

# 我国农业生产中化肥施用效率的 时空变化与提升途径研究

王善高 刘 余 田 旭 严斌剑\*

**摘要:** 本文采用随机前沿生产函数,测算了我国农业化肥施用效率,并从时间和空间两个维度计算了在产出和其他投入不变时,农业化肥的削减潜能。在此基础上,采用Tobit模型考察了提高农业化肥施用效率的途径。主要结论有:当前我国农业化肥施用效率仍有较大的提升空间;农业化肥施用效率地区间差异明显,呈现出东北、中部、西部、东部依次递减的格局,而且各地区的农业化肥施用效率均呈现出递减趋势;如果能够消除化肥施用效率损失,在保持产出与其他投入不变的情况下,我国化肥施用潜在削减量较大,其中,山东、河南、安徽、江苏和广西等粮食主产省的潜在削减总量最大。根据本文的研究结果,实现化肥减量化目标可以采取以下措施:适当提高化肥价格,促进化肥品质提升;进一步深化规模化种植,以获取更多的农业收益;加强农业基础设施建设,以能更好的实现化肥的肥效,减少肥力流失。

**关键词:** 化肥施用效率;化肥削减潜能;随机前沿分析

## 一、引言

我国作为农业生产大国,农业生产中的化肥投入量呈逐年增加趋势(林源、马骥,2013)。据国家统计局数据显示,全国农业化肥施用折纯量从1978年的1635.4万吨,增长至2014年的

---

\*王善高,南京农业大学经济管理学院,邮政编码:210095,电子信箱:1551927977@qq.com;刘余,南京农业大学经济管理学院,邮政编码:210095,电子信箱:liuyunjau@foxmail.com;田旭(通讯作者),南京农业大学经济管理学院,邮政编码:210095,电子信箱:xutian@njau.edu.cn;严斌剑,南京农业大学经济管理学院,邮政编码:210095,电子信箱:byron251@163.com。

本文是国家自然科学基金项目“劳动力成本上升背景下农业生产方式转变与结构调整研究”(71473123),“新时期农业发展的国家政策支持体系研究”(71333008)和国家社会科学基金项目“加快构建新型农业经营体系研究”(14ZDA037)的阶段性成果。感谢匿名审稿人提出的宝贵意见,文责自负。

5995.9万吨,年均增长率为3.8%。我国农业化肥施用持续增长主要源于四个因素:第一,缺乏针对农业生产的环境规制,农户施用化肥带来的环境成本为零;第二,劳动力等其他投入要素相对化肥的价格上涨更快,化肥相对价格偏低;第三,出于粮食安全的考量,2015年以前政府对农产品持续补贴,这提高了农产品价格,造成农业过量生产(张卫峰等,2008);第四,长期大量使用化肥造成了土地肥力的下降,农业生产已经对化肥施用形成了依赖。

化肥是我国农作物增产的重要保障,虽然从农户角度而言,化肥施用量是在考虑当前的土地情况、种植作物以及投入产出价格情况下的最优选择,但大量施用也造成了资源浪费、环境污染和生产破坏等问题(马骥,2006;张智峰、张卫峰,2008;王奇等,2013;栾江等,2013)。2014年我国耕地化肥施用折纯量达到443.6kg/hm<sup>2</sup>,而同期的国际公认安全上限为225kg/hm<sup>2</sup>,我国化肥施用折纯量远远超过国际安全上限(张元红等,2015)。如果继续按目前的施用速度增长,必然会导致农业生产不可持续。为了控制农业化肥使用量,农业部适时提出了化肥施用“减量化”行动。在确保粮食安全目标的同时,如何减少化肥施用量,提高农业可持续生产能力成为当前我国农业发展的重要挑战。

遗憾的是,当前并没有统一的标准来界定每亩化肥的合理使用量。因此,在保持产出和其他要素投入不变的情况下,找出可能的最小化肥施用量成了实现化肥施用“减量化”目标的关键,但由于“最小化肥施用量”的标准难以界定,现有的研究还主要停留在田间试验层面(朱兆良,2000;张福锁等,2008)。庆幸的是,Reinhard等(1999)测算荷兰奶牛养殖户环境效率的思路给了我们启示,他们将环境效率定义为:假设产出和其他要素投入保持不变,用能够实现的最小有害物质施用量除以当前实际施用量,所得到的比值即为环境效率。随后,Karagiannis等(2003)、Zhang和Xue(2005)分别将这种思路引用到了农业灌溉用水效率和农业生产环境效率的测算中。受此启发,本文将化肥施用效率定义为在维持农业产出和其他要素投入不变时,最小化肥施用量与农业生产中实际施用量的比值。由定义可知,测算化肥施用效率能够使人们清楚地认识到在不改变产出和其他投入的前提下,农业生产中化肥过量使用的程度,进而使人们寻找到最优的化肥施用量,推动我国农业生产向更具可持续性的方向转变。

本文的研究主题是化肥效率、削减潜力以及化肥效率的影响因素,因此以下将从这三个方面进行文献综述。第一,在化肥效率方面。不同学者采用不同的指标来反映化肥效率,早期学者通常采用化肥偏生产力(即作物产量除以单位面积化肥投入量)来衡量化肥效率,如:张福锁等(2008)通过粮食主产区1333个田间实验数据,测算了水稻、小麦和玉米氮磷钾肥的偏生产力和生理利用率等指标。该指标虽然简单明了,但仅考虑了农业生产中的化肥作用,而忽略了其他投入要素的作用。随着随机前沿生产理论的发展,一些学者开始尝试用测算技术效率的方法来测算化肥效率。如:杨增旭和韩洪云(2011)采用随机生产函数测算了我国小

