

农业机械化对粮食生产韧性的影响研究

郭俊霞*, 张玲#, 郑晨露, 刘忠宽

河北农业大学经济管理学院, 河北 保定

收稿日期: 2026年2月28日; 录用日期: 2026年3月27日; 发布日期: 2026年4月3日

摘要

粮食安全是维系国家稳定的战略基石, 粮食生产韧性作为保障粮食安全的核心指标, 其提升对应对全球市场波动与极端气候等挑战至关重要。本文基于2014~2023年我国30个省份的面板数据, 采用实证研究方法, 构建基准回归模型、中介效应模型, 系统探究农业机械化对粮食生产韧性的影响及作用机制, 并通过稳健性、内生性、异质性检验验证结论可靠性。研究结果表明: 第一, 农业机械化对粮食生产韧性具有显著正向提升作用, 该结论经稳健性与内生性检验后依然成立; 第二, 土地产出率在二者关系中发挥部分中介作用, 农业机械化通过实现生产精细化、促进规模化经营等提升土地产出率, 进而间接增强粮食生产韧性; 第三, 该影响存在显著异质性, 乡村振兴战略实施后、低地形起伏区及非西部地区的农业机械化对粮食生产韧性的提升效果更为突出。基于研究结论, 本文提出提升农机化发展质量、促进规模化经营与农机化协同发展、精准赋能农机化发展等对策建议, 为筑牢国家粮食安全屏障提供理论支撑与实践参考。

关键词

农业机械化, 粮食生产韧性, 土地产出率

Study on the Influence of Agricultural Mechanization on the Toughness of Grain Production

Junxia Guo*, Ling Zhang#, Chenlu Zheng, Zhongkuan Liu

College of Economic Management, Hebei Agricultural University, Baoding Hebei

Received: February 28, 2026; accepted: March 27, 2026; published: April 3, 2026

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 郭俊霞, 张玲, 郑晨露, 刘忠宽. 农业机械化对粮食生产韧性的影响研究[J]. 农业科学, 2026, 16(4): 510-523. DOI: 10.12677/hjas.2026.164067

Abstract

Food security is the strategic cornerstone to maintain national stability. As the core index to ensure food security, the improvement of food production resilience is very important to meet the challenges of global market fluctuation and extreme climate. Based on the panel data of 30 provinces in China from 2014 to 2023, this paper uses empirical research methods to construct benchmark regression model and intermediary effect model, systematically explores the influence and mechanism of agricultural mechanization on grain production resilience, and verifies the reliability of the conclusion through robustness, endogeneity, and heterogeneity tests. The results show that: firstly, agricultural mechanization has a significant positive effect on the toughness of grain production, and this conclusion is still valid after the robustness and endogenous test; secondly, the land output rate plays a partial intermediary role in the relationship between them. Agricultural mechanization enhances the land output rate by realizing fine production and promoting large-scale operation, thus indirectly enhancing the resilience of grain production. Thirdly, the impact is significantly heterogeneous. After the implementation of rural revitalization strategy, agricultural mechanization in low-lying areas and non-western areas has a more prominent effect on improving the toughness of grain production. Based on the research conclusion, this paper puts forward some countermeasures and suggestions, such as improving the development quality of agricultural mechanization, promoting the coordinated development of large-scale operation and agricultural mechanization, and accurately empowering the development of agricultural mechanization, so as to provide theoretical support and practical reference for building a national food security barrier.

Keywords

Agricultural Mechanization, Grain Production Toughness, Land Output Rate

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

农业机械化作为现代化的核心支撑，与粮食生产韧性之间存在着深度耦合的内在关联，是筑牢粮食生产韧性的关键力量。农业机械化作为农业现代化的核心标志，除了代替人工劳动力、提高作用效率外，其更重要的标志是已经深入贯穿粮食生产的全链条。在粮食生产全过程中，机械化技术的应用不仅带来传统生产模式的改变，更在资源利用、风险抵御、效率提升等方面重塑了粮食生产系统的运行逻辑。但现有研究多聚焦于农业机械化对粮食产量、生产效率的直接影响，或单独探讨粮食生产韧性的提升路径，却忽视了二者之间深度的内在关联。本文将农业机械化同粮食生产韧性进行关联研究，并探讨其作用机制，关键在于实践需求和理论不足的双重驱动。

粮食安全是“国之大者”。粮食安全不仅是基本的生存需求，更是维系国家稳定、保障民生福祉的战略基石。党的二十大报告提出“全方位夯实粮食安全根基”，这是基于粮食战略价值做出的重大判断，充分体现了对粮食安全的高度重视。2025年中央一号文件也围绕粮食安全做出了全新阐述及明确部署。如今全球粮食市场波动加剧、极端气候事件频发，粮食安全的重要性愈发凸显。而粮食生产韧性作为衡量区域粮食系统应对内外扰动、维持稳定产出能力的关键指标，其强弱直接决定了粮食安全的保障水平。我国以世界百分之九的耕地养育了世界近五分之一的人口，粮食虽连年丰收，但仍面临粮

