

# LCA 和 DEA 法相结合的农业生态效率研究

## ——兼顾绿色认知和环境规制的影响

黄玛兰<sup>1</sup>,曾琳琳<sup>2</sup>,李晓云<sup>2\*</sup>

(1.湖北大学 商学院/中国农业碳减排碳交易研究中心,湖北 武汉 430062;

2.华中农业大学 经济管理学院,湖北 武汉 430070)



**摘要** 以湖北省单季水稻为例,采用生命周期评价方法,对水稻生产边界内的相关环境影响进行量化分析,并运用超效率 SBM 模型测算农户农业生态效率。在此基础上,利用 Tobit 和 OLS 模型分析绿色认知、环境规制对农业生态效率的影响。结果表明:1)单季水稻系统生命周期环境影响综合指数为 2.099。2)农业生态效率均值为 0.64。低效率组农户占比为 81.08%,均值为 0.55;中效率组农户占比为 4.86%,均值为 0.85;高效率组农户占比为 14.05%,均值为 1.11。3)农户绿色认知能够促进农业生态效率提升,环境规制有利于促进农业生态效率提升。影响农户农业生态效率的经济条件、资源条件和市场因素中,家庭人均资产、劳均资本具有正向影响;农业机械投入强度、灌溉用水量具有负向影响,种植面积、户均劳动能力具有正向影响;稻谷商品化率具有负向影响。基于研究结论,提出通过扩大高农业生态效率水平的农户数量、提升农户改善环境质量的责任意识、加强农业绿色生产知识的宣传力度、增强农户经济条件和资源条件支撑以及完善绿色农产品市场建设等措施实现农业生产方式绿色转型。

**关键词** 农业生态效率;水稻;生命周期评价;超效率 SBM 模型;绿色认知;环境规制

中图分类号:F 323.22 文献标识码:A 文章编号:1008-3456(2022)01-0094-11

DOI 编码:10.13300/j.cnki.hnwkxb.2022.01.010

2004—2020 年,我国粮食产量年均增长率 2.24%,2020 年粮食总产量高达 66949 万吨,人均粮食占有量 474 千克,农业发展不断迈上新台阶。但由于化肥、农药的过量使用,加之畜禽粪便、农作物秸秆、农膜资源化利用率不高,农业发展面临的资源压力日益增大,面源污染严重,不利于农业绿色可持续发展。为推动农业生产方式的绿色转型,2015 年开始,农业农村部组织开展化肥、农药使用量零增长行动。十九大报告进一步指出,建设生态文明是中华民族永续发展的千年大计,必须树立和践行绿水青山就是金山银山的理念。在当前农业生态环境形势严峻的背景下,农业经济发展应保持农业生产投入产出与资源消耗、环境保护三者之间的统筹协调。

与传统农业效率相比,农业生态效率(agricultural eco-efficiency, AEE)强调经济效益和环境效益的统一,是衡量农业可持续发展能力的重要指标<sup>[1-2]</sup>。国外对农业生态效率的研究起步较早<sup>[3]</sup>,我国引入生态效率应用于农业领域研究的历程较短<sup>[4]</sup>。现有文献在农业生态效率测算方面,主要涉及构建评价指标和评价方法的比较与选取两个内容。前者包括,生产投入、非期望产出与期望产出指标。后者核算方法主要有经济/环境单一比值法、指标体系法、模型法三类<sup>[5]</sup>。国外文献在测算方法

收稿日期:2021-07-05

基金项目:中国博士后科学基金项目“农业劳动力转移与农业机械化时空耦合关系对粮食生产的影响研究:以粮食主产区为例”(2020M672317);教育部哲学社会科学重大项目“新形势下我国粮食安全与水资源保障重大问题研究”(20JZD015)。

\* 为通讯作者。

上注重推演方法的原理,流行联合运用生命周期评估(life cycle assessment, LCA)和数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)方法。由于数据可获得性优势,有大量微观层面的农业生态效率研究成果,研究对象以具体农产品<sup>[6-8]</sup>或农业经营主体农场为主<sup>[9-10]</sup>。国内在测算方法上注重方法的应用,随机前沿(SFA)、SBM 模型、DEA 及其衍生模型是主流方法,并侧重中宏观层面的农业生态效率测算<sup>[11-12]</sup>。在农业生态效率影响因素研究方面,国外文献侧重分析单个影响因素,例如资源禀赋<sup>[13]</sup>、化肥<sup>[14]</sup>、制度<sup>[9]</sup>、欧盟共同农业政策<sup>[15]</sup>、农业创新体系<sup>[16]</sup>。我国学者侧重分析综合影响因素的贡献,主要包括技术、社会结构、人力资本、制度和经济发展水平<sup>[17]</sup>,农业基本情况、产业结构、发展潜力和投入强度<sup>[18]</sup>,劳动力素质、种植结构、财政支农水平、农机投入强度、农业生态环境防护投资额<sup>[19]</sup>等因素。

综上所述,现有文献对农业生态效率的研究已较为丰富,但仍有完善和深入的空间。第一,在研究尺度上,国内关于农业生态效率的研究由于数据获取限制,主要集中在全国以及省级的农业(种植业)生态效率研究,缺少从单个农产品角度的微观研究。第二,在研究方法上,国内虽然利用农业 LCA 方法研究农作物系统环境影响评价的成果较多,但是缺乏联合运用 LCA 和 DEA 方法分析农业生态效率的研究。第三,在农业生态效率影响因素研究上,缺少从农户绿色认知与环境规制视角,分析其对农户农业生态效率的影响,进而影响区域农业生态效率表现的研究。因此,文章基于现有研究的不足,拟作出如下改进。首先,以湖北省 370 个水稻农户的调查数据为研究单元,以水稻为研究对象,运用农业 LCA,对水稻生产边界内的相关环境影响进行量化分析,将得到的环境影响综合指数作为非期望产出纳入生态效率评价体系。其次,采用当前较为前沿的超效率 SBM 模型,在将非期望产出考虑进去的同时,也将取得更为符合实际效率的计量结果。最后,分别使用 Tobit 和 OLS 模型探讨农户绿色认知与环境规制对农业生态效率的影响,进而总结其所代表区域的农业生态效率,提出相应的改进措施和政策建议,更具有针对性和可操作性。

