have any products traded through online platforms in your home: yes=1, no=0	0.034	0.182
	您购置种苗和化肥等农资是否使用移动支付作为首选支付方式: 是=1, 否=0 Do you use mobile payment as your preferred payment method for purchasing agricultural materials such as seedlings and fertilizers: yes=1, no=0	0.258	0.437
	您是否利用手机进行学习教育活动: 是=1, 否=0 Do you use your cell phone for learning and educational activities: yes=1, no=0	0.455	0.498
	您是否利用手机进行游戏等娱乐活动: 是=1, 否=0 Do you use your cell phone for entertainment activities such as gaming: yes=1, no=0	0.419	0.493

娱乐、学习以及商务等方面的应用程度是对数字应用能力的普遍定义<sup>[41-42]</sup>。因此,选取涉及农户社交、娱乐、学习及商务的问题,并加入农户对4G/5G手机的使用难度进行测度。网络社交能力包括主动与被动社交两类,网络商务能力则包括农户借助网络平台参与买、卖两方面的活动。故选取“您是否通过微信群交流村内重要公共事务”和“您是否倾向村委会通过微信等网络手段传递信息”测度农户网络社交技能;选取“您家是否有产品通过网络平台进行交易”和“您购置种苗和化肥等农资是否使用移动支付作为首选支付方式”测度农户网络商务技能;选取“您是否利用手机进行学习教育活动”测度农户网络学习能力;选取“您是否利用手机进行游戏等娱乐活动”测度农户网络娱乐能力,以此衡量农户是否掌握数字应用能力。

3) 控制变量。考虑到模型稳健性及遗漏变量等问题,本文参考相关文献<sup>[14]</sup>,将个体特征、家庭特征、土地经营特征以及村庄特征作为控制变量。具体来看,个体特征包括受访者性别、年龄和受教育程度;

家庭特征包括适龄劳动力人数和家庭年收入;土地经营特征包括播种面积、地块块数和地块距离;村庄特征包括村庄地形、村庄区位和村庄耕地总面积。其中,播种面积和村庄耕地总面积作对数处理。

4) 机制变量。基于前文分析,本文的机制变量包括农药机械作业、组织能力优化和生态素养提升。首先,数字能力作为人力资本的重要构成,农户多维选择能力得以提升,机械替代劳动力促进其非农或兼业具有重要意义。其次,一方面,互联网信息的全面性和多样性促使农户对合作社等组织产生新的认知;另一方面,互联网沟通的广泛性和高频率特征扩大了农户社交网络,拓宽了农户加入正式组织的渠道。最后,生态优先和绿色发展等环保倡议及有机和绿色农产品的高溢价能力通过网络媒介得以迅速扩散,提升了农户生态素养。具体变量设定及描述如表2所示。

## 2.3 模型构建

1) 基准回归模型。本文主要讨论数字能力与农药施用强度的相关关系,在充分考虑被解释变量设

表 2 变量定义与描述性统计  
Table 2 Variable definition and descriptive statistics

变量类别 Variable category	变量名称 Variable name	变量定义或赋值 Variable definition or assignment	均值 Mean value	标准差 Standard deviation
被解释变量 Explained variable	农药施用强度 Pesticide application intensity	单位播种面积平均农药使用费用的对数 <sup>2)</sup> Logarithm of average pesticide usage cost per unit planting area (¥·hm <sup>-2</sup> ) <sup>2)</sup>	0.226	0.087
解释变量 <sup>1)</sup> Explanatory variable <sup>1)</sup>	数字能力 Digital capability	运用因子分析法计算 Calculated using factor analysis method	0	0.634
	数字接入条件 Digital access condition	运用因子分析法计算 Calculated using factor analysis method	0	1.000
	数字资源需求 Digital resources demand	运用因子分析法计算 Calculated using factor analysis method	0	1.000
	数字应用能力 Digital application capability	运用因子分析法计算 Calculated using factor analysis method	0	1.000
个体特征 Individual characteristics	性别 Gender	受访农户性别(男性=1, 女性=0) Gender of interviewed farmers (male=1, female=0)	0.801	0.399
	年龄 Age	受访农户年龄 Age of interviewed farmers (year)	54.024	10.971
	受教育程度 Education level	受访农户受教育年限 Education years of interviewed farmers (a)	7.861	3.213
家庭特征 Household characteristic	劳动力人数 Labor force	适龄劳动力人数 Number of active labor force (persons)	3.114	1.175
	家庭年收入 Annual household income	家庭年收入 Annual household income (×10 <sup>4</sup> ¥·a <sup>-1</sup> )	7.117	18.008
地块经营特征 Land management characteristics	播种面积 Planting area	播种面积最大的粮食作物面积的对数 Logarithm of area of the largest grain crop planted (hm <sup>2</sup> )	0.135	0.083
	地块块数 Land quantity	土地地块数量 Number of land parcels (pieces)	7.429	8.102
	地块距离 Land distance	面积最大的3块耕地到住所的平均距离 Average distance of the three largest cultivated lands from the residence (km)	1.741	21.443
村庄特征 Village characteristics	村庄地形 Village landforms	村庄地形(1=平原, 2=丘陵, 3=山区或半山区) Village landforms (1=plain, 2=hills, 3=mountainous or semi-mountainous areas)	1.848	0.877
	村庄区位 Village location	是否为城市郊区(是=1, 否=0) Is it a suburban area of the city (yes=1, no=0)	0.172	0.378
	村庄耕地总面积 Total cultivated area of village	村庄耕地总面积的对数 Logarithm of total area of cultivated land of the village (hm <sup>2</sup> )	0.548	0.076
机制变量 Mechanism variables	农药机械作业 Pesticide machinery operation	施药过程是否采纳自有机械作业(是=1, 否=0) <sup>3)</sup> Whether the pesticide application process adopts self-owned mechanical operations (yes=1, no=0) <sup>3)</sup>	0.192	0.394
	组织能力优化 Organizational capability optimization	是否加入合作社(是=1, 否=0) Whether to join the cooperative (yes=1, no=0)	0.233	0.423
	生态素养提升 <sup>3)</sup> Ecological literacy improvement <sup>3)</sup>	农药包装物是否回收至固定点或农资市场(是=1, 否=0) Whether pesticide packaging materials are recycled to fixed points or agricultural input markets (yes=1, no=0)	0.470	0.499

