钱昭英，魏基超. 农业数字化对我国粮食体系韧性的影响——基于我国粮食主产区的实证研究［J］. 山西农业大学学报（社会科学版），2025，24（2）：48-59.
QIAN Zhaoying，WEI Jichao. The impact of agricultural digitization on the resilience of China's grain system——based on the empirical study of major grain-producing areas in China［J］. Journal of Shanxi Agricultural University（Social Science Edition），2025，24（2）：48-59.
DOI：10.13842/j.cnki.issn1671-816X.2025.02.006

农业数字化对我国粮食体系韧性的影响
——基于我国粮食主产区的实证研究

钱昭英[1]，魏基超[2]
（1.贵州财经大学 经济学院，贵州 贵阳 550025；2.贵州财经大学 管理科学与工程学院，贵州 贵阳 550025）

摘 要：提升粮食体系韧性水平对保障国家粮食安全具有重要意义。本研究基于2011—2022年我国13个粮食主产区的面板数据，在理论分析的基础上，运用固定效应模型、调节效应模型、门槛效应模型分析了农业数字化对我国粮食主产区粮食体系韧性的影响及其作用机制。结果表明：农业数字化对我国粮食主产区粮食体系韧性具有显著的正向影响；异质性分析结果显示，农业数字化对南方主产区和非粮食净调出省的粮食体系韧性有着更为显著的正向影响；调节效应分析结果显示，财政支农水平在农业数字化影响我国粮食主产区粮食体系韧性中具有正向调节作用，并且对北方主产区的调节作用更为显著；门槛效应分析结果显示，财政支农水平在农业数字化影响我国粮食主产区粮食体系韧性中的正向调节作用存在门槛效应。据此，提出以下政策建议：加快粮食主产区农业数字化技术的推广和应用；发挥好南方主产区农业数字化先进地区的示范作用；根据南北方主产区的异质性特征，制定差异化农业数字化策略。

关键词：农业数字化；粮食体系韧性；调节效应；门槛效应
中图分类号：S—9 **文献标识码：**A 文章编号：1671-816X（2025）02-0048-12

一、研究背景及文献综述

“国以民为本，民以食为天”，党和政府高度重视粮食安全。2024年中央一号文件提出，确保国家粮食安全，抓好粮食和重要农产品生产。现阶段，虽然我国粮食总产量连续9年稳定在1.3万亿斤以上，但是仍面临许多问题：农业基础设施薄弱，应对自然灾害能力不足；城市化进程不断加快，粮食生产用地受到威胁；农村人口老龄化严重，劳动力日益减少；小农经营模式占主导地位，农药、化肥等生产要素价格不断上升，粮食生产收益低，农户产生分化，部分土地撂荒，或为获得更高收益放弃粮食生产种植经济作物等。基于上述问题，不能仅仅通过增加粮食产量来保障我国粮食安全，还应不断增强粮食体系的韧性，使我国粮食系统能够迅速适应并有效应对粮食生产中出现的各种问题。因此，提升我国粮食体系韧性对保障我国粮食安全、粮食体系转型具有重要意义。在当下数字经济时代，农业数字化正在蓬勃发展，通过农业要素数字化和农业模型数字化实现智能化的生产决策[1]，能够减少粮食生产过程中人力和物力的浪费，增加农民的收入和效益。此外，农业数字化可以实现农业的精准化管理[2]，通过对粮食作物生长环境、生长过程的精确调控，可以有效提高粮食作物的品质和产量，提升粮食生产、经营以及管理服务水平，推动现代粮食生产网络化、精细化、智能化。由此可见，农业数字化对粮食体系韧性的提升具有

收稿日期：2024-08-21 **修回日期：**2024-10-20
基金项目：2022年度贵州省哲学社会科学规划课题“数字赋能贵州农产品流通体系高质量发展的理论逻辑及实现路径研究”（22GZYB19）
作者简介：钱昭英，研究方向：农业经济。

一定的作用，理清农业数字化转型与粮食体系韧性之间的关系尤为重要。

目前，关于农业数字化和粮食体系韧性的研究已有一定研究成果。在农业数字化方面，现有研究主要分为两类，一类是对我国农业数字化水平进行测度[3-5]，另一类是对我国农业数字化的内涵解读、面临困难及提升路径进行探讨[2，6-7]。此外，还有文献就农业数字化对农民的增收效应[8]、农业数字化对粮食安全的影响[9]、农业数字化对粮食新质生产力的影响[10]进行了研究。在粮食体系韧性方面，现有研究主要聚焦于粮食体系韧性的定义、测度和影响因素分析。就粮食体系韧性定义，联合国粮农组织[11]、Béné[12]对粮食体系韧性的定义进行了阐述；就粮食体系韧性的测度方面，郝爱民等[13]、左秀平等[14]、郑家喜等[15]构建了粮食体系韧性综合评价指标体系，对我国粮食体系韧性进行了测度；就粮食体系韧性的影响因素方面，主要从数字乡村建设[13]、数字金融[16]等因素进行研究，蒋辉等[17]运用因子探测和交互探测分析了各种因素对中国粮食生产韧性的影响。

