

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2026.03.043

李承翰, 刘卫柏, 蒋健. 农业机械化对农业产业链韧性的影响研究[J]. 中国农机化学报, 2026, 47(3): 335-343

Li Chenghan, Liu Weibai, Jiang Jian. Research on the impact of agricultural mechanization on the resilience of the agricultural industry chain [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2026, 47(3): 335-343

农业机械化对农业产业链韧性的影响研究*

李承翰¹, 刘卫柏², 蒋健³

(1. 湖南工业大学城市与环境学院, 湖南株洲, 412007; 2. 曲靖师范学院管理学院, 云南曲靖, 655011;
3. 中南财经政法大学工商管理学院, 武汉市, 430073)

摘要: 农业机械化是现代农业发展的核心标志, 其在增强农业产业链韧性, 推动农业高质量发展方面发挥着重要作用。利用 2012—2023 年我国 31 个省级行政区的面板数据, 采用双向固定效应模型和中介效应模型, 实证探究农业机械化对农业产业链韧性的影响和作用机制。基准回归结果表明, 农业机械化对农业产业链韧性具有显著的促进作用, 这一结果通过包括工具变量法在内的多种稳健性检验。中介回归结果表明, 农业生产效率的提高, 农田减灾抗灾能力的增强是农业机械化促进农业产业链韧性提升的重要影响路径。异质性分析结果表明, 农业机械化对农业产业链韧性的影响不同地区存在一定的差异, 作用大小依次为东部地区、东北地区、西北地区、中部地区、西南地区; 北方地区、南方地区。研究结果为我国农业高质量发展及农业现代化转型提供实证支持与策略导向, 对优化农业资源配置、提升农业生产效率以及增强农业产业链韧性具有重要的理论与现实意义。

关键词: 农业机械化; 农业产业链韧性; 农业高质量发展; 双向固定效应模型; 中介效应模型

中图分类号: F323 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-5553 (2026) 03-0335-09

Research on the impact of agricultural mechanization on the resilience of the agricultural industry chain

Li Chenghan¹, Liu Weibai², Jiang Jian³

(1. School of Urban and Environmental Sciences, Hunan University of Technology, Zhuzhou, 412007, China;
2. School of Management, Qujing Normal University, Qujing, 655011, China; 3. School of Business Administration,
Zhongnan University of Economics and Law, Wuhan, 430073, China)

Abstract: Agricultural mechanization is a core symbol of modern agricultural development, playing an important role in enhancing the resilience of the agricultural industry chain and promoting high-quality agricultural development. Using the panel data of 31 provincial administrative regions in Chinese mainland from 2012 to 2023, this paper empirically explores the impact and mechanism of agricultural mechanization on the resilience of agricultural industry chain by using the two-way fixed effect model and the intermediary effect model. The benchmark regression results indicate that agricultural mechanization has a significant promoting effect on the resilience of the agricultural industry chain, which has passed various robustness tests including instrumental variable methods. The results of the intermediary regression indicate that the improvement of agricultural production efficiency and the enhancement of disaster reduction and resistance capabilities in farmland are important pathways for agricultural mechanization to promote the resilience of the agricultural industry chain. The heterogeneity analysis results indicate that the impact of agricultural mechanization on the resilience of the agricultural industry chain varies in different regions, with the order of effect being, eastern region, Northeast region, Northwest region, Central region, Southwest region; northern region, Southern region. This study provides strong empirical support and strategic guidance for the high-quality development and modernization transformation of agriculture in China, and has important theoretical and practical significance for optimizing agricultural resource allocation,

收稿日期: 2025 年 10 月 28 日 修回日期: 2025 年 11 月 11 日

* 基金项目: 云南省社科基金重点项目(ZD202207)

第一作者: 李承翰, 男, 1997 年生, 湖南湘潭人, 硕士研究生, 研究方向为农业经济。E-mail: 19873989692@163.com

通讯作者: 刘卫柏, 男, 1978 年生, 湖南邵阳人, 博士, 教授, 博导; 研究方向为农村经济、区域经济。E-mail: m18875267071@163.com

improving agricultural production efficiency, and enhancing the resilience of the agricultural industry chain.

Keywords: agricultural mechanization; resilience of agricultural industry chain; high-quality development of agriculture; two-way fixed effect model; intermediary effect model

0 引言

农业机械化作为现代农业发展的核心驱动力,其发展水平直接关系到农业生产效率、资源利用效率以及农业的可持续发展能力。当前,我国农业机械化正处于从数量增长向高质量发展的转型阶段,面临着区域不平衡、技术集成不足等挑战。党的二十大报告指出要“强化农业科技和装备支撑”,中央一号文件也多次强调需大力推动农业机械化发展进程,提升农业生产全程机械化,明确了农业机械化在加快推进农业农村现代化中的关键地位。2025年中央一号文件则进一步强调了以科技创新引领先进生产要素集聚的重要性,将农机装备作为推动农业科技力量协同攻关的重要内容,旨在通过政策支持与技术革新,推动农机装备产业向高端化、智能化、绿色化方向发展,助力农业现代化水平的提升。与此同时,党的二十大报告强调要“着力提升产业链供应链韧性和安全水平”,这一战略部署为农业产业链发展指明了方向。农业经济作为国民经济体系的关键支柱,其产业链在新发展格局中承担着基础支撑与战略引领的双重职能。提升农业产业链韧性,强化农业产业“风险缓冲器”与“安全压舱石”的核心作用,既是我国应对全球局势动荡与国内转型挑战的战略要务,也是保障经济社会持续健康发展的现实抉择。基于此,探讨农业机械化对农业产业链韧性的影响,对实现我国农业高质量发展具有重要现实意义。