## 一、研究方法

### 1. 农业生命周期评价方法

国际环境毒理学和化学学会(SETAC)以及国际标准化组织(ISO)将 LCA 定义为,对一个产品系统的生命周期中输入、输出以及潜在环境影响的汇编和评价。我国学者将农业 LCA 定义为,伴随农业生产活动而引起的所有物质和能量的投入、产出与可计量的环境负荷间的关系,以评价农业生产活动的资源消耗、能源消耗和对环境的总和影响<sup>[20]</sup>。农业 LCA 评价包括目标定义与范围界定、清单分析、影响评价和结果解释四个步骤。

本文以湖北省单季水稻系统生命周期评价为研究目标,以 1 吨稻谷为评价的功能单元,分析生产 1 吨稻谷的生命周期过程中能量和物质投入、产出与环境影响。农产品生命周期的起始边界为与水稻生命周期相关的原料开采与运输、农用化学品生产与运输,终止边界为经过水稻生产播种至收获输出农产品和污染物。

清单分析中,原料和农资阶段主要考虑能源原材料开采的资源消耗与环境排放,农作阶段主要考虑水土资源、化肥、农药等资源消耗和污染排放,其能耗等技术指标和  $\text{CO}_2$ 、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{NO}_x$  等污染物排放系数主要参考梁龙<sup>[20]</sup>和王利<sup>[21]</sup>的相关研究。土地资源利用是生产 1 吨稻谷所占用的土地数量。水资源消耗仅考虑农田环节灌溉水资源消耗总量。氮磷钾肥有效成分施用量根据生产过程所用复合肥、碳酸氢氨和尿素有效成分进行换算。调研问卷详细记录了农户家庭所施用复合肥的 N、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  有效成分,以及碳酸氢铵、尿素中 N 的有效成分。稻田 N 损失参数的选择,包括  $\text{NH}_3$ 、 $\text{NO}_3$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  参考田玉华等<sup>[22]</sup>、尹娟等<sup>[23]</sup>、Brentrup<sup>[24]</sup>等的研究成果。稻田磷流失参数的选择,参考纪雄辉等<sup>[25]</sup>的相关研究,磷养分径流流失率为化肥的 0.86%。农药残留参考 Calker 等<sup>[26]</sup>的研究成果,研究中进入大气、水体、土壤的农药残留污染物分别为有效成分投入量的 10%、1%、43%。

农田重金属污染仅考虑肥料和灌溉水带入农田的 Cu、Zn、Pb、Cd 等重金属对环境的影响。样本区域农户水稻秸秆全部还田,仅考虑籽粒离开农作系统所带走的重金属量,参考倪润祥<sup>[27]</sup>的研究成果。与该系统相关的厂房设备、建筑设施、运输工具生产和原材料运输等环境影响未予考虑。

文章需要获取水稻系统对环境影响的指标化数据,并将其作为非期望产出纳入农业生态效率评价体系。生态环境影响一般分为特征化、标准化和加权评估三个步骤。首先,采用当量系数法进行核算<sup>①</sup>,对资源消耗和污染排放清单进行汇总。文章综合考虑了全球气候变暖、环境酸化、富营养化、人体毒性、水体毒性、土壤毒性、土地资源利用、能源消耗和淡水资源消耗 9 种环境影响类型<sup>[20,28]</sup>。其中,全球气候变暖、环境酸化、富营养化分别以 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 为当量因子,人体毒性、水体毒性、土壤毒性均以 1,4-DCB 为当量因子。土地资源利用、淡水资源消耗参考梁龙<sup>[20,28]</sup>的相关研究,能源消耗依据能源系数<sup>[20]</sup>折算成热值进行核算。其次,以 2000 年世界人均环境影响潜力<sup>[29]</sup>为环境影响基准值进行标准化处理。然后,借鉴彭小瑜等<sup>[28]</sup>研究中设定的权重系数,对各类环境影响指数进行汇总,最终得到水稻环境影响综合指数。

## 2. 非期望产出超效率 SBM 模型

农业生态效率是衡量农业生态化发展水平的基本指标,其重点是综合平衡农业投入、农业产出、生态影响三者之间的关系,目标是促进农业可持续发展。农业生态效率不能直接由当前农业系统测量得出,其必须以农业生产为基础,其中包括期望的和非期望的生产活动或产出。文章以水稻总产值为期望产出,以水稻系统生命周期的环境影响综合指数为非期望产出。以 DEA-SOLVER Pro 5.0 为计算平台,测算农户水稻生产的生态效率表现。与传统 DEA 模型相比,SBM 模型可以解决“拥挤”或“松弛”问题。然而,SBM 模型无法区分效率等于 1 以及超过 1 的决策单元(DMUs)间的效率差异,而基于非期望产出的超效率 SBM 模型<sup>[30]</sup>弥补了上述方法的不足。因此,文章采用超效率 DEA(SE-DEA)来测度农业生态效率<sup>[31]</sup>,模型如下:

$$\min AEE = \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left( \frac{\bar{x}}{x_{ik}} \right)}{\frac{1}{r_1 + r_2} \left( \sum_{s=1}^{r_1} \bar{y}^d / y_{sk}^d + \sum_{q=1}^{r_2} \bar{y}^u / y_{qk}^u \right)} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x \geq \sum_{j=1, \neq k}^n x_{ij} \lambda_j; \bar{y}^d \leq \sum_{j=1, \neq k}^n y_{sj}^d \lambda_j; \bar{y}^d \geq \sum_{j=1, \neq k}^n y_{qj}^d \lambda_j; \\ x \geq x_k; \bar{y}^d \leq y_k^d; \bar{y}^u \geq y_k^u \\ \lambda_j \geq 0, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n, j \neq 0; \\ s = 1, 2, \dots, r_1; q = 1, 2, \dots, r_2; \end{cases} \quad (2)$$

