

农业机械化的环境效应*

——来自农机购置补贴政策的证据

田晓晖¹ 李 薇¹ 李 戎²

摘要：本文基于中国县级农业生产数据以及卫星遥感数据，从农机购置补贴政策实施的视角，依托该政策推广的准自然实验特征，利用双重差分模型识别了农机购置补贴政策对农业机械化水平和污染性农业生产行为的影响及其作用机制，回答了农业机械化如何影响生态环境的问题。研究发现，农机购置补贴政策显著提高了试点县的农业机械化水平，政策对不同污染性农业生产行为的影响存在差异，且具有一定滞后性。具体地，农机购置补贴政策显著减少了当年及下一年的地膜使用量，增加了下一年的秸秆焚烧火点数目，但对化肥使用量和农药使用量的影响不显著。机制分析表明，农机购置补贴政策通过扩大粮食播种面积占比以及促进农业劳动力转移，改变了农户使用污染性投入要素和处理农业生产废弃物的方式，从而对生态环境产生了相应的影响。

关键词：农业机械化 生产行为 种植结构 劳动力流动 双重差分模型

中图分类号：F304.4 **文献标识码：**A

一、引言

党的十九届中央委员会第五次全体会议提出中国到 2035 年要基本实现农业现代化的远景目标。农业机械化水平的提升和农业绿色转型是农业现代化的内在要求，理解两者之间的相互作用和发展关系对于加快中国农业现代化进程具有重要的理论和现实意义。为激发农业生产者购买农业机械的积极性，原农业部和财政部于 2004 年共同制定了《农业机械购置补贴资金使用管理办法（试行）》，对农民和农业生产经营组织购买农业机械提供补贴。农机购置补贴政策实施以来，中国农机装备结构持续改善，作业效率不断提高，农业机械化对农业农村现代化的支撑作用逐步凸显。2004—2019 年中央财政累计安排农机购置补贴资金 2226 亿元，累计支持 3500 多万农户及农业生产经营组织购置各类别

*本文受到国家自然科学基金青年科学基金项目“农户秸秆处置行为及激励政策研究——以东北玉米生产为例”（批准号：71603268）和国家自然科学基金面上项目“地方财政政策与地方经济稳定：实证分析与理论机制”（批准号：71973143）资助。感谢匿名审稿专家、两刊第四届“三农论坛”专家的宝贵建议，文责自负。本文通讯作者：李戎。

农机具超过 4500 万台（套）^①，农业机械总动力由 2003 年的 6.04 亿千瓦上升至 2019 年的 10.28 亿千瓦，增长率达 70.20%。农作物耕种收综合机械化率从 2003 年的 32% 提高到 2019 年的 70%，小麦、水稻、玉米三大粮食作物耕种收综合机械化率均超过 80%^②。农业机械化进程的推进带来了农业种植结构、生产方式及生产技术的改变，对生态环境也产生了重大影响。那么，农业机械化对生态环境的影响有哪些？影响程度如何？农业机械化影响生态环境的作用机制又是什么？学界对相关问题尚缺乏深入探讨。

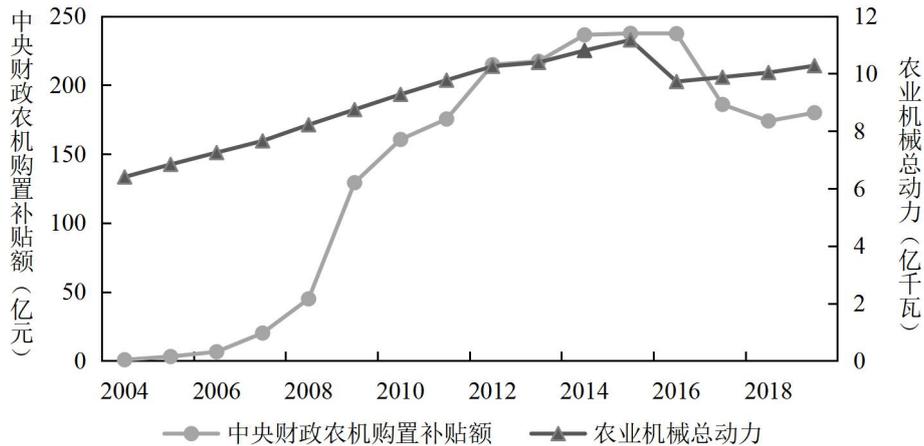


图 1 2004—2019 年中央财政农机购置补贴额及农业机械总动力变化情况

数据来源：中央财政农机购置补贴额数据来源于《全国农业机械化统计年报》（2005—2020 年，历年），农业机械总动力数据来源于《中国统计年鉴》（2005—2020 年，历年）。

