



中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
ISSN 2096-6237, CN 13-1432/S

《中国生态农业学报(中英文)》网络首发论文

题目: 农业机械化是否会制约中国农业碳达峰?——一个非线性关系的考察
作者: 李亚玲, 路硕, 易福金
收稿日期: 2025-02-26
网络首发日期: 2025-09-18
引用格式: 李亚玲, 路硕, 易福金. 农业机械化是否会制约中国农业碳达峰?——一个非线性关系的考察[J/OL]. 中国生态农业学报(中英文).
<https://link.cnki.net/urlid/13.1432.S.20250918.1403.001>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.12357/cjea.20250127

李亚玲, 路硕, 易福金. 农业机械化是否会制约中国农业碳达峰?——一个非线性关系的考察[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, DOI: 10.12357/cjea.20250127

LI Y L, LU S, YI F J. Will agricultural mechanization restrict carbon peaking in China's agriculture — An examination of nonlinear relationships[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, DOI: 10.12357/cjea.20250127

农业机械化是否会制约中国农业碳达峰?*

——一个非线性关系的考察

李亚玲¹, 路硕¹, 易福金²

(1. 安徽农业大学经济管理学院 合肥 230036; 2. 浙江大学中国农村发展研究院/公共管理学院 杭州 310058)

摘要: 农业机械化带来农业能源消耗增加, 成为学术界广泛讨论的制约农业碳达峰的因素。同时, 农业机械化也会导致农业化学品等要素的重新配置和种植结构调整, 进而给中国农业碳排放的变化带来不确定性。本文通过厘清上述路径, 深度剖析农业机械化发展对中国农业碳达峰的影响。本文基于全国县级层面数据, 利用固定效应模型实证分析农业机械化水平对中国农业碳排放的影响, 并进一步采用联立方程模型, 从化学品投入和水稻种植两个角度实证检验其中的作用路径。研究结果表明: 1) 随着农业机械使用强度的增加, 农业碳排放强度呈先增后减的“倒 U 型”变化, 拐点出现在机械使用强度达 $87.50 \text{ kW} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 远高于当前全国平均水平。2) 随着农业机械使用强度的提高, 化肥和农药等农业化学品投入强度呈先增加后减少的“倒 U 型”变化趋势, 成为农业碳排放强度呈“倒 U 型”变化趋势的主导因素。3) 随着农业机械使用强度的增加, 水稻播种面积占比呈先减少后增加的“U 型”变化, 但不足以扭转农业碳排放强度的“倒 U 型”变化趋势。因此, 农业机械化发展在初期会增加农业碳排放强度, 成为制约农业碳达峰的因素。但是, 当农业机械化水平发展到一定程度后, 将有助于农业碳减排, 这种“倒 U 型”变化趋势主要是由农业化学品投入强度的类似变化所致。基于以上结论, 应加快推进农业机械化进程以促进农业碳减排, 但在农业机械化初期应加强农业化学品的环境管控, 并优化农业生产结构以推动农业碳减排。

关键词: 农业机械化; 农业碳排放; 农业化学品投入; 水稻种植

中图分类号: F323.2

Will agricultural mechanization restrict carbon peaking in China's agriculture — An examination of nonlinear relationships

LI Yaling¹, LU Shuo¹, YI Fujin²

(1. College of Economics and Management, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. China Academy for Rural Development / School of Public Affairs, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Agricultural mechanization has led to increased energy consumption in agriculture, becoming a widely discussed factor restricting China's agricultural carbon peak. However, what is often overlooked is that agricultural mechanization also results in the reallocation of agricultural inputs, such as chemicals, and adjustments in crop planting structures, which in turn introduce uncertainties into the changes in China's agricultural carbon emissions. This paper provides a detailed analysis of the impact of agricultural mechanization on China's agricultural carbon peak by clarifying these pathways. Based on county-level data across the country, this

* 安徽省高校科研计划项目(人文社会科学类)重点项目(2024AH052424)、国家重点研发计划子课题(2023YFD170020X-04)、国家自然科学基金面上项目(42471310)和国家自然科学基金-盖茨基金国际合作重点项目(72261147758)资助

李亚玲, 主要从事农业资源与环境经济相关领域研究。E-mail: yaling_li@ahau.edu.cn

收稿日期: 2025-02-26 接受日期: 2025-09-16

* This study was supported by the Key Project of Anhui Provincial Higher Education Institutions Research Program (Humanities and Social Sciences) (2024AH052424), Sub-project of the National Key R&D Program of China during the 14th Five-Year Plan Period (2023YFD170020X-04), General Program of the National Natural Science Foundation of China (42471310), and National Natural Science Foundation of China-Gates Foundation International Cooperation Key Project (72261147758).

**Corresponding author, LI Yaling, E-mail: yifujin@zju.edu.cn

Received Feb. 26, 2025; accepted Sep. 16, 2025

paper empirically analyzes the impact of agricultural mechanization on agricultural carbon emissions in China using a fixed effects model. Furthermore, a simultaneous equations model is employed to empirically test the pathways of this impact from the perspectives of chemical inputs and rice planting. The research findings indicate that 1) with the increase in the intensity of agricultural mechanization, agricultural carbon emission intensity first increases and then decreases in an inverted U-shape, with the turning point occurring when the intensity of mechanization reaches $87.50 \text{ kW} \cdot \text{hm}^{-2}$, much higher than the current national average level; 2) as the intensity of agricultural mechanization increases, the intensity of agricultural chemical inputs, such as fertilizers and pesticides, follows a similar inverted U-shape pattern, becoming the dominant factor driving the inverted U-shape trend in agricultural carbon emission intensity; 3) as the intensity of agricultural mechanization increases, the proportion of rice planting area initially decreases and then increases in a U-shape, but this is not sufficient to reverse the inverted U-shape trend of agricultural carbon emission intensity. Therefore, in the early stages of agricultural mechanization, agricultural carbon emission intensity will increase, becoming a factor restricting the agricultural carbon peak. However, when agricultural mechanization reaches a certain level, it will contribute to agricultural carbon reduction. This inverted U-shape trend is mainly due to the similar changes in agricultural chemical input intensity. Based on these findings, it is crucial to accelerate the process of agricultural mechanization to promote agricultural carbon reduction, while enhancing environmental management of agricultural chemicals and optimizing agricultural production structures in the early stages of mechanization to drive further carbon reduction in agriculture.

Keywords: agricultural mechanization; agricultural carbon emissions; agricultural chemical inputs; rice planting

在中国“双碳”战略目标下, 2022 年发布的《农业农村减排固碳实施方案》明确指出了农业减排固碳的重要任务。由于非二氧化碳温室气体对气候变暖的显著影响, 中国政府高度重视对其进行控制。中国农业生产过程中, 甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)的排放分别占全国总温室气体排放量的 40%和 60%。此外, 农业领域的能源消耗也是中国二氧化碳(CO_2)排放的一个重要来源^[1-2]。联合国粮食及农业组织的数据显示, 中国农业导致的碳排放占全球农业总排放的 10%和国内总碳排放的 7%, 其中种植业产生的碳排放超过一半(后文提到的农业指狭义农业, 即种植业)。因此, 农业碳减排成为中国实现“双碳”目标的关键路径之一。

中国农业碳排放已接近峰值^[3], 但农业机械化发展可能成为制约农业碳达峰的重要因素^[4]。由于土地流转政策和农机购置补贴政策的实施以及农机社会化服务的兴起, 中国农业机械化水平得到了快速提升^[5-7]。近 20 年来, 全国农业机械总动力增长了约 1.1 倍, 全国农作物耕种收综合机械化率增长超过 55%^[8]。在国内政策驱动和农业现代化趋势的推动下, 农业机械化水平将进一步提高, 随之带来的能源消耗和碳排放的增加可能会推高农业整体碳排放量, 这也成为学界认为农业机械化发展可能威胁农业碳达峰的重要依据。值得注意的是, 农业机械化不仅直接带来农业能源消耗的增加, 同时也会导致农业化学品投入强度和作物种植结构的调整, 农业机械化是否会成为制约农业碳达峰的因素尚无法确定。从农业全生命周期角度的碳排放结构来看, 农业化学品投入构成了农业碳排放的最大来源, 主要包括化学品施用过程中造成的农地 N_2O 排放以及化学品制造、运输过程中消耗能源引起的碳排放。另外, 水稻(*Oryza sativa*)种植构成了农业碳排放的第二大来源, 主要原因在于稻田在淹水条件下形成厌氧环境, 促使根系微生物分解有机物质, 并产生大量 CH_4 。农业机械的使用通过推动技术进步和重新配置农业生产要素, 改变了农业化学品投入强度与种植结构, 引起与农业化学品投入关联的碳排放和作物田间碳排放相应发生变化, 由此对农业碳排放造成重要影响。在上述多重路径下, 农业机械化将会给中国农业碳排放的变化带来诸多不确定性, 农业机械化是否会制约农业碳达峰尚无法确定, 值得进一步研究。

