

农业技术进步与碳排放强度关系 ——不同影响路径下的实证分析

李成龙 周宏*

(南京农业大学 经济管理学院,南京 210095)

摘要 为厘清农业技术进步在农业碳排放过程中发挥的作用,使用中国29个省份1997—2016年的农业面板数据(统计数据未含新疆、西藏自治区及港、澳、台地区,下同),通过系统广义矩估计(SYS-GMM)方法分析了农业技术进步对农业碳排放强度的影响。结果表明:农业技术进步整体上有利于农业碳排放强度的降低,但是细分路径发现,农业技术进步并不总是有利于农业碳减排,以农业机械化水平为代表的机械型技术进步促进了农业碳排放强度的增加,以农业种质创新为代表的生物型技术进步显著降低了农业碳排放强度。因此,未来农业绿色发展过程中,需重视不同路径技术进步对农业碳排放的影响,有针对性地促进农业碳减排,继续推进农业种质创新和优质新品种推广;优化农机装备结构,促进农机的新旧动能转换,以更有力地促进农业碳减排。

关键词 农业技术进步; 碳排放强度; 生物型技术进步; 机械型技术进步

中图分类号 F323.3

文章编号 1007-4333(2020)11-0162-10

文献标志码 A

Relationship between agricultural technology progress and carbon emission intensity: An empirical analysis under different influence paths

LI Chenglong, ZHOU Hong*

(College of Economics and Management, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract In order to clarify the role of agricultural technology progress in the process of agricultural carbon emissions, based the panel data of 29 provinces in China from 1997 to 2016(The data do not include those of Xinjiang and Xizang Autonomous Region, Hongkong, Macao and Taiwan regions. The same below.), this study analyzes the impact of agricultural technology progress on the intensity of agricultural carbon emissions by using the SYS-GMM method. The results show that the agricultural technology progress as a whole promotes the reduction of carbon emissions. However, the breakdown path found that agricultural technology progress is not always conducive to agricultural carbon reduction: Represented by agricultural mechanization level, the mechanical model of technological progress promotes the agricultural carbon intensity increases; Represented by agricultural germplasm innovation, the biological technology significantly reduces the carbon intensity of agriculture. Therefore, in the process of green agricultural development in the future, attention should be paid on the impact of technological progress of different routes on agricultural carbon emissions, targeted promotion of agricultural carbon emission reduction, continuous promotion of agricultural germplasm innovation and promotion of high-quality new varieties to optimize the structure of agricultural machinery and equipment, promote the conversion of old and new driving forces of agricultural machinery, and more effectively promote carbon emission reduction in agriculture.

Keywords agricultural technology progress; carbon emission intensity; biochemical technology progress; mechanical technology progress

收稿日期: 2020-04-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(71473121);江苏现代农业(水稻)产业技术体系产业经济研究项目(JATS[2019]438)

第一作者: 李成龙,博士研究生,E-mail:liclnjau@163.com

通讯作者: 周宏,教授,主要从事农业经济管理研究,E-mail:zhouhong@njau.edu.cn

农业作为国民经济的基础,同时又是温室气体的重要来源。农业与环境紧密相关,在可持续发展理念的指导下,最大限度地减少生产过程中的高碳能源消耗,降低温室气体的排放量,达到生产与安全并重的理想农业发展形态是低碳农业发展关键。2014年5月,联合国粮农组织公布的温室气体排放数据显示,农业、林业、渔业温室气体排放量在近50年的时间里将近翻了一翻^①,其发布的《2016年粮食及农业状况》^②指出,农业(农、林、牧、渔业)占世界温室气体的1/5左右,所以在温室气体减排过程中农业的碳减排起着重要作用,而农业发展过程中如何降低碳排放量也成为当前要亟待解决的实际问题。

在影响农业碳排放的诸多因素中,技术进步被认为是碳减排的重要力量之一,但是农业技术进步具有多种模式,技术进步总是有助于减少能源消耗和二氧化碳排放的现实并非如此。能源经济学中的“回报效应”理论指出,技术进步在促进经济增长的同时又会促进能源消耗的增加^[1]。当前,中国农业技术进步与农业经济处于快速发展阶段,而推进农业的低碳化发展是新形势下转变农业发展方式、实现农业可持续发展的必然选择。在此背景下,研究农业技术进步对碳排放的影响具有重要的现实意义。本研究旨在厘清不同技术进步方式对农业碳排放的影响程度和方向,以期政府更有针对性地制定措施促进农业碳减排,实现农业的绿色化发展提供政策建议。

1 农业技术进步与碳排放的研究梳理

农业经济增长的同时伴随着能源消耗和二氧化碳排放量的增加,针对目前农业发展与碳排放问题,许多学者在相关研究领域已进行了广泛研究。以往的研究中主要聚集在农业碳排放的测算^[2-3]与碳排放影响因素的分解方面^[4-5]。相关研究还发现,农业碳排放表现出一定的空间特征^[6-7]。陈柔等^[8]研究了农业碳排放、碳汇与经济增长的关系,分析发现中国西北、西南地区由于污染型的碳源经济发展以及粗放的农业生产方式,碳排放与经济存在负脱钩关系。