上式中, $n$  是决策单元 DMUs 的数量,每个 DMUs 由投入  $m$ ,期望产出  $r_1$  和非期望产出  $r_2$  组成, $x, y^d, y^u$  分别是投入、期望产出和非期望产出矩阵中的元素。

## 3. 实证模型

文章对农业生态效率的影响因素进行了实证分析,重点考察农户绿色认知与环境规制的作用水平。文章分别选择 OLS 和 Tobit 两种模型进行分析。其中,OLS 估计满足经典线性模型的基本假定,模型设定如下:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 Z + \mu + \varepsilon \quad \varepsilon \sim N(0, \delta^2) \quad (3)$$

式(3)中, $\mathbf{Y}$  表示被解释变量向量,即稻农的农业生态效率值; $\mathbf{X}$  表示核心自变量向量,即绿色认知与环境规制变量; $\mathbf{Z}$  表示控制变量向量,即一系列要素投入量; $\boldsymbol{\beta}$  表示参数向量, $\mu$  为地区固定效应, $\boldsymbol{\varepsilon}$  表示残差向量,服从均值为 0、方差为  $\delta^2$  的正态分布。

① 即以某影响因素中某一种生态影响因子为基准,根据性质不同的生态影响因子对同一种生态影响类型的贡献潜力得出各类影响因子的相对影响潜力,进而计算出各种影响因子的环境影响潜值。

农业生态效率值是左侧受限点为 0, 无右侧受限点的非负截断变量, 满足受限因变量 Tobit 模型运用特征。模型设定如下:

$$Y^* = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 Z + \mu + \varepsilon \quad \varepsilon \sim N(0, \delta^2) \quad (4)$$

$$Y = \begin{cases} Y^*, & \text{if } Y^* > 0 \\ 0, & \text{if } Y^* \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

上式中,  $Y$  为超效率 SBM 模型计算的农业生态效率向量。当潜变量  $Y^*$  小于等于 0 时, 被解释变量  $Y$  等于 0; 当  $Y^*$  大于 0 时, 被解释变量  $Y$  等于  $Y^*$ 。  $\mu$  为地区固定效应, 假设扰动项  $\varepsilon$  服从均值为 0、方差为  $\delta^2$  的正态分布。

## 二、数据来源与变量选取

### 1. 数据来源

样本区域地处长江中游, 属于典型亚热带季风性湿润气候, 光照充足, 热量丰富, 降水充沛, 雨热同季, 年平均气温 15~17℃, 年平均降水量在 800~1600 毫米之间, 夏季降雨主要集中在 7、8 月份。单季水稻是该区域当前典型的种植制度之一, 田间管理措施以“大水、大肥、间歇灌溉”为主要特征。长期以来, 该区域过量的农药、化肥投入不仅大幅增加了农民水稻种植的成本, 而且付出了严峻的环境代价。

文章数据主要来源于课题组 2020 年 11—12 月对湖北省襄阳市杨垱镇红沙河村、赵堂村、高店村, 吴店镇黄家庙村、西赵湖村、周寨村; 以及钟祥市洋梓镇大桥村、回龙村、高林村, 冷水镇鲍岗村、王垱村、鸭湖村的农户 2020 年投入产出的随机抽样调查。作为我国粮食生产大省, 湖北省具有一定区域代表性, 并且作为单季水稻种植主产区和优势区, 对研究水稻生命周期的环境影响以及绿色生产具有较好区域代表性。调研采取分层逐级抽样和随机抽样相结合, 调研员与农户“一对一”访谈的方式进行。首先, 每个市随机选取 2 个镇; 其次, 每个镇随机选取 3 个村; 最后, 每个村选择 30~35 户农户进行访谈。最终, 剔除未回收、农户漏答或中途停止作答等无效问卷外, 适用于本研究目的的有效问卷共 370 份。问卷内容涉及农户家庭特征、种植业生产经营情况、农业绿色认知与环境规制情况等方面。文章中每个农户即为一个决策单元 DMUs, 因此共有 370 个 DMUs。

### 2. 变量选择与处理

(1) 农业生态效率(AEE)。文章以水稻为研究对象测算其生产生态效率, 评价指标体系的构建借鉴相关文献<sup>[19,32]</sup>, 同时考虑到数据的可获得性, 选择水稻的种植面积、劳动用工量、机械使用总费用、灌溉水用量、化肥投入量、农药用量、农用汽油柴油用量等作为生产投入指标, 以水稻总产值作为期望产出指标, 以利用农业 LCA 法测度的水稻系统环境影响综合指数作为非期望产出指标。最终构建的农业生态效率指标体系见如表 1。

表 1 农业生态效率投入产出指标

指标类别	分类指标	变量说明	备注	均值	标准差
生产要素	土地投入	水稻种植面积/hm <sup>2</sup>	反映水稻生产的实际种植面积	1.158	1.506
	劳动投入	水稻劳动用工天数/(人/工日)	水稻生产过程中总的劳动力用工量按天折算	55.774	62.053
	机械投入	水稻机械服务总费用/元	农业机械服务费用代表机械化利用水平	3234.669	4152.092
	用水投入	水稻灌溉用水量/m <sup>3</sup>	水稻生产过程中的灌溉用水总量	4184.393	5673.659
	化肥投入	化肥施用量/kg	化肥投入是水稻生产过程中主要污染源之一	1135.940	1553.249
	农药投入	农药使用量/kg	农药投入是水稻生产过程中主要污染源之一	13.432	18.274
	能源投入	农用汽油柴油使用量/kg	农用汽油柴油投入是水稻生产过程中污染源之一	47.308	75.963
期望产出	水稻产值	水稻总产值/元	2020 年水稻总产量与销售价格的乘积	27996.950	35981.480
非期望产出	水稻环境影响综合指数	水稻生命周期过程 N、P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 、K <sub>2</sub> O、农药、农业用电、农用汽油柴油、灌溉、土地利用、能源消耗、种子, 投入和消耗造成的环境负荷	利用农业 LCA 估算得到水稻环境影响综合指数	22.996	24.572



