

农户环境友好型技术采纳的路径选择 与增效机制实证*

董莹¹ 穆月英²

摘要: 本文在剖析农户环境友好型技术采纳的路径选择与增效机制基础上, 构建了 Cov-AHP-MFA 集成关联技术的效率评价模型, 结合黄淮海与环渤海设施蔬菜优势产区 959 个农户调研数据进行实证测算与比较分析, 得到的主要结论包括: (1) 参与服务与自主采纳两种环境友好型技术路径使农户处于不同的生产前沿面; 参与服务农户采用技术强度与生产前沿面呈显著的“U”型关系, 具有深化采纳技术扩展前沿面的潜力; 自主采纳农户则主要依靠技术经验缓解技术非效率损失; (2) 基于环境友好型技术优势的营销服务能显著提升技术转化率, 但技术配套物资购买服务却降低了技术转化率; (3) 参与服务农户比自主采纳农户的综合效率高 5.79%, “干中学”与“示范效应”下的技能扩散是其中主要的增效机制。

关键词: 环境友好型技术采纳 路径选择 增效机制 Cov-AHP-MFA 模型

中图分类号: F014.4 **文献标识码:** A

一、引言

随着农业资源环境约束的不断加大, 促进农业生产方式由传统粗放向绿色高效模式转变, 对推进农业可持续发展、加快农业现代化进程的现实意义越发凸显。促进农户积极采纳以高效节水灌溉与测土配方施肥为主的环境友好型技术, 是农业绿色发展的微观基础。理论上讲, 通常的农业技术能提高成本收益率, 与农户生产目标相一致。但环境友好型农业技术由于高成本与高风险、作用周期长、见效慢等特点很难得到农户的青睐(徐志刚、吕开宇, 2018)。一方面, 风险预期、技术成本、补贴政策等因素制约着农户对环境友好型技术的采纳决策(邓祥宏等, 2011; 李想、穆月英, 2013a); 另一方面, 周围农户技术决策、前期相关技术效果以及预期产量、市场价格等收益波动影响了农户对环境友

*本文研究得到国家自然科学基金青年项目“地权稳定性对农户环境友好型技术采纳行为的影响及其溢出效应研究”(编号: 71803052)、国家自然科学基金面上项目“空间均衡视角下蔬菜跨区域供给、地区结构和供给效应研究”(编号: 71773121)、现代农业产业技术体系“北京市果类蔬菜产业创新团队项目”(编号: BAIC01-2018)、国家社科基金重大项目“我国粮食生产的水资源时空匹配及优化路径研究”(编号: 18ZDA074)的资助。本文通讯作者: 穆月英。

好型技术稳定与深入采纳的积极性 (Aldana and Useche, 2011; 王世尧等, 2017)。因此, 如何克服技术采纳的高成本门槛与应用风险、提高技术采纳后的产量与市场价值, 对促进环境友好型技术在农户层面的推广扩散的意义重大。

农户采纳环境友好型技术后的成本收益差异一方面受农户户主年龄、受教育程度、技术经验以及家庭经营土地规模与细碎化程度等异质性因素影响, 另一方面与农户生产组织化与专业化程度关系密切 (葛继红、周曙东, 2012; Noltze et al., 2013; 吕杰等, 2016)。在当前情况下, 受文化素质、组织化程度及封闭经营等因素影响, 农户很难获取其所需的生产技术, 农业技术的推广主要通过政府相关部门“自上而下”来进行。这种推广模式往往倾向于体现政府意图, 忽视了农户的实际技术需求, 导致政府的技术供给与农户的实际技术需求脱节 (罗建利等, 2015)。相比政府主导的公共选择, 农户自发形成、自愿加入的专业化服务组织在参与公共决策、完善技术推广体系与保障公共物品有效供给中的优势凸显 (国鲁来, 2005)。农户以有效采纳技术为目的, 自发组织形成的技术相关服务, 既弥补了其特定的技术采纳劣势, 又有效衔接了农户与市场 (伊藤顺一等, 2011; 黄祖辉、高钰玲, 2012), 开辟了新的技术采纳增效方式。一方面, 生产环节的技术服务有助于缓解农户采纳技术所面临的高风险、高成本以及技术管理能力不足等问题 (Deng et al., 2010; 张社梅等, 2016; 吴比等, 2016; Ma et al., 2017); 另一方面, 技术配套物资购买与有针对性的市场销售等上下游环节服务, 通过优化产品交易条件提高了技术采纳后的产出效率 (蔡荣, 2011; 王丽佳、霍学喜, 2013; Yang, 2013)。且对资产专用性程度较高、质量难以监测或检测成本较高, 单次交易量较小、交易频率较高、物理特性不稳定的农产品而言, 这种增效作用更加显著 (梁巧、黄祖辉, 2011)。

此外, 参与技术相关服务会促使农户进行统一生产与技术管理, 也具有促进农户间信息传递, 提升技术能力水平的作用。中国农村特有的关系型社会网络, 使农户间的信息传递成为农业技术扩散的主要渠道。这种基于地缘与亲缘形成的关系型的社会网络连接, 使自发组织形成的技术服务对网络内成员具有信息传递与集体沟通决策的先天优势 (Cai et al., 2015)。一方面, 统一生产与技术管理有助于农户积累的经验在生产空间中扩散, 以“干中学”的方式加速了农户熟练掌握新技术的进程 (陈菲菲等, 2016); 另一方面, 与当地农户具有相同社会背景与社会结构关系的“意见领袖”所发起的技术相关服务, 是基于本土经验理解和采纳后的信息再传递, 能通过“示范效应”降低农户采纳新技术的风险与不确定性 (李南田等, 2002; 董莹、穆月英, 2016)。

尽管自发组织形成的技术相关服务为农户采纳新技术带来了额外的增效方式, 农户是否实际发起或参与相关服务还受其相对禀赋条件的影响。随着农村劳动力的不断转移, 农户异质化与分化程度加深。与从事小规模生产经营农户相比, 小部分留在农村的“精英”农户所面临的环境友好型技术的采纳困境可能存在层次上的差异, 抑或发起的技术相关服务非但不能使其从中获益, 甚至受到损失, 所以积极性不大 (Ma et al., 2017)。使其他小农户也无从获取与技术相关服务, 只得依靠禀赋能力来采纳新技术。即使“精英”农户基于共同抵御新技术带来的市场风险或套取政策优惠等目的, 发起技术相关服务, 小农户也可能由于难以承担组织运行成本或利润空间被挤压、甚至无法获取实质性服务等原因 (潘劲, 2011; 周应恒、胡凌啸, 2016), 宁愿选择自主采纳技术。

