

引用格式:

杜美玲, 祝宏辉, 尹小君. 农业机械化对农业生态效率的影响研究[J]. 农业现代化研究, 2023, 44(6): 1082-1092.

Du M L, Zhu H H, Yin X J. The study on the impacts of agricultural mechanization on agricultural ecological efficiency[J].

Research of Agricultural Modernization, 2023, 44(6): 1082-1092.

DOI: 10.13872/j.1000-0275.2023.0101



农业机械化对农业生态效率的影响研究

杜美玲¹, 祝宏辉^{1,2*}, 尹小君³

(1. 石河子大学经济与管理学院, 新疆石河子 832000; 2. 石河子大学乡村振兴研究中心, 新疆石河子 832000;
3. 石河子大学信息科学与技术学院, 新疆石河子 832000)

摘要: 在当前资源约束紧缺、环境污染严重、生态系统退化的背景下, 探究农业机械化对农业生态效率的影响, 对全面推进乡村振兴、加强生态文明建设具有重要意义。基于2000—2020年中国30个省(自治区、直辖市)面板数据, 本文利用固定效应与门槛效应模型分析农业机械化对农业生态效率的影响及其作用机制。结果表明: 农业机械化在一定程度上提高了农业生态效率, 并且农作物种植结构“趋粮化”和农村劳动力转移强化了农业机械化对农业生态效率的正向作用。进一步研究发现, 农业机械化对农业生态效率的影响存在农地规模经营的门槛效应, 即随着农地规模经营的扩大, 农业机械化对农业生态效率呈现边际效应“先递增后递减”的规律。通过完善农机补贴政策, 优化农作物种植结构、引导农村剩余劳动力转移、推进农地适度规模经营、加快农机配套体系建设等措施, 将有助于提升农业生态效率。

关键词: 农业机械化; 农业生态效率; 农地规模经营; 农业种植结构; 农村劳动力转移

中图分类号: F323.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0275(2023)06-1082-11

The study on the impacts of agricultural mechanization on agricultural ecological efficiency

DU Mei-ling¹, ZHU Hong-hui^{1,2}, YIN Xiao-jun³

(1. School of Economics and Management, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China;

2. Research Center for Rural Revitalization, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China;

3. School of Information Science and Technology, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: Under the background of current resource shortage, environmental pollution and ecosystem degradation, it is of great significance to explore the impacts of agricultural mechanization on agricultural ecological efficiency for comprehensively promoting rural revitalization and strengthening ecological civilization construction. Based on a panel data of 30 provinces (autonomous regions and cities) in China from 2000 to 2020, this paper analyzed the impacts of agricultural mechanization on agricultural ecological efficiency and its mechanism by the fixed effect and the threshold effect models. Results show that agricultural mechanization have significantly improved agricultural ecological efficiency. The positive effect of agricultural mechanization on agricultural ecological efficiency have been reinforced by the grain-orientation of crop structure and the rural labor transfer. Further study indicates that the impacts of agricultural mechanization on agricultural ecological efficiency have a threshold effect of farmland scale management. With the expansion of farmland scale management, the marginal effect of agricultural mechanization on agricultural ecological efficiency shows the law of “first increasing and then decreasing”. Therefore, to improve agricultural ecological efficiency, this paper suggests: improving the agricultural machinery subsidy policy, optimizing the crop planting structure, guiding the transfer of rural surplus labor force, promoting the moderate scale operation of farmland, and accelerating the construction of agricultural machinery supporting system.

Key words: agricultural mechanization; agricultural ecological efficiency; farmland scale management; agricultural planting structure; rural labor outflow

基金项目: 兵团社科基金项目(21YB05); 第三次新疆综合科学考察项目(2022xjkk0500)。

作者简介: 杜美玲(1993—), 女, 山西大同人, 博士研究生, 主要从事农业经济与技术经济研究, E-mail: 20202316032@stu.shzu.edu.cn;

通信作者: 祝宏辉(1973—), 男, 江苏丹阳人, 博士, 教授, 主要从事农业经济与技术经济研究, E-mail: zhh_jm@shzu.edu.cn。

收稿日期: 2023-04-28; **接受日期:** 2023-11-06

Foundation item: Corps Social Science Foundation of China (21YB05); The Third Xinjiang Scientific Expedition Program (2022xjkk0500).

Corresponding author: ZHU Hong-hui, E-mail: zhh_jm@shzu.edu.cn.

Received 28 April, 2023; **Accepted** 6 November, 2023

改革开放以来,中国农业生产效率持续提升的同时,农业生态系统的结构失衡和功能退化等问题也日益凸显。从2004年到2023年,连续二十年中央一号文件指导“三农”工作重点,聚焦破解资源紧缺、保护生态环境,提倡农业绿色发展,实现人与自然和谐共生。农业机械化作为农业现代化的重要表征和农业发展追求目标,对提高农业生产效率和保证粮食产量具有重要作用^[1],但机械化作业产生的农业面源污染和农业碳排放等负外部性指标,也对农业生态效应改善和农业绿色发展产生不利影响^[2]。那么,在农业机械化水平提升的背景下,农业机械化究竟会对农业生态效率产生怎样的影响?其背后的作用机制又是什么?这一影响是否会在不同情境下存在差异?这些问题的解答对于促进农业绿色发展、加快农业现代化进程具有重要意义。

现有文献从生产特征、技术条件、能源结构、社会结构等方面对农业生态效率的影响因素进行了诸多探索^[3-4],但从农业机械化角度对农业生态效率的实证研究还有待进一步丰富。有关农业机械化实施效果的研究可概括为两大类:第一类主要研究农业机械化带来的经济效果,包括农民增收效应^[5]、粮食增产和生产效率提升等^[6]。第二类研究主要集中在农业机械化带来的生态效应,但尚未得出一致的结论,“农业机械化促进论者”指出农业机械化显著降低了农业碳排放强度,是提高农业生态效率的重要因素^[7-8],”农业机械化质疑论者”却认为采用机械化生产虽能提高农作物的产出效率,但机械化作业过程中因石油资源的大量使用增加了非期望产出,进而对农业生态效率产生负向影响^[9];还有学者从非线性角度检验农业机械化对农业生态效率的影响,伍国勇等^[10]借助SEM模型分析表明农业机械化水平与种植业碳生产率呈U型关系,Zhu等^[11]研究发现随着我国农业机械化的迅速普及,能源消耗造成的环境问题使得农业机械化与农业生态效率呈倒U型关系。

