

引用格式：

邱俊柯, 陈紫云, 尹子青, 尹奇. 农业生产数字化的发展水平与实现路径——基于蔬菜种植村的多案例研究[J]. 农业现代化研究, 2025, 46(2): 260-269.

QIU J K, CHEN Z Y, YI Z Q, YIN Q. The development level and implementation path of agricultural production digitization: a multi-case study based on vegetable-growing villages[J]. Research of Agricultural Modernization, 2025, 46(2): 260-269.

DOI: 10.13872/j.1000-0275.2024.0966

CSTR: 32240.14.1000.0275.2024.0966



农业生产数字化的发展水平与实现路径 ——基于蔬菜种植村的多案例研究

邱俊柯¹, 陈紫云^{2*}, 尹子青³, 尹奇⁴

(1. 江西理工大学商学院, 江西 南昌 330013; 2. 南昌大学公共政策与管理学院, 江西 南昌 330013;
3. 南昌大学马克思主义学院, 江西 南昌 330013; 4. 四川农业大学管理学院, 四川 成都 610300)

摘要: 加快推进农业生产数字化是以新质生产力引领农业高质量发展的重要着力点。本研究以 11 省 30 县(市、区) 102 村为案例, 采用综合指数法多维展现农业生产数字化的发展水平和阶段特征, 并通过 fsQCA 法解构农业生产数字化实现路径。结果表明: 我国农业生产数字化处于起步阶段, 发展水平整体不高; 农业生产数字化的发展基础、过程体现和作用结果基于区划、省份、结构、主体等不同呈现多维特征; 以数字基建配套赋能农业生产数字化的政府主导路径、以高精尖技术和设备叠加实现农业生产单一或多环节数字化的科研院所引领路径、以小范围经济适用技术和设备应用的农户自发路径、以操作简便、成本更低的成熟数字技术和设备应用的企业运作路径是 4 条农业生产数字化的实现路径。由此提出加大政府扶持力度、发挥科创主体作用和促进小农户与现代农业衔接的建议。

关键词: 农业生产数字化; 发展水平; 阶段特征; 实践路径; 新质生产力

中图分类号: F323.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-0275 (2025) 02-0260-10

The development level and implementation path of agricultural production digitization: a multi-case study based on vegetable-growing villages

QIU Junke¹, CHEN Ziyun², YI Ziqing³, YIN Qi⁴

(1. Business School, Jiangxi University of Science and Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China; 2. School of Public Policy and Administration, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330013, China; 3. School of Marxism, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330013, China; 4. College of Management, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan 610300, China)

Abstract: Accelerating the digitalization of agricultural production is a key focal point for leading the high-quality agricultural development through new quality productive forces. This study adopts a case study approach involving 102 villages across 30 counties (cities, districts) in 11 provinces, and employs a composite index method to explore the development level and stage characteristics of agricultural production digitalization from multiple dimensions. Additionally, this paper also applies the fuzzy-set qualitative comparative analysis (fsQCA) to deeply deconstruct the pathways to achieving agricultural production digitalization. Results show that the digitalization of agricultural production in China is still in its early, uphill phase, with an overall low development level. The foundation, process, and outcomes of agricultural production digitalization present multidimensional characteristics based on different perspectives such as regional divisions, provinces, structures, and stakeholders. Four key pathways for achieving agricultural production digitalization are identified, including the government-led pathway that empowers digital agriculture through digital infrastructure, the research institute-led pathway that integrates advanced technologies and equipment to digitalize single or multiple agricultural production processes, the farmer-initiated pathway that applies affordable technologies and equipment on a small scale, and the enterprise-operated pathway that applies mature digital technologies and equipment that are easy to operate and lower in cost. Based on these findings, this paper provide the following recommendations: to increase government support, to leverage the role of scientific and technological

收稿日期 Received: 2024-06-26; 接受日期 Accepted: 2024-12-30

基金项目: 国家社会科学基金 (23BGL218); 教育部人文社会科学研究一般项目 (17YJA630124); 南昌市社会科学规划项目 (GL202403)。Supported by the National Social Science Foundation of China (23BGL218); Research Project of Humanities and Social Sciences of the Ministry of Education (17YJA630124); Nanchang Social Science Planning Project (GL202403).

* 通信作者 Corresponding author (chenziyun@ncu.edu.cn)

innovation entities, and to promote the connection between small - scale farmers and modern agriculture.

Keywords : agricultural production digitalization; development level; stage characteristics; practical pathways; new quality productive forces

加快推进农业生产数字化是形成农业新质生产力^[1]、助推农业走在前^[2]的重要着力点。从2018年至2024年,中央一号文件连续7年对智慧农业发展做出部署,在政策引导下,我国依托新一轮科技创新加速推进农业数字化^[3-4],但更多集中在技术门槛较低的交易和服务环节^[5-6],未使数据要素有效渗透至农业数字化根基和重要技术体现的生产环节,没有实现传统要素效益倍增,也未实现农业生产组织结构重塑。农业生产端受数字基建薄弱、核心技术牵制^[7]、数字人才短缺、高投入成本属性等因素^[8]牵制而面临进程受阻的转型困境。当前,我国农业正处于保障“菜篮子”供给、缓解自然灾害冲击^[9],应对劳动力老弱化^[10]等复杂情况下,处于由量增转向质增、从粗放经营转向精细管理的转型时期,在数字化风口上,如何加快农业生产环节的数字化转型就成为关键。

近年来,围绕农业生产数字化,学界展开了一定研究。一是解析农业生产数字化的概念界定,学者认为农业生产数字化是以全面感知、智能处理和可靠传输的数字技术、设备和基建为支撑和手段^[11],以农业生产中耕种管收各环节智能化、自动化的泛在化为特征的现代农业发展形态^[12],旨在提高农业质效、改善生态环境、赋能主体增收^[13]。二是从省域层面探讨农业生产数字化水平测度,现有研究大多基于省级宏观统计指标,从发展环境、人才基础、创新能力和产出效益等维度构建评价体系^[14-15],并多采用综合指数法测度其发展水平高低^[16]。三是剖析农业生产数字化的转型路径,学者多基于农业生产数字化的参与主体和影响因素,提出加强基础设施建设、培养农业数字化人才^[17-18]、增强涉农企业科创能力^[19]等建议。现有研究虽较好解析了农业生产数字化的概念内涵、总体水平和推进路径,但从实践层面客观展现农村地区农业生产数字化实际水平,归纳总结农村推进农业生产数字化具体实现路径的研究却鲜见。