近年来, 关于农业机械化水平与农业碳排放之间关系的研究初步显现。例如, 陈银娥等^[9]基于 1997—2014 年中国 26 个省份面板数据捕捉农业机械化水平、产业升级与农业碳排放之间的联动关系, 发现农业机械化水平的提升能够减少农业碳排放总量, 但是, 部分学者却发现农业机械化显著促进了粮食主产区农业碳排放总量的增加^[10]。同时, 部分学者基于省市层面数据的分析指出, 农业机械化水平的提高不仅能够显著促进本地农业碳排放强度的下降, 还能够突破土地产权不稳定和土地细碎化等条件的限制, 发挥技术扩散的空间溢出效应, 从而降低邻近地区的农业碳排放强度^[11-12]。从现有研究来看, 仍然存在以下不足之处。一方面, 现有研究就农业机械化水平与农业碳排放之间的关系尚未达成一致结论, 主要原因在于数据选取和农业碳排放核算方法的差异, 忽视了农业机械化水平与农业碳排放之间可能的非线性关系。首先, 现有研究大多基于省市级层面数据展开实证分析, 数据维度较高问题导致无法捕捉农业机械化水平对农业碳排放的潜在非线性影响。其次, 相关研究多基于全国统一的农业温室气体排放因子进行农业碳排放核算, 并且未采用全生命周期评价法核算农业碳排放强度, 忽视了稻田 CH_4 排放, 导致核算结果出现偏差, 从而影响实证估计结果。另一方面, 现有研究多从产业升级和空间溢出效应等角度分析农业机械化水平对农业碳排放的影响路径, 未尝试从经营主体种植决策调整角度识别农业机械化水平对农业碳排放的影响路径, 即无法捕捉农业

机械化水平通过改变农业化学品投入强度和种植结构对农业碳排放产生的影响,导致研究结论难以直接指导机械化背景下农业低碳发展政策的制定。

鉴于此,本研究首先基于生命周期评价法,采用地区和作物差异化排放因子核算中国农业全生命周期碳排放量;其次,利用全国(不包括西藏)县级层面数据,考虑农业机械化水平与中国农业碳排放之间的非线性关系,实证分析农业机械化水平对中国农业碳排放强度的影响;最后,从农业化学品投入强度和种植结构两个维度,实证检验农业机械化水平对中国农业碳排放强度产生影响的作用路径。本研究的边际贡献如下:第一,本研究揭示了农业机械化水平对中国农业碳排放强度的非线性影响,能够给已有研究结论的分歧提供部分解释;第二,本研究从农业化学品投入强度和种植结构两个维度规范、系统地实证检验了农业机械化水平对中国农业碳排放强度的影响路径,研究结论可以为农业机械化发展驱动下的农业低碳发展政策制定提供决策参考;第三,本研究基于全生命周期评价法以及地区、作物差异化排放因子,核算农业碳排放,能够更加科学全面地核算中国农业碳排放强度,为相关研究提供数据支撑,并且能够更加准确地识别农业机械化水平对中国农业碳排放强度的影响。

1 理论分析与研究假说

农业机械化发展不仅直接通过增加机械使用的能源消耗促进农业碳排放强度的增加,也会通过影响农业化学品投入强度和种植结构使得农业碳排放强度发生变化(图 1)。从农业全生命周期角度的碳排放结构来看,与农业化学品投入相关的农地 N_2O 排放和能源消耗碳排放为农业碳排放的最大来源,水稻种植过程中产生的稻田 CH_4 排放为第二大排放源^[13]。由于农业机械使用对农业碳排放强度产生的影响可以直接通过核算得到,且农业机械使用带来的碳排放占总碳排放的比重较小,本文将重点从农业化学品投入和水稻种植两个维度,分析农业机械化水平影响农业碳排放强度的路径。需要说明的是,水稻种植虽仅分布于部分地区,但稻田 CH_4 排放是仅次于化学品投入碳排放的第二大排放源,这就要求将水稻播种面积变化这一维度纳入检验农业机械化水平对农业碳排放强度的影响路径分析框架。与此同时,水稻主产区(如长江中下游平原)既是农机推广的重点区域,也面临着显著的农业碳减排压力。在此背景下,揭示农业机械化水平如何通过调节水稻播种面积进而影响农业碳排放强度的具体路径,将有助于为差异化、精准化的碳减排政策设计提供科学依据。

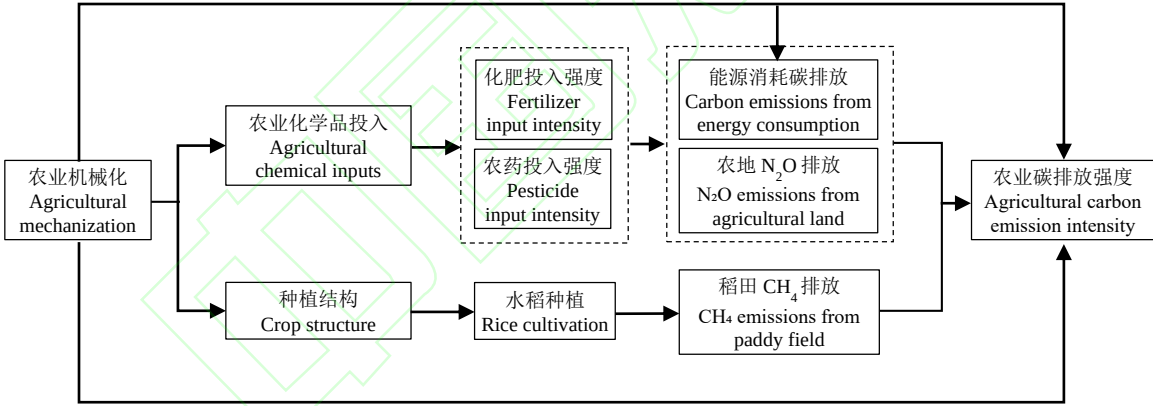


图 1 理论分析框架

Fig. 1 Theoretical analysis framework

1.1 农业机械化水平与农业化学品投入强度

农业机械化引发了农业生产要素的重新配置,并对农业化学品投入强度产生了非线性影响。这种影响表现为“倒 U 型”关系,其内在机制可从以下理论角度进行更深入的分析和阐释。一方面,在农业机械化发展的初期阶段,其对农业化学品投入强度具有正向促进作用,具体表现在如下两个方面。首先,农业化学品投入的粗放型增长显著,农业机械化抑制了有机肥替代化肥、生物防治等保护性耕作方式的采用,更倾向于促进化肥和农药等便于机械化操作的高碳型农业生产行为,导致农业化学品施用强度的增加。其次,农业化学品对劳动力投入的替代效应显现,机械化的推广加速了农业劳动力向非农领域的转移,农业劳动力相对稀缺的状况使农业生产者倾向于以农业化学品替代劳动力,进一步推高了农业化学品的使用量^[14]。另一方面,随着农业机械化水平的进一步提升,农业化学品投入强度将会逐渐降低,这一过程具体体现在技术升级、施肥技术优化和精准农业技术应用 3 个方面。首先,高水平机械化的普及推动了精细化操作和可持续耕作方式的发展,例如通过有机废弃物改善土壤质量、提高化肥利用效率,从而减少化肥施用量^[15]。其次,机械化施肥技术的进步实现了由传统浅施向深施的转变,深施技术有效减少了化肥的挥发和分解损失,提高了化肥

