

引用格式:展进涛,徐钰娇,葛继红.考虑碳排放成本的中国农业绿色生产率变化[J].资源科学,2019,41(5):884-896.[Zhan J T, Xu Y J, Ge J H. Change in agricultural green productivity in China considering the cost of carbon emissions[J]. Resources Science, 2019, 41(5): 884-896.] DOI: 10.18402/resci.2019.05.06

# 考虑碳排放成本的中国农业绿色生产率变化

展进涛<sup>1,2</sup>,徐钰娇<sup>1</sup>,葛继红<sup>1,2</sup>

(1. 南京农业大学 经济管理学院,南京 210095;

2. 南京农业大学 中国粮食安全研究中心,南京 210095)

**摘要:**绿色发展将成为中国未来农业增长的重点内容,衡量农业绿色生产率有利于正确判断当前绿色发展的阶段特征。本文引入碳排放交易理论,将考虑了碳排放成本的农业绿色GDP作为产出,将农业生产中的氮磷流失作为一种要素投入,运用参数随机前沿函数模型(SFA)测算并分析了中国农业2000—2015年的省(市、区)绿色全要素生产率(GTFP)变化指数,并传统全要素生产率(TFP)进行了比较分析。结果表明,研究期内中国农业GTFP年均下降0.14%,主要因2008/2009年前绿色技术的“退步”造成;从时间趋势和空间分布呈现明显的波动性特征以及地区之间的梯度性特征。此外,农业TFP变化指数优于GTFP变化指数,年均增长0.02%,主要得益于技术进步驱动,但传统技术效率处于年均下降状态。改变重产出的研发理念、加强农业绿色技术研发,进而提高传统投入要素的技术效率水平是中国未来提高农业绿色生产率的关键。

**关键词:**农业绿色生产率;碳排放成本;氮流失;磷流失;随机前沿分析(SFA);中国

DOI: 10.18402/resci.2019.05.06

## 1 引言

21世纪以来,中国农业经济取得了举世瞩目的发展成就,但也承受着严峻的环境压力。面临保持经济可持续增长和实现绿水青山的双重任务,“十三五”时期,中国史无前例地将“绿色”确定为发展理念,农业部门成为这一时期绿色增长的重点对象<sup>[1]</sup>;党的“十九大”报告也提出要强化农业面源污染防治和施行农村生产居住环境整治,推进绿色发展<sup>[2]</sup>。据国家统计局统计,中国主要农作物产品产量从2000年的46217.52万t增长到2017年的66160.72万t<sup>[3]</sup>,粮食产量大幅增长与以高产良种为中心,配以电力灌溉、机械化播种收割、温室养殖以及农药化肥等技术的生产方式密切相关,然而这些高污染高耗能型农业生产技术的使用促使农业绿色增长面临着耗水量大、排污严重和生产率低三重障碍。其中,

化肥施用和温室气体排放是农业生产的重要污染源。据2010年2月公布的《第一次全国污染源普查公报》统计,中国2007年农业源中总氮流失量和总磷流失量分别为270.46万t和28.47万t,造成了严重的土壤污染和水体富营养化<sup>[4]</sup>。同时,IPCC综合评估报告指出,2000—2010年世界农业生产的CO<sub>2</sub>当量排放约为5.0~5.8 Gt/a,占人为温室气体排放总量的1/4,其中中国农业产生的CO<sub>2</sub>当量约为0.8 Gt/a<sup>[5]</sup>。气候恶化带来了冰川融化和海平面上升等现象,使农作物生长地区的盐渍化和沼泽化更加严重,粮食安全的保障面临巨大挑战。总体上看,中国农业主要依靠资源消耗的粗放经营方式,农业面源污染和生态退化的趋势尚未有效遏制。根据新古典经济增长理论,越来越多的学者把全要素生产率(TFP)作为研究经济可持续增长的重要工具。因此,评价

收稿日期:2018-04-11,修订日期:2018-08-31

基金项目:中央高校业务经费项目(SKCX2017001);国家社会科学基金重大项目(11&ZD046);江苏省高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)。

作者简介:展进涛,博士,教授,博导,主要研究方向为农业科技政策。E-mail: jintao.zhan@njau.edu.cn

通讯作者:葛继红, E-mail: gjh@njau.edu.cn

2019年5月

中国农业真实绩效目前处于什么位置,如何进一步提高农业绿色全要素生产率(GTFP),是中国实现农业可持续发展和保障粮食安全的关键。

生产率分析是基于索洛增长核算方程的经济增长理论的新发展。目前,关于农业生产率的研究,国内外学者大多采用索洛余值法、前沿面的非参数数据包络分析(DEA)和参数随机前沿分析(SFA)三种方法<sup>[6]</sup>,鉴于变量选取和研究时期的不同,产生了不同的研究结果。由于“绿色生产率”概念的提出较为滞后,关于纳入环境因素的农业生产率的研究尚处于起步阶段。起初,Oskam<sup>[7]</sup>将大气污染、水污染、土壤污染等环境因素纳入农业生产率核算体系,测算以索洛余值表征的农业绿色生产率水平。随后,Ball等<sup>[8]</sup>运用DEA方法,推导出了非合意产出的虚拟价格,从而得出环境敏感性Fisher生产率变化指数。Hoang等<sup>[9]</sup>基于距离函数采用DEA方法分析了经合组织国家的农业环境绩效。近年来,Kuosmanen<sup>[10]</sup>把SFA和DEA模型相结合,推导出随机半参数数据包络模型(StoNED),并纳入农业CO<sub>2</sub>排放、氮磷储量等环境因素,评价了经合组织国家的农业绿色生产率。Zhou等<sup>[11]</sup>将污染量作为一种负要素投入,利用SFA方法核算了中国生猪产业的技术效率和环境效率。国内关于农业绿色生产率的测算较少,大多集中于采用DEA方法研究传统农业TFP、国民经济或者工业经济的绿色生产率增长。尤其是在王奇等<sup>[12]</sup>的研究后,由于污染物的价格信息无法获取,在农业绿色生产率测算中使用SFA方法很难有新的突破,因此基于SFA方法的研究十分匮乏。但是,SFA构建出了随机性生产前沿,与DEA方法相比较更贴合农业生产特征<sup>[13]</sup>,故目前国内研究基于SFA构建了新的环境效率指标作为延伸,而忽视了对农业GTFP进行精确的核算。总体来看,国内外的研究表明,农业绿色生产率增长低于传统生产率增长。此外,国内大部分的研究得出,地区间农业绿色生产率差异明显,东部增长最快,西部和中部增长速度不一。

在上述背景下,本研究引入资源环境经济学和生态经济学理论,结合传统生产率理论,在绿色GDP的视角下,尝试将具有价格信息的污染变量纳入产出核算体系,把无价格信息的污染变量纳入投

入核算体系,运用SFA方法研究考虑环境污染因素后的中国农业全要素生产率,即农业绿色全要素生产率(GTFP)的变化。此外,由于绿色GDP核算体系难以在现实中操作实施,所以本文引入碳排放交易理论,作为缓解全球气候变暖和温室效应所设定的市场交易机制,碳排放交易借鉴科斯定理,由政府设定CO<sub>2</sub>排放限额,通过供求因素支配交易市场,激励那些减排成本相对较低的污染型生产主体在市场上将污染许可证出售给减排成本相对较高的生产主体。这种污染权的重新配置可以最小化整个社会CO<sub>2</sub>排放的达标费用,即能够实现用最少的社会成本达到特定的污染和排放目标。2011年10月,随着《关于开展碳排放权交易试点工作的通知》的出台,中国发改委率先批准深圳于2013年6月18日启动碳交易试点工作,监测中国的碳K线;随后,北京、上海、广东、天津、湖北、重庆和福建七省陆续启动了碳交易试点工作;2017年,随着波恩气候大会的落幕,中国在上海正式启动了全国统一的碳交易平台。因此,本文获取了碳排放交易价格,把考虑碳排放成本后的农业生产总值定义为农业绿色生产总值。

