



杜瑞瑞, 吴昊, 贺婷, 宁心怡, 赵敏娟. 基于三阶段超效率SBM-GML的中国畜牧业全要素碳生产率演变特征及影响因素[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(07): 305-320.

DU Ruirui, WU Hao, HE Ting, NING Xinyi, ZHAO Minjuan. Evolutionary characteristics and influencing factors of total factor carbon productivity of animal husbandry in China based on the three-stage super-efficiency SBM-GML model[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(07): 305-320.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.07.25

基于三阶段超效率SBM-GML的中国畜牧业全要素碳生产率 演变特征及影响因素

杜瑞瑞¹ 吴昊¹ 贺婷¹ 宁心怡¹ 赵敏娟^{1,2*}

(1. 西北农林科技大学 经济管理学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 西安财经大学, 西安 710100)

摘 要 为准确评估畜牧业低碳生产绩效,并揭示其时空分异特征及影响因素,利用三阶段超效率SBM和GML指数,对2001—2020年中国31个省(市、自治区)畜牧业全要素碳生产率进行测算及影响因素分析(统计数据未含港澳台地区,下同);并运用面板回归模型,进一步揭示畜牧业技术进步、技术效率和规模效率变化在改善投入产出上的偏向性及作用效果。结果表明:1)中国畜牧业低碳生产效率实现3.33%的年均增长,但总体水平不高(0.695)且区域差异明显,呈现“华南区>黄淮海区>东北区>青藏区>长江中下游区>西北及长城沿线区>西南区”的格局;2)畜牧业全要素碳生产率增长主要源于技术进步和规模经济,劳动力投入效率和碳排放效率低下是畜牧业全要素碳生产率偏离生产前沿的主要原因;3)畜牧业技术进步偏向于促进要素集约利用,对碳排放效率的影响并不显著,技术效率对畜牧业碳排放效率有显著的正向影响;4)经济发展、政府支持、牧业产业结构以及科技创新对畜牧业全要素碳生产率均有显著影响。

关键词 畜牧业碳排放;全要素碳生产率;三阶段DEA模型;GML指数;要素利用效率

中图分类号 F831.4

文章编号 1007-4333(2025)07-0305-16

文献标志码 A

Evolutionary characteristics and influencing factors of total factor carbon productivity of animal husbandry in China based on the three-stage super-efficiency SBM-GML model

DU Ruirui¹, WU Hao¹, HE Ting¹, NING Xinyi¹, ZHAO Minjuan^{1,2*}

(1. College of Economic and Management, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Xi'an University of Finance and Economics, Xi'an 710100, China)

Abstract To accurately evaluate the low-carbon production performance of animal husbandry and reveal its spatial-temporal differentiation characteristics and influencing factors, based on the three-stage super-efficiency SBM and GML index, the total factor carbon productivity in animal husbandry and its influencing factors were determined and analyzed in 31 provinces in China from 2001 to 2020 (The data do not include those of Hong Kong, Macao and Taiwan regions. The same below). A panel regression model was used to reveal further the bias and effect of technological progress, technical efficiency, and scale efficiency changes on improving input-output in animal husbandry. The results showed that: 1) China's low-carbon

收稿日期: 2024-09-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(72173097);国家社会科学基金重大项目(22&ZD083)

第一作者: 杜瑞瑞(ORCID: 0009-0005-7456-2369),博士研究生,E-mail: duruirui@nwfufu.edu.cn

通讯作者: 赵敏娟(ORCID: 0000-0002-0986-0213),教授,主要从事农业自然资源管理与评价、农业绿色转型研究,E-mail: minjuan.zhao@nwsuaf.edu.cn

production efficiency in animal husbandry achieved an average annual growth rate of 3.33%, but the overall level was not high (0.695) and the regional differences were obvious, showing a pattern of "South China > Huang-Huai-Hai > Northeast > Qinghai-Tibet > Middle-lower Yangtze River > Northwest and along the Great Wall > Southwest"; 2) The growth of total factor carbon productivity in China's animal husbandry industry is mainly due to technological progress and economies of scale, and the low efficiency of labor input and carbon emission is the main reason for the deviation of total factor carbon productivity from the production frontier; 3) The current technological progress in animal husbandry tends to promote intensive utilization of factors and has no significant impact on carbon emission efficiency, while the technical efficiency has a significant positive impact on the improvement of carbon emission efficiency in animal husbandry; 4) Economic development, government support, animal husbandry industry structure and scientific and technological innovation all have significant effects on total factor carbon productivity of animal husbandry.

Keywords animal husbandry carbon emissions; total factor carbon productivity; three-stage DEA model; GML index; elements utilization efficiency

当前,畜牧业已成为全球温室气体排放的主要生产部门之一。研究表明,畜牧业温室气体排放约占人为温室气体排放总量的18%^[1]。中国是畜牧业生产大国,近年来在畜牧业政策扶持和畜产品消费需求的拉动下,畜牧业发展势头愈发强劲^[2]。与此同时,由畜禽养殖所造成的碳排放问题日趋严峻。据FAO数据统计,2022年中国畜牧业温室气体排放达309.27百万t CO₂当量,占到农业温室气体排放总量的33.04%。面临畜产品需求刚性增长和低碳减排的双重约束,推动畜牧业低碳发展势在必行,这不仅事关中国未来畜产品供给质量的提升,也关乎中国“双碳”目标的实现。全要素碳生产率是衡量畜牧业低碳生产绩效的有效指标,它能准确描述畜牧业经济增长与碳排放之间的关系,以及多项投入要素与合意产出和非合意产出之间的关系^[3]。

学术界关于畜牧业低碳生产绩效的相关研究主要集中在畜牧业碳排放^[4]、畜牧业低碳生产效率^[5]、环境全要素生产率^[6]测算、时空演变及影响因素分析。对于低碳生产效率的测算,已有研究多采用DEA^[7]、SFA^[8]、SBM^[9]、超效率EBM^[10]等。然而,传统DEA和SBM在测算效率时将外部环境和随机干扰的影响均纳入了管理无效率^[11],SFA存在生产函数设定误差且无法处理多输入多输出问题^[12],均会导致效率评价结果偏离实际。Fried等^[13]提出三阶段DEA模型,该模型有效剔除了环境因素和随机误差对效率评价的影响,目前在科技创新、碳排放等效率测算中得到广泛应用^[14-15]。因此,本研究选择三阶段超效率SBM模型对畜牧业低碳生产效率

进行测算。

除上述静态效率测度视角外,部分学者运用ML、GML指数对全要素碳生产率(TFCP)指数进行动态分解^[16-17]。然而,现有研究多止步于将TFCP增长归因于纯技术效率、规模效率和技术变动,对于上述因素在推动畜牧业TFCP增长时,更偏向于优化要素配置效率还是提升碳排放效率,以及畜牧业各项要素利用效率及其变动趋势如何这一系列问题,现有研究中尚不明确。相关研究指出,农业技术进步可以通过改变各要素投入比例,对农业全要素生产率(TFP)增长产生影响,但受要素资源禀赋差异影响,技术变迁的方向和有效性有所不同^[18]。从最新的生产率增长分解文献也能发现,学者们开始关注要素利用效率对TFP增长的影响。如李冬等^[19]从要素投入集约和产出结构优化双重效应分解视角揭示中国TFP增长来源;李小克等^[20]从单位要素生产率变化、要素边际产出变化、异质性纯技术进步效应变化等多重效应分解角度探讨了TFP演变机制。故从要素集约利用效率角度剖析畜牧业TFCP的驱动机制至关重要。

基于此,本研究以2001—2020年中国31个省级数据为样本(统计数据未含港澳台地区,下同),进行了以下三方面拓展:第一,选取面板三阶段超效率SBM-GML指数模型进行全要素碳生产率指数测算与动态分解,剥离外部环境和随机干扰因素对畜牧业TFCP增长的影响,识别影响畜牧业TFCP的技术变迁、要素规模报酬和内部管理水平因素;第二,在传统畜牧业TFCP增长分解基础上,刻画畜牧业各项投入要素及产出效率的变化情

况,并从要素集约利用视角,揭示技术进步、技术效率和规模效率变化驱动畜牧业TFCP增长的中间机制;第三,细化区域尺度,深入开展中国七大区域畜牧业全要素碳生产率的综合对比研究,了解各区域畜牧业全要素碳生产率的差异、障碍和驱动因素,以期为探索差异化区域畜牧业低碳政策提供新思路。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究方法

计算畜牧业全要素碳生产率首先需要构建畜牧业投入-产出指标体系,并选择合适的效率测算模型。Fried等^[13]提出的三阶段DEA模型,能够剔除影响效率测算的环境因素和随机误差,得到更加准确的效率评价结果。同时,考虑到超效率SBM能够同时识别多个有效决策单元,本研究采用面板三阶段超效率SBM模型(三阶段SSBM)对中国31个省(市、自治区)的畜牧业低碳生产效率进行测算;此外,结合GML指数得到畜牧业全要素生产率指数及其分解项。

1.1.1 面板三阶段超效率SBM模型

第一阶段:超效率SBM模型。本研究采用超效率SBM测算各决策单元的初始效率值和投入松弛值。考虑到该模型的应用已非常成熟,计算过程不予赘述,具体可参考任海军等^[21]的阐释。

