

数字技术赋能粮食供应链韧性的空间异质性： 区域差异与政策适配

张豫浙，代绍涵

安徽财经大学统计与应用数学学院，安徽 蚌埠

收稿日期：2026年1月4日；录用日期：2026年1月26日；发布日期：2026年2月5日

摘 要

本文基于2013~2023年中国30个省份的面板数据，构建了粮食供应链韧性与数字技术发展水平的综合评价指标体系，利用双向固定效应模型实证检验了数字技术对粮食供应链韧性的赋能效应。研究发现，数字技术对粮食供应链韧性具有显著的正向促进作用，且经过一系列稳健性检验后结论依然成立。机制分析表明，互联网普及率在其中发挥了部分中介作用。异质性分析显示，赋能效果在粮食主销区最为显著，主产区和产销平衡区次之。文章最后根据不同功能区的定位提出了差异化的政策建议。

关键词

数字技术，粮食供应链韧性，互联网普及率，区域异质性

The Spatial Heterogeneity of Digital Technology Empowering Grain Supply Chain Resilience: Regional Differences and Policy Adaptation

Yuxi Zhang, Shaohan Dai

School of Statistics and Applied Mathematics, Anhui University of Finance and Economics, Bengbu Anhui

Received: January 4, 2026; accepted: January 26, 2026; published: February 5, 2026

Abstract

Based on panel data from 30 Chinese provinces spanning 2013~2023, this study constructs a com-

prehensive evaluation index system for grain supply chain resilience and digital technology development. Using a two-way fixed effects model, it empirically examines the enabling effect of digital technology on grain supply chain resilience. The findings reveal that digital technology has a significant positive promoting effect on grain supply chain resilience, a conclusion that remains robust after a series of stringent tests. Mechanism analysis indicates that internet penetration plays a partial mediating role in this relationship. Heterogeneity analysis shows that the enabling effect is most pronounced in major grain consumption regions, followed by major production regions and production-consumption balanced regions. Finally, the paper proposes differentiated policy recommendations based on the distinct functional positioning of each region type.

Keywords

Digital Technology, Grain Supply Chain Resilience, Internet Penetration, Regional Heterogeneity

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,我国粮食安全水平显著提升,实现了“谷物基本自足、口粮绝对安全”的战略目标,为经济社会发展奠定了坚实基础。党的二十大报告明确将全方位夯实粮食安全根基作为建设农业强国的重大任务,这标志着粮食安全治理已进入系统强化、提质增效的新阶段。然而,在全球气候变化加剧、地缘政治冲突频发与突发事件常态化的多重冲击下,粮食安全面临的挑战日益复杂化、系统化,其内涵正在从侧重生产端的产量安全,向涵盖生产、储存、流通、贸易等多维度的“供应链安全与韧性”拓展。粮食供应链作为一个环环相扣的复杂网络,其抵御干扰、适应变化并快速恢复的能力,已成为国家粮食安全的核心维度。因此,在新发展阶段,保障国家粮食安全的关键在于着力解决粮食供应链韧性不足的难题,系统提升其应对各类风险冲击的预见性、适应性与恢复力,这不仅是守住粮食安全底线的必然要求,更是构建新发展格局、促进经济社会平稳运行的关键战略支撑。

新一代数字技术作为引领产业变革的战略性驱动力,正成为提升粮食供应链韧性、夯实国家粮食安全根基的关键赋能工具。以大数据、物联网、人工智能、区块链等为代表的数字技术浪潮,重塑着社会生产方式和治理模式,也为破解农业发展难题、推动粮食产业转型升级提供了历史性机遇。《2025年数字乡村发展工作要点》指出要让数字技术在确保国家粮食安全中发挥更显著的作用,这一政策导向为粮食供应链的发展指明了导向,同时凸显数字化在赋能现代农业发展中的核心地位。数字技术通过驱动数据这一新型生产要素在粮食“产、购、储、加、销”全链条中渗透、流动与融合,能够实现生产精准化、管理可视化、服务智能化与决策科学化,从根本上提升供应链的透明度、协同效率与自适应能力,加快推进粮食产业的数字化转型,不仅是技术升级的路径,更是培育农业新质生产力、构筑粮食安全长久防线和建设农业强国的战略选择。