上述研究为本文提供了丰富的理论和方法支撑,但在辩证分析农业机械化与农业生态效率关系方面,仍有改进的空间。第一,现有研究尚未充分探究农业机械化对农业生态效率的影响、内在作用机理及异质性;第二,现有文献多采用农业机械总动力作为种植业机械化的代理变量,一方面农业机械总动力数据夸大了种植业机械的影响,另一方面农业机械跨区作业使得统计的农机总动力数据未能真实反映该地区农业机械化水平。鉴于此,本文以中国种植业为研究对象,基于2000—2020年30个

省(自治区、直辖市)的面板数据,以“农作物耕种收综合机械化率”作为种植业机械化水平的代理变量,并运用SSBM-GML指数模型测算农业生态效率,进而通过构建面板固定效应与门槛效应模型对农业机械化如何影响农业生态效率开展实证研究,以进一步厘清二者之间的关系,为提升农业生态效率和实现农业绿色发展提供经验借鉴。

1 理论分析与研究假设

1.1 农业机械化对农业生态效率的影响

农业生态效率是平衡农业经济和生态保护二者关系下农业生态发展水平的综合绩效指标,农业机械化主要通过两个方面影响农业生态效率。首先,农业机械化有助于提高资源要素配置效率,相较于传统以人畜力生产要素投入为主的资源禀赋结构,农业机械化的发展和大规模应用改变了农业资源要素投入比例,优化农业生产要素配置,不仅能够对劳动产生替代效应,节约劳动成本并降低劳动强度,而且对其他要素投入也产生替代效应,农业机械操作精度的提高和技术溢出效应减少了化肥、农药等化学品投入的不合理使用,降低农用化学品施用强度,进而提升地区农业生态效率水平^[12-13]。其次,农业机械化有助于提高农业生产效率,农机深耕、深松作业不仅能够改善农田的土壤透气性,提高土壤的有效肥力和有机质保有量,改善土壤营养条件,使得农业产出能力和固碳增汇能力得到提升,有效提高了农业生态效率^[1]。此外,从辩证角度看,人工劳动与机械作业都既有环保的一面,又有不环保的一面。虽然小农户采用人工除草、人工翻耕可能更环保,更有助于生态环境,但生产效率较低,相应地,机械化是现代农业发展的特征与趋势,新型农业经营主体和服务主体基本全部采用除草剂除草、农机翻耕,尽管可能对环境造成一定的不利影响,但更能满足生产效率的提升,整体上更有助于提升农业生态效率。基于此,提出假说1。

H1:农业机械化能够显著提升农业生态效率。

1.2 农作物种植结构与农村劳动力转移在农业机械化对农业生态效率影响中的作用机制

关于趋粮化机制,本文选取农作物种植结构作为调节变量。农业机械化水平提升与农作物种植结构变化有着重要的关系。一方面,随着农地经营规模的扩大,经济作物的边际劳动投入和管理成本上升,使得农户尤其是新型农业经营主体更倾向于种植对劳动需求较低、全程机械化技术较成熟的粮食作物,粮食作物种植规模的扩大有助于降低化学品

投入；另一方面，粮食安全问题促进农户优先选择种植粮食作物，并抑制了粮食种植户过度施药施肥等高碳排放行为^[14]。具体而言，经济作物与粮食作物对农业生产条件的需求表现出明显的差异，经济作物属于高效益、高耗能农作物，而且机械化作业还存在明显短板，特别在收获、播种环节仍需投入较多的劳动力，相对而言，粮食作物不仅需水量小，对肥药等农资产品的需求量也相对较少，而且具有更成熟的机械化技术和社会化服务技术，较多粮食作物可以实现全程机械化作业，在农产品产出效率一定时，粮食作物对生态环境影响较小^[15-16]。沿循这一逻辑，农户通常会通过调整种植结构，种植易于机械作业的粮食作物，以实现农业生产机会成本最小化，作物生产碳排放量、面源污染降低等目标，从而提高农业生态效率，即在农作物种植结构中，粮食作物所占比重越高，越强化农业机械化对农业生态效率的正向作用。基于此，提出假说2。

H2：农作物种植结构“趋粮化”强化了农业机械化对农业生态效率的正向作用。

关于劳动力转移机制，本文选取农村劳动力转移作为调节变量。农业机械化的发展与农村劳动力转移有着密切的关系。农村劳动力转移造成了农村劳动力数量、质量和结构的变化，导致农村呈现儿童、妇女和老人这“三留守”群体特征。一方面，农村劳动力转移会诱发小农户对农业机械的需求，作为理性的农户会更倾向于选择种植易于机械化操作的农作物，从而推动农业机械化发展^[17]。诱致性技术变迁理论在一定程度上能够解释随着农村劳动力的转移，农机要素对劳动力要素的替代作用逐步增强，小农户通过采用农业社会化服务不仅降低了农业生产对劳动力数量和质量的依赖，还能够获得服务规模经济带来的优势，促进肥药减施、提高农业生产效率，进而提升农业生态效率。另一方面，农村劳动力转移促使部分外出农户选择将土地承包给新型农业经营主体，推动农地流转进程加快、农地经营规模扩大，新型农业经营主体更加重视新技术和农业机械的使用，推动了农业生产环节的标准化，既有利于促进规模效益和农业生产效率，也有利于提高包含肥药在内各生产要素的利用率，进而改善农业生态效率^[18]。因此，在农村劳动力转移下，农户更倾向于使用农业机械化技术以改进生产要素配置效率，提高农业生态效率。基于此，提出假说3。

H3：农村劳动力转移强化了农业机械化对农业生态效率的正向作用。

1.3 不同农地规模经营下农业机械化对农业生态效率的影响

农地规模经营与农业机械化是我国农业现代化的典型特征，二者相互作用，共同影响着农户的经营决策与行为选择^[19]。一方面，农地流转制度的成熟和农民组织化程度（成立合作社经营）的提高，为农地规模经营创造了条件，规模化经营对农业机械化提出了需求，农户也倾向于投入农业机械进行替代生产，得益于农业机械技术创新的支撑，以提高农业生产效率为目标的农业机械化程度也不断提升。另一方面，农业机械化在一定程度上又会倒逼农地规模化经营，在资源条件允许的区域，农业机械设备如大马力农机具只有在农地面积达到一定规模以上，才能有效发挥生产效率，由此促成农业生产者进行土地整合以实现规模化经营；但农业机械化并非仅仅适用于农业规模化经营，适用于小规模经营的农业机械在我国农业生产实践中也有广泛的应用^[20]。