也即我国农业生产数字化实践走在理论研究前面,为落实党中央关于农业生产数字化转型的决策部署,山东、四川等省份相继出台一系列政策,稳步推进有条件地区农业生产全流程、部分流程的数字化转型。而借助各类评估和调研,课题组于2017年底至2024年初先后对四川、湖南等21省(区、市)302余县进行调研,并观察到政府主导、企业

运作、科研院所引领和农户自发这4种还未在实践中大范围铺开的农业生产数字化路径。因此,结合实地调研与专家研讨,本文重点选取11省30县(市、区)102村为案例,立足实践层面构建农业生产数字化分析框架和微观评价体系,运用综合指数法和fsQCA分析法,从我国农业生产数字化发展水平和阶段特征入手,系统梳理典型地区推进农业生产数字化的多元实现路径,以期为广大农村选择适宜的农业生产数字化道路提供借鉴。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

从自然环境的地域分异看,地形地貌、水源、土壤等自然因素在不同程度上对我国区域农业发展具有限制性^[20],特别是地形复杂、生态脆弱的西部地区;基于经济社会发展视阈,自改革开放以来,东部地区率先发展起来^[21],较好的历史基础和较优的产业结构为农业发展提供了有力支持,使其农业现代化水平领先于东北、中部和西部地区^[22]。可见,对中国这一不同区域差别巨大的农业大国而言,要推进农业生产数字化转型并不容易。研究区以11省30个县(市、区)102个蔬菜种植村为主,东部选取山东、浙江和江苏3省7县(市、区)24村,中部选取江西和湖南10县(市、区)28村,西部选取四川、新疆、陕西和广西4省(区)9县(市、区)30村,东北选取吉林和辽宁4县(市、区)22村,其能够展现我国绝大部分农村地区推进农业生产数字化的现状和路径。

1.2 数据来源

定性案例研究中多采用非概率抽样中的目的性抽样以为研究提供最大信息量^[23],因此本文选择已进行农业生产数字化实践的村庄为研究样本。自2017年至2024年,借助世行调研项目、乡村建设评价和乡村振兴三方评估,课题组先后对江西、湖南、广西、四川、山东等21省(区、市)302余县(市、区)近万余村进行实地调研,并与乡镇干部、村干部、合作社理事长、农业科技人员等主体进行深度访谈获取相关信息和数据。结合调研情况和专家研讨,本文重点选取四川C市W区、D市、X县,陕西X市、W市,山东Q市、T市,江西J市等11省(区、市)30个县(市、区)102个样本村。这些样本村包括农业生产数字化刚起步和水平相对较高的村庄,同

时涵盖了东西中部和东北地区村庄、蔬菜主产区和非蔬菜主产区村庄、经济发展水平较高和相对较低县（市、区）村庄，还从村庄特征角度包括了以农业生产为主和以工业、旅游为主的村庄。

2 研究方法

2.1 农业生产数字化指标体系构建

本文结合农业生产数字化概念、借鉴《中国农业信息化发展评价指标体系》《智慧农业示范基地建设与评价规范 第四部分：智慧菜园》和已有研究^[24]，并基于可测性、科学性等原则，从发展基础、过程体现和作用结果 3 个维度选取 12 个指标体系

测度农业生产数字化水平（表 1）。其中，农业生产数字化是基础设施完善和技术创新应用相统一的数字化，故基于数字技术应用、数字设备采用和数字基建配套水平 3 个指标建立农业生产数字化发展基础准则层；农业生产数字化是从整地到收获整个农业生产过程的数字化，故基于整地、种植、灌溉、施肥、施药和收获 6 个指标建立农业生产数字化过程体系准则层；农业生产数字化结果直接体现在农业生产效率、绿色发展、主体增收等方面^[25]，因此选取生产效率提升、生产绿色转型和生产主体增收 3 个指标。

表 1 农业生产数字化评价指标体系

Table 1 Evaluation index system for digitalization of agricultural production

准则层	指标层	测度标准	属性	权重
农业生产数字化发展基础	数字技术应用水平 /%	根据应用大数据、物联网、云计算、人工智能和其他数字技术的类别数量直接赋值，每应用一类赋值 20%	+	0.079
	数字设备采用水平 /%	根据采用农业物联网设备、智能农机、智能灌溉设备、智能分析平台和其他设备的类别数量赋值，每应用一类赋值 20%	+	0.095
	数字基建配套水平 /%	根据配套通信网络设施、大数据设施、云计算设施、数据中心设施和其他设施的类别数量赋值，每配套一类赋值 20%	+	0.115
农业生产数字化过程体现	整地作业数字化面积 /hm ²	反映开展智能整地作业面积的情况	+	0.099
	种植作业数字化面积 /hm ²	反映开展智能种植作业面积的情况	+	0.092
	灌溉作业数字化面积 /hm ²	反映开展智能灌溉作业面积的情况	+	0.070
	施肥作业数字化面积 /hm ²	反映开展智能施肥作业面积的情况	+	0.073
	施药作业数字化面积 /hm ²	反映开展智能施药作业面积的情况	+	0.075
	收获作业数字化面积 /hm ²	反映开展智能收获作业面积的情况	+	0.081
农业生产数字化作用结果	生产效率提升	非常差 =1；比较差 =2；一般 =3；比较好 =4；非常好 =5	+	0.071
	生产绿色转型	化肥农药使用量减少比率：减少 10% 及以下 =1，减少 11%~20%=2，减少 21%~30%=3，减少 31%~40%=4，减少 40% 以上 =5	+	0.076
	主体增收效应	主体增收比率：增收 5% 及以下 =1，增收 6%~10%=2，增收 11%~15%=3，增收 16%~20%=4，增收 20% 以上 =5	+	0.074

