

DOI: 10.12357/cjea.20220686

万凌霄, 杨果. 农业机械对化肥施用影响的路径及效果研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(4): 643–653  
WAN L X, YANG G. Influence pathways and effects of agricultural mechanization on the application of chemical fertilizers[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(4): 643–653

# 农业机械对化肥施用影响的路径及效果研究\*

万凌霄, 杨果\*\*

(重庆社会科学院农业农村研究所 重庆 400020)

**摘要:** 实现农业绿色生产有赖于小农户生产方式的转变。相比以往研究多聚焦于人工施肥, 本研究关注农户使用机械后, 通过机械搭配使用化肥对化肥施用量以及施肥均匀度的影响。利用 2017 年中国农村家庭追踪调查 (CRHPS) 数据, 通过最小二乘估计法 (OLS) 以及处理效应模型探讨农业机械化对小麦化肥使用影响, 并关注到不同机械使用来源化肥施用差异。研究结果表明: 整体而言, 使用机械并不会降低小麦化肥使用量, 但能够缩小农户间施肥差异。分环节来看, 只有机播环节能够降低化肥施用量以及施肥不均等, 这主要是因为小麦在机播环节施肥占比较高。区分农户农业机械使用来源差异后, 发现相比农户自购机械, 购买机械服务每公顷能够减少 150.45 kg 化肥施用量并提升施肥均匀度。其中, 购买机播服务同自购机械播种相比, 每公顷能降低 213.45 kg 施肥量并提升 0.32 个单位施肥均匀度。此外, 农户采用机播可使每公顷化肥投入下降 283.95 元, 购买机械服务则可使每公顷化肥投入平均下降 394.50 元, 购买机播服务能降低 352.80 元。这说明, 农业机械化能够实现化肥减量并降低农户间施肥不均等, 且主要通过服务外包实现。本文结论有助于扩展理解农业机械化与现代农业之间的关系, 从而为我国农业绿色转型以及可持续发展提供有力支撑。

**关键词:** 农业机械化; 服务外包; 化肥减量; 施肥均匀度

**中图分类号:** F325.2

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



## Influence pathways and effects of agricultural mechanization on the application of chemical fertilizers\*

WAN Lingxiao, YANG Guo\*\*

(Institute of Agricultural and Rural Research, Chongqing Academy of Social Sciences, Chongqing 400020, China)

**Abstract:** Achieving green agricultural production depends on changes in smallholder farmers' production methods. Compared with previous studies that focused on manual fertilizer application, this study focused on the effect of machinery use and use links on fertilizer application and uniformity among farmers. Using data from the 2017 China Rural Household Panel Survey (CRHPS), the impact of agricultural mechanization on fertilizer application in wheat was explored through ordinary least squares (OLS) method, as well as treatment effect models, with attention to differences in fertilizer application across sources of machinery use. The results show that the use of machinery does not reduce fertilizer use in wheat but can reduce inter-farmer fertilizer application differences. Only machine sowing decreased fertilizer application and uniformity, mostly because wheat has a higher fertilizer application rate at sowing.

\* 2021 年度重庆市社会科学规划重大委托项目 (2021WT41)、2022 年度重庆社会科学院自主项目“数字经济促进城乡融合发展研究” (2022ZZ0102) 和“加快建设宜居宜业和美乡村研究”资助

\*\* 通信作者: 杨果, 主要研究方向为农村经济、生态经济等。E-mail: 1090526699@qq.com

万凌霄, 主要研究方向为农业资源与环境、农村经济。E-mail: lindseywan@126.com

收稿日期: 2022-09-05 接受日期: 2022-10-21

\* This study was supported by the Municipal Social Science Planning Major Commissioned Project of Chongqing in 2021 (2021WT41), the Autonomous Projects “Research on Digital Economy for Integrated Urban-Rural Development” (2022ZZ0102) and “Accelerating the Construction of Livable, Workable and Beautiful Villages” of Chongqing Academy of Social Sciences in 2022.

\*\* Corresponding author, E-mail: 1090526699@qq.com

Received Sep. 5, 2022; accepted Oct. 21, 2022

After separating the various sources of farm machinery use, it is discovered that using machinery services rather than buying machinery equipment reduces the amount of fertilizer applied per hectare by 150.45 kg, and increases fertilizer uniformity. For instance, compared with purchasing machine equipment, the purchase of machine services lowered fertilizer application by 213.45 kg per hectare and increased fertilizer application uniformity by 0.32 units per hectare during seeding. Additionally, farmers can cut their fertilizer input by 283.95  $\text{¥}\cdot\text{hm}^{-2}$  by adopting machine sowing. Purchasing machinery services can lower fertilizer input by 394.50  $\text{¥}\cdot\text{hm}^{-2}$ , especially during seeding the input was decreased by 352.80  $\text{¥}\cdot\text{hm}^{-2}$ . This suggests that agricultural mechanization can achieve fertilizer reduction and reduce inequality in fertilizer application among farmers, mainly through outsourcing. The findings of this study can help expand our understanding of the relationship between agricultural mechanization and modern agriculture and can also provide strong support for the green transformation and sustainable development of agriculture in China.

**Keywords:** Agricultural mechanization; Service outsourcing; Fertilizer reduction; Fertilizer application uniformity

改革开放以来,化肥在生产要素中对粮食增产最为重要<sup>[1-2]</sup>。但随着农业生产对化肥的过度依赖,也出现了化肥施用过量的问题<sup>[3-5]</sup>。不断增加的化肥施用量不仅造成了面源污染等环境问题,还反向威胁到我国粮食安全。为解决资源环境困境并保障粮食安全,我国政府将化肥“减量化”视为重要工作方向。2008年起,中央一号文件不断提出农业绿色发展的需求,采用补贴、技术推广等方式促使农业生产主体实现生产绿色转型。2015年,农业农村部颁布《到2020年化肥使用零增长行动方案》,力争到2020年主要农作物化肥施用量实现零增长,第一次明确化肥减量的具体目标。国家统计局数据显示,我国化肥施用总量从2016年起出现自20世纪70年代以来的首次下降。虽然整体上我国化肥减量取得了初步进展,但2020年化肥施用量为313  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,仍远高于国际安全施用标准。

农户作为农业生产的微观主体,化肥减量目标的实现有赖于其生产经营方式转变。已有化肥减量研究主要包括以下几个维度:一是从生产端出发,关注到信息渠道以及农户个体及家庭特征的影响<sup>[6-7]</sup>。通过农业社会化服务、农技推广服务等方式能够减少农户与化肥销售商之间的信息不对称,从而改善农户施肥状况<sup>[8-9]</sup>。此外,农户认知能力、风险规避意识、收入状况以及家庭经营规模等也均能影响农户施肥行为<sup>[10-14]</sup>。二是从消费端出发,聚焦于农产品质量追溯体系建立,通过绿色、有机农产品标签以及标准化生产等方式倒逼农户实现减量施肥<sup>[2,15-16]</sup>。三是聚焦于施肥方式转变,我国城镇化进程加快,农村劳动力大量往城市转移,劳动力成本大幅度上升<sup>[17]</sup>,大量农户开始通过机械替代劳动以实现效用最大化。化肥作为土地替代型生产要素,长期以来主要靠人工完成<sup>[18]</sup>。部分研究区别于以往人工施肥,侧重于讨论机械施肥对化肥减量的影响<sup>[7]</sup>。