1)使用因子分析法需进行Bartlett球形度检验和KMO检验。对数字接入条件、数字资源需求、数字应用能力以及数字能力综合测度的球形度检验P值均为0.00, KMO依次为0.574、0.656、0.767和0.875, 均>0.5, 符合因子分析法使用条件。2)表2中面积单位均以每公顷计算, 但鉴于农户实际播种面积普遍偏小(中国户均耕地面积仅0.43 hm<sup>2</sup>, 即6.5亩), 且中国乡村振兴综合调查(CRRS)数据库中间卷问卷项设置以“亩”为单位, 为保证数据分析的一致性, 故下文实证分析中仍以“亩”作为面积的基本单位。3)作业过程中未产生农药包装物的农户按照“是=1”定义。1) The use of factor analysis requires Bartlett's sphericity test and KMO test. All the P values of the sphericity test for digital access condition, digital resources demand, digital application capability, and comprehensive measurement of digital capability are 0.00, the KMO values are 0.574, 0.656, 0.767, and 0.875, respectively, and all above meet the conditions for using factor analysis. 2) The area unit in Table 2 are hm<sup>2</sup>. Farmers' actual planting areas are small (with an average cultivated land area per household in China being only 0.43 hm<sup>2</sup>, namely 6.5 mu), and the questionnaire items in the China Rural Revitalization Survey (CRRS) Database utilize “mu” as the unit. Therefore, we will continue to employ “mu” as the basic unit for area in the subsequent empirical analysis to ensure consistency in our data analysis. 3) Farmers who do not produce pesticide packaging during the pesticide application process are defined as “yes=1”.

定类型和影响农户数字能力的因素后, 选择控制省份固定效应的多元线性回归模型作为本文基准回归模型, 具体如下:

$$\text{Pesticide}_i = \alpha_1 + \beta_1 \times \text{Digital}_i + \gamma_1 \times X_i + \mu_s + \varepsilon_i \quad (1)$$

式中: 核心被解释变量Pesticide<sub>i</sub>为农药施用强度, 即农户*i*单位播种面积的平均农药施用费用; 核心解释

变量  $Digital_i$  为农户  $i$  的数字能力;  $X_i$  为控制变量, 即与农户农药施用强度直接相关的特征变量;  $\alpha_1$  为常数项,  $\beta_1$  为待估计的核心参数,  $\gamma_1$  为控制变量的回归系数,  $\mu_s$  和  $\varepsilon_i$  分别为省份固定效应和随机误差项。

2) 机制检验模型。在讨论农户数字能力与农药施用强度关系的基础上, 本文进一步验证其可能的影响路径, 即农药机械作业、组织能力优化和生态素养提升。由于农药机械作业、组织能力优化和生态素养提升为离散型变量, 故采用 Probit 模型进行参数估计。以农药机械作业为例, 具体公式如下:

$$\text{Machine}_i^* = \alpha_2 + \beta_2 \times \text{Digital}_i + \gamma_2 \times X_i + \mu_s + \varepsilon_i \quad (2)$$

$$\text{prob}(\text{Machine} = 1) = \text{prob}(\text{Machine}_i^* > 0) = \Phi \times (\alpha_2 + \beta_2 \times \text{Digital}_i + \gamma_2 \times X_i + \mu_s + \varepsilon_i) \quad (3)$$

式中:  $\text{Machine}_i^*$  为农户  $i$  是否采纳农药机械作业, 若采纳农药机械作业, 则赋值为 1, 反之则为 0;  $\alpha_2$  为常数项,  $\beta_2$  为待估计参数,  $\gamma_2$  为控制变量的回归系数,  $\Phi$  为标准正态累积分布函数。

### 3 结果与分析

#### 3.1 基准回归结果

由于数字能力多维度和多层次的特点, 本文基于表 3 模型 1, 依次验证数字接入条件、数字资源需求以及数字应用能力对农户农药施用强度的影响,

以明晰不同维度数字能力可能存在的作用差异, 并在此基础上, 进一步讨论综合测度的数字能力与农药施用强度的关系。回归结果如表 3 所示。

由模型 1-3 可知, 数字接入条件、数字资源需求以及数字应用能力分别在 5%、1% 和 5% 水平显著抑制农户农药施用强度; 由模型 4 可知, 数字能力在 1% 水平显著抑制农户农药施用强度。就系数而言, 综合测度的数字能力的影响远大于单一维度, 表明数字能力的任一维度均是不可忽视的重要条件, 缺失可能导致结果的向下偏误。就单一维度而言, 数字资源需求的影响系数最大, 数字应用能力次之, 数字接入条件的影响系数最小, 表明农户的数字资源需求对农药施用强度起到了关键作用。数字资源需求反映农户对数据要素的主观能动性, 属于数据赋能而产生的内生发展能力。数字资源需求能够助推农户利用数字平台获取满足自身需求的信息资源, 优化资源配置效率, 并有效缓解农户面临的要素禀赋约束, 有利于降低农药施用强度。因此, 本文研究假说 H1 得以验证。

#### 3.2 稳健性检验

1) 更换测度方法。数字能力的综合测度方式多种多样, 均有其各自的优点及缺陷, 且目前尚未明确统一有效的方法。在基准回归中, 本文采用因子分析法计算农户数字能力, 尽管已有研究证明这一方

表 3 数字能力对农户农药施用强度影响的基准回归结果

Table 3 Benchmark regression results of the impact of digital capabilities on farmers' pesticide application intensity

