

农户作物营养强化技术采纳提高了 生产绩效吗？*

——基于小麦种植户的实证分析

曾晶¹ 李剑² 青平² 闵师²

摘要：农户作物营养强化技术采纳能否提高生产绩效，是促进作物营养强化技术扩散，进而改善人口营养健康、推动高附加值农业发展面临的重要现实问题。本文以营养强化小麦为例，采用豫冀陇晋四省606份农户调研数据，同时考量生产、消费和微量营养素缺乏水平，利用内生转换模型实证探究农户作物营养强化技术采纳能否以及多大程度提高农户生产绩效。结果表明：第一，农户作物营养强化技术采纳能够显著提高农户生产绩效。具体而言，控制农户自选择偏误后，农户作物营养强化技术采纳分别提高了6.81%的小麦亩产以及14.84%的小麦亩收入。第二，农户作物营养强化技术采纳对生产绩效的影响存在一定的区域异质性。第三，农户作物营养强化技术采纳对不同受教育年限和不同种植面积农户生产绩效的提升作用存在差异。本研究为进一步推动中国作物营养强化项目实施提供政策参考。

关键词：作物营养强化 技术采纳 生产绩效 内生转换模型

中图分类号：F326.11 **文献标识码：**A

一、引言

作物营养强化（Biofortification）通过育种手段提高现有农作物中能为人体吸收利用的微量营养素的含量，是减少和预防微量营养素缺乏问题的新兴农业干预形式（范云六，2007；White and Broadley，2009；张春义和王磊，2009；王林洁等，2021）。自2004年中国引进作物营养强化项目以来，政府

*本研究是国家自然科学基金国际（地区）合作与交流项目“作物营养强化对改善人口营养健康影响及评估研究”（编号：71561147001）、湖南省教育厅优秀青年项目“‘健康中国’战略背景下功能食品产业发展研究”（编号：21B0450）以及华中农业大学自主科技创新基金“面向未来的新型食物系统构建及经济社会影响评估研究”（编号：2662021JC003）的阶段性研究成果。本文通讯作者：李剑。感谢中国农业科学院作物科学研究所何中虎研究员、张勇研究员对调研与数据收集的支持与帮助，感谢匿名审稿人提出的建设性修改意见，当然，文责自负。

等主体积极推动农户作物营养强化技术采纳，以改善人体健康、提高农业附加值和增加社会福利。然而，农户是理性个体，农户作物营养强化技术采纳能否提高其生产绩效，直接影响了农户作物营养强化技术采纳决策，进而影响作物营养强化项目的推广及高附加值农业的发展。因此，对作物营养强化技术采纳能否以及多大程度上提高农户生产绩效进行经验性评估，可为作物营养强化技术的推广提供重要参考。

现有关于农户作物营养强化技术采纳绩效的研究起步较晚，相关研究主要集中在探讨其健康效益和经济效益。例如，Vaiknoras and Larochelle（2021）以铁强化豆类品种 RWR2245 为例，使用控制函数方法评估了农户采纳铁强化豆类对大豆产量、大豆种植面积等的影响。结果表明，相较于传统豆类品种，RWR2245 提高了 20%~49% 的豆类产量，增加了 12% 的豆类销售概率，改善了购买富铁大豆家庭的营养状况。Mottaleb et al.（2019）应用事前影响评估框架分析发现，富锌小麦品种的产量比其他小麦品种高 5.2%。Mahboob et al.（2020）在巴基斯坦偏远农村地区开展随机对照试验，测试农村居民对富锌面粉的认识，探讨了当地居民对作物营养强化的认识和态度。结果表明，受访者阐述了获取和消费富锌面粉的动机，认为富锌面粉可带来营养健康改善，这提升了当地对富锌小麦的采纳意愿。

作物营养强化作为一项公共干预手段，其目的不仅仅包括改善全球营养不良状况，还旨在提高品种产量和耐受力，进而提升采纳者福利水平。考虑到不同区域人群微量营养素缺乏状况不同、特定作物营养强化品种的生产和消费潜力不同，已有研究通过判别作物营养强化优先序来实现作物营养强化技术推广的最大健康效益和社会福利（Asare-Marfo et al., 2013）。国内方面，曾晶等（2020）构建了富铁大米的中国区域级作物营养强化优先指数，通过测量大米（即稻谷或水稻）在中国 31 个省份的生产强度水平、消费强度水平以及铁微量营养素的缺乏程度，确定了富铁大米在这些省份推广的优先程度。这从宏观层面为农户作物营养强化技术采纳提供了潜在适宜性的事前评估和重要依据。

现有关于农户作物营养强化技术采纳及其绩效的研究存在以下局限：第一，农户作物营养强化技术采纳对农户生产绩效影响的研究，忽略了农户所在省份作物的生产水平、消费水平和微量营养素缺乏水平，而这三个因素直接影响甚至决定了农户作物营养强化技术采纳决策及其绩效；第二，农户作物营养强化技术采纳绩效的测算指标单一，大部分研究以产量作为衡量指标。本文的创新之处在于：第一，同时考量生产、消费强度和微量营养素缺乏水平等因素，通过作物营养强化优先指数判别农户所处省份处于何种优先区域，基于此探究农户作物营养强化技术采纳对农户生产绩效的影响，丰富了农户作物营养强化技术采纳的研究；第二，同时采用小麦亩产和亩收入两个指标衡量农户作物营养强化技术采纳的生产绩效，增强了结果的科学性和稳健性。

本文以营养强化小麦为例，将中国 31 个省份划分为最适宜区域、较适宜区域和一般适宜区域，对农户所在省份处于何种优先区域进行判别，基于此探究农户作物营养强化技术采纳对小麦亩产和亩收入的影响，并进一步根据优先区域比较分析农户作物营养强化技术采纳对其生产绩效影响的差异。为了解决农户采纳和不采纳作物营养强化技术时面临的因可观测因素和不可观测因素的系统性差异而产生的选择偏差问题，本文使用内生转换回归模型进行实证分析，并估计了农户作物营养强化技术采纳对农户生产绩效的直接边际效应和平均处理效应。实证结果为中国乃至全球其他国家制定作物营养

强化项目，推进农业高质量发展及改善国民营养健康提供政策参考。

本文章节安排如下：第二节测算作物营养强化优先指数，第三节介绍本文的理论框架和实证模型，第四节给出数据和描述性统计，第五节呈现了农户作物营养强化技术采纳对农户生产绩效影响的实证结果，并进一步分析了这种影响的异质性，第六节是本研究的结论和政策启示。

二、基于区域级作物营养强化优先指数判别作物营养强化优先区域

（一）区域级作物营养强化优先指数的测算

确定作物营养强化可能产生重大影响区域，不仅为企业、生产者、政府等作物营养强化投资干预主体提供了支撑性信息，还可通过有序有效干预实现有限资源的合理配置，实现成本效益最大化。曾晶等（2020）借鉴了 Asare-Marfo et al.（2013）的研究，基于中国 31 个省域的数据，构建了中国区域级作物营养强化优先指数（以下简称区域级 BPI），从适宜程度方面对各省域进行了作物营养强化投资干预优先顺序的判别，为在何地进行何种营养强化作物的干预提供了指导。本文借鉴 Asare-Marfo et al.（2013）和曾晶等（2020）的研究，将中国区域级作物营养强化优先指数界定为通过测量某一特定作物在某特定省域生产水平、消费强度以及与该作物相关的铁、维生素 A 等微量营养素的缺乏程度，确定该作物在某省域进行作物营养强化的优先程度。中国区域级 BPI 数值越高，表明该省推广该作物的适宜性越强。

