

引用格式:李家辉,李晗,牛永泽,等.精准农业技术对农户生产效率和家庭收入的协同影响及机制[J].资源科学,2025,47(11):2466-2479. [Li J H, Li H, Niu Y Z, et al. Synergistic effects and mechanisms of precision agriculture technology on farmers' production efficiency and household income[J]. Resources Science, 2025, 47(11): 2466-2479.] DOI: 10.18402/resci.2025.11.11

# 精准农业技术对农户生产效率和家庭收入的协同影响及机制

李家辉,李晗,牛永泽,程雯欣,陆迁

(西北农林科技大学经济管理学院,杨凌 712100)

**摘要:**【目的】探究精准农业技术能否促进农户的生产效率和家庭收入的协同增长对于精准农业技术的持续推广与应用非常重要。【方法】基于2022年内蒙古、陕西和山西3个省份724份粮食种植户的微观调查数据,运用内生转换回归模型,实证分析精准农业技术对农户生产效率和家庭收入的协同影响及其机制。【结果】①精准农业技术能够显著提升农户的生产效率和家庭收入,并能在不同收入群体中实现效率和收入的协同增长。②异质性分析表明,精准农业技术对新生代农户的生产效率和家庭收入的提升作用均高于老一代;对土地细碎化程度较低农户的生产效率和家庭收入的提升作用均高于土地细碎化程度较高的农户。③机制分析表明,精准农业技术通过节约资本投入、劳动力投入和提升农业产出提高生产效率;精准农业技术通过促进农户扩大经营规模和外出务工实现家庭增收;改善劳动力和资本要素配置是精准农业技术对农户生产效率和家庭收入的协同影响机制。【结论】精准农业技术能够实现农户生产效率和家庭收入的协同增长。未来应持续推进发展精准农业,加大精准农业技术推广力度,助力农业生产效率的提升和农民收入增长。

**关键词:**精准农业;技术采用;农户;生产效率;家庭收入;内生转换回归模型

DOI: 10.18402/resci.2025.11.11

## 1 引言

农业生产过程中资源利用效率低下、面源污染严重是制约发展中国家农业高质量发展的突出问题。据《中国农业绿色发展报告2023》和《中国水资源公报2022》统计,2022年中国三大粮食作物化肥利用率为41.3%,农田灌溉水有效利用系数为0.572,均与欧美发达国家存在一定差距<sup>[1]</sup>。为提升农业资源利用效率,精准农业应运而生。作为技术变革的产物,精准农业通过利用信息化技术监测作物的生产环境变化,有针对性地调整要素投入结构,以达到提质增效和保护环境的目地<sup>[2]</sup>。当前中国的精准农业发展处于初级阶段,精准农业技术在

农户中的采用率相对较低<sup>[3]</sup>。值得注意的是,精准农业技术属于资本密集型技术,具有前期投资大、投资回报周期长的特点<sup>[4]</sup>,技术投资风险较高,该技术若不能为农户带来与高风险相匹配的经济收益,将很难为广大农户所接受,甚至可能由于农业的弱质性导致部分采用精准农业技术的农户面临陷入贫困的风险。著名经济学家舒尔茨<sup>[5]</sup>在《改造传统农业》一书中提出“有效率但贫穷”的经典假说。该理论指出传统农业中的小农户是有效率<sup>①</sup>的,但由于生产要素与技术条件的落后,农户始终处于贫穷状态,而改造传统农业的重要途径是进行技术创新。那么以技术变革为代表的精准农业技术能否

收稿日期:2024-06-18;修订日期:2024-09-01

基金项目:国家自然科学基金面上项目(71973105)

作者简介:李家辉,男,山东蓬莱人,博士研究生,研究方向为农业经济与管理。E-mail: 1414205525@qq.com

通讯作者:陆迁,男,宁夏中宁人,教授,博士生导师,研究方向为农业经济管理。E-mail: xnluqian@126.com

① 舒尔茨认为传统农业中的小农是理性的,会对生产要素进行有效配置以实现帕累托最优。舒尔茨将“有效率但贫穷”命题中的“效率”划分为技术效率和分配效率<sup>[6]</sup>。本文重点关注农户的技术效率。

2025年11月

打破传统农业“有效率但贫穷”的困境,亟待深入研究,这对于精准农业技术的持续推广和农业现代化的有序推进至关重要。

中国早在20世纪末便开始关注精准农业,并在新疆、黑龙江、北京等地开展精准农业试验工程。随后,国务院发布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》明确将“农业精准作业与信息化”作为农业领域优先发展的主题,农业农村部在《农业绿色发展技术导则(2018—2030年)》中明确将推广精准灌溉、施肥等精准农业技术作为主要任务之一。虽然中国现阶段的精准农业整体在智能化、体系化程度上落后于发达国家的高级精准农业<sup>[4]</sup>,但在政策推动下,中国的精准农业技术在研发与应用上取得了丰硕成果<sup>②</sup>,且部分较为成熟的精准农业技术已经在全国范围开展大面积推广<sup>[7]</sup>,这也意味着中国农业发展步入“精准化”时代<sup>[8]</sup>。其中,水肥一体化技术作为代表性技术之一<sup>[9]</sup>,通过自动化设备将灌溉与施肥融为一体,可根据作物生长阶段的需求差异调整施水与施肥量,从而实现精准施水、定点施肥,在节约资源的同时也能实现提质增效<sup>[10,11]</sup>。农业农村部办公厅印发的《推进水肥一体化实施方案(2016—2020年)》中针对中国不同地区、不同作物作出了推广水肥一体化技术的战略部署。然而,农户对该技术的采用率仍较低<sup>[11,12]</sup>。据统计,截至2020年,中国高效节水灌溉面积仅占农田有效灌溉面积的三成左右<sup>③</sup>,与欧美发达国家存在较大差距<sup>[13]</sup>。

当前国内外学者围绕精准农业技术的采用效果展开了一系列研究,由于国外部分发达国家精准农业发展较为前沿,因此评估国外精准农业技术采用效果的研究居多,聚焦于中国情景的研究偏少。现有研究主要围绕精准农业技术提质、增效、环保的技术理念,对其生产效应、环境效应和经济效应分别进行评估:①生产效应。已有研究表明精准农业技术能够改善农业要素配置,提升农户技术效率<sup>[12,14,15]</sup>。例如,Carrer等<sup>[15]</sup>使用组间对比的方法研究了巴西甘蔗种植户采用精准农业技术对技术效率的影响,发现采用精准农业技术农户的技术效率显著高于未采用组。Yang等<sup>[12]</sup>在对华南樱桃番茄种植的研究中,使用倾向得分匹配法(PSM)也得到

了相同的结论。②环境效应。学术界一致认为精准农业技术能够提升要素利用率,从而对环境产生正外部性<sup>[10,16,17]</sup>。例如,Sidhu等<sup>[10]</sup>和陶源等<sup>[16]</sup>的研究表明精准农业技术能够提升水资源、化肥等中间投入品的利用效率,有效降低环境负荷。③经济效应。随着技术的推广与扩散,精准农业技术的经济效益评价逐渐成为该领域备受关注的话题,然而从研究结果来看,学术界对此存在一定的争议。部分研究表明,精准农业技术能够提升作物品质和产量<sup>[18]</sup>,从而实现农业收入或利润的增加<sup>[19,21]</sup>。例如,陆泉志等<sup>[19]</sup>的研究发现,精准农业技术能够显著提升果蔬种植户的收入水平。Bucci等<sup>[21]</sup>的研究发现,精准农业技术能够显著提升硬小麦和软小麦的产量,并最终将二者利润率分别提升9.6%和12.8%。但另一部分持有不同观点,认为精准农业技术对农户的增收效应不明显<sup>[22,23]</sup>。例如,Biermacher等<sup>[22]</sup>研究了精准施肥对小麦经济效益的影响,发现精准施肥与传统施肥方式的经济效益没有显著差异。

尽管既有研究为本文提供了良好基础,但仍存在3点不足:①在生产效应评估方面,聚焦中国情境的研究较少,且既有研究多未充分处理样本自选择与反向因果等内生性问题,影响结论可靠性;②关于精准农业技术的经济效益仍存争议,且多数研究仅关注直接收入效应,缺乏对其影响机制的深入探讨;③现有文献多分别考察精准农业技术的提效效应或增收效应,较少关注二者是否存在协同提升,未能回应精准农业技术能否改变“有效率但贫穷”这一传统困境。