食生产韧性基础不稳固、难以适应不断增长的粮食需求和结构变化等问题,加之耕地“非粮化”趋势加剧、水土资源和生态环境压力也越来越大。在此背景下,保障粮食生产韧性不仅是实现经济社会稳定发展的前提,更是应对全球粮食市场波动、维护国家主权的战略需求。在此背景下,如何通过技术创新强化粮食生产韧性,成为保障国家粮食安全必须破解的重要课题。因此,研究农业机械化与粮食生产韧性的内在关联和影响机制,一方面是应对现实风险挑战的必然选择,另一方面也能丰富农业技术与粮食生产韧性交叉领域的欠缺,对推动农业机械化高质量发展,筑牢国家粮食安全屏障具有重要的实践价值与理论意义。

本文拟采用实证研究的方法,通过收集我国 30 个省份农业机械化水平、粮食生产韧性相关数据,构建基准回归模型,定量分析农业机械化对粮食生产韧性的作用效果和土地产出率的中介传导作用。在研究视角上,突破以往将农业机械化与粮食生产韧性分开研究的局限,从两者相互关系的角度出发,系统探究农业机械化对粮食生产韧性的影响,丰富了粮食生产韧性影响因素的理论研究,为农业技术进步与粮食生产关系研究提供了新的视角。

2. 文献综述

2.1. 粮食生产韧性的内涵与影响因素

粮食生产韧性这一概念是 Tendall 将韧性理论引入粮食体系中而产生的[1]。粮食生产韧性是粮食安全韧性的重要组成部分[2],是粮食体系韧性的重要方面[3]。蔡林军将粮食生产韧性概括为粮食生产过程中生产要素受到外界冲击时,要素分配组合能迅速调整及向新均衡路径转变以实现应对冲击的能力[4]。

现有研究对于粮食生产韧性的影响因素主要聚焦于宏观层面,而关注微观因素对粮食生产韧性影响的较少。郝爱民和谭家银基于省域面板数据发现数字乡村建设有助于提升粮食体系韧性[5],高雪、李欠男通过研究高标准农田建设对粮食生产韧性的影响,发现高标准农田建设能显著推动农业技术进步、提高农田灌溉面积、增强农业机械化水平,从而有效提升了粮食生产韧性[6]。朱满德和张青认为农业生产性服务通过规模化效应和专业化效应促进粮食生产韧性提升[7]。蒋辉等人研究发现城镇化率、科技因素和农业生产资料价格变动为影响粮食生产韧性的主要因素[8]。在自然因素方面,范振楠等通过检验极端气温对粮食生产韧性的影响,发现极端气温显著降低了粮食生产韧性水平,且极端高温对粮食生产韧性的负向影响更大[9]。陈有华等同样得出相似的结论,积温的上升以及降雨的亏缺或过量都会抑制粮食生产韧性,提高作物多样性程度缓解了积温上升对粮食生产韧性的负向影响,但对降雨的影响并不明显[10]。

2.2. 农业机械化的效应研究

对于农业机械化带来的影响,不同学者从不同方面对其进行了充分的探索。在推动产业结构调整方面,有学者通过实证分析验证农业机械化能够推动产业结构调整 and 升级[11],姚季伦研究发现农业机械化通过提升资源使用效率,从而对产业结构调整产生积极作用[12]。在提高农业生产率方面,农业机械化的作用也达到了共识。彭代彦和文乐认为在农村劳动力老龄化、女性化的背景下,农业机械化是提高粮食生产效率的主要因素[13]。薛超等人发现农业机械化水平对种植业全要素生产率的提升具有显著促进作用[14],而吴海霞等人通过探究农业机械化对小麦全要素生产率的影响,验证了农业机械化推广有助于提高小麦全要素生产率和技术效率[15]。后有学者对其机理进行研究,认为农业机械化有效替代了劳动力,提高了农业生产效率[16]。在农业机械化与农民收入研究方面,目前研究认为二者可以相互影响,农业机械化对农民增收具有重要的作用,农民收入的增加能够有效地推动农业机械化[17]。李谷成等人通过省级

面板数据验证机械化既可以直接作用于农业收入增长,也可以通过劳动力转移“部分地”间接作用于非农收入增长[18]。当农机化发展到一定程度时,农业机械化替代原有的劳动力,解放了农户的双手,让农户可以通过务工来增加工资性收入[19]。

2.3. 农业机械化与粮食生产相关研究

关于农业机械化与粮食生产相关研究,现在较为普遍关注的是农业机械化对粮食安全和粮食增产减损方面的研究。机械化使得土地产出率和劳动生产率都会有一个质的提升,因而可以促使粮食产量不断增长[20]。对于农业机械化对粮食的增产减损作用,得到了多位学者的普遍认同。农业机械化通过提高农业生产效率、优化资源配置、减少粮食损耗,提升作物质量等在粮食增产和减损中发挥重要作用[21]。田甜等人构建了粮食单产的C-D生产函数模型,分析各种投入、政策、气候和农户行为对单产的影响,他们认为,未来中国粮食单产的提高将日益依赖于优良品种和机械投入[22]。但也有部分学者认为影响粮食单产的因素是自然资源、种子资源等,不是机械使用或使用程度等因素[23]。

