

DOI: 10.12357/cjea.20240068

CSTR: 32371.14.cjea.20240068

陈旖旎, 胡盛红, 卢卫星, 朱伟铭, 潘禹锟, 申玉琢. 基于三阶段 DEA 的农业能源效率计算方法改进[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(1): 153-165

CHEN Y N, HU S H, LU W X, ZHU W M, PAN Y K, SHEN Y Z. Improvement of the method for calculating agricultural energy efficiency based on the three-stage Data Envelopment Analysis[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(1): 153-165

基于三阶段 DEA 的农业能源效率计算方法改进*

陈旖旎¹, 胡盛红¹, 卢卫星², 朱伟铭², 潘禹锟², 申玉琢^{1**}

(1. 中国热带农业科学院科技信息研究所/海南省热带作物信息技术应用研究重点实验室 海口 570100; 2. 湛江中粤能源有限公司 湛江 524044)

摘要: 精准测算是提高农业能源效率的基础, 有助于识别能源使用的瓶颈和潜力, 优化农业能源结构, 突破能源与环境双重约束, 进而有力有效地推进乡村全面振兴。概念辨析发现, 传统的农业能源效率测算结果实质是包含能源的农业生产效率。为科学合理地测算农业能源效率, 本文提出了一种基于三阶段数据包络分析 (DEA) 模型的改进计算方法, 并以中国 30 个省 (自治区、直辖市, 不包括香港、澳门、台湾和西藏) 的面板数据为样本进行测算, 对比原有方法的分析结果以验证改进方法的可靠性。结果表明: 1) 随机前沿 (SFA) 分析可知, 环境变量和随机因素对能源效率影响显著, 说明该方法能够剔除生产因素对农业能源效率的影响, 从而规避部分测算结果高于实际值的问题; 2) 与传统方法对比, 改进方法的估算结果与中国农业经济发展趋势更相符, 波动节点与相应政策出台时间更契合; 3) 传统方法的估算结果会受物价和成本影响, 与真实农业能源效率产生较大偏离, 其中北京、上海和青海最为明显。综上所述, 改进的三阶段 DEA 农业能源效率测算方法明显优于传统方法, 可为企业及政府在农业节能减排方面提供更加准确的决策依据。

关键词: 农业能源效率; 三阶段 DEA 模型; 环境因素; 方法改进

中图分类号: F323

Improvement of the method for calculating agricultural energy efficiency based on the three-stage Data Envelopment Analysis*

CHEN Yini¹, HU Shenghong¹, LU Weixing², ZHU Weiming², PAN Yukun², SHEN Yuzhuo^{1**}

(1. Institute of Scientific and Technical Information, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Key Laboratory of Applied Research on Tropical Crop Information Technology of Hainan Province, Haikou 570100, China; 2. Zhanjiang Zhongyue Energy Co., Ltd., Zhanjiang 524044, China)

Abstract: Energy is the basis for the development of modern society and an important guarantee for comfortable rural living and successful agricultural production. With industrialization and urbanization occurring rapidly in China, the demand for efficient energy in agricultural modernization will inevitably increase. In the face of increasingly severe global issues such as limited resources, environmental calamities, and food insecurity, accurate measurement is key to improving agricultural energy efficiency, facilitating users in identifying bottlenecks and potential in energy usage, optimizing the agricultural energy structure, and breaking through the dual constraints of energy and the environment, which in turn will effectively promote comprehensive rural revitalization.

* 广东能源集团有限公司 2022 年揭榜挂帅项目 (ZY-KJ-XNY-2022X132F) 资助

** 通信作者: 申玉琢, 主要研究方向为热带农业产业经济。E-mail: 183441385@qq.com

陈旖旎, 主要研究方向为热带农业产业经济。E-mail: 469041202@qq.com

收稿日期: 2024-02-05 接受日期: 2024-09-29

* This study was supported by the "2022 Open Competition Project" of Guangdong Energy Group Co., Ltd. (ZY-KJ-XNY-2022X132F).

** Corresponding author, E-mail: 183441385@qq.com

Received Feb. 5, 2024; accepted Sep. 29, 2024

Previous concept exploration has revealed the existence of a conceptual intersection between conventional agricultural energy efficiency and agricultural production efficiency, where the calculation output of the former is in fact the latter including energy. To scientifically and logically calculate agricultural energy efficiency, we proposed an improved algorithm based on a three-stage Data Envelopment Analysis (DEA) model. Based on the conventional one-stage calculation method, this algorithm applied a second-stage Stochastic Frontier Approach (SFA) and third-stage DEA analysis. Panel data from 30 provinces (municipalities and autonomous regions, not including Hong Kong, Macao, Taiwan and Xizang) in China were used as a sample to test the updated algorithm. The reliability of the model was tested by comparing its calculated results with those obtained using the conventional method. The following observations were made: 1) Outputs from the second-stage SFA showed that the likelihood-ratio (LR) values of all input slack variables were greater than 10.501 ($P < 1\%$). The impacts of environmental variables and random factors on energy efficiency were significant, indicating that the SFA analysis is necessary and effective and can eliminate the effect of production factors on agricultural energy efficiency, thereby avoiding the problem of some calculated results being higher than the observed values. 2) Compared with the gap of approximately 0.1 derived from the conventional method of calculating agricultural energy efficiency in the past 20 years, the final (third-stage) efficiency value from the improved model increased from 0.240 in 2003 to 0.541 in 2018, demonstrating that the estimated result was more appropriate for the trend in China's agricultural economy development. The fluctuation node was more consistent with the periods when the corresponding policies were introduced, such as the severe agricultural blow resulting from natural disasters at the end of the 20th century, the first China's No. 1 central document with the theme of "Agriculture, Rural Areas, and Farmers" issued in 2004, the international economic and financial crisis in 2008, and other important nodes. 3) The estimates from the conventional method were greatly biased from actual values owing to price and cost influences, especially in Beijing, Qinghai, and Shanghai, where the differences between the traditional and improved models were 0.95, 0.87, and 0.77, respectively. In summary, the improved three-stage DEA method for calculating agricultural energy efficiency is superior to the conventional method, and can provide a more accurate decision-making basis for enterprises and governments in the fields of agricultural energy conservation and emissions reduction.

Keywords: energy efficiency in agriculture; three-stage DEA model; environmental factor; method improvement

全球能源与自然资源日益趋紧的形势下,能源使用伴生的废气、废水和固废等污染物,不仅严重制约了环境可持续发展,也进一步加剧了粮食安全问题与粮食供需不平衡的矛盾。我国多次强调粮食安全,更是提出“强国必先强农,农强方能国强”的发展理念,二十大也明确将“加快建设农业强国”摆在建设社会主义现代化强国的重要位置^[1]。农业强国需要以绿色为鲜明底色,只有长期坚持绿色和高效的农业发展方针,提高能源利用效率,才能摆脱能源危机,有力有效地推进乡村全面振兴。

能源更多需要依附工具、设备、劳动力和资本才能转化使用,其效率测算不能忽略这些要素及其与能源间的替代作用^[2]。因此,考虑单要素指标存在明显不足,现阶段国内外学者多基于全要素的指标框架进行能源效率测算,Filippini等^[3]也从经济学角度解释并指出全要素能源效率比能源强度更适合衡量能效。具体到农业部门,国内侧重于农业能源效率的地区差异性、收敛性及其影响因素分析。栾义君等^[4]、冉启英等^[5-6]、杜辉等^[7]和郑祥生等^[8]分别通过构建数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)、至前沿最远距离(slack based measure, SBM)等模型,比较分析了中国各省(直辖市、自治区)近几十年的农业全要素能源效率。其结果表明,从区域层面看,东部地区、中部地区和西部地区的农业

全要素能源效率依次递减,区域差距有缩减趋势,且均表现出一定的收敛性。周辉等^[9]、冉启英等^[10]和李海鹏等^[11]分别从不同角度对农业全要素能源效率的影响因素进行了分析,发现农业科技水平、农民农村收入水平和地区农业占比等均对其具有促进作用,而财政政策、能源价格和受灾率等具有不利影响。此外,也有研究测算了全国或局部粮食主产区的农业能源效率,并取得类似结论^[12-13]。相较于国内,国外研究起步较早,目前更偏重于农业能源效率在实际生产中的运用。Eskandari等^[14]考察伊朗的农业能源效率与CO₂和SO₂排放之间的关系,以此作为环境污染和能源消费的标准;Talukder等^[15]利用能源利用效率和CO₂排放水平指标,评估、比较和确定孟加拉国沿海地区最节能的农业系统;Khan等^[16]采用随机前沿分析(stochastic frontier approach, SFA)和系统广义矩估计(system generalized method of moments, SGMM)方法评估技术创新对南亚农业部门农业能源效率的影响。