已有研究从多角度讨论了农户减量施肥的因素,

也有少量文献关注到机械应用对化肥施用的影响,但仍存在争议及不足,主要有以下3点原因:一是关于农业机械对化肥施用的影响特点认知不足。除化肥施用量外,由于精准、定量的特点机械施肥更有可能减少农户之间施肥不均等。二是未关注到不同机械应用环节对化肥施用的影响差异。以小麦(*Triticum aestivum*)化肥投入流程为例,农户需要在播种时施用基肥,后期返青、拔节期或者孕穗期进行追肥和补肥。农户若使用机械,一般是在播种时种肥同播以及植保环节喷洒叶面肥。因此,若笼统使用机械应用作为衡量指标而不区分与化肥施用相关环节,也会误判机械应用与化肥施用之间的关系。三是研究并未关注到机械使用来源差异对化肥投入影响的差异。农业机械具有较高资产专用性特点,受自身禀赋以及规模准入约束限制,大部分农户无法自己购置农业机械<sup>[19]</sup>。因而除自购农机外,通过服务外包获取农机服务也是农户机械应用的有效补充<sup>[20-21]</sup>。二者由于机械质量、技术应用以及施肥主体人力资本差异也会对化肥施用产生不同影响。基于上述分析,本文首先从理论层面分析机械应用对化肥施用的影响,并基于机械应用来源于自购或者服务外包,讨论不同机械来源对化肥施用的影响差异。其次,以小麦作为研究对象,利用浙江大学中国家庭大数据库(CFD)2017年中国农村家庭追踪调查(China rural household panel survey, 以下称“CRHPS”)数据中种植户样本建立计量模型,并克服潜在的内生性问题来实证检验。本文旨在通过理论与实证分析相结合,揭示机械应用与化肥施用之间的关系,进而为中国农业绿色转型以及可持续发展提供现实证据。

## 1 理论分析与研究假说

### 1.1 机械应用对化肥施用影响机理

机械应用对农户化肥施用的影响主要包括施用量和施肥均匀度两个维度。根据《“十四五”农业机械化发展规划》,“十三五”以来我国农业机械化取得

了长足发展,农作物耕种收综合机械化率达 71.25%,相比“十二五”提升 7.4 个百分点<sup>[22]</sup>。随着我国城镇化进程加深,劳动力不断转移,劳动力成本大幅上升。农户使用机械一般是为了弥补劳动力约束,因此家庭劳动力投入与机械应用存在相互替代的关系。理论上,农户施肥具有人工施肥以及机械施肥两种形式。相较而言,人工施肥能够按照作物实际生产状况机动调整施肥程序,并灵活变更用量及现场操作,但标准化程度较低。而使用机械施肥则能够解决人工施肥随机性以及不均匀的问题,提升化肥施用深度及效率<sup>[7]</sup>。从化肥施用量来看,以往农户在人工施肥时多采用“多量少次”的方法以减少劳动力投入,且由于人工撒施化肥需要自己估计化肥施用量,化肥用量具有随机性,往往容易导致过量施肥。农户在使用机械后,通过机械配施化肥,可定时定量施肥从而减少化肥施用量<sup>[23]</sup>。从施肥均匀度看,机械应用能够改善农户间施肥不均的情况。由于机械施肥直接按量标准化施用化肥,减少了农户化肥投入的决策流程,农户在使用机械后能够减少个体间施肥差异,促使区域内施肥量趋于一致。由此,得到假说 1:

H1: 农业机械应用能够实现化肥减量以及降低农户间施肥不均等。

## 1.2 不同机械应用环节对化肥施用影响机理

不同机械使用环节因机械与化肥配施程度以及施肥占比差异,化肥施用量以及施肥均匀度会有所不同。农户对于耕地、播种以及收割等劳动密集型环节具有较强应用需求,而对于植保这类劳动密集型环节应用需求不足。虽然机械的使用往往与农地规模有关,但播种、耕地以及收割等环节由于发展较早,已经研发出较多与小规模地块相匹配的机械。此外,播种环节基肥施用占整体施肥比例的 50%~60%,因而降低化肥施用量以及提升施肥均匀度效果更显著。植保环节机械使用一方面具有规模准入约束,一般经营规模大于 2 hm<sup>2</sup> 才达到使用无人机的准入门槛<sup>[24]</sup>;另一方面植保环节使用无人机喷洒叶面肥整体施肥占比较小,因而影响并不明显。由此,得到假说 2:

H2: 分环节来看,播种环节机械应用能够实现化肥减量并降低农户间施肥不均等。

## 1.3 不同机械应用来源对化肥施用影响差异

农户是否应用机械受信贷约束、经营规模以及地形特征等因素影响<sup>[25-27]</sup>,自购机械使用存在现实约束。除自购机械,利用迂回投资例如使用播种及植保环节外包服务也能够精准施肥且缓解劳动力约束<sup>[7]</sup>。

外包服务相比农户自购农机,一方面农户使用机械服务时,服务商具备专业技术人员,能够有效识别化肥质量。相比低质量肥料,高质量肥料肥效好,因此农户使用高质量化肥可降低最终化肥施用量;另一方面,服务商为农户传递技术信息可改变农户施肥技术。农户使用机械服务的过程中,服务商充当农业生产知识的传送器<sup>[28-29]</sup>。相较农户,服务商具有更广泛的信息来源,提供服务过程中通过化肥施用知识传递,在农业生产过程中实现了技术转移。此外,服务商更具资金、信息以及规模采购优势,能够用较低价格获取国外大型机械进行生产。相比国内农业机械,国外播种以及植保环节的机械更加大型,且与化肥适配程度较高。例如,法国库恩公司的机械在施肥过程中能够进行全自动化操作,有效配合播种以及肥料施用,均匀撒至农田<sup>[30-31]</sup>,从而提升化肥施用均匀度。由此,得到假说 3:

H3: 相比农户自购机械,农业机械服务对化肥减量以及降低农户间施肥不均等的效果更明显。

## 2 研究方法

### 2.1 模型构建

#### 2.1.1 基准模型设置

本研究重点关注机械应用、各环节机械应用以及机械应用来源差异对化肥施用的影响。分别构建了农户使用与未使用农业机械、使用与未使用农业机械服务的方程进行实证检验,虚拟变量多元线性回归模型表达如下:

$$f_i = \alpha_{0i} + \alpha_{1i} \times M_i + \alpha_{2i} \times p_{fi} + \sum_{3 \leq k \leq 11} \alpha_{ki} \times C_{ki} + D_i + \sigma_i \quad (1)$$

$$f_i = \beta_{0i} + \beta_{1i} \times S_i + \beta_{2i} \times p_{fi} + \sum_{3 \leq k \leq 11} \beta_{ki} \times C_{ki} + D_i + \mu_i \quad (2)$$

式中: $f_i$ 表示第*i*个农户小麦的化肥施用情况,以单位面积化肥施用量和施肥均匀度来衡量; $M_i$ 为二元虚拟变量,表示农户是否在农业生产中使用机械,如使用则为 1,否则为 0; $C_{ki}$ 表示除化肥价格以及机械应用或机械服务应用控制变量外,第*i*个农户第*k*项控制变量。需要说明的是,农户机械使用在现实中区分为机耕、机播、机械撒药以及机收环节,鉴于化肥施用只与产中环节相关,并不涉及收割环节,因此设定只要使用机耕、机播、机械撒药任一项定义为农户进行了机械应用,式(1)主要验证整体机械应用以及不同环节机械应用对化肥施用的影响。 $S_i$ 为机械服务,如使用则为 1,否则为 0。农户只要购买机耕服务、机播服务以及机械撒药服务定义为使用了机

械服务。 $p_{fi}$  为化肥价格; $k$  表示除化肥价格以及机械应用或机械服务应用控制变量外,第  $i$  个农户第  $k$  项控制变量; $D_i$  为地区虚拟变量,主要控制地区之间包括气候特征、外部经济因素等差异; $\sigma_i$  以及  $\mu_i$  为随机扰动项; $\alpha_{0i}$  以及  $\beta_{0i}$  为截距项; $\alpha_{1i}$ 、 $\alpha_{2i}$ 、 $\alpha_{ki}$ 、 $\beta_{1i}$ 、 $\beta_{2i}$ 、 $\beta_{ki}$  为待估参数。