## 2 理论模型与数据

### 2.1 理论模型:随机前沿分析模型

将环境污染纳入农业TFP测算框架主要有两种途径:一种是将环境污染作为非合意产出;另一种是将环境污染作为负的要素投入<sup>[12]</sup>。由于污染物的价格信息难以准确获取,所以目前学术界主要引入方向性距离函数,采用支持多投入—多产出的非参数DEA方法(表1)。该方法运用线性规划(Linear Programming)方法构建观测数据的非参数分段曲面(或前沿),依此测度效率变化和技术进步。而利用参数随机前沿方法(SFA)时,环境污染变量只能作为要素投入,但相比DEA方法,SFA方法具有可解释噪声和可用于研究传统假设检验的优点<sup>[14]</sup>。

故本文基于Battese等<sup>[21,22]</sup>的时变非效率SFA模型,将农业生产总值减去碳排放成本作为绿色产出,氮磷流失分别作为负的要素投入,构建考虑环境因素的绿色农业SFA模型:

$$GY_{it} = F(X_{it}, Z_{it}, t; \beta) \exp(V_{it} - U_{it}) \quad (1)$$

式中:GY<sub>it</sub>表示第t年第i个省的农业绿色生产总值;

表1 关于中国农业生产率和绿色生产率的主要研究方法及其结果

Table 1 Main research methods and results of agricultural green total factor productivity (GTFP) and total factor productivity (TFP) in China

时期	方法	不包含环境因素			包含环境因素			作者
		TFP变化 指数	技术效率 变化指数	技术进步 指数	GTFP变化 指数	技术效率 变化指数	技术进步 指数	
1978—2008年	SBM-M				1.029 4	0.970 5	1.060 8	李谷成 <sup>[13]</sup>
1991—2011年	DEA				1.009 4	0.998 3	1.042 0	杜江 <sup>[15]</sup>
1992—2010年	SFA-M	1.056 0	0.992 4	1.064 0	1.056 1	0.998 5	1.057 7	王奇等 <sup>[12]</sup>
1993—2010年	DEA-ML	1.043 5	0.985 1	1.027 9	1.023 3	0.995 7	1.018 9	韩海彬等 <sup>[16]</sup>
1997—2011年	DEA-M	1.041 3	0.982 3	1.063 7	1.040 3			崔晓等 <sup>[17]</sup>
1998—2009年	DEA-ML	1.051 0	0.981 0	1.071 0	1.029 0	1.001 0	1.028 0	潘丹等 <sup>[18]</sup>
1999—2008年	DEA-ML				1.018 0	0.997 0	1.021 0	杨俊 <sup>[19]</sup>
2000—2013年	DEA-L	1.877 1	1.002 3	1.092 9	1.150 1	1.000 2	1.016 1	梁俊等 <sup>[20]</sup>

$X_{it}$ 是一个  $n \times 1$  阶的传统投入向量(包括农业从业人员数量、农作物总播种面积、农业机械总动力、有效化肥施用量和农业 R&D 资本存量);  $Z_{it}$ 是一个  $m \times 1$  阶的环境要素投入向量(包括氮流失量和磷流失量);  $\beta$ 表示待估计的未知参数向量;  $V_{it}$ 表示随机统计噪声,独立于投入和技术水平且服从正态分布  $N(0, \sigma_v^2)$ ;  $U_{it} \geq 0$ , 表示技术无效因素,衡量存在技术非效率时的实际产出  $GY_{it}$ 与具有完全效率时的最大经济产出  $F(X_{it}, Z_{it}, t; \beta)$ 之间的距离,即满足:

$$U_{it} = z_{it}\delta + W_{it} \quad (2)$$

式中:  $z_{it}$ 表示与技术非效率有关的解释变量;  $\delta$ 为未知参数向量; 随机变量  $W_{it}$ 服从截尾正态分布  $N(0, \sigma^2)$ 。利用前沿规划的极大似然法进行参数估计:

$$\gamma = \frac{\sigma^2}{\sigma_v^2 + \sigma^2} \quad (3)$$

式中: 参数  $\gamma$  表征混合误差项方差中由无效率随机项解释的比例,必须属于区间  $(0, 1)$ , 当  $\sigma_v^2$  无限趋近于 0 时,  $\gamma \rightarrow 1$ , 说明实际产出与理论上最大产出之间的差距主要来自于技术无效因素; 当  $\sigma^2$  无限趋近于 0 时,  $\gamma \rightarrow 0$ , 表明  $i$  省的实际产出与理论上最大产出之间的差距主要来自于随机扰动<sup>[23]</sup>。

综上, 本文将第  $i$  个省  $t$  年的农业绿色技术效率  $GTE_{it}$  用下式表示:

$$GTE_{it} = \exp(-U_{it}) = \exp(-z_{it} - W_{it}) \quad (4)$$

那么,  $i$  省从  $t$  年到  $t+1$  年的农业绿色技术效率变动 ( $GECH$ ) 可递推表示为如下公式:

$$GECH_{it}^{t,t+1} = \frac{GTE_{it}^{t+1}}{TE_{it}^t} \quad (5)$$

由于技术变化是非中性的, 参照全炯振<sup>[6]</sup>的研究, 绿色技术变化指数 ( $GTCH$ ) 公式如下:

$$GTCH_{it}^{t,t+1} = \left[ 1 + \frac{\partial \ln F(X_{it}, Z_{it}, t; \beta)}{\partial(t)} \right] \times \left[ 1 + \frac{\partial \ln F(X_{it+1}, Z_{it+1}, t+1; \beta)}{\partial(t+1)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

运用 Malmquist 指数的原理, 农业绿色全要素生产率 ( $GTFPCH$ ) 的变动可以表示为:

$$GTFPCH_{it}^{t,t+1} = GECH_{it}^{t,t+1} \times GTCH_{it}^{t,t+1} \quad (7)$$

此外,  $TFPCH_i$  表示第  $i$  个省不纳入环境因素的农业全要素生产率变化指数。

## 2.2 数据来源依据及其预处理

1998 年, 联合国环境署最早在《国际清洁生产宣言》<sup>[24]</sup> 提出了“绿色生产率”的概念。基于此, 亚洲生产率组织对绿色生产率的界定为: 社会经济发展过程中, 通过使用适当技术、生产方式和管理手段, 生产提供环保型产品和服务, 从而能协同提高生产率和环境绩效时的效率水平。随后, Tolentino<sup>[25]</sup> 认为, 绿色生产率是生产经营主体在将污染治理到不会对社会福利产生负面影响时的生产率水平; 胡鞍钢等<sup>[26]</sup> 认为, 绿色生产率是纳入资源消耗和环境污染损失后的生产率水平。因此, 结合农业经济学的理论, 本文总结出 GTFP 测算模型涉及的投入要素涵盖物质资本、人力资本、技术投入和自然资源与环境, 据此, 确定以下要素投入变量和产出变量。

### 2.2.1 环境污染变量

Kuosmanen<sup>[10]</sup> 将农业特定的环境污染界定为氮



2019年5月

磷流失和CO<sub>2</sub>排放等。关于农业氮磷流失和CO<sub>2</sub>排放量,目前中国没有直接统计的数据,因此根据《第一次全国污染源普查公报》<sup>[4]</sup>得到的2007年农业氮流失量和磷流失量,以其占当年全国氮肥和磷肥使用量的比重得出各省(市、区)氮流失率和磷流失率,并基于各省(市、区)历年的氮肥和磷肥使用量得到氮流失量( $ne$ )和磷流失量( $pe$ )。同时,本文沿用李波等<sup>[27]</sup>的方法来预测省级CO<sub>2</sub>排放数量,以各类农业碳排放来源的数量与其碳排放系数乘积的总和计算得出,农业生产碳排放来源主要包括化肥、农药、农膜、柴油、翻耕和灌溉。其中,化肥和农药的碳排放系数分别为0.8956 kg/kg和4.9341 kg/kg,农膜的碳排放系数为5.1800 kg/kg,柴油的碳排放系数为0.5927 kg/kg,翻耕的碳排放系数为3.1260 kg/hm<sup>2</sup>,农业灌溉的碳排放系数为20.4760 kg/hm<sup>2</sup><sup>[27]</sup>。