在农业现代化转型的背景下，适度规模经营成为现代农业发展的重要方式。对农地规模经营而言，规模化经营为农业机械作业创造了有利条件，农业机械化可以促进农业生态效率的提升，但这种促进作用，并不一定是线性的，可能存在农地规模经营的门槛效应。区域农地规模经营的扩大需要控制在一个合理的区间，农地规模经济效益的发挥有利于农户合理配置生产要素，减少资源的无效浪费，提高农业机械和农用化学品的使用效率，缓解了对农业生态环境造成的危害，提升了农业生态效率^[21-22]。当区域农地规模经营较小时，农业机械投入总体较低，且需要支付较高的机械设备应用成本，导致农业机械化对农业生态效率的提升作用受限；当区域农地规模经营较大时，更依赖化肥、机械等协助人来完成农业生产，化肥、农药等化学品和柴油等化石能源的大量投入增加了农作物生产过程中的非期望产出，从而阻碍农业生态效率的提高。基于此，提出假说4。

H4：农业机械化对农业生态效率的影响存在农地规模经营的门槛效应。

2 研究方法

2.1 数据来源

为保证研究结果真实性，在可获取前提下尽可能选取更长时间维度的样本数据，本文采用2000—2020年中国30个省（自治区、直辖市）农业生态发展水平的相关数据，研究农业机械化对

农业生态效率的影响。首先，以中国30个省（自治区、直辖市）数据为研究样本，主要源于各省（区、市）是区域经济发展的重要载体和生态文明建设的前沿阵地，区域经济发展与环境污染之间的不协调现象依然存在，此外，由于西藏及港澳台地区农业生产的特殊性和数据缺失比较严重，故未将其纳入。其次，以2000—2020年为研究样本期，除了考虑数据的可获得性外，尽可能将核心解释变量开始快速增长时点包含在内，2004年起中国出台大量农业机械化政策，农业机械化得到快速发展。基础数据来源于《中国农村统计年鉴》《中国统计年鉴》《中国农业机械工业年鉴》《中国国土资源统计年鉴》《中国财政年鉴》及相应年份各省（区、市）统计年鉴，部分缺失数据采用插值法补齐。

2.2 变量选取

1) 被解释变量：农业生态效率。农业生态效率采用基于SSBM-GML指数模型测算出来的全要素生产率衡量，反映该时期内各决策单元农业生态效率的动态变化情况（限于篇幅，文中未列示）。在指标选取上，依据农业发展的现实情况及数据可得性，结合已有研究^[23-24]，选取各省（区、市）的农业总产值和农业固碳量为期望产出指标、农业碳排放和农业面源污染为非期望产出指标，投入指标包括劳动力、土地、灌溉、化肥、农药、农膜和机械投入。其中，农业固碳量作为生态效益指标，借鉴尚杰和杨滨键^[25]的研究成果，本文选取了玉米、小麦、棉花等主要农作物作为研究对象测算农业固碳量；农业碳排放量作为非期望产出指标，计算方法参考徐清华和张广胜^[8]的研究，包含农业生产中化肥、农药等6种碳源的碳排放总量；农业面源污染作为另一非期望产出指标，生产过程中农业化学制品和农田固体废弃物是两大主要污染源^[26]，选取化学需氧量、总氮、总磷三种主要污染

物的排放总量来表征，相关系数参考《第一次全国污染普查——农业污染源》系数手册进行调整。

2) 核心解释变量：农业机械化。本文参考朱满德等^[16]和马贤磊等^[27]的研究，采用农作物耕种收综合机械化率度量农业机械化程度，指农作物机耕、机播、机收三项作业水平按4:3:3比例加权的和，用于反映农业生产全过程机械化作业水平，其中机耕、机播、机收作业水平可以反映各生产环节的机械化作业水平。

3) 调节变量：农作物种植结构和农村劳动力转移。关于农作物种植结构，本文以粮食作物播种面积与农作物总播种面积的比值来衡量农户粮食作物种植比例。关于农村劳动力转移，本文借鉴田晓晖^[28]的研究，使用省级农林牧渔业从业人员的年度变化量来衡量地区农村劳动力向外转移的程度。

4) 其他控制变量。除农业机械化外，影响农业生态效率的因素还有很多。本文参考以往研究^[10,29]并考虑中国农业生态发展特点，选取农地规模经营、农业产值占比、农村用电量、财政支农水平、自然灾害为控制变量。其中，考虑到不同农地规模经营下农户的生产行为可能存在差异，对农业生态效率可能产生非线性影响，故在各模型中分别引入农地规模经营本身及其二次项。上述各变量的定义及描述性统计如表1所示。

2.3 模型设定

为了对前述提出的研究假说进行针对性检验，本文构建了以下4个模型。此外，为保证研究结果准确性和可靠性，并保持原始数据的实际经济含义，对模型中变量取自然对数，以消除变量间不同量纲所造成的异方差。

首先，为了检验假说1，本文构建如下回归模型：

$$Y_{i,t} = \alpha_0 + \alpha_1 M_{i,t} + \delta X_{i,t} + \mu_i + \varepsilon_{i,t} \quad (1)$$

式中： $Y_{i,t}$ 为农业生态效率， $M_{i,t}$ 为农业机械化， $X_{i,t}$

表1 各变量的描述性统计
Table 1 Variable definition and descriptive statistics

变量	变量说明	均值	标准差
农业生态效率	基于SSBM-GML指数模型计算得到	1.055	0.217
农业机械化	反映农业生产全过程机械化作业水平	70.025	23.539
农作物种植结构(%)	粮食播种面积/农作物播种面积	65.131	12.669
农村劳动力转移(万人)	当年农林牧渔业从业人数减去上一年农林牧渔业从业人数	-1.471	4.855
农地规模经营(hm ² /人)	耕地面积/农业(种植业)从业人数	1.010	0.695
农业产值占比(%)	农业产值/农林牧渔业总产值	52.563	8.743
农村用电量(万kW·h)	直接获取	212.195	337.304
财政支农水平(%)	农林水利事务支出/财政支农支出	8.801	4.123
自然灾害(%)	受灾面积/农作物总播种面积	23.496	15.987