基于上述背景,本文使用2022年内蒙古、陕西和山西3个省份724份粮食种植户的微观调查数据,运用内生转换回归模型,实证分析农户采用精准农业技术对其生产效率和家庭收入的协同影响及其影响机制。本文的边际贡献在于:①将精准农业技术与生产效率和家庭收入纳入同一分析框架,检验二者是否协同提升,既回应了舒尔茨的经典假说,也拓展了精准农业技术效果评估的维度;②从要素再配置视角揭示精准农业技术的增收机制,弥补既有研究忽视间接路径的不足;③通过内生转换回归模型与因果中介分析,有效处理样本选择与双

② 参见 [https://www.gov.cn/xinwen/2016-06/17/content\\_5083101.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2016-06/17/content_5083101.htm)。

③ 参见 [https://www.gov.cn/xinwen/2021-07/03/content\\_5622261.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2021-07/03/content_5622261.htm) 和 [https://politics.gmw.cn/2021-09/10/content\\_35155109.htm](https://politics.gmw.cn/2021-09/10/content_35155109.htm)。

向因果等内生问题,提升估计结果的可靠性。

## 2 理论分析

经济学家舒尔茨提出的改造传统农业理论认为,发展中国家的农业稳定快速的发展是经济增长的重要源泉之一,但由于传统农业技术条件长期保持不变,原有生产要素的投资回报率低,农户缺乏改变传统生产要素的动力,导致传统农业的资源配置处于长期停滞的均衡状态,不具备稳定增长的条件。想要改造传统农业则需要引入现代农业生产要素,其中一个重要方面是进行技术创新。该理论强调不仅要寻找能够打破传统农业平衡的现代生产要素,而且要寻找能够让农民有利可图,能为农民所接受的现代生产要素,这是实现农业现代化的重要前提<sup>[5]</sup>。精准农业技术作为技术变革的产物,是推动传统农业向现代农业转型的一种新型农业技术,其能否为农户创造良好的经济效益,形成农户采用该技术的内在诱因,对于农业现代化转型至关重要。为此,本文从提效和增收两方面分析精准农业技术对农户的福利效应。

### 2.1 精准农业技术对农户生产效率的影响

要素配置是农业生产效率的重要决定因素,如何实现既定产出下要素投入的减少或者既定要素投入下产出的增加是提升农业生产效率的重要路径。精准农业技术作为现代化农业生产技术,其自动化、精准化特点使其能够从3个方面促进生产效率的提高:①减少劳动力投入。精准农业技术不仅是资本密集型技术,同时也是劳动力节约型技术<sup>[7,20,24]</sup>,通过引入自动化设备形成机械要素对劳动力要素的有效替代,其自动化作业特点显著降低了农业劳动力的劳动时间和劳动强度<sup>[25]</sup>,从而节约劳动力要素投入。②节约资本要素投入。精准农业技术不仅可以根作物生长条件的差异进行资本要素的差异化投入,实现资本要素的按需供给,减少不必要的投入,而且其精准化作业特点能够实现资本要素的精准输送,降低作业过程中的要素损耗。因此,相比于传统的粗放式管理,精准农业技术能够有效节约资本要素投入<sup>[10]</sup>。③增加作物产出。精准农业技术能够通过设备将生产要素精准输送到作物所需部位,使作物能够充分吸收养分,同时也能改善作物生长环境,使其在更适合的环境下生长,进而有助于提升作物产量<sup>[9]</sup>。以水肥一体化技术为例,该技术能够将施肥

与灌溉融为一体,利用节水灌溉系统将肥料和水分准确均匀地输送到作物根系土壤,可根据作物生长阶段的需求差异调整施水与施肥量。相比于传统作业方式,该技术能够有效节约劳动力<sup>[16]</sup>、水资源和化肥投入<sup>[17]</sup>,并提升作物产量<sup>[11]</sup>。因此,从柯布道格拉斯生产函数的角度来看,劳动力、资本等生产要素投入的节约与产出的增加均有助于生产效率的提升。本文提出如下假说:

H1:精准农业技术能够提升农户的生产效率。

H1a:精准农业技术通过提高产量提升生产效率。

H1b:精准农业技术通过节约资本投入提升生产效率。

H1c:精准农业技术通过节约劳动力投入提升生产效率。

### 2.2 精准农业技术对农户家庭收入的影响

精准农业技术对农户家庭收入的影响可以分为两个方面:①直接效应。精准农业技术可以根据作物在不同生长阶段的营养需求实现差异化养分供给,并改善作物生长环境,不仅能够增加产出,也有助于提升产品品质,从而促进农业收入的增加<sup>[24]</sup>。②间接效应。根据农户理性假设和资源配置理论,精准农业技术帮助农户节约劳动力和资本要素投入后,农户会对剩余的生产要素进行再配置。农户在要素再配置的过程中可以进行不同的选择。一方面,已有研究表明,生产成本的降低能够激励农户进一步扩大经营规模<sup>[26]</sup>。精准农业技术为农户节约的劳动力和资本要素缓解了农户进一步扩大规模所面临的劳动力约束和资本约束,农户会将剩余劳动力和资本要素用于进一步扩大经营规模,从而提升农业经营收入,进而实现家庭增收。另一方面,农业生产通常面临气候变化带来的自然灾害冲击和农产品价格波动带来的市场冲击的风险,加之劳动力成本上升的背景,农户可以选择将剩余劳动力分配到其他农场或者非农部门以获取工资性收入,在实现家庭增收的同时,也提升了家庭收入的多样化,可以进一步增强家庭应对风险冲击的能力。本文提出如下假说:

H2:精准农业技术能够提升农户家庭收入。

H2a:精准农业技术能够促进农户扩大经营规模提升其家庭收入。

2025年11月

H2b:精准农业技术能够促进农户外出务工提升其家庭收入。

精准农业技术对农户生产效率和家庭收入的影响机理如图1所示。

### 3 数据来源、变量定义与模型构建

#### 3.1 数据来源

本文所用数据来自课题组于2022年7—8月对内蒙古、山西和陕西3个省份开展的粮食种植户(玉米和小麦)微观调查。选择这3个省份作为调研区域的原因是农业农村部办公厅在其印发的《推进水肥一体化实施方案(2016—2020年)》中提出,“在西北地区推广玉米、马铃薯、棉花膜下滴灌水肥一体化技术2000万亩,在华北地区推广小麦、玉米微喷水肥一体化技术2000万亩以及在西南地区推广玉米、马铃薯集雨补灌水肥一体化技术1000万亩”。上述地区为本文探究精准农业技术的提效和增收效果提供有利条件。在此基础上,课题组选择内蒙古自治区的达拉特旗、准格尔旗,山西省的平陆县以及陕西省的大荔县作为区县级调研区域。调研过程采取分层抽样与随机抽样相结合的方法,各县选取2~3个镇,各镇选取3~5个村,各村随机抽取10~20个农户进行问卷调查。问卷内容主要包括农户个体和家庭基本情况、生产经营情况、数字技术使用情况以及水肥一体化技术采用情况等方面,剔除核心变量缺失和逻辑矛盾等无效问卷后,最终得到724份有效数据。样本分布情况为内蒙古自治区318份数据、山西省194份数据和陕西省212份数据。

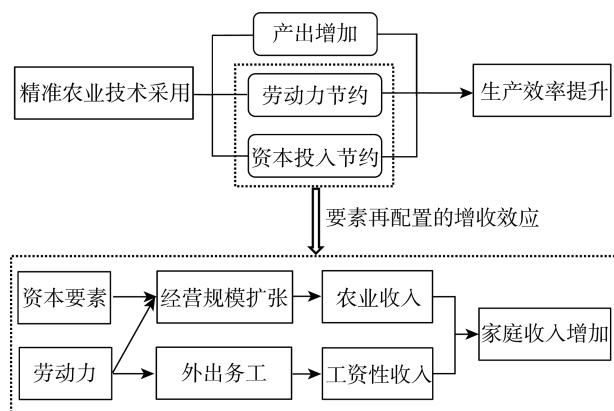


图1 精准农业技术对农户生产效率和家庭收入的影响机理

Figure 1 Mechanisms of effects of precision agriculture technology (PAT) on farmers' production efficiency and household income