因此,深入探究数字技术赋能粮食供应链韧性的内在机理、优化其区域适配路径,是推动粮食产业高质量发展的重要基础。本研究基于2013~2023年省级面板数据,构建粮食供应链韧性与数字技术的评价指标体系,并用熵值法测定各指标水平,重点分析数字技术对粮食供应链韧性的直接影响与间接作用,并依据粮食功能区进行区域异质性检验,为我国制定粮食安全数字化政策、提升供应链韧性提供理论依据与决策参考。

2. 文献综述

对粮食供应链韧性的学术关注, 学者们普遍认同, 韧性是指供应链在遭受内外冲击时, 能够抵御、适应并实现变革的复合能力。这一概念框架在实证研究中被广泛采纳并操作化。戴媛媛从抵抗、适应与创新三个维度构建了评价体系, 测度发现我国粮食产业链供应链韧性水平呈上升趋势, 但主产区最高、产销平衡区最低, 且区域间差距是总体差距的主要来源[1]。左秀平与叶林祥以及曾俊杰等的研究均证实了韧性存在显著的空间分异, 且区域间差异是主导[2][3]。这些发现为本研究关注主产区、主销区、产销平衡区的功能区异质性提供了关键依据。在提升路径上, 早期研究多集中于宏观战略。陈明星提出构建涵盖供应链、产业链的多维度系统韧性[4]; 韩冬和钟钰则强调通过进口来源多样化来应对外部风险[5]。近年来, 随着数字化转型的深入, 马俊凯等提出的数字化转型, 通过技术手段提升韧性[6], 为数字技术赋能研究铺设了理论桥梁。

关于数字技术对粮食供应链韧性的具体影响, 近期的实证研究已开始涌现并形成了一些富有启示的结论, 尤其在影响效应与异质性方面。首先, 在整体赋能效应上, 研究普遍证实了数字技术的正向作用。刘慧玉与徐礼志的实证研究表明, 农业数字化对粮食供应链韧性具有显著提升作用, 其中交易数字化在加速信息流通、提升市场透明度方面发挥了关键作用[7]。李凤廷同样验证了数字经济对韧性的积极影响, 并进一步发现优质的营商环境能够强化这一正面效应[8]。其次, 在赋能效应的空间异质性上, 研究结论因划分标准不同而呈现差异, 但均指向非均衡特征。一部分研究基于传统的地理经济带划分。刘慧玉与徐礼志发现, 农业数字化的赋能效应在西部地区最强, 中部次之, 东部不显著, 揭示了技术在后发地区的边际效益更高[7]。另一部分研究则开始切入更具政策意义的粮食功能区视角。李凤廷与弓赫发现数字经济对主产区的效应更为显著[8]; 而王娟娟与曲健的另一项研究则指出, 在粮食主销区和主产区的促进作用显著, 且主销区的作用更明显, 产销平衡区则不显著[9]。最后, 在赋能的内在机制探索上, 研究开始触及但尚未深入。徐亚纯与卫雅祺在研究新质生产力时发现, 推动农业技术进步是其赋能韧性提升的关键中介途径[10]。高鸣与杨新宇则从理论层面指出, 数字技术主要通过影响粮食生产方式、整合产业链与价值链来促进高质量发展[11]。

因此, 本研究在已有研究基础上, 向前推进关键一步。通过聚焦互联网普及率这一关键中介变量, 并置于“粮食功能区”这一差异化的空间场景下, 旨在提供一个细致深刻, 也更贴合中国粮食安全治理实践的理论与实证分析, 为因地制宜制定差异化数字赋能政策、全面提升国家粮食供应链韧性提供依据。

3. 理论分析与研究假设

3.1. 数字技术对粮食供应链韧性的直接影响

粮食供应链韧性的核心, 在于面临内外冲击时能够有效抵抗、快速恢复并实现进化升级的综合能力。传统供应链常因信息割裂、决策迟缓和协调僵化显得脆弱, 而数字技术的兴起为破解这些困境提供了全新范式。其赋能逻辑根植于信息经济学与复杂系统理论, 通过将数据要素深度嵌入供应链的各个环节, 重构了信息流动、决策制定与组织协同的基本模式, 从而增强了供应链的动态适应性。

