

# 粮食安全视角下数字技术对粮食单产的影响机制

彭建仿<sup>a,b</sup>, 黄世成<sup>a</sup>

(重庆工商大学 a. 成渝地区双城经济圈建设研究院; b. 工商管理学院, 重庆 400067)

**摘要:** 采用熵权法测度数字技术, 理论分析并实证检验数字技术对粮食单产的影响机制和作用路径, 以考察数字技术何以影响粮食单产。研究发现: 从总体上看, 数字技术可以有效提升粮食单产水平, 并且这种促进作用在一系列的稳健性检验下仍然显著。从异质性来看, 数字技术在粮食非主产区对粮食单产的促进作用更强。从作用机制来看, 农业社会化服务水平、田间管理水平与农业机械化水平是数字技术提高粮食单产的重要渠道, 农业经营规模在数字技术赋能粮食单产的过程中具有正向调节作用。从门槛效应来看, 数字技术作用于粮食单产的过程中存在农村教育水平门槛。拓展分析表明, 农业现代化政策有助于数字技术提高粮食单产能力。

**关键词:** 粮食安全; 数字技术; 粮食单产; 农业社会化服务

中图分类号: F326.11

文献标识码: A

文章编号: 1672-0202(2024)04-0077-16

## 一、引言

粮食稳则天下安。粮食安全乃是“国之大者”, 确保国家粮食安全是维护社会稳定、促进经济发展以及实现国泰民安的重要基石。党的二十大报告中明确提出, 要全方位夯实粮食安全的基础以及保障中国人的饭碗握在自己手中的重要指导方针。2023年, 我国粮食总产量再创新高, 达到1.39万亿斤, 同比增长1.3%<sup>[1]</sup>, 产量连续9年在1.3万亿斤以上, 粮食产量稳定, 粮仓储备充盈。但是, 我国仍面临着水土资源约束、农田水利基础设施薄弱以及农业科技支撑能力不强等问题<sup>[2]</sup>。2024年, 中央一号文件再次传递出重视农业发展的明确信号, 将确保国家粮食安全置于首要位置, 并明确指出将粮食增产的工作核心放在提升粮食单产水平上。由于耕地资源有限, 扩大种植面积以确保国家粮食安全的空间受到限制, 而提升单产水平仍有相当大的发展潜力。因此, 探寻可持续发展的粮食增产, 提高粮食单产能力具有十分重要的实践价值。

现有文献中, 大多研究认为传统农业生产方式存在大量使用化肥和农药、过度消耗水资源、透支土地肥力等问题<sup>[3]</sup>, 这些困难限制了传统农业生产方式的发展和粮食产量的提高。首先, 粗放的栽培管理。我国的稻谷和小麦亩产量高于全球平均水平, 但这种增产背后伴随着资源过度消耗、化学品过量使用以及土地透支等问题<sup>[4]</sup>。肥料施用的不均衡、有机肥的利用效率低下以及施肥结构不合理等现象, 均凸显出我国农业管理粗放的特点。其次, 农业集约化与农业绿色可持续发展的进程相对缓慢, 土地的产出率、农业资源的利用效率以及劳动生产率均有待提高<sup>[5]</sup>。这些挑战迫切需要利用“数字技术”对传统农业进行改造升级, 来转变农业生产方式, 创新农业管理模式, 提高农业生产效率。

收稿日期: 2024-04-12

DOI: 10.7671/j.issn.1672-0202.2024.04.007

基金项目: 国家社会科学基金项目(22BJY210)

作者简介: 彭建仿(1973—), 男, 湖北天门人, 重庆工商大学工商管理学院教授, 主要研究方向为农产品供应链与农业经济。E-mail: 993876689@qq.com

随着大数据、物联网、5G通信以及人工智能等新兴技术的蓬勃发展,数字技术在中国式农业现代化的进程中取得的成绩举世瞩目。当前推动中国式农业现代化进程中,农业产业与数字技术融合已经是大势所趋,在数字技术的赋能作用下,农业产业呈现网络化、大型化、平台化发展趋势<sup>[6]</sup>。数字技术的应用不仅有利于智慧农业的推进,还能利用大数据、区块链、农业物联网等技术,建设高标准的农田。此外,通过卫星遥感、土壤检测等数据采集手段,数字技术还能为农业生产提供全面科学高效的服务<sup>[7]</sup>。事实上,数字技术为促进农业高质量发展提供了有效方案<sup>[8]</sup>,对于提高粮食单产的重要性日益凸显。数字技术在种业振兴、粮食和重要农产品稳产保供、耕地和农田建设管理等方面发挥重要作用,为构筑粮食安全屏障提供了新的方案<sup>[9]</sup>。

综上所述,学界在数字技术对中国式农业现代化和农业高质量发展的影响机理已经进行了广泛研究,但是对数字技术与粮食单产关系的相关研究相对较少,其中系统探究内在机制与传导路径的分析研究亦鲜有涉及,不利于全面识别数字技术对粮食单产的影响。基于此,本文从以下几个方面对现有研究做进一步的深化:一是拓展研究对象,从全国整体视角以2011—2021年31个省份的面板数据为研究对象,深入探究数字技术与粮食单产之间的因果关系;二是从农业社会化服务水平、田间管理水平、农业机械化水平与农业经营规模的视角分析数字技术影响粮食单产过程中的影响机制;三是从农村教育的视角分析数字技术作用于粮食单产的过程中是否存在门槛效应;四是检验不同区域数字技术发展非均衡的背景下数字技术影响粮食单产的内在逻辑;五是拓展分析农业现代化政策能否显著促进数字技术对粮食单产能力的提升。通过以上分析希望丰富数字技术与粮食单产两者在理论层面的研究成果,以期有关部门制定粮食安全政策提供借鉴。

## 二、理论假说

### (一) 数字技术概念界定与赋能途径

#### 1. 数字技术概念界定

数字技术是实现信息识别、转化、储存、分析以及应用等功能的一系列数字化技术的集合<sup>[10]</sup>。其重要功能在于显著降低数据信息的搜集、传送、复制、追踪以及检验的成本,从而调整经济活动的表现形式,并展现出日新月异的发展态势<sup>[11]</sup>。已有研究表明,数字技术可分为广义和狭义两方面。狭义的数字技术主要是指运用二进制算法进行信息识别、存储和传播的一系列基础技术,而广义的数字技术则包括人工智能、云计算、物联网、区块链等新兴科技<sup>[12-13]</sup>。因此,数字技术具有分层结构,包括基础层的大数据技术,以及核心层的新一代信息技术、区块链技术、人工智能技术等<sup>[14]</sup>。数字技术在农业中的应用正在深刻改变着现代农业的面貌,其在提高粮食生产方面的作用愈发凸显,这不仅是一种技术的应用,更是一种对农业生产方式的深刻革新和对未来粮食安全的战略选择。考虑到在粮食生产过程中,不同类型的数字技术应用场景存在些许差异,本文后续讨论的数字技术既涵盖了基础层面的数据信息处理平台技术,同时也包括核心层面的区块链、人工智能以及云计算等技术。

#### 2. 数字技术与粮食单产

数字技术在农业领域的应用是推动粮食生产智能化、精准化和可持续化的关键因素之一,可以通过数据采集、综合分析、精准实践等途径,赋能粮食生产的各个环节。其一,数据采集与监测。数据采集与监测是实现精准农业的基础。通过传感器、遥感技术以及物联网等措施,实现对耕地土壤、自然气候、作物生长等相关数据的实时监测和采集。传感器作为基础层,通过实时监测土壤湿度、温度、光照等参数,提供了精准的农田管理数据<sup>[15]</sup>;遥感技术在中间层发挥作用,通过卫星和无人机等技术手段,实现了对大面积农田的遥感监测<sup>[16]</sup>,可以快速获取土地利用状况、作物生长情