第二阶段:相似随机前沿模型。本研究引入面板随机前沿模型(SFA),分析第一阶段各投入松弛变量与外生环境变量和随机误差之间的关系,以消除环境因素和随机因素对效率测度的影响。SFA表达式如下:

$$S_{nit} = f(Z_{it}; \beta_{nt}) + v_{nit} + u_{nit} \quad (1)$$

式中: S_{nit} 为第*i*个决策单元的第*n*项投入在第*t*年的投入松弛值; Z_{it} 为影响投入松弛值的外部环境变量,主要包括经济发展水平、产业结构、政府支持和科技创新水平; β_{nt} 为环境变量影响各项投入松弛值的待估系数。 β_{nt} 显著为正,说明环境变量对投入松弛值的影响为正,则该环境变量不利于畜牧业低碳生产效率提升; v_{nit} 为随机误差项,表示随机干扰因素对投入松弛变量的影响, $v_{nit} \sim N(0, \sigma_v^2)$; u_{nit} 为管理无效率项,表示管理因素对投入松弛变量的影响,假设其服从在零点截断的正态分布,即 $u_{nit} \sim N^+(u, \sigma_u^2)$, v_{nit} 与 u_{nit} 相互独立。令 $\sigma^2 = \sigma_v^2 + \sigma_u^2$, $\gamma = \sigma_u^2 / \sigma^2$, $0 \leq \gamma \leq 1$,如果 γ 趋

近于1,说明管理因素影响比较大,反之 γ 趋近于0,说明随机误差影响更大。投入松弛变量调整前,需要先分离管理无效率项 u_{nit} ,并计算随机误差 v_{nit} 。一般令 $f(Z_{it}; \beta_{nt}) = Z^n \beta$,则 v_{nit} 可以表示为^[22]:

$$E(v_{nit}|v_{nit} + u_{nit}) = S_{nit} - Z^n \beta - E(u_{nit}|v_{nit} + u_{nit}) \quad (2)$$

为了使所有决策单元面临相同的外部环境和随机干扰,以最有效率的决策单元投入量为参照,对其他决策单元投入量进行调整,调整公式为:

$$X_{nit}^A = X_{nit} + \left[\max \left(f(Z_{it}; \hat{\beta}_{nt}) \right) - f(Z_{it}; \hat{\beta}_{nt}) \right] + \left[\max(\hat{v}_{nit}) - \hat{v}_{nit} \right] \quad (3)$$

式中: X_{nit}^A 为第*i*个决策单元在第*t*年的调整后实际投入, X_{nit} 为调整前投入; $\hat{\beta}_{nt}$ 为环境变量参数估计值; $\hat{v}_{nit}$ 为随机误差项的估计值。

第三阶段:利用第二阶段调整得到的各投入实际值与原始产出数据,对各决策单元的低碳生产效率进行再测度,从而得到剔除环境影响和统计噪声影响的真实效率值。

1.1.2 GML指数模型

为进一步分析畜牧业TFCP的动态变化和驱动因素,本研究采用基于三阶段SSBM的GML指数模型对畜牧业TFCP进行时空动态分析。模型具体形式为:

$$\begin{aligned} \text{GML}_t^{t+1}(x^t, y^t, z^t, x^{t+1}, y^{t+1}, z^{t+1}) &= \frac{1 + D_G^T(x^t, y^t, z^t)}{1 + D_G^T(x^{t+1}, y^{t+1}, z^{t+1})} \\ &= \frac{1 + D_C^t(x^t, y^t, z^t)}{1 + D_C^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, z^{t+1})} \times \\ &\quad \left[\frac{1 + D_G^T(x^t, y^t, z^t)}{1 + D_C^t(x^t, y^t, z^t)} / \frac{1 + D_G^T(x^{t+1}, y^{t+1}, z^{t+1})}{1 + D_C^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, z^{t+1})} \right] \\ &= \text{EC}_t^{t+1} \times \text{TC}_t^{t+1} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: x, y, z 分别为各个时期的投入、期望和非期望产出变量; E^t 和 E^{t+1} 分别为以*t*时期技术为参照,*t*时期和*t+1*时期的距离方程。若GML值 <1 ,表明从*t*到*t+1*畜牧业TFCP有所降低;反之,则从*t*到*t+1*畜牧业TFCP有所提高。

参考Pastor等^[23]的分解方法,本研究进一步将综合技术效率变化指数(EC)分解为纯技术效率变化(PEC)和规模技术效率变化(SEC),2项分别对

应影响畜牧业 TFCP 的内部管理水平因素和要素规模报酬变化因素。

$$GML_t^{t+1} = PEC_t^{t+1} \times SEC_t^{t+1} \times TC_t^{t+1} \quad (5)$$

1.2 变量选取

1.2.1 投入产出变量

利用SSBM模型测算畜牧业低碳生产效率涉及投入、期望产出和非期望产出3类变量,具体变量描述见表1。借鉴Andersen^[24]、易青等^[8],本研究将劳动力、资本、中间消耗作为投入变量。1)劳动力指标为各省(市、自治区)畜牧业劳动力数量(万人),鉴于现有官方数据并未公布农林牧渔业分部门的就业人员数量,参考尹朝静等^[25],通过第一产业从业人员数间接计算

得到(畜牧业劳动力投入=第一产业从业人员数×(畜牧业总产值/第一产业产值);2)资本投入以畜牧业固定资本存量为衡量指标,由于无直接可用数据,故参考李谷成等^[26]的计算方法,以“永续盘存法”估算;3)中间消耗主要包括饲料、饲草、燃料、水电等物质与服务支出(亿元),并采用农业生产资料价格指数平减;4)期望产出以各省(市、区)畜牧业总产值衡量,并用畜牧业产值指数进行平减;5)非期望产出以各省(市、区)畜牧业碳排放量来衡量,包括畜禽饲养过程中因肠道发酵和粪便管理产生的碳排放。测算方法参考田云等^[27],各碳排放系数和增温潜势转化系数均源于IPCC。

表1 变量汇总及描述
Table 1 Summary and description of variables

变量分类 Variable type	变量 Variable	变量描述 Definition	均值 Mean	标准差 SD
投入变量 Input variable	劳动力 Labor	畜牧业劳动力数量,万人	303.747	266.749
	资本 Capital	采用永续盘存法估算畜牧业资本存量,亿元	119.570	147.262
	中间消耗 Intermediate consumption	物质与服务费用,亿元	60.453	52.868
产出变量 Output variable	畜牧业产值 Economic output	实际畜牧业产值,亿元	180.755	152.954
	畜牧业碳排放量 Carbon emissions	肠道发酵和粪便管理碳排放,万t	1 251.041	873.818
环境变量 Environmental variable	经济发展水平 Economic development level	人均实际地区生产总值,万元	1.173	8.850
	牧业产业结构 Industry structure	牲畜饲养产值占畜牧业总产值比重, %	32.290	25.874
	政府支持力度 Government support	各地农林水事务支出占财政总支出比重, %	9.753	3.922
	科技创新水平 Technological innovation	畜牧业科研投入,亿元	3.333	3.493

1.2.2 环境变量

环境变量选取原则是选择对畜牧业低碳发展绩效有显著影响,但又不受决策单元主观控制的影响因素。本研究选取涵盖经济、产业、制度、科技等方面的4个指标作为环境变量。1)经济发展水平,采用以1987年为基期的地区人均实际GDP来衡量;2)牧业产业结构,以草食畜牧业产值占畜牧业总产值的比重来表示,考虑居民未来膳食结构和营

养需求变化,碳强度高的牛羊等草食性牲畜饲养规模不断扩大,会制约畜牧业低碳发展;3)政府支持力度,用各地区农林水事务支出占财政总支出比重来反映;4)科技创新水平,由于无直接可用的分地区牧业科技创新指标,本研究参考李强等^[28],使用调整系数对各地区研究与开发机构R&D经费内部支出进行调整,调整系数使用全国畜牧业科研支出占比与牧业实际产值占地区实际GDP比重来确定,