考虑到作物营养强化干预省份需同时满足“有人生产”“有人消费”和“有人需要”的条件，本文首先计算了区域级 BPI 的三个子指数：生产指数、消费指数和微量营养素缺乏指数。其中，生产指数（ PI ）是衡量某一地区特定作物生产强度的指标， P_1 、 P_2 、 P_3 分别表示某省小麦的人均种植面积、该省小麦种植面积、该省粮食作物种植面积。消费指数（ CI ）是衡量某一地区人口对某一特定作物消费强度的指标，等于某省小麦人均消费量（ C_1 ）。生产指数、消费指数分别见（1）式和（2）式，其中，“*”表示标准化结果。本文采用 Min-Max 标准化方法，Min-Mmax 标准化公式为： $X^* = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 。

$$PI = \frac{P_1^* + (P_2 / P_3)^*}{2} \quad (1)$$

$$CI = C_1^* \quad (2)$$

微量营养素缺乏指数（ MI ）是衡量某一地区某种微量营养素缺乏程度的指标。考虑到数据可得性与完整性，本文将铁微量营养素缺乏指数纳入作物营养强化优先指数的计算。铁微量营养素缺乏指数等于各省贫血人口数（ P_a ）与该省人口总数（ P ）的比值，具体见（3）式。

$$MI = (P_a / P)^* \quad (3)$$

然后，本文采用几何平均测算区域级 BPI（称为未加权 BPI），公式具体见（4）式。考虑到各省

种植面积、人口、经济发展水平的差异可能直接影响作物营养强化能否精准定位，笔者进一步基于人口、经济 and 面积三个因素，分别计算得到人口加权 BPI、经济加权 BPI 和面积加权 BPI。加权 BPI 计算公式见 (5) 式，其中， W_i 表示权重^①。

$$BPI_{\text{未加权}} = 100 \times \sqrt{\sqrt{PI \times CI \times MI}} \quad (4)$$

$$BPI_i = 100 \times W_i^* \times BPI_{\text{未加权}}^* \quad (5)$$

人口规模、生产指数涉及变量以及各权重指标数据均来源于《中国统计年鉴（2018）》。小麦人均消费量采用了布瑞克农业数据库中 2012 年小麦的人均消费量，各省贫血人口数量来源于《中国居民营养与健康状况监测 2010—2013 年综合报告》。计算结果如表 1 所示。

表 1 营养强化小麦的未加权 BPI、加权 BPI 计算结果

排序	未加权		面积加权		人口加权		经济加权	
	省份	BPI 值	省份	BPI 值	省份	BPI 值	省份	BPI 值
1	甘肃	169.84	河南	348.47	山东	335.27	山东	319.99
2	山东	154.42	山东	303.63	河南	322.69	江苏	307.75
3	安徽	154.28	安徽	264.24	安徽	273.60	河南	259.52
4	河南	152.50	甘肃	226.82	江苏	269.07	广东	238.71
5	青海	152.31	江苏	223.69	河北	260.76	安徽	228.37
6	贵州	148.99	河北	221.83	甘肃	242.34	河北	214.77
7	江苏	141.09	新疆	186.43	四川	241.97	甘肃	214.00
8	河北	140.72	陕西	178.43	广东	238.79	湖北	202.92
9	新疆	140.04	青海	177.39	湖北	221.57	浙江	200.60
10	陕西	137.99	湖北	175.85	贵州	219.71	四川	195.68
11	湖北	133.70	贵州	173.65	陕西	202.07	贵州	192.48
12	海南	132.84	山西	156.02	湖南	194.27	陕西	188.31
13	山西	130.85	四川	155.31	江西	191.25	青海	176.63
14	四川	129.04	内蒙古	146.64	浙江	190.46	新疆	172.65
15	江西	127.42	海南	145.05	辽宁	187.73	辽宁	171.00
16	辽宁	127.26	云南	140.23	云南	186.84	上海	170.87
17	西藏	125.08	江西	137.34	山西	186.28	江西	166.02
18	天津	124.70	辽宁	136.85	新疆	186.09	湖南	165.94
19	云南	124.24	天津	135.49	青海	178.21	山西	164.99
20	内蒙古	123.50	西藏	134.44	内蒙古	157.77	天津	158.94
21	上海	121.55	浙江	130.01	海南	152.98	云南	154.86

^① 人口加权 BPI 的权重等于各省人口占全国人口总数的比值；面积加权 BPI 的权重等于各省的小麦种植面积占全国小麦种植面积的比值；经济加权 BPI 的权重等于各省地区生产总值占国内生产总值的比重。本文采用 Min-Max 标准化方法对权重进行标准化处理，并采用增加一个标准差的方式使权重的取值范围在 1 到 2 之间。

农户作物营养强化技术采纳提高了生产绩效吗？

22	浙江	121.16	宁夏	129.58	上海	152.97	内蒙古	153.16
23	宁夏	120.59	上海	128.75	黑龙江	152.07	海南	150.28
24	吉林	118.55	吉林	123.87	吉林	151.07	重庆	144.65
25	湖南	116.80	湖南	121.82	广西	150.77	吉林	142.96
26	重庆	115.99	重庆	120.64	重庆	150.39	北京	138.79
27	广东	115.55	广东	119.37	天津	147.98	福建	134.95
28	黑龙江	112.80	黑龙江	117.33	西藏	133.57	黑龙江	134.35
29	北京	106.93	北京	106.77	福建	133.04	西藏	133.58
30	广西	106.65	广西	106.21	宁夏	130.93	宁夏	129.97
31	福建	102.51	福建	100.01	北京	124.64	广西	126.86

(二) 作物营养强化优先区域判别

借鉴牛敏杰等（2016）和曾晶等（2020）的研究，笔者以未加权 BPI、人口加权 BPI、经济加权 BPI 和面积加权 BPI 得分值为样本，采用聚类分析将中国 31 个省份（不包含港澳台）划分成不同优先区域，包含最适宜区域，较适宜区域和一般适宜区域。如表 2 所示，营养强化小麦最适宜区域包括江苏、山东与河南，较适宜区域包括河北、甘肃等 9 个省（区），一般适宜区域包括山西等 19 个省（市、区）。通常而言，在同时考量营养强化小麦的生产、消费和改善微量营养素潜力的情况下，处于最适宜区域的农户种植营养强化小麦的必要性更高，实现营养强化小麦潜在健康效益的可能性更大。

表 2 营养强化小麦的优先区域划分

区域	省份个数	具体省份
I 区（最适宜区域）	3	江苏、山东、河南
II 区（较适宜区域）	9	河北、安徽、四川、湖北、贵州、甘肃、青海、陕西、新疆
III 区（一般适宜区域）	19	广东、浙江、黑龙江、广西、辽宁、海南、云南、重庆、吉林、福建、上海、山西、天津、内蒙古、北京、西藏、宁夏、湖南、江西