况等信息,为农业生产决策提供了全局视角;物联网作为顶层,将传感器和遥感技术采集到的数据进行整合<sup>[17]</sup>。这些数据为精准农业管理提供了重要依据。

其二,数据分析与决策。数据分析与决策是实现精准农业的前提。基于云计算、大数据、人工智能等数字技术,对收集到的粮田数据进行深度挖掘和分析<sup>[18-19]</sup>,为粮食生产的各个环节提供了更加有效的管理与优化策略。通过对历史气象数据、土壤质量等多方面数据的深度分析,可以预测粮食作物的生长趋势和产量,有助于合理安排种植策略;通过对农田环境、作物品种、病虫害发生规律等数据的分析,可以及时发现潜在的病虫害风险,并提前制定相应的防治策略;通过对土壤养分状况、粮食作物生长需求等数据的综合分析,可以制定个性化的施肥和灌溉方案,最大限度地满足粮食作物的营养和水分需求,提高粮食的生产效率和可持续发展能力<sup>[20]</sup>。

### 3. 精准农业实践

精准农业实践是数字技术赋能粮食单产的关键。精准农业是一种利用现代信息技术、传感技术、定位技术等数字技术为支撑,结合农业生产实际需求,实现对农田、作物、生产过程等进行精细化管理和精准化操作的农业生产模式<sup>[21]</sup>。这种精细化管理模式能够精确调控农业生产的各个环节,达到高效、节约和可持续的目的。在粮食生产过程中,结合实时监测数据和决策支持系统,优化作物种植结构和密度,并辅以智能农机,通过网络操作平台实现无人化操作,根据作业内容与环境自动生成最优的农机参数,实时调整指令传递给控制系统<sup>[22]</sup>,实现农业生产的自动化和智能化<sup>[23]</sup>,达到精准施肥、精准灌溉、精准防治病虫害等目标<sup>[24]</sup>,避免过量施肥和水资源浪费,提高养分利用效率,最大程度地满足粮食作物生长需求,减少资源浪费,提高粮食单产水平。综上所述,数字技术在农业领域的应用为粮食生产提供了全方位的赋能,实现了粮食生产的智能化、精准化和可持续化,对于提高粮食单产水平具有重要意义。基于此,本文提出假说1。

假说1:数字技术有助于提高粮食单产能力。

### (二) 数字技术对粮食单产影响机制的理论逻辑

除了直接影响粮食单产之外,数字技术还可能通过中介效应以及调节效应来影响粮食单产。如前所述,数字技术可以通过一系列数字赋能方式来提高粮食单产能力,然而在这个过程中,数字技术是如何改善农业生产条件、提供专业技术支持,来间接影响粮食单产呢?因此,本部分内容从农业社会化服务水平、田间管理水平、农业机械化水平和农业经营规模四条路径来分析数字技术对粮食单产的影响机制。

#### 1. 通过数字赋能增强农业社会化服务水平,进而提升粮食单产能力

农业社会化服务是通过整合社会资源为农业生产者提供各种服务和支持,包括技术咨询、培训指导、信息传递、市场开拓、资金支持等,旨在提高农业生产效率、优化资源利用、改善农民生活水平,推动农业现代化和乡村振兴。这种服务模式能够促进农业产业链条升级,推动农业可持续发展,实现高效、可持续、有质量增长的农业生产。而数字技术被普遍视为促进农业社会化服务高质量发展的重要手段<sup>[25]</sup>。利用物联网和人工智能等新兴数字技术的赋能优势,可建立本地区智能化流通系统以及农业社会化服务平台,用以强化各类农业经营主体之间的密切联系,从而提升农业社会化服务的运营效率<sup>[26]</sup>。数字技术不仅有助于改善农业社会化服务的供需匹配,降低交易成本和搜索成本,而且能够拓宽农业社会化服务范围,有效解决了农业社会化服务的平台运营过程中的各种阻碍<sup>[27]</sup>。因此,数字技术能够有效提高农业社会化服务水平。随着农业社会化服务水平的不断提高,有效缓解了农户家庭资源禀赋的限制条件<sup>[28]</sup>,提供替代要素的途径和专业技术支持<sup>[29]</sup>,并且整合农业生产要素<sup>[30]</sup>,提高资源利用效率,这有助于实现小农户和现代农业之间的有机衔接,降低农业生产成本,从而进行更有效的农业生产活动,最终提高粮食单产水平。由此,本

文提出假说 2a。

假说 2a:数字技术可能通过增强农业社会化服务水平来提高粮食单产能力。

## 2. 通过精细化管理提高田间管理水平,进而提升粮食单产能力

数字技术在提高田间管理水平方面发挥着重要作用<sup>[31]</sup>,主要通过提高农业灾害防范率、土地产出率以及有效灌溉率来促进田间管理水平。首先,数字技术提升农业灾害防范率。数字技术不仅能够提高防灾设备的准确性,而且可以利用人工智能、云计算对相关历史数据进行系统分析,来预测自然灾害与病虫害发生的概率,及时发现问题并采取相应的防灾措施<sup>[32]</sup>,降低灾害造成的损失,最大限度地保障农作物的正常生长。其次,数字技术提高土地产出率。数字技术能够深入分析土地利用状况,有效监测、调控农作物的长势和生长环境<sup>[33]</sup>,优化种植结构和作物轮作,避免不必要的农药喷洒、化肥施用及土地开发,提升土地资源利用效率,减少资源浪费,降低生产成本,实现农作物的优质高产。最后,数字技术提升有效灌溉率。传统的灌溉方式通常采用漫灌、畦灌、喷灌等形式<sup>[34]</sup>,这些传统方式会造成灌水量过多、水分不均匀和肥料流失<sup>[35]</sup>,造成农田中水分分布不均匀,导致水资源的浪费和土壤盐碱化。数字技术为滴灌系统智能管理提供重要支持,滴灌系统能够直接将水资源输送至植物根部,有效减少蒸发和地表径流损失,从而显著提升水资源的利用效率。同时,滴灌系统可与施肥系统结合,实现水肥一体化,实现节水、节肥和节工<sup>[36]</sup>,最大程度释放粮食作物生长潜力。因此,数字技术可以通过实现病虫害监测、精准施肥、定量灌溉等精细化管理<sup>[37]</sup>,提高田间管理水平,从而优化粮食作物的生长环境,以此提高粮食单产能力。由此,本文提出假说 2b。

假说 2b:数字技术可能通过提高田间管理水平来提升粮食单产能力。

## 3. 通过“3S 技术”提高农业机械化水平,进而提升粮食单产能力

数字技术通过“3S 技术”(遥感、地理信息系统和全球定位系统)有效提升了农业机械化水平。遥感技术提供高精度的农田监测数据,协助农户进行土地利用规划和作物生长监测<sup>[38-39]</sup>,为农业机械操作提供指导;地理信息系统支持农业机械智能化作业规划和路径优化,实现了农机智能导航和作业区域划分<sup>[40]</sup>;全球定位系统为农机提供精确定位和导航功能,使得播种、施肥、灌溉等作业更加精准,通过引入卫星导航自动驾驶系统能够将先进农业机械技术贯穿整个生产流程,采用“多机协同”导航技术,支持农业机械之间的信息共享和协同作业,实现多台农业机械之间的智能互联互通,提高作业效率,有效节省人力资源,降低人工成本,改善传统农业生产中的能源消耗问题,实现同一时间内的多样作业<sup>[41]</sup>。此外,数字技术在提升农业机械化效率方面具有重要作用。借助数字化管理平台,能够实时获取各项管理数据,综合分析当下的农机运行现状以及粮田的各项指标,为优化农业机械作业提供重要参考<sup>[42]</sup>。而农业机械化是农业现代化的重要标志之一,引进先进的农业机械设备,可以促进整个农业生产体系的现代化升级,减轻农户耕作的体力劳动,提高劳动生产率,避免了人工操作可能带来的偏误,提升农田作业的质量和效率,保证作物在适宜的生长期得到必要管理<sup>[43]</sup>,有效提升粮食单产能力。由此,本文提出假说 2c。

