

# 农户低碳行为对其生产绩效的影响

## ——基于湖北省的农户调查数据

吴贤荣<sup>1</sup> 张俊飏<sup>2,3</sup> 张艳<sup>1,2</sup> 李兆亮<sup>1</sup> 刘念<sup>11</sup>

(1. 武汉工程大学 法商学院, 湖北 武汉 430205;

2. 华中农业大学 经济管理学院, 湖北 武汉 430070;

3. 湖北农村发展研究中心, 湖北 武汉 430070)

**【摘要】:** 将农业碳排放和碳汇等生态因素引入传统农业经济绩效核算分析框架, 运用 SBM 模型测算农户低碳生产绩效, 考察无效率决策单元的投入要素冗余率及农户低碳参与行为对其低碳生产绩效的影响效应。研究表明: (1) 农户低碳生产绩效水平较低, 且样本间差异性较大, 与最优决策单元相比, 资源过度消耗和农业碳排放产量高均是农户低碳生产绩效低下的重要原因; (2) 通过传统生产绩效与低碳生产绩效的对比分析发现, 低碳生产绩效小于传统生产绩效, 表明以往忽视农业碳排放、碳吸收的环境约束因素会高估农户的生产绩效水平; (3) 现行低碳减排政策的执行和实施效果不一, 具体而言, 参与低碳减排工程对低碳生产绩效具有显著正向影响效应, 但控制了样本选择性偏误等问题之后, 秸秆禁烧与综合利用工程和农机节能升级工程的正向影响不再显著。

**【关键词】:** 农业碳排放 碳吸收 低碳生产绩效 低碳行为

**【中图分类号】:** F205; F062.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2020)09-107-09

### 0 引言

近年, 中国农业生产特别是粮食生产发展成果瞩目, 事实上, 农业生产在获得粮食等经济产出的同时, 也带来了碳排放、碳吸收等生态产出, 农业生产对生态环境具有极强外部性。研究显示, 中国农业碳排放量占全国总量的 17%左右<sup>[1]</sup>, 具有一定的减排潜力, 有研究预测中国农业碳排在现有排放水平上约有减少 20%的空间<sup>[2]</sup>。2016 年 3 月, 国家正式确立了绿色发展理念成为新时期经济和社会发展的总基调, 在保障粮食安全的前提下, 将农业碳减排并入政府减排行动之一具有重要现实意义, 也符合当前绿色发展理念。农业部门兼具碳排放、碳吸收双重特性而成为近年来学术界寄望于缓解气候变化的关键领域, 农业碳减排除了可以降低

---

**作者简介:** 吴贤荣, 博士, 讲师, 研究方向为资源与环境经济、农业技术经济。张俊飏, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为农业经济理论与政策、资源与环境经济。E-mail: zhangjb513@126.com。

**基金项目:** 国家自然科学基金青年项目“生态补偿政策对农户绿色生产率的影响机理与实证研究——以秸秆还田补偿政策为例”(71903148); 教育部人文社会科学研究青年基金项目“农业碳减排的生态服务价值评估及补偿机制研究”(18YJC790184); 湖北省教育厅人文社会科学研究青年项目“基于低碳绩效的湖北农业碳减排成本与减排潜力研究”(18Q077); 武汉工程大学校内科学研究基金“基于低碳价值的农户生态补偿研究”(K201812); 湖北省社会科学基金一般项目(后期资助项目)“绿色发展理念下农业低碳生产效率分析及减排政策设计”(2018024)。

低大气中的温室气体浓度外,还能带来土壤肥力的提升、农业生态环境的改善、农产品健康绿色的保障<sup>[3]</sup>,而这些正外部性的呈现对于推进绿色农业发展以及促进国民生活品质的提高都是大有裨益的。因此,如何进一步提高农业产出的同时,减少碳排放、增加碳吸收,是当前农业可持续发展的关键问题之一。

梳理国内外文献发现,针对低碳农业发展和生产绩效问题学术界展开了广泛研究,目前基本达成共识的是:以往仅仅考核经济增长指标的核算体系不再符合当前发展要求,在关注农业经济增长的同时,应遵循绿色发展理念,兼顾农业生产外部性问题,将环境因素纳入进来。基于这样一个学术共识,Chung 等<sup>[4]</sup>建立了引入环境生产技术的方向距离函数模型(directional distance function),将生态环境因素作为经济增长中的重要因素,使得运用 DEA 方法综合测度低碳生产绩效成为可能<sup>[3]</sup>。

此后,学者们在此基础上进行了大量的实证分析<sup>[5-6]</sup>,这些研究主要集中于工业部门或宏观层面的环境经济绩效研究。近年来,有部分学者开始尝试在农业生产绩效的测算中考虑环境因素<sup>[7]</sup>。有学者指出,环境因素复杂而难以量化,将其归纳为面源污染和碳排放问题是目前学术界较为认可的途径<sup>[8-9]</sup>。从现有文献看,除了着眼于宏观层面探究绿色农业问题外,基于农户角度探讨农户生产绩效及环境友好型生产行为决策的研究也逐渐涌现。赵连阁和蔡书凯<sup>[10]</sup>、Montefrio 等<sup>[11]</sup>对农户环境生产绩效进行探究,发现环境规制行为对其生产绩效具有显著影响。但值得注意的是,在他们的实证过程中,均是采用传统最小二乘法(OLS),而未能剔除农户自身禀赋特征差异的影响,准确性和严谨性均有待进一步验证。实际生产过程中,农户生产绩效差异除了受环境规制因素的影响,还会受到来自其他因素的干扰,且二者之间存在互为因果的关系,因此,要解决上述问题,传统 OLS 法显然不再适用,倾向得分匹配法(PSM)借助反事实分析框架思路可以实现。

综上,以上文献在一定程度上丰富了低碳农业的研究成果,对推进绿色低碳农业发展具有重要意义,但仍存在进一步细化和深化的空间。相比现有文献,本研究拟从以下三个方面进行拓展:(1)为避免因非期望产出测算不完整而出现低碳生产绩效高估的情况,本研究将对农业生产物资投入所引发的碳排放、农作物生长过程所产生的温室气体和农作物秸秆焚烧带来的二氧化碳及一氧化碳进行综合、全面清查。(2)从微观视角出发,定量分析与评价低碳生产效率水平,分别对传统测算法与低碳测算法下的农业生产绩效进行对比分析,定量呈现低碳农业的发展现状。(3)在测度低碳生产绩效的基础上,剔除样本选择性偏误问题,估计反事实分析构架,利用 PSM 法估计农户低碳减排工程参与行为对其绩效的影响效应,客观评价现有低碳减排工程的推广情况与实施效果。因此,本研究在测算低碳生产绩效时,环境因素的考核重点关注农业碳排放和碳吸收问题,以农户为决策单元,研究其低碳生产行为及现有低碳减排工程的实施效果。