### 2.2.2 传统投入变量

农业生产涉及的要害投入主要包括劳动力、土地、资源和技术。其中,劳动力投入选择第一产业从业人员数量( $x_1$ );土地投入选择农作物总播种面积( $x_2$ );机械和生物化学资源投入选择农业机械总动力( $x_3$ )和有效化肥施用量( $x_4$ )表示。由于本文把氮磷流失作为一种负的要害投入,为避免投入变量在生产函数中的重复计算,因而选择有效化肥施用量代表生物化学资源投入。关于有效化肥施用量,没有直接的统计数据,因此利用环境污染变量中得出的氮磷流失量,计算出氮肥和磷肥流失折存量,再将化肥施用折存量减去氮肥流失折存量(即氮流失量)和磷肥流失折存量得到各省(市、区)历年的有效化肥施用量。

关于技术一般用知识、科研费用、专利等表征,本文选择农业R&D资本存量( $x_5$ )。由于农业R&D资本存量无法直接从统计资料中获取,这里采用Fan等<sup>[28]</sup>的方法确定基期农业R&D资本存量,并根据张军等<sup>[29]</sup>的永续盘存法得到各省区历年的农业R&D资本存量,最后以固定资产投资价格指数进行平减为2000年不变价。

### 2.2.3 考虑碳排放成本的绿色产出变量

TFP生产函数的农业产出变量选择中国31个

省(市、区)<sup>1)</sup>2000—2015年的农业生产总值( $y$ ),为了剔除价格变动因素,以农业生产价格指数将当年价折算为2000年不变价。

根据环境成本理论和碳排放交易理论,本文定义碳排放成本 $c=C \times p$ ,其中 $C$ 表示CO<sub>2</sub>排放量, $p$ 表示碳排放交易价格。碳排放交易价格来源于中国碳排放交易网,由于中国的碳排放交易所从2013年才开始建立,2000—2012年的碳排放交易价格以最早的深圳排放权交易所的开盘价29元/t表征,2013—2015年的以全年各所平均价格的算数平均数表征,最后以农业生产资料价格指数将当年价折算为2000年不变价。根据联合国综合环境与经济核算体系工作组的界定,绿色GDP是从GDP中减去生产资本消耗和自然资本消耗得到的国内生产净值<sup>[30]</sup>。因此,本文将农业绿色生产总值( $GY$ )使用如下公式计算: $GY=y-c$ 。

以上数据主要来源于2000—2016年《中国农村统计年鉴》<sup>[31]</sup>、《中国农业统计年鉴》<sup>[32]</sup>、《中国科技统计资料汇编》<sup>[33]</sup>、《中国统计年鉴》<sup>[34]</sup>和各省(市、区)统计年鉴。产出与投入指标的统计描述见表2。此外,为分析中国区域层面农业GTFP和TFP变化情况,按照《全国农业可持续发展规划》<sup>[35]</sup>的农业区域划分标准,东北区包括辽宁、吉林、黑龙江3省;黄淮海区包括北京、天津、山东、河北、河南5省(市);长江中下游区包括江苏、浙江、上海、安徽、江西、湖北、湖南7省(市);华南区包括福建、广东、广西、海南4省;西北及长城沿线区包括内蒙古、山西、陕西、宁夏、甘肃、青海、新疆7省(区);西南区包括四川、重庆、贵州、云南、西藏5省市(区)。

## 3 农业绿色生产函数的模型设定与估计

### 3.1 模型设定及其检验

目前,在实证中使用随机前沿模型最常用的是C-D生产函数形式和Christensen等<sup>[36]</sup>提出的超越对数(Translog)生产函数形式。两者对比,Translog函数具有易估计性和包容性的优势,在结构上属于二次响应面模型,并对生产技术几乎没有附加限制条件,能准确反映生产函数中各种要素投入和时间投入的参数<sup>[19]</sup>。因此,本文选用相对灵活的Translog

1)因数据缺失未包含港澳台。

表2 随机前沿生产函数产出与投入变量的统计描述

Table 2 Statistical description of output and input variables of stochastic frontier (SF) production functions

统计量	最大值	最小值	平均值	标准差
农业绿色生产总产值/亿元	1 991.62	19.59	580.21	443.62
农业从业人员数量/万人	3 558.55	33.38	953.89	750.33
农作物总播种面积/千hm <sup>2</sup>	14 424.96	173.73	5 103.65	3 572.42
农业机械总动力/万kW	13 353.02	95.32	2 608.98	2 656.10
有效化肥施用量/万t	678.09	2.32	155.08	128.29
农业R&D资本存量/百万元	16 151.69	9.35	1 654.13	2 062.60
氮流失量/万t	28.90	0.14	8.68	6.74
磷流失量/万t	4.48	0.02	0.92	0.87
CO <sub>2</sub> 排放量/万t	805.17	3.41	221.96	173.98
碳排放成本/亿元	3.35	0.01	0.83	0.69

函数形式的SF模型,式(1)可表示为:

$$\ln GY_{it} = \beta_0 + \beta_t t + \frac{1}{2} \beta_{tt} t^2 + \sum_m (\beta_m + \beta_{mt} t) \ln X_{im} + \sum_n (\beta_n + \beta_{nt} t) \ln Z_{in} + \frac{1}{2} \left( \sum_m \sum_j \beta_{mj} \ln X_{im} \ln X_{ij} + \sum_m \sum_n \beta_{mn} \ln X_{im} \ln Z_{in} + \sum_n \sum_k \beta_{nk} \ln Z_{in} \ln Z_{ik} \right) + V_{it} - U_{it} \quad (8)$$

式中:  $\beta_t$  是时间平方的待估计参数;  $\beta_{mt}$  是时间变量与传统投入要素变量交互项的待估计参数;  $\beta_{nt}$  是时间变量与环境污染变量交互项的待估计参数;  $\beta_{mj}$  是传统投入要素变量两两交互项的待估计参数;  $\beta_{mn}$  是传统投入要素变量与环境污染变量两两交互项的待估计参数,  $\beta_{nk}$  是环境污染变量两两交互项的待估计参数。

一般来说,使用SFA需要进行两个检验,分别为:

(1)超越对数函数的适用性检验,原假设  $H_0$  为:

$$\beta_{tt} = \beta_{mt} = \beta_{nt} = \beta_{mj} = \beta_{mn} = \beta_{nk} = 0 \quad (9)$$

该假设如果成立,表明Cobb-Douglas生产函数模型可较好地描述生产结构与变化过程。

(2)技术变化的存在性检验,原假设  $H_0$  为:

$$\beta_t = \beta_{tt} = \beta_{mt} = \beta_{nt} = 0 \quad (10)$$

如果假设成立,表明模型不存在技术进步。

关于超越对数函数的适用性检验和技术变化的存在性检验均通过构建似然比检验(Likelihood-ratio Test Statistic)统计量  $LR$  来进行。似然比统计量定义为:  $LR = -2(\ln L' - \ln L)$ ,  $\ln L'$  和  $\ln L$  分别表示估

计非约束和约束模型得到的最大似然值。基于Stata 14.0的检验得出非约束模型的对数似然值为328.154,式(9)的对数似然值为52.606,  $LR$  统计量为551.100,  $p$  值为0,故拒绝零假设;式(10)的对数似然值为232.522,  $LR$  统计量为191.26,  $p$  值为0,故拒绝零假设。因此,超越对数函数适用于本文的SFA模型设定,且随机前沿函数模型存在技术进步。