假说 2c:数字技术可能通过提高农业机械化水平来提升粮食单产能力。

## 4. 农业经营规模的调节作用

随着农业经营规模的不断扩大,数字技术对粮食单产的促进作用变得越发显著。在当今的农业生产中,规模化经营已成为一种普遍趋势,农业经营规模的扩大意味着涉及的土地面积和作物种植数量越来越多,相关数据量也愈加庞大,各类农业数据的获取和管理也变得更加复杂,数字技术的支持需求更为迫切。随之而来的是对信息系统和数据平台的建设,通过数字技术的数据采集、分析和应用,实现精细化管理,提高农作物的养分利用效率。此外,由于农业经营规模的差异,

经营主体在农业生产的规划上通常存有一定的区别。小农户往往更加关注短期利益,而经营规模相对较大的农户则倾向于注重长期目标<sup>[44]</sup>。大规模农业经营具备投资和资源配置、资金支持、数据积累以及资源整合等方面的优势,使得他们更容易采用数字技术进行农业生产,使用现代化的农业设备、传感器、自动化系统等,从而更好地实施精准农业管理。相比之下,小农户由于资源有限,可能难以承担高昂的设备投资和技术培训成本,这限制了数字技术在其生产中的应用。因此,农业经营规模的扩大为数字技术的应用提供了更好的基础和条件,使得数字技术能够更充分地发挥作用,增强对粮食单产的提升幅度。由此,本文提出假说2d。

假说2d:农业经营规模在数字技术对粮食单产的促进作用中可能起正向调节作用。

#### (四) 数字技术对粮食单产的门槛效应

与传统服务机构相比,数字技术主要依赖于先进的信息技术,如互联网、智能设备和电子商务平台等,提供线上服务。数字技术作为人力资本含量和物质资本含量较高的外在体现形式,要求使用者具备更高的数字素养和文化水平。因此,数字素养是数字经济时代的关键技能<sup>[45]</sup>。在数字化时代,提升数字素养不仅可以减轻农户参与数字经济活动的焦虑感,还能降低技术和心理门槛<sup>[46]</sup>,而农民的数字素养与受教育程度密切相关<sup>[47]</sup>。从全国农村居民受教育水平不均衡的现状出发,数字技术对粮食单产的影响作用可能存在异质性,主要原因是农村地区教育水平存在差异。尽管城乡发展的二元格局给人们留下了农村居民整体受教育文化水平较低的刻板印象,但由于经济条件、产业结构和资源配置等方面的差异,不同地域的居民所获得的教育资源也存在显著差异<sup>[48]</sup>。一些地区可能面临教育资源匮乏和数字技术培训不足的问题,导致农户对数字技术的了解和应用能力相对较低,缺乏使用互联网购买农资、销售农产品等相关技能限制了数字技术在粮食生产中的应用。鉴于此,本文进一步探究全国各地农村居民教育水平不均衡的背景下,数字技术对粮食单产的影响过程中是否存在农村教育水平门槛效应,并提出假说3。

假说3:数字技术作用于粮食单产的过程中可能存在农村教育水平的门槛效应。

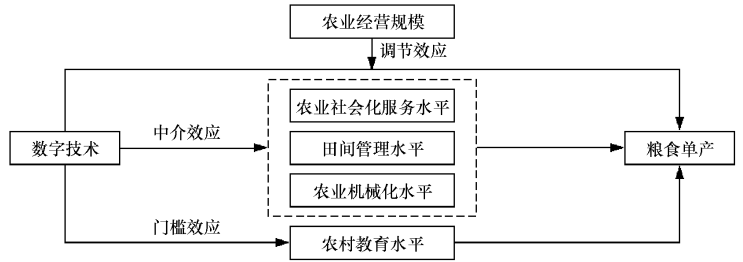


图1 数字技术对粮食单产影响的理论分析框架

### 三、模型选取与变量说明

#### (一) 模型构建

##### 1. 基准模型、中介效应模型

为检验数字技术对粮食单产的影响及作用机制,以粮食单产为被解释变量,数字技术为核心解释变量,农业社会化服务水平、田间管理水平与农业机械化水平作为中介变量,以此构建本文的递归估计模型,具体情况如下:

$$Grain_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 DT_{it} + \alpha_2 Control_{it} + \eta_t + \mu_i + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

$$MV_{it} = \beta_0 + \beta_1 DT_{it} + \beta_2 Control_{it} + \eta_t + \mu_i + \theta_{it} \quad (2)$$

$$Grain_{it} = \gamma_0 + \gamma_1 DT_{it} + \gamma_2 MV_{it} + \gamma_3 Control_{it} + \eta_t + \mu_i + v_{it} \quad (3)$$

其中, $Grain$  代表粮食单产; $DT$  代表数字技术; $MV$  代表中介变量; $Control$  代表一系列的控制变量(包括:粮食作物播种面积占比、第一产业从业人员占比、农药投入强度、化肥投入强度、人均用电

量、人均柴油消耗量、城镇化程度、政府干预力度、复种指数、农业产值占比、粮食产量占比); $i$ 和 $t$ 分别代表年份、省份; $\eta_t$ 和 $\mu_i$ 代表时间与个体固定效应; $\varepsilon$ 、 $\theta$ 、 $v$ 分别代表相应的随机干扰项。

## 2. 调节效应模型

为了验证数字技术是否存在农业经营规模的调节效应,本文在基准回归模型的基础上,纳入农业经营规模和数字技术的交乘项( $DT \times Scale$ ),以此来构建调节效应模型,具体情况如下:

$$Grain_{it} = \varphi_0 + \varphi_1 DT_{it} + \varphi_2 Scale_{it} + \varphi_3 DT_{it} \times Scale_{it} + \varphi_4 Control_{it} + \eta_t + \mu_i + \zeta_{it} \quad (4)$$

其中, $Scale$ 代表农业经营规模,以农作物播种面积与第一产业就业人数之比表征。

## 3. 门槛效应模型

考虑到不同农村教育水平下,数字技术对粮食单产可能存在的非线性影响,借鉴相关研究的方法,以农村教育水平作为门槛变量来构建门槛效应模型,如式(4)所示:

$$Grain_{it} = \varphi_0 + \varphi_1 DT_{it} \times I(Edu \leq \lambda_1) + \varphi_2 DT_{it} \times I(\lambda_1 < Edu \leq \lambda_2) + \dots + \varphi_n DT_{it} \times I(\lambda_{n-1} < Edu \leq \lambda_n) + \varphi_{n+1} DT_{it} \times I(Edu > \lambda_n) + \varphi_\varphi Control_{it} + \eta_t + \mu_i + \xi_{it} \quad (5)$$

其中, $Edu$ 代表农村教育水平,即门槛变量; $\lambda$ 代表待检验的门槛值; $I(*)$ 表示门槛值的示性函数,若括号内为真,则 $I$ 取值为1,为假则为0。

## (二) 变量选取与说明

### 1. 被解释变量

本文的被解释变量为粮食单产。按照惯例,通过计算粮食产量与粮食作物播种面积之比来评估不同地区的粮食单产水平。

### 2. 解释变量

(1)核心解释变量。本文的核心解释变量为数字技术。从农业角度出发,数字技术是指在农业生产和管理中应用数字化、信息化和智能化技术,旨在提高农业生产效率、降低成本、改善农产品质量,增加农民收益。这类技术被视为一种综合数字化技术体系,其测度方法也有所不同。本文以科学性、代表性、可得性为原则,借鉴相关研究成果<sup>[49-51]</sup>,从数字技术基础和数字技术服务两个维度构建数字技术指标体系。并采用熵值法对数字技术指数进行测算。