变量 Variable	农药施用强度 Pesticide application intensity			
	模型1 Model 1	模型2 Model 2	模型3 Model 3	模型4 Model 4
数字接入条件 Digital access condition	-0.067** (0.032)			
数字资源需求 Digital resources demand		-0.098*** (0.033)		
数字应用能力 Digital application capability			-0.071** (0.036)	
数字能力 Digital capability				-0.167*** (0.059)
性别 Gender	0.010 (0.077)	0.012 (0.077)	0.018 (0.077)	0.017 (0.077)
年龄 Age	-0.004 (0.003)	-0.005 (0.003)	-0.005 (0.003)	-0.006* (0.003)
受教育程度 Education level	0.000 (0.011)	0.003 (0.011)	0.002 (0.011)	0.005 (0.011)
劳动力人数 Labor force	-0.053* (0.028)	-0.057** (0.028)	-0.061** (0.028)	-0.057** (0.028)
家庭年收入 Annual household income	0.001 (0.001)	0.001 (0.001)	0.001 (0.001)	0.001 (0.001)
播种面积 Planting area	-0.070* (0.039)	-0.072* (0.039)	-0.069* (0.039)	-0.067* (0.039)
地块块数 Land quantity	0.006 (0.004)	0.006 (0.004)	0.006 (0.004)	0.006 (0.004)
地块距离 Land distance	0.002*** (0.000)	0.002*** (0.000)	0.002*** (0.000)	0.002*** (0.000)
村庄地形 Village landforms	-0.387*** (0.043)	-0.384*** (0.043)	-0.386*** (0.043)	-0.385*** (0.043)
村庄区位 Village location	0.213*** (0.077)	0.208*** (0.077)	0.211*** (0.077)	0.215*** (0.077)
村庄耕地总面积 Total cultivated area of village	-0.101** (0.044)	-0.101** (0.044)	-0.101** (0.044)	-0.101** (0.044)
常数项 Constant term	5.274*** (0.517)	5.343*** (0.509)	5.327*** (0.515)	5.364*** (0.513)
省份固定效应 Provincial fixed effects	已控制 Controlled	已控制 Controlled	已控制 Controlled	已控制 Controlled
$N$	1665	1665	1665	1665
$R^2$	0.243	0.245	0.243	0.245

\*:  $P < 10\%$ ; \*\*:  $P < 5\%$ ; \*\*\*:  $P < 1\%$ .

法能有效避免赋值不合理和忽视指标内在相关性等问题,但仍可能存在尚未可知的缺陷。因此,本文采用等权法重新测度数字能力,以避免由于测度缺陷导致的结果变异。结果如表 4 模型 1 所示,数字能力在 1% 水平显著抑制了农户农药施用强度,证明了基准结果的稳健性。

2) 剔除未施药样本。在数据清理时发现,存在农户主观不施用农药的样本,但为保证数据库的完整,并未将其剔除。事实上,影响农户不施用农药的原因有很多,包括生产要素成本和播种面积等因素。在此情况下,未施用农药既不能代表农户具备较强的生态素养,也可能干扰数字能力对农户农药施用强度的作用。因此,剔除相关数据。表 4 模型 2 显示,剔除未施药样本后,数字能力依然在 1% 水平显著抑制农户农药施用强度,再次证明基准结果的稳健性。

3) 双边截尾。为避免部分核心变量存在的极端值对结果造成干扰,对农药施用强度、播种面积以及村庄耕地总面积 3 个变量进行 5% 的双边截尾。表 4 模型 3 显示,双边截尾后数字能力显著抑制了农户农药施用强度,影响系数为-0.125,与基准回归结果系数相差不大。以上证明,基准结果具有较强的稳健性。

### 3.3 内生性检验

上述稳健性方法虽然在一定程度上证明了基准结果的稳健性,但仍无法避免由于遗漏变量以及自选择导致的内生性问题。为此,本文将“村庄是否建立信息发布与交流群”作为工具变量,若村庄建立信息发布与交流群,则赋值为 1,反之则赋值为 0。一方面,村庄数字化治理一般以微信和公众号等数字平台为依托,进行村庄事务发布与信息交流,不仅客观反映该村数字基础设施的完善程度,还将利用社会网络将农户纳入线上信息交流平台,进而推动农户数字能力提升,符合工具变量的相关性;另一方面,

村庄是否建立信息发布与交流群和农户农药施用行为无直接的作用关系,符合工具变量外生性。此外,不可识别检验拒绝原假设,且弱工具变量检验的两类统计量均大于 Stock-Yogo bias critical 偏误下 15% 的临界值,拒绝弱工具变量的原假设,不存在弱工具变量问题。综上,工具变量通过了有效性检验。表 5 为内生性检验的回归结果。第一阶段中,“村庄是否建立信息发布与交流群”在 1% 统计水平显著提升了农户数字能力。第二阶段中,在缓解内生性干扰后,数字能力仍显著抑制农户农药施用强度,影响系数为-1.446。

### 3.4 机制分析

在论证数字能力与农户农药施用强度关系的基础上,为进一步明晰二者的内在机制及可能解释,参考王汉杰<sup>[14]</sup>的做法,实证检验数字能力对农药机械作业、组织能力优化和生态素养提升的影响,进而反映可能的机制路径。

表 6 模型 1 中,数字能力在 10% 统计水平显著促进了农药机械作业的采纳行为,即农户在农药施用环节中,因数字能力的提升更倾向于采用机械作业,进而对农药施用强度产生影响。事实上,数字能力是人力资本的重要组成部分,一定程度上提升了农户就业竞争力及潜在机会成本,为实现劳动力的有效替代,机械作业成为重要选择之一。而施药均匀和作业规范作为机械作业的重要优势,其农药减量效果已被广泛证实。表 6 模型 2 中,数字能力对组织能力优化的影响在 1% 统计水平显著为正,即数字能力通过影响组织能力优化有效降低了农户农药施用强度。具体而言,互联网在信息传播方面具有便捷、高效和低成本等优势,能有效激发农户对倾向信息的深度挖掘与广泛交流,社会网络限制实现重大突破,农户进入正式与非正式组织的意愿得到强化,而作为与农户日常生活紧密联系的合作社可能成为首要选择。当然,合作社规章条例的客观