数字技术首先通过提升供应链的预见性来强化其抵抗能力。物联网传感器与遥感技术构成的感知网络, 实现了对农业生产环境、仓储状态和物流轨迹的实时数字化监控, 将物理世界的连续状态转化为可分析的数据流。这使得系统能够对自然灾害、市场波动等潜在风险进行早期预警, 推动风险管理从被动响应转向主动缓冲。当冲击不可避免地发生时, 数字技术则通过优化决策效率来加速恢复进程。大数据平台能整合中断影响范围、库存分布、多式联运资源等碎片化信息, 人工智能算法可在其中快速寻找到达受灾点的最优资源调度路径; 同时, 区块链技术提供的全程溯源信息, 能实现问题环节的瞬时精准定

位与隔离, 极大缩短了诊断与恢复时间, 减少了次生损害。

数字技术还能激发供应链的“进化潜力”, 即变革能力。云计算平台与数字生态促进了跨环节、跨主体的数据共享与知识沉淀, 将应对危机的临时协作固化为常态化的网络协同。基于历史冲击与恢复数据的机器学习模型, 使系统具备自学习与自适应能力, 能够持续优化预警阈值与应急预案。更重要的是, 数字技术驱动了商业模式与流程的根本性创新, 例如订单农业、智能合约履约、数字化产销直连等新模式, 推动供应链结构从传统的线性链条向柔性、开放的生态网络转型。这种转型不仅解决了当下面临的冲击, 更从根本上提升了适应未来复杂性与不确定性的潜力。

综上所述, 数字技术通过实时感知、智能决策与网络协同等关键机制, 形成了一种连贯且递进的赋能路径: 由强化环境感知能力实现主动风险抵抗, 通过优化决策效率加速系统中断后的恢复, 并最终以促进协同创新的方式驱动供应链的结构进化与升级, 这一连贯而递进的作用机制, 对粮食供应链韧性产生全方位、多层次的直接赋能。基于此, 本研究提出核心假设:

H1: 数字技术发展水平对粮食供应链韧性具有显著正向影响。

3.2. 数字技术通过发展信息基础设施的间接影响

数字技术对粮食供应链韧性的赋能, 需要通过广泛的信息基础设施作为关键支撑来实现。互联网普及是这一基础设施覆盖的核心体现, 它构成了数字技术应用不可或缺的底层网络。数字技术的发展, 率先推动并依赖于互联网的广泛接入; 而互联网的普及, 通过降低供应链各环节的信息获取、传递与协同成本, 重塑了信息流动模式。这具体促进了生产端的智能决策、流通环节的高效匹配与跨主体间的网络化协作, 从而系统性地增强了供应链的抵抗力、恢复力与变革力。

因此, 数字技术对粮食供应链韧性的提升, 部分是通过推动互联网普及、进而优化整体信息环境这一路径实现的。基于此, 本文提出如下中介假设:

H2: 互联网普及率在数字技术与粮食供应链韧性之间发挥中介作用。

4. 研究设计

4.1. 数据来源

本研究深入探究数字技术对粮食供应链韧性的赋能效应及其机制, 选取 2013~2023 年中国 30 个省、自治区和直辖市(不含西藏及港澳台地区)的面板数据作为研究样本, 共计 330 个观测值。研究所涉及的粮食供应链韧性、数字技术发展水平、互联网普及率及其他控制变量的原始数据, 均来源于《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》、各省份统计年鉴以及国家统计局、工业和信息化部等政府官方发布的数据与报告。对于数据中存在的少量缺失值, 本研究采用插值法进行了合理填补与处理。

4.2. 模型设计

4.2.1. 基准回归模型

为检验数字技术对粮食供应链韧性的影响及其作用机制, 准确识别其中的因果关系, 本文构建如下基准回归模型:

$$GSCR_{it} = \beta_0 + \beta_1 Digital_{it} + \beta_2 Controls_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it}$$

其中, 下标 i 表示省份, t 表示年份; $GSCR_{it}$ 表示粮食供应链韧性指数。 $Digital_{it}$ 表示数字技术发展水平综合指数, $Controls_{it}$ 为控制变量; μ_i 和 λ_t 分别表示省份固定效应和年份固定效应, ε_{it} 为随机扰动项。

