

张露,梁志会,普雁翔.长江经济带测土配方施肥技术效果及其改进——基于滇、鄂、苏三省水稻种植的实证分析[J].华中农业大学学报, 2021, 40(3): 30-42. DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.03.005

长江经济带测土配方施肥技术效果及其改进

——基于滇、鄂、苏三省水稻种植的实证分析

张露¹, 梁志会¹, 普雁翔²

1. 华中农业大学经济管理学院/湖北农村发展研究中心, 武汉 430070; 2. 云南农业大学经济管理学院, 昆明 650201

摘要 基于长江经济带所属云南、湖北和江苏3省的农户调查数据,运用 Trans-log 形式随机前沿生产函数测算了水稻种植户的化肥施用效率,进而利用 Tobit 模型估计了农户采用测土配方施肥技术对其水稻化肥施用效率的影响。研究结果显示:在其他条件不变的情况下,长江经济带的水稻化肥施用效率仍存在 31.5% 的改进潜力,长江上游地区(云南)的水稻化肥施用效率低于长江中游地区(湖北)和长江下游地区(江苏);长江经济带的水稻化肥施用效率要低于水稻生产技术效率,说明现阶段减少化肥用量不仅不会导致水稻产量下降,反而有助于提高化肥施用效率;农户采纳测土配方施肥技术显著提高了水稻化肥施用效率,但对于化肥施用效率处于较高水平的农户,测土配方施肥技术对化肥施用效率的提升作用有所减弱。研究结果表明,通过高标准基本农田建设促成土地连片化经营能够提高测土配方施肥技术对化肥施用效率的改进作用。

关键词 长江经济带; 化肥施用效率; 农业要素利用率; 测土配方施肥技术; 高标准农田建设; 农业面源污染; 磷污染; 绿色发展

中图分类号 S 147.2; F 321.42 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)03-0030-13

党的十八大以来,以习近平同志为核心的党中央高度重视长江经济带生态建设,强调“长江拥有独特的生态系统,是中国重要的生态宝库,当前和今后相当长一个时期,要把修复长江生态环境摆在压倒性位置,共抓大保护,不搞大开发”“推动长江经济带发展必须从中华民族长远利益考虑,走生态优先、绿色发展之路”。近年来,在国家政策的引导下,虽然长江经济带的污染物排放总量得到有效控制,但流域生态系统退化(如湿地功能退化、水体富营养化和生物多样性降低等)的态势未得到根本遏制^[1-2],农业面源污染问题尤为突出^[1-4]。研究表明,磷污染是长江水质改善的主要瓶颈,长江经济带 11 个省(市)的农业源总磷排放量占各类污染源磷污染物排放总量的比例超过 60%^[1]。由此判断,提高农业化肥利用效率、减少化肥用量是改善长江流域生态环境的

关键治本举措之一。

2015 年,原农业部(现农业农村部)出台的《到 2020 年化肥使用量零增长行动》(下文简称“《行动》”)将长江流域划为化肥减量增效政策实施的重点区域之一^①。《行动》明确指出,“减氮、控磷、稳钾,配合施用硫、锌、硼等中微量元素”是长江中下游流域化肥施用的主要原则,并通过推广秸秆还田、水肥一体化和推广配方施肥技术等措施来提高化肥施用效率,减少化肥施用强度。其中,测土配方施肥技术以土壤测试和肥料田间试验为基础,根据作物需肥规律、土壤供肥性能和肥料效应,调整施肥结构,实现科学施肥、减少农业面源污染^[5]。长江经济带各省份十分重视推广测土配方施肥技术。例如,长江中游省份湖北省印发的《湖北省水污染防治行动计划工作方案》明确指出,到 2020 年实现全省测土

收稿日期: 2021-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(42071157); 中国博士后科学基金特别项目(2019T120736); 农业污染源普查地膜专业全面普查和抽样调查项目(K2419002100)

张露, E-mail: luzhang@mail.hzau.edu.cn

通信作者: 梁志会, E-mail: zhihui.liang@webmail.hzau.edu.cn

① 资料来源:《农业部关于印发〈到 2020 年化肥使用量零增长行动方案〉和〈到 2020 年农药使用量零增长行动方案〉的通知》, http://jjuban.moa.gov.cn/zwl/m/tzgg/tz/201503/t20150318_4444765.htm。

配方施肥技术推广覆盖率达到90%以上^①。随着测土配方施肥技术在长江经济带所属省份不断得到推广应用,分析技术对农业化肥施用效率的影响,对实现化肥减量、遏制农业面源污染与改善长江流域的生态环境具有重要意义。

已有文献围绕测土配方施肥技术推广与应用展开的研究主要集中在3个维度:一是技术推广模式研究。李兴佐等^[6]认为,企业主导型的农业技术推广服务主体立足于市场需求,具备服务及时且有效性高的优势,能够有效缓解技术推广面临的供需不平衡问题,是测土配方施肥技术推广值得依赖的技术服务体系。李莎莎等^[7]总结了现阶段中国测土配方施肥技术推广服务的现状,发现测土配方施肥技术推广普遍存在测土环节供需不平衡、配肥环节监管缺失和施肥环节服务匮乏等问题。因此,推进测土配方施肥技术推广服务转型的基本逻辑应以“政府负责服务,市场负责推广”为主线,以企业为纽带,整合农业职能部门,建立各服务主体间的良性互动机制。孙杰等^[5]则将测土配方施肥技术视为一项精准农业技术,认为扩大测土配方施肥技术的推广面积关键在于打破行政分割,提高配方肥生产企业的市场占有率,并构建以市场为主导的技术推广体系。不难发现,就如何促进测土配方施肥技术推广,既有研究均强调了以市场为导向的技术推广体系。

二是技术采纳行为研究,主要考察农户个体特征、家庭特征、土地经营特征和外部环境等对测土配方肥技术采纳行为的影响。其中,个体特征维度的影响因素主要为性别^[8]、年龄^[9]、受教育程度^[10]、技术认知、环保法规认知和农业生产经验等^[11-12];家庭特征维度的影响因素主要为家庭收入^[13]、兼业化程度^[14]、劳动力非农转移^[15]等;土地经营特征维度的影响因素主要为土地经营规模^[16-17]、土地产权类型和土地质量^[18]等;外部环境特征维度的影响因素则主要为是否获得测土配方卡、技术培训和政府补贴^[12-13,19]等。需要特别指出的是,旨在改进农业生产主体认知的培训和示范被普遍认为是促进测土配方肥技术采纳的重要策略。孔凡斌等^[13]指出,测土配方肥技术具有知识密集型特征,技术培训显著正向改进农户的采纳意愿;李莎莎等^[7]的分析则表明,技术培训对测土配方肥技术采纳行为的

影响最强。

三是技术采纳影响研究。经济影响方面,张成玉等^[20]针对小麦和水稻两类粮食作物研究发现,采用测土配方施肥技术能够显著增加单位面积粮食产量和农户收入。刘畅等^[21]针对东北地区的家庭农场研究表明,采纳测土配方施肥技术能够显著提高家庭农场的农业收入。环境影响方面,李夏菲等^[22]基于湖北省油菜种植数据,认为测土配方施肥技术的推广显著降低了温室气体排放量。张卫红等^[23]研究发现,测土配方施肥技术显著减少了氮肥用量。葛继红等^[24]研究表明,农户采纳测土配方施肥技术会导致氮肥和磷肥的施用量减少,有助于优化施肥结构。张聪颖等^[25]基于苹果主产区的数据,发现测土配方施肥技术显著增加了农户的有机肥施用量,对改善施肥结构具有一定的促进作用。