关于技术进步与碳排放的关系研究也相对比较

丰富,通常的研究认为,技术进步可以有效促进节能减排,降低能耗强度^[9]。魏玮等^[10]利用GTAP-E模型模拟了未来中国农业增长趋势,并分析了农业技术进步对农业碳排放的影响,研究发现农业技术进步可以有效控制农业能源增长、减缓碳排放。胡中应^[11]和杨钧^[12]以DEA-Malmquist指数测得的农业全要素生产率表征农业技术水平,考察了中国农业技术进步对农业碳排放强度的影响,发现农业技术进步有利于农业碳排放强度的降低。

Yang等^[13]认为技术进步是碳减排的主要途径,Valin等^[14]则认为不同的生产力途径会产生不同的影响。而农业技术进步是如何影响农业碳排放强度的呢?通过分解或测算的技术进步仅探讨了技术进步对碳排放总的的影响效应,而忽视了不同来源的技术进步对碳排放的影响结果与影响程度之间的差异,相关研究很少对此进行细分探讨。所以本研究试图回答,农业技术进步在农业碳排放过程中究竟发挥着什么样的作用,是减排还是增排?不同路径下的技术进步是否均有利于农业碳排放强度的降低?

2 农业技术进步对碳排放影响的理论分析

一般研究认为,农业技术进步主要通过两种途径影响农业碳排放。一是中性技术进步,即在不改变要素投入的情况下促进农业生产效率的提高,提升农业产出从而降低农业碳排放强度,另一方面是通过改变要素的投入结构而对碳排放产生影响。Hicks^[15]认为,技术进步具有一定的“方向”,生产者会使用相对便宜的要素去替换较为昂贵的要素,即有偏技术进步,农业生产中的有偏技术进步可以改变不同要素之间的边际替代率,此外还可以通过改变某种要素的边际生产率影响碳排放强度。

农业技术进步通过农业技术的创新、推广和采用而逐步影响农业经济发展。农户作为农业技术的最终需求者会合理做出决策,参考王班班等^[16]的相关研究,本研究假设农业生产函数为一个包含技术进步和要素投入的函数:

$$F(x, A) = A \cdot F(x) \quad (1)$$

式中: A 表示技术进步, x 为要素投入。碳排放强度为要素投入乘以排放系数的值与产出的比值,基于

① 数据来源:联合国粮农组织, <http://www.fao.org/news/story/zh/item/224418/icode/>

② 数据来源:联合国粮农组织《2016年粮食及农业状况》, <http://agris.fao.org/>

成本最小化的角度分析,技术进步对碳排放强度的影响可以表述为产出既定情况下对要素投入的节约。然而,这种生产节约可能是由中性技术进步导致的要素的同比例节约,也可能是有偏技术进步导致的某种要素边际生产率的提高而对其他要素产生的替代。假设要素使用量为 x_E , 那么

$$x_E = S_E \cdot C / \omega_E \quad (2)$$

式中: S_E 为某种碳源投入要素在总成本中的价值份额; C 为总成本; ω_E 为这种要素的价格。那么成本最小化条件下,技术进步对要素投入的影响可以表述为:

$$\frac{\partial \ln(x_E/Y)}{\partial \ln A} = \frac{\partial \ln x_E}{\partial \ln A} \quad (3)$$

进一步的将式(3)进行分解得到式(4)

$$\frac{\partial \ln(x_E/Y)}{\partial \ln A} = \frac{\partial \ln S_E}{\partial \ln A} + \frac{\partial \ln C}{\partial \ln A} \quad (4)$$

式(4)可以更好的理解技术进步对农业碳排放强度的影响。一方面是技术进步对要素投入份额的影响,即通过要素替代影响碳排放强度;另一方面是对总成本的节约,即产出既定情况下对成本的节约。

然而农业技术进步具有广泛的来源,资本的深化、人力资本的积累以及规模经济等均被认为是农业技术进步的内生动力,可以带来新技术的应用,促进全要素生产率的提高,改进要素利用效率^[17]。杨福震等^[18]认为新的农业技术往往渗透在各种生产要素中,在促进农业生产效率提升的同时促进产出的增加或降低生产成本。此外农业技术创新、农业技术引用等均可以优化要素配置,提升农业生产效率促进农业经济的增长,降低农业碳排放强度。

Hayami 等^[19]和 Ruttan^[20]关于农业发展理论的研究中将农业技术进步模式分为两种,即生物化学型技术进步和机械型技术进步。对于生物化学型技术进步来说,种质创新和化肥农药的使用是其重要的代表,由于化肥农药作为碳排放重要来源,本研究仅分析农业种质创新这一生物型技术进步,用水稻、小麦和玉米的新品种推广面积表示。机械型技术进步方面,虽然碳排放量与单机排放量和机械数量有关,但是总体农业机械数量和不同类型机械数量均呈不断增加趋势,为更好衡量机械型技术进步,本研究用单位耕地面积农机总动力来表示。