(2)农业生态效率影响因素回归模型变量选取。被解释变量为农业生态效率。核心解释变量包括农户绿色认知与环境规制两个维度。文章选取责任意识与环境规制两个方面的指标。责任意识作为一种外在社会规范内化形成的心理和行为方式,会在个体行为决策中起到重要引导和规范作用<sup>[33-34]</sup>,已有研究证实责任意识对农户绿色生产行为具有显著促进作用<sup>[35]</sup>。借鉴余威震等<sup>[35]</sup>的做法,选取责任归属、行为实践和行为担当三个变量,分别用“您认为村民应积极使用环境友好型施药施肥技术吗?”“您在农业生产中是否贯彻执行政府化肥农药减量施用的规定和要求?(自身)”“您会引导和劝说他人农业生产中执行化肥农药减量施用吗?(他人)”三个问题进行反映。制度经济学认为,任何经济活动都是在一定制度约束下的效用最大化的理性活动,并已有大量关于环境规制对农户绿色生产行为影响的研究成果<sup>[36-37]</sup>。借鉴相关研究<sup>[37-39]</sup>的做法,选取命令规制、宣传规制两个变量,分别用“村里是否有化肥农药减量使用的硬性规定与要求?”“政府有关化肥农药减量增效知识的宣传力度?”两个问题进行反映。控制变量参考相关研究<sup>[40-41]</sup>的做法,从农户经济条件、资源条件、市场因素三个维度控制了其可能会影响农户农业生态效率的因素,以排除干扰。其中,经济条件包括家庭人均收入、人均资产、劳均资本三个变量。资源条件包括水稻种植面积、农业机械投入强度、水稻灌溉用水量、户均劳动能力、户均受教育水平五个变量。市场因素包括是否加入农业专业合作社、稻谷商品化率、作物种植结构三个变量。所有变量及其说明见表 2。

表 2 农业生态效率影响因素的测算说明

变量类别	变量/单位	变量说明	均值	标准差	
被解释变量	农业生态效率	基于农业 LCA+DEA 法相结合进行测算	0.640	0.239	
核心解释变量	责任归属	您认为村民应积极使用环境友好型施药施肥技术吗? 非常不同意=1;不太同意=2;一般=3;比较同意=4;非常同意=5	2.900	1.058	
	责任意识	行为实践	您在农业生产中是否贯彻执行政府化肥农药减量施用的规定和要求? 是=1;否=0	0.132	0.339
	行为担当	您会引导和劝说他人农业生产中执行化肥农药减量施用吗? 非常不重视=1;不太重视=2;一般=3;比较重视=4;非常重视=5	2.843	1.000	
	命令规制	村里是否有化肥农药减量使用的硬性规定与要求? 是=1;否=0	0.205	0.405	
环境规制	宣传规制	政府有关化肥农药减量增效知识的宣传力度? 很小=1;较小=2;一般=3;较大=4;很大=5	4.211	1.035	
	经济条件	人均收入/(元/人)	家庭总收入/家庭人口数	24274.990	21123.410
控制变量	人均资产/(m <sup>2</sup> /人)	房屋使用总面积/家庭人口数	64.113	57.353	
	劳均资本/(元/工日)	水稻生产总资本投入/水稻生产总劳动投入时间	413.117	795.601	
	资源条件	种植面积/hm <sup>2</sup>	水稻播种面积	1.158	1.506
		机械投入强度/(元/hm <sup>2</sup> )	水稻机械服务总费用/种植面积	2912.967	806.732
		灌溉用水量/(m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> )	水稻种植灌溉用水总量/种植面积	3586.234	2273.828
	户均劳动能力	家庭劳动能力=整劳动力×1+半劳动力×0.5;整劳动力和半劳动力定义依据《中国住户调查年鉴(2013)》标准	2.597	1.021	
	户均受教育水平	劳动力在学校接受正规教育平均年数	8.535	2.166	
市场因素	是否加入合作社	是否加入农业专业生产合作社	0.111	0.314	
	稻谷商品化率/%	稻谷总销售数量/水稻总产量	86.188	13.420	
	作物种植结构/%	(农作物种植面积-粮食作物种植面积)/粮食作物种植面积	0.174	0.320	

注:文章资源条件指标中的户均劳动能力是根据《中国住户调查年鉴(2013)》定义,整劳动力指男子 18~50 周岁、女子 18~45 周岁,且具有劳动能力的人;半劳动力指男子 16~17 周岁、51~60 周岁,女子 16~17 周岁、46~55 周岁,同时具有劳动能力的人;超过劳动年龄,但全年劳动时间超过 3 个月,计为半劳动力。户均受教育水平参考李谷成等(2006,2009)的相关研究成果,采用劳动力在学校接受正规教育的平均年数表示。按照中国实际学制,每户农户均受教育年限具体表示为: $Education = (0 \times H_0 + 6 \times H_1 + 9 \times H_2 + 12 \times H_3 + 13.5 \times H_4 + 15 \times H_5) / Farmer$ 。其中, $H_j$ 表示各农户劳动力中各文化层次人数, $j = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ 分别表示文盲与半文盲、小学(学制 6 年)、初中(学制 9 年)、高中(学制 12 年)、中专和大专(学制折算成 13.5 年)和大专以上(学制折算成 15 年)。

### 三、结果与分析

#### 1. 农业环境影响综合指数

水稻系统生命周期环境影响潜值分类和特征化结果见表 3。水稻生命周期过程的影响类型分为资源利用和环境影响两大类。其中,资源利用主要考虑能源消耗、土地资源利用和水资源消耗,环境影响主要包括全球气候变暖、环境酸化、富营养化、人体毒性、水体毒性和土壤毒性。文章通过计算水稻生命周期生态环境影响潜值,得到每种环境影响类型的计算结果。