国内外学界已有大量研究关注公共政策对生态环境的影响，研究对象多以非农部门的政策为主，如财政收支政策（卢洪友等，2015）、产业转型政策（Grossman and Krueger, 1995）、碳税及碳排放配额政策（何萍等，2018）、能源政策（魏巍贤、赵玉荣，2017）等。少数研究涉及了农业政策对生态环境的影响，且结论存在差异。如张海涛、任景明（2016）关注了农业土地政策、农业结构政策及农业财政政策的综合环境效应，发现农业政策通过影响单位面积化肥使用量对种植业面源污染产生了显著影响。左喆瑜、付志虎（2021）基于地块数据的研究发现，绿色农业补贴政策降低了肥料投入环境效率和肥料生产率。这些研究表明，环境效应是公共政策评估中需要考虑的重要因素。

关于农业机械化相关政策实施效果的研究成果较多，现有研究主要考察了政策对农业生产、劳动力市场以及农民收入等方面的影响。这些研究发现：第一，农机购置补贴政策不仅促使农户自适应地扩大了农业生产规模，还明显改进了农业生产的基础条件，提升了农业生产效率和粮食总产量（周振、孔祥智，2019），并改变了农业种植结构（吴银毫、苗长虹，2017）。第二，通过农业机械对农业劳动力的替代，农机购置补贴政策促进了农村劳动力的外流（吕炜等，2015）。第三，农机购置补贴政

^①数据来源：http://www.moa.gov.cn/govpublic/NCJJTZ/202009/t20200903_6351406.htm。

^②数据来源：《中国农业机械化年鉴》（2004—2020 年，历年）。

策促使购机农户收入大幅提升，该政策效果在小规模农户以及从事种植业的农户中更为明显（王姣、肖海峰，2007）。上述研究大大加深了学界对农业机械化及相关政策实施效果的认识，然而，现有关于农业机械化或农机购置补贴政策对生态环境影响的探讨还很少，且存在一些不足：第一，现有文献大多局限于定性描述和直观判断，对作用路径和机制的探讨十分匮乏。第二，仅有的少数实证研究往往聚焦于单一的污染性农业生产行为。例如，周家俊、周德（2019）基于中国 232 个地级市数据估计了农业机械投入对化肥减量化的影响，发现机械强度与化肥强度呈非线性关系。第三，现有实证研究大多采用截面数据，因此不可避免地会出现遗漏变量（如土地质量、地形等）导致的内生性问题。

本文试图以农机购置补贴政策为视角来探究农业机械化对生态环境的影响。农机购置补贴政策的实施具有“先试点、再逐步推广”的准自然实验特征，这为识别农业机械化对生态环境影响的因果关系提供了机会。鉴于农机购置补贴政策从开始试点到全国推广期间（2004—2009 年），中国尚无公开的大范围的县级环境监测数据^①，本文选取了四种典型的污染性农业生产行为作为对生态环境影响的代理变量，即农药使用、化肥施用、地膜使用和秸秆焚烧。基于中国县级层面的面板数据和遥感卫星数据，本文构建了多时点双重差分模型，首先估计了农机购置补贴政策实施对地区农业机械化水平的影响，然后识别了政策对四种污染性农业生产行为的影响，最后检验了农机购置补贴政策影响各类污染性农业生产行为的作用机制。

本文的边际贡献有以下三点：一是从农业补贴视角丰富和拓展了公共政策对生态环境影响的研究；二是关注了多种污染性农业生产行为，并理清了相应的影响机制，有利于为探究农业机械化与生态环境的关联提供来自转型国家的经验证据；三是丰富和拓展了农机购置补贴政策效果的实证研究，本文跳出了前人主要围绕农机购置补贴政策的经济影响展开研究的习惯，为全面评估政策效果和中国农业机械化政策设计提供了参考。

二、理论分析

（一）典型的污染性农业生产行为及其影响生态环境的机制

农业生产对生态环境的影响主要来源于三个方面：一是农业生产投入品的使用，包括化肥、农药和地膜等的使用；二是农业生产废弃物的处理，包括秸秆焚烧和畜禽粪便排放等；三是作物生长过程中对自然资源和生态环境的影响，包括水资源利用、温室气体排放、土地利用等。从影响机制来看，农业机械化主要是通过前两个渠道对生态环境造成影响，即通过改变污染性投入品的使用方式和农业废弃物的处理方式对生态环境产生影响。

^①以空气质量数据为例，在全国范围内公开发布县级实时空气质量数据最早始于 2015 年。根据 2016 年环境保护部发布的《生态环境大数据建设总体方案》，中国从 2016 年开始推动生态环境质量监测大数据共享、交换与公开平台建设。