基于上述分析,本研究提出以下假设:总体上,

农业技术进步可以有效降低农业碳排放强度,但是农业技术进步并不总是朝着有利于农业碳减排方向发展,机械型技术进步模式会促进农业碳排放强度的提升,而以种质创新为代表的生物型技术进步有利于农业碳排放强度的降低。

3 技术进步与碳排放强度测算与分析

3.1 农业技术进步的测算

超越对数模型可以有效地分析生产函数中投入要素间的相互作用机理和技术进步差异,并且可以较好的研究技术进步随时间的变化情况,相比于 C-D 函数来说解决了完全竞争和要素替代弹性相等的假定^[21]。因此,本研究通过构建超越对数生产函数模型来计算农业技术进步。具体的模型如下:

$$\ln Y_{it} = \beta_0 + \sum_{n=1}^N \beta_n \ln x_{nit} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^N \beta_{nj} \ln x_{nit} \ln x_{jit} + \sum_{n=1}^N \beta_{nt} t \ln x_{nit} + \beta_t t + \frac{1}{2} \beta_{tt} t^2 + v_{it} - u_{it} \quad (5)$$

式中: Y_{it} 为第 i 个省份第 t 年的农业总产出; x_{nit} 表示第 n 个投入量; x_{jit} 表示第 j 个投入量; t 表示技术变化的时间趋势; β 表示估计参数; v_{it} 表示随机误差; u_{it} 表示技术无效因素; v_{it} 与 u_{it} 相互独立,服从正态分布。式(5)中包含了时间趋势与要素投入之间的交互项,考虑了非中性的技术变化。

第 i 个省份 s 期到 t 期的技术进步可以从估计参数中通过计算得到。利用第 i 个省份在两个不同时期的数据,对生产函数关于时间 t 求偏导。由于模型为超越对数函数形式,所以技术变化等于求对数导数的代数均值的指数函数,具体形式如下:

$$\text{技术变化} = \exp \left\{ \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \ln y_{is}}{\partial s} + \frac{\partial \ln y_{it}}{\partial t} \right] \right\} \quad (6)$$

式中相关变量的选取借鉴孔祥智等^[21]使用超越对数函数计算农业技术进步的研究。农业总产出以每个省份不变价格的种植业总产值表示,亿元。投入要素为第一产业从业人员数量,万人;农作物总播种面积,万 hm^2 ; 农机总动力,万 kW 和化肥施用量,万 t 。

对于生物型技术进步,本研究用种质创新(水稻、小麦、玉米新品种审定推广面积^①)来表示,农作物新品种审定是中国推进农业科技成果转化的重要力量,优质的作物品种可以提升作物品质,适应复杂

① 数据来源:中国种子协会网, <http://www.seedchina.com.cn/>

的农业生产环境,降低单位要素的投入,有利于成本的降低和产出的增加,可以有效提升农业综合能力和农业产出效率。此外,机械型技术进步在优化要素投入、提升农业生产效率的同时也会促进能源消耗的增加,对农业碳排放水平产生重要影响,本研究中机械型技术进步用单位耕地面积农机总动力表示。

3.2 碳排放的测算

联合国公布的农业温室气体数据显示,2011年农业温室气体排放中,合成肥料约占总量的13%^①,而农药、农业机械与灌溉水泵的能源消耗也是造成农业温室气体排放的主要来源。通常,种植业碳排放主要来源于要素的投入及机械使用过程中化石能源的消耗。本研究的农业碳源参考李波等^[22]和梁青青^[23]的研究,主要包括化肥、农药、机械、翻耕和灌溉5种,分别用实际化肥投入量、实际农药投入量、机械使用过程中的柴油消耗量、农作物总播种面

积和农作物实际灌溉面积表示。

具体的农业碳排放总量的计算公式为:

$$E_{it} = \sum E_{nit} = \sum T_{nit} \cdot \sigma_n \quad (7)$$

式中: E_{it} 表示第*i*个省份第*t*年农业碳排放总量; E_{nit} 为*n*种碳源的碳排放总量; T_{nit} 为各种碳排放源的量; σ_n 为各种碳排放源的碳排放系数。根据相关研究,本研究具体的碳排放系数见表1。

由于农业技术进步的同时伴随着农业经济的增长,因此考虑单位农业生产总值上的农业碳排放强度更具有现实意义。农业碳排放强度计算公式见式(8)

$$EI_{it} = \frac{E_{it}}{GDP_{it}} \quad (8)$$

式中: EI_{it} 为第*i*个省份第*t*年的农业碳排放强度; E_{it} 同式(7); GDP_{it} 为第*i*个省份第*t*年不变价的种植业总产值。