吸收率,从而显著降低了化肥投入强度^[16-17]。最后,现代农业机械设备的使用能够提高农药和化肥的施用精准度,使其在土壤中的分布更加均匀,从而减少农业化学品的浪费和损失,实现农业化学品的减量化^[18]。从理论上说,这一“倒U型”关系的拐点可归因于农业机械化进程中成本与收益结构的动态变化。初期阶段,农业机械化带来的农业化学品投入的粗放型增长和其对劳动力投入的替代效应使生产者更加依赖化学品投入以追求利润最大化。然而,随着机械化水平的提升,先进机械技术的推广逐渐改善了农业化学品的利用效率,推动化学品投入从粗放型增长向高效型优化的转变。当机械化达到一定水平后,其对农业化学品利用效率的提升起主导作用,从而引发农业化学品投入强度的下降。

1.2 农业机械化水平与水稻播种面积

随着农业机械化水平的提升,水稻播种面积占比呈先减少后增加的“U型”变化趋势。这一现象的形成可以从水稻生产的机械化特征及其动态变化加以解释。在机械化发展初期,由于水稻生产对地形条件和生产技术要求较高,现有农业机械在复杂地形的适应性不足且操作成本较高,机械化优势难以在水稻种植中得到充分体现。相较于其他粮食作物,水稻种植的单位生产成本更高,从而导致其播种面积占比逐步减少。然而,随着机械化技术的持续进步,如适用于水稻种植的中小型机械设备的推广及精细化作业技术(如深施技术)的普及,水稻生产机械化水平显著提高,生产效率和经济性随之改善。这一过程中,水稻种植的比较成本逐渐下降,其相对竞争力逐步增强,播种面积占比得以回升,形成“U型”变化趋势。这种转变不仅反映了农业机械化技术进步对水稻种植边际收益的动态影响,还揭示了生产者在不同机械化发展阶段对资源配置的调整行为。在机械化初期,生产者倾向于优先将机械化资源配置于作业成本较低的作物种植,而在机械化水平提高后,生产者逐步扩展资源分配范围,涵盖水稻等原本难以实现机械化作业的作物。

1.3 农业机械化水平与农业碳排放强度

随着农业机械化水平的提高,农业碳排放强度呈先增加后减少的“倒U型”变化趋势。这种趋势的形成源于农业化学品投入强度和播种面积占比的动态变化及其相互作用。由于农业化学品投入产生的碳排放为农业碳排放的最大来源,随着农业机械化水平的提高,农业碳排放的变化趋势将由农业化学品投入强度变化主导。具体来说,随着农业机械化水平的提高,农业碳排放强度呈“倒U型”变化可归因于以下机制的驱动和转化。在农业机械化发展初期,机械化设备的推广促进了农业化学品投入的粗放型增长,同时降低了生产者对劳动密集型生产方式的依赖,促使农业化学品作为劳动力的替代品得到广泛使用。这一阶段,化肥和农药使用强度显著增加,由此产生的增碳效应主导了农业碳排放强度的上升趋势。与此同时,水稻播种面积占比因其机械化作业成本较高而逐步减少,带来一定程度的减排效应。然而,由于农业化学品的增碳效应占主导地位,整体农业碳排放强度依然呈上升趋势。当农业机械化水平达临界点后,机械化技术的进步带来了生产方式的优化和化学品利用效率的提升,从而引发化学品投入强度的下降。与此同时,机械化技术对复杂作物种植条件的适应性增强,使水稻生产的成本劣势逐渐缩小,其播种面积占比开始逐步增加,带来一定的增碳效应。由于此时农业化学品的减碳效应超过了水稻播种面积增加带来的增碳效应,最终引发农业碳排放强度的下降趋势。因此,从理论上推断,农业机械化水平对农业碳排放强度的影响呈先促进后抑制的“倒U型”特征。基于此,提出如下研究假说:

假说 1: 农业机械化水平的提升对中国农业碳排放强度产生先促进后抑制的“倒U型”影响。

假说 2: 农业机械化通过改变农业化学品投入强度和播种面积占比对农业碳排放强度产生显著影响。

2 识别策略、变量选择与特征事实

2.1 识别策略

在进行 Hausman 检验之后,本文选择固定效应模型分析农业机械化水平对农业碳排放强度的总体影响:

$$CE_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Mech_{it} + \alpha_2 Sq_Mech_{it} + \alpha_3 Z_{it} + T_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中: CE_{it} 为被解释变量,表示地区 i 第 t 年的农业碳排放强度; $Mech_{it}$ 为核心解释变量,表示地区 i 第 t 年的农业机械化水平;考虑到农业机械化水平与农业碳排放强度间可能存在非线性关系,本研究在模型中引入农业机械化水平的平方项(Sq_Mech_{it}),以便于更为准确地估计其潜在的非线性影响; Z_{it} 为一系列控制变量,主要包括农作物总播种面积、受灾面积、耕地经营面积、化肥相对价格指数、农药相对价格指数、水稻价格指数; T_t 为政策虚拟变量,用于控制不随地区改变但随时间改变的政策、技术进步等因素的干扰,同时,固定效应模型已控制地区层面的土壤肥力和地形特征等不随时间改变的个体效应; α_0 、 α_1 、 α_2 和 α_3 为待估参数; ε_{it} 为随机扰动项。

由于与机械投入引起的能源消耗产生的碳排放占中国农业碳排放的比重较小,而化肥和农药投入以及

稻田 CH₄ 排放为中国农业碳排放的主要来源, 因此, 本文重点从农业化学品投入强度和水稻播种面积两个维度探讨农业机械化水平对农业碳排放强度的影响路径, 模型设定如下:

$$\text{LnUse}_{it}^{\text{fert}} = \alpha_1 + \beta_1 \text{Mech}_{it} + \gamma_1 \text{Sq_Mech}_{it} + \delta_1 Z_{1it} + T_t + \varepsilon_{1it} \quad (2)$$

$$\text{LnUse}_{it}^{\text{pest}} = \alpha_2 + \beta_2 \text{Mech}_{it} + \gamma_2 \text{Sq_Mech}_{it} + \delta_2 Z_{2it} + T_t + \varepsilon_{2it} \quad (3)$$

$$\text{LnArea}_{it}^{\text{rice}} = \alpha_3 + \beta_3 \text{Mech}_{it} + \gamma_3 \text{Sq_Mech}_{it} + \delta_3 Z_{3it} + T_t + \varepsilon_{3it} \quad (4)$$

式中: $\text{Use}_{it}^{\text{fert}}$ 、 $\text{Use}_{it}^{\text{pest}}$ 和 $\text{Area}_{it}^{\text{rice}}$ 为路径分析变量, 分别表示化肥投入强度、农药投入强度和水稻播种面积占比, 这些变量均进行对数化处理; Z_{1it} 、 Z_{2it} 和 Z_{3it} 为一系列控制变量; α_s 、 β_s 、 γ_s 和 δ_s ($s=1, 2, 3$) 为待估计参数, ε_{1it} 、 ε_{2it} 和 ε_{3it} 为随机扰动项。公式(2)-(4)分别用于考察农业机械化水平对化肥投入强度、农药投入强度和水稻播种面积占比的影响。

2.2 变量选择与说明

2.2.1 被解释变量

被解释变量为中国农业碳排放强度, 即单位面积农业碳排放量。本研究采用全生命周期评价法^[13,19]核算中国农业碳排放总量, 其系统边界涵盖农业生产过程中直接与间接的碳排放源, 包括化肥、农药、农膜等农业投入品的生产和使用、农田耕作、灌溉以及水稻种植过程中的甲烷排放等关键环节。纳入碳排放核算的作物包括水稻、小麦(*Triticum aestivum*)、玉米(*Zea mays*)、大豆(*Glycine max*)、马铃薯(*Solanum tuberosum*)、棉花(*Gossypium*)、油菜籽(*Brassica napus*)、糖料作物、蔬菜和水果等, 这些播种面积总和占农作物总播种面积的比重超过 85%。农业碳排放强度核算公式如下:

$$\text{CE}_i = \sum_g \sum_c \sum_s T_{ics} \times \text{EF}_{icsg} \times \text{GWP}_g \times 12/44 / \sum_c A_{ic} \quad (5)$$