综上所述，现有研究对农业数字化和粮食体系韧性已经有了一定的探讨，但是现有文献暂无将农业数字化和粮食体系韧性置于统一分析框架来探讨农业数字化对粮食体系韧性的影响与机制，就粮食体系韧性的大部分研究集中于全国层面的宏观探讨及影响效应研究，较少研究深入分析影响机制。2003年财政部发布《关于改革和完善农业综合开发若干政策措施的意见》，划定了13个粮食主产区；2024年6月1日正式实施的《中华人民共和国粮食安全保障法》也指出粮食主产区应当不断提高粮食综合生产能力。基于以上背景，相关粮食扶持政策和资金也向主产区倾斜；同时，粮食主产区是我国粮食生产的核心区，提升粮食主产区的粮食体系韧性对保障国家粮食安全具有重要意义。故本研究以粮食主产区为研究对象，利用固定效应模型、调节效应模型、门槛效应模型深入研究农业数字化对我国粮食主产区粮食体系韧性的影响及其作用机制，以期为我国粮食主产区粮食体系韧性的提升提供理论与现实指导。该研究可能的贡献在于：将农业数字化与粮食体系韧性置于统一框架并以我国粮食主产区作为研究对象进行分析，弥补了这一领域的研究空白。第二，从实证层面验证了财政支农水平在农业数字化影响我国粮食主产区粮食体系韧性中的作用机制，并分析了其作用机制的异质性特征，进一步厘清了农业数字化对我国粮食主产区粮食体系韧性的作用机制及其异质性特征。第三，从实证层面验证了财政支农水平在农业数字化影响我国粮食主产区粮食体系韧性中调节作用的非线性特征，丰富了研究成果。

二、理论分析与研究假设

（一）农业数字化对我国粮食体系韧性的影响

基于现有研究，从风险抵抗能力、适应调整能力、创新转型能力衡量一个地区的粮食体系韧性水平。基于农业数字化技术在粮食生产中的应用，农业数字化可通过以下方式提升粮食体系韧性（见图1）。

首先，农业数字化能够培育数字农业科技产品和服务[18]，以对粮食生产全过程质量进行追溯，并利用农业物联网对粮食生产流程进行优化，实现对粮食生产的集约化管理[1]；农业数字化技术能够对粮食生产的各个环节进行数据采集、分析和决策支持，实现对粮食生产过程的精细化管理和优化配置[19]，为粮食生产决策提供更精准的参考，从而减少因农民认知能力不足造成的损失，提高粮食的产量和质量，同时粮食生产的机械化和智能化也减少了农民体力劳动和时间的投入，从而提高农民种粮的积极性，增加粮食种植面积。

其次，农业数字化推动了粮食的绿色化生产，使农户在粮食种植过程中能够更加科学地使用农药化肥，减少了部分农户过量使用化肥农药造成的土壤板结和碳排放的增加，推进了粮食生产的投入品减量化、生产清洁化和废弃物资源化[13]；农业数字化能够借助卫星设备精准监测土地、大气、化肥农药残留等生态因素[20]，有效保证粮食生产全过程的绿色化，从而增强土地的适应调整能力，促进环境保护，提高粮食生产的可持续发展能力。

最后，农业数字化可以通过技术创新，开发出更加先进、高效的农业生产技术和装备[19]，促

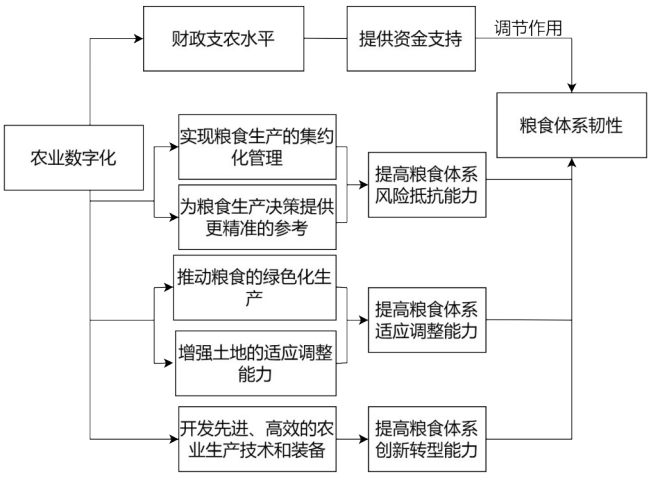


图 1　农业数字化对粮食体系韧性影响的机理分析

进农业基础设施改造，减轻自然灾害冲击对粮食体系的影响。

基于以上分析，提出如下假说：

假说 1：农业数字化对我国粮食体系韧性的提升具有正向影响。

（二）财政支农水平的调节效应分析

财政支农水平能够影响农业数字化水平和粮食生产。第一，政府财政支出为农业数字化所需的设备和农业数字化技术的推广提供资金支持。第二，政府财政支出能够推动农业基础设施的建设，为粮食生产提供良好条件。第三，政府财政支出能够为种粮农民提供补贴，增加农民种粮的收益，提高农民种粮的积极性[21]。第四，充裕的财政支持会吸引更多的投资者进入粮食产业，从而提高粮食生产效率[22]。基于此，提出如下假说：

假说 2：财政支农水平在农业数字化影响我国粮食体系韧性中具有正向调节作用。

（三）地理位置对财政支农水平调节效应的异质性影响

我国经济发展存在区域间发展不平衡，财政支农的影响在一定的条件下才能够实现和深化[22]。与北方主产区相比，南方主产区经济发达、农业数字化基础设施相对完善，粮食生产的数字化水平高，财政支农资金对农业数字化水平提升的边际效益递减，可能会使得南方主产区财政支农水平在农业数字化影响粮食体系韧性中的正向调节作用不太显著。基于此，提出如下假说：