为控制变量, i 为地区, t 为年度, α_0 为截距项, α_1 和 δ 均表示变量相关系数, u_i 为省份固定效应, $\varepsilon_{i,t}$ 为随机误差项。

其次, 为了探究农作物种植结构与农村劳动力转移在农业机械化与农业生态效率之间的调节效应, 本文在模型 (1) 的基础上构建模型 (2) 和模型 (3) 来检验假说 2 和假说 3。此外, 由于自变量农业机械化与调节变量之间具有较强的相关性, 为避免多重共线性带来的结果偏差, 故在生成交乘项之前, 先对自变量和调节变量进行了中心化处理。

$$Y_{i,t} = \alpha_0 + \alpha_1 M_{i,t} + \alpha_2 C_{i,t} + \alpha_3 C_{i,t} \times M_{i,t} + \delta X_{i,t} + \mu_i + \varepsilon_{i,t} \quad (2)$$

$$Y_{i,t} = \alpha_0 + \alpha_1 M_{i,t} + \alpha_2 T_{i,t} + \alpha_3 T_{i,t} \times M_{i,t} + \delta X_{i,t} + \mu_i + \varepsilon_{i,t} \quad (3)$$

式中: $C_{i,t}$ 为农作物种植结构, $T_{i,t}$ 为农村劳动力转移, α_1 、 α_2 、 α_3 表示变量相关系数。其他变量同上。

最后, 为进一步探究农业机械化对农业生态效率的影响是否会受到农地规模的影响, 即不同农地规模经营下农业机械化对农业生态效率的影响会存在怎样的差异, 传统做法通常是根据分组变量 (农地规模经营的高低水平) 对样本进行分组回归, 然而, 这样分组带有一定的主观性, 使得回归结果不够准确。本文借鉴 Hansen^[30] 提出门槛效应模型的核心思想设立模型 (4) 来验证假说 4, 构建以农地规模经营为门槛变量、农业机械化对农业生态效率的分段函数, 考察在不同农地规模经营下, 农业机械化对农业生态效率影响的非线性关系。

$$Y_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 M_{i,t} \times I(S_{i,t} \leq \gamma_1) + \dots + \beta_n M_{i,t} \times I(\gamma_{n-1} < S_{i,t} \leq \gamma_n) + \delta X_{i,t} + \mu_i + \varepsilon_{i,t} \quad (4)$$

式中: β_0 、 β_1 、 β_n 表示变量相关系数。 $S_{i,t}$ 为农地规模经营, γ 为待估计的门槛值, $I(\cdot)$ 为示性函数, 若括号内的表达式成立, I 函数取值为 1, 否则为 0。其他变量同上。

3 结果与分析

3.1 农业机械化对农业生态效率的影响

为检验农业机械化对农业生态效率的影响, 本部分将依据上文所选的实证模型进行回归估计, 表 2 报告了模型回归结果。模型 (1) 报告了包含全部变量的结果, 其中农业机械化对农业生态效率影响的估计系数为 0.127, 并在 5% 水平上显著, 表明农业机械化与农业生态效率之间存在显著的正相关关系, 即所在地农业机械化水平越高, 越有助于提升

农业生态效率, 这与徐志刚等^[13] 的研究结果一致, 假说 1 得到验证。目前我国农业生产已进入机械化为主导的新发展阶段, 大中小型农业机械的广泛应用带动我国农业生产机械化率快速提升, 以农业机械化为核心的现代农业技术体系推广, 改变了传统农业经营方式, 从生产操作层面便利了机械化作业, 使得研究区农业机械化能够显著提升农业生态效率。

农业机械化能够显著提升农业生态效率的原因主要有两点: 其一, 机械作业通过要素替代效应降低了单位面积要素投入水平, 尤其克服了农业生产面临的劳动力数量和质量的约束、抑制了多量少次的施肥方式和过量且不均匀的施肥行为, “节劳节肥” 效应的实现有效提升了农业生态效率。其二, 农业机械的深耕深施等技术以及标准化作业有助于提高作物根系吸收效率和延长肥效时间, 增强农业生产能力和固碳增汇能力, 从而提升农业生产和生态效率。

此外, 从其他控制变量回归结果看, 农地规模经营、农业产值占比、农村用电量、自然灾害均在统计意义上通过了显著性检验, 在经济意义上与预期影响方向一致, 并与已有学者研究结果一致^[4,27]。财政支农水平对农业生态效率的影响方向为负且不显著, 很可能源于中国财政支农范围不止限于各类农业机械及农机社会化服务, 该变量在模型 (1) 中的系数为 -0.312, 这在某种程度上意味着, 我国财政支农补贴可能还在化肥、农药、柴油等农资要素上占有较大比重, 这对农业生态效率的提高形成了较强的制约, 因而要想促进农业生态化发展, 财政支农结构和趋向的改革不可或缺, 比如向清洁能源等有利于改善环境效应的生产要素上加大补贴力度。

3.2 农作物种植结构与农村劳动力转移对农业生态效率影响的机制作用

为检验农作物种植结构与农村劳动力转移在农业机械化与农业生态效率关系中的作用机制, 本文采用调节效应分析方法并构造交乘项进行机制检验, 结果见表 2 中的模型 (2) 和模型 (3)。模型 (2) 中, 农作物种植结构与农业机械化的交乘项系数为 0.902, 且在 1% 统计水平上显著, 表明农作物种植结构在农业机械化与农业生态效率之间表现出正向调节作用, 此结论与假说 2 的预期相符, 即粮食作物种植比例越高的地区, 农业机械化对生态环境的改善效应越大。由于大部分农业机械对经济作物的“耕-种-收”环节在应用上有限制, 一方面

表 2 农业机械化与农业生态效率的回归结果
Table 2 Regression results of agricultural mechanization and agricultural ecological efficiency