假定权重分别为0.5,最终得到分地区畜牧业科研支出估计值,作为畜牧业科技创新水平的衡量指标。

1.3 数据来源

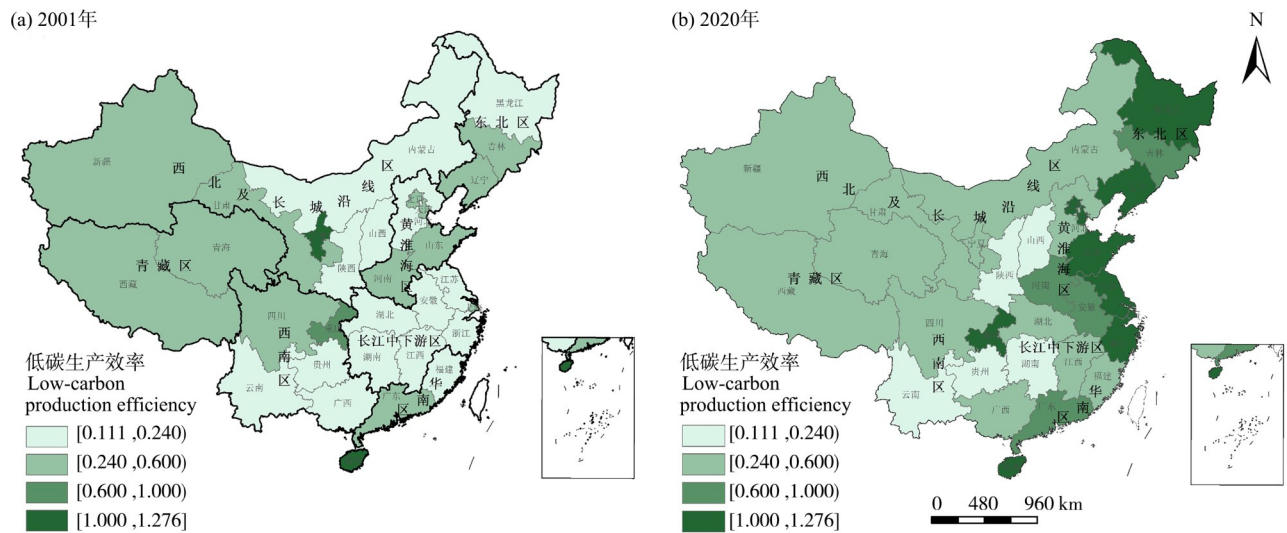
本研究收集了2001—2020年中国大陆31个省(市、自治区)的面板数据,并按照《全国农业可持续发展规划(2015—2030年)》^[29]的划分方法,将全国划分为东北区、黄淮海区、长江中下游区、华南区、西北及长城沿线区、西南区、青藏区7个区域。基础数据主要来源于《中国统计年鉴》^[30]《中国农村统计年鉴》^[31]《中国畜牧业年鉴》^[32]《中国畜牧兽医年鉴》^[33]以及EPS数据库,部分缺失数据采用线性插值法进行补齐。

2 基于三阶段SSBM的畜牧业低碳生产率测度结果分析

2.1 第一阶段SSBM模型测算结果

第一阶段在不考虑决策单元环境因素和随机误差的影响下,运用Matlab软件和超效率SBM模型计算中国各省份2001—2020年畜牧业低碳生产

效率。从时间序列层面来看,2001—2020年,中国(各省份均值)畜牧业低碳生产效率均 <1 ,处于DEA无效状态,但总体上呈明显上升态势。为了更直观地体现结果,采用ArcGIS 10.8对2001和2020年各省份畜牧业低碳生产效率按照低效率值 $[0.111, 0.240)$ 、中低效率值 $[0.240, 0.600)$ 、中高效率值 $[0.600, 1.000)$ 、高效率值 $[1.000, 1.276]$ 进行区域划分,结果见图1。可见,2001年,除重庆、宁夏和海南3个省份外,其余省份均处在低效率区和中低效率区。相比之下,2020年图中深色区域逐渐变多,即许多省份从低、中低效率区跃升至中高、高效率区,说明碳排放约束下的畜牧业生产效率在不断改善。从区域层面来看,各地区畜牧业低碳生产效率存在明显差异,低碳生产效率较高省份主要集中在黄淮海区、东北区和华南区。其中,2020年中高效率区包括河南、安徽、广东和吉林4个省份,黑龙江、辽宁、山东、重庆、广东、海南、北京、天津、上海和浙江10个省份的畜牧业低碳生产效率均位于效率生产前沿面,其余17个省份在畜牧业低碳发展方面仍存在较大的提升空间。



审图号为GS(2023)2763号标准地图制作,底图未修改,下同。

Review No. GS(2023)2763. The base map has not been modified. The same below.

图1 第一阶段中国畜牧业低碳生产效率的空间分布

Fig.1 Spatial distribution of low-carbon production efficiency in the first stage of animal husbandry in China

2.2 第二阶段SFA随机前沿模型测算结果

将第一阶段得到的劳动力、资本、中间消耗等投入的松弛变量依次作为因变量,经济发展水平、牧业产业结构、政府支持力度和科技创新水平作为自变量,构建相似SFA模型,以拆解环境变量、随机

误差与内部管理无效率的影响程度,结果见表2。3种回归下, γ 均较大且向1趋近,说明相比随机误差因素,管理无效率因素对畜牧业低碳生产效率的影响占主导作用。 σ^2 和LR单边误差项均在1%水平上显著不为0,说明模型拟合较好,测度效率时必须

考虑环境因素和随机干扰。

由表2可知:1)省域经济发展水平对劳动力投入松弛值的影响在1%的显著水平上表现为负相关,对资本存量投入松弛值的影响为正且在1%水平上显著。说明地区经济发展水平的提高会促进畜牧业劳动力人口向第二、三产业转移,从而提高畜牧业劳动力配置效率。但是,地区经济发展水平的提高同时会带来资本存量投入的增加与浪费,进而制约地区畜牧业低碳生产效率的提高。2)牧业产业结构对劳动力、资本存量投入松弛值的影响均在1%水平上显著为正,而对中间消耗投入松弛值的影响呈负向关系,且在5%的水平上显著。这表明草食畜牧业产值比重的增加会消耗更多的人力和财力,不利于畜牧业低碳生产效率的提升。3)政府支持力度对劳动力投入松弛值的影响为负,且在1%水平上显著,对资本存量和中间消耗投入松弛

的影响显著为正。说明政府对畜牧业扶持力度的提高,有利于提高牧业劳动力利用效率,但不利于减少资本存量和中间消耗的投入浪费。4)科技创新水平对劳动力投入松弛值的影响在1%的水平上显著为正,对资本存量、中间消耗投入松弛值的影响分别在1%和10%的水平上显著为负。一方面,畜牧业科技成果的转化应用会增加对高素质畜牧业劳动人员的需求;另一方面,畜牧业科技创新水平的提高,会降低养殖过程中无效工序的资本投入和中间消耗,从而促进畜牧业低碳生产效率的提高。

基于上述分析,环境因素对畜牧业生产各项投入要素冗余度的影响方向及程度均存在差异,也表明第一阶段所测算的畜牧业低碳生产效率结果是有偏的。因此,本研究利用式(2)和(3)对第一阶段各要素投入数值进行调整,以便分析相同环境和随机干扰条件下的畜牧业低碳生产绩效。

表2 第二阶段SFA回归模型结果
Table 2 Results of the second stage SFA regression model

变量 Variable	劳动力投入松弛 Labor slack	资本存量投入松弛 Capital slack	中间消耗投入松弛 Intermediate consumption slack
常数项 Constant term	88.492*** (21.980)	-129.232*** (11.514)	-0.912 (1.763)
经济发展水平 Economic development level	-8.907*** (0.804)	4.694*** (0.494)	0.033 (0.072)
牧业产业结构 Industrial structure	64.619*** (23.765)	29.985** (14.831)	-4.477** (2.317)
政府支持力度 Government support	-6.104*** (1.407)	6.410*** (0.868)	0.148** (0.068)
科技创新水平 Technological innovation	17.083*** (3.737)	-14.025*** (2.738)	-0.676* (0.397)
σ^2	65 995.211*** (1.007)	10 448.487*** (1.014)	687.215*** (157.602)
γ	0.881*** (0.007)	0.655*** (0.020)	0.896*** (0.025)
Log likelihood function	-3 726.707	-3 464.026	-2 264.559
LR test of the one-sided error	711.992***	244.591***	762.520***

注:***、**、*分别表示在1%、5%、10%水平下显著。下同。
Note: *, ** and *** indicate the significate level of 10%, 5% and 1%, respectively. The same below.

2.3 第三阶段调整后SSBM模型测算结果

剔除环境因素和随机干扰影响后,将第二阶段调整得到的投入数据与原始产出数据重新代入SSBM模型,对各省份畜牧业低碳生产效率进行测算。结果显示,2001—2020年中国畜牧业低碳生产

效率呈现逐年上升态势,平均值为0.695,与生产前沿面还有一定的差距,畜牧业仍存在较大减排空间。为了更直观地体现结果,对各省份畜牧业低碳生产效率按照低效率值[0.406, 0.524)、中低效率值[0.524, 0.659)、中高效率值[0.659, 1.000)、高

效率值 $[1.000, 1.129]$ 进行区域划分,结果见图2。可以看出,从2001—2020年,除青海、新疆、宁夏等地区外,绝大多数省份的畜牧业低碳生产效率实现增长。相比2001年,2020年畜牧业低碳生产效率处于低效率区的省份减少6个,分别为山西、陕西、安徽、河北、河南和四川;高效率区省份增加6个,包括黑龙江、辽宁、山东、江苏、重庆和上海;表现突出的省份主要集中在东北区、黄淮海区、长江中下游区

和华南区。此外,与图1相比,大多数省份的畜牧业低碳生产效率有所提高,尤其山西、陕西、新疆、云南、贵州等西北及西南部省份的畜牧业低碳生产效率提升超过2倍,说明不考虑环境因素和随机干扰影响时会严重低估这些地区的畜牧业低碳生产效率。海南、山东和重庆3个地区的效率均值下降,表明有利的环境因素和随机干扰因素拉高了这3个地区的畜牧业低碳生产效率。