通过比较现有的研究成果发现,目前主要使用包含非期望产出的SBM、混合距离函数(epsilon-based measure, EBM)或者超效率SBM、EBM模型的数据包络分析方法测算农业能源效率,一方面能解决“松弛量”带来的影响效果,另一方面可以真实地反映污染物带来的治理成本^[10,17]。但是,农业能源效

率还受各种环境和随机因素的影响,若不妥善解决,当样本中存在着特殊点时,DEA方法所得的技术效率结果将与实际情况偏差较大。但目前还少有学者在农业能源效率测算时使用三阶段DEA的方法。因此,本文将对已有的农业能源效率测算模型进行改进,在运算时引入环境变量,以得到更加准确和真实的效率值。

1 材料与方法

1.1 农业能源效率改进模型

1.1.1 引入环境影响因子

在以往的研究成果中,所采用的DEA方法仅包含一个阶段,以基于报酬不变(constant returns to scale, CRS)假定下的SBM-DEA模型为例,其表达式如下:

$$\min \rho = \frac{1 - \frac{1}{a} \sum_{i=1}^a \frac{S_i^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{b+c} \left(\sum_{r=1}^b \frac{S_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{q=1}^c \frac{S_q^k}{y_{q0}^k} \right)} \quad (1)$$

$$s.t. \begin{cases} x_0 = X\lambda + S^- \\ y_0^g = Y^g\lambda - S^g \\ y_0^k = Y^k\lambda + S^k \\ S^- \geq 0, S^g \geq 0, S^k \geq 0 \end{cases}$$

式中: ρ 表示决策单元效率值, $\rho \in [0, 1]$, $\rho = 1$ 表明该评价单元有效且为强有效, $\rho < 1$ 表明该评价单元无效;下标0表示被评价单元; a 表示投入个数; b 表示期望产出个数; c 表示非期望产出个数; S_i^- 、 S_r^g 和 S_q^k 分别表示第 i 个投入、第 r 个期望产出和第 q 个非期望产出的松弛量; x_{i0} 、 y_{r0}^g 和 y_{q0}^k 分别表示被评价单元的第 i 个投入值、第 r 个期望产出和第 q 个非期望产出; λ 表示权重向量; X 、 Y^g 和 Y^k 分别表示投入值、期望产出值和非期望产出值的矩阵; x_0 、 y_0^g 和 y_0^k 分别表示投入值、期望产出值和非期望产出值的向量; S^- 、 S^g 和 S^k 分别表示投入、期望产出和非期望产出的松弛量的向量^[18]。

然而,一阶段的DEA模型不是针对管理效率的测度^[19],所测得的结果不能客观地反映农业能源效率的真实情况,并且产业在时间序列上均为规模可变的,因此使用目前主流的“三阶段DEA”方法是较为合适的^[20]。第一阶段输出的松弛变量指理想投入量与实际投入量之间的差额,分别由环境因素、管理无效率和统计噪声构成,可以反映初始阶段的低效率问题,需将其剔除以保证所有决策单元置于相同的外部环境中。

针对以上问题,考虑优化投入变量的分配以实现效率最大化,应选择投入导向模型(banker, charnes, and cooper, BCC)。因此,在一阶段模型的基础上,首先增加一个 $\sum_{i=1}^a \lambda_i = 1$ 的约束把规模报酬不变(CRS)转变为规模报酬可变(variable returns to scale, VRS);其次增加环境变量,即在第二阶段引入随机前沿分析(SFA)模型进行回归分析,其表达式如下:

$$s_{ij} = f(z_j; \beta^i) + v_{ij} + u_{ij} \quad (2)$$

式中: s_{ij} 表示第 j 项决策单元在第 i 项投入变量的松弛量; f 表示给定环境变量的生产函数; $f(z_j; \beta^i)$ 表示第 j 个决策单元中所有环境变量影响第 i 项投入的情况,且取 $f(z_j; \beta^i) = z_j \beta^i$,其中, z_j 为第 j 个决策单元所对应的环境向量, β^i 为对应参数向量; $v_{ij} + u_{ij}$ 表示混合误差项,且 v_{ij} 和 u_{ij} 相互独立;其中 $v_{ij} \sim N(0, \sigma_v^2)$ 表示随机误差项, σ_v^2 表示 v_{ij} 的方差, v_{ij} 表明第 j 个决策单元自身能控制的因素对第 i 项投入松弛变量的影响,值越大说明无效率水平越高; u_{ij} 表示第 j 个决策单元的第 i 项变量随机误差项,表明在效率测度中管理无效率的作用。

利用上述模型得出的回归结果调整各决策单元的投入项,调整方式如下:

$$x'_{ij} = x_{ij} + \{\max[f(z_j; \beta^i)] - f(z_j; \beta^i)\} + (\max v_{ij} - u_{ij}) \quad (3)$$

式中: x'_{ij} 和 x_{ij} 分别表示第 j 个决策单元调整后和调整前的第 i 项投入量; $\max[f(z_j; \beta^i)]$ 表示最差环境条件; $\max[f(z_j; \beta^i)] - f(z_j; \beta^i)$ 表示将所有环境变量调整为一致的环境状态,使得各决策单元所处的外部运营环境一致; $\max v_{ij} - u_{ij}$ 表示去除效率测度中的统计噪声,用于改善和优化随机因素。

1.1.2 把生产作为环境变量剔除的合理性

原有的能源效率与生产效率在概念上存在交叉,本质上是包含能源的生产效率。其中,能源效率概念经过多年各国专家学者的不断完善和丰富,在气候变化和环境污染等问题日益严峻的背景下,目前主要以多种投入要素、经济产出和环境约束为核心的全要素能源效率为主,其研究方法来源于微观经济学的全要素生产理论^[21-22]。根据其基本内涵也可认为,通过技术进步和优化资源配置等路径,实现经济期望产出最大化和环境非期望产出最小化,进而达到“能源—经济—环境”的共赢局面。农业全要素生产率是指在农业生产活动过程中多种投入要素与产出要素的综合利用程度,即与经济学类似的原理,反映投入与产出是否达到理想状态^[23-24],可分解为土

地产出率、农业劳动生产率、技术效率以及成本利润率等多种指标^[25-26]。通过对比两种效率的概念界定和方法可知,农业能源作为一种生产要素,通常与资本、劳动和土地等其他要素共同参与农业生产过程,两者之间有大部分重复之处,原有方法本质上只是新增了能源要素投入变量的生产效率测算。如果需要测算农业能源与产出的关系,又要考虑和其他要素间的替代作用,首要剔除的是农业生产效率的影响,其核心是技术水平的差异。另外,考虑中国农业的弱质性和“靠天吃饭”的特殊性,需要将自然因素和政策因素作为生产相关指标进行剔除。

综上,经过一系列的概念辨析,可以将本研究中的农业能源效率理解为剔除生产因素后,环境约束下包含非期望产出框架下的农业能源经济效率和农业环境效率相结合的综合效率^[27]。

1.1.3 改进后的三阶段 DEA 方法步骤

1) 第一阶段:构建 DEA-SBM 模型分析初始效率。使用 SBM 模型对被评价决策单元进行 DEA 分析,得到初始效率值和投入松弛变量。

2) 第二阶段:利用 SFA 模型剔除环境因素影响。通过构建 SFA 模型,将第一阶段得到的投入松弛变量进行回归分析,分解成环境因素、管理无效率和统计噪声 3 种效应,并得到调整后的投入变量。

3) 第三阶段:调整后的投入-产出变量的 DEA 效率分析。用调整后的投入替换原始投入,再次运行

第一阶段 DEA-SBM 模型,所得到的测算结果即为最终的效率值。

1.2 指标体系构建与数据来源

按照 DEA 三阶段理论,秉承着“代表性、科学性、系统性和可取性”的效率评估指标选取特点^[28],构建农业能源效率评价指标体系。农业能源效率一般分为投入、产出和环境 3 类指标。在农业生产中,生产者可以直接掌握土地、劳动力、机械、化肥和灌溉等生产要素^[29],因此本文投入变量选取能源、农用机械、劳动力、土地和资本 5 个方面。通常,在能源投入指标选取上只涉及柴油、电力和原煤等的直接能源,即狭义的能量投入。但考虑到部分省(直辖市、自治区)仍存在较为规模的传统农业,直接能源还应包括由人力和畜力组成的生物能量投入(人力部分投入已用劳动力进行量化,本文不再进行二次累加),即依靠人和役畜通过选种、耕作、施肥与防治病虫害等措施,使农作物将太阳能转化为可供人类利用的生物能。因此,广义的能源投入应为以上直接能源、农药与化肥等生产资料所消耗间接能源的组合。产出变量除期望产出外,还将造成环境污染的农业碳排放作为非期望产出。环境变量主要剔除生产因素,因此选取了农业技术水平、财政农业支出和受灾率 3 项指标。具体的评价指标体系如表 1 所示。