水稻系统生命周期环境影响潜值标准化及加权分析结果见表 4。对水稻生命周期环境影响较大的是水体毒性、土壤毒性、富营养化、环境酸化,环境影响指数分别为 12.57、8.69、1.78、0.28。即生产 1 吨稻谷产生的水体毒性、土壤毒性、富营养化、环境酸化分别相当于 2000 年世界人均环境影响潜力的 1257%、869%、178%、28%。水稻能源消耗、人体毒性和水资源消耗的环境影响都较小,低于 4%。水体毒性、土壤毒性和富营养化是其主要影响因子。它们分别占 9 种环境影响综合指数的 53.89%、33.19%、9.35%。水稻系统生命周期生态环境影响综合指数为 2.099。此值将作为非期望产出纳入下一步的超效率 SBM 模型效率评价体系中,用于衡量农户的水稻生产生态效率表现。

#### 2. 农业生态效率

文章以微观农户为研究单元, Battese 等<sup>[42]</sup>认为,微观研究对象更适用于可变规模报酬(variable returns to scale, VRS)模型。因此,文章选择 VRS 限定条件下的非期望产出超效率 SBM-DEA 模型进行农业生态效率测度。设定期望产出总权重与非期望产出总权重均为 1, 测算出 370 个决策单元<sup>①</sup>的平均农业生态效率值为 0.64(表 5)。此研究结果与王宝义等<sup>[32]</sup>测算的湖北省 2004—2015 年的农业生态效率均值 0.51 相比已有大幅提高。

表 5 样本区域农户农业生态效率值

分组	高效率组(AEE ≥ 1)	中效率组(0.8 ≤ AEE < 1)	低效率组(AEE < 0.8)	样本总体
户数	52	18	300	370
均值	1.11	0.85	0.55	0.64

农户家庭农业生态效率存在显著差异。文章根据每个农户的农业生态效率水平,将其生态效率值划分为高、中、低三个组别<sup>[43]</sup>。具体为,高效率组表示实现了效率状态,农户生产处于生产前沿面上,其农业生态效率值等于或大于 1。农户的农业生态效率值未达生产前沿面时均小于 1,属于 DEA 相对无效表现,均存在一定程度的效率损失。文章进一步依据距离生产前沿面的远近,将无效率农户

表 3 水稻系统生命周期生态环境影响潜值

生态环境影响类型	农资系统	农作系统	合计
能源耗竭 MJ	2530.662	1736.909	4267.571
淡水资源消耗/ m <sup>3</sup>	—	358.171	358.171
土地资源利用/ m <sup>2</sup>	—	997.440	997.440
全球气候变暖/ kgCO <sub>2</sub> -eq	267.984	125.707	393.691
环境酸化/ kgSO <sub>2</sub> -eq	1.708	12.919	14.627
富营养化/ kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -eq	0.304	3.202	3.506
人体毒性/ kg1,4-DCB-eq	—	5.811	5.811
水体毒性/ kg1,4-DCB-eq	—	60.707	60.707
土壤毒性/ kg1,4-DCB-eq	—	53.122	53.122

表 4 水稻生命周期环境影响潜值  
标准化及加权分析

环境影响类型	标准化后 影响指数	加权后 影响指数
能源耗竭 MJ	0.002	0.0002
淡水资源消耗/m <sup>3</sup>	0.041	0.005
土地资源利用/m <sup>2</sup>	0.184	0.026
全球气候变暖/kgCO <sub>2</sub> -eq	0.057	0.007
环境酸化/kgSO <sub>2</sub> -eq	0.28	0.034
富营养化/kgPO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -eq	1.781	0.196
人体毒性/kg1,4-DCB-eq	0.03	0.004
水体毒性/kg1,4-DCB-eq	12.569	1.131
土壤毒性/kg1,4-DCB-eq	8.694	0.696
合计	—	2.099

① 由于篇幅限制,正文中省略了 370 个农户在各限定条件下的农业生态效率值。

划分为中效率组和低效率组,中效率组农户的农业生态效率值介于 0.8~1 之间,低效率组农户的农业生态效率值小于 0.8。由表 5 结果可知,低效率组农户占比为 81.08%,均值为 0.55;中效率组农户占比为 4.86%,均值为 0.85;高效率组农户占比为 14.05%,均值为 1.11。由此可知,样本区域农业生态效率存在高低两个极端,处于低、中效率组别的农户占比为高效率组别农户占比的 6.12 倍。这意味着,扩大高效率组农户数量,提升区域农业生态效率存在巨大潜力。

在农业生态效率测算过程中,期望产出总权重和非期望产出总权重的设定也很重要。文章参考王宝义等的研究<sup>[32]</sup>,利用 Under desirable 模型,在选定以 VRS 为限定条件的基础上,分别设定期望产出总权重和非期望产出总权重均为 1;期望产出总权重为 0.6,非期望产出总权重为 0.4;期望产出总权重为 0.4,非期望产出总权重为 0.6,三类条件下的计算结果进行对比分析,具体结果见表 6。从三种结果来看,期望产出总权重较之于非期望产出总权重比值越高,农业生态效率均值也相对越高。总体而言,三种计算结果差别不大,这进一步说明上文测算的农户农业生态效率具有稳健性。

表 6 期望产出与非期望产出不同权重条件下农业生态效率值对比

条件	平均值	标准差	最小值	最大值	效率单元	非效率单元
1 : 1	0.571	0.214	0.201	1	52	318
0.6 : 0.4	0.558	0.219	0.190	1	52	318
0.4 : 0.6	0.545	0.224	0.181	1	52	318

### 3. 绿色认知与环境规制对农户农业生态效率的影响

利用 Stata16 软件,结合上文基于 VRS 限定条件设定测度的农业生态效率值与农户绿色认知、环境规制变量进行 Tobit 回归。为了验证估计结果的稳健性,在 Tobit 回归基础上进行了 OLS 估计。由表 7 估计结果可知,两个模型的回归结果整体保持一致,说明回归结果具有稳健性。