表1 数字技术评价指标体系

标准层	指标变量	指标说明	权重
数字技术基础	移动电话普及率(部/百人)	每百人移动电话用户数量	0.0283
	互联网宽带普及率(户/人)	互联网宽带接入用户数/常住人口数	0.0367
	移动互联网普及率(户/人)	移动物联网用户数/常住人口数	0.0339
	信息化从业人员比重(%)	计算机服务和软件从业人员数/常住人口数	0.1040
	人均电信业务量(万元/人)	电信业务量/常住人口数	0.1430
数字技术服务	人均电子商务交易额(万元/人)	电子商务交易额/常住人口数	0.1890
	人均电子商务采购额(万元/人)	电子商务采购额/常住人口数	0.2002
	数字普惠金融	中国数字普惠金融指数	0.0303
	人均快递业务量(万元/人)	快递业务收入/常住人口数	0.2346

(2)中介变量。中介变量为农业社会化服务水平、田间管理水平与农业机械化水平。农业社会化服务,借鉴王磊的研究成果<sup>[52]</sup>,使用农林牧渔服务业产值与耕地面积的比值来衡量。田间管理水平以农业灾害防范率、土地产出率以及有效灌溉率来衡量,并采用熵值法进行测算。农业机械化程度,借鉴杜美玲的研究成果<sup>[53]</sup>,采用农作物耕种收综合机械化率来度量,通过对农作物的机耕、机播和机收三项作业水平进行加权和来反映。具体而言,以4:3:3的比例加权来综合反映农业生产全过程的机械化作业水平。其中,机耕、机播和机收作业水平可以反映各个生产环节的机

械化水平。

表2 田间管理水平评价指标体系

指标	指标变量	指标说明	权重
田间管理水平	农业灾害防范率	$1 - (\text{成灾面积} / \text{农作物总播种面积})$	0.5437
	土地产出率	$\text{农业总产值} / \text{耕地面积}$	0.0663
	有效灌溉率	$\text{有效灌溉面积} / \text{农作物播种面积}$	0.3900

(3)调节变量。农业经营规模,借鉴陈宇斌等的研究成果<sup>[54]</sup>,使用各地区的农作物总播种面积和第一产业就业人员数量之比来表征。

(4)门槛变量。农村教育水平,采用农村人均受教育年限表征,借鉴陈刚的研究成果<sup>[55]</sup>,对不同学历进行赋值估算。

(5)控制变量。影响粮食单产的因素很多,结合已有文献以及实际情况,本文对可能影响粮食单产的其他因素进行控制,具体的定义与赋值如表3所示。

### 3. 数据说明

研究样本由2011—2021年全国31个省际面板数据构成。数据来源:因变量粮食单产所涉及到的粮食产量、粮食作物播种面积等原始数据主要来自于国家统计局网站、《中国农业统计年鉴》等;自变量所涉及到的原始数据来自《北京大学数字普惠金融指数》、各省份统计年鉴;机制变量与控制变量来自《中国环境统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国宏观统计数据库》以及国家统计局等。对于个别缺漏数据,采用线性插值法填补。主要变量的描述性统计分析如表3所示。

表3 描述性统计分析

(1) 变量	(2) 变量名称	(3) 变量赋值说明	(4) 均值	(5) 标准差
被解释变量	粮食单产	粮食产量/粮食作物播种面积(吨/公顷)	5.490	0.970
核心解释变量	数字技术	数字技术综合指数,熵值法	0.122	0.115
中介变量	农业社会化服务水平	农林牧渔服务业产值/耕地面积(亿元/千公顷)	0.0457	0.0384
	田间管理水平	田间管理水平综合指数,熵值法	0.271	0.134
	农业机械化水平	机耕、机播和机收三项作业水平进行加权	0.572	0.196
调节变量	农业经营规模	农作物播种面积/第一产业从业人数(千公顷/万人)	7.532	4.134
门槛变量	农村教育水平	农村人均受教育年限(年)	7.696	0.829
控制变量	粮食播种面积占比	粮食作物播种面积/农作物播种面积	0.661	0.145
	第一产业从业人员占比	第一产业从业人数/三产从业总人数	0.313	0.141
	化肥投入强度	农药使用量/农作物播种面积(吨/公顷)	0.367	0.141
	农药投入强度	化肥使用量/农作物播种面积(吨/公顷)	0.0116	0.00958
	人均用电量	农村用电量/乡村人口(万千瓦时/人)	0.204	0.522
	人均柴油消耗量	农用柴油使用量/乡村人口(吨/人)	0.0405	0.0278
	城镇化程度	城镇人口/地区人口总数	0.586	0.131
	政府干预力度	财政一般预算支出/地区生产总值	0.293	0.206
	复种指数	农作物播种面积/耕地面积	1.269	0.411
	农业产值占比	农业总产值/农林牧渔业总产值	0.523	0.0846
	粮食产量占比	各省份粮食产量/全国粮食总产量	0.0323	0.0287

## 四、实证结果分析

### (一) 基准回归分析

为了避免解释变量之间存在多重共线性问题,本文采用方差膨胀因子检验,VIF均小于10,结

果表明模型不存在多重共线性问题。其次,对于选用何种估计方法的问题,根据豪斯曼的检验结果( $\text{Prob} > \chi^2 = 0.0000$ ),选用固定效用模型是更为合理的。

由表4的基准回归可知,列(4)中数字技术的估计系数为1.804,且通过1%的显著检验,表明数字技术有助于粮食单产的提高。并且,无论是否纳入控制变量以及时间效应,数字技术均显著促进粮食单产,进一步表明基准回归的可靠性。其他解释变量中,农业产值占比与粮食产量占比对粮食单产均产生显著的正效应,与预期相符。农药投入强度、人均柴油消耗量以及复种指数对粮食单产均产生显著的负效应。分析其原因:农药投入强度过高可能对农田土壤和水体造成污染,破坏生态平衡,进而危害农作物和生态环境;柴油能源近些年价格上涨,导致农机作业和生产成本增加,给粮食生产带来了压力;复种指数高会造成土壤养分枯竭、病虫害和杂草问题加剧、土壤结构破坏等,从而影响粮食的产量和质量。因此,假说1得到验证。究其本质,数字技术的发展可以提供精确的农业数据和智能决策支持,优化种植管理、水肥利用等环节,从而提高粮食单产。

表4 基准回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
数字技术	2.128*** (0.153)	1.498*** (0.179)	1.691*** (0.299)	1.804*** (0.379)
粮食播种面积占比		0.190(0.478)		0.016(0.484)
第一产业从业人员占比		-0.493(0.420)		-0.303(0.417)
化肥投入强度		0.190(0.428)		-0.026(0.440)
农药投入强度		-9.810** (4.080)		-9.441** (4.024)
人均用电量		0.037(0.032)		0.045(0.031)
人均柴油消耗量		-8.660*** (1.348)		-8.711*** (1.308)
城镇化程度		1.442*** (0.547)		1.542(1.073)
政府干预力度		0.170(0.338)		0.461(0.362)
复种指数		-0.246*** (0.086)		-0.249*** (0.092)
农业产值占比		0.923** (0.434)		0.791* (0.452)
粮食产量占比		84.161*** (6.554)		85.270*** (6.362)
省份固定效应	是	是	是	是
时间固定效应	否	否	是	是
常数项	5.231*** (0.022)	2.166*** (0.616)	5.134*** (0.039)	2.463*** (0.887)
样本量	341	341	341	341
R2	0.386	0.675	0.448	0.707