本文以广义农业(农林牧渔业)为研究对象,使

表 1 农业能源效率评价指标体系
Table 1 Evaluation index system of agricultural energy efficiency

变量类型 Variable type		指标名称 Index name
投入变量 Input variable	能源投入 Energy input	直接能源投入 Direct energy input /MJ
		间接能源投入 Indirect energy input /MJ
		机械投入 Machinery input /($\times 10^4$ kW)
		劳动力投入 Labor input /($\times 10^4$ person)
		土地投入 Land input /($\times 10^3$ hm ²)
		资本投入 Capital input /($\times 10^8$ 元)
	产出变量 Output variable	期望产出 Desirable output /($\times 10^8$ 元)
		非期望产出 Undesirable output /($\times 10^4$ t)
		农业技术水平 Agricultural technique level /%
	环境变量 Environment variable	财政农业支出 Fiscal expenditures on agriculture /%
受灾率 Disaster rate /%		
	农业能源终端消费量 Total final consumption of primary industry	
	农业畜力能量投入量 Input of animal energy input for agriculture production	
	农药能量投入量 Input of pesticide energy for agriculture production	
	农用化肥能量投入量 Input of fertilizer energy for agriculture production	
	农用塑料薄膜能量投入量 Input of agricultural plastic film energy for agriculture production	
	农业机械总动力 Total power of agricultural machinery	
	农业劳动力 Labor for agriculture production	
	农作物总播种面积 Total sown area of crops	
	农业资本存量 Agricultural capital stock	
	农业总产值 Total agricultural output value	
	农业碳排放量 Agricultural carbon emissions	
	研究与试验发展中农业技术人员占农业劳动力比例 Proportion of the agricultural R&D staffs to total labor for agriculture production	
	农林水事务支出占一般公共预算支出比例 Proportion of the budgetary expenditure for agriculture, forestry and water conservancy to public budgetary expenditure	
	受灾面积占农作物总播种面积比例 Proportion of the disaster-affected area to the total sown area of crops	

用 2002—2021 年中国各省份(直辖市、自治区)关于农业投入与产出的面板数据(限于数据可得性, 本文研究区域不包括西藏、香港、澳门及台湾等地区)。以下为数据的来源与统计方法。

1) 投入变量

能源投入: 根据表 1 的指标分类, 需要先统计各项能源的实际消耗量, 参考李楠^[30]总结的能量折标值(表 2)计算各项能源的等效能量值。其中, 农业能

源终端消费量数据来自《中国能源统计年鉴》各地区能源平衡表(实物量)“农林牧渔业终端消费量”的各项能量折算总和; 畜力能源投入量参考公式计算: 畜力能源投入=役畜数量×年均工作时间×折标值^[11], 役畜数量来源于《中国畜牧兽医年鉴》和《中国农业年鉴》, 参考已有研究按年均工作时间 360 h·a⁻¹^[31-32]计算。间接能源的农药、农用化肥和农用塑料薄膜使用量均来源于《中国农村统计年鉴》。

表 2 广义农业能源投入能量折标值
Table 2 Equivalent energy values for the input of energy in broad sense of agriculture

种类 Category		能量折标值 Equivalent energy value
农业生物能量投入 Agricultural input of biological energy	畜力 Animal energy/(MJ·h ⁻¹)	4.50
农业化学能量投入 Agricultural input of chemical energy	农用化肥 Agricultural fertilizer/(MJ·kg ⁻¹)	
	氮肥 Nitrogen fertilizer	64.40
	磷肥 Phosphate fertilizer	11.96
	钾肥 Potash fertilizer	6.70
	复合肥 Compound fertilizer	28.05
	农药 Pesticide/(MJ·kg ⁻¹)	208.00
	农用塑料薄膜 Agricultural plastic film/(MJ·kg ⁻¹)	46.89

机械投入: 由于不同类型机械设备存在能耗差异, 农业机械拥有量不能客观地反映各地区农业机械投入程度, 因此采用农业机械总动力(即全部农业机械动力的额定功率之和)衡量更为准确; 相关数据来源于《中国统计年鉴》。

劳动力投入: 农业劳动力投入采用各省(直辖市、自治区)农业就业人口数量表示, 数据来源于各省统计年鉴和《中国人口和就业统计年鉴》。

土地投入: 农业土地投入采用各省(直辖市、自治区)农作物总播种面积表示, 数据来源于《中国统计年鉴》和《中国农村统计年鉴》。

资本投入: 采用永续盘存法(PIM), 将宗振利等^[33]和王金田等^[34]的估算值分别作为 2002 年农业资本存量和折旧率(考虑数据可得性, 假设重置率=折旧率^[35]), 采用公式(4)将其更新至 2021 年, 再转化成以 2002 年为基期的不变价确保口径一致; 相关数据来源于《中国固定资产投资统计年鉴》和《中国投资领域统计年鉴》。

$$K_{in} = (1 - \delta) K_{i(n-1)} + I_{in} \quad (4)$$

式中: K_{in} 表示第 i 省(直辖市、自治区)第 n 年的农业资本存量; δ 表示折旧率(重置率); I_{in} 表示第 i 省(直辖市、自治区)第 n 年的农业固定资产投资。

2) 产出变量

期望产出: 采用农业总产值表示, 数据来源于《中国统计年鉴》。

非期望产出: 采用农业碳排放量表示, 参考丁宝

根等^[36]对农业碳排放的计算方法, 见下式:

$$C = \sum C_{it} = \sum T_{it} \times \delta_i \quad (5)$$

式中: C 表示各省(直辖市、自治区)每年的农业碳排放量; C_{it} 表示各省(直辖市、自治区)第 i 类农业碳排放源在第 t 年的碳排放量; T_{it} 表示各省(直辖市、自治区)第 i 类农业碳排放源在第 t 年的投入量; δ_i 表示第 i 类碳源对应的碳排放系数。参考李波等^[37]、段华平等^[38]和马涛^[39]的研究成果, 柴油、农用化肥、农药、农用塑料薄膜、灌溉和翻耕的碳排放系数分别为 0.59 kg·kg⁻¹、0.89 kg·kg⁻¹、4.93 kg·kg⁻¹、5.18 kg·kg⁻¹、266.48 kg·hm⁻² 和 312.60 kg·km⁻²; 畜牧业相关的碳排放系数参考 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories 的推荐值。

3) 环境变量

农业技术水平: 该指标衡量了各地区农业在科技方面的投入水平, 但由于各地区农业科技研发投入数据尚不可得, 本文参考冉启英等^[10]和陈振等^[40]的研究方法, 采用各地区研究与试验发展(research and experimental development, R&D)中农业技术人员数量占农业劳动力的比重来表示农业技术水平, 其中农业技术人员=R&D 人员数×(农业总产值/生产总值), 数据来源于《中国科技统计年鉴》。

财政农业支出: 该指标衡量了政府对各地区农业农村发展的政策支持强度, 采用各省(直辖市、自治区)农林水事务支出与一般公共预算支出比例来

衡量^[41]。样本期内国内财政支出口径发生了变化^[42],故 2002—2006 年涉农支出以《中国区域经济统计年鉴》中的支农支出来衡量,2007—2021 年涉农支出以《中国统计年鉴》中的农林水事务支出来衡量。

受灾率:该指标采用各省(直辖市、自治区)农业受灾面积占农作物总播种面积比例来衡量,数据来源于《中国农村统计年鉴》。

2 结果与分析

2.1 改进模型计算结果

2.1.1 第一阶段 SBM-DEA 模型分析结果

本文运用 MAXDEA 软件,对中国 30 个省(直辖市、自治区,不包括中国香港、澳门、台湾和西藏)2002—2021 年农业能源效率进行了测算。第一阶段

结果如表 3 所示,篇幅有限仅列出部分年份数据。由表 3 可知,平均农业能源效率超过 0.9 的仅 4 个省(直辖市、自治区),分别是新疆、上海、海南和福建;而均值低于 0.5 的有 9 个省(直辖市、自治区),其中山西最低,仅 0.332;样本期内有 12 个省(直辖市、自治区)超过了全国均值。