假说 3：较南方主产区，北方主产区财政支农水平对农业数字化影响粮食体系韧性的正向调节作用更强。

（四）财政支农水平门槛效应分析

随着财政支农强度的提高，其作用效果可能呈现边际效应递增的非线性特征[22]。当财政支农水平较低时，农业数字化处于初期阶段或起步期，农业数字化的基础设施不完善，数字化设备也较少，技术的推广与研发也缺乏资金支持，前期的投入消耗一定的资源，但对农业数字化水平提升的影响可能并不显著[9]，从而对粮食体系韧性提升的边际效益可能较低；当财政支农水平达到一定程度后，农业数字化配套的基础设施、设备得到完善，技术的研发和推广得到资金保障，农业数字化水平显著提升并得以发挥其最大化效用，从而对粮食体系韧性提升的边际效益显著提高。基于此，提出如下假说：

假说 4：财政支农水平在农业数字化影响我国粮食体系韧性中的调节作用存在门槛效应。

三、模型设定、变量选取与数据来源

（一）模型设定

1. 基准回归模型

为研究农业数字化对我国粮食主产区粮食体系韧性的影响，构建如下基准回归模型：

$$RFS_{it}=\beta_0+\beta_1 Dig_{it}+\beta_2 controls_{it}+\mu_i+\delta_t+\varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中，RFS 表示被解释变量粮食体系韧性，Dig 表示核心解释变量农业数字化，$controls$ 表示控制

变量，i表示省份，t表示年份，β_0表示常数项，μ_i为省份固定效应，δ_t为年份固定效应，ε_{it}为随机误差项；β_0、β_1和β_2为待估计参数。

2. 调节效应模型

为研究在农业数字化对我国粮食主产区粮食体系韧性的影响中，财政支农水平的调节效应，构建如下模型：

$$RFS_{it}=\alpha_0+\alpha_1 Dig_{it}+\alpha_2 Dig_{it}\times Fin_{it}+\alpha_3 Fin_{it}+\alpha_4 controls_{it}+\mu_i+\delta_t+\varepsilon_{it} \quad (2)$$

其中，Fin_{it}表示财政支农水平。该研究重点关注的α_2系数代表了财政支农水平的调节效应。

3. 门槛效应模型

为研究财政支农水平在农业数字化影响我国粮食主产区粮食体系韧性中的调节作用是否存在非线性特征，把财政支农水平作为门槛变量，构建如下模型：

$$RFS_{it}=\varphi_0+\varphi_1 Dig_{it}\times I(Fin_{it}\leqslant\theta)+\varphi_2 Dig_{it}\times I(Fin_{it}>\theta)+\varphi_3 controls_{it}+\mu_i+\delta_t+\varepsilon_{it} \quad (3)$$

其中，Fin_{it}表示财政支农水平门槛变量，φ表示对应门槛下的估计系数，θ表示待估计的门槛值，$I(\cdot)$为取值为1或0的指示函数，当括号中表达式满足条件为1，否则为0。

（二）变量选取

1. 被解释变量：粮食体系韧性

基于现有研究对粮食体系韧性的定义[11-12]，结合我国目前所强调的粮食安全主要是保障粮食的产量和质量安全，将粮食体系韧性定义为粮食系统在遭遇外部冲击时的风险抵抗能力，以及在遭受损害后的适应调整能力、创新转型能力，在面对自然灾害、市场波动等外部冲击时，粮食体系需要具备足够的韧性，应对各种挑战和危机，以保障粮食供应的稳定性和安全性。参考李盛竹[10]、郝爱民[13]、左秀平[14]、王妍霏[16]、蔡林军[23]等相关研究成果，建构了风险抵抗能力、适应调整能力、创新转型能力三个维度的粮食体系韧性评价指标体系，包含3个二级指标和15个三级指标（见表1）。其中，风险抵抗能力由粮食播种面积、耕地有效灌溉效率、农村投递里程、单位面积粮食产量、第一产业从业人员数、农村居民人均可支配收入、农村人均第一产业总产值来反映[14, 16, 23]，适应调整能力由复种指数、单位播种面积农药使用量、单位播种面积农膜使用量、成灾率来反映[13-14, 16]，创新转型能力由农林牧渔增加值、单位播种面积农用柴油使用量、农业固定资产投资、农业科技专利数量来反映[10, 16]。运用熵值法对我国13个粮食主产区2011－2022年的粮食体系韧性进行综合测度。

2. 核心解释变量：农业数字化

参考范谨[3]、苏锦旗[4]、刘战伟[5]、刘威[9]、李盛竹[10]、王恒[24]等相关研究成果，从农业数字化基础设施、人才与技术资源、农业数字化经济效益三个维度构建农业数字化发展水平

表1 粮食体系韧性评价指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	单位	权重	指标属性
粮食体系韧性	风险抵抗能力	粮食播种面积	千公顷	0.103	正向
		耕地有效灌溉效率	%	0.063	正向
		农村投递里程	千米	0.098	正向
		单位面积粮食产量	公斤/公顷	0.027	正向
		第一产业从业人员数	万人	0.094	正向
		农村居民人均可支配收入	元	0.067	正向
		农村人均第一产业总产值	元/人	0.079	正向
	适应调整能力	复种指数	%	0.088	正向
		单位播种面积农药使用量	公斤/公顷	0.036	负向
		单位播种面积农膜使用量	公斤/公顷	0.024	负向
		成灾面积/受灾面积	%	0.029	负向
	创新转型能力	农林牧渔增加值	亿元	0.073	正向
		单位播种面积农用柴油使用量	公斤/公顷	0.018	负向
		农业固定资产投资	亿元	0.049	正向
		农业科技专利数量	个	0.152	正向