### 3.2 模型估计结果

基于Belotti等<sup>[37]</sup>的归纳,本文通过Stata14.0软件运用最大似然估计方法得出式(8)中的相关参数,具体估计结果见表3。由表3的Wald用计量及其伴随概率可以看出,GTFP和TFP模型整体上显著,且模型中的大部分系数具有统计显著性,能较好地解释产出变量。

由表3可见, $\lambda$ 的估计值在纳入环境因素和未纳入环境因素时分别为9.410和12.161,且在1%水平上检验,说明中国农业生产存在绿色技术效率损失状况,无效率项  $U$  在复合扰动项  $\varepsilon (\varepsilon = V - U)$  中占据了主导地位;比较而言,考虑环境因素时的  $\lambda$  值较小,表明纳入环境因素时的技术效率普遍比不纳入环境因素时要高。进一步地,参数  $\gamma$  在考虑环境因素和未考虑环境因素时分别为0.989和0.993,显示出2000—2015年间中国农业生产总体处于非效率中,人为可控制的技术非效率占比较高。此外,时间变量  $t$  和  $t^2$  的回归系数均通过了1%显著性水平检验。由于一次项系数为负,二次项系数为正,表明随着时间的推移,技术进步在不断加快;环境污染变量氮流失和磷流失的一次项和二次项回归系数皆为负,

2019年5月

表3 SFA模型估计结果

Table 3 Estimation results of stochastic frontier analysis (SFA) model

自变量	GTFP模型			TFP模型		
	估计系数	标准误	伴随概率	估计系数	标准误	伴随概率
$t$	-0.269***	0.088	0.002	-0.186***	0.066	0.005
$0.5 \times t \times t$	0.011***	0.002	0.000	0.011***	0.002	0.000
$\ln x_1$	1.559**	0.654	0.017	0.654*	0.346	0.059
$\ln x_2$	-0.880	1.004	0.381	-0.926	0.743	0.213
$\ln x_3$	-2.204**	0.984	0.025	-0.493	0.724	0.496
$\ln x_4$	10.720***	1.941	0.000	1.997**	0.964	0.038
$\ln x_5$	0.223	0.382	0.559	0.407	0.256	0.112
$\ln ne$	-7.329***	1.651	0.000			
$\ln pe$	-1.684***	0.629	0.007			
$t \times \ln x_1$	0.005	0.010	0.611	0.041***	0.011	0.000
$t \times \ln x_2$	-0.008	0.013	0.511	-0.023	0.014	0.104
$t \times \ln x_3$	0.005	0.010	0.601	-0.008	0.011	0.473
$t \times \ln x_4$	0.049**	0.023	0.031	-0.007	0.013	0.568
$t \times \ln x_5$	-0.001	0.005	0.791	0.012**	0.005	0.011
$t \times \ln ne$	-0.040*	0.022	0.063			
$t \times \ln pe$	-0.005	0.008	0.570			
$\ln x_1 \times \ln x_1$	-0.021	0.091	0.822	0.231**	0.090	0.010
$\ln x_2 \times \ln x_2$	0.372***	0.121	0.002	0.309**	0.122	0.011
$\ln x_3 \times \ln x_3$	0.155***	0.043	0.000	0.170***	0.054	0.002
$\ln x_4 \times \ln x_4$	-0.624**	0.290	0.031	0.158	0.114	0.166
$\ln x_5 \times \ln x_5$	0.022**	0.010	0.032	-0.014	0.011	0.203
$\ln ne \times \ln ne$	-0.597***	0.210	0.004			
$\ln pe \times \ln pe$	-0.219***	0.051	0.000			
$\ln x_1 \times \ln x_2$	-0.404***	0.105	0.000	-0.298***	0.112	0.008
$\ln x_1 \times \ln x_3$	0.174**	0.073	0.018	0.050	0.082	0.542
$\ln x_1 \times \ln x_4$	0.525**	0.211	0.013	-0.243**	0.102	0.017
$\ln x_1 \times \ln x_5$	-0.094**	0.040	0.020	-0.080***	0.031	0.010
$\ln x_1 \times \ln ne$	-0.417**	0.163	0.011			
$\ln x_1 \times \ln pe$	0.123*	0.068	0.068			
$\ln x_2 \times \ln x_3$	-0.088	0.159	0.579	-0.242	0.160	0.131
$\ln x_2 \times \ln x_4$	-0.933***	0.259	0.000	-0.247	0.160	0.122
$\ln x_2 \times \ln x_5$	0.156***	0.048	0.001	0.098**	0.047	0.036
$\ln x_2 \times \ln ne$	0.654***	0.170	0.000			
$\ln x_2 \times \ln pe$	-0.034	0.088	0.701			
$\ln x_3 \times \ln x_4$	-0.198	0.178	0.267	0.072	0.166	0.664
$\ln x_3 \times \ln x_5$	-0.072*	0.042	0.089	-0.082**	0.036	0.022
$\ln x_3 \times \ln ne$	0.380***	0.107	0.000			
$\ln x_3 \times \ln pe$	-0.310***	0.075	0.000			
$\ln x_4 \times \ln x_5$	-0.103	0.075	0.167	0.048	0.049	0.325
$\ln x_4 \times \ln ne$	0.920**	0.424	0.030			
$\ln x_4 \times \ln pe$	0.710***	0.180	0.000			
$\ln x_5 \times \ln ne$	0.044	0.073	0.544			
$\ln x_5 \times \ln pe$	0.053	0.043	0.211			
$\ln ne \times \ln pe$	-0.160	0.165	0.334			
Constant	-6.999	4.95 1	0.157	2.209	2.150	0.304
$z_{it}\delta$	-0.382*	0.179	0.033	-0.602	0.500	0.228
$\sigma$	0.329***	0.042	0.000	0.467***	0.108	0.000
$\sigma_v$	0.035***	0.010	0.001	0.038***	0.012	0.002
$\lambda$	9.410***	0.043	0.000	12.161***	0.103	0.000
Wald统计量		65 734.680			44 475.340	
Wald伴随概率		0.000			0.000	
对数似然函数		328.154			197.709	
观测数		496			496	

注:\*\*\*、\*\*和\*分别表示在1%、5%和10%的水平下显著。

且均在1%的水平上显著,表明环境污染变量与农业绿色产出之间呈现负相关关系,是一种负作用的要素投入。

## 4 农业绿色生产效率的测算及实证结果分析

基于估计得到的随机前沿生产函数,通过式(5)和式(6)可测算出绿色技术效率变化指数和绿色技术进步指数,进而根据式(7)得到各省观测期历年的GTFP指数和TFP指数,具体计算结果见表4和表5。

### 4.1 农业绿色生产效率变化的时间趋势

从GTFP的变化及动因看,2000—2015年间,在考虑碳排放和氮磷流失的环境约束条件下,中国农业绿色技术效率年均增长率为0.15%,而农业GTFP年均下降0.14%,这主要与2008/2009年此前绿色技术进步指数连年小于1有关,即表明此前绿色技术是“退步”的。由于生产技术不具有可逆性,所以由农业政策和自然环境等因素造成的生产环境变化是导致技术“退步”的关键所在。综观研究期前后,