表 4 数字能力对农户农药施用强度影响的稳健性检验回归结果

Table 4 Robustness test regression results of the impact of digital capability on farmers' pesticide application intensity

变量 Variable	更换测度方式	剔除未施药样本	双边截尾
	Change measurement method	Remove samples without pesticide application	Bilateral truncation
	模型1 Model 1	模型2 Model 2	模型3 Model 3
数字能力 Digital capability	-0.408*** (0.145)	-0.138*** (0.042)	-0.125** (0.064)
常数项 Constant term	5.546*** (0.522)	4.832*** (0.400)	5.896*** (0.587)
控制变量 Control variable	已控制 Controlled	已控制 Controlled	已控制 Controlled
省份固定效应 Provincial fixed effects	已控制 Controlled	已控制 Controlled	已控制 Controlled
N	1665	1542	1299
R <sup>2</sup>	0.244	0.258	0.212

\*\*：P<5%；\*\*\*：P<1%。

表 5 数字能力对农户农药施用强度影响的内生性检验回归结果

Table 5 Endogeneity test regression results of the impact of digital capability on farmers' pesticide application intensity

变量 Variable	第一阶段: 数字能力 The first phase: digital capability		第二阶段: 农药施用强度 The second stage: pesticide application intensity	
	系数 Coefficient	稳健标准误 Robust standard error	系数 Coefficient	稳健标准误 Robust standard error
数字能力 Digital capability			-1.446*	0.782
村庄是否建立信息发布与交流群 Whether has the village established an information dissemination and exchange group	0.219***	0.058		
常数项 Constant term	0.489***	0.192	6.244***	0.753
控制变量 Control variable	已控制 Controlled	已控制 Controlled	已控制 Controlled	已控制 Controlled
省份固定效应 Provincial fixed effects	已控制 Controlled	已控制 Controlled	已控制 Controlled	已控制 Controlled
观测值 Observed value		1665		1665
$R^2$		0.441		0.028
Kleibergen-Paap rk LM			11.858 ( $P=0.001$ )	
Cragg-Donald Wald $F$			10.293	
Kleibergen-Paap rk Wald $F$			14.316	
Stock-Yogo bias critical			8.96 (15%)	

\*:  $P<10\%$ ; \*\*\*:  $P<1\%$ .

表 6 数字能力对农户农药施用强度影响的机制检验回归结果

Table 6 Impact mechanism test regression results of digital capability on farmers' pesticide application intensity

变量 Variable	农药机械作业 Pesticide machinery operation	组织能力优化 Organizational capability optimization	生态素养提升 Ecological literacy improvement
	模型1 Model 1	模型2 Model 2	模型3 Model 3
数字能力 Digital capability	0.155 <sup>†</sup> (0.091)	0.314*** (0.078)	0.176*** (0.067)
边际系数 Marginal coefficient	0.031 <sup>†</sup> (0.018)	0.089*** (0.022)	0.066*** (0.025)
常数项 Constant term	-1.288 <sup>†</sup> (0.665)	-0.562 (0.560)	0.002 (0.513)
控制变量 Control variable	已控制 Controlled	已控制 Controlled	已控制 Controlled
省份固定效应 Provincial fixed effects	已控制 Controlled	已控制 Controlled	已控制 Controlled
$N$	1665	1665	1665
$R^2$	0.262	0.066	0.061

\*:  $P<10\%$ ; \*\*\*:  $P<1\%$ .

制约以及作业培训等主观影响将有效降低农户农药施用强度。表 6 模型 3 中, 数字能力对生态素养提升的影响在 1% 统计水平显著为正, 即数字能力通过提升生态素养降低了农户农药施用强度。一方面, 绿色、有机和无公害等安全农产品绿色溢价认知通过网络与农户实现有效衔接。另一方面, 以图文结合和微视频等形式展示生态保护和绿色发展的观念更容易深入人心, 农户生态素养得以提升, 进而推动农户合理和规范施药。综上, 假说 H2 得以验证。

### 3.5 异质性分析

为论证数字能力对农户农药施用强度的影响作用是否存在组间差异, 本文从关键变量着手, 重点讨论影响农户提升数字能力及抑制农药施用强度的因素变量, 从而针对性提出可能存在的组间差异。对于数字能力而言, 易莹莹等<sup>[43]</sup>认为个体禀赋对提升数字能力具有显著差异。年轻农户更容易掌握互联网及智能手机功能, 使用偏好更强。而对于农药施

用强度而言, 大量学者讨论了其与种植规模的关系, 认为规模优势能促进要素的合理配置, 实现农药减量<sup>[44]</sup>。此外, 随着城镇化进程的加速, 城郊农户与城市活动的互动日益频繁, 城郊村庄的区位差异对农户数字能力和农业生产行为的影响极为深远。因此, 本文对受访农户年龄、播种面积以及村庄区位进行分组, 并利用费舍尔组合检验方法检验其组间差异的有效性, 回归结果如表 7 所示。

1) 年龄异质性。本文参考王静等<sup>[45]</sup>的方法, 将年龄在 60 岁以下的样本划分至低年龄组, 60 岁及以上的样本划分至高年龄组。模型 1 和模型 2 结果表明, 数字能力在 1% 统计水平显著抑制了高龄组农户农药施用强度, 影响系数为 -0.312, 但对低龄组农户影响不显著, 且组间系数差异经验  $P$  值在 5% 统计水平显著。可能的解释有: 一方面, 高龄农户劳动能力不断减弱, 难以承担繁重的农业生产活动, 以过量施用农药简单替代劳动力的情况较为普遍, 农药减量