上述研究为分析测土配方施肥技术采纳及其影响提供了较好的基础,但仍存在进一步拓展的空间。一方面,已有关于测土配方施肥技术的影响分析,主要集中于农作物产量、农业收入、化肥施用结构和温室气体排放等方面,鲜少探析测土配方施肥技术对农业要素利用效率的影响。尽管大量研究表明测土配方施肥技术有助于改善施肥结构,但是这种改善作用能否提高化肥施用效率,促进农业提质增效?既有文献尚未展开充分的讨论。另一方面,长江经济带正面临巨大的农业面源污染压力,但鲜有研究探析长江经济带农户采用测土配方施肥技术对其化肥施用效率的影响。据此,本研究基于云南、湖北和江苏3个省份的农户调查数据,运用随机前沿生产函数法测算稻农化肥施用效率,进而估计测土配方施肥技术对稻农化肥施用效率的影响效应,旨在丰富采用测土配方施肥技术相关文献,为改善长江经济带生态环境提供政策建议。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究方法

1) 化肥效率测算模型设定。本研究运用随机前沿生产函数法测度农户化肥施用效率^[26],其中,超越对数形式(Trans-log)可视某未知函数形式的二次项近似,本研究首先采用Trans-log形式模型估算各投入要素的产出弹性与最优化肥用量,然后

① 资料来源:《省人民政府关于印发湖北省水污染防治行动计划工作方案的通知》湖北省人民政府门户网站 http://www.hubei.gov.cn/zfwj/ezf/201602/t20160205_1711935.shtml。

根据估计参数对农户化肥施用效率进行测算。本研究所使用的 Trans-log 形式的随机前沿生产函数的设置如下:

$$\begin{aligned} \ln Y_i = & \beta_0 + \sum_j \beta_j \ln X_{ji} + \beta_f \ln F_i + \\ & \frac{1}{2} \sum_j \sum_k \beta_{jk} \ln X_{ij} \ln X_{ik} + \\ & \sum_j \beta_{jf} \ln X_{ij} \ln F_i + \frac{1}{2} \beta_{ff} (\ln F_i)^2 + v_i - u_i \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中, i 表示第 i 个农户; Y_i 为第 i 个农户的农业总产出, 利用水稻单产表示; F_i 表示农户单位面积化肥施用量; X_{ji} 表示水稻生产中的其他投入要素, 包括劳动力、机械和其他中间投入要素(如农药、种子、灌溉); j 和 k 表示除化肥外的其他投入要素 X 的序号数; β 表示待估参数; $v_i - u_i$ 为复合误差项, 其中, v_i 为随机误差项, 表示生产过程中由自然灾害等不可控因素以及测量误差对前沿产量的影响, 服从独立于 u_i 的正态分布 $N(0, \sigma_v^2)$; u_i 为非负数, 表示非效率项, 服从半正态分布 $N^+(0, \sigma_u^2)$ 。

假设不存在生产技术效率损失 ($u_i = 0$), 在保持农业产出即其他投入要素不变的情形下, 利用可能达到的最少化肥施用量 F_i^0 替代实际化肥施用量 F_i , 可将(1)式转化为:

$$\begin{aligned} \ln Y_i = & \beta_0 + \sum_j \beta_j \ln X_{ji} + \beta_f \ln F_i^0 + \frac{1}{2} \sum_j \sum_k \beta_{jk} \\ & \ln X_{ij} \ln X_{ik} + \sum_j \beta_{jf} \ln X_{ij} \ln F_i^0 + \\ & \frac{1}{2} \beta_{ff} (\ln F_i^0)^2 + v_i - u_i \end{aligned} \quad (2)$$

化肥施用效率可以定义为在农业产出与其他投入要素确定的条件下, 最少化肥施用量与实际化肥施用量的比值, 即各省份化肥利用效率 $F_{Ei} = F_i^0 / F_i$, 其对数形式为 $\ln F_{Ei} = \ln F_i^0 - \ln F_i$ 。联立式(1)和式(2), 并简化为关于 $\ln F_i^0 - \ln F_i$ 的形式有:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \beta_{ff} (\ln F_i^0 - \ln F_i)^2 + \\ & (\beta_f + \sum_j \beta_{jf} \ln X_{ij} + \beta_{ff} \ln F_i) \times \\ & (\ln F_i^0 - \ln F_i) + u_i = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

通过求解(3)式可得农户的化肥施用效率:

$$\begin{aligned} \ln F_{Ei} = & \left\{ -(\beta_f + \sum_j \beta_{jf} \ln X_{ij} + \beta_{ff} \ln F_i) \pm \right. \\ & \left. [(\beta_f + \sum_j \beta_{jf} \ln X_{ij} + \beta_{ff} \ln F_i)^2 - 2\beta_{ff} u_i]^{1/2} \right\} / \beta_{ff} \end{aligned} \quad (4)$$

2) 农户测土配方施肥技术采纳对化肥施用效率影响的模型设定。为考察农户测土配方施肥技术采

纳对其化肥施用效率的影响, 本研究构建如下实证模型:

$$\ln F_{Ei} = \alpha_0 + \alpha_1 T_i + \sum_{k=1} \alpha_{2k} C_i + D_i + \mu_i \quad (5)$$

式(5)中, F_{Ei} 为化肥施用效率; T_i 为农户测土配方施肥技术采纳行为, 若农户采纳测土配方施肥技术, 变量赋值为 1, 否则赋值为 0; C_i 表示控制变量, 包括第 i 个农户的农业生产决策者的个体特征(性别、年龄、受教育年限、健康状况与是否非农兼业)、农户 i 的家庭特征(是否拥有汽车、电脑与是否养殖家畜)、农户 i 的农业生产特征(地块数、灌溉条件、排水条件、土壤肥力、稻作类型与是否购买水稻保险)、农户 i 所处的外部环境(化肥价格和市场距离)。 D_i 表示农户 i 所在县(市)的虚拟变量, 用以控制气候条件与病虫害等区域固定效应, μ_i 为随机扰动项。 α_0 为截距项, α_1 、 α_{2k} 为待估计参数。考虑到化肥施用效率为 $[0, 1]$ 区间的截断数据, 本研究采用 Tobit 模型估计式(5)。

1.2 数据来源

本研究数据来源于笔者所在课题组在 2020 年 8 至 9 月针对长江经济带的农户问卷数据调查。研究根据各省份的地理与经济特征, 选择了云南、湖北和江苏 3 个省份作为样本采集区域。从地理因素来看, 云南、湖北和江苏分别位于长江上、中、下游地区, 因而样本区域涵盖了长江经济带三大区域。具体而言, 云南位于中国的第一阶梯上, 海拔较高, 以山地地形为主; 湖北位于中国第二阶梯上, 海拔低于云南, 但高于江苏省, 以平原和丘陵地形为主; 江苏位于第三阶梯上, 以平原地形为主, 属于低海拔地区。从经济区位来看, 云南、湖北和江苏分别属于西部、中部欠发达地区和东部发达地区, 3 个省份大致反映了长江经济带的经济发展状况。据此, 选择云南、湖北和江苏 3 个省份作为长江经济带的样本采集区具备代表性。

