

# 农业化学投入强度替代效率及其影响因素

杨建辉\* 张肇中

(浙江财经大学中国政府管制研究院, 杭州 310018)

**摘要** 采用 SE-DEA 和空间基尼系数,研究了 2000—2016 年我国农业化学投入强度替代效率,并运用 Tobit 模型分析了我国及各地区替代效率的驱动因素.结果表明:我国农业化学投入强度替代的综合效率和规模效率呈现出“N”字型趋势,纯技术效率则波动上升,替代效率的地区差异明显,东部地区更倚重替代要素的投入规模;各年份全国省域差异最高的是综合效率,其次为纯技术效率,规模效率的区域差异性最小,地区内部省域差异逐渐减小,东部地区省域差异最大;农业化学投入替代效率受农业技术水平、农户收入水平、农业生产结构、农业发展程度和工业化水平的显著影响,各地区受各因素影响差异明显.推动农业化学投入替代效率,要从提高农业化学投入强度替代要素的投入效率、调整农用工业发展结构、关注农民收入水平和修订农业化学投入强度替代的补贴政策等方面入手.

**关键词** 农业化学投入强度;替代效率;影响因素;SE-DEA

**Substitution efficiency of agro-chemical input intensity and its influence factors.** YANG Jian-hui\*, ZHANG Zhao-zhong (*China Institute of Regulation Research, Zhejiang University of Finance & Economics, Hangzhou 310018, China*).

**Abstract:** We examined the substitution efficiency of agro-chemical input intensity from 2000 to 2016 in China by employing SE-DEA model and Gini coefficient, and analyzed the driving factors of substitution efficiency with Tobit model. The results showed that the comprehensive efficiency and the scale efficiency of substitution of agro-chemical input intensity displayed the trend of “N-shaped”, while the pure technical efficiency was enhanced with some fluctuations. The regional differences of substitution efficiency were obvious, with the eastern region relying more heavily on the input scale of substitution factors. The most salient provincial-regional difference was the comprehensive efficiency, followed by the pure technical efficiency, and the least salient regional difference was the scale efficiency nationwide. The provincial-regional difference decreased year by year within each region. The Eastern region’s provincial-regional difference was the greatest. The substitution efficiency was significantly affected by agricultural technology level, farmers’ income level, agricultural production structure, agricultural development level and industrialization level. Besides, there were obvious differences in the influencing factors among regions. To promote the substitution efficiency of agro-chemical input, it is necessary to improve the efficiency of substitution factors of agro-chemical input intensity, to adjust the development structure of agro-industry, to pay attention to farmers’ income level, and to revise the subsidy policy of substitution of agricultural chemical input intensity.

**Key words:** agro-chemical input intensity; substitution efficiency; influence factor; SE-DEA.

本文由教育部人文社会科学研究基金项目(18YJCZH218)、浙江省自然科学基金项目(LY18G030029)和浙江省新型重点专业智库“政府监管与公共政策研究院”项目资助 This work was supported by the Humanities and Social Sciences Research Fund of Ministry of Education (18YJCZH218), the Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LY18G030029), and the New Type Key Think Tank of Zhejiang Province “Research Institute of Regulation and Public Policy”.

2018-11-09 Received, 2019-03-18 Accepted.

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qingfengzi@163.com

农业化学投入减量是面源污染防治的重要内容,也是现代农业重点关注的主题<sup>[1-2]</sup>.面对化肥和农药中氮磷大量流失带来的水资源污染,以及农膜低回收率导致的土壤污染和营养流动阻隔等问题<sup>[3-5]</sup>,我国 2001 年开始防治化肥、农药和农膜的不合理使用带来的面源污染,但整体减量管制效果不够理想,农药使用强度(单位农作物播种面积的农药使用量)从 2013 年才开始出现下降,而化肥和农膜直到 2015 年“化肥、农药使用量零增长计划”实施后才陆续下降,2016 年化肥、农药和农膜使用强度分别为 359.1、10.4 和 15.6 kg · hm<sup>-2</sup>,分别比最高值下降了 0.9%(2014 年)、4.7%(2012 年)和 0.2%(2015 年).目前,我国农业发展目标正向“优质、高效、生态、增收”方向转变,加上农业发展中存在粮食等农产品阶段性供过于求的情况,食物生产率提高对农业化学投入强度单需求影响的平衡会被打破<sup>[6]</sup>.农业化学投入减量管制遇到的阻力,反映了农业增产对化肥、农药和农膜的过度依赖<sup>[7]</sup>,有研究显示,化肥投入对我国粮食增产的作用一度达到 56.8%<sup>[8]</sup>.农业生产对农业化学投入强度的强烈需求,导致了农业化学投入减量过程缓慢.

目前实施的农业化学投入减量管制政策,如 2005 年的“测土配方施肥行动”和 2015 年的“化肥农药使用量零增长行动”,均将提质增效作为减量重点内容,旨在通过提高利用率来降低农业生产对农业化学投入相对数量的需求.其中主要蕴含了两个方面的内容:比较明显的是农业化学投入内部驱动,即农业生产中化肥、农药和农膜投入变化的直接影响因素<sup>[9-11]</sup>;农业化学投入内部驱动包含了农户使用行为研究,相关学者<sup>[12-14]</sup>重点分析了农户的生产特征、家庭特征、风险态度和认知等因素对农业化学投入的影响.值得注意的是,从农业增产角度来看,农业化学等中间投入在农业生产中出现是因为随着土地逐渐变成稀缺要素,要确保农业生产率的不断提高,需要中间投入对土地进行适度补偿,这体现了农业增产压力下,农业生产投入之间的替代关系<sup>[15]</sup>.农业化学投入强度也可以作为农业增产的另外一个重要要素——劳动投入的替代,弥补农村劳动力转移引起的农业增产投入缺失,农业劳动投入的减少还助推了化肥投入对有机肥投入的替代,这不仅为我国目前尚在实施的“提质增效”过程提出了警示,也反映出农业生产过程中化学投入与劳动投入存在相互替代的情况<sup>[16-17]</sup>.在后工业化国家

中,随着农业劳动投入的进一步减少以及化肥等化学投入强度的不断降低,农业机械投入强度会加强,从侧面反映了农业机械投入对化学投入替代的加强<sup>[18]</sup>.农业生产中的中间投入要素从“单投入”向“多投入”的发展过程,实际上是农业生产投入要素间的替代过程,农业化学投入减量过程中,蕴含着劳动力、机械、水利等现代农业生产要素投入的外部替代,即农业化学投入减量管制政策蕴含的另外一个内容.

