

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

孙 杰 周 力 应瑞瑶

摘要：本文基于测土配方施肥技术的精准化属性，构建精准农业技术推广的一个分析框架，着重讨论政府推广的配方肥种类单一与否对测土配方施肥技术扩散及采用效果的差异化影响，并利用江苏省多年的土壤肥力监测数据和跨省的农户调查数据进行实证检验。研究发现：①与推广单一种类的配方肥相比，政府推广多种配方肥对农户的技术采用概率和采用程度有显著的负向影响。②与施用传统化肥相比，如果政府推广的配方肥种类单一，施用配方肥并不能显著改善土壤肥力，但当政府推广的配方肥种类多于1种时，施用配方肥可以平衡土壤养分，改善土壤质量。

关键词：精准农业技术 测土配方施肥技术 技术扩散 土壤肥力

中图分类号：F303.2 **文献标识码：**A

一、引言

发展精准农业技术是破解中国农业资源环境约束趋紧、生态系统退化等问题的关键路径，对实现农业绿色发展具有重要意义。精准农业是根据田间每一操作单元的具体条件，针对性地投入生产要素，在获取最高经济效益的同时，亦可达到保护生态环境的目的（李世成、秦来寿，2007）。农业生产的诸多环节都涉及精准农业技术，如测土配方施肥技术^①，滴灌、喷灌等节水灌溉技术，以土壤品质和作物生长监测为基础的水肥一体化技术（杨盛琴，2014）等。曾福生（2011）认为，以专业农户为基础、适度规模的精准农业将是中国农业经营的主导模式。农业农村部2018年发布的《农

*本文研究得到国家自然科学基金项目“农户异质性视角下耕地质量保护的信息干预机制与政策优化研究”（项目编号：71773053）、国家自然科学基金项目“基于实验经济的稻米镉污染农户治理行为及干预机制研究”（项目编号：71773052）、江苏省高校优势学科建设工程资助项目（PAPD）的资助。作者感谢南京农业大学经济管理学院徐志刚教授、孙项强教授对本文提出的宝贵意见和建议。本文通讯作者：应瑞瑶。

^①测土配方施肥技术是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，实现合理施肥（参见《测土配方施肥技术规范（2011年修订版）》，http://jiuban.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201109/t20110922_2293389.htm）。

业绿色发展技术导则（2018—2030年）》^①中，明确地把精准农业相关技术装备的研发与应用作为农业绿色发展的主要任务。

虽然精准农业技术已得到学界和政界的广泛认可，但是在现阶段，中国精准农业技术扩散速度仍然较慢。方向明、李娇媛（2018）指出，由于土地细碎化问题严重、农业高素质劳动力缺乏等，中国目前精准农业生产经营模式发展较慢，精准农业技术采用率较低。尽管国家从2005年开始大力推广测土配方施肥技术^②，截至2014年4月测土配方施肥技术推广面积也已达14亿亩次^③，但是在现实中，农户对测土配方施肥技术的采用率偏低，全国范围的技术采用率不足1/3（冯晓龙、霍学喜，2016）^④。因此，剖析精准农业技术扩散机制，分析精准农业技术扩散及采用效果的影响因素，对促进精准农业技术在农户层面的采用具有重要意义。

已有文献对技术扩散机制开展了较多研究，主要集中于：①回答技术扩散过程能够进行的原因。傅家骥（1998）认为，技术扩散机制由供求机制、计划机制、中介机制、激励机制和竞争机制组成，这5种机制共同作用，决定了技术扩散的模式。王武科等（2008）将农业技术扩散机制划分为政府驱动机制、市场诱导机制、政府和市场的耦合机制，认为精准农业技术扩散是政府和市场相互耦合的结果，在前期其扩散主要是由政府推动，当技术效益被示范之后逐步由市场发挥扩散作用。②回答技术扩散过程缓慢的原因。Rogers（2010）指出，技术扩散所处的客观环境以及扩散主体的异质性会使其产生时间上和效果上的差异。欧阳煌、李思（2016）认为，经营主体在生产要素网络节点中的初始位置会对技术扩散速度产生重要影响，所处节点的初始位置越低，技术扩散速度越慢。

尽管已有诸多研究关注了技术扩散机制，但鲜有文献关注政府的技术推广模式对精准农业技术扩散及采用效果的影响。精准农业技术扩散与政府的驱动密切相关。由于精准农业技术的实施成本高昂，在地方政府财政负担较重的情况下，精准农业技术的推广可能会出现以下两种情形：①采用非精准化推广，如在县域层面推广单一种类的配方肥。②采用精准化推广，但由于政策扶持力度有限，农户获得精准农业技术的成本较高。以测土配方施肥技术为例，随着配方肥种类的增加，企业的生产成本和农户获取配方肥的交易成本均会上升^⑤。政府的技术推广模式不同，对精准农业技术扩散及采用效果产生的影响可能会不同，然而，已有文献对此关注较少。

^①参见 http://www.moa.gov.cn/gk/ghjh_1/201807/t20180706_6153629.htm。

^②截至2016年，中央财政在测土配方施肥技术推广上已累计投入92亿元（参见《农业部关于科学指导农业化肥使用的建议》，http://www.sohu.com/a/164910503_569636）。

^③参见财政部：《中央财政支持测土配方施肥成效显著》，http://www.gov.cn/xinwen/2014-04/16/content_2660833.htm。

^④本文的研究团队2017年在湖南省、江西省和江苏省的调查显示，农户对测土配方施肥技术的采用率不足15%。

^⑤目前，通过政府公开招标采购的配方肥不能跨县销售，而大部分的复合肥企业受工艺、设备的限制，产品结构单一，配方肥种类增加使得企业的生产成本增加，生产意愿降低（参见《测土配肥，是不是赔本买卖？》，http://juban.moa.gov.cn/fwilm/jjps/200508/t20050816_439281.htm）。另外，目前配方肥的定点供销模式亦可作为农户获取配方肥交易成本较高的佐证。

那么，现实中，政府精准农业技术推广模式对技术扩散有何影响？与非精准化推广模式相比，精准化推广模式下农户的技术采用概率是否更低，技术扩散是否更慢？政府采用非精准化模式推广精准农业技术，是否会对技术的采用效果产生制约？为了回答以上问题，本文将基于农户调查数据、土壤肥力监测数据等，分析政府推广的配方肥种类单一与否对测土配方施肥技术扩散及采用效果的影响，以求为促进精准农业技术扩散提供决策依据。

二、精准农业技术推广的分析框架

（一）文献综述

纵观前人研究，许多学者已经关注精准农业技术扩散及其生态效益，并聚焦于以下两个方面：第一，分析农户采用精准农业技术的意愿及行为，并探究其关键诱因；第二，测度采用精准农业技术的生态效益。

关于农户采用精准农业技术的影响因素，许多学者开展了分析。首先，人力资本被认为是影响农户是否采用精准农业技术的重要因素。Larson et al. (2008) 的研究指出，棉花种植者的受教育程度对精准农业技术的采用能够产生积极影响。Aubert et al. (2012) 认为，农场主的个体特征，如受教育程度，是影响他们是否采用精准农业技术的重要因素。朱萌等 (2015) 也认为，若户主具有较高的受教育水平和种粮积极性，并对国家粮食补贴政策的满意程度较高，则该农户采用测土配方施肥技术的概率更大。其次，信息是影响农户是否采用精准农业技术的关键因素。如果棉花种植者认为农业推广服务机构和学校提供的信息对精准农业技术采用决策有所帮助，则他们采用该技术的概率更高 (Larson et al., 2008)。褚彩虹等 (2012) 的研究指出，农户对测土配方施肥技术的知晓度、是否收到过测土配方施肥技术施肥指导卡等，都是影响农户决定是否施用测土配方肥的关键因素。蔡颖萍、杜志雄 (2016) 也指出，农场主是否接受过培训会 影响他们是否采用测土配方施肥技术。再次，自然资源禀赋对农户是否采用精准农业技术会产生重要影响 (Robertson et al., 2012)。Kutter et al. (2011) 的研究指出，农场规模对农场主是否采用精准农业技术有重要影响。高瑛等 (2017) 认为，农户特征和耕地特征等是影响农户测土配方施肥技术采用决策的主要因素。最后，农户认知会影响他们是否采用精准农业技术。如张复宏等 (2017) 通过对苹果种植户的调查研究得出，除农户特征、果园特征外，果农对过量施肥的认知对其是否采用测土配方施肥技术有显著的影响。