## 1 研究方法 with 指标说明

### 1.1 DEA-SBM 绩效测度模型介绍

数据包络分析模型( DEA)用于测算相对效率值,不像其他方法一样需要预先确定生产函数或各指标的权重,所以应用较为广泛。基本思路是,在环境生产技术思想基础上,追求期望产出的同时,也考察环境问题等非期望产出因素<sup>[12]</sup>,用  $P(x)$  来表示生产可能性,假设农业生产投入要素为  $x$ ,有  $N$  种;期望产出为  $y$ ,有  $M$  种;非期望产出为  $c$ ,有  $J$  种。考虑环境损失条件下,经济—环境生产可能性集为:

$$P(x)=\{(y, c): (x, y, c) \in T\} \tag{1}$$

其中:  $T$  为特定环境生产技术关系;  $P(x)$  应满足以下条件:

- ①  $x \in R_+^N$  ;
- ②  $(y, c) \in P(x)$  且  $y' \leq y$ , 则  $(y', c) \in P(x)$  ;
- ③  $(y, c) \in P(x)$  且  $c' \leq c$ , 则  $(y, c') \notin P(x)$  ;
- ④  $(y, c) \in P(x)$  且  $b=0$ , 则  $y=0$ 。

基于 DEA 模型的距离函数方法的优势在于可以构建一个多投入与多产出并存的生产模型,以求解既定投入要素下,期望产出沿着向量  $\vec{g}=(g_y, -g_c)$  方向的最大增长限度和非期望产出的最大缩减限度,表述为:

$$\bar{D}_c(x, y, c; g_y, -g_c) = \max \{ \lambda : (y + \lambda g_y, c - \lambda g_c) \in P(x) \} \quad (2)$$

如图 1 所示,横坐标  $c$  表示非期望产出,如农业碳排放;纵坐标  $y$  为期望产出,如农业总产值;曲线  $ONPQ$  为农业生产前沿,该曲线即为所有观测点的最佳生产可能集  $P(x)$ 。若观测样本点  $M$  不在前沿面曲线上,要实现最佳生产状态,需沿着向量  $\vec{g}$  的方向移动到产出前沿面的  $N$  点上,其坐标可表述为  $(c-g_c, c+\lambda g_y)$ 。该移动过程中,表示非期望产出的横坐标  $c$  在减小,而表示期望产出的纵坐标  $y$  在增大,变动比例最大值即为  $\lambda = \bar{D}_c(x, y, c; g_y, -g_c)$ ,也就是相对效率值。

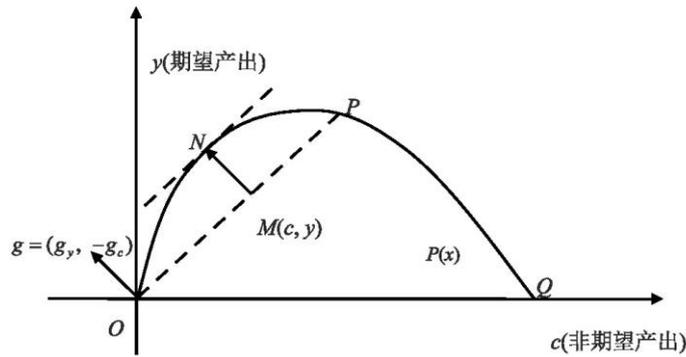


图 1 方向距离函数图示

方向距离函数具有如下转移特性:

$$\bar{D}_c(x, y + \alpha g_y, c - \alpha g_c; g) = \bar{D}_c(x, y, c; g) - \alpha \quad (3)$$

且满足以下条件:

- ①  $\bar{D}_c(x, y, c; g_y, -g_c) \geq 0$ , 当且仅当  $(y, c) \in P(x)$
  - ② 若  $y' \leq y$ , 则  $\bar{D}_c(x, y', c; g_y, -g_c) \geq \bar{D}_c(x, y, c; g_y, -g_c)$
  - ③ 若  $c' \leq c$ , 则  $\bar{D}_c(x, y, c'; g_y, -g_c) \geq \bar{D}_c(x, y, c; g_y, -g_c)$
  - ④ 若  $(y, c) \in P(x)$  且  $0 \leq \theta \leq 1$ , 则  $\bar{D}_c(x, \theta y, \theta c; g_y, -g_c) \geq 0$
  - ⑤  $\bar{D}_c(x, y, c; g_y, -g_c)$  是凹函数
- (4)

在实际操作和计算中,SBM(Slacks-Based Measure)模型将松弛变量设定于目标函数中<sup>[13]</sup>,基本形式是:

$$\bar{D}_i(x, y, c; g_y, -g_c) = \min \rho = \frac{1 - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s_n^x}{1 + \frac{1}{M+J} (\sum_{m=1}^M s_m^y / y_{m0} + \sum_{j=1}^J s_j^c / c_{j0})} \quad (5)$$

设有  $i (i=1, \dots, I)$  个决策单元, 则 SBM 模型应满足以下规划条件:

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^I z_i x_{i,n} - s_n^x = x_{i,n}, n=1, \dots, N \\ \sum_{i=1}^I z_i y_{i,m} - s_m^y = y_{i,m}, m=1, \dots, M \\ \sum_{i=1}^I z_i c_{i,j} - s_j^c = c_{i,j}, j=1, \dots, J \\ s_n^x \geq 0, s_m^y \geq 0, s_j^c \geq 0, i=1, \dots, I \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $\sum z_i$  为权重变量的总和;  $s_n^x$ 、 $s_m^y$ 、 $s_j^c$  依次表示投入松弛、期望产出松弛和非期望产出松弛; 目标函数  $\rho \in [0, 1]$ , 当且仅当  $\rho=1$  时, 该决策单元处于完全有效率的状况, 此时满足  $s^x=s^y=s^c=0$ , 即最优解中所有松弛量均为零, 不存在投入过多或产出不足的现象。当  $\rho < 1$  时, 表示决策单元存在效率损失部分, 此时各变量的松弛量不为零, 投入产出存在可改进的空间。

## 1.2 投入产出变量与调研数据说明

采取随机抽样与典型调查相结合的方式, 课题组成员于 2015 年 7 月前往湖北、河南、陕西、江苏、四川等地, 就低碳农业生产及节能减排技术等方面的问题进行了问卷调查及访谈。共发放问卷 850 份, 回收 836 份。为了对农户节能减排工程的参与情况及低碳农业生产绩效进行分析, 结合本章所用研究方法的特性, 即 DEA 模型测算的是相对效率水平, 其模型构建前提是所有决策个体具备同质性, 即被考察农户的生产方式及所处环境具有相似性。而不同省份的地理环境因素相差较大, 种植结构及耕作方式也存在较大差异, 因此, 剔除河南、陕西、江苏、四川等省份, 本研究从 836 个调研样本中选择了湖北省的 563 个有效样本作为研究对象。就调研地点来看, 选取了湖北省武汉市的新洲、随州、荆州为样本点, 基本涵盖了鄂北、鄂南及鄂东等地区。