4.2.2. 中介效应模型

为进一步检验互联网普及率在数字技术影响粮食供应链韧性过程中所起的中介作用, 本文借鉴温忠

麟等的经典方法，构建如下中介效应模型进行逐步回归分析[12]：

$$\text{Internet}_{it} = \delta_0 + \delta_1 \text{Digital}_{it} + \delta_2 \text{Controls}_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

$$\text{GSCR}_{it} = a_0 + a_1 \text{Digital}_{it} + a_2 \text{Internet}_{it} + a_3 \text{Controls}_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

其中， Internet_{it} 为中介变量，即互联网普及率。式(1)用于检验数字技术对中介变量互联网普及率的影响，系数 δ_1 的显著性反映了数字技术是否有效促进了信息基础设施的普及。式(2)则在控制数字技术后，检验中介变量对粮食供应链韧性的影响，同时观察数字技术的直接效应。

4.3. 变量构造与测度

4.3.1. 被解释变量

被解释变量设定为粮食供应链韧性。粮食供应链韧性是保障国家粮食安全的关键能力，指供应链在面临冲击时能够保持稳定、快速恢复并实现升级的综合属性。为科学量化这一概念，本文在理论分析的基础上，将其解构为抵抗能力、恢复能力与变革能力三个核心维度，并据此构建综合评价指标体系。具体指标的选取全面反映各维度的内涵，抵抗能力涵盖生产基础与缓冲水平，恢复能力关注灾后恢复速度与经济支撑，变革能力则衡量系统协调与创新水平。在测度方法上，采用客观赋权的熵权法对各级指标进行综合，计算出各省份每年的粮食供应链韧性得分，粮食供应链韧性的评价指标选取具体如表 1 所示。

Table 1. Grain supply chain resilience evaluation indicator system

表 1. 粮食供应链韧性评价指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	指标属性	权重
抵抗能力	基础条件	人均粮食产量	正向	0.031
		有效灌溉面积	正向	0.033
	缓冲水平	单位面积粮食产量	正向	0.035
		粮食生产价格指数	正向	0.037
恢复能力	恢复速度	灾后产量恢复率	正向	0.039
		农业增加值增长率	正向	0.041
	经济支撑	第一产业增加值	正向	0.042
		农村人均可支配收入	正向	0.044
变革能力	协调水平	农用塑料薄膜使用量、 农、林、牧、渔服务业总产值	负向 正向	0.046 0.215
	创新水平	农业 R&D 经费投入强度	正向	0.217
		农业机械总动力	正向	0.218

4.3.2. 解释变量

数字技术是驱动粮食供应链转型升级的核心赋能要素。为全面衡量其发展水平，本文从数字基础设施、技术应用深度与创新能力三个层面构建评价指标体系。通过熵权法计算综合得分，数字技术的评价指标选取具体如表 2 所示。

4.3.3. 中介变量与控制变量

本文选取互联网普及率作为中介变量，以“互联网宽带接入用户数占常住人口比重”衡量。该指标是数字技术赋能得以实现的基础性渠道，用来检验数字技术是否通过提升信息可及性来影响供应链韧性。

Table 2. Digital technology evaluation indicator system
表 2. 数字技术评价指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	指标属性	权重
数字基础设施	农村宽带接入率	农村宽带用户数/农村总人口	正向	0.145
	信息传输设备建设	长途光缆线路长度	正向	0.154
技术应用深度	移动电话普及率	每百人移动电话数	正向	0.162
	互联网相关产出	人均电信业务总量	正向	0.171
创新能力	互联网相关从业人员数	计算机服务和软件从业人数占比	正向	0.180
	数字金融发展	数字普惠金融指数	正向	0.188

控制变量的选取旨在控制其他可能对粮食供应链韧性产生系统性影响的潜在因素，以更准确地识别数字技术的净效应。选取如下：农作物总播种面积，反映了农业生产的基本规模。控制该变量可排除单纯的生产规模效应对韧性的影响；城镇化率，城镇化进程改变区域的经济社会结构，控制该变量旨在剥离经济社会结构转型带来的混杂效应；财政涉农支出占比，政府支持是提升农业抗风险能力的关键外部因素，控制该变量有助于分离出政策扶持的贡献，从而聚焦于数字技术本身的市场化或社会性赋能作用。

5. 实证分析

5.1. 描述性统计分析

基于 2013~2023 年中国 30 个省、自治区和直辖市(不含西藏及港澳台地区)的面板数据。为确保数据完整性，对个别缺失值采用了插值法进行处理。核心变量均已进行标准化以消除量纲影响，对主要变量做描述性统计分析，结果见表 3。