表 7 绿色认知与环境规制对农业生态效率影响的估计结果

解释变量	Tobit 模型估计		OLS 模型估计		
	系数	稳健标准误	系数	稳健标准误	
责任意识	责任归属	0.007	0.006	0.007	0.006
	行为实践	0.075***	0.022	0.075***	0.022
	行为担当	0.012*	0.006	0.012*	0.007
环境规制	命令规制	0.014	0.015	0.014	0.015
	宣传规制	0.015*	0.008	0.015*	0.009
经济条件	人均收入	-0.0001	0.009	-0.0001	0.009
	人均资产	0.039***	0.008	0.039***	0.009
	劳均资本	0.036***	0.006	0.036***	0.007
资源条件	种植面积	0.050***	0.017	0.050***	0.018
	机械投入强度	-0.132***	0.022	-0.132***	0.023
	灌溉用水量	-0.024***	0.009	-0.024***	0.009
	户均劳动能力	0.021*	0.014	0.021*	0.014
	户均受教育水平	0.006	0.017	0.006	0.017
市场因素	是否加入合作社	-0.021	0.016	-0.021	0.016
	稻谷销售率	-0.118***	0.032	-0.118***	0.033
	作物种植结构	-0.003	0.033	-0.003	0.033
地区固定效应	已控制		已控制		
常数项	1.768***	0.246	1.768***	0.251	
Loglikelihood	327.855		R <sup>2</sup>		
F	14.05(Prob>F=0.000)		13.44(Prob>F=0.000)		

注: \*、\*\* 和 \*\*\* 分别表示在 10%、5% 和 1% 的水平上显著。

从表 7 可知,在农户绿色生产的责任意识方面,农户绿色生产行为实践、行为担当分别在 1%、10% 水平上显著正向影响农业生态效率,这意味着随着农户绿色生产责任意识增强,水稻生产的生态效率将有所提高。可能的原因是,责任意识作为对个体行为的一种自我约束,责任意识强的稻农更倾向于做出符合社会或大众期望的行为,通过以身作则及引领示范承担环境保护责任,促进经济效益与生态效益相协调,并从中获得自我满足感以及社会认同感。在农业绿色生产的环境规制方面,整体而言,环境规制措施有利于促进农业生态效率的提升,主要表现在宣传规制对稻农绿色生产的促进作用。这主要是由于对化肥农药减量增效知识的宣传,能够增强稻农认识到其生产行为的环境效益,加深对水稻绿色生产行为的认知与了解,从而进一步强化稻农的绿色生产意识,提高稻农参与化肥农药减量施用行动的可能性。并且,通过化肥农药减量增效知识宣传改变稻农对化肥农药的认知,可以对稻农在施肥施药前的行为以及整个施肥施药过程的行为起到一定的规范作用。

控制变量方面。较好的经济条件整体上有利于促进农业生态效率提升。经济条件对农业生态效率的正向影响得益于家庭人均资产、劳均资本对农业生态效率的正向影响。家庭资产、劳均资本均在一定程度上反映了家庭经济实力,雄厚的经济实力为稻农农业生态效率的提升提供充足的资金技术支持。资源条件对农业生态效率的影响较为复杂,农业机械投入强度、灌溉用水量对农业生态效率具有负向影响,水稻种植面积、户均劳动能力对农业生态效率具有正向影响。农业机械投入强度的增加造成大量柴油消耗以及动力资源浪费,均进一步造成农业生态系统中非期望产出的增加,从而不利于农业生态效率提升。水资源消耗以及灌溉水带入农田的重金属污染均会带来农业环境问题。随着经营规模扩大,单位面积化肥、农药投入量在减少,此外还能够提升农户的绿色生产意识,促进环境友好型生产技术采纳,因此经营规模扩大有助于生态环境改善。整体较高的劳动能力,可以促使这部分农户在稻田种植时投入更多精力,执行精细化的田间管理措施,提升农业生态效率。市场因素对农业生态效率的负向影响反映在稻谷商品化率对农业生态效率的负向影响上。这可能是由于稻谷商品化率高的农户以追求利润最大化为目标,更倚重通过高农用化学品投入来获得更大的市场利润,对食品安全效用的关注不及口粮型农户,导致其呈现农业生产生态低效状态。

## 四、结论与启示

文章利用湖北省农户水稻生产调查数据,首先运用农业 LCA 方法,并考虑当前主要的农业生产约束性要素——水资源和土地资源,对农户水稻生产边界内的相关环境影响进行量化分析,并将加权评估后的环境影响综合指数作为农业生态效率评价体系中的非期望产出值。其次,运用超效率 SBM 模型,测算出农户农业生态效率值。最后,选择 Tobit 模型和 OLS 模型探讨农户绿色认知与环境规制对农业生态效率的影响。主要研究结论如下:

水稻系统生命周期的环境影响主要是水体毒性、土壤毒性、富营养化和环境酸化,环境影响指数分别为 12.57、8.69、1.78、0.28。经加权评估后,水稻系统生命周期环境影响综合指数为 2.099,水体毒性、土壤毒性和富营养化是其主要影响因子。在 VRS 限定条件下,同时期望产出总权重和非期望产出总权重均设定为 1 时,稻农农业生态效率平均值为 0.64。其中,低效率组农户占比为 81.08%,均值为 0.55;中效率组农户占比为 4.86%,均值为 0.85;高效率组农户占比为 14.05%,均值为 1.11。

在农户绿色生产责任意识方面,农户绿色生产行为实践、行为担当能够促进农业生态效率的提升。在环境规制方面,宣传规制有利于促进农业生态效率的提升。除此之外,经济条件对农业生态效率的正向影响主要得益于家庭人均资产、劳均资本对农业生态效率的正向影响。资源条件对农业生态效率的影响较为复杂,农业机械投入强度、灌溉用水量对农业生态效率具有负向影响,水稻种植面积、户均劳动能力对农业生态效率具有正向影响。市场因素对农业生态效率的负向影响主要表现在稻谷商品化率对农业生态效率的负向影响。