### (1) 调研对象基本统计情况。

农业农村部在推广节能减排技术的基础上, 提出农村沼气池、作物秸秆综合利用、农村扶贫光伏项目、太阳能热水器入户、农机节能升级和清洁生产等六大农业低碳减排重点工程, 促进农业绿色化、低碳化发展。根据研究目的, 本研究考察的是农户在农业生产过程中的低碳行为及低碳生产绩效等问题, 并结合调研地区农业生产以水稻、小麦、棉花等种植业为主, 农业生产投入大、农作物秸秆产生量大、耗能高排放大等普遍存在的实际情况, 选择其中秸秆禁烧与综合利用工程、农机节能升级工程、农业清洁生产工程三大低碳减排工程作为样本推广工程, 分析农户参与情况以及这些低碳项目对农业生产绩效的影响作用。

调研结果(表 1)显示, 农户对秸秆禁烧与综合利用工程的认知程度、参与意愿和参与度均高于农业清洁生产工程和农机节能升级工程, 实际的调研也证实了这一结论, 湖北荆州农村地区在秸秆禁烧政策的贯彻落实方面基本做到了全覆盖, 农户随意焚烧秸秆的行为几乎不再有, 在政府的大力宣传下开始重视对农作物秸秆的综合循环利用, 而农户对农业清洁生产工程、农机节能升级工程的了解不深, 从而导致了参与意愿和参与度不高。

表 1 低碳减排工程的认知与参与情况平均得分

低碳减排工程	认知程度	参与意愿	参与度
秸秆禁烧与综合利用工程	0.91	0.86	0.62
农机节能升级工程	0.35	0.64	0.32
农业清洁生产工程	0.43	0.76	0.39

为了更深入地探究农业低碳技术或减排工程推广中的缺陷以及可供改进的地方,我们还向农户询问了参与低碳排放工程最大的障碍因素来自哪些方面,如表 2 所示。

表 2 农户参与低碳减排工程的障碍因素

低碳减排工程	资金成本	技术缺乏	时间成本	期望值低	其他
秸秆禁烧与综合利用工程	25.40%	29.13%	20.43%	25.93%	9.77%
农机节能升级工程	49.38%	39.96%	3.37%	21.31%	14.92%
农业清洁生产工程	34.81%	48.67%	6.22%	22.38%	9.77%

从表 2 中可知,农户参与低碳减排工程的资金成本以及其缺乏相关技术成为最大的两个阻碍因素。根据此次调研对农户特征的统计结果显示,目前参与农业生产的农户收入水平偏低,对农业生产的投资支出也偏低,对参与低碳减排工程的资金成本投入采取较为保守的态度。另外,被调研群体普遍高龄,且文化程度不高,对农业新技术的学习不容易,对低碳减排工程的期望值也在一定程度上影响了农户参与行为,而时间成本对农户的影响相对较小。究其原因,农业生产活动是阶段性的,农户对时间具有绝对的掌控权,且大多数农户时间较为充裕,因此时间因素对农户参与低碳减排工程影响较小。还有部分农户选择了其他因素。

## (2) 投入产出变量。

本文选择的农户生产投入指标分别为:①劳动投入(Labor),将兼业人数从家庭劳动力总人数中剥离出来,以农户生产全过程中实际劳动力为准,单位为人;②土地投入(Land),采取学术界主流的做法,即用上一年农户作物实际播种面积替代当年的土地投入变量,单位为亩;③资本投入(Capital),为农户上一时期农业生产费用投入的总和,包括种子、化肥、农药、农用机械及雇工等费用,单位为元。

传统生产效率测算中产出变量一般为经济产出,考虑低碳约束后,将农业碳排放和农业碳吸收等生态指标纳入进来,考查更准确。因此,本研究的产出指标包含期望产出(农业经济收入和农业碳吸收)和非期望产出(农业碳排放),具体界定如下:

①农业总收入。以经济产出作为一项期望产出指标,与上述投入变量统计口径保持一致,本研究的农业经济产出变量为农户上一年的农业生产总收入,单位为元。

②农业碳吸收。以农业碳吸收作为经济产出外另一生态期望产出的替代变量,单位为千克标准碳。农业碳吸收包括森林、牧草、农作物等由于光合作用而吸收的 CO<sub>2</sub> 总量,农业生产中的碳吸收可以表示为:

$$y_2 = \sum y_{2i} = \sum \delta_i \cdot q_i \cdot (1-r) / HI_i \quad (7)$$

式中： $y_2$ 表示作物碳吸收总量； $i$ 表示第  $i$  种作物； $\delta$  表示碳吸收参数； $q$  表示农作物总产量； $r$  表示作物总产量含水比重； $HI$  表示作物的经济系数。结合具体的调研地区，农作物涉及如水稻、小麦、玉米等粮食作物和豆类、油菜籽、花生、棉花及其他蔬菜类等经济作物，上述作物碳吸收率和经济系数主要参考田云等<sup>[14]</sup>的研究结果，并经整理而得。

③农业碳排放。以农业碳排放作为非期望产出的替代变量，单位是万吨标准碳。本研究在农户生产项目碳效应分析框架的基础上，参考田云等<sup>[14]</sup>、闵继胜和胡浩<sup>[15]</sup>等学者碳排放公式构建的方法，构建农户经营项目的碳排放表述为：

$$c = \sum c_i = \sum e_i \cdot \varepsilon_i \quad (8)$$

式中： $c$ 为农业生产碳排放总量， $c_i$ 为某一碳源的排放量， $e_i$ 为碳源基础数据， $\varepsilon_i$ 为某一碳源的碳排放系数。根据调研地区农业生产方式及种植结构，碳源因子和碳排放系数具体如下：一是农业生产要素投入引发的碳排放。农业生产要素主要包括目前农业生产必不可缺的农药、化肥、农膜、农用柴油使用以及农业灌溉耗费的电能等，这些要素的使用直接或者间接产生碳排放，其碳排放系数分别为 0.8956 千克碳/千克、4.9341 千克碳/千克、5.18 千克碳/千克、0.5927 千克碳/千克和 266.48 千克碳/公顷，系数来源于 IABCAU 及 IPCC 公布资料。二是作物生长过程所产生的温室气体。农作物生长过程所产生的温室气体主要包括  $CH_4$  和  $N_2O$ ，其中， $N_2O$  主要来源于土壤耕作和田间施肥<sup>[16]</sup>，在农业生产要素投入所引发的碳排放中已经纳入，而旱地生态系统中  $CH_4$  排放较少，水稻是中国最主要的  $CH_4$  排放源<sup>[17]</sup>。因此只需考察水稻  $CH_4$  排放，参考闵继胜和胡浩<sup>[15]</sup>研究结果中湖北省中季稻  $CH_4$  气体排放系数 58.17g/m<sup>2</sup>。三是作物秸秆焚烧带来的  $CO_2$  和  $CO$  排放。根据农作物草谷比系数计算出各作物秸秆总量，由于水稻、玉米和小麦是中国农作物秸秆的主要来源<sup>[18]</sup>，考虑到数据的可得性，本文仅考察这三种作物。草谷比系数来源于国家发展和改革委员会公布资料及根据前人研究成果整理而得<sup>[19]</sup>，湖北省水稻、玉米和小麦的草谷比系数分别为 1.16、1.94 和 1.37。

