

“双碳”目标下农业机械化与农业绿色发展

——基于绿色全要素生产率的视角

王翌秋¹,徐丽¹,曹蕾^{2*}

(1.南京农业大学金融学院,江苏南京210095;
2.农业农村部南京农业机械化研究所,江苏南京210014)



摘要 采用2004—2020年我国30个省的省际面板数据和随机前沿生产函数法,实证分析农业机械化对农业绿色全要素生产率的影响,并从技术和能源消耗类型两个角度探究农业绿色发展的提升路径。研究表明:多年来我国农业机械化发展对推进农业现代化做出了巨大贡献,但传统的农业机械化增长方式并未促进农业绿色技术进步,且因燃油消耗造成温室气体排放等加剧环境污染,最终无助于农业绿色全要素生产率的提高。因此,应对农业机械进行绿色转型升级,通过农业绿色机械化技术及绿色农机的使用提高农业绿色全要素生产率,促进农业绿色发展;加强农机科技创新,促进绿色清洁农机研发和量化生产;优化农机购置补贴、作业补贴等扶持政策,向绿色农机倾斜,促进机械化秸秆还田、节水灌溉、深施化肥等绿色机械化技术的推广应用。

关键词 农业机械化; 绿色发展; 农业绿色全要素生产率; 农业绿色机械化技术

中图分类号:F326 **文献标识码:**A **文章编号:**1008-3456(2023)06-0056-14

DOI编码:10.13300/j.cnki.hnwkxb.2023.06.006

工业文明飞速发展带来严重的生态危机和农业困境,出路在于工业文明向生态文明转型、产业化农业向农业可持续回归^[1]。近现代以来,工业化在一定程度上冲击了我国环境友好型传统生产模式,一方面实现了生物化、化学化和机械化的产业化发展,另一方面对我国的生态环境产生“负外部性”,给农业可持续发展带来挑战。全球农业每年排放的温室气体约占总排放量的20%,气体重量合计约150亿吨,已然成为碳排放“大户”,而农业污染排放一定程度上受到农业现代技术的影响^①。我国农业受人均拥有生产资源较低、边际收益递减和污染排放加剧等多重因素的制约,提高农业全要素生产率是实现农业经济可持续发展的有效途径^[2,3]。据统计,相较于工业等污染源,我国农业源污染量更大^②。在乡村振兴战略引领下,我国逐渐步入绿色生态发展的农业4.0阶段^③,农业农村现代化发展要寻求资源消耗、生产效率与生态环境三者的协调发展,应形成一种更为绿色低碳的农业生产方式^[4]。因此,研究如何提高农业绿色全要素生产率、促进农业绿色可持续发展是十分重要的话题,在农业全要素生产率的测度指标中纳入环境、资源等要素十分必要。

农业机械化是农业现代化的重要支撑,在增加农业经济产出、调整产业结构等方面发挥着重要作用。发达国家早在20世纪80年代便开始实施农业机械化与农业现代化同步发展战略,并由此进

收稿日期:2022-12-09

基金项目:中国农业科学院创新工程项目“农业机械化技术系统优化与评价”[农科院办(2014)216号];江苏高校哲学社会科学研究重大项目“‘一带一路’战略下江苏企业融资约束与绿色技术创新”(2020SJZDA074)。

*为通讯作者。

① 资料来源于联合国粮食与农业组织(FAO)发布的《2016年粮食及农业状况》。

② 资料来源于《第一次全国污染源普查公报》。

③ 农业4.0(社会化生态农业),具体指的是用网络等现代化手段凸显农业的非经济功能,使农村经济回嵌乡土社会和资源环境,最终实现全人类回嵌大自然的生态文明新时代。

入农业机械化快速发展时期,实现了农业高质量发展。自2004年实施《农业机械化促进法》以来,我国农业机械化步入高速发展时期。2004—2021年中央累计投入农机购置补贴资金2582亿元^①,农机总动力从2004年的6.40亿千瓦上升到2021年的10.78亿千瓦,增长了68%。农业机械的使用促进资本型技术进步,促进我国农业生产由传统“劳动集约型”加快向资本集约型生产方式转变,同时通过提高作业效率、提高农业生产技术进步^[5],进而最终提高全要素生产率。但值得注意的是农业机械化的发展也可能存在不利于农业生产环境和绿色发展的一面,农业机械的大量使用增加了能源消耗,使得二氧化碳、氮氧化物等污染物的排放加剧^[6],部分超期服役的农业机械因高能耗造成更为严重的环境污染,成为阻碍农业达到碳达峰目标的不确定性因素^[7]。农业机械成为农业能源消耗和环境污染排放不可忽视的源头,是我国农业碳排放的重要因素^[8]。《“十四五”全国农业机械化发展规划》中明确提出“加快推动农业机械化智能化、绿色化”,要求加快绿色智能农机装备和节本增效农业机械化技术推广应用,促进农机节能减排,实现农业碳达峰、碳中和。2023年中央一号文件《关于做好2023年全面推进乡村振兴重点工作的意见》要求加快先进农机研发推广和推进农业绿色发展,强化农业科技和装备支撑。因此,分析农业机械化对绿色全要素生产率的影响,探讨以绿色发展为导向的农业机械化发展政策支持体系具有重要意义。

现有文献对农业绿色全要素生产率的研究较为丰富,大量研究证明了农业绿色技术进步是农业绿色全要素生产率的动力^[9-11],但鲜有文献深入研究农业机械化与农业绿色全要素生产率之间的关系,对二者之间的传导路径缺乏探讨。一些研究认为农业机械化不利于农业绿色全要素生产率的提高^[6,13-16],例如,葛鹏飞等^[13]测算分解了我国各省农业绿色全要素生产率,证明了农业绿色无效率的主要原因是碳排放和农用机械动力投入的无效率;Jiang等^[6]证明了农业机械化的发展因增加能源消耗和环境污染而不利于农业能源—环境绩效的提高;王兵等^[14]对我国农业绿色全要素生产率进行要素分解和贡献分析,证明了农业机械生产率阻碍了农业绿色全要素生产率的增长;杨泽宸等^[15]认为种植业农业机械动力的提升会加大化石燃料的消耗和机械投入,造成二氧化碳等污染物排放增多,不利于农业绿色全要素生产率提高;Liu等^[16]测算了基于碳排放的中国农业绿色全要素生产率,研究认为农业机械的使用会增加柴油消耗进而导致环境污染,降低农业绿色全要素生产率。但也有少量文献持相反观点,例如,崔宁波等^[4]和郭永奇等^[12]研究表明粮食主产区农业机械总动力的增加有利于农业绿色全要素生产率的提高。

绿色低碳是我国农业发展的重要目标,在农业农村现代化快速发展的背景下,农业机械化水平的提高是否有助于农业绿色发展,此为本文研究的主题。基于此,本文使用2004—2020年我国30个省的省际面板数据,科学构建指标体系测度各省农业绿色全要素生产率,进而评估我国农业绿色发展的现状,实证分析农业机械化对农业绿色全要素生产率的影响,农业机械化对能源消耗和环境污染的影响,探究农业机械化影响农业绿色发展的内在逻辑和传导机制。本文从农业机械化技术和能源消耗类型两个角度探索农业绿色全要素生产率的提升路径,以寻求农业机械化转型升级的有效路径,为促进我国加快农业机械化全程全面高质高效发展和农业生产实现绿色转型提供决策参考。