注:括号内的数值表示标准误,\*\*\*、\*\*、\*分别表示在1%、5%以及10%的显著性。下表同。

## (二)内生性及稳健性检验

### 1. 稳健性检验

为确保基准回归结果的有效性,本研究分别采取替换核心解释变量、样本数据缩尾处理、剔除四个直辖市和滞后效应来分别进行稳健性检验。第一,替换核心解释变量。考虑到本文采用熵值法测算出的数字技术水平可能存在偏差,为保证结果的有效性,使用主成分分析法对其再次进行测算,由列(1)所示,数字技术对粮食单产在1%水平上均是显著的,再次说明数字技术对粮食单产具有促进作用,表明基准结论是可靠的。第二,样本缩尾。由于本文样本中可能会存在异常值,对实证检验结果产生不确定的影响作用,故对所有的样本数据进行1%的双边缩尾处理,具体结果如列(2)所示,数字技术在1%水平上正向显著。第三,剔除直辖市。从数字技术发展水平来看,四个直辖市的发展势头良好,位居全国前列,并且享有一定的自主权以及政策支持,故剔除四个直辖市重新回归分析,结果如列(3)所示,与基准回归结果保持一致。第四,滞后效应。鉴于可能存在潜



在的内生性问题,为了更准确地进行实证检验,对所有解释变量和控制变量均进行一期滞后处理,并进行回归检验。结果如列(4)显示,回归方程的方向、显著性和大小与原始模型相比均未发生明显的变化,再次证明前文基准回归结果的可靠性。

表5 稳健性及内生性检验

变量	替换核心解释变量 (1)	样本缩尾 (2)	剔除直辖市 (3)	滞后效应 (4)	工具变量1		工具变量2	
					第一阶段回归 (5)	第二阶段回归 (6)	第一阶段回归 (7)	第二阶段回归 (8)
数字技术	0.510*** (0.101)	2.014*** (0.399)	2.463*** (0.738)	2.429*** (0.452)	0.031*** (0.005)		0.886*** (0.037)	
工具变量					2.052*** (0.510)		1.754*** (0.206)	
控制变量	是	是	是	是	是	是	是	是
省份固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
样本量	341	341	297	310	341	341	341	341
R2	0.709	0.706	0.720	0.684	0.834	0.974	0.937	0.975

## 2. 内生性检验

本文旨在研究分析数字经济对粮食安全的作用机制,但是,基于现实和理论判断,数字技术与粮食单产可能存在内生性问题。一方面,数字技术可能与区域粮食单产之间存在双向因果关系,在数字技术提高粮食单产能力的同时,粮食单产能力的提高也可能会反向影响数字技术发展水平;另一方面,在建模过程中可能忽略了其他影响粮食单产的重要因素,进而造成模型设定遗漏变量偏误。以上两种情况均可能造成内生性问题,因此,在固定效应回归的基础上采用工具变量识别数字技术对粮食单产的影响机制。

针对工具变量的选择问题。互联网信息技术的普及是数字技术发展的重要基础,而互联网信息技术的应用发始于固定电话的应用,据此可以认为数字技术与固定电话普及具有相关性。借鉴黄群慧的研究经验<sup>[56]</sup>,将1984年各省份每百万人邮局数量和固定电话数量分别与上一年度互联网用户数的交乘项当做数字技术的工具变量纳入模型之中,以缓解内生性问题。其中1984年每百万人邮局数、固定电话数以及全国互联网用户数量的数据来源于中国统计年鉴。从表5中两阶段最小二乘法(2SLS)估计结果可知,在考虑控制变量的情况下,数字技术对粮食单产的影响系数分别为2.052和1.754,均在1%的水平上显著,工具变量法得到的估计结果与基准结论保持一致。

## (三) 异质性分析

为深化数字技术对粮食单产的影响研究,分别使用区域异质性以及功能异质性分析。具体情况如表6所示。

表6 异质性检验

变量/参数	功能异质性		分布异质性				
	粮食主产区 (1)	粮食非主产区 (2)	0.1 (3)	0.25 (4)	0.5 (5)	0.75 (6)	0.9 (7)
数字技术	4.421** (1.748)	1.301*** (0.484)	1.510*** (0.348)	1.712*** (0.436)	1.306** (0.508)	2.329*** (0.467)	1.997*** (0.208)
控制变量	是	是	是	是	是	是	是
省份固定效应	是	是	是	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是	是	是	是
样本量	143	198	341	341	341	341	341
R2	0.807	0.770	-	-	-	-	-

### 1. 功能异质性

由于经济发展水平、地理环境特征以及农业发展模式等基础条件存在差异,我国各地区的数字技术与粮食产业发展水平存在地区不均衡的情况,因此导致数字技术对粮食单产的影响机制可能存在着地区差异。有鉴于此,本文从粮食功能区分的视角出发,数字技术对粮食单产的促进作用可能存在异质性。将样本区分为粮食主产区以及非粮食主产区。表中粮食主产区和非粮食主产区的影响系数为4.421和1.301,分别通过了5%和1%的显著性检验。分析其原因:粮食主产区的生态条件优越,种粮面积比例大,粮食产业发展迅速,数字技术已经达到比较先进的水平,当地的粮食生产经营者较早通过数字技术的渠道推动粮食增产工作,数字技术与粮食产业融合较好,已经达到比较先进的水平;而粮食非主产区的生产条件较为复杂,土地资源有限,气候条件多变,需要通过科技手段提高生产效率。数字技术可以帮助农民或农业企业更好地监测和管理农田,优化生产过程,提高粮食产量和质量,从而提升粮食单产水平,未来仍有较大的粮食数字技术挖掘空间,因此,数字技术在粮食非主产区对粮食单产的促进作用更明显。

### 2. 分布异质性

从粮食安全的异质性角度出发,数字技术对不同分位点水平的粮食单产的影响可能存在差异。本文分别从数字技术对粮食单产0.1、0.25、0.5、0.75及0.9各分位点进行估计,从表6中(3)~(7)列可见各估计系数均为正数且均通过显著性检验,表明任何数字技术水平均对粮食单产有显著的促进作用,再次证明数字技术对粮食单产的促进作用。

## (四) 作用机制分析

### 1. 中介效应分析

本文采用中介效应模型检验假说2,回归结果如表7所示:第(2)列中数字技术对农业社会化服务的影响系数为0.135,通过1%的显著性检验,表明数字技术有助于推动农业社会化服务进程;列(3)中数字技术与农业社会化服务水平对粮食单产的影响系数分别为1.548、1.899,分别通过1%和5%显著性检验,即农业社会化服务在数字技术提高粮食单产水平的过程中承担了部分中介作用。分析其原因:农业社会化服务能够帮助农民和农业企业更好地理解、接受和应用数字技术,提供技术培训、咨询指导和技术支持,协助他们将数字技术有效地运用到农业生产实践中,从而促进粮食单产水平的提升。

第(4)列中被解释变量为田间管理水平,数字技术的影响系数为0.272,在1%的统计水平上显著,说明数字技术显著提升田间管理水平,列(5)中数字技术与田间管理水平对粮食单产的影响系数分别为1.476、1.207,且均通过1%显著性检验,即田间管理水平在数字技术提高粮食单产的过程中承担了部分中介作用,这是因为数字技术的应用提升了田间管理水平,使农户能够实时监测关键参数并精准施肥、灌溉,同时预警病虫害,科学调整种植方案,优化生产流程,最终实现了粮食单产的显著提升。

第(6)列中被解释变量为农业机械化,数字技术的系数为0.277,在1%的统计水平上显著,说明数字技术显著促进农业机械化水平,列(7)中数字技术与农业机械化对粮食单产的影响系数分别为1.56和0.879,均通过1%显著性检验,说明数字技术通过促进农业机械化水平,从而提高粮食单产水平,原因在于数字技术可以与农业机械相结合,实现智能化、自动化的农业生产。数字技术可以提供精准的农田测绘、作物生长监测和预测、农机作业调度等功能,使农业机械更加高效、精确地进行农事操作,提高农业生产效率和粮食单产水平。因此,影响机制的研究假说得以验证。