3. 理论分析与研究假说

3.1. 农业机械化对粮食生产韧性的直接影响

生态系统韧性理论起源于生态学研究,后拓展至社会-生态系统分析,为解析农业机械化的作用提供了核心分析框架,其强调的是生态系统在遭受冲击后,通过自我调节机制演进到新的均衡状态的能力,具体体现为抗扰能力、恢复能力、适应能力三维度的动态平衡。粮食生产系统面临极端天气、病虫害、农资价格波动等多重扰动,是典型的社会-生态复合系统,其韧性水平直接决定产能稳定性。

首先,农业机械化能提升粮食生产效率,增强粮食生产的抗风险能力[24]。传统依靠人力和畜力的生产模式,劳动强度大且效率低下。人工劳动不仅速度慢,其质量与机械相比也存在差距。在播种、喷药、收割环节,机械化作业的质量均优于人工作业。机器播种更均匀,播种深度也能得到更好控制,有利于后续种子发芽和生长。在收割时节,收割机的收割效率也远远超出人力,因为对于收割时间紧迫的作物短时间提高收割效率尤为重要。在遇到天气变化、病虫害等突发情况时,机械化的高效作业能力尤为重要[25]。要素配置理论认为,一种要素可以通过技术进步实现对另一种或多种要素的替代,进而优化要素组合效率。农业机械化的本质就是物质技术要素对传统劳动要素的高效替代。农业机械化对人力、畜力的替代为粮食生产韧性提供要素层面的稳定性支撑,机械化装备与精准农业技术的结合,实现了对土地、化肥、农药等资源要素的精准配置,进一步提升要素利用效率,强化系统抗扰能力。

在提升粮食生产恢复能力方面,农业机械化的作用体现在优化配置土地资源和合理配置劳动力资源。我国某些地区土地碎片化严重,农户经营的耕地规模较小且相对分散,生产效率较低,不适合进行机械化作业。在这样的情况下,为了提高生产效率,土地流转、托管等形式变得普遍起来。种粮大户通过对集中起来的耕地进行机械化作业,大大降低了原来分散经营的弊端。根据规模效应理论,在一定技术条件下,随着生产规模的扩大,单位生产成本也会降低,从而提高经济效益。购买农机虽前期需要投入,但随着生产规模扩大单位面积的成本会降低,将节省下来的成本用于种子、农田、基础设施等投入,也会进一步增强粮食生产的抵抗力和恢复力,提升粮食生产韧性[26]。机械化的出现使得众多劳动力从粮食生产中解放出来,转移到二、三产业,增加其他收入来源[27]。在遇到病虫害或自然灾害时,会有更充足的资金用于粮食生产的恢复。同时劳动力转移也促进了农村劳动力素质的提升,促进生产管理和生产方式创新,进一步增强粮食生产韧性的恢复能力。

智能化农业机械是农业机械化推动技术创新与应用的重要体现,进一步提升了粮食生产对气候变化

的适应能力。随着科技的不断进步,农业机械化不再局限于传统的农业机械作业,而是融合了诸多先进技术。粮食市场需求不断升级和政策的调整也对粮食生产系统的适应性提出更高要求,粮食生产逐渐从单一粮食种植向粮经饲统筹、种养结合等模式转型。农业机械化可通过装备模块化、作业标准化实现对不同作物、不同种植模式的适配,使粮食生产系统能够快速响应市场需求变化和政策导向,通过调整种植结构、优化生产布局维持系统稳定运行。

根据以上分析,提出假设 H1:农业机械化对粮食生产韧性具有显著提升作用。

3.2. 土地产出率在农业机械化对粮食生产韧性影响中的中介作用

土地产出率是衡量单位土地面积产值的关键指标,是反映农业生产效益的核心指标。当耕地资源一定时,土地产出率高意味着同样面积的土地能产出更多粮食,在保障粮食安全的同时提升经济效益,为乡村振兴战略的实施提供坚实的物质基础[28]。

农业机械化通过替代人力实现作业标准化和精细化,从多方面提升土地产出率。第一,机械化播种技术能够精确控制种子的播撒密度和深度,确保每一粒种子都能在最适宜的环境中生长,使得土地产出率得到显著提高。有效提升作物单产。第二,机械化施肥和节水灌溉技术能减少资源浪费,使得资源利用效率更高,避免传统粗放作业导致的土壤退化和产能下降,进而提升了土地产出率。第三,机械化收割技术能降低收割损失,间接增加单位面积粮食产量,实现机械化对土地产出率的提升。

土地产出率在保障粮食生产韧性中发挥着核心作用。土地产出率高能有效增加粮食总产量,在面对突发情况时能更好地保障粮食市场的稳定供应。即使部分地方减产,较高的单位产能仍能保障区域总产能维持在安全水平。另一方面,随着人口的不断增长和经济的发展,土地资源、水资源等保障受到威胁,环境问题也对粮食生产造成了挑战。在此局势下,提高土地产出率成为了实现粮食安全和可持续发展的必然选择。土地产出率高可以在土地面积一定的前提下,满足不断增长的粮食需求,从而缓解土地资源压力。同时,高土地产出率可增加农民收入,激励农民加大农业投入,进一步增强系统的抗扰和恢复能力。因此,提出假设 H2:土地产出率在农业机械化与粮食生产韧性之间发挥中介作用,即农业机械化通过提升土地产出率间接增强粮食生产韧性。