三、理论背景与模型设定

(一) 农户作物营养强化技术采纳对生产绩效影响的路径分析

根据图 1 中构建的农户作物营养强化技术采纳对生产绩效影响路径的分析框架，农户作物营养强化技术采纳主要通过两条途径影响小麦产量和亩收入。第一条路径集中在小麦的生产环节，即农户作物营养强化技术采纳通过提高新品种产量和减少产量损失来提高小麦产量（Mottaleb et al., 2019）。具体而言，一是通过育种手段和试验管理培育具有高产特性的营养强化作物品种（Mottaleb et al., 2019），使得营养强化作物品种的产量与普通作物品种的产量相当甚至更高（Muthusamy et al., 2014; Hossain et al., 2018; Vaiknoras and Larochelle, 2021）；二是通过提高营养强化作物品种的植物耐性，提高营养强化作物品种的气候灾害和病害应对能力，进而减少产量损失以提升营养强化作物品种的潜在产量（Mottaleb et al., 2019）。

第二条路径集中在小麦的销售环节，即通过价格或销量影响小麦亩收入。市场溢价或订单收购是促进作物营养强化技术采纳的主要激励方式（Yadava et al., 2018; Li et al., 2021）。一方面，通过市

场机制提高小麦售价。营养导向型农业需以市场需求为导向（陈志钢等，2019；王磊和张春义，2019）。通常而言，在相同情况下，高附加值农产品往往具有更高的售价。作为富含微量营养素和可改善人体营养健康的作物品种，营养强化小麦销售价格可能比普通小麦更高。另一方面，通过订单形式提高小麦销量。鉴于营养强化小麦的营养属性，部分地区以订单收购的方式扩展了营养强化小麦的销路（Shikuku et al., 2017；Li et al., 2021）。相较于普通小麦，营养强化小麦具有更好的市场前景，进而提升了农户作物营养强化技术采纳的收入。

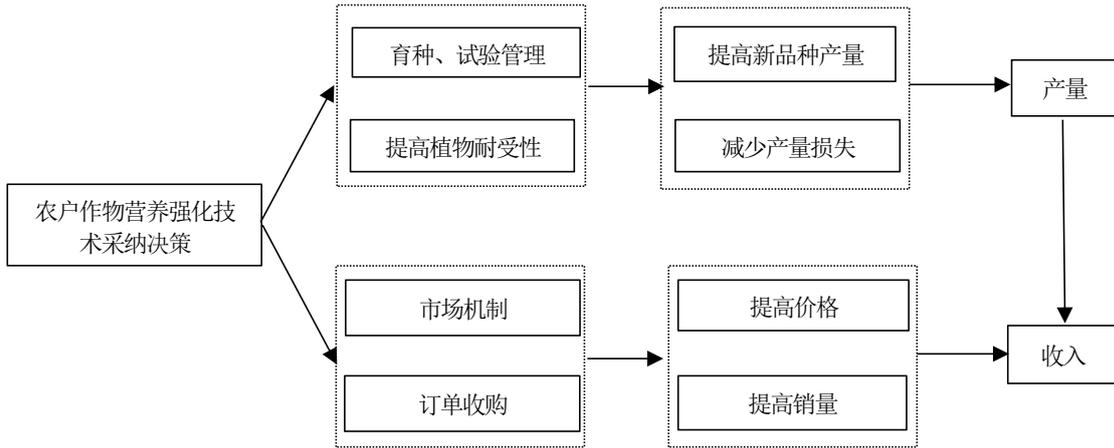


图1 农户作物营养强化技术采纳对生产绩效影响路径

综上所述，理论上农户采纳作物营养强化技术有助于提高小麦产量和收入，但这种影响有待进一步实证检验。本文以小麦种植户为例，采用内生转换回归模型，从产量和收入两方面分析农户作物营养强化技术采纳对生产绩效的影响以及这种影响的差异性。

（二）农户作物营养强化技术采纳对生产绩效影响的模型设定

农户通过权衡内外部条件进行生产决策以实现自身效用最大化（钟文晶等，2015）。本文基于已有研究（如 Abdulai and Huffman, 2014；Ma and Abdulai, 2016），采用随机效用框架分析农户作物营养强化技术采纳决策。假定农户 i 采纳营养强化技术所获得的潜在净收益为 A_i^* ， A_{ic}^* 为农户未采纳营养强化技术所获得的潜在净收益，农户采纳营养强化技术的条件是 $A_i^* - A_{ic}^* > 0$ ，即农户采纳营养强化技术所获得的净收益大于未采纳营养强化技术所获的净收益。 A_i^* 为无法被直接观测的潜变量，但可通过包含一系列可观测外生变量的函数来表示。因此，农户是否采纳营养强化技术的决策模型为：

$$A_i = \begin{cases} 1, & \text{如果 } A_i^* > 0 \\ 0, & \text{如果 } A_i^* \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

（6）式中， A_i 为农户是否采纳作物营养强化技术的决策， $A_i = 1$ 表示农户种植了营养强化小麦（称为“采纳农户”）， $A_i = 0$ 表示农户未种植营养强化小麦（称为“未采纳农户”）。因此，农户种植营养强化小麦对生产绩效影响的模型为：

$$Y_i = \beta X_i + \delta A_i + \varepsilon_i \quad (7)$$

其中， Y_i 为农户 i 的生产绩效， X_i 为外生变量，包括影响农户生产绩效的家庭特征、个人特征、经营特征及外部环境特征因素， β 、 δ 表示待估参数， ε_i 是随机扰动项。若农户被随机分配到采纳组与未采纳组，(7) 式中的参数 δ 可衡量农户采纳营养强化技术的效应。然而，农户是否采纳营养强化技术取决于农户对收益和成本的权衡，感知风险等不可观测因素同样影响农户营养强化技术采纳决策及其生产绩效，即存在样本自选择问题。

(7) 式中，农户作物营养强化技术采纳的决策变量 A_i 不能被视为外生变量，若使用最小二乘法估计，则结果有偏。倾向得分匹配法可以解决样本的选择性偏差问题，但该方法无法估计不可观测因素引起的遗漏变量内生性问题。因此，本文借鉴 Ma and Abdulai (2016)、杨志海等 (2017)、Takam-Fongang et al. (2019) 的研究，采用内生转换回归模型分析农户作物营养强化技术采纳的福利效应。采用该方法具有以下优势：第一，同时考量了可观测因素与不可观测因素的影响，解决了农户作物营养强化技术采纳的自选择问题和内生性问题；第二，分别对采纳农户组和未采纳农户组的生产绩效影响因素方程进行估计，考量各影响因素的差异化影响；第三，使用了全信息最大似然估计方法，可处理有效信息遗漏问题；第四，同时构建作物营养强化技术采纳组与未采纳组的农户样本配对，实现了反事实分析。

内生转换回归模型一般分两个阶段估计。首先，使用 Probit 模型或者 Logit 模型估计农户采纳作物营养强化技术的选择方程；然后，建立农户生产绩效决定方程，估计农户采纳营养强化技术导致的生产绩效水平变化。行为方程（是否采纳作物营养强化技术）为：

$$A_i = \lambda D_i + m I_i + \mu_i \quad (8)$$

其中， A_i 是二分类变量，表示农户是否采纳营养强化技术； I_i 为工具变量； μ_i 是误差项； D_i 表示影响农户作物营养强化技术采纳的因素。

采纳者的生产绩效方程为：

$$Y_{it} = \beta_t X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (9a)$$

未采纳者的生产绩效方程为：

$$Y_{ic} = \beta_c X_{ic} + \varepsilon_{ic} \quad (9b)$$

在 (9a) 式、(9b) 式中， Y_{it} 、 Y_{ic} 分别表示两个样本组的生产绩效， X_{it} 、 X_{ic} 表示影响生产绩效的因素， ε_{it} 、 ε_{ic} 为生产绩效的误差项。