表 7 数字能力对农户农药施用强度影响的异质性检验回归结果  
Table 7 Heterogeneity test regression results of the impact of digital capability on farmers' pesticide application intensity

变量 Variable	低龄组(<60岁) Young group (<60)	高龄组(≥60岁) Elderly group (≥60)	小规模组 (户均播种面积 ≤0.43 hm <sup>2</sup> ) Small scale group (average planting area per household ≤ 0.43 hm <sup>2</sup> )	大规模组 (户均播种面积> 0.43 hm <sup>2</sup> ) Large scale group (average planting area per household > 0.43 hm <sup>2</sup> )	城郊村庄 Suburban village	一般村庄 Ordinary village
	模型1 Model 1	模型2 Model 2	模型3 Model 3	模型4 Model 4	模型5 Model 5	模型6 Model 6
数字能力 Digital capability	-0.086 (0.078)	-0.312*** (0.096)	-0.227*** (0.075)	-0.003 (0.090)	0.012 (0.137)	-0.196*** (0.065)
常数项 Constant term	5.444*** (0.612)	6.728*** (1.200)	5.869*** (0.723)	4.928*** (0.936)	5.661*** (0.935)	5.333*** (0.684)
控制变量 Control variable	已控制 Controlled	已控制 Controlled	已控制 Controlled	已控制 Controlled	已控制 Controlled	已控制 Controlled
省份固定效应 Provincial fixed effect	已控制 Controlled	已控制 Controlled	已控制 Controlled	已控制 Controlled	已控制 Controlled	已控制 Controlled
系数差异经验P值 Empirical P value of coefficient difference		0.029**		0.033**		-0.196***
N	1152	513	1020	645	287	1378
R <sup>2</sup>	0.234	0.312	0.238	0.234	0.310	0.243

“系数差异经验P值”用于检验组间数字能力系数差异的显著性,通过Bootstrap抽样1000次获得,但由于村庄区位样本量差距较大,抽样1000次会导致一致性错误,故采用有限最大程度抽样获得。\*\*: P<5%; \*\*\*: P<1%。The “empirical P value of coefficient difference” is used to test the significance of the difference in digital capability coefficients between groups, obtained through Bootstrap sampling 1000 times. As significant sample size disparities among villages, 1000 sampling iterations may compromise consistency. Thus, limited maximum sampling is adopted to ensure result validity.

潜力较大。当老龄农户数字能力提升,通过机械替代劳动力以及合作社组织作用外溢可以显著降低农户农药施用强度。另一方面,当数字能力弱化了老龄农户劳动能力的劣势后,其丰富的农业生产经验优势得以显现。数字能力与种植经验结合所发挥的协同效应将提升老龄农户施药的质量。

2) 种植规模异质性。本文以 2020 年我国户均耕地经营规模 (0.43 hm<sup>2</sup>) 作为衡量界限,将播种面积 0.43 hm<sup>2</sup> 及以下的样本划分至小规模组,将大于 0.43 hm<sup>2</sup> 的样本划分至大规模组。模型 3 和模型 4 表明数字能力在 1% 水平显示抑制了小规模农户农药施用强度,而对大规模农户不显著,且组间系数差异经验 P 值在 5% 水平显著。可能的原因是:对于小规模农户而言,数字能力突破了传统小农的生产要素限制,“蚂蚁花呗”“京东白条”等低门槛信贷平台缓解了小农资金约束,技能培训及服务平台缓解了小农生产技术约束,规范化作业能力得到有效提升,农药施用强度逐渐降低。对于大规模农户而言,并不容易受到要素约束的限制,在种植规模与“成本—收益”的驱动下,自置机械或社会化服务逐渐取代人工施药,作业过程较为规范合理,过量施药的情况不容易发生,减量潜力不大。

3) 村庄区位异质性。为进一步讨论村庄区位的组间差异,本文按照村庄区位将其划分为城郊村庄

与一般村庄。模型 5 和模型 6 的结果表明,数字能力在 1% 统计水平显著抑制了一般村庄农户农药施用强度,但对城郊村庄农户的影响不显著,且组间系数差异经验 P 值在 1% 统计水平显著。由于城镇化进程不断加速,城郊土地不确定性增加,可能削弱农户可持续耕作意愿,其为追求短期收益最大化,过量投入农药等生产要素<sup>[46]</sup>。此外,城郊地区不可避免地受到城市生产活动产生的“热岛效应”影响,气温上升加剧了农业生态系统中病虫害的发生,这一外部因素可能进一步削弱数字能力在降低城郊村庄农户农药施用强度方面的实际效果。

## 4 结论与政策建议

### 4.1 结论

大数据、云计算、人工智能和互联网等新一代数字技术迅速兴起,日益融入农业生产与农村生活的各领域与全过程,农户的数字能力、思维模式和认知程度由此发生深刻变革。据此,本文采用 2020 年中国乡村振兴综合调查数据 (CRRS),从数字接入条件、数字资源需求和数字应用能力 3 个维度构建数字能力指标体系,实证检验农户数字能力对农药施用强度的影响及作用机制。本研究主要得出以下结论:第一,数字能力提升能够显著降低农户农药施用强度,该结论在考虑内生性问题以及进行一系列稳

健性检验后依然成立。第二,数字接入条件、数字资源需求和数字应用能力 3 个维度的数字能力均能显著降低农户农药施用强度,其中数字资源需求的影响效应高于数字接入条件与数字应用能力,并且综合测度数字能力的影响作用远大于单一维度。第三,机制分析结果表明,数字能力通过农药机械作业、组织能力优化和生态素养提升 3 条路径显著降低农户农药施用强度。第四,异质性分析结果表明,农户数字能力提升对高龄组、小规模种植组与一般村庄的农户农药施用强度降低的影响作用更显著。