关于采用精准农业技术的生态效益，现有研究也开展了诸多讨论。首先，采用精准农业技术可以减少土壤中农药的残留量，进而减轻农药淋溶进入地下水造成的危害 (Du et al., 2008)。其次，采用精准农业技术对化肥施用量和施肥结构会产生影响。有研究表明，采用测土配方施肥技术的农户会减少化肥的施用量 (郑鑫, 2010; 张卫红等, 2015)。从氮、磷、钾的用量看，采用测土配方施肥技术的农户会调整施肥结构，如减少氮肥和磷肥的施用量、增加钾肥的施用量 (葛继红, 2011; 韩洪云、杨增旭, 2011; 罗小娟, 2013)。Xu et al. (2017) 的研究也表明，与常规的管理方法相比，采取以肥料推荐系统和地理信息系统为工具的高效肥料管理措施后，玉米的氮肥和磷肥施用量分别降低了 31.6% 和 15.5%。最后，测土配方施肥技术的推广可以减少粮食作物种植产生的碳排放量 (邓

明君等, 2016)。

学界对精准农业技术扩散及其生态效益的分析, 为本文研究提供了借鉴。但是, 已有研究仍然存在不足之处。首先, 已有文献主要从人力资本、信息获取、自然资源禀赋、农户认知等方面分析农户采用精准农业技术的影响因素, 但除了以上因素外, 政府的推广模式可能也是影响精准农业技术采用的关键因素, 而在已有研究中没有受到足够的重视。其次, 已有文献虽然已对精准农业技术采用的生态效益开展了诸多讨论, 但主要是关注农药残留量、化肥施用量和施肥结构、碳排放几方面, 对土壤质量方面的讨论不足。

(二) 分析框架及理论假说

1. 精准农业技术的采用决策。普兰纳布·巴德汉、克利斯托弗·尤迪(2002)指出, 当农户在某块土地上所做的生产决策只取决于该地块的价格及其特点, 而与家庭的禀赋(如劳动力)和偏好(如对闲暇的偏好)无关时, 农户模型具有可分离性。此时, 农户首先以利润最大化为目标进行生产决策, 然后在预算约束下, 以效用最大化为目标进行消费决策。农户模型的可分离性简化了对生产决策的分析。为了简化讨论, 本研究基于农户模型的可分离性, 仅关注农户的生产决策行为, 并对模型做出以下几点简化: ①不考虑非农就业。②只关注粮食作物。③要素投入仅考虑劳动力和肥料投入。以上简化不影响本文分析政府的技术推广模式(是否为精准化推广)对精准农业技术采用决策的影响。基于以上考虑, 本文以水稻种植户施用配方肥为例, 设定农户施用配方肥的利润函数如下:

$$\pi_{\text{配}} = PQ_{\text{配}} - wL_{\text{配}} - r_{\text{配}}M_{\text{配}} \quad (1)$$

(1) 式中, $\pi_{\text{配}}$ 是农户施用配方肥的水稻种植利润, $Q_{\text{配}}$ 是施用配方肥生产的水稻产量, $L_{\text{配}}$ 是施用配方肥情况下水稻生产中投入的劳动力, $M_{\text{配}}$ 是配方肥的施用量, P 是稻谷价格, w 是劳动力价格, $r_{\text{配}}$ 是购买每单位配方肥的成本。 $Q_{\text{配}}$ 是 $L_{\text{配}}$ 和 $M_{\text{配}}$ 的函数, 即 $Q_{\text{配}} = f(L_{\text{配}}, M_{\text{配}})$ 。 $r_{\text{配}}$ 是配方肥种类的函数, 即 $r_{\text{配}} = g(N_{\text{配}})$ 。为了保证利润最大化有解, 生产函数 $Q_{\text{配}} = f(L_{\text{配}}, M_{\text{配}})$ 需满足以下 3 个条件:

$$f''_{L_{\text{配}}L_{\text{配}}} = \frac{d^2 f(L_{\text{配}}, M_{\text{配}})}{dL_{\text{配}}^2} < 0 \quad (2)$$

$$f''_{M_{\text{配}}M_{\text{配}}} = \frac{d^2 f(L_{\text{配}}, M_{\text{配}})}{dM_{\text{配}}^2} < 0 \quad (3)$$

$$\begin{vmatrix} f''_{M_{\text{配}}M_{\text{配}}} & f''_{M_{\text{配}}L_{\text{配}}} \\ f''_{L_{\text{配}}M_{\text{配}}} & f''_{L_{\text{配}}L_{\text{配}}} \end{vmatrix} = f''_{M_{\text{配}}M_{\text{配}}} * f''_{L_{\text{配}}L_{\text{配}}} - f''_{M_{\text{配}}L_{\text{配}}} * f''_{L_{\text{配}}M_{\text{配}}} > 0 \quad (4)$$

先来考虑政府的技术推广模式(是否为精准化推广)对农户采用测土配方施肥技术决策的影响。参照(1)式, 本文设置的农户施用传统化肥的利润函数为 $\pi = PQ - wL - rM$, 其中, π 是农户施用传统化肥的水稻种植利润, Q 是施用传统化肥生产的水稻产量, L 是施用传统化肥情况下

水稻生产中投入的劳动力， M 是传统化肥的施用量， r 是购买每单位传统化肥的成本。在政府推广单一类型配方肥的情况下，一方面，政府对测土配方施肥技术的宣传可能会提高农户对施用配方肥下水稻产量的预期（即 $Q_{\text{配}} > Q$ ），降低农户对肥料施用量的预期（ $M_{\text{配}} < M$ ）；另一方面，肥料生产企业大批量地生产单一类型的配方肥时，除了原料成本有所变动，生产系统的运转成本、包装袋成本与生产传统化肥相比均无显著改变，即配方肥与传统化肥的价格无显著差异（可认为 $r_{\text{配}} = r$ ），再加上政府对农户施用配方肥有补贴，使得农户对施用配方肥的预期利润较施用传统化肥可能会增加（即 $\pi_{\text{配}} > \pi$ ），从而增加了他们采用测土配方施肥技术的概率。在政府推广的配方肥种类多于 1 种的情况下，由于现有政策要求通过政府公开招标采购的配方肥不能跨区域销售，当企业生产的配方肥种类增加时，每种配方肥的生产数量相对就会减少，使得生产配方肥的包装袋成本、原料成本、生产系统的运转成本等均会增加，即生产成本较生产单一类型的配方肥会增加，从而会提高农户购买配方肥的成本（即 $r_{\text{配}}$ 增加）。由于政府的补贴力度有限，农户的预期利润较施用单一类型的配方肥可能会减少（即 $\pi_{\text{配}}$ 减少），从而降低他们采用测土配方技术的概率。