(三) 农户作物营养强化技术采纳对生产绩效影响的处理效应评估

内生转换回归模型的估计结果提供了各影响因素对采纳与未采纳作物营养强化技术农户生产绩效的差异化影响。为了评估农户作物营养强化技术采纳对农户生产绩效的总体影响，需要采用内生转换

回归模型的估计参数，进一步运用反事实分析框架，将真实情景与反事实假设情景下农户采纳与未采纳营养强化技术的生产绩效期望值进行比较分析，以估计农户作物营养强化技术采纳对生产绩效影响的平均处理效应。因此，实际采纳作物营养强化技术的农户生产绩效的平均处理效应，即处理组的平均处理效应（ ATT ）为：

$$ATT_i = E[Y_{it} | A_i = 1] - E[Y_{ic} | A_i = 1] \quad (10)$$

未采纳作物营养强化技术的农户生产绩效的平均处理效应，即控制组的平均处理效应（ ATU ）为：

$$ATU_i = E[Y_{ic} | A_i = 0] - E[Y_{it} | A_i = 0] \quad (11)$$

本文将采用 ATT_i 、 ATU_i 的平均值检验农户作物营养强化技术采纳对农户生产绩效的平均处理效应。

四、数据来源与变量统计描述

（一）数据来源

本文数据来源于课题组 2020 年 7 月—8 月对河南、河北、甘肃和山西四省小麦种植户的调研。数据一共包括两部分，一部分是营养强化小麦种植户，另一部分是非营养强化小麦种植户（以下简称普通小麦种植户）。综合考量小麦种植的主要分布情况、营养强化小麦主要分布省份及这些省份营养强化小麦种植的区域与规模，笔者采用多层抽样与随机抽样相结合的方式，首先确定了河南三门峡市、河北高碑店市、甘肃平凉市、甘肃庆阳市、甘肃天水市以及山西平陆县和介休县作为调研市或县，然后在市或县分别随机抽取 2~4 个乡镇，每个乡镇随机 2~6 个村，每个村随机抽取 6~20 户小麦种植户，并保证每个村均有营养强化小麦种植户和普通小麦种植户^①。调研共回收问卷 672 份，剔除收入等变量有缺失值的样本后，有效样本 606 份，其中，营养强化小麦种植户样本数为 352 户，普通小麦种植户样本数为 254 户。调查收集了农户个体信息、家庭小麦种植的投入与产出信息等。

（二）变量定义

1.被解释变量：生产绩效。本文借鉴陈超和李道国（2004）、仇童伟和罗必良（2018）等的研究，选择小麦亩产和小麦亩收入衡量农户生产绩效。

2.关键解释变量：农户作物营养强化技术采纳。本文探讨的是农户作物营养强化技术采纳对生产绩效的影响，因此选择农户是否采纳作物营养强化技术作为关键解释变量。考虑到关键解释变量与被解释变量可能存在反向因果关系，后续回归考虑了内生性问题。

^① 本文以中麦 175 作为作物营养强化小麦的调研品种。中麦 175 由中国农业科学院作物科学研究所国家小麦改良中心培育，已在河北、山西、河南西部、甘肃等省份通过审定并推广，是当前缓解“隐性饥饿”问题的重要作物营养强化小麦品种（张春义和王磊，2009；何中虎等，2015）。

3.控制变量。借鉴施晟等（2012）、杨志海（2018）、冯晓龙等（2018）、尚燕等（2020）、曾晶等（2021）的研究，本文将年龄、性别、受教育年限等个人特征，种植面积、家庭劳动力人数等家庭特征，是否参与政府服务推广项目、是否参与小麦合作社、是否曾种植过营养强化小麦等经营特征和处于何种优先区域等外部环境特征作为控制变量。

4.工具变量：风险态度、农户对作物营养强化技术的信任和信念。本文认为，农户的风险态度、对农户作物营养强化技术的信任和信念会影响农户的技术采纳决策，但是不直接影响农户作物营养强化技术采纳的生产绩效。因此，本文选择“风险态度”、“信任”和“信念”作为工具变量。其中，农户对作物营养强化技术采纳的信念的测量题项包括4个，分别为：①营养强化小麦可以改善土壤质量；②营养强化小麦可以提高人体健康；③营养强化小麦可以提高亩产；④营养强化小麦有利于整个社会福利的提升。农户对作物营养强化技术采纳的的信任的测量题项共6个，分别为：①我相信作物营养强化技术；②我相信营养强化小麦富含营养；③我相信营养强化小麦有好的产量；④我相信营养强化小麦有市场前景；⑤我相信作物营养强化可以改善人体健康；⑥我相信营养强化小麦有好的口味。为了验证结果的稳健性，本文增加了合法性感知作为替代工具变量。合法性感知从法律支持、政府支持两个方面测量，具体测量题项为：①政府应该积极推广营养强化小麦；②政府应该颁布法律保障营养强化小麦推广。信念、信任、合法性感知均采用了李克特五分量表测量，“1”表示完全不同意，“2”表示比较不同意，“3”表示一般，“4”表示比较同意，“5”表示非常同意。

表3 变量定义及描述性统计

变量	定义及其赋值	均值	标准差
被解释变量			
小麦亩产	每亩小麦产量（单位：斤/亩）	893.9658	238.0467
小麦亩收入	小麦价格与每亩小麦销量的乘积（单位：元/亩）	968.4213	410.3588
关键解释变量			
农户作物营养强化技术采纳	农户种植营养强化小麦=1，农户未种植营养强化小麦（种植普通小麦）=0	0.5809	0.4938
个人特征			
年龄	调研时农户年龄（单位：岁）	54.2574	10.1790
性别	男=1，女=2	1.2327	0.4229
受教育年限	农户接受教育的年数（单位：年）	7.9455	3.2497
家庭特征			
种植面积	小麦种植面积（单位：亩）	6.5693	9.7808
家庭劳动力人数	具有劳动能力的家庭成员人数	2.8366	1.1845
经营特征			
是否参加政府服务推广项目	近年来农户参加了政府针对小麦的服务推广项目=1，农户未参加政府针对小麦的服务推广项目=0	0.4191	0.6106
是否参与合作社	农户参加了小麦合作社=1，农户未参加小麦合作社=0	0.6930	0.2542
是否种植过营养强化小麦	农户曾经种植过营养强化小麦=1，农户未种植过	0.7607	0.4270

农户作物营养强化技术采纳提高了生产绩效吗？

		营养强化小麦=0	
外部环境特征			
最适宜区域	农户所在家庭属于I区=1, 不属于I区=0	0.2046	0.4038
较适宜区域	农户所在家庭属于II区=1, 不属于II区=0	0.4802	0.5000
一般适宜区域	农户所在家庭属于III区=1, 不属于III区=0	0.3152	0.4650
工具变量			
风险态度	农户可接受新品种种植带来的风险=1, 农户不愿承担新品种种植带来的风险=0	0.4389	0.4967
信念	信念测量题项得分的均值	3.7558	0.6839
信任	信任测量题项得分的均值	3.9200	0.7013

(三) 描述性统计

表 3 给出了各变量的定义和描述性统计。结果表明，种植营养强化小麦的农户约占全部农户的 58.09%，76.07%的农户曾经种植过营养强化小麦。农户的平均年龄约为 54.26 岁，平均受教育年限约为 7.95 年，小麦平均种植面积为 6.57 亩。