我国已经进入了农业化学投入减量管制阶段,农业化学投入强度替代效率决定了化肥、农药和农膜减量的速度,也影响着农业面源污染防治的进程,然而我国对于农业化学投入强度替代效率的研究几乎没有,分析我国农业化学投入强度替代效率,并分析其影响因素,将为农业化学投入减量管制提供政策建议和依据.

### 1 研究方法

#### 1.1 研究思路与模型

当前对农业要素投入替代的研究主要集中在一定时期内两个单一农业投入间的替代关系方面<sup>[19-21]</sup>,有关农业化学投入替代效率的研究未见报道.鉴于在确保农业产量稳定的前提下,农业生产要素投入替代的完成过程就是要素投入比例的变化过程,本研究考虑将其他要素投入视作农业化学投入强度替代的投入,农业化学投入强度视作产出,分析替代效率.

#### 1.2 替代效率的测算

SE-DEA( super-efficiency DEA, SE-DEA)效率模型是从传统 DEA 模型<sup>[22]</sup>发展而来的,可以较为有效地区分有效决策单元(DMU),其原理是对某 DMU 进行评价时,采取用其他全部 DMU 线性组合替代的方法,以求达到有效 DMU 投入呈比例增加的效果,保证测算的相对有效性,由此所得的效率计作  $\theta$ .那么,DMU<sub>j</sub> 的输入变量为  $x_j=(x_{1j}, \cdots, x_{mj})^T$ ,输出变量为  $y_j=(y_{1j}, \cdots, y_{sj})^T$ ,其中,  $m$  和  $s$  分别代表输入变量和输出变量的个数,最优规划模型为:

$$\min [\theta \rightarrow \varepsilon (e_1' s^- - e_2' s^+)]$$
$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n x_j \lambda_j + s^- = \theta x_j \\ \sum_{j=1}^n y_j \lambda_j - s^+ = y_j \\ \lambda_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \cdots, n) \\ s^+ \geq 0; \quad s^- \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $s^-$ 、 $s^+$ 均为松弛变量,表示产出和投入指标的调整量; $e's^-$ 和 $e's^+$ 分别表示输入过剩和输出不足; $\lambda_j$ 表示权重系数。 $e's^-+e's^+=0$ 时,表示 $DMU_j$ 技术有效;若同时满足 $\theta=1$ ,则表示 $DMU_j$ 还存在规模有效,即DEA有效。 $e's^-+e's^+>0$ 时,若 $\theta=0$ ,表示弱DEA有效;若 $\theta<1$ ,表示DEA无效;对于这两种情况,可以通过只减少 $(1-\theta^0)x_0+s^-$ 输入或者只增加 $s^+$ 输出的方式来处理。

1.3 空间基尼系数的测算

空间基尼系数<sup>[23]</sup> (Gini coefficient) 可以用来衡量农业化学投入替代效率的空间差异,公式为:

$$G = \frac{2 \times \sum_{i=1}^n (i \times x_i)}{n^2 \times u_x} - \frac{n+1}{n} \tag{2}$$

式中: $G$ 表示农业化学投入替代效率的基尼系数, $G \in [0,1]$ , $G$ 越趋近于0,区域差异性越小; $n$ 表示省级区域的个数; $x_i$ 表示第*i*个省级区域的农业化学投入替代效率; $u_x$ 表示农业化学投入替代效率的均值; $i$ 按照各省级区域的农业化学投入替代效率从小到大的顺序排列。

1.4 变量设定与数据来源

1.4.1 变量设定 参考相关研究<sup>[24-28]</sup>,一般将土地、劳动力作为农业生产的基本要素,其他投入变量被认为是资本、技术或中间投入,本研究将强度作为农业化学投入替代效率的研究内容,因此不考虑土地投入。投入变量分别选择单位面积劳动力(农业劳动力/农作物播种面积,人· $\text{km}^{-2}$ )、有效灌溉率(有效灌溉面积/农作物播种面积,% )、单位面积用电量(农村用电量/农作物播种面积, $\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{hm}^{-2}$ )、单位面积的柴油使用量(柴油使用量/农作物播种面积, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )、单位面积机械动力(机械总动力/农

作物播种面积, $\text{kW} \cdot \text{hm}^{-2}$ )。产出变量分别为化肥投入强度(化肥施用折纯量/农作物播种面积, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )、农药投入强度(农药使用量/农作物播种面积, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )、农膜投入强度(农膜使用量/农作物播种面积, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ),三者均为逆向变量,采用取倒数的方法将其转化为正向变量。

1.4.2 数据来源 农业劳动力数据来自于2000—2016年相应年份的各省域统计年鉴,其他数据均来自相应年份的《中国统计年鉴》<sup>[29]</sup>和《中国农村统计年鉴》<sup>[30]</sup>。由于数据不可得,不包括台湾省、香港特别行政区和澳门特别行政区。

1.5 数据处理

采用Excel 2003、SE-DEA和Stata 15.0软件对数据进行统计分析。采用SE-DEA效率模型对农业化学投入强度的替代效率进行测算,用面板数据的Tobit模型进行回归分析。利用Excel 2003软件制作图表。

2 结果与分析

2.1 农业化学投入强度替代效率的测算结果

2.1.1 农业化学投入强度替代效率的时序特征 2000—2016年我国及各省域农业化学投入强度替代的各效率值见图1。从省域平均值上看,我国农业化学投入强度替代的综合效率和规模效率呈现出“上升-下降-上升”的趋势,而纯技术效率波动上升;其中,综合效率值于2007年达到最低值(0.6),随后农业化学投入强度替代效率逐年提高并趋于稳定,2016年达到0.7,比2007年和2000年均增加了0.1;2016年纯技术效率和规模效率分别为0.7和0.9,较2000年均增加0.1,2000—2016年期间规模效率始终高于纯技术效率,农业化学投入强度替代的综合