一、理论分析与研究假设

1. 理论分析

传统的经济增长理论认为全要素生产率可以反映技术进步和要素效率,是测度经济发展和增长动力的核心指标,但这一指标忽略了生态环境破坏对经济可持续发展的影响^[17-18]。因此,学者逐渐将环境和生态相关变量纳入农业全要素生产率的研究框架中,以全面反映农业发展的质量问题,进而衍生出农业绿色全要素生产率(GTFP)、绿色GDP等概念^[19-20]。当前,在考虑资源投入约束的基础上引入生态环境因素,成为评判一个国家或地区农业绿色发展质量的重要依据,农业绿色全要素生产

① 资料来源于农业农村部农业机械化推广司《农业农村部 财政部有关司局负责人就2021-2023年农机购置补贴政策实施工作答记者问》等。

率已然成为衡量农业绿色发展质量的关键指标^[4,21]。

关于农业全要素生产率的测度方法,现有研究主要采用前沿面板的非参数数据包络分析法(DEA)和参数随机前沿分析法(SFA)两种方法,但这些方法以往只侧重劳动、土地和资本等传统投入变量,不能契合当下的绿色发展理念。因此,一些学者结合环境因素完善了农业TFP测算体系,构建了以能源和污染排放等环境变量为非期望产出的农业绿色全要素生产率测算方法^[10,22]。由于环境污染物的价格难以衡量,学者们多采用多投入多产出的DEA方法来测算农业绿色全要素生产率。杨骞等^[18]使用超效率SBM方法,将农业面源污染和碳排放设为非期望产出,进而测度农业绿色全要素生产率。郭海红等^[10]使用改进EBM模型,基于“资源—能源—经济—环境”四要素进行测算,分析了农业绿色全要素生产率的时空演变。Hoang等更多学者则使用SFA方法来测算兼顾环境和经济效益的农业绿色全要素生产率指数^[4,23-25]。总的来说,SFA方法更符合我国农业生产的特点,且得益于我国近年来碳排放交易市场的迅速发展,现排污费征收标准逐渐规范,可在一定程度上解决污染物价格合理度量难题^[3,26],使该方法得以更好地使用。如展进涛等^[26]考虑碳排放成本和氮磷流失等环境污染变量,使用SFA方法对GTFP进行测算。本文参考王留鑫等^[24]的方法,选用一步法的超越对数SFA模型测度农业绿色全要素生产率,以探究我国农业绿色发展。

现有研究普遍将农业绿色全要素生产率分解为农业绿色技术进步和农业绿色技术效率指数,以综合考察农业绿色全要素生产率增长模式。研究认为我国农业绿色生产率增长是一种典型的技术推进型增长模式,主要驱动力是农业绿色技术进步,主要来自“最佳实践者”的“最佳实践”和生产边界向外扩张,而非农业绿色技术效率^[20]。农业绿色技术进步可产生技术效应和学习效应,可减少农业能源消耗,减少碳减排成本,有利于碳减排行为;可提高资源利用率,增加产量,最终促进农业绿色全要素生产率的提高^[27-28]。

在我国农业机械化进程中,作为农业绿色技术进步重要组成部分的绿色农机(即清洁能源农机)和绿色机械化技术(如机械化秸秆还田、机械化深施化肥等)因受制于技术、制造和推广等难题,在实践中的采用率非常低^[29],导致我国农业机械化的发展尚未有效促进农业绿色技术进步,进而制约农业绿色全要素生产率的提高。据统计,我国农用柴油的碳排放量占总碳排放量的60%^[16],农用柴油发动机总动力的占比始终居高不下,以2021年为例,农用柴油发动机总动力占农机总动力的比重高达77.54%。然而我国仍有大量土地未实现规模化经营,加之部分农机作业人员素质不高、专业知识不足,导致农机利用率和作业效率不高,不利于农机作业节能减排。此外,受制于部分农业生产经营人员绿色低碳意识不强、经营观念落后等因素,农机作业往往伴随着化肥等大量农资的消耗和大量老旧农机的超期服役,秸秆还田、深施化肥、高效植保等农业绿色机械化技术推广应用不够,均不利于农业绿色发展^[1,29]。

2. 研究假说

近十多年来,我国农业机械总量持续增长,但超半数均为能耗高、效率低的小型农业机械^[29],传统农机使用的增加意味着更多柴油等化石燃料的消耗,导致碳排放、面源污染等环境污染加剧,不利于农业绿色全要素生产率的提高。同时,受制于我国工业基础条件差、发展起步较晚等原因,先进的绿色动力技术研发投入较少、科技成果转化率低、制造工艺不强,导致我国农机存在能源消耗量大、燃烧热效率低、电动等清洁能源机械动力难以匹配现实需求等问题,限制了农业绿色技术进步。而相比于农业绿色技术效率,农业绿色技术进步是农业绿色全要素生产率的根本动力因素。由此,本文提出假说1。

H₁:传统的农业机械化增长方式既不利于农业绿色技术进步,也不利于农业绿色全要素生产率的提高。

农业机械化快速发展不可避免地增加了能源消耗和农业面源污染治理的负担。化石燃料的燃烧是农业二氧化碳和氮氧化物排放的主要来源,其中柴油和汽油相比于风能、电能、太阳能等清洁能源会造成更多的环境污染。与此同时,我国还存在一些老旧农机超期服役和问题农机带病服役的现

象,相比于新农机,其消耗能源更多、碳排放更高,更不利于绿色发展。我国农业机械化的发展普遍存在农业绿色机械化技术的采用率低、农业机械操作人员绿色低碳的专业知识掌握不足等问题。因此,本文提出假说2。

H₂:传统的农业机械化增长方式导致农业温室气体排放等农业环境污染的增加。

从技术的角度出发,农业绿色机械化技术是将农业机械和绿色技术相结合的一组以增产、减少投入和环境污染为目标的现代化技术,包括机械化深施化肥、秸秆还田、节水灌溉和免耕播种等,是实现农业绿色生产发展的重要途径。相比于传统农机化作业,采用绿色机械化技术更有助于提高土壤质量和固碳能力,从而提高作物产量和减少碳排放^[30]。现阶段的农业机械绝大多数是靠内燃机驱动的,需要消耗大量柴油和汽油等不可再生能源,加剧污染排放。因此,从能源消耗类型的角度出发,绿色清洁型农机(后文称绿色农机)可以有效减少化石燃料的燃烧,有利于碳排放、面源污染等的减少,它一定程度代表了我国农业绿色能源技术创新,有利于农业绿色技术进步。因此,促进农业绿色技术进步不仅要加大力度研发应用绿色农机,还应加强农业绿色机械化技术的推广应用。鉴于此,本文提出假说3。

H₃:农业绿色机械化技术的应用和绿色农机的使用对农业绿色全要素生产率的提高具有促进作用。

二、数据、变量与模型

1. 模型设定

本文采用固定效应面板回归模型,研究农业机械化对农业绿色全要素生产率的影响。模型设定如下:

$$GTFP_{i,t} = \alpha_i + \beta_i Mechanization_{i,t} + \gamma_i \sum Control_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (1)$$