2.1.2 第二阶段 SFA 回归结果

将第一阶段得到的投入松弛变量作为被解释变量,环境变量作为解释变量,使用 Frontier 4.1 软件进行 SFA 回归,得到结果如表 4 所示。由表 4 可知,5 个投入松弛变量均通过了 LR 在 1% 水平的显著性检验,表明拒绝了管理无效率不存在的假设,说明管理无效率对 5 种投入均有影响,且第二阶段的 SFA 分析是必要的^[44]。其中,财政农业支出对除劳动力投

表 3 2002—2021 年中国 30 个省(直辖市、自治区,不包括香港、澳门、台湾和西藏)第一阶段农业能源效率
Table 3 Agricultural energy efficiencies of 30 provinces (municipalities and autonomous regions, excluding Hong Kong, Macao, Taiwan and Xizang) of China based on the first-stage model from 2002 to 2021

省(直辖市、自治区) Province (municipality, autonomous region)	2002	2007	2012	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	均值 Mean	排序 Rank
北京 Beijing	1.000	0.689	0.605	0.660	0.695	0.741	0.892	1.000	1.000	0.640	0.757	9
天津 Tianjin	0.820	1.000	0.413	0.420	0.435	0.420	0.415	0.421	0.505	0.526	0.567	18
河北 Hebei	1.000	0.750	0.478	0.445	0.438	0.431	0.492	0.500	0.617	0.636	0.614	13
山西 Shanxi	0.372	0.351	0.293	0.250	0.277	0.311	0.317	0.332	0.415	0.447	0.332	30
内蒙古 Inner Mongolia	0.800	0.469	0.440	0.425	0.428	0.392	0.483	0.502	0.588	0.657	0.498	23
辽宁 Liaoning	1.000	0.646	0.615	0.611	0.618	0.606	0.618	0.632	0.653	0.672	0.669	10
吉林 Jilin	1.000	0.571	0.531	0.481	0.452	0.421	0.451	0.485	0.535	0.544	0.567	17
黑龙江 Heilongjiang	0.589	0.451	0.515	0.556	0.544	0.533	0.532	0.589	0.594	0.599	0.523	20
上海 Shanghai	1.000	0.941	0.913	0.868	1.000	0.877	0.913	0.877	1.000	0.768	0.939	2
江苏 Jiangsu	1.000	0.845	1.000	0.827	0.786	0.766	0.752	0.767	0.796	0.815	0.857	7
浙江 Zhejiang	0.744	1.000	1.000	0.806	0.767	1.000	0.970	0.883	1.000	1.000	0.876	6
安徽 Anhui	0.644	0.546	0.511	0.479	0.469	0.475	0.465	0.493	0.583	0.597	0.526	19
福建 Fujian	1.000	0.915	0.809	0.869	1.000	1.000	0.983	1.000	1.000	1.000	0.910	4
江西 Jiangxi	0.773	0.569	0.495	0.544	0.552	0.536	0.530	0.560	0.680	0.715	0.569	16
山东 Shandong	1.000	0.627	0.623	0.565	0.561	0.547	0.578	0.575	0.616	0.694	0.648	11
河南 Henan	0.672	0.542	0.457	0.422	0.429	0.417	0.423	0.435	0.595	0.608	0.499	22
湖北 Hubei	1.000	0.619	0.554	0.512	0.538	0.534	0.527	0.535	0.587	0.623	0.597	15
湖南 Hunan	0.757	0.591	0.466	0.391	0.385	0.379	0.374	0.405	0.509	0.505	0.501	21
广东 Guangdong	1.000	0.865	0.714	0.673	0.711	0.707	0.692	0.716	0.812	0.864	0.777	8
广西 Guangxi	1.000	0.670	0.587	0.520	0.525	0.521	0.529	0.572	0.626	0.661	0.634	12
海南 Hainan	1.000	0.870	0.879	1.000	0.964	1.000	0.967	1.000	1.000	1.000	0.939	3
重庆 Chongqing	0.679	0.416	0.353	0.429	0.488	0.467	0.475	0.497	0.552	0.563	0.453	27
四川 Sichuan	1.000	0.680	0.584	0.551	0.552	0.529	0.613	0.523	0.616	0.592	0.614	14
贵州 Guizhou	0.384	0.356	0.464	0.488	0.472	0.428	0.397	0.402	0.484	0.474	0.420	28
云南 Yunnan	0.459	0.496	0.496	0.455	0.456	0.455	0.472	0.517	0.567	0.586	0.476	26
陕西 Shaanxi	0.485	0.494	0.489	0.477	0.505	0.506	0.514	0.533	0.580	0.584	0.494	24
甘肃 Gansu	0.533	0.449	0.367	0.370	0.389	0.405	0.428	0.454	0.497	0.550	0.416	29
青海 Qinghai	1.000	1.000	0.821	0.752	0.706	0.803	0.788	0.827	1.000	1.000	0.878	5
宁夏 Ningxia	1.000	0.368	0.410	0.490	0.440	0.445	0.480	0.482	0.737	0.778	0.483	25
新疆 Xinjiang	1.000	0.929	0.812	0.954	0.847	0.826	0.919	1.000	1.000	1.000	0.947	1
平均 Average	0.824	0.657	0.590	0.576	0.581	0.583	0.600	0.617	0.691	0.690	0.633	—

表 4 第二阶段 SFA 回归分析结果
Table 4 Regression results of SFA on the second-stage model

投入松弛变量 Input slack variable	常数 Constant	农业技术水平 Agricultural technique level	财政农业支出 Fiscal expenditures on agriculture	受灾率 Disaster rate	σ^2	γ	LR 单边检验 LR one-sided test
能源投入 Energy input	2.843 5×10 ^{7***}	-5.212 2×10 ^{6***}	-3.370 3×10 ^{6***}	2.005 7×10 ^{7***}	1.221 4×10 ¹⁵	0.368 3	46.35
机械投入 Machinery input	4.512 6×10 ^{3***}	-1.201 2×10 ^{5***}	-1.466 1×10 ^{3***}	-2.563 5×10 ^{3***}	6.033 7×10 ⁶	0.870 3	579.16
劳动力投入 Labor input	9.793 8×10 ^{2***}	-4.202 6×10 ^{4***}	-3.217 7×10 ²	-1.344 4×10 ^{2**}	1.252 5×10 ⁵	0.786 1	395.09
土地投入 Land input	6.192 1×10 ^{3***}	-1.151 2×10 ^{5***}	-3.647 1×10 ^{3***}	-1.576 7×10 ^{3***}	8.243 2×10 ⁶	0.879 2	590.60
资本投入 Capital input	6.916 1×10 ^{3***}	1.636 2×10 ^{3***}	-5.749 2×10 ^{3***}	-6.822 9×10 ^{3***}	9.337 5×10 ⁶	0.297 7	43.08

LR 为单边广义似然比统计量, 在 1% 显著性水平下的临界值为 10.501^[43]。** 和 *** 表示在 P<5% 和 P<1% 水平显著相关。LR is the one-sided generalized likelihood ratio statistic with a critical value of 10.501^[43] at 1% significance level. ** and *** represent significant correlations at P<5% and P<1% levels, respectively.

入外的 4 项投入指标均有显著的负向影响, 说明该指标的增加会促使能源、机械、土地和资本的有效利用, 进而提高农业能源效率^[45]; 农业技术水平对资本投入有正向影响, 其余为负向影响; 受灾率对能源

投入有正向影响, 其余为负向影响。

2.1.3 第三阶段 SBM-DEA 模型分析结果

将调整后的投入变量再次进行 DEA 分析, 得到最终的农业能源效率及排名 (表 5)。由表 5 可知, 平

表 5 2002—2021 年中国 30 个省 (直辖市、自治区, 不包括香港、澳门、台湾和西藏) 第三阶段农业能源效率
Table 5 Agricultural energy efficiencies of 30 provinces (municipalities and autonomous regions, excluding Hong Kong, Macao, Taiwan and Xizang) of China based on the third-stage model from 2002 to 2021