表 7 中介及调节效应检验

变量	粮食单产 (1)	农业社会化服务水平 (2)	粮食单产 (3)	田间管理水平 (4)	粮食单产 (5)	农业机械化水平 (6)	粮食单产 (7)	粮食单产 (8)
数字技术	1.804*** (0.379)	0.135*** (0.028)	1.548*** (0.391)	0.272*** (0.068)	1.476*** (0.381)	0.277*** (0.100)	1.560*** (0.375)	1.943*** (0.395)
农业社会化服务水平			1.899** (0.779)					
田间管理水平					1.207*** (0.324)			
农业机械化水平							0.879*** (0.218)	
农业经营规模								-0.011(0.013)
数字技术×农业经营规模								0.121** (0.055)
控制变量	是	是	是	是	是	是	是	是
省份固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
样本量	341	341	341	341	341	341	341	341
R2	0.706	0.775	0.712	0.831	0.719	0.594	0.722	0.711

2. 调节效应分析

由前文的理论分析可知,农业经营规模可能是数字技术作用于粮食单产的调节变量,因此,通过引入数字技术和农业经营规模的交乘项,以验证调节效应是否存在。为消除可能存在的多重共线性,对交乘项采取去中心化处理。表 7(8)列展示了农业经营规模的调节效应回归结果,从中可知交乘项在 5% 的统计水平上正向显著,表明随着农业经营规模的不断扩大,数字技术对粮食单产的提升作用明显增强,即农业经营规模越大,这种促进效果越明显,假说 3 得以验证。综上,农业经营规模在数字技术与粮食单产的关系中发挥了正向调节作用。

(五) 门槛效应分析

结合客观实际和理论分析,不同水平的数字技术可能对粮食单产的影响存在非线性的门槛特征,对此采用门槛模型进行检验。本文通过 Bootstrap 反复自举抽样 300 次的方式对农村教育水平作为门槛变量的情况进行效应检验,结果如表 8 所示。由结果可知,农村教育水平的单一门槛对应的 F 值、P 值均通过 1% 的显著性,但双重门槛结果并不显著。表明农村教育水平驱动下数字技术的对粮食单产的影响存在单一门槛效应。由结果可知,农村教育水平的门槛值分别为 8.3006,与之对应的置信区间为[8.2460,8.3400]。

表 8 门槛效应检验

门槛变量	门槛性质	F 统计值	P 值	1% 临界值	5% 临界值	10% 临界值
农村教育水平	单一门槛	40.65	0.000***	19.6759	13.6498	11.8571
	双重门槛	8.13	0.2433	22.6519	15.3946	12.1180

进一步基于省级面板数据进行门槛回归以检验假说 3 的准确性。结果如表 9 所示:数字技术作用于粮食单产时存在显著的农村教育水平的门槛效应。并且在不同的门槛区间,数字乡村对粮食安全的作用效果均是不同的。具体而言,当农村教育水平不高于 8.3 年时,数字技术的影响系数为正,但不显著;当农村教育水平超过 8.3 年时,数字技术的影响系数为正且在 1% 的水平上显著。由此可知,随着农村教育水平的不断提高,数字技术对粮食单产的促进作用表现为边际递增的特征。深入分析可知,农村人口通过教育可以获得更多的知

表 9 门槛效应回归结果

变量/参数	粮食单产
数字技术(农村人均受教育年限≤8.3)	0.445(0.351)
数字技术(农村人均受教育年限>8.3)	1.665*** (0.339)
控制变量	是
样本量	341
R2	0.707

识和技能,从而更好地理解、应用和创新数字技术。他们具备更强的数据分析和决策能力,能够更科学地利用数字技术进行农业生产管理,提高资源利用效率和作物生产质量。此外,受过教育的农民更愿意接受新技术,并能够将其经验和知识传播给其他农民,进一步推广数字技术的应用。

## 五、拓展分析:从政策视角探析数字技术对粮食单产的影响

2015年,国务院印发了《关于加大改革创新力度加快农业现代化建设的若干意见》的中央一号文件,强调了挖掘提高粮食生产能力的新潜力,同年农业部等8部委共同研究发布了《“互联网+”现代农业三年行动实施方案》,提出将实施“互联网+”现代农业行动作为重大举措,以保障国家粮食安全,并鼓励地方加大精准农业发展力度。该方案包括实施农业信息监测预警、农作物种植与质量安全监测,同时,结合遥感技术、定位技术、地理信息系统以及农业物联网,开展病虫害监测预警和农作物产量预测,推进水肥一体化与智能节水灌溉技术、农机定位耕种以及测土配方施肥等一系列精准化作业。所以,本文将2015年作为一项准自然实验,从政策视角探析数字技术对粮食单产的影响。

### (一) 模型构建及回归分析

本部分内容旨在探究农业现代化相关政策实施是否有助于提升数字技术对粮食单产的促进作用。区别于一般的DID模型采用虚拟变量来区分实验组和控制组,本文则是利用“数字技术”这个连续型变量来区分实验组和控制组。这样,政策实施将样本分为实验组(数字技术发展水平高的样本)和控制组(数字技术发展水平较低的样本)。这种连续型DID模型不仅不会改变DID模型的基本性质,反而能捕捉到更多的数据变异性,并避免了人为设定实验组和控制组可能带来的偏差<sup>[57]</sup>。为了识别相应的影响效果,由此构建的广义双重差分模型如式(6)所示:

$$Grain_{it} = \psi_0 + \psi_1 DT_i \times I_{post}^{t} + \psi_2 Control_{it} + \eta_i + \mu_i + \tau_{it} \quad (6)$$

其中, $DT_i \times I_{post} t$ 为核心解释变量, $DT_i$ 代表数字技术, $I_{post} t$ 代表农业现代化政策实施时点的虚拟变量,当 $t < 2015$ 时, $I = 0$ ;当 $t \geq 2015$ 时, $I = 1$ 。回归结果如表10所示:普通标准误、稳健标准误和Bootstrap重复抽样1000次所得的估计结果表明影响系数均在1%的显著水平上。可见,相关政策的实施能够提升数字技术对粮食单产的促进作用。

表10 基准回归结果

变量	普通标准误 (1)	稳健标准误 (2)	Bootstrap 抽样1000次 (3)
$DT_i \times I_{post} t$	1.317*** (0.273)	1.317*** (0.443)	1.317*** (0.395)
控制变量	是	是	是
省份固定效应	是	是	是
时间固定效应	是	是	是
样本量	341	341	341
R2	0.707	0.978	0.978

### (二) 平行趋势检验及动态估计

根据前文的研究发现,农业现代化政策的实施有助于数字技术提高粮食单产水平。然而,连续型DID估计结果的可靠性,还需要检查平行趋势能否通过。为了检验农业现代化政策的动态估计结果,本文借鉴张国建等的研究方法<sup>[58]</sup>,采取事件研究法。具体而言,在公式(6)中,我们将核心解释变量替换为代表政策实施前后不同年份的虚拟变量,并保持被解释变量不变。具体估计方程如式(7)所示:

$$Grain_{it} = \omega_0 + \prod_{s \geq -4}^6 \omega_s D_s + \omega_{12} Control_{it} + \eta_i + \mu_i + \zeta_{it} \quad (7)$$

在公式中, $D_0$ 用于表示农业现代化政策实施年份的虚拟变量; $S$ 代表距离政策实施年份的时间间隔。图2展现了核心解释变量估计系数的变化趋势以及相应95%的置信区间的分布情况。从中可知,在该项政策实施前,对粮食单产并不具显著的影响;而在政策实施的第2年之后,95%的置信区间基本不包含零,且在其之上,表明该项政策实施有助于数字技术提升粮食单产水平,虽然有滞后性,但提升效果是持续稳定的。