式(1)中, i,t 代表不同省份和年份。 $GTFP$ 表示农业绿色全要素生产率; $Mechanization$ 表示农业机械化; $\sum Control$ 表示本文的控制变量; ε 为随机扰动项。

2. 变量选择与处理

被解释变量:农业绿色全要素生产率($GTFP$)。本文结合王留鑫等^[24]和展进涛等^[26]的研究,使用一步法构建超越对数SFA模型测算农业绿色全要素生产率增长指数($GTFPCH$):

$$GY_{i,t} = F(X_{i,t}, t; \beta) e^{V_{i,t} - U_{i,t}} \quad (2)$$

式(2)中: GY 代表农业绿色GDP; X 是一个 (1×4) 维传统投入向量(第一产业从业人员数量、农作物总播种面积、农业机械总动力、农药使用量四要素的对数值); β 表示待估计的未知参数向量; V 表示随机统计噪声; U 表示生产技术无效率项,是服从截断正态分布 $N(z_{it}, \delta, \sigma^2)$ 的非负随机变量,其中 z 代表多维向量,表示技术无效率项的解释变量(氮流失量、磷流失量和农业碳排放量), δ 表示 3×1 阶未知参数系数。

借鉴展进涛等的研究,首先计算出绿色技术进步变动指数($GTEPCH$)和农业绿色技术效率变动指数($GTECH$)^[26],再用Malmquist生产率变化指数的原理计算出农业绿色全要素生产率增长指数($GTFPCH$)^[31]。因以上测算的 $GTFPCH$ 及其分解项是环比指数,所以参考李谷成等^[20]的研究,将其转化为以2004年为100的累积增长指数,然后对其进行对数转换作为被解释变量($GTFP$),转换公式为 $\ln(1 + GTFPCH)$ 。农业绿色技术进步(GTP)和农业绿色技术效率($GTEC$)均按此公式进行计算。

解释变量:农业机械化($Mechanization$)。借鉴薛超等^[5]、周振等^[32]的方法,选取农作物耕种收综合机械化率衡量农业机械化变量,解决农业机械总动力指标忽略的空间溢出效应问题。农作物耕种收综合机械化率为各省各年份农作物机耕、机播、机收率按4:3:3比例加权的和^①。

控制变量:参考已有相关研究,本文的控制变量包括农民人均可支配收入、城镇化率、经济发展

① 根据《农业机械化水平评价》标准计算得出,数据来源于《中国农业机械化年鉴》(2005-2020年)。

水平、受灾率、劳均播种面积以及农民平均受教育水平等。

其他变量:①绿色机械化技术,结合He等^[29]研究及相关农业绿色技术,选用农业机械化节水灌溉、机械化深耕、机械化秸秆还田、机械化深施化肥、机械化免耕以及机械化植保六个变量作为衡量绿色机械化技术采用率的代理变量。②农业绿色技术进步(*GTEC*)指投入一定时农业生产函数前沿面的移动,具体指农业绿色技术的创新等。测算方式如上文所示。

3. 农业绿色全要素生产率增长指数的测算指标

借鉴葛鹏飞等^[13]、展进涛等^[26]的研究,选定科学合理的投入产出变量。

(1)环境污染变量。Kuosmanen^[33]认为农业环境污染具体在于氮磷流失、温室气体排放、有毒农药使用等方面,因此本文选取氮、磷流失(*NE*、*PE*)、二氧化碳排放(*CO₂*)和化学需氧量排放(*COD*)四个指标作为环境污染变量。

氮、磷流失(*NE*、*PE*)。本文借鉴展进涛等^[26]的做法,首先,分别估计氮、磷流失率,即两次全国污染源普查公报的农业氮流失量除以当年氮肥;磷流失量除以当年磷肥使用量(结果见表1);并假设在相应时间段各省各年的氮磷流失率保持不变;然后,以氮、磷肥使用量与之前算出的氮、磷流失率相乘测算出氮流失量(*NE*)和磷流失量(*PE*)^①。

关于农业 *CO₂* 排放,本文借鉴田云等^[34]的研究方法来测算省际 *CO₂* 排放水平,计算公式如下:

$$CO_{2n}^{i,t} = \sum C_n^{i,t} = \sum E_n^{i,t} \times \theta_n^{i,t} \quad (3)$$

式(3)中,*i*、*n*、*t*分别表示省份、农业碳排放来源和年份。*C*表示 *CO₂* 排放数量;*E*是碳排放来源的数量, θ_n 指的是系数(详见表2)。

表2 *CO₂* 排放量的测算系数

碳排放源	碳排放系数	参考来源
化肥	0.896 kg C/kg	T.O.WEST、美国橡树岭国家实验室
翻耕	312.60 kg C/km ²	中国农业大学生物与技术学院
农膜	5.180 kg C/kg	南京农业大学农业资源与生态环境研究所
农药	4.934 kg C/kg	美国橡树岭国家实验室
农业灌溉	266.5kg C/km ²	段华平等 ^[35]
柴油	0.593 kg C/kg	联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)
稻田	3.136gC/(m·d),130天	田云 ^[34] 、Wang ^[36] 等
牲畜养殖(如奶牛、水牛、其他牛、马等)	IPCC	处理方式参照程琳琳 ^[37] 等

农业生产过程中的化学需氧量污染排放(*COD*)。本文使用单元调查评估法来对农业 *COD* 进行测算^[38-39]。

(2)投入变量。本文根据农业生产要素理论确定投入变量,包括劳动、土地和资本等。其中,劳动要素选取第一产业从业人员数量作为代理变量;土地要素选择农作物总播种面积;资本要素选取农业机械总动力和农药使用量这两个指标。

(3)产出变量。参考联合国综合环境与经济核算体系工作组的定义,绿色GDP指的是在国内生产总值的基础上扣除生产和自然资本消耗。因此,测算农业绿色生产总值(*GY_i*)的具体公式为:

$$GY_{i,t} = Y_i - C_{i,t} - W_{i,t} \quad (4)$$

式(4)中,*Y*表示农业产出中的经济产出,用农林牧渔业生产总值表示(为剔除价格变化所带来的影响,统一以2004年作为基期,将农林牧渔业生产总值折算成不变价格);

*C*表示农业碳排放成本。在农业绿色全要素生产率的测算中纳入碳排放指标,能够更加准确全

① 2004-2014年的氮、磷流失率根据2007年全国污染源普查公报计算,2015-2020年依据2017年的公报。

面地衡量农业绿色生产水平。本文测算农业碳排放成本的具体计算公式如下：

$$C_{i,t} = P_{i,t} \times CO_2^{i,t} \quad (5)$$

式(5)中, P 表示碳排放交易价格,数据来源于WIND数据库。其中,2004—2013年的碳排放交易价格以交易所最早的开盘价29元/吨衡量,2014—2020年以全年各个交易所的平均成交均价的算术平均数衡量。最后按照农业生产资料价格指数^①进行平减。