近年来,学术界对农业机械化与农业生产之间的关系进行了广泛且深入的研究。主要从农业机械化对农业生产效率、劳动力替代效应、农民增收以及农业绿色发展方面展开了研究,从对农业生产效率的影响看,薛超^[1]和吴海霞^[2]等的研究指出,农业机械化水平的提高对种植业全要素生产率具有显著的促进作用。彭超^[3]、刘卫柏^[4]和徐志刚^[5]等的研究一致表明,农业机械化水平的提升能够显著提高农户的粮食生产效率,尤其是在土地规模经营的背景下,这种提升作用更为明显。这表明农业机械化在优化资源配置、提升生产效率方面具有不可忽视的贡献。从对劳动力替代效应的研究来看,田梦君^[6]、李秋生^[7]和李双双^[8]等的研究发现,农业机械化通过“技术替代—效率补偿”,有效缓解了农村劳动力转移带来的劳动力短缺对农业生产的冲击^[6-8]。从对农民增收的视角看,王水连^[9]和唐林^[10]等的研究均发现农业机械化服务能显著提升农

户家庭收入。从对农业绿色发展来看,徐清华^[11]、贺青^[12]以及王陆陆^[13]等的研究表明,农业机械化水平的提升对降低农业碳排放强度具有显著的正向作用。而关于农业产业链韧性的研究,主要集中于农业产业链韧性内涵及测度和农业产业链韧性的影响因素方面,较少学者关注农业机械化对农业产业链韧性的影响。农业产业链韧性内涵方面,国内外学者基于不同研究视角形成了多元阐述。其中,以Folke^[14]提出的社会—生态韧性理论为重要理论支撑,该理论框架下,农业韧性可被理解为农业系统应对外部环境变化的关键适应能力,为后续农业产业链韧性的深化研究提供了基础理论参照。于伟等^[15]指出,相较于农业脆弱性、农业适应力等与之相近的概念,农业韧性的内涵更为丰富复杂。其并非单一维度的属性,而是兼具弹性与恢复力双重核心含义,既包含农业系统在面临扰动时维持自身稳定的“弹性”特质,也涵盖系统受冲击后逐步恢复有序运行的“恢复力”特征。蒋辉等^[16]进一步指出农业韧性是指农业体系在面对自然灾害、政策调整与市场波动等外部冲击时,仍能维系其核心特征与关键功能不丧失的能力。曾雄旺等^[17]把农业产业链韧性概括为农业全链条受扰后的自我修复力以及抵御自然与市场冲击、实现恢复与重构的综合能力。农业产业链韧性测度方面,学者从不同维度构建了评价指标体系,郝爱民等^[18]从抵御能力、恢复能力、再造能力3个维度构建了评价指标体系,吕雅辉等^[19]则构建了断裂韧性—冲击韧性—演化韧性评价体系,王珊珊等^[20]则从抵御能力、恢复能力、创新力3个维度构建了农业产业链韧性评价指标体系。农业产业链韧性的影响因素方面,众多学者通过大量理论与实证研究发现,数字化水平^[21, 22]、农业科技创新^[23, 24]、农业产业融合度^[25, 26]以及农业基础设施^[27]这四大关键要素,均会对农业经济韧性产生显著影响。

综上,现有研究从多方面揭示了农业机械化在农业发展过程中的重要作用,但就农业机械化对农业产业链韧性的研究较少。既有文献就“农业机械化”与“农业产业链韧性”进行一定程度的探讨,为本文研究提供丰富的理论参考与经验借鉴,但仍存在一定局限性。(1)研究视角存在片面性,部分文献在探讨农业机械化时,聚焦于农业机械化对农业生产效率、农民增收等方面的影响,或孤立探讨农业产业链韧性的测度方法与影响因素,缺乏将两者置于统一分析框架的系统

性研究,对农业机械化如何影响农业产业链韧性的关注不足。(2)关于农业机械化与农业产业链韧性的影响机制分析不足,部分研究虽指出农业机械化会对农业韧性产生作用,但仅停留在对其表面现象的简单描述,缺乏对二者之间作用路径的深入探讨,未能清晰揭示农业机械化影响农业产业链韧性的具体内在作用机理。故而当下农业机械化发展对于农业产业链韧性会产生何种影响,有待进一步的研究与关注。鉴于此,本文基于我国2012—2023年31个省市的面板数据,就农业机械化如何影响农业产业链韧性进行全面系统的分析和论证,以期对农业机械化的持续发展和农业产业链韧性的提升提供有力的理论支撑和实践指导。

1 理论分析和研究假说

1) 农业机械化通过提高农业生产效率,进而促进农业产业链韧性的提高。作为农业现代化的重要组成部分,农业机械的大规模推广与普及,在增强农业产业链韧性过程中起到了至关重要的作用。从生产环节来看,农业机械化的使用有效突破了传统农业依赖经验驱动生产力的代际鸿沟,实现了农业生产效率的大幅提升。一方面,机械化耕种可以实现标准化作业,有效避免因人工播种导致的力度不均、间距把控不准造成的出苗率参差不齐,降低了因人工操作失误带来的生产风险与效率损耗。这种对人工失误的规避,不仅提升了农业生产环节的稳定性,而且还带来了产量的稳定,使农业生产环节具备更强的风险抵御能力。另一方面,这种作业方式可以实现深耕翻种、化肥深施,提高土地、化肥等资源利用效率,进而直接促进农作物单位面积产量的提升。稳定地农业生产,能为农业产业链供应端提供坚实保障,提高产业链在面对市场需求波动等外部冲击时的供应稳定性,增强农业产业链韧性。