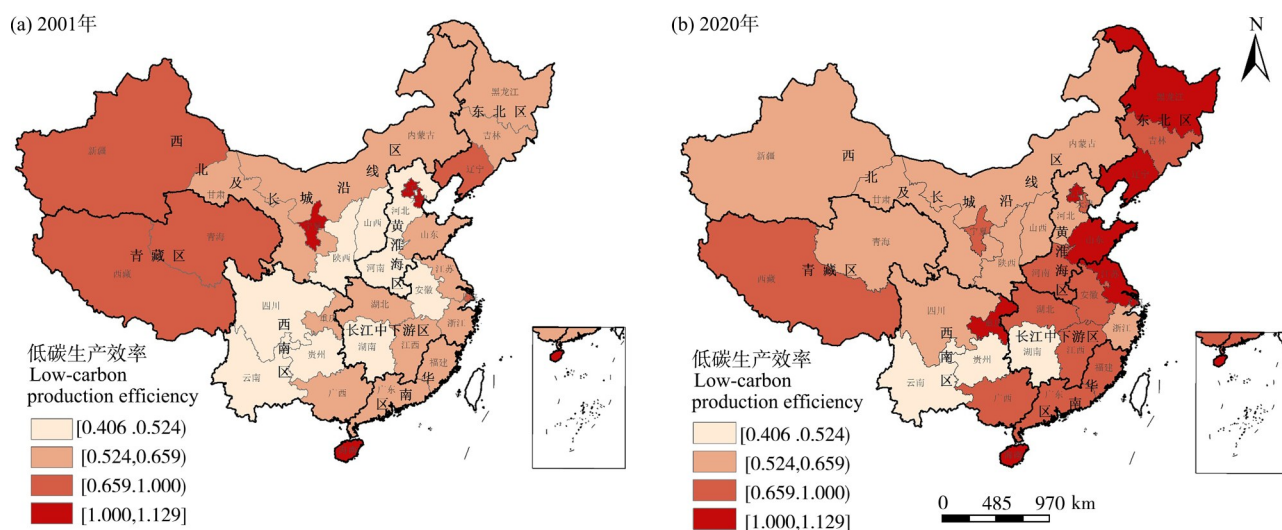


图2 第三阶段中国畜牧业低碳生产效率的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of low-carbon production efficiency in the third stage of animal husbandry in China

图3进一步展示了第一阶段和第三阶段畜牧业低碳生产效率的区域差异。与第一阶段相比,第三阶段各区域畜牧业低碳生产效率的总体时间趋势没有改变,但畜牧业低碳生产效率均表现出不同程度的提升。具体而言,研究期内黄淮海区、东北区、长江中下游区、华南区和西南区的畜牧业低碳生产效率在第一阶段和第三阶段均有明显提升。这些地区普遍经济实力较强,在产业发展中高度响应国家高质量发展目标,制定了严格的养殖污染环境治理政策和排放标准,加大了对畜牧业的资金和技术扶持,有效提升了养殖户的技术水平和管理能力;同时,注重畜牧业向产业化、规模化、集约化方向发展,实现养殖资源优化配置,进而促进畜牧业全要素生产率快速提升。相比之下,青藏区2001—2020年的畜牧业低碳生产效率呈现“波动下降-快速上升”的态势。究其原因,青藏地区海拔高且气候寒冷,而早期该地区畜牧业基础设施薄弱,养殖技术落后,加上缺乏针对性的草场保护补贴政策和气候

适应性措施,导致牧民投入产出效率较低,碳排放相对较高,畜牧业低碳生产效率呈现波动式下降;近年来,随着草原生态保护政策的推进和环境生产技术的提高,青藏区畜牧业低碳生产效率明显提升。西北及长城沿线区的畜牧业低碳生产效率在第一阶段整体呈现下降态势,年均值仅为0.234;经过第二阶段调整后,该区畜牧业低碳生产效率明显改善,均值达到0.612,说明该区面临的外部环境严重制约畜牧业低碳发展。此时,排除环境因素和随机干扰影响后,畜牧业低碳生产效率呈现“华南区>黄淮海区>东北区>青藏区>长江中下游区>西北及长城沿线区>西南区”的空间分布格局。

3 基于GML指数的畜牧业TFCP时空动态分析

3.1 全国畜牧业TFCP指数分解结果的阶段性特征

由图4可知,2001—2020年,中国畜牧业平均

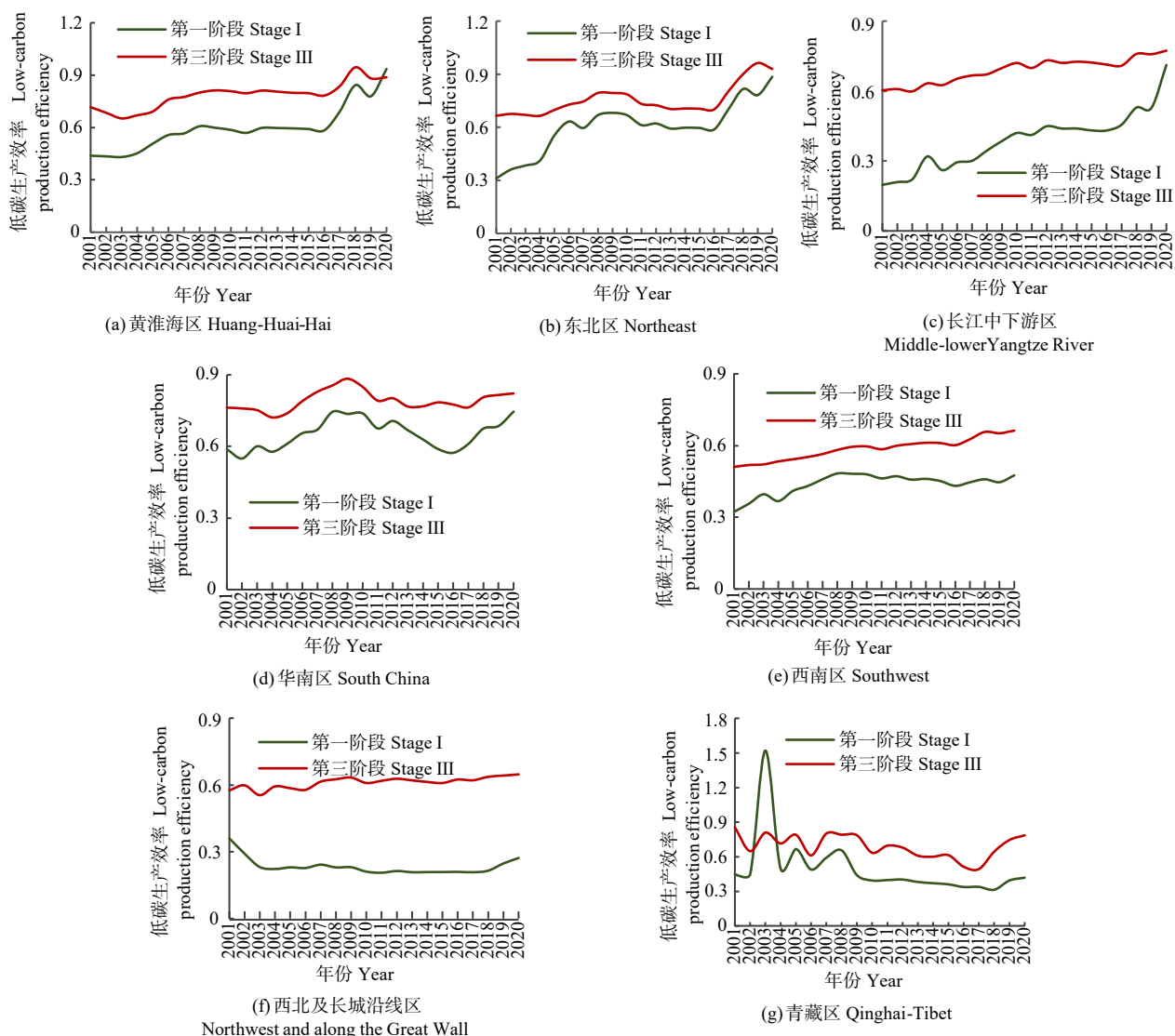


图3 2001—2020年中国七个区域畜牧业低碳生产效率对比图

Fig.3 Comparison of animal husbandry low-carbon production efficiency in seven regions of China from 2001 to 2020

TFCP指数为1.033,即20年来中国畜牧业TFCP实现3.33%的年均增长。其中,畜牧业纯技术效率变化指数均值为0.999,规模技术效率变化指数均值为1.016,技术进步指数均值为1.031,说明中国畜牧业TFCP增长主要源于技术进步(3.1%)和规模经济(1.6%),技术效率出现恶化(-0.1%)。分阶段来看,“十五”时期、“十一五”时期、“十二五”时期及“十三五”时期,中国畜牧业TFCP均值分别增长4.9%、4.6%、1.1%、2.6%,并且除“十五”时期外,其余三个时期畜牧业技术进步增长率均高于规模效率增长率,技术效率增长率贡献较小,甚至在“十二五”、“十三五”期间出现下降。表明畜牧业低碳生产动力主要来源是技术进步和规模经济。畜

牧业生产技术进步有效促进了资源利用效率提高和环境污染治理。同时,适度规模养殖有效降低单位产品的要素投入成本,提高畜产品产出和经济效益。据2024年《全国农产品成品收益资料汇编》^[34]数据显示,2023年中国平均每单位规模生猪养殖的总成本为2183.45元、主产品产量为132.88 kg,比每单位散养生猪成本降低8.07%、产量增长2.47%,实现生猪规模生产效率提升;不同的是,中国奶牛产业的规模经济效益并不明显,2023年每单位规模奶牛养殖的总成本为28240.98元、主产品产量为7152.48 kg,比单位散养奶牛的总成本增了52.75%、产量增长33.72%,需进一步调整生产规模,避免规模不当引起生产效率下降。