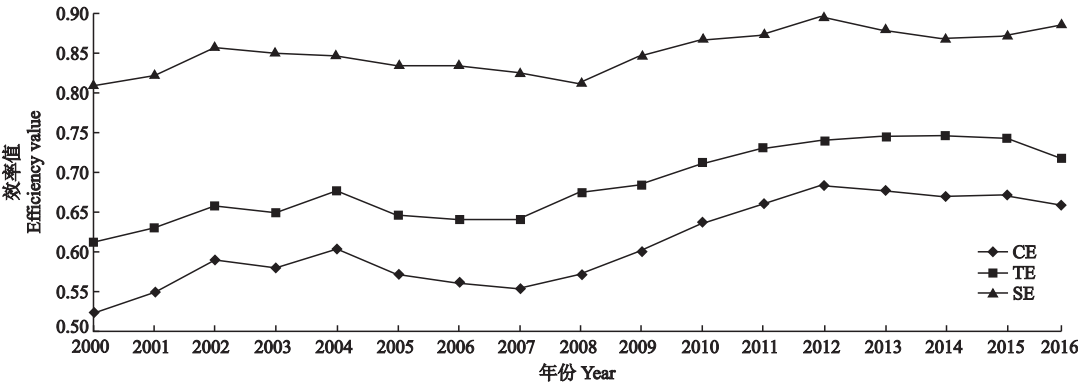


图1 2000—2016年农业化学投入替代效率的变化趋势  
Fig.1 Change trend of agro-chemical input substitution efficiency from 2000 to 2016.

CE: 综合效率 Comprehensive efficiency; TE: 纯技术效率 Technical efficiency; SE: 规模效率 Scale efficiency. 下同 The same below.

**2.1.2 农业化学投入强度替代效率的空间演变** 从农业化学投入强度替代效率空间演变上看(表1),

2000—2016年各省域的规模效率提高迅速,其

[illegible]



中上海的年平均增长率最高,达到 1.9%,其次为山东(1.8%)和辽宁(1.6%),均达到 1.5%以上;年平均增长率最低的为海南(-1.4%),山西、吉林、北京、重庆和湖北增长率也均为负值.2000 年位于 8.0 以下的有浙江(0.6)、北京(0.6)等 11 个区域,其中除了云南和河南外均为东部地区,2007 年降为 9 个,而 2016 年位于 8.0 以下的仅有北京(0.5)、浙江(0.7)、福建(0.7)、河北(0.8)、天津(0.8)和海南(0.8)6 个区域,均为东部地区;表明大部分省域替代要素投入规模扩大带来的影响逐渐减弱,随着农业化学投入减量管制的深化,无法持续依赖规模效率,而东部地区仍然采取通过加大投入规模的方式提高农业化学投入强度替代效率.

2016 年纯技术效率的省域特征与综合效率保持一致,2016 年纯技术效率大于或等于规模效率的省域较 2000 年增加了 2 个,包括重庆、黑龙江、江西等 10 个西部、东北和中部地区,表明 2002—2016 年各省域农业化学投入强度的替代在信息、技术和管理上得到了有效提高,但东部地区还有待加强,这可

能与 2000 年前在全国以农业化学投入驱动农业生产的管制背景下,东部地区优先形成并长期保持的农业生产投入结构难以较快完成技术优化有关.从 2000—2016 年纯技术效率的年平均增长率看,吉林最高,达到 3.4%,其次为湖北(2.8%)、广西(2.6%)和广东(2.4%),而海南、北京、云南、浙江和山西均出现了负增长,整体上东部地区增长较慢.

**2.1.3 农业化学投入强度替代效率的区域差异** 从 2000—2016 年我国整体农业化学投入强度替代效率基尼系数的测算结果上看(图 2),综合效率、纯技术效率和规模效率尽管在 2001 年之间出现了波动,但整体上均呈现出下降趋势,基尼系数分别由 2000 年的 0.3、0.2 和 0.1 降为 2016 年的 0.2、0.2 和 0.1;历年的综合效率均最高,说明综合效率的区域差异性最大,其次为纯技术效率,规模效率的区域差异性最小.

从各地区综合效率的基尼系数上看(图 3),农业化学投入强度替代效率的区域差异演变均呈现下降态势,但差别较大;其中东北地区土地较为平整,

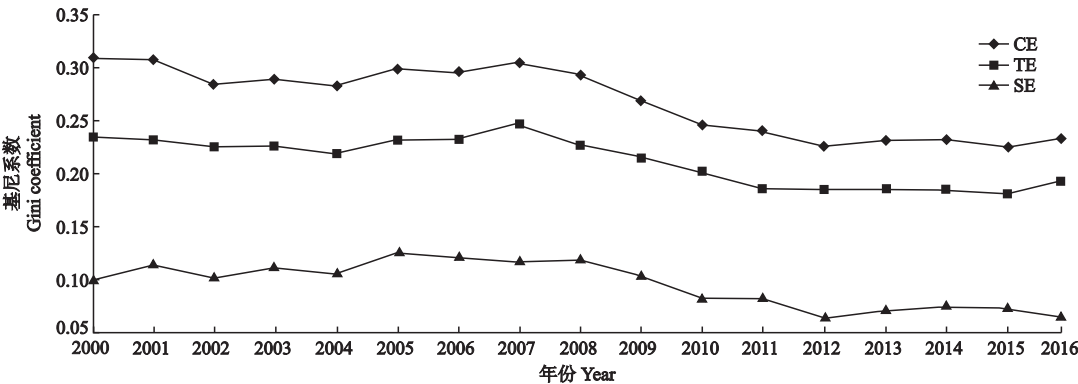


图 2 2000—2016 年我国整体农业化学投入强度替代效率的基尼系数  
Fig.2 Gini coefficient of agro-chemical input intensity substitution efficiency from 2000 to 2016 in China.