### 2.1.2 处理效应模型 (treatment effect model, TEM)

在基准模型的基础上考虑两个内生性问题:一是核心解释变量机械以及机械服务应用存在自选择问题;二是存在不可观测变量对机械以及机械服务应用产生影响。基于此,进一步采用处理效应模型解决机械应用以及机械服务应用对化肥施用影响的内生性问题。

TEM 应用包含两个阶段。第 1 阶段是分析农户使用机械或机械服务的影响因素,以机械使用以及机械服务使用为例可表示为:

$$M_i = \alpha_{0i} + \alpha_{1i} \times Z_i + \alpha_{2i} \times p_{fi} + \sum_{3 \leq k \leq 11} \alpha_{ki} \times C_{ki} + D_i + \varepsilon_i \quad (3)$$

$$S_i = \gamma_{0i} + \gamma_{1i} \times Z_i + \gamma_{2i} \times p_{fi} + \sum_{3 \leq k \leq 11} \gamma_{ki} \times C_{ki} + D_i + \delta_i \quad (4)$$

式中: $Z_i$  为不包含在式 (1) 以及式 (2) 中的工具变量, $k$  至少为 3,  $\alpha_{1i}$ 、 $\gamma_{1i}$  为工具变量的待估参数; $\alpha_{2i}$ 、 $\gamma_{2i}$  为化肥价格的待估参数; $\alpha_{ki}$ 、 $\gamma_{ki}$  为其余控制变量的待估参数; $\alpha_{0i}$ 、 $\gamma_{0i}$  为截距项。

第 2 阶段则是对化肥施用的回归。这一步主要是为了解决式 (3) 和 (4) 随机误差项  $\varepsilon_i$ 、 $\delta_i$  与式 (1)、式 (2) 随机误差项  $\mu_i$ 、 $\sigma_i$  出现相关而导致估计偏误的问题,因此构造逆米尔斯比率 ( $\lambda$ ) 控制偏差。最后得到是否使用机械以及机械服务农户的化肥施用差异,以机械使用为例,最终的平均处理效应为:

$$ATE = E(y_i | M_i = 1, x_i, Z_i) - E(y_i | M_i = 0, x_i, Z_i) \quad (5)$$

$$ATE = E(y_i | S_i = 1, x_i, Z_i) - E(y_i | S_i = 0, x_i, Z_i) \quad (6)$$

式中: $x_i$  为除工具变量外的其他控制变量,  $Z_i$  为工具变量。式 (5) 以及式 (6) 中的 ATE 表示农户使用与未使用农业机械以及机械服务的处理效应。

## 2.2 变量选取与定义

1) 被解释变量。如理论分析所述,机械应用精准定量施肥的特点不仅影响化肥施用量还能够影响施肥均匀度。因此被解释变量用化肥施用状况以化肥施用量以及施肥均匀度来共同衡量。需要说明的是,由于 CRHPS 数据库中未区分出单种作物的化肥施用量,因此使用 2016 年《农产品成本收益资料汇编》中各省小麦与其他作物化肥施用量比值代入 CRHPS 数据中,按省份折算小麦化肥施用量,再除以

小麦种植面积得到单位面积平均化肥施用量。而施肥均匀度则是衡量区域内化肥施用的差异状况,借鉴 Firpo 等<sup>[32]</sup> 对数据偏离度的测算研究,将农户小麦化肥施用量与村级化肥施用量偏离度的绝对值来衡量。具体计算公式为:

$$f_{\text{even}} = \left| \frac{f_i - \bar{f}_u}{\bar{f}_u} \right| \quad (7)$$

式中: $f_{\text{even}}$  表示农户施肥均匀度,此值越低则区域内农户施肥不均等程度越低,即施肥更均匀; $f_i$  表示第  $i$  个家庭的小麦化肥施用量; $\bar{f}_u$  表示村级化肥施用量均值,为村级每户家庭化肥使用量加总再除以村级家庭数量。此外,后续为验证结果稳健性同时还采用了化肥投入金额作为替代指标回归。

2) 核心解释变量。首先,本研究的核心问题是机械应用对化肥施用的影响,以农户是否使用机械来衡量机械应用状况。其次,由于需要进一步探讨农户自购机械以及机械服务对化肥施用影响差异,引入机械服务作为解释变量,定义农户只要通过租赁方式在机耕、机播以及机械撒药时应用机械,则为使用机械服务。

3) 控制变量。TEM 模型的设置需要尽量将影响农户机械使用以及化肥施用的相关变量考虑进来。借鉴相关研究以及理论框架设定,本文设定户主特征禀赋(性别、年龄、受教育年限、健康状况)、家庭特征(家庭劳动力占比以及家庭收入)、经营特征(耕地质量、经营规模、与农业组织合作状况、农业技术培训状况以及化肥价格)、区域特征(东、中以及西部)作为控制变量。

4) 工具变量。本文选取村级农业机械使用比例以及村级农业生产组织数量作为工具变量。村级农业机械使用比例以 2016 年本村农业机械使用面积占村级耕地面积占比来衡量。由于村级机械化使用比例与农户农业机械使用息息相关,但又与家庭化肥施用不相关,因此选择该变量作为工具变量。而村级农业生产组织数量以 2016 年本村新型经营主体包括专业大户、家庭农场、农民专业合作社、农业企业进行加总衡量。

## 2.3 数据来源

本研究数据来源于 2017 年的 CRHPS 数据。数据调研分为 3 个层次,采用分层抽样、三阶段以及人口规模比例抽样方式<sup>[14]</sup>,涉及全国 29 个省份(西藏、新疆、香港、澳门和台湾地区除外)。调研涵盖家庭人口特征、农业生产状况、家庭消费、收入与支出等。为控制不同作物化肥施用差异并且关注粮食安

全问题,本研究以小麦作为研究对象主要是由于不同品种化肥投入本身具有显著差异,大部分研究都会采用单一品种进行研究以控制不同种植作物化肥投入量的客观差异。另外,本研究聚焦我国粮食生产,小麦作为三大主粮之一是实现我国生产绿色转型的关键;小麦识别误差较小,而玉米(*Zea mays*)多以饲用为主,水稻(*Oryza sativa*)则需要进行早稻和晚稻的区分;另外小麦为最早开展机械化服务的作物,研究具有典型性。数据处理中剔除了不种植小麦的农户,删除数据缺失以及异常值后,对化肥施用量、化肥价格、家庭收入进行了5%的缩尾处理,最终得到23个省份1088个样本。

#### 2.4 描述性统计

表1为本文设定变量相关描述性统计。结果显示,样本农户用于小麦的化肥施用量平均为531.23 kg·hm<sup>-2</sup>,农户化肥施用量仍较高。施肥均匀度均值为0.36,表明区域内化肥施用均匀度存在差异。小麦化肥投入金额为2080.95元·hm<sup>-2</sup>,与2016年《全国农产品成本收益资料汇编》中小麦化肥投入均值

2111.70元·hm<sup>-2</sup>较为接近,说明样本具有代表性。而小麦种植规模平均为0.56 hm<sup>2</sup>,与第3次农业普查数据显示的户均经营规模0.52 hm<sup>2</sup>较为接近,表明我国小麦仍以小规模种植为主。从机械使用状况来看,样本农户使用机械的占75.1%,其中有54.0%是通过购买服务来使用机械的。从户主特征来看,样本中户主几乎为男性,且年龄平均为55岁以上,受教育年限平均为7.46年,主要集中在初中段。户主健康状况均值为3.21,反映户主健康状况较为良好。就家庭特征而言,家庭劳动力占比平均为88.4%,表明家庭劳动力较为充足。而家庭收入取对数后方差仍较大,说明农村家庭之间收入差异较明显。