W 表示水污染排放成本。其测算方法及数据借鉴展进涛等^[25]的研究,见式(6)。最后以农业生产资料价格指数进行平减处理：

$$W_{i,t} = COD\text{污染当量数}_{i,t} \times 0.7\text{元} = (COD\text{排放量}_{i,t} / COD\text{污染当量值}_{i,t}) \times 0.7\text{元} \quad (6)$$

综上所述,农业绿色全要素生产率的测算要素归纳如表3所示。

表3 农业绿色全要素生产率增长指数的测算说明

测算变量	测算变量说明	均值	标准差	最小值	最大值
投入变量	第一产业从业人数/万人	891.3	645.1	27.0	3246
	农业播种面积/千公顷	5383	3661	88.60	14910
	农业机械总动力/千万瓦	3068	2799	94	13353
	农药使用量/万吨	5.435	4.234	0.123	17.35
产出变量	基于2004年的农业绿色GDP/亿元	1757	1302	83.52	6329
氮流失量	万吨	7.485	6.134	0.132	28.90
磷流失量	万吨	0.866	0.805	0.008	4.482
农业碳排放量	万吨	969.8	600.3	17.4	2418

4. 数据来源与描述性统计

2004年颁布的《农业机械化促进法》对我国农业机械化发展具有里程碑式的意义,因此本文实证研究数据以2004年为起点,选取30个省份(直辖市、自治区)2004—2020年的面板数据进行分析,原始数据主要来源于《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》,各省统计年鉴以及《中国农业机械化统计年鉴》等。各主要变量的定义及描述性统计如表4所示。

三、实证结果与分析

1. 农业绿色全要素生产率

本文在效率测度前,使用Stata软件运用广义似然比对超越对数函数的有效性、技术无效率项的存在性、技术进步的存在性及希克斯中性共四个假设进行检验,检验结果如表5所示,均拒绝原假设,证明了本文模型设置的合理性。

经测算,农业绿色全要素生产率随时间变化的趋势如图1所示。总体来看,自2005年以来,我国农业绿色全要素生产率不断提升,年均增速达到2.89%,主要来源于农业绿色技术进步的贡献,增速为2.82%,而农业绿色技术效率增速仅为0.07%。这一结果与大部分研究一致。这也说明农业绿色技术进步是我国农业绿色全要素生产率增长的动力源泉,农业绿色技术效率的贡献不大。这与我国日益重视农业技术水平,不断加大农业科研投入有关。而我国农业绿色技术效率并无明显变化,可能的原因在于农业生产投入增加,碳排放等环境污染问题日益严重。这说明我国土地、农机等生产和环境资源要素的合理化配置水平并未得到改善。

2. 农业机械化对农业绿色全要素生产率影响的回归分析

为排除伪回归的情况,采用Fisher检验对面板数据进行平稳性检验,结果证明了数据为平稳序列。然后采用固定效应模型进行实证检验,结果如表6所示。

实证结果显示,农业机械化水平对农业绿色全要素生产率的回归系数在10%以下的水平显著为负,农业机械化水平对农业绿色技术进步和绿色技术效率的影响均为负向影响,但对农业绿色技术

① 缺失数据使用当年全国平均农业生产资料价格指数代替。

表4 变量含义与描述性统计

变量名称	变量说明	均值	标准差	最小值	最大值
被解释变量					
农业绿色全要素生产率(GTFP)	根据环境因素下的绿色农业SFA模型测算出增长指数后,经转换得到	4.825	0.228	4.029	5.410
核心解释变量					
农业机械化(Mechanization)	农作物机耕、机播、机收三项作业水平按4:3:3比例加权的和×100	48.56	21.78	2.385	100
控制变量					
农民人均可支配收入	工资性收入+经营净收入+财产净收入+转移净收入/元	9784	5857	1971	34911
城镇化率	城镇人口占总人口的比重/%	54.70	13.90	26.90	89.60
农村人均受教育年限	(文盲人数×1+小学学历人数×6+初中学历人数×9+高中和中专学历人数×12+大专及以上学历人数×16)/6岁以上人口总数/年	7.546	0.672	5.139	9.660
财政支出水平	农林水事务支出占其财政一般预算支出比重	0.893	0.058	0.667	0.997
劳均耕种面积	耕地面积/第一产业从业人员	6.761	3.415	2.090	27.71
自然灾害程度	ln(农作物受灾面积与农作物播种面积+1)	0.202	0.149	0	0.936
地区经济发展水平	ln(2004年不变价的人均地区生产总值)	7.096	0.965	4.462	8.728
其他变量					
农业机械化节水灌溉	农田机械节水灌溉面积/总播种面积	0.086	0.100	0	0.667
机械化深耕	机械深耕面积/总播种面积	0.153	0.127	0	0.507
机械化秸秆还田	机械化秸秆还田面积/总播种面积	0.198	0.167	0	0.718
机械化深施化肥	机械深施化肥面积/总播种面积	0.189	0.193	0	0.824
机械化免耕	机械化免耕播种面积/总播种面积	0.070	0.113	0	0.631
机械化植保	机械植保作业面积/总播种面积	0.357	0.227	0.014	2.287
农业绿色技术进步变动指数(GTPCH)	环比指数	1.028	0.017	0.974	1.058
农业绿色技术效率变动指数(GTECH)	环比指数	1.001	0.040	0.780	1.277

进步的回归系数在10%的显著水平下通过显著性检验,而对农业绿色技术效率的影响并不显著。这说明近二十年来传统的农业机械化增长方式不利于农业绿色全要素生产率的提高,这主要是由未产生农业绿色技术进步导致的。原因在于:其一,目前我国对清洁、能源农业机械和绿色农机化作业技术等绿色技术的研发投入较少,科技成果转化率低,特别是低碳农业技术水平总体不高,限制了绿色技术进步,而不利农业绿色全要素生产率的提高。其二,在我国绝大部分地区,受地形的制约,农业不具有大规模机械化运作的条件,且缺乏应用生物防治等技术,所以农业机械化会引发与之相匹配的其他生产要素(如柴油、农膜等)的使用和农业机械修理维护等费用增加,加剧了农业二氧化碳的排放、资源要素的消耗和农业面源污染等,导致环境因素的资源无效配置,从而制约了农业绿色技术效率提高。

3. 关于农业机械化与环境污染问题的进一步探讨

本文进一步研究农业机械化对环境污染的影响,分别以环境污染,包括氮流失量(NF)、磷流失

表5 LR假设检验结果

假设H ₀	LR值	临界值	检验结论
CD函数适用	285.676	30.578	拒绝
技术无效率项不存在	1312.750	9.210	拒绝
技术是希克斯中性的	2187.028	13.277	拒绝
前沿技术进步不存在	2208.752	15.086	拒绝