表 1 农业碳排放的碳源系数及参考来源

Table 1 Carbon source coefficient and reference source of agricultural carbon emission

碳源 Carbon source	碳排放系数 Carbon emission coefficient	参考来源 Reference
化肥 Fertilizer	0.859 kg/kg	West ^[24] 美国橡树岭国家实验室
农药 Pesticides	4.934 kg/kg	美国橡树岭国家实验室 ^[25]
柴油 Diesel oil	0.592 7 kg/kg	IPCC 联合国气候变化政府间专家委员会 ^[26]
翻耕 Ploughing	312.600 kg/km	伍芬琳等 ^[27]
灌溉 Irrigation	20.476 kg/hm ²	Dubey 等 ^[28]

4 模型设定与数据说明

4.1 模型设定

本研究中农业技术进步利用超越对数生产函数计算得到。主要控制变量包括:1)农业经济发展水平,地区农业经济发展水平会影响农业要素投入进而影响到农业碳排放水平,这也得到了李波等^[29]和杨钧^[12]的验证。2)人力资本水平,人力资本水平的提升使得农户更容易从事非农劳动,进而在农业生产中可能增加对化肥、农机等要素资料的使用,从而影响碳排放水平。3)人均耕地面积,随着农地流转市场的发育,土地更容易流向规模户,这会使得劳动

节约型要素投入有所增加,会对农业碳排放水平产生影响。4)城市化水平,城镇化通过影响生产要素的流动和新型农业生产方式的建立对碳排放产生影响,这也得到了吴伟伟^[30]的验证。5)农业受灾程度,受灾程度的增加会影响农户后期的要素投入,并可能影响农业产值,从而影响农业碳排放水平。具体的模型设定见式(9)。

$$\ln EI_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 A_{it} + \alpha_2 \ln Ey_{it} + \alpha_3 Edu_{it} + \alpha_4 Area_{it} + \alpha_5 Urban_{it} + \alpha_6 Disaster_{it} + \mu_i + \epsilon_{it} \quad (9)$$

式中: EI_{it} 为农业碳排放强度,由前面计算得到; A_{it} 为农业技术进步; Ey_{it} 为农业经济发展水平,用农业总产值与农业从业人员数量的比值表示; Edu_{it} 为农业劳动力人力资本水平,用各省份农村地区初中及

① 数据来源:联合国粮农组织, <http://www.fao.org/news/story/zh/item/224418/icode/>

以上学历人口与农村总人口的比值表示; $Area_{it}$ 为人均耕地面积; $Urban_{it}$ 表示城市化水平; $Disaster_{it}$ 为农业受灾程度, 用农作物受灾面积与总播种面积的比值表示; α_0 为常数项; μ_i 为个体效应; ϵ_{it} 为随机误差项。

不考虑内生性的情况下进行回归分析会导致结果的有偏和不一致问题。一方面农业技术进步受到地区特征、地方政府政策的影响, 另一方面, 虽然模型控制了主要的变量, 但是农业碳排放也会受到地区特征、土壤肥力等相关因素的影响, 会存在变量遗漏的情形。此外, 由于农业生产过程中过去的生产习惯等会影响农户的要素使用, 从而影响农业碳排放强度, 因此考虑到碳排放的路径依赖, 本研究将碳排放强度的一阶滞后项 $\ln EI_{i(t-1)}$ 加入模型, 构建动态面板模型, 具体模型见式(10)。

$$\ln EI_{it} = \alpha_0 + \varphi \ln EI_{i(t-1)} + \alpha_1 A_{it} + \alpha_2 \ln Ey_{it} + \alpha_3 Edu_{it} + \alpha_4 Area_{it} + \alpha_5 Urban_{it} + \alpha_6 Disaster_{it} + \mu_i + \epsilon_{it} \quad (10)$$

动态 GMM 估计又分为差分 GMM 和系统 GMM。由于动态面板模型中引入被解释变量的一阶滞后项, 一阶滞后项的引入会导致一阶差分以后模型存在内生性问题, 本研究借鉴 Arellano 等^[31]的方法, 将被解释变量的二期滞后和更高阶滞后作为工具变量进行估计。工具变量有效的前提是 ϵ_{it} 不存在自相关, 而与差分广义矩估计(DIF-GMM)方法相比, 系统广义矩估计(SYS-GMM)方法可以提高估计效率, 并且可以估计不随时间变化的变量的系数, 所以本研究使用系统 GMM 法做进一步估计。

4.2 数据说明及描述性统计

本研究所使用的数据来自 1997—2016 年中国 29 个省份的面板数据(统计数据未含新疆、西藏自治区及港、澳、台地区), 相关统计数据来源于《中国统计年鉴》^[32]、《中国农村统计年鉴》^[33]、《中国人口和就业统计年鉴》^[34]。个别省份缺失的数据通过各省份统计年鉴补充。具体的变量设定及描述性统计特征见表 2。