评价指标体系，建构了3个二级指标、11个三级指标的评价指标体系（见表2），其中，农业数字化基础设施由农村数字网络接入、农业生产信息传播、农业生产环境感知、农业数字化终端普及、农产品电商发展基础、农村光缆覆盖水平来反映[4-5, 9, 24]，人才与技术资源由农村地区数字化人才、农村企业数字化能力来反映[3, 10]，农业数字化经济效益由农业数字化应用水平、农业农村数字基地、农产品数字化交易水平来反映[4-5, 24]。运用熵值法对我国13个粮食主产区2011－2022年农业数字化发展水平进行综合测度。测度步骤如下：

（1）标准化处理。计算公式如下：

$$Z_{ij}=\frac{x_{ij}-\min(x_{ij})}{\max(x_{ij})-\min(x_{ij})} \tag{4}$$

$$Z_{ij}=\frac{\max(x_{ij})-x_{ij}}{\max(x_{ij})-\min(x_{ij})} \tag{5}$$

Z_{ij}为标准化数据，x_{ij}为初始数据，$max(x_{ij})$为指标中最大值，$min(x_{ij})$为指标中最小值。

（2）计算指标权重：

$$P_{ij}=\frac{Z_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}Z_{ij}} \tag{6}$$

$$E_j=-\left(\frac{1}{\ln m}\right)\sum_{i=1}^{m\sum_{ij}}p_{ij}ln \tag{7}$$

$$D_j=1-E_j \tag{8}$$

$$W_j=\frac{D_j}{\sum_{j=1}^{m}D_j} \tag{9}$$

P_{ij}为指标比重，E_j为指标的信息熵，D_j为指标的信息熵，W_j为指标的权重。

（3）计算综合得分：

$$T=\sum_{j=1}^{m}W_jZ_{ij} \tag{10}$$

3. 控制变量

参考郝爱民[13]、王妍霏[16]等相关研究，选取第一产业增加值占地区生产总值比重、城镇化率、农村公路密度、数字普惠金融指数、农业机械总动力作为控制变量。第一产业增加值占地区生产总值比重用以控制产业结构，该值的提高可能会增强第一产业的风险抵抗能力，进而增强粮食体系韧性；城镇化率用以控制城镇化水平，城镇化水平的改变可能会使得农村人口结构发生变化，进而影响粮食体系韧性；农村公路密度由各省三级公路、四级公路和等外公路里程与省域面积之比计算所得，用以控制农村交通的通达性，农村交通的通达性的改变会使农村经济水平发生变化，进而影响粮食体系韧性；数字普惠金融指数用以控制农村的数字普惠金融发展水平，农业的发展需要大量的资金支持，数字普惠金融的发展可能会影响农业的智能化、科技化水平，进而影响粮食体系韧性；农业机械总动力用以控制农业机械化水平，农业机械化水平的改变可能会影响粮食生产效率，进而影响粮食体系韧性。为缩小数据间量级差距便于分析，将数字普惠金融指数作除以100处理，农业机械总动力作取自然对数处理。

表2 农业数字化评价指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	衡量方式	单位	权重	指标属性
农业数字化	农业数字化基础设施	农村数字网络接入	农村宽带接入用户	万户	0.075	正向
		农业生产信息传播	农村电视节目人口覆盖率	%	0.005	正向
		农业生产环境感知	农业气象观测站	个	0.050	正向
		农业数字化终端普及	移动电话年末用户	万户	0.044	正向
		农产品电商发展基础	邮政营业网点	个	0.058	正向
		农村光缆覆盖水平	光缆线路长度	公里	0.052	正向
	人才与技术资源	农村地区数字化人才	信息传输、软件和信息技术服务业就业人员	万人	0.060	正向
		农村企业数字化能力	信息传输、软件和信息技术服务业法人单位数	个	0.104	正向
			有电子商务交易活动的企业数比重	%	0.034	正向
	农业数字化经济效益	农业数字化应用水平	快递业务量	万件	0.132	正向
			货运量	万吨	0.036	正向
		农业农村数字基地	淘宝村数量	个	0.293	正向
		农产品数字化交易水平	农产品电子商务销售额	亿元	0.057	正向

4. 调节（门槛）变量

研究选取财政支农水平作为门槛（调节）变量。财政支农水平借鉴蒋团标[25]的做法使用农林水事务支出来衡量财政支农水平，为缩小数据间量级差距便于分析，将财政支农水平原始数据除以1000量化处理。

（三）数据来源

选取我国13个粮食主产区2011—2022年的面板数据作为研究样本，就农业数字化对我国粮食主产区粮食体系韧性的影响进行分析。数据主要来源于国家统计局官网、《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国人口和就业统计年鉴》、阿里巴巴研究院和中国知网专利数据库，以及《北京大学数字普惠金融指数》，少量缺失数据利用插值法补齐。

表3为各变量的描述性统计。从表中可以看出，各变量的标准差均小于均值，说明数据均具有较好的稳定性，无极端值；各变量的VIF值均小于10，说明各变量之间不存在多重共线性问题。

表3 变量的描述性统计

变量类型	变量名称	样本量	均值	标准差	最小值	最大值	VIF
被解释变量	粮食体系韧性	156	0.371	0.125	0.142	0.683	
解释变量	农业数字化	156	0.207	0.173	0.019	0.856	3.66
控制变量	第一产业增加值占地区生产总值比重	156	0.104	0.038	0.009	0.251	1.97
	城镇化率	156	0.581	0.077	0.405	0.744	2.63
	农村公路密度	156	0.886	0.415	0.119	1.626	2.72
	数字普惠金融指数	156	2.385	1.049	0.245	4.241	3.55
	农业机械总动力	156	8.542	0.494	7.608	9.499	2.24
调节（门槛）变量	财政支农水平	156	0.725	0.253	0.256	1.359	3.77