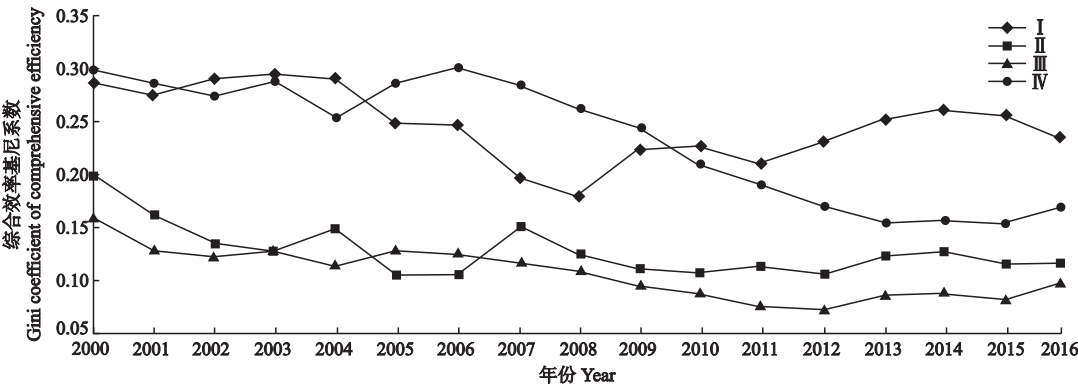


图 3 2000—2016 年我国各地区综合效率的基尼系数  
Fig.3 Gini coefficient of the comprehensive efficiency in various regions of China from 2000 to 2016.

I : 东部地区 Eastern region; II : 中部地区 Central region; III : 西部地区 Western region; IV : 东北地区 Northeast region.

在相应的管制作用下,便于全域实施农业化学投入强度替代,2010 年开始区域差异已经优于东部地区,2000—2016 年基尼系数的降幅最大,达到-0.8%;其次为中部地区(-0.5%);西部和东部地区的降幅最低,仅为-0.4%和-0.3%,不同的是西部地区各年份的基尼系数基本为各地区最低,而东部地区在 2002—2004 年和 2010 年后两个阶段均高于其他地区;说明随着农业化学投入减量管制的加强,地区内部各省域农业化学投入强度替代的方向保持一致.综上,地区内区域差异逐渐减小,但仍然明显存在,东部地区的区域差异仍然最大,西部地区的区域差异最小.

2.2 农业化学投入强度替代效率的影响因素

2.2.1 影响因素变量的选取 根据农业化学投入强度替代效率的时空演化分析发现,我国农业化学投入强度替代效率显著提高,但投入规模扩大无法带来相应比例的产出报酬,各地区、各省域的替代效率存在明显的差异,因此研究农业化学投入强度替代效率的影响因素十分重要.本研究参考相关文献<sup>[31-34]</sup>,选取以下指标进行分析:1)农业发展程度.以人均粮食产量表示,体现了农业产出对生产投入结构的基本需求,是农业化学投入替代的重要影响因素,数据来自各年份的《中国统计年鉴》<sup>[29]</sup>.2)农业生产结构.以农作物播种面积中粮食播种比值计量,反映了农业种植结构比较优势调整对农业化学投入强度替代的影响,数据来自相应年份的《中国统计年鉴》<sup>[29]</sup>.3)农户收入水平.以农民年人均可支配收入表示,体现了农业生产中对农用机械等生产性投入的支付能力,数据来自各年份的《中国统计年鉴》<sup>[29]</sup>.4)农业技术水平.以公有经济企事业单位农业技术人员占农林牧渔劳动力的比值计量,反映

了农业化学投入替代过程中科技投入的影响情况,公有经济企事业单位农业技术人员来自相应年份的《中国科技统计年鉴》<sup>[35]</sup>,农林牧渔劳动力来自相应年份的《中国统计年鉴》<sup>[29]</sup>.5)工业化水平.以单位工业劳动力的工业产值表示,反映了农用机械工具、电气设备等工业发展的农业反哺对农业化学投入强度替代的影响,数据来自各地区相应年份的统计年鉴.6)财政农业投资强度.以财政农林水事务支出与财政支出的比值计量,反映了政府对水利设施等农业生产投入的支持力度,是政府制度导向的量化,数据来自相应年份的《中国财政年鉴》<sup>[36]</sup>.7)农业化学投入补贴.虚拟变量,根据我国农业化学投入的政策补贴情况赋值,2000—2005 年、2016 年赋值为 0;2006—2015 年由于农资(化肥)综合补贴政策的实施赋值为 1.变量描述性统计结果见表 2.

2.2.2 影响因素计算结果 由于本研究中的被解释变量及农业化学投入强度替代效率取值范围为 0~1,属于典型的受限变量,因此采用 Tobit 模型分别估计各种因素对综合效率、技术效率和规模效率的影响(表 3),LR 检验的结果个体误差  $\sigma_u$  和随机误差  $\sigma_e$  取值均较小,拒绝不存在个体效应的原假设,支持随机效应面板 Tobit 模型.同时报告了面板 Tobit 模型估计的边际效应,以对各变量对化学投入强度替代效率的边际影响进行分析.结果表明:1)农业发展程度也即人均粮食产量对化学投入强度替代综合效率及纯技术效率的影响显著为正,人均粮食产量每增加 1 kg,化学投入强度替代的综合效率和纯技术效率分别增加 2.1% 和 3.0%,农业发展程度对化学投入强度替代规模效率的影响不显著;这说明随着农业发展程度的不断提高,中国农业生产中化学投入被显著替代,但并未对农用机械等替代要素的投

表 2 变量描述性统计  
Table 2 Variable descriptive statistics

变量 Variable	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	最大值 Maximum	最小值 Minimum
综合效率 Comprehensive efficiency	0.610	0.291	1.000	0.114
纯技术效率 Technical efficiency	0.686	0.263	1.000	0.245
规模效率 Scale efficiency	0.854	0.159	1.000	0.409
农业发展程度 Degree of agricultural development	5.775	0.689	8.464	3.219
农业生产结构 Agricultural production structure	0.654	0.121	0.957	0.314
农业技术水平 Technical level of agriculture	0.00317	0.00202	0.01050	0.00010
工业化水平 Level of industrialization	1.623	0.676	5.483	0.0610
农户收入水平 Household income level	8.319	0.571	9.778	7.195
农业财政强度 Intensity of agricultural finance	0.0899	0.0386	0.2880	0.0091
农业化学投入补贴 Agro-chemical input subsidy	0.588	0.493	1.000	0.000

n = 527.