4. 数据来源、变量选取与模型构建

4.1. 数据来源

本文选取 2014~2023 年我国 30 个省(不包含西藏)的面板数据为样本,实证检验农业机械化对粮食生产韧性的影响。相关数据来源于中国统计年鉴、中国农村统计年鉴、中国农村经营管理年报和 EPS 数据库。对于个别缺失数据,采用插值法进行补齐,并对所有连续变量进行双向缩尾处理。

4.2. 变量选取

4.2.1. 被解释变量

本文的被解释变量为粮食生产韧性。本文参考李明亮等人[29]和赵巍、徐筱雯[30]对粮食生产韧性指标体系的构建,从抵抗能力、适应能力和变革能力三方面构建了粮食生产韧性的综合评价指标体系,通过熵权法对体系中各指标权重进行赋值,得到粮食生产韧性水平。其中,抵抗能力包括粮食生产系统具备的内在稳定性,以及粮食生产产供鲁棒性。适应力是指粮食生产系统对社会和环境的反应能力,包括对农业可持续发展的适应以及遭受洪涝、干旱、风雹等自然灾害后的恢复能力。变革力指粮食生产未来增长的能力和空间,依赖于技术进步和与企业产业的协作。综合衡量指标体系和各衡量方式属性见表 1。

Table 1. Index system of grain production toughness**表 1.** 粮食生产韧性指标体系

一级指标	二级指标	计量方式	属性
抵抗能力	内在稳定性	人均耕地面积(亩/人)	+
		有效灌溉面积占比	+
		第一产业从业人员占比	+
	产供鲁棒性	农产品生产价格指数	-
		人均粮食占有量(公斤)	+
		粮食单位面积产量(公斤/公顷)	+
适应能力	可持续性	单位化肥施用量(吨/公顷)	-
		单位农药施用量(吨/公顷)	-
		单位农膜使用量(吨/公顷)	-
		农村人均用电量(千瓦时/人)	+
	可恢复性	复种指数	+
		受灾面积(千公顷)	-
		农业总产值增长率	+
变革能力	多样协作性	农业科技投入(亿元)	+
	技术进步性	地方财政科学技术支出(亿元)	+

4.2.2. 解释变量

本文的解释变量为农业机械化。借鉴侯炬凯[31]对粮食生产机械动力的衡量,用粮食播种面积占农作物播种面积的比例与农业机械总动力的乘积代表粮食生产的机械动力,本文在其基础上进行取对数处理。

4.2.3. 控制变量

为抑制其他因素对粮食生产韧性的影响,本文选取互联网普及率、产业结构、对外开放水平、耕地面积稳定性和土地流转率作为控制变量。

4.2.4. 调节变量

本文中中介变量为土地产出率,用农业总产值与耕地面积之比衡量。相关变量定义与描述性统计如表 2 所示。

Table 2. Selection and definition of variables**表 2.** 变量选取与定义

变量类型	变量名称	变量符号	变量阐释	平均值	标准差
被解释变量	粮食生产韧性	GRP	熵权法赋值得到	0.232	0.069
解释变量	农业机械化	AML	Ln(粮食播种面积/农作物播种面积*农业机械总动力)	7.245	1.264
中介变量	土地产出率	LOR	农业总产值/耕地面积	0.473	0.258
控制变量	互联网普及率	IPR	互联网用户数/常住人口总数	0.626	0.137

续表

产业结构	IS	第一产业增加值/地区生产总值	0.093	0.051
对外开放水平	OPE	(货物进出口总额*美元对人民币汇率)/地区生产总值	0.252	0.240
耕地面积稳定性	CRP	耕地面积/上一年耕地面积	1.022	0.058
土地流转率	STD	家庭承包耕地流转面积/家庭承包耕地总面积	0.364	0.168

4.3. 模型构建

为探究新型城镇化与粮食生产韧性的关系，本文构建如下基准模型：

$$GRP_{i,t} = \alpha_0 + \alpha_1 AML_{i,t} + \alpha_2 CONTROL_{i,t} + \mu_i + \delta_t + \varepsilon_{i,t} \quad (1)$$

其中，下标 i 表示省份、 t 表示年份，GRP 为被解释变量粮食生产韧性，AML 为解释变量农业机械化，CONTROL 代表控制变量。 α_0 表示回归的截距项， α_1 为解释变量回归系数， α_2 为控制变量的回归系数， μ_i 为省份固定效应， δ_t 为时间固定效应， $\varepsilon_{i,t}$ 表示随机误差项。

为探究土地产出率在农业机械化与粮食生产韧性间的中介作用，验证假设 H2，借鉴温忠麟和叶宝娟 [32] 对中介效应检验的说法。构建中介效应模型如下：

$$LOR_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 AML_{i,t} + \beta_2 CONTROL_{i,t} + \mu_i + \delta_t + \varepsilon_{i,t} \quad (2)$$

$$GRP_{i,t} = \gamma_0 + \gamma_1 LOR_{i,t} + \gamma_2 AML_{i,t} + \beta_3 CONTROL_{i,t} + \mu_i + \delta_t + \varepsilon_{i,t} \quad (3)$$