四、结果与分析

（一）基准回归分析

研究使用OLS模型和双向固定效应模型来探究农业数字化对我国粮食主产区粮食体系韧性的影响，回归结果如表4所示。模型（1）仅控制核心解释变量农业数字化，未添加任何控制变量，结果表明农业数字化对我国粮食主产区粮食体系韧性的影响在1%水平上显著为正。模型（2）在模型（1）的基础上加入了相关控制变量，模型（3）进一步对年份和省份进行控制以消除其他因素对模型结果的影响。从三个模型的回归结果可以发现，农业数字化的系数始终显著为正并逐渐下降，R^2逐渐增加，说明遗漏变量、省份和年份所造成的影响得到了有效控制。因此，由模型（3）回归结果可知，农业数字化对我国粮食主产区粮食体系韧性影响的估计系数为0.153，并在1%的水平上显著，这表明农业数字化能够显著提升我国粮食主产区的粮食体系韧性。

（二）稳健性检验

为了检验模型的稳健性，研究进一步采取选择Tobit模型重新回归、替换核心解释变量、缩尾处理、滞后一期核心解释变量进行稳健性检验，检验结果如表5所示。

1. Tobit模型重新回归

由于测度的被解释变量粮食体系韧性的取值均在0—1之间，符合受限因变量模型条件，故使用随机效应Tobit模型重新回归进行稳健性检验，回归结果如表5列（1）所示，与基准回归结果一致。

2. 替换核心解释变量

由于农业数字化离不开农村宽带的普及，农村宽带的普及将推动农业的数字化，故采用农村宽带普及率替换核心解释变量农业数字化，回归结果如表5列（2）所示，农村宽带普及率的估计系数依然显著为正，符合基准回归结论。

3. 缩尾处理

由于极端值可能会使模型的回归结果有一定偏差，因此将所有变量进行1%缩尾处理，回归结果如表5列（3）所示，农业数字化的估计系数依然显著为正，符合基准回归结论。

4. 滞后一期核心解释变量

由于农业数字化对我国粮食主产区粮食体系韧性的影响可能具有一定的滞后性，故将核心解

表4 农业数字化对我国粮食主产区粮食体系韧性影响的回归结果

	模型（1）	模型（2）	模型（3）
农业数字化	0.555***	0.425***	0.153***
	（0.039）	（0.052）	（0.052）
第一产业增加值占地区生产总值比重		0.614***	0.193
		（0.115）	（0.123）
城镇化率		0.039	0.049
		（0.105）	（0.335）
农村公路密度		0.091***	−0.038
		（0.016）	（0.043）
数字普惠金融指数		−0.003	−0.031
		（0.006）	（0.064）
农业机械化总动力		0.084***	0.011
		（0.012）	（0.016）
常数项	0.256***	−0.595***	0.155
	（0.010）	（0.122）	（0.180）
年份固定效应	NO	NO	YES
省份固定效应	NO	NO	YES
N	156	156	156
R^2	0.591	0.833	0.862

注：*、**和***分别表示10%、5%和1%的显著性水平；括号内为稳健标准误，下同

释变量农业数字化滞后一期后进行再回归，回归结果如表5列（4）所示，农业数字化的估计系数依然显著为正，符合基准回归结论。

表5 稳健性检验结果

	（1） Tobit模型	（2） 替换核心解释变量	（3） 缩尾处理	（4） 滞后一期核心解释变量
农业数字化	0.185***	0.150**	0.147***	0.146***
	（0.064）	（0.069）	（0.049）	（0.052）
控制变量	已控制	已控制	已控制	已控制
常数项	−0.291	0.499*	0.133	0.101
	（0.355）	（0.298）	（0.185）	（0.264）
样本量	156	156	156	143
R^2		0.848	0.862	0.858

（三）内生性分析与工具变量

由于粮食体系韧性的影响因素较多，难以将所有影响因素纳入模型中，可能存在遗漏变量偏误、双向因果，故选取1984年每万人固定电话数量和1984年每百万人拥有的邮局数作为农业数字化的工具变量（IV1、IV2），由于工具变量的原始数据为截面数据，参考赵涛[26]的研究，引入一个随时间变化的变量来构造面板工具变量，使用滞后一期的互联网普及率与二者的交互项作为工具变量。选择上述两个工具变量主要出于以下考虑：第一，农业数字化的发展和应用需要互联网的普及，而互联网的普及需要固定电话所使用的线路作为基础，固定电话所使用线路的铺设与邮局密切相关，所以邮局必然与互联网的普及、农业数字化的发展和应用存在一定的联系，因此满足了工具变量的“相关性”。第二，粮食体系韧性主要与粮食的产量、粮食的流通效率、粮食生产的绿色化水平、粮食生产的科技化水平等因素相关，邮局数量和固定电话数量均不与粮食体系韧性存在直接联系；第三，前置若干年的固定电话数量和邮局数量也难以对今天的粮食体系韧性产生影响，因此满足了工具变量的“外生性”。

估计结果表6显示，Kleibergen－Paap rk Wald F统计量大于Stock－Yogo检验10%水平上的临界值，Kleibergen－Paap rk LM统计量的P值小于0.01，Hansen J统计P值大于0.1，表明不存在弱工具变量、工具变量识别不足、工具变量过度识别问题。在工具变量有效的情况下，基准回归研究结论仍然成立。至此，假说1得以验证。