④ 经检验,模型参数显著,模型拟合效果较好。

#### 3.2 变量定义

##### 3.2.1 被解释变量

(1)生产效率(表1)。当前已有研究通常使用单一要素生产率或产量来衡量生产效率,但这些指标不能很好地反映实际产出与理想产出的距离。故本文选择技术效率指标表征生产效率,这也与农业由增产向提质转变的发展方向相符<sup>[27]</sup>。常见的测算技术效率的方法包括以参数法为代表的随机前沿分析(SFA)和以非参数法为代表的数据包络分析(DEA)。鉴于SFA具有能够避免自然灾害等随机因素对生产前沿面的影响的优势,本文采用SFA测算农户的生产效率。并借鉴朱然等<sup>[28]</sup>、任天驰等<sup>[29]</sup>的研究,使用更为灵活的超越对数生产函数的形式以克服经典随机前沿模型假设要素之间完全替代或互补的缺陷。具体的模型设定如下:

$$\ln Y_i = \beta_0 + \beta_1 \ln T_i + \beta_2 \ln L_i + \beta_3 \ln K_i + \beta_4 (\ln T_i)^2 + \beta_5 (\ln L_i)^2 + \beta_6 (\ln K_i)^2 + \beta_7 \ln T_i L_i + \beta_8 \ln T_i K_i + \beta_9 \ln L_i K_i + (V_i - \mu_i) \quad (1)$$

式中: $Y_i$ 为第*i*个农户的产出,用粮食总产值表征; $T_i$ 为土地投入,以粮食播种面积表示; $L_i$ 为劳动力投入,以雇工和自雇工之和表征; $K_i$ 为资本投入,以种子、肥料、农药、灌溉、社会化服务等直接投入费用之和表征。 $(V_i - \mu_i)$ 为混合误差项,其中, $V_i$ 为服从正态分布的随机误差项, $\mu_i$ 为技术非效率项; $\beta_0 \sim \beta_9$ 为待估计参数<sup>④</sup>。

农户生产效率的测算公式为:

$$TE_i = \frac{E(Y_i | \mu_i, Q_i)}{E(Y_i | \mu_i = 0, Q_i)} \quad (2)$$

式中: $TE_i$ 为农户*i*的生产效率,取值范围为0~1, $TE$ 越大表示农户生产效率越高; $Q_i$ 为各项中间投入; $\mu_i$ 为技术非效率项; $E(Y_i | \mu_i, Q_i)$ 为实际产出期望; $E(Y_i | \mu_i = 0, Q_i)$ 为不存在技术无效率情况下生产前沿面的产出期望。

(2)家庭收入。使用农户家庭年总收入表征精准农业技术的收入效应,并进行对数化处理。

##### 3.2.2 核心解释变量:精准农业技术采用

本文以水肥一体化技术作为精准农业技术的代表,主要基于3点考虑。第一,水肥一体化技术是资本密集型、劳动力节约型技术<sup>[7,20,24]</sup>,通过自动化设

表1 变量定义、描述性统计及均值差异检验

Table 1 Definitions of variables, descriptive statistics, and tests for differences in means

变量类型	变量名称	变量定义	精准农业技术		差异
			采用组 (N=290)	未采用组 (N=434)	
被解释变量	生产效率	由随机前沿模型计算所得	0.566(0.121)	0.469(0.135)	0.097***
	家庭收入	农户家庭年总收入/元,取对数	11.693(0.922)	11.008(1.137)	0.685***
核心解释变量	精准农业技术采用	农户是否采用水肥一体化技术,采用=1,未采用=0	1.000(0.000)	0.000(0.000)	—
控制变量	户主年龄	户主实际年龄/岁	56.959(10.496)	57.445(11.307)	-0.486
	户主受教育年限	户主上学年限/年	7.903(2.442)	7.170(3.042)	0.733***
	户主健康状况	不健康=1,一般=2,很健康=3	2.817(0.453)	2.666(0.616)	0.151***
	绿色生产认知	认为绿色生产很重要=1,不重要=0	0.548(0.499)	0.385(0.487)	0.163***
	家庭劳动力数量	家庭劳动力人数	2.521(1.220)	2.636(1.176)	-0.115
	社会网络	人情礼品支出金额/万元	0.684(1.836)	0.329(0.475)	0.355***
	种植年限	家庭从事农业生产年限/年	32.207(11.817)	32.959(11.829)	-0.752
	自有耕地规模	家庭自有耕地面积/亩	36.901(65.937)	15.736(36.804)	21.165***
	产业组织	加入农民专业合作社、农业企业或农业协会中的至少一种=1,未加入=0	0.286(0.453)	0.058(0.233)	0.228***
	中介变量	土地细碎化	承包地面积与地块数量的比值	7.018(10.023)	4.178(10.501)
到集镇距离		到最近集镇的距离/km	10.961(8.465)	8.995(7.041)	1.966***
亩均产量		亩均产量/斤,取对数	7.161(0.042)	6.942(0.029)	0.219***
亩均劳动力投入		亩均劳动力投入/天,取对数	2.105(0.073)	2.893(0.052)	-0.788***
亩均资本投入		亩均资本要素投入/元,取对数	6.157(0.068)	6.456(0.059)	-0.299***
土地净转入		土地转入面积大于转出面积=1,否则=0	0.390(0.489)	0.069(0.254)	0.321***
务工劳动力		家庭外出务工人员/人	0.893(0.895)	0.806(0.914)	0.087***
工具变量	村均技术采用	村庄除本人外其他农户采用精准农业技术的平均水平	0.513(0.219)	0.323(0.216)	0.190***
	与农技部门交流的便利情况	非常不便利=1,比较不便利=2,一般=3,比较便利=4,很便利=5	2.845(1.234)	2.177(1.082)	0.668***

注: \*、\*\*、\*\*\*分别表示统计结果在10%、5%、1%的水平上显著。下同。括号内为标准差。

备实现精准施水、定点施肥,具有精准化、自动化作业特点,是一项典型的精准农业技术<sup>[9]</sup>。第二,灌溉与施肥是农业生产中的必要环节,也是资源损耗严重和环境负荷压力较大的环节,该环节的水肥一体化技术能够较好地反映精准农业技术提质增效和保护环境的技术理念<sup>[10]</sup>。第三,水肥一体化技术是现阶段中国大力推广的一项精准农业技术,以该技术为例能够较好地响应国家政策。若农户采用水肥一体化技术,赋值为1;否则赋值为0。

### 3.2.3 中介变量

以亩均产量、亩均劳动力投入和亩均资本投入表征精准农业技术的增产情况和要素节约情况,均进行对数化处理。以农户土地净转入表征其是否进行经营规模的扩张,若土地转入面积大于转出面积,赋值为1;否则赋值为0。以农户家庭外出务工

人数表征劳动力外出务工情况。

### 3.2.4 工具变量

(1)在评估精准农业技术对农户技术效率影响中,借鉴钱龙等<sup>[30]</sup>、崔钊达等<sup>[31]</sup>的研究思路,以“村均技术采用”作为工具变量。同一村庄内的气候、地形以及技术普及等外部条件相似,且农户之间存在“羊群效应”,该工具变量理论上满足相关性要求,同时,村内其他人的技术采用情况不会直接影响本人的技术效率,满足外生性要求。

(2)在评估精准农业技术对农户家庭收入的影响中,借鉴曾晶等<sup>[32]</sup>、李亚娟等<sup>[33]</sup>的研究思路,选择“农户与农技部门交流的便利情况”作为工具变量。农户与农技部门交流的便利情况与农户的技术信息获取、技术认知密切相关,很大程度上能够影响农户的技术采用行为,但不会对家庭收入产生直接

2025年11月

影响,满足相关性和外生性要求。

### 3.2.5 控制变量

借鉴已有研究<sup>[11,15]</sup>,选择户主年龄、户主受教育年限、户主健康状况、绿色生产认知、家庭劳动力数量和社会网络等变量表征户主和家庭基本特征,选择种植年限、自有耕地规模、产业组织等变量表征生产经营特征,选择土地细碎化程度和到集镇距离表征外部环境特征。

具体的变量定义、组间差异及描述性统计如表1所示。通过组间对比统计可以看出,采用精准农业技术的农户在技术效率、家庭收入等方面均显著高于未采用组,与前文理论分析相符。此外,采用组在人力资本、社会资本以及物质资本等方面也具有相对更好的禀赋。