调查采用多阶段抽样方法: 第一阶段, 根据长江经济带的地理、经济特征, 选择云南、湖北和江苏作为样本抽样区域; 第二阶段, 在每个省份选择 3 个水稻主产区(区), 共计 9 个县(区); 第三阶段在每个样本县随机调查 3 个乡镇, 共计 27 个乡镇; 第四阶段在每个样本镇随机调查 2 个行政村(街道), 共计 54 个行政村(街道); 第五阶段, 在每个行政村(街道)随机调查 30 位农户, 共计 1 620 位农户。剔除

遗漏关键信息和答案前后矛盾的问卷后，共获得 1 541 份有效问卷，有效问卷率为 95.123%。

调查内容主要包括 3 个层面：第一，村庄层面内容，包括村庄道路、通信等基础设施信息；第二，农户层面内容，涵盖农户家庭成员基本信息和农业经营等情况；第三，地块层面内容，考虑到农户经营多个地块，农户凭借记忆可能无法准确地描述地块间投入产出的差异，本研究仅调查农户最大地块的基本特征与投入产出信息。长江流域是我国水稻的主产区，然而水稻种植过程中的化肥过量投入，在继续加剧土壤退化、温室气体排放与地下水体污染^[27]。据此，本研究聚焦水稻生产过程中的化肥施用效率。剔除未种植水稻农户的问卷后，共获得满足本研究要求的有效样本 1 112 份。

1.3 变量描述性统计

变量的含义及其描述性统计见表 1。样本农户平均水稻单产为 8 752.50 kg/hm²，国家统计局的数据显示，2019 年云南、湖北和江苏水稻单产分别为 6 482.25、8 208.75 和 8 971.50 kg/hm²，3 个省份的水稻单产均值为 7 849.50 kg/hm²。可见，本研究的样本数据与宏观统计数据相近，表明样本数据具有代表性。有 32.6% 的样本农户采纳了测土配方施肥技术，表明农户测土配方施肥技术采纳率较低，这与孙杰等^[5]得出长江经济带省份（湖南、江西和江苏）农户测土配方施肥技术采纳率不高的结论一致。样本农户的平均年龄约为 55 周岁，平均受教育年限约为 8 a，这与现阶段中国农业劳动力受教育程度低、老龄化现象严重的基本情况相符。综上，研究的调

查数据能够较好地反映长江经济带的农业生产状况。

2 结果与分析

2.1 化肥施用效率测算结果

由表 2 可知，变差率 γ 单边似然比检验在 1% 的水平上显著，说明稻农化肥施用存在无效率现象，因而利用随机前沿生产函数测算施用效率具备合理性。同时，单边似然比检验函数模型设定检验 LR 统计量为 658.44，通过了 1% 的水平显著性检验，说明应选择 Trans-log 形式的随机前沿生产函数而非柯布道格拉斯 (C-D) 形式生产函数进行参数估计。

根据 Trans-log 形式的随机前沿生产函数的估计结果，本研究测算了长江经济带水稻种植户的投入要素产出弹性、化肥施用效率和生产技术效率（表 3）。从投入要素产出弹性来看，劳动和化肥要素的产出弹性均值分别为 0.130 和 0.138，说明增加劳动和化肥要素投入有助于增加水稻产量。机械要素的产出弹性均值为 -0.074，说明增加机械投入对水稻产量带来一定的负面影响。不难理解，水稻属于精耕细作、劳动密集投入型农作物，机械投入可能有利于降低生产成本，但不一定有助于提高水稻产量。

总体来看，样本农户的化肥施用效率均值为 0.685，说明在维持当前投入与产出水平不变的情况下，若消除效率损失，水稻生产中化肥使用效率存在 31.5% 的提升空间。长江经济带的水稻化肥施用效

表 1 变量含义与描述性统计

Table 1 Variable definition and descriptive statistics

变量类型 Variable type	变量名称 Variable name	变量含义 Variable definition	均值 Mean	标准差 SD
产出变量 Output variables	水稻产量 Rice yield	水稻单产/(kg/hm ²) Rice yield	8 752.500	1 693.500
	劳动力 Labor	水稻种植劳动投入/(人/hm ²) Labor input in rice production	18.420	36.465
	机械 Machinery	水稻种植机械投入/(元/hm ²) Machinery input in rice production	2 529.000	1 458.000
投入变量 Input variables	化肥 Fertilizer	水稻种植化肥用量/(kg/hm ²) Chemical fertilizer input in rice production	781.500	405.075
	其他投入 Other inputs	水稻种植其他投入(包括种子、农药和灌溉)/(元/hm ²) Other input (seed, pesticide and irrigation) in rice production	4 038.000	1 831.500
解释变量 Explanatory variables	测土配方施肥技术 Soil testing and formulated fertilization technology	农户是否采纳测土配方施肥技术，是=1，否=0 If the farmer adopts soil testing and formulated fertilization technology=1, otherwise=0	0.326	0.469

续表 1 Continued Table 1

变量类型 Variable type	变量名称 Variable name	变量含义 Variable definition	均值 Mean	标准差 SD
控制变量 Control variables	性别 Gender	农业生产决策者的性别,男=1,女=0 Gender of the agricultural production decision-maker, male=1, female=0	0.726	0.446
	年龄/岁 Age	农业生产决策者的实际年龄 Age of the agricultural production decision-maker	55.430	12.370
	受教育年限/a Years of education	农业生产决策者的正规受教育年限 Years of education of the agricultural production decision-maker	7.752	3.592
	健康状况 Health status	农业生产决策者是否患有慢性疾病,是=1,否=0 If the agricultural production decision-maker suffers from chronic diseases=1, otherwise=0	0.279	0.449
	非农兼业 Off-farm activities	农业生产决策者是否非农兼业,是=1,否=0 If the agricultural production decision-maker participates in off-farm activities=1, otherwise=0	0.212	0.409
	拥有汽车 Car ownership	农户是否拥有汽车,是=1,否=0 If the farmer owns a car=1, otherwise=0	0.462	0.499
	拥有电脑 Computer ownership	农户是否拥有电脑,是=1,否=0 If the farmer owns a computer=1, otherwise=0	0.471	0.499
	家畜养殖 Breeding livestock	农户是否养殖家畜,是=1,否=0 If the farmer raises livestock=1, otherwise=0	0.113	0.317
	地块数 Number of plots	农户实际经营的地块数,块 Number of plots actually operated by the farmer, block	8.062	15.87
	灌溉条件 Irrigation conditions	田间灌溉是否方便,是=1,否=0 If irrigation is convenient=1, otherwise=0	0.708	0.455
	排水条件 Drainage conditions	田间排水是否方便,是=1,否=0 If field drainage is convenient=1, otherwise=0	0.728	0.444
	土壤肥力 Soil fertility	土壤肥力,差=1,一般=2,较好=3 Soil fertility, poor=1, normal=2, good=3	2.308	0.667
	早稻 Early rice	农户是否种植早稻,是=1,否=0 If the farmer is planting early rice=1, otherwise=0	0.219	0.414
	中稻 Middle rice	农户是否种植中稻,是=1,否=0 If the farmer is planting middle rice=1, otherwise=0	0.612	0.488
	晚稻 Late rice	农户是否种植晚稻,是=1,否=0 If the farmer is planting late rice=1, otherwise=0	0.207	0.405
	水稻保险 Rice insurance	农户是否购买水稻保险,是=1,否=0 If the farmer purchases rice insurance=1, otherwise=0	0.591	0.492
	化肥价格/(元/kg) Fertilizer price	化肥购买价格 The price of purchasing chemical fertilizer	2.302	0.482
	距离市场时间/min Distance to market	农户到达最近镇级市场所花费的时间 Time consumption for reaching the nearest town-level market	17.600	10.920
	地区虚拟变量 Regional dummy variables	以农户所在的县(市)设置地区虚拟变量 Regional dummy variables representing the county (city) where the farmer is located	—	—