表 3 化学投入强度替代效率影响因素  
Table 3 Influencing factors of chemical input intensity substitution efficiency ( $n=527$ )

影响因素 Influencing factor	面板 Tobit Panel Tobit			边际效应 Marginal effect		
	综合效率 Comprehensive efficiency	纯技术效率 Technical efficiency	规模效率 Scale efficiency	综合效率 Comprehensive efficiency	纯技术效率 Technical efficiency	规模效率 Scale efficiency
农业发展程度 Degree of agricultural development	0.049 * (1.685)	0.086 ** (2.386)	-0.010 (-0.453)	0.021 * (1.554)	0.030 ** (2.115)	-0.005 (-0.454)
农业生产结构 Agricultural production structure	0.368 ** (2.543)	0.570 *** (3.096)	0.052 (0.482)	0.158 ** (2.335)	0.202 *** (2.756)	0.025 (0.481)
农业技术水平 Technical level of agriculture	38.002 *** (4.530)	60.869 *** (5.302)	1.582 (0.259)	16.327 *** (3.448)	21.544 *** (3.804)	0.775 (0.258)
工业化水平 Level of industrialization	-0.030 ** (-1.971)	-0.034 * (-1.775)	-0.001 (-0.083)	-0.013 * (-1.868)	-0.012 * (-1.692)	-0.000 (-0.083)
农户收入水平 Household income level	0.132 *** (5.308)	0.114 *** (3.631)	0.047 ** (2.498)	0.057 *** (4.123)	0.040 *** (3.189)	0.023 ** (2.468)
农业财政强度 Intensity of agricultural finance	0.080 (0.270)	0.197 (0.516)	0.244 (1.095)	0.034 (0.268)	0.070 (0.509)	0.119 (1.080)
农业化学投入补贴 Agro-chemical input subsidies	-0.013 (0.985)	0.001 (-0.040)	-0.015 (1.445)	-0.006 (0.971)	0.000 (-0.040)	-0.007 (1.430)
$\sigma_u$	0.365 *** (7.002)	0.391 *** (6.446)	0.199 *** (6.632)			
$\sigma_e$	0.108 *** (27.819)	0.131 *** (25.060)	0.083 *** (27.796)			
$\rho$	0.919	0.899	0.8534			
LR	77.13	634.42	502.57			

\*、\*\*和\*\*\*分别表示在10%、5%和1%的显著水平下显著;括号中为t值,用以说明该变量的显著程度\*,\*\*and\*\*\* were significant at 10%, 5% and 1%, respectively. The value in parentheses was t used to indicate the significance of variable. 下同 The same below.

入规模产生影响.2)农业生产结构对农业化学投入替代的综合效率和纯技术效率呈现出正向的显著影响,说明粮食播种面积比例的增加会促进农业化学投入强度的替代;但在当前阶段随着农业生产结构的不断转调,果蔬等经济作物的播种比例会进一步增大,使农业化学投入替代步伐放缓,提高非粮食作物的替代效率将会成为未来一个时期重点关注的内容.3)农业技术水平显著地正向影响综合效率和纯技术效率,并表现出高显著性,对化学投入强度替代过程的影响仅次于对3种效率均表现出较高显著性的农户收入水平,但从推动程度上看,农业技术人员占农林牧渔劳动力的比值每增加1%,综合效率和纯技术效率分别增加16.3%和21.5%,科学管理和技术参与会强劲而有效地推进替代进程;意味着在当前阶段过于依赖规模效率且已经接近90%的情况下,要进一步推进农业化学投入强度的替代,需从提高农业技术水平着手.4)工业化水平(即单位劳动的工业产值)对综合效率和纯技术效率的影响显著为负,尽管显著性较弱,但足以说明当前阶段工业发展对农业的反哺作用仍然主要体现在农用化学工业层面,而在推动农用化学投入强度替代的农用机械工业等领域,并未出现反哺作用,这与相关学者的

研究保持一致<sup>[37-38]</sup>.5)农户收入水平,即农户年人均可支配收入,其对化学投入强度替代效率的影响也显著为正,农户年人均可支配收入每增加1元,综合效率、纯技术效率和规模效率分别增加5.7%、4.0%和2.3%;说明在小农经济仍占主导的农业生产中,农户的收入水平直接影响其在农业机械投入方面的意愿和行为,着力提高农民收入水平才能有效推进化学投入强度的替代效率.6)农业财政投资强度和农业化学补贴政策对化学投入强度替代效率的影响并不显著,说明现阶段农业财政支持力度的增加并未有效推动农机等要素逐步替代化学投入,当前政府财政投资需要进一步明确在农业要素投入之间的转移方向.7)农资(化肥)综合补贴政策是在农业化学投入减量化管制要求下实施的,与农业化学投入政策方向存在矛盾,导致其在综合效率、纯技术效率和规模效率的影响方向上有所不同,但均未与整体上的替代效率产生显著关联.

由于中国农业区域间的资源禀赋和发展状况存在明显差异,因此划分东部、中部、西部、东北4个地区对农业化学投入强度替代效率的影响因素进行了分组回归,分组回归仍采用面板Tobit模型,由于篇幅所限,不再列出边际效应的回归结果.从表4可以

表 4 各区域化学投入强度替代效率影响因素回归分析  
Table 4 Regression analysis of influencing factors of regional chemical input intensity substitution efficiency