式(2) (3)中各符号含义同式(1)。

5. 实证结果与分析

5.1. 基准回归分析

如表 3 所示，在加入控制变量之前与加入控制变量之后，农业机械化对粮食生产韧性的影响均在 1% 的置信水平上显著为正，表明新型城镇化促进粮食生产韧性提升，研究假说 H1 成立。通过对比发现，未加入控制变量前新型城镇化对粮食生产韧性的影响系数为 0.059，而在加入控制变量后降低至 0.056，有些微降低，说明在未加入控制变量时高估了新型城镇化对粮食生产韧性的影响。且在加入控制变量后 R^2 也较之前有所提升，说明模型拟合效果更好，估计结果更加准确。

Table 3. Benchmark regression results

表 3. 基准回归结果

变量名称	(1)	(2)
	GRP	GRP
AML	0.059*** (3.65)	0.056*** (3.28)
IPR		0.010 (0.28)
IS		-0.028 (-0.08)
OPE		0.034 (0.67)

续表

CRP		-0.011 (-0.34)
STD		-0.055 (-1.38)
Constant	-0.195* (-1.67)	-0.153 (-1.17)
省份固定效应	控制	控制
年份固定效应	控制	控制
样本量	300	300
F	13.293***	2.717**
R ²	0.845	0.847

注：***、**、*分别代表在 1%、5%、10%的水平上显著，下同。

5.2. 稳健性检验

5.2.1. 使用稳健标准误差

为了解决异方差性问题并缓解潜在的模型设定偏误，确保核心结论的可靠性，因此用稳健标准误差对其修正，修正后的结果与原结果一致。

5.2.2. 使用近五年样本

为了更贴合农业领域的政策、技术与生产特性，使用近五年样本进行稳健性检验。农业机械化具有明显的短期迭代与扩散特性，近五年恰好能覆盖农机技术更新、设备普及的关键周期。若数据周期过长，可能包含不同技术代际、政策周期的干扰，而近五年数据可聚焦当前主流机械化模式的实际效果，让稳健性检验更贴合当前农业生产现实。可以看出，近五年农业机械化对粮食生产韧性的影响作用更加强烈，反映出近几年农业技术迭代升级，大幅提升了粮食生产韧性。

5.2.3. 剔除直辖市样本

我国的直辖市并非普通行政单位，在经济、政策、人口、资源等关键维度与其他省份存在系统性差异，这些差异可能成为研究中的混淆因素。因此，其独特性可能会影响研究的总体效果，因此对剔除这四个直辖市后的数据重新进行回归，结果见表 4，新型城镇化依旧显著影响粮食生产韧性且影响程度稍有增加，说明分析结果较为稳健。

Table 4. Robustness test

表 4. 稳健性检验

变量名称	稳健标准误	近五年	剔除直辖市
	GRP	GRP	GRP
AML	0.056*** (3.18)	0.241** (2.47)	0.026*** (3.65)
控制变量	控制	控制	控制
Constant	-0.153 (-1.33)	-1.401** (-2.05)	0.011 (0.19)
省份固定效应	控制	控制	控制

续表

年份固定效应	控制	控制	控制
样本量	300	150	260
F	2.223**	1.174	2.896***
R ²	0.847	0.809	0.973

5.3. 中介效应检验

表 5 为中介效应检验结果, 第(1)列为农业机械化对土地产出率的回归结果, 农业机械化系数显著为正, 表明农业机械化可显著提升土地产出率。第(2)列为加入中介变量后的回归结果, 土地产出率系数显著为正, 而农业机械化系数较基准回归系数 0.056 有所下降, 且显著性水平也有所降低, 验证了土地产出率在农业机械化与粮食生产韧性之间的部分中介作用。

Table 5. intermediary effect test

表 5. 中介效应检验

变量名称	(1)	(2)
	LOR	GRP
AML	0.088*** (2.75)	0.043** (2.58)
LOR		0.147*** (4.59)
控制变量	控制	控制
Constant	0.106 (0.43)	-0.168 (-1.34)
省份固定效应	控制	控制
年份固定效应	控制	控制
样本量	300	300
F	6.564***	5.529***
R ²	0.962	0.859

5.4. 内生性检验

农业机械化对粮食生产韧性的促进作用已得到验证。粮食生产韧性提升, 意味着粮食生产系统更稳定高效, 促进农业生产者和相关者有更多资源进行投资, 进而反向推动农业机械化发展, 即二者之间可能存在互为因果的内生性问题。同时, 还可能受遗漏变量影响, 导致估计结果进一步失真。因此采用两阶段最小二乘法对其进行进一步检验。本文选择滞后一期和滞后二期的农业机械化作为工具变量。农业机械化具有连续性, 上一期的机械化水平会直接影响当期的装备存量、使用熟练度等, 与当期机械化水平高度相关且不会直接影响当年粮食生产韧性, 满足工具变量要求。滞后二期的农业机械化更能体现长期积累效应, 具有相关性和更强的外生性, 而且可降低单一工具变量的测量误差风险, 让选择更具说服力。在表 6 中, LM 统计量的 P 值为 0.000, 则拒绝工具变量识别不足的原假设, F 统计量的值大于 10% 水平上的临界值 16.38, 说明有效规避了弱工具变量问题, 两组检验通过, 工具变量有效。在识别内生性问题后, 农业机械化滞后一期、滞后二期系数方向、显著性仍然与基准回归结果一致, 进一步验证假设 H1。