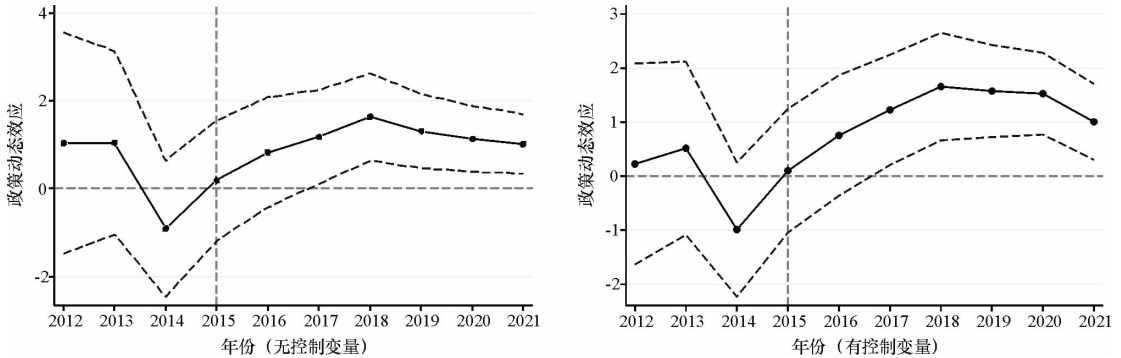


图2 农业现代化政策对粮食单产的动态影响

## 五、研究结论与政策建议

### (一) 主要结论

本文主要以2011—2021年我国31个省级面板数据为主要研究对象,采用双重固定效应模型、中介效应模型和调节效应模型等方法,旨在探究数字技术对粮食生产的影响及相关作用机制。研究发现:(1)数字技术能够对粮食单产水平产生明显的促进作用,并且这种促进作用通过多项稳健性检验。(2)数字技术对粮食单产的保障存在异质性,在功能异质性下粮食非主产区比主产区作用更明显,即这种保障作用在粮食产业发展相对落后的地区比发展领先的地区更为明显。(3)数字技术影响粮食单产的传导机制在于,通过提高农业社会化服务水平、田间管理水平以及农业机械化水平,提升粮食单产能,实现“藏粮于技”。(4)农业经营规模在数字技术提高粮食单产中起正向调节作用。(5)数字技术作用于粮食单产的过程中存在农村教育水平门槛效应,且这种门槛效应表现为边际递增的特征。(6)农业现代化政策有助于提升数字技术粮食单产的促进作用,虽然存在滞后性,但对粮食单产能够产生持续推动效应。

### (二) 政策建议

依据上述研究结论,为增强粮食单产能力,提出相应对策建议:

第一,推动粮食生产数字化进程,以数字技术赋能粮食单产。研究显示,数字技术能够通过提高农业社会化服务水平、田间管理水平以及农业机械化水平来提升粮食单产能力。建议逐步完善农业社会化服务平台,整合农业生产各类资源,提供高效准确的农业技术服务、生产咨询服务以及作物病虫害监测预警服务,帮助农户提高农业生产管理水平。并提供数字化农业机械化装备购置补贴或贷款支持,鼓励农民使用先进的数字化农业机械设备,提高农业生产效率和粮食单产水平。此外,加强农业科技研发力度,推动数字技术在农业领域的创新应用,并扩大对这些技术的推广力度,以使更多农户受益于先进的数字农业技术。

第二,构建差异化调节机制,实施区域协调发展战略。研究发现,数字技术在粮食非主产区对粮食单产的促进作用更明显。为更好地发挥数字技术对粮食单产的增效作用,不同地区可以实施错位发展,因地制宜推进数农融合发展。对于粮食主产区发挥模范带头作用,发挥粮食生产技术优势,加强技术创新,调整效用曲线,从而继续释放数字技术对粮食生产的助推作用,形成具有

借鉴意义的粮食数字化产业。粮食非主产区应充分利用后发优势,借鉴相关经验,抢抓数字技术对粮食单产的发展红利,加大数字产业的基建投入,推动精准农业、智慧农业的发展,为实现“藏粮于技”夯实基础。

第三,加强农村教育投入力度,保障数字技术有效应用。研究表明,随着农村教育水平的不断提高,数字技术对粮食单产的促进作用呈现出边际效应递增的特征。因此,应加大财政投入力度,专注于农村教育发展和数字技术推广。逐步改善农村学校基础设施和教学资源,提供先进的计算机设备和网络连接,并建立农村数字化教育平台,实现农村学校与城市优质教育资源互通,通过在线课程、远程教育等方式,农村学生可以接触到更多新颖的知识。此外,可以设立专门的培训计划,提供师资培训和进修机会,使农村教师提高其教学水平和数字化教育技能,能够将其运用到农村教育中,确保农村学生接受良好的教育。

### 参考文献:

- [1]国家统计局关于2023年粮食产量数据的公告[N].中国信息报,2023-12-12(001).
- [2]苏芳,刘钰,汪三贵,等.气候变化对中国不同粮食产区粮食安全的影响[J].中国人口·资源与环境,2022(8):140-152.
- [3]孙东旭,程松涛.农业技术创新体系带动低碳农业发展的现实困境与政策建议[J].科学管理研究,2021(4):125-130.
- [4]张美琪,刘帅,郭庆海.政府激励、感知价值对农户黑土地保护意愿与行为影响的研究[J].干旱区资源与环境,2023(12):49-58.
- [5]刘志铭,司雨,姚凡云,等.提高东北春玉米产量和资源利用效率降低碳足迹的优化综合管理措施[J].中国生态农业学报(中英文),2022(3):380-388.
- [6]李飞星,叶云,张光宇.数据价值链构件及其作用机理——基于数字技术促进农业产业的案例[J].科技管理研究,2022(11):108-115.
- [7]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(6):21-28.
- [8]ZHOU L, ZHANG S, ZHOU C, et al. The impact of the digital economy on high-quality agricultural development—Based on the regulatory effects of financial development[J]. PLoS One, 2024(3):e293538.
- [9]冯伯豪,王晓红.数字农业助推乡村振兴的影响机制及政策建议[J].西安财经大学学报,2024(1):119-129.
- [10]彭刚,朱莉,陈榕. SNA 视角下我国数字经济生产核算问题研究[J].统计研究,2021(7):19-31.
- [11]江小涓.数字时代的技术与文化[J].中国社会科学,2021(8):4-34.
- [12]VIAL G. Understanding digital transformation: A review and a research agenda[J]. The Journal of Strategic Information Systems, 2019(2):118-144.
- [13]罗英.数字技术风险程序规制的法理重述[J].法学评论,2022(5):151-160.
- [14]余东华,李云汉.数字经济时代的产业组织创新——以数字技术驱动的产业群生态体系为例[J].改革,2021(7):24-43.
- [15]KAYAD A, SOZZI M, GATTO S, et al. Ten years of corn yield dynamics at field scale under digital agriculture solutions: A case study from North Italy[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021,185:106126.
- [16]TRIVELLI L, APICELLA A, CHIARELLO F, et al. From precision agriculture to Industry 4.0: Unveiling technological connections in the agrifood sector[J]. British Food Journal, 2019(8):1730-1743.
- [17]ARVANITIS K G, SYMEONAKI E G. Agriculture 4.0: The Role of Innovative Smart Technologies Towards Sustainable Farm Management[J]. The Open Agriculture Journal, 2020(1):130-136.
- [18]ZHANG Q. Opinion paper: Precision agriculture, smart agriculture, or digital agriculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023,211:107982.
- [19]HRUSTEK L. Sustainability Driven by Agriculture through Digital Transformation[J]. Sustainability, 2020(20):8596.