麦和玉米化肥施用的技术效率。颜璐和马惠兰(2014)运用随机前沿分析法估算了新疆棉农的化肥技术效率。第二,在化肥削减潜力方面。目前,学术界就中国化肥施用量已超过其经济意义上的最优施用量这一结论已经达成共识。许多学者从不同的角度研究我国化肥的削减潜力,如:朱兆良(2000)以水稻田为试验对象,研究发现我国农户水稻生产中氮肥的损失量为 $71\text{kg}/\text{hm}^2$ ,比合理施用量下氮肥的损失量高出2.8倍。张林秀等(2006)基于利润最大化的视角,通过实证分析发现我国农民在小麦、玉米和水稻生产上过量施肥程度达50%。第三,在化肥效率影响因素方面。现有文献大多考察农户特征、农户收入、生产规模、化肥价格和技术培训等对化肥效率的影响,如:杨增旭和韩洪云(2011)利用Tobit模型分析了化肥技术效率的影响因素,发现化肥价格、农民的收入水平、农户的种植规模和农户获得的技术培训对化肥技术效率有显著的影响。此外,张卫峰等(2008)、葛继红和周曙东(2012)还考察了农业种植结构调整、化肥市场的扭曲政策等对化肥效率的影响。

通过对相关文献的梳理,我们发现当前研究农业化肥施用的文献相对较少,而且已有的研究仅能证明农民施肥偏高,并不能测算出化肥施用可减少的程度。与此同时,测度化肥合适使用量的数据大多来自田间试验,由于我国耕地复杂多样,仅采用实验田数据将不具有代表性。针对以上不足,本文参照Reinhard等(1999)测算环境效率的思路,将化肥施用效率定义为在维持农业产出和其他要素投入不变时,最小化肥施用量与农业生产中实际施用量的比值。测算化肥施用效率不仅可以知道农业生产中化肥施用偏高的程度,而且还可以计算出农业生产中化肥的削减潜力和削减量。

有鉴于此,本文通过1998–2012年中国31个省份(不含港、澳、台地区)农业生产的省级面板数据,采用随机前沿生产函数,测算我国农业化肥施用效率,并从时间和空间两个维度计算在产出和其他投入不变时,农业化肥的削减潜能,在此基础上,采用Tobit模型考察农业化肥施用效率的影响因素,以期寻找出农业化肥施用效率的提升路径,进而为国家农业化肥“减量化”政策的制定提供理论参考。本文第二部分为研究方法和数据说明,第三部分是实证分析结果,第四部分为效率提升途径分析,最后是本文的结论。

## 二、研究方法

Reinhard等(1999)测算荷兰奶牛养殖户环境效率的方法主要有两个步骤,具体而言:第一步,通过随机前沿模型(SFA)测算单个养殖户奶牛养殖的技术效率;第二步,在第一步的基础上,维持产出和其他投入要素不变,用能够实现的最小污染物投入量除以污染物实际投入量。因此,本文也采用这种“两步法”来计算化肥施用效率。

根据上文分析,本文采用如下的SFA模型来测算农业生产技术效率:

$$Y_{it} = F(X_{it}, F_{it}; \beta) \times \exp(V_{it} - U_{it}) \quad (1)$$

式中:  $i$  和  $t$  分别表示省份和年份;  $Y_{it}$  表示农业产出;  $F(X_{it}, F_{it}; \beta)$  为设定的农业生产函数形式, 通常有 Cobb-Douglas 形式和 Translog 形式;  $X_{it}$  表示农业生产投入要素, 包括劳动、资本和土地等;  $F_{it}$  表示农业生产化肥施用量;  $\beta$  表示待估参数;  $(V_{it} - U_{it})$  为复合误差项, 其中,  $V_{it}$  为传统误差项, 表示天气、自然灾害等不可控因素对前沿产量的影响, 服从独立于  $U_{it}$  的正态分布  $N(0, \sigma_v^2)$ ;  $U_{it}$  为非效率项, 是一个非负数, 服从独立于  $V_{it}$  的半正态分布  $N^+(0, \sigma_u^2)$ 。根据技术效率的定义, 可以将技术效率表示为:

$$TE_{it} = Y_{it} / F(X_{it}, F_{it}; \beta) \times \exp(V_{it}) = \exp(-U_{it}) \quad (2)$$

在计算技术效率时, 本文将 SFA 模型的形式设置为 Translog 形式。那么, (1) 式可表示为:

$$\begin{aligned} \ln Y_{it} = & \beta_0 + \sum_{j=1}^m \beta_j \ln X_{jit} + \beta_n \ln F_{it} + \beta_t T + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \beta_{jk} \ln X_{jit} \ln X_{kit} + \\ & \sum_{j=1}^m \beta_{jn} \ln X_{jit} \ln F_{it} + \sum_{j=1}^m \beta_{jt} \ln X_{jit} T + \beta_{nt} \ln F_{it} T + \\ & \frac{1}{2} \beta_{nn} (\ln F_{it})^2 + \frac{1}{2} \beta_{tt} T^2 + V_{it} - U_{it} \end{aligned} \quad (3)$$

(3) 式中:  $i$  和  $t$  分别表示省份和年份;  $j$  和  $k$  表示投入变量  $X$  的序号数;  $n$  表示投入变量  $F$  的序号数;  $Y_{it}$  表示农业产出;  $X_{it}$  表示农业生产中的投入要素, 包括劳动、资本和土地等;  $F_{it}$  表示农业生产中化肥的实际施用量;  $T$  表示时间趋势。