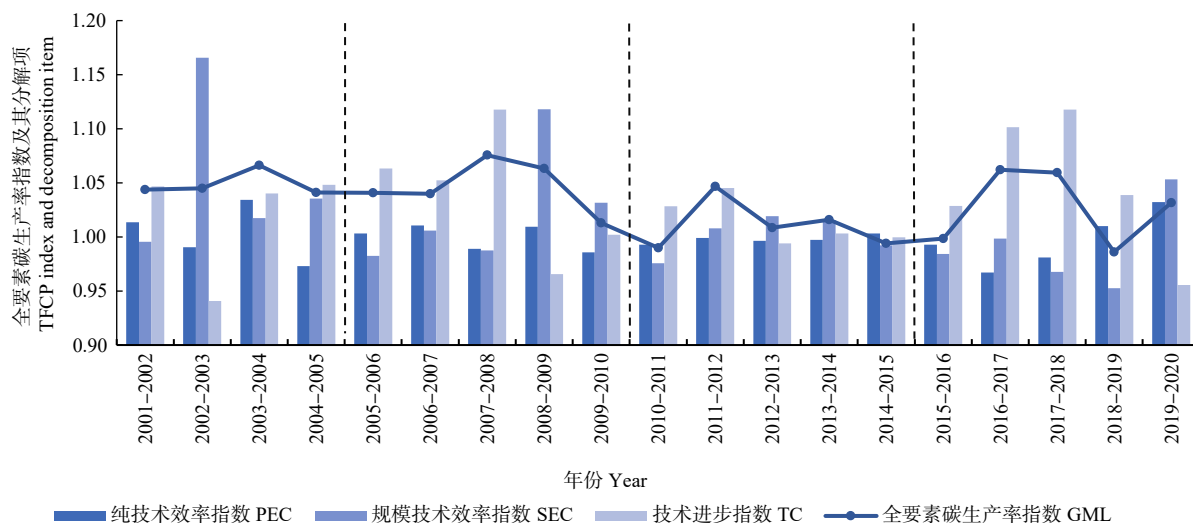


图4 中国畜牧业全要素碳生产率指数及其分解项的时间变动趋势

Fig. 4 Time variation trend of total factor carbon productivity index and decomposition item of animal husbandry in China

3.2 畜牧业TFCP指数分解结果的区际差异

图5展示了2001—2020年各区域年均畜牧业TFCP指数及其分解指数。可以看出,各区域年均畜牧业TFCP指数均 >1 ,具体排序为青藏区(1.055) $>$ 华南区(1.046) $>$ 东北区(1.041) $>$ 西北及长城沿线区(1.038) $>$ 全国(1.033) $>$ 黄淮海区(1.032) $>$ 西南区(1.030) $>$ 长江中下游区(1.015)。各区域的畜牧业技术进步指数均呈现不同幅度的增长,黄淮海区的畜牧业技术进步涨幅最高,年均增长达4.9%。从规模效率指数来看,仅黄淮海区和长江中下游区畜牧业的规模技术效率指

数 <1 。表现相对最差的是纯技术效率指数,长江中下游区、西北及长城沿线区、华南区和东北区畜牧业的年均纯技术效率均呈现不同幅度的下降,降幅分别为0.85%、0.34%、0.24%和0.20%。综上,畜牧业TFCP增长的主要动力是技术进步,技术效率驱动特征不明显。近年来,在农业政策扶持下,从中央到地方集成了丰硕的农业科研成果,极大推动了畜牧业技术进步。但受限于基层农技推广体系不健全、科研成果供需不匹配等现实因素,许多农业科研成果转化困难,导致畜牧业低碳生产技术效率并未得到有效提升。

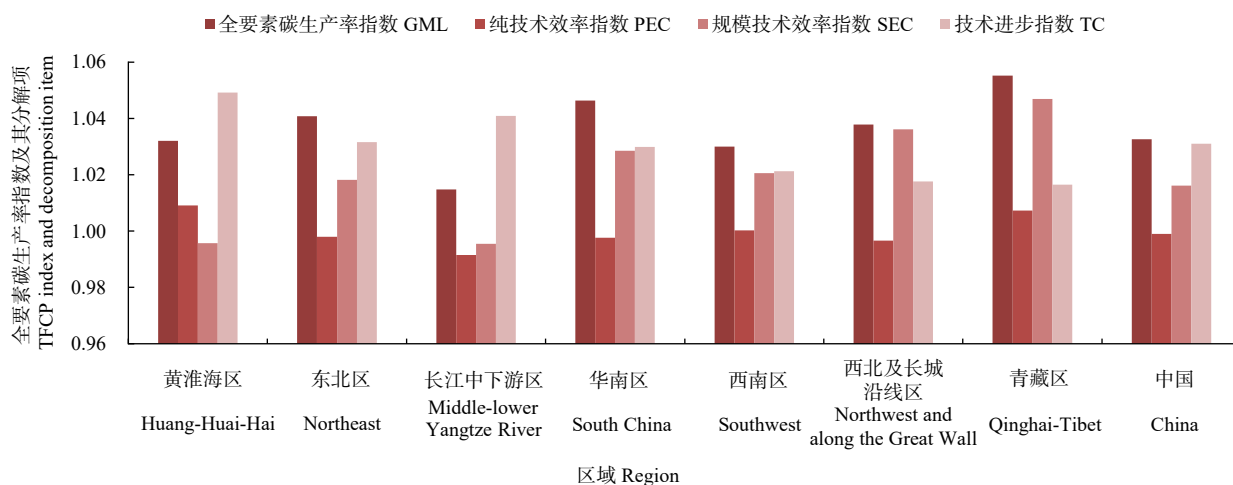


图5 各区域畜牧业全要素碳生产率指数均值及其分解

Fig.5 Average value and decomposition of animal husbandry total factor carbon productivity index in each region

3.3 畜牧业 TFCP 指数分解结果的省域差异

从省域层面来看,以全国畜牧业 TFCP 指数 1.033 为参照,有超过一半(16个)省份的畜牧业 TFCP 增长率高于全国均值,海南畜牧业 TFCP 增长最快,上海畜牧业 TFCP 下降最快。技术效率的全国年均降幅为 0.1%,11 个省份的技术效率指数 >1 。上海、浙江、内蒙古、新疆和陕西的纯技术效率指数位居倒数前五,年均降幅分别为 5.17%、2.74%、2.25%、1.93% 和 1.12%,严重拉低了长江中下游地区、西北及长城沿线区的畜牧业 TFCP 指数。规模技术效率的全国年均增长率为 1.6%,有 17 个省份的年均规模技术效率指数位于其上,其中,海南、内蒙古和西藏的规模效率指数增速位居前三,涨幅依次为 8%、5.2% 和 5%,北京、河北、山东、上海和浙江 5 个省份的畜牧业规模效率指数 <1 。此外,各省份技术变化指数均 >1 ,但技术进步幅度存在省际差异。技术进步最快的 3 个地区为上海、天津和北京,平均涨幅为 9.1%;技术进步相对较慢的省份包括甘肃、湖南、四川、西藏、内蒙古、青海、贵州、云南等 8 个省份,平均涨幅为 1.6%,主要集中在西南区、西北及长城沿线区和青藏区。

4 基于要素集约利用效率的畜牧业 TFCP 增长机制分析

通过三阶段 SSBM-GML 模型,已知影响畜牧业 TFCP 的技术变革因素、规模经济因素和内部管理因素的增长变化,但各因素如何驱动畜牧业 TFCP 增长尚不可知,以下将从要素集约利用视角出发,探讨技术进步、规模效率和技术效率变动因素如何影响各项要素利用效率,进而实现畜牧业 TFCP 增长。考虑到碳排放约束,除要素投入效率外,本研究同时考察非期望产出效率的具体变化。

4.1 投入产出效率变化趋势分析

在劳动力、资本、中间消耗等多种投入下,SSBM 模型除了可以得到畜牧业低碳生产效率外,也可以得到各项投入(产出)的总改进值,实际投入(产出)量得到改进后,可以得到最优目标值。参考李海鹏等^[35]、魏玮等^[36]的研究,本研究以最优目标投入与实际投入的比值计算要素投入效率,最优非期望产出与实际非期望产出的比值计算碳排放效率。结果显示,2001—2020 年,中国畜牧业劳动力、

资本、中间消耗的效率均值分别为 0.786、0.947 和 0.844,反映非期望产出的畜牧业碳排放效率均值为 0.566。即在整个样本期间,资本投入效率 $>$ 中间消耗投入效率 $>$ 劳动力投入效率 $>$ 碳排放效率。由此可见,导致畜牧业全要素碳生产率无法达到生产前沿的主要原因是劳动力投入效率和碳排放效率低下。