投入产出指标的主要统计特征见表 3。

表 3 投入产出变量描述性统计

变量		单位	均值	标准差	最小值	最大值
投入要素 ( $x_i$ )	劳动力投入 ( $x_1$ )	人	1.65	0.96	1.00	8.00
	土地投入 ( $x_2$ )	亩	15.09	15.73	0.70	97.50
	资本投入 ( $x_3$ )	元	8000.84	10770.96	395.00	107000.00
期望产出 ( $y$ )	农业总收入 ( $y_1$ )	元	21278.23	24567.55	660.00	176400.00
	碳吸收总量 ( $y_2$ )	千克	8594.46	10297.80	303.60	67692.24
非期望产出 ( $c$ )	碳排放总量 ( $c$ )	千克	2325.35	2600.87	136.02	21160.34

## 2 农户低碳生产绩效测度结果与分析

我们运用调研所收集的样本数据及前文介绍的研究方法，对湖北省 563 个样本农户低碳生产绩效进行测算。同时，为了与不

包含农业碳排放与农业碳吸收的传统生产效率相比较,我们也使用 DEA 模型估计了不包含农业碳排放和农业碳吸收的传统生产效率。

### 2.1 农户低碳生产绩效测算结果与分布情况

测度结果如表 4 所示,农户低碳生产绩效均值为 0.4900,即低碳生产过程中存在约 49%的效率损失,低碳生产绩效水平不高。从区间分布情况来看,427 个考察样本的低碳生产绩效低于 0.6,占样本总量的 75.86%,而其中 58.63%的样本农户低碳生产绩效在 0.5 以下;低碳生产绩效大于 0.7 的样本仅有 84 户,占样本总量的 14.93%;低碳生产绩效主要集中在 0.3~0.6 之间,比重为 61.64%。总体而言,农户的低碳生产绩效水平普遍不高。同时,区域间低碳生产绩效也存在显著差异,农户低碳生产绩效水平从高到低排序为:随州>荆州>新洲。其中,随州地区的农户低碳生产绩效水平较其他地区高,但仍存在 48.83%的提升空间,荆州和新洲地区低碳生产绩效提升空间分别为 51.01%和 53.16%。

表 4 农户低碳生产绩效分布状况

绩效值	总体		新洲		随州		荆州	
	户数/户	比例	户数/户	比例	户数/户	比例	户数/户	比例
0.1 以下	6	1.07%	1	0.61%	2	1.02%	3	1.48%
0.1~0.2	14	2.49%	2	1.23%	3	1.52%	9	4.43%
0.2~0.3	60	10.66%	18	11.04%	14	7.11%	28	13.79%
0.3~0.4	139	24.69%	59	36.20%	41	20.81%	39	19.21%
0.4~0.5	111	19.72%	30	18.40%	39	19.80%	42	20.69%
0.5~0.6	97	17.23%	24	14.72%	47	23.86%	26	12.81%
0.6~0.7	52	9.24%	7	4.29%	22	11.17%	23	11.33%
0.7~0.8	43	7.64%	12	7.36%	17	8.63%	14	6.90%
0.8~0.9	10	1.78%	3	1.84%	3	1.52%	4	1.97%
0.9~1.0	31	5.51%	7	4.29%	9	4.57%	15	7.39%
均值	0.4900		0.4684		0.5117		0.4899	

### 2.2 基于投入冗余的低碳生产绩效改善方向

在测算各个决策单元低碳生产绩效的基础上,我们同时考察了特定决策个体与最优决策之间存在的投入要素冗余、非期望产出冗余、期望产出不足,从而找到相应的低碳生产绩效改善方向,如表 5 所示。

第一,从总体农户低碳生产过程看,投入要素与非期望产出存在一定的冗余,而期望产出表现为不足,这说明除农业产出不足成为湖北省绿色低碳生产无效率外,导致农户低碳生产无效率的原因还体现在资源投入和非期望产出两方面,资源消耗过多和农

业碳排放过多均是调研地区农户低碳生产绩效不高的原因。

表 5 低碳生产非有效决策个体投入产出可改进程度

地区	投入冗余率/%			期望产出冗余率/%		非期望产出冗余率/%
	劳动力投入	土地投入	资本投入	农业总收入	碳吸收总量	碳排放总量
总体	-2.26	-0.15	-6.37	5.58	4.74	-52.07
新洲	-2.96	-0.48	-1.83	19.06	3.15	-57.90
随州	-1.98	-0.04	-5.37	1.58	6.77	-51.36
荆州	-1.96	-0.02	-10.17	0.32	4.25	-48.74

第二,投入冗余方面,资本投入冗余率为-6.37%,在农户低碳生产无效率中所占的比重最高,这说明调研地区农户低碳生产中资本投入偏多,在以后的生产活动中,应该逐步减少资本投入量,减少空间为 6.37%。农村劳动力过剩是构成农户低碳生产绩效低下的第二大影响因素。土地投入对农户低碳生产的影响排在第三位,在中国耕地面积日益稀缺的情况下,本不应该出现这样的情况,一方面是在调研地区耕地利用效率较低;另一方面,可能与当地土地细碎化有关,有研究表明,小规模农业生产容易导致效率损失<sup>[20]</sup>。

第三,分区域来看,考察投入冗余方面,随州、荆州两个地区农户低碳生产绩效低下的影响力排序同总体样本保持一致,而新洲地区出现细微差异,即劳动力投入的影响力大于资本投入因素,说明在以后的低碳农业生产中,应该逐步减少随州、荆州两地约 5.37%、10.17%的资本投入量,而新洲地区应减少约 2.96%的劳动力投入。

### 2.3 不同类型农户的生产绩效对比分析

为分析低碳约束因素是否会对农户的生产绩效产生影响,本文在考察农户低碳生产绩效的同时,也计算了不考虑碳排放、碳吸收的传统农业生产绩效,并通过对二者的比较,分析低碳约束对生产绩效水平的影响。

为了更为清晰地界定各决策单元的现有生产状态是否属于低碳环保型,可将低碳生产绩效均值小于传统生产绩效均值的地区定义为“高碳型”地区。由表 6 可知,若不考虑碳排放和碳吸收等生态因素的影响,农户传统生产绩效均值为 0.5078,低于低碳生产绩效均值,表明调研地区样本农户的农业生产基本属于“高碳型”。具体而言,传统生产绩效在 0.6 以下的样本农户占比高达 84.15%,说明农户传统生产绩效普遍处于较低水平,效率损失严重。分地区来看,新洲、随州和荆州三地传统生产绩效均值均在不同水平上高于低碳生产绩效,表明三个地区均为“高碳型”地区。若继续按以往单纯考察农业经济产出的测算方法来评价农户生产绩效水平,而忽视农业碳排放、碳吸收等环境约束因素,会导致农户生产绩效水平被高估。