Table 3. Descriptive statistical analysis
表 3. 描述性统计分析

变量类型	变量	样本量	平均值	中位数	标准差	最小值	最大值
被解释变量	粮食供应链韧性	330	0.455	0.449	0.063	0.264	0.636
解释变量	数字技术	330	0.000	-0.059	1.000	-1.749	3.515
中介变量	互联网普及率	330	0.000	-0.019	1.000	-1.771	2.344
	农作物总播种面积	330	0.000	-0.120	1.000	-1.39	2.473
控制变量	城镇化率	330	0.000	-0.110	1.000	-2.122	2.453
	财政涉农支出	330	0.000	-0.062	1.000	-1.811	2.826

5.2. 基准回归分析

为探究数字技术对粮食供应链韧性的影响，分别进行在无控制变量和有控制变量条件下的基准回归分析，结果见表 4。

表 4 展示了数字技术对粮食供应链韧性影响的基准回归结果。第(1)列未加入控制变量，数字技术的系数为 0.046 且在 1%水平上显著。第(2)列加入了城镇化率、财政涉农支出和农作物总播种面积等控制变量后，数字技术的系数上升至 0.064，显著性水平保持不变。这意味着数字技术发展水平每提升 1 个单位，粮食供应链韧性将相应提升 0.064 个单位，验证了假设 H1。

Table 4. Benchmark regression
表 4. 基准回归

变量	(1)	(2)
	粮食供应链韧性	粮食供应链韧性
数字技术	0.046*** (15.089)	0.064*** (11.445)
农作物总播种面积		-0.080* (-1.761)
城镇化率		-0.065*** (-5.752)
财政涉农支出		0.018** (2.309)
常数项	0.455*** (227.056)	0.455*** (240.148)
N	330	330
R ²	0.432	0.498
省份固定	是	是
年份固定	是	是

***p < 0.01, **p < 0.05, *p < 0.10.

在控制变量中，城镇化率的系数为-0.065 且显著，表明城镇化进程在一定程度上对粮食供应链韧性产生负向影响。这可能是因为城镇化加速了农业劳动力向非农产业转移，减少了农业生产投入。财政涉农支出的系数为 0.018 且在 5%的水平上显著，说明政府农业支持政策对提升粮食供应链韧性具有积极效果。值得注意的是，农作物总播种面积的系数为-0.080，在 10%的水平上显著为负，这可能是因为当前中国农业生产条件下，播种面积的扩张并不必然带来供应链韧性的提升，反而可能因为规模化经营不足、资源分散等原因，难以形成有效的风险抵抗能力。模型的 R² 为 0.498，表明该模型能够解释粮食供应链韧性接近一半的变异，拟合效果良好。

5.3. 稳健性检验

为确保基准回归结果的可靠性，本文通过替换估计方法与调整样本范围两种方式进行稳健性检验。

1. 替换估计模型

被解释变量粮食供应链韧性指数为 0 至 1 之间的连续变量，符合因变量受限的条件，采用 Tobit 模型重新进行估计。结果如表 5 第(1)列所示，数字技术的估计系数为 0.037，且在 1%的水平上显著，其符号与显著性水平均与基准回归结果一致，表明核心结论对于不同的模型设定具有稳健性。

2. 剔除特殊样本

考虑到北京、上海、天津、重庆四个直辖市在行政级别、经济结构和农业功能上与一般省份存在系统性差异，可能对整体估计产生影响。因此，在剔除这四个直辖市的样本后重新进行回归。结果如表 5 第(2)列所示，数字技术的系数为 0.052，仍在 1%的水平上显著，通过稳健性检验。

综合以上两种检验，数字技术对粮食供应链韧性具有显著正向促进作用的结论始终稳健，假设 H1 得到了进一步证实。

Table 5. Robustness test**表 5.** 稳健性检验

变量	(1)	(2)
	Tobit 模型	剔除直辖市样本
数字技术	0.037*** (8.65)	0.052*** (8.804)
农作物总播种面积	0.030*** (8.22)	-0.065 (-1.547)
城镇化率	0.010** (2.48)	-0.038*** (-4.228)
财政涉农支出	-0.003 (-0.77)	0.014* (1.807)
常数项	0.452*** (222.743)	0.452*** (230.250)
样本量	330	286
R ²		0.454
省份固定效应	是	是
年份固定效应	是	是