省(直辖市、自治区) Province (municipality, autonomous region)	2002	2007	2012	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	均值 Mean	排序 Rank
北京 Beijing	0.055	0.060	0.073	0.063	0.058	0.052	0.047	0.043	0.041	0.042	0.059	30
天津 Tianjin	0.048	0.060	0.077	0.083	0.086	0.080	0.073	0.074	0.079	0.081	0.072	27
河北 Hebei	0.303	0.608	0.650	0.680	0.706	0.704	0.755	0.764	0.797	0.803	0.650	4
山西 Shanxi	0.088	0.139	0.250	0.267	0.266	0.273	0.276	0.292	0.327	0.347	0.215	24
内蒙古 Inner Mongolia	0.135	0.266	0.424	0.446	0.449	0.442	0.492	0.515	0.545	0.591	0.367	18
辽宁 Liaoning	0.230	0.381	0.536	0.565	0.545	0.540	0.550	0.568	0.581	0.599	0.463	12
吉林 Jilin	0.151	0.276	0.401	0.411	0.394	0.380	0.400	0.433	0.490	0.494	0.343	20
黑龙江 Heilongjiang	0.166	0.297	0.602	0.671	0.668	0.678	0.683	0.706	0.730	0.742	0.498	10
上海 Shanghai	0.060	0.064	0.072	0.069	0.065	0.064	0.062	0.060	0.058	0.050	0.064	28
江苏 Jiangsu	0.346	0.540	0.708	0.847	0.884	0.882	0.877	0.890	0.887	0.906	0.678	3
浙江 Zhejiang	0.239	0.300	0.430	0.458	0.471	0.476	0.480	0.491	0.509	0.511	0.393	16
安徽 Anhui	0.248	0.364	0.534	0.631	0.639	0.664	0.663	0.700	0.730	0.751	0.508	8
福建 Fujian	0.227	0.324	0.461	0.503	0.511	0.514	0.516	0.517	0.524	0.523	0.411	15
江西 Jiangxi	0.178	0.280	0.402	0.467	0.485	0.485	0.485	0.499	0.500	0.506	0.371	17
山东 Shandong	0.661	1.000	1.000	1.000	1.000	0.980	1.000	0.984	1.000	1.000	0.981	1
河南 Henan	0.483	0.813	0.929	1.000	1.000	0.947	0.950	0.931	1.000	1.000	0.882	2
湖北 Hubei	0.231	0.406	0.643	0.667	0.709	0.725	0.724	0.737	0.776	1.000	0.571	7
湖南 Hunan	0.248	0.407	0.533	0.569	0.589	0.596	0.602	0.649	0.748	0.737	0.507	9
广东 Guangdong	0.306	0.447	0.608	0.683	0.713	0.728	0.712	0.782	1.000	1.000	0.600	6
广西 Guangxi	0.183	0.351	0.542	0.606	0.634	0.644	0.661	0.687	0.706	0.722	0.489	11
海南 Hainan	0.085	0.125	0.198	0.229	0.233	0.235	0.231	0.233	0.232	0.238	0.177	25
重庆 Chongqing	0.109	0.162	0.250	0.290	0.318	0.316	0.326	0.333	0.358	0.367	0.235	22
四川 Sichuan	0.280	0.486	0.685	0.752	0.780	0.773	0.774	0.882	1.000	1.000	0.635	5
贵州 Guizhou	0.104	0.141	0.275	0.383	0.400	0.403	0.403	0.406	0.426	0.406	0.261	21
云南 Yunnan	0.162	0.279	0.435	0.528	0.559	0.577	0.583	0.641	0.691	0.713	0.416	14
陕西 Shaanxi	0.121	0.215	0.402	0.466	0.483	0.491	0.506	0.523	0.548	0.562	0.352	19
甘肃 Gansu	0.089	0.158	0.239	0.292	0.301	0.317	0.333	0.363	0.389	0.430	0.234	23
青海 Qinghai	0.020	0.035	0.067	0.077	0.081	0.086	0.092	0.097	0.108	0.110	0.062	29
宁夏 Ningxia	0.027	0.051	0.097	0.115	0.117	0.120	0.129	0.131	0.149	0.156	0.088	26
新疆 Xinjiang	0.132	0.241	0.461	0.564	0.581	0.590	0.631	0.656	0.686	0.749	0.422	13
平均 Average	0.203	0.332	0.460	0.514	0.531	0.533	0.541	0.565	0.614	0.637	0.432	—

均农业能源效率超过 0.9 的仅有山东, 共 12 个省(自治区)超过了全国均值; 效率低于 0.5 的有 21 个省(直辖市、自治区), 其中青海、宁夏、北京和天津的效率甚至低于 0.1, 说明中国的农业能源效率整体水平偏低。

2.2 改进模型结果对比分析

2.2.1 改进模型第一阶段与第三阶段结果对比

1) 从整体趋势上看, 全国平均农业能源效率第

一阶段呈现先降后升的“U 型”发展状态, 而第三阶段呈现持续上升的变化趋势, 并且后者效率整体低于前者。从图 1 可知, 样本期间的第一阶段全国平均农业能源效率从 2002 年的 0.824 下降到 2021 年的 0.690; 其中, 效率值在 2002—2009 年波动性下降, 之后一直在 0.58 左右徘徊, 直到 2017 年开始稳步提升。而第三阶段的全国平均农业能源效率从 2002 年的 0.203 一直较为稳定地上升到 2021 年的 0.637。

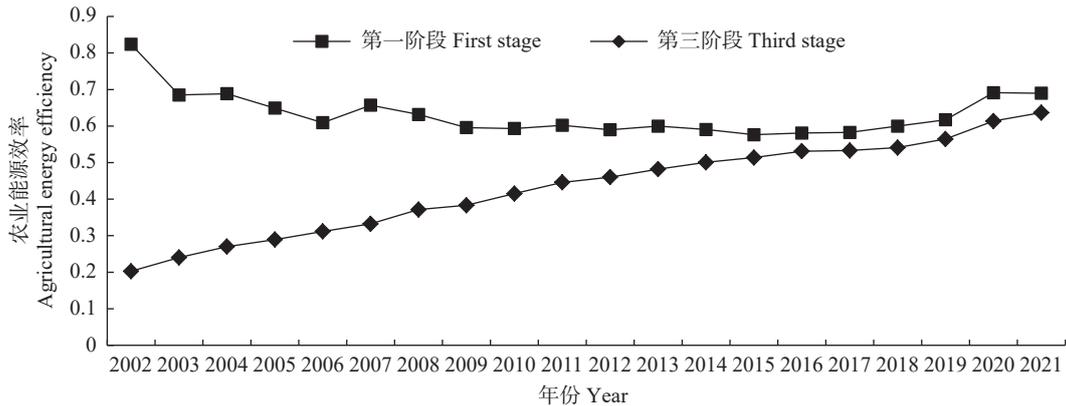


图 1 改进模型 (第三阶段) 的 2002—2021 年中国农业能源效率均值趋势

Fig. 1 Trends of average agricultural energy efficiencies of China based on the improved model (third stage) from 2002 to 2021

中国近 20 年的农业农村经济发展变化与第三阶段的整体变化趋势更为相符。在 21 世纪初期, 落后的生产技术和盲目追求农业产值造成农业生态环境恶化, 尤其 20 世纪末特大水灾对中国农业和农民带来致命性打击且需要长期的恢复工作, 因此这一阶段农业能源效率低迷。此后, 国家开始加大对农业的重视, 先后出台了一系列支农惠农政策。2003 年的中央农村工作会议上将“三农”问题作为政府工作重点, 2004 年出台了第一个以“三农”为主题的“中央一号文件”, 2006 年国家全面取消农业税, 以上均较大程度地激发了农民的积极性以及对农业的投资, 使得短期内农业各基本生产要素投入迅速增加, 有利于能源效率的提高; 2005 年中国因加入 WTO 而受到国际农产品的冲击, 2008 年又受到了国际金融危机的影响, 因此之后的效率变化迎来一小段平缓期。2010 年开始, 中央一号文件、中央经济工作会议及中央农村工作会议多次阐明要进一步增加农业农村设施建设方面的投入, 重点支持农村“水电路气房”等民生工程和农业基础设施和服务体系建设, 财政涉农资金投入的不断增加使农业技术和农业综合生产能力得到了极大地提升; 国家经济增长方式逐步向“低投入、低消耗、高产出”转变, 并带动农业模式从粗放型向集约型升级, 加快了现代化农业建设步伐,

促使农业能源效率持续稳步上升。

2) 从省(直辖市、自治区)差异上看, 大部分省份的第三阶段农业能源效率均有所降低。通过对比表 3 和表 5 可知, 上海第一阶段和第三阶段效率均值差异最大, 整体下降 0.875, 排名下降 26 名; 海南的效率均值下降 0.762, 排名下降 22 名; 北京的效率均值下降 0.698, 排名下降 21 名。究其原因, 主要是这 3 个省(直辖市)具备较为先进的农业技术水平或者科学的农业发展政策, 在第一阶段受到了有利的外部环境和随机干扰的影响^[46], 因此在剔除环境因素后效率降低很多。