图 6 展示了中国畜牧业各项投入要素效率及非期望产出效率的时序变化趋势。可以看出,虽然资本投入效率整体表现最佳,但近年来呈现出不断下降的趋势,年均降速 0.44%,与其他投入要素效率之间的差距逐渐缩小,2015 年以后资本投入效率的年均降速高达 1.31%;中间消耗投入效率较为稳定,在 $[0.818, 0.876]$ 范围内小幅上下波动,“十三五”时期增长明显,年均增速达到 0.84%。说明“十三五”以来,国家高度重视“三农”工作,农业扶持资金和固定资产投资大幅提升,有效提升了要素生产效率,但也因资金错位等问题造成了更多的资本冗余。劳动力投入效率呈现波动式缓慢上升,进入“十三五”时期后,年均增速高达 1.69%。近年来,随着养殖规模的扩大以及养殖技术的提高,各类畜禽产业逐渐实现精细化的生产管理,各类畜禽的单位用工数量大幅下降,单位主产品产量不断提高,带动各类畜禽劳动效率的大幅提高。《全国农产品成品收益资料汇编》^[34]数据表明,2023 年生猪、肉牛、肉羊、蛋鸡、肉鸡和奶牛主产品生产的劳动效率分别为 26.82、32.72、8.01、71.05、116.07 和 140.94 kg/工日,相比 2015 年分别增长了 29.81%、20.92%、11.04%、7.56%、24.74% 和 24.54%。此外,畜牧业碳排放效率变化幅度最大,呈现“先上升-停滞-再上升”的演进趋势,年均增长率高达 2.36%,但效率总体处于较低水平,有显著的提升潜力。

表 3 进一步列出了各省份的年均畜牧业投入及产出效率。对比发现,四川、广西、云南、安徽、贵州、河北等 13 个省份的劳动力投入效率低于全国均值,这些省份大多位于西南区和东北区,存在明显的劳动力过剩;从资本投入效率来看,大多数省份的资本投入效率均 >0.9 ,只有河北、湖南、云南、陕西、山西和内蒙古 6 个省份的资本投入效率介于 0.8~0.9;从中间消耗投入效率来看,湖南、贵州、云南、陕西、内蒙古等 9 个省份中间消耗投入效率低于

0.8。从碳排放效率来看,四川、贵州、云南、陕西、甘肃、山西、内蒙古、新疆等14个省份的畜牧业碳排放效率值不足0.5,尤其贵州、云南、甘肃、内蒙古的畜牧业碳排放效率只有0.166、0.174、0.177和0.192,碳排放效率过低是导致这些省份畜牧业TFCP缺乏竞争力的主要原因。

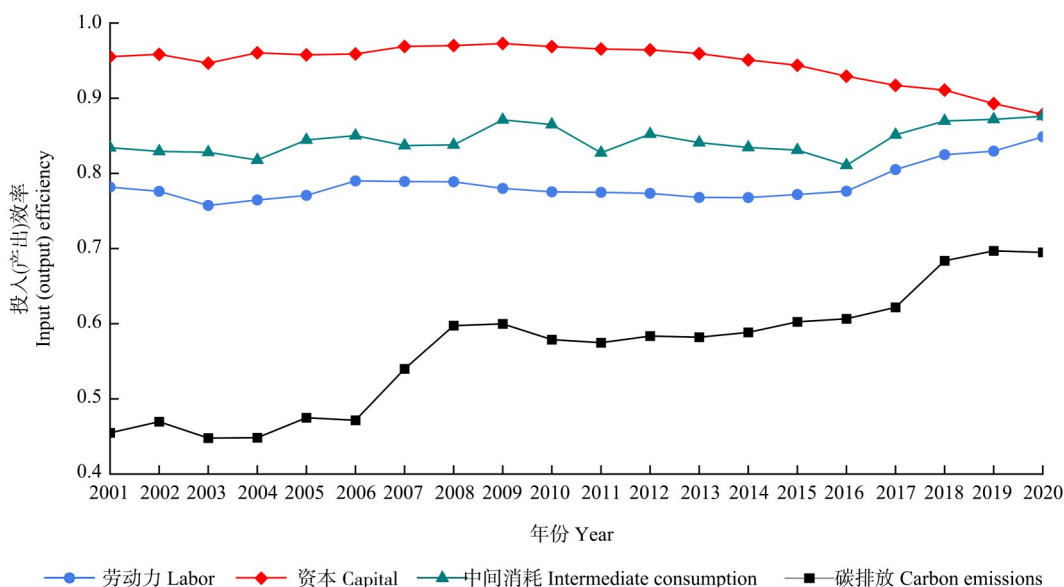


图6 2001—2020年中国畜牧业投入(产出)效率动态变化

Fig. 6 Dynamic change of input (output) efficiency of animal husbandry in China from 2001 to 2020

表3 2001—2020年中国省域畜牧业投入-产出效率均值

Table 3 Average input-output efficiency of animal husbandry in China from 2001 to 2020

区域 Region	省域 Province	投入-产出效率 Input-output efficiency			
		劳动力 Labor	资本 Capital	中间消耗 Intermediate consumption	碳排放 Carbon emissions
东北区 Northeast	辽宁	0.828	0.996	0.956	0.791
	吉林	0.683	0.928	0.868	0.602
	黑龙江	0.637	0.936	0.952	0.608
	均值	0.716	0.953	0.925	0.667
长江中下游区 Middle-lower Yangtze River	上海	0.999	1.000	0.983	1.000
	江苏	0.839	0.991	0.821	0.864
	浙江	0.924	0.957	0.631	0.594
	安徽	0.527	0.922	0.816	0.661
	江西	0.832	0.907	0.711	0.362
	湖北	0.561	0.938	0.940	0.496
	湖南	0.538	0.870	0.496	0.246
	均值	0.746	0.941	0.771	0.603
华南区 South China	福建	0.946	0.936	0.564	0.466
	广东	0.740	0.994	0.822	0.766
	海南	0.999	0.999	1.000	0.909
	均值	0.895	0.976	0.795	0.714

表3(续)

区域 Region	省域 Province	投入-产出效率 Input-output efficiency			
		劳动力 Labor	资本 Capital	中间消耗 Intermediate consumption	碳排放 Carbon emissions
青藏区 Qinghai-Tibet	西藏	1.000	0.997	0.993	0.924
	青海	1.000	0.999	1.000	0.578
	均值	1.000	0.998	0.996	0.751
西南区 Southwest	广西	0.459	0.921	0.941	0.534
	重庆	0.943	0.991	0.858	0.635
	四川	0.385	0.955	0.812	0.326
	贵州	0.643	0.904	0.734	0.166
	云南	0.554	0.856	0.638	0.174
	均值	0.597	0.925	0.797	0.367
西北及长城 沿线区 Northwest and along the Great Wall	陕西	0.914	0.895	0.708	0.317
	甘肃	0.848	0.967	0.977	0.177
	山西	0.904	0.866	0.865	0.359
	内蒙古	0.752	0.877	0.785	0.192
	宁夏	1.000	0.999	0.994	0.890
	新疆	0.980	0.961	0.858	0.283
	均值	0.900	0.928	0.865	0.370
黄淮海区 Huang-Huai-Hai	北京	1.000	1.000	0.915	0.933
	天津	0.946	0.990	0.983	0.944
	河北	0.505	0.820	0.646	0.432
	山东	0.868	1.000	0.968	0.836
	河南	0.605	0.968	0.929	0.478
	均值	0.785	0.956	0.888	0.725

4.2 作用机制分析

为进一步厘清纯技术效率、规模效率和技术变革因素影响畜牧业TFCP增长的内在机制,本研究分别以畜牧业各项要素集约利用效率为因变量,纯技术效率指数、规模效率指数和技术进步指数为自变量,构建回归模型。由于畜牧业TFCP分解指数均为与上一年的比值,为保持一致,各投入及产出要素的效率也采用与上一年的比值,具体模型形式如下:

$$Y_{k,it} = \alpha + \beta_1 Z_{it}^1 + \beta_2 Z_{it}^2 + \beta_3 Z_{it}^3 + \epsilon_{it} \quad (6)$$

式中: t 为年份, i 为全国各省份, $Y_{k,it}$ 为因变量,当 $k=1,2,3$ 时,分别代表 t 时期 i 省份的畜牧业劳动力投入效率、资本投入效率、中间消耗投入效率; Z_{it}^1 、 Z_{it}^2 和 Z_{it}^3 分别为纯技术效率指数、规模效率指数、技

术进步指数, β_1 、 β_2 和 β_3 为相应的系数, α 表示截距项, ϵ_{it} 为随机误差项。回归结果如下表4所示。

从劳动力回归结果来看,技术效率、技术进步增长都可以促进劳动力投入效率的提高,技术效率和技术进步增长1%,劳动力投入效率会分别提高0.096%和0.123%,规模效率变化对劳动力投入效率的影响不显著;技术效率、技术进步增长均有利于资本投入效率的提高,但提高效果不及劳动力投入效率,同样规模效率对其影响不显著;中间消耗回归结果显示,技术效率、规模效率和技术进步增长对畜牧业中间消耗投入效率的影响均在1%的水平上显著为正,技术效率、规模效率和技术进步每增长1%,畜牧业中间消耗投入效率会分别提高0.227%、0.130%和0.131%。此外,技术效率在

表 4 中国畜牧业全要素碳生产率增长机制的回归结果
Table 4 Regression results of the total factor carbon productivity
growth mechanism of animal husbandry in China

变量 Variable	投入-产出效率 Input-output efficiency			
	劳动力 Labor	资本存量 Capital	中间消耗 Intermediate consumption	碳排放 Carbon emissions
常数 Constant term	0.759*** (0.119)	0.830*** (0.067)	0.510*** (0.137)	0.604** (0.274)
PEC	0.096* (0.051)	0.071*** (0.022)	0.227*** (0.062)	0.233** (0.107)
SEC	0.027 (0.034)	0.033 (0.022)	0.130*** (0.044)	0.044 (0.090)
TC	0.123** (0.057)	0.059** (0.024)	0.131*** (0.042)	0.156 (0.098)

注：括号内为稳健标准误。
Note: Robust standard errors are in parentheses.