表6 内生性分析结果：工具变量

(1)		(2)
农业数字化		粮食体系韧性
农业数字化		0.216***
		(0.058)
IV1	0.012***	
	(0.004)	
IV2	−0.015***	
	(0.002)	
控制变量	已控制	已控制
年份固定效应	YES	YES
省份固定效应	YES	YES
常数项	0.385	0.080
	(0.549)	(0.229)
样本量	156	156
Kleibergen－Paap rk LM 统计量		24.933
		[0.0000]
Kleibergen－Paap rk Wald F 统计量		31.512
		{19.93}
Hansen J统计P值		0.2736
R^2	0.937	0.976

注：[ ] 内数值为P值，{ } 内数值为Stock－Yogo弱识别检验在10%水平上的临界值

（四）异质性分析

1. 南北方主产区异质性

由于我国南北方地区的自然资源禀赋、社会经济条件存在较大差异，故将我国粮食主产区划分为南方主产区和北方主产区进行分析[①]。回归结果表7列（1）列（2）表明农业数字化对南方主产区粮食体系韧性的正向影响较北方主产区更为强烈。可能的原因是北方主产区地形以平原为主，土壤肥沃，自然条件优越，粮食生产规模效益明显，且经济发展水平与南方相比较低，农业数字化基础设施水平、技术水平相对较低，使得农业数字化发挥的效用相对有限；而南方主产区丘陵山区较多，耕地较为细碎化，且经济较北方更为发达，农业数字化发展的基础设施较为完善，农业数字化技术也更为成熟，使得农业数字化能够发挥出最大化效用，从而能够更显著地提升粮食体系韧性的水平。

2. 粮食功能区异质性

研究将我国粮食主产区划分为粮食净调出省和非净调出省，以探究农业数字化对粮食体系韧性是否存在粮食功能区的异质性[②]。回归结果表7列（3）列（4）表明农业数字化对非粮食净调出省的粮食体系韧性的正向影响较粮食净调出省更为显著。粮食净调出省5省中4省来自北方主产区，再次验证了南北方主产区异质性分析结论的稳健性。

① 南方主产区包括江苏、安徽、江西、湖北、湖南、四川；北方主产区包括河北、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、山东、河南。

② 目前，我国粮食净调出省包括内蒙古、黑龙江、吉林、安徽、河南，其余均为非粮食净调出省。

表7 异质性分析结果

	（1）	（2）	（3）	（4）
变量	南方主产区	北方主产区	粮食净调出省	非粮食净调出省
农业数字化	0.220***	0.124**	0.215	0.117*
	（0.047）	（0.052）	（0.207）	（0.062）
常数项	0.046	0.873	−0.227	0.088
	（0.454）	（0.756）	（1.395）	（0.163）
控制变量	已控制	已控制	已控制	已控制
年份固定效应	YES	YES	YES	YES
省份固定效应	YES	YES	YES	YES
样本量	72	84	60	96
R^2	0.863	0.926	0.895	0.876

（五）调节效应

表8列（1）显示财政支农水平的估计系数不显著，而列（2）显示农业数字化×财政支农水平的估计系数在1%水平上显著为正，这表明财政支农水平在农业数字化对我国粮食主产区粮食体系韧性的影响中具有正向调节作用。至此，假说2得以验证。

表8 调节效应检验结果

变量	（1） 粮食体系韧性	（2） 粮食体系韧性
农业数字化	0.152***	−0.357*
	（0.052）	（0.196）
财政支农水平	−0.014	−0.126**
	（0.055）	（0.062）
农业数字化×财政支农水平		0.421***
		（0.147）
控制变量	已控制	已控制
省份固定效应	YES	YES
时间固定效应	YES	YES
常数项	0.105	0.216
	（0.233）	（0.330）
样本量	156	156
R^2	0.862	0.878

为进一步探究财政支农水平的调节作用在不同经济发展水平地区的异质性影响，对我国粮食主产区进行南方主产区和北方主产区、人均GDP前50%省和人均GDP后50%省的划分①，回归结果如表9显示，在经济水平较南方相对落后的北方主产区，农业数字化×财政支农水平在1%水平上显著为正，在南方主产区则不显著，符合假说3；在人均GDP后50%省，农业数字化×财政支农水平在1%的水平上显著为正，在人均GDP前50%省则不显著，而人均GDP后50%的7省中有5省来自北方主产区，再次验证了前文南北方主产区调节效应异质性分析结论的稳健性。

（六）财政支农水平的门槛效应

为进一步探究财政支农水平在农业数字化影响我国粮食主产区粮食体系韧性中的调节作用是否具有非线性特征，引入Hansen[27]的面板门槛模型进行检验。表10报告了门槛检验结果，财政

① 人均GDP前50%省和后50%省依照2023年各省人均GDP排名进行划分，人均GDP前50%省包括江苏、内蒙古、湖北、山东、安徽、湖南；人均GDP后50%省份包括河北、辽宁、吉林、黑龙江、江西、河南、四川。

表9 调节效应的异质性分析结果

	南方主产区	北方主产区	人均GDP前50%省	人均GDP后50%省
农业数字化	−0.313	−0.434***	−0.004	−0.377**
	(0.698)	(0.121)	(0.259)	(0.146)
财政支农水平	−0.203	−0.002	−0.097	−0.001
	(0.162)	(0.048)	(0.093)	(0.036)
农业数字化×财政支农水平	0.360	0.503***	0.136	0.395***
	(0.465)	(0.077)	(0.197)	(0.137)
控制变量	已控制	已控制	已控制	已控制
省份固定效应	YES	YES	YES	YES
年份固定效应	YES	YES	YES	YES
N	72	84	72	84
R^2	0.874	0.946	0.913	0.918