同时,农业机械通过机器替代人的方式,显著提升了劳动生产效率。农业机械化的使用使单个劳动力在相同时间内的播种、灌溉和收割面积大幅增加,降低了单位农产品的劳动力成本,在显著降低对农业劳动力数量依赖的同时,促进了农业劳动生产效率的大幅提高。在面临劳动力短缺、劳动力成本上涨等冲击时,机械化程度高的农业生产方式能够凭借其较低的成本优势稳定地开展农业生产,保证农产品稳定供应,有效提升了农业产业链生产端应对风险的韧性,进而增强了整个农业产业链的抗风险能力。

2) 农业机械化通过提高农田减灾抗灾能力,进而促进农业产业链韧性的提高。农业机械化在提升农田减灾抗灾能力方面发挥着关键作用。农业机械化与智慧农业的结合使得农田灾害监测更加精准,为农田减

灾抗灾提供了更高效的解决方案,提升灾后农业恢复生产速度。一方面,搭载卫星遥感和物联网传感器等技术的农业机械装备,可以实时监测农田的土壤湿度、温度、病虫害以及气象变化情况,并生成精准的灾害预警信息,为农田减灾抗灾提供充足的时间,采取应对措施,减少灾害损失。在暴雨或台风来临前,联合收割机可快速完成作物抢收,避免作物损失,而谷物烘干机等机械化抢烘技术则进一步确保了收割后的农产品能够及时干燥处理,防止霉变,从“产后环节”阻断灾害对农业产业链的传导,强化农业产业链韧性。另一方面,在灾害发生时,农业机械化可以实现更高效的应急响应速度,促进农业快速恢复生产。在发生洪涝灾害时,大型排涝设备可以在短时间内完成农田的排水作业,防止水涝对农作物的损害,同时,播种机等设备可以在短时间内完成大面积的农作物补种和重栽等抢种工作,减少因延误播种期而导致的产量损失。在发生病虫害时,无人植保机可以实现快速、精准施药,防止病虫害的扩散。在发生干旱灾害时,智能化灌溉设备可以根据土壤肥力和作物生长需求,自动调节灌溉量,确保农作物在干旱条件下能正常生长。

综上,机械化的应用不仅能更加精准地监测农田灾害,而且提高农田救灾速度和效率,减少因灾害而导致的农产品供应中断风险,保障农业生产的稳定性和连续性,使农业产业链能够更好地应对环境风险,实现可持续发展,从根本上增强农业产业链的韧性。

综上,提出假说1:农业机械化可以促进农业产业链韧性的提升;假说2:农业机械化可以通过提高农业生产效率,进而促进农业产业链韧性的提高;假说3:农业机械化可以通过提高农田减灾抗灾能力,进而促进农业产业链韧性的提高。农业机械化对农业产业链韧性的影响机制如图1所示。

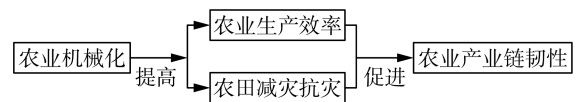


图1 影响机制图

Fig. 1 Impact mechanism diagram

2 研究设计

2.1 数据说明

选取2012—2023年我国31个省份相关面板数据进行实证研究,数据来自《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》《中国城乡建设统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国社会统计年鉴》以及各省统计年鉴及相关统计资料,部分缺失值采用线性插值法补齐。

2.2 模型设计

为检验农业机械化对农业产业链韧性的影响,构建基准回归模型如式(1)所示。

$$resis_{i,t} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln machine_{i,t} + \alpha_2 control_{i,t} + \epsilon_{i,t} + u_i + e_t \quad (1)$$

式中: i ——地区;

t ——时间;

$resis$ ——农业产业链韧性;

$\ln machine$ ——农业机械化水平;

$control$ ——控制变量;

ϵ ——随机误差项;

α_0 ——常数项;

α_1, α_2 ——系数。

在模型设定中,考虑到可能存在随时间变化以及随地区变化的遗漏变量,因此对所有模型均引入时间固定效应和地区固定效应,其中, u_i 表示地区固定效应,用于捕捉不同地区之间存在的异质性, e_t 表示时间固定效应,用于控制随时间变化的共同因素。

为验证假说2和假说3,参考江艇^[28]的做法,构建中介效应模型如式(2)所示。

$$M_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 \ln machine_{i,t} + \beta_2 control_{i,t} + \epsilon_{i,t} + u_i + e_t \quad (2)$$

式中: M ——中介变量;

β_0 ——常数项;

β_1, β_2 ——系数。

2.3 变量选取

1) 被解释变量:农业产业链韧性($resis$)。农业产业链韧性是指农业产业链在面对自然灾害、市场波动、政策调整等内外部冲击时,能够维持自身稳定运行并恢复到原有状态的能力,它体现了农业产业链的抗风险能力和自我修复能力。农林牧渔业总产值是农业生产能力、生产规模和经济效益的综合体现,反映了农业产业链在一定时期内的整体运行效率和产出规模。因此,使用农林牧渔业总产值的“偏离程度”可以作为衡量农业产业链韧性的指标。借鉴张树山^[29]和蒋健^[30]等的研究方法,通过构建计量经济模型,并利用残差项(即实际观测值与模型估计值之间的差异)来刻画各地区农林牧渔业在不同时间段内遭遇外部干扰时的动态变化与响应情况。残差项的绝对值数值越大,意味着农业产业链在面对冲击时展现出更强的韧性;反之,则表明其韧性较弱。具体计算如式(3)所示。

$$\ln agdp = \gamma_0 + \gamma_1 \ln area_{i,t} + \gamma_2 \ln labor_{i,t} + \gamma_3 \ln edu_{i,t} + \gamma_4 \ln financial_{i,t} + \epsilon_{i,t} + u_{i,t} + e_{i,t} \quad (3)$$

式中: $\ln agdp$ ——农林牧渔业总产值;