表 4 变量组间差异

变量	种植强化小麦农户组	种植普通小麦农户组	差异	t 值
亩产	926.3162 (236.1151)	849.133 (233.8525)	-77.1823***	-3.9865
亩收入	1046.982 (426.7779)	859.549 (359.8664)	187.4333***	-5.6900
年龄	53.2443 (10.4697)	55.6614 (9.6067)	2.4171**	2.9019
性别	1.2585 (0.4384)	1.1969 (0.3984)	-0.0617*	-1.7746
受教育年限	8.1534 (3.2563)	7.6575 (3.2249)	-0.4959*	-1.8574
种植面积	6.1835 (6.2837)	7.1039 (13.1716)	0.9204	1.1433
家庭劳动力人数	2.8892 (1.1605)	2.7638 (1.2156)	-0.1254	-1.2869
是否参加政府服务推广项目	0.4915 (0.6493)	0.3189 (0.5378)	-0.1726***	-3.4644
是否参与合作社	0.0909 (0.2879)	0.0394 (0.1949)	-0.0515**	-2.4732
是否种植过营养强化小麦	0.9716 (0.1664)	0.4685 (0.5000)	-0.5031***	-17.5816
最适宜区域	0.1676 (0.3741)	0.2559 (0.4372)	0.0883**	2.6696
较适宜区域	0.5597 (0.4971)	0.3701 (0.4838)	-0.1896***	-4.6843
一般适宜区域	0.2727 (0.4460)	0.3740 (0.4848)	0.1013**	2.6592
风险态度	0.4915 (0.5006)	0.3661 (0.4827)	-0.1253**	-3.0867
信念	3.7841 (0.7025)	3.7165 (0.6566)	-0.0676	-1.2002
信任	3.9332 (0.6840)	3.9016 (0.7256)	-0.0317	-0.5480

注：①括号内为标准差；②***、**、*分别表示 1%、5%和 10%的显著性水平。

表 4 呈现了采纳营养强化技术农户组和未采纳营养强化技术农户组的各变量是否存在显著差异。两组在年龄、性别、受教育年限、是否参加政府服务推广项目、是否参与合作社、风险态度和是否种植过营养强化小麦等方面存在显著差异。相较于种植普通小麦的农户，受教育年限更长、参与了合作社、种植过营养强化小麦的农户更可能采纳营养强化技术。

五、估计结果分析

（一）农户作物营养强化技术采纳对小麦亩产的影响

表 5 呈现了农户作物营养强化技术采纳对小麦亩产的影响。rho_1、rho_2 分别表示作物营养强化技术采纳决策模型和采纳者的小麦亩产模型、未采纳者的小麦亩产模型误差项的相关系数。结果表明，rho_1、rho_2 均在 1% 的统计水平上显著，说明样本存在自选择问题，若不纠正将导致估计结果有偏。rho_1 的估计值为负，说明采纳作物营养强化技术农户的亩产高于样本农户中随机个体的亩产；rho_2 的估计值为正，说明未采纳作物营养强化技术农户的亩产低于样本农户的亩产（Lokshin and Sajaia, 2004; Ma and Abdulai, 2016）。这一结论从侧面说明种植营养强化小麦可提高小麦亩产。由表 5 可知，农户年龄越小、小麦种植面积越小、未参加政府服务推广项目、处于较适宜区域、种植过营养强化小麦、存在风险感知的农户更可能采纳作物营养强化技术。农户年龄对种植营养强化小麦农户和种植普通小麦农户的亩产均有显著的影响。

表 5 农户作物营养强化技术采纳对小麦亩产影响的估计

变量	选择方程		生产绩效模型			
			种植强化小麦农户组		种植普通小麦农户组	
	系数	标准误	系数	标准误	系数	标准误
年龄	-0.0120**	0.0051	2.3583*	1.4244	-4.0723**	1.9212
种植面积	-0.0138*	0.0073	2.9407	2.2002	1.4156	1.6834
家庭劳动力人数	0.0619	0.0431	16.7329	12.1781	42.1094**	15.6884
是否参加政府服务推广项目	-0.1488*	0.0790	26.2663	23.3651	-34.1657	29.6689
是否种植过营养强化小麦	0.2659**	0.1158	-64.7499*	33.5574	55.8117	42.7497
最适宜区域	-0.0878	0.1425	-217.3535***	42.1720	-154.1298**	51.0511
较适宜区域	0.3481**	0.1156	-129.785***	32.3593	37.5056	44.7400
风险态度	0.1781**	0.0603				
信念	0.0739	0.0643				
信任	-0.0796	0.0582				
常数项	-0.2228	0.4400	1049.492***	114.7966	1192.578***	149.0191
rho_1			-1.3431***	0.1658		
ln σ_1			5.6752***	0.0583		
rho_2					2.0694***	0.2238
ln σ_2					5.9001***	0.0654
LR	24.30***					
Log likelihood	-4506.6757					
样本量	606		352		254	

注：① ***、**、* 分别表示 1%、5% 和 10% 的显著性水平；② 采用 Hansen 检验进行了工具变量有效性检验，p 值为 0.1527，表明工具变量有效；③ 仅显示显著的控制变量，未在表中呈现的控制变量有：性别、受教育年限、是否参加

合作社。

(二) 农户作物营养强化技术采纳对小麦亩收入的影响

表 6 呈现了农户作物营养强化技术采纳对小麦亩收入的影响。rho_1 在 1% 的统计水平上显著且为负，表明作物营养强化技术采纳农户的亩收入高于样本农户中随机个体的亩收入 (Lokshin and Sajaia, 2004; Ma and Abdulai, 2016)。由表 6 可知，农户年龄、性别、受教育年限、是否参加政府服务推广项目、处于较适宜区域、是否种植营养强化小麦和风险态度显著影响农户作物营养强化技术采纳决策。是否参加合作社对作物营养强化技术采纳者的亩收入有显著的积极影响，表明在其他条件不变的情况下，参加合作社可以提高小麦亩收入。其原因可能在于参加小麦有关的合作社可以提高农户的议价能力，开阔市场销路，尤其对于种植营养强化小麦的农户，合作社可以整合资源，提高营养强化小麦的竞争力。

表 6 农户作物营养强化技术采纳对小麦亩收入影响的估计

变量	选择方程		生产绩效模型			
			种植强化小麦农户组		种植普通小麦农户组	
	系数	标准误	系数	标准误	系数	标准误
年龄	-0.0147**	0.0056	0.0032	0.0021	-0.0039	0.0029
性别	0.2187*	0.1301	-0.0240	0.0483	-0.0166	0.0645
受教育年限	0.0303*	0.0168	-0.0040	0.0065	0.0048	0.0080
家庭劳动力人数	0.0361	0.0465	0.0220	0.0181	0.0356*	0.0213
是否参加政府服务推广项目	-0.1758**	0.0844	0.0286	0.0345	0.0320	0.0411
是否参加合作社	-0.0311	0.2190	0.1945**	0.0880	-0.0236	0.0928
是否种植过营养强化小麦	0.3038**	0.1253	-0.0671	0.0503	-0.0117	0.0606
最适宜区域	0.0427	0.1572	-0.2689***	0.0642	-0.1882**	0.0684
较适宜区域	0.5007***	0.1228	-0.1364**	0.0488	-0.1624**	0.0701
风险态度	0.1404*	0.0894				
信念	0.1592	0.0854				
信任	-0.1229	0.0867				
常数项	-0.1202	0.5072	7.1243***	0.1724	6.9453***	0.2195
rho_1			-1.3484***	0.1397		
ln σ_1			-0.8666***	0.0542		
rho_2					-0.0421	0.3312
ln σ_2					-1.0047***	0.0470
LR	23.69***					
Log likelihood	-549.9294					
样本量	606		352		254	