综上所述,农户基于相对禀赋条件所选择的技术采纳路径,会对采纳技术后的生产效率产生影响,决定着农户对环境友好型技术的采纳决策行为。目前,对农户环境友好型技术采纳意愿与行为决策的实证研究较为丰富,针对农户环境友好型技术采纳路径以及全要素生产率的提升机制与实证效果的研究较少。此外,已有文献多集中于研究单一环境友好型技术的采纳决策,忽略了该类型技术的关联性(李想、穆月英,2013b),以及在统一生产过程中的“干中学”与“示范效应”,导致实证结果有偏。

本文基于黄淮海与环渤海设施蔬菜优势产区的调研,对农户采纳环境友好型技术的路径选择与增效机制进行剖析,综合运用Cov-AHP(协方差层次分析)方法与MFA(共前沿面分析)模型对该类型技术的集成采用强度与不同技术采纳路径的增效方式进行刻画与实证比较分析,旨在识别促进与抑制环境友好型技术采纳效果的路径,为地方政府有效促进农户积极深入采纳环境友好型技术,进而推进高效绿色的农业发展转型提供理论依据与实践参考。

二、机制分析与研究框架

为便于系统性理解农户采纳环境友好型技术路径与增效机制的关系,下文将从归纳环境友好型技术的特征入手,分析农户不同技术采纳路径选择及增效机制,为构建相应实证分析框架奠定理论基础。

(一) 农户采纳环境友好型技术的路径选择与增效机制

基于全要素生产率分析框架与农户经济行为理论,本文将农户采纳环境友好型技术的路径选择与增效机制总结为图1,并从技术采纳过程与效率评价两个角度进行剖析。农户对环境友好型技术的采纳决策基于该类型技术的特征。环境友好型技术具有高成本、高风险性,以及跨期正外溢性下的收益缓慢性特征。此外,以节水和施肥两大类技术为主的环境友好型技术关系密切,不同灌水方法会通过土壤水分状况影响养分在土壤中运移和分配(杨丽娟等,2003),以水肥一体化作为中介技术,形成集成关联,给该类技术采用强度的衡量提出了挑战。在此基础上,农户会综合考虑包括土地、劳动、资本等要素条件以及管理能力等禀赋,选择与之适应的技术采纳路径。若农户选择参与技术相关服务,可能获得与环境友好型技术相关的配套物资购买、技术指导以及针对采用该类型技术生产农产品的优质特征进行的市场营销与价格信息传递上的便利(Naziri et al., 2014),还有可能在统一生产与技术管理中,通过技能扩散提升相对技术水平。若农户选择自主采纳,则需要依靠以往技术经验来增效。

成本收益意义上的生产效率提升,即剔除物质投入的全要素生产率增长。基于全要素生产率分析框架,采纳技术获得的生产效率提升主要体现在前沿面扩张和技术效率改善两个方面。前者源于新技术采用对生产前沿面的推进,而后者则是来自有效使用技术对要素组合的优化配置。农户选择不同的技术采纳路径,会影响采纳环境友好型技术对生产前沿面的推进程度,也会影响技术效率的改善效果。从增效方式来看,自主采纳技术农户的主要增效方式是内部增效,即依靠个人禀赋获得技术采纳后的组内前沿面扩张与个体技术效率改善;参与技术相关服务农户的增效方式既包括内部增效,也包括外部增效,且通常以外部增效为主,即主要通过提升技术采纳后的组间技术转化率、缩小其与组内其他农户的技术水平差距来增效。从动态角度看,有效的技术采纳路径选择也能促进环境友好型技术采纳效果的发挥,促使农户持续深入地采纳该类型技术。因此,来自农户的技术条件与管理能力异质性、