- [20]GIUSTI E, MARSILI-LIBELLI S. A Fuzzy Decision Support System for irrigation and water conservation in agriculture[J]. *Environmental modelling & software*, 2015(Jan.):73-86.
- [21]BIRNER R, DAUM T, PRAY C. Who drives the digital revolution in agriculture? A review of supply-side trends, players and challenges[J]. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 2021(4):1260-1285.
- [22]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.
- [23]AYOUB SHAIKH T, RASOOL T, RASHEED LONE F. 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.
- [24]TALAVIYA T, SHAH D, PATEL N, et al. Implementation of artificial intelligence in agriculture for optimisation of irrigation and application of pesticides and herbicides[J]. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2020(4):58-73.
- [25]童婷,李谷成,廖文梅. 互联网使用能影响农户生产托管行为吗?[J]. *中南财经政法大学学报*, 2023(4):149-160.
- [26]陈中伟,汤灿. 数字经济发展对农业碳排放的影响及其时空效应[J]. *科技管理研究*, 2023(12):137-146.
- [27]张永奇,单德朋. 县域数字经济、农业社会化服务与小农户受益——基于宏微观数据的经验考察[J]. *上海财经大学学报*, 2024(1):94-107.
- [28]张哲晰,潘彪,高鸣,等. 农业社会化服务:衔接赋能抑或歧视挤出[J]. *农业技术经济*, 2023(5):129-144.
- [29]杨子,饶芳萍,诸培新. 农业社会化服务对土地规模经营的影响——基于农户土地转入视角的实证分析[J]. *中国农村经济*, 2019(3):82-95.
- [30]孙中义,王力,李兴锋. 人口老龄化、农业社会化服务与农业高质量发展[J]. *贵州财经大学学报*, 2022(3):37-47.
- [31]陶慧,张晓雯,熊航. 全球粮食安全的现状、实现途径与保障措施——2022全球粮食安全青年科学家论坛综述[J]. *华中农业大学学报(社会科学版)*, 2023(4):25-32.
- [32]CHANDIO A A, OZDEMIR D, JIANG Y. Modelling the impact of climate change and advanced agricultural technologies on grain output: Recent evidence from China[J]. *Ecological Modelling*, 2023,485:110501.
- [33]CHANDIO A A, OZDEMIR D, GOKMENOGLU K K, et al. Digital agriculture for sustainable development in China: The promise of computerization[J]. *Technology in Society*, 2024(76):102479.
- [34]何锐,佟长福,王军,等. 水氮调控对向日葵生长、水肥利用效率和土壤水盐分布的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2023(12):73-81.
- [35]FAN J, DU Y, WANG B, et al. Forage yield, soil water depletion, shoot nitrogen and phosphorus uptake and concentration, of young and old stands of alfalfa in response to nitrogen and phosphorus fertilisation in a semiarid environment[J]. *Field Crops Research*, 2016,198:247-257.
- [36]白由路. 高效施肥技术研究的现状与展望[J]. *中国农业科学*, 2018(11):2116-2125.
- [37]杜威漩. 现代数字技术赋能农田水利供给体系的机理与路径[J]. *农业经济与管理*, 2022(5):12-21.
- [38]胡晶,赵文哲. 数字农业助推黑龙江省乡村振兴的对策[J]. *学术交流*, 2023(5):140-153.
- [39]孟冉,周龙飞,徐乐,等. 农业遥感技术助力智慧农业发展[J]. *智慧农业导刊*, 2021(10):17-24.
- [40]黄凰,陈燕燕,陈鹏宇,等. 基于时间窗的农机调度技术研究进展[J]. *中国农业科技导报*, 2022(4):93-106.
- [41]苏菲. GPS 自动驾驶驾驶技术在新疆乌苏市农机作业中的应用[J]. *农业工程技术*, 2019(23):55-56.
- [42]马红伟. 农业机械管理创新与发展探析[J]. *内江科技*, 2021(7):135.
- [43]魏秀菊,朱明,廖艳. 推动农业工程发展保障我国粮食安全[J]. *科技导报*, 2023(20):5-19.
- [44]徐志刚,张骏逸,吕开宇. 经营规模、地权期限与跨期农业技术采用——以秸秆直接还田为例[J]. *中国农村经济*, 2018(3):61-74.
- [45]张兆忠,李明轩. 新时代民族地区特色农业高质量发展研究[J]. *北方民族大学学报(哲学社会科学版)*, 2021(4):117-124.
- [46]杨佳利,吴从亮. 数字素养、电商认知与农户电商参与行为——基于湘粤地区528份调查数据[J]. *湖南农业大学学报(社会科学版)*, 2023(6):23-34.

- [47]李春秋,张萌,章芑,等.数字乡村建设背景下农民数字素养框架的构成及其内涵[J].图书情报知识,2023(3):62-71.
- [48]陈宇斌,王森,陆杉.数字普惠金融对农业规模经营的影响效应——基于空间面板模型与门槛模型的实证分析[J].当代经济管理,2023:1-12.
- [49]刘富华,宋然.数字技术对区域经济差距的影响——基于空间溢出的检验[J].华东经济管理,2023(9):1-10.
- [50]任转转,邓峰.数字技术、要素结构转型与经济高质量发展[J].软科学,2023(1):9-14.
- [51]苏群,邢怀振,刘晨.数字技术赋能农民增收:作用机制与影响效应[J].山西财经大学学报,2023(12):72-86.
- [52]王磊,马金铭.数字普惠金融影响农业绿色发展的机制与效应[J].华南农业大学学报(社会科学版),2023(6):14-27.
- [53]杜美玲,祝宏辉,尹小君.农业机械化对农业生态效率的影响研究[J].农业现代化研究,2023(6):1082-1092.
- [54]陈宇斌,王森.农村劳动力外流、农业规模经营与农业碳排放[J].经济与管理,2022(6):43-49.
- [55]陈刚,王燕飞.农村教育、制度与农业生产率——基于中国省级层面数据的实证研究[J].农业技术经济,2010(6):18-27.
- [56]黄群慧,余泳泽,张松林.互联网发展与制造业生产率提升:内在机制与中国经验[J].中国工业经济,2019(8):5-23.
- [57]NUNN N, QIAN N. The potato's contribution to population and urbanization: evidence from a historical experiment [J]. Q J Econ, 2011(2):593-650.
- [58]张国建,佟孟华,李慧,等.扶贫改革试验区的经济增长效应及政策有效性评估[J].中国工业经济,2019(8):136-154.

## Mechanisms of Digital Technology's Impact on Grain Yield from Perspective of Food Security

PENG Jian-fang<sup>a,b</sup>, HUANG Shi-cheng<sup>a</sup>

(a. Institute for Chengdu-Chongqing Twin City Economic Circle Construction;

b. College of Business Administration, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

**Abstract:** This study employs entropy weight method to assess digital technology; it theoretically analyzes and empirically tests the impact mechanism and pathways of digital technology on grain yield, aiming to explore how digital technology affects grain yield. The research findings indicate that, in general, digital technology can effectively enhance grain yield levels, and this promoting effect remains significant under a series of robustness tests. In terms of heterogeneity, digital technology exhibits a stronger promoting effect on grain yield in non-main grain-producing areas. Regarding the mechanisms, the level of agricultural socialized services, field management, and agricultural mechanization are important channels through which digital technology enhances grain yield. Moreover, agricultural operation scale plays a positive moderating role in the process of digital technology empowering grain yield. Regarding the threshold effect, there exists a threshold of rural education level in the process of digital technology affecting grain yield. Expanded analysis suggests that policies promoting agricultural modernization contribute to the capacity of digital technology to enhance grain yield. This study aims to provide a theoretical basis and decision-making references for empowering grain yield with digital technology, as well as offer new insights for formulating relevant policies.

**Key Words:** food security, digital technology, grain yield, agricultural socialized services