在计算化肥施用效率时, 假设不存在技术效率损失, 即  $U_{it} = 0$ , 并保持产出及其他投入要素不变, 用可能达到的最少的化肥施用量  $F_{it}^F$  替代当前的实际施用量  $F_{it}$ 。那么, (3) 式改写为:

$$\begin{aligned} \ln Y_{it} = & \beta_0 + \sum_{j=1}^m \beta_j \ln X_{jit} + \beta_n \ln F_{it}^F + \beta_t T + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \beta_{jk} \ln X_{jit} \ln X_{kit} + \\ & \sum_{j=1}^m \beta_{jn} \ln X_{jit} \ln F_{it}^F + \sum_{j=1}^m \beta_{jt} \ln X_{jit} T + \beta_{nt} \ln F_{it}^F T + \\ & \frac{1}{2} \beta_{nn} (\ln F_{it}^F)^2 + \frac{1}{2} \beta_{tt} T^2 + V_{it} \end{aligned} \quad (4)$$

(4) 式中:  $i$  和  $t$  分别表示省份和年份;  $j$  和  $k$  表示投入变量  $X$  的序号数;  $n$  表示投入变量  $F_{it}^F$  的序号数;  $F_{it}^F$  表示可能存在的最少化肥施用量;  $Y_{it}$ 、 $X_{it}$ 、 $T$  和  $V_{it}$  等变量的定义同公式(3)中的定义一致。

根据上文分析, 化肥施用效率被定义为最小化肥施用量与实际施用量的比值, 即农业化肥施用效率  $EE_{it} = F_{it}^F / F_{it}$ , 其对数形式为  $\ln EE_{it} = \ln F_{it}^F - \ln F_{it}$ 。那么, 联立(3)式和(4)式, 并整理成关于  $\ln F_{it}^F - \ln F_{it}$  的形式:

$$\frac{1}{2}\beta_{nn}(\ln F_{it}^F - \ln F_{it})^2 + \left(\beta_n + \sum_{j=1}^m \beta_{jn} \ln X_{jit} + \beta_{nt}T + \beta_{nn} \ln F_{it}\right) \times (\ln F_{it}^F - \ln F_{it}) + U_{it} = 0 \quad (5)$$

我们发现,(5)式是关于  $\ln F_{it}^F - \ln F_{it}$  的一元二次方程<sup>①</sup>,通过数学公式可以求解出化肥施用效率:

$$\ln EE_{it} = \left\{ -\left(\beta_n + \sum_{j=1}^m \beta_{jn} \ln X_{jit} + \beta_{nt}T + \beta_{nn} \ln F_{it}\right) \pm \left[ \left(\beta_n + \sum_{j=1}^m \beta_{jn} \ln X_{jit} + \beta_{nt}T + \beta_{nn} \ln F_{it}\right)^2 - 2\beta_{nn}U_{it} \right]^{0.5} \right\} / \beta_{nn} \quad (6)$$

### 三、数据处理

本文数据主要来源于《中国统计年鉴》和《中国农村统计年鉴》两本宏观统计数据。需要说明的是:第一,农业生产化肥主要用于种植业中,因此本文以种植业(狭义农业)作为研究对象。第二,重庆直辖市1997年才成立,1997年及其以前年份的数据大多统计在四川省,由于缺乏合理的指标将其分离,因此本文选取1998年作为研究起点。此外,《中国统计年鉴》中的农林牧渔业从业人员仅公布到2012年,之后的数据不再公开,因此本文将研究的时间段设置为1998-2012年。

基于已有的研究成果和数据的可获得性,在估算随机前沿生产函数时,本文选取了如下的投入产出变量:

(1)农业产出  $Y$  (亿元):本文用农业总产值来表示农业产出,由于农业总产值是按当年价格计算,因此本文用农业总产值指数平减为1998年不变价格。

(2)土地投入  $X_1$  (千公顷):本文用农作物播种面积来表示土地投入,一方面能够保证数据来源一致,另一面也可以消除复种指数的影响。

(3)农业劳动力投入  $X_2$  (万人):本文用农业从业人数来表示农业劳动投入,但农业从业人数没有直接的数据来源,本文参照林毅夫(2008)、田伟等(2014)的方法,用农业产值占农林牧渔业总产值的比重作为权重乘以农林牧渔业从业人员计算。

(4)农业机械投入  $X_3$  (万千瓦):用各省(市)每年的农业机械总动力来反映。

(5)农药投入  $X_4$  (万吨):用各省(市)每年的农药使用量来反映。

(6)化肥投入  $X_5$  (万吨):用各省(市)每年的化肥折纯用量(包括氮肥、磷肥、钾肥和复合

<sup>①</sup>一元二次方程通常有两个解,考虑到化肥施用效率的取值应该在0~1之间,因此我们将舍弃大于1或者为负的解。



肥)作为化肥投入的指标。

需要说明的是,第一,农林牧渔业从业人员数据来自《中国统计年鉴》;农业产值、农林牧渔业总产值、播种面积、农业机械总动力、农药使用量和化肥施用量数据来自《中国农村统计年鉴》。第二,考虑到我国农业生产的自然禀赋特征,在实证分析中将我国各省划分为东部、中部、西部以及东北地区<sup>①</sup>四大地理区域对比研究。