路径选择差异分别对生产前沿面与技术效率产生作用，从而影响环境友好型技术采纳的增效效果。

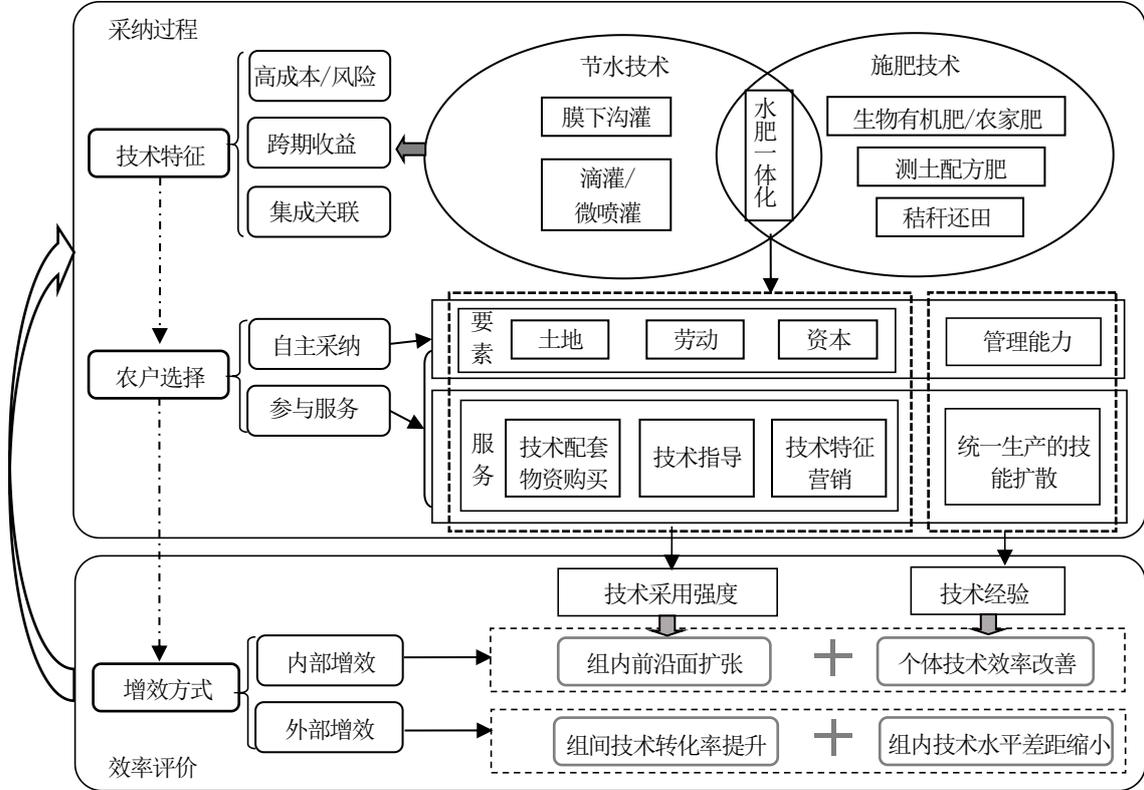


图1 农户对环境友好型技术采纳的路径选择及其增效机制

为识别农户采纳环境友好型技术的有效路径，有必要对自主采纳与参与服务两种路径选择下的增效效果进行实证层面的分解。这不仅有助于判断农户采纳环境友好型技术的实践规律，更能分析农户不同技术采纳路径选择下，促进与抑制增效效果的因素，为动态推进农户稳定而深入地采纳环境友好型技术，实现农业高效绿色生产转型提供有针对性政策建议。

(二) 环境友好型技术的采用强度测度

在评价农户环境友好型技术采纳的全要素生产率效果前，需要先明确该类型技术采纳程度的衡量标准。环境友好型技术不单指一项具体技术，而是一系列密切相关的技术措施集合，其采纳决策存在较强的序贯性、依赖性，以及替代或互补关系（李想、穆月英，2013b）。农户可能选择采纳系列技术措施中的一种或几种，体现出不同程度的采用强度，无法简单用是否采纳技术进行判断。基于此，下文将结合层次分析法对此类集成技术的采用强度进行测算。在具体测算方法选择上，本文采用Cov-AHP方法，该方法基于AHP方法的分析框架，以平均协方差替代主观打分权数，进而替代了原有需借助专家根据自己的经验对系统各变量相对重要性的主观判断（谢忠秋，2015）。张珩等（2017）应用Cov-AHP对陕西省农村普惠金融发展水平进行了测算，刘晓伟等（2017）运用该方法对建设项目施工阶段的风险进行了客观评价。该方法在本文的应用能更好地结合农户技术采纳数据，体现主要

环境友好型技术措施间的实际关联性,进而对每个农户环境友好型技术采用强度进行合理的集成测算。

结合本文的研究内容,将 Cov-AHP 方法的具体应用步骤设置为:(1)明确环境友好型技术的主要技术;(2)根据主要技术采纳数据计算协方差矩阵,并进行变换,构造判断矩阵;(3)用平均协方差替代主观打分,得到各项环境友好型技术权重;(4)测算 CR 比率,对判断矩阵进行一致性检验。

(三) 增效机制的实证效果分解原理

基于农户经济行为理论,农户自发采纳技术是预期其能扩展生产前沿面或改善效率。农户根据其能否达到预期效果,停止或加强采用该类技术。农户选择不同技术采纳路径导致了不同的增效方式。若农户选择参与服务,即借助技术相关服务与统一生产的技能扩散等外部资源,会使得两种增效机制选择下的农户的生产经营条件不同,使其生产前沿面间存在差异,不能直接进行效果比较。因此,需构造不同技术条件下的分组生产前沿面,以及由各组前沿面构成的共前沿面,采用 meta-frontier analysis (MFA) 模型对此进行逐层分析 (Battese et al., 2004)。

图 2 展示了应用 MFA 模型对农户选择不同技术采纳路径下的增效机制进行分析的原理。不同技术采纳路径下的主要增效方式不同。选择参与服务农户相比自主采纳农户具有额外的外部技术增效方式,形成了效果差异的两个层次来源。第一个层次是来自统一生产的技能扩散对组内相对技术水平与潜力空间的作用,使得两种选择下农户的组内相对技术水平差距有所不同,但由于生产前沿面不同,无法比较。第二个层次是基于技术相关服务的农户组间的生产前沿面差异,具体通过确定共前沿面,测算其与共前沿面的距离,即组间技术效率转化率。

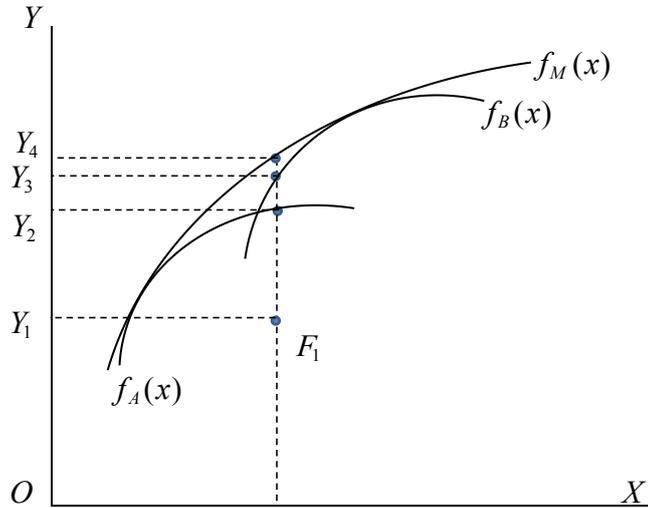


图 2 MFA 模型下不同技术采纳路径的增效原理

具体而言,农户选择不同环境友好型技术采纳路径的增效机制源于缓解组内技术非效率损失与扩张前沿面两个方面。假定 A、B 两组农户分别选择了自主采纳与参与服务两种不同的技术采纳路径,所面临的生产前沿面分别为 $f_A(x)$ 、 $f_B(x)$, 并共同组成了共前沿面 $f_M(x)$; 点 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 是以同一要素组合而分别得到四个产出点。从技术相关服务和统一生产的技能扩散对综合效率的影响看,若假定 F_1 点为 A 组中某农户的投入产出,其自身管理能力决定了其在第一层次组内技术效率水平为

OY_1/OY_2 ， A 组中所有农户禀赋形成的第二层次组间技术转化率为 OY_2/OY_4 ，则其综合效率为 OY_1/OY_4 ；若假定 F_1 点为 B 组中某农户的投入产出，其在组织生产中技能扩散作用下的组内技术效率为 OY_1/OY_3 ，其获得的技术相关环节服务使其第二层次的组间技术转化率为 OY_3/OY_4 。此时，两个不同组农户的综合效率均为 OY_1/OY_4 ，但相同综合效率背后所蕴含的两个层次的全要素生产率提升结构完全不同，即农户在不同技术采纳路径下的增效结构不同。采用MFA模型可以在异质性禀赋条件下，分别捕捉农户选择差异化的环境友好型技术采纳路径对综合效率水平的影响。