5% 的显著水平上正向促进畜牧业碳排放效率的提升,技术效率每提高 1%,将导致畜牧业碳排放效率增加 0.233%。相对而言,技术效率主要通过调整资本、中间消耗投入及提高碳排放效率,促进畜牧业 TCFP 提升;规模效率的贡献主要体现在提高饲料、燃料等中间投入利用效率;技术进步偏向于通过要素结构调整,提高投入要素利用效率,对于缩减非期望产出冗余效果并不明显。

5 结论与建议

本研究基于 2001—2020 年中国 31 个省(市、自治区)的面板数据,利用三阶段超效率 SBM 模型,测算出剔除环境因素和随机干扰的省域畜牧业低碳生产效率;并结合 GML 指数,得到畜牧业全要素碳生产率(TFCP)指数及其增长的核心因素:技术进步变化、技术效率变化、规模效率变化及要素配置因素。在此基础上,考虑要素投入利用效率以及碳排放效率的变动,研究进一步探讨技术进步、技术效率和规模效率变化对各项投入及产出效率的影响,明晰了畜牧业 TFCP 增长的“黑箱”。主要结论有以下 4 点:

1)SFA 回归结果表明,剔除环境因素和随机干扰影响后,畜牧业低碳生产效率较第一阶段有明显提升,但总体水平并不高(0.695),与效率前沿面存在较大差距。经济发展、政府支持、牧业产业结构以及科技创新对畜牧业低碳生产效率均有显著影响,但各变量对各投入变量松弛值的影响存在差

异。畜牧业低碳生产效率呈现“华南区>黄淮海区>东北区>青藏区>长江中下游区>西北及长城沿线区>西南区”的空间格局。

2)从增长源泉来看,20 年间中国畜牧业 TFCP 实现了 3.33% 的年均增长,其增长主要源于技术进步(3.1%)和规模经济(1.6%),而技术效率变化出现退步(−0.1%)。上海、浙江、内蒙古、新疆和陕西的技术效率指数位居倒数前五,严重拉低长江中下游区、西北及长城沿线区畜牧业 TFCP 指数。

3)从投入产出效率变动来看,样本期间中国畜牧业资本投入效率>中间消耗投入效率>劳动力投入效率>碳排放效率,劳动力投入效率和碳排放效率低下是导致畜牧业 TFCP 偏离生产前沿的主要原因。畜牧业碳排放效率虽然实现了年均 2.31% 的增长,但效率总体处于较低水平(0.566),提升空间较大。

4)从驱动机制来看,技术效率增长主要通过调整资本和中间消耗投入,以及提高碳排放效率,促进畜牧业 TFCP 增长;规模效率增长可以提高饲料、燃料等中间投入利用效率,进而提高畜牧业 TFCP;技术进步偏向于通过要素结构调整,提高要素利用效率,但对提高碳排放效率的效果并不显著。

结合上述结论,为进一步提高畜牧业全要素碳生产率,本研究提出以下 3 点建议:

1)制定差异化的畜牧业低碳发展策略。各地区要考虑经济发展水平、牧业产业结构、技术创新、

要素管理水平等对各地区畜牧业低碳生产效率增长的不同作用,制定并实施与地区畜牧业发展阶段相适应的政策。着力解决西北及长城沿线区技术进步缓慢、管理水平不高导致的效率低下问题,优化畜牧业生产外部环境,在大力发展草食畜牧业同时注重畜牧业低碳技术的推广与应用;西南区应重视畜牧业人力资本培养,实现人力资本深化和劳动集约以提高劳动力利用效率,同时加强畜牧业低碳技术推广,提升畜牧业碳排放效率。

2)充分发挥技术进步对畜牧业全要素碳生产率增长的促进作用。继续加大畜牧业科技研发的资金投入和政策支持,提高各项投入要素的利用效率,因地制宜进行资源优化配置;充分认识各地区畜牧业碳排放现状及减排能力,要加强畜牧业低碳关键核心技术的研发与应用,并利用区域间的资源要素流动、人才交流与技术共享带来的辐射效应,降低畜牧业碳排放强度,提高畜牧业碳排放效率以推动畜牧产业低碳转型升级。

3)重视提升技术效率对畜牧业全要素碳生产率增长的推动作用。努力消除畜牧业生产管理无效率对中国畜牧业全要素碳生产率全要素增长的不利影响,通过畜牧产业政策倾斜、投资引导等,深化要素市场化改革,发挥市场资源配置功能;充分利用现代畜牧业生产技术、畜牧信息交流平台、养殖技能培训等方式,促进劳动力、资本、中间消耗等要素集约利用,实现从传统畜牧业向现代高质量畜牧业的有效衔接。

参考文献 References

- [1] Rosenzweig C, Mbow C, Barioni L G, Benton T G, Herrero M, Krishnapillai M, Liwenga E T, Pradhan P, Rivera-Ferre M G, Sapkota T, Tubiello F N, Xu Y L, Mencos Contreras E, Portugal-Pereira J. Climate change responses benefit from a global food system approach[J]. *Nature Food*, 2020,1(2):94-97
- [2] 励汀郁,熊慧,王明利.“双碳”目标下中国奶牛产业如何发展:基于全产业链视角的奶业碳排放研究[J]. 农业经济问题,2022(2):17-29
Li T Y, Xiong H, Wang M L. How does China's dairy industry develop under "the carbon peaking and carbon neutrality goal": Study on carbon emission of dairy industry from the perspective of whole industry chain [J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2022(2):17-29(in Chinese)
- [3] 白雪洁,孙献贞. 互联网发展影响全要素碳生产率:成本、创新还是需求引致[J]. 中国人口·资源与环境,2021,31(10):105-117
Bai X J, Sun X Z. Impact of internet development on total factor carbon productivity: induced by cost, innovation, or demand [J]. *China Population, Resources and Environment*, 21,31(10):105-117
- [4] 姚成胜,钱双双,李政通,梁龙武. 中国省际畜牧业碳排放测度及时空演化机制[J]. 资源科学,2017,39(4):698-712
Yao C S, Qian S S, Li Z T, Liang L W. Provincial animal husbandry carbon emissions in China and temporal-spatial evolution mechanism[J]. *Resources Science*, 2017,39(4): 698-712(in Chinese)
- [5] 于占民,唐增,高晶,喜娟. 我国畜牧业全要素生产率的动态分析:基于DEA模型的Malmquist指数方法[J]. 中国畜牧杂志,2017,53(5):132-136
Yu Z M, Tang Z, Gao J, Xi J. Dynamic analysis of total factor productivity in Animal husbandry in China: Malmquist index method based on DEA model [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2017, 53(5):132-136 (in Chinese)
- [6] 郑微微,胡浩,周力. 基于碳排放约束的生猪养殖业生产效率研究[J]. 南京农业大学学报:社会科学版,2013,13(2):60-67.
Zheng W W, Hu H, Zhou L. On pig breeding production efficiency based on carbon emissions constraints [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University: Social Sciences Edition*, 2013,13(2):60-67(in Chinese)
- [7] Han Z, Han C, Yang C. Spatial econometric analysis of environmental total factor productivity of animal husbandry and its influencing factors in China during 2001 - 2017[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 723: 137726 DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.137726
- [8] 易青,李秉龙,耿宁. 基于环境修正的中国畜牧业全要素生产率分析[J]. 中国人口·资源与环境,2014,24(S3):121-125
Yi Q, Li B L, Geng N. Environmentally-adjusted analysis of total factor productivity of China's animal husbandry [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014,24(S3):121-125 (in Chinese)
- [9] 李翠霞,曹亚楠. 中国奶牛养殖环境效率测算分析[J]. 农业经济问题, 2017,38(3):80-88,111-112
Li C X, Cao Y N. Estimation and analysis of environmental efficiency in dairy farming in China[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2017, 38(3): 80-88,111-112 (in Chinese)
- [10] 梁耀文,王明利,马晓萍,李鹏程. 中国畜牧业生态效率时空特征及溢出效应研究[J]. 中国农业资源与区划,2023,44(8):189-201
Liang Y W, Wang M L, Ma X P, Li P C. Study on the spatial and temporal characteristics and spillover effects of eco-efficiency in China's animal husbandry [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023,44(8):189-201(in Chinese)
- [11] 李金钲,马静静,魏伟. 中国八大综合经济区能源碳排放效率的区域差异研究[J]. 数量经济技术经济研究,2020,37(6):109-129
Li J K, Ma J J, Wei W. Study on regional differences of energy carbon emission efficiency in eight economic areas of China [J]. *Journal of Quantitative & Technological Economics*, 2019, 37(6): 109-129 (in Chinese)
- [12] 刘亦文,欧阳莹,蔡宏宇. 中国农业绿色全要素生产率测度及时空演化特征研究[J]. 数量经济技术经济研究,2021,38(5):39-56
Liu Y W, Ouyang Y, Cai H Y. Evaluation of China's agricultural green TFP and its spatiotemporal evolution characteristics [J]. *Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2021,38(5):39-56(in Chinese)
- [13] Fried H O, Lovell C A K, Schmidt S S, Yaisawarng S. Accounting for environmental effects and statistical noise in data envelopment analysis [J]. *Journal of Productivity Analysis*, 2002,17, 157-174
- [14] 秦青. 区域工业企业技术创新效率及影响因素:基于三阶段SBM模型的分析[J]. 地域研究与开发,2018,37(2):47-51
Qin Q. Evaluation of technological innovation efficiency in regional