再来考虑政府的技术推广模式（是否为精准化推广）对农户配方肥施用量的影响。将（1）式中的 $\pi_{\text{配}}$ 分别对 $L_{\text{配}}$ 和 $M_{\text{配}}$ 求导，并令一阶导数为零，可得：

$$\begin{cases} \frac{\partial \pi_{\text{配}}}{\partial M_{\text{配}}} == Pf'_{M_{\text{配}}} - r_{\text{配}} = 0 \\ \frac{\partial \pi_{\text{配}}}{\partial L_{\text{配}}} == Pf'_{L_{\text{配}}} - w = 0 \end{cases} \quad (5)$$

即

$$\begin{cases} Pf'_{M_{\text{配}}} = r_{\text{配}} \\ Pf'_{L_{\text{配}}} = w \end{cases} \quad (6)$$

再求（6）式对 $L_{\text{配}}$ 、 $M_{\text{配}}$ 、 P 、 $r_{\text{配}}$ 、 w 的全微分，可得：

$$\begin{cases} f'_{M_{\text{配}}} dP + Pf''_{M_{\text{配}}M_{\text{配}}} dM_{\text{配}} + Pf''_{M_{\text{配}}L_{\text{配}}} dL_{\text{配}} = dr_{\text{配}} \\ f'_{L_{\text{配}}} dP + Pf''_{L_{\text{配}}L_{\text{配}}} dL_{\text{配}} + Pf''_{L_{\text{配}}M_{\text{配}}} dM_{\text{配}} = dw \end{cases} \quad (7)$$

用矩阵形式表示，则有：

$$\begin{bmatrix} Pf''_{M_{\text{配}}M_{\text{配}}} & Pf''_{M_{\text{配}}L_{\text{配}}} \\ Pf''_{L_{\text{配}}M_{\text{配}}} & Pf''_{L_{\text{配}}L_{\text{配}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dM_{\text{配}} \\ dL_{\text{配}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dr_{\text{配}} - f'_{M_{\text{配}}} dP \\ dw - f'_{L_{\text{配}}} dP \end{bmatrix} \quad (8)$$

利用克莱姆法则求解，可得：

$$dM_{\text{配}} = \frac{(dr_{\text{配}} - f'_{M_{\text{配}}} dP) * (Pf''_{L_{\text{配}}L_{\text{配}}}) - (Pf''_{M_{\text{配}}L_{\text{配}}}) * (dw - f'_{L_{\text{配}}} dP)}{P^2 D} \quad (9)$$

(9) 式中, $D = f_{M_{配}M_{配}}'' * f_{L_{配}L_{配}}'' - f_{M_{配}L_{配}}'' * f_{L_{配}M_{配}}''$ 。如果仅关注可变成本 $r_{配}$ 对配方肥施用量 $M_{配}$ 的影响, 并假定劳动力价格 w 和稻谷价格 P 不变, 即 $dP = dw = 0$, 可得:

$$dM_{配} = \frac{dr_{配} * (f_{L_{配}L_{配}}'')}{PD} \quad (10)$$

由于 $D > 0$, 且 $f_{L_{配}L_{配}}'' < 0$, 所以 $\frac{dM_{配}}{dr_{配}} = \frac{f_{L_{配}L_{配}}''}{PD} < 0$, 即购买配方肥的成本越高, 农户施用的配方肥数量越少。如前文所述, 当企业生产的配方肥种类增加时, 生产成本会上升。可见, 随着政府推广的配方肥种类的增加, 农户购买配方肥的成本 $r_{配}$ 上升, 从而降低了他们采用测土配方施肥技术的程度。基于以上分析, 本文提出如下假说:

假说 1: 与未推广测土配方施肥技术相比, 当政府推广单一一种类的配方肥时, 农户采用测土配方施肥技术的概率增加; 但当政府推广多种配方肥时, 与推广单一一种类的配方肥相比, 农户采用测土配方施肥技术的概率下降, 且采用程度降低。

2. 采用精准农业技术对土壤肥力的影响。精准农业以田间作物生长条件的空间差异性为依据, 采用针对性的生产方式, 以期获得较高的收益。因此, 采用精准农业技术虽能带来较高的效益, 但需要因地制宜。若对精准农业技术采用非精准化推广, 则与传统农业相比, 精准农业的优势就难以体现。以测土配方施肥技术为例, 该技术虽然能够改善土壤肥力, 但前提是要根据土壤和作物情况有针对性地设置施肥方案。在现阶段, 农户普遍施用复合肥作为主要的施肥技术。复合肥一般含有氮、磷、钾 3 种养分, 但出于成本考虑, 企业生产的复合肥中 3 种养分的含量通常相同, 如江苏省普遍采用的是氮磷钾复合肥料 15-15-15。若在某一行政区域只推广单一一种类的配方肥, 即使 3 种养分的含量各不相同, 也不能真正实现针对性施肥的初衷。因此, 与未采用测土配方施肥技术相比, 采用非精准化推广的测土配方施肥技术可能并不能显著地改善土壤肥力。基于以上分析, 本文提出如下假说:

假说 2: 与施用传统化肥相比, 若政府推广的配方肥种类单一, 施用配方肥对土壤肥力没有显著影响; 但当政府推广的配方肥种类多于 1 种时, 施用配方肥对土壤肥力会产生显著的积极影响。

三、数据来源

(一) 农户调查数据

本文使用的农户数据来自于 2017 年 11~12 月课题组在 3 个水稻主产省 (湖南省、江西省、江苏省) 开展的实地调查。选择这 3 个省的原因是: ①它们都是水稻产量排在全国前十名的水稻主产省; ②3 个省代表不同的经济发展水平, 农户的行为可能会存在差异; ③3 个省都在推广测土配方施肥技术。实地调查中, 课题组首先根据经济发展状况和水稻产量状况, 采用分层随机抽样方法在每个省选取 3 个水稻种植县; 然后在每个水稻种植县采用同样的抽样方法选取 4 个水稻主产村, 共计选取了 36 个样本村; 最后在每个样本村随机抽取 15~25 个农户, 共计选取了 733 个样本农户。

调查采用一对一的访谈形式。农户调查问卷主要涵盖家庭劳动力结构、家庭收入状况、土地利用状况、作物结构、耕地质量保护行为、分地块的农业生产情况、风险偏好等内容。在剔除信息不完整以及前后回答不一致的无效问卷后，调查共获取有效农户问卷 722 份，问卷有效率为 98.5%。

（二）土壤肥力监测数据

本文分析使用的 2011~2017 年江苏省土壤肥力监测数据^①来自于江苏省耕地质量与农业环境保护站。江苏省现已建立了覆盖全省、代表不同土壤类型和种植制度的基本农田质量监测网络，共建立了 300 个基本农田质量监测点，其中种植水稻的监测点有 196 个。为了保证监测数据的代表性和连续性，《江苏省耕地质量监测管理办法》要求，监测点主要设在基本农田保护区内，尽量远离城镇、村庄、公路，并确保长期不被占用^②；监测点地块选定后在其中心点要用 GPS 定位，并由专门人员管理。主要监测的内容包括监测点地块的耕作制度、作物产量、施肥量、土壤环境质量等。每年度最后一季作物收获后，耕地质量与农业环境保护站的相关工作人员都会在监测地块上采集土壤样品，以供检测化验。

（三）其他数据

政府对测土配方施肥技术的推广模式数据来源于两方面资料：①当利用横截面农户调查数据分析其对农户采用测土配方施肥技术决策的影响时，所用的技术推广模式数据根据所在县耕地质量与农业环境保护站（或土壤肥料工作站、农业技术推广服务中心）提供的相关资料整理而成。②当利用历史数据分析采用测土配方施肥技术对土壤肥力的影响时，所用的技术推广模式数据是根据江苏省 2011~2017 年省市县各级政府采购网站发布的配方肥招标公告中的数据整理而成^③。2011~2017 年的县级气候数据来源于天气网站^④。