2.2 农业生产数字化综合评价

目前学界对农业相关领域发展水平的评价方法主要有综合指数法和熵值法。本文则采用综合指数法评价农业生产数字化发展水平。方法过程包括：以专家论证方式确定农业生产数字化评价指标体系；用极值法对各数据进行无量纲化处理；用变异系数法确定评价指标权重；将各项指标无量纲化后的数据乘以对应权重，再加总后求得农业生产数字化综合指数。公式如下：

$$H_j = \sum_{i=1}^n W_i P_{ij} \quad (1)$$

式中： W_i 为指标权重； P_{ij} 为无量纲化后的指标数值； H_j 为农业生产数字化综合指数，通常综合指数越高，表明农业生产数字化发展水平也越高。

2.3 农业生产数字化实现路径判定方法

本文采用 fsQCA 解析农业生产数字化的实现

路径。在“多元协作治理”四维框架下^[26]，农业生产数字化实际就是以政府为主体承担主要建设责任的同时，充分发挥农业企业、科研机构以及农户等主体的作用^[27]。首先，地方政府在农村地区更关注区域发展和公共事业^[28]，能通过政策引导、财政扶持等方式影响农业生产数字化进程。其次，农业企业和科研机构拥有一定资本和数字化经验，而农户作为主要劳动力，能够学习、应用数字技术和设备，二者互补协同能够实现生产范式转换。此外，村干部村庄发展领头雁的作用不可忽视，目前争资跑项依然是基层特别是资源匮乏农村地区治理工作的核心^[29]，而拥有雄厚社会资本的村干部往往更能在政府、企业、农户等主体间牵线搭桥，促成合作和项目落地，推进农业生产数字化。基于此，本文基于参与主体的角色和作用，引入 fsQCA 法，探究不同参与主体及其不同组合与村庄农业生产高水平数字化发展之间的复杂因果关系，并解构农业生产数字

化的实现路径。

2.3.1 结果变量 本文将采用综合指数法测度的村庄农业生产数字化综合指数设为衡量农业生产数字化水平的结果变量。

2.3.2 条件变量 借鉴现有研究^[30-31]，本文构建4个条件变量的问卷题项，通过8个题项分析农业生产数字化的参与主体及其行为（表2）。政府扶持从财政投入和政策倾斜，衡量政府对农业生产数字化的注意力分配程度；科创主体引领通过企业和科研院所研发建设投入、示范推广等题项，衡量上述两类主体在农业生产数字化中的作用；村干部运作参考社会资本框架，衡量村支书利用关系网络获取发展所需内外部资源的能力；村民参与借鉴动机行为框架^[32]，探究多方推动农业生产数字化进程中村民的参与意愿和行为选择。

2.3.3 数据校准 在进行研究前，需对数据变量进行校准。由于各条件变量单位不统一，因此本文采用极值标准化法对数据进行无量纲化处理，在此基础上，采用直接校准法对结果变量和条件变量进行校准，转换为模糊集隶属分数。具体操作为选取数据的75%（完全隶属）、50%（交叉点）和25%（完

全不隶属）设为校准点，并且由于fsQCA下一步运算会自动忽略0.5的数据案例，因此将校准为0.5的数据赋值为0.499。

3 结果与分析

3.1 农业生产数字化发展水平

3.1.1 农业生产数字化综合评价 我国农业生产数字化尚处于爬坡起步阶段，且基于不同视阈呈现多维特征。全样本下，我国农业生产数字化综合指数为0.349，整体水平不高。从区域划分看，东部、中部、西部和东北地区农业生产数字化综合指数分别为0.449、0.311、0.279和0.376，呈现东部领先、东北其次、中部跟随和西部最后的特征；基于省份比较视阈，江苏农业生产数字化综合指数最高，为0.502，其次为浙江0.431，而广西最低，仅为0.199（图1）。可见，东部地区和沿海发达省份在经济实力、人才聚集、科创能力、产业链协同等方面的优势促进农业生产数字化高质量转型发展。

3.1.2 农业生产数字化细化分析 农业生产数字化发展基础指数量化范围为0.00~0.289，而我国农业生产数字化发展基础指数均值为0.102，表明我国推

表2 fsQCA 变量选取
Table 2 Variable selection for the fsQCA

变量类型	变量视角	具体变量	变量说明
结果变量	农业生产数字化	农业生产数字化水平	按综合指数法得出的农业生产数字化综合指数赋值
条件变量	政府扶持	财政直接投入/万元	按财政投入总额直接赋值
		政策间接倾斜	按扶持政策的类别和数量赋值，每符合一项赋值0.25
	科创主体引领	企业资本投入/万元	按研发和建设投资总额直接赋值
		科研院所投入/万元	按研发和建设投资总额直接赋值
		示范推广	技术培训、现场指导、经验交流、其他，每符合一项赋值0.25
	村干部运作	支书社会资本	种养大户、返乡创业人员、合作社领头人、其他，每符合一项赋值0.25
	村民参与	村民生产投资/万元	按村民自主采购智能生产设备或系统的总额直接赋值
		村民合作参与	仅劳作参与或仅土地、资金入股参与人数乘0.5，入股且日常参与生产劳作人数乘1，两者人数相加