根据 Battese et al. (2004) 的研究，先定义随机前沿面分析模型如下：

$$y_i = f(x_i, \beta) \exp(v_i - u_i) \quad (1)$$

(1) 式表达了产出由技术结构方程与技术非效率方程两个部分组成。其中， $f(x_i, \beta)$ 函数代表生产前沿面，体现为技术结构方程， x_i 是投入要素， β 是技术结构参数， i 表示投入要素； v_i 表示随机总误差，服从正态分布； u_i 为非负的随机误差项，分布形态为零点截断型，反映技术非效率损失， v_i 与 u_i 彼此独立。再据此将无技术非效率损失的共前沿面及其具体表达式定义如下：

$$y_i^* = f(x_i, \beta^*) = e^{x_i \beta^*} \quad (2)$$

(2) 式中， β^* 代表共前沿面上最优投入产出系数，即最优资源投入配置系数。

$$f^j(x_{ij}, \beta_j) = f(x_i, \beta^*) e^{-u_{ij}^M} = \varepsilon_{ij} - \hat{\varepsilon}_{ij} \quad (3)$$

(3) 式定义了各组前沿面与共前沿面的关系。其中， u_{ij}^M 非负，代表 i 个体所在的 j 组所在的前沿面到共前沿面的距离，即组间技术转化率 (TGR)，其表达式如下：

$$TGR_i^j = \frac{f^j(x_{ij}, \beta_j)}{f(x_i, \beta^*)} = e^{-u_{ij}^M} \quad (4)$$

TGR 在本文中被用于描述不同技术采纳路径选择下的组间前沿面差异。不可观测的各组的前沿面 $f^j(x_{ij}, \beta_j)$ 可以从第一阶段估算得到，各组前沿面与共前沿面的关系可转化如下：

$$\ln \hat{f}^j(x_{ij}, \beta_j) = \ln f(x_i, \beta^*) + v_{ij}^M - u_{ij}^M \quad (5)$$

$$TGR_i^j = MTE_i / TE_{ij} = \hat{E}(e^{-u_{ij}^M} | \hat{\varepsilon}_{ij}^M) \quad (6)$$

其中， $\hat{\varepsilon}_{ij}^M = \ln \hat{f}^j(x_{ij}, \beta_j) - \ln \hat{f}(x_i, \beta^*)$ 是估算得到的各组前沿面与共前沿面的差距。

MFA 模型的估计方法分为非参数型与参数型。由于参数型方法能对随机误差进行更准确的估计，下文将采用参数型方法进行实证测算 (O'Donnell et al., 2008)。考虑到如在测算两阶段共前沿面的过程中忽略了用 $\hat{f}^j(x_{ij}, \beta_j)$ 代替 $f^j(x_{ij}, \beta_j)$ ，在第二阶段运用 programming technique 方法无法剔除系统中存在随机变量 v_{ij}^M 的缺陷 (Huang et al., 2014)，本文选择采用两阶段 SFA 模型估计方法，结合第

一阶段得到的组内技术效率（TE）和第二阶段得到的组间技术转化率（TGR）得到综合效率。

三、数据与实证模型构建

（一）数据选择

鉴于设施蔬菜生产过程中化肥、农药、农膜等密集使用所产生的严重环境污染问题，本文选择以设施蔬菜生产为例，对不同环境友好型技术采纳路径的增效机制进行实证分析。实证所使用的数据来自课题组于2014~2015年对北京、天津、河北、辽宁、山东的实地调研。北京、天津、河北、辽宁、山东位于黄淮海与环渤海地区，是设施蔬菜的优势产区，是保障北方蔬菜供给的重要来源，聚集了151个全国“十三五”蔬菜规划重点县。调研样本的选取运用了分层抽样方式，按照省和县进行分类，然后针对县进行村的随机抽样。具体做法是以课题为依托，在向农业部及各省份、直辖市的农业厅（农委、农业局）进行咨询，并收集整理相关统计材料的基础上，结合国家发改委发布的全国“十三五”蔬菜规划中的蔬菜主产区划定，对调研县进行了抽取，进而对抽取主产县的下辖乡镇、村的农户开展调查。调研地区包括24个县、76个乡镇、118个村，共获取农户问卷981份，其中，有效问卷959份。数据收集工作由本课题组成员承担，设施蔬菜品种以黄瓜、番茄、甜(辣)椒等果类蔬菜为主。

针对本文研究需要，调研问卷设计了以下几个部分问题：第一部分是调查农户的家庭基本情况，包括户主性别、年龄、受教育程度、兼业化程度等农户家庭特征；第二部分是调查农户的蔬菜生产成本收益情况，主要包括各类生产要素的投入量、投入金额与产值；第三部分是调查农户的技术采纳情况，包括具体采用哪几项技术措施、相应的采用经验，以及是否获取某种技术相关服务等。结合设施蔬菜生产与技术推广实践，选择膜下沟灌、滴灌/微喷灌、水肥一体化、生物有机肥/农家肥、测土配方施肥与秸秆还田^①作为具体调查的主要环境友好型技术措施。

（二）实证模型体系构建

基于环境友好型技术的集成关联性，对主要环境友好型技术的集成采用情况进行Cov-AHP方法下的测算。进而将各子指标重新加权，得到每个农户的环境友好型技术采用情况。测算结果通过了一致性指数CR比率检验，得到的膜下沟灌、滴灌/微喷灌、水肥一体化、生物有机肥/农家肥、测土配方施肥与秸秆还田技术措施的客观权重分别为0.179、0.191、0.211、0.108、0.159和0.152。

以下将构建MFA两阶段实证模型。先定义超越对数生产函数形式下的技术结构方程如下：

$$\begin{aligned} \ln Y_i = & \beta_0 + \beta_K \ln K_i + \beta_L \ln L_i + \beta_B \ln B_i + \beta_M \ln M_i + \beta_{KK} \ln K_i^2 + \beta_{LL} \ln L_i^2 + \beta_{BB} \ln B_i^2 \\ & + \beta_{MM} \ln M_i^2 + \beta_{KL} \ln K_i \ln L_i + \beta_{KB} \ln K_i \ln B_i + \beta_{KM} \ln K_i \ln M_i + \beta_{LB} \ln L_i \ln B_i \\ & + \beta_{LM} \ln L_i \ln M_i + \beta_{BM} \ln B_i \ln M_i + A_i + A_i^2 + v_i - u_i \end{aligned} \quad (7)$$