#### 四、实证结果分析

##### (一)模型检验和估计

随机前沿模型的统计检验主要有变差率  $\gamma$  的单边似然比检验和函数设定形式检验两种 (Battese & Coelli, 1992)。首先,变差率  $\gamma = \sigma_u^2 / (\sigma_u^2 + \sigma_v^2)$  检验考察的是非效率项和随机误差项哪一个影响更大。若  $\gamma \neq 0$ ,说明偏差是由随机误差和非效率共同决定的;反之,若  $\gamma = 0$ ,则可以忽略非效率的影响。其次,模型设定形式检验主要考察SFA模型是否可以简化为C-D形式。针对本文所提出的两个检验,我们均采用似然率检验统计量LR来实现,计算公式为  $LR = -2[\ln(H_0) - \ln(H_1)]$ ,其中,  $L(H_0)$  和  $L(H_1)$  分别是有约束和无约束条件下的最大似然函数值,且LR服从自由度为  $n$  的  $\chi^2$  分布,  $n$  为约束的个数,统计检验结果见表1。结果显示,单边似然比检验<sup>②</sup>在1%的水平上通过检验,这意味着我国农业生产存在非效率现象,因此需要构建随机前沿生产函数。其次,模型设定形式检验也在1%的显著性水平上显著,说明随机前沿生产函数不可以简化为C-D形式,即需要选择Translog形式。表2展示了采用stata12.0软件估算的随机前沿生产函数的估计结果。

表1 模型设定形式检验

检验	自由度	$H_0$ 似然对数值	$\chi^2$ 统计量	$\chi^2$ 临界值			显著性
				0.01	0.05	0.1	
$\gamma = 0$	1	239.51	8.36	5.42	2.71	1.64	0.01
前沿函数为C-D	21	44.93	397.54	38.93	32.67	29.62	0.01

①东部地区省份为:北京、天津、河北、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、海南(10个省份);中部地区省份为:山西、安徽、江西、河南、湖北、湖南(6个省份);西部地区省份为:内蒙古、广西、重庆、四川、贵州、云南、西藏、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆(12个省份);东北地区省份为:辽宁、吉林和黑龙江(3个省份)。

②需要说明的是,由于  $\gamma = 0$  在边界上,其真实分布与普通  $\chi^2$  分布相差较大,此时用普通  $\chi^2$  分布来检验  $\gamma$  的似然比统计量不可靠,而应采用混合  $\chi^2$  分布,它能更好地解决成本效率前沿面上的参数检验问题,混合  $\chi^2$  的临界值来自Kodde和Palm(1986)。

表2 随机前沿生产函数模型的估计结果

变量	估计系数	T值	变量	估计系数	T值	变量	估计系数	T值
$\ln X_1$	3.189***	4.277	$t^2$	0.011***	10.338	$\ln X_3 \times \ln X_5$	-0.117	-0.838
$\ln X_2$	-1.613***	-3.071	$\ln X_1 \times \ln X_2$	-0.097	-0.786	$\ln X_3 \times T$	-0.006	-0.962
$\ln X_3$	-0.211	-0.308	$\ln X_1 \times \ln X_3$	-0.392***	-2.899	$\ln X_4 \times \ln X_5$	-0.129**	-2.138
$\ln X_4$	0.862***	3.280	$\ln X_1 \times \ln X_4$	-0.290***	-5.020	$\ln X_4 \times T$	-0.005	-1.088
$\ln X_5$	-1.352	-1.472	$\ln X_1 \times \ln X_5$	0.719***	4.690	$\ln X_5 \times T$	0.018°	1.759
$T$	0.004	0.064	$\ln X_1 \times T$	-0.004	-0.283	虚拟变量(东部)	0.051	1.038
$[\ln(X_1)]^2$	0.009	0.039	$\ln X_2 \times \ln X_3$	0.215***	2.793	虚拟变量(中部)	-0.271***	-6.436
$[\ln(X_2)]^2$	0.086	0.616	$\ln X_2 \times \ln X_4$	0.178***	3.758	虚拟变量(西部)	-0.160***	-3.406
$[\ln(X_3)]^2$	-0.025	-0.289	$\ln X_2 \times \ln X_5$	-0.304***	-3.384	_cons	-5.598***	-2.635
$[\ln(X_4)]^2$	-0.073	-1.627	$\ln X_2 \times T$	0.004	0.398	Usigma	-3.255***	-11.305
$[\ln(X_5)]^2$	-0.029	-0.128	$\ln X_3 \times \ln X_4$	0.276***	5.389	Vsigma	-4.883***	-11.930