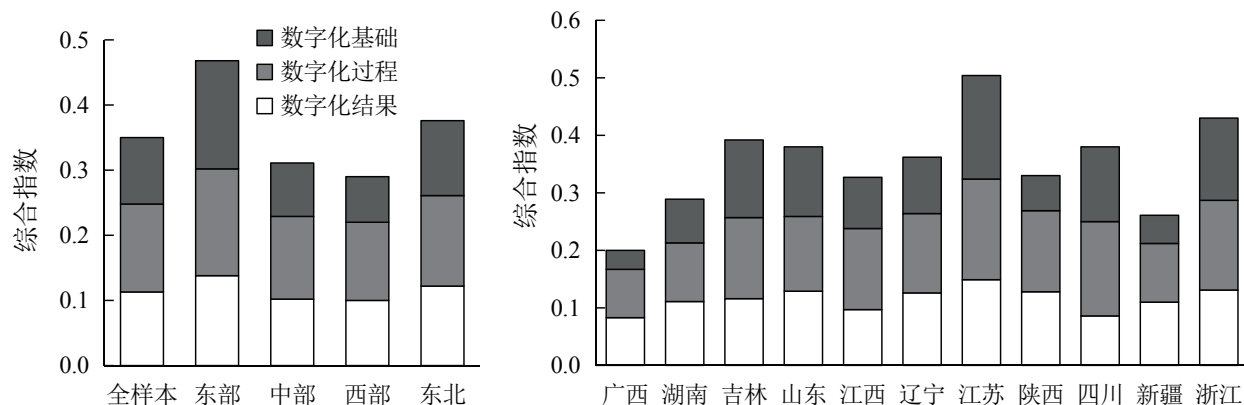


图1 农业生产数字化水平

Fig. 1 Level of digitalization in agricultural production

进农业生产数字化有一定技术、设备和基建支撑,但发展基础仍有待夯实。基于区划视阈,东部地区农业生产数字化发展基础指数最高,为 0.166,其次为东北地区 0.115,而中部和西部分别为 0.082 和 0.069。东北地区是蔬菜、粮食生产的优势产区,地形平坦、土地连片,利于数字基建配套和技术设备应用,使其数字化基础仅次于东部地区,而中西部特别是西部地区,地形复杂、耕地破碎、生态脆弱、小农经济仍占主要地位,不利于新技术和设备推广,且仍面临数字基建薄弱、村庄部分地方存信号盲点问题。

农业生产数字化过程指数均值为 0.135 (量化范围 0.000~0.490),表明多数村庄从整地到收获整个农业生产过程的数字化水平相对较低。基于蔬菜生产划分,蔬菜优势产区村庄农业生产数字化指数均值为 0.140,非蔬菜优势产区村庄为 0.115;基于村庄类型看,农业村庄农业生产数字化过程指数均

值为 0.143,非农业村庄为 0.119,可见村庄定位、发展导向等的不同,农业生产过程的数字化水平有较大差异(图 2)。而从具体结构看,整地、种植、灌溉、施肥、施药和收获作业数字化均值分别为 0.208、0.205、0.340、0.260、0.280 和 0.190,表明当前农业生产数字化主要集中在灌溉、施肥和施药 3 个环节,而这是因作为解决上述三项相对耗时且成本高的的重要手段,多功能无人机、智能灌溉系统等技术和设备得以在有条件地区率先应用,带动农业生产单一或多环节的数字化转型。

农业生产数字化作用结果指数均值为 0.113 (量化范围 0.000~0.221),表明现阶段推进农业生产数字化在一定程度上能够实现生产效率提升、生产绿色转型和经营主体增收。但从主体分类看,企业(0.136)主导村庄农业生产数字化带来的多维效应最好,其次为农户(0.108)和科研院所(0.102),最后为政府(0.086)主导模式,这主要是因为推

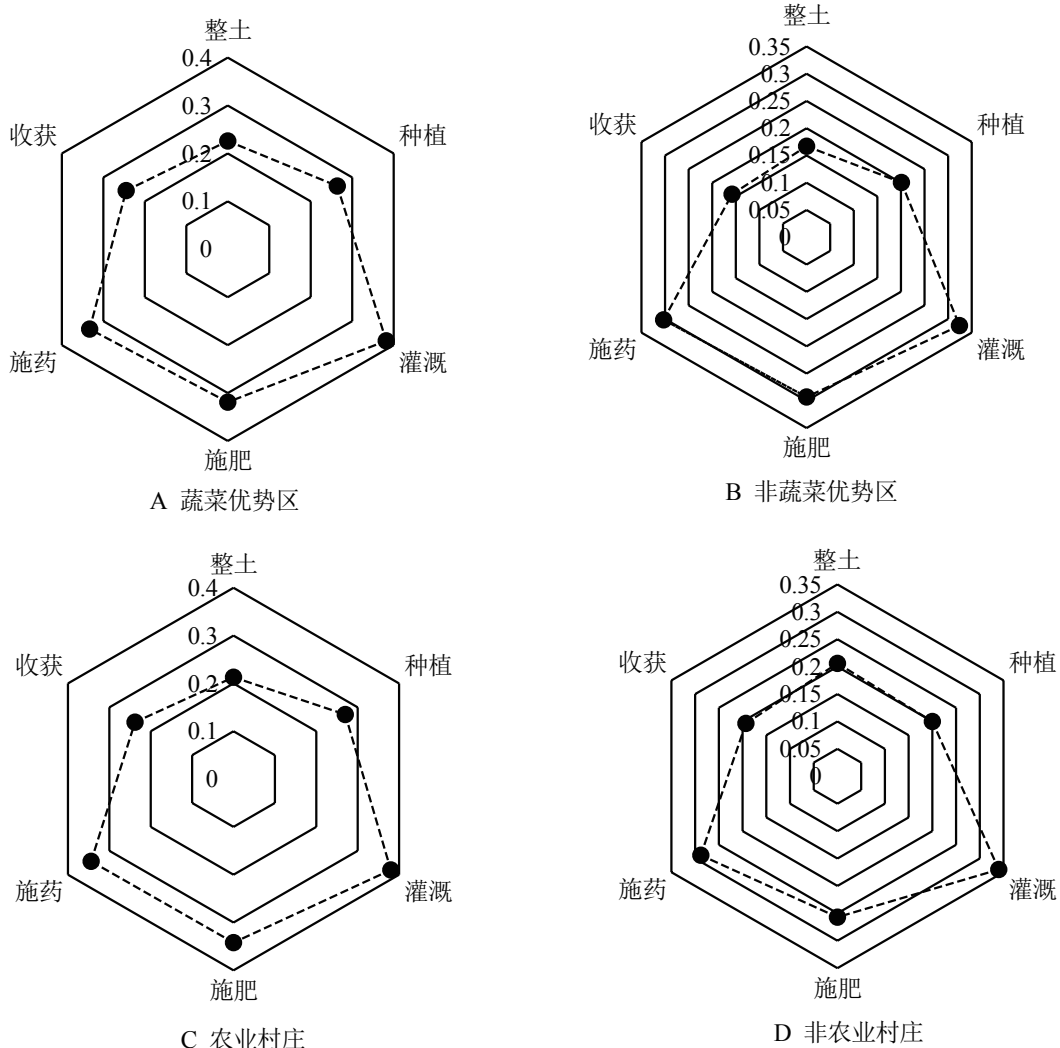


图 2 农业生产数字化过程雷达图

Fig. 2 Radar chart of the digitalization process in agricultural production

进农业生产数字化过程中，地方政府更偏好建设农业大数据平台，以期为农业数据的收集、分析和共享赋能农业生产，但数据孤岛现象、平台功能不完善等问题又限制其作用发挥。在解析农业生产数字化发展水平的基础上，本文进一步采用 fsQCA 解构我国农业生产数字化的不同实现路径。