根据本文研究结论,为了实现区域农业生产方式绿色转型,可以从以下四个方面入手。一是,政府应当注重扩大高农业生态效率水平的农户数量,发挥高农业生态效率农户的引领示范作用,带动低、中农业生态效率农户向高农业生态效率不断提升,整体提升区域农业生态效率水平。二是,政府



应当注重提升农户促进农业绿色发展、持续改善环境质量的责任意识,进而推进农户绿色生产实践的进程。三是,加大化肥农药过量使用的环境危害和农业绿色生产重要性的宣传力度,从而有效提高稻农的环境保护意识,提升稻农的水稻绿色生产参与度,规范稻农在施肥施药前的行为以及整个施肥施药过程中的行为。四是,在促进农业生态化发展过程中,不断提高农业生态效率的同时,应当增强农户经济条件和资源条件支撑、完善绿色农产品市场建设。

文章也存在一些不足之处,主要表现在:第一,农业在自我系统运转中,能够汇集和转化部分“碳”,通过光合作用增加碳汇,但文章仅考虑了农业生产中的环境负荷,却未考虑其对环境的正向影响。实际上,已有研究证实了小规模农场可提供环境公益物<sup>[9]</sup>,这也符合可持续发展的概念和欧盟实施的支持模式<sup>[44-45]</sup>。第二,关于农业生态效率的影响因素,需要纳入更多社会和环境方面的其他变量,这也是本文研究的局限性之一。第三,本研究的另一个限制是采用了静态的研究方法。为了评估稻农农业生态效率的进展和政策措施的有效性,需要采用动态的研究方法,例如 Picazo 等<sup>[46]</sup>开发的方法,在未来的研究中可以尝试考虑这些限制。

### 参考文献

- [1] MÜLER K, HOLMES A, DEURER M, et al. Eco-efficiency as a sustainability measure for kiwifruit production in New Zealand [J]. *Journal of cleaner production*, 2015(106): 333-342.
- [2] RASHIDI K, FARZIPOOR S R. Measuring eco-efficiency based on green indicators and potentials in energy saving and undesirable output abatement [J]. *Energy economics*, 2015(50): 18-26.
- [3] SCHALTEGGER S, STURM A. Ökologische Rationalität [J]. *Die Unternehmung*, 1990(4): 273-290.
- [4] 周震峰. 关于开展农业生态效率研究的思考 [J]. *农业科技管理*, 2007(6): 9-11.
- [5] 尹科, 王如松, 周传斌, 等. 国内外生态效率核算方法及其应用研究述评 [J]. *生态学报*, 2012, 32(11): 3595-3605.
- [6] ULLAH A, PERRET S R, GHEEWALA S H, et al. Eco-efficiency of cotton-cropping systems in Pakistan: an integrated approach of life cycle assessment and data envelopment analysis [J]. *Journal of cleaner production*, 2016(134): 623-632.
- [7] MOHSENI P, BORGHEI A M, KHANALI M. Coupled life cycle assessment and data envelopment analysis for mitigation of environmental impacts and enhancement of energy efficiency in grape production [J]. *Journal of cleaner production*, 2018(197): 937-947.
- [8] FORLEO M B, PALMIERI N, SUARDI A, et al. The eco-efficiency of rapeseed and sunflower cultivation in Italy. Joining environmental and economic assessment [J]. *Journal of cleaner production*, 2018, 172: 3138-3153.
- [9] STEPIEN S, CZYZEWSKI B, SAPA A, et al. Eco-efficiency of small-scale farming in Poland and its institutional drivers [J]. *Journal of cleaner production*, 2021, 279: 123721.
- [10] BAUM R, BIENKOWSKI J. Eco-efficiency in measuring the sustainable production of agricultural crops [J]. *Sustainability*, 2020, 12(4): 1-12.
- [11] 侯孟阳, 姚顺波. 1978—2016年中国农业生态效率时空演变及趋势预测 [J]. *地理学报*, 2018, 73(11): 2168-2183.
- [12] 王永静, 陈增增. 天山北坡经济带农业生态效率评价及提升路径研究——基于 Super-SBM 模型和 Global-Malmquist 指数 [J]. *生态经济*, 2020, 36(2): 111-117.
- [13] GRZELAK A, GUTH M, MATUSZCZAK A, et al. Approaching the environmental sustainable value in agriculture: how factor endowments foster the eco-efficiency [J]. *Journal of cleaner production*, 2019, 241: 118304.
- [14] MYO L C, AKANE N, SEIJI H. Eco-efficiency assessment of material use: the case of phosphorus fertilizer usage in Japan's rice sector [J]. *Sustainability*, 2017, 9(9): 1562.
- [15] CZYZEWSKI B, MATUSZCZAK A, GRZELAK A, et al. Environmental sustainable value in agriculture revisited: how does Common Agricultural Policy contribute to eco-efficiency? [J]. *Sustainability science*, 2021, 16(1): 137-152.
- [16] CHRISTIAN G, TESFAMICHEAL W, ADRIAN M, et al. Eco-efficiency and agricultural innovation systems in developing countries: evidence from macro-level analysis [J]. *Plos one*, 2019, 14(4): 1-14.
- [17] 李燕. 农业环境效率测度及其影响因素的研究综述 [J]. *探求*, 2019(6): 44-49.
- [18] LIU Y S, ZOU L L, WANG Y S. Spatial-temporal characteristics and influencing factors of agricultural eco-efficiency in China in recent 40 years [J]. *Land use policy*, 2020(97): 104794.
- [19] 陈菁泉, 信猛, 马晓君, 等. 中国农业生态效率测度与驱动因素 [J]. *中国环境科学*, 2020, 40(7): 3216-3227.
- [20] 梁龙. 基于 LCA 的循环农业环境影响评价方法探讨与实证研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2009.