#### 4.2 政策建议

基于上述研究结论,本文提出以下政策建议。

第一,加快推进数字乡村建设,健全数字基础设施全覆盖及信息服务体系。中国地理环境错综复杂,部分山地和丘陵地区数字基础设施完善程度有待提升,新兴数字技术在扩散与普及过程中存在不均衡现象,进而导致“数字鸿沟”问题加剧。为此,应针对数字基础设施建设薄弱地区,制定有的放矢的数字化建设与干预政策,以最大限度弥合区域间和区域内部的“数字鸿沟”。各地各级政府要统筹制定提升农户数字能力的行动纲领,鼓励与引导当地科研机构等各单位积极参与,利用行政手段打通资源传输渠道,积极扩大农村地区大数据、人工智能和区块链等新兴数字技术的覆盖面,降低农户学习数字技术的难度,使农户能够真正地将数字技术运用到农业生产经营活动中,共享“数字红利”。

第二,构建农户数字能力提升培育体系。农户因年龄、受教育程度和经济能力等因素制约,难以具备掌握和熟练运用新兴数字技术的能力。为此,提升农户数字能力应重视网络培训方式,充分利用直播和视频等载体形式,加强农业数字化的示范推广和培训教育。一方面,为农户提供电子商务直播培训等实战机会,培训农户依托数字平台搜寻和获取市场信息,运用线上电商平台进行数字化营销,助力绿色农产品出村进城。另一方面,利用全国科教云平台,整合线上线下教育培训资源,以满足农户信息需求为目标,着力培训农户熟练掌握智慧农业等专业软件的运用,为农户在线上的农资购买、外包服务获取、数字技术培训、农产品销售和产品质量认证等方面提供便利,综合提升农户数字能力。

第三,强化数字农业技术推广服务体系,采用正式推广与非正式推广相结合的方式。一方面,要加强政府与企业的引导作用,充分利用数字媒体技术,利用图片、音频和视频等可视化方式科普现代数字

农业技术。利用互联网传播的便捷性、实时性和发散性,向农户宣传植保无人机技术、精准施药技术和高效、低毒、低残留农药等新技术和新要素,同时反馈市场对绿色农产品的需求偏好,引导农户提升生态素养。另一方面,要充分发挥合作社和家庭农场等新型农业经营主体的示范效应,建立小农户与新型农业经营主体的利益联结机制,利用生产要素优势互补的组织化和规模化效应,共同实现经济效益提升和农业生产绿色发展的双重目标。

#### 参考文献 References

- [1] 黄季焜, 齐亮, 陈瑞剑. 技术信息知识、风险偏好与农民施用农药[J]. 管理世界, 2008, 24(5): 71-76  
HUANG J K, QI L, CHEN R J. The knowledge about technology information, predilection for running risks and peasants' application of pesticides[J]. Management World, 2008, 24(5): 71-76
- [2] 蔡键. 风险偏好、外部信息失效与农药暴露行为[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(9): 135-140  
CAI J. Risk preference, external information failure and pesticide exposure[J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(9): 135-140
- [3] 安同良, 杨晨. 互联网重塑中国经济地理格局: 微观机制与宏观效应[J]. 经济研究, 2020, 55(2): 4-19  
AN T L, YANG C. How the internet is reshaping China's economic geography: Micro mechanism and macro effects[J]. Economic Research Journal, 2020, 55(2): 4-19
- [4] 王小华, 刘云, 宋檬. 数字能力与家庭风险金融资产配置[J]. 中国农村经济, 2023(11): 102-121  
WANG X H, LIU Y, SONG M. Digital capability and household risk financial assets allocation[J]. Chinese Rural Economy, 2023(11): 102-121
- [5] 张露, 罗必良. 农药减量: 挖掘包装容量的秘密[J]. 中国农村经济, 2022(11): 59-81  
ZHANG L, LUO B L. Pesticide reduction: Exploring the secret of package capacity[J]. Chinese Rural Economy, 2022(11): 59-81
- [6] ZURKOWSKI P G. The Information Service Environment Relationships and Priorities[M]. Washington: National Commission on Libraries and Information Science, National Program for Library and Information Services, 1974: 1-7
- [7] BAWDEN D. Information and digital literacies: A review of concepts[J]. Journal of Documentation, 2001, 57(2): 218-259
- [8] ESHET Y. Digital literacy: A conceptual framework for survival skills in the digital era[J]. Journal of Educational Multimedia and Hypermedia, 2004, 13(01): 93-106
- [9] BRANDTZÆG P B, HEIM J, KARAHASANOVIĆ A. Understanding the new digital divide — A typology of internet users in Europe[J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2011, 69(3): 123-138
- [10] VUORIKARI R, KLUZER S, PUNIE Y. DigComp2.2: The Digital Competence Framework for Citizens with New Examples of Knowledge, Skills and Attitudes[R]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2022: 1-50
- [11] 苏岚岚, 张航宇, 彭艳玲. 农民数字素养驱动数字乡村发展的