表 2 变量设定及描述性统计

Table 2 Variable setting and descriptive statistics

变量 Variable	定义 Definition	单位 Unit	均值 Mean	标准差 Standard deviation
碳排放强度 Carbon emission intensity	农业碳排放总量/农业生产总值	t/亿元	14.48	0.45
农业技术进步 Agricultural technological progress	农业技术水平		1.38	0.38
机械型技术进步 Technology progress in mechanical	单位耕地面积农业机械总动力	kW/万 hm ²	0.07	0.41
生物型技术进步 Technology progress in biotechnology	水稻、玉米、小麦新品种审定推广面积总和	km ²	2.41	2.25
农业经济发展水平 Agricultural economic development level	人均农业生产总值	万元/人	2.37	2.69
人力资本水平 Human capital level	初中以上学历人口占总人口比值		0.49	0.12
人均耕地面积 Cultivated area per capita	人均耕地面积	万 hm ² /万人	0.46	3.79
城市化水平 Cultivated area per capita	城市人口占总人口比值		0.46	0.16
农业受灾程度 Agricultural damage	受灾面积占总播种面积比值		0.27	0.16

5 农业碳排放现状与影响因素分析

5.1 农业技术进步对农业碳排放的影响

表 3 中 OLS(普通最小二乘法)估计模型和固定效应估计模型是用式(9)进行的回归结果,结果显示,农业技术进步有利于农业碳排放强度的降低,均通过了 1% 的显著性检验。由于使用静态模型估计出的结果存在较大的偏差,所以此估计结果仅作为动态面板的参考。差分 GMM 估计模型和系统

GMM 估计模型是用式(10)回归的结果,可以看出,技术进步对碳排放强度的影响系数显著为负,分别通过了 1% 的显著性检验,可以认为农业技术进步对农业碳排放强度的降低起着关键作用。相比于差分 GMM 估计,由于系统 GMM 可以更好的提高估计效率,所以本研究以系统 GMM 估计的结果进行具体指标的解释。系统 GMM 扰动项自相关检验结果表明不存在二阶自相关, P 值为 0.196, Sargan 检验也表明通过工具变量有效性检验,模型估计效果较好。

表 3 农业技术进步与农业碳排放强度的估计结果

Table 3 Estimated results of agricultural technology progress and agricultural carbon emission intensity

变量 Variable	OLS 估计 OLS estimation	固定效应 Fixed effect estimation	差分 GMM DIF-GMM	系统 GMM SYS-GMM
碳排放强度一阶滞后项 $\ln EI_{i(t-1)}$			0.077*** (0.011)	0.431*** (0.055)
农业技术进步 A_{it}	-0.476*** (0.046)	-0.207*** (0.046)	-0.128*** (0.013)	-0.032*** (0.011)
农业经济发展水平 $\ln Ey_{it}$	-0.511*** (0.032)	-0.584*** (0.037)	-0.582*** (0.018)	-0.407*** (0.042)
人力资本水平 Edu_{it}	0.498*** (0.154)	-0.407** (0.192)	-0.359*** (0.057)	0.029 (0.095)
人均耕地面积 $Area_{it}$	0.034*** (0.003)	0.044*** (0.005)	0.048*** (0.001)	0.037*** (0.003)
城市化水平 $Urban_{it}$	0.288*** (0.100)	-0.002 (0.073)	-0.086*** (0.017)	-0.152*** (0.044)
受灾情况 $Disaster_{it}$	0.183** (0.083)	0.021 (0.053)	-0.015** (0.007)	0.007 (0.012)
常数项 Constant	14.364*** (0.104)	14.604*** (0.117)	13.410*** (0.162)	8.082*** (0.740)
Observations	580	580	522	551
AR(2)			0.189	0.196
Sargan test			0.998	1.000
R-squared	0.758	0.898		

注: *、** 和 *** 分别表示在 10%、5% 和 1% 的统计水平上显著。括号内为标准误。下同。

Note: *, ** and *** respectively represent significant at 10%, 5% and 1% levels. Standard errors are in parentheses. The same below.

5.2 不同影响路径下的技术进步与农业碳排放强度研究

由前述可知,农业技术进步显著降低农业碳排放强度,但是农业技术进步作用于农业碳排放强度具有不同的路径。总体来看农业技术进步对碳排放强度的作用路径表现在两个方面,一是对能源和要素投入的影响,二是通过影响农业产出影响农业碳排放强度。本部分具体讨论不同来源的农业技术进步对农业碳排放的影响,主要分析以农业种质创新为代表的生物型技术进步和以机械化水平为代表的机械型技术进步的影响效果。表4为使用系统GMM方法对式(10)进行估计的结果。统计检验结