表 6 农户低碳生产绩效与传统生产绩效分布情况

绩效值	低碳生产绩效		传统生产绩效	
	农户数量/户	所占比例	农户数量/户	所占比例

0.1 以下	6	1.07%	4	0.77%
0.1~0.2	14	2.49%	16	2.90%
0.2~0.3	60	10.66%	59	10.44%
0.3~0.4	139	24.69%	127	22.63%
0.4~0.5	111	19.72%	97	17.21%
0.5~0.6	97	17.23%	89	15.86%
0.6~0.7	52	9.24%	66	11.80%
0.7~0.8	43	7.64%	52	9.28%
0.8~0.9	10	1.78%	14	2.51%
0.9~1.0	31	5.51%	37	6.58%
总体均值	0.4900		0.5078	
新洲	0.4684		0.4865	
随州	0.5117		0.5124	
荆州	0.4899		0.5245	

## 2.4 讨论

我们将本研究与已有相关研究结果进行了比较,如表 7 所示。可以看到,本文在考虑碳排放非期望产出得到的农户生产绩效为 0.4900,由于测算方法、研究对象的不同,测算的估计值与朱帆等<sup>[21]</sup>、姜天龙<sup>[22]</sup>、李鹏和张俊飏<sup>[23]</sup>等人对农户生产绩效的估计值稍有不同,但本研究结果值介于诸位学者估计值的范围内。朱帆等学者对农户生产绩效估计的平均值为 0.5833<sup>[21-25]</sup>,本文研究的估计值低于其平均值,原因在于本文考虑了碳排放约束非期望产出,碳排放约束要求农户在生产中节省对农药、化肥、农膜等农业物资的投入;而如前文所述,在不考虑碳排放约束的情况下,测算出的农户绩效估计值为 0.5078,更接近他们估计值的均值,进一步表明考虑碳排放约束会影响农户的生产绩效。

表 7 不同研究中农户生产绩效估计值对比

研究	关注视角	研究样本	采用模型	估算均值
朱帆等 <sup>[21]</sup>	农业生产效率	西藏 163 个样本	三阶段 DEA 模型	0.5840
姜天龙 <sup>[22]</sup>	粮食生产效率	吉林 292 个样本	投入导向 BCC 模型	0.7660
李鹏和张俊飏 <sup>[23]</sup>	农业废弃物综合利用效率	山东、湖北、河南共 220 个样本	三阶段 DEA 模型	0.4516
肖国增等 <sup>[24]</sup>	农地利用效率	湖北 44 个村庄样本	投入导向 BCC 模型	0.7300
吴雪莲 <sup>[25]</sup>	农户水稻生产绩效	湖北 425 个样本	投入导向 BCC 模型	0.3850

本研究	考虑低碳约束下的农户生产绩效	湖北 563 个样本	包含非期望产出的 SBM 模型	0.4900
-----	----------------	------------	-----------------	--------

### 3 农户低碳参与行为对其低碳生产绩效的影响

为积极响应低碳经济号召,促进低碳可持续农业的良好发展,国家制定并推行了一系列促进农业绿色低碳发展的措施,并重点提出六大低碳减排技术与工程促进农业和农村可持续发展。但通过以上分析发现,调研地区农户低碳生产绩效平均水平依然较低,为考察农户低碳参与行为对其低碳生产绩效的影响,检验现行低碳减排政策的执行和实施效果,本文以农村低碳减排工程为例,运用 PSM 法,将农户参与低碳减排工程从影响低碳生产绩效的其他因素中剥离出来,单独考察参与减排工程对生产绩效的影响效应。

#### 3.1 倾向匹配得分法与数据说明

##### (1) 倾向匹配得分法简介。

农户参与低碳减排工程等低碳农业参与行为对其低碳生产绩效的影响效应可采用反事实分析框架下的 PSM 模型进行估计。首先,设置一个虚拟变量  $T_i$ ,用以表示第  $i$  个农户是否得到了“处理(treatment)”,如果参与低碳减排工程,则  $T_i=1$ ,表示处理组,否则为对照组,  $T_i=0$ ;其次,为与期望值区别,这里记绩效值  $E$  为  $Y$ ,假定  $Y_i^1$  表示第  $i$  个参与低碳减排工程的农户生产绩效,  $Y_i^0$  表示第  $i$  个未参与低碳减排工程的农户生产绩效。则低碳减排工程对其绩效影响的参与者的平均处理效应 ATT 和非参与者的平均处理效应 ATU 可表示为:

$$\begin{aligned} ATT &= E(Y_i^1 | T_i = 1) - E(Y_i^0 | T_i = 1) \\ &= E(Y_i^1 - Y_i^0 | T_i = 1) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} ATU &= E(Y_i^1 | T_i = 0) - E(Y_i^0 | T_i = 0) \\ &= E(Y_i^1 - Y_i^0 | T_i = 0) \end{aligned} \quad (10)$$

对于单个农户而言,参与低碳减排工程的绩效值为  $Y_i^1$ ,未参与低碳减排工程的绩效值为  $Y_i^0$ ,二者之差 ATD 为:

$$ATD = E(Y_i^1 | T_i = 1) - E(Y_i^0 | T_i = 0) \quad (11)$$

对以上公式进行变形,可分别获得 ATD 与 ATT、ATU 的关系:

$$\begin{aligned} ATD &= E(Y_i^1 | T_i = 1) - E(Y_i^0 | T_i = 0) \\ &= [E(Y_i^1 | T_i = 1) - E(Y_i^0 | T_i = 1)] + E(Y_i^0 | T_i = 1) - \\ &\quad E(Y_i^0 | T_i = 0) \\ &= ATT + E(Y_i^0 | T_i = 1) - E(Y_i^0 | T_i = 0) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} ATD &= E(Y_i^1 | T_i = 1) - E(Y_i^0 | T_i = 0) \\ &= E(Y_i^1 | T_i = 1) - E(Y_i^1 | T_i = 0) + [E(Y_i^1 | T_i = 0) - \\ &\quad E(Y_i^0 | T_i = 0)] \\ &= E(Y_i^1 | T_i = 1) - E(Y_i^1 | T_i = 0) + ATU \end{aligned} \quad (13)$$