*** p < 0.01, ** p < 0.05, * p < 0.10.

5.4. 内生性检验

考虑到数字技术与粮食供应链韧性之间可能存在双向因果关系等内生性问题, 为避免估计偏误, 采用以下两种方法进行检验。结果见表 6。

Table 6. Endogeneity test**表 6.** 内生性检验

变量	两阶段最小二乘法	被解释变量滞后一期	解释变量滞后一期
	(1)	(2)	(3)
数字技术	0.0308*** (3.380)	0.039*** (5.952)	
滞后一期数字技术			0.036*** (8.222)
控制变量	控制	控制	控制
地区效应	控制	控制	控制
时间效应	控制	控制	控制
常数项	0.4519*** (175.61)	0.450*** (175.231)	0.458*** (210.137)
样本量	270	300	300
R ²	0.585	0.241	0.435

*** p < 0.01, ** p < 0.05, * p < 0.10.

1. 两阶段最小二乘法(2SLS)

为缓解互为因果导致的内生性，选取数字技术发展水平的滞后二期作为工具变量进行 2SLS 估计。由表 6 列(1)可知，数字技术的系数为 0.0308，且在 1%的水平上显著。工具变量通过了弱识别检验，证实了其合理性。这一结果说明，在控制内生性干扰后，数字技术对粮食供应链韧性的正向促进作用依然稳健。

2. 滞后回归分析

为进一步验证结论的可靠性，分别采用滞后一期数据进行回归。列(2)为被解释变量滞后一期的估计结果，数字技术的系数为 0.039，显著性未发生变化。列(3)为核心解释变量滞后一期的估计结果，其系数为 0.036，同样在 1%的水平上显著。这两种处理方式的核心结论均与基准回归保持一致，进一步增强了研究结论的可信度。

综上所述，在采用工具变量法与滞后模型控制潜在内生性问题后，数字技术对粮食供应链韧性的正向影响依然显著成立，这表明基准回归的结论是可靠的，研究假设 H1 通过了内生性检验。

5.5. 中介效应检验

为揭示数字技术赋能粮食供应链韧性的内在路径，检验互联网普及率是否发挥关键的中介作用，借鉴温忠麟等的逐步回归法进行实证检验，结果如表 7 所示。

Table 7. Mediation effect test

表 7. 中介效应检验

变量	(1)	(2)
	互联网普及率	粮食供应链韧性
数字技术	1.154***	0.059***
	(24.750)	(10.179)
互联网普及率		0.015***
		(2.645)
农作物总播种面积		-0.096**
		(-2.121)
城镇化率		-0.100***
		(-5.733)
财政涉农支出		0.022***
		(2.843)
常数项	-0.000	0.455***
	(-0.000)	(242.568)
N	330	330
R ²	0.672	0.509
省份固定效应	是	是
年份固定效应	是	是

*** p < 0.01, ** p < 0.05, * p < 0.10.

第一步，验证总效应。基准回归分析已证实，数字技术对粮食供应链韧性具有显著的正向影响，系数为 0.064，在 1%水平上显著，满足中介效应检验的前提条件。

第二步, 检验数字技术对中介变量的影响。将互联网普及率作为被解释变量进行回归, 结果如表 7 列(1)所示。数字技术的系数为 1.154, 且在 1%的水平上高度显著。这表明数字技术的发展是推动互联网广泛普及的强大驱动力。

第三步, 检验中介变量与直接效应。将互联网普及率与数字技术同时纳入对粮食供应链韧性的回归中, 结果如表 7 列(2)所示。互联网普及率的系数为 0.015, 在 1%的水平上显著为正; 与此同时, 数字技术的直接效应系数为 0.059, 依然在 1%的水平上保持显著, 但相较于基准回归中的总效应系数有所减小。这一结果表明, 互联网普及率在数字技术与粮食供应链韧性之间起到了显著的部分中介作用。其传导路径可以解释为: 数字技术首先推动了互联网的广泛普及; 互联网的普及进而通过促进信息实时流通、降低供需匹配成本、赋能远程协同等方式, 增强了供应链各环节的可见性与响应速度, 从而系统性提升了供应链的抵抗力与恢复力。