2003—2015年是中国农业发展的黄金时期,粮食实现了连年增长,除2003年淮河和渭河流域洪涝、2006年超强台风“桑美”和强热带风暴“碧利斯”、以及2008年南方低温雨雪冰冻和汶川地震等一系列重大自然灾害<sup>[38]</sup>,在耕地没有太大变化的情况下,农业GTFP在2008年后大致均处于增长状态,但增长幅度不大,无法抵消前期和受灾期GTFP的大幅下降,致使整个研究期内GTFP处于年均下降状态。虽然研究中后期随着《关于支持粮食产业化经营促进社会主义新农村建设的通知(2006)》<sup>[39]</sup>、《关于做好2011年粮食质量安全重点工作的通知》<sup>[40]</sup>和《国务院关于建立健全粮食安全省长责任制的若干意见(2014)》<sup>[41]</sup>等粮食安全保障政策的实施,农业生产要素投入大量增加,氮磷流失量和CO<sub>2</sub>排放量连年递增,制约了农业绿色技术效率的增长;然而,由于农业科研投入的不断加大和社会经济的持续增长,农业绿色技术“退步”受自然灾害等的冲击不断减弱,因此,绿色技术进步指数不断增加;从2008/2009年起农业前沿环境生产技术开始进步,且进步幅度逐

表4 2000—2015年中国农业GTFP和TFP变化指数及分解指数

Table 4 Change index and decomposition index of agricultural green total factor productivity (GTFP) and total factor productivity (TFP) in China, 2000-2015

年份	包含环境因素			不包含环境因素		
	GTFPCH	GECH	GTCH	TFPCH	ECH	TCH
2000/2001	0.888 4	0.976 1	0.910 0	0.889 9	0.979 3	0.908 9
2001/2002	0.963 4	1.044 3	0.922 3	0.953 1	1.028 1	0.927 4
2002/2003	0.888 7	0.950 9	0.934 8	0.901 0	0.955 9	0.942 8
2003/2004	0.957 0	1.010 0	0.947 4	0.970 7	1.014 7	0.956 5
2004/2005	1.033 1	1.075 5	0.960 1	1.011 5	1.043 7	0.969 0
“十五”期间平均	0.946 1	1.011 4	0.934 9	0.945 2	1.004 3	0.940 9
2005/2006	1.007 9	1.036 1	0.972 8	1.013 9	1.033 4	0.981 6
2006/2007	0.963 1	0.977 3	0.985 6	0.964 1	0.970 0	0.994 1
2007/2008	0.972 8	0.974 4	0.998 3	0.969 6	0.963 8	1.006 1
2008/2009	1.075 3	1.063 7	1.010 9	1.083 1	1.064 0	1.017 9
2009/2010	1.051 0	1.027 4	1.023 3	1.050 7	1.021 0	1.029 5
“十一五”期间平均	1.014 0	1.015 8	0.998 2	1.016 3	1.010 4	1.005 8
2010/2011	0.996 4	0.962 4	1.035 6	0.993 5	0.955 1	1.040 7
2011/2012	1.059 0	1.010 5	1.048 0	1.064 0	1.011 3	1.052 2
2012/2013	1.032 9	0.974 2	1.060 2	1.043 2	0.980 6	1.063 9
2013/2014	1.048 9	0.978 6	1.072 1	1.051 9	0.977 8	1.075 9
2014/2015	1.041 8	0.960 9	1.084 2	1.043 4	0.959 2	1.088 0
“十二五”期间平均	1.035 8	0.977 3	1.060 0	1.039 2	0.976 8	1.064 1



2019年5月

表5 2000—2015年中国各省(市、区)年均农业GTFP和TFP变化指数及分解指数

Table 5 Annual average change index and decomposition index of agricultural green total factor productivity (GTFP) and total factor productivity (TFP) in 31 provinces of China's mainland from 2000 to 2015

省份	包含环境因素			GTFPCH较 TFPCH的增减	不包含环境因素		
	GTFPCH	GECH	GTCH		TFPCH	ECH	TCH
辽宁	0.998 3	1.002 1	0.996 2	-	1.003 7	0.998 5	1.005 5
吉林	1.021 3	1.014 1	1.007 4	+	0.969 8	0.972 7	0.998 1
黑龙江	0.997 8	0.997 1	1.000 1	+	0.993 9	1.010 0	0.983 7
东北区平均	1.005 8	1.004 4	1.001 2	+	0.989 1	0.993 8	0.995 7
北京	0.969 7	0.990 6	0.979 5	-	0.987 2	0.988 7	1.001 7
天津	0.986 6	1.002 4	0.983 5	+	0.977 2	1.005 0	0.970 7
山东	1.018 7	0.996 1	1.024 4	+	1.006 2	0.988 0	1.019 7
河北	1.019 7	1.013 9	1.007 4	+	1.019 2	1.021 6	0.999 3
河南	0.994 8	0.978 4	1.017 5	+	0.992 0	0.974 0	1.019 3
黄淮海区平均	0.997 9	0.996 3	1.002 5	+	0.996 4	0.995 5	1.002 2
上海	0.962 1	0.997 8	0.964 3	-	0.981 4	1.002 6	0.979 6
江苏	0.991 6	0.995 0	0.996 5	-	1.005 4	1.000 6	1.004 4
浙江	0.979 8	0.990 5	0.989 8	-	1.008 4	0.989 9	1.019 4
安徽	1.010 6	0.993 9	1.017 8	+	0.982 6	0.983 2	0.999 8
湖北	0.993 8	0.995 6	0.998 4	+	0.989 4	0.990 2	0.999 2
湖南	0.987 9	0.983 5	1.004 5	-	1.010 0	0.986 2	1.024 4
江西	1.019 3	1.010 0	1.010 2	+	1.006 0	1.003 5	1.002 7
长江中下游区平均	0.992 2	0.995 2	0.997 4	-	0.997 6	0.993 8	1.004 2
广东	0.995 8	0.988 8	1.007 6	-	1.021 2	0.977 5	1.045 5
广西	1.017 5	0.996 6	1.022 8	+	1.009 6	0.987 2	1.024 4
福建	1.021 0	1.017 1	1.004 7	+	1.015 2	1.002 2	1.013 5
海南	1.042 5	1.035 5	1.008 6	+	0.987 6	0.982 8	1.004 0
华南区平均	1.019 2	1.009 5	1.010 9	+	1.008 4	0.987 4	1.021 8
内蒙古	0.967 0	0.976 2	0.991 0	+	0.954 7	0.979 4	0.975 4
山西	1.038 3	1.032 8	1.005 5	+	1.023 3	1.025 2	0.999 0
陕西	1.016 9	1.016 5	1.001 4	+	1.002 8	1.006 0	0.997 5
宁夏	1.038 4	1.057 4	0.983 8	+	1.013 5	1.052 7	0.963 7
甘肃	0.994 7	1.001 0	0.993 2	-	1.022 7	1.012 2	1.010 6
青海	1.017 2	1.037 5	0.983 3	+	1.013 9	1.032 1	0.984 3
新疆	0.978 7	0.991 4	0.987 3	+	0.972 5	0.986 8	0.985 9
西北及长城沿线区平均	1.007 3	1.016 1	0.992 2	+	1.000 5	1.013 5	0.988 1
四川	0.985 8	0.992 2	0.993 9	-	1.025 1	0.995 2	1.030 3
重庆	0.974 4	0.992 3	0.981 4	-	1.002 5	0.997 1	1.004 4
贵州	0.995 7	1.005 3	0.988 7	-	1.051 5	1.022 1	1.025 5
云南	0.956 9	0.963 3	0.993 1	-	0.998 0	0.968 5	1.030 4
西藏	0.965 6	0.981 2	0.985 2	-	0.960 9	0.970 9	0.991 0
西南区平均	0.975 7	0.986 9	0.988 5	-	1.007 6	0.990 8	1.016 3

年递增,带动了农业GTFP的增长。

从时间趋势看,农业绿色生产效率的变化呈现显著的周期性波动,可将整个研究时期划分为“十五”“十一五”“十二五”三个阶段,拉长时间跨度后,

发现GTFP变化指数的波动性趋于平稳,三个阶段的平均增长率逐步提升,各时期GTFP变动模式也各不相同。第一阶段,21世纪伊始,由于自然灾害的频发和农业清洁生产技术的匮乏,GTFP在数据