变量	农业生态效率		
	(1) 未加入交互项	(2) 加入农作物种植结构与农业机械化的交乘项	(3) 加入农村劳动力转移与农业机械化的交乘项
农业机械化	0.127**(2.022)	0.480***(2.618)	0.144**(2.354)
农作物种植结构		0.239(1.456)	
农作物种植结构 × 农业机械化		0.902***(3.478)	
农村劳动力转移			-0.008***(-3.170)
农村劳动力转移 × 农业机械化			0.023***(-3.812)
农地规模经营的二次项	-0.094***(-7.216)	-0.103***(-8.089)	-0.113***(-8.567)
农地规模经营	0.532***(7.253)	0.486***(6.913)	0.608***(8.095)
农业产值占比	1.377***(8.174)	1.294***(8.019)	1.311***(7.503)
农村用电量	0.025***(7.416)	0.026***(8.175)	0.023***(6.788)
财政支农水平	-0.312(-1.633)	-0.173(-0.943)	-0.357*(-1.927)
自然灾害	-0.214***(-5.667)	-0.220***(-6.021)	-0.182***(-4.749)
个体固定效应	控制	控制	控制
观测值	630	630	630
调整 R ²	0.760	0.781	0.794
AIC	-949.1	-1 004.4	-958.5

注：*、** 和 *** 分别表示变量在 10%、5% 和 1% 的显著性水平上显著，括号中为 *t* 统计值。

意味着如果在经济作物种植比例高的地区，改变种植可实现全程机械化作业的粮食作物，其化肥、农药、地膜等使用量会伴随经济作物播种面积的下降而减少，进而对地区生态环境的改善效应更明显；另一方面也意味着如果经济作物关键作业环节的机械化及其农机装备取得重要突破，农机社会化服务发展速度快于粮食作物，那么农户基于经济效益的比较优势，种植决策将改变为以收益较大的经济作物为导向，并有可能引发农业种植结构的“去粮化”，这一点需高度警惕。

接着，模型（3）的结果显示，农村劳动力转移与农业机械化的交乘项在 1% 统计水平上显著为正，说明农村劳动力转移会加强所在地农业机械化对农业生态效率的正向影响，假说 3 得到验证，即农村劳动力向外转移人数越多，基于农机社会化服

务成本与劳动力成本的比较优势，外出人员采用农业机械化作业替代人工作业的可能性更大，采用农机作业服务的规模经济性提高了地区生产投入要素（包含污染性投入要素）的使用效率，提高了地区农业生产效率并降低了对地区环境的污染，进而有助于提升农业生态效率。基于以上机制分析的结果，农业机械化确实能够通过农作物种植结构“趋粮化”机制和农村劳动力转移机制促进地区农业生态效率的提高。

3.3 农业机械化对农业生态效率影响的稳健性检验

为保证本文主要结论的可靠性，通过不同方式对主效应及作用机制进行了稳健性检验。首先，改变模型研究方法，采用 Tobit 回归对模型重新进行估计。由表 3 可知，主效应中农业机械化与农业生态效率的相关性和显著性维持不变，同时作用机

表 3 稳健性检验（更换估计方法）
Table 3 Robustness test (replacement of estimation method)

变量	农业生态效率		
	(4) 未加入交互项	(5) 加入农作物种植结构与农业机械化的交乘项	(6) 加入农村劳动力转移与农业机械化的交乘项
农业机械化	0.155**(2.546)	0.519***(2.894)	0.170***(2.857)
农作物种植结构		0.138(0.857)	
农作物种植结构 × 农业机械化		0.998***(3.931)	
农村劳动力转移			-0.009***(-3.403)
农村劳动力转移 × 农业机械化			0.025***(4.199)
控制变量	控制	控制	控制
观测值	630	630	630
AIC	-846.3	-899.2	-852.1

注：*、** 和 *** 分别表示变量在 10%、5% 和 1% 的显著性水平上显著，括号中为 *t* 统计值。

制中农作物种植结构与农业生态效率的交乘项和农村劳动力转移与农业生态效率的交乘项系数也仍然维持在 1% 水平上显著为正。可以看出, 更换模型研究方法后, 稳健性检验结果与前文估计结果保持一致。

其次, 更换农业机械化的测算方法重新进行检验。考虑到农业机械越来越普遍用于“耕-种-收”各环节, 本文借鉴郑晶和高孟菲^[31]的研究, 采用机耕水平、机播水平和机收水平三者的算术平均数重新测度农业机械化, 并依次对主效应和调节效应进行检验。由表 4 可知, 农业机械化与农业生态效率的主效应结果显著, 且农作物种植结构和农村劳动力转移在农业机械化对农业生态效率影响中也依然发挥显著的调节作用。可见, 替换自变量测量方法后, 结果依然稳健。

最后, 调整解释变量滞后阶数进行验证。通常来讲, 前期解释变量会对后期农业生态效率产生持续影响, 考虑到时滞性问题, 对各解释变量均取滞后一期放入模型重新检验对农业生态效率的影响。

由表 5 可知, 核心解释变量的系数符号和显著性均没有发生本质性变化, 表明估计结果是稳健的。

3.4 农地规模经营在农业机械化影响农业生态效率中的门槛作用

前文已经验证得出农业机械化有利于提升农业生态效率的结论, 那么本部分将进一步研究这种促进作用是不是一成不变的? 是线性还是非线性的? 农地规模经营在农业机械化与农业生态效率二者关系中起到什么作用? 有鉴于此, 本文基于理论分析, 构建面板门槛回归模型检验在不同农地规模经营下, 农业机械化对农业生态效率的异质性影响。为此, 首先检验是否存在门槛以及对应的门槛个数, 运用 Stata16.0 软件, 自抽样 (Bootstrap) 次数选择 300 次, 门槛变量两端值缩尾 0.01, 在此基础上对存在三重、双重和单一门槛的原假设依次从高到低进行检验, 估计结果如表 6 所示。

从表 6 门槛效应检验结果可知, 三重门槛检验中 F 统计量不显著, 双重和单一门槛的 F 统计量分别在 1% 和 5% 的水平上通过了显著性检验, 表明农地

表 4 稳健性检验 (更换解释变量)

Table 4 Robustness test (replacement of independent variables)