式中: CE_i 为地区 i 的农业碳排放强度; T_{ics} 为地区 i 作物 c 碳排放源 s 的生产活动数据; EF_{icsg} 为地区 i 作物 c 碳排放源 s 温室气体 g 的排放因子; GWP_g 为温室气体 g 的全球增温潜势, 联合国政府间气候变化专门委员会第六次综合报告中, 100 年时间尺度下 N₂O 和 CH₄ 的全球增温潜势分别为 273 和 27.9; A_{ic} 为地区 i 作物 c 的播种面积。本文选取的温室气体排放因子考虑了作物和地区的差异性, 农业碳排放的核算结果能够更加贴合中国的实际生产情况, 相应的排放因子数值参考已有研究^[18]。不同来源碳排放均折算为碳当量进行计算。

2.2.2 核心解释变量与路径变量

本文的核心解释变量为农业机械使用强度, 以衡量农业机械化水平, 用单位面积农业机械总动力作为代理变量。一个地区的农业机械使用强度越大, 则表示其农业机械化水平越高。基于前文理论分析, 本文重点从农业化学品投入强度和水稻播种面积两个维度, 探讨农业机械化水平对中国农业碳排放强度的影响路径。具体地, 本文选取化肥投入强度和农药投入强度作为路径分析变量, 分析农业机械化通过改变农业化学品投入强度影响中国农业碳排放强度的路径。同时, 本文选择水稻播种面积占比(即水稻播种面积与粮食作物播种面积的比值)作为路径分析变量, 检验农业机械化通过改变水稻播种面积对中国农业碳排放强度产生的影响。

2.2.3 控制变量

为了消除其他因素对估计结果产生的不利影响, 本文在模型中加入一系列控制变量, 包括农业生产相关变量、农产品与投入要素价格相关变量和政策虚拟变量。农业生产相关变量包括农作物总播种面积、受灾面积以及耕地经营规模等变量, 用于控制生产端驱动因素对农业碳排放强度的影响^[13,19-20]。其中, 农作物总播种面积反映农业活动规模, 较大的面积通常伴随更高农业投入与碳排放, 控制该变量可排除规模效应干扰; 受灾面积影响农民种植结构调整与投入决策, 进而改变碳排放强度, 控制该变量可排除自然灾害扰动; 耕地经营规模直接关联农业化学品投入强度与种植结构, 需控制其对碳排放强度的潜在影响。农产品与投入要素价格相关变量涵盖化肥相对价格指数、农药相对价格指数、水稻价格指数等, 以 2002 年为基期对上述指数进行平减, 用于控制农业生产要素和产品的市场价格波动对农业碳排放强度的影响^[21]。具体来说, 化肥和农药价格变动直接影响生产成本, 鉴于化肥和农药投入强度和农业碳排放强度间存在明显的正相关关系, 因此需在模型中控制二者的价格指数。同样地, 水稻价格变动直接影响水稻播种面积和要素投入等生产决策, 考虑到稻田 CH₄ 排放是农业碳排放的重要来源, 需将水稻价格指数作为控制变量加入模型。2015 年中国农业部颁布《农药使用量零增长行动方案》和《化肥使用量零增长行动方案》, 将会对化肥和农药投入强度产生明显影响, 因此本文设置政策虚拟变量, 2015 年之前的年份取值为 0, 2015 年及其之后的年份取值为 1, 以排除政策因素的干扰^[22]。

2.3 数据来源

本文采用 2002—2017 年全国范围内的县级层面数据展开分析, 数据来源于中国农业科学院农业信息研究所的《中国分县农业农村经济数据库》和中国县域经济数据库。价格指数来自《中国统计年鉴》和《中国农村统计年鉴》。论文剔除部分关键变量遗漏严重的样本及异常值, 共保留 2 149 个县(市、区)的数据。由于中国农业科学院的数据库中 2017 年之后获取的数据只涵盖中国部分县(市、区), 因此本文所采用的数据截至 2017 年, 尽管时效性并非最强, 但涵盖了全国范围内县级层面的信息, 仍能有效地识别农业机械化对中国农业碳排放强度的边际影响。变量的描述性统计分析见表 1。

表 1 变量描述性统计分析

Table1 Descriptive statistical analysis of variables					
变量类	变量	平均值	标准差	最小值	最大值
Variable category	Variable	Mean	Standard deviation	Minimum	Maximum
被解释变量	农业碳排放强度	1.179	0.510	0.167	21.800
Explained variable	Agricultural carbon emission intensity /(t·hm ⁻²)				
解释变量	农业机械使用强度	0.635	0.689	0.001	17.573
Explanatory variable	Agricultural machinery utilization intensity /(×10 kW·hm ⁻²)				
路径变量	水稻播种面积占比 Proportion of rice sown area	0.276	0.220	0.000	1.000
Path variable	化肥投入强度 Fertilizer input intensity /(t·hm ⁻²)	0.383	0.300	0.006	14.410
	农药投入强度 Pesticide input intensity /(t·hm ⁻²)	0.017	0.025	0.000	1.461
控制变量	农作物总播种面积	6.017	4.775	0.028	50.720
Control variable	Total sown area of crops /(×10 ⁴ hm ²)				
	受灾面积占比 Proportion of disaster-affected area	0.286	0.226	0.000	0.887
	化肥相对价格指数 Relative price index of fertilizers	1.018	0.073	0.692	1.261
	农药相对价格指数 Relative price index of pesticides	0.822	0.131	0.562	1.153
	耕地经营规模	0.158	0.263	0.010	3.068
	Farmland operation scale /(hm ² ·person ⁻¹)				
	水稻价格指数 Rice price index	1.528	0.438	0.870	2.720

3 结果与讨论

3.1 农业机械使用强度和碳排放强度变化

由图 2 可以看出, 中国农业机械使用强度整体上呈明显上升趋势, 2002 年的农业机械使用强度仅为 4.40 kW·hm⁻², 2017 年增至 6.63 kW·hm⁻², 增长近 50%。2016 年, 中国农业机械使用强度出现了短暂下降, 原因是小型农机具保有量下降, 随后继续呈增长趋势。同时, 中国农业碳排放强度总体上呈波动上升的变化趋势, 从 2002 年的每公顷 1.16 t 碳当量增至 2017 年的 1.24 t 碳当量。从农业碳排放的来源结构看, 化肥投入为最大的碳排放来源, 2017 年化肥投入带来的碳排放达 1.13 亿 t 碳当量, 在所有来源碳排放中占比高达 59%, 农药投入产生的碳排放约占农业碳排放总量的 12%。水稻种植产生的稻田 CH₄ 排放为第二大排放源, 占比达 20%。尽管与机械使用关联的碳排放占总碳排放量的比重不大, 但农业机械化发展将带来农业化学品投入和水稻播种面积的同步变化, 从而给农业碳排放的未来变化带来不确定性。

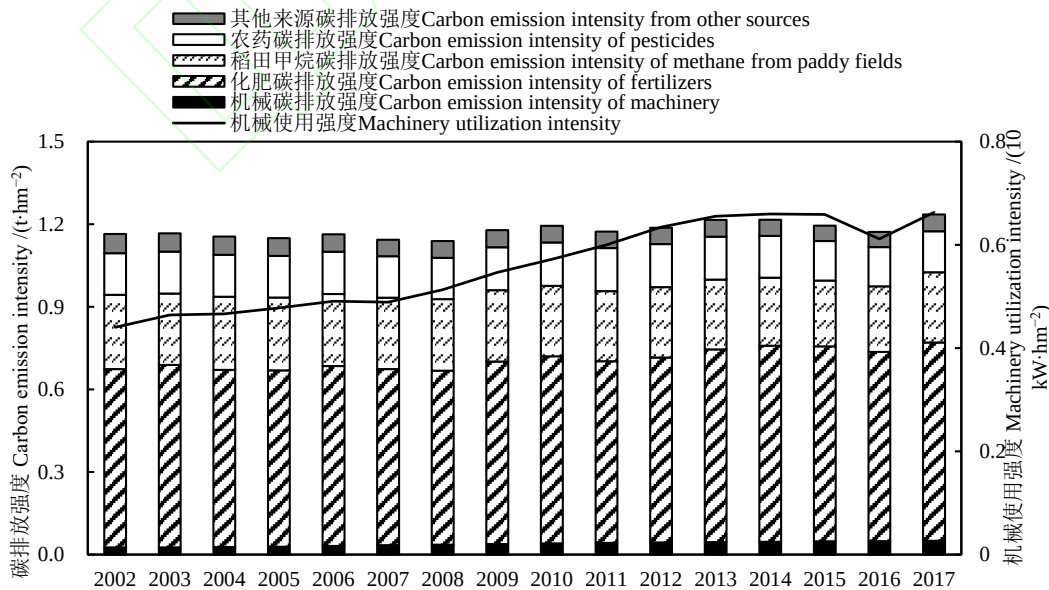


图 2 2002—2017 年中国农业机械使用强度和农业碳排放强度变化趋势

Fig. 2 The trend of changes in agricultural machinery utilization intensity and agricultural carbon emission intensity in China from 2002 to 2017