从上式可看出,ATT、ATU 与 ATD 不相等,传统最小二乘法(OLS)的处理方法是假定它们相等,即低碳减排工程参与行为是随机

的。然而现实中,农户参与低碳减排工程并不满足随机假设,参与行为是农户“自选择(selfselection)”的结果。他们并非完全随机选择是否参与低碳减排工程,而是根据自身需求和禀赋条件做出选择,存在选择性偏差,传统方法必然会造成估计结果有偏。因此,需在反事实分析框架下,利用PSM来模拟自然实验下的随机选择状态,进而得到农户参与低碳减排工程对低碳生产绩效影响的一致估计结果。反事实分析框架下,ATT和ATU可以表示为:

$$\begin{aligned}
 ATT &= E(Y_i^1|T_i=1) - E(Y_i^0|T_i=1) \\
 &= E(Y_i^1 - Y_i^0|T_i=1) \\
 &= E\{E[(Y_i^1 - Y_i^0)|T_i=1], P(X)\} \quad (14)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 ATU &= E(Y_i^1|T_i=0) - E(Y_i^0|T_i=0) \\
 &= E(Y_i^1 - Y_i^0|T_i=0) \\
 &= E\{E[(Y_i^1 - Y_i^0)|T_i=0], P(X)\} \quad (15)
 \end{aligned}$$

其中: $X$ 表示与农户参与低碳减排工程无关的观测变量。 $P(X)$ 为农户参与低碳减排工程的概率,其取值介于0~1之间,可通过二元Logit或Probit模型进行估计:

$$P(X) = \Pr(T_i = 1|X) = \frac{\exp(\beta X)}{1 + \exp(\beta X)} \quad (16)$$

此概率值 $P(X)$ 即为单个决策单元的倾向得分值。根据该概率值,将样本农户分为处理组和对照组。但此时仍然无法估计出参与低碳减排工程对低碳生产绩效影响的平均效果ATT和ATU,因为 $P(X)$ 为连续变量,现实中很难找出两个决策单元倾向得分值相等,因此无法匹配处理组和对照组,而近邻匹配、半径匹配和核匹配等方法的使用可以使该问题得以解决。

## (2) 变量选择与数据说明。

通过前文文献回顾发现,较多研究结论表明:农户户主个人特征、农户家庭禀赋、生态环境的认知程度以及政策环境因素等方面均有可能对农户参与类似低碳减排等环保行动的行为产生影响。也有研究已经证实信息获取度及其传播度是影响农户参与低碳行为的重要因素<sup>[26]</sup>,此外,财政补贴等政策性支持因素对农户低碳行为的影响同样不可忽略<sup>[27]</sup>。

综上,本研究以低碳减排工程中的农户参与秸秆综合利用工程为例,以参与该工程的农户为处理组,未参与的农户为对照组。从农户个人特征、家庭特征及其他方面分析影响农户参与低碳减排工程的关键因素,选取了14个观测变量,具体含义及相关统计值如表8所示。

表8 变量赋值及其描述性统计结果

变量		变量的含义及赋值	均值	标准差
因变量	参与秸秆禁烧与综合利用工程	参与=1;未参与=0	0.621	0.590
个人特征变量	性别( $X_1$ )	男性=1;女性=0	0.545	0.497
	年龄( $X_2$ )	实际周岁(岁)	52.748	9.918
	文化程度( $X_3$ )	不识字或识字很少=1;小学=2;初中=3;高中或中专=4;大专及以上=5	2.679	0.890

	兼业情况 ( $X_4$ )	是=1;否=0	0.509	0.500
	社会身份 ( $X_5$ )	党员或干部身份=1;群众=0	0.025	0.157
家庭特征变量	劳动力数量 ( $X_6$ )	家庭劳动力人数(人)	3.150	1.306
	耕地面积 ( $X_7$ )	家庭实际耕地面积(亩)	15.090	15.730
	家庭年收入 ( $X_8$ )	家庭年度总收入(万元)	6.810	17.607
	是否参加专业化组织 ( $X_9$ )	参加=1;未参加=0	0.117	0.322
其他变量	与市场的距离 ( $X_{10}$ )	家到乡镇集市的距离(千米)	2.706	2.948
	有线电视 ( $X_{11}$ )	有=1;无=0	0.762	0.426
	有线网络 ( $X_{12}$ )	有=1;无=0	0.410	0.492
	政府依赖 ( $X_{13}$ )	由政府补贴总成本的百分比	3.427	3.390
	对低碳减排工程的认知 ( $X_{14}$ )	不了解=1;不太了解=2;一般=3;比较了解=4;非常了解=5	2.465	0.975

由被调查者个人特征可以看出,约占样本总体的 54.5%为男性,平均年龄近 53 岁;文化程度普遍为小学及初中水平;约一半的样本有兼业现象,而 2.5%的样本为党员或干部身份,大多为普通群众。从家庭禀赋特征来看,家庭劳动力规模平均约为 3 人,占家庭总人口数的 67.9%,其中兼业人数约占一半比例;家庭实际耕地面积三地平均为 15.09 亩,其中,荆州农户平均耕地面积为 27.52 亩,而新洲和随州分别为 6.22 亩和 8.05 亩;家庭平均年收入为 6.816 万元,其中农业收入平均约为 2.128 万元,家庭经济收入以外出务工等非农收入为主,约占家庭总收入的 68.8%;只有少数农户参与了合作社、协会等农村专业化组织。此外,从调研数据来看,目前农村有线电视覆盖率已达 76.2%,而农村互联网近年来发展迅速,覆盖率达到 41.0%(表 8)。

### 3.2 低碳行为对生产绩效影响的实证结果

#### (1) 低碳参与行为倾向得分 Logit 估计。

参与低碳减排工程的倾向匹配得分是指在一组既定控制变量  $X_i$  (反映农户个体特征) 的情况下,样本农户成为处理组的条件概率。首先利用 Logit 回归模型拟合农户参与低碳减排工程的概率,逐一引入控制变量,最终有 9 个变量通过检验。PseudoR<sup>2</sup> 值为 0.1160, Prob>chi<sup>2</sup>=0.000, 表明模型选取的控制变量对因变量即农户生产绩效具有显著影响作用,如表 9 所示。

表 9 倾向得分 Logit 模型估计结果

变量	回归系数	T 统计量
年龄	-0.0409**	-2.19
兼业情况	-0.2681***	-2.78
社会身份	0.0646*	1.77
劳动力数量	0.0659*	1.72

与市场的距离	-0.0314*	-1.89
是否参加专业化组织	0.0669**	2.37
有线网络	0.2328***	-3.36
政府依赖	-0.0187*	-1.92
对低碳减排工程的认知	0.2921***	3.36
常数项	0.2754**	2.45
检验指标	Loglikelihood=-192.3302	
	LRchi <sup>2</sup> (9)=50.46	
	Prob>chi <sup>2</sup> =0.0000	
	PseudoR <sup>2</sup> =0.1160	

Logit 回归结果显示(表 9),被调查者年龄越小、兼业程度越低、家庭劳动力数越多、与市场距离越近、对政府的依赖程度越低以及对低碳减排工程的认知程度越高,参与秸秆禁烧与综合利用工程的概率越大;同时,兼有党员或其他干部等社会身份相比普通群众更倾向参与秸秆禁烧与综合利用工程;参加合作社、协会等农村专业化组织以及安装互联网等变量均会促进农户参与秸秆禁烧与综合利用工程。