- 机理研究[J]. 电子政务, 2021(10): 42-56
- SU L L, ZHANG H Y, PENG Y L. Study on the mechanism of farmers' digital literacy driving the development of digital countryside[J]. E-Government, 2021(10): 42-56
- [12] 马翠萍, 刘文霞, 方燕. 数字技术赋能农户增收的理论机制与实证检验: 基于 CRRS 2022 农户调查数据[J]. 中国软科学, 2024(7): 69-78
- MA C P, LIU W X, FANG Y. Theoretical mechanisms and empirical tests of digital technology enabling farm households to increase income: Based on CRRS 2022 farm household survey data[J]. China Soft Science, 2024(7): 69-78
- [13] 邱泽奇, 张树沁, 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(10): 93-115, 203-204
- 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(10): 93-115, 203-204
- [14] 王汉杰. 数字素养与农户收入: 兼论数字不平等的形成[J]. 中国农村经济, 2024(3): 86-106
- WANG H J. Digital literacy and rural household income: The formation of digital inequality[J]. Chinese Rural Economy, 2024(3): 86-106
- [15] 李天龙, 姜春云. 信息素养对高素质农民乡村数字治理参与的影响机制——来自西北地区 1280 位高素质农民的经验证据[J]. 电子政务, 2022(6): 86-98
- LI T L, JIANG C Y. The influence mechanism of information literacy on the participation of high-quality farmers in rural digital governance — Empirical evidence from 1280 high-quality farmers in Northwest China[J]. E-Government, 2022(6): 86-98
- [16] 苏岚岚, 彭艳玲. 农民数字素养、乡村精英身份与乡村数字治理参与[J]. 农业技术经济, 2022(1): 34-50
- SU L L, PENG Y L. Farmers' digital literacy, elite identity and participation in rural digital governance[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2022(1): 34-50
- [17] 易法敏. 数字技能、生计抗逆力与农村可持续减贫[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2021, 20(3): 1-13
- YI F M. Digital skills, livelihood resilience and sustainable poverty reduction in rural areas[J]. Journal of South China Agricultural University (Social Science Edition), 2021, 20(3): 1-13
- [18] 余威震, 罗小锋, 唐林, 等. 土地细碎化视角下种粮目的对稻农生物农药施用行为的影响[J]. 资源科学, 2019, 41(12): 2193-2204
- YU W Z, LUO X F, TANG L, et al. Impact of grain growing objectives on the application of bio-pesticides of rice farmers from the perspective of land fragmentation[J]. Resources Science, 2019, 41(12): 2193-2204
- [19] 齐琦, 周静, 王绪龙. 农户风险感知与施药行为的响应关系研究——基于辽宁省菜农数据的实证检验[J]. 农业技术经济, 2020(2): 72-82
- QI Q, ZHOU J, WANG X L. Study on the relationship between farmer risk perception and pesticide application behavior response — An empirical test from vegetable farmers of Liaoning Province[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2020(2): 72-82
- [20] 赵秋倩, 夏显力. 社会规范何以影响农户农药减量施用——基于道德责任感中介效应与社会经济地位差异的调节效应分析[J]. 农业技术经济, 2020(10): 61-73
- ZHAO Q Q, XIA X L. How does social norms affect the reduction of pesticide application by farmers? — Analysis of the regulating effect of the difference between the mediating effect of moral responsibility and social economic status[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2020(10): 61-73
- [21] 陈菊慧, 白军飞, 马英辉, 等. 友好型标签能促进农药减量吗?——来自随机干预实验的证据[J]. 中国农村经济, 2022(9): 124-144
- CHEN J H, BAI J F, MA Y H, et al. Can friendly labels reduce pesticides use? Empirical evidence from a randomized controlled trial[J]. Chinese Rural Economy, 2022(9): 124-144
- [22] 闫阿倩, 罗小锋, 黄炎忠. 社会化服务对农户农药减量行为的影响研究[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(10): 91-97
- YAN A Q, LUO X F, HUANG Y Z. Influence of socialized services on farmers' pesticide reduction behavior[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(10): 91-97
- [23] 李昊, 李世平, 南灵. 农药施用技术培训减少农药过量施用了吗?[J]. 中国农村经济, 2017(10): 80-96
- LI H, LI S P, NAN L. Can technical training reduce pesticide overuse?[J]. Chinese Rural Economy, 2017(10): 80-96
- [24] 王翠翠, 夏春萍, 童庆蒙, 等. 电商参与促进农户绿色生产吗?——基于 3 省 4 县 812 户果农的实证研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(5): 132-143
- WANG C C, XIA C P, TONG Q M, et al. Does participating in E-commerce promote farmers' green production: An empirical study based on 812 fruit farmers in four counties of three provinces[J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(5): 132-143
- [25] 马千惠, 郑少锋, 陆迁. 社会网络、互联网使用与农户绿色生产技术采纳行为研究——基于 708 个蔬菜种植户的调查数据[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(3): 16-21, 58
- MA Q H, ZHENG S F, LU Q. Social network, internet use and farmers' green production technology adoption behavior[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(3): 16-21, 58
- [26] 骆家昕, 孙炜琳. 互联网使用对农户采纳绿色农业技术的影响研究——基于河北省 436 个设施蔬菜种植户的调研数据[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(8): 97-105
- LUO J X, SUN W L. Research on the impact of internet use on farmers' adoption of green agricultural technologies — Based on the survey data of 436 facility vegetable growers in Hebei Province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023, 44(8): 97-105
- [27] 张鹏, 李小红, 吴雨. 农户数字素养对化学农药减量使用的影响及其机制研究[J]. 中国软科学, 2024(2): 64-73
- ZHANG P, LI X H, WU Y. Impact of farmers' digital literacy on pesticide reduction and their mechanism[J]. China Soft Science, 2024(2): 64-73
- [28] 陆镜名, 杨晓婷, 孔祥智. 参与纵向一体化能否促进农户采用绿色生产方式?——以化肥、农药减量施用为例[J]. 农村经济, 2024(4): 77-90
- LU J M, YANG X T, KONG X Z. Can participating in vertical integration promote farmers to adopt green production methods: Taking the reduced application of fertilizers and pesticides as an example[J]. Rural Economy, 2024(4): 77-90
- [29] 朱淀, 孔霞, 顾建平. 农户过量施用农药的非理性均衡: 来自中国苏南地区农户的证据[J]. 中国农村经济, 2014(8): 17-29, 41
- ZHU D, KONG X, GU J P. Irrational equilibrium of farmers' excessive use of pesticides: Evidence from farmers in Southern