注：①小麦亩收入以对数形式纳入回归；②***、**、*分别表示 1%、5%和 10%的显著性水平；③采用 Hansen 检验进行了工具变量有效性检验，p 值为 0.1752，表明工具变量有效；④仅显示显著的控制变量，未在表中呈现的控制

变量有：种植面积。

（三）农户作物营养强化技术采纳对生产绩效影响的平均处理效应分析

农户作物营养强化技术采纳对采纳组农户生产绩效影响的平均处理效应（ATT）见表 7。与表 4 中的均值差异不同，表 7 中的平均处理效应考虑了可观察特征和不可观察特征引起的选择偏差。结果表明，农户作物营养强化技术采纳显著提高了 6.81% 的小麦亩产，提高了 14.84% 的小麦亩收入。表 7 的结果表明，种植营养强化小麦在提高小麦产量和农民收入方面发挥着重要作用。

表 7 农户作物营养强化技术采纳对生产绩效影响的平均处理效应

	种植强化小麦农户组	种植普通小麦农户组	ATT	t 值	变化率 (%)
小麦亩产	926.1063	867.0940	59.0123**	2.18	6.81
小麦亩收入	1046.6605	911.3818	135.2787***	3.03	14.84

注：***、**分别表示 1%、5% 的显著性水平。

（四）农户作物营养强化技术采纳对生产绩效影响的异质性分析

1. 基于个体特征的异质性分析。本文进一步分析了农户作物营养强化技术采纳对不同受教育年限和不同小麦种植规模农户的生产绩效的影响。如表 8 所示，对不同受教育年限和不同小麦种植面积的农户，作物营养强化技术采纳会显著影响农户小麦亩收入。当受教育年限和种植面积不高于均值时，农户种植营养强化小麦可分别提高 28.33%、25.23% 的小麦亩收入；当农户受教育年限和种植面积高于均值水平时，农户种植营养强化小麦可分别提高 14.86%、21.37% 的小麦亩收入。对不同受教育年限的农户而言，当受教育年限大于均值时，农户作物营养强化技术采纳可显著提高 9.47% 的小麦亩产。对不同小麦种植面积的农户而言，当种植面积不高于均值时，农户作物营养强化技术采纳可显著提高 7.57% 的小麦亩产。总体而言，农户作物营养强化技术采纳可以提升农户生产绩效，且对不同受教育水平和小麦种植面积的农户的影响存在差异。在产量方面，农户作物营养强化技术采纳对受教育水平低于均值和种植面积高于均值农户的生产绩效存在显著影响。就收入而言，农户作物营养强化技术采纳对不同小麦种植面积和受教育年限农户的生产绩效均有显著的提升作用。

表 8 不同特征农户作物营养强化技术采纳对生产绩效影响的异质性分析

		平均产出		ATT	t 值	变化率 (%)
		种植强化小麦农户组	种植普通小麦农户组			
农户受教育年限						
小麦亩产	受教育年限小于等于均值	918.6842	871.9298	46.7544	1.09	5.36
	受教育年限大于均值	928.6893	848.3761	80.3132**	2.16	9.47
小麦亩收入	受教育年限小于等于均值	1040.7895	811.0088	229.7807***	3.34	28.33
	受教育年限大于均值	1048.4557	912.8141	135.6416**	2.11	14.86
小麦种植规模						
小麦亩产	种植面积小于等于均值	934.3319	867.8599	66.4720*	1.82	7.57
小麦亩产	种植面积大于均值	899.3407	857.1429	42.1978	0.82	4.92
小麦亩收入	种植面积小于等于均值	1048.1744	836.9669	211.2075***	3.33	25.23

农户作物营养强化技术采纳提高了生产绩效吗？

亩收入	种植面积大于均值	1043.7579	859.9632	183.7947***	2.72	21.37
-----	----------	-----------	----------	-------------	------	-------

注：***、**、*分别表示 1%、5%和 10%的显著性水平。

2.基于不同优先区域的异质性分析。如表 9 所示，无论对于最适宜区域、较适宜区域还是一般适宜区域的农户，农户作物营养强化技术采纳对小麦亩产、小麦亩收入均存在显著的影响。具体而言，在亩产方面，一般适宜区域的农户作物营养强化技术采纳提高了 12.87%的小麦亩产，最适宜区域次之，提高幅度为 8.84%，较适宜区域的农户作物营养强化技术采纳提高了 6.12%的小麦亩产。在亩收入方面，最适宜区域、较适宜区域和一般适宜区域的农户作物营养强化技术采纳分别提高了 16.71%、14.83%、25.70%的小麦亩收入。

表 9 农户作物营养强化技术采纳对生产绩效影响的异区域质性分析

优先序		平均产出		ATT	t 值	变化率 (%)
		种植强化小麦农户组	种植普通小麦农户组			
小麦 亩产	最适宜区域	926.1063	850.8547	75.2516***	2.98	8.84
	较适宜区域	926.1063	872.6781	53.4282*	1.93	6.12
	一般适宜区域	926.1063	820.4843	105.6219***	3.92	12.87
小麦 亩收 入	最适宜区域	1046.9825	897.0767	149.9058***	3.40	16.71
	较适宜区域	1046.9825	913.5241	133.4583***	2.86	14.83
	一般适宜区域	1046.9825	832.8977	214.0847***	4.64	25.70

注：***、*分别表示 1%、10%的显著性水平。

总结而言，农户作物营养强化技术采纳对一般适宜区域的生产绩效提升作用最为明显，最适宜区域次之，较适宜区域作用最小。这表明农户作物营养强化技术采纳对生产绩效的影响存在一定的区域异质性。这种影响的异质性在现实中可表现为最适宜区域农户作物营养强化技术采纳对生产绩效的提升作用未必最为显著。造成这一现象的原因可能是最适宜区域营养强化小麦的推广程度较高，影响其促进作用的发挥。

(五) 稳健性检验

本文采用合法性感知和风险态度作为替代工具变量进行稳健性检验。表 10、表 11 分别呈现了农户作物营养强化技术采纳对小麦亩产、小麦亩收入影响的稳健性检验。由这两个表可知，农户作物营养强化技术采纳对小麦亩产和小麦亩收入影响的估计结果具有稳健性。根据不同模型的 rho_1 和 rho_2 的显著性以及系数正负情况，农户作物营养强化技术采纳对小麦亩产、小麦亩收入的影响均存在样本选择偏差，且种植营养强化小麦组农户的小麦亩产、小麦亩收入均比样本农户中随机个体的小麦亩产、小麦亩收入高。根据 ATT 的结果，农户作物营养强化技术采纳显著提高了小麦亩产和小麦亩收入。稳健性检验的结果与已有结论基本相符。