2.2.2 改进模型与传统模型结果对比

1) 从整体趋势上看, 两种模型的变化趋势大致相同, 但改进模型的效率均值低于传统模型(图 2)。从图中可以看出, 两种模型计算结果均呈上升的变化趋势, 但是传统模型的效率值普遍高于改进模型 0.25 左右。这是因为后者在第二阶段剔除生产因素后, 失去了良好外部环境的加持。前文关于发展阶段的分析表明, 2012 年后国家出台利好政策且经济发展态势较好, 所以相比传统模型效率值在该阶段呈下降趋势, 改进模型更贴近于实际发展水平。

2) 从省(直辖市、自治区)差异上看, 改进模型中北京和上海 2 个东部直辖市以及西部地区的青海

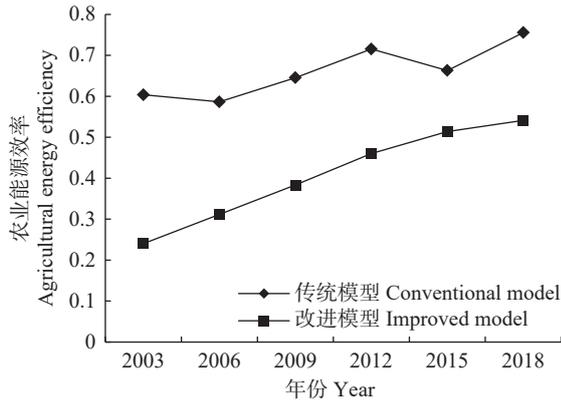


图 2 两种模型的中国农业能源效率均值趋势 (传统模型数据来自文献 [8])

Fig. 2 Trends of average agricultural energy efficiencies of China based on two models (the data of the conventional model is from the reference [8])

农业能源效率明显低于传统模型, 并且相对于其他省 (直辖市、自治区) 距离前沿面位置较远。根据郑祥生等^[8]的研究成果, 2018 年传统模型的北京、青海和上海的平均农业能源效率分别为 1.00、0.96 和 0.83, 与本文改进模型所得最终效率分别相差 0.95、0.87 和 0.77, 说明这 3 个省 (直辖市) 的农业能源效率

被明显高估, 也间接证明其农业生产效率很高, 即单位产出的价格较高。由表 6 可知, 北京、上海和青海的大部分农产品价格均高于全国水平, 这也较好地证明了改进模型的效率与实际情况更相符。

3 讨论和结论

3.1 讨论

3.1.1 农业能源效率变化特征

由表 5 可知, 2002—2021 年期间, 除上海和北京外, 其余省 (直辖市、自治区) 的农业能源效率均有一定提升, 说明中国大部分省 (直辖市、自治区) 在农业技术发展逐渐成熟的同时, 节能减排意识和水平日益增强, 符合中国农业和能源的发展趋势。

以表 5 中 2002—2021 年农业能源效率变化较大的省 (直辖市、自治区) 为典型案例, 列出逐年农业能源效率, 分析年际间效率变化 (图 3)。河北省在 2003—2006 年呈短时间大幅上升又下降的趋势, 这是因为 2004 年河北省印发了《农业和粮食企业 [个人] 税收优惠政策措施》, 同年还发布《河北省发展千万吨奶工程实施规划》对现有龙头加工企业

表 6 2018 年中国部分省和直辖市的农产品零售价格

Table 6 Retail prices of agricultural products in selected province and municipalities of China in 2018 $\text{¥}\cdot\text{kg}^{-1}$

地区 Area	粳米 Rice	猪肉 Pork	牛肉 Beef	羊肉 Mutton	水产品 Aquatic product	蔬菜 Vegetable	鸡蛋 Egg
北京 Beijing	6.04	30.45	66.41	73.43	—	6.25	9.57
上海 Shanghai	—	27.96	—	—	36.50	7.82	12.00
天津 Tianjin	—	28.02	59.66	69.05	19.04	6.16	8.69
青海 Qinghai	6.54	27.01	57.87	56.39	50.39	6.19	10.61
平均 Average	5.56	21.90	64.30	63.64	17.33	6.12	10.10

全国平均数据来源于 2019 年的《中国农产品价格调查年鉴》, 北京数据来源于北京市价格监测中心, 上海数据来源于上海市农业委员会信息中心, 青海数据来源于青海省发展和改革委员会。The national averages are derived from *China Yearbook of Agricultural Price Survey* in 2019; the Beijing data are derived from the Beijing Price Monitoring Center; the Shanghai data are derived from the Information Center of the Shanghai Municipal Agriculture Commission; and the Qinghai data are derived from the Development and Reform Commission of QingHai Province.

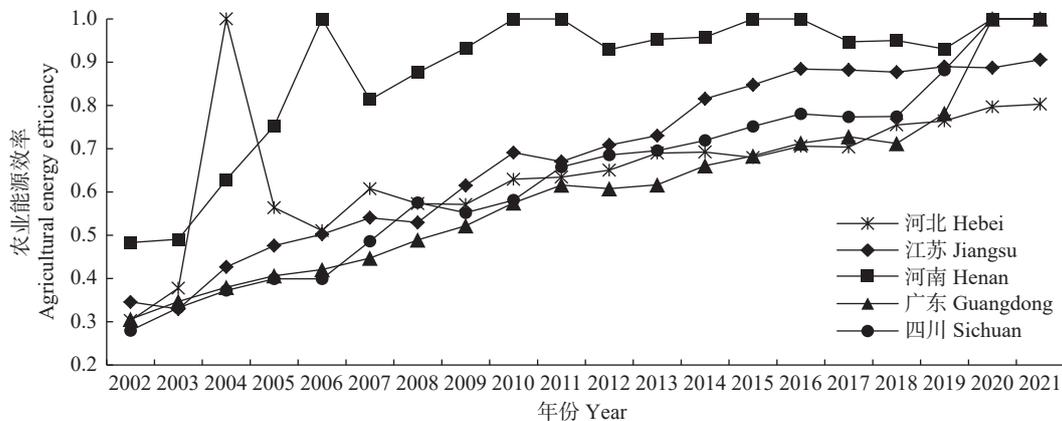


图 3 基于改进模型测算的 2002—2021 年 5 省农业能源效率均值

Fig. 3 Average agricultural energy efficiencies of 5 provinces in China based on the improved model from 2002 to 2021

民和相关企业的负担^[13],导致其选择成本稍高而污染较小的能源,进而提高了农业能源效率;但由于能源的投入需要大量资本,所以只能维持短暂的提升转而大幅下降。同样因为农业税改革,2004年开始,河南省、江苏省和四川省的农业能源效率也得到了提升,直到2008—2010年受全球经济危机影响,能源效率或提升降速或小幅度下跌。之后,2012年的《河南省循环经济发展“十二五”规划》中提出,大力促进节能减排,其农业能源效率又逐步回升;尽管江苏省于2016年开始出台了一系列政策,例如《省政府办公厅关于加快转变农业发展方式的实施意见》《江苏省“十三五”现代农业发展规划》等,提出“建设资源节约型、环境友好型农业”理念,但农业能源效率变动趋于平缓,说明资源—环境双重约束和“高集约度、高附加值、高外向性”的生产方式对农业发展的影响以一次性“水平效应为主”,而“增长效应”有限^[10];不同于江苏省,广东省在实施乡村振兴战略开局之年的2018年前后出台了《广东省推进农业供给侧结构性改革实施方案》《中共广东省委广东省人民政府关于全面推进乡村振兴加快农业农村现代化的实施意见》和《广东省人力资源和社会保障厅关于贯彻实施乡村振兴战略的行动计划》,四川省在“十三五”期间出台了《推进农业供给侧结构性改革加快四川农业创新绿色发展行动方案》《四川省“十三五”农业和农村经济发展规划》和《四川省乡村振兴战略规划(2018—2022年)》,农业能源效率均得到了稳步提升,说明这两个省份把握住了持续深化农牧业供给侧改革带来的能源消费结构优化利好。

3.1.2 农业发展的政策启示

1) “因地制宜”实施发展战略。通过对全国30个省(自治区、直辖市,不包括中国香港、澳门、台湾和西藏)的农业能源效率进行改进计算发现,北京、上海和天津等直辖市的效率值特别低,表明其生产高效但节能潜力巨大,机械化的提升以及农业科技进步并不等同于能源高效利用,相较于其他省(直辖市、自治区),这些直辖市使用了大量能源代替劳动和资本等要素,因此需要加大高效清洁能源在其农业生产中的投入力度。而对于青海等西部偏远省份(自治区),由于地理位置和经济条件的限制,各项农业基础设施建设始终较为落后,当地可以技术创新和产业升级为抓手,推动现代运输、仓储和冷链等专业设施建设,逐步改变仍以传统种养业为主和生产经营方式落后的局面;或合理调整产业布局,