Table 6. Endogenous test
表 6. 内生性检验

变量名称	(1)	(2)	(3)	(4)
	AML	GRP	AML	GRP
AML		0.096*** (3.57)		0.270*** (3.43)
L1.AML	0.668*** (18.55)			
L2.AML			0.259*** (6.47)	
控制变量	控制	控制	控制	控制
省份固定效应	控制	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制	控制
Anderson canon. corr. LM		162.953		42.031
Cragg-Donald Wald F		344.032		41.825
样本量	270	270	240	240
F	64.073***	2.969***	9.428***	2.580**
R ²	0.998	0.063	0.998	-0.006

5.5. 异质性检验

5.5.1. 乡村振兴战略实施前后异质性

2017年乡村振兴战略的实施,使得影响粮食生产韧性的核心条件发生了系统性变化。乡村振兴推动了粮食生产基础设施建设,优化了机械化作业的基础环境。同时在政策层面加大了农机购置补贴与农机服务合作社培育力度,提升了机械化普及度。针对乡村振兴政策实施进行异质性分析,可以揭示农业机械化对粮食生产韧性影响的动态演变过程。乡村振兴前,机械化对生产韧性的影响可能局限于“单点效率提升”,如仅解决收割慢、耕作难等具体问题。乡村振兴后,基础设施、规模化水平的改善,可能让机械化形成全链条抗风险效应,如从耕种收延伸到抗旱排涝、病虫害统防统治等多个维度韧性。

表7中数据明显指出乡村振兴战略实施使得农业机械化对粮食生产韧性的影响发生巨大改变。该战略实施前,农业机械化对粮食生产韧性影响微乎其微,且达不到显著性要求,而在乡村振兴战略实施后,农业机械化对粮食生产韧性影响效果迅速显现且满足1%水平显著。乡村振兴战略带来的基础设施建设、规模化培育等政策对于提升我国粮食安全保障能力有效性,为我国继续实施乡村振兴战略和相关政策实施提供了支撑。

Table 7. Heterogeneity test of rural revitalization strategy implementation
表 7. 乡村振兴战略实施异质性检验

变量名称	(1)	(2)
	乡村振兴后	乡村振兴前
AML	0.141*** (3.17)	-0.001 (-0.07)
控制变量	控制	控制

续表

Constant	-0.793** (-2.46)	0.198** (2.49)
省份固定效应	控制	控制
年份固定效应	控制	控制
样本量	210	90
F	2.176**	0.641
R ²	0.816	0.995

5.5.2. 地形地貌异质性

地形起伏度是影响粮食生产能力的一个重要自然因素，平原、盆地等低地形起伏区具备粮食生产的先天优势，地块规整，适合机械化作业，自然灾害影响范围可控，且便于防灾减灾设施建设，而高地形起伏区地块分散且易水土流失，地形复杂，易发生山洪、滑坡等灾害，防灾设施建设难度大、成本高，机械化难以推广，直接加剧韧性不足的问题。因此，本文参考游珍等人[33]测算的省际地形起伏度，将样本省份分为高地形起伏区和低地形起伏区。

表 8 显示，低地形起伏区农业机械化对粮食生产韧性的影响系数明显高于高地形起伏区，二者都满足显著性要求，对其进行组间差异检验后验证二者影响强度确实存在差异。究其原因，低地形起伏区适合机械化作业的基础更扎实，地形平坦开阔且地块集中，无明显坡度和障碍物，农机可顺利开展深耕、播种、收割等全流程作业，而且配套设施建设更加便利，降低农机转移和作业成本，让机械化作业覆盖范围更广、效率更高。而且，低地形起伏区更易形成规模化种植，更能放大机械化韧性价值。机械化与规模化生产高度契合，能大幅提升耕种收效率，降低单位生产成本。

Table 8. Test of topography heterogeneity

表 8. 地形异质性检验

变量名称	(1)	(2)	组间差异检验		
	高地形起伏区	低地形起伏区	b0-b1	Freq	p-value
AML	0.0209*** (2.63)	0.0940** (2.61)	0.073	0	0.000
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制
Constant	-0.00504 (-0.09)	-0.353 (-1.25)	-0.348	97	0.030
省份固定效应	控制	控制			
年份固定效应	控制	控制			
样本量	140	160			
F	4.145***	2.027*			
R ²	0.963	0.788			

5.5.3. 地理位置异质性

西部地区与非西部地区不仅包含地形差异，在政策支持、经济水平、基础设施、规模化程度等方面同样存在差距。若仅做地形地貌异质性分析，可能忽略西部地区发展滞后、政策缺乏等不利因素，导致