表2为农户机械应用与化肥施用状况的交叉分析结果,整体上使用机械的农户化肥施用量相较未使用的农户要更低且施肥更均匀。对机械来源进行区分后,当农户使用自购机械时,化肥施用量略低于未使用的农户且施肥均匀度更高。需要说明的是,此处农户机械自购化肥投入金额大于未使用机械的农户,具体二者之间的关系需要实证部分进一步验

表1 变量定义及描述性统计  
Table 1 Definition and descriptive statistics of variables

| 变量<br>Variable                              | 含义与赋值<br>Definition and assignment                                                                                                                                                                 | 平均值<br>Mean | 标准差<br>Standard deviation |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------------------------|
| 化肥施用量<br>Fertilizer application amount      | 小麦单位面积施肥量<br>Fertilizer application amount per unit area of wheat (kg·hm <sup>-2</sup> )                                                                                                           | 531.23      | 36.94                     |
| 施肥均匀度<br>Fertilizer application uniformity  | 小麦化肥施用量与村平均化肥施用量差异绝对值再除以村平均化肥施用量<br>[Amount of fertilizer applied to wheat by farmers - average amount of fertilizer applied in the village] / average amount of fertilizer applied in the village | 0.36        | 0.91                      |
| 化肥投入金额<br>Amount of fertilizer input        | 小麦单位面积化肥投入金额<br>Amount of fertilizer input per unit area of wheat (¥·hm <sup>-2</sup> )                                                                                                            | 2080.95     | 55.08                     |
| 机械使用状况<br>Mechanical application            | 使用=1; 未使用=0<br>Use = 1; not use = 0                                                                                                                                                                | 0.75        | 0.43                      |
| 机械服务使用状况<br>Mechanical service usage        | 使用=1; 未使用=0<br>Use = 1; not use = 0                                                                                                                                                                | 0.54        | 0.50                      |
| 性别 Gender                                   | 女=0; 男=1 Female = 0; male = 1                                                                                                                                                                      | 0.91        | 0.29                      |
| 年龄 Age                                      | 2017年户主年龄 Age of the head of household in 2017                                                                                                                                                     | 55.94       | 11.25                     |
| 受教育年限 Education                             | 受教育类型最高年限 Maximum years of education type (a)                                                                                                                                                      | 7.46        | 3.21                      |
| 健康状况 Health                                 | 1=非常不好; 2=不好; 3=一般; 4=好; 5=非常好<br>1 = very bad; 2 = bad; 3 = fair; 4 = good; 5 = very good                                                                                                         | 3.21        | 1.08                      |
| 家庭劳动力占比<br>Household labor force share      | 家庭16岁以上人口占家庭总人口比例<br>Proportion of household population over 16 years old to total household population                                                                                            | 0.88        | 0.16                      |
| 家庭收入 Income                                 | 家庭总收入取对数 Logarithm of total household income                                                                                                                                                       | 42.81       | 65.71                     |
| 耕地质量 Soil quality                           | 正常=0; 差=1 Normal = 0; poor = 1                                                                                                                                                                     | 0.03        | 0.16                      |
| 经营规模 Scale                                  | 小麦种植规模 Scale of wheat cultivation (hm <sup>2</sup> )                                                                                                                                               | 0.56        | 1.04                      |
| 农业组织合作状况<br>Cooperation of organizations    | 有合作=1; 未合作=0<br>With cooperation = 1; without cooperation = 0                                                                                                                                      | 0.32        | 0.47                      |
| 农业技术培训状况<br>Agricultural technique training | 有人接受过农业技术培训=1; 无人接受过农业技术培训=0<br>Someone trained = 1; no one trained = 0                                                                                                                            | 0.12        | 0.32                      |
| 化肥价格 Fertilizer price                       | 化肥价格 Fertilizer prices (¥·kg <sup>-1</sup> )                                                                                                                                                       | 2.18        | 1.01                      |
| 村级农业机械使用比例<br>Proportion of machinery       | 农业机械使用面积占村级耕地面积比例<br>Proportion of agricultural machinery use area to village arable land (%)                                                                                                      | 68.21       | 42.47                     |
| 村级农业生产组织数量<br>Number of organizations       | 新型经营主体数量<br>Number of new business entities                                                                                                                                                        | 3.68        | 8.62                      |

根据2017年中国农村家庭追踪调查(CRHPS)数据库整理而成。Compiled from the 2017 China Rural Household Panel Survey (CRHPS) database.

表 2 农户机械使用状况与化肥施用相关描述性统计

Table 2 Descriptive statistics related to machinery use status and fertilizer application of farmers

| 变量<br>Variable                                                   | 机械使用状况<br>Mechanical application |             | 机械服务使用状况<br>Mechanical service usage |             | 自购机械使用状况<br>Self-purchased machinery usage |             |
|------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------|--------------------------------------|-------------|--------------------------------------------|-------------|
|                                                                  | 使用 Use                           | 未使用 Not use | 使用 Use                               | 未使用 Not use | 使用 Use                                     | 未使用 Not use |
| 化肥施用量 Average fertilizer application rate (kg·hm <sup>-2</sup> ) | 1041.45                          | 1125.15     | 1021.05                              | 1112.1      | 1093.65                                    | 1125.15     |
| 施肥均匀度 Fertilizer application uniformity                          | 0.32                             | 0.48        | 0.30                                 | 0.43        | 0.36                                       | 0.48        |
| 化肥投入金额 Average amount of fertilizer input (¥·hm <sup>-2</sup> )  | 2100.00                          | 2024.30     | 2069.91                              | 2088.27     | 2153.78                                    | 2024.30     |
| 样本量 Observations                                                 | 817                              | 271         | 588                                  | 500         | 238                                        | 271         |

根据2017年中国农村家庭追踪调查(CRHPS)数据库整理而成。Compiled from the 2017 China Rural Household Panel Survey (CRHPS) database.

证。而使用机械服务的农户化肥施用量都低于未使用机械服务的农户,且使用与未使用机械服务的农户间施肥均匀度相差程度也较大。

### 3 结果与分析

#### 3.1 机械应用及应用环节对化肥施用的影响

表 3 为机械应用以及不同应用环节对化肥施用影响估计结果。结果显示,总体上机械使用对施肥

量并不会造成显著影响,但能够显著降低区域内农户施肥不均等程度。进一步分环节来看,机耕以及机械撒药环节均未显著影响化肥施用量以及施肥均匀度。不过机播对化肥施用量有显著负向影响,并在 1% 的统计性水平下显著,具体为使用机播的农户能够降低 47.63 kg·hm<sup>-2</sup> 的化肥施用量。此外,机播环节对施肥不均等也有显著负向影响,表现在农户使用机播后,能够提升 0.14 单位施肥均匀度。这也意

表 3 机械使用及不同应用环节对化肥施用状况影响估计结果

Table 3 Estimation results of the effects of machinery use and use links on fertilizer application