3.2 必要条件分析

在组态分析前，需进行必要条件分析。结果发现，所有条件变量一致性均小于 0.9，不构成必要条件，表明单一条件变量对农业生产数字化的解释力度不够。本文将案例阈值设置为 1、一致性阈值设置为 0.8、PRI 值设置为 0.75 进行筛选后，得到复杂解、中间解和简约解。由于中间解的一致率和覆盖率超过复杂解和简约解，因此本文以中间解为主、简约解为辅探究农业生产数字化的实现路径，最终得到 4 类农业生产数字化高水平转型的组态，总体解一致率为 0.818，总体解覆盖率为 0.829，能够解释近 82.9% 的案例数，解释力度较好（表 3）。以上结果表明，农业生产数字化是多个变量共同作用的结果。

3.3 组态结果分析

根据农业生产高水平组态的核心条件及其背后逻辑，本文得出 4 种农业生产数字化高水平转型的实现路径（表 3）。

3.3.1 政府主导路径 C1 组态以财政直接投入、企业资本投入和科研机构投入为核心条件，体现政府与企业、科研机构的协同合作。由于辅助条件不同，可分为政府主导下的政研协同（C1a）和政企合作路径（C1b）两类，共同包含 10 个案例。政府主导

路径，即政府作为主要投资者、决策者和组织者，以行政手段和市场机制相结合方式，推动区域农业生产数字化转型的路径。在该组态下，其推动动因主要是基于国家和地方政策的支持，多由政府部门牵头进行资源整合和规划设计，再与科研机构、农业企业等主体协作推进村庄农业生产数字化进程。该组态典型案例为湖南 Z 市 QY 村，作为数字乡村试点，Z 市以政府财政投资、企业服务供给的方式共建农业大数据平台，并在 QY 村蔬菜生产重点区域安装物联网传感、监测终端、智能云广播等智能设备，动态监测温度、湿度等环境因子，帮助农业经营主体及时对周围环境做出响应，达到优化农业生产、提高蔬菜产量的目的。

在该实现路径下，地方政府多偏好通过建设以可视化农业大数据平台为代表的数字基建的方式推动农业生产从经验依赖到数据驱动。但现阶段该路径存在问题：一是因建设成本问题，地方政府更倾向以农业大数据平台建设的方式赋能农业生产，较少推进农业生产从整地到收获全流程的数字化改造；二是数据平台功能相对单一、数据质量不齐且存在数据孤岛现象，农民可能面临多平台的农业数据查询，困扰其农业生产。

3.3.2 科研院所引领路径 C2 主体以科研院所投入为核心条件、以政策间接倾斜为辅助条件，包含 7 个案例。科研院所引领路径主要是以各级农业科研院所、涉农高校为主体，通过协调自有资金或争取上级财政支持的方式，立足国家战略、科技发展、社会需要和学科前沿探索等多方面需求而研发、示范和推广农业生产数字化技术和设备的实践路径。该

表 3 农业生产数字化发展的组态分析结果

Table 3 Configuration analysis results of digitalization development in agricultural production

条件变量	C1		C2	C3	C4
	C1a	C1b			
财政直接投入	●	●	—	★	—
政策间接倾斜	○	○	○	★	★
企业资本投入	★	●	★	●	★
科研机构投入	●	★	●	★	★
示范推广	★	○	★	○	★
支书社会资本	★	★	★	—	★
村民生产投资	★	★	★	★	●
村民合作参与	—	—	★	○	○
原始覆盖率	0.459	0.569	0.408	0.518	0.357
唯一覆盖率	0.059	0.068	0.007	0.095	0.022
一致率	0.851	0.913	0.933	0.889	0.924
总体解一致率			0.818		
总体解覆盖率			0.829		

注：●表示核心条件，○表示辅助条件，★表示条件缺失，—表示该条件可有可无。

组态典型案例为四川 L 市 RH 村, S 涉农高校在农业部门支持下在 RH 村创建农田示范基地, 2021 年为服务数字农业专业建设, 该高校开展示范基地数字化转型探索, 通过蔬菜生长模型、农田智能管理系统和智能决策平台的研发突破, 以及智能水肥灌溉系统、智能传感器等设备配套, 建成耕、种、管、收全流程精准化、数字化管理的智慧蔬菜基地, 实现农业生产劳作方式和管理模式转换。

但农业科研院所和涉农高校创新研发的农业生产数字化技术和设备更侧重于感知、分析且多属于高精尖领域, 技术原理复杂、研发成本高、购置成本高, 而多数农村地区数字基建落后, 农民技术接受和应用能力有限, 使其科创研究面临成果转化难、推广应用难问题。

3.3.3 企业运作路径 C3 组态以企业资本投入为核心条件、以村民合作参与为辅助条件, 包含 19 个案例。企业运作路径通常有两条推进逻辑: 一是有一定资本的涉农企业, 直接与农业经营主体合作将数字技术、设备融入农业生产环节以实现传统要素效益倍增; 二是涉农企业通过技术创新、改造和推广等举措, 为农业部门和农业经营主体提供农业生产数字化技术、设备和服务。该路径典型案例为江苏 S 市 BL 村, S 农科企业通过“企业+合作社+农户”的合作模式建成 86.67 hm² 蔬菜基地, 运用物联网技术, 配套智能灌溉、施肥、通风、温湿度探测、无人农机等系统和设备, 实现蔬菜生产全程智能化, 智能农场节约人力成本 40%、减少农药施用 30%、减少化肥浪费 50%、增产 8%, 村民则通过基地务工、土地流转、入股分红、技术培训等方式, 实现农户与企业的合作共赢。

综上, 该路径具有较强的盈利特征, 且企业多研发和应用操作简便、成本更低的数字技术和设备, 因此技术和设备供需间的适配度较高, 同时该路径能够有效解决小农户生产融入大产业、对接大市场的问题, 促进农民增收, 而这也是当前推进农业生产数字化较为理想的路径。