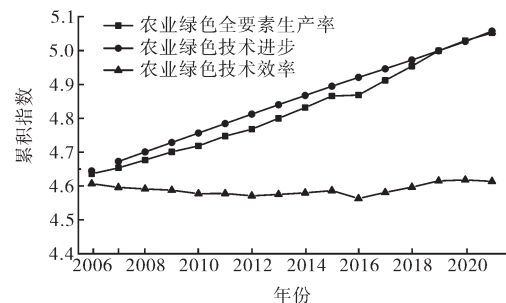


图1 我国农业绿色全要素生产率累积指数及其来源变化

表6 农业机械化对农业绿色全要素生产率的影响

变量	绿色全要素生产率	绿色技术进步	绿色技术效率
ln农业机械化	-0.041** (-2.29)	-0.025* (-1.66)	-0.017 (-1.17)
ln城镇化率	-0.312*** (-4.03)	-0.509*** (-8.07)	0.190*** (3.10)
ln农村人均受教育年限	-0.834*** (-5.07)	-0.566*** (-4.22)	-0.253* (-1.94)
地区经济发展水平	-0.007* (-1.88)	-0.004 (-1.09)	-0.004 (-1.18)
ln农民人均可支配收入	0.791*** (7.32)	0.816*** (9.26)	-0.027 (-0.32)
财政支出水平	0.218 (0.88)	-0.753*** (-3.73)	0.921*** (4.78)
自然灾害程度	-0.008 (-0.22)	0.033 (1.18)	-0.040 (-1.47)
劳均耕种面积	0.019*** (5.47)	0.009*** (3.08)	0.011*** (4.04)
省份固定效应	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制
系数值	-0.457 (-0.52)	-0.463 (-0.64)	4.645*** (6.58)
观测值	479	479	480
R ²	0.794	0.843	0.154

注：***、**和*分别表示在1%、5%和10%的水平上显著，括号内为t值；下表同。

表7 农业机械化对环境污染的影响

N=480

变量	Ln(农业CO ₂)	农业氮流失(NE)	农业磷流失(PE)	农业COD
ln农业机械化	0.011 (0.50)	0.874** (2.11)	0.079* (1.75)	3.638*** (3.00)
ln城镇化率	0.126 (1.40)	9.378*** (5.32)	0.864*** (4.45)	9.393* (1.81)
ln农村人均受教育年限	-0.000 (-0.00)	19.377*** (5.18)	1.290*** (3.13)	15.035 (1.37)
地区经济发展水平	-0.001 (-0.18)	0.177* (1.94)	0.014 (1.44)	-0.172 (-0.64)
ln农民人均可支配收入	1.012*** (7.99)	12.196*** (4.93)	1.308*** (4.80)	17.447** (2.40)
财政支出水平	0.112 (0.40)	-35.811*** (-6.47)	-3.844*** (-6.31)	-30.987* (-1.91)
自然灾害程度	-0.015 (-0.38)	-0.631 (-0.81)	-0.036 (-0.42)	-2.351 (-1.03)
劳均耕种面积	0.040*** (10.14)	-0.393*** (-5.14)	-0.044*** (-5.19)	-0.392* (-1.75)
年份固定效应	控制	控制	控制	控制
省份固定效应	控制	控制	控制	控制
系数值	-1.869* (-1.80)	-93.449*** (-4.61)	-8.534*** (-3.83)	-94.978 (-1.60)
R ²	0.491	0.698	0.511	0.256

量(PE)、二氧化碳排放(CO_2)和化学需氧量排放(COD)四个变量作为因变量,研究农业机械化对环境污染的影响,估计结果如表7所示。结果显示农业机械化对农业氮流失量、磷流失量和农业 COD 排放的回归系数均在10%的水平上显著为正,农业机械化对农业碳排放量的影响虽不显著,但系数为正。这意味着农业机械化的快速发展造成了我国农业污染日益加剧。主要原因在于:一是我国农业机械仍以柴油为主要动力来源,而柴油属于不可再生的化石燃料,且会造成二氧化碳和氮氧化物等污染物的大量排放,加重了环境负担;二是,我国作物种植的种类单一,较少使用生物防治手段,农业机械化的发展需要配合投入较多的化肥农药等化学投入要素。

4. 我国农业机械化转型升级的路径研究

(1)农业绿色机械化技术的应用对农业绿色全要素生产率的影响分析。本文从技术的角度出发,选取农业机械化节水灌溉、机械化深耕、机械化秸秆还田、机械化深施化肥、机械化免耕以及机械化植保六个变量衡量农业绿色机械化技术的应用情况^[28],回归结果如表8所示。可以看出:机械化秸秆还田和机械化深施化肥在10%的水平上显著有利于农业绿色全要素生产率的提高,并且机械化免耕播种技术这一农业绿色机械化技术的应用在1%的水平上显著有利于农业绿色全要素生产率的提高;机械化节水灌溉对农业绿色全要素生产率的影响虽不显著,但系数为正。原因在于这些技术可兼顾农业生产效率提高和环境保护,如机械化秸秆还田节本增效,可加速秸秆的分解,增加土壤有机质,将生物碳融入土壤,减少碳排放并降低营养物质的流失,最终提高农作物的产量。而机械化深耕和机械化植保对农业绿色全要素生产率以及农业绿色技术进步的影响显著为负,说明这两种技术目前在机械使用和能源消耗中对缓解污染没有起到缓解作用。综合分析农业绿色机械化技术的六个代理变量的回归系数,机械化秸秆还田、机械化深施化肥等农业绿色机械化技术对农业绿色全要素生产率的回归系数整体上显著为正。这表明我国农业绿色机械化技术的应用整体上有利于农业绿色全要素生产率的提高,可实现经济产出与环境保护的双重目标。因此我国应更大力推广机械化节水灌溉、机械化秸秆还田、机械化深施化肥及机械化免耕等有利于农业绿色全要素生产率提高的农业绿色机械化技术的应用。

(2)绿色农机使用对农业绿色全要素生产率的影响分析。本文进一步从能源消耗类型的角度出发,研究绿色农机使用对农业绿色全要素生产率的影响。相关研究表明,在不完全燃烧的情况下,一般柴油机比汽油机排放出更多的炭粒和 CO 、 HC 、 NO_x 等,采用电动机等清洁能源机械将

表8 绿色农机技术应用对农业绿色全要素生产率的影响

变量	绿色全要素生产率	绿色技术进步	绿色技术效率
农业机械化节水灌溉	0.022 (0.34)	0.068 (1.23)	-0.043 (-0.79)
机械化深耕	-0.355*** (-4.35)	-0.188*** (-2.72)	-0.170** (-2.48)
机械化秸秆还田	0.097* (1.67)	-0.030 (-0.62)	0.124** (2.54)
机械化深施化肥	0.138* (1.82)	0.064 (1.00)	0.075 (1.17)
机械化免耕播种	0.520*** (5.36)	0.388*** (4.74)	0.133 (1.63)
机械化植保	-0.070** (-2.20)	-0.060** (-2.25)	-0.008 (-0.32)
ln农业机械化	-0.015 (-0.81)	-0.012 (-0.80)	-0.003 (-0.17)
ln城镇化率	-0.301*** (-4.09)	-0.505*** (-8.13)	0.197*** (3.19)
ln农村人均受教育年限	-0.530*** (-3.30)	-0.419*** (-3.09)	-0.093 (-0.69)
地区经济发展水平	-0.007* (-1.85)	-0.004 (-1.11)	-0.003 (-1.03)
ln农民人均可支配收入	0.820*** (8.05)	0.814*** (9.46)	0.004 (0.04)
财政支出水平	-0.022 (-0.09)	-0.852*** (-4.26)	0.779*** (3.99)
自然灾害程度	-0.014 (-0.44)	0.025 (0.92)	-0.038 (-1.43)
劳均耕种面积	0.011*** (3.10)	0.005* (1.68)	0.006** (2.29)
省份固定效应	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制
系数值	-1.098 (-1.31)	-0.639 (-0.90)	4.181*** (5.90)
观测值	477	477	478
R^2	0.825	0.857	0.201