$\ln area$ ——农作物总播种面积;

$\ln labor$ ——农业从业人员;

$\ln edu$ ——农村人力资本,参考 Lee 等^[31]的做法,采用农村人均受教育年限衡量;

$\ln financial$ ——财政支农强度;

γ_0 ——常数项;

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ ——系数。

2) 解释变量:农业机械化($machine$)。农业机械总动力的高低不仅体现该地区在农业生产中投入的机械化设备数量,更是衡量农业现代化水平的核心要素。然而单纯依赖总动力数值的简单比较,易陷入“规模陷阱”,某地区农业机械总动力的绝对值增长,可能仅反映设备数量的简单累加,而无法准确表征其实际生产效率提升。因此,本文以农业机械总动力与农作物总播种面积的比值作为衡量农业机械化水平的指标。这种衡量方式综合考虑了机械化设备的投入规模与农业生产的规模,能够更准确地反映农业机械化对农业生产效率提升的实际贡献。

3) 中介变量:农业生产效率(eff)。农业机械化能够通过减少劳动力依赖,提高单位劳动力产出,提升农业劳动生产效率,增强农业产业链在面对外部冲击时的稳定性和恢复能力,从而提高农业产业链的韧性。因此,采用农林牧渔业总产值与第一产业从业人员的比值衡量农业生产效率,该比值越大,表明单位劳动力创造的经济价值越高,反映出农业劳动生产效率的提升。农田减灾抗灾(dis)。采用农作物受灾面积与农作物总播种面积的比值衡量,农田受灾率的大小直接反映了灾害对农业生产的影响范围与冲击强度。农田受灾率会对农业生产造成直接破坏,导致农作物减产、农业设施受损,影响农业生产的连续性和稳定性,对农业产业链韧性产生冲击。

4) 控制变量:借鉴郝爱民^[25]、郭岩峰^[32]和蒋健^[33]等研究,选取5个变量作为控制变量。(1)地区交通水平($traffic$),用乡道公路里程数表示,这一指标是衡量农业交通基础设施完善程度及便利性的重要依据,交通基础设施的完善,有利于农机设备作业以及农产品的运输,为农业产业链韧性的提升提供了有力支撑。(2)农业产业结构($astruc$),以农业产值与农林牧渔业总产值的比值衡量,农业产业结构的优化有助于农业资源的合理配置和高效利用,进一步推动农业产业链韧性的发展。(3)城镇化率($urban$),以城镇人口与地区总人口之比衡量,城镇化进程促进了农村人口向城镇转移,导致农村劳动力减少,这会迫使农业生产方式向机械化转变,从而促进农业产业链韧性的提升。(4)地区农业占比($aper$),以第一产业增加值占地区生产总值的比重来

量化,较高的农业占比说明该地区对农业发展较为重视,有更多的资源和政策倾向于农业领域,这为农业发展提供了良好的政策环境和资金支持。(5)电力基础设施(*electr*),以农村用电量与地区农村总人口之比衡量,用电量的增加,表明农村电气化水平的提高,这为农业机械化 and 智能化应用提供重要支撑。变量定义如表 1 所示。

表 1 变量定义
Tab. 1 Variable definition

变量类型	变量名称	变量说明
解释变量	农业机械化(<i>machine</i>)	农业机械总动力/农作物总播种面积
被解释变量	农业产业链韧性(<i>resis</i>)	农林牧渔业总产值的“偏离程度”
中介变量	农业生产效率(<i>eff</i>)	农林牧渔业总产值/第一产业从业人员
	农田减灾抗灾(<i>dis</i>)	农作物受灾面积/农作物总播种面积
控制变量	地区交通水平(<i>traffic</i>)	乡道公路里程数
	农业产业结构(<i>astruc</i>)	农业产值/农林牧渔业总产值
	城镇化率(<i>urban</i>)	城镇人口/地区总人口
	地区农业占比(<i>aper</i>)	第一产业增加值/地区生产总值
	电力基础设施(<i>electr</i>)	农村用电量/地区农村总人口

3 实证分析

3.1 基准回归结果与分析

为消除异方差问题对估计结果的影响,对关键变量进行对数化处理:农业机械化水平(*lnmachine*)、农业生产效率(*lneff*)、农田减灾抗灾(*lndis*)和地区交通水平(*lntraffic*)。基准回归结果详见表 2。

如表 2 所示,列(1)~列(4)分别展示采用普通最小二乘法(OLS)、时间固定效应、省份固定效应以及双向固定效应模型得到的估计结果。为确定适合的模型,进行 Hausman 检验和 F 检验。由检验结果表明,固定效应模型更适合本文研究。此外,考虑到农业机械化对农业产业链韧性的影响可能具有时间持续性特征,即存在时间惯性,且模型中可能包含随时间变化的遗漏变量,因此,在后续分析中统一采用能够同时控制时间和省份因素的双向固定效应模型。表 2 列(1)~列(4)农业机械化水平的系数均显著为正,这表明农业机械化对农业产业链韧性的影响在不同模型设定下均表现为促进作用。表 2 列(4)结果显示,农业机械化对农业产业链韧性具有显著的正向促进作用,即农业机械化每提升 1%,农业产业链韧性提高 0.000 8,从而初