	东部地区 Eastern region			中部地区 Central region			西部地区 Western region			东北地区 Northeast region		
	综合效率 Comprehensive efficiency	纯技术 效率 Technical efficiency	规模效率 Scale efficiency	综合效率 Comprehensive efficiency	纯技术 效率 Technical efficiency	规模效率 Scale efficiency	综合效率 Comprehensive efficiency	纯技术 效率 Technical efficiency	规模效率 Scale efficiency	综合效率 Comprehensive efficiency	纯技术 效率 Technical efficiency	规模效率 Scale efficiency
农业发展程度	0.034	0.143 *	-0.060	0.022	0.027	-0.014	-0.146 *	-0.169	-0.001	0.215 * * *	0.169	0.559 * * *
Degree of agricultural development	(0.511)	(1.937)	(-1.215)	(0.792)	(0.894)	(-0.602)	(-1.792)	(-1.398)	(-0.014)	(3.497)	(1.001)	(7.127)
农业生产结构	0.908 * * *	0.642 * *	0.690 * * *	-1.019 * * *	-0.426	-0.172	-0.285	0.265	-0.441	-1.038 * *	-0.864	-0.804
Agricultural production structure	(3.692)	(2.379)	(3.693)	(-3.994)	(-1.366)	(-1.315)	(-0.697)	(0.423)	(-1.513)	(-2.543)	(-1.640)	(-1.425)
农业技术水平	64.1 * * *	116.3 * * *	-17.3 *	-12.2	-69.0 * *	-6.3	-5.7	-40.3	27.4 * *	121.1 * * *	281.4 * * *	-223.4 * * *
Technical level of agriculture	(4.880)	(6.749)	(-1.765)	(-0.614)	(-2.384)	(-0.508)	(-0.326)	(-1.465)	(2.316)	(3.335)	(5.957)	(-5.825)
工业化水平	-0.042 *	-0.038	-0.006	-0.018	-0.020	0.001	-0.075	-0.006	-0.106 * * *	-0.178	-0.246	-0.221 *
Level of industrialization	(-1.652)	(-1.385)	(-0.290)	(-1.252)	(-1.334)	(0.115)	(-1.468)	(-0.080)	(-2.950)	(-1.516)	(-1.518)	(-1.695)
农户收入水平	0.143 * * *	0.107 * *	0.092 * *	0.180 * * *	0.232 * * *	-0.007	0.167 * * *	0.138	0.125 * * *	0.399 * * *	0.486 * * *	0.018
Household income level	(3.022)	(2.056)	(2.559)	(6.818)	(7.395)	(-0.311)	(2.780)	(1.572)	(3.063)	(3.963)	(3.516)	(0.176)
农业财政强度	-1.279 *	-1.673 * *	0.569	-0.000	-0.026	-0.138	0.377	0.254	0.229	-1.099	-1.741	3.219 * * *
Intensity of agricultural finance	(-1.802)	(-2.156)	(1.063)	(-0.001)	(-0.067)	(-0.480)	(0.959)	(0.421)	(0.817)	(-1.561)	(-1.515)	(3.718)
农业化学投入补贴	-0.034	-0.005	-0.043 * *	0.008	-0.001	0.010	0.037	0.072 * *	-0.014	0.003	0.037	-0.010
Agro-chemical input subsidies	(1.436)	(0.185)	(2.378)	(-0.522)	(0.043)	(-0.743)	(-1.606)	(-2.043)	(0.849)	(-0.070)	(-0.656)	(0.216)
$\sigma_u$	0.245 * * *	0.266 * * *	0.160 * * *	0.132 * * *	0.273 * * *	0.019 *	0.291 * * *	0.385 * * *	0.160 * * *	0.576 *	0.653 *	0.000
	(4.141)	(4.069)	(4.246)	(3.236)	(2.892)	(1.890)	(4.032)	(3.324)	(3.544)	(1.913)	(1.836)	(0.000)
$\sigma_e$	0.115 * * *	0.126 * * *	0.088 * * *	0.061 * * *	0.065 * * *	0.054 * * *	0.099 * * *	0.139 * * *	0.070 * * *	0.051 * * *	0.066 * * *	0.075 * * *
	(17.619)	(16.888)	(17.633)	(13.806)	(12.691)	(13.629)	(14.259)	(11.572)	(14.366)	(7.914)	(7.297)	(8.304)
$\rho$	0.819	0.818	0.77	0.825	0.947	0.112	0.896	0.884	0.84	0.992	0.99	0
LR	103.46	89.21	142.83	92.39	154.59	2.96	260.11	169.13	162.43	74.99	64.71	0
样本量 Sample capacity	170	170	170	102	102	102	204	204	204	51	51	51

根据 LR 检验,东北地区农业化学投入强度替代规模效率的影响因素分析支持混合 Tobit 模型,因此第 12 列显示的是混合 Tobit 模型的回归结果 According to LR test, the analysis of the substitution efficiency of agro-chemical input intensity in Northeast region was in line with Tobit model. The 12th column showed the regression result of Tobit model.

看出:1) 东部地区和东北地区农业化学投入强度替代效率影响因素回归结果与全国范围的回归结果基本一致,即农业发展程度、农户收入水平、农业技术水平和农业生产结构对农业化学投入强度替代效率的影响整体上呈正显著性;而工业化水平对农业化学投入强度替代效率的影响为负显著性。2) 在补贴等外生驱动因素上表现出与全国整体不同的情况,农业财政强度对东部地区农业化学投入强度替代的综合效率和纯技术效率的影响呈负显著性,对东北地区规模效率的影响呈正显著性,说明东部、东北地区受前期农业化学投入对水体和土壤污染的压力、劳动力紧缺、土地便于整合等因素作用,农业财政强度的提高可以更有效地对替代规模效率产生影响,其中东部地区由于忽视农业财政强度对纯技术效率的调整和提升,导致在农业财政强度增加的过程中,加剧了农业化学投入强度替代的技术、管理等方面的缺陷,从而对综合效率产生弱的负显著影响;同时,东部地区农资(化肥)综合补贴的取消对规模效率产生了积极的正向推动,表明补贴的政策效果正在发达地区逐渐显现。

相比之下,在中、西部地区,受农业资源禀赋和农业发展水平的制约,农业化学投入降速较缓慢,导致各因素与农业化学投入强度替代效率的关系普遍不显著,表现出高显著性的仅有农户收入水平和农业生产结构两个因素。农户收入水平表现出的高显著性与中、西部地区农户收入相对偏低的经济现状相符,导致无法实现高成本投入的农用生产器具对低成本投入的农业化学投入的替代。农业生产结构对中部地区综合效率的影响表现出负的高显著性,表明由于粮食对农业化学投入具有较低的需求,播种结构中粮食的比例减少给农业化学投入的减量带来了压力,这与该地区所处的农业生产结构调整阶段相匹配。中部、西部地区其他因素对农业化学投入强度替代效率的影响为不显著性,反映了这些因素在替代过程中的缺失,也反映出中国的农业化学投入强度替代过程具有明显的区域差异,这种差异不仅表现在农业发展程度、农业技术水平等方面,也表现在政策、补贴等外生驱动因素上,意味着制定因地制宜的管制政策将是解决农业化学投入强度替代区域不平衡的重点。