## 3.3 模型构建

### 3.3.1 内生转换回归模型

本文探讨的是农户采用精准农业技术对生产效率和家庭收入的影响,考虑到农户是否采用精准农业技术是自选择的结果,可能存在可观测和不可观测因素同时影响农户的技术采用决策和生产效率与家庭收入,导致估计结果有偏。此外,精准农业技术采用可能分别与生产效率和家庭收入之间可能存在反向因果关系,生产效率和家庭收入较高的农户可能更愿意采用精准农业技术。故本文选择基于工具变量和全信息最大似然估计的内生转换回归模型(ESR)修正上述内生性问题。ESR模型的基本思路是构建反事实假设,通过比较农户在真实决策与在反事实决策下生产效率和家庭收入的期望值差异,从而得到采用精准农业技术对生产效率和家庭收入的平均处理效应。ESR模型的建模过程包括两部分,第一部分是构建行为决策方程,即估计农户是否采用精准农业技术的影响因素;第二部分是结果方程,即分别估计采用组和未采用组农户技术效率和家庭收入的影响因素。具体建模过程如下:

首先,构建行为决策方程:

$$T_i^* = \alpha_i Z_i + \theta_i I_i + \mu_i \quad (3)$$

式中: $T_i^*$ 为农户是否采用精准农业技术的潜变量, $T_i = 1$ 为农户采用精准农业技术, $T_i = 0$ 为农户未采用精准农业技术。 $Z_i$ 为影响农户是否采用精准农业

技术的外生解释变量向量; $I_i$ 为识别变量; $\alpha_i$ 、 $\theta_i$ 为待估计系数; $\mu_i$ 为随机误差项。

其次,构建结果方程。采用精准农业技术农户的生产效率和家庭收入的估计方程和未采用精准农业技术农户的技术效率和家庭收入的估计方程分别如式(4)和式(5)所示:

$$Y_{i1} = \beta_1 X_{i1} + \sigma_{\mu 1} \lambda_{i1} + \varepsilon_{i1}, \text{ if } T_i = 1 \quad (4)$$

$$Y_{i2} = \beta_2 X_{i2} + \sigma_{\mu 2} \lambda_{i2} + \varepsilon_{i2}, \text{ if } T_i = 0 \quad (5)$$

式中: $Y_{i1}$ 和 $Y_{i2}$ 分别为采用精准农业技术和未采用精准农业技术农户的生产效率和家庭收入; $X_{i1}$ 和 $X_{i2}$ 分别为技术采用组和未采用组农户生产效率和家庭收入的影响因素向量; $\varepsilon_{i1}$ 和 $\varepsilon_{i2}$ 为随机扰动项。为解决式(3)中的样本选择偏差问题,通过引入逆米尔斯比率 $\lambda_{i1}$ 和 $\lambda_{i2}$ 及其协方差 $\sigma_{\mu 1} = COV(\mu_i, \varepsilon_{i1})$ 、 $\sigma_{\mu 2} = COV(\mu_i, \varepsilon_{i2})$ ,并运用完全信息极大似然法估计式(3)–(5), $\beta_1$ 和 $\beta_2$ 均为各解释变量的待估计系数。

采用组和未采用组农户的生产效率和家庭收入期望值分别如式(6)和(7)所示:

$$E[Y_{i1}|T_i = 1] = \beta_1 X_{i1} + \sigma_{\mu 1} \lambda_{i1} \quad (6)$$

$$E[Y_{i2}|T_i = 0] = \beta_2 X_{i2} + \sigma_{\mu 2} \lambda_{i2} \quad (7)$$

式中 $E(\cdot)$ 表示期望值。在反事实假设下,采用组农户若未采用,以及未采用组农户若采用,相应的生产效率和家庭收入期望值分别如式(8)和(9)所示:

$$E[Y_{i2}|T_i = 1] = \beta_2 X_{i1} + \sigma_{\mu 2} \lambda_{i1} \quad (8)$$

$$E[Y_{i1}|T_i = 0] = \beta_1 X_{i2} + \sigma_{\mu 1} \lambda_{i2} \quad (9)$$

通过比较式(6)与(8),可以得到技术采用组农户采用精准农业技术对生产效率和家庭收入的平均处理效应(ATT):

$$ATT = E[Y_{i1}|T_i = 1] - E[Y_{i2}|T_i = 1] = (\beta_1 - \beta_2) X_{i1} + (\sigma_{\mu 1} - \sigma_{\mu 2}) \lambda_{i1} \quad (10)$$

同理,通过比较式(7)与(9),可以得到未采用组农户采用精准农业技术对生产效率和家庭收入的平均处理效应(ATU):

$$ATU = E[Y_{i1}|T_i = 0] - E[Y_{i2}|T_i = 0] = (\beta_1 - \beta_2) X_{i2} + (\sigma_{\mu 1} - \sigma_{\mu 2}) \lambda_{i2} \quad (11)$$

### 3.3.2 因果中介效应模型

传统中介效应检验多依赖结构方程联立方程组建模,但其未基于因果推断框架,难以克服中介变量与解释变量、被解释变量间的内生性问题,易导致估计偏差<sup>[34]</sup>,且难以拓展至非线性模型<sup>[35]</sup>。本

文采用 Imai 等<sup>[36]</sup>提出的因果中介效应模型分析影响机制。该模型基于因果推断反事实框架,通过准贝叶斯蒙特卡罗近似估计模拟中介变量潜在值与结果,可得到平均因果中介效应、直接效应及总效应,还能基于序列可忽略性假设进行敏感性分析以验证结果稳健性,相比传统方法估计更准确可靠。具体建模过程如下:

农户采用精准农业技术对家庭收入的因果效应表现为真实结果与反事实结果的差值。假设  $Y_i(t)$  为农户  $i$  在某个状态下的家庭收入情况,  $t$  为  $T$  (是否采用精准农业技术)的取值。每个农户的家庭收入情况均有两个潜在值,但只有一个能被实际观察到。农户采用精准农业技术对家庭收入的影响为  $\tau_i(t) = Y_i(1) - Y_i(0)$ , 精准农业技术对家庭收入的平均总效应(ATE)为:

$$ATE = E [Y_i(1) - Y_i(0)] \quad (12)$$

假定精准农业技术可以通过中介变量  $M_i$  影响农户家庭收入,则  $M_i(t)$  有两个潜在值,分别为  $M_i(1)$  和  $M_i(0)$ ,且实际只能观察到其中一个,其相应的家庭收入为  $Y_i(t, M_i(1))$  和  $Y_i(t, M_i(0))$ ,  $t=0$  或  $t$

$=1$ 。按照 Imai 等<sup>[36]</sup>的定义,平均因果中介效应(ACME)为:

$$ACME = E [Y_i(t, M_i(1)) - Y_i(t, M_i(0))] \quad (13)$$

对于  $t=0$  或  $1$ ,代表  $T$  的取值,精准农业技术对家庭收入的平均直接效应(ADE)为:

$$ADE = E [Y_i(1, M_i(t)) - Y_i(0, M_i(t))] \quad (14)$$

## 4 结果与分析

### 4.1 精准农业技术对农户生产效率和家庭收入的影响

决策模型(精准农业技术采用)与结果模型(生产效率和家庭收入)的联立估计结果如表2所示。内生检验参数  $\rho_1$  分别在1%和5%的水平上显著为正,说明模型存在样本自选择偏误,且采用组农户的生产效率和家庭收入均高于样本中随机农户的生产效率和家庭收入。方程独立性检验和模型拟合优度检验均至少通过5%水平的显著性检验,说明使用内生转换回归模型是合理的。

#### 4.1.1 精准农业技术采用决策与生产效率模型联合估计结果

户主年龄仅对未采用组农户的生产效率有显

表2 精准农业技术采用决策模型与生产效率模型和家庭收入模型的联立估计结果

Table 2 Results of simultaneous estimation of precision agriculture technology decision model, production efficiency model, and household income model