注：\*、\*\*、\*\*\*分别表示在10%、5%和1%的水平下显著。

### (二)化肥施用效率的时空差异

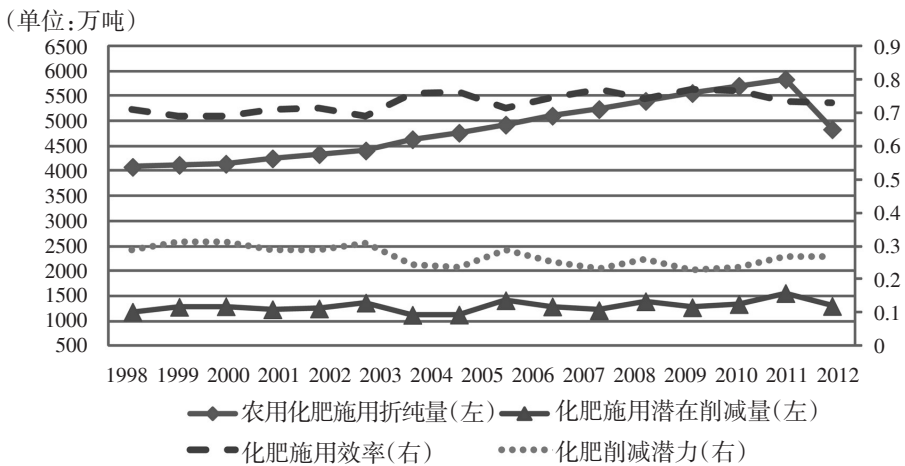
依据表2的估计结果,我们利用公式(6)计算了1998-2012年中国各地区农业化肥施用效率值(结果见表3)。首先,整体来看,我国农业化肥施用效率为0.731,说明当前我国农业化肥施用效率处在较高水平,但不可否认,我国农业化肥依然存在过量施用问题。如果能够消除施用效率损失,在维持当前投入与产出水平不变的情况下,我国农业化肥依然有26.9%的提升空间。其次,分地区来看,东部、中部、西部和东北地区农业化肥施用效率依次为0.627、0.798、0.725和0.815,呈现出东北、中部、西部、东部依次递减的格局。出现这种现象的可能原因是,与中西部以及东北地区相比,东部地区农民的非农就业机会更多,农户兼业化倾向更大,因此投入到农业生产的时间相对较少,而农业劳动力价格又较高,故农户倾向于通过加大化肥、农药等生产资料的使用来替代日常田间管理(何浩然等,2006;Ebenstein,2012),从而造成化肥施用量较高,化肥利用效率偏低。最后,从时间上来看,自2005年以来,无论是全国范围、东中西部地区还是东北地区,我国农业化肥施用效率均呈现出递减趋势,且这种趋势在中部地区体现得尤为明显,说明我国农业生产中化肥施用效率不断下降,因此有必要重新审视我国农业高化肥投入的生产方式。

表3 各地区化肥施用效率值

地区	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	平均
东部	0.615	0.598	0.627	0.663	0.654	0.631	0.707	0.728	0.652	0.702	0.730	0.686	0.718	0.713	0.651	0.672
中部	0.747	0.808	0.802	0.774	0.781	0.725	0.852	0.803	0.761	0.797	0.820	0.829	0.848	0.830	0.789	0.798
西部	0.741	0.678	0.668	0.693	0.702	0.695	0.744	0.754	0.707	0.733	0.749	0.726	0.767	0.762	0.752	0.725
东北	0.831	0.798	0.738	0.804	0.807	0.797	0.792	0.838	0.843	0.855	0.863	0.817	0.805	0.821	0.821	0.815
全国	0.710	0.689	0.688	0.710	0.712	0.690	0.758	0.763	0.713	0.747	0.768	0.742	0.771	0.765	0.733	0.731

### (三)农业化肥削减潜能分析

基于上文农业化肥施用效率时空差异分析,本文进一步测算了农业化肥在全国范围内的潜在削减量,这对我国政府制定化肥“减量化”政策至关重要。具体而言,由于化肥施用效率在0~1之间,因此我们以1作为历年化肥施用效率的潜在水平,用各年度的潜在化肥施用效率减去实际化肥施用效率得到化肥削减空间,再用化肥削减空间乘以实际化肥施用量,加总所有年份的潜在削减量即为全国潜在削减量,即潜在削减量=(1-实际化肥施用效率)×实际化肥施用量。图1展示了1998-2012年我国农业化肥施用总量及其潜在削减量的折线图。1998-2012年间,我国农业化肥年均施用折纯量为4836.38万吨,而化肥施用效率为0.731,如果能够消除化肥施用效率损失,在保持产出与其他投入不变的情况下,我国农业化肥每年平均可以削减1301.0万吨。此外,如果每年都能实现化肥施用完全效率,1998-2012年,我国农业化肥的削减总量将达19514.8万吨,超过任意两年化肥施用量的总和,说明如果能够有效地消除化肥施用效率损失,实现化肥施用最大潜能,将极大地缓解我国农业化肥施用量偏高的问题。当然,全部省份的化肥施用均实现完全有效只是理论存在的理想状况,现实中由于不同地区地形地质等因素的差异,化肥施用效率不可能完全一致,因此我们估计的化肥施用潜在削减总量是实际可削减量的上限值。



注:农用化肥施用折纯量数据来自《中国统计年鉴》。

图1 中国农业化肥施用总量及其潜在削减量

上文从时间维度分析了我国农业化肥的削减潜能,接下来,我们将从省级维度考察农业化肥削减潜能的地区差异。表4展示了1998-2012年各省农业化肥施用总量及其潜在削减量。首先,从削减潜力来看,我们发现农业化肥削减潜力最大的5个省份分别是西藏、北京、青海、海南、浙江。其中,西藏自治区的农业化肥施用效率仅有0.249,远远低于全国平均水平0.731,说明这些省份当前的农业化肥施用效率水平较低,还存在较大的改善空间。其次,从潜在削减总量来看,农业化肥潜在削减量最大的5个省份分别山东、河南、安徽、江苏和广



西。其中,山东省的农业化肥潜在削减量最大,达到了1937.68万吨。特别需要关注的是,在这些潜在削减量最大的5个省份中,山东、河南、安徽和江苏4个省份是粮食主产大省<sup>①</sup>,这说明实现化肥“减量化”目标的关键在于提升粮食主产区省份的农业化肥施用效率。