- industry and environmental factors analysis based on three-stage SBM [J]. *Areal Research and Development*, 2018, 37(2): 47-51 (in Chinese)
- [15] 华坚, 任俊, 徐敏, Fong E. 基于三阶段 DEA 的中国区域二氧化碳排放绩效评价研究[J]. 资源科学, 2013, 35(7): 1447-1454
- Hua J, Ren J, Xu J, Fong E. Evaluation of Chinese regional carbon dioxide emissions performance based on a three-stage DEA model [J]. *Resources Science*, 2013, 35(7): 1447-1454 (in Chinese)
- [16] 陈杰, 许朗. 基于面板三阶段 DEA-Malmquist 模型的中国农业绿色水資源利用效率研究[J]. 地理科学, 2023, 43(4): 709-718
- Chen J, Xu L. Utilization efficiency of Chinese agricultural green water resources based on panel three-stage DEA-Malmquist model [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 43(4): 709-718 (in Chinese)
- [17] 闫佳惠, 张越杰. 中国肉牛主产区碳排放效率时空演化特征及空间分布格局研究[J]. 地理科学, 2023, 43(5): 879-888
- Yan J H, Zhang Y J. Spatio-temporal evolution characteristics and spatial distribution pattern of carbon emission efficiency in main beef cattle producing areas in China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 43(5): 879-888 (in Chinese)
- [18] 付明辉, 祁春节. 要素禀赋、技术进步偏向与农业全要素生产率增长: 基于 28 个国家的比较分析[J]. 中国农村经济, 2016(12): 76-90
- Fu M H, Qi C J. Factor endowment, technological progress bias, and agricultural total factor productivity growth: A comparative analysis of 28 countries [J]. *Chinese Rural Economy*, 2016(12): 76-90 (in Chinese)
- [19] 李冬, 杨万平. 面向经济高质量发展的中国全要素生产率演变: 要素投入集约还是产出结构优化[J]. 数量经济技术经济研究, 2023, 40(8): 46-68
- Li D, Yang W P. Evolution of China's TFP for high-quality economic development: Factor input intensification or output structure optimization [J]. *Journal of Quantitative & Technological Economics*, 2019, 40(8): 46-68 (in Chinese)
- [20] 李小克, 李小平. 中国全要素生产率演变的测度和多重效应分解: 偏向性技术进步视角[J]. 经济研究, 2022, 57(4): 191-208
- Li X K, Li X P. Measurement and multiple effect decomposition of China's total factor productivity growth: A perspective based on directed technological change [J]. *Economic Research Journal*, 2002, 57(4): 191-208 (in Chinese)
- [21] 任海军, 姚银环. 资源依赖视角下环境规制对生态效率的影响分析: 基于 SBM 超效率模型[J]. 软科学, 2016, 30(6): 35-38
- Ren H J, Yao Y H. Effect of environmental regulation on eco-efficiency from the perspective of resource dependence: Based on super efficiency SBM model [J]. *Soft Science*, 2016, 30(6): 35-38 (in Chinese)
- [22] 王勇, 赵晗. 中国碳交易市场启动对地区碳排放效率的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(1): 50-58
- Wang Y, Zhao H. The impact of China's carbon trading market on regional carbon emission efficiency [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2019, 29(1): 50-58 (in Chinese)
- [23] Pastor J T, Lovell C A K. A global Malmquist productivity index [J]. *Economics Letters*, 2005, 88(2): 266-271
- [24] Andersen M A, Alston J M, Pardey P G. Capital services in U S agriculture: Concepts, comparisons, and the treatment of interest rates [J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 2011, 93(3): 718-738
- [25] 尹朝静, 杨坤, 田云. 中国农业生态全要素生产率增长: 经验事实、区域差异与动态演进[J]. 中国农村经济, 2024(2): 20-43
- Yin C J, Yang K, Tian Y. China's agricultural ecological total factor productivity growth in: Empirical facts, regional differences, and dynamic evolution [J]. *Chinese Rural Economy*, 2024(2): 20-43 (in Chinese)
- [26] 李谷成, 范丽霞, 冯中朝. 资本积累、制度变迁与农业增长: 对 1978~2011 年中国农业增长与资本存量的实证估计[J]. 管理世界, 2014(5): 67-79, 92
- Li G C, Fan L X, Feng Z C. Capital accumulation, institutional change and agricultural growth: Empirical estimation of agricultural growth and capital stock in China from 1978 to 2011 [J]. *Journal of Management World*, 2014(5): 67-79, 92 (in Chinese)
- [27] 田云, 尹恣昊. 中国农业碳排放再测算: 基本现状、动态演进及空间溢出效应[J]. 中国农村经济, 2022(3): 104-127
- Tian Y, Yin M H. Re-evaluation of China's agricultural carbon emissions in China: Basic status, dynamic evolution and spatial spillover effect [J]. *China Rural Economy*, 2022(3): 104-127 (in Chinese)
- [28] 李强, 刘冬梅. 中国农业科研投入对农业增长的贡献研究: 基于 1995—2007 年省级面板数据的实证分析[J]. 中国软科学, 2011(7): 42-49, 81
- Li Q, Liu D M. Contribution of agricultural research input to agricultural growth in China: An empirical analysis based on provincial panel data from 1995 to 2007 [J]. *China Soft Science*, 2011(7): 42-49, 81 (in Chinese)
- [29] 农业部, 国家发展改革委, 科技部, 财政部, 国土资源部, 环境保护部, 水利部, 国家林业局. 全国农业可持续发展规划(2015—2030 年) [EB/OL]. [2015-05-28] https://www.gov.cn/xinwen/2015-05/28/content_2869902.htm
- Ministry of Agriculture, National Development and Reform Commission, Ministry of Science and Technology, Ministry of Finance, Ministry of Land and Resources, Ministry of Environmental Protection, Ministry of Water Resources, State Forestry Administration. National agricultural sustainable development plan (2015-2030) [EB/OL]. [2015-05-28] https://www.gov.cn/xinwen/2015-05/28/content_2869902.htm
- [30] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2002—2021
- National Bureau of Statistics of China. *China Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2002-2021
- [31] 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, 2002—2021
- Rural Socioeconomic Survey Division of the National Bureau of Statistics. *China Rural Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2002-2021
- [32] 中国畜牧业年鉴编辑委员会. 中国畜牧业年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002—2014
- Editorial Committee of China Animal Husbandry Yearbook. *China Animal Husbandry Yearbook* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2008-2014
- [33] 中国畜牧兽医年鉴编辑委员会. 中国畜牧兽医年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015—2020
- Editorial Committee of China Animal Husbandry and Veterinary Yearbook. *China Animal Husbandry and Veterinary Yearbook* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2015-2020 (in Chinese)
- [34] 国家发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本收益资料汇编, 2016—2024 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2016-2024
- Price Department of the National Development and Reform Commission. *Compilation of National Agricultural Product Cost Benefit Data*, 2016-2024 [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2016-2024 (in Chinese)

- [35] 李海鹏, 罗丽, 张雄, 张俊彪. 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 Li, Zhang X, Zhang J B. Dynamic change of agricultural energy efficiency and its influencing factors in China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30 (12): 105-115 (in Chinese)

- [36] 魏玮, 文长存, 崔琦, 解伟. 农业技术进步对农业能源使用与碳排放的影响:

基于GTAP-E模型分析[J]. 农业技术经济, 2018(2): 30-40

Wei W, Wen C C, Cui Q, Xie W. The impacts of technological advance on agricultural energy use and carbon emission-an analysis based on GAPT-E model[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2018(2): 30-40 (in Chinese)

责任编辑: 王岩



第一作者简介: 杜瑞瑞, 现为西北农林科技大学经济管理学院博士研究生。攻读博士期间, 以第一作者在 *Agricultural Economics—Zemledska Ekonomika*、*Science of the Total Environment* 等 SSCI、SCI 期刊发表学术论文 2 篇, 以共同作者发表学术论文 8 篇, 相关论文获得西北农林科技大学第十届大学生创新创业论坛研究生一等奖, 参与研究生科研创新项目并以优秀结题。此外, 多次参与团队农业农村部软科学、国家社科重大、国际合作项目、中国工程院行业院重大项目、陕西省哲学社会科学研究专项等课题的申报、中期和结题工作。



通讯作者简介: 赵敏娟, 九三学社成员, 管理学博士(西北农林科技大学)、农业与自然资源经济学博士(University of Connecticut, USA); 现为西安财经大学校长, 西北农林科技大学教授, 博士生导师。入选教育部“长江学者奖励计划”青年学者、国家万人计划哲学社会科学领军人才、农业农村部“神农英才计划”领军英才、国务院特殊津贴专家、三秦学者、陕西省中青年创新领军人才。先后主持完成国家自然科学基金项目、国家社会科学基金项目、国家软科学重大项目等 30 余项, 在《中国科学院院刊》、《中国农村经济》、《农业经济问题》、*Environmental and Resource Economics* 等期刊发表论文 100 余篇。先后将科研成果及时转为决策建议十余份, 多篇调研成果获农业农村部韩长赋部长等省部级主要领导批示, 观点和建议多次被《经济日报》《陕西新闻联播》等多家媒体和平台报道。