变量	决策方程 (是否采用精准农业技术)	结果方程 (生产效率)		结果方程 (家庭收入)	
		采用组	未采用组	采用组	未采用组
户主年龄	0.004(0.008)	-0.001(0.001)	-0.002**(0.001)	-0.010(0.008)	0.000(0.007)
户主受教育年限	0.040**(0.020)	0.011*** (0.003)	0.005** (0.002)	0.074*** (0.020)	0.044** (0.017)
户主健康状况	0.175*(0.101)	0.049*** (0.014)	0.045*** (0.010)	0.077(0.105)	0.034(0.083)
绿色生产认知	0.379*** (0.107)	0.019(0.013)	0.011(0.013)	0.172*(0.096)	-0.033(0.103)
种植年限	-0.021(0.047)	0.005(0.005)	0.004(0.006)	0.245*** (0.039)	0.326*** (0.044)
社会网络	0.211*(0.116)	0.002(0.004)	0.010(0.013)	0.082*** (0.028)	0.178*(0.106)
家庭劳动力数量	-0.002(0.007)	0.002** (0.001)	0.003*** (0.001)	0.007(0.007)	0.002(0.007)
自有耕地规模	0.002(0.002)	-0.0001(0.000)	0.0001(0.000)	0.003** (0.001)	0.005* (0.003)
产业组织	0.880*** (0.161)	0.103*** (0.017)	0.088*** (0.031)	0.508*** (0.128)	0.585** (0.234)
土地细碎化	0.002(0.010)	0.0004(0.001)	0.001(0.002)	-0.002(0.006)	-0.007(0.012)
到集镇距离	0.001(0.007)	-0.002** (0.001)	-0.002* (0.001)	-0.010* (0.006)	-0.022*** (0.007)
村均技术采用	2.313*** (0.250)				
常数项	-2.592*** (0.550)	0.289*** (0.076)	0.312*** (0.060)	10.164*** (0.568)	9.587*** (0.476)
$\rho_1$		0.336*** (0.114)		0.334** (0.142)	
$\rho_0$			0.103(0.187)		-0.261(0.157)
模型拟合优度检验		100.63***		135.85***	
对数伪似然值		152.618		-1338.067	
方程独立性检验		6.86***		5.48**	
样本量	724	290	434	290	434

注:括号内为标准误。下同。

2025年11月

著负向影响,这是因为年龄较大的农户劳动能力较弱,劳动投入的边际产出较低,会降低生产效率,但对于采用组而言,精准农业技术具有节约劳动力的特点,在一定程度上弥补了采用组农户因年龄较大导致劳动能力弱的缺陷,故户主年龄对采用组生产效率的负向影响不显著。户主受教育年限、户主健康状况和种植年限对两组农户的生产效率均有显著正向影响,与王静等<sup>[37]</sup>的研究结果相符。这是因为三者均能在一定程度上反映劳动力素质的高低,劳动力素质越高,劳动投入的边际产出能力越强,越有利于生产效率的提高。产业组织和到集镇距离对两组农户生产效率分别有显著的正向和负向影响,与张永强等<sup>[38]</sup>的研究结论相符。原因是加入产业组织的农户能够获得技术培训与指导等服务,有利于提高农户的技能和管理水平,从而促进生产效率的提升。到集镇距离较远的农户搜寻信息的成本较高,不利于农户获得生产管理信息,从而对生产效率产生负向影响。

#### 4.1.2 精准农业技术采用决策与家庭收入模型联合估计结果

户主受教育年限、家庭劳动力数量、社会网络、自有耕地规模以及产业组织对两组农户的收入影响均显著为正,与杨鑫等<sup>[39]</sup>的研究结果相符,因为这些因素属于农户家庭的人力资本、社会资本、物质资本,是农户创收的基础。绿色生产认知仅对采用组农户的收入影响显著为正,这是因为采用组农户的绿色生产认知使其采用更多的绿色技术,规范化的生产管理模式促进了农业增收。到集镇距离对两组农户的收入有显著负向影响,这是因为距离集镇较近的农户交通和信息成本较低,面临着更多的销售选择和非农就业机会,有利于家庭增收。

#### 4.1.3 精准农业技术对农户生产效率和家庭收入的平均处理效应

精准农业技术对农户生产效率和家庭收入的

平均处理效应结果如表3所示。首先,生产效率的 $ATT$ 估计结果表明,在反事实假设下,采用精准农业技术的农户若未采用该技术,其生产效率将下降0.044,在1%的水平上显著,下降比例为7.8%; $ATU$ 的估计结果表明,在反事实假设下,未采用精准农业技术的农户若采用该技术,其生产效率将提升0.015,在1%的水平上显著,提升比例为3.4%。上述结果从两方面说明了精准农业技术能够促进农户生产效率的提升,H1得以验证。该结果不仅暗示着精准农业之于农户是“有效率”的,也意味着精准农业技术在节约要素投入、提升产量方面发挥着重要作用,说明采用精准农业技术的农户是“有效率”的。

其次,家庭收入的 $ATT$ 估计结果表明,对于采用精准农业技术的农户而言,若其未采用精准农业技术,家庭收入的对数将下降0.798,在1%的水平上显著,下降比例为6.8%;对于未采用精准农业技术的农户而言,若其采用精准农业技术,家庭收入的对数将提高0.107,在1%的水平上显著,上升比例为1.0%。说明精准农业技术能够显著提升农户家庭收入,即采用精准农业技术的农户是“不贫穷”的,假说H2得以验证。该结果产生的原因一方面在于精准农业技术具有提质增产效应,另一方面在于精准农业技术的要素节约效应使得农户将要素再配置于增收活动中导致的。

#### 4.2 精准农业技术对农户提效和增收的协同效应

本文进一步探究了精准农业技术在农户不同收入水平下增收与提效的协同效果。结果如图2所示。可以看出,提效效应与增收效应总体上均大于零,说明对于绝大多数农户而言,精准农业技术能够实现效率与收入的协同增长。进一步地,以收入中位数划分收入群体后可以看出,对于收入较低的农户群体,精准农业技术增收效果更好,且随着收入增加,提效效果也随之增加,进一步说明精准农

表3 精准农业技术对农户生产效率和家庭收入的平均处理效应

Table 3 Average treatment effects of precision agriculture technology on farmers' production efficiency and household income

变量	农户类别	采用精准农业技术	未采用精准农业技术	$ATT$	$ATU$	变化率/%
生产效率	采用精准农业技术农户	0.566(0.004)	0.522(0.004)	0.044***(0.005)	—	7.8
	未采用精准农业技术农户	0.484(0.003)	0.469(0.002)	—	0.015***(0.004)	3.4
家庭收入	采用精准农业技术农户	11.694(0.031)	10.896(0.048)	0.798***(0.057)	—	6.8
	未采用精准农业技术农户	11.116(0.022)	11.009(0.027)	—	0.107***(0.035)	1.0

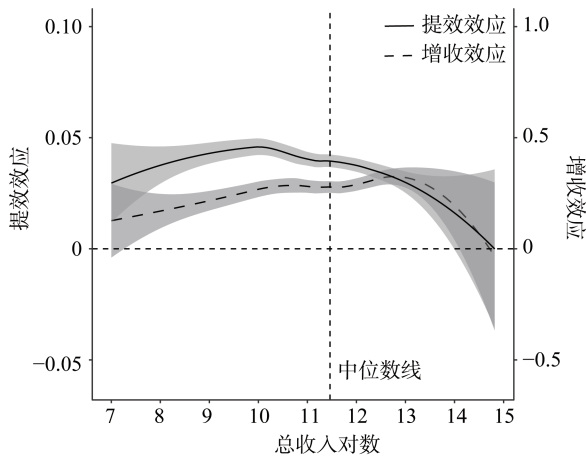


图2 精准农业技术对农户提效和增收的协同效应分析图

Figure 2 Analysis of synergistic effects of precision agriculture technology on improving farmers' efficiency and income

注:阴影部分为95%置信区间。

业技术是“有效率且不贫穷”的<sup>⑤</sup>。而对于较高收入群体,随着收入增加,精准农业技术的提效与增收效应均出现下降趋势,原因是收入较高的农户在技术投入水平、生产标准化方面通常已经具有较高的水平,精准农业技术对技术效率和收入的提升效应呈现“边际报酬递减”的趋势。

4.3 异质性分析

考虑到农户代际差异导致认知水平、经营水平上的差异,以及土地细碎化程度导致规模经济上的差异,可能导致精准农业技术对不同类型农户的提效和增收效应存在差异,本文借鉴时鹏等<sup>[40]</sup>的研究,按照户主年龄将农户划分为新生代( $\leq 50$ 岁)和老一代( $> 50$ 岁),并按照土地细碎化变量中位数将农户分为高细碎化程度和低细碎化程度两组,进而从农户代际差异和土地细碎化程度两方面进行异质性