表4 1998-2012年各省农用化肥施用总量及其潜在削减量

地区	农用化肥施用折纯量(万吨)	化肥施用效率	化肥施用潜在削减量(万吨)	地区	农用化肥施用折纯量(万吨)	化肥施用效率	化肥施用潜在削减量(万吨)
北京	227.85	0.442	127.068	湖北	4430.36	0.851	660.856
天津	323.16	0.647	113.923	湖南	3130.35	0.843	491.021
河北	4465.82	0.825	781.221	广东	3131.09	0.765	735.930
山西	1462.09	0.710	423.310	广西	3004.07	0.667	1000.170
内蒙古	1837.49	0.897	190.163	海南	549.09	0.523	262.006
辽宁	1854.21	0.909	167.859	重庆	1215.42	0.735	322.521
吉林	2215.10	0.679	711.768	四川	3403.30	0.888	379.667
黑龙江	2447.75	0.858	348.127	贵州	1183.26	0.842	186.392
上海	228.09	0.675	74.179	云南	2204.89	0.706	647.516
江苏	5070.05	0.799	1017.717	西藏	58.01	0.249	43.540
浙江	1383.20	0.589	568.116	陕西	2382.93	0.830	404.522
安徽	4360.65	0.708	1272.621	甘肃	1131.17	0.801	225.328
福建	1809.74	0.734	481.033	青海	113.24	0.488	58.031
江西	1876.28	0.844	293.542	宁夏	466.68	0.660	158.567
山东	6827.36	0.716	1937.681	新疆	1807.34	0.933	120.269
河南	7945.61	0.830	1350.825				

注:农用化肥施用折纯量数据来自《中国统计年鉴》。

## 五、农业化肥施用效率的影响因素分析

基于前文分析,本文进一步构建多元线性模型来分析影响化肥施用效率的因素,进而寻找出提高效率的途径。

### (一)变量的选取

在现实生产中,影响农民化肥施用的因素有很多。一般认为,家庭收入情况、农业生产规模、化肥价格等会影响化肥的购买需求,而受教育程度、灌溉率等会影响化肥的施用技术。因此,本文选取化肥价格、农户收入、受教育程度、家庭种植规模、自然灾害率和灌溉率等作为化肥施用效率的影响因素。具体而言:

(1)化肥价格:一般而言,如果化肥价格上涨,理性经济农户必定会减少使用量,而且会

<sup>①</sup>粮食主产区包括:河北、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、江苏、安徽、江西、山东、河南、湖北、湖南、四川等13个省份。

更合理使用。同时,还可能寻找替代品,诸如增加农家肥的使用等。因此,化肥价格的上涨会促进农户化肥施用效率提高。由于化肥种类较多,价格缺乏统一的标准,本文参照杨增旭和韩洪云(2011)的方法,用各省的化学肥料价格指数来表示化肥价格,并折算成1998年不变价格。

(2)农户收入水平:农户收入增加对化肥施用效率的影响有两种效应:一方面,收入增加可能会缓解农户的预算约束,农户有充足的资金购买化肥等生产资料,因而很容易导致化肥施用过量,降低化肥施用效率;另一方面,随着收入增加,农户会购买质量较高、更有利于农作物吸收利用的高效化肥,而高效化肥的使用在于“质”而不是“量”,因此农户会更合理利用,这会提高农户的化肥施用效率。本文以农村居民家庭人均纯收入来表示农户收入水平。

(3)农民平均受教育水平:农民作为农业生产活动的主体,其受教育水平的高低在一定程度上可能会影响其生产决策的科学制定以及新型农业生产技术的采纳与运用,因此农民平均受教育水平对化肥施用效率具有正向效应。借鉴史常亮等(2015)的方法,用各级文化程度人口所占比重乘以所对应的受教育年限来表示农民平均受教育水平。

(4)农户种植规模:一般来说,种植规模越大,农户兼业化倾向越小,为了获取更多的农业收益,规模户会采用先进的农业生产技术和农业管理方式,来降低单位播种面积的固定投入成本和管理成本,因此农户种植规模对化肥施用效率具有正向效应。本文以各省平均每个农户拥有的农作物播种面积表示农户种植规模。

(5)自然灾害:农业生产在自然环境中进行,通常会受到自然条件的影响。我们认为农作物受灾后,农户会选择重新播种,为了最大限度挽回损失,会增加农业化肥等生产性资料的使用,从而容易导致化肥过量施用,降低农业化肥施用效率。本文选取农作物受灾率(农作物受灾面积/农作物播种面积)作为自然灾害的替代变量。

(6)灌溉率:一般来说,灌溉率较高的地区,农田基础设施建设也相对较好,在化肥的施用过程中,能更好地实现化肥的肥效,减少肥力流失。因此,我们认为灌溉率对化肥施用效率具有正向效应。灌溉率的计算公式为:农作物有效灌溉面积/农作物总播种面积。

化肥价格指数、农村居民家庭人均纯收入、农村居民家庭经营耕地面积、农村居民家庭劳动力文化程度状况、农作物受灾面积、农作物有效灌溉面积和农作物总播种面积数据均来自《中国统计年鉴》。

## (二)实证回归

在分析化肥施用效率的影响因素时,本文构造如下的实证方程:

$$EE_i = \alpha_0 + \sum \alpha_i X_i + u_i \quad (7)$$

式(7)中, $EE_i$ 表示化肥施用效率, $X_i$ 指影响化肥施用效率的因素。需要说明的是,由于作为因变量的化肥施用效率 $EE_i \in (0, 1]$ ,如果直接使用OLS回归,将导致估计结果有偏误,借鉴

Greene(2003)的思路,采用基于极大似然估计法的Tobit模型估计方程式(7),此时的估计结果不仅无偏而且有效。

需要说明的是,我们同时采用混合Tobit模型和随机效应面板Tobit模型估计方程式(7),并采用似然比检验(LR)比较哪一个模型更适用,回归结果展示在表5中。总体来看,混合Tobit模型的回归结果和随机效应面板Tobit模型的回归结果大体一致,说明本文的实证结果相对稳健。此外,LR检验( $\chi^2=258.53, P=0.000$ )的结果显示,回归样本存在个体效应,应使用随机效应面板Tobit模型回归。