四、计量模型设定与变量选取

（一）农户采用测土配方施肥技术的决策模型

1. 计量模型设定。本文参照 García（2013）的做法，采用双栏模型（double-hurdle model）分析政府的技术推广模式对农户是否施用配方肥以及施用量的影响，模型的表达式为：

^①之所以本文分析只使用了江苏省的土壤肥力监测数据，是因为土壤肥力监测数据是各省耕地质量与农业环境保护站的内部资料，课题组只获得了江苏省土壤肥力监测数据的使用权限，而并未获得江西省和湖南省土壤肥力监测数据的使用权限。

^②参见 <https://baike.baidu.com/item/%E6%B1%9F%E8%8B%8F%E7%9C%81%E8%80%95%E5%9C%B0%E8%B4%A8%E9%87%8F%E7%9B%91%E6%B5%8B%E7%AE%A1%E7%90%86%E5%8A%9E%E6%B3%95/9589196#1>。

^③如江苏省政府采购网的网址为：<http://www.ccgp-jiangsu.gov.cn/>。

^④网址为：http://tianqi.2345.com/wea_history/70442.htm。

$$Degree_i = \begin{cases} x_i\beta + \varepsilon_i & \text{if } \min(x_i\beta + \varepsilon_i, z_i\gamma + \mu_i) > 0 \\ 0 & \text{if } \min(x_i\beta + \varepsilon_i, z_i\gamma + \mu_i) \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_i \\ \mu_i \end{pmatrix} \sim N(0, \Sigma), \Sigma = \begin{pmatrix} 1 & \sigma_{12} \\ \sigma_{12} & 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

(11) 式中, i 代表第 i 个农户, $Degree_i$ 表示配方肥的施用量, $x_i\beta + \varepsilon_i$ 模拟的是技术采用程度方程, 其中 x_i 为影响农户配方肥施用量的变量, 包括政府推广的配方肥种类、户主特征、农户特征等变量, β 为相应的待估计系数, ε_i 是随机扰动项。 $z_i\gamma + \mu_i$ 模拟的是参与方程 (即是否采用测土配方施肥技术方程), z_i 为影响农户是否施用配方肥的变量, 包括政府推广的配方肥种类、户主特征、农户特征等变量, γ 为相应的待估计系数, μ_i 是随机扰动项。在双栏模型中需要假设 $Var(\mu_i)=1$, 否则模型无法识别 (García, 2013)。

2. 变量选取。参照已有相关研究 (例如褚彩虹等, 2012; 蔡颖萍、杜志雄, 2016; 高瑛等, 2017; 冯晓龙等, 2018), 本文选取了影响农户是否采用测土配方施肥技术以及采用程度的变量。变量的含义及其描述性统计见表 1。

表 1 农户采用测土配方施肥技术决策模型中变量的含义及其描述性统计

变量名称	变量定义和赋值	均值	标准差
测土配方施肥技术的采用			
是否采用技术	农户是否采用测土配方施肥技术? 是=1, 否=0	0.12	0.14
采用程度	水稻的配方肥施用面积占总种植面积的比例 (%)	18.98	25.23
政府推广的配方肥种类 ^a			
推广的配方肥种类为 0	农户所在县是否没有推广配方肥? 是=1, 否=0	0.11	0.21
推广的配方肥种类多于 1 种	农户所在县推广的配方肥种类是否多于 1 种? 是=1, 否=0	0.34	0.47
户主特征			
年龄	户主 2017 年的年龄 (岁)	57.26	10.32
性别	户主性别: 男=1, 女=0	0.95	0.22
受教育程度	户主的受教育程度: 1=文盲, 2=小学, 3=初中, 4=高中、中专、技校、职高, 5=大专, 6=大学本科, 7=硕士, 8=博士	2.66	0.98
农户特征			
家庭规模	家庭总人口 (人)	4.98	2.19
家庭人均年收入	2017 年家庭人均年收入 (元)	16660	9508
非农收入	2017 年家庭非农收入占总收入的比例 (%)	57.09	31.36
老人占比	60 岁及以上老人占家庭总人口的比例 (%)	25.60	29.29
儿童占比	18 岁以下人口占家庭总人口的比例 (%)	18.66	16.86
农地规模	2017 年家庭人均经营的耕地面积 (亩)	14.68	42.59
示范户	是否是科技示范户? 是=1, 否=0	0.05	0.21

加入合作社	是否加入了农民专业合作社？是=1，否=0	0.14	0.35
技术培训	家里是否有人接受过测土配方施肥技术培训？是=1，否=0	0.12	0.33
自有耕地占比	2017年自有耕地面积占家庭经营总耕地面积的比例（%）	65.48	0.46
土地产权	农户是否已经领到《农村土地承包经营权证》？是=1，否=0	0.58	0.49
土壤肥力	农户对最大地块土壤肥力的评价：1=差，2=中，3=良，4=优	2.74	1.19
省虚变量（参照组：江西省）			
江苏省	是否属于江苏省：是=1，否=0	0.33	0.47
湖南省	是否属于湖南省：是=1，否=0	0.33	0.47

注：观测值个数为 722。^a 参照组是“推广的配方肥种类为 1 种”。

（二）采用测土配方施肥技术对土壤肥力的影响模型

1. 计量模型设定。由于土壤肥力会受到前期土壤肥力的滞后影响，故本文建立动态面板模型来分析测土配方施肥技术的采用对土壤肥力的影响，模型的表达式如下：

$$Y_{ijt} = \alpha_{ij} + \beta_{1j} dummy_1 + \beta_{2j} dummy_2 + \phi_j Behavior_{it} + \gamma S_{it} + \delta Y_{ij,t-a} + \varepsilon_{ijt} \quad (13)$$

(13)式中，下标 i 代表监测点地块， j 代表土壤肥力指标， t 代表时期； Y 是土壤肥力； $dummy_1$ 是虚拟变量，当监测点地块所属县没有推广配方肥时，取值为 1，否则取值为 0； $dummy_2$ 也是虚拟变量，当监测点地块所属县推广的配方肥种类多于 1 种时，取值为 1，否则取值为 0； $Behavior_{it}$ 代表 t 时期负责监测点地块 i 耕种的人员在该地块上的肥料施用量； S_{it} 代表随时间变化、影响土壤肥力的其他因素； $Y_{ij,t-a}$ 是 t 时期监测点地块 i 土壤肥力指标 j 的 $1 \sim a$ 阶滞后项； ε_{ijt} 为扰动项。

对于动态面板模型，可采用广义矩估计（GMM）解决其内生性问题。系统 GMM 在差分 GMM 基础上进一步采用差分变量的滞后项作为水平值的工具变量，使估计结果更加稳健，并且可以报告不随时间变化的变量的系数（陈强，2014），因此，本文采用系统 GMM 估计（13）式。

2. 变量选取。借鉴已有相关研究（如李娟等，2008；温延臣等，2015），结合课题组收集的资料（如《江苏省 2015 年耕地质量监测报告》^①和《测土配方施肥技术规范（2011 年修订版）》），本文选取了土壤肥力变量，以及影响土壤肥力变化的变量。变量的含义及其描述性统计见表 2。