变量	农业生态效率		
	(7) 未加入交互项	(8) 加入农作物种植结构与农业机械化的交乘项	(9) 加入农村劳动力转移与农业机械化的交乘项
农业机械化	0.173***(2.711)	0.487***(2.593)	0.189***(3.020)
农作物种植结构		0.224(1.385)	
农作物种植结构 × 农业机械化		0.929***(3.559)	
农村劳动力转移			-0.008***(-3.314)
农村劳动力转移 × 农业机械化			0.024***(4.020)
控制变量	控制	控制	控制
观测值	630	630	630
调整 R^2	0.761	0.782	0.796
AIC	-952.5	-1 006.4	-963.8

注: *、** 和 *** 分别表示变量在 10%、5% 和 1% 的显著性水平上显著, 括号中为 t 统计值。

表 5 稳健性检验 (解释变量滞后一期)

Table 5 Robustness test (independent variables lag one period)

变量	农业生态效率		
	(10) 未加入交互项	(11) 加入农作物种植结构与农业机械化的交乘项	(12) 加入农村劳动力转移与农业机械化的交乘项
农业机械化	0.180***(2.778)	0.632***(3.289)	0.162**(2.496)
农作物种植结构		-0.018(-0.105)	
农作物种植结构 × 农业机械化		1.233***(4.482)	
农村劳动力转移			-0.008**(-2.319)
农村劳动力转移 × 农业机械化			0.020**(2.466)
控制变量	控制	控制	控制
观测值	600	600	600
调整 R^2	0.781	0.799	0.807
AIC	-926.8	-972.7	-920.4

注: *、** 和 *** 分别表示变量在 10%、5% 和 1% 的显著性水平上显著, 括号中为 t 统计值。

表 6 门槛效应检验及门槛值估计结果
Table 6 Threshold effect test and threshold estimation results

门槛变量	核心解释变量	门槛类型	F 值	P 值	门槛值	95% 置信区间
农地规模经营	农业机械化	单一门槛	33.703	0.008	0.702***	[0.669, 0.711]
		双重门槛	22.076	0.047	0.775**	[0.718, 0.790]
		三重门槛	11.275	0.660	2.481	[1.980, 2.632]

表 7 门槛模型回归结果
Table 7 Regression results of the threshold model

变量	农业生态效率
	(13) 农地规模经营为门槛变量
农业机械化 (农地规模经营 $\leq 0.702 \text{ hm}^2$)	0.206***(3.153)
农业机械化 ($0.702 \text{ hm}^2 < \text{农地规模经营} \leq 0.775 \text{ hm}^2$)	0.387***(6.236)
农业机械化 (农地规模经营 $> 0.775 \text{ hm}^2$)	0.211***(3.275)
农业产值占比	0.764***(5.392)
农村用电量	0.025***(7.285)
财政支农水平	-0.230(-1.213)
自然灾害	-0.228***(-5.953)
个体固定效应	控制
观测值	630
调整 R^2	0.406
AIC	-991.1

注：*、** 和 *** 分别表示变量在 10%、5% 和 1% 的显著性水平上显著，括号中为 t 统计值。

规模经营通过了单一门槛和双重门槛检验。农地规模经营的两个门槛值分别为 0.702 hm^2 和 0.775 hm^2 ，据此也可将农地规模经营分为较低水平（小于 0.702 hm^2 ）、适中水平（ $0.702 \sim 0.775 \text{ hm}^2$ ）和较高水平（大于 0.775 hm^2 ）。在门槛值确定后，对式（4）进行门槛回归，得到以农地规模经营为门槛变量的农业机械化对农业生态效率影响的门槛回归结果，如表 7 所示。

从表 7 的门槛模型回归结果可知，农业机械化对农业生态效率的影响存在农地规模经营的门槛效应。当区域农地规模经营处于较低水平（小于 0.702 hm^2 ）时，农业机械化与农业生态效率的回归系数为 0.206，在 1% 水平上正向显著，此时农业机械化对农业生态效率提高的作用不强；当区域农地规模经营处于适中水平（ $0.702 \sim 0.775 \text{ hm}^2$ ）时，农业机械化与农业生态效率的回归系数为 0.387，在 1% 水平上显著为正，即中等规模水平下农业机械化对农业生态效率的正外部性加强，农业机械化水平得到进一步发挥；当区域农地规模经营处于较高水平（大于 0.775 hm^2 ）时，农业机械化与当地农业生态效率的回归系数为 0.211，低于中等规模组（ $0.702 \sim 0.775 \text{ hm}^2$ ）的 0.387，即较高规模水平下的规模不经济效应导致农业机械化带来的正向效应开始减缓。这表明，随着农地规模经营的扩大，农业机械化对农业生态效率的影响呈现边际效应先递增后递

减的正向关系。据此，假说 4 得到验证。

进一步地，通过计算表 2 模型（1）中最优农地经营规模为 2.830 hm^2 ，与表 7 农地规模经营门槛值对比可发现研究期内农地经营规模在倒 U 型曲线的左侧，这也佐证了农业机械化与农业生态效率呈现边际效应先递增后递减的正向关系。可能的解释为，在较低的农地规模经营水平下，农机作业的自组织化程度不高，农机利用效率较低，一方面可以降低能源消耗造成的增排效应，减缓了环境污染风险，正所谓减少对环境的破坏某种意义上就是对环境的保护，另一方面，生产效率偏低，不利于产量增加带来的升汇效应，相对而言农业机械化带来的正效应仍大于负效应；适中的农地规模经营水平，有利于高新技术和大中型农业机械的推广和运用，农业机械化的规模经济效应也就越能体现出来，能更好地提高农业生产效率，且机械投入强度也随经营规模的增加而下降，尽管仍会对环境产生一定的非期望产出，但整体而言农地规模经营扩大带来的增效减排效应大大促进了农业机械化对农业生态效率的正向作用；当农地规模经营处于较高水平时，农户为追求短期利益最大化而选择支付环境污染成本，通过追加化肥等可促进作物生长的要素投入来提高农业生产力，农业要素投入不仅遵循边际收益递减规律，还带来了污染增加，一定程度上抑制了农业生态效率的上升。

4 结论与启示

4.1 研究结论

基于中国 30 个省（自治区、直辖市）2000—2020 年面板数据，本文实证检验了农业机械化与农业生态效率之间的关系，考察了农作物种植结构和农村劳动力转移两个变量发挥的机制作用，还探讨了不同农地规模经营水平下农业机械化对农业生态效率的非线性影响，得出以下 3 点结论：