有利于减少农业碳排放,减轻农业污染。本文采用绿色动力农机占比来衡量绿色动力农机使用,具体使用以下两个指标,公式(7)(8)如下:

$$\text{绿色动力农机占比} I = (\text{汽油发动机动力} + \text{电动机动力} + \text{其他机械动力}^{\text{①}}) / \text{农用机械总动力} \quad (7)$$

$$\text{绿色动力农机占比} II = (\text{电动机动力} + \text{其他机械动力}) / \text{农用机械总动力} \quad (8)$$

此处模型(1)的基础上进一步引入绿色动力农机占比,采用个体固定效应模型进行实证分析,结果如表9所示。结果显示:绿色农机使用对农业绿色全要素生产率和农业绿色技术进步在1%以上的水平上显著为正;绿色农机使用对绿色技术效率的影响虽不显著,但系数均为正。这意味着,提高绿色农机占比以实现农机能源结构转型升级,将有利于农业绿色技术进步和农业绿色技术效率的提高,进而提高农业绿色全要素生产率。

表9 绿色农机使用对农业绿色全要素生产率的影响

变量	绿色全要素生产率	绿色技术进步	绿色技术效率	绿色全要素生产率	绿色技术进步	绿色技术效率
绿色农机占比I	0.392*** (3.82)	0.311*** (3.75)	0.081 (0.98)			
绿色农机占比II				0.388*** (3.53)	0.326*** (3.67)	0.064 (0.72)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
省份固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
系数值	-0.730 (-0.80)	-0.754 (-1.03)	4.667*** (6.37)	-0.784 (-0.86)	-0.808 (-1.10)	4.665*** (6.35)
观测值	449	449	450	449	449	450
R ²	0.800	0.849	0.155	0.799	0.849	0.154

四、稳健性检验

1. 更换二氧化碳的测算指标

由于目前关于碳排放测算的指标存在争议,因此借鉴李波等^[40]的方法重新测算二氧化碳排放量,以进行稳健性检验。结果表明,使用更换二氧化碳测算指标测算得出的农业绿色全要素生产率得到的回归结果与前文一致^②。

2. 更换解释变量

进一步用“每亩机械总动力”即“农业机械总动力/总播种面积”和“每亩柴油动力”即“柴油总动力/总播种面积”重新测度农业机械化水平,并采用固定效应模型进行估计,以进行稳健性检验。表10结果所示,以每亩机械总动力衡量农业机械化的回归结果与以每亩柴油动力衡量农业机械化的回归结果一致。

3. 更换被解释变量

为消除不同测算模型和污染物价格误差的影响,本文更换农业绿色全要素生产率的测算方法,分别采用考虑非期望产出的SBM和Super-SBM两种模型,结合Malmquist-Luenberger指数进行再次测算^③,依然对测算结果进行基期累积和对数处理^[11,20,41],结果如表11所示。可以看出农业机械化对农业绿色全要素生产率影响的估计结果依然稳健。

① 指除柴油、汽油和电力外的其他能源,例如风能、太阳能等动力机械功率之和。

② 为了节省篇幅,回归结果未汇报。

③ 投入变量:第一产业从业人数、农业播种面积、农业机械总动力、农药使用;期望产出:基于2004年的农林牧渔业总产;非期望产出:氮流失量、磷流失量、COD、农业碳排放总量。

表10 更换农业机械化变量测度方式的稳健性检验结果

变量	绿色全要素生产率	绿色技术效率	绿色技术进步	变量	绿色全要素生产率	绿色技术效率	绿色技术进步
每亩机械总动力	-0.284*** (-7.12)	-0.117*** (-3.36)	-0.148*** (-4.14)	每亩柴油动力	-0.333*** (-6.57)	-0.128*** (-3.08)	-0.199*** (-4.73)
ln城镇化率	-0.275*** (-3.77)	0.195*** (3.23)	-0.488*** (-7.88)	ln城镇化率	-0.262*** (-3.56)	0.208*** (3.45)	-0.479*** (-7.82)
ln农村人均受教育年限	-0.784*** (-5.01)	-0.226* (-1.76)	-0.540*** (-4.10)	ln农村人均受教育年限	-0.791*** (-5.01)	-0.233* (-1.80)	-0.540*** (-4.11)
地区经济发展水平	-0.009** (-2.27)	-0.004 (-1.43)	-0.004 (-1.28)	地区经济发展水平	-0.007* (-1.90)	-0.004 (-1.15)	-0.003 (-1.08)
ln农民人均可支配收入	0.837*** (8.28)	-0.007 (-0.08)	0.836*** (9.81)	ln农民人均可支配收入	0.868*** (8.44)	0.000 (0.00)	0.863*** (10.08)
财政支出水平	0.233 (1.01)	0.937*** (5.07)	-0.757*** (-3.89)	财政支出水平	0.233 (1.00)	0.912*** (4.90)	-0.743*** (-3.85)
自然灾害程度	-0.001 (-0.02)	-0.038 (-1.44)	0.037 (1.34)	自然灾害程度	0.001 (0.04)	-0.036 (-1.35)	0.038 (1.40)
劳均耕种面积	0.015*** (4.66)	0.009*** (3.54)	0.007** (2.46)	劳均耕种面积	0.019*** (5.66)	0.011*** (4.11)	0.009*** (3.12)
年份固定效应	控制	控制	控制	年份固定效应	控制	控制	控制
省份固定效应	控制	控制	控制	省份固定效应	控制	控制	控制
系数值	-0.891 (-1.08)	4.492*** (6.58)	-0.655 (-0.94)	系数值	-1.170 (-1.39)	4.390*** (6.32)	-0.893 (-1.27)
观测值	479	480	479	观测值	479	480	479
R ²	0.814	0.186	0.849	R ²	0.811	0.170	0.850

五、结论与政策建议

自2005年以来我国农业机械化得到快速发展,为农业现代化做出了巨大贡献。在生态文明和农业可持续发展为战略目标的背景下,提升绿色全要素生产率驱动我国农业绿色发展是必然趋势,农业农村发展的各项政策之间需要协调发展,共同促进生态文明建设,以实现农业高质量发展目标。本文采用2004—2020年的省际面板数据,运用SFA模型测算农业绿色全要素生产率,考察农业机械化对农业绿色全要素生产率的影响,并进一步研究了我国农业机械化转型升级的路径——农业绿色机械化技术应用和绿色农机使用,得出了以下结论:(1)近二十年来,我国农业机械化的发展以经济产出和生产效率为主要目标,较少关注绿色环保的新发展理念在农业机械中的应用,农业机械化因造成温室气体排放增加和忽视农业绿色技术进步而对农业绿色全要素生产率的提升作用有限。(2)机械化秸秆还田、节水灌溉、深施化肥等农业绿色机械化技术的应用整体有利于农业绿色全要素生产率的提高。(3)以柴油为动力来源的农业机械占比过高是导致农业机械化提升绿色全要素生产率作用有限的根本原因,因此加快发展清洁能源机械,促进绿色动力农机占比提高将有利于提高农业绿色全要素生产率,促进农业绿色发展。