分析(表4)。

对农户生产效率的影响结果表明,新生代和老一代农户采用精准农业技术对生产效率的平均处理效应分别为0.091和0.020,均在1%的水平上显著,但新生代的提效效应更高。原因是相比于老一代农户,新生代农户对新技术的学习、吸收和转化为实践的能力更高,更有利于发挥精准农业技术的提效作用。精准农业技术对高细碎化程度农户的生产效率影响不显著,对低细碎化程度农户的生产效率在1%的水平上显著为正,与叶子等<sup>[41]</sup>的研究结果相符。这是因为较高的土地细碎化程度阻碍了规模经济的实现,加大了生产过程中效率的损失,使得精准农业技术对该类农户的提效效果不显著。

对家庭收入的影响结果表明,新生代和老一代农户采用精准农业技术对家庭收入的平均处理效应分别为1.231和0.807,均在1%的水平上显著,但新生代的增收效应更高。这是因为新生代农户具有较高的劳动力素养和较为前沿的经营理念,可以将精准农业技术为其节约的劳动力更好地配置于农业或非农部门,从而实现更好的增收效果。精准农业技术对土地细碎化程度较高和较低农户的家庭收入均有显著提升作用,但对低土地细碎化程度农户的增收效应更高( $1.225 > 0.487$ )。这是因为土地细碎化程度较低的农户在形成规模化、专业化管理方面更具优势,采用精准农业技术后能够获得更高的经济效益。

4.4 影响机制分析

4.4.1 精准农业技术对农户生产效率的影响机制分析

精准农业技术对农户生产效率的影响机制检

表4 精准农业技术对不同禀赋农户生产效率与家庭收入的异质性

Table 4 Heterogeneity of precision agriculture technology on farmers' production efficiency and household income with different endowments

结果变量	农户类型	采用精准农业技术	未采用精准农业技术	ATT
生产效率	新生代	0.555(0.008)	0.464(0.010)	0.091*** (0.012)
	老一代	0.580(0.004)	0.560(0.006)	0.020*** (0.007)
	高细碎化程度	0.598(0.003)	0.589(0.006)	0.009(0.007)
	低细碎化程度	0.519(0.006)	0.451(0.007)	0.068*** (0.009)
家庭收入	新生代	11.752(0.087)	10.521(0.125)	1.231*** (0.153)
	老一代	11.672(0.036)	10.865(0.062)	0.807*** (0.071)
	高细碎化程度	11.753(0.037)	11.266(0.077)	0.487*** (0.086)
	低细碎化程度	11.589(0.063)	10.364(0.057)	1.225*** (0.085)

⑤ 本文使用更换模型法和替换因变量的表征方法对前文估计结果进行稳健性检验,得到与前文一致的结果,证明了研究结论的稳健性,限于篇幅未报告结果,留存备案。

2025年11月

验结果如表5所示。可以看出,采用精准农业技术对亩均产量的 $ATT$ 为0.441,在1%的水平上显著,说明采用精准农业技术能够促使亩均产量的对数提升0.441。该结果也表明采用精准农业技术能够显著提升亩均产量,而产出的提升有助于生产效率的提高,假说H1a得以验证。同理,精准农业技术对亩均劳动力和资本投入的 $ATT$ 分别为-0.356和-0.146,均在1%的水平上显著,说明采用精准农业技术能够促使亩均劳动力和资本投入的对数分别降低0.356和0.146。该结果也同样表明采用精准农业技术能够显著节约劳动力和资本投入,而生产投入的节约有助于生产效率的提高,假说H1b和H1c均得以验证。上述结果证实精准农业技术作为一种现代化农业技术,凭借其自动化、精准化的作业特点,能够灵活调整要素投入以及要素的精准输送,不仅节约了劳动力和资本投入,提高了资源利用效率,也改善了作物生长条件,提升了产量,较好地提升了农户的生产效率。

#### 4.4.2 精准农业技术对农户家庭收入的影响机制

基于线性结构方程的增收机制检验结果如表6所示。根据列(1)结果,精准农业技术对农户家庭收入的影响在1%的水平上显著为正。根据列(2)结果,采用精准农业技术对土地净转入的影响在1%的水平上显著为正,说明农户采用精准农业技术有利于经营规模的扩张。根据列(3)结果,将精

准农业技术采用与土地净转入同时纳入模型后,二者对家庭收入的影响均在1%的水平上为正。上述结果初步验证了精准农业技术通过促进农户扩大经营规模提升家庭收入。同理,结合列(4)、(5)结果,农户采用精准农业技术能够显著促进务工劳动力的增加,将精准农业技术采用与务工劳动力同时纳入模型后,二者对家庭收入的影响均在1%的水平上为正,该结果表明精准农业技术通过促进农户外出务工提升家庭收入。

表7报告了基于因果中介效应模型的影响机制检验结果。当中介变量为土地净转入时, $ACME$ 为0.131,95%的置信区间为[0.020, 0.293],不包含0,说明土地净转入的中介效应显著。 $ADE$ 和 $ATE$ 分别为0.344和0.475,置信区间均不包含0,说明直接效应和总效应显著,且中介效应占总效应比例为27.6%。说明精准农业技术通过促进农户扩大经营规模提升家庭收入,假说H2a得以验证。同理,当中介变量为务工劳动力时, $ACME$ 、 $ADE$ 和 $ATE$ 分别为0.078、0.415和0.493,95%的置信区间均不包含0,说明务工劳动力的中介效应显著,且中介效应占总效应比例为15.8%,表明精准农业技术通过促进农户外出务工提升家庭收入,假说H2b得以验证。上述结果一方面意味着精准农业技术通过促进农户扩大经营规模和外出务工两条路径提升其家庭收入;另一方面,直接效应显著也意味着精准农业技

表5 提效机制分析结果

Table 5 Results of efficiency improvement mechanism analysis

变量	采用精准农业技术	未采用精准农业技术	$ATT$
亩均产量	7.161(0.010)	6.720(0.009)	0.441*** (0.014)
亩均劳动力投入	2.127(0.054)	2.483(0.065)	-0.356*** (0.085)
亩均资本投入	6.164(0.027)	6.310(0.489)	-0.146*** (0.056)

表6 基于线性模型的增收机制分析结果

Table 6 Results of income increase mechanism analysis based on linear model

变量	家庭收入	土地净转入	家庭收入	务工劳动力	家庭收入
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
精准农业技术采用	0.494*** (0.076)	0.265*** (0.029)	0.346*** (0.079)	0.183*** (0.069)	0.416*** (0.070)
土地净转入	—	—	0.561*** (0.096)	—	—
务工劳动力	—	—	—	—	0.425*** (0.038)
控制变量	已控制	已控制	已控制	已控制	已控制
$F$	28.66***	19.51***	30.28***	11.79***	40.71***
Adj $R^2$	0.315	0.235	0.345	0.152	0.417

表7 基于因果中介效应模型的增收机制分析结果

Table 7 Results of income increase mechanism analysis based on causal mediation effect model

作用路径	效应类型	效应值	95%置信区间
精准农业技术→土地净转入→家庭收入	平均中介效应(ACME)	0.131	[0.020, 0.293]
	平均直接效应(ADE)	0.344	[0.200, 0.493]
	平均总效应(ATE)	0.475	[0.260, 0.739]
精准农业技术→务工劳动力→家庭收入	平均中介效应(ACME)	0.078	[0.024, 0.141]
	平均直接效应(ADE)	0.415	[0.286, 0.548]
	平均总效应(ATE)	0.493	[0.311, 0.684]

术的提质增产效应也能促进农户增收<sup>⑥</sup>。

#### 4.4.3 精准农业技术对农户生产效率和家庭收入的协同影响机制分析

通过梳理前文精准农业技术对农户生产效率和家庭收入的影响机制不难发现,精准农业技术在提升农户生产效率的过程中为农户节约了劳动力和资本投入,为农户进行要素再配置奠定了基础,农户可以将剩余劳动力和资本要素用于扩大经营规模,提升农业收入;也可以将剩余劳动力用于外出务工,提升工资性收入,二者共同促进了家庭收入增长。上述结果也意味着精准农业技术对农户生产效率和家庭收入的协同影响是通过改善要素配置实现的,具体来说,改善劳动力和资本要素配置是精准农业技术对农户生产效率和家庭收入的协同影响机制。