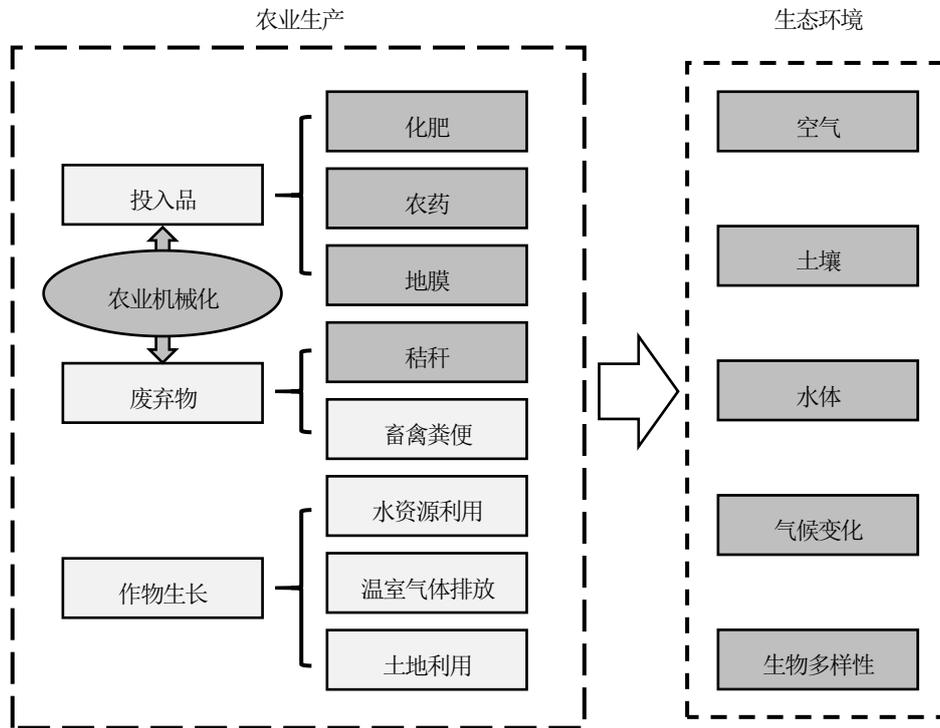


图2 农业生产、机械化与生态环境的关联

1.化肥施用。中国是世界上化肥消费量增长最快、施用强度最高的国家。化肥的不合理施用给土壤、水体、大气、生物及人体健康带来了许多负面影响。大量施用化肥，特别是氮肥，容易使土壤硝酸盐大量剩余和迅速累积，加速土壤盐积和次生盐渍化，造成土壤板结，降低农作物的产量和质量。土壤中过量的氮、磷等营养元素还会通过土壤侵蚀、地表径流、淋溶流失等方式进入水体，加大地表水体富营养化程度，引起地下水硝态氮污染，严重威胁水体健康（朱浩宇等，2021）。此外，铵态氮肥的不合理施用（如浅施、撒施）还会造成氨的逸失，反硝化作用生成的气态氮逸入大气，造成大气污染，进而危及人和动植物的健康（刘钦普，2014）。

2.农药使用。农药的不科学使用会对大气、土壤、水体等造成严重污染。2016年，中国农药平均使用强度达13公斤/公顷，为世界上农药使用强度最大的国家之一（Qiu et al., 2020）。作为外来化学物质，农药一旦进入环境，其毒性、高残留性便会发生作用，造成严重的生态环境污染。喷洒农药过程中，农药微粒会散发到空中，造成空气污染。由于农药不易挥发、分解且难溶于水，落入土壤后将持续残留，造成长久的土壤污染。此外，残留在大气和土壤中的农药会通过地表径流、雨水冲刷、土壤淋溶等途径进入水体环境中，导致水环境质量恶化（朱岩等，2017）。

3.地膜使用。残留的地膜会破坏土壤结构，导致农作物降质减产，并对农业生产环境造成破坏。中国农用塑料薄膜使用量快速增长，从1991年的64.21万吨增至2019年的240.77万吨^①。1979年以

^①数据来源：《中国统计年鉴》（1992—2020年，历年）。

来中国地膜覆盖面积累计达 2000 万平方公里，超过 2000 万吨地膜进入耕地，同时约 1/4~1/3 的地膜残留在农田中（张佰秋，2017）。农膜材料的主要成分为难以分解的高分子化合物，因此在无法回收的情况下，残留地膜将成为永久性的白色垃圾。