发挥当地资源优势,加快农产品加工业发展,增加产品附加值,从而提高农业经济效益。

2) “融合互惠”协调三产关系。在我国经济高质量发展背景下,中国逐渐走向“农村一二三产业融合发展”道路,即“农业生产+农产品加工业+农产品市场服务业”。从绿色环保角度出发,三产不应只融合,还应做到循环,即利用先进工业技术将三产所产生的污染或废弃物处理再利用,尽量减少能源消耗和污染排放。各省(直辖市、自治区)可以大力发展绿色种养业、乡村特色产业和休闲观光农业等新业态新动能,加大对清洁能源项目的开发,例如屋顶铺设太阳能板、部分种植和养殖用地架设光伏设备,推动农村发展生物质能,以促进当地节能减排工作的有效推进。

3.1.3 改良方法的适用性

本文所测算的农业能源效率剔除了与生产有关的因素,可用于反映纯能源的利用效率。首先,能源效率指标是衡量一个系统能源使用的最有效方式,可用于帮助政府农业部门、农投公司和私人企业更好地管理和优化能源消耗与需求,并以此提供农业生产中的最佳节能效果方案。其次,能源效率是一个涵盖性指标,可以帮助相关部门优先考虑改进能源使用中涉及费用和环境影响的问题。最后,能源效率指标的最终目的是降低能源消耗,可帮助政府制定适当的能源政策,从而有效地实现节能减排和环境保护,并进一步实现可持续发展目标。

3.2 结论

本文对以往的农业能源效率测算方法进行了深度剖析,在能源效率和生产效率概念辨析的基础上,重新构建了农业能源效率评价指标体系,并提出了改进的估算方法,即采用DEA三阶段方法,对中国30个省(直辖市、自治区)2002—2021年的农业能源效率进行测度和分析,主要结论如下:

1) 第二阶段的随机前沿(SFA)分析能有效剔除环境变量和随机因素对能源效率的显著影响,从而规避部分测算结果高于实际值的问题。综合来看,全国效率均值由第一阶段的0.633降为第三阶段的0.432,不同省(直辖市、自治区)的测算结果也存在明显差异。

2) 与传统方法对比,改进方法的估算结果与中国农业经济发展趋势更相符,波动节点与相应政策出台时间更契合。2010年以前,两种方法的整体变化趋势基本一致;但在2010年后,一系列国家政策提出的加大对农业农村设施建设的扶持,理应对农业

能源效率起到促进作用, 但该情况只与改进方法相符。

3) 传统方法的估算结果会受物价和成本等生产效率因素影响, 与真实农业能源效率产生较大偏离。在两种方法所测算的 2018 年效率值中, 北京、青海和上海差异最为明显, 分别相差 0.95、0.87 和 0.77。

参考文献 References

- [1] 杨崑, 李光泗, 祁华清. “立足自给”还是“倚重贸易”——农业强国进程中的饲用粮食安全困境[J]. 农业经济问题, 2023, 44(12): 17–35
YANG K, LI G S, QI H Q. “Self-sufficiency” or “reliance on trade”: The dilemma of feed grain security in the process of building an agricultural powerhouse[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2023, 44(12): 17–35
- [2] 黄建, 冯升波, 杨阳, 等. 全要素能源效率及其测算、比较与验证[J]. 资源科学, 2023, 45(2): 281–295
HUANG J, FENG S B, YANG Y, et al. Total factor energy efficiency and its measurement, comparison, and validation[J]. *Resources Science*, 2023, 45(2): 281–295
- [3] FILIPPINI M, HUNT L C. Measurement of energy efficiency based on economic foundations[J]. *Energy Economics*, 2015, 52: S5–S16
- [4] 栾义君, 任杰. 我国农业全要素能源效率及其收敛性研究[J]. 中国农业资源与区划, 2014, 35(5): 20–24
LUAN Y J, REN J. Agricultural total factor energy efficiency of China and its convergence[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2014, 35(5): 20–24
- [5] 冉启英, 王倍倍, 周辉. 碳排放约束下农业全要素能源效率增长及收敛分析——基于 Malmquist-Luenberger 指数分解[J]. 生态经济, 2018, 34(2): 47–53
RAN Q Y, WANG B B, ZHOU H. Agricultural total factor energy efficiency growth and convergence under carbon emission constraints: Based on Malmquist-Luenberger index[J]. *Ecological Economy*, 2018, 34(2): 47–53
- [6] 冉启英, 周辉. 1997—2012 年中国农业全要素能源效率的地区差异及收敛性分析[J]. 新疆农业科学, 2015, 52(6): 1169–1176
RAN Q Y, ZHOU H. Regional differences and convergence analysis of agricultural total factor energy efficiency in China: 1997–2012[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2015, 52(6): 1169–1176
- [7] 杜辉, 黄杰. 中国农业能源效率的区域差异及动态演进[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(8): 45–54
DU H, HUANG J. Regional difference decomposition and its dynamic evolution of agricultural energy efficiency in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 40(8): 45–54
- [8] 郑祥生, 徐若梅. 碳排放约束下中国全要素农业能源效率测度与地区差异研究[J]. 云南农业大学学报(社会科学), 2022, 16(3): 134–142
ZHENG X S, XU R M. Measurement and regional differences of total factor agricultural energy efficiency under carbon emission constraints in China[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Social Science)*, 2022, 16(3): 134–142
- [9] 周辉, 冉启英, 王宏森. 我国农业全要素能源效率及其影响因素分析[J]. 生态经济, 2016, 32(7): 133–138
ZHOU H, RAN Q Y, WANG H S. Analysis on agriculture total factor energy efficiency and its influencing factors in China[J]. *Ecological Economy*, 2016, 32(7): 133–138
- [10] 冉启英, 周辉. 环境约束下农业全要素能源效率研究: 基于 SBM-TOBIT 模型[J]. 经济问题, 2017(1): 103–109
RAN Q Y, ZHOU H. Research on agricultural total factor energy efficiency under environmental constraints: Based on SBM-TOBIT model[J]. *On Economic Problems*, 2017(1): 103–109
- [11] 李海鹏, 罗丽, 张雄, 等. 中国农业能源效率动态演变及其影响因素[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(12): 105–115
LI H P, LUO L, ZHANG X, et al. Dynamic change of agricultural energy efficiency and its influencing factors in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(12): 105–115
- [12] 张佳卓. 低碳背景下西北地区农业能源效率[J]. 西部皮革, 2018, 40(6): 72–73
ZHANG J Z. Agricultural energy efficiency in Northwest China under the background of low carbon[J]. *West Leather*, 2018, 40(6): 72–73
- [13] 王永静, 武玲竹, 苏芳. 中国粮食主产区农业能源效率变动研究——基于超效率 EBM 和 Global-Malmquist 指数模型[J]. 资源开发与市场, 2022, 38(6): 641–649
WANG Y J, WU L Z, SU F. Research on the dynamic change of agricultural energy efficiency in China's main grain-producing areas—Based on the super-efficiency EBM and Global-Malmquist index model[J]. *Resource Development & Market*, 2022, 38(6): 641–649
- [14] ESKANDARI S, ZERAATKISH Y, MOGHADDASI R, et al. Determinant factors energy efficiency and emission of pollutants CO₂ & SO₂ in Iran's agricultural sector[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2022, 19(3): 1717–1728
- [15] TALUKDER B, VANLOON G W, HIPEL K W. Energy efficiency of agricultural systems in the southwest coastal zone of Bangladesh[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 641–648
- [16] KHAN D, NOUMAN M, ULLAH A. Assessing the impact of technological innovation on technically derived energy efficiency: A multivariate co-integration analysis of the agricultural sector in South Asia[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2023, 25(4): 3723–3745
- [17] 陈佩, 张为付. 中国农业能源效率时空演进及其影响因素——基于技术异质视角[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(6): 276–286
CHEN P, ZHANG W F. Temporal and spatial evolution of agricultural energy efficiency in China and its influencing factors: From the perspective of technological heterogeneity[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(6): 276–286
- [18] 钟许杰, 温晓妮, 张晓微. 基于三阶段 SBM 模型的制造业数