| 变量<br>Variable                             | 因变量: 单位面积平均施肥量<br>Dependent variable: average fertilizer application rate (kg·hm <sup>-2</sup> ) |                      |                      |                      | 因变量: 施肥均匀度<br>Dependent variable: fertilization uniformity |                             |                             |                             |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                                            |                                                                                                  |                      |                      |                      |                                                            |                             |                             |                             |
| 机械使用<br>Mechanical application             | -29.33<br>(21.15)                                                                                |                      |                      |                      | -0.14 <sup>*</sup><br>(0.07)                               |                             |                             |                             |
| 机耕<br>Mechanical ploughing                 |                                                                                                  | -12.08<br>(18.23)    |                      |                      |                                                            | -0.10<br>(0.07)             |                             |                             |
| 机播<br>Mechanical sowing                    |                                                                                                  |                      | -47.63***<br>(17.63) |                      |                                                            |                             | -0.14**<br>(0.06)           |                             |
| 机械撒药<br>Mechanical spreading of pesticides |                                                                                                  |                      |                      | -12.75<br>(19.28)    |                                                            |                             |                             | -0.03<br>(0.05)             |
| 性别<br>Gender                               | -19.95<br>(28.58)                                                                                | -22.58<br>(28.58)    | -20.93<br>(28.58)    | -23.03<br>(28.58)    | 0.10 <sup>*</sup><br>(0.05)                                | 0.09 <sup>*</sup><br>(0.05) | 0.09 <sup>*</sup><br>(0.05) | 0.09 <sup>*</sup><br>(0.05) |
| 年龄<br>Age                                  | 0.15<br>(0.08)                                                                                   | 0.15<br>(0.08)       | 0.23<br>(0.08)       | 0.15<br>(0.075)      | 2.0E-03<br>(2.0E-03)                                       | 2.0E-03<br>(2.0E-03)        | 2.0E-03<br>(2.0E-03)        | 2.0E-03<br>(2.0E-03)        |
| 受教育年限<br>Education                         | -0.68<br>(0.37)                                                                                  | -1.13<br>(0.36)      | 0.08<br>(0.38)       | -1.28<br>(0.36)      | -2.7E-05<br>(0.01)                                         | -1.0E-04<br>(0.01)          | -1.0E-04<br>(0.01)          | -3.0E-04<br>(0.01)          |
| 健康状况<br>Health                             | 3.75<br>(7.28)                                                                                   | 3.53<br>(7.28)       | 4.13<br>(7.28)       | 3.52<br>(7.28)       | 0.01<br>(0.01)                                             | 0.01<br>(0.01)              | 0.01<br>(0.01)              | 0.01<br>(0.02)              |
| 家庭劳动力占比<br>Share of household labor        | 81.00<br>(51.83)                                                                                 | 79.50<br>(52.05)     | 77.40<br>(51.68)     | 82.73<br>(52.13)     | -0.08<br>(0.14)                                            | -0.08<br>(0.14)             | -0.09<br>(0.14)             | -0.08<br>(0.15)             |
| 家庭收入<br>Household income                   | 0.08<br>(0.15)                                                                                   | 0.08<br>(0.15)       | 0.08<br>(0.15)       | 0.02<br>(0.11)       | -3.2E-04<br>(2.4E-04)                                      | -3.2E-04<br>(2.4E-04)       | -2.9E-04<br>(2.3E-04)       | -3.3E-04<br>(2.4E-04)       |
| 耕地质量<br>Soil quality                       | -19.20<br>(46.20)                                                                                | -17.78<br>(46.20)    | -26.18<br>(46.95)    | -15.08<br>(46.50)    | 0.01<br>(0.08)                                             | 0.01<br>(0.08)              | 0.01<br>(0.08)              | 0.01<br>(0.08)              |
| 经营规模<br>Operation scale                    | -0.98***<br>(0.30)                                                                               | -1.05***<br>(0.38)   | -0.90***<br>(0.38)   | -0.98***<br>(0.38)   | -1.0E-04**<br>(5.6E-04)                                    | -1.0E-04***<br>(5.8E-04)    | -1.0E-04**<br>(5.7E-04)     | -1.0E-04**<br>(6.9E-04)     |
| 农业组织合作<br>Cooperation of organizations     | -12.60<br>(17.03)                                                                                | -15.30<br>(17.10)    | -9.98<br>(17.18)     | -16.05<br>(17.18)    | -0.01<br>(0.05)                                            | -0.01<br>(0.05)             | -0.01<br>(0.05)             | -0.02<br>(0.05)             |
| 农业技术培训<br>Tech training                    | 18.98<br>(26.33)                                                                                 | 18.00<br>(26.33)     | 18.32<br>(26.18)     | 18.23<br>(26.33)     | -0.05<br>(0.05)                                            | -0.06<br>(0.05)             | -0.06<br>(0.05)             | -0.06<br>(0.05)             |
| 化肥价格<br>Fertilizer prices                  | -129.68***<br>(8.85)                                                                             | -129.98***<br>(8.93) | -129.75***<br>(8.85) | -130.42***<br>(8.93) | -0.02<br>(0.04)                                            | -0.02<br>(0.04)             | -0.02<br>(0.04)             | -0.02<br>(0.04)             |
| 区域特征<br>Regional characteristics           | 已控制<br>Control                                                                                   | 已控制<br>Control       | 已控制<br>Control       | 已控制<br>Control       | 已控制<br>Control                                             | 已控制<br>Control              | 已控制<br>Control              | 已控制<br>Control              |
| 常数<br>constant                             | 834.83***<br>(67.65)                                                                             | 828.98***<br>(67.65) | 829.59***<br>(67.35) | 824.10***<br>(66.83) | 0.04**<br>(0.15)                                           | 0.36**<br>(0.15)            | 0.34**<br>(0.15)            | 0.32**<br>(0.15)            |
| 观测值<br>Observations                        | 1088                                                                                             | 1088                 | 1088                 | 1088                 | 1088                                                       | 1088                        | 1088                        | 1088                        |

\*\*\*、\*\*、\*分别表示1%、5%以及10%的显著性水平;括号内为稳健标准误。\*\*\*, \*\* and \* indicate significant effects of the variables at 1%, 5% and 10% levels, respectively. The robust standard errors are shown in parentheses.

味着伴随着播种环节机械使用,农户之间施肥差异将会显著缩小。

只在机播环节对化肥投入产生影响的原因可能在于:现实中,化肥施用分为底肥、追肥以及补肥。与追肥环节能够有效适配的机械发展仍不充分,因此机械追肥使用较少。现实中,生产主体在播种环节会使用机械种肥同播,与人工施肥不同的是,这时化肥施用更加精准、定量,且能够降低施用损耗,因此能减少化肥施用量并提升施肥均匀度。撒药环节由于无人机喷肥成本较高,现实中使用该方式喷洒叶面肥较少。此外,叶面肥施用在整体化肥投入中占比较小,因此最终结果并不明显。而耕种环节则不涉及到化肥施用,最终与化肥投入不相关理由较为充分。

### 3.2 机械应用及应用环节对化肥施用影响的内生性处理

农户机械应用可能存在自选择以及不可观测变量的潜在影响。机械应用可能会降低最终化肥施用量,但也可能是化肥施用量高的农户更倾向于使用机械来降低施肥量。此外,在估计过程中遗漏部分相关变量,也会导致估计结果不一致。基于上述原

因,本研究采用TEM解决农户使用机械的自选择以及不可观测变量遗漏问题。不过,处理效应模型两步法易将第1步的估计误差带入第2步估计中,导致效率损失问题。为减少效率损失并估计所有模型系数,采用最大似然估计(MLE)计算。

表4为模型估计结果。第1阶段估计结果表明,村级农业机械使用比例对农户整体机械、机播以及机械撒药使用都有显著正向影响,而村级农业生产组织数量则会显著负向影响上述3个变量。似然比检验结果表明处理效应模型均拒绝了原假设,表示模型存在内生性问题需要解决。此外,逆米尔斯比率Lamda( $\lambda$ )也均通过了显著性检验,表明工具变量有效。第2阶段为TEM的估计结果,表明整体机械应用以及机械撒药环节并未显著影响化肥施用量,只有机播环节能够降低化肥施用量,但机械应用及相关环节均能降低施肥不均等,估计结果与基准回归保持一致,因此在克服内生性问题之后前述研究结论仍成立。