根据检验结果计算, 中介效应值占总效应比例约为 26.6%。这意味着数字技术对粮食供应链韧性的提升作用中, 有超过四分之一是通过“推动互联网普及”这一基础性路径实现的。综上所述, 中介效应检验结果表明, 数字技术不仅直接赋能粮食供应链韧性, 还通过显著促进互联网普及, 间接地增强了韧性。因此, 研究假设 H2 得到验证。

5.6. 异质性分析

为考察数字技术赋能效应的空间差异, 本文依据粮食功能区划进行异质性分析。如表 8 所示, 数字技术对粮食供应链韧性的提升作用在主产区、主销区与产销平衡区均显著为正, 但其赋能强度呈现主销区最强, 主产区与平衡区次之的特征。

Table 8. Heterogeneity analysis
表 8. 异质性分析

变量	(1)	(2)	(3)
	主产区	主销区	产销平衡区
数字技术	0.052***	0.071***	0.051***
	(6.794)	(5.868)	(5.780)
农作物总播种面积	-0.088*	-0.114	0.030
	(-1.900)	(-1.221)	(0.753)
城镇化率	-0.026*	-0.054**	-0.056***
	(-1.721)	(-1.999)	(-4.703)
财政涉农支出	-0.001	0.032**	0.010
	(-0.076)	(2.095)	(0.838)
常数项	0.480***	0.473***	0.409***
	(166.736)	(118.106)	(127.566)
N	143	77	110
R ²	0.482	0.607	0.461
省份固定	是	是	是
年份固定	是	是	是

***p < 0.01, **p < 0.05, *p < 0.10.

具体而言，数字技术的估计系数在主销区最高为 0.071，在主产区为 0.052，在产销平衡区为 0.051。这可能是因为主销区作为消费与流通枢纽，其供应链效率提升更直接依赖于智慧物流、数字平台等技术的深度应用，数字化边际效益更高；主产区的赋能则更侧重于生产环节的稳产增效；而产销平衡区的数字基础设施与应用水平相对薄弱，限制了赋能潜力的充分释放。

异质性分析结果表明，数字技术的赋能效果具有普遍性，但其政策着力点应因地制宜。对主销区，应聚焦流通与消费环节的数字化集成；对主产区，需强化生产端的智能技术应用；对产销平衡区，则首要任务是补齐数字基础设施短板。

为进一步从统计上严格检验数字技术赋能效应在三个粮食功能区之间是否存在显著差异，本文采用费舍尔组合检验对三个子样本回归中“数字技术”变量系数的显著性进行合并检验。检验结果显示，费舍尔卡方统计量为 105.96 (自由度为 6)，对应的 p 值远小于 0.001。该结果拒绝“三组区域系数无差异”的原假设，从统计意义上证实了数字技术对粮食供应链韧性的提升作用存在显著的区域异质性，支持了前述基于系数大小的比较分析结论。

5.7. 流通环节数字化基础的区域证据

为探究数字技术赋能效应区域异质性的可能原因，本文考察了反映流通环节数字化基础的关键指标。表 9 展示了 2025 年不同粮食功能区快递业的发展水平。数据显示，主销区在快递业务量均值和业务收入均值上均显著领先，分别约为主产区的 2.0 倍和 2.9 倍。这表明主销区已具备更发达、更高附加值的物流网络体系，为数字技术在订单处理、路径优化、智能调度等流通环节的深度应用提供了坚实基础，从而可能放大了其对供应链韧性的提升效果。

Table 9. Comparison of express industry development levels across different grain regions
表 9. 不同粮食区快递业发展水平对比

功能区	省份数量	快递业务量均值(亿件)	快递业务收入均值(亿元)	单件快递收入(元/件)
主销区	7	128.71	1149.80	8.93
主产区	13	63.39	394.07	6.22
产销平衡区	10	11.21	109.81	9.80

6. 总结与建议

6.1. 研究结论

深入研究 2013~2023 年中国 30 个省级面板数据，构建相关指标体系进行实证分析，检验数字技术对粮食供应链韧性的影响、作用机制及空间异质性。主要结论如下：数字技术发展对粮食供应链韧性具有显著的直接提升作用，且该结论在经过替换模型、调整样本以及处理内生性问题等一系列稳健性检验后依然成立；互联网普及率在数字技术与粮食供应链韧性之间发挥了显著的部分中介作用。这意味着，数字技术不仅直接赋能，还通过推动信息基础设施的广泛普及、改善信息生态环境这一关键路径，间接地增强了供应链的抵抗力与恢复力；数字技术的赋能效果存在明显的区域异质性。按照粮食功能区划分，其提升作用在主销区最为突出，在主产区与产销平衡区次之，三者均呈现统计显著性。这表明，数字技术的赋能效应具有普遍性，但其强度与区域的功能定位、数字化应用场景的成熟度密切相关。