其中， Y_i 为*i*农户的主要设施蔬菜总产值； K 和 L 分别代表土地与劳动要素投入，具体为实际播种面积、劳动工日（自雇工日与雇佣工日之和）；基于诱致性农业技术进步理论，投入要素还包括生物

^①专指设施蔬菜秸秆还田技术，该技术有助于大幅度减少农药和肥料使用，增加土壤有机质与生物活性，提高土壤保水保肥能力。

化学型与机械型两种技术要素，分别用 B 和 M 表示。其中，生物化学型技术要素包括种苗、肥料与农药，用种肥费体现其投入情况；机械型技术要素包括生产过程中使用的机械与电力，用机电费体现其投入情况。另外，考虑到环境友好型技术措施的集成关联性以及改善产能的较长周期性，采用强度对前沿面的作用可能存在阶段性特征，故将技术采用强度 A 及其平方项 A^2 同时纳入技术结构方程中。 $u_{ji} \sim N^+[\mu(Z_{ji}), \sigma_u^2(Z_{ji})]$ ，代表可观测因素产生的技术非效率损失。

再将各组前沿面与共前沿面的技术非效率方程分别定义如下：

$$\mu_{ji} = \delta_0 + \delta_{ji}Z_{ji} + AEXP_i + AEXP_i^2 + w_{ji} \quad (8)$$

$$\mu_M = \gamma_0 + \gamma_{ji}S_{ji} + \omega_{ji} \quad (9)$$

(8) 式表示各组农户的内部技术非效率方程， Z_{ji} 是体现农户异质性的向量，具体包括农户的户主年龄（劳动强度）、受教育程度（劳动素质）、每亩农膜^①投入费（资本投入密度）和蔬菜产值占家庭总收入比例即蔬菜产值占比（生产经营积极性）， δ 为相应的待估计系数。为体现技术使用经验对效率产生的长期影响的阶段性差异，还将技术经验 $AEXP$ 及其平方项 $AEXP^2$ 也同时纳入其中。即在技术采用的摸索阶段，环境友好型技术对相对产量的影响可能产生非效率，当达到一定的技术熟练度且水土改良优势显现时，可能逐渐出现缓解技术损失的作用。 w_{ji} 为组内技术非效率方程的残差项。(9) 式表示共前沿面的技术非效率方程， S_{ji} 是体现技术相关服务的向量，具体包括是否提供技术配套物资购买、技术指导、提供基于技术优势的价格信息与市场营销服务的虚拟变量， γ 为相应的待估计系数， ω_{ji} 为共前沿面技术非效率方程的残差项。

表 1 农户投入产出与环境友好型技术采纳情况

变量	参与服务农户 (364 户)				自主采纳农户 (595 户)			
	平均值	最小值	最大值	标准差	平均值	最小值	最大值	标准差
投入产出结构								
产值(万元)	7.65	0.3	148.6	10.32	7.63	0.1	174.4	11.47
播种面积(亩)	5.55	0.6	80	9.42	5.09	0.25	80	6.38
劳动(工日)	356.2	30	1366	207.8	347.1	60	1370	205.2
种肥费(元)	11521.4	495	173600	18422.5	9709.9	60	135000	13101.1
机电费(元)	999.7*	50	22500	2400.5	814.9	50	22000	1384.5
技术效率影响因素								
年龄(岁)	48.51	25	78	8.71	48.64	25	76	9.12
受教育程度(年)	10.27**	0	15	2.39	9.74	0	15	2.52

^①农膜是设施蔬菜生产中的重要投入物资，包括地膜和棚膜。但地膜和棚膜的更换并不是随生产周期进行，不作为生产投入要素，主要体现设施完备程度。且地膜是膜下沟灌技术的主要配套物资，不宜在生产模型中重复出现，影响实证测算的结果。因此，本文将将其每亩投入费纳入方程中，用来体现物质资本的投入密度与保障水平。

农户环境友好型技术采纳的路径选择与增效机制实证

每亩农膜费(千元)	0.87	0.01	6	0.61	0.93	0.01	1.35	1.03
蔬菜产值占比(%)	64.04	0.25	100	35.38	63.71	0.8	102.38	33.07
技术采用 (0, 1)								
滴灌/微喷灌	0.36	0	1	0.48	0.35	0	1	0.48
膜下沟灌	0.41***	0	1	0.49	0.32	0	1	0.47
水肥一体化	0.67	0	1	0.47	0.63	0	1	0.48
生物有机肥/ 农家肥	0.80*	0	1	0.40	0.75	0	1	0.018
测土配方肥	0.36	0	1	0.48	0.31	0	1	0.46
秸秆还田	0.32***	0	1	0.02	0.20	0	1	0.02
技术经验 (年)								
滴灌/微喷灌	2.43	0	22	4.49	2.62	0	24	4.76
膜下沟灌	3.22	0	31	5.76	3.08	0	25	5.7
水肥一体化	6.46**	0	36	7.72	7.61	0	34	7.92
生物有机肥/ 农家肥	7.03**	0	36	0.38	8.14	0	33	0.33
测土配方肥	1.51	0	22	2.99	1.76	0	31	3.36
秸秆还田	2.10***	0	30	0.23	1.03	0	21	0.12
各环节服务 (0, 1)								
技术配套物资购买	0.43	0	1	0.44	--	--	--	--
技术指导	0.33	0	1	0.38	--	--	--	--
价格信息	0.09	0	1	0.23	--	--	--	--
市场营销	0.37	0	1	0.48	--	--	--	--

注：***、**、*分别表示在 1%、5%与 10%水平上显著。

表 1 显示的是设施蔬菜生产农户选择不同技术采纳路径下的投入产出与技术采纳情况，包括以参与服务方式采纳技术农户 364 户，自主采纳技术农户 595 户。从投入产出结构角度看，参与服务农户的平均蔬菜产值显著高于自主采纳农户，除机电费外，两组农户的其他平均要素投入不存在显著差异；从技术效率影响因素看，除参与服务农户的受教育程度高于自主采纳农户外，两组农户不存在显著的管理能力差异。从环境友好型技术的采纳与经验情况看，参与服务农户的各项具体技术采纳率较高，尤其是在膜下沟灌、生物有机肥/农家肥以及秸秆还田的采用率和采用经验上都显著高于自主采纳农户；但其在生物有机肥/农家肥和水肥一体化上的技术经验却少于自主采纳农户。在参与服务农户可能获取的四类主要技术相关服务中，技术配套物资购买、基于技术优势的市场营销、技术指导以及价格信息服务的覆盖率依次降低。