3.3.4 农户自发路径 C4 组态以村民生产投资为核心条件、以村民合作参与为辅助条件, 包含 7 个案例。农户自发路径表现为有一定经营规模和开拓意识的农户, 利用自有资金、村民入股资金和涉农项目资金, 以自主经营、共建共管等方式自觉推进农业生产数字化。观察该组态案例发现, 对应案例均属东部和东北地区, 该路径多起源于村内先发农户获益后, 为后发农户提供示范作用, 促使后者探寻适宜的新技术和设备。组态代表案例为辽宁 J 县 ZT 村,

村内合作社引入无人机喷施、水肥一体化设备、拖拉机北斗导航及自动驾驶技术实现智能种管, 大田蔬菜作业降本增效成果显著, 促使村内有条件农户引入无人机开展飞防作业。

相较于其他三种路径, 农户自发路径多属于当地农户基于自身条件和需求的主动实践, 通过农户的农业生产活动, 小范围经济适用的数字化技术和设备得以快速应用。但农户应用数字技术和设备的规模相对较小, 且多数农民数字素养较低、资本有限, 致使该路径的示范带动作用发挥有限。

3.4 实现路径组态比较分析

从组态比较分析看, 农业生产数字化可依靠政府主导下的财政倾斜来统筹, 也可以是科创主体引领下的创新实践去实现, 更可以是村民主动下的自主投资来推进, 或多主体之间相嵌互作来探索。也即我国农业生产数字化是实现路径多元化的数字化, 而这是由不同地区资源禀赋显著差异、参与主体及其共生关系多元化所决定的。

基于实现路径对应案例的解析来看, 4 类农业生产数字化实现路径中的任意一类均无法实现既同时满足差异化的转型需求, 又保证所有农户的合作参与机会。其中, 政府主导路径侧重以农业数据平台建设来提供公共服务的形式满足多数农户农业生产数字化的共性需求; 农户自发路径则仅是一部分有一定经营规模和资本积累的种植大户主动投资的自我服务来满足自身的个性化转型需求; 而科研院所引领路径和企业运作路径则多是基于利益共同体内部的定向服务来解决具有差异化的产业需求问题。但正因上述异质性, 不同农业生产数字化实现路径的定位和功能才具有互补性, 可在协同推进过程中通过各自功能和覆盖面的叠加来建构多层次的农业生产数字化架构体系, 从而促进农户的普遍参与, 满足差异化的农业生产数字化需求。

3.5 稳健性检验

参考已有研究^[33], 本文采用调整一致性阈值的方法进行稳健性检验。在操作阶段, 将一致性阈值从 0.75 提高至 0.80、0.85 后再次进行组态分析, 产生的组态(表 4)与现有组态(表 3)完全一致, 总体解的一致率和覆盖率与原计算结果相同, 表明原分析结果稳健可靠。

4 结论与建议

4.1 结论

1) 总体层面, 我国农业生产数字化处于爬坡起步阶段, 发展水平尚不高且基于区域划分、省份

表 4 稳健性检验
Table 4 Robustness test

条件变量	C1		C2	C3	C4
	C1a	C1b			
财政直接投入	●	●	—	★	—
政策间接倾斜	○	○	○	★	★
企业资本投入	★	●	★	●	★
科研机构投入	●	★	●	★	★
示范推广	★	○	★	○	★
支书社会资本	★	★	★	—	★
村民生产投资	★	★	★	★	●
村民合作参与	—	—	★	○	○
原始覆盖率	0.459	0.569	0.408	0.518	0.357
唯一覆盖率	0.059	0.068	0.007	0.095	0.022
一致率	0.851	0.913	0.933	0.889	0.924
总体解一致率			0.818		
总体解覆盖率			0.829		

比较等视阈呈现多维特征。细化层面，在发展基础上，我国推进农业生产数字化有一定技术、设备和基建支撑，但发展根基仍待夯实，特别是地形复杂、耕地破碎的西部地区；在过程体现上，我国农业生产数字化主要集中在灌溉、施肥和施药环节；在作用结果上，推进农业生产数字化在一定程度上能够实现生产效率提升、生产绿色转型和经营主体增收。

2) 农业生产数字化的实现路径有 4 类：以数字基建配套赋能农业生产数字化的政府主导路径；以高精尖技术和设备叠加实现农业生产单一或多环节数字化的科研院所引领路径；以小范围经济适用技术和设备采用的农户自发路径；以操作简便、成本更低的成熟数字技术和设备应用的企业运作路径，而这也是目前推进农业生产数字化较为理想的路径。

3) 不同农业生产数字化实现路径的定位和功能具有互补性，能在协同推进过程中通过各自覆盖面和功能的叠加构建多层次的农业生产数字化架构体系，解决异质性的农业生产数字化需求，促进农户的普遍参与，且不需要每个农户都熟练掌握相应的数字技术、配备完善的数字设备。

4.2 建议

基于上述结论，为进一步推动农业生产数字化提出以下建议：

1) 加大政府扶持力度。地方政府应补齐数字基建体系弱项，引导通信运营商在农村地区合理布局小型基站和宽带网络，为数字技术和设备进村创造条件；应推进农业生产数字化标准建设，设定统一的技术标准，形成基础的元数据，进而为生产数据的收集、整理、分析和应用奠定前提条件；要完

善智能农机购置和数字农业发展补贴政策，降低企业、农户等主体的农业生产数字化转型成本。

2) 发挥科创主体作用。企业、科研院所等科创主体应立足农村实际和场景应用需求，加大普适性强的作物生长模型、农业数据收集与处理、智能农机等数字技术和设备的攻关研发和成果转化。同时，科创主体在自身成功实践基础上，应对外积极开展技术培训、经验交流等推广活动，通过示范引领带动更多后发主体参与农业生产数字化。

3) 促进小农户与现代农业有机衔接。一方面，要通过专家讲座、企业培训服务、农机推广体系和在线学习平台等方式，着力提高小农户的数字素养和数字技能；另一方面，要重视小农户对农业生产数字化技术和设备的异质性需求，完善以小农户为主体的农业生产数字化咨询和技术推广服务，提高小农户对现代农业技术和设备的采纳意愿。

参考文献：

[1] 许秀川,王浩力.数智化推动形成农业新质生产力:科学内涵、理论逻辑和实现路径[J].当代金融研究,2024,7(6):1-14.
XU X C, WANG H L. Mathematical intelligence promotes the formation of new agricultural productivity: scientific connotation, theoretical logic and realization path[J]. Journal of Contemporary Financial Research, 2024, 7(6): 1-14.