上显示出逐年下降的趋势,年均下降5.39%,主要由前沿绿色技术“退步”造成(6.51%)。虽通过一系列促进粮食高产的科技政策的实施,这一时期的绿色技术效率年均增长1.14%,但依然挽救不了农业GTFP负增长的局面。第二阶段,国务院出台各类环境文件严控了全国主要污染物的排放量,伴随中国应对气候变化科技专项行动等的开展,农业绿色技术从2008/2009年开始步入进步轨道,伴随年均1.58%的高绿色技术效率增长,农业GTFP的年均增长率为1.40%。第三阶段,基于农业可持续发展政策的出台,《关于加快推进农业清洁生产的意见》<sup>[42]</sup>和《测土配方施肥技术规范(2011年修订版)》<sup>[43]</sup>等政策法规相继贯彻落实,GTFP处于高速增长阶段(3.58%),主要源于前沿绿色技术进步年均增长6.00%,但由于资源无效配置造成绿色技术效率年均恶化2.27%,因此该阶段GTFP增长完全由技术进步诱导。

#### 4.2 农业绿色生产效率变化的空间分布

从中国各地区之间农业GTFP变化的差异来看,东北区、华南区和西北及长城沿线区在研究期内农业GTFP的年均增长率分别为0.58%、1.92%和0.73%,黄淮海区、长江中下游区和西南区分别年均下降0.21%、0.78%和2.43%。显然,东北区、华南区和西北及长城沿线区农业GTFP处于增长趋势,且华南区增长较快,黄淮海区和长江中下游区GTFP的下降趋势相对西南区较为缓慢,表明中国地区间农业GTFP变化不平衡。样本期间,东北区和华南区GTFP的持续增长由绿色技术效率和绿色技术进步协同推动,而西北及长城沿线区仅由绿色技术效率诱导;其他三大地区均出现GTFP负增长现象,其中西南区是负增长最大的区域,这主要与西南区要素配置错位、水土流失严重、农业基础设施落后、抗灾能力薄弱有关。然而,作为大宗农产品主产区的黄淮海区和长江中下游区出现GTFP负增长是需要引起重视的,究其原因,这主要与中国农业布局向东北等转移有关,且这两个区域农业绿色技术水平基数较高,研发重点也更加倾向于非农部门,导致其在绿色技术效率提升和技术进步上分别存在缺陷。

农业绿色生产效率的增长在省域之间呈现出一定的发展梯度。模型得出全国31个省(市、区)的

农业GTFP年均增速从快到慢依次为:海南、宁夏、山西、吉林、福建、河北、江西、山东、广西、青海、陕西和安徽;农业GTFP年均负增长速度从快到慢依次是云南、上海、西藏、内蒙古、北京、重庆、新疆、浙江、四川、天津、湖南、江苏、湖北、甘肃、河南、贵州、广东、黑龙江和辽宁。此外,在农业GTFP增长的省区中,海南、山西、吉林、福建、河北、江西和陕西由绿色技术效率增长和绿色技术进步共同驱动,山东、广西和安徽属于绿色技术进步诱导型增长,宁夏和青海属于绿色技术效率诱导型增长。

#### 4.3 农业绿色生产效率与传统生产率的比较分析

考察2000—2015年期间的农业TFP变化可以发现,中国农业TFP年均增长0.02%,其变化指数优于考虑环境因素后的GTFP变化指数。分解来看,农业技术效率年均下降0.28%,而农业技术年均进步0.36%。与前人研究相比,TFP和农业技术进步的增速与农业技术效率的降速都相对放缓。但与大部分传统农业全要素生产率研究结果相一致的是,中国TFP增长主要得益于技术进步,技术效率的降低抵消了一部分技术进步的效果,这与纳入环境要素的GTFP变化指数的结果相反。纳入环境要素后,绿色技术进步变化指数小于传统的技术进步变化指数,表明中国农业生产使用的还是追求产量和效率的非清洁生产技术;绿色技术效率变化指数普遍大于传统的技术效率变化指数,某种程度上表明中国农业生产中环境要素投入利用效率处于增长状态,而在现有技术水平上,传统要素投入利用效率处于下降状态。

进一步比较2000—2015年间中国农业GTFP变化与TFP变化的时间趋势和空间分布特点可得出,两者均呈现明显的波动性特征,波动趋势一致,且每相邻两年之间的变化率较为接近,整体呈上升趋势(图1)。与GTFP相比,TFP同样表现出了地区之间不平衡变化的特征,但与GTFP空间分布不同的是,TFP的年均增长率从大到小依次为:华南区(0.84%)、西南区(0.76%)和西北及长城沿线区(0.05%),而其余地区的TFP处于年均下降状态。综观各个地区GTFP与TFP变化指数之间的关系,仅西南区出现了TFP年均增长、GTFP年均下降的情况,且GTFP变化指数比其TFP低3.19个百分点,

2019年5月

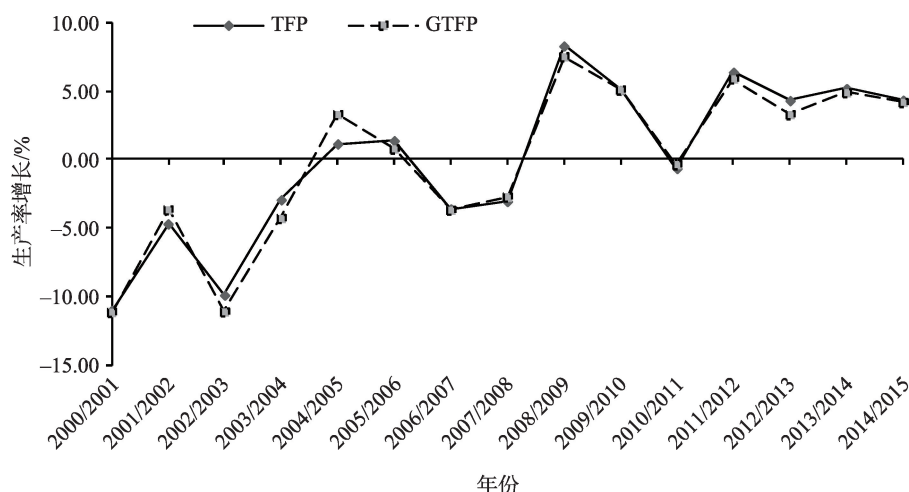


图1 2001-2015年中国农业GTFP与TFP增长率的波动

Figure 1 Change of growth rate of agricultural green total factor productivity (GTFP) and total factor productivity (TFP) in China, 2001-2015

其原因可能是随着20世纪90年代西部大开发战略的实施,西南区传统投入要素的利用效率增长最快,秉承先发展后治理的传统理念,其对农业环境污染的关注相对较少,因此当纳入环境因素后,其绿色技术进步指数的下降幅度最大,绿色技术效率的增长幅度最小。

## 5 结论与政策启示

### 5.1 结论

本文使用2000—2015年的中国省级面板数据,基于农业绿色增长的视角,将农业生产带来的CO<sub>2</sub>排放和氮磷流失环境污染考虑进生产率测算体系,结合SFA模型,测算并分析了21世纪以来中国各省(市、区)的农业绿色生产率和传统生产率变化指数及其分解指数,发现中国农业绿色生产效率呈现明显的波动性特征以及地区之间的梯度性特征。2000—2015年期间,中国农业绿色生产效率年均下降0.14%,主要是因2008/2009年前绿色技术的“退步”而致,但绿色技术效率的增长减轻了部分技术“退步”的影响。尽管如此,农业绿色生产率的变化总体呈现良好局面,具体来看,“十五”期间农业绿色生产效率年均下降5.39%,主要由绿色技术“退步”造成;“十一五”期间农业绿色生产效率年均增长1.40%,主要由绿色技术效率增长推动;而“十二五”期间农业绿色生产效率年均增长3.58%,处于快速增长期,主要由前沿绿色技术进步贡献。从空间分布看,东北区、华南区和西北及长城沿线区年均农