支农水平单一门槛通过了10%水平的显著性检验，双重门槛未通过显著性检验，表明模型中仅存在单一门槛，门槛值为1.1454。

表10 门槛效应检验结果

门槛变量	门槛数	门槛值	P值	F值	临界值		
					10%	5%	1%
财政支农水平	单一门槛	1.1454	0.0620	21.32*	18.7477	22.4106	31.4705
	双重门槛	0.3762	0.6020	6.27	24.1546	35.0562	65.8817

注：自主抽样次数为500

表11报告了财政支农水平面板门槛模型回归结果。回归结果显示，在门槛值前后，农业数字化对我国粮食主产区粮食体系韧性的影响有显著差别。当财政支农水平小于门槛值时，农业数字化在5%的显著性水平上正向影响我国粮食主产区的粮食体系韧性，估计系数为0.134，当财政支农水平越过门槛值时，农业数字化在1%的显著性水平上正向影响我国粮食主产区的粮食体系韧性，估计系数为0.276。可能的原因是，当财政支农水平较低时，农业数字化所需的基础设施、设备缺乏政府投入资金建设，政府为保障粮食生产的资金支持力度也较低，农业数字化水平较低，其发挥的作用相对有限，从而使得农业数字化对我国粮食主产区粮食体系韧性水平的提升幅度不大；而当财政支农水平达到一定程度后，农业数字化基础设施建设、设备所需要的资金得到保障，政府为保障粮食生产的资金支持力度也较大，农业数字化水平得到较大提升，农业数字化能够发挥出最大效用，从而使农业数字化对我国粮食主产区粮食体系韧性水平提升的边际效益显著增加，粮食体系韧性水平得以较大幅度的提升。至此，假说4得以验证。

表11 门槛效应回归结果

门槛变量	系数	稳健标准误	t统计量
农业数字化（财政支农水平≤1.1454）	0.134**	0.050	2.68
农业数字化（财政支农水平>1.1454）	0.276***	0.048	5.75
控制变量		已控制	
年份固定效应		YES	
省份固定效应		YES	
R^2		0.879	

五、结论与政策建议

在我国农业现代化进程加速推进和保障粮食安全的背景下，利用我国13个粮食主产区2011—2022年的面板数据，实证分析农业数字化对我国粮食体系韧性的影响，主要得到以下研究结论：（1）基准回归结果显示，农业数字化能够显著提升我国粮食主产区的粮食体系韧性水平，在经过稳健性检验和考虑内生性问题后依旧成立。（2）

异质性分析结果显示，农业数字化对南方主产区粮食体系韧性的正向影响大于北方主产区，对非粮食净调出省的粮食体系韧性的正向影响大于粮食净调出省。（3）调节效应分析结果显示，财政支农水平在农业数字化影响我国粮食主产区粮食体系韧性中具有正向调节作用，并在经济水平相对落后的北方主产区更为显著。（4）门槛效应分析结果显示，财政支农水平在农业数字化影响我国粮食主产区粮食体系韧性中的正向调节作用具有非线性特征，当财政支农水平超过门槛值后，农业数字化水平对我国粮食主产区粮食体系韧性水平的提升幅度更大。

基于上述研究结论，提出如下政策建议：（1）加快粮食主产区农业数字化技术的推广和应用。有关部门要完善农业数字化基础设施，建立农业数字化服务中心，推广普及农业数字化技术，推动建立农业数字化技术培训和教学平台，帮助农民解决数字化技术应用过程中的使用难题；要发挥好村党员干部和新乡贤的带头引领作用，让农民看得见新设备、新技术的先进性和优越性，从而激发农民的内生动力，调动农民自身积极性，使农民敢于接受农业新设备、乐于学习农业新技术。（2）发挥好南方主产区农业数字化先进地区的示范作用。南北各主产区之间应加强交流与合作，学习南方主产区农业数字化水平较高地区在推广和应用过程中具有普遍指导意义的经验，按照先试点后推广的原则，逐步完善北方主产区的农业数字化，提高北方主产区的农业数字化发展水平。（3）根据南北方主产区的异质性特征，制定差异化农业数字化策略。由于南北方主产区自然条件、社会经济条件存在差异，农业数字化对不同粮食主产区粮食体系韧性的影响也存在差异，为使农业数字化发挥最大效用，不同粮食主产区应因地制宜地推动农业数字化发展。对于南方主产区应充分发挥地方经济优势推动农业数字化的发展，以农业数字化水平的提升减少不利自然条件对粮食体系韧性所造成的负面影响，增强风险抵抗能力，提高粮食自给率，提升粮食体系韧性；对于北方主产区应加大财政支农力度，使其尽快超过门槛值，提高农业数字化水平，发挥农业数字化的最大化效用，以提高农业数字化对粮食体系韧性提升的边际效益，提升粮食体系韧性水平。

参 考 文 献

[1] 马述忠，贺歌，郭继文. 数字农业的福利效应——基于价值再创造与再分配视角的解构[J]. 农业经济问题，2022，43（5）：10-26.

[2] 向红玲. 大力推进数字农业高质量发展[J]. 宏观经济管理，2024（1）：55-61，77.

[3] 范瑾，张金星. 乡村振兴视域下中国农业数字化发展水平测度[J]. 生态经济，2023，39（7）：99-106.