表 10 农户作物营养强化技术采纳对小麦亩产影响的估计

变量	选择方程		生产绩效模型			
			种植强化小麦农户组		种植普通小麦农户组	
	系数	标准误	系数	标准误	系数	标准误

农户作物营养强化技术采纳提高了生产绩效吗？

年龄	-0.0112**	0.0054	2.3257	1.4396	-1.3985	1.7275
种植面积	-0.0066	0.0060	1.3436	2.0377	2.0288*	1.1561
家庭劳动力人数	0.0504	0.0447	17.8567	12.2758	29.7500**	12.6284
是否参加政府服务推广项目	-0.1726**	0.0831	33.9587	23.8197	15.7848	25.0006
是否种植过营养强化小麦	0.3170**	0.1213	-72.3257**	34.0984	-23.1670	38.3891
最适宜区域	-0.0452	0.1486	-221.4709***	42.6505	-155.4458***	38.2983
较适宜区域	0.5145***	0.1195	-150.9813***	32.8484	-131.8409**	48.6209
合法性感知	-0.0828*	0.0497				
风险态度	0.1183	0.0891				
常数项	0.3411	0.4684	1088.694***	116.6484	927.4944***	146.521
rho_1			-0.8736***	0.0380		
lnσ ₁			5.6728***	0.0572		
rho_2					-0.0640	0.4768
lnσ ₂					5.3985***	0.0487
LR	14.26***					
Log likelihood	-4511.8946					
ATT	3.18***					
样本量	606		352		254	

注：① ***、**、*分别表示 1%、5%和 10%的显著性水平；②仅显示显著的控制变量，未在表中呈现的控制变量有：性别、受教育年限、是否参加合作社。

表 11 农户作物营养强化技术采纳对小麦亩收入影响的估计

变量	选择方程		生产绩效模型			
			种植强化小麦农户组		种植普通小麦农户组	
	系数	标准误	系数	标准误	系数	标准误
年龄	-0.0138**	0.0056	0.0031	0.0021	-0.0037	0.0029
受教育年限	0.0328*	0.0167	-0.0042	0.0065	0.0045	0.0079
家庭劳动力人数	0.0347	0.0459	0.0210	0.0181	0.0352*	0.0211
是否参加政府服务推广项目	-0.1805**	0.0844	0.0319	0.0347	0.0332	0.0402
是否参加合作社	-0.1064	0.2171	0.1801**	0.0879	-0.0214	0.0932
是否种植过营养强化小麦	0.3241**	0.1250	-0.0679	0.0504	-0.0148	0.0591
最适宜区域	0.0510	0.1564	-0.2624***	0.0642	-0.1896**	0.0686
较适宜区域	0.5454***	0.1230	-0.1366**	0.0489	-0.1680**	0.0667
合法性感知	-0.1087**	0.0524				
风险态度	0.1495*	0.0883				
常数项	0.4093	0.4910	7.1413***	0.1729	6.9312***	0.2153
rho_1			-0.8778***	0.0322		

农户作物营养强化技术采纳提高了生产绩效吗？

$\ln\sigma_1$		-0.8630***	0.0541		
rho_2				-0.0850	0.2695
$\ln\sigma_2$				-1.0029***	0.0486
LR	24.83***				
Log likelihood	-549.5242				
ATT	3.77***				
样本量	606	352	254		

注：①小麦亩收入以对数形式纳入回归；②***、**、*分别表示 1%、5%和 10%的显著性水平；③仅显示显著的控制变量，未在表中呈现的控制变量有：性别、种植面积。

六、结论与政策启示

本文以营养强化小麦为例，采用内生转换回归模型，利用中国 606 个小麦种植户家庭的调查数据，研究了农户作物营养强化技术采纳对小麦亩产和小麦亩收入的影响。研究表明：第一，农户作物营养强化技术采纳对生产绩效有显著的提升作用。种植营养强化小麦的农户的小麦亩产、小麦亩均收入均高于样本农户中随机个体的小麦亩产和小麦亩收入，农户作物营养强化技术采纳分别显著地提高了 6.81% 的小麦亩产、14.84% 的小麦亩收入。第二，农户作物营养强化技术采纳对农户生产绩效的影响存在区域异质性。农户作物营养强化技术采纳对小麦亩产和小麦亩收入的提升作用基本呈现“一般适宜区域最为明显，最适宜区域次之，较适宜区域最小”的特征，农户作物营养强化技术采纳对一般适宜区域的生产绩效提升作用最为明显。第三，农户年龄、是否参加政府服务推广项目、是否种植过营养强化小麦以及区域变量对农户作物营养强化技术采纳决策有显著的影响。第四，农户作物营养强化技术采纳对不同受教育年限和不同种植规模农户的生产绩效的影响存在差异。

基于上述研究结果，本文得到如下政策启示：

第一，明确战略定位，以作物营养强化项目推动营养导向型农业发展。战略上要明确作物营养强化的发展定位；技术上要培育高产和高营养价值兼备的营养强化作物品种；发挥政府与市场的双重作用，采用订单农业形式，推动作物营养强化产业化发展。

第二，因地制宜，提升不同区域作物营养强化技术采纳农户的持续生产能力。一是根据不同区域土壤特性改良营养强化作物品种，提高营养强化作物产量；二是鼓励农户扩大营养强化品种种植面积，将先进的生产和管理技术应用到营养强化作物品种的种植过程中。

第三，多措并举，提高推广项目的效果和推广效率。一是站在农户视角“想农户之所想”，主动入户、实地指导解决农户作物营养强化技术采纳过程中遇到的难题。二是优化和创新政府开展作物营养强化技术推广模式和服务方式，如采用“线上+线下”相结合的方式，提高农户参加政府服务推广项目的积极性。

第四，创新驱动，推动作物营养强化技术推广的数字化信息平台建设。一是依靠现代信息技术，收集和分析农户对作物营养强化技术的偏好与需求。二是以区域为单位构建包含营养强化作物品种的生产和消费数据库，辅以作物营养强化优先序数据，预测未来不同区域作物营养强化技术推广的必要