四、实证结果与比较分析

(一) 环境友好型技术效果的组内技术效率比较

表 2 是测算的第一阶段,选择不同环境友好型技术采纳路径农户的组内技术效率的增效实证结果。

该阶段先后对农户总体、参与服务与自主采纳农户分别进行了效率测算。整体上看，各子模型的统计检验均显著，模型整体测算效果良好。根据以上实证结果计算得到的最大似然比估计量为 69.01，说明两类选择下的农户生产前沿面存在显著差异，应采用 MFA 模型进行实证测算，得到的实证结果与分析如下。

首先，技术采用强度与技术经验对两组农户全要素生产率的影响方式不同。(1) 从技术结构方程的实证结果看，参与服务农户的环境友好型技术采用强度一次项系数显著为负，二次项系数显著为正，技术采纳强度与该组前沿面存在“U”型关系，即参与服务农户采纳环境友好型技术的增效方式主要源于深入采纳技术对前沿面的扩张冲击。这种冲击在采用环境友好型技术的初期会对产值产生负面影响，但随着采用技术强度的加深，会逐渐得到明显缓解，说明环境友好型技术在初步应用阶段主要带来产量损失，而随技术采纳深化，将通过土壤改良或单价提升扩展生产前沿面。(2) 从技术非效率方程的实证结果看，仅自主采纳农户的技术经验一次项系数显著为负，说明自主采纳农户在技术采纳初期主要依靠技术经验的来改善技术效率，与之前分析的预期相符。

其次，两组农户的异质性要素条件与管理能力使其采纳环境友好型技术的增效效果存在较大差异。

(1) 从农户要素条件上看，两组农户的各类要素投入产出弹性均显著为正，其中，参与服务农户的种肥与机电投入的偏产出弹性较高，自主采纳农户土地与劳动投入的偏产出弹性较高；参与服务农户的土地、种肥与机电投入的二次项系数显著为正，自主采纳农户的各类要素投入的二次项系数显著为正。这说明机械型与生物化学型技术要素投入是参与服务农户增产的主要因素，且两型技术要素的密集化投入能进一步提高产出；土地与劳动依然是自主采纳农户增产的主要贡献要素，且更加密集性地投入土地与劳动是其提高产出的主要途径。从交叉项测算结果看，参与服务农户的机电与劳动投入交叉项系数显著为负，说明参与服务农户的机电投入对劳动力呈现显著的替代；自主采纳农户的种肥、机电与劳动的交叉项系数均显著为负，种肥与机电投入的交叉项系数显著为正，说明自主采纳农户所投入种肥与机电均对劳动呈现显著替代，而种肥和机电则体现出显著的互补性。(2) 从农户管理能力异质性上看，自主采纳农户年龄的估计系数显著为正，说明该组农户的老龄化现象造成了显著的技术非效率损失；参与服务农户受教育程度的估计系数显著为负，说明较高的文化素质水平有助于该组农户缓解技术非效率损失。两组农户的每亩农膜投入与蔬菜产值占比系数均显著为负，说明较高的资本投入密度与从事农业经营积极性有利于缓解农户的技术非效率损失，使其具有较高的技术水平。参与服务与自主采纳农户的平均组内技术效率分别为 0.702 和 0.621，即参与服务农户组的组内技术水平差距较小，说明参与服务促进的统一生产过程有利于促进“干中学”与“示范效应”下的技能扩散，有助于缩小农户组内部的技能水平差距。

表 2 环境友好型技术的组内技术效率实证结果

变量	农户总体		参与服务农户		自主采纳农户	
	系数	t 值	系数	t 值	系数	t 值
结构方程常数项 1	0.377***	6.825	0.201***	3.212	0.454***	6.506
技术结构 $\ln K$	0.425***	14.883	0.394***	9.858	0.434***	12.397

$\ln L$	0.297***	11.121	0.179***	4.642	0.364***	10.407
$\ln B$	0.075***	3.291	0.115***	3.458	0.057*	1.944
$\ln M$	0.186***	5.154	0.256***	4.956	0.135***	2.819
$\ln K^2$	0.058***	3.461	0.044**	1.963	0.059**	2.359
$\ln L^2$	0.093***	5.563	0.047	1.413	0.118***	5.614
$\ln B^2$	0.022***	3.855	0.027**	2.349	0.013*	1.795
$\ln M^2$	0.053***	4.071	0.065***	3.875	0.082***	2.840
$\ln K \ln L$	-0.073***	-2.899	-0.074*	-1.780	-0.095***	-2.699
$\ln K \ln B$	0.011	0.679	0.043	1.230	0.008	0.381
$\ln K \ln M$	-0.025	-0.672	-0.035	-0.681	0.012	0.229
$\ln L \ln B$	-0.064***	-4.554	-0.020	-0.491	-0.069***	-4.103
$\ln L \ln M$	-0.106***	-2.727	-0.102**	-2.023	-0.132**	-2.169
$\ln B \ln M$	0.038**	2.024	0.007	0.386	0.129***	3.097
A	-0.174**	-2.032	-0.206**	-1.991	-0.166	-1.391
A^2	0.391	1.633	1.155***	3.248	-0.167	-0.473
常数项 2	-0.469	-1.566	-1.258***	-2.441	-0.228	-0.667
年龄	0.009	1.386	-0.012	-1.293	0.018*	1.950
受教育程度	-0.017***	-5.900	-0.027***	-5.886	0.173	1.636
每亩农膜费	0.019	0.238	-0.487***	-3.580	-0.014***	-4.723
蔬菜产值占比	-0.047***	-3.409	-0.027**	-2.040	-0.048***	-6.577
$AEXP$	-0.037	-1.434	0.006	0.160	-0.048*	-1.669
$AEXP^2$	-0.003	-0.562	0.002	0.380	-0.010	-1.178
sigma-squared	0.849***	7.128	0.866***	4.637	0.826***	4.572
gamma	0.791***	19.285	0.839***	17.729	0.763***	10.981
Log-likelihood	-864.372		-269.490		-560.383	
LR test	144.348		75.577		81.324	
平均技术效率	0.641		0.702		0.621	