(2) 低碳生产绩效 PSM 实证结果与分析。

通过 Logit 回归得到倾向指数得分后,采用 k 近邻匹配法进行倾向得分匹配(k=4),匹配结果如表 10 所示。为控制样本选择性偏误问题,剔除农户特征差异因素,农户参与秸秆禁烧与综合利用工程对低碳生产绩效的正向影响效应并不显著。

表 10 农户参与秸秆禁烧与综合利用工程的 PSM 估计结果

匹配状态	低碳生产绩效		指标	系数	T 值
	处理组	对照组			
匹配前	0.5284	0.4680	ATT	0.0604*	1.93
匹配后	0.5276	0.4745	ATT	0.0531	0.98
	0.5179	0.4729	ATU	0.0450	0.77

估计结果显示,匹配前处理组和对照组低碳生产绩效均值为0.5284和0.4680,相比于未参与秸秆禁烧与综合利用工程的农户,参与秸秆禁烧与综合利用工程的农户其生产绩效在10%的水平上显著提高6.04%。考虑到选择性偏差问题,进行倾向得分匹配后,参与秸秆禁烧与综合利用工程的农户绩效值仍然高于未参与的农户,但处理组与对照组的平均绩效差距有所缩小,且二者之间差异不再显著。可见,传统 OLS 回归估计方法会高估秸秆禁烧与综合利用工程对低碳生产绩效的影响效应,而在充分考虑样本选择

性偏误及低碳参与行为与低碳生产绩效之间相互影响等问题的前提下, 秸秆禁烧与综合利用工程对低碳生产绩效的正向影响效应并不显著。

(3) 实证结果稳健性检验。

为了检验匹配结果的稳健性, 本文进一步采用半径匹配法检验参与秸秆禁烧与综合利用工程对农户低碳生产绩效的影响, 同时检验农机节能升级工程、农业清洁生产工程对农户低碳生产绩效的影响。检验显示(表 11), 半径配比法与 k 近邻匹配法估计值保持一致, 控制选择性偏误情况下, 秸秆禁烧与综合利用工程和农机节能升级工程对低碳生产绩效的影响均不显著, 而农业清洁生产工程对低碳生产绩效有显著正向效应。

表 11 农户参与低碳减排工程的 PSM 半径配比法估算

低碳减排工程	匹配状态	低碳生产绩效		指标	系数	T 值
		处理组	对照组			
秸秆禁烧与综合利用工程	匹配前	0.5284	0.4680	ATT	0.0604*	1.93
	匹配后	0.5268	0.4746	ATT	0.0522	1.01
		0.5189	0.4720	ATU	0.0469	0.80
农机节能升级工程	匹配前	0.5910	0.4574	ATT	0.1336**	2.13
	匹配后	0.5763	0.4590	ATT	0.1173	1.32
		0.5711	0.4603	ATU	0.1108	1.17
农业清洁生产工程	匹配前	0.5613	0.4623	ATT	0.0990***	3.40
	匹配后	0.5497	0.4622	ATT	0.0875*	1.75
		0.5395	0.4606	ATU	0.0789*	1.89

由此可见, 在剔除样本选择性偏误及参与低碳减排工程与低碳生产绩效之间相互影响等问题后, 秸秆禁烧与综合利用工程、农机节能升级工程虽能正向影响低碳生产绩效, 但在统计上并不显著, 而农业清洁生产工程对低碳生产绩效的正向效应相对稳定。具体地, 就农业清洁生产工程而言, 匹配前处理组和对照组的平均低碳生产绩效分别为 0.5613 和 0.4623, 表明参与农业清洁生产工程的农户比未参与农业清洁生产工程的农户其低碳生产绩效在 1% 的水平上显著提高 9.90%。而进行倾向得分匹配后, 对于处理组样本而言, 参与农业清洁生产工程使得其低碳生产绩效提高了 8.75%; 对于对照组样本而言, 参与农业清洁生产工程使得其低碳生产绩效提高约 7.89%, 且均在 10% 的置信水平上通过统计检验。表明自 2011 年印发《关于加快推进农业清洁生产的意见》以来, 通过适度减少过多投入要素、农村垃圾的无害化处理与资源化利用, 以降低增效提高农业生产效率, 已经取得较好成果。同时, 实证结果也验证了 PSM 模型对简单分组统计或传统 OLS 模型存在的参数高估问题有一定修正作用。

3.3 讨论

从秸秆禁烧与综合利用工程、农机节能升级工程来看, 参与低碳减排工程对农户低碳生产绩效具有显著正向影响效应, 但控制个体选择性偏误问题后, 参与秸秆禁烧与综合利用工程和农机节能升级工程的低碳生产绩效仍然高于未参与秸秆禁烧与综合

利用工程和农机节能升级工程农户的生产绩效,但差距不再显著。可能的原因是:一方面,秸秆禁烧与综合利用工程能够减少因作物秸秆焚烧带来的农业碳排放,降低非期望产出,从而达到绩效提升效应;另一方面,由于中国现阶段的秸秆禁烧与综合利用工程主要停留在强制禁烧阶段,相应的收集、储运、交易和综合利用环节发展相对滞后,农户只能付出额外劳动力或资金对其进行处理,比如打捆收集或粉碎还田,参与该工程会相应增加劳动力投入而增大农户的生产成本<sup>[26]</sup>,在一定程度上将会降低绩效水平。由此可见,参与秸秆禁烧与综合利用工程对农户低碳生产绩效的影响效应并不显著。同理,农机节能升级工程虽能提升生产绩效,但参与该工程需要大量资金投入,故其对低碳生产绩效的影响效应并不显著。

## 4 主要结论与政策启示

### 4.1 主要结论

本研究利用湖北省调研农户数据,首先运用 DEA 模型测算农户低碳生产绩效,将低碳生产绩效与传统绩效测度结果进行比较分析;进一步基于倾向得分匹配方法,探究减排项目参与行为对绩效的影响效应。得到以下主要结论:

(1) 农户低碳生产绩效平均值为 0.4900,表明在维持现有技术和投入水平下,如果能够提高生产技术效率,农业产出仍有 51.00%的提升空间;样本间差异性较大,约 58.63%的样本农户低碳生产绩效在 0.5 以下,仅有 14.92%的农户低碳生产绩效高于 0.7,较多农户均介于 0.3~0.6 之间,表明农户低碳生产率普遍不高,地区差异较大,随州的低碳绩效均值明显高于荆州和新洲。与最优决策单元相比较,资源过度消耗和农业碳排放产量高均是农户低碳生产绩效低下的重要原因。