表 2 Trans-log 形式的随机前沿生产函数模型的估计结果

Table 2 Estimated results of the stochastic frontier production function model in Trans-log form

变量 Variable	系数 Coefficient	标准误 Standard error
Ln(劳动力) Ln(Labor)	0.023 **	0.010
Ln(机械) Ln(Machinery)	-0.022 ***	0.008
Ln(化肥) Ln(Fertilizer)	0.040 ***	0.012
Ln(其他投入) Ln(Other inputs)	0.010	0.010
Ln(劳动力)×Ln(机械) Ln(Labor)×Ln(Machinery)	-0.012 **	0.005
Ln(劳动力)×Ln(化肥) Ln(Labor)×Ln(Fertilizer)	0.003	0.005
Ln(劳动力)×Ln(其他投入) Ln(Labor)×Ln(Other inputs)	-0.025	0.016
Ln(机械)×Ln(化肥) Ln(Machinery)×Ln(Fertilizer)	-0.003 **	0.001
Ln(机械)×Ln(其他投入) Ln(Machinery)×Ln(Other inputs)	0.006	0.005
Ln(化肥)×Ln(其他投入) Ln(Fertilizer)×Ln(Other inputs)	0.001	0.005
0.5 × [Ln(劳动力)] ² 0.5×[Ln(Labor)] ²	0.019	0.034
0.5 × [Ln(机械)] ² 0.5×[Ln(Machinery)] ²	-0.012 ***	0.004
0.5 × [Ln(化肥)] ² 0.5×[Ln(Fertilizer)] ²	0.025 ***	0.008
0.5 × [Ln(其他投入)] ² 0.5×[Ln(Other inputs)] ²	0.008	0.027
常数项 Constant	7.142 ***	0.103
V sigma	-5.552 ***	0.585
U sigma	-2.647 ***	0.136
Log likelihood		658.44
观测值 Number of observations		1 112

注：***、**、* 分别代表在 1%、5%、10% 的统计水平上显著。下表同。Note: ***, **, and * denote significance at 1%, 5%, and 10% level, respectively. The same as below.

表 3 长江经济带水稻化肥施用效率测算结果

Table 3 Calculation results of rice fertilizer application efficiency in the Yangtze River Economic Belt

指标 Index	总体 Total	云南 Yunnan	湖北 Hubei	江苏 Jiangsu	采纳测土配方施肥技术 Soil testing and formulated fertilization technology adopters	未采纳测土配方施肥技术 Non-soil testing and formulated fertilization technology adopters
劳动产出弹性 Labor output elasticity	0.130 (0.025)	0.118 (0.028)	0.127 (0.023)	0.141 (0.018)	0.134 (0.025)	0.127 (0.025)
机械产出弹性 Mechanical output elasticity	-0.074 (0.022)	-0.068 (0.031)	-0.077 (0.013)	-0.076 (0.018)	-0.077 (0.017)	-0.071 (0.025)
化肥产出弹性 Fertilizer output elasticity	0.138 (0.043)	0.113 (0.056)	0.150 (0.032)	0.152 (0.019)	0.155 (0.020)	0.131 (0.048)
化肥施用效率 Fertilizer application efficiency	0.685 (0.245)	0.643 (0.220)	0.652 (0.227)	0.759 (0.269)	0.774 (0.217)	0.503 (0.193)
生产技术效率 Production technology efficiency	0.816 (0.113)	0.789 (0.140)	0.831 (0.090)	0.827 (0.101)	0.886 (0.070)	0.782 (0.115)

注：括号内数字为标准差。Note: The parentheses are standard errors.

率要低于水稻生产技术效率,说明现阶段长江流域水稻生产减少化肥用量并不会导致产量下降,反而有利于提高化肥施用效率。从地区差异来看,化肥施用效率从高到低依次是江苏、湖北和云南。可以发现,长江流域上游地区的云南省的化肥施用效率较低。可能原因是,长江上游地区多属于高海拔的山地,经济和现代农业发展水平较为滞后,加剧了要素利用效率的损失。从测土配方施肥技术采纳情况来看,采纳测土配方施肥技术组农户的化肥施用效率要高于未采纳测土配方施肥技术的农户。这初步

表明采纳测土配方施肥技术有助于提高化肥施用效率。据此,以下进一步考虑其他混淆因素的影响,实证分析农户采用测土配方施肥技术对水稻化肥施用效率的影响。

2.2 测土配方施肥技术对化肥施用效率的影响估计结果

1) Tobit 模型回归估计结果。表 4 第(1)列报告了基于 Tobit 模型估计测土配方施肥技术对化肥施用效率的影响效应。估计结果显示,测土配方施肥技术变量显著,且系数为正。这说明农户采纳测

土配方施肥技术能够显著提高其化肥施用效率。采纳测土配方施肥技术农户的化肥施用效率平均比未采纳测土配方施肥技术农户提高了 25.2%，具有显著的经济意义。由此不难推断，推广测土配方施肥技术是提高长江经济带化肥施用效率的有效举措之一。

2) 分位数回归估计结果。考虑到 Tobit 模型估

计结果仅得到测土配方施肥技术对化肥施用效率的平均影响。同时，在不同的化肥施用效率水平上，测土配方施肥技术的影响可能存在差异。分位数回归能够在被解释变量的整个分布上估计出解释变量的影响效应，有效弥补了均值回归的不足^[28]。据此，本研究进一步利用分位数回归估计了测土配方施肥技术对化肥施用效率的影响。表 4 第(2)~(6)列为

表 4 测土配方施肥技术对化肥施用效率的影响估计结果

Table 4 Estimated results of the influence of soil test formula fertilization technology on fertilizer efficiency