注：投入变量经标准化处理，系数表示平均偏产出弹性；***、**、*分别表示在 1%、5%、10%水平上显著。

(二) 环境友好型技术效果的组间技术转化率比较

表 3 是第二阶段组间技术转化率的实证结果，检验了技术相关服务对农户采纳环境友好型技术后的生产前沿面扩张的影响，即对组间技术转化的作用。相比而言，基于环境友好型技术优势的市场营销能显著提升农户组间技术转化率，技术指导与价格信息服务的效果不显著，技术配套物资购买服务反而降低了农户组间技术转化率。这一方面体现了市场营销对改善农户环境友好型技术采纳效果的重要性；另一方面，结合参与服务农户对环境友好型技术的较高采用率，技术配套物资购买的低效也侧面体现了环境友好型技术较高的采纳成本。尽管从平均组间技术转化率看，参与服务农户的平均技术转化率相对自主采纳农户低 6.45%，但结合组内平均技术效率后的最终综合效率要高 5.79%。说明选

择参与服务采纳环境友好型技术的农户在采纳效果上占优势，尽管针对技术的特征营销服务仅能部分弥补采纳该类型技术的高成本效率损失，但仍对技术管理能力较差的农户尤其具有吸引力。

表 3 组间技术转化率实证结果

服务类型	系数	t 值
技术配套物资购买	0.263***	3.319
技术指导	-0.089	-1.336
价格信息	-0.005	-0.061
市场营销	-0.112**	-2.151
sigma-squared	0.123***	22.680
gamma	0.075**	1.993
Log-likelihood		-340.380
LR test		26.463

注：***、**、*分别表示在 1%、5%与 10%水平上显著。

五、结论与政策性建议

在大力发展绿色高效农业的背景下，研究如何充分发挥环境友好型技术增效机制，促进农户稳定而深化地采纳环境友好型技术进行农业生产，具有重要的理论与实践意义。本文在剖析农户环境友好型技术的不同采纳路径选择与增效机制基础上，充分考虑环境友好型技术的集成关联性与生产前沿面差异下的效率可比性，构建了 Cov-AHP-MFA 组合模型，并基于黄淮海与环渤海设施蔬菜优势产区 959 个农户样本进行了客观系统性的实证比较分析，得到研究结论包括：（1）在自主采纳与参与服务两种不同技术采纳路径选择下，农户所处的生产前沿面不同；参与服务农户的环境友好型技术采用强度与生产前沿面的扩张呈现显著“U”型关系，即技术采纳的深化有助于越过初期损失，扩张生产前沿面；自主采纳农户的技术经验能缓解技术非效率损失。（2）基于环境友好型技术优势的市场营销能显著提升农户组间技术转化率，但技术配套物资的购买服务反而降低了农户组间技术转化率。（3）以参与服务方式采纳环境友好型技术农户的综合效率比自主采纳农户高 5.79%，“干中学”与“示范效应”下的技能扩散是主要增效机制。（4）参与服务农户的两型技术要素投入的偏产出弹性较高，即两型技术资本的密集化能更加扩张其生产前沿面，且机电投入与劳动力呈现明显的替代；自主采纳农户的土地、劳动投入的偏产出弹性较高，其种肥与机电投入对劳动具有明显替代作用，种肥与机电投入存在明显互补性；自主采纳农户的老龄化现象产生的负面效率影响显著，而受教育程度会缓解参与服务农户的技术非效率损失；较高资本投入密度与生产经营积极性有助于普遍缓解农户的技术非效率损失。

本文基于农户环境友好型技术采纳路径与增效实证结论，得到以下政策性建议：（1）统一生产的技能扩散在缩小农户环境友好型技术采纳的技术水平差距上作用显著，应鼓励农户积极发起或参与环境友好型技术相关服务；同时，应引导新技术掌握能力较差或技术经验不够丰富的农户参与进来，分享环境友好型技术带来的增效红利。（2）针对采纳环境友好型技术所生产农产品的优良属性进行市场营销有助于提升技术采纳的效果，应着力推进农业生产与生产性服务行业的融合，借助成熟的互联网

营销与电子商务平台进行有针对性的宣传。(3) 采纳环境友好型技术的投入成本较高, 技术指导与价格信息服务的增值作用尚不明显, 降低了农户发起或参与技术相关服务的积极性。建议借助大数据信息传输与直播平台, 对应用环境友好型技术生产的农产品价格信息与专业技术操作进行深度服务; 并结合相应的技术补贴政策与众筹模式, 提高市场信息透明度, 降低采纳环境友好型技术的成本。此外, 参与服务的技术采纳路径还能筛选出土地规模较大、以两型技术资本的密集性投入替代劳动、以及人力资源素质与积极性较高的农户来从事农业生产经营, 是更应提倡的环境友好型技术采纳路径。

参考文献

1. 蔡荣, 2011: 《“合作社+农户”模式: 交易费用节约与农户增收效应——基于山东省苹果种植农户问卷调查的实证分析》, 《中国农村经济》第 1 期。
2. 陈菲菲、张崇尚、罗玉峰等, 2016: 《农户种植经验对技术效率的影响分析——来自我国 4 省玉米种植户的微观证据》, 《农业技术经济》第 5 期。
3. 邓祥宏、穆月英、钱加荣, 2011: 《我国农业技术补贴政策及其实施效果分析——以测土配方施肥补贴为例》, 《经济问题》第 5 期。
4. 董莹、穆月英, 2016: 《基于 PSM-SFA 两阶段模型的农业生产创新——来自北京市示范户与非示范户的实证》, 《北京理工大学学报(社会科学版)》第 6 期。
5. 葛继红、周曙东, 2012: 《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》, 《南京农业大学学报(社会科学版)》第 2 期。
6. 国鲁来, 2003: 《农业技术创新诱致的组织制度创新——农民专业协会在农业公共技术创新体系建设中的作用》, 《中国农村观察》第 5 期。
7. 黄祖辉、高钰玲, 2012: 《农民专业合作社服务功能的实现程度及其影响因素》, 《中国农村经济》第 7 期。
8. 李想、穆月英, 2013a: 《北方保护地菜农可持续生产行为分析》, 《中国人口·资源与环境》第 5 期。
9. 李想、穆月英, 2013b: 《农户可持续生产技术采用的关联效应及影响因素——基于辽宁设施蔬菜种植户的实证分析》, 《南京农业大学学报(社会科学版)》第 4 期。
10. 李南田、王磊、周伟强, 2002: 《意见领袖和农业技术传播》, 《农业科技管理》第 6 期。
11. 梁巧、黄祖辉, 2011: 《关于合作社研究的理论和分析框架: 一个综述》, 《经济学家》第 12 期。
12. 刘晓伟、张永超、姚石顺, 2017: 《建设工程项目施工阶段风险的评估与防范》, 《数学的实践与认识》第 24 期。
13. 罗建利、郭红东、贾甫等, 2015: 《农业技术创新体系中合作社的技术获取模式——基于扎根理论的研究》, 《管理案例研究与评论》第 2 期。
14. 吕杰、金雪、韩晓燕, 2016: 《农户采纳节水灌溉的经济及技术评价研究——以通辽市玉米生产为例》, 《干旱区资源与环境》第 10 期。
15. 潘劲, 2011: 《中国农民专业合作社: 数据背后的解读》, 《中国农村观察》第 6 期。
16. 王丽佳、霍喜喜, 2013: 《合作社成员与非成员交易成本比较分析——以陕西苹果种植户为例》, 《中国农村观察》第 3 期。