## 5 结论与政策启示

### 5.1 结论

本文基于2022年内蒙古、陕西和山西3个省份724份粮食种植户的微观调查数据,运用内生转换回归模型和因果中介效应模型,实证分析农户采用精准农业技术对其生产效率和收入的协同影响及其机制。主要研究结论如下:

(1)精准农业技术能够显著提升农户的生产效率和家庭收入,并能不同收入群体中实现效率和收入的协同增长,且对较低收入群体的促进效果更好。即采用精准农业技术的农户是“有效率且不贫穷”的。具体而言,在反事实假设下,样本区农户采用精准农业技术可以促使生产效率和家庭收入分别提升约7.8%和6.8%。

(2)精准农业技术的提效与增收效应在不同农

户群体间存在异质性。精准农业技术对新生代农户的生产效率和家庭收入的提升作用均高于老一代农户;精准农业技术对土地细碎化程度较低农户的生产效率和家庭收入的提升作用均高于土地细碎化程度较高的农户。

(3)影响机制分析表明,精准农业技术通过节约劳动力投入、资本投入和增加产出3条路径促进生产效率的提升;精准农业技术通过促进农户扩大经营规模和外出务工两条路径实现家庭增收;改善劳动力和资本要素配置是精准农业技术对农户生产效率和家庭收入的协同影响机制。

### 5.2 政策启示

基于上述研究结论,本文得到如下政策启示:

(1)持续推进发展精准农业,增强精准农业技术推广力度。农技推广部门可以通过线上线下相结合的方式开展技术推广,在线上,充分利用数字平台(例如微信、QQ等)推送技术知识、技术效果、支持政策等技术相关信息,宣传精准农业技术在增收提效和环保方面的优势,提升农户的技术认知;在线下,农技推广部门可以联合产业组织推广技术,借助产业组织平台为农户建立技术示范基地、开展技术培训,以“大手牵小手”的方式发挥产业组织的带动作用,提高农户的技术采用率。

(2)针对不同类型农户的资本禀赋,制定差异化技术推广方案。对于新生代农户和规模化程度较高的农户给予更多的技术扶持和政策偏向,例如实施具有偏向性的技术补贴和信贷支持政策,以更好地发挥精准农业技术的提效增收效应。

(3)进一步完善土地流转制度和流转市场体系,并加强就业信息流动机制建设。应引导村镇设

<sup>⑥</sup> 本文对上述中介效应结果进行敏感性分析,发现上述因果中介效应能够支持序列可忽略性假设,说明中介效应结果是稳健的,限于篇幅未报告结果,留存备索。

2025年11月

立土地流转信息平台 and 就业信息咨询平台,并通过数字平台(例如微信、QQ等)及时发布供需信息,提高供需双方的信息流通效率。不仅有利于土地细碎化程度较高的农户通过土地流转形成规模化经营,降低效率损失,也能为采用精准农业技术的农户进一步扩大经营规模或外出务工实现增收奠定坚实基础。

### 参考文献(References):

- [1] 宋洪远. 进一步深化农村改革推进农业农村现代化[J]. 南京农业大学学报(社会科学版), 2025, 25(4): 2-13. [Song H Y. Further deepen rural reform and promote the modernization of agriculture and rural areas[J]. Journal of Nanjing Agricultural University (Social Sciences Edition), 2025, 25(4): 2-13.]
- [2] Blasch J, Van Der Kroon B, Van Beukering P, et al. Farmer preferences for adopting precision farming technologies: A case study from Italy[J]. European Review of Agricultural Economics, 2022, 49(1): 33-81.
- [3] Kendall H, Clark B, Li W, et al. Precision agriculture technology adoption: A qualitative study of small-scale commercial “family farms” located in the North China Plain[J]. Precision Agriculture, 2022, 23(1): 319-351.
- [4] 刘欢, 孙自来, 阮俊虎. 制度环境、价值认知与精准农业技术采纳: 来自黄河流域1998份微观农户的证据[J]. 西北农林科技大学学报(社会科学版), 2025, 25(2): 121-132. [Liu H, Sun Z L, Ru-an J H. Institutional environment, value perception and precision agriculture technology adoption: Evidence based on 1998 micro farming households in the Yellow River Basin[J]. Journal of Northwest A&F University (Social Science Edition), 2025, 25(2): 121-132.]
- [5] Schultz T W. Transforming Traditional Agriculture[M]. New Haven: Yale University Press, 1964.
- [6] Abler D G, Sukhatme V A. The “efficient but poor” hypothesis[J]. Review of Agricultural Economics, 2006, 28(3): 338-343.
- [7] 张毅, 杨金江. 现代设施农业的创新发展: 理论逻辑、现实情境与改革路径[J]. 东岳论丛, 2024, (1): 68-77. [Zhang Y, Yang J J. The innovative development of modern facility agriculture: Theoretical logic, realistic situation and reform path[J]. Dongyue Tribune, 2024, (1): 68-77.]
- [8] 郭巧苓, 马骥. 互联网应用对农户精准农业技术采纳的影响: 基于907个蛋鸡养殖户的实证分析[J]. 农业技术经济, 2024, (12): 25-45. [Guo Q L, Ma J. The impact of internet application on the adoption of precision agricultural technology of farmers: Empirical analysis based on 907 layer farmers[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2024, (12): 25-45.]
- [9] 李家辉, 程雯欣, 陆迁. 数字金融与社会网络对农户精准农业技术采用的影响: 以水肥一体化技术为例[J]. 自然资源学报, 2024, 39(12): 2980-3004. [Li J H, Cheng W X, Lu Q. The impact of digital finance and social network on the adoption of precision agricultural technology by farmers: Taking water and fertilizer integration technology as an example[J]. Journal of Natural Resources, 2024, 39(12): 2980-3004.]
- [10] Sidhu H S, Jat M L, Singh Y, et al. Sub-surface drip fertigation with conservation agriculture in a rice-wheat system: A breakthrough for addressing water and nitrogen use efficiency[J]. Agricultural Water Management, 2019, 216: 273-283.
- [11] 朱月季, 杨倩, 王芳. 社会网络对蕉农采纳资源节约型技术的影响机制: 以水肥一体化技术为例[J]. 资源科学, 2021, 43(6): 1099-1114. [Zhu Y J, Yang Q, Wang F. Mechanism of influence of social networks on banana farmers’ adoption of resource conservation technologies: A case study of the drip fertigation system[J]. Resources Science, 2021, 43(6): 1099-1114.]
- [12] Yang Q, Zhu Y, Wang J. Adoption of drip fertigation system and technical efficiency of cherry tomato farmers in Southern China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123980.
- [13] 汤玲迪, 袁寿其, 刘俊萍, 等. 中国喷灌机现状与发展思考[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(10): 1072-1080. [Tang L D, Yuan S Q, Liu J P, et al. Challenges and opportunities for development of sprinkler irrigation machine in China[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(10): 1072-1080.]
- [14] DeLay N D, Thompson N M, Mintert J R. Precision agriculture technology adoption and technical efficiency[J]. Journal of Agricultural Economics, 2022, 73(1): 195-219.
- [15] Carrer M J, Filho H M D S, Vinholis M D M B, et al. Precision agriculture adoption and technical efficiency: An analysis of sugarcane farms in Brazil[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2022, DOI: 10.1016/j.techfore.2022.121510.
- [16] 陶源, 赵晓颖, 刘庆志. 水肥一体化技术的环境效应与经济效应分析: 基于山东省苹果种植户的调研数据[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(9): 60-70. [Tao Y, Zhao X Y, Liu Q Z. Analysis of environmental and economic effects of irrigation and fertilization technology: Based on survey data of apple growers in Shandong Province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023, 44(9): 60-70.]
- [17] Sandhu O S, Gupta R K, Thind H S, et al. Drip irrigation and nitrogen management for improving crop yields, nitrogen use efficiency and water productivity of maize-wheat system on permanent beds in north-west India[J]. Agricultural Water Management, 2019, 219: 19-26.
- [18] Rahim H, Ghazali M S S M, Bookeri M A M, et al. Economic potential of rice precision farming in malaysia: The case study of Felera Seberang Perak[J]. Precision Agriculture, 2022, 23(3): 812-829.
- [19] 陆泉志, 张益丰. 农户从测土配方施肥中获益了吗? 兼论测土