此外，有以下两点需要说明：①参考《测土配方施肥技术规范（2011 年修订版）》中的表 13，本文选取了耕地地力评价中必选的以下 6 项指标来衡量土壤肥力：全氮含量、有效磷含量、速效钾含量、缓效钾含量、有机质含量、pH 值。②由于土壤肥力会受到前期土壤肥力的滞后影响，在模型设计时需要首先判断滞后项阶数。Wintoki et al.（2012）通过以下方法识别动态面板模型中应纳入的滞后项阶数：首先，同时纳入因变量的 $1 \sim 4$ 阶滞后项和其他控制变量；然后，利用最小二乘法（OLS）对面板数据进行回归；最后，通过观察滞后项的显著性判断动态面板模型中应纳入的滞后项阶数。如 Wintoki et al.（2012）的研究发现，在模型的最小二乘法回归结果中，滞后项中只有滞后 1 阶和滞后 2 阶是显著的，故其在动态面板模型中仅纳入了两阶滞后项。参照上述方法，本文获得了应纳

^①江苏省耕地质量与农业环境保护站提供。

入模型的各个土壤肥力指标的滞后项阶数^①。

表2 测土配方施肥技术采用对土壤肥力影响模型中变量的含义及其描述性统计

变量名称	变量定义和赋值	均值	标准差
监测点地块土壤肥力			
全氮	土壤全氮含量（克/千克）	1.44	0.76
有效磷	土壤有效磷含量（毫克/千克）	24.58	29.09
速效钾	土壤速效钾含量（毫克/千克）	127.63	76.33
缓效钾	土壤缓效钾含量（毫克/千克）	593.50	254.82
有机质	土壤有机质含量（克/千克）	23.91	7.68
PH 值	土壤酸碱度	7.06	0.99
政府推广的配方肥种类 ^a			
推广的配方肥种类为 0	监测点地块所属县是否没有推广配方肥？是=1，否=0	0.52	0.14
推广的配方肥种类多于 1 种	监测点地块所属县推广的配方肥种类是否多于 1 种？是=1，否=0	0.15	0.21
肥料施用量（按折纯量计算） ^b			
氮肥施用量	氮肥（N）的年施用量（千克/亩）	35.56	14.13
磷肥施用量	磷肥（P ₂ O ₅ ）的年施用量（千克/亩）	9.04	5.01
钾肥施用量	钾肥（K ₂ O）的年施用量（千克/亩）	9.36	5.63
有机肥施用量	有机肥施用量（千克/亩）	4.32	2.06
气候			
高温	对应年份的最高气温（℃）	36.98	1.48
低温	对应年份的最低气温（℃）	-6.67	2.64
土壤类型（参照组：红壤）			
棕壤	土壤是否为棕壤；是=1，否=0	0.06	0.24
褐土	土壤是否为褐土；是=1，否=0	0.02	0.14
黑土	土壤是否为黑土；是=1，否=0	0.04	0.20
水稻土	土壤是否为水稻土；是=1，否=0	0.42	0.49
潮土	土壤是否为潮土；是=1，否=0	0.37	0.48
盐土	土壤是否为盐土；是=1，否=0	0.08	0.03
区域虚变量（参照组：苏中）			
苏南	是否属于苏南；是=1，否=0	0.25	0.44
苏北	是否属于苏北；是=1，否=0	0.49	0.49

注：当期指标的观测值为 1372 个（196×7），滞后 a 期的土壤肥力指标的观测值为 $196 \times (7 - a)$ 个，以滞后 3 期的土壤有效磷含量（有效磷₃）为例，该指标的观测值为 784 个（ $196 \times (7 - 3)$ ）。^a 参照组是“推广的配方肥种类为 1 种”。^b 若负责监测点地块耕种的人员施用的肥料不是单一肥料（仅具有 1 种养分标明量的氮肥、磷肥或钾肥），则根据 N、P₂O₅、K₂O 的百分含量分别计算氮肥（N）、磷肥（P₂O₅）、钾肥（K₂O）的施用量。

^①全氮、有效磷、速效钾、缓效钾、有机质、pH 值的滞后项阶数分别为：1 阶、3 阶、1 阶、2 阶、3 阶、2 阶。

五、实证结果分析

（一）农户采用测土配方施肥技术决策模型的回归结果

表3汇报了利用极大似然估计法估计(11)式得到的结果。从关键自变量的估计结果看,“推广的配方肥种类为0”对农户是否采用测土配方施肥技术有显著的负向影响,“推广的配方肥种类多于1种”对农户是否采用测土配方施肥技术及采用程度均有显著的负向影响。这表明,与没有推广配方肥相比,当政府推广单一种类的配方肥时,农户采用测土配方施肥技术的概率会上升;但当政府推广的配方肥种类多于1种时,与只推广单一种类的配方肥相比,农户采用测土配方施肥技术的概率和采用程度均降低,假说1得到验证。

政府推广多种配方肥时农户的技术采用率之所以下降,可能是因为随着配方肥种类的增加,企业的供给意愿和农户的购买意愿均下降了。笔者通过对江苏省某大型化肥企业负责人的访谈了解到:通过政府公开招标采购的配方肥只能在一定行政区域范围内销售,当配方肥种类增加时,企业的包装袋成本、原料成本、生产系统运转成本均会增加。以生产系统运转成本为例,企业生产线每班次的生产量为500~600吨,小批量生产多种配方肥时,不仅投料难以把控,换线、清线等也更加繁琐。因此,小批量生产多种配方肥时,企业的生产成本较高。再考虑到农户受农产品和肥料主流价格的影响,当化肥价格高出一定水平时,他们的购买意愿会降低^①,使得企业可获的利润减少,导致企业的供给意愿下降。

从控制变量的估计结果看,“技术培训”“示范户”“农地规模”对农户采用测土配方施肥技术的决策可能有显著的影响。“技术培训”变量对农户是否采用测土配方施肥技术有显著的正向影响,即家里有人接受过测土配方施肥技术培训的农户采用该技术的概率更高,这与蔡颖萍、杜志雄(2016)研究结论相符。这可能是因为家里有人接受过技术培训的农户获取信息的渠道更多,获得技术相关的信息更加充分,所以采用技术的概率更高(Rogers, 2010)。然而,变量的描述性统计结果显示,目前参加过测土配方施肥技术培训的农户比例较低,还不到总样本的15%,这说明,虽然测土配方施肥技术培训对农户采用该技术有显著的正向影响,但培训力度还不够。回归1和回归2的估计结果表明,“示范户”变量对农户是否采用测土配方施肥技术以及采用程度均有显著的正向影响。但考虑到“示范户”变量可能存在内生性问题,本文的估计结果可能高估了“示范户”对农户采用测土配方施肥技术决策的影响,该变量对农户采用测土配方施肥技术决策的影响有待进一步分析。“农地规模”变量对农户采用测土配方施肥技术的程度有显著的正向影响,表明人均经营的耕地面积越大,农户采用测土配方施肥技术的程度越高。可能的原因是,技术采用存在规模经济效应。最后,表3中的回归结果显示,省虚变量是显著的,表明农户对测土配方施肥技术的采用概率及其程度存在显著的地区差异。需要说明的是,户主年龄的影响在本文的研究结果中并不显著。

^①以化肥为例,市场上以总养分 $\geq 45\%$ (即氮磷钾复合肥料15-15-15)的肥料为主,市场价格为2300~2600元/吨,在当前情况下,当化肥价格超过3800元/吨时,农户的接受程度较低。

以往研究关于年龄对精准农业技术采用决策的影响尚无定论，有的学者认为年龄稍小的农场主采用精准农业技术的概率更高 (Kutter et al., 2011)，但也有学者认为两者之间的关系并不显著 (Robertson et al., 2012)。