- 17.王世尧、金媛、韩会平, 2017:《环境友好型技术采用决策的经济分析——基于测土配方施肥技术的再考察》,《农业技术经济》第8期。
- 18.吴比、刘俊杰、徐雪高、张振, 2016:《农户组织化对农民技术采用的影响研究——基于11省1022个农户调查数据的实证分析》,《农业技术经济》第8期。
- 19.谢忠秋, 2015:《Cov-AHP:层次分析法的一种改进》,《数量经济技术经济研究》第8期。
- 20.徐志刚、吕开宇, 2018:《经营规模、地权期限与跨期农业技术采用——以秸秆直接还田为例》,《中国农村经济》第3期。
- 21.杨丽娟、张玉龙、须晖, 2003:《棚室蔬菜生产中灌溉技术研究进展》,《农业工程学报》第6期。
- 22.伊藤顺一、包宗顺、苏群, 2011:《农民专业合作社的经济效果分析——以南京市西瓜合作社为例》,《中国农村观察》第5期。
- 23.张珩、罗剑朝、郝一帆, 2017:《农村普惠金融发展水平及影响因素分析——基于陕西省107家农村信用社全机构数据的经验考察》,《中国农村经济》第1期。
- 24.张社梅、董杰、孙战利, 2016:《农业科技机构与合作社技术对接的程度分析——基于四川的调查》,《农业技术经济》第11期。
- 25.周应恒、胡凌啸, 2016:《中国农民专业合作社还能否实现“弱者的联合”?——基于中日实践的对比分析》,《中国农村经济》第6期。
- 26.Aldana U, Useche P., 2011, “Sequential Adoption of Package Technologies: The Dynamics of Stacked Trait Corn Adoption”, *American Journal of Agricultural Economics*, 93(1):130-143.
- 27.Battese G E, Rao D S P, O'Donnell C J., 2004, “A Metafrontier Production Function for Estimation of Technical Efficiencies and Technology Gaps for Firms Operating Under Different Technologies”, *Journal of Productivity Analysis*, 21(1):91-103.
- 28.Cai Q, Zhu Y, Chen Q, 2015, “Can social networks increase households' contribution to public-good provision in rural China?: The case of small hydraulic facilities construction”, *China Agricultural Economic Review*, 8(1):178-184.
- 29.Deng H, Huang J, Xu Z, et al., 2010, “Policy support and emerging farmer professional cooperatives in rural China”, *China Economic Review*, 21(4):495-507.
- 30.Huang C J, Huang T H, Liu N H., 2014, “A new approach to estimating the metafrontier production function based on a stochastic frontier framework”, *Journal of Productivity Analysis*, 42(3):241-254.
- 31.Ma W, Abdulai A, Goetz R., 2017, “Agricultural Cooperatives and Investment in Organic Soil Amendments and Chemical Fertilizer in China”, *American Journal of Agricultural Economics*, 100(2).
- 32.Naziri D, Aubert M, Codron J M, et al., 2014, “Estimating the Impact of Small-Scale Farmer Collective Action on Food Safety: The Case of Vegetables in Vietnam”, *Journal of Development Studies*, 50(5):715-730.
- 33.Noltze M, Schwarze S, Qaim M., 2013, “Impacts of natural resource management technologies on agricultural yield and household income: The system of rice intensification in Timor Leste”, *Ecological Economics*, 85(2):59-68.
- 34.O'Donnell C J, Rao D S P, Battese G E., 2008, “Metafrontier frameworks for the study of firm-level efficiencies and

technology ratios”, *Empirical Economics*, 34(2):231-255.

35. Yang H., 2013, “Farmer cooperatives as intermediaries for agricultural and rural development in China”, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 37(3):231-231.

(作者单位: ¹华南农业大学经济管理学院;

²中国农业大学经济管理学院)

(责任编辑: 高 鸣)

The Path Selection and Efficiency Increase Mechanism of Farmers' Adoption of Environmentally Friendly Technology: An Empirical Analysis

Dong Ying Mu Yueying

Abstract: Based on an analysis of the path selection and efficiency increase mechanism of farmers' adoption of environmentally friendly technology, this article constructs a Cov-AHP-MFA integrated technology efficiency evaluation model, and uses the survey data collected from 959 farmer households in the main facility vegetable production areas of Huang-Huai-Hai and Bohai Rim Region to conduct an empirical estimation and a comparative analysis. The main conclusions are as follows. First, farmers with different path selection of environmentally friendly technology adoption by themselves or service participation face different production frontiers; technology adoption intensity of farmers who participate in services provision has a significant "U" relationship with their production frontier. They have the potential to deepen the adoption of technology and expand frontier. Farmers who adopt technology by themselves rely on technology experience to mitigate the loss of technical inefficiency. Second, the marketing channels service based on environmentally-friendly technical advantages can significantly improve the TGR, but the purchase of relative technical goods or services reduces the farmers' TGR. Third, the comprehensive meta-frontier production efficiency of farmers who participate in services provision is 5.79% higher than farmers who adopt technology by themselves, where the technical skill diffusion under “learning by doing” and “the model effect” is the main mechanism to improve production efficiency.

Key Words: Environmentally Friendly Technology Adoption; Path Selection; Efficiency Increase Mechanism; Cov-AHP-MFA Model