(2) 通过传统生产绩效与低碳生产绩效的对比分析发现,低碳生产绩效均值(0.4900)小于传统生产绩效均值(0.5078),表明以往忽视农业碳排放、碳吸收的环境约束因素会高估农户的生产绩效水平。进一步,依据低碳生产绩效与传统生产绩效的大小进行分类,结果显示,占总样本量 69.65%的农户均属于“高碳型”,仅有 25.37%的农户属于“低碳型”,此外,少量农户的低碳生产绩效等于传统生产绩效,属于“均衡型”。分地区来看,新洲、随州和荆州三地传统生产绩效均值均在不同水平上高于低碳生产绩效,表明湖北省三个调研地区均为“高碳型”地区。

(3) 为考察农户低碳参与行为对其低碳生产绩效的影响,检验现行低碳减排政策的执行和实施效果,运用 k 近邻匹配法计算参与低碳减排工程对农户低碳生产绩效的影响效应。结果显示,参与低碳减排工程对农户低碳生产绩效具有显著正向效应,但控制样本选择性偏误等问题之后,秸秆禁烧与综合利用工程和农机节能升级工程对低碳生产绩效的正向影响不再显著,而参与农业清洁生产工程对低碳生产绩效的正向影响依然显著但提升效应明显缩小。

### 4.2 政策启示

“十三五”规划强调的绿色发展理念,在农业领域主要表现为减排与增汇并重,促进农业绿色化、低碳化发展。农业绿色发展则强调了多重目标的实现,在追求好的农业经济发展效率的同时,关注资源消耗低和温室气体排放少等多重指标,以实现农业经济发展与生态环境保护的“双赢效应”,进而推进整个社会的绿色化发展。发展绿色低碳农业是一个长期的过程,要紧密结合当前农业发展的实际情况,有计划、有步骤、有保障推进,具体措施主要从政策法规、技术体系、产业结构以及社会宣传等方面入手。具体做法是:第一,出台绿色低碳农业战略规划,推进绿色低碳农业立法进程;第二,突出低碳生产技术的支撑作用,创新科技推广服务;第三,优化农业生产的产业结构,提升绿色低碳农业组织化水平;第四,促进产业间减排政策平衡发展,引导全民参与。

### 参考文献:

[1]董红敏,李玉娥,陶秀萍,等.中国农业源温室气体排放与减排技术对策[J].农业工程学报,2008(10):269-273.

- 
- [2]Sun Y, Meng L, Tian L, et al. Assessing current stocks and future sequestration potential of forest biomass carbon in Daqing Mountain Nature Reserve of Inner Mongolia, China[J]. *Journal Forestry Research*, 2016, 27(4):931-938.
- [3]Johnson J M F, Franzluebbers A J, Weyers S L, et al. Agricultural opportunities to mitigate greenhouse gas emissions[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 150(1):107-124.
- [4]Chung Y H, Färe R, Grosskopf S. Productivity and undesirable outputs: A directional distance function approach[J]. *Journal of Environmental Management*, 1997, 51(3):229-240.
- [5]涂正革, 肖耿. 环境约束下的中国工业增长模式研究[J]. *世界经济*, 2009(11):41-54.
- [6]陈诗一. 工业二氧化碳的影子价格: 参数化和非参数化方法[J]. *世界经济*, 2010(8):93-111.
- [7]杜江, 王锐, 王新华. 环境全要素生产率与农业增长: 基于 DEA-GML 指数与面板 Tobit 模型的两阶段分析[J]. *中国农村经济*, 2016(3):65-81.
- [8]李谷成, 陈宁陆, 闵锐. 环境规制条件下中国农业全要素生产率增长与分解[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011(11):153-160.
- [9]吴贤荣, 张俊飏, 朱烨, 等. 中国省域低碳农业绩效评估及边际减排成本分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014(10):57-63.
- [10]赵连阁, 蔡书凯. 晚稻种植农户 IPM 技术采纳的农药成本节约和粮食增产效果分析[J]. *中国农村经济*, 2013(5):78-87.
- [11]Montefrio M J F, Sonnenfeld D A, Luzadis V A. Social construction of the environment and smallholder farmers' participation in 'low-carbon', agro-industrial crop production contracts in the Philippines[J]. *Ecological Economics*, 2015, 116:70-77.
- [12]Färe R, Grosskopf S. Shadow pricing of good and bad commodities[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 1998, 80(3):584-590.
- [13]Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 130(3):498-509.
- [14]田云, 张俊飏, 李波. 中国农业碳排放研究: 测算、时空比较及脱钩效应[J]. *资源科学*, 2012(11):2097-2105.
- [15]闵继胜, 胡浩. 江苏省农业生产过程中碳减排潜力的理论与实证分析[J]. *科技进步与对策*, 2012(8):35-38.
- [16]王智平. 中国农田 N<sub>2</sub>O 排放量的估算[J]. *农村生态环境*, 1997(2):51-55.
- [17]唐红侠, 韩丹, 赵由才, 等. 农林业温室气体减排与控制技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009:81-96.
- [18]李飞跃, 汪建飞. 中国粮食作物秸秆焚烧碳排放量及转化生物炭固碳量的估算[J]. *农业工程学报*, 2013(14):1-7.

- 
- [19]曹国良,张小曳,王丹,等. 秸秆露天焚烧排放的 TSP 等污染物清单[J]. 农业环境科学学报, 2005(4):800-804.
- [20]Wang W, Xie H L, Jiang T, et al. Measuring the total-factor carbon emission performance of industrial land use in China based on the global directional distance function and non-radial Luenberger productivity index[J]. Sustainability, 2016, 8(4):336.
- [21]朱帆,余成群,曾嵘,等. 西藏“一江两河”地区农户生产效率分析及改进方案——基于三阶段 DEA 模型和农户微观数据[J]. 经济地理, 2011(7):1178-1184.
- [22]姜天龙. 吉林省农户粮作经营行为和效率的实证研究[D]. 长春:吉林农业大学, 2012.
- [23]李鹏,张俊飏. 农业生产废弃物循环利用绩效测度的实证研究——基于三阶段 DEA 模型的农户基质化管理[J]. 中国环境科学, 2013(4):754-761.
- [24]肖国增,吴雪莲,费永俊. 基于 DEA 模型的荆州市 44 个村农地利用效率评测[J]. 长江大学学报(自科版), 2014(23):84-89.
- [25]吴雪莲. 农户绿色农业技术采纳行为及政策激励研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2016.
- [26]矫晓庆. 影响农户可持续农业技术采纳意愿的心理因素分析及营销启示[D]. 青岛:青岛理工大学, 2014.
- [27]邓祥宏,穆月英,钱加荣. 我国农业技术补贴政策及其实施效果分析——以测土配方施肥补贴为例[J]. 经济问题, 2011(5):79-83.
- [28]马骥. 我国农户秸秆就地焚烧的原因:成本收益比较与约束条件分析——以河南省开封县杜良乡为例[J]. 农业技术经济, 2009(2):77-84.