性和可能性。

参考文献

1. 陈超、李道国, 2004: 《品种权保护对农户增收的影响分析》, 《中国农村经济》第9期, 第38-42页、第48页。
2. 常继乐、王宇, 2016: 《中国居民营养与健康状况监测2010—2013年综合报告》, 北京: 北京大学医学出版社, 第83-87页。
3. 陈志钢、毕洁颖、聂凤英、方向明、樊胜根, 2019: 《营养导向型的中国食品安全新愿景及政策建议》, 《中国农业科学》第18期, 第3097-3107页。
4. 冯晓龙、刘明月、仇焕广、霍学喜, 2018: 《资产专用性与专业农户气候变化适应性生产行为——基于苹果种植户的微观证据》, 《中国农村观察》第4期, 第74-85页。
5. 范云六, 2007: 《以生物强化应对隐性饥饿》, 《科技导报》第11期, 第1页。
6. 何中虎、陈新民、王德森、张艳、肖永贵、李法计、张勇、李思敏、夏先春, 2015: 《中麦175高产高效广适特性解析与育种方法思考》, 《中国农业科学》第17期, 第3394-3403页。
7. 牛敏杰、赵俊伟、尹昌斌、唐华俊, 2016: 《我国农业生态文明水平评价及空间分异研究》, 《农业经济问题》第3期, 第17-25页。
8. 仇童伟、罗必良, 2018: 《种植结构“趋粮化”的动因何在? ——基于农地产权与要素配置的作用机理及实证研究》, 《中国农村经济》第2期, 第65-80页。
9. 青平、曾晶、李剑、游良志, 2019: 《中国作物营养强化的现状与展望》, 《农业经济问题》第8期, 第83-93页。
10. 施晟、卫龙宝、伍骏骞, 2012: 《“农超对接”进程中农产品供应链的合作绩效与剩余分配——基于“农户+合作社+超市”模式的分析》, 《中国农村观察》第4期, 第14-28页、第92-93页。
11. 尚燕、熊涛、李崇光, 2020: 《风险感知、风险态度与农户风险管理工具采纳意愿——以农业保险和“保险+期货”为例》, 《中国农村观察》第5期, 第52-72页。
12. 王磊、张春义, 2019: 《营养型农业的发展背景及进展》, 《生物产业技术》第6期, 第59-63页。
13. 王林洁、李剑、罗小锋、青平, 2021: 《营养认知、产品信任与营养型食品支付意愿》, 《世界农业》第5期, 第53-63页、第127页。
14. 杨志海, 2018: 《老龄化、社会网络与农户绿色生产技术采纳行为——来自长江流域六省农户数据的验证》, 《中国农村观察》第4期, 第44-58页。
15. 杨志海, 2019: 《生产环节外包改善了农户福利吗? ——来自长江流域水稻种植农户的证据》, 《中国农村经济》第4期, 第73-91页。
16. 张春义、王磊, 2009: 《生物强化在中国: 培育新品种, 提供好营养》, 北京: 中国农业科学技术出版社, 第10页、第22-23页。
17. 曾晶、青平、霍军生、李剑、游良志, 2020: 《基于区域级BPI的中国作物营养强化优先序——以富铁大米为

例》，《农业技术经济》第10期，第4-20页。

18. 曾晶、青平、李剑、郭喆，2021：《营养信息干预对农户作物营养强化新品种采纳的影响》，《华中农业大学学报（社会科学版）》第3期，第30-38页、第184页。

19. 钟文晶、邹宝玲、罗必良，2018：《食品安全与农户生产技术行为选择》，《农业技术经济》第3期，第16-27页。

20. Abdulai, A., and W. Huffman, 2014, "The Adoption and Impact of Soil and Water Conservation Technology: An Endogenous Switching Regression Application", *Land Economics*, 90(1):26-43.

21. Asare-Marfo, D., E. Birol, C. Gonzalez, M. Moursi, S. Perez, J. Schwarz, and M. Zeller, 2013, "Prioritizing Countries for Biofortification Interventions Using Country-level Data", HarvestPlus Working Paper No.11. Washington, DC.

22. Hossain, F., V. Muthusamy, N. Pandey, A. K. Vishwakarma, A. Baveja, R. U. Zunjare, N. Thirunavukkarasu, S. Saha, K. M. Manjaiah, B. M. Prasanna, and H. S. Gupta, 2018, "Marker-assisted Introgression of Opaque2 Allele for Rapid Conversion of Elite Hybrids into Quality Protein Maize", *Journal of Genetics*, 97:287-98.

23. Li, J., P. Qing, W. Y. Hu, and M. L. Li, 2021, "Contract Farming, Community effect and Farmer Valuation of Biofortified Crop Varieties in China: The Case of High Zinc Wheat", *Review of Development Economics*, 00:1-21.

24. Lokshin, M., and Z. Sajaia, 2004, "Maximum Likelihood Estimation of Endogenous Switching Regression Models", *The Stata Journal*, 4(3):282-289.

25. Ma, W., and A. Abdulai, 2016, "Does Cooperative Membership Improve Household Welfare? Evidence from Apple Farmers in China", *Food Policy*, 58:94-102.

26. Ma, W., and A. Abdulai, 2019, "IPM Adoption, Cooperative Membership and Farm Economic Performance Insight from Apple Farmers in China", *China Agricultural Economic Review*, 11(2): 218-236.

27. Mahboob, U., H. Ohly, E. Joy, V. Moran, and N. M. Lowe, 2020, "Exploring Community Perceptions in Preparation for a Randomised Controlled Trial of Biofortified Flour in Pakistan", *Pilot and Feasibility Studies*, 6(1):117.

28. Mottaleb, K., A., V. Govindan, P. K. Singh, S. Kai, and O. Erenstein, 2019, "Economic Benefits of Blast-resistant Biofortified Wheat in Bangladesh: The Case of BARI Gom 33", *Crop Protection*, 123:45-58.

29. Muthusamy, V., F. Hossain, N. Thirunavukkarasu, M. Choudhary, S. Saha, J. S. Bhat, B. M. Prasanna, and H. S. Gupta, 2014, "Development of β -carotene Rich Maize Hybrids through Marker-assisted Introgression of β -carotene Hydroxylase Allele", *Plos One*, 9(12): e113583.

30. Shikuku, K. M., J. J. Okello, K. Sindi, J. Low, and M. Mcewan, 2017, "Effect of Farmers' Multidimensional Beliefs on Adoption of Biofortified Crops: Evidence from Sweetpotato Farmers in Tanzania", *Journal of Development Studies*, 55(2):1-16.

31. Takam-Fongang, G. M., C. B. Kamdem, and G. Q. Kane, 2019, "Adoption and Impact of Improved Maize Varieties on Maize Yields: Evidence from Central Cameroon", *Review of Development Economics*, 23(1):172-188.

32. Yadava, D., K., F. Hossain, and T. Mohapatra, 2018, "Nutritional Security through Crop Biofortification in India: Status & Future Prospects", *The Indian Journal of Medical Research*, 148(5): 621-631.

33. Vaiknoras, K., and C. Larochelle, 2021, "The Impact of Iron-biofortified Bean Adoption on Bean Productivity,

Consumption, Purchases and Sales”, *World Development*, 139:105260.

34. White, P. J., and M. R. Broadley, 2009, “Biofortification of Crops with Seven Mineral Elements often Lacking in Human Diets-iron, Zinc, Copper, Calcium, Magnesium, Selenium and Iodine”, *New Phytologist*, 182(1): 49-84.

(作者单位：湖南科技大学商学院工商管理系
华中农业大学经济管理学院)

(责任编辑：光明)

Does Farmers’ Adoption of Biofortification Crop Technologies Improve Production Performance? An Empirical Analysis Based on Wheat Growers

ZENG Jing LI Jian QING Ping MIN Shi

Abstract: Whether farmers' adoption of biofortification crop technologies can improve production performance is an important practical issue for promoting the diffusion of biofortification crop technologies, improving population nutrition and health and developing high value-added agriculture. Taking biofortified wheat as an example, this article uses 606 household survey data from Henan, Hebei, Gansu and Shanxi provinces, taking into consideration the level of production, consumption and micronutrient deficiencies. It explores whether and how farmers' adoption of biofortification crop technologies improve their production performance based on an endogenous switching model. The results are as follows. First, farmers' adoption of biofortification crop technologies can significantly improve their production performance. Specifically, after controlling farmers' self-selection bias, farmers' adoption of biofortification crop technologies has increased wheat yield per mu by 6.81% and wheat income per mu by 14.84%, respectively. Second, there is a certain regional heterogeneity in the impact of farmers' adoption of biofortification crop technologies on production performance. Third, the effect of farmers' adoption of biofortification crop technologies on production performance is heterogeneous among farmers with different levels of education achievement and planting acreage. The conclusion provides policy reference for further promoting the implementation of biofortification projects in China.

Keywords: Biofortification; Technology Adoption; Production Performance; Endogenous Switching Model