基于以上结论,本文提出以下政策建议:

第一,加强绿色农机研发创新。我国对农业科技的投入比重较低,农业科技贡献率和成果转化率低,远低于发达国家,尤其存在低碳农业技术水平总体较低的现象^[42]。因此,在我国农业追求高质量和低碳发展的背景下,应围绕农业绿色低碳高质量发展目标,结合农业供给侧结构性改革,发挥市场作用调动农机生产企业的积极性,促进绿色清洁农业机械的研发、生产及推广。具体来讲,应从供需两个方面齐头并进。可通过加强绿色清洁农机的科研投入与创新,促进农用柴油、汽油机的节能减排以及绿色清洁农机研发的技术攻关,以提高燃油利用率、降低废气排放,从供给端刺激农机企业生产

表11 更换绿色全要素生产率变量测算方法的稳健性检验结果

N=480

	超效率SBM			SBM		
	绿色全要素生产率	绿色技术效率	绿色技术进步	绿色全要素生产率	绿色技术效率	绿色技术进步
ln农业机械化	-0.153** (-2.04)	-0.043 (-1.08)	-0.111* (-1.66)	-0.152** (-2.03)	-0.041 (-1.06)	-0.112* (-1.67)
ln城镇化率	-0.319 (-1.01)	-0.098 (-0.59)	-0.218 (-0.77)	-0.317 (-1.01)	-0.094 (-0.58)	-0.220 (-0.78)
ln农村人均受教育年限	-1.484** (-2.19)	-1.050*** (-2.95)	-0.431 (-0.71)	-1.494** (-2.21)	-1.069*** (-3.07)	-0.422 (-0.70)
地区经济发展水平	-0.000 (-0.02)	0.011 (1.33)	-0.011 (-0.78)	-0.000 (-0.00)	0.012 (1.40)	-0.012 (-0.79)
ln农民人均可支配收入	0.761 (1.65)	0.363 (1.50)	0.406 (0.99)	0.752 (1.63)	0.345 (1.45)	0.416 (1.01)
ln环保意识	0.350** (2.40)	0.252*** (3.30)	0.092 (0.71)	0.354** (2.44)	0.260*** (3.48)	0.088 (0.67)
财政支出水平	-1.360 (-1.37)	-0.148 (-0.28)	-1.216 (-1.37)	-1.362 (-1.38)	-0.151 (-0.30)	-1.214 (-1.37)
自然灾害程度	-0.175 (-1.25)	-0.118 (-1.61)	-0.056 (-0.45)	-0.172 (-1.24)	-0.113 (-1.58)	-0.058 (-0.47)
劳均耕种面积	0.017 (1.23)	0.007 (0.90)	0.010 (0.84)	0.016 (1.17)	0.005 (0.68)	0.011 (0.91)
年份固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
省份固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
系数值	1.873 (0.49)	3.373* (1.67)	3.065 (0.90)	1.958 (0.51)	3.541* (1.80)	2.981 (0.87)
R ²	0.681	0.228	0.745	0.683	0.234	0.744

低能耗、低排放的装备。尤其重视特色小型机械和低能耗高效率的农机装备领域,加快提升汽油、电力等清洁能源农机的研发和产业化,实现农机能源消耗结构的绿色转型。大力推动农业绿色生产宣传,培养农业生产经营主体农业绿色生产的观念和意识,营造节能减排的社会氛围,促进清洁型农产品的更新换代和绿色机械化技术的广泛采用,探索传统和工业化相结合的有机农业生产方式。

第二,加强以绿色生态为导向的农机作业补贴政策的实施。优化农机购置补贴和作业补贴政策,一是加大绿色农机购置补贴比例,大力推动新型绿色农机装备的推广,努力优化农机装备结构。二是完善农机报废更新补贴政策的实施,可通过加大补贴力度、加强便民宣传服务等方式加快高能耗、高污染的老旧农机的更新报废进度,推进农机转型升级。三是重点提高对机械化免耕、节水灌溉、秸秆还田、深施化肥等绿色农机化作业的补贴力度,普及绿色种植理念,促进绿色农业生产技术应用普及和推广,以促进农业绿色技术进步和减轻环境污染,达到在不牺牲环境为代价的前提下提升经济效益的目标。

第三,构建并完善以绿色发展为导向的农机支持政策体系。深化农业绿色发展的顶层设计,兼顾环境保护和经济发展,完善绿色导向的金融服务体系,为更多主体参与到农业绿色发展中提供资金条件;尤其要重视绿色农机信贷担保体系的建立健全,帮助农户实现资本要素投入的合理化和利用有效化;有条件的地区可设立“以旧换新”专项计划等,分产业、分阶段有序淘汰落后低效的农业机械,推广使用绿色环保农用机械,以促进我国农业绿色技术效率的提高。

第四,提高农机操作人员的环保意识和专业技能。农业机械操作人员的技术水平直接影响农机的作业效率、能源消耗和环境污染状况,应提高基层农业技术推广服务体系效能,通过组织开展多形式的培训、竞赛等活动,加强农业农机技术人才的绿色技术储备和应用能力培养。一是提高农机手的绿色环保意识,使其主动淘汰耗能高、污染重的老旧农机,并主动学习和采用绿色农机化作业技术

等。二是提高农机手的驾驶操作技能和维修保养技能,组织植保无人机、新型智能农机等多类型的农机驾驶技能培训,降低能源损耗和环境污染,并提升作业效率,真正实现农机作业“低损高效、节能减排”的双重目标。