### 3.3 机械服务以及自购机械对化肥施用差异

在明确总体使用机械和使用机械服务对化肥施用的影响后,进一步只考虑使用农业机械的农户,区

表4 机械应用及应用环节对化肥施用影响内生性处理估计结果

Table 4 Endogeneity treatment estimation results of effects of machinery use and use links on fertilizer application

| 第1阶段 First stage                                 |                                                                         |                           |                              |                                                                                           |                         |                              |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|------------------------------|
| 变量<br>Variable                                   | 是否使用机械/使用机械环节<br>Whether to use machine / link using machine            |                           |                              | 是否使用机械服务/使用机械服务环节<br>Whether to use mechanical services / links using mechanical services |                         |                              |
|                                                  | 机械应用<br>Mechanical application                                          | 机械播种<br>Mechanical sowing | 机械撒药<br>Mechanical spreading | 机械应用<br>Mechanical application                                                            | 机播<br>Mechanical sowing | 机械撒药<br>Mechanical spreading |
|                                                  |                                                                         |                           |                              |                                                                                           |                         |                              |
| 村级农业机械使用比例<br>Proportion of machinery of village | 0.02***<br>(2.0E-03)                                                    | 0.02***<br>(1.0E-03)      | 0.02***<br>(2.0E-03)         | 0.02***<br>(2.0E-03)                                                                      | 0.02***<br>(2.0E-03)    | 0.02***<br>(2.0E-03)         |
| 村级农业生产组织数量<br>Number of organizations of village | -0.01*<br>(0.01)                                                        | -0.01*<br>(0.01)          | -0.02**<br>(0.01)            | -0.01<br>(0.15)                                                                           | -0.01<br>(0.15)         | -0.01**<br>(0.01)            |
| LR test                                          | 3.23*                                                                   | 3.41*                     | 4.17**                       | 3.41*                                                                                     | 2.98**                  | 3.57**                       |
| Prob>chi2                                        | 0.07                                                                    | 0.07                      | 0.04                         | 0.08                                                                                      | 0.04                    | 0.05                         |
| 第2阶段 Second stage                                |                                                                         |                           |                              |                                                                                           |                         |                              |
| 变量<br>Variable                                   | 单位面积平均施肥量<br>Average fertilizer application rate (kg·hm <sup>-2</sup> ) |                           |                              | 施肥均匀度<br>Fertilization uniformity                                                         |                         |                              |
|                                                  |                                                                         |                           |                              |                                                                                           |                         |                              |
| 机械应用<br>Mechanical application                   | -54.98<br>(35.18)                                                       |                           |                              | -0.21**<br>(0.10)                                                                         |                         |                              |
| 机播<br>Mechanical sowing                          |                                                                         | -83.63**<br>(33.75)       |                              |                                                                                           | -1.02***<br>(0.07)      |                              |
| 机械撒药<br>Mechanical spreading of pesticides       |                                                                         |                           | -61.73<br>(45.53)            |                                                                                           |                         | -0.02**<br>(0.01)            |
| 其他控制变量<br>Others                                 | 已控制<br>Control                                                          | 已控制<br>Control            | 已控制<br>Control               | 已控制<br>Control                                                                            | 已控制<br>Control          | 已控制<br>Control               |
| 区域特征<br>Regional characteristics                 | 已控制<br>Control                                                          | 已控制<br>Control            | 已控制<br>Control               | 已控制<br>Control                                                                            | 已控制<br>Control          | 已控制<br>Control               |
| Lamda ( $\lambda$ )                              | 6.19**<br>(3.25)                                                        | 9.72***<br>(3.91)         | 8.89**<br>(4.03)             | 0.10*<br>(0.05)                                                                           | 0.12**<br>(0.05)        | 0.12**<br>(0.05)             |
| $\rho$                                           | 0.19*<br>(0.01)                                                         | 0.21*<br>(0.01)           | 0.31**<br>(0.13)             | 0.11*<br>(0.06)                                                                           | 0.13**<br>(0.06)        | 0.16**<br>(0.06)             |

\*\*\*、\*\*、\*分别表示1%、5%以及10%的显著性水平;括号内为稳健标准误。\*\*\*, \*\* and \* indicate significant effects of the variables at 1%, 5% and 10% levels, respectively. The robust standard errors are shown in parentheses.

分农户自购机械以及使用机械服务对最终化肥施用的差异。如表 5 所示,运用处理效应模型之后,发现相比自购机械,农户使用机械服务能够减少 150.45 kg·hm<sup>-2</sup> 化肥施用量。其中,使用机播服务相比自购

机械播种,能够显著降低 213.45 kg·hm<sup>-2</sup> 施肥量。此外,相比自购机械,使用机械服务后能够提升 1.17 单位施肥均匀度,而机播服务相比农户自己购买机械播种则能够提升 0.32 单位的施肥均匀度。

表 5 机械服务与自购机械对化肥施用影响处理效应模型估计结果

Table 5 Estimated results of treatment effect model (TEM) for the effect of machinery services and self-purchased machinery on fertilizer application

| 第1阶段 First stage                                 |                                                                         |                         |                                                                                           |                         |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 变量<br>Variable                                   | 是否使用机械/使用机械环节<br>Whether to use machine / link using machine            |                         | 是否使用机械服务/使用机械服务环节<br>Whether to use mechanical services / links using mechanical services |                         |
|                                                  | 机械服务<br>Mechanical services                                             | 机播服务<br>Sowing services | 机械服务<br>Mechanical services                                                               | 机播服务<br>Sowing services |
|                                                  |                                                                         |                         |                                                                                           |                         |
| 村级农业机械使用比例<br>Proportion of machinery of village | 0.01***<br>(1.0E-03)                                                    | 0.02***<br>(2.0E-03)    | 4.0E-03***<br>(1.0E-03)                                                                   | 0.02***<br>(2.0E-03)    |
| 村级农业生产组织数量<br>Number of organizations of village | -0.02***<br>(0.010)                                                     | -0.02***<br>(0.01)      | -0.01***<br>(0.004)                                                                       | -0.02***<br>(0.008)     |
| LR test                                          | 17.45                                                                   | 10.90                   | 15.53                                                                                     | 4.37                    |
| Prob>chi2                                        | 0.00                                                                    | 0.00                    | 0.00                                                                                      | 0.04                    |
| 第2阶段 Second stage                                |                                                                         |                         |                                                                                           |                         |
| 变量<br>Variable                                   | 单位面积平均施肥量<br>Average fertilizer application rate (kg·hm <sup>-2</sup> ) |                         | 施肥均匀度<br>Fertilization uniformity                                                         |                         |
|                                                  |                                                                         |                         |                                                                                           |                         |
| 机械服务 Mechanical services                         | -150.45*** (44.47)                                                      |                         | -1.17*** (0.08)                                                                           |                         |
| 机播服务 Sowing services                             |                                                                         | -213.45*** (48.90)      |                                                                                           | -0.32*** (0.30)         |
| 其他控制变量 Others                                    | 已控制 Control                                                             | 已控制 Control             | 已控制 Control                                                                               | 已控制 Control             |
| 区域特征 Regional characteristics                    | 已控制 Control                                                             | 已控制 Control             | 已控制 Control                                                                               | 已控制 Control             |
| Lamda (λ)                                        | 22.90*** (3.35)                                                         | 16.73*** (4.21)         | 0.89*** (0.04)                                                                            | 0.16** (0.07)           |
| ρ                                                | 0.75*** (0.07)                                                          | 0.60*** (0.12)          | 0.92*** (0.01)                                                                            | 0.20** (0.08)           |

\*\*\*、\*\*、\*分别表示1%、5%以及10%的显著性水平;括号内为稳健标准误。\*\*\*\*, \*\* and \* indicate significant effects of the variables at 1%, 5% and 10% levels, respectively. The robust standard errors are shown in parentheses.