[2] 徐宏潇.农业数字化转型:理论内涵、现实驱动与政策建议[J].深圳社会科学,2024,7(5):36-44.
XU H X. Digital transformation of agriculture: theoretical connotation reality driven and optimization suggestions[J]. Social Sciences in Shenzhen, 2024, 7(5): 36-44.

[3] 刘晓倩,李玲,孙小龙.科技创新对农业高质量发展的影响及区域差异[J].江苏农业学报,2024,40(6):1129-1141.
LIU X Q, LI L, SUN X L. Impact of scientific and technological innovation on the high-quality development of agriculture and its regional differences[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences,

- 2024, 40(6): 1129-1141.
- [4] 李盛竹, 薛枫, 姜金贵. 农业数字化对中国粮食新质生产力的影响效应研究[J]. 农林经济管理学报, 2024, 23(4): 435-445.
LI S Z, XUE F, JIANG J G. Effect of agricultural digitization on new productive forces of food in China[J]. Journal of Agro-Forestry Economics and Management, 2024, 23(4): 435-445.
- [5] 彭傲天, 安鑫丽, 张良悦. 中国农业数字化转型发展的的问题与出路[J]. 区域经济评论, 2023(4): 91-99.
PENG A T, AN X L, ZHANG L Y. The problems and pathways of digital transformation of China's agriculture[J]. Regional Economic Review, 2023(4): 91-99.
- [6] 黄季焜, 苏岚岚, 王悦. 数字技术促进农业农村发展: 机遇、挑战和推进思路[J]. 中国农村经济, 2024(1): 21-40.
HUANG J K, SU L L, WANG Y. Digital technologies facilitate agricultural and rural development: opportunities, challenges, and future directions[J]. Chinese Rural Economy, 2024(1): 21-40.
- [7] 曹冰雪, 李瑾, 冯献, 等. 我国智慧农业的发展现状、路径与对策建议[J]. 农业现代化研究, 2021, 42(5): 785-794.
CAO B X, LI J, FENG X, et al. Development status, path, and countermeasures of smart agriculture in China[J]. Research of Agricultural Modernization, 2021, 42(5): 785-794.
- [8] 邱俊柯, 张哲, 尹奇. 乡村振兴背景下农业数字化: 发展现状、影响因素与提升路径[J]. 西南农业学报, 2024, 37(9): 1907-1914.
QIU J K, ZHANG Z, YIN Q. Agricultural digitalization under background of rural revitalization: development status, influencing factors and upgrading paths[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2024, 37(9): 1907-1914.
- [9] 蒋永穆, 赖珩瑗. 中国式农业现代化道路: 内在逻辑、重要共识与未来展望[J]. 当代经济研究, 2024(9): 5-15.
JIANG Y M, LAI H Y. The Chinese path to agricultural modernization: internal logic, important consensus and future prospects[J]. Contemporary Economic Research, 2024(9): 5-15.
- [10] 黄梦姣, 付占辉, 乔家君, 等. 传统农区乡村老弱化与农业现代化时空耦合格局分析: 以河南省为例[J]. 农业现代化研究, 2024, 45(4): 591-600.
HUANG M J, FU Z H, QIAO J J, et al. Analysis of coupling development pattern between rural aging and agricultural modernization in traditional agricultural areas: a case study of Henan Province[J]. Research of Agricultural Modernization, 2024, 45(4): 591-600.
- [11] 陈江, 熊礼贵. 数字农业内涵、作用机理、挑战与推进路径研究[J]. 西南金融, 2022(10): 92-102.
CHEN J, XIONG L G. Research on the connotation, function mechanism, challenge and promotion path of digital agriculture[J]. Southwest Finance, 2022(10): 92-102.
- [12] 刘长全. 关于智慧农业的理论思考: 发展模式、潜在问题与推进策略[J]. 经济纵横, 2023(8): 63-70.
LIU C Q. Theoretical thinking on smart agriculture: development modes, potential problems, and promotion measures[J]. Economic Review Journal, 2023(8): 63-70.
- [13] 张益, 宋洪远. 智慧农业赋能乡村振兴: 传导机制、关键问题与路径优化[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(3): 1-9.
ZHANG Y, SONG H Y. Smart agriculture empowers rural revitalization: transmission mechanisms, key issues and path optimization[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(3): 1-9.
- [14] 欧定余, 廖纤. 智慧农业发展水平测度及驱动力比较: 基于产业融合的视角[J]. 湘潭大学学报(哲学社会科学版), 2024, 48(2): 62-68.
OU D Y, LIAO Q. Measurement of smart agriculture development level and comparison of its driving forces: based on the perspective of industrial integration[J]. Journal of Xiangtan University (Philosophy and Social Sciences), 2024, 48(2): 62-68.
- [15] 刘战伟. 数字农业发展水平、区域差异及时空演变特征研究[J]. 统计与决策, 2023, 39(20): 94-99.
LIU Z W. Study on digital agriculture development level, regional differences and spatiotemporal evolution characteristics[J]. Statistics & Decision, 2023, 39(20): 94-99.
- [16] 陈雨晴, 祝文琪, 刘海明, 等. 数字农业农村发展水平的测度与评价: 以山东省淄博市为例[J]. 西南农业学报, 2024, 37(9): 1959-1966.
CHEN Y Q, ZHU W Q, LIU H M, et al. Measurement and evaluation of digital agriculture and rural development level: taking Zibo city of Shandong province as an example[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2024, 37(9): 1959-1966.
- [17] 周恩宇, 赵浪. 中国数字农业发展的区域差异、时空特征与驱动因素识别[J]. 四川农业大学学报, 2024, 42(1): 215-223.
ZHOU E Y, ZHAO L. Identification of regional differences, spatial and temporal characteristics, and drivers of digital agriculture development in China[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2024, 42(1): 215-223.
- [18] 张耀一. 数字农业高质量发展的国际经验及其启示[J]. 技术经济与管理研究, 2022(10): 93-98.
ZHANG Y Y. International experience of high quality development of digital agriculture and its enlightenment[J]. Journal of Technical Economics & Management, 2022(10): 93-98.
- [19] 易加斌, 李霄, 杨小平, 等. 创新生态系统理论视角下的农业数字化转型: 驱动因素、战略框架与实施路径[J]. 农业经济问题, 2021, 42(7): 101-116.
YI J B, LI X, YANG X P, et al. Agricultural digital transformation from the perspective of innovation ecosystem theory: driving factors, strategic framework and realization path[J]. Issues in Agricultural Economy, 2021, 42(7): 101-116.
- [20] 刘彦随, 张紫雯, 王介勇. 中国农业地域分异与现代农业区划方案[J]. 地理学报, 2018, 73(2): 203-218.
LIU Y S, ZHANG Z W, WANG J Y. Regional differentiation and comprehensive regionalization scheme of modern agriculture in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(2): 203-218.
- [21] 覃成林, 张震, 贾善铭. 东部地区率先发展战略: 变迁、成效与新构想[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2020, 20(4): 58-71.
QIN C L, ZHANG Z, JIA S M. Pioneering development strategy of the eastern region: change, effect and new concept[J]. Journal of Beijing University of Technology (Social Sciences Edition), 2020, 20(4): 58-71.
- [22] 赵丹玉, 崔建军. 中国农业农村高质量发展的时空特征、区域差异及影响因素[J]. 华中农业大学学报(社会科学版),