- [21] 王利. 中国化肥产业体系养分资源流动规律与管理策略研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- [22] 田玉华, 尹斌, 贺发云, 等. 太湖地区稻季的氮素径流损失研究[J]. 土壤学报, 2007(6): 1070-1075.
- [23] 尹娟, 费良军, 田军仓, 等. 水稻田中氮肥损失研究进展[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 189-191.
- [24] BRENTRUP F, KÜSTERS J, LAMMEL J, et al. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment methodology II. The application to N fertilizer use in winter wheat production systems[J]. *European journal of agronomy*, 2004, 20(3): 265-279.
- [25] 纪雄辉, 郑圣先, 刘强, 等. 施用有机肥对长江中游地区双季稻田磷素径流损失及水稻产量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2006, 32(3): 283-287.
- [26] CALKER K, BERENTSEN P, BOER I, et al. An LP-Model to analyze economic and ecological sustainability on Dutch dairy farms: model presentation and application for experimental farm “de marke”[J]. *Agricultural systems*, 2004, 82(2): 139-160.
- [27] 倪润祥. 中国农田土壤重金属输入输出平衡和风险评价研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.
- [28] 彭小瑜, 吴喜慧, 吴发启, 等. 陕西关中地区冬小麦-夏玉米轮作系统生命周期评价[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(4): 809-816.
- [29] HUIJBREGTS M A J, BREEDVELD L, HUPPES G, et al. Normalization figures for environmental life-cycle assessment the Netherlands (1997/1998), western Europe(1995) and the world(1990 and 1995)[J]. *Journal of cleaner production*, 2003(11): 737-748.
- [30] TONE K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J]. *European journal of operational research*, 2002, 143(1): 32-41.
- [31] ZENG L L, LI X Y, RUIZ M J. The effect of crop diversity on agricultural eco-efficiency in China: a blessing or a curse? [J]. *Journal of cleaner production*, 2020, 276: 124243.
- [32] 王宝义, 张卫国. 中国农业生态效率的省际差异和影响因素——基于 1996~2015 年 31 个省份的面板数据分析[J]. 中国农村经济, 2018(1): 46-62.
- [33] 谭小宏, 秦启文. 责任心心的心理学研究与展望[J]. 心理科学, 2005(4): 991-994.
- [34] 杨文杰, 巩前文. 农村绿色发展中农户认知对行为响应的影响研究[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2021(2): 40-48, 176.
- [35] 余威震, 罗小锋, 王洁, 等. 责任意识能激发稻农亲环境生产行为吗? ——基于情境约束的调节效应[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(9): 2047-2056.
- [36] LICHTENBERG E. Economics of pesticide use and regulation[J]. *Encyclopedia of energy natural resource and environmental economics*, 2013(3): 86-97.
- [37] 李芬妮, 张俊飏, 何可. 非正式制度、环境规制对农户绿色生产行为的影响: 基于湖北 1105 份农户调查数据[J]. 资源科学, 2019, 41(7): 1227-1239.
- [38] 黄祖辉, 钟颖琦, 王晓莉. 不同政策对农户农药施用行为的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(8): 148-155.
- [39] 唐林, 罗小锋, 张俊飏. 环境规制如何影响农户村域环境治理参与意愿[J]. 华中科技大学学报(社会科学版), 2020, 34(2): 64-74.
- [40] 黄炎忠, 罗小锋. 既吃又卖: 稻农的生物农药施用行为差异分析[J]. 中国农村经济, 2018(7): 63-78.
- [41] 王宝义. 中国农业生态化发展的综合评价与系统诊断[J]. 财经科学, 2018(8): 107-120.
- [42] BATTESE G E, COELLI T J. Frontier production functions, technical efficiency and panel data: with application to paddy farmers in India[J]. *The journal of productivity analysis*, 1992, 3(1): 153-169.
- [43] 方永丽, 曾小龙. 中国省际农业生态效率评价及其改进路径分析[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(1): 135-142.
- [44] COOPER T, HART K, BALDOCK D. Provision of public goods through agriculture in the European Union: report prepared for DG agriculture and rural development[R]. London: Institute for European Environmental Policy, 2009.
- [45] HART K, BALDOCK D, WEINGARTEN P, et al. What tools for the European Agricultural Policy to encourage the provision of public goods? European Parliament Directorate General for international policies[R]. Brussels: European Parliament's Committee, 2011.
- [46] PICAZO T A J, CASTILLO G J, BELTRAN E M. An intertemporal approach to measuring environmental performance with directional distance functions: greenhouse gas emissions in the European Union[J]. *Ecological economics*, 2014, 100: 173-182.

## Joint Life Cycle Assessment and Data Envelopment Analysis for Assessing Agriculture Eco-Efficiency

——Considering the Impacts of Green Cognition and Government Regulations

HUANG Malan, ZENG Linlin, LI Xiaoyun

**Abstract** Taking one season paddy rice in Hubei Province as research object, the life cycle assessment method was adopted to quantify the relevant environmental impacts within the rice production boundary, and the super-efficient SBM model was applied to measure the eco-ecological efficiency of farmers. On this basis, Tobit and OLS models are used to analyse the effects of green cognition and environmental regulations on agricultural eco-efficiency. The results showed that aggregate life cycle environmental impact index of rice paddy system was 2.099. The average eco-efficiency of rice was 0.64. More specifically, the proportion of farmers in low efficiency group, in middle efficiency group and in high efficiency group was 81.08%, 4.86%, 14.05%, with an average value of 0.55, 0.85 and 1.11, respectively. Both the green cognition and the government regulation had a significant positive impact on rice eco-efficiency. Among the economic, resource and market conditions determinants of eco-efficiency, per capita assets and per capita capital investment had a positive influence on eco-efficiency; both machinery use intensity and irrigation had a negative influence on eco-efficiency, while sown area and per household labor capacity had a positive influence on eco-efficiency; and the rice commercialization rate had a negative influence on eco-efficiency. Based on those findings, we recommend expanding the number of farmers with high eco-efficiency, enhancing farmers' sense of responsibility for improving environmental quality, strengthening on the promotion of agriculture green production knowledge, and enforcing support of farmers' economic conditions, resource conditions and improving market construction of green agricultural products to realize the green transformation of agricultural production mode.

**Key words** agriculture eco-efficiency; rice; life cycle assessment; super-SBM model; green cognition; environmental regulations

(责任编辑:陈万红)