结合整体农业机械应用对最终施肥量并不显著的估计结果,能够发现机械使用对施肥量下降的影响更多是机械服务带来的。这可能是由于农户使用机械服务时,施肥主体为服务商,服务商在提供机械服务时涉及到技术转移,除运用机械施肥外还能够进一步优化施肥技术。而农户使用自购机械施肥时,仍是采用传统的施肥技术,因此施肥量并不会产生较大改变。实证部分发现不论机械使用来源是自购还是服务外包,均能够显著降低农户施肥不均等程度,这意味着只要使用机械就能够提升施肥均匀度,减小农户之间施肥差异。

### 3.4 机械及机械服务应用对化肥施用的稳健性检验

进一步将被解释变量替换成单位面积平均化肥投入金额以验证前述研究结论的稳健性。估计结果(表 6)表明,机播、机械服务以及机播服务仍对单位面积平均化肥投入金额具有显著负向影响。具体而言,当农户使用机播后,平均化肥投入金额能够显著下降 283.95 元·hm<sup>-2</sup>。当农户使用机械服务后,平均化肥投入金额能够下降 394.50 元·hm<sup>-2</sup>。其中,农户使用机播服务后,平均化肥投入金额能够显著降低 352.80 元·hm<sup>-2</sup>。这与前述研究结论保持一致,说明

本研究的实证结果较为稳健。

## 4 结论与政策建议

化肥减量是实现我国农业绿色转型的重要途径。在“大国小农”的农业发展现实下,促进小农户实现化肥减量是实现农业现代化的重要抓手。已研究关注农业机械化发展能够导入绿色生产要素,但仍缺乏基于机械精准定量特点、自购机械与机械服务差异视角的实证检验。本研究利用 2017 年 CRHPS 数据,通过 OLS 以及处理效应模型分析了机械应用与化肥施用量以及施肥均匀度之间的关系,并检验了不同机械应用环节以及农户机械获取来源对化肥施用量以及均匀度的差异。

研究发现:第 1,总体上机械应用并不会降低化肥施用量,但能够降低施肥均匀度。第 2,不同机械应用环节对化肥施用量以及施肥均匀度影响具有差异。具体而言,占总体化肥施用比例 50%~60% 的播种环节能够显著降低化肥施用量以及施肥均匀度,而机械撒药环节则对化肥施用的影响不显著。第 3,由于机械质量、技术应用以及人力资本差异,自购机械以及机械服务对化肥施用的影响具有差异,相

表6 机械及机械服务应用对化肥施用的稳健性检验估计结果  
Table 6 Robustness test estimation results of effects of machinery use and use links on fertilizer application

| 第1阶段 First stage                                 |                                                                         |                                                                                           |                         |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 变量<br>Variable                                   | 使用机械环节<br>Link using machine                                            | 是否使用机械服务/使用机械服务环节<br>Whether to use mechanical services / links using mechanical services |                         |
|                                                  | 机播<br>Mechanical sowing                                                 | 机械服务<br>Mechanical services                                                               | 机播服务<br>Sowing services |
|                                                  |                                                                         |                                                                                           |                         |
| 村级农业机械使用比例<br>Proportion of machinery of village | 0.02***<br>(2.0E-03)                                                    | 0.02***<br>(2.0E-03)                                                                      | 0.02***<br>(2.0E-03)    |
| 村级农业生产组织数量<br>Number of organizations of village | -0.01*<br>(0.01)                                                        | -0.01*<br>(0.01)                                                                          | -0.02***<br>(0.01)      |
| LR test                                          | 5.23                                                                    | 9.30                                                                                      | 5.09                    |
| Prob>chi2                                        | 0.02                                                                    | 2.0E-03                                                                                   | 0.02                    |
| 第2阶段 Second stage                                |                                                                         |                                                                                           |                         |
| 变量<br>Variable                                   | 单位面积平均化肥投入<br>Average fertilizer application rate (¥·hm <sup>-2</sup> ) |                                                                                           |                         |
| 机播 Mechanical sowing                             | -283.95*** (104.55)                                                     |                                                                                           |                         |
| 机械服务 Mechanical services                         |                                                                         | -394.50*** (131.25)                                                                       |                         |
| 机播服务 Sowing services                             |                                                                         |                                                                                           | -352.80*** (126.75)     |
| 其他控制变量 Others                                    | 已控制 Control                                                             | 已控制 Control                                                                               | 已控制 Control             |
| 区域特征 Regional characteristics                    | 已控制 Control                                                             | 已控制 Control                                                                               | 已控制 Control             |
| Lamda (λ)                                        | 11.37** (4.94)                                                          | 18.82*** (5.88)                                                                           | 13.68** (5.90)          |
| ρ                                                | 0.25** (0.11)                                                           | 0.41*** (0.12)                                                                            | 0.30** (0.13)           |

\*\*\*、\*\*、\*分别表示1%、5%以及10%的显著性水平; 括号内为稳健标准误。\*\*\*, \*\* and \* indicate significant effects of the variables at 1%, 5% and 10% levels, respectively. The robust standard errors are shown in parentheses.

较于农户自购机械, 机械服务能够更有效实现化肥减量并提升施肥均匀度。

本文的研究启示在于: 第1, 需要重视机械化对于化肥减量以及绿色生产的作用。由于机械精准定量的特点, 机械应用会更好地改善农户间施肥不均匀的状况。第2, 需要提升机械质量以及机械与施肥适配性。虽然现在播种环节基本实现了种肥同播, 但植保等其他环节由于机械与施肥的不匹配, 对化肥施用的影响较小。因此, 需要发挥机械施肥精准定量的优势, 改善机械与化肥施用适配程度, 并不断提升机械质量实现化肥深施、精施。第3, 可以考虑将农机购置补贴向服务商进行倾斜, 迂回利用农业机械服务带动小农户绿色生产。由于农业机械购置具有高初始投资的特点, 且具有经营规模的门槛, 大部分农户并不具备购置机械装备的能力, 因此其会选择服务外包来使用机械。鉴于上述特点, 可以考虑将农机购置补贴转向服务商, 满足农户农业机械使用实际需求, 实现绿色生产技术以及人力资本的传导。

## 参考文献 References

- [1] HUANG J, HU R, CAO J, et al. Training programs and in-the-field guidance to reduce China's overuse of fertilizer without hurting profitability[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 63(5): 165A-167A
- [2] 张福锁. 科学认识化肥的作用及合理利用[J]. *农机科技推广*, 2017(1): 38-40, 43
- [3] ZHANG F S. Scientific understanding of the role of chemical fertilizers and their rational use[J]. *Agriculture Machinery Technology Extension*, 2017(1): 38-40, 43
- [4] JIANG C, LU D, ZU C, et al. Root-zone fertilization improves crop yields and minimizes nitrogen loss in summer maize in China[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 15139
- [5] ZHANG X, DAVIDSON E A, MAUZERALL D L, et al. Managing nitrogen for sustainable development[J]. *Nature*, 2015, 528(7580): 51-59
- [6] GAO B, WANG L, CAI Z C, et al. Spatio-temporal dynamics of nitrogen use efficiencies in the Chinese food system, 1990-2017[J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 717: 134861
- [7] 马骥. 农户粮食作物化肥施用量及其影响因素分析——以华北平原为例[J]. *农业技术经济*, 2006(6): 36-42
- [8] MA J. Analysis of fertilizer application and its influencing factors for food crops by farming households in the North China Plain[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2006(6): 36-42
- [9] 张露, 罗必良. 农业减量化: 农户经营的规模逻辑及其证据[J]. *中国农村经济*, 2020(2): 81-99
- [10] ZHANG L, LUO B L. Agricultural chemical reduction: the logic and evidence based on farmland operation scale of households[J]. *Chinese Rural Economy*, 2020(2): 81-99
- [11] 周洁红, 刘清宇. 基于合作社主体的农业标准化推广模式研究——来自浙江省的实证分析[J]. *农业技术经济*, 2010(6): 88-97
- [12] ZHOU J H, LIU Q Y. A study on agricultural standardization promotion model based on cooperative subjects — An empirical analysis from Zhejiang Province[J]. *Journal of Agrotechnical*