果表明,扰动项不存在自相关,且两个估计结果均无法拒绝“所有工具变量都有效”的原假设,也即表明可以进行系统GMM估计。

表4中,以种质创新为代表的生物型技术进步显著降低了农业碳排放强度,相关系数为-0.026,在1%统计水平上显著。农业种质创新是国家农业技术进步的重要体现方式之一,20世纪60、70年代,中国开始了第一次“绿色革命”,其本质是推进农业新品种的培育与推广的农业技术进步活动,绿色革命为中国粮食产量的提高和农业经济的发展提供了重要的推动力,极大的促进了土地产出率的提高,提升了经济发展水平,进而有利于农业碳排放强度的降低。

表4 不同路径下的技术进步与农业碳排放强度

Table 4 Technological progress and agricultural carbon emission intensity under different paths

变量 Variable	生物型技术进步 Technology progress in biotechnology	机械型技术进步 Technology progress in mechanical	综合影响 Comprehensive impact
碳排放强度一阶滞后项 $\ln EI_{it-1}$	0.567*** (0.024)	0.543*** (0.029)	0.495*** (0.045)
生物型技术进步 Technology progress in biotechnology	-0.026*** (0.009)		-0.022** (0.009)
机械型技术进步 Technology progress in mechanical		0.038** (0.018)	0.041*** (0.012)
农业经济发展水平 $\ln EY_{it}$	-0.321*** (0.023)	-0.344*** (0.025)	-0.400*** (0.045)
人力资本水平 Edu_{it}	-0.090** (0.036)	-0.098** (0.038)	-0.006 (0.084)
人均耕地面积 $Area_{it}$	0.028*** (0.002)	0.031*** (0.002)	0.035*** (0.004)
城市化水平 $Urban_{it}$	-0.151*** (0.048)	-0.187*** (0.036)	-0.097* (0.059)
受灾情况 $Disaster_{it}$	-0.007 (0.015)	0.006 (0.019)	-0.004 (0.016)
常数项 Constant	6.379*** (0.312)	6.547*** (0.413)	7.318*** (0.567)
Observations	551	551	551
AR(2)	0.218	0.186	0.239
Sargan test	0.998	0.999	1.000

农业机械化水平是机械型农业技术进步的重要表现。农业机械化作为一种有偏技术进步可以有效地替代人力和畜力,优化要素配置^[35],但是随着农业机械的广泛使用,柴油等农业能源消耗也在不断增加,这也在一定程度上促进了农业碳排放量的增加,从而影响碳排放强度。表 4 中的结果显示,机械型技术进步明显促进了农业碳排放强度的增加,相关系数为 0.038。

从生物型技术进步和机械性技术进步的综合影响结果可以看出,两种技术进步对碳排放强度影响的相关系数分别为-0.022 和 0.041,分别达 5%和 1%的显著水平。其他控制变量方面,农业经济发展水平和城市化水平降低了农业碳排放水平,相关系数分别为-0.400 和-0.097,而人均耕地面积的提升促进了碳排放强度增加,人均耕地面积的提升更利于机械等劳动替代要素的投入,增加了能源消耗,从而促进了碳排放强度的增加。

6 结论及政策建议

农业技术进步在农业经济发展过程中扮演者双重角色:一方面农业经济的发展依赖于农业技术进步,另一方面会影响农业碳排放,对生态环境产生负面影响。本研究通过系统 GMM 方法对农业技术进步与农业碳排放之间的关系进行了检验,研究发现,总体上农业技术进步对农业碳排放强度的降低具有显著影响,与前人研究结果基本一致^[10,12]。本研究进一步对农业技术进步路径进行了细分,结果显示,不同技术进步路径对农业碳排放的影响存在差异,以农业种质创新为代表的生物型技术进步有利于碳排放强度的降低,而机械型技术进步提升了碳排放强度,也即农业技术进步并不总是朝着有利于农业碳减排的方向发展。

绿色化是现代农业发展的重要导向,为有效促进农业生产提质增效,降低碳排放强度,本研究提出以下政策建议。一、推进农业种质创新和优质新品种推广。政府可以牵头推动政企、科研单位的协同育种创新,以市场需求为导向培育节水、节肥和抗病的“绿色”农作物品种;此外还要加大新品种推广力度,通过“农服中心+示范基地+经营主体”的链条式推广与示范服务模式,通过示范与推广的有机结合,提升农业新品种的科研成果转化率。二、优化农机装备结构,促进农机的新旧动能转换。一方面可以推广多功能性机械,提升农机作业效率,促进多环

节、多任务一次性完成,如玉米的收割和秸秆还田同时进行等;此外,还可以提高农机报废的补贴力度,按照马力大小细化报废补贴标准,尤其是针对那些使用量大、频率高农机,逐步淘汰落后的、能耗高的农机,推进老旧农业机械报废淘汰工作。三、优化要素投入结构,促进农业绿色技术进步。依托农技推广中心等部门,通过对农户的宣传指导,推进农业生产过程中的化肥、农药减量化施用;支持农业绿色生产技术的应用,集成推广精准施肥与测土配方技术,鼓励家庭农场、专业大户等实施绿色化生产,发挥其带动示范作用。