变量 Variables	(1) Tobit	分位数回归 Quantile regression				
		(2) 0.1 分位点 0.1 quantile	(3) 0.25 分位点 0.25 quantile	(4) 0.5 分位点 0.5 quantile	(5) 0.75 分位点 0.75 quantile	(6) 0.9 分位点 0.9 quantile
测土配方施肥技术 Soil testing and formulated fertilization technology	0.252*** (0.029)	0.150*** (0.015)	0.256*** (0.009)	0.326*** (0.017)	0.311*** (0.028)	0.183*** (0.032)
性别 Gender	-0.006 (0.016)	0.000 (0.016)	-0.003 (0.010)	-0.018 (0.019)	-0.001 (0.030)	-0.008 (0.035)
年龄 Age	0.002*** (0.001)	0.000 (0.001)	0.001 (0.000)	0.002* (0.001)	0.002 (0.001)	0.002 (0.002)
受教育年限 Years of education	0.004* (0.002)	0.000 (0.002)	0.001 (0.001)	0.004 (0.003)	0.007* (0.004)	0.005 (0.005)
健康状况 Health status	-0.005 (0.014)	-0.006 (0.016)	-0.004 (0.010)	-0.015 (0.019)	-0.016 (0.030)	0.026 (0.035)
非农兼业 Off-farm activities	0.028 (0.022)	0.007 (0.017)	0.001 (0.011)	-0.001 (0.020)	0.022 (0.032)	0.076** (0.037)
拥有汽车 Car ownership	0.010 (0.014)	0.004 (0.014)	0.006 (0.009)	0.009 (0.017)	-0.005 (0.027)	0.006 (0.032)
拥有电脑 Computer ownership	0.029** (0.014)	0.001 (0.015)	0.009 (0.010)	0.024 (0.018)	0.034 (0.028)	0.030 (0.033)
家畜养殖 Breeding livestock	-0.033 (0.024)	-0.001 (0.022)	-0.006 (0.014)	-0.046* (0.026)	-0.058 (0.041)	-0.007 (0.048)
地块数 Number of plots	0.000 (0.001)	-0.001 0.150***	-0.002*** 0.256***	-0.001 0.326***	0.001 0.311***	0.001 0.183***
灌溉条件 Irrigation conditions	-0.001 (0.031)	(0.000) -0.000	(0.000) 0.012	(0.001) 0.017	(0.001) 0.008	(0.001) -0.105*
排水条件 Drainage conditions	0.012 (0.029)	(0.026) 0.010	(0.016) 0.001	(0.030) -0.008	(0.048) -0.008	(0.056) 0.035
以土壤质量差组为参照 Poor soil fertility as the reference						
土壤肥力一般 Normal soil fertility	-0.020 (0.024)	(0.025) -0.007	(0.016) -0.010	(0.030) -0.004	(0.048) -0.042	(0.056) -0.028
土壤肥力较好 Good soil fertility	-0.012 (0.025)	(0.022) -0.006	(0.014) -0.014	(0.026) -0.016	(0.041) -0.020	(0.048) 0.015
以早稻为参照组 Early rice as the reference						
中稻 Middle rice	-0.026 (0.025)	0.002 (0.020)	0.007 (0.013)	-0.005 (0.024)	-0.070* (0.038)	-0.120*** (0.045)
晚稻 Late rice	-0.074*** (0.025)	0.012 (0.021)	0.001 (0.014)	-0.029 (0.026)	-0.141*** (0.041)	-0.166*** (0.047)
水稻保险 Rice insurance	-0.028 (0.020)	-0.010 (0.015)	-0.010 (0.010)	-0.003 (0.018)	-0.021 (0.028)	-0.056* (0.033)
化肥价格 Fertilizer price	0.045 (0.044)	-0.009 (0.028)	-0.018 (0.018)	0.025 (0.033)	0.066 (0.053)	0.108* (0.061)
市场距离 Distance to the market	0.000 (0.001)	0.000 (0.001)	-0.000 (0.000)	-0.001 (0.001)	-0.000 (0.001)	-0.000 (0.001)
常数项 Constant	0.081 (0.066)	-0.006 (0.060)	0.017 (0.039)	0.023 (0.072)	0.211* (0.114)	0.463*** (0.132)
地区虚拟变量 Regional dummy variables	控制 Yes	控制 Yes	控制 Yes	控制 Yes	控制 Yes	控制 Yes
观测值 Number of observations	1 112	1 112	1 112	1 112	1 112	1 112

注：括号内为村级层面的聚类标准误。Note: The parentheses are standard errors clustering at the village level.下同。The same as below.

分位数回归结果,可以发现,测土配方施肥技术的影响系数随着分位点的增加而下降。这表明,对于化肥施用效率处于较高水平的农户而言,测土配方施肥技术对化肥施用效率的提升作用有所下降。

2.3 内生性问题

前文的估计结果表明,测土配方施肥技术能够显著提高长江经济带水稻种植户的化肥施用效率。但需要指出的是,若上述估计模型存在内生性问题,将有可能导致估计结果有偏。具体来说,第一,本研究仅考察水稻种植户的化肥施用效率,如果存在不可观测因素同时影响农户水稻种植决策与化肥施用效率,前文的估计结果可能出现样本选择偏误。第二,农户测土配方施肥技术采纳决策不仅受到可观测因素(如决策者性别、年龄、受教育年限等)的影响,还可能受到不可观测因素(如经营能力等)的影响。若经营能力越高的农户越有可能采纳测土配方施肥技术,其化肥施用效率也越高,这将会带来自选择偏误问题,导致前文的估计结果偏大,即高估了测土配方施肥技术对化肥施用效率的正向影响。

工具变量法是缓解上述内生性问题的有效方法^[29]。本研究选择村庄测土配方施肥技术采纳率(除农户自身外村庄的样本农户测土配方施肥技术采纳占比)作为工具变量。从同群效应(peer effect)维度来看,村庄测土配方施肥技术采纳率越高,农户越有可能采纳测土配方施肥技术。因为村庄内部的自我认同与集体行动规范将会促使大部分农户生产行为的趋同化。从社会学习(social learning)维度来看,农户在生产过程会出现信息交流、相互学习的

情况。村庄测土配方施肥技术采纳率越高,农户之间的学习效应将会加速技术的扩散。然而,使用解释变量的组内平均值作为工具变量可能会违反工具变量的排他性约束,因为未观察到的组间异质性可能与工具变量和解释变量相关^[30]。在工具变量不满足排他性假设的情况,Lewbel^[31]提出了基于异方差构建的内部工具变量法,能够利用工具变量法进行参数估计。同时,为进一步检验工具变量法估计结果的稳健性,本研究利用近似外生工具变量法,即在允许工具变量违反排他性假设的条件下进行参数估计^[32]。

表 5 为工具变量法的估计结果。第(1)列为利用村庄测土配方施肥技术采纳率作为工具变量的估计结果。一阶段 F 统计值远大于 10 这一经验值,拒绝存在弱工具变量的原假设。第(2)列为基于异方差构建的内部工具变量的估计结果,第(3)列为外部工具变量(村庄的测土配方施肥技术采纳率)和基于异方差构建的内部工具变量的组合。过度识别检验的 Hansen's J 统计量、外生性检验结果均表明基于异方差构建的内部工具变量法中所使用的工具变量是满足条件的。外部工具变量和基于异方差构建的内部工具变量法的估计结果表明,农户采用测土配方施肥技术能够显著提高水稻化肥施用效率。基于异方差构建的内部工具变量与外部工具变量的组合估计得到的系数与表 4 第(1)列的基准回归较为接近,第(4)列近似工具变量法的估计结果也同样支持了农户采纳测土配方施肥技术能够显著提高化肥施用效率的基本结论。综上,可以认为估计结果具备稳健性。

表 5 内生检验结果

Table 5 The result of endogenous test

变量 Variables	(1) IV-Tobit	(2) Lewbel 模型 Lewbel model	(3) IV-Lewbel	(4) 近似外生工具变量法 Plausibly exogenous instrument variable method
测土配方施肥技术 Soil testing and formulated fertilization technology	0.307*** (0.068)	0.232*** (0.024)	0.235*** (0.024)	0.456*** (0.169)
控制变量 Control variables	控制 Yes	控制 Yes	控制 Yes	控制 Yes
地区虚拟变量 Regional dummy variables	控制 Yes	控制 Yes	控制 Yes	控制 Yes
常数项 Constant	0.078 (0.057)	0.083 (0.057)	0.085 (0.057)	0.077 (0.059)
F 值 F value	44.810	—	—	—
Hansen's J 统计量 Hansen's J statistics	—	84.745***	84.657***	—
观测值 Number of observations	1 112	1 112	1 112	1 112

2.4 进一步的异质性分析:如何提高测土配方施肥技术的化肥增效效应?