- 配方施肥技术缘何“叫好不叫座”[J]. 农业经济与管理, 2023, (3): 48–58. [Lu Q Z, Zhang Y F. Have farmers benefited from soil testing and formulated fertilization? On the reason why soil testing and formulated fertilization is “widely acclaimed but not widely adopted”[J]. *Agricultural Economics and Management*, 2023, (3): 48–58.]
- [20] Schimmelpfennig D. Farm profits and adoption of precision agriculture[J]. *Economic Research Report*, 2016, DOI: 10.22004/ag.econ.249773.
- [21] Bucci G, Bentivoglio D, Belletti M, et al. Measuring a farm’s profitability after adopting precision agriculture technologies: A case study from Italy[J]. *Acta Imeko*, 2020, 9(3): 65–65.
- [22] Biermacher J T, Brorsen B W, Epplin F M, et al. The economic potential of precision nitrogen application with wheat based on plant sensing[J]. *Agricultural Economics*, 2009, 40(4): 397–407.
- [23] Dhoubhadal S P. Precision agriculture technologies and farm profitability[J]. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 2020, 46(2): 256–268.
- [24] Sun X, Ritzema H, Huang X, et al. Assessment of farmers’ water and fertilizer practices and perceptions in the North China Plain [J]. *Irrigation and Drainage*, 2022, 71(4): 980–996.
- [25] Adewusi A O, Asuzu O F, Olorunsogo T, et al. AI in precision agriculture: A review of technologies for sustainable farming practices [J]. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 2024, 21 (1): 2276–2285.
- [26] 李家辉, 陆迁. 加入合作社对农户土地转入行为的影响[J]. 资源科学, 2022, 44(6): 1181–1195. [Li J H, Lu Q. Influence of joining cooperatives on farmers’ land transfer-in behavior[J]. *Resources Science*, 2022, 44(6): 1181–1195.]
- [27] 邓远远, 朱俊峰. 保护性耕作技术对粮食生产效率和环境效率的提升效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(12): 218–228. [Deng Y Y, Zhu J F. Effects of conservation tillage technology on improving grain production and environmental efficiency[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2023, 33(12): 218–228.]
- [28] 朱然, 顾雪松, 秦涛, 等. 银保互动对农户增收的作用效果与机制研究: 基于鲁、辽、赣、川四省的调查数据[J]. 中国农村观察, 2023, (1): 96–115. [Zhu R, Gu X S, Qin T, et al. The effect and mechanism of bank–insurance interactions on farmers’ income increase: An analysis based on the survey data collected from Shandong, Liaoning, Jiangxi and Sichuan Provinces[J]. *China Rural Survey*, 2023, (1): 96–115.]
- [29] 任天驰, 刘素春, 聂赟彬. 大豆玉米带状复合种植对农户生产效率的影响: 基于黄淮海和西南种植区的实证分析[J]. 资源科学, 2024, 46(7): 1346–1357. [Ren T C, Liu S C, Nie Y B. The impact of Maize–Soybean strip intercropping on farmers’ production efficiency: Empirical analysis based on the Huang–Huai–Hai and Southwest planting areas[J]. *Resources Science*, 2024, 46(7): 1346–1357.]
- [30] 钱龙, 饶清玲, 刘同山. 节水灌溉技术采纳对种植结构“非粮化”的影响: 基于黄淮海地区的调查[J]. 农村经济, 2022, (10): 47–55. [Qian L, Rao Q L, Liu T S. Impact of water–saving irrigation technology adoption on ‘non–grain’ planting structure: A survey in Huang–Huai–Hai region[J]. *Rural Economy*, 2022, (10): 47–55.]
- [31] 崔钊达, 余志刚, 张培鸽. 保护性耕作技术采用有助于提高粮食生产技术效率吗? 以玉米为例[J]. 农林经济管理学报, 2021, 20(4): 458–467. [Cui Z D, Yu Z G, Zhang P G. Does adoption of conservation tillage technology help improve technical efficiency of grain production? A case study of corn[J]. *Journal of Agro–Forestry Economics and Management*, 2021, 20(4): 458–467.]
- [32] 曾晶, 李剑, 青平, 等. 农户作物营养强化技术采纳提高了生产绩效吗? 基于小麦种植户的实证分析[J]. 中国农村观察, 2022, (1): 107–125. [Zeng J, Li J, Qing P, et al. Does farmers’ adoption of biofortification crop technologies improve production performance? An empirical analysis based on wheat growers[J]. *China Rural Survey*, 2022, (1): 107–125.]
- [33] 李亚娟, 马骥. 科学施肥技术的收入效应差异分析: 基于粮农初始禀赋的实证估计[J]. 农业技术经济, 2021, (7): 18–32. [Li Y J, Ma J. Analysis of income effect differences of scientific fertilization technology: An empirical estimation based on farmers’ initial endowment[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2021, (7): 18–32.]
- [34] 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. [Jiang T. Mediating effects and moderating effects in causal inference[J]. *China Industrial Economics*, 2022, (5): 100–120.]
- [35] Hicks R, Tingley D. Causal Mediation Analysis[J]. *The Stata Journal*. 2011, 11(4): 605–619.
- [36] Imai K, Keele L, Tingley D. A general approach to causal mediation analysis[J]. *Psychological Methods*, 2010, 15(4): 309–334.
- [37] 王静, 赵凯. 宅基地退出、要素配置与农户农业生产效率[J]. 南京农业大学学报(社会科学版), 2022, 22(3): 151–163. [Wang J, Zhao K. Homestead exit, factor allocation and farmer’s agricultural production efficiency[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2022, 22(3): 151–163.]
- [38] 张永强, 田媛. 社会化服务模式对农户技术效率的影响[J]. 农业技术经济, 2021, (6): 84–100. [Zhang Y Q, Tian Y. The impact of agricultural socialized service mode on the farmers’ technical efficiency[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2021, (6): 84–100.]
- [39] 杨鑫, 穆月英. 农业技术采用、时间重配置与农户收入[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2020, (4): 50–60, 176. [Yang X, Mu Y Y. Agricultural technology adoption, time reallocation and farmer’s income[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University (So-*

- cial Sciences Edition), 2020, (4): 50–60, 176.]
- [40] 时鹏, 余劲. 易地扶贫搬迁对农户非农就业的影响: 基于内生转换 Probit 模型[J]. 农业技术经济, 2023, (4): 101–120. [Shi P, Yu J. Impact of poverty alleviation relocation on rural household's off-farm employment: Based on the endogenous switching probit model[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2023, (4): 101–120.]
- [41] 叶子, 夏显力, 陈哲, 等. 农地确权、农地细碎化与农业生产效率[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(12): 30–36. [Ye Z, Xia X L, Chen Z, et al. Farmland right confirmation, farmland fragmentation and agricultural production efficiency: A case study in Loess Plateau[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(12): 30–36.]

## Synergistic effects and mechanisms of precision agriculture technology on farmers' production efficiency and household income

LI Jiahui, LI Han, NIU Yongze, CHENG Wenxin, LU Qian

(College of Economics and Management, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** [Objective] Exploring whether precision agriculture technology can promote the synergistic growth of farmers' production efficiency and household income is crucial for its continuous promotion and application. [Methods] Based on the micro-survey data of 724 grain-growing households in Inner Mongolia, Shaanxi, and Shanxi provinces in 2022, the endogenous switching regression model was used to empirically analyze the synergistic effects of precision agriculture technology on farmers' production efficiency and household income, as well as the underlying mechanisms. [Results] (1) Precision agriculture technology could significantly improve the production efficiency and household income of farmers, achieving the synergistic growth of efficiency and income across different income groups. (2) Heterogeneity analysis showed that the enhancement effects of precision agriculture technology on both production efficiency and household income were higher for the new-generation farmers than for the old-generation farmers, and higher for farmers with lower levels of land fragmentation than for those with higher levels of land fragmentation. (3) Mechanism analysis showed that precision agriculture technology improved production efficiency by saving capital and labor inputs and increasing agricultural output. Precision agriculture technology improved household income by promoting farmers to expand their business scale and engage in off-farm employment. Optimizing the allocation of labor and capital resources constituted the mechanisms through which precision agriculture technology exerted synergistic effects on farmers' production efficiency and household income. [Conclusion] Precision agriculture technology can achieve the synergistic growth of farmers' production efficiency and household income. In the future, it is essential to continue promoting the development and expansion of precision agriculture technology, thereby improving the efficiency of agricultural production and increasing the income of farmers.

**Key words:** precision agriculture; technology adoption; farmer; production efficiency; household income; endogenous switching regression model