业绿色生产率处于增长状态,其中华南区增长速度最快;黄淮海区、长江中下游区和西南区分别处于下降状态,其中西南区下降速度最快。

### 5.2 政策启示

从研究结果看,中国农业绿色全要素生产率和传统全要素生产率增长分别依靠绿色技术效率提高和传统技术进步推动,因此,同步加大农业绿色技术研发和加强先进技术的推广与应用,是提高农业绿色生产率必不可少的环节。同时,由于区域差异较大,东北区需要着重提高传统要素投入的生产率;西南区应更加注重并借鉴发达地区经验,分区实施小流域农业面源污染综合治理,充分合理利用草地资源涵养水源,在绿色维护中发展特色农业,避免重复东部地区“先污染,后治理”的模式;而黄淮海区和长江中下游区作为中国人口密集、经济发达的地区,应加大力度进行审慎的政策设计以巩固农产品主产区供给地位,不仅需要使农业R&D投入有效转化为高产、稳产、抗旱涝的生产技术,还应构建与资源环境承载力相适应的健康安全生产模式,改善农业农村环境。此外,近年来的农业环境规制政策已取得较好的效果,对农业环境的保护政策应继续实施并加大“双减”政策、土壤修复政策的全面普及,鼓励循环农业和生态农业的发展,加强对环境友好型农业生产行为的补贴。最后,中国应建立健全统一的全国碳排放交易市场,并逐步纳入农业行业,从而有效地推动农业绿色全要素生产率的提

高,实现农业的绿色增长与可持续发展。

## 参考文献(References):

- [1] 中国国家发展与改革委员会. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要(全文) [EB/OL]. (2016-03-17) [2018-04-11]. <http://www.12371.cn/special/sswgh/>. [China National Development and Reform Commission. Outline of the Thirteenth Five-Year Plan for National Economic and Social Development of the People's Republic of China (Full Text) [EB/OL]. (2016-03-17) [2018-04-11]. <http://www.12371.cn/special/sswgh/>.]
- [2] 中华人民共和国中央人民政府. 中国共产党第十九次全国代表大会报告[EB/OL]. (2017-12-01) [2018-04-11]. <http://www.gov.cn/zhuanti/19thcpc/baogao.htm>. [Central People's Government of the People's Republic. Report of the 19th National Congress of the Communist Party of China [EB/OL]. (2017-12-01) [2018-04-11]. <http://www.gov.cn/zhuanti/19thcpc/baogao.htm>.]
- [3] 中国国家统计局. 主要农作物产品产量[EB/OL]. (2011-07-12) [2018-04-11]. <http://data.stats.gov.cn/search.htm?s=主要农作物产品产量>. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Output of Major Crop Products [EB/OL]. (2011-07-12) [2018-04-11]. <http://data.stats.gov.cn/search.htm?s=主要农作物产品产量>.]
- [4] 国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室. 第一次全国污染源普查公报[R]. 北京: 国务院, 2010. [The First National Pollution Census Leading Group Office of State Council. The First National Pollution Census Bulletin [R]. Beijing: The State Council, 2010.]
- [5] IPCC. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change, Working Group III Report [R]. Geneva: IPCC, 2014.
- [6] 全炯振. 中国农业全要素生产率增长的实证分析: 1978-2007年: 基于随机前沿分析(SFA)方法[J]. 中国农村经济, 2009, (9): 36-47. [Quan J Z. An empirical analysis of China's agricultural total factor productivity growth: 1978-2007: Based on Stochastic Frontier Analysis (SFA) method [J]. Chinese Rural Economy, 2009, (9): 36-47.]
- [7] Oskam A. Productivity measurement, incorporating environmental effects of agricultural production[J]. Developments in Agricultural Economics, 1991, 7(2): 186-204.
- [8] Ball V E, Nehring R. Incorporating environmental impacts in the measurement of agricultural productivity growth[J]. Journal of Agricultural & Resource Economics, 2004, 29(3): 436-460.
- [9] Hoang V N, Coelli T. Measurement of agricultural total factor productivity growth incorporating environmental factors: A nutrients balance approach[J]. Journal of Environmental Economics & Management, 2011, 62(3): 462-474.
- [10] Kuosmanen T. Green Productivity in Agriculture: A Critical Synthesis[R]. Helsinki: Aalto University Technical Report, 2013.
- [11] Zhou Y H, Zhang X H, Tian X, et al. Technical and environmental efficiency of hog production in China: A stochastic frontier production function analysis[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(6): 1069-1080.
- [12] 王奇, 王会, 陈海丹. 中国农业绿色全要素生产率变化研究: 1992-2010年[J]. 经济评论, 2012, (5): 24-33. [Wang Q, Wang H, Chen H D. A study on agricultural green TFP in China: 1992-2010 [J]. Economic Review, 2012, (5): 24-33.]
- [13] 李谷成. 中国农业的绿色生产率革命: 1978-2008年[J]. 经济学(季刊), 2014, 13(1): 537-558. [Li G C. The green productivity revolution of agriculture in China from 1978 to 2008 [J]. China Economic Quarterly, 2014, 13(1): 537-558.]
- [14] 蒂莫西·J·科埃利. 效率与生产率分析引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2008. [Timothy J C. An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis [M]. Beijing: China Renmin University Press, 2008.]
- [15] 杜江. 中国农业增长的环境绩效研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2014, (11): 53-69. [Du J. Study on the environmental performance of China's agricultural growth [J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2014, (11): 53-69.]
- [16] 韩海彬, 赵丽芬. 环境约束下中国农业全要素生产率增长及收敛分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(3): 70-76. [Han H B, Zhao L F. Growth and convergence of agricultural total factor productivity in China under environmental regulations [J]. China Population, Resource and Environment, 2013, 23(3): 70-76.]
- [17] 崔晓, 张屹山. 中国农业环境效率与环境全要素生产率分析[J]. 中国农村经济, 2014, (8): 4-16. [Cui X, Zhang Q S. China agricultural environment efficiency and environmental TFP analysis [J]. Chinese Rural Economy, 2014, (8): 4-16.]
- [18] 潘丹, 应瑞瑶. 资源环境约束下的中国农业全要素生产率增长研究[J]. 资源科学, 2013, 35(7): 1329-1338. [Pan D, Ying R Y. Agricultural total factor productivity growth in China under the binding of resource and environment [J]. Resources Science, 2013, 35(7): 1329-1338.]
- [19] 杨俊, 陈怡. 基于环境因素的中国农业生产率增长研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(6): 153-157. [Yang J, Chen Y. Empirical study on China's agricultural production growth under the binding of environment [J]. China Population, Resource and Environment, 2011, 21(6): 153-157.]
- [20] 梁俊, 龙少波. 农业绿色全要素生产率增长及其影响因素[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2015, (3): 1-12. [Liang J, Long S B. China's agricultural green total factor productivity growth and its affecting factors [J]. Journal of South China Agricultural University (Social Science Edition), 2015, (3): 1-12.]
- [21] Battese G E, Coelli T J. Frontier production functions, technical efficiency and panel data: With application to paddy farmers in India