步验证假说 1。

表 2 基准回归分析
Tab. 2 Baseline regression analysis

变量	(1) OLS	(2) 时间固 定效应	(3) 省份固 定效应	(4) 双向固 定效应
<i>lnmachine</i>	0.047*** (0.018)	0.050*** (0.019)	0.045** (0.023)	0.080** (0.039)
<i>lntraffic</i>	0.019** (0.007)	0.020** (0.008)	0.104*** (0.033)	0.029 (0.031)
<i>astruc</i>	0.067 (0.073)	0.078 (0.077)	-0.138 (0.222)	0.246 (0.218)
<i>urban</i>	0.099 (0.062)	0.119* (0.072)	0.638*** (0.154)	3.761*** (0.373)
<i>electr</i>	0.000*** (0.000)	0.000*** (0.000)	0.000*** (0.000)	0.000* (0.000)
<i>aper</i>	0.393*** (0.140)	0.408*** (0.145)	3.469*** (0.673)	3.623*** (0.668)
常数项	0.476*** (0.136)	0.673*** (0.188)	1.055*** (0.370)	1.256*** (0.449)
时间固定效应	—	YES	NO	YES
省份固定效应	—	NO	YES	YES
N	372	372	372	372
R ²	0.053	0.054	0.222	0.382

注: * 表示 $p < 0.1$, ** 表示 $p < 0.05$, *** 表示 $p < 0.01$,括号里为稳健标准误。下同。

3.2 机制分析

为检验农业机械化水平是否通过前文所述的两种途径,增强农业产业链韧性,本文采用两步法中介效应模型进行分析。基于表 2 中的基准回归结果,进一步得到表 3 的估计结果。其中,列(1)~列(3)分别展示了基准回归结果、农业机械化对农业生产效率、农业机械化对农田减灾抗灾的回归结果。

表 3 中介效应分析
Tab. 3 Analysis of intermediation effects

变量	(1) <i>resis</i>	(2) <i>lneff</i>	(3) <i>lndis</i>
<i>lnmachine</i>	0.080** (0.039)	0.136** (0.055)	-0.529* (0.313)
控制变量	YES	YES	YES
时间固定效应	YES	YES	YES
省份固定效应	YES	YES	YES
N	372	372	372
R ²	0.382	0.956	0.588

结果显示,农业机械化对农业生产效率的影响显著为正,表明农业机械化通过提高农业生产效率进而促进农业产业链韧性的提升,从而验证假说 2。而农业机械化对农田减灾抗灾的影响显著为负,表明农业机械化通

过减少农田受灾面积,增强农田减灾抗灾能力,进而增强农业产业链韧性,假说3得到验证。农业机械化作为农业现代化的重要支撑,不仅提升农业生产效率,还通过精准施肥、精准施药等技术手段,增强农田减灾抗灾能力,增强农业产业链韧性,促进农业高质量发展。

3.3 异质性分析

为了深入探讨农业机械化水平对各地区农业产业链韧性影响的差异性,依据地理区位将样本划分为若干区域,将全国31个省份划分为东北、东部、中部、西北、西南以及北方、南方。结果如表4所示。异质性分析结果表明,农业机械化对农业产业链韧性的影响在不同地区均显著为正,但具体的作用大小却存在显著差异。作用大小依次为东部地区、东北地区、西北地区、中部地区、西南地区,北方地区、南方地区。可能的解释是:东部地区地形相对平坦,且经济发达,农业科技水平较高,便于先进的农业机械设备和技术推广与应用,从而促进农业生产的现代化和集约化,不仅能提高农业生产效率,还有利于农业产业结构的优化和升级。东北地区是我国重要的粮食主产区,拥有广阔的连片耕地和肥沃的黑土地资源,这些都为农业机械化的广泛应用提供了得天独厚的环境,适合大规模农业机械的作业和规模化经营,能够大幅提高农业生产效率促进农业产业链韧性的提升。西北地区虽然经济相

对欠发达,但土地辽阔,耕地集中分布于关中平原、河西走廊、新疆绿洲等核心农业区,形成以大农场经营、专业化连片种植为主的生产模式,这种生产格局天然适配大规模机械化作业。加之,国家对西部地区农业发展的重视,针对西北地区的农业机械化专项投入持续加大,引进适配当地干旱、温差大等环境特征的农机设备,有效提高农业生产效率,增强农业产业链的稳定性。相比之下,中部地区虽然也具备一定的农业机械化基础,但由于地处平原和丘陵地带,地形复杂,耕地分散,地区内机械化水平差异较大,农业机械化的推广普及程度要低于东部和东北地区。而西南地区以山地、喀斯特地貌为主,地形复杂、土地细碎化,农业机械化的发展面临诸多挑战,大规模农业机械化耕作的水平较低,因此,农业机械化对西南地区的农业产业链韧性的提升幅度也相对较小。至于北方和南方的差异,北方地区以平原为主,耕地连片,气候适宜,有利于农业机械化的大规模作业。而南方地区则以丘陵和山地地形居多,地形复杂,且气候湿润多雨,对农业机械化的应用造成了一定限制。因此,北方地区的农业机械化水平相对较高,对农业产业链韧性的提升作用也更加显著。这些结果表明,在制定农业政策时,需要考虑地区差异,因地制宜地推动农业机械化发展,以促进农业产业链韧性的提升。

表4 异质性回归分析

Tab. 4 Heterogeneity regression analysis

变量	(1) 东北	(2) 东部	(3) 中部	(4) 西北	(5) 西南	(6) 北方	(7) 南方
$\ln machine$	0.262*** (0.131)	0.309*** (0.087)	0.107*** (0.032)	0.110* (0.065)	0.075** (0.038)	0.448** (0.224)	0.102*** (0.030)
控制变量	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
时间固定效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
省份固定效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
N	36	120	72	72	72	180	192
R^2	0.961	0.415	0.536	0.662	0.880	0.522	0.597