- Economics, 2010(6): 88–97
- [9] 常倩, 王士权, 李秉龙. 农业产业组织对生产者质量控制的影响分析——来自内蒙古肉羊养殖户的经验证据[J]. 中国农村经济, 2016(3): 54–64, 81
- CHANG Q, WANG S Q, LI B L. Analysis of the impact of industrial organization on producer quality control — Empirical evidence from meat sheep farmers in Inner Mongolia[J]. Chinese Rural Economy, 2016(3): 54–64, 81
- [10] 巩前文, 穆向丽, 田志宏. 农户过量施肥风险认知及规避能力的影响因素分析——基于江汉平原284个农户的问卷调查[J]. 中国农村经济, 2010(10): 66–76
- GONG Q W, MU X L, TIAN Z H. Analysis of factors influencing farmers' risk perception and avoidance ability of over-fertilizer application — A questionnaire survey based on 284 farmers in Jianghan Plain[J]. Chinese Rural Economy, 2010(10): 66–76
- [11] 高晨雪, 汪明, 叶涛, 等. 种植行为及保险决策在不同收入结构农户间的差异分析[J]. 农业技术经济, 2013(10): 46–55
- GAO C X, WANG M, YE T, et al. Analysis of differences in planting behavior and insurance decisions among farmers with different income structures[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2013(10): 46–55
- [12] 仇焕广, 栾昊, 李瑾, 等. 风险规避对农户化肥过量施用行为的影响[J]. 中国农村经济, 2014(3): 85–96
- QIU H G, LUAN H, LI J, et al. The impact of risk aversion on farmers' behavior of excessive fertilizer application[J]. Chinese Rural Economy, 2014(3): 85–96
- [13] 邹伟, 崔益邻, 周佳宁. 农地流转的化肥减量效应——基于地权流动性与稳定性的分析[J]. 中国土地科学, 2020, 34(9): 48–57
- ZOU W, CUI Y L, ZHOU J N. The impact of farmland transfer on farmers' fertilizer reduction: an analysis of transferability and security of land rights[J]. China Land Science, 2020, 34(9): 48–57
- [14] 郑淋议, 钱文荣, 刘琦, 等. 新一轮农地确权对耕地生态保护的影响——以化肥、农药施用为例[J]. 中国农村经济, 2021(6): 76–93
- ZHENG L Y, QIAN W R, LIU Q, et al. The impact of the new round of farmland certification on the ecological protection of cultivated land: taking the application of chemical fertilizers and pesticides as examples[J]. Chinese Rural Economy, 2021(6): 76–93
- [15] 沈兴兴, 刘帅, 段晋苑, 等. 基于化肥减量化管理的农业清洁生产多方联动机制框架研究[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(1): 41–47
- SHEN X X, LIU S, DUAN J Y, et al. Multi-stakeholders collaborative action mechanism frame work for clean agricultural production based on chemical fertilizer reduction controlling[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(1): 41–47
- [16] 吴九兴, 黄贤金. 农业减量投入、产出水平与农民收入变化[J]. 世界农业, 2019(9): 30–37
- WU J X, HUANG X J. Study on agricultural input reduction, output level and peasant income change[J]. World Agriculture, 2019(9): 30–37
- [17] 蔡昉. 城市化与农民工的贡献——后危机时期中国经济增长潜力的思考[J]. 中国人口科学, 2010(1): 2–10, 111
- CAI F. How migrant workers can further contribute to the urbanization: potentials of China's growth in post-crisis era[J]. Chinese Journal of Population Science, 2010(1): 2–10, 111
- [18] 胡浩, 杨泳冰. 要素替代视角下农户化肥施用研究——基于全国农村固定观察点农户数据[J]. 农业技术经济, 2015(3): 84–91
- HU H, YANG Y B. Study on fertilizer application by farm households from the perspective of factor substitution — Based on farm household data from fixed observation spots in rural areas nationwide[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2015(3): 84–91
- [19] 李宪翔, 丁鼎, 高强. 小农户如何有机衔接全程机械化——基于农机社会化服务的视角[J]. 农业技术经济, 2021(4): 98–109
- LI X X, DING D, GAO Q. How to organically connect small farmers to mechanize the whole process? — Based on the perspective of social service of agricultural machinery[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2021(4): 98–109
- [20] 钟甫宁, 纪月清. 土地产权、非农就业机会与农户农业生产投资[J]. 经济研究, 2009, 44(12): 43–51
- ZHONG F N, JI Y Q. Land rights, non-agricultural employment opportunities and farmers' agricultural investment[J]. Economic Research Journal, 2009, 44(12): 43–51
- [21] LU L, REARDON T, ZILBERMAN D. Supply chain design and adoption of indivisible technology[J]. American Journal of Agricultural Economics, 2016, 98(5): 1419–1431
- [22] 农业农村部. 加快推进农业机械化向高质量发展迈进 [EB/OL]. [2022-01-05]. [http://www.njhs.moa.gov.cn/zcjd1/202201/t20220105\\_6386355.htm](http://www.njhs.moa.gov.cn/zcjd1/202201/t20220105_6386355.htm)
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Accelerate agricultural mechanization to high-quality development [EB/OL]. [2022-01-05]. [http://www.njhs.moa.gov.cn/zcjd1/202201/t20220105\\_6386355.htm](http://www.njhs.moa.gov.cn/zcjd1/202201/t20220105_6386355.htm)
- [23] 朱建军, 徐宣国, 郑军. 农机社会化服务的化肥减量效应及作用路径研究——基于CRHPS数据[J/OL]. 农业技术经济, [2022-11-01]. DOI:10.13246/j.cnki.jae.20211126.002
- ZHU J J, XU X G, ZHENG J. Study on the fertilizer reduction effect and action path of socialized agricultural machinery services—Based on CRHPS data[J]. Agricultural Technology and Economics, [2022-11-01]. DOI:10.13246/j.cnki.jae.20211126.002
- [24] 孙小燕, 刘雍. 土地托管能否带动农户绿色生产?[J]. 中国农村经济, 2019(10): 60–80
- SUN X Y, LIU Y. Can land trusteeship improve farmers' green production?[J]. Chinese Rural Economy, 2019(10): 60–80

- [25] FEDER G, JUST R E, ZILBERMAN D. Adoption of agricultural innovations in developing countries: a survey[J]. *Economic Development and Cultural Change*, 1985, 33(2): 255–298
- [26] YIGEZU Y A, MUGERA A, EL-SHATER T, et al. Enhancing adoption of agricultural technologies requiring high initial investment among smallholders[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2018, 134: 199–206
- [27] MUKHERJEE S. Access to formal banks and new technology adoption: evidence from India[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 2020, 102(5): 1532–1556
- [28] DAN P. The impact of agricultural extension on farmer nutrient management behavior in Chinese rice production: a household-level analysis[J]. *Sustainability*, 2014, 6(10): 6644–6665
- [29] 梁志会, 张露, 刘勇, 等. 农业分工有利于化肥减量施用吗? ——基于江汉平原水稻种植户的实证[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(1): 150–159
- LIANG Z H, ZHANG L, LIU Y, et al. Is the agricultural division of labor conducive to the reduction of fertilizer input? empirical evidence from rice production households in the Jiangnan Plain[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(1): 150–159
- [30] 董剑豪, 刘晓丽, 刘新州, 等. 有机肥与化肥配比施肥装置研究现状综述[J]. *南方农机*, 2020, 51(15): 28, 39
- DONG J H, LIU X L, LIU X Z, et al. A review of the current status of research on organic fertilizer and chemical fertilizer proportional fertilizer application devices[J]. *China Southern Agricultural Machinery*, 2020, 51(15): 28, 39
- [31] 何亚凯, 赵学观, 李翠玲, 等. 玉米追肥机械施肥技术研究现状与分析[J]. *农机化研究*, 2021, 43(7): 1–9
- HE Y K, ZHAO X G, LI C L, et al. Research status and analysis on fertilization technology of corn topdressing machinery[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2021, 43(7): 1–9
- [32] FIRPO S, FORTIN N, LEMIEUX T. Decomposing wage distributions using recentered influence function regressions[J]. *Econometrics*, 2018, 6(2): 28