2019年5月

- [J]. *Journal of Productivity Analysis*, 1992, 3(1-2): 153-169.
- [22] Battese G E, Coelli T J. A model for technical inefficiency effects in a stochastic frontier production function for panel data[J]. *Empirical Economics*, 1995, 20(2): 325-332.
- [23] 胡岩岩. 中国农业全要素生产率、地区差距及收敛性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2010. [Hu Y Y. Study on Chinese Agricultural Total Factor Productivity, Regional Disparities and Convergence[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.]
- [24] 联合国环境署. 国际清洁生产宣言[EB/OL]. (2003-04-21) [2018-04-11]. [http://www.china.com.cn/environment/txt/2003-04/21/content\\_5317771.htm](http://www.china.com.cn/environment/txt/2003-04/21/content_5317771.htm). [UNEP. International Cleaner Production Declaration[EB/OL]. (2003-04-21)[2018-04-11]. [http://www.china.com.cn/environment/txt/2003-04/21/content\\_5317771.htm](http://www.china.com.cn/environment/txt/2003-04/21/content_5317771.htm).]
- [25] Tolentini A L. New Concepts of Productivity and Its Improvement [C]. Budapest: European Productivity Network Seminar, 2004.
- [26] 胡鞍钢, 郑京海, 高宇宁, 等. 考虑环境因素的省级技术效率排名(1999-2005)[J]. *经济学(季刊)*, 2008, 7(3): 933-960. [Hu A G, Zheng J H, Gao Y N, et al. Provincial technology efficiency ranking with environment factors(1999-2005) [J]. *China Economic Quarterly*, 2008, 7(3): 933-960.]
- [27] 李波, 张俊飏, 李海鹏. 中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(8): 80-86. [Li B, Zhang J B, Li H P. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China [J]. *China Population, Resource and Environment*, 2011, 21(8): 80-86.]
- [28] Fan S, Pardey P G. Research, productivity, and output growth in Chinese agriculture [J]. *Journal of Development Economics*, 1997, 53(1): 115-137.
- [29] 张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952-2000[J]. *经济研究*, 2004, (10): 35-44. [Zhang J, Wu G Y, Zhang J P. The estimation of China's provincial capital stock: 1952-2000 [J]. *Economic Research Journal*, 2004, (10): 35-44.]
- [30] 中国国家统计局. 2004年中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2004. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Statistical Yearbook 2004*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2004.]
- [31] 中国国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001-2016. [Department of Rural Social and Economic Investigation of the National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China's Rural Statistical Yearbook*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2001-2016.]
- [32] 中华人民共和国农业农村部. 中国农业统计资料[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001-2016. [The Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. *China Agriculture Statistical Report*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001-2016.]
- [33] 中国农业部科技教育司. 全国农业科技统计资料汇编[M]. 北京: 中国农业部科技发展中心, 2001-2016. [Department of Science and Technology Education in China Ministry of Agriculture. *Compilation of National Agricultural Science and Technology Statistics*[M]. Beijing: Science and Technology Development Center of China Ministry of Agriculture, 2001-2016.]
- [34] 中国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001-2016. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Statistical Yearbook*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2001-2016.]
- [35] 中华人民共和国农业部. 全国农业可持续发展规划(2015-2030年) [EB/OL]. (2015-05-28)[2018-04-11]. [http://jiuban.moa.gov.cn/sjzz/jgs/cfc/yw/201505/t20150528\\_4620635.htm](http://jiuban.moa.gov.cn/sjzz/jgs/cfc/yw/201505/t20150528_4620635.htm). [Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. *National Agricultural Sustainable Development Plan (2015-2030)*[EB/OL]. (2015-05-28) [2018-04-11]. [http://jiuban.moa.gov.cn/sjzz/jgs/cfc/yw/201505/t20150528\\_4620635.htm](http://jiuban.moa.gov.cn/sjzz/jgs/cfc/yw/201505/t20150528_4620635.htm).]
- [36] Christensen L R, Jorgenson D W, Lau L J. Transcendental logarithmic production frontiers[J]. *Review of Economics & Statistics*, 1973, 55(1): 28-45.
- [37] Belotti F, Daidone S, Ilardi G, et al. Stochastic frontier analysis using Stata[J]. *CEIS Research Paper*, 2013, 13(4): 719-758.
- [38] 柴观珍, 张晓曦. 天津市社会科学界联合会. 科学发展·惠及民生: 天津市社会科学界第八届学术年会优秀论文集(下)[C]. 天津: 天津市社会科学界联合会, 2012. [Chai G Z, Zhang X X. *Tianjin Social Science Federation. Scientific Development · Benefiting the People's Livelihood: Excellent Papers of the 8th Annual Academic Conference of Tianjin Social Sciences (Part 2)*[C]. Tianjin: Tianjin Social Science Federation, 2012.]
- [39] 中国国家粮食局, 中国农业发展银行. 关于支持粮食产业化经营促进社会主义新农村建设的通知(2006)[J]. *中国农村科技*, 2006, (3): 6. [China National Grain Bureau, China Agricultural Development Bank. Notice on supporting grain industrialization and promoting the construction of new socialist countryside (2006)[J]. *China Rural Science and Technology*, 2006, (3): 6.]
- [40] 中国国家粮食局. 关于做好2011年粮食质量安全重点工作的通知[J]. *中国粮食经济*, 2011, (5): 11-13. [China National Grain Administration. Notice on doing a good job of food quality and safety in 2011[J]. *China Food Economics*, 2011, (5): 11-13.]
- [41] 中华人民共和国国务院. 国务院关于建立健全粮食安全省长责任制的若干意见[EB/OL]. (2015-01-22)[2018-04-11]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-01/22/content\\_9422.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-01/22/content_9422.htm). [State Council of the People's Republic of China. *Several Opinions of the State Council on Establishing and Improving the Responsibility System for the Governor of Food Security* [EB/OL]. (2015-01-22) [2018-04-11]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-01/22/content\\_9422.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-01/22/content_9422.htm).]



- [42] 中国农业部科技教育司. 农业部关于加快推进农业清洁生产的意见[EB/OL]. (2011-12-02)[2018-04-11]. [http://jiuban.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201112/t20111202\\_2421979.htm](http://jiuban.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201112/t20111202_2421979.htm). [Department of Science and Technology Education, Ministry of Agriculture of China. Opinions of the Ministry of Agriculture on Accelerating Agricultural Cleaner Production [EB/OL]. (2011-12-02)[2018-04-11]. [http://jiuban.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201112/t20111202\\_2421979.htm](http://jiuban.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201112/t20111202_2421979.htm).]
- [43] 中华人民共和国农业部. 测土配方施肥技术规范(2011年修订版)[EB/OL]. (2011-09-22)[2018-04-11]. [http://jiuban.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201109/t20110922\\_2293389.htm](http://jiuban.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201109/t20110922_2293389.htm). [Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Technical Specifications for Soil Testing and Formulation (2011 Revision) [EB/OL]. (2011-09-22)[2018-04-11]. [http://jiuban.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201109/t20110922\\_2293389.htm](http://jiuban.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201109/t20110922_2293389.htm).]

## Change in agricultural green productivity in China considering the cost of carbon emissions

ZHAN Jintao<sup>1,2</sup>, XU Yujiao<sup>1</sup>, GE Jihong<sup>1,2</sup>

(1. College of Economics and Management, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

2. Research Center for China Food Security, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** Green development will become the key component of China's future agricultural growth. Measuring green productivity of agriculture is conducive to identifying its current development stage. By introducing carbon emissions trading theory and taking agricultural green GDP considering carbon emission cost as output, nitrogen and phosphorus losses as an input factor, and using parameter stochastic frontier analysis (SFA) model, this study calculated and analyzed the provincial-level green total factor productivity (GTFP) change index of China's agricultural sector from 2000 to 2015, then compared it with the traditional total factor productivity (TFP). The results show that the average annual decline of China's agricultural GTFP was 0.14% during the study period, mainly due to the "retrogression" of environmental technologies before 2008/2009. The temporal trend fluctuated and the spatial distribution varied between regions. In addition, the index of TFP in agriculture was superior to GTFP's, with an average annual increase of 0.02%, mainly due to technological progress, but the average traditional technology efficiency is declining. The key to improving the green productivity of agriculture in China in the future is to shift the focus of research and development investment away from overemphasizing output, strengthen the research and development of agricultural environmental technologies, and improve the technical efficiency of the traditional input factors.

**Key words:** agricultural green productivity; cost of carbon emissions; nitrogen loss; phosphorus loss; stochastic frontier analysis; China