表5 化肥施用效率影响因素回归结果

变量名称	混合Tobit模型		随机效应面板Tobit模型	
	估计系数值	T值	估计系数值	T值
化肥价格	0.095**	2.046	0.157***	3.625
农户收入水平	-0.080**	-2.329	-0.145***	-5.253
农户种植规模	0.009	1.119	0.018***	5.352
农民平均受教育水平	0.216	1.507	0.178	1.428
自然灾害	-0.261***	-4.189	-0.299***	-3.639
灌溉率	0.083***	4.673	0.085***	9.300
_cons	0.738***	3.626	1.146***	7.532
Sigma	0.097***	27.186	0.159***	30.496
LR 检验	chi2= 258.53; P=0.000			

注:\*, \*\*, \*\*\*分别表示在10%、5%和1%的水平下显著

总体来看,本文选取的变量对化肥施用效率具有显著的影响,而且影响方向与我们的预期基本一致。在正向影响方面:(1)化肥价格的估计系数为0.157,且在1%的水平上显著,说明化肥价格的提高会显著提升化肥施用效率。(2)农户种植规模的估计系数在1%的水平上显著为正,说明种植规模的扩大能够提升化肥施用效率。(3)灌溉率的估计系数为0.085,也在1%的水平上显著,说明灌溉率的提高也能够提升化肥施用效率。化肥价格、农户种植规模、灌溉率对化肥施用效率的影响均符合我们的理论预期,这意味着可以通过提高化肥价格、扩大种植规模以及改善农业生产设施水平来提高化肥施用效率,降低农业生产的环境成本。在负向影响方面:(1)农户收入水平的估计系数在1%的水平上显著为负,说明随着农户收入水平增加,农业化肥施用效率会降低。这可能是由于随着农户收入水平的提高,农户农业生产的资金约束会逐步降低,农户更有可能购买和施用更多的化肥,从而降低了化肥施用效率。(2)自然灾害的估计系数为-0.299,且在1%的水平上显著为负,说明自然灾害的发生会降低化肥施用效率,这可能是由于农作物受灾后,农户会选择重新播种,为了最大限度挽回损失,会增加农业化肥等生产性资料的使用,从而容易导致化肥过量施用,降低农业化肥施用效率。值得注意的是,农民平均受教育水平的估计系数虽然为正,但在统计上不显著,说明农民

平均受教育水平对化肥施用效率没有显著影响。一种可能的解释是,农民接受的教育不是农业生产方面的专业知识,其教育水平不能直接转化为农业生产技能,农业生产中化肥等生产性资料的施用还需要农民在农业生产实践中摸索和总结。

## 六、结论与讨论

本文通过1998—2012年中国31个省(市)农业生产的省级宏观数据,采用随机前沿生产函数,测算了我国农业化肥施用效率,并从时间和空间两个维度计算了在产出和其他投入不变时,农业化肥的削减潜能,在此基础上,采用Tobit模型考察了农业化肥施用效率的影响因素。主要结论有:(1)我国农业化肥施用效率的均值为0.731,表明当前我国农业化肥施用效率仍有26.9%的提升空间。此外,农业化肥施用效率也存在明显的地区差异,呈现出东北、中部、西部、东部依次递减的趋势。需要引起重视的是,自2005年以来,东中西部地区以及东北地区,农业化肥施用效率均呈现出递减的趋势,这给我国当前依靠大量化肥投入以维持高产的农业生产方式敲响了警钟。(2)通过分析农业化肥削减潜能发现,如果能够完全消除化肥施用效率损失,1998—2012年间,在保持产出与其他投入不变的情况下,我国农业化肥每年平均可以削减1301.0万吨。其中,西藏、北京、青海、海南、浙江等省的削减潜力较大,而山东、河南、安徽、江苏和广西等省的削减总量较大。特别需要关注的是,我们发现潜在削减量较大的省份大多是粮食主产省,说明实现化肥“减量化”目标的关键在于提升粮食主产区省份的农业化肥施用效率。(3)本文发现化肥价格上升、扩大种植规模、提高灌溉等农业基础设施水平可以有效提高化肥施用效率。

基于本文的研究,我们发现尽管我国农业化肥施用效率达到了0.731,但仍有较大的提升空间,而效率提升在一定程度上能够削减当前居高不下的化肥施用量。因此,化肥减量化目标实现的关键在于化肥施用效率的提升,而化肥价格、种植规模和灌溉率等对化肥施用效率又有显著的正向作用。对此,我们认为实现化肥减量化目标可以采取以下措施:第一,适当提高化肥价格,促进化肥品质提升。上文指出当化肥价格上涨时,理性经济农户会减少使用量,而且会更合理使用。第二,进一步深化规模化种植。一般来说,为了获取更多的农业收益,规模户会采用先进的农业生产技术和农业管理方式进行专业化生产,因而会更科学合理的施用化肥。第三,加强农业基础设施建设。影响灌溉率的主要因素是农业基础设施,通常来说,在化肥的施用过程中,农田基础设施建设较好的地区,能更好地实现化肥的肥效,减少肥力流失。

需要注意的是,虽然本文计算出了农业化肥的潜在削减量,但农业生产实际中影响化肥施用效率的因素太多,如农业生产技术、耕地地形、土壤地质和地理气候等,其中,各地区地理气候等异质性并不能通过技术外溢、人力资本投资等渠道消除,因此本文计算的化肥潜在削