研究结论不够准确。西部在农机保有量、农机服务体系、高标准农田覆盖率等方面与非西部存在显著差距，进行异质性分析可以揭示区域发展差距对二者关系的影响。同时西部是粮食安全的重要后备区，同时面临更多发展短板，分析其特殊性可为针对性完善西部农机推广、韧性提升政策提供依据。异质性检验结果也证明了在西部地区农业机械化对粮食生产韧性的影响效果确实低于中部、东部地区，因此有必要针对不同地区的农业生产特点，因地制宜制定相关政策和实施方案，加强农业机械化对粮食生产韧性的影响程度(表 9)。

Table 9. Test of geographic location heterogeneity

表 9. 地理位置异质性检验

变量名称	(1)	(2)	组间差异检验		
	非西部地区	西部地区	b0-b1	Freq	p-value
AML	0.0617** (2.58)	0.0286** (2.32)	-0.033	91	0.090
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制
Constant	-0.107 (-0.56)	-0.0927 (-0.97)	0.014	53	0.470
省份固定效应	控制	控制			
年份固定效应	控制	控制			
样本量	190	110			
F	2.141*	3.831***			
R ²	0.781	0.975			

6. 研究结论与启示

6.1. 研究结论

基于 2014~2023 年全国 30 个省份的面板数据建立实证模型，对农业机械化与粮食生产韧性的关系进行实证分析，并验证土地产出率在二者关系中发挥的中介作用，得出如下结论：

第一，农业机械化对粮食生产韧性有显著正向提升作用。基准回归结果显示，农业机械化每提升 1 个单位，粮食生产韧性就会提升 0.056 个单位，且该结论在进行一系列稳健性检验后依然成立。这表明农业机械化通过增强粮食生产系统的抗扰能力、恢复能力和适应能力，直接提升粮食生产韧性，是保障粮食安全的关键技术支撑。

第二，土地产出率在农业机械化与粮食生产韧性之间发挥部分中介作用。这一发现揭示了农业机械化对粮食生产韧性的影响具有直接作用和间接传导的双重作用机制。机械化作业实现了对土地资源的精细化利用和土地流转与规模化经营的普及，在提高单位面积粮食产量的同时降低生产成本，提高土地产出效率。高土地产出率能够保障粮食稳定供给，为农业基础设施投入、抗风险技术研发提供了资金积累，增强粮食生产韧性。而土地产出率发挥部分中介作用，说明农业机械化除通过土地产出率传导外，还通过直接提升抗灾能力、优化生产流程等方式直接作用于粮食生产韧性，这也印证了二者关系的复杂性与多元性。

第三，新型城镇化对粮食生产韧性的影响存在异质性，在乡村振兴战略实施后、低地形起伏区和非西部地区更加明显。从乡村振兴战略实施前后来看，乡村振兴战略实施后农业机械化作用更加明显得益

于乡村振兴推动了城镇化与农业现代化的协同发展，基础设施投入力度加大，城镇化带来的资本、技术等要素更高效地反哺农业生产，增强粮食生产韧性。从地形起伏度看，低地形起伏区因地块开阔更适宜进行机械化和规模化作业，使得机械化对粮食生产韧性提升作用更加明显。而从区域位置看，非西部地区因经济实力强、农业基础设施投入力度大、农机服务市场更为完善等优势使粮食生产韧性在农业机械化趋势下得到强劲提升。

6.2. 对策建议

强化农业机械核心支撑力，提升农机化发展质量。以技术创新驱动农机装备升级，可以形成对粮食生产韧性的硬核支撑。基于我国在工业制造方面的优势，聚焦智能农机装备研发，不断对农机装备进行更新，提升农机作业效率。同时，还需针对山区等碎片化耕地采用农机装备困难的痛点，为其研发小型化、轻量化智能农机装备，进一步加大农机装备的作业覆盖率。为更好地推动农机技术创新，鼓励农机企业与高校、科研院所合作，共同攻关农机核心零部件，解决技术上“卡脖子”的问题，将科研样机快速转化为符合生产需求的实用装备。建立农机创新成果评价与推广机制，将田间作业效果、农民满意度纳入评价体系，确保创新技术真正服务于粮食生产韧性提升。为使研发出的农机装备更好地服务与粮食生产者，有必要建立覆盖研发、生产、销售、服务的农机全产业链服务体系，夯实农机化发展基础。完善农机销售与售后服务网络，在粮食主产区、偏远地区设立农机维修站点和农机驿站，提供油料供应、维修保养、食宿保障等一站式服务，确保农机能为农民带来最大限度便利。

促进规模化经营与农机化协同发展，放大农机化效应。深化农村土地制度改革，鼓励通过土地流转、托管、入股等多种形式，破解土地碎片化难题，实现土地规模化与农机化协同发展。要用政策筑牢耕地保护防线，为粮食生产的空间基础提供保障。同时建立耕地保护奖励制度，对永久基本农田保护成效显著的地区给予财政奖励，对耕地保护不力的地区实施约谈问责与项目限批，强化地方政府耕地保护责任。另外，在保护机制方面，要优化种粮补贴政策，将种粮补贴与粮食产量、耕地保护面积挂钩，使补贴落实得更加精准有效。扶持农机合作社、种粮大户等新型经营主体发展，对采用规模化经营模式的主体给予政策倾斜与奖励，实现土地规模化经营与农机化作业的良好互动，充分发挥机械化的规模效应。