- Jiangsu in China[J]. *Chinese Rural Economy*, 2014(8): 17-29, 41
- [30] 米建伟, 黄季焜, 陈瑞剑, 等. 风险规避与中国棉农的农药施用行为[J]. *中国农村经济*, 2012(7): 60-71, 83  
MI J W, HUANG J K, CHEN R J, et al. Risk avoidance and pesticide application behavior of cotton farmers in China[J]. *Chinese Rural Economy*, 2012(7): 60-71, 83
- [31] 高晶晶, 史清华. 农户生产性特征对农药施用的影响: 机制与证据[J]. *中国农村经济*, 2019(11): 83-99  
GAO J J, SHI Q H. The impacts of rural households' productive characteristics on pesticide application: Mechanism and evidence[J]. *Chinese Rural Economy*, 2019(11): 83-99
- [32] 夏显力, 陈哲, 张慧利, 等. 农业高质量发展: 数字赋能与实现路径[J]. *中国农村经济*, 2019(12): 2-15  
XIA X L, CHEN Z, ZHANG H L, et al. Agricultural high-quality development: Digital empowerment and implementation path[J]. *Chinese Rural Economy*, 2019(12): 2-15
- [33] 钟甫宁. 正确认识粮食安全和农业劳动力成本问题[J]. *农业经济问题*, 2016, 37(1): 4-9, 110  
ZHONG F N. Understanding issues regarding food security and rising labor costs[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2016, 37(1): 4-9, 110
- [34] 张忠军, 易中懿. 农业生产性服务外包对水稻生产率的影响研究——基于 358 个农户的实证分析[J]. *农业经济问题*, 2015, 36(10): 69-76  
ZHANG Z J, YI Z Y. Study on the impact of agricultural productive service outsourcing on rice productivity — An empirical analysis based on 358 farmers[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2015, 36(10): 69-76
- [35] 潘明明, 蔡书凯, 周游. 互联网使用促进农村妇女非农就业了吗——基于苏、皖、豫、鄂四省调研数据的实证研究[J]. *农业技术经济*, 2021(8): 133-144  
PAN M M, CAI S K, ZHOU Y. Has internet use promoted non-agricultural employment for rural women? — Empirical research based on the survey data of Jiangsu, Anhui, Henan, and Hubei[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2021(8): 133-144
- [36] 罗明忠, 魏滨辉. 数字赋能、技术进步与农村共同富裕[J]. *农业技术经济*, 2024(2): 4-18  
LUO M Z, WEI B H. Digital empowerment, technological progress and rural common prosperity[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2024(2): 4-18
- [37] 罗明忠, 刘子玉. 数字技术采纳、社会网络拓展与农户共同富裕[J]. *南方经济*, 2022(3): 1-16  
LUO M Z, LIU Z Y. Digital technology adoption, social network expansion and farmers' common prosperity[J]. *South China Journal of Economics*, 2022(3): 1-16
- [38] 蔡荣, 汪紫钰, 钱龙, 等. 加入合作社促进了家庭农场选择环境友好型生产方式吗? ——以化肥、农药减量施用为例[J]. *中国农村观察*, 2019(1): 51-65  
CAI R, WANG Z Y, QIAN L, et al. Do cooperatives promote family farms to choose environmental-friendly production practices? An empirical analysis of fertilizers and pesticides reduction[J]. *China Rural Survey*, 2019(1): 51-65
- [39] 安宁, 郑姗, 徐志刚. “委托-代理”视角下施药环节外包服务与农药施用强度研究[J/OL]. *农业技术经济*, 1-16 (2024-01-26). <https://doi.org/10.13246/j.cnki.jae.20240024.001>  
AN N, ZHENG S, XU Z G. Study on the outsourcing service and pesticide application intensity from the perspective of “principal-agent” [J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 1-16 [2024-01-26]. <https://doi.org/10.13246/j.cnki.jae.20240024.001>
- [40] HTRSHLEIFER J. Where are we in the theory of information?[J]. *The American Economic Review*, 1973, 63(2): 31-39
- [41] 罗千峰, 赵奇锋, 邱海兰. 数字技能与农户财产性收入——基于中国乡村振兴综合调查(CRRS)数据[J]. *当代经济管理*, 2023, 45(7): 54-62  
LUO Q F, ZHAO Q F, QIU H L. Digital skills and property income of farmers: Based on CRRS data[J]. *Contemporary Economic Management*, 2023, 45(7): 54-62
- [42] 姜扬, 郑怀宇. 数字技能与居民幸福感——基于 CFPS2018 数据的研究[J]. *人口学刊*, 2023, 45(4): 57-69  
JIANG Y, ZHENG H Y. Digital skills and residents' happiness—Research based on CFPS2018 data[J]. *Population Journal*, 2023, 45(4): 57-69
- [43] 易莹莹, 曹家诚. 数字经济的发展能否提高新老两代农民工的就业质量? ——来自 CMDS 的经验证据[J]. *现代财经(天津财经大学学报)*, 2023, 43(9): 39-53  
YI Y Y, CAO J C. Can the development of digital economy improve employment quality of the new and old generations of migrant workers? Empirical evidence from CMDS data[J]. *Modern Finance and Economics-Journal of Tianjin University of Finance and Economics*, 2023, 43(9): 39-53
- [44] 蔡文聪, 霍学喜, 杨海钰. 扩大种植规模还是参与外包服务: 农药减量化的逻辑选择[J]. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(2): 50-58  
CAI W C, HUO X X, YANG H Y. Expanding the planting scale or participating in outsourcing services: The logical choice of pesticide reduction[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023, 37(2): 50-58
- [45] 王静, 赵凯. 宅基地退出、要素配置与农户农业生产效率[J]. *南京农业大学学报(社会科学版)*, 2022, 22(3): 151-163  
WANG J, ZHAO K. Homestead exit, factor allocation and farmer's agricultural production efficiency[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2022, 22(3): 151-163
- [46] 王华书, 马志懿. 机械化及其模式如何影响农户农药投入? ——基于中国乡村振兴综合调查数据的实证检验[J]. *世界农业*, 2024(10): 66-77  
WANG H S, MA Z Y. How does mechanization and its modes affect farmer's pesticide input? — An empirical test based on the survey data of China's Rural Revitalization[J]. *World Agriculture*, 2024(10): 66-77