3.2 基准回归结果与讨论

表 2 报告了农业机械使用强度影响农业碳排放强度的基准回归结果。模型 1 仅包含农业机械使用强度, 未加入控制变量。模型 2 在模型 1 的基础上加入了农业机械使用强度的平方项, 结果表明农业机械使用强度对农业碳排放强度造成“倒 U 型”的非线性影响。模型 3 和模型 4 分别在模型 1 和模型 2 的基础上加入了控制变量, 结果显示农业机械使用强度的一次项显著为正, 平方项显著为负, 农业机械使用强度与农业碳排放强度的“倒 U 型”非线性关系得到验证。随着农业机械使用强度的提高, 农业碳排放强度呈“倒 U 型”变化趋势, “倒 U 型”曲线的拐点出现在农业机械使用强度为 87.50 kW·hm⁻² 处。当农业机械使用强度小于拐点时, 随着农业机械化的提升, 农业碳排放强度呈增加趋势; 当农业机械使用强度超过拐点时, 随着农业机械化水平的进一步提高, 农业碳排放强度呈降低趋势。

从现实情况来看, 尽管中国部分地区的农业机械使用强度已越过拐点, 如辽宁省长海县(127.64 kW·hm⁻²) 等, 但仍有一些县(市、区)的农业机械化水平未达到拐点水平, 如广东省惠来县(0.12 kW·hm⁻²)。2017 年和 2021 年, 中国县级层面农业机械使用强度的平均值分别为 5.94 和 6.39 kW·hm⁻², 与拐点相比仍存在极大差距。因此, 就当前情况来看, 大部分地区农业机械使用强度未到达“倒 U 型”曲线拐点, 农业机械使用强度的提高将带来农业碳排放强度的增加, 农业机械化的发展确实是农业碳达峰的制约因素。然而, 当农业机械使用强度越过了“倒 U 型”曲线拐点, 农业机械化的进一步发展能够促进农业碳减排。

表 2 农业机械使用强度对农业碳排放强度影响的估计结果

变量 Variable	农业碳排放强度 Agricultural carbon emission intensity			
	模型 1 Model 1	模型 2 Model 2	模型 3 Model 3	模型 4 Model 4
农业机械使用强度 Agricultural machinery utilization intensity	0.139*** (0.039)	0.252*** (0.047)	0.095*** (0.026)	0.175*** (0.027)
农业机械使用强度的平方项 Squared term of agricultural machinery utilization intensity		-0.009*** (0.002)		-0.010*** (0.001)
农作物总播种面积 Total sown area of crops			-0.020*** (0.003)	-0.018*** (0.002)
受灾面积占比 Proportion of disaster-affected area			-0.008 (0.009)	-0.009 (0.008)
化肥相对价格指数 Relative price index of fertilizers			-0.090** (0.041)	-0.087** (0.041)
农药相对价格指数 Relative price index of pesticides			-0.249*** (0.032)	-0.233*** (0.032)
耕地经营规模 Farmland operating scale			-0.016 (0.018)	-0.016 (0.018)
水稻价格指数 Rice price index			-0.003 (0.010)	-0.013 (0.010)
常数项 Constant term	1.074*** (0.022)	1.023*** (0.025)	1.545*** (0.067)	1.492*** (0.066)
政策虚拟变量 Policy dummy variable	Yes	Yes	Yes	Yes
地区固定效应 Region fixed effect	Yes	Yes	Yes	Yes
观测值数量 Number of observations	19 302	19 302	18 649	18 649
R ²	0.086	0.100	0.049	0.050

***: $P < 0.01$; **: $P < 0.05$.

3.3 稳健性检验

3.3.1 验证“倒 U 型”关系

以平方项系数是否显著作为判断“U 型”或“倒 U 型”关系是否存在标准过于薄弱^[23], 因此有必要进一步检验前文实证分析得到的农业机械使用强度与农业碳排放强度之间的“倒 U 型”关系。本文采用 Utest (U 检验)方法^[24]对农业机械使用强度与中国农业碳排放强度之间的“倒 U 型”关系进行验证, 结果如表 3 所示。检验结果表明, 农业机械使用强度的变动区间为 0.01~175.73 kW·hm⁻², 实证分析结果中的拐点(87.50 kW·hm⁻²)落在该数据范围内, 左侧区间斜率为 0.175 且在 1%的水平上显著, 右侧区间斜率为-0.188 且在 1%的水平上显著。因此, 农业机械化对中国农业碳排放强度的影响呈“倒 U 型”的结果得到了进一步验证, 估计结果具有稳健性。

表 3 农业机械使用强度与农业碳排放强度间的“倒 U 型”关系检验结果

Table 3 Results of the test for an “inverted U-shaped” relationship between agricultural machinery utilization intensity and agricultural carbon emission intensity

	农业碳排放强度 Agricultural carbon emission intensity	
	下限 Lower bound	上限 Upper bound
农业机械使用强度区间 Interval of agricultural machinery utilization intensity / (×10 kW·hm ⁻²)	0.001	17.573
斜率 Slope	0.175	-0.188

T 值 T value	6.518	-7.096
P	0.000	0.000

3.3.2 排除“S 型”关系

为了排除农业机械使用强度与农业碳排放强度间呈“S 型”变化趋势的可能性,本文进一步在模型中加入农业机械使用强度的三次项进行重新估计,结果如表 4 所示。模型 1 和模型 2 中,一次项和平方项系数与表 2 结果一致,在模型 3 中,农业机械使用强度的三次项不显著,这说明随着农业机械使用强度的提升,中国农业碳排放强度的变化不会呈“S 型”变化趋势,而是呈“倒 U 型”变化趋势,这为前文估计结果的稳健性提供了进一步的支持。

表 4 农业机械使用强度与农业碳排放强度间不存在“S 型”关系的检验结果

Table 4 Results of the test for the absence of an “S-shaped” relationship between agricultural machinery utilization intensity and agricultural carbon emission intensity

变量 Variable	农业碳排放强度 Agricultural carbon emission intensity		
	模型 1 Model 1	模型 2 Model 2	模型 3 Model 3
农业机械使用强度 Agricultural machinery utilization intensity	0.095*** (0.026)	0.175*** (0.027)	0.191*** (0.026)
农业机械使用强度的平方项 Squared term of agricultural machinery utilization intensity		-0.010*** (0.001)	-0.016* (0.009)
农业机械使用强度的三次项 Cubic term of agricultural machinery utilization intensity			0.000 (0.001)
常数项 Constant term	1.545*** (0.067)	1.492*** (0.066)	1.483*** (0.063)
控制变量 Control variable	Yes	Yes	Yes
政策虚拟变量 Policy dummy variable	Yes	Yes	Yes
地区固定效应 Region fixed effect	Yes	Yes	Yes
观测值数量 Number of observations	18 649	18 649	18 649
R ²	0.044	0.049	0.050