参考文献 References

- [1] 周勇,林源源. 技术进步对能源消费回报效应的估算[J]. 经济学家, 2007(2): 45-52
Zhou Y, Lin Y Y. The estimation of technological progress on the energy consumption returns effects[J]. *Economist*, 2007 (2): 45-52 (in Chinese)
- [2] 陈炜,殷田园,李红兵. 1997—2015 年中国种植业碳排放时空特征及与农业发展的关系[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(2): 37-44
Chen W, Yin T Y, Li H B. Spatiotemporal distribution characteristics of carbon emission from plant industry and the relations[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(2): 37-44 (in Chinese)
- [3] 何艳秋,陈柔,吴昊玥,徐杰,宋艺. 中国农业碳排放空间格局及影响因素动态研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(9): 1269-1282
He Y Q, Chen R, WU H Y, Xu J, Song Y. Spatial dynamics of agricultural carbon emissions in China and the related driving factors[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(9): 1269-1282
- [4] 李国志,李宗植. 中国农业能源消费碳排放因素分解实证分析:基于 LMDI 模型[J]. 农业技术经济, 2010(10): 66-72
Li G Z, Li Z Z. An empirical analysis on the decomposition of carbon emission factors of China's agricultural energy consumption based on LMDI model[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2010(10): 66-72 (in Chinese)
- [5] 张志高,袁征,李贝歌,张宏亮,张玉,郑美洁. 基于投入视角的河南省农业碳排放时空演化特征与影响因素分解[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(10): 152-161
Zhang Z G, Yuan Z, Li B G, Zhang H L, Zhang Y, Zheng M J. Spatial-temporal evolution characteristics and factor decomposition on agricultural carbon emissions in Henan Province[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38(10): 152-161 (in Chinese)
- [6] 颜廷武,田云,张俊鹰,汪洋. 中国农业碳排放拐点变动及时

- 空分异研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(11): 1-8
- Yan T W, Tian Y, Zhang J B, Wang Y. Research on inflection point change and spatial and temporal variation of China's agricultural carbon emissions[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(11): 1-8 (in Chinese)
- [7] 李秋萍, 李长建, 肖小勇, 武红. 中国农业碳排放的空间效应研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(4): 30-35
- Li Q P, Li C J, Xiao X Y, Wu H. The spatial effects of agricultural carbon emissions in China: Based on spatial durbin model[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(4): 30-35 (in Chinese)
- [8] 陈柔, 何艳秋, 朱思宇, 徐杰. 我国农业碳排放双重性及其与经济协调性的研究[J]. 软科学, 2020, 34(1): 132-138
- Chen R, He Y Q, Zhu S Y, Xu J. Duality of agricultural carbon emissions and coordination with economic development in China[J]. *Soft Science*, 2020, 34(1): 132-138 (in Chinese)
- [9] 何小钢, 张耀辉. 技术进步、节能减排与发展方式转型: 基于中国工业 36 个行业的实证考察[J]. 数量经济技术经济研究, 2012, 29(3): 19-33
- He X G, Zhang Y H. Technology progress, energy save and emission reduce and development pattern transformation[J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2012, 29(3): 19-33 (in Chinese)
- [10] 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-Analysis based on GTAP-E model[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2018(2): 30-40 (in Chinese)
- [11] 胡中应. 技术进步、技术效率与中国农业碳排放[J]. 华东经济管理, 2018, 32(6): 100-105
- Hu Z Y. Technical progress, technical efficiency and agricultural carbon emissions in China [J]. *East China Economic Management*, 2018, 32(6): 100-105 (in Chinese)
- [12] 杨钧. 农业技术进步对农业碳排放的影响: 中国省级数据的检验[J]. 软科学, 2013, 27(10): 116-120
- Yang J. The effects of technological advances on agricultural carbon emission: Evidence from Chinese provincial data[J]. *Soft Science*, 2013, 27(10): 116-120 (in Chinese)
- [13] Yang L, Li Z. Technology advance and the carbon dioxide emission in China: Empirical research based on the rebound effect[J]. *Energy Policy*, 2017, 101: 150-161
- [14] Valin H, Havlik P, Mosner A, Herrero M, Schmid E, Obersteiner M. Agricultural productivity and greenhouse gas emissions: Trade-offs or synergies between mitigation and food security[J]. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(3): 035019
- [15] Hicks J R. *The Theory of Wages*[M]. London: Mac Millan, 1932
- [16] 王班班, 齐绍洲. 有偏技术进步、要素替代与中国工业能源强度[J]. 经济研究, 2014, 49(2): 115-127
- Wang B B, Qi S Z. Biased technological progress, factor substitution and China's industrial energy intensity [J]. *Economic Research Journal*, 2014, 49(2): 115-127 (in Chinese)
- [17] 鞠传宝. 中国农业技术进步的动力结构分析: 基于 2001—2015 年省级面板数据的分析[J]. 中国经济问题, 2018(3): 62-69
- Ju C B. Analysis of power structure of agricultural technology progress in China: Based on province panel data from 2001—2015 [J]. *China Economic Studies*, 2018(3): 62-69 (in Chinese)
- [18] 杨福霞, 徐江川, 青平. 中国小麦生产的技术进步诱因: 投资驱动抑或价格诱导[J]. 农业技术经济, 2018(9): 100-111
- Yang F X, Xu J C, Qing P. Investment-driven or price-induced? Source of technical progress in China's wheat production [J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2018(9): 100-111 (in Chinese)
- [19] Hayami Y, Herdt R W. Market price effects of technological change on income distribution in semi subsistence agriculture [J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 1977, 59(2): 245-256
- [20] Ruttan V W. *Agricultural Research Policy*[M]. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1982
- [21] 孔祥智, 张琛, 张效榕. 要素禀赋变化与农业资本有机构成提高: 对 1978 年以来中国农业发展路径的解释[J]. 管理世界, 2018, 34(10): 147-160
- Kong X Z, Zhang C, Zhang X R. The change of factor endowment and the improvement of organic composition of agricultural capital[J]. *Management World*, 2018, 34(10): 147-160 (in Chinese)
- [22] 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
- Li B, Zhang J B, Li H P. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(8): 80-86 (in Chinese)
- [23] 梁青青. 我国农业碳排放的空间差异实证研究: 基于 1996—2015 年省际面板数据[J]. 农林经济管理学报, 2018, 17(2): 159-168
- Liang Q Q. Regional and provincial comparison of carbon sinks status: Based on 1996—2015 provincial panel data[J]. *Journal of Agro-Forestry Economics and Management*, 2018, 17(2): 159-168 (in Chinese)
- [24] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2002, 91(1/2/3): 217-232
- [25] 智静, 高吉喜. 中国城乡居民食品消费碳排放对比分析[J]. 地理科学进展, 2009, 28(3): 429-434
- Zhi J, Gao J X. Comparative analysis on carbon emissions of