1) 基准回归结果表明，农业机械化对农业生态效率产生了显著的正向影响，表明农业耕种收全程机械化不仅有助于提升农业生产效率，对农业生态效率也有改善作用。

2) 作用机制结果表明，农作物种植结构和农村劳动力转移在农业机械化与农业生态效率的影响中发挥着正向调节作用。农作物种植结构“趋粮化”和农村劳动力转移有助于强化农业机械化的正向经济-生态综合效应。

3) 异质性分析结果表明，农业机械化对农业生态效率的影响存在农地规模经营的门槛效应，随着农地规模经营的扩大，农业机械化对农业生态效率的正向作用呈现边际效应先递增后递减的规律。

本文基于省域面板数据，从宏观层面得出了一些启示性结论，丰富了已有研究，但也存在一定的局限，这些不足正是未来研究的方向。第一，本文使用宏观数据验证理论假说，限于宏观数据指标难以提供更深层次的分析，未来考虑基于农户层面微观数据从长时序、多空间开展研究，以对本文宏观数据得出的结论做进一步补充和完善。第二，本文基于理论分析提出了农业机械化对农业生态效率的两种影响机制，并构建了固定效应模型和门槛效应模型，尽可能验证其中的因果关系，未来可通过问卷调查、实地访谈等方式，研究并构建更加合理的模型，考察农业机械化对农业生态效率的影响及存在的其他作用机制。

4.2 政策启示

1) 完善农机一体化补贴政策，加快推进农业机械化。完善农机“研发-生产-购置-作业”一体化补贴政策，制定精准化、差别化的农机补贴条款，鼓励发展节油、节水、节肥、节药和资源综合利用的节约型机械化技术，大力推广秸秆机械化综合利用、高效植保、保护性耕作等环保型机械化技术，加快推进农业机械化高质量发展。

2) 积极引导农作物种植结构调整优化和农村劳动力转移。着力提升粮食作物种植比例，深入推

进粮食作物生产全程机械化，大力发展经济作物生产关键环节机械化；有序推进农村剩余劳动力稳定转移，发挥农村劳动力转移的正向调节作用，推动农业机械化健康发展。

3) 推进农业适度规模经营和农机配套体系建设。因地制宜制定符合实际和生产者需要的机械化发展策略，发挥农地规模经营在农业机械化提升农业生态效率水平中的积极作用。此外，进一步强化农业机械化配套体系建设，如规范农地流转、推进高标准农田建设、加强与机械化相匹配的农田基础设施建设、构建行之有效的技术服务体系，探索一条具有中国特色的以规模化农机服务为载体的新型农业技术推广新路和农业规模经营新路。

参考文献：

- [1] 周振, 孔祥智. 农业机械化对我国粮食产出的效果评价与政策方向[J]. 中国软科学, 2019(4): 20-32.
Zhou Z, Kong X Z. Agricultural machines subsidy policy and the grain output of China: DID empirical analysis based on national county-level data[J]. China Soft Science, 2019(4): 20-32.
- [2] 侯孟阳, 邓元杰, 姚顺波. 农村劳动力转移、化肥施用强度与农业生态效率: 交互影响与空间溢出[J]. 农业技术经济, 2021(10): 79-94.
Hou M Y, Deng Y J, Yao S B. Rural labor transfer, fertilizer use intensity and agro-ecological efficiency: Interaction effects and spatial spillover[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2021(10): 79-94.
- [3] 王宝义, 张卫国. 中国农业生态效率的省际差异和影响因素——基于 1996—2015 年 31 个省份的面板数据分析[J]. 中国农村经济, 2018(1): 46-62.
Wang B Y, Zhang W G. Cross-provincial differences in determinants of agricultural eco-efficiency in China: An analysis based on panel data from 31 provinces in 1996-2015[J]. Chinese Rural Economy, 2018(1): 46-62.
- [4] 祝宏辉, 杜美玲, 尹小君. 节水农业技术对绿洲农业生态效率的影响: 促进还是抑制?——以新疆玛纳斯河流域绿洲农业为例[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(10): 34-41.
Zhu H H, Du M L, Yin X J. Impact of water-saving agricultural technology on oasis agricultural ecological efficiency: Promote or inhibit[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(10): 34-41.
- [5] 李谷成, 李焯阳, 周晓时. 农业机械化、劳动力转移与农民收入增长——孰因孰果?[J]. 中国农村经济, 2018(11): 112-127.
Li G C, Li Y Y, Zhou X S. Agricultural mechanization, labor transfer and the growth of farmer's income: A re-examination of causality[J]. Chinese Rural Economy, 2018(11): 112-127.
- [6] 彭超, 张琛. 农业机械化对农户粮食生产效率的影响[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2020, 19(5): 93-102.
Peng C, Zhang C. Assessment of agricultural mechanization on farmers' grain aggregated production efficiency[J]. Journal of South China Agricultural University (Social Science Edition), 2020, 19(5): 93-102.