***: $P < 0.01$; *: $P < 0.1$.

4 影响路径检验结果与讨论

4.1 路径检验结果

表 5 报告了农业机械使用强度影响农业碳排放强度的作用路径检验结果。在模型 1-4 的回归结果中,农业机械使用强度一次项均显著为正,二次项均显著为负,说明农业机械使用强度对化肥和农药投入强度均产生“倒 U 型”的非线性影响,随着农业机械使用强度的提高,化肥和农药投入强度呈先增加后减少的“倒 U 型”变化趋势,“倒 U 型”曲线的拐点分别出现在农业机械使用强度为 91.04 和 69.31 $\text{kW}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处。这说明农业机械化初期会引起农业化学品投入强度的增加,如理论分析部分所述,主要原因在于机械对劳动力的替代促进了为追求利润最大化而过度使用农业化学品的行为,抑制了采纳有机肥替代化肥和生物防治等环境友好型生产方式的行为。然而,当农业机械化水平越过了“倒 U 型”曲线的拐点后,农业机械化的进一步发展将有利于提升农业化学品的使用效率,并产生农业化学品使用的减量效果,进而降低农业化学品投入强度。模型 5-6 结果显示,农业机械使用强度一次项显著为负,平方项显著为正,说明农业机械使用强度对水稻播种面积占比产生“U 型”的非线性影响,“U 型”曲线的拐点出现在农业机械使用强度为 63.33 $\text{kW}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处。如理论分析部分所述,初期水稻机械化受限于地形和技术,成本优势不明显,播种面积逐渐减少。随着中小型机械和精细化技术的推广,机械化水平提升,生产效率提升,从而导致水稻播种面积增加。综上所述,本文假说 2 得到验证。

在农业机械使用强度达 87.50 $\text{kW}\cdot\text{hm}^{-2}$ 前,随着农业机械化水平的提高,农业碳排放强度逐渐增加。在这一阶段,当农业机械使用强度小于 63.33 $\text{kW}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,随着农业机械化水平提升,化学品投入强度升高,水稻播种面积占比下降,农业碳排放强度主要受化学品投入强度的影响逐渐增加;当农业机械使用强度大于 63.33 $\text{kW}\cdot\text{hm}^{-2}$ 但小于 69.31 $\text{kW}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,随着农业机械化水平增加,化学品投入强度和水稻播种面积占比均增加,农业碳排放强度也同步增加;当农业机械使用强度大于 69.31 $\text{kW}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,随着农业机械化水平升高,化肥投入强度和水稻播种面积占比升高,农药投入强度下降,农业碳排放强度主要受化肥投入强度和水稻播种面积占比的影响逐渐增加。在农业机械使用强度达 87.50 $\text{kW}\cdot\text{hm}^{-2}$ 后,随着农业机械化水平提升,农业碳排放强度减少。在这一阶段,当农业机械使用强度小于 91.04 $\text{kW}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,随着农业机械化水平提升,农药投入强度下降,水稻播种面积占比和化肥投入强度升高,农业碳排放强度主要受农药投入强度的影响逐渐下降;当农业机械使用强度大于 91.04 $\text{kW}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,随着农业机械化水平提升,化学品投入强度呈下降趋势,水稻播种面积占比呈上升趋势,农业碳排放强度的趋势下降主要由化学品投入强度的下降趋势主导。

总体上,农业化学品产生的碳排放远远高于稻田 CH_4 排放,且化肥投入为农业碳排放的最大来源,因此

农业机械化对农业碳排放强度产生“倒 U 型”的非线性影响主要归因于农业机械化对农业化学品投入强度的“倒 U 型”影响, 其中化肥投入强度的变化起主导作用。虽然农业机械化对水稻播种面积占比造成了同农业机械化对农业化学品投入强度相反的“U 型”非线性影响, 但是不能扭转农业机械化对农业碳排放强度造成的“倒 U 型”非线性影响。

表 5 农业机械化强度对农业碳排放强度的影响路径检验结果

Table 5 Results of the test for the impact pathways of agricultural machinery utilization intensity on agricultural carbon emission intensity

变量 Variable	化肥投入强度		农药投入强度		水稻播种面积占比	
	Fertilizer input intensity		Pesticide input intensity		Proportion of rice sown area	
	模型 1 Model 1	模型 2 Model 2	模型 3 Model 3	模型 4 Model 4	模型 5 Model 5	模型 6 Model 6
农业机械使用强度 Agricultural machinery utilization intensity	0.277*** (0.040)	0.437*** (0.030)	0.179*** (0.057)	0.402*** (0.045)	-0.045** (0.020)	-0.152*** (0.037)
农业机械使用强度的平方项 Squared term of agricultural machinery utilization intensity		-0.024*** (0.002)		-0.029*** (0.004)		0.012*** (0.003)
常数项 Constant term	-1.070*** (0.080)	-1.172*** (0.071)	-4.562*** (0.104)	-4.814*** (0.085)	-2.784*** (0.576)	-2.683*** (0.577)
控制变量 Control variable	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
政策虚拟变量 Policy dummy variable	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
地区固定效应 Region fixed effect	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
观测值数量 Number of observations	18 649	18 649	18 649	18 649	12 078	12 078
R ²	0.076	0.093	0.047	0.061	0.529	0.529

***: $P < 0.01$; **: $P < 0.05$.

4.2 稳健性检验

4.2.1 验证“U 型”或“倒 U 型”关系

本文采用 Utest 方法对农业机械使用强度与中国农业碳排放强度影响路径的“U 型”或“倒 U 型”变化关系进行验证, 结果如表 6 所示。农业机械使用强度的变动区间为 0.010~175.73 kW·hm⁻², 左侧区间与右侧区间均显著, “U 型”或“倒 U 型”变化关系与前文一致。因此, 农业机械使用强度对中国农业碳排放强度的影响路径呈“U 型”或“倒 U 型”变化趋势的结果得到进一步验证, 估计结果具有稳健性。

表 6 农业机械使用强度与农业碳排放强度影响路径的“U 型”或“倒 U 型”关系检验结果

Table 6 Results of the test for an “U-shaped” or “inverted U-shaped” relationship in the impact pathways between agricultural machinery utilization intensity and agricultural carbon emission intensity

	化肥投入强度		农药投入强度		水稻播种面积占比	
	Fertilizer input intensity		Pesticide input intensity		Proportion of rice sown area	
	下限 Lower bound	上限 Upper bound	下限 Lower bound	上限 Upper bound	下限 Lower bound	上限 Upper bound
农业机械使用强度区间 Interval of agricultural machinery utilization intensity / (×10 kW·hm ⁻²)	0.001	17.573	0.001	17.573	0.001	17.573
斜率 Slope	0.437	-0.391	0.402	-0.629	-0.152	0.264
T	14.740	-5.875	8.933	-6.035	-4.127	2.872
P	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002

4.2.2 内生性问题处理

农业机械化水平对农业化学品投入强度和水稻播种面积占比的影响并非独立的, 并且农业机械化与水稻播种面积占比之间可能存在互为因果的内生性关系, 为解决模型潜在内生性问题导致的参数估计偏误, 本文选取农业机械化的滞后一期变量作为农业机械化的工具变量, 对识别策略部分列出的影响路径检验模型进行重新估计。同时, 联立方程模型(SEM)考虑了各方程之间的联系, 相对于单一方程的估计方法效率更高。因此, 本研究在引入工具变量后, 采用三阶段最小二乘法(3SLS)进行估计。表 7 报告了基于工具变量法的 3SLS 估计结果, 在模型 1-4 的回归结果中, 农业机械使用强度一次项均显著为正, 平方项均显著为负, 说明农业机械使用强度对化肥和农药投入强度均产生“倒 U 型”的非线性影响, 随着农业机械使用强度的提高, 化肥和农药投入强度呈“倒 U 型”的变化趋势仍得到验证。模型 5-6 显示, 农业机械使用强度一次项显著为负, 平方项显著为正, 农业机械使用强度对水稻播种面积占比产生的“U 型”非线性影响得到验证。

表 7 农业机械使用强度对农业碳排放强度的影响路径检验结果(SEM-3SLS)

Table 7 Results of the test for the impact pathways of agricultural machinery utilization intensity on agricultural carbon emission intensity (SEM-3SLS)

变量 Variable	化肥投入强度		农药投入强度		水稻播种面积占比	
	Fertilizer input intensity		Pesticide input intensity		Proportion of rice sown area	
	模型 1 Model 1	模型 2 Model 2	模型 3 Model 3	模型 4 Model 4	模型 5 Model 5	模型 6 Model 6
农业机械使用强度 Agricultural machinery utilization intensity	0.132*** (0.008)	0.322*** (0.014)	0.178*** (0.012)	0.433*** (0.021)	-0.047** (0.021)	-0.152*** (0.037)
农业机械使用强度的平方项 Squared term of agricultural machinery utilization intensity		-0.022*** (0.001)		-0.030*** (0.002)		0.012*** (0.004)
常数项 Constant term	-1.227*** (0.236)	-1.469*** (0.233)	-5.001*** (0.342)	-5.358*** (0.340)	-2.788*** (0.576)	-2.689*** (0.577)
控制变量 Control variable	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
政策虚拟变量 Policy dummy variable	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
地区固定效应 Region fixed effect	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
观测值数量 Number of observations	12 078	12 078	12 078	12 078	12 078	12 078
R ²	0.280	0.296	0.373	0.384	0.529	0.529