尽管本文的估计结果表明测土配方施肥技术能够显著增加长江经济带水稻种植户的化肥施用效率,但应当正视,即便是采用了测土配方施肥技术的农户,农户的化肥施用效率仍存在较大的提升空间。如何进一步提高测土配方施肥技术对化肥施用效率的改进作用将是今后技术推广面临的一个重要问题。

测土配方施肥技术包含“测土”“配肥”“施肥”3个环节,属于知识密集型技术^[6]。以测土环节为例,其涉及到取土、化验和制定施肥方案等步骤,这普遍超出了普通农户能力范围。这就需要为农户提供专业化的技术服务,缓解农户采纳测土配方施肥技术面临的技术约束。事实上,《行动》曾明确指出要“积极探索公益性服务与经营性服务结合、政府购买服务的有效模式,支持专业化、社会化服务组织发展,为农民提供统测、统配、统供、统施四统一服务”。尽管通过农业社会化服务促进测土配方施肥技术的推广与应用具有多重优势,但测土配方施肥技术服务所隐含的前置条件却被严重忽视。

农业社会化服务通常对土地的连片化经营提出较高的要求,具体到测土配方施肥技术的实践中:第一,测土环节大多依赖于专业技术人员的实地考察与检测,非连片的土地可能面临较高的采样成本;第二,配肥环节虽然基本为工厂化作业,属于“异地”交易范畴,但土地的分散性可能造成不同地块的配方呈现异质性,可能增加要素成本;第三,施肥机械在不同地块间转场困难,地块狭小还会限制机械活动半径,从而影响施肥机械工作效率,也会增加机械成本。

由此不难理解,实现土地连片化经营是提高测土配方施肥技术对化肥施用效率改进作用的重要方式。现阶段,高标准基本农田建设是各地政府降低耕地细碎程度、促进土地连片化经营的重要举措。《高标准基本农田建设标准(TD/T1033—2012)》^①中对高标准农田的定义是:“一定时期内,通过农村土地整治形成的集中连片、设施配套、高产稳产、生态良好、抗灾能力强、与现代农业生产和经营方式相适应的基本农田”。其通过“小田并大田”“化零为整”等土地平整合并措施,实现土地平整与集中连片

经营,有效降低耕地细碎程度,形成地块规模和经营规模同步扩张的有利局面;或经由地块互换,保持总经营规模不变,实现地块经营规模增加。基于此,本研究将测土配方施肥技术与高标准基本农田建设交互,检验经由高标准基本农田建设促进土地连片化经营是否能够提高测土配方施肥技术对化肥施用效率的改进作用。

表6为测土配方施肥技术与高标准基本农田建设变量^②交互的估计结果。第(1)列的估计结果显示,测土配方施肥技术与高标准基本农田建设的交互项显著,且系数为正。说明高标准基本农田建设能够提高测土配方施肥技术对化肥施用效率的改善作用。进一步,根据高标准基本农田建设的内容,本研究将测土配方施肥技术与田块平整合并变量交互,结果表明,测土配方施肥技术与田块平整合并的交互项显著,这一结果验证了土地连片化经营能够增强测土配方施肥技术对化肥施用效率的改进作用的猜想。第(3)列的估计结果显示,测土配方施肥技术、高标准基本农田建设、田块平整合并3个变量的交互项显著,且系数为正。这一结果同样验证了前文的猜想,即通过高标准基本农田建设促进土地连片化经营能够提高测土配方施肥技术对化肥施用效率的改进作用。

3 结论与政策启示

推广测土配方施肥技术是提高化肥施用效率、改善长江流域生态环境的一项重要举措。本研究基于长江经济带省份云南、湖北和江苏的农户调查数据,运用 Trans-log 随机前沿生产函数测算了长江经济带水稻种植户的化肥施用效率,进一步利用 Tobit 模型估计了农户采用测土配方施肥技术对水稻化肥施用效率的影响。研究结果表明:

1) 长江经济带化肥施用效率的均值为 0.685,说明在其他条件不变的情况下,若消除效率损失,水稻生产中的化肥使用效率仍存在 31.5% 的提升空间;上游地区(云南)的水稻化肥施用效率要低于中游(湖北)和下游地区(江苏)。

2) 平均而言,长江经济带的水稻化肥施用效率要低于水稻生产技术效率,说明现阶段减少长江经济带的化肥用量并不会导致水稻产量下降,反而有助于提高化肥施用效率。

① 资料来源:《高标准基本农田建设标准 TD/T1033—2012》<http://www.jianbiaoku.com/webarbs/book/55235/997897.shtml>。

② 若农户近5年来开展过高标准农田建设土地整治活动,变量赋值为1,否则为0。

表 6 测土配方施肥技术与高标准基本农田建设交互的估计结果
 Table 6 Estimated results of interaction between soil testing formula fertilization technology and well-facilitated capital farmland construction

变量 Variables	(1) Tobit	(2) Tobit	(3) Tobit
测土配方施肥技术 Soil testing and formulated fertilization technology	0.225*** (0.026)	0.222*** (0.015)	0.225*** (0.017)
高标准农田建设 Well-facilitated capital farmland construction	-0.048 (0.033)		-0.030 (0.023)
田块平埂合并 Merger of plots and ridges		-0.060*** (0.020)	-0.043 (0.041)
测土配方施肥技术×高标准基本农田建设 Soil testing and formulated fertilization technology×Well-facilitated capital farmland construction	0.048* (0.025)		-0.015 (0.033)
测土配方施肥技术×田块平埂合并 Soil testing and formulated fertilization technology×Merger of plots and ridges		0.119*** (0.035)	-0.086 (0.113)
高标准基本农田建设×田块平埂合并 Well-facilitated capital farmland construction×Merger of plots and ridges			-0.012 (0.048)
测土配方施肥技术×高标准基本农田建设×田块平埂合并 Soil testing and formulated fertilization technology×Well-facilitated capital farmland onstruction×Merger of plots and ridges			0.244** (0.122)
控制变量 Control variables	控制 Yes	控制 Yes	控制 Yes
地区虚拟变量 Regional dummy variables	控制 Yes	控制 Yes	控制 Yes
常数项 Constant	0.161 (0.118)	0.159* (0.085)	0.161** (0.071)
交互项联合分布检验 Joint significance of interaction terms			F=4.020 P=0.045
观测值 Number of observations	1 112	1 112	1 112

3)农户采纳测土配方施肥技术显著提高了水稻化肥施用效率,但对于化肥施用效率处于较高水平的农户而言,测土配方施肥技术对化肥施用效率的提升作用有所下降。

4)进一步分析发现,经由高标准基本农田建设促进土地连片化经营能够增强测土配方施肥技术对化肥施用效率的改进作用。

基于上述基本结论,就如何提高长江经济带化肥施用效率、减少农业面源污染,本研究得出如下政策启示:

1)在区域空间上,长江上游等欠发达地区的化肥施用效率仍存在较大的改进空间,是今后长江经济带农业源污染治理需要重点关注的区域。

2)在技术选择上,测土配方施肥技术能够显著提高化肥施用效率,相关部门应完善测土配方施肥技术推广服务体系,提高长江流域农户测土配方施肥技术采纳率。

3)加大长江流域高标准基本农田建设力度,改善农业生产条件。特别地,建议采取田块平埂合并

等措施,促进土地连片化经营,进一步发挥测土配方施肥技术对化肥施用效率的改进作用。

参考文献 References

[1] 刘录三,黄国鲜,王璠,等.长江流域水生态环境安全主要问题、形势与对策[J].环境科学研究,2020,33(5):1081-1090.LIU L S,HUANG G X,WANG P,et al.Main problems,situation and countermeasures of water eco-environment security in the Yangtze River Basin[J].Research of environmental sciences,2020,33(5):1081-1090(in Chinese with English abstract).