3.4 稳健性检验

为进一步验证假说1,进行稳健性检验,确保研究结果的可靠性与稳健性。(1)聚类稳健标准误。为避免模型中可能存在的异方差和自相关问题,采用聚类稳健标准误进行回归分析,以省份作为聚类单位。这种方法能够有效处理面板数据中个体层面的潜在相关性,增强估计结果的稳健性。回归结果如表5所示,核心解释变量的估计系数在聚类稳健标准误下依然显著,表明研究结论不受异方差或自相关问题的影响。(2)替换解释变量。为验证结果对不同代理变量的敏感性,选取农业机械总动力(mov)替换农业机械化进行重新估计。农业机械总动力是衡量农业机械化程度

的重要指标,能够从不同角度反映农业机械化对农业产业链韧性的影响。回归结果如表5所示,核心解释变量的估计系数在替换后依然稳健,进一步证实农业机械化对农业产业链韧性的显著促进作用。(3)增加控制变量。为排除其他潜在因素对结果的干扰,在原模型基础上增加城乡人口流动($migration$)作为控制变量。城乡人口流动以农村户籍人口与农村常住人口的差值衡量,是反映劳动力要素在城乡间流动的重要指标。通过引入这一变量,能够更全面地捕捉农业产业链韧性的影响因素,确保核心解释变量不受遗漏变量偏误的影响。回归结果表5显示,增加城乡人口流动这一控制变量,核心解释变量的估计系数依然显著为正,进一

步验证了农业机械化对农业产业链韧性具有显著的正向影响。(4)工具变量法。参考蒋健等^[33]的做法,采用解释变量农业机械化的滞后一阶项作为工具变量,并运用两阶段最小二乘法(2SLS)对模型可能存在的内生性问题进行缓解。在选择工具变量时,必须确保其满足外生性和相关性两个关键条件。一方面,从相关性角度来看,农业机械化的发展存在一定的惯性,当前值与其滞后一期值之间存在高度相关性,这满足工具变量的相关性条件。另一方面,就外生性而言,由于滞后变量是在当前期之前就已经确定的,因此它具有“前定”的特性,这意味着它与当前期的随机扰动项不存在相关性,从而满足了外生性条件。回归结果表5显示,工具变量通过不可识别检验(Kleibergen-Paap rk LM statistic)和弱识别检验(Cragg-Donald Wald F statistic),说明所选工具变量是合适的,同时核心解释变量的估计系数依然显著为正,进一步验证结论的稳健性。

综上,通过采用聚类稳健标准误、替换解释变量、增加控制变量以及工具变量法等多种方法进行稳健性检验,研究结论得到充分验证,表明农业机械化会促进农业产业链韧性提升的结论是可靠的。

表5 稳健性检验
Tab. 5 Robustness test

变量	(1) 聚类 稳健 标准误	(2) 替换 解释 变量	(3) 增加 控制 变量	(4) 解释 变量滞后 一阶
<i>lnmachine</i>	0.080* (0.048)	—	0.089** (0.039)	0.031* (0.018)
<i>lnmov</i>	—	0.014** (0.007)	—	—
控制变量	YES	YES	YES	YES
<i>lnmigration</i>	—	—	-0.306*** (0.108)	—
时间固定 效应	YES	YES	YES	YES
省份固定 效应	YES	YES	YES	YES
Kleibergen-Paap rk LM 检验	—	—	—	118.829
CDW 检验	—	—	—	3 312.637
<i>N</i>	372	372	372	341
<i>R</i> ²	0.382	0.374	0.397	0.044

4 研究结论与政策建议

4.1 结论

运用双向固定效应模型和中介效应模型,实证探

究农业机械化对农业产业链韧性的影响效应及其作用机理。

1) 基准回归结果表明,农业机械化对农业产业链韧性具有显著的正向促进作用,这一结果通过包括工具变量法在内的多种稳健性检验。

2) 中介回归结果表明,农业生产效率的提高,农田减灾抗灾能力的增强是农业机械化促进农业产业链韧性提升的重要影响路径。

3) 异质性分析结果表明,农业机械化对农业产业链韧性的影响在不同地区间存在一定的差异,作用大小依次为东部地区、东北地区、西北地区、中部地区、西南地区;北方地区、南方地区。

4.2 政策建议

1) 政府应加大对农业机械化的推广与应用力度,针对区域异质性特征,实施差异化补贴政策。针对东部及北方规模化种植地区,加大对大型联合采收机、大型烘干机等设备的推广力度,强化减灾抗灾能力,提升农业生产全链条机械化覆盖率,进一步提高农业生产效率,同时,重点补贴高端智能农机装备,推动农机技术迭代更新。中部地区需加强中小型、多功能农机设备的普及,实行分地形补贴,提高丘陵地区补贴比例,避免因地形差异导致的机械化覆盖断层,逐步缩小区域内机械化水平差距。西北地区优先推广和补贴节水化、耐旱化的专用农机,强化农田抗旱能力。西南丘陵山区应重点推广和补贴微型、山地适用型农机设备,通过设备适配弥补地形对机械化应用的限制,提高农业生产效率和农业产业链韧性,缩小与东部和东北地区的机械化水平差距。

2) 完善农业基础设施建设,农业基础设施建设是提升农业机械化与农业产业链韧性的关键保障。加强以农田水利为重点的农业基础设施建设,重点推进田间道路标准化改造,为农业机械化作业创造基础条件。同时增加对农村道路、灌溉系统、仓储物流等基础设施的投资,构建“田一路一库一市”无缝衔接的基础设施网络,为农业机械化作业及农产品流通创造更加便利的条件以增强农业产业链韧性。

3) 加强农业科技研发与创新。农业科技研发与创新是提升农业机械化水平的重要支撑,政府应加大对农业科技研发的投入,鼓励科研机构与企业深化农业机械化技术的创新研究,构建“政产学研用”协同创新平台,推动农业机械化与信息化、智能化的深度融合,发展智慧农机系统,全面提升农业生产的智能化水平与综合效益。