***: $P < 0.01$; **: $P < 0.05$.

5 异质性分析

由于农业机械化作业的难度和效率与地形相关, 本文进一步将全部样本按照地形划分为平原、山区(包括丘陵、山地和高原)和盆地(https://www.gov.cn/guoqing/2005-06/24/content_2582624_2.htm), 分析不同地形条件下农业机械使用强度对农业碳排放强度的异质性影响。由表 8 中模型 1 和模型 2 的结果可知, 对于平原和山区地区而言, 随着农业机械使用强度的提高, 农业碳排放强度呈“倒 U 型”变化趋势。模型 3 结果表明, 盆地地区农业机械使用强度的提高将会持续推动农业碳排放强度的增加。在平原地区, 农业机械化初期, 农业机械化对劳动力的替代推动化肥和农药等投入强度上升, 导致碳排放强度增加; 由于地势平坦, 随着机械化程度的提升, 平原地区农业化学品的利用效率提高, 其投入强度呈下降趋势, 因此碳排放强度呈“倒 U 型”变化。在山区地区, 由于地形复杂, 机械化初期效率低, 化学品投入增加提高了碳排放强度, 但后期随着小型机械引入和技术改进, 化学品投入减少, 碳排放强度逐渐下降, 亦呈“倒 U 型”趋势。而在盆地地区, 封闭地形限制了技术扩散, 高强度农业机械化增加了对农业化学品的依赖, 同时机械设备高负荷运行加剧了能源消耗, 因此碳排放强度随机械使用强度的提高而持续增加。

本文进一步将样本划分为粮食主产区(辽宁、河北、山东、吉林、内蒙古、江西、湖南、四川、河南、湖北、江苏、安徽和黑龙江)与非粮食主产区(其余省份)进行地区异质性分析。由表 8 模型 4 可知, 粮食主产区农业机械使用强度对农业碳排放强度具有非线性影响, 随着农业机械使用强度的提高, 农业碳排放强度呈“倒 U 型”变化趋势。在粮食主产区, 初期农业机械化带来农业化学品的粗放型增长和其对劳动力的替代, 提高了化肥、农药等农业化学品的使用强度, 导致碳排放强度上升; 但随着高效机械设备和精准施肥等技术的推广, 化学品利用效率显著提高, 使用强度逐步下降, 因此碳排放强度呈现“倒 U 型”变化。模型 5 显示, 在非粮食主产区, 农业机械使用强度的提高将会显著促进农业碳排放强度的增加。相比之下, 非粮食主产区机械化的发展缺乏足够的技术推广和政策支持, 对化肥和农药的依赖较强, 精准农业技术应用有限, 碳排放强度随机械化水平的提高而持续上升。同时, 非主产区的种植结构可能更多集中于经济作物, 而机械化对这一模式的优化作用有限, 进一步强化了碳排放强度增加的趋势。

表 8 农业机械使用强度对农业碳排放强度影响的地区异质性分析

Table 8 Analysis of regional heterogeneity of the impacts of agricultural machinery utilization on agricultural carbon emission intensity

变量 Variable	平原 Plain	山区 Mountainous	盆地 Basin	粮食主产区 Major grain-producing area	非粮食主产区 Non-major grain-producing area
	模型 1 Model 1	模型 2 Model 2	模型 3 Model 3	模型 4 Model 4	模型 5 Model 5
	模型 1 Model 1	模型 2 Model 2	模型 3 Model 3	模型 4 Model 4	模型 5 Model 5
农业机械使用强度 Agricultural machinery utilization intensity	0.220*** (0.053)	0.183*** (0.033)	0.214*** (0.075)	0.105*** (0.023)	0.190*** (0.056)
农业机械使用强度的平方项 Squared term of agricultural machinery utilization intensity	-0.050*** (0.011)	-0.011*** (0.002)		-0.006*** (0.001)	
常数项 Constant term	1.504*** (0.112)	1.556*** (0.083)	0.995*** (0.156)	1.338*** (0.058)	1.847*** (0.152)
控制变量 Control variable	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
政策虚拟变量 Policy dummy variable	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
地区固定效应 Region fixed effect	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
观测值数量 Number of observations	4,284	11,743	2,622	10,873	7,776
R ²	0.084	0.055	0.115	0.049	0.084

***: $P < 0.01$.

6 结论与政策建议

6.1 结论

本文基于全国范围的县级层面数据,采用生命周期评价法,并利用地区和作物差异化的温室气体排放因子,核算中国农业碳排放总量。基于此,通过固定效应模型实证分析农业机械化对中国农业碳排放强度的总体影响,并从农业化学品投入强度和水稻播种面积两个维度对其中的影响路径进行检验。主要研究结论如下:

1)随着农业机械化水平的提升,农业碳排放强度呈先增加后减少的“倒 U 型”变化趋势,拐点出现在农业机械使用强度为 $87.50 \text{ kW}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处,远高于中国目前的平均农业机械使用强度。这表明,农业机械化在初期会导致农业碳排放强度的增加,成为制约农业碳达峰的因素。但是,当农业机械化程度超过一定水平后,农业机械化的继续发展将有助于推动农业碳排放强度的下降。这一结论为农业政策制定者在推动农业机械化时,如何平衡短期和长期农业碳减排目标提供了科学依据。

2)随着农业机械化水平的提高,化肥和农药投入强度呈先增加后减少的“倒 U 型”变化趋势,成为农业碳排放强度呈“倒 U 型”变化趋势的主导因素。化肥和农药投入是中国农业碳排放的主要来源,化肥更是农业碳排放的最大来源,农业机械化对碳排放强度的“倒 U 型”影响,主要源于机械化在初期阶段导致农业化学品使用的增加,尤其是化肥的使用。随着机械化水平进一步提高,农业化学品的利用效率得到提升,使用量减少,从而有助于降低农业碳排放强度。

3)在农业机械化推动下,水稻播种面积占比呈先减少后增加的“U 型”变化,但不足以扭转农业碳排放强度的“倒 U 型”变化趋势。在农业机械化初期阶段,由于水稻机械化受限于地形和技术约束,成本优势不明显,播种面积逐渐减少;随着中小型机械和精细化技术的推广,机械化水平提升,水稻生产的比较成本下降,从而引起播种面积增加。由于稻田 CH_4 排放对应的碳排放水平并未超过农业化学品投入产生的碳排放,因此水稻播种面积占比的“U 型”变化无法扭转农业化学品投入强度的“倒 U 型”变化,农业碳排放强度仍然呈“倒 U 型”变化。

6.2 政策建议

1)加快推进农业机械化进程以促进农业碳减排。虽然农业机械化初期可能导致农业碳排放强度的增加,但随着机械化水平的提升,农业机械化将有助于减少农业碳排放。因此,政府应加大力度推动农业机械化进程,并从以下几个方面入手:提升农机购置补贴,通过财政补贴等手段降低农民购置农业机械的成本,提升农户的机械化水平;加强农机示范区建设,提供技术培训和机械使用指导,帮助农民掌握高效、环保的农业机械化技术;推动农业机械的节能环保技术研发,生产低碳排放的农业机械,减少机械使用过程中可能产生的碳排放;继续完善农机社会服务体系,发展农业机械服务合作社,促进农业机械服务的共享和互助,提升农民组织化程度和农业现代化水平。

2)在农业机械化初期加强农业化学品的环境管控。由于农业机械化的初期阶段可能会导致化肥和农药投入强度的增加,从而导致农业碳排放强度增加,因此,政府应制定严格的农业化学品使用管控政策,减少化肥和农药的过度使用。具体措施包括:加强化肥使用监管,尤其是对化肥种类、施用量以及施用时间进行严格规范;加强推广精准农业技术,通过精确施肥技术减少化肥浪费,并推动有机肥替代化肥;鼓励绿色农药的研发和应用,减少对化学农药的依赖,降低农药对环境的污染。