[2] 肖羽芯,王妍,刘云根,等.典型岩溶湿地流域生态功能区划研究——以滇东南普者黑流域为例[J].华中农业大学学报,2020,39(2):47-55.XIAO Y X,WANG Y,LIU Y G,et al. Research on ecological function regionalization of typical karst wetland watershed; take Puzhehei basin as an example[J]. Journal of Huazhong Agricultural University,2020,39(2):47-55(in Chinese with English abstract).

[3] 彭甲超,肖建忠,李纲,等.长江经济带农业废水面源污染与农业经济增长的脱钩关系[J].中国环境科学,2020,40(6):2770-2784.PENG J C,XIAO J Z,LI G,et al.Decoupling relationship between agricultural wastewater non-point source pollution

- and agricultural economic growth in the Yangtze River Economic Belt[J]. *China environmental science*, 2020, 40(6): 2770-2784 (in Chinese with English abstract).
- [4] 殷培红, 耿润哲, 王萌, 等. 长江经济带农业面源污染治理中的关键问题及建议[J]. *环境与可持续发展*, 2019, 44(2): 22-25. YIN P H, GENG R Z, WANG M, et al. Key issues and suggestions in agricultural non-point source pollution control in the Yangtze River economic belt[J]. *Environment and sustainable development*, 2019, 44(2): 22-25 (in Chinese with English abstract).
- [5] 孙杰, 周力, 应瑞瑶. 精准农业技术扩散机制与政策研究——以测土配方施肥技术为例[J]. *中国农村经济*, 2019(12): 65-84. SUN J, ZHOU L, YING R Y. A study on the diffusion mechanisms and policies of precision agriculture technology: a case study of soil testing and formulated fertilization technology[J]. *Chinese rural economy*, 2019(12): 65-84 (in Chinese with English abstract).
- [6] 李兴佐, 朱启臻, 鲁可荣, 等. 企业主导型测土配方施肥服务体系的创新与启示[J]. *农业经济问题*, 2008(4): 25-28. LI X Z, ZHU Q Z, LU K R, et al. Innovation and enlightenment of enterprise-led soil testing and fertilization service system[J]. *Issues in agricultural economy*, 2008(4): 25-28 (in Chinese with English abstract).
- [7] 李莎莎, 朱一鸣. “一体化”视角下测土配方施肥技术推广服务模式转型的思考[J]. *当代经济管理*, 2017, 39(11): 54-58. LI S S, ZHU Y M. The thoughts on service pattern of testing soil for formulated fertilization technology popularization in the perspective of integration[J]. *Contemporary economic management*, 2017, 39(11): 54-58 (in Chinese with English abstract).
- [8] 张复宏, 宋晓丽, 霍明. 果农对过量施肥的认知与测土配方施肥技术采纳行为的影响因素分析——基于山东省9个县(区、市)苹果种植户的调查[J]. *中国农村观察*, 2017(3): 117-130. ZHANG F H, SONG X L, HUO M. Excess fertilizer application and growers' adoption behavior for soil testing for fertilizer formulation and their determinants: an empirical analysis based on survey data from apple growers in 9 counties of Shandong Province[J]. *China rural survey*, 2017(3): 117-130 (in Chinese with English abstract).
- [9] 许增巍. 农户参与测土配方施肥意愿的影响因素分析——以陕西省杨凌区为例[J]. *生态经济(学术版)*, 2013(1): 207-210. XU Z W. An analysis on influential factors of farmers' intention to participate in soil testing and fertilizer recommendation: a case study from Yangling district of Shaanxi Province[J]. *Ecological economy*, 2013(1): 207-210 (in Chinese with English abstract).
- [10] 秦明, 范焱红, 王志刚. 社会资本对农户测土配方施肥技术采纳行为的影响——来自吉林省703份农户调查的经验证据[J]. *湖南农业大学学报(社会科学版)*, 2016, 7(6): 14-20. QIN M, FAN Y H, WANG Z G. Impact of social capital on farmers' technology adoption for soil testing and formulated fertilization technology: a survey of 703 farmers in Jilin province[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (social sciences)*, 2016, 17(6): 14-20 (in Chinese with English abstract).
- [11] 高瑛, 王娜, 李向菲, 等. 农户生态友好型农田土壤管理技术采纳决策分析——以山东省为例[J]. *农业经济问题*, 2017, 38(1): 38-47, 110-111. GAO Y, WANG N, LI X F, et al. Adoption of eco-friendly soil management practices by smallholder farmers in Shandong of China [J]. *Issues in agricultural economy*, 2017, 38(1): 38-47, 110-111 (in Chinese with English abstract).
- [12] 褚彩虹, 冯淑怡, 张蔚文. 农户采用环境友好型农业技术行为的实证分析——以有机肥与测土配方施肥技术为例[J]. *中国农村经济*, 2012(3): 68-77. CHU C H, FENG S Y, ZHANG W W. An empirical analysis of farmers' behavior in adopting environmentally friendly agricultural technologies: taking organic fertilizer and soil testing formula fertilization technology as an example[J]. *Chinese rural economy*, 2012(3): 68-77 (in Chinese with English abstract).
- [13] 孔凡斌, 钟海燕, 潘丹. 小农户土壤保护行为分析——以施肥为例[J]. *农业技术经济*, 2019(1): 100-110. KONG F B, ZHONG H Y, PAN D. Analysis of soil conservation behavior among small-scale farmers: a case study of fertilization[J]. *Journal of agrotechnical economics*, 2019(1): 100-110 (in Chinese with English abstract).
- [14] 文长存, 吴敬学. 农户“两型农业”技术采用行为的影响因素分析——基于辽宁省玉米水稻种植户的调查数据[J]. *中国农业大学学报*, 2016, 21(9): 179-187. WEN C C, WU J X. Impacts of environment-friendly technology on technical efficiency of rice cultivation: a case study of formula fertilization technology by soil testing [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(9): 179-187 (in Chinese with English abstract).
- [15] 张聪颖, 霍学喜. 劳动力转移对农户测土配方施肥技术选择的影响[J]. *华中农业大学学报(社会科学版)*, 2018(3): 65-72, 155. ZHANG C Y, HUO X X. Impact of labor transfer on farmers' choice of soil testing formulated fertilization[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University (social sciences edition)*, 2018(3): 65-72, 155 (in Chinese with English abstract).
- [16] 侯晓康, 刘天军, 黄腾, 等. 农户绿色农业技术采纳行为及收入效应[J]. *西北农林科技大学学报(社会科学版)*, 2019, 19(3): 121-131. HOU X K, LIU T J, HUANG T, et al. Adoption behavior and income effects of green agricultural technology for farmers[J]. *Journal of Northwest A&F University (social science edition)*, 2019, 19(3): 121-131 (in Chinese with English abstract).
- [17] 夏雯雯, 杜志雄, 郜亮亮. 土地经营规模对测土配方施肥技术应用的影响研究——基于家庭农场监测数据的观察[J]. *中国土地科学*, 2019, 33(11): 70-78. XIA W W, DU Z X, GAO L L. Study on the impact of land operational scale on the application