### 3 结论与政策启示

本文采用 SE-DEA 和空间基尼系数,分析了 2000—2016 年农业化学投入强度替代效率的时序变化和区域差异情况,并运用 Tobit 模型研究了我国及各地区的替代效率驱动因素.得出的主要结论有:1) 由于管制政策在对农业生产方式调整过程中存在一定的滞后性,我国农业化学投入强度替代的综合效率和规模效率呈现出“N”字型趋势,而纯技术效率则波动上升,但管制过程过于依赖替代的投入,导致农业化学投入强度未达到减量的预期;农业化学投入强度替代效率的区域差异明显,整体上东部地区更倚重替代投入的强度,各时期替代效率均低于中部、西部和东北地区.2) 从全国整体上看,区域差异的综合效率最高,其次为纯技术效率,规模效率的区域差异性最小;随着农业化学投入减量管制的加强,地区内部的省域差异逐渐减小,但东部地区的省域差异仍然最大,西部地区最小.3) 农业化学投入替代效率受农业技术水平、农户收入水平、农业生产结构、农业发展程度和工业化水平的显著影响,工业对农业的反哺仍然以农业化学工业为主,阻碍了农业化学投入替代效率的提高;各地区的替代效率受影响因素的状况差异明显,中部、西部地区需要尽快调整和制定与农业生产状况相对应的管制政策.

基于以上结论,建议从以下几个方面推动农业化学投入替代效率:1) 提高农业化学投入强度替代要素的投入效率.严格控制替代要素投入强度,通过发展地形匹配性强的农用机械、采用新型节水灌溉技术、提高劳动力的生产技术水平等手段,强化要素投入的技术、信息和管理内涵,避免全国整体出现以投入规模为主要驱动、替代效率短期提高的状况.2) 调整农用工业发展结构.工业对农业的反哺,要注意农用工业的结构布局,加速农用机械、水利等农用工业对传统农用化学工业的替代,侧重发展适合各地区资源禀赋的农用工业,提高农业化学投入强度替代要素市场供给,以免相关地区在农业生产结构调整过程中替代效率的降低.3) 关注农民收入水平.农业化学投入的替代还要重点关注农民人均可支配收入,认真落实现有的相关支农政策,推动农民收入水平的提高,对于低收入省域采取农户生产机械、设备等购置补贴,有效推动要素投入的农业生产参与程度.4) 修订农业化学投入强度替代的补贴和政策.要因地制宜地制定补贴和政策,尤其要关注和研究中、西部地区替代过程中存在的资源禀赋差异和农

业发展水平差异,适度差异化地调整各省域的补贴侧重,避免出现与东部地区类似的替代发展过程,降低地区间的不平衡性.

### 参考文献

- [1] Baumgärtner S, Dyckhoff H, Faber M. The concept of joint production and ecological economics. *Ecological Economics*, 2001, **36**: 365–372
- [2] Zhang W-L (张维理), Ji H-J (冀宏杰), Kolbe H, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies. II. Status of agricultural non-point source pollution and the alleviating strategies in European and American countries. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2004, **37**(7): 1018–1025 (in Chinese)
- [3] Yang J-H (杨建辉). Effect of agricultural economy growth on agricultural chemical and its spatiotemporal pattern: A case of Shandong Province. *Economic Geography* (经济地理), 2017, **37**(3): 182–187 (in Chinese)
- [4] Huang X-M (黄晓敏), Chen C-Q (陈长青), Chen M-Z (陈铭洲), et al. Carbon footprints of major staple grain crops production in three provinces of Northeast China during 2004–2013. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2016, **27**(10): 3307–3315 (in Chinese)
- [5] Zhang P-Y (张鹏岩), He J-J (何坚坚), Pang B (庞博), et al. Temporal and spatial differences in carbon footprint in farmland ecosystem: A case study of Henan Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2017, **28**(9): 3050–3060 (in Chinese)
- [6] Li G-X (李国祥). Discuss the transformation of China's agricultural development momentum. *Chinese Rural Economy* (中国农村经济), 2017(7): 2–14 (in Chinese)
- [7] Zhu ZL, Chen DL. Nitrogen fertilizer use in China: Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, **63**: 117–127
- [8] Wang Z-L (王祖力), Xiao H-F (肖海峰). Analysis of chemical fertilizer on the growth of grain output. *Issues in Agriculture Economy* (农业经济问题), 2008(8): 65–68 (in Chinese)
- [9] Yang J-H (杨建辉). Decoupling relationship between agricultural chemical and agricultural economic growth in the context of agricultural non-point source pollution control. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2017, **32**(9): 1517–1527 (in Chinese)
- [10] Pan D (潘丹). The spatial-temporal difference of driving effects for fertilizer use intensity change and its determinants in China. *Economic Geography* (经济地