表 3 农户采用测土配方施肥技术决策模型的回归结果

变量名称	回归 1	回归 2
	是否采用技术	采用程度
政府推广的配方肥种类		
推广的配方肥种类为 0	-0.522* (0.285)	4.709 (12.423)
推广的配方肥种类多于 1 种	-2.694*** (0.314)	-11.157** (5.436)
户主特征		
年龄	-0.153 (0.384)	5.893 (8.743)
性别	-0.025 (0.097)	-1.996 (2.603)
受教育程度	0.008 (0.010)	-0.039 (0.172)
农户特征		
家庭规模	0.008 (0.048)	-0.914 (1.274)
家庭人均年收入	2.80e-6 (2.72e-6)	3.42e-5 (8.03e-5)
非农收入	-3.06e-4 (0.001)	2.63e-4 (0.006)
老人占比	0.002 (0.004)	-0.122 (0.074)
儿童占比	-0.005 (0.006)	-0.127 (0.167)
农地规模	4.82e-4 (6.89e-4)	0.084** (0.032)
示范户	0.307** (0.120)	15.233*** (5.693)
加入合作社	-0.123 (0.237)	-2.039 (4.929)
技术培训	0.907*** (0.239)	-1.105 (4.864)
自有耕地占比	0.291	0.104

	(0.204)	(0.078)
土地产权	0.007	-0.608
	(0.193)	(4.449)
土壤肥力	0.027	-2.601
	(0.079)	(2.170)
省虚变量 (参照组: 江西省)		
江苏省	3.568***	20.767**
	(0.356)	(9.627)
湖南省	1.166***	26.654**
	(0.290)	(11.282)
常数项	-2.336***	108.894***
	(0.787)	(17.380)
观测值	722	722
对数似然值		-627.258
Wald 卡方值		42.56***

注: ①***、**、*分别代表在 1%、5%、10%的统计水平上显著。②括号中数字是回归标准误。

为了检验回归结果的稳健性, 笔者改变关键解释变量的设置来衡量政府是否精准化推广测土配方施肥技术, 并重新估计模型。具体而言, 笔者仅设置 1 个虚拟变量, 即“推广的配方肥种类多于 1 种”, 来衡量政府是否精准化推广测土配方施肥技术。当推广的配方肥种类多于 1 种时, 该变量取值为 1, 否则取值为 0。表 4 报告了农户采用测土配方施肥技术决策模型的稳健性检验结果。回归 3 和回归 4 的结果表明, 与没有推广配方肥或仅推广单一种类的配方肥相比, 政府推广多种配方肥会使农户采用测土配方施肥技术的概率及采用程度均降低, 可见, 回归结果具有稳健性。

表 4 农户采用测土配方施肥技术决策模型的稳健性检验结果

变量名称	回归 3	回归 4
	是否采用技术	采用程度
政府推广的配方肥种类		
推广的配方肥种类多于 1 种	-2.911***	-10.623**
	(0.349)	(5.117)
其他变量	已控制	已控制
常数项	-2.685***	107.237***
	(0.822)	(21.223)
观测值	722	722
对数似然值		-638.281
Wald 卡方值		28.99***

注: ①***、**、*分别代表在 1%、5%、10%的统计水平上显著。②括号中数字是回归标准误。

(二) 采用测土配方施肥技术对土壤肥力影响模型的回归结果

表 5 是采用系统 GMM 估计 (13) 式得到的结果。系统 GMM 扰动项的自相关性检验结果表明,

可以接受“扰动项无二阶自相关”的原假设，即可以采用系统 GMM 进行估计。表 5 中所有回归的 Sargan 检验的 p 值均大于 0.1，表明可以接受“所有工具变量均有效”的原假设。

从回归 5~回归 10 的估计结果看，“推广的配方肥种类为 0”变量均不显著，表明与施用传统化肥相比，若政府推广的配方肥种类单一，则施用配方肥并不能显著改善土壤肥力^①。从“推广的配方肥种类多于 1 种”变量的估计结果看，该变量对土壤速效钾含量会产生显著的正向影响，而对土壤全氮含量和有机质含量会产生显著的负向影响。鉴于江苏省测土配方施肥技术的配肥原则是“降氮控磷增钾”（罗小娟，2013），回归结果反映出的采用测土配方施肥技术对土壤全氮和速效钾含量的影响与江苏省测土配方施肥技术的配肥原则相符，假说 2 得到验证。采用测土配方施肥技术会造成土壤有机质含量减少的原因可能是，土壤有机质含量与全氮含量存在一定的相关性^②。当政府推广的配方肥种类多于 1 种时，施用配方肥将造成土壤全氮含量降低，同时土壤有机质含量也呈现下降趋势。

表 5 中的结果还显示，除有效磷指标和 PH 值指标外，滞后 1 期的土壤肥力指标对当期的土壤肥力指标均有显著的正向影响。肥料施用量对相应的土壤肥力指标有显著的正向影响。具体而言，回归 6 中的“磷肥施用量”变量、回归 7 中的“钾肥施用量”变量及回归 9 中的“有机肥施用量”变量均在统计上显著，且系数符号为正，表明随着磷肥施用量、钾肥施用量及有机肥施用量的增加，相应地土壤有效磷、速效钾、有机质含量也会增加。有机肥施用量对土壤全氮含量有显著的正向影响，这可能是由于土壤全氮含量和有机质含量之间具有相关性。温度亦会对土壤肥力产生显著影响。例如，最高温度越高，土壤中的全氮含量越少，这可能是由于温度越高，氨氮挥发越快，使得土壤中的全氮含量越低。李苗等（2017）的研究也表明，极端高温会显著降低土壤中的氮养分含量。

表 5 采用测土配方施肥技术对土壤肥力影响的回归结果

变量名称	回归 5	回归 6	回归 7	回归 8	回归 9	回归 10
	全氮	有效磷	速效钾	缓效钾	有机质	PH 值
政府推广的配方肥种类						
推广的配方肥种类为 0	0.043 (0.033)	0.228 (2.050)	-12.961 (11.232)	-5.736 (4.570)	0.851 (0.541)	-0.001 (0.041)
推广的配方肥种类多于 1 种	-0.340*** (0.088)	-3.965 (2.688)	40.303* (21.672)	0.429 (12.834)	-2.343** (1.044)	0.112 (0.074)
滞后期的土壤肥力						
全氮 _{t-1}	0.078*** (0.017)					

^①之所以解释为施用配方肥对土壤肥力的影响，主要是因为：江苏省耕地质量监测点是由农业技术推广人员负责，他们既负责耕种监测点地块，也负责农业技术推广工作。当地政府推广测土配方施肥技术时，监测点的管理人员就在监测点地块上采用相应的测土配方施肥技术。

^②参见《江苏省 2015 年耕地质量监测报告》（江苏省耕地质量与农业环境保护站提供）。

有效磷 ₁		0.199				
		(0.141)				
有效磷 ₂		-0.042				
		(0.077)				
有效磷 ₃		-0.098*				
		(0.055)				
速效钾 ₁			0.306***			
			(0.069)			
缓效钾 ₁				0.279***		
				(0.102)		
缓效钾 ₂				-0.016		
				(0.058)		
有机质 ₁					0.161*	
					(0.090)	
有机质 ₂					-0.006	
					(0.057)	
有机质 ₃					-0.086*	
					(0.048)	
PH 值 ₁						0.029
						(0.025)
PH 值 ₂						-0.084***
						(0.032)
肥料施用量 (按折纯量计算)						
氮肥施用量	-0.001	0.096	0.004	-0.154	-0.020	-0.001
	(0.001)	(0.075)	(0.489)	(0.150)	(0.025)	(0.002)
磷肥施用量	-0.402	0.013***	11.439**	-0.358	0.065	0.001
	(0.422)	(0.004)	(5.280)	(1.204)	(0.080)	(0.005)
钾肥施用量	-0.001	0.006	17.525***	-0.461	0.062	0.008
	(0.003)	(0.347)	(5.790)	(1.113)	(0.083)	(0.005)
有机肥施用量	0.016***	0.003	1.410	0.605**	0.010**	2.91e-4
	(0.004)	(0.036)	(1.187)	(0.280)	(0.005)	(0.001)
气候						
高温	-8.841*	1.019	-0.003	-2.755**	0.809***	-2.18e-4
	(4.889)	(0.641)	(0.007)	(1.356)	(0.143)	(0.008)
低温	-0.003	0.380	3.929**	-2.081***	0.039	0.001
	(0.004)	(0.274)	(1.785)	(0.763)	(0.068)	(0.005)
土壤类型 (参照组: 红壤)						
棕壤	7.143	375.842	115.446	-317.633	-16.113	3.962