[4] 苏锦旗，潘婷，董长宏. 中国农业数字化发展及区域差异评价[J]. 西北农林科技大学学报(社会科学版)，2023，23（4）：135-144.

[5] 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.

[6] 文丰安. 农业数字化转型发展：意义、问题及实施路径[J]. 中国高校社会科学，2023（3）：111-120，159-160.

[7] 何睦，王翔. 农业数字化转型发展：重要性、障碍及实施路径[J]. 贵州社会科学，2023（9）：161-168.

[8] 张相龙，赵梦典，张海莹. 土地流转视角下农业数字化的增收效应[J/OL]. 河南农业大学学报，1-17.[2024-07-06]. https://doi.org/10.16445/j.cnki.1000-2340.20240620.001.

[9] 刘威，郑雪丽，马恒运. 农业数字化对粮食生产安全的影响机理与效应[J]. 中国农业大学学报，2024，29（7）：307-320.

[10] 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.

[11] 联合国粮食及农业组织. 2021年粮食及农业状况：提高农业粮食体系韧性，应对冲击和压力[R]. 罗马:联合国粮食及农业组织，2021.

[12] Béné C. Resilience of local food systems and links to food security - A review of some important concepts in the context of COVID-19 and other shocks[J]. Food security，2020，12（4）：805-822.

[13] 郝爱民，谭家银. 数字乡村建设对我国粮食体系韧性的影响[J]. 华南农业大学学报(社会科学版)，2022，21（3）：10-24.

[14] 左秀平，叶林祥. 中国粮食体系韧性：水平测度及动态演进[J]. 华南农业大学学报(社会科学版)，2024，23（1）：88-101.

[15] 郑家喜，赵妍，卫增. 基于空间马尔科夫链的粮食生产韧性动态演进及趋势预测[J]. 华中农业大学学报(社会科学版)，2024（3）：104-117.

[16] 王妍霏，叶举，曹杰. 数字金融提升粮食体系韧性

的机理及效应研究[J]. 经济经纬，2023，40（5）：48-60.
[17] 蒋辉，陈瑶，刘兆阳. 中国粮食生产韧性的时空格局及其影响因素[J]. 经济地理，2023（6）：126-134.
[18] 杜剑，徐筱彧，杨杨. 数字农业推动高质量发展的路径机制分析[J]. 贵州社会科学，2023（6）：160-168.
[19] 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，2024，37（1）：119-129.
[20] 赵亮. 乡村振兴视域中数字农业高质量发展探析[J]. 人民论坛，2023（2）：81-83.
[21] 卜林，赵轶薇. 进口贸易对粮食安全的影响研究——基于财政支农与农业保险的调节效应分析[J]. 保险研究，2023（3）：87-104.
[22] 乔翠霞，刘韵致，杨晨曦. FDI对农业技术创新的影响——基于财政支农的调节效应分析[J]. 东岳论丛，2023，44（5）：148-159，192.
[23] 蔡林军，文春晖. 劳动力转移对粮食生产韧性的影响研究——基于中国粮食主产区的实证[J]. 中国农机化学报，2024，45（3）：313-321.
[24] 王恒，方兰. 中国农业数字化与绿色化时空耦合协调关系及驱动力分析[J]. 长江流域资源与环境，2023，32（4）：868-882.
[25] 蒋团标，张亚萍. 财政支农支出对农村居民消费升级的影响机理[J]. 华东经济管理，2021，35（12）：1-9.
[26] 赵涛，张智，梁上坤. 数字经济、创业活跃度与高质量发展——来自中国城市的经验证据[J]. 管理世界，2020，36（10）：65-76.
[27] HansenBruce E.. Threshold effects in non-dynamic panels：estimation，testing，and inference[J]. Journal of econometrics，1999，93（2）：345-368.

The impact of agricultural digitization on the resilience of China´s grain system——based on the empirical study of major grain-producing areas in China

QIAN Zhaoying[1]，WEI Jichao[2]

（1. *School of Economics*，*Guizhou University of Finance and Economics*，*Guiyang* 550025，*China*；2. *School of Management Science and Engineering*，*Guizhou University of Finance and Economics*，*Guiyang* 550025，*China*）

Abstract：Improving the resilience level of the food system is of great significance for ensuring national food security. This study is based on panel data from 13 major grain producing areas in China from 2011 to 2022. Based on theoretical analysis，fixed effects model，moderation effect model，and threshold effect model are used to analyze the mechanism of agricultural digitization and its effect on the resilience of the grain system in major grain producing areas in China. The results are the following：Agricultural digitization has a significant positive impact on the resilience of the grain system in China′s major grain producing areas；The heterogeneity analysis results show that agricultural digitization has a more significant positive impact on the resilience of the grain system in the main production areas and non-grain net outflow provinces in the south；The results of the moderation effect analysis show that the level of fiscal support for agriculture has a positive moderating impact on the resilience of the grain system in China′s major grain producing areas under the influence of agricultural digitization，and the moderating effect is more significant in the northern major grain producing areas；The threshold effect analysis results show that the positive moderating effect of fiscal support for agriculture on the impact of agricultural digitalization in major grain-producing regions in China has a threshold effect. Accordingly，the following policy recommendations are proposed：accelerate the promotion and application of agricultural digital technology in major grain-producing regions；Give full play to the exemplary role of advanced agricultural digitalization in the main production areas of the south；formulate differentiated agricultural digitalization strategies based on the heterogeneity characteristics of southern and northern main production areas.

Keywords：Agricultural digitalization；Resilience of grain system；Regulating effect；Threshold effect

（编辑：赫雪侠）