精准赋能农机化发展，构建差异化政策支持体系。在制定相关政策时，要立足该地区区域特征。对于地势起伏低，适宜进行规模化种植的地区要积极引导经营主体配置高效农机装备，同时鼓励耕地连片流转，为机械化作业创造良好条件。而高地形起伏区和西部地区则应重点支持小型化、轻量化农机研发与推广，加强跨区域技术帮扶与政策倾斜，推动东中部地区优质农机技术与服务资源向西部转移，缩小区域发展差距。同时可以建立跨区域农机作业协同机制，在农忙时节组织农机跨区作业，优化农机资源配置，保障粮食抢收抢种，提高农机利用率。

基金项目

2024年河北省社会发展科学研究课题“数智赋能河北省农文旅融合发展的模式创新及实现路径研究”(项目号: 202402196)、河北省三期农业产业技术体系创新团队项目(项目号: HBCT2023160301)。

参考文献

- [1] Tendall, D., Joerin, J., Kopainsky, B., *et al.* (2015) Food System Resilience: Defining the Concept. *Global Food Security*, 6, 17-23. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2015.08.001>
- [2] 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.
- [3] 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.

- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 高雪, 李欠男. 高标准农田建设对粮食生产韧性的影响及作用机制[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(8): 255-267.
- [7] 朱满德, 张青. 农业生产性服务与粮食生产韧性: 影响机制与实证检验[J]. 湖南农业大学学报(社会科学版), 2024, 25(6): 1-11.
- [8] 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, 43(6): 126-134.
- [9] 范振楠, 覃朝晖, 余思明. 极端气温对粮食生产韧性的影响效应研究——基于绿色金融视角[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(5): 896-910.
- [10] 陈有华, 曾梦晴, 陈彬. 气候变化对粮食生产韧性的影响——基于作物多样化的调节效应研究[J]. 生态学报, 2024, 44(16): 6937-6951.
- [11] 陈银娥, 陈薇. 农业机械化、产业升级与农业碳排放关系研究——基于动态面板数据模型的经验分析[J]. 农业技术经济, 2018(5): 122-133.
- [12] 姚季伦. 农业机械化对农业产业结构调整的支撑研究[J]. 农机化研究, 2009, 31(3): 1-3.
- [13] 彭代彦, 文乐. 农村劳动力老龄化、女性化降低了粮食生产效率吗——基于随机前沿的南北方比较分析[J]. 农业技术经济, 2016(2): 32-44.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 周振, 孔祥智. 农业机械化对我国粮食产出的效果评价与政策方向[J]. 中国软科学, 2019(4): 20-32.
- [17] 王志章, 孙晗霖. 农业机械化对农民增收效应的实证研究[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(2): 310-313+322.
- [18] 李谷成, 李烨阳, 周晓时. 农业机械化、劳动力转移与农民收入增长——孰因孰果?[J]. 中国农村经济, 2018(11): 112-127.
- [19] 潘经韬, 陈池波, 龚政. 农业机械化对农民增收的空间效应分析——基于农机跨区作业的视角[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(11): 231-238.
- [20] 谢冬梅. 农业机械化发展对中国粮食生产的影响研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南财经大学, 2021.
- [21] 李超. 农业机械化在粮食增产和减损中的作用[J]. 南方农机, 2024, 55(12): 72-74+87.
- [22] 田甜, 李隆玲, 黄东, 等. 未来中国粮食增产将主要依靠什么?——基于粮食生产“十连增”的分析[J]. 中国农村经济, 2015(6): 13-22.
- [23] 刘凤芹. 农业土地规模经营的条件与效果研究: 以东北农村为例[J]. 管理世界, 2006(9): 71-79+171-172.
- [24] 杨先亮. 农业机械化与粮食安全耦合协调研究[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2024.
- [25] 杨多瑞. 会宁县林业资源管护现状问题及对策[J]. 南方农业, 2024, 18(14): 168-170.
- [26] 周密, 牛浩, 魏超, 等. 农业保险保障对粮食生产韧性的影响研究[J]. 中国农业资源与区划, 2024, 45(8): 44-55.
- [27] 付国琦. 农机在农民增收中的作用[J]. 农机使用与维修, 2012(2): 16-17.
- [28] 王素敏. 农业机械化在乡村振兴战略推进中的作用探析[J]. 南方农机, 2022, 53(9): 80-82+89.
- [29] 李明亮, 陈德慧, 余国新. 数字普惠金融赋能粮食体系韧性——基于空间溢出效应视角分析[J]. 中国农业资源与区划, 2024, 45(5): 74-84.
- [30] 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.
- [31] 侯炬凯. 贵州粮食生产实证研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(23): 14492-14494.
- [32] 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.
- [33] 游珍, 封志明, 杨艳昭. 中国 1km 地形起伏度数据集[J]. 全球变化数据学报(中英文), 2018, 2(2): 151-155+274-278.