	(8.835)	(638.716)	(341.704)	(1496.183)	(54.980)	(11.602)
褐土	-5.284	201.772	524.105	55.850	66.745	1.826
	(8.258)	(396.315)	(1339.398)	(525.492)	(346.232)	(0.834)
黑土	-9.322	-267.712	-206.285	3893.233	33.661	-3.057
	(14.993)	(214.303)	(463.592)	(3592.398)	(41.861)	(7.533)
水稻土	0.065	388.592	-205.290**	981.787	26.030	9.282
	(7.388)	(470.067)	(97.600)	(1352.536)	(19.701)	(7.659)
潮土	1.503	514.288	-598.415	689.519	-19.016	9.191
	(5.542)	(521.662)	(910.316)	(1358.601)	(36.372)	(6.879)
盐土	-3.972	165.653	1173.838	-152.030	-78.593	12.769
	(7.302)	(974.380)	(1343.096)	(877.557)	(77.216)	(11.248)
区域虚变量 (参照组: 苏中)						
苏南	1.723	125.660	-152.162	443.768	-32.406	2.032
	(0.752)	(118.588)	(490.103)	(332.093)	(60.668)	(7.805)
苏北	-4.578	-38.097	36.734	515.242	-22.706	1.482
	(6.754)	(61.102)	(98.008)	(399.742)	(27.340)	(5.141)
常数项	1.120	-399.017	895.194***	-596.299	-12.976	-1.162
	(6.404)	(483.541)	(201.889)	(1222.733)	(18.736)	(7.437)
观测值	1176	784	1176	980	784	980
Wald 卡方值	84.35***	50.18***	83.49***	55.96***	69.83***	60.57***
系统 GMM 扰动项的自相关性						
AR (1)	0.0234	0.0003	0.0000	0.0006	0.0000	0.0000
AR (2)	0.6119	0.3414	0.4342	0.5383	0.1570	0.5381
Sargan 检验	0.1101	0.3580	0.1002	0.1182	0.1117	0.1143

注: ①***、**、*分别代表在 1%、5%、10%的统计水平上显著。②括号中数字是回归标准误。③系统 GMM 扰动项的自相关性和 Sargan 检验报告的是 p 值。

表 6 报告的是采用测土配方施肥技术对土壤肥力影响的稳健性检验结果。回归 11~回归 16 的结果表明, 与没有推广配方肥或仅推广单一一种类的配方肥相比, 政府推广的配方肥种类多于 1 种时, 施用配方肥将会显著改善土壤肥力。例如, 施用配方肥将会降低土壤中的全氮含量, 增加速效钾含量。这些结果与表 5 的回归结果一致, 表明回归结果具有稳健性。

表 6 采用测土配方施肥技术对土壤肥力影响的稳健性检验结果

变量名称	回归 11	回归 12	回归 13	回归 14	回归 15	回归 16
	全氮	有效磷	速效钾	缓效钾	有机质	PH 值
政府推广的配方肥种类						
推广的配方肥种类多于 1 种	-0.371**	-4.114*	36.745*	3.016	-2.844***	0.113
	(0.084)	(2.260)	(21.753)	(13.118)	(1.036)	(0.070)

其他变量	已控制	已控制	已控制	已控制	已控制	已控制
常数项	1.564 (6.357)	-390.654 (482.917)	833.127 (198.704)	-765.329 (1278.260)	-8.637 (18.674)	-1.165 (7.436)
观测值	1176	784	1176	980	784	980
Wald卡方值	84.96***	50.25***	80.10***	55.27***	68.61**	60.40***
系统 GMM 扰动项的自相关性						
AR (1)	0.0234	0.0032	0.0000	0.0007	0.0000	0.0000
AR (2)	0.6185	0.2661	0.4822	0.4976	0.1417	0.5367
Sargan 检验	0.1129	0.3280	0.1189	0.1035	0.1087	0.1150

注：①***、**、*分别代表在 1%、5%、10%的统计水平上显著。②括号中数字是回归标准误。③系统 GMM 扰动项的自相关性和 Sargan 检验报告的是 p 值。

六、结论与讨论

本文利用 2017 年 3 省 9 县 722 个农户的实地调查数据和江苏省 2011~2017 年的土壤肥力监测数据，基于双栏模型和动态面板模型，分析了政府推广的配方肥种类单一与否对测土配方施肥技术扩散及采用效果的差异化影响，并验证了本文的研究假说。研究表明：在不同的推广模式下，农户采用测土配方施肥技术的概率及程度不同，技术扩散存在差异。与推广单一种类的配方肥相比，政府推广多种配方肥对农户的技术采用概率和采用程度有显著的负向影响。与施用传统化肥相比，如果政府推广的配方肥种类单一，施用配方肥并不能显著改善土壤肥力，但当政府推广的配方肥种类多于 1 种时，施用配方肥可以平衡土壤养分，改善土壤质量。就江苏省而言，推广多种配方肥可以显著提高土壤速效钾含量、降低土壤全氮含量。

本文的研究结果解释了政府不同的技术推广模式对精准农业技术扩散及采用效果的差异化影响，为分析制约测土配方施肥技术相关政策实施效果的因素提供了新的分析框架，为促进测土配方施肥技术扩散提供了决策依据。根据上述研究结论，可以得到以下 3 点政策启示：

第一，农业部门应根据作物生长环境差异化信息，因地制宜地推广精准农业技术^①。忽略精准农业技术的精准化属性，采取均一化的田间作业方式，将不能获得精准农业技术带来的生态效益。以测土配方施肥技术为例，农业部门应根据作物需肥特点、土壤养分状况、气候特征等因素，提供适宜的配方肥种类，推广精准施肥技术。

第二，政府应加大对从事精准农业技术研发及相关产品生产的企业的支持力度，提高精准农业技术的可获得性。精准农业技术的属性导致企业研发该类技术及生产相关产品的成本与消费者支付意愿之间存在差距，政府应加大对企业的支持力度，提高企业对该类技术相关产品的供给意愿。

^①虽然测土配方的采样标准仅为 100~200 亩，但考虑到精准投入的高昂成本，现阶段可按照特征相似区域分组，确定几个大配方。Tey and Brindal (2012) 也指出，虽然这种方法是退而求其次，但其效率仍然高于“一刀切”的均一化方案。

第三,就测土配方施肥技术而言,应打破行政分割,扩大配方肥生产企业的市场份额。现有政策不允许通过政府公开招标采购的配方肥跨县销售。在配方肥种类固定不变的前提下,若通过政府公开招标采购的配方肥的销售区域扩大了,企业所占的市场份额就会增加,进而能够提高企业的生产利润。