- [7] He P P, Zhang J B, Li W J. 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.
- [8] 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.
- [9] Jiang M J, Hu X J, Chunga 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: 124210.
- [10] 伍国勇, 孙小钧, 于福波, 等. 中国种植业碳生产率空间关联格局及影响因素分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(5): 46-57.
Wu G Y, Sun X J, Yu F B, et al. Spatial correlation pattern and influencing factors of China's crop production carbon productivity[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(5): 46-57.
- [11] Zhu Y Y, Zhang Y, Piao H L. Does agricultural mechanization improve agricultural environment efficiency? Evidence from China's planting industry[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(35): 53673-53690.
- [12] 程永生, 张德元, 汪侠. 农业社会化服务的绿色发展效应——基于农户视角[J]. *资源科学*, 2022, 44(9): 1848-1864.
Cheng Y S, Zhang D Y, Wang X. Green development effect of agricultural socialized services: An analysis based on farming households' perspective[J]. *Resources Science*, 2022, 44(9): 1848-1864.
- [13] 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.
- [14] 詹绍菓, 宦梅丽. 农业社会化服务、作物结构趋粮化与化肥减量施用[J]. *农村经济*, 2023(5): 96-105.
Zhan S G, Huan M L. Agricultural socialized service, grain orientation of crop structure and reduced application of chemical fertilizer[J]. *Rural Economy*, 2023(5): 96-105.
- [15] 刘琼, 肖海峰. 农地经营规模影响农业碳排放的逻辑何在?——要素投入的中介作用和文化素质的调节作用[J]. *农村经济*, 2020(5): 10-17.
Liu Q, Xiao H F. What is the logic of agricultural land management scale affecting agricultural carbon emissions? The mediating role of factor input and the regulating role of cultural quality[J]. *Rural Economy*, 2020(5): 10-17.
- [16] 朱满德, 张梦瑶, 刘超. 农业机械化驱动了种植结构“趋粮化”吗[J]. *世界农业*, 2021(2): 27-34, 44.
Zhu M D, Zhang M Y, Liu C. Does agricultural mechanization drive the “grain-oriented” planting structure[J]. *World Agriculture*, 2021(2): 27-34, 44.
- [17] 张琛, 彭超, 毛学峰. 非农就业、农业机械化与农业种植结构调整[J]. *中国软科学*, 2022(6): 62-71.
Zhang C, Peng C, Mao X F. Off-farm employment, agricultural mechanization and adjustment of agricultural planting structure[J]. *China Soft Science*, 2022(6): 62-71.
- [18] 睢忠林, 刘春明, 周杨. 农业机械对劳动力的替代能否提高粮食生产环境效率[J]. *世界农业*, 2021(1): 99-108, 130.
Sui Z L, Liu C M, Zhou Y. Dose the substitution of agricultural machinery for labor improve the environmental efficiency of food production[J]. *World Agriculture*, 2021(1): 99-108, 130.
- [19] 王舒娟, 马俊凯, 李宁. 农地经营规模如何影响农户的农业机械化选择?[J]. *农村经济*, 2021(4): 111-118.
Wang S J, Ma J K, Li N. How does the scale of farmland management affect farmers' choice of agricultural mechanization?[J]. *Rural Economy*, 2021(4): 111-118.
- [20] 胡雯, 张锦华, 陈昭玖. 小农户与大生产: 农地规模与农业资本化——以农机作业服务为例[J]. *农业技术经济*, 2019(6): 82-96.
Hu W, Zhang J H, Chen Z J. Small farmer and large scale production: Farmland scale and agricultural capital deepening: Taking agricultural machinery operation service as example[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2019(6): 82-96.
- [21] 田红宇, 祝志勇. 农村劳动力转移、经营规模与粮食生产环境技术效率[J]. *华南农业大学学报(社会科学版)*, 2018, 17(5): 69-81.
Tian H Y, Zhu Z Y. Rural labor migration, scale of operation and environmental technical efficiency of grain production[J]. *Journal of South China Agricultural University (Social Science Edition)*, 2018, 17(5): 69-81.
- [22] 刘桂英, 成雪宇, 张双庆, 等. 耕地经营规模与化肥减施效应——来自江西省水稻种植户的证据[J]. *农业现代化研究*, 2023, 44(1): 97-107.
Liu G Y, Cheng X Y, Zhang S Q, et al. Farmland management scale and the effect of chemical fertilizer reduction: Evidence from rice farmers in Jiangxi Province[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2023, 44(1): 97-107.
- [23] 田伟, 杨璐嘉, 姜静. 低碳视角下中国农业环境效率的测算与分析——基于非期望产出的SBM模型[J]. *中国农村观察*, 2014(5): 59-71, 95.
Tian W, Yang L J, Jiang J. Measurement and analysis of the Chinese agricultural eco-efficiency from the perspective of low carbon: Based on SBM model of the undesirable outputs[J]. *China Rural Survey*, 2014(5): 59-71, 95.
- [24] 曹俊文, 曾康. 低碳视角下长江经济带农业生态效率及影响因素研究[J]. *生态经济*, 2019, 35(8): 115-119, 127.
Cao J W, Zeng K. Study on agricultural eco-efficiency and its influencing factors in the Yangtze River economic belt from the perspective of low carbon[J]. *Ecological Economy*, 2019, 35(8): 115-119, 127.
- [25] 尚杰, 杨滨键. 种植业碳源、碳汇测算与净碳汇影响因素动态分析: 山东例证[J]. *改革*, 2019(6): 123-134.
Shang J, Yang B J. Estimation of carbon source and carbon

- sequestration in planting industry and dynamic analysis of influencing factors of net carbon sequestration: A case study of Shandong Province[J]. *Reform*, 2019(6): 123-134.
- [26] 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, 26(6): 751-755.
Chen M P, Chen J N, Lai S Y. Inventory analysis and spatial distribution of Chinese agricultural and rural pollution[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(6): 751-755.
- [27] 马贤磊, 车序超, 李娜, 等. 耕地流转与规模经营改善了农业环境吗?——基于耕地利用行为对农业环境效率的影响检验 [J]. *中国土地科学*, 2019, 33(6): 62-70.
Ma X L, Che X C, Li N, et al. Has cultivated land transfer and scale operation improved the agricultural environment? An empirical test on impact of cultivated land use on agricultural environment efficiency[J]. *China Land Science*, 2019, 33(6): 62-70.
- [28] 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.
- [29] 姜智强, 刘伊霖, 曾智, 等. 财政环保支出对农业生态效率的影响研究——来自长江经济带发展战略的经验证据 [J]. *经济问题*, 2022(6): 113-122.
Jiang Z Q, Liu Y L, Zeng Z, et al. The impact of public environmental expenditure on agricultural eco-efficiency: Empirical evidence from the Yangtze River economic belt[J]. *On Economic Problems*, 2022(6): 113-122.
- [30] Hansen B E. Threshold effects in non-dynamic panels: Estimation, testing, and inference[J]. *Journal of Econometrics*, 1999, 93(2): 345-368.
- [31] 郑晶, 高孟菲. 农业机械化、农村劳动力转移对农业全要素生产率的影响研究——基于中国大陆 31 个省(市、自治区)面板数据的实证检验 [J]. *福建论坛(人文社会科学版)*, 2021(8): 59-71.
Zheng J, Gao M F. Study on the influence of agricultural mechanization and rural labor transfer on agricultural total factor productivity: An empirical test based on panel data of 31 provinces (cities and autonomous regions) in Chinese mainland[J]. *Fujian Tribune*, 2021(8): 59-71.

(责任编辑: 王育花)