- 理), 2014, **34**(3): 121–135 (in Chinese)
- [11] Zheng W-W (郑微微), Xu X-G (徐雪高). Driving-factor decomposition of fertilizer use intensity change and its determinants in Jiangsu Province. *Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences)* (华中农业大学学报: 社会科学版), 2017(4): 55–62 (in Chinese)
- [12] Luan J (栾江), Qiu H-G (仇焕广), Jing Y (井月), *et al.* Decomposition of factor contributed to the increase of China's chemical fertilizer use and projections for future fertilizer use in China. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2013, **28**(11): 1869–1878 (in Chinese)
- [13] Tian Y (田云), Zhang J-B (张俊飏), He K (何可), *et al.* Analysis on low-carbon production behavior of farm households and its influencing factors: Taking fertilizer application and pesticide use as an example. *China Rural Survey* (中国农村观察), 2015(4): 61–70 (in Chinese)
- [14] Cai Y-P (蔡颖萍), Du Z-X (杜志雄). An analysis of ecological consciousness of family farm production behaviour and its influencing factors: An empirical test based on survey data of family farms in China. *China Rural Economy* (中国农村经济), 2016(12): 33–45 (in Chinese)
- [15] Gao M-G (高明国). Analysis of modern agricultural productivity integrated system based on China's agricultural modernization. *Economic Problems* (经济问题), 2013(6): 104–108 (in Chinese)
- [16] Ebenstein A. The consequences of industrialization: Evidence from water pollution and digestive cancers in China. *Review of Economics and Statistics*, 2012, **94**: 186–201
- [17] Zhang J (张舰), Avraham E (亚伯拉罕·艾宾斯坦), Margaret M (玛格丽特·麦克米伦), *et al.* Migration, excessive fertilizer use and environmental consequences. *Comparative Economic and Social Systems* (经济社会体制比较), 2017(3): 149–160 (in Chinese)
- [18] Liu Q (刘琦), Zhao M-Z (赵明正). Theoretical analysis and empirical study on international experience of agricultural modernization: Based on the panel data of 29 major agricultural countries. *Issues in Agricultural Economy* (农业经济问题), 2018(3): 23–32 (in Chinese)
- [19] Soliman I, Ewaida O. Impact of technological changes and economic liberalization on agricultural labor employment and productivity. *Contemporary Egypt*, 1997, **88**: 47–64
- [20] Yin C-J (尹朝静), Fan L-X (范丽霞), Li G-C (李谷成). Elasticity of substitution of factor and China's agricultural growth. *Journal of South China Agricultural University (Social Science)* (华南农业大学学报: 社会科学版), 2014, **13**(2): 16–23 (in Chinese)
- [21] Wang O (王欧), Tang K (唐轲), Zheng H-M (郑华懋). The effect of agricultural machinery on the intensity of labor substitution and grain output. *China Rural Economy* (中国农村经济), 2016(12): 46–59 (in Chinese)
- [22] Wang L (王丽), Xi F-M (郗凤明), Li J-X (李金鑫), *et al.* Efficiency of industrial energy conservation and carbon emission reduction in Liaoning Province based on data envelopment analysis (DEA) method. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2016, **27**(9): 2925–2932 (in Chinese)
- [23] Liu H (刘慧). Regional inequality measurement: Methods and evaluations. *Geographical Research* (地理研究), 2006, **25**(4): 710–718 (in Chinese)
- [24] Yang L-X (杨丽霞), Yang G-S (杨桂山), Yao S-M (姚士谋), *et al.* A study on the spatial heterogeneity of grain yield per hectare and driving factors based on ESD-AGWR. *Economic Geography* (经济地理), 2012, **32**(6): 120–126 (in Chinese)
- [25] Li G-C (李谷成). The green productivity revolution of agriculture in China from 1978 to 2008. *China Economic Quarterly* (经济学: 季刊), 2014, **13**(2): 537–558 (in Chinese)
- [26] Gao F (高帆). Evolution trend and internal mechanism of regional total factor productivity in Chinese agriculture. *The Journal of Quantitative and Technical Economics* (数量经济技术经济研究), 2015(5): 3–19 (in Chinese)
- [27] Zhu X (朱喜), Shi Q-H (史清华), Gai Q-E (盖庆恩). Misallocation and TFP in rural China. *Economic Research Journal* (经济研究), 2011(5): 86–98 (in Chinese)
- [28] Ge P-F (葛鹏飞), Wang S-J (王颂吉), Huang X-L (黄秀路). Measurement for China's agricultural green TFP. *China Population, Resources and Environment* (中国人口·资源与环境), 2018, **28**(5): 66–74 (in Chinese)
- [29] National Bureau of Statistics of the People's Republic of China (中华人民共和国国家统计局). *China Statistics Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2001–2017 (in Chinese)
- [30] National Bureau of Statistics of the People's Republic of China (中华人民共和国国家统计局). *China Rural Statistics Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2001–2017 (in Chinese)
- [31] Zhou Z (周振), Kong X-Z (孔祥智). Pattern and influencing factors of coordinated implementation of “Four Tasks” in China: Perspective of agricultural modernization. *China Soft Science* (中国软科学), 2015(10): 9–25 (in Chinese)
- [32] Li G-C (李谷成), Fan L-X (范丽霞), Feng Z-C (冯中朝). Capital accumulation, institutional change and

agricultural growth. *Management World* (管理世界), 2014(5): 67-79 (in Chinese)

[33] Zhou J (周 晶), Chen Y-P (陈玉萍), Ruan D-Y (阮冬燕). Effect of terrain condition on regional imbalance development of agricultural mechanization. *Chinese Rural Economy* (中国农村经济), 2013(9): 63-77 (in Chinese)

[34] Xie J (谢 杰), Li P (李 鹏). Direct influencing factors for the process of China's agricultural modernization and its spatial spillover effect. *Issues in Agricultural Economy* (农业经济问题), 2015(8): 42-48 (in Chinese)

[35] National Bureau of Statistics of the People's Republic of China (中华人民共和国国家统计局), Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China (中华人民共和国科学技术部). *China Statistics Yearbook on Science and Technology*. Beijing: China Statistics Press, 2001-2017 (in Chinese)

[36] Ministry of Finance of the People's Republic of China

(中华人民共和国财政部). *Finance Yearbook of China*. Beijing: China State Finance Press, 2001-2017 (in Chinese)

[37] Lin S-L (林善浪), Ye W (叶 炜), Zhang L-H (张丽华). Did rural labor selective transfer enhance agriculture mechanization? An analysis based on modified translog function. *Journal of Agrotechnical Economics* (农业技术经济), 2017(7): 4-17 (in Chinese)

[38] Ma H-Y (马恒运), Xu X (许 欣), Yan G-A (严功岸), *et al.* The change of agricultural-industry relation and theoretical explanation of rural revitalization over the past decades of rural and agricultural reform. *Issues in Agricultural Economy* (农业经济问题), 2018(7): 4-13 (in Chinese)

---

**作者简介** 杨建辉,男,1983年生,博士. 主要从事农业可持续发展研究. E-mail: qingfengzi@163.com

**责任编辑** 张凤丽

---