4) 加强区域农机技术协同与共享。通过技术许可、人才交流与设备共享等模式促进农业机械化技术

的共享与交流。同时,实施农机技术发达地区与欠发达地区的对口支援项目,重点加强适用于丘陵山区的农机联合研发与推广,帮助其突破地形限制,提升农业机械化水平以促进农业产业链韧性的提升,同时缩小地区间的农业机械化发展差距。

5) 推动农田宜机化改造,实施差异化分区改造。针对中部、西南丘陵山区地带,侧重小型化与适应性改造,推行“宜机化+梯田化”复合改造模式,通过地块合并并将细碎化土地块改造为“窄幅宽、缓坡度”的适配田块,并建设小型农机机耕道,为机械化作业创造基础条件。同时,针对平原地区,聚焦“小并大”,实施田块整合,开展“万亩级”连片农田适机化改造,建设大型农机机耕道与机耕道硬化,保障大型农机高效作业。

参 考 文 献

- [1] 薛超, 史雪阳, 周宏. 农业机械化对种植业全要素生产率提升的影响路径研究[J]. 农业技术经济, 2020(10): 87-102.
Xue Chao, Shi Xueyang, Zhou Hong. Influence path of agricultural mechanization on total factor productivity growth in planting industry [J]. Agricultural Technology and Economy, 2020(10): 87-102.
- [2] 吴海霞, 郝含涛, 史恒通, 等. 农业机械化对小麦全要素生产率的影响及其空间溢出效应[J]. 农业技术经济, 2022(8): 50-68.
Wu Haixia, Hao Hantao, Shi Hengtong, et al. Effect of agricultural mechanization on total factor productivity of wheat and its spatial spillover effect [J]. Agricultural Technology and Economics, 2022(8): 50-68.
- [3] 彭超, 张琛. 农业机械化对农户粮食生产效率的影响[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2020, 19(5): 93-102.
Peng Chao, Zhang Chen. Assessment of agricultural mechanization on farmers' grain aggregated production efficiency [J]. Journal of South China Agricultural University (Social Science Edition), 2020, 19(5): 93-102.
- [4] 刘卫柏, 李双双, 李中, 等. 水稻种植机械与农村劳动力的替代弹性及其对粮食产出的影响[J]. 经济地理, 2022, 42(12): 172-178.
Liu Weibai, Li Shuangshuang, Li Zhong, et al. Substitution elasticity of rice planting machinery and rural labor and its impact on grain output [J]. Economic Geography, 2022, 42(12): 172-178.
- [5] 徐志刚, 郑姗, 刘馨月. 农业机械化对粮食高质量生产影响与环节异质性——基于黑、豫、浙、川四省调查数据[J]. 宏观质量研究, 2022, 10(3): 22-34.
- [6] 田梦君, 熊涛, 张鹏静. 劳动力转移对耕地抛荒的影响研究——基于农业机械化的调节效应分析[J]. 世界农业, 2023(11): 103-114.
- [7] 李秋生, 傅青, 刘小春. 劳动力转移、农业机械权属与农户生产效率[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(6): 294-302.
Li Qiusheng, Fu Qing, Liu Xiaochun. Labor transfer, ownership of agricultural machinery and farmers' productivity [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(6): 294-302.
- [8] 李双双, 刘卫柏, 蒋健. 农业机械化可以解决农业劳动力短缺吗? [J]. 中国农机化学报, 2024, 45(7): 316-322, 336.
Li Shuangshuang, Liu Weibai, Jiang Jian. Can agricultural mechanization solve the shortage of agricultural labour? [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(7): 316-322, 336.
- [9] 王水连, 辛贤. 中国甘蔗种植机械与劳动力的替代弹性及其对农民收入的影响[J]. 农业技术经济, 2017(12): 32-46.
- [10] 唐林, 罗小锋, 张俊飏. 购买农业机械服务增加了农户收入吗——基于老龄化视角的检验[J]. 农业技术经济, 2021(1): 46-60.
- [11] 徐清华, 张广胜. 农业机械化对农业碳排放强度影响的空间溢出效应——基于282个城市面板数据的实证[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(4): 23-33.
Xu Qinghua, Zhang Guangsheng. Spatial spillover effect of agricultural mechanization on agricultural carbon emission intensity: An empirical analysis of panel data from 282 cities [J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(4): 23-33.
- [12] 贺青, 张俊飏, 张虎. 农业机械化对农业碳排放的影响——来自粮食主产区的实证[J]. 统计与决策, 2023, 39(1): 88-92.
- [13] 王陆陆, 许雨萱, 柴嫔嫔, 等. 农业机械化水平对农业碳排放强度影响研究——基于2004—2021年30个省域面板数据检验[J]. 中国农业资源与区划, 2025, 46(8): 55-66.
Wang Lulu, Xu Yuxuan, Chai Zhenzhen, et al. Impact of agricultural mechanization development on agricultural carbon emission intensity: Based on a panel data for 30 provinces from 2004-2021 [J]. China Agricultural Resources and Zoning, 2025, 46(8): 55-66.
- [14] Folke C. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses [J]. Global Environmental Change, 2006, 16(3): 253-267.
- [15] 于伟, 张鹏. 中国农业发展韧性时空分异特征及影响因素研究[J]. 地理与地理信息科学, 2019, 35(1): 102-108.
Yu Wei, Zhang Peng. Study on the spatial-temporal differentiation characteristics and influencing factors of agricultural development resilience in China [J]. Geography and Geographic Information Science, 2019, 35(1): 102-108.
- [16] 蒋辉, 张驰, 蒋和平. 中国农业经济韧性对农业高质量发展的影响效应与机制研究[J]. 农业经济与管理, 2022(1): 20-32.
Jiang Hui, Zhang Chi, Jiang Heping. Study on effect