参 考 文 献

- [1] 温铁军.从农业1.0到农业4.0:生态转型与农业可持续[M].上海:东方出版社,2021.
- [2] 张淑辉.异质性农村人力资本对农业绿色生产率的影响——基于中国省级面板数据[J].山西大学学报(哲学社会科学版),2017,40(5):127-138.
- [3] 郑宏运,李谷成.农业资源再配置的生产率效应评估[J].华中农业大学学报(社会科学版),2021(5):45-53,193.
- [4] 崔宁波,生世玉.粮食主产区农业绿色发展的影响因素、质量测度与动力分析——基于绿色全要素生产率视角[J].农业资源与环境学报,2022,39(3):621-630.
- [5] 薛超,史雪阳,周宏.农业机械化对种植业全要素生产率提升的影响路径研究[J].农业技术经济,2020(10):87-102.
- [6] JIANG M, HU X, CHUANG J, et al.Does the popularization of agricultural mechanization improve energy-environment performance in China's agricultural sector?[J].Journal of cleaner production, 2020, 276(1):124210.
- [7] 金书秦,林煜,牛坤玉.以低碳带动农业绿色转型:中国农业碳排放特征及其减排路径[J].改革,2021(5):29-37.
- [8] 贺青,张俊飏,张虎.农业机械化对农业碳排放的影响——来自粮食主产区的实证[J].统计与决策,2023,39(1):88-92.
- [9] 吕娜,朱立志.中国农业环境技术效率与绿色全要素生产率增长研究[J].农业技术经济,2019(4):95-103.
- [10] 郭海红,刘新民.中国农业绿色全要素生产率时空演变[J].中国管理科学,2020,28(9):66-75.
- [11] 孟祥海,周海川,杜丽永,等.中国农业环境技术效率与绿色全要素生产率增长变迁——基于种养结合视角的再考察[J].农业经济问题,2019(6):9-22.
- [12] 郭永奇,侯林岐.中国粮食主产区粮食农业绿色全要素生产率测度及影响因素研究[J].科技管理研究,2020,40(19):223-229.
- [13] 葛鹏飞,王颂吉,黄秀路.中国农业绿色全要素生产率测算[J].中国人口·资源与环境,2018,28(5):66-74.
- [14] 王兵,曾志奇,杜敏哲.中国农业绿色全要素生产率的要素贡献及产区差异——基于Meta-SBM-Luenberger生产率指数分析[J].产经评论,2020,11(6):69-87.
- [15] 杨泽宸,李宵寒,李坦.农村居民收入对种植业绿色全要素生产率影响分析——基于门槛回归[J].河北农业大学学报(社会科学版),2021,23(4):11-18.
- [16] LIU D, ZHU X, WANG Y. China's agricultural green total factor productivity based on carbon emission: an analysis of evolution trend and influencing factors[J].Journal of cleaner production, 2020, 278(1):123692.
- [17] 蔺鹏,孟娜娜.环境约束下京津冀区域经济发展质量测度与动力解构——基于绿色全要素生产率视角[J].经济地理,2020,40(9):36-45.
- [18] 杨骞,王珏,李超,等.中国农业绿色全要素生产率的空间分异及其驱动因素[J].数量经济技术经济研究,2019,36(10):21-37.
- [19] VIAGGI D, BARTOLINI F, RAGGI M. Combining linear programming and principal-agent models: an example from environmental regulation in agriculture[J].Environmental modelling & software, 2009, 24(6):703-710.
- [20] 李谷成.中国农业的绿色生产率革命:1978—2008年[J].经济学(季刊),2014,13(2):537-558.
- [21] OUTHWAITE O, BLACK R, LAYCOCK A. The pursuit of grounded theory in agricultural and environmental regulation: a suggested approach to empirical legal study in biosecurity[J].Law & policy, 2010,29(4):493-528.
- [22] 潘丹,应瑞瑶.资源环境约束下的中国农业全要素生产率增长研究[J].资源科学,2013,35(7):1329-1338.
- [23] HOANG V N, COELLI T. Measurement of agricultural total factor productivity growth incorporating environmental factors: a nutrients balance approach[J].Journal of environmental economics & management, 2011,62(3):462-474.
- [24] 王留鑫,姚慧琴,韩先锋.碳排放、绿色全要素生产率与农业经济增长[J].经济问题探索,2019(2):142-149.
- [25] 展进涛,徐钰娇.环境规制、农业绿色生产率与粮食安全[J].中国人口·资源与环境,2019,29(3):167-176.
- [26] 展进涛,徐钰娇,葛继红.考虑碳排放成本的中国农业绿色生产率变化[J].资源科学,2019,41(5):884-896.
- [27] 魏玮,文长存,崔琦,等.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,2018,274(2):30-40.
- [28] GERLAGH R. Measuring the value of induced technological change[J].Energy policy, 2007,35(11):5287-5297.
- [29] HE P, ZHANG J, LI W. The role of agricultural green production technologies in improving low-carbon efficiency in China: necessary but not effective[J].Journal of environmental management, 2021, 293:112837.
- [30] ISMAEL M, SROUJI F, BOUTABBA M A. Agricultural technologies and carbon emissions: evidence from Jordanian economy. [J].Environmental science and pollution research, 2018(25):10867-10877.

- [31] 全炯振. 中国农业全要素生产率增长的实证分析: 1978~2007年——基于随机前沿分析(SFA)方法[J]. 中国农村经济, 2009(9):36-47.
- [32] 周振, 马庆超, 孔祥智. 农业机械化对农村劳动力转移贡献的量化研究[J]. 农业技术经济, 2016(2):52-62.
- [33] KUOSMANEN T. Green productivity in agriculture: a critical synthesis[C]. Finland Espoo: Aalto University, 2013.
- [34] 田云, 张银岭. 中国农业碳排放减排成效评估、目标重构与路径优化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(12):1-7.
- [35] 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.
- [36] MINGXING W, AIGUO D, RENXING S, et al. CH EMISSION FROM A CHINESE RICE PADDY FIELD[J]. Acta meteorologica sinica, 1990, 4(3):265-275.
- [37] 程琳琳, 张俊飏, 田云, 等. 中国省域农业碳生产率的空间分异特征及依赖效应[J]. 资源科学, 2016, 38(2):14.
- [38] 赖斯芸, 杜鹏飞, 陈吉宁. 基于单元分析的非点源污染调查评估方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004(9):1184-1187.
- [39] 陈敏鹏, 陈吉宁, 赖斯芸. 中国农业和农村污染的清单分析与空间特征识别[J]. 中国环境科学, 2006(6):751-755.
- [40] 李波, 张俊飏, 李海鹏. 中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(8):80-86.
- [41] 杨芷晴. 教育如何影响农业绿色生产率——基于我国农村不同教育形式的实证分析[J]. 中国软科学, 2019(8):52-65.
- [42] 秦军. 低碳农业发展的障碍、模式及对策[J]. 西北农林科技大学学报(社会科学版), 2014, 14(6):70-75.

Agricultural Mechanization and Agricultural Green Development Under the “Dual Carbon” Goal

—— A Perspective Based on Green Total Factor Productivity

WANG Yiqiu, XU Li, CAO Lei

Abstract Using inter-provincial panel data of 30 provinces in China from 2004 to 2020 and the stochastic frontier production function method, this paper empirically analyzes the impact of agricultural mechanization on agricultural green total factor productivity, and explores the path to improve agricultural green total factor productivity from the perspective of technology and energy consumption types. The results show that the agricultural mechanization has made significant contributions to the promotion of agricultural modernization in China over the years, while the traditional growth mode of agricultural mechanization has not fostered the progress of agricultural green technology. Moreover, it has exacerbated environmental pollution through fuel consumption and greenhouse gas emissions, which ultimately hinders the improvement of agricultural green total factor productivity. Therefore, it is necessary to pursue green transformation and upgrade of agricultural mechanization. This can be achieved by enhancing agricultural green mechanization technology and the use of green agricultural machinery to improve green total factor productivity, and promote agricultural green development. Additionally, efforts should be made to strengthen agricultural machinery technological innovation, facilitate the research and development as well as quantitative production of clean and green agricultural machinery. Optimizing support policies such as subsidies for machinery purchases and operation should be considered, with a focus on favoring green agricultural machinery. This will encourage the widespread adoption of green mechanization technologies such as straw returning, water-saving irrigation, and precision application of fertilizers.

Key words agricultural mechanization; green development; agricultural green total factor productivity; agricultural green mechanization technology

(责任编辑:王 薇)