- of formula fertilization technology by soil testing; based on the observation from family farm monitoring data[J]. *China land science*, 2019, 33(11): 70-78 (in Chinese with English abstract).
- [18] 钱龙, 缪书超, 陆华良. 新一轮确权对农户耕地质量保护行为的影响——来自广西的经验证据[J]. *华中农业大学学报(社会科学版)*, 2020(1): 28-37, 162-163. QIAN L, MIU S C, LU X L. The impact of a new round certification on farmer's protection behaviors to cultivated land quality: empirical evidence from Guangxi Province[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University(social sciences edition)*, 2020(1): 28-37, 162-163 (in Chinese with English abstract).
- [19] 张振, 高鸣, 苗海民. 农户测土配方施肥技术采纳差异性及其机理[J]. *西北农林科技大学学报(社会科学版)*, 2020, 20(2): 120-128. ZHANG Z, GAO M, MIAO H M. Analysis of farmers' adoption behavior and influencing mechanism of soil testing for fertilizer[J]. *Journal of Northwest A&F University (social science edition)*, 2020, 20(2): 120-128 (in Chinese with English abstract).
- [20] 张成玉, 肖海峰. 我国测土配方施肥技术增收节支效果研究——基于江苏、吉林两省的实证分析[J]. *农业技术经济*, 2009(3): 44-51. ZHANG C Y, XIAO H F. Study on the effect of soil testing formula fertilization technology on increasing income and saving expenditure in China; based on the empirical analysis of Jiangsu and Jilin Province[J]. *Journal of agrotechnical economics*, 2009(3): 44-51 (in Chinese with English abstract).
- [21] 刘畅, 张馨予, 张巍. 家庭农场测土配方施肥技术采纳行为及收入效应研究[J]. *农业现代化研究*, 2021, 42(1): 123-131. LIU C, ZHANG X Y, ZHANG W. The adoption behaviors and income effects of soil testing and formula fertilization technology on family farms[J]. *Research of agricultural modernization*, 2021, 42(1): 123-131 (in Chinese with English abstract).
- [22] 李夏菲, 杨璐, 于书霞, 等. 湖北省油菜测土配方施肥下 N_2O 减排潜力估算[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(12): 3817-3823. LI X F, YANG L, YU S X, et al. Estimation of N_2O mitigation potential from rape planting through soil testing and formulated fertilization in Hubei Province [J]. *China environmental science*, 2015, 35(12): 3817-3823 (in Chinese with English abstract).
- [23] 张卫红, 李玉娥, 秦晓波, 等. 应用生命周期法评价我国测土配方施肥项目减排效果[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(7): 1422-1428. ZHANG W H, LI Y E, QIN X B, et al. Evaluation of greenhouse gas emission reduction by balanced fertilization in China using life cycle assessment [J]. *Journal of agro-environment science*, 2015, 34(7): 1422-1428 (in Chinese with English abstract).
- [24] 葛继红, 周曙东. 环境友好型技术对水稻种植技术效率的影响——以测土配方施肥技术为例[J]. *南京农业大学学报(社会科学版)*, 2012, 12(2): 52-57. GE J H, ZHOU S D. Impacts of environment-friendly technology on technical efficiency of rice cultivation: a case study of formula fertilization technology by soil testing [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University (social sciences edition)*, 2012, 12(2): 52-57 (in Chinese with English abstract).
- [25] 张聪颖, 冯晓龙, 霍学喜. 我国苹果主产区测土配方施肥技术实施效果评价——基于倾向得分匹配法的实证分析[J]. *农林经济管理学报*, 2017, 16(3): 343-350. ZHANG C Y, FENG X L, HUO X X. Effect evaluation of soil testing and formulated fertilization technology in major apple production areas: an empirical analysis with propensity score matching methods[J]. *Journal of agro-forestry economics and management*, 2017, 16(3): 343-350 (in Chinese with English abstract).
- [26] 邹伟, 张晓媛. 土地经营规模对化肥使用效率的影响——以江苏省为例[J]. *资源科学*, 2019, 41(7): 1240-1249. ZOU W, ZHANG X Y. Effects of land management scale on fertilizer use efficiency: taking Jiangsu as an example[J]. *Resources science*, 2019, 41(7): 1240-1249 (in Chinese with English abstract).
- [27] WANG Y Y, ZHU S, ZHANG Y W. What could promote farmers to replace chemical fertilizers with organic fertilizers [J]. *Journal of cleaner production*, 2018, 199(10): 882-890.
- [28] KOENKER R G, BASSETT J R. Regression quantiles[J]. *Econometrica*, 1978, 46: 33-50.
- [29] WOOLDRIDGE J M. *Introductory econometrics: a modern approach*[M]. 6th ed. Boston: Cengage Learning, 2015.
- [30] GORMLEY T A, MATSA D A. Common errors; how to (and not to) control for unobserved heterogeneity[J]. *Review of financial studies*, 2014, 27(2): 617-661.
- [31] LEWBEL A. Using heteroscedasticity to identify and estimate mismeasured and endogenous regressor models[J]. *Journal of business & economic stats*, 2012, 30(1): 67-80.
- [32] VAN KIPPERSLUIS H, RIETVELD C A. Beyond plausibly exogenous[J]. *Econometrics journal*, 2018, 21(13): 316-331.

Effect and improvement of soil testing and formulated fertilization technology in the Yangtze River Economic Belt:

an empirical analysis of rice planting in Yunnan, Hubei and Jiangsu provinces

ZHANG Lu¹, LIANG Zhihui¹, PU Yanxiang²

1. *College of Economics and Management, Huazhong Agricultural University/
Hubei Rural Development Research Center, Wuhan 430070, China;*

2. *College of Economics and Management, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China*

Abstract Based on the survey data of farmers in the Yangtze River Economic Belt including Yunnan, Hubei and Jiangsu, the Trans-log stochastic frontier production function was used to measure the efficiency of fertilizer application and the Tobit model was used to estimate the impact of soil testing and formulated fertilization technology on fertilizer application efficiency in rice production. The results showed that there was still a 31.5% improvement potential in the efficiency of rice fertilizer application in the Yangtze River Economic Belt with other conditions unchanged. The efficiency of fertilizer application in the upper reaches (Yunnan) was relatively lower than that in the middle (Hubei) and the lower reaches (Jiangsu) of the Yangtze River. The efficiency of chemical fertilizer application in rice in the Yangtze River Economic Belt was lower than that of rice production technology, indicating that reducing the amount of chemical fertilizer at current stage would not only lead to a decline in rice yield, but would help improve the efficiency of chemical fertilizer application. Farmers significantly improved the efficiency of rice chemical fertilizer application through adopting soil testing and formulated fertilization technology. However, for farmers with a relatively high level of fertilizer application efficiency, the effect of soil testing and formulated fertilization technology on the improvement of chemical fertilizer application efficiency had been weakened. It is indicated that the construction of well-facilitated capital farmland to promote the joint planting scale can improve the effect of soil testing and formulated fertilization technology on the efficiency of chemical fertilizer application.

Keywords Yangtze River Economic Belt; efficiency of fertilizer application; utilization of agricultural elements; soil testing and formulated fertilization technology; construction of well-facilitated capital farmland; agricultural non point source pollution; phosphorus pollution; green development

(责任编辑:陆文昌)