减量是实际农业生产中可以达到的上限,即便如此,本文的研究依然能够为国家制定农业化肥“减量化”目标提供理论参考。

## 参考文献:

- [1] 马骥. 农户粮食作物化肥施用量及其影响因素分析——以华北平原为例[J]. 农业技术经济, 2006, (6): 157-157.
- [2] 葛继红, 周曙东. 要素市场扭曲是否激发了农业面源污染——以化肥为例[J]. 农业经济问题, 2012, (3): 92-98.
- [3] 何浩然, 张林秀, 李强. 农民施肥行为及农业面源污染研究[J]. 农业技术经济, 2006, (6): 2-10.
- [4] 栾江, 仇焕广, 井月, 廖绍攀, 韩炜. 我国化肥施用量持续增长的原因分解及趋势预测[J]. 自然资源学报, 2013, 28(11): 1869-1878.
- [5] 林源, 马骥. 农户粮食生产中化肥施用的经济水平测算——以华北平原小麦种植户为例[J]. 农业技术经济, 2013, (1): 25-31.
- [6] 林毅夫. 制度、技术与中国农业发展[M]. 上海: 上海人民出版社, 2008.
- [7] 史常亮, 朱俊峰, 栾江. 我国小麦化肥投入效率及其影响因素分析——基于全国15个小麦主产省的实证[J]. 农业技术经济, 2015, (11): 69-78.
- [8] 田伟, 杨璐嘉, 姜静. 低碳视角下中国农业环境效率的测算与分析——基于非期望产出的SBM模型[J]. 中国农村观察, 2014, (5): 59-71.
- [9] 王奇, 詹贤达, 王会. 我国粮食安全与水环境安全之间的关系初探——基于粮食产量与化肥施用的定量关系[J]. 中国农业资源与区划, 2013, 34(1): 81-86.
- [10] 颜璐, 马惠兰. 棉农化肥施用技术效率及影响因子分析——基于莎车县农户调查数据的实证研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2014, 40(2): 203-209.
- [11] 杨增旭, 韩洪云. 化肥施用技术效率及影响因素——基于小麦和玉米的实证分析[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(1): 140-147.
- [12] 张林秀, 黄季焜, 乔方彬. 农民化肥使用水平的经济评价和分析[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [13] 张卫峰, 季玥秀, 马骥, 王雁峰, 马文奇, 张福锁. 中国化肥消费需求影响因素及走势分析[J]. 资源科学, 2008, 30(2): 213-220.
- [14] 张元红, 刘长全, 国鲁来. 中国粮食安全状况评价与战略思考[J]. 中国农村观察, 2015, (1): 2-14.
- [15] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 崔振岭, 马文奇, 陈新平, 江荣凤. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- [16] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 生态环境学报, 2000, 9(1): 1-6.
- [17] 张智峰, 张卫峰. 我国化肥施用现状及趋势[J]. 磷肥与复肥, 2008, 23(6): 9-12.
- [18] Battese, G. E. and T. J. Coelli. Frontier Production Functions, Technical Efficiency and Panel Data: With Application to Paddy Farmers in India[J]. Journal of Productivity Analysis, 1992, 3(1): 153-169.
- [19] Ebenstein, A. The Consequences of Industrialization: Evidence from Water Pollution and Digestive Cancers in China[J]. Review of Economics & Statistics, 2012, 94(1): 186-201.
- [20] Greene, W. H. Econometric Analysis[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2003.
- [21] Karagiannis, G., V. Tzouvelekas, and A. Xepapadeas. Measuring Irrigation Water Efficiency with a Stochastic Production Frontier[J]. Environmental and Resource Economics, 2003, 26(1): 57-72.



[22] Kodde, D. A. and F. C. Palm. Wald Criteria for Jointly Testing Equality and Inequality Restrictions[J]. *Econometrica*, 1986, 54(5):1243–1248.

[23] Reinhard, S., C. A. Knox Lovell, and G. Thijssen. Econometric Estimation of Technical and Environmental Efficiency: An Application to Dutch Dairy Farms[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 1999, 2(81): 44–60.

[24] Zhang, T. and B. D. Xue. Environmental Efficiency Analysis of China's Vegetable Production[J]. *Biomedical and Environmental Sciences*, 2005, 18(1): 21–30.

## The Estimation of Fertilizer Use Efficiency in Agriculture and the Improving Ways

Wang Shangao, Liu Yu, Tian Xu and Yan Binjian

(School of Economics and Management of Nanjing Agricultural University)

**Abstract:** This paper use a translog production function investigate the efficiency of fertilizer in agricultural, than estimate the potential of reducing fertilizer usage for each province in each year, and further exam the determinants of fertilizer efficiency using a Tobit model. The main results include: At present, china's agricultural fertilizer application efficiency is still a big room for improvement; We find significant regional heterogeneity in fertilizer efficiency, and east China has lowest efficiency while north–east China has highest efficiency; Given the output and other inputs unchanged, the total fertilizer input has a huge room for reduction, of which the main crop area such as Shandong, Henan, Anhui, Jiangsu, and Guangxi have more potential to reduce fertilizer usage. Based on the research results, to achieve the goal of reducing fertilizer can take the following measures: First, appropriately increasing fertilizer prices, promote fertilizer quality improvement. Second, further deepen the scale of planting to obtain more agricultural benefits. Third, improving the construction of agricultural infrastructure to realize the fertilizer efficiency of fertilizer and reduce the loss of fertility.

**Keywords:** Fertilizer Use Efficiency; Fertilizer Reduction Potential; Stochastic Frontier Analysis

**JEL Classification:** Q5

(责任编辑:卢 玲)