- food consumption of urban and rural residents in China[J]. *Progress in Geography*, 2009, 28(3): 429-434 (in Chinese)
- [26] Intergovernmental Panel on Climate Change *Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of The Intergovernmental Panel on Climate Change*[M]. New York: Cambridge University Press, 2007
- [26] 伍芬琳, 李琳, 张海林, 陈阜. 保护性耕作对农田生态系统净碳释放量的影响[J]. 生态学杂志, 2007(12): 2035-2039
Wu F L, Li L, Zhang H L, Chen F. Effects of conservation tillage on net carbon flux from farmland ecosystems [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007 (12): 2035-2039 (in Chinese)
- [27] Dubey A, Lal R. Carbon footprint and sustainability of agricultural production systems in Punjab, India, and Ohio, USA[J]. *Journal of Crop Improvement*, 2009, 23(4): 332-350
- [28] 李波, 张俊飏, 李海鹏. 中国农业碳排放与经济研究的实证研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(12): 8-13
Li B, Zhang J B, Li H P. Empirical study on China's agriculture carbon emissions and economic development [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, 23(4): 332-350 (in Chinese)
- [29] 吴伟伟. 支农财政、技术进步偏向的农田利用碳排放效应研究[J]. 中国土地科学, 2019, 33(3): 77-84
Wu W W. Effect of fiscal support to agriculture and technical-biased progress on carbon emission from farmland use [J]. *China Land Science*, 2019, 33(3): 77-84 (in Chinese)
- [30] Arellano M, Bond S. Some tests of specification for panel data: Monte Carlo evidence and an application to employment equations[J]. *The Review of Economic Studies*, 1991, 58(2): 277-297
- [31] 中国国家统计局. 中国统计年鉴, 1997—2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 1997—2016
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Statistical Yearbook, 1997 - 2016* [M]. Beijing: China Statistics Press, 1997—2016 (in Chinese)
- [32] 中国国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴, 1997—2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 1997—2016
Department of Rural social and Economic Investigation of National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Rural Statistical Yearbook, 1997 - 2016* [M]. Beijing: China Statistics Press, 1997—2016 (in Chinese)
- [33] 国家统计局人口和就业统计司. 中国人口和就业统计年鉴, 1997—2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 1997—2016
Department of Population and Employment Statistics, National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Demographic and Employment Statistics Yearbook, 1997 - 2016* [M]. Beijing: China Statistics Press, 1997 - 2016 (in Chinese)
- [34] 秦佳虹, 王成军. 农业机械化能否改善农业劳动力错配[J]. 农业现代化研究, 2019, 40(6): 1021-1028
Qin J H, Wang C J. Can mechanization alleviate agricultural labor misallocation [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2019, 40(6): 1021-1028 (in Chinese)

责任编辑：王岩