总而言之,其他精准农业技术在推广过程中也都面临与测土配方施肥技术类似的困境,忽略其精准化属性及供求失衡的本质,将不可避免地产生政府失灵——努力推广却收效甚微。因此,农业部门需要把这类技术识别出来,设立专项资金,重点补贴供给方,降低企业研发精准农业技术及生产相关产品的成本,提高该技术的可获得性,从而使精准农业技术的生态效益得以实现。

参考文献

- 1.蔡颖萍、杜志雄,2016:《家庭农场生产行为的生态自觉性及其影响因素分析——基于全国家庭农场监测数据的实证检验》,《中国农村经济》第12期。
- 2.陈强,2014:《高级计量经济学及Stata应用(第二版)》,北京:高等教育出版社。
- 3.邓明君、邓俊杰、刘佳宇,2016:《中国粮食作物化肥施用的碳排放时空演变与减排潜力》,《资源科学》第3期。
- 4.方向明、李姣媛,2018:《精准农业:发展效益、国际经验与中国实践》,《农业经济问题》第11期。
- 5.冯晓龙、霍学喜,2016:《社会网络对农户采用环境友好型技术的激励研究》,《重庆大学学报(社会科学版)》第3期。
- 6.冯晓龙、仇焕广、刘明月,2018:《不同规模视角下产出风险对农户技术采用的影响——以苹果种植户测土配方施肥技术为例》,《农业技术经济》第11期。
- 7.傅家骥,1998:《技术创新学》,北京:清华大学出版社。
- 8.高瑛、王娜、李向菲、王咏红,2017:《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》,《农业经济问题》第1期。
- 9.葛继红,2011:《江苏省农业面源污染及治理的经济学研究——以化肥污染与配方肥技术推广政策为例》,南京农业大学博士学位论文。
- 10.韩洪云、杨增旭,2011:《农户测土配方施肥技术采纳行为研究——基于山东省枣庄市薛城区农户调研数据》,《中国农业科学》第23期。
- 11.李茜、赵杏、杨京平、钟一铭、王小鹏,2017:《高温与降雨对不同茶龄土壤碳氮养分及胞外酶活性的影响》,《农业环境科学学报》第3期。
- 12.李娟、赵秉强、李秀英,2008:《长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响》,《中国农业科学》第1期。
- 13.李世成、秦来寿,2007:《精准农业变量施肥技术及其研究进展》,《世界农业》第3期。
- 14.罗小娟,2013:《太湖流域环境友好型技术影响评价与政策模拟——基于计量经济和数理规划方法》,南京农业大学博士学位论文。

15. 欧阳煌、李思, 2016: 《创新扩散、制度网络与专业合作社发展——基于小世界网络视角》, 《中国农村经济》第 8 期。
16. 普兰纳布·巴德汉、克利斯托弗·尤迪, 2002: 《发展微观经济学》, 陶然等译, 北京: 北京大学出版社。
17. 温延臣、李燕青、袁亮、李娟、李伟、林治安、赵秉强, 2015: 《长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法》, 《农业工程学报》第 7 期。
18. 王武科、李同升、刘笑明、张建忠, 2008: 《农业科技园技术扩散的实证研究——以杨凌示范区为例》, 《经济地理》第 4 期。
19. 杨盛琴, 2014: 《不同国家精准农业的发展模式分析》, 《世界农业》第 11 期。
20. 张复宏、宋晓丽、霍明, 2017: 《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》, 《中国农村观察》第 3 期。
21. 张卫红、李玉娥、秦晓波、万运帆、刘硕、高清竹, 2015: 《应用生命周期法评价我国测土配方施肥项目减排效果》, 《农业环境科学学报》第 7 期。
22. 曾福生, 2011: 《中国现代农业经营模式及其创新的探讨》, 《农业经济问题》第 4 期。
23. 郑鑫, 2010: 《丹江口库区农户氮肥施用强度的影响因素分析》, 《中国人口·资源与环境》第 5 期。
24. 褚彩虹、冯淑怡、张蔚文, 2012: 《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》, 《中国农村经济》第 3 期。
25. 朱萌、齐振宏、邬兰娅、李欣蕊、唐素云, 2015: 《新型农业经营主体农业技术需求影响因素的实证分析——以江苏省南部 395 户种稻大户为例》, 《中国农村观察》第 1 期。
26. Aubert, B. A., A. Schroeder, and J. Grimaudo, 2012, "IT as Enabler of Sustainable Farming: An Empirical Analysis of Farmers' Adoption Decision of Precision Agriculture Technology", *Decision support systems*, 54(1): 510-520.
27. Du, Q., N. B. Chang, C. Yang, and K. R. Srilakshmi, 2008, "Combination of Multispectral Remote Sensing, Variable Rate Technology and Environmental Modeling for Citrus Pest Management", *Journal of Environmental Management*, 86(1): 14-26.
28. García, B., 2013, "Implementation of A Double-hurdle Model", *The Stata Journal*, 13(4): 776-794.
29. Kutter, T., S. Tiemann, R. Siebert, and S. Fountas, 2011, "The Role of Communication and Co-operation in the Adoption of Precision Farming", *Precision Agriculture*, 12(1): 2-17.
30. Larson, J. A., R. K. Roberts, B. C. English, S. L. Larkin, M. C. Marra, S. W. Martin, K. W. Paxton, and J. M. Reeves, 2008, "Factors Affecting Farmer Adoption of Remotely Sensed Imagery for Precision Management in Cotton Production", *Precision Agriculture*, 9(4): 195-208.
31. Robertson, M. J., R. S., Llewellyn, and R. Mandel, 2012, "Adoption of Variable Rate Fertiliser Application in the Australian Grains Industry: Status, Issues and Prospects", *Precision Agriculture*, 13(2): 181-199.
32. Rogers, E. M., 2010, *Diffusion of Innovations*, New York: Simon and Schuster.
33. Tey, Y. S., and M. Brindal, 2012, "Factors Influencing the Adoption of Precision Agricultural Technologies: A Review for Policy Implications", *Precision agriculture*, 13(6): 713-730.

34.Wintoki, M. B., J. S. Linck, and J. M. Netter, 2012, "Endogeneity and the Dynamics of Internal Corporate Governance", *Journal of Financial Economics*, 105(3): 581-606.

35.Xu, X., P. He, J. Zhang, M. F. Pampolino, A. M. Johnston, and W. Zhou, 2017, "Spatial Variation of Attainable Yield and Fertilizer Requirements for Maize at the Regional Scale in China", *Field Crops Research*, 203: 8-15.

(作者单位: 南京农业大学经济管理学院)

(责任编辑: 张丽娟)

A Study on the Diffusion Mechanisms and Policies of Precision Agriculture Technology: A Case Study of Soil Testing and Formulated Fertilization Technology

Sun Jie Zhou Li Ying Ruiyao

Abstract: Based on the precision attribute of soil testing and formulated fertilization technology, this article constructs an analytical framework of precision agriculture technology promotion. It focuses on the different effects of formula fertilizer's type promoted by the government on the diffusion of soil testing and formulated fertilization technology and analyzes different application effects. It uses the soil fertility data and inter-provincial household survey data for empirical test. It finds that compared with the promotion of a single type of formula fertilizer, the promotion of a variety of formula fertilizers has a significant negative impact on the adoption probability and adoption degree of farmers' technology. Besides, compared with the application of traditional fertilizer, if the type of formula fertilizer promoted by the government is single, the use of formula fertilizers will not significantly improve soil fertility. However, if there is more than one type of formula fertilizers promoted by the government, the use of formula fertilizers can balance soil nutrients and improve soil quality.

Key Words: Precision Agriculture Technology; Soil Testing and Formulated Fertilization Technology; Technological Diffusion; Soil Fertility