6.2. 政策建议

基于上述结论，为更有效地发挥数字技术对粮食供应链韧性的赋能作用，提出以下政策建议：

夯实数字底座, 实施全域差异化赋能战略。国家层面应继续加大农村及粮食流通关键节点的数字基础设施投资, 特别是提升产销平衡区的网络覆盖质量与带宽水平。在施策时需因地制宜: 在主产区, 政策重心应偏向智慧生产, 大力推广智能农机、遥感监测、精准灌溉等生产技术, 筑牢产能根基; 在主销区, 重点应建设智慧枢纽, 发展智能仓储、冷链物流、需求预测平台, 提升流通效率与应急调配能力; 在产销平衡区, 着力打造智慧桥梁, 支持利用电商平台、直播带货等低成本数字化工具, 促进特色农产品产销对接。

聚焦中介路径, 激活数据要素配置效能。应重视并强化数字技术通过普及互联网提升韧性这一传导路径。政策上需鼓励开发适用于农业领域的低成本、易操作的数字化解决方案与公共数据平台, 降低各类经营主体接入和使用数字技术的门槛与成本, 将互联网的连通优势切实转化为供应链各环节的决策优化与协同效率。

优化政策配套, 形成数字赋能合力。在推进数字技术应用的同时, 需同步深化相关配套改革。引导财政涉农资金向数字化重点环节和短板区域倾斜; 培养既懂农业又懂数字技术的复合型人才; 建立健全农业数据产权、流通、安全和收益分配等基础制度。通过构建技术、资本、人才、制度协同发力的良好生态, 全面提升粮食供应链面对不确定性冲击的韧性与稳定性。

基金项目

国家级大学生创新创业训练计划项目(编号: 202510378236)。

参考文献

- [1] 戴媛媛. 中国粮食产业链供应链韧性分布动态与区域差距[J]. 统计与决策, 2024, 40(18): 114-119.
- [2] 左秀平, 叶林祥, 台德进, 等. 数字经济与中国粮食体系韧性: 影响效应与作用机制[J]. 统计与决策, 2024, 40(21): 117-122.
- [3] 曾俊杰, 李贤柏, 蔡扬, 等. 中国粮食供应链韧性: 时空演变及驱动因素[J]. 新疆农垦经济, 2025(2): 27-38, 92.
- [4] 陈明星. 粮食安全韧性: 内在机理、重塑路径与提升策略[J]. 贵州社会科学, 2023(11): 120-128.
- [5] 韩冬, 钟钰. 地缘因素对我国粮食进口韧性的冲击与政策响应[J]. 国际贸易, 2023(9): 52-61.
- [6] 马俊凯, 李光泗, 韩冬. 数字经济赋能粮食供应链韧性: 作用路径和政策取向[J]. 新疆社会科学, 2023(1): 46-54.
- [7] 刘慧玉, 徐礼志. 粮食安全视域下农业数字化对粮食供应链韧性的影响研究[J]. 广东农业科学, 2024, 51(9): 79-90.
- [8] 李凤廷, 弓赫. 数字经济何以赋能粮食供应链韧性——机理分析与实证检验[J]. 四川农业大学学报, 2025, 43(5): 1360-1368.
- [9] 王娟娟, 曲健. 粮食供应链韧性提高与产销空间布局优化[J]. 开发研究, 2024(6): 47-58.
- [10] 徐亚纯, 卫雅祺. 新质生产力对粮食供应链韧性的影响研究——基于中国 30 个省区市的面板数据[J]. 云南农业大学学报(社会科学), 2025, 19(2): 34-42.
- [11] 高鸣, 杨新宇. 新质生产力赋能农业强国建设: 理论阐释与战略构想[J]. 经济体制改革, 2025(6): 180-190.
- [12] 温忠麟, 叶宝娟. 中介效应分析: 方法和模型发展[J]. 心理科学进展, 2014, 22(5): 731-745.