- 字化生产效率评价[J]. 高师理科学刊, 2023, 43(11): 14-20
- ZHONG X J, WEN X N, ZHANG X W. Evaluation of digital production efficiency in manufacturing based on three-stage SBM model[J]. *Journal of Science of Teachers' College and University*, 2023, 43(11): 14-20
- [19] 权杰庆. 研发投入产出效率的国际比较研究——基于三阶段 DEA 模型分析[D]. 太原: 山西财经大学, 2016
- QUAN J Q. An international comparative study of R&D input-output efficiency—Based on the three-stage DEA model analysis[D]. Taiyuan: Shanxi University of Finance & Economics, 2016
- [20] FRIED H O, LOVELL C A K, SCHMIDT S S, et al. Accounting for environmental effects and statistical noise in data envelopment analysis[J]. *Journal of Productivity Analysis*, 2002, 17(1): 157-174
- [21] 郭红霞. 环境规制对能源效率的时间与空间效应研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2023
- GUO H X. Study on time and space effects of environmental regulation on energy efficiency[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023
- [22] 李国璋, 霍宗杰. 我国全要素能源效率及其收敛性[J]. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(1): 11-16
- LI G Z, HUO Z J. Total factor energy efficiency of China and its convergence[J]. *China Population Resources and Environment*, 2010, 20(1): 11-16
- [23] 邹瑶. 江西省农业生产效率测度研究——基于三阶段 DEA 模型[D]. 南昌: 江西财经大学, 2019
- ZOU Y. Study on the measurement of agricultural production efficiency in Jiangxi Province — Based on the three-stage DEA model[D]. Nanchang: Jiangxi University of Finance and Economics, 2019
- [24] 孙一博. “双碳”背景下我国智慧农业生产效率测度及影响因素研究[D]. 郑州: 河南财经政法大学, 2023
- SUN Y B. Research on production efficiency measurement and influencing factors of smart agriculture in China under the background of “Double Carbon” [D]. Zhengzhou: Henan University of Economics and Law, 2023
- [25] 李谷成, 冯中朝, 范丽霞. 小农户真的更加具有效率吗? 来自湖北省的经验证据[J]. *经济学(季刊)*, 2010, 10(1): 95-124
- LI G C, FENG Z C, FAN L X. Is the small-sized rural household more efficient? The empirical evidence from Hubei Province[J]. *China Economic Quarterly*, 2010, 10(1): 95-124
- [26] 周来友. 江西丘陵地区非农就业类型对农业生产效率的影响——基于农地流转和农地投入的考察[D]. 南京: 南京农业大学, 2017
- ZHOU L Y. The influence of non-agricultural employment types on agricultural production efficiency in hilly areas of Jiangxi Province—Based on the investigation of farmland circulation and farmland input[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017
- [27] 周益波. 中国农业能源效率的时空分异及影响因素研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019
- ZHOU Y B. Spatial-temporal differentiation of agricultural energy efficiency in China and its influencing factors[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019
- [28] 刘畅. 吉林省农业生产效率时空演变与影响因素研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2023
- LIU C. Spatial-temporal evolution and influencing factors of agricultural production efficiency in Jilin Province[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2023
- [29] 崔海洋, 卓雯君, 虞虎, 等. 基于三阶段 DEA 模型的农业生产效率及其时空特征研究——以长江经济带为例[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(7): 1243-1252
- CUI H Y, ZHUO W J, YU H, et al. Calculation of agricultural production efficiency based on a three-stage Data Envelopment Analysis model and analysis of the spatial-temporal characteristics: An example from the Yangtze River Economic Belt[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(7): 1243-1252
- [30] 李楠. 中国农业能源消费及温室气体排放研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014
- LI N. Study on agricultural energy consumption and greenhouse gas emission in China[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014
- [31] 王敏强. 亚洲国家役畜资源及中国黄牛现状与未来(综述)[J]. *草与畜杂志*, 1986(2): 28-31
- WANG M Q. Draft animal resources in Asian countries and the current situation and future of Chinese cattle[J]. *China Herbivore Science*, 1986(2): 28-31
- [32] SCHIERE J B, IBRAHIM M N M, VAN KEULEN H. The role of livestock for sustainability in mixed farming: Criteria and scenario studies under varying resource allocation[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 90(2): 139-153
- [33] 宗振利, 廖直东. 中国省际三次产业资本存量再估算: 1978—2011[J]. *贵州财经大学学报*, 2014(3): 8-16
- ZONG Z L, LIAO Z D. Estimates of fixed capital stock by sector and region: 1978—2011[J]. *Journal of Guizhou University of Finance and Economics*, 2014(3): 8-16
- [34] 王金田, 王学真, 高峰. 全国及分省份农业资本存量 K 的估算[J]. *农业技术经济*, 2007(4): 64-70
- WANG J T, WANG X Z, GAO F. An estimation on capital assets K in agriculture in all provinces, autonomous regions and four municipalities[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2007(4): 64-70
- [35] HULTEN C R. The Measurement of Capital[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1990
- [36] 丁宝根, 赵玉, 邓俊红. 中国种植业碳排放的测度、脱钩特征及驱动因素研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2022, 43(5): 1-11
- DING B G, ZHAO Y, DENG J H. Calculation, decoupling effects and driving factors of carbon emission from planting industry in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(5): 1-11
- [37] 李波, 张俊飏. 基于投入视角的我国农业碳排放与经济发展脱钩研究[J]. *经济经纬*, 2012, 29(4): 27-31
- LI B, ZHANG J B. Decoupling of China's agriculture carbon emissions and economic development based on the input perspective[J]. *Economic Survey*, 2012, 29(4): 27-31
- [38] 段华平, 张悦, 赵建波, 等. 中国农田生态系统的碳足迹分

- 析[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 203-208
- DUAN H P, ZHANG Y, ZHAO J B, et al. Carbon footprint analysis of farmland ecosystem in China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5): 203-208
- [39] 马涛. 上海农业碳源碳汇现状评估及增加碳汇潜力分析[J]. 农业环境与发展, 2011, 28(5): 38-41
- MA T. Assessment of current situation of carbon source and carbon sink in Shanghai agriculture and analysis of potential of increasing carbon sink[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2011, 28(5): 38-41
- [40] 陈振, 郑锐, 李佩华, 等. 河南省农业科技创新效率评价与分析[J]. 河南农业大学学报, 2018, 52(3): 464-469, 484
- CHEN Z, ZHENG R, LI P H, et al. Evaluation and analysis of agricultural science and technology innovation efficiency in Henan Province[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2018, 52(3): 464-469, 484
- [41] 曹清峰. 全球价值链参与、生产率提升与城乡收入差距[J]. 财经论丛, 2020(3): 3-11
- CAO Q F. Global value chain participation, productivity improvement and the urban-rural income gap[J]. *Collected Essays on Finance and Economics*, 2020(3): 3-11
- [42] 向洁, 胡青江, 闫海龙. 中国 31 个省区市财政支农对农业经济增长的空间效应和门槛特征研究[J]. 新疆财经, 2021(1): 17-30
- XIANG J, HU Q J, YAN H L. The spatial effect and threshold characteristics of fiscal expenditure for supporting agriculture in China's 31 provinces[J]. *Finance & Economics of Xinjiang*, 2021(1): 17-30
- [43] 郑思雨, 周苏洋, 邱玥, 等. 基于改进三阶段数据包络分析法的省域全要素能效评价方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5329-5342
- ZHENG S Y, ZHOU S Y, QIU Y, et al. Provincial total-factor energy efficiency evaluation based on improved three-stage DEA model[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(14): 5329-5342
- [44] 闫星, 罗义, 赵芹, 等. 基于 SBM-DEA 的陕西省制造业高质量发展效率评价及对策研究[J]. 科技管理研究, 2022, 42(1): 44-50
- YAN X, LUO Y, ZHAO Q, et al. Evaluation and countermeasures of high quality development efficiency of manufacturing industry in Shaanxi Province based on SBM-DEA[J]. *Science and Technology Management Research*, 2022, 42(1): 44-50
- [45] 高丽艳. 京津冀地区低碳物流效率测度及分析[J]. 河北工业大学学报(社会科学版), 2022, 14(4): 8-13, 42
- GAO L Y. Measurement and analysis of low-carbon logistics efficiency in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *Journal of Hebei University of Technology (Social Sciences Edition)*, 2022, 14(4): 8-13, 42
- [46] 胡大双, 陈晓玲, 李敏, 等. 基于超效率三阶段 SBM 模型的安徽省农业生产效率测度及其时空差异分析[J]. 云南农业大学学报(社会科学), 2022, 16(6): 46-56
- HU D S, CHEN X L, LI M, et al. Measurement of agricultural production efficiency and its spatial-temporal differences in Anhui Province based on three-stage SBM model[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Social Science)*, 2022, 16(6): 46-56