- 2024(3): 10-24.
- ZHAO D Y, CUI J J. The spatial-temporal characteristics, regional disparities, and influencing factors of high-quality agricultural and rural development in China[J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2024(3): 10-24.
- [23] 徐凤增, 裴威, 徐月华. 乡村走向共同富裕过程中的治理机制及其作用: 一项双案例研究 [J]. 管理世界, 2021, 37(12): 134-151, 196, 152.
- XU F Z, XI W, XU Y H. Governance mechanisms and their roles in facilitating Chinese rural areas' common prosperity: a case study of two villages[J]. Journal of Management World, 2021, 37(12): 134-151, 196, 152.
- [24] 冷功业, 吴子远. 山东省农业数字化转型水平测度与政策建议 [J]. 聊城大学学报 (社会科学版), 2023(6): 68-78.
- LENG G Y, WU Z Y. The measurement and policy suggestions of agricultural digital transformation level in Shandong Province[J]. Journal of Liaocheng University (Social Science Edition), 2023(6): 68-78.
- [25] 殷浩栋, 霍鹏, 肖荣美, 等. 智慧农业发展的底层逻辑、现实约束与突破路径 [J]. 改革, 2021(11): 95-103.
- YIN H D, HUO P, XIAO R M, et al. The underlying logic, practical constraints and breakthrough path of the development of smart agriculture[J]. Reform, 2021(11): 95-103.
- [26] 曲延春. 四维框架下的“多元协作供给”: 农村公共产品供给模式创新研究 [J]. 理论探讨, 2014(4): 164-167.
- QU Y C. “Multi-cooperative supply” under the four-dimensional framework: research on the innovation of rural public goods supply mode[J]. Theoretical Investigation, 2014(4): 164-167.
- [27] 王薇, 王欣彤, 戴姣. 农业高质量发展: 迈向数字化转型: 基于阳西县数字农业的考察研究 [J]. 西南金融, 2023(5): 59-69.
- WANG W, WANG X T, DAI J. High-quality agricultural development: towards digital transformation: research based on digital agriculture in Yangxi County[J]. Southwest Finance, 2023(5): 59-69.
- [28] 蔡雪雄, 王明澈. 地方财政制度改革对乡村产业振兴的影响研究 [J]. 经济问题, 2023(5): 87-94.
- CAI X X, WANG M W. Research on the influence of local fiscal system reform on rural industry revitalization[J]. On Economic Problems, 2023(5): 87-94.
- [29] 陈文琼. 富人治村与不完整乡镇政权的自我削弱?: 项目进村背景下华北平原村级治理重构的经验启示 [J]. 中国农村观察, 2020(1): 29-43.
- CHEN W Q. Village governance by the rich and the self-weakening of incomplete township regime: an empirical analysis based on field investigation in the North China Plain[J]. China Rural Survey, 2020(1): 29-43.
- [30] 李立清, 丁海峰, 李燕凌. 乡村振兴背景下县域农业数字化转型的关键要素与持续路径: 基于30个案例的模糊集定性比较分析 [J]. 电子政务, 2023(3): 60-72.
- LI L Q, DING H F, LI Y L. Key elements and sustainable path of digital transformation of county agriculture under the background of rural revitalization: a qualitative comparative analysis of fuzzy sets based on 30 cases[J]. E-Government, 2023(3): 60-72.
- [31] 曾艳, 周宝亮, 郝柯锦, 等. 农民专业合作社盈利能力的影响因素及提升路径 [J]. 西北农林科技大学学报 (社会科学版), 2021, 21(3): 64-73.
- ZENG Y, ZHOU B L, HAO K J, et al. Factors influencing the profitability of farmers' specialized cooperatives and ways of improvement[J]. Journal of Northwest A&F University (Social Science Edition), 2021, 21(3): 64-73.
- [32] 黄庆龙, 陈美球, 张馥林, 等. 基于IMB干预模型农户低碳稻作采纳行为研究: 以江西省2173份农户调查为例 [J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(12): 2661-2672.
- HUANG Q L, CHEN M Q, ZHANG F L, et al. Research on low carbon rice farming behavior based on IMB intervention model: a survey of 2173 farmers in Jiangxi Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(12): 2661-2672.
- [33] 王薇, 刘昕. 数字乡村建设驱动脱贫地区经济发展路径研究: 以25个国家级脱贫县为例 [J]. 农业现代化研究, 2024, 45(5): 838-849.
- WANG W, LIU X. Study on the driving path of digital village construction on the economic development of poverty alleviated areas: taking 25 national poverty alleviated counties as an example[J]. Research of Agricultural Modernization, 2024, 45(5): 838-849.

(责任编辑: 王育花)