3)优化农业生产结构以推动农业碳减排。除了提升农业机械化水平外,还应通过优化农业生产结构和生产方式,助力农业碳减排目标的实现。政府可以采取以下措施:推动农业产业结构调整,鼓励农业生产多样化发展,减少单一作物种植对化肥和农药的依赖;支持农业绿色技术的研发与推广,如智能农业、精准农业等绿色高效技术的应用,推动农业生产方式的转型升级;开展面向农民的环保技术指导,提高农民对绿色生产方式的认知,鼓励其采用绿色、低碳的生产手段。

参考文献 References

- [1] 林斌, 徐孟, 汪笑溪. 中国农业碳减排政策、研究现状及展望[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(4): 500–515
LIN B, XU M, WANG X X. Mitigation of greenhouse gas emissions in China's agricultural sector: Current status and future perspectives[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(4): 500–515
- [2] 叶兴庆, 程郁, 张玉梅, 等. 我国农业活动温室气体减排的情景模拟、主要路径及政策措施[J]. 农业经济问题, 2022, 43(2): 4–16
YE X Q, CHENG Y, ZHANG Y M, et al. Scenario simulation, main paths and policy measures of greenhouse

- gas emission reduction of agricultural activities in China[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2022, 43(2): 4–16
- [3] 赵敏娟, 石锐, 姚柳杨. 中国农业碳中和目标分析与实现路径[J]. *农业经济问题*, 2022, 43(9): 24–34
ZHAO M J, SHI R, YAO L Y. Analysis on the goals and paths of carbon neutral agriculture in China[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2022, 43(9): 24–34
- [4] 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
JIN S Q, LIN Y, NIU K Y. Driving green transformation of agriculture with low carbon: Characteristics of agricultural carbon emissions and its emission reduction path in China[J]. *Reform*, 2021, (5): 29–37
- [5] ZHANG X B, YANG J, THOMAS R. Mechanization outsourcing clusters and division of labor in Chinese agriculture[J]. *China Economic Review*, 2017, 43: 184–195
- [6] 郑旭媛, 徐志刚. 资源禀赋约束、要素替代与诱致性技术变迁——以中国粮食生产的机械化为例[J]. *经济学(季刊)*, 2017, 17(1): 45–66
ZHENG X Y, XU Z G. Endowment restriction, factor substitution and induced technological innovation: A case research on the grain producing mechanization in China[J]. *China Economic Quarterly*, 2017, 17(1): 45–66
- [7] 方师乐, 黄祖辉. 新中国成立 70 年来我国农业机械化的阶段性演变与发展趋势[J]. *农业经济问题*, 2019, 40(10): 36–49
FANG S L, HUANG Z H. 70th anniversary of the founding of the PRC: The transition, influence factor and trend of China's agricultural mechanization[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2019, 40(10): 36–49
- [8] 张宗毅. 我国农机装备高质量发展的驱动逻辑与方向路径[J]. *中国发展观察*, 2025, (3): 62–68
ZHANG Z Y. The driving logic and development pathway for high-quality development of China's agricultural machinery equipment [J]. *China Development Observation*, 2025, (3): 62–68
- [9] 陈银娥, 陈薇. 农业机械化、产业升级与农业碳排放关系研究——基于动态面板数据模型的经验分析[J]. *农业技术经济*, 2018, (5): 122–133
CHEN Y E, CHEN W. A study on the relationship among agricultural mechanization, industrial upgrading and agricultural carbon emission—The empirical research based on dynamic panel data model[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2018, (5): 122–133
- [10] 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
HE Q, ZHANG J B, ZHANG H. The impact of agricultural mechanization on agricultural carbon emissions: Empirical evidence from major grain-producing regions [J]. *Statistics & Decision*, 2023, 39(1): 88–92
- [11] 徐清华, 张广胜. 农业机械化对农业碳排放强度影响的空间溢出效应——基于 282 个城市面板数据的实证[J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(4): 23–33
XU Q H, ZHANG G S. Spatial spillover effect of agricultural mechanization on agricultural carbon emission intensity: An empirical analysis of panel data from 282 cities[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(4): 23–33
- [12] 王陆陆, 许雨萱, 柴嫚嫚, 等. 农业机械化水平对农业碳排放强度影响研究——基于 2004—2021 年 30 个省份面板数据检验[J/OL]. *中国农业资源与区划*, 2024,: 1–14 (2024-11-28)
WANG L L, XU Y X, CHAI Z Z, et al. Study on the impact of agricultural mechanization development on agricultural carbon emission intensity—Based on a panel data test for 30 provinces from 2004–2021[J/OL]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2024,: 1–14 (2024-11-28)
- [13] LI Y L, YI F J, YUAN C J. Influences of large-scale farming on carbon emissions from cropping: Evidence from China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2023, 22(10): 3209–3219
- [14] 田晓晖, 李薇, 李戎. 农业机械化的环境效应——来自农机购置补贴政策的证据[J]. *中国农村经济*, 2021, (9): 95–109
TIAN X H, LI W, LI R. The environmental effects of agricultural mechanization: Evidence from agricultural machinery purchase subsidy policy[J]. *Chinese Rural Economy*, 2021, (9): 95–109
- [15] 徐志刚, 郑姗, 刘馨月. 农业机械化对粮食高质量生产影响与环节异质性——基于黑、豫、浙、川四省调查数据[J]. *宏观质量研究*, 2022, 10(3): 22–34
XU Z G, ZHENG S, LIU X Y. The Impact of Agricultural Mechanization on High Quality Grain Production and the Heterogeneity of Links—Based on the survey data of Heilongjiang, Henan, Zhejiang and Sichuan Provinces[J]. *Journal of Macro-Quality Research*, 2022, 10(3): 22–34
- [16] 王翌秋, 徐丽, 曹蕾. “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[J]. *华中农业大学学报(社会科学版)*, 2023, (6): 56–69

- WANG Y Q, XU L, CAO L. Agricultural mechanization and agricultural green development under the “dual carbon” goal—a perspective based on green total factor productivity[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2023, (6): 56–69
- [17] 蔡荣, 陈佩. 农业机械化有助于化肥投入效率提升吗?——以小麦为例[J]. *中国农业大学学报*, 2021, 26(8): 265–274
- CAI R, CHEN P. Does agricultural machinery service improve fertilizer input efficiency: Take wheat as an example[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(8): 265–274
- [18] DAS N, MASKE N, KHAWAS V, et al. Agricultural fertilizers and pesticides sprayers - A review[J]. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 2015, 1(11): 44–47
- [19] 徐湘博, 李畅, 郭建兵, 等. 土地转入规模、土地经营规模与全生命周期作物种植碳排放——基于中国农村发展调查的证据[J]. *中国农村经济*, 2022, (11): 40–58
- XU X B, LI C, GUO J B, et al. Land transfer-in scale, land operation scale and carbon emissions from crop planting throughout the life cycle: Evidence from China rural development survey[J]. *Chinese Rural Economy*, 2022, (11): 40–58
- [20] 李亚玲, 陈同勤, 易福金. “促进”或“抑制”: 农地经营规模扩大如何影响作物种植净碳汇效应[J]. *华中农业大学学报(社会科学版)*, 2025, (3): 53–66
- LI Y L, CHEN T Q, YI F J. “Promote” or “inhibit”: How does the expansion farmland operation scale affect the net carbon sequestration effect in crop production[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2025, (3): 53–66
- [21] 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
- [22] 严圣吉, 邓艾兴, 尚子吟, 等. 我国作物生产碳排放特征及助力碳中和的减排固碳途径[J]. *作物学报*, 2022, 48(4): 930–941
- YAN S J, DENG A X, SHANG Z Y, et al. Characteristics of carbon emission and approaches of carbon mitigation and sequestration for carbon neutrality in China’s crop production[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(4): 930–941
- [23] HAANS R F J, PIETERS C, HE Z L. Thinking about U: Theorizing and testing U- and inverted U-shaped relationships in strategy research[J]. *Strategic Management Journal*, 2016, 37(7): 1177–1195
- [24] LIND J T, MEHLUM H. With or without U? the appropriate test for a U-shaped relationship[J]. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 2010, 72(1): 109–118