- and mechanism of China's agricultural economic resilience on agricultural high-quality development [J]. *Agricultural Economics and Management*, 2022(1): 20-32.
- [17] 曾雄旺, 张湘琦, 左声亮, 等. 中国中部地区农业产业链韧性时空分异及其影响因素——基于2011—2022年80个地级区域数据[J]. *地理科学进展*, 2025, 44(9): 1807-1818.
- [18] 郝爱民, 解梦菡, 刘育廷. 农业产业链韧性水平测度与时空演变[J]. *统计与决策*, 2024, 40(16): 95-100.
- [19] 吕雅辉, 袁佳伟, 张斯琪, 等. 农业产业链韧性、区域差异及动态演进[J]. *统计与决策*, 2025, 41(3): 87-93.
- [20] 王珊珊, 高铭阳, 吕杰. 数字经济、产业融合、农业产业链韧性: 指数测算与效应检验[J]. *统计与决策*, 2025, 41(2): 11-16.
- [21] 赵巍, 徐筱雯. 数字经济对农业经济韧性的影响效应与作用机制[J]. *华南农业大学学报(社会科学版)*, 2023, 22(2): 87-96.
- Zhao Wei, Xu Xiaowen. The impact and mechanism of digital economy on agricultural economic resilience [J]. *Journal of South China Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2023, 22(2): 87-96.
- [22] 曾雄旺, 张湘琦, 李志胜, 等. 数字普惠金融对农业产业链韧性影响的空间效应[J]. *经济地理*, 2025, 45(2): 183-191.
- Zeng Xiongwang, Zhang Xiangqi, Li Zhisheng, et al. Spatial effect of digital inclusive finance on the resilience of agricultural industry chain [J]. *Economic Geography*, 2025, 45(2): 183-191.
- [23] 彭长生, 黄兴宇, 王澎, 等. 农业科技创新对粮食生产韧性的影响[J]. *科技导报*, 2024, 42(16): 47-57.
- Peng Changsheng, Huang Xingyu, Wang Peng, et al. The impact of agricultural technological innovation on the resilience of grain production [J]. *Science and Technology Review*, 2024, 42(16): 47-57.
- [24] 李敬锁, 万群. 农业技术创新对农业经济韧性的影响——基于财政支农政策的门槛效应分析[J]. *农业技术经济*, 2025(3): 4-17.
- Li Jingsuo, Wan Qun. The impact of agricultural technology innovation on agricultural economic resilience: Threshold effect analysis based on fiscal support for agriculture policies [J]. *Agricultural Technology and Economics*, 2025(3): 4-17.
- [25] 郝爱民, 谭家银. 农村产业融合赋能农业韧性的机理及效应测度[J]. *农业技术经济*, 2023(7): 88-107.
- Hao Aimin, Tan Jiayin. Empowering agricultural resilience by rural industrial integration: Influence mechanism and effect analysis [J]. *Agricultural Technology and Economics*, 2023(7): 88-107.
- [26] 李义姝, 严奉宪. 农业产业集聚对农业经济韧性的影响研究——以长江中下游77个地级市为例[J]. *农业技术经济*, 2025(4): 38-53.
- Li Yishu, Yan Fengxian. Research on the impact of agricultural industry agglomeration on agricultural economic resilience: A case study of 77 prefecture level cities in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Agricultural Technology and Economics*, 2025(4): 38-53.
- [27] 唐莹, 陈梦涵. 农业基础设施对农业经济韧性的作用机制与效应研究[J]. *农林经济管理学报*, 2023, 22(3): 292-300.
- Tang Ying, Chen Menghan. Research on the mechanism and effect of agricultural infrastructure on agricultural economic resilience [J]. *Journal of Agriculture and Forestry Economic Management*, 2023, 22(3): 292-300.
- [28] 江艇. 因果推断经验研究中的中介效应与调节效应[J]. *中国工业经济*, 2022(5): 100-120.
- [29] 张树山, 谷城, 张佩雯, 等. 智慧物流赋能供应链韧性提升: 理论与经验证据[J]. *中国软科学*, 2023(11): 54-65.
- Zhang Shushan, Gu Cheng, Zhang Peiwen, et al. Intelligent logistics empowers supply chain resilience: Theory and empirical evidence [J]. *China Soft Science*, 2023(11): 54-65.
- [30] 蒋健, 吴海涛. 农村劳动力老龄化对农业产业链韧性的影响——基于数字技术和数字普惠金融视角下的分析[J]. *南京农业大学学报(社会科学版)*, 2025, 25(1): 168-181.
- Jiang Jian, Wu Haitao. The impact of aging rural labor force on the resilience of agricultural industry chain: Analysis from the perspective of digital technology and digital inclusive finance [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2025, 25(1): 168-181.
- [31] Lee J, Ihm J, Ryu D. Human capital measures and stock return predictability: Macroeconomic versus microeconomic approaches [J]. *Finance Research Letters*, 2017, 21: 53-56.
- [32] 郭岩峰, 张春艳. 产业数字化、绿色技术创新与农业产业链韧性[J]. *技术经济与管理研究*, 2023(10): 117-122.
- Guo Yanfeng, Zhang Chunyan. Industrial digitization, green technology innovation and agricultural industry chain resilience [J]. *Research on Technology Economics and Management*, 2023(10): 117-122.
- [33] 蒋健, 吴海涛, 李双双, 等. 农村人口老龄化对农业经济韧性的影响——基于生产要素视角的分析[J]. *华东经济管理*, 2024, 38(8): 94-105.
- Jiang Jian, Wu Haitao, Li Shuangshuang, et al. Impact of rural population aging on the resilience of the agricultural economy: Analysis based on the perspective of production factors [J]. *East China Economic Management*, 2024, 38(8): 94-105.