4. 秸秆焚烧。秸秆焚烧是农业生产中处理废弃作物秸秆的一种方式，在传统农业生产中较为普遍。秸秆焚烧会导致大气中的 CO、SO₂、VOC 等有毒有害气体及可吸入颗粒物的浓度急剧升高（Crutzen et al., 1979），夏收、秋收时期秸秆的大面积集中焚烧已成为区域性重霾污染事件的主要原因之一，威胁到相关区域居民的身体健康（朱佳雷等，2012）。此外，焚烧秸秆还会显著减少农田土壤中的有机质，降低生物群落数量及密度，导致耕地贫瘠化、农田板结化，影响后茬作物生长，降低作物产量。

（二）农业机械化影响污染性农业生产行为的路径

具体来说，农业机械化可以通过以下两条路径对污染性农业生产行为产生影响：

1. 改变农业种植结构。机械化水平的提升往往伴随着农业种植结构的变化。Yang et al. (2013) 的研究表明，农机补贴政策有助于加快农业规模化发展，提高粮食播种面积占比。粮食播种面积占比提高对污染性农业生产行为的潜在影响表现在以下三个方面：第一，不同农作物对化学品的需求量存在差异，相对于蔬菜、水果等经济作物，更容易实现机械化生产的小麦、水稻、玉米等粮食作物所需的污染性投入要素（如化肥、农药）数量更少（葛继红、周曙东，2011）。第二，粮食作物对地膜的需求量较少，粮食播种面积占比提高会自然地减少地膜使用量，从而减少污染。第三，粮食作物产生的秸秆数量一般多于菜、果、花等经济作物，因此粮食种植规模扩大会增加秸秆总量。可见，农业机械化水平提升后，粮食作物播种面积占比将提高，化肥、农药、地膜的使用量会相应减少，秸秆总量则会相应增加。综上，农业机械化会通过改变农业种植结构，影响化学品投入和废弃物处理，从而间接地对生态环境产生影响。

2. 加快农业劳动力转移。周振等（2016a）的研究表明，农业机械化能有效促进农业劳动力向非农部门转移。一般来说，农业劳动力数量减少会降低劳动密集型生产行为的频次，也有可能改变单次劳动中其他要素投入的数量。以化肥投入为例，农业劳动力流出可能会减少化肥的施用次数，但增加单次的施肥量。此外，农业劳动力流出会强化劳动力这一生产要素的稀缺性，从而提高农户在农业生产中利用化肥替代劳动力的意愿。由此可知，农业劳动力转移对化肥施用量的总体影响是不确定的。与化肥类似，秸秆回收再利用属于劳动密集型生产行为，农业劳动力减少必然会提高秸秆废弃及焚烧行为的发生频率。综上，农业机械化会通过加快农业劳动力向非农部门转移，改变农户使用污染性投入要素和处理农业生产废弃物的行为，进而间接地影响生态环境。

综上所述，本文提出如下假说：

假说 1：农机购置补贴政策会对污染性农业生产行为（农药使用、化肥施用、地膜使用和秸秆焚烧）产生影响。

假说 2：农机购置补贴政策主要通过改变农业种植结构和促进农业劳动力转移对污染性农业生产行为产生影响。

三、研究设计

（一）数据来源与处理

1. 农业生产数据。本文使用的农业生产数据来自于农业农村部，本文选取 2001—2009 年^①中国县级农业生产面板数据，具体指标包括农业机械总动力、化肥施用量、农药使用量、地膜使用量、农作物总播种面积、粮食播种面积、粮食总产量、农林牧渔业从业人员数量、农村居民人均纯收入、农业产值、农林牧渔业总产值。

2. 农机购置补贴政策试点数据。农机购置补贴政策试点县逐年推进名单来自于农业农村部。农机购置补贴政策自 2004 年起在全国试点推行，第一批试点县为 66 个，2005 年扩展到 500 个，2006 年为 1126 个，2007 年为 1716 个，2008 年为 2653 个，2009 年覆盖到中国全部县级地区。

3. 秸秆焚烧火点数据。秸秆焚烧火点数据来源于美国国家航天局（NASA）卫星遥感数据。NASA 建立了火灾信息资源管理系统（FIRMS），通过发射搭载有中分辨率成像光谱仪（MODIS）的卫星对地面火点进行监测。MODIS 数据中的原始火点数据包含了火点的时间（精确到小时）和空间（经纬度）分布，图像分辨率可达 1 千米。从现有相关研究来看，该数据能够相当准确地展示地区秸秆焚烧情况。本文选取 MODIS 数据中 2001 年 5 月至 2009 年 4 月中国县级月度秸秆焚烧火点数目数据，加总后构建了 2001—2009 年的年度县级秸秆焚烧火点数目数据^②。

本文构建的是 2001—2009 年中国县级层面的平衡面板数据^③，数据清洗过程如下：第一步，剔除关键解释变量为缺失值或取值不合理的样本，剩余 1597 个样本。第二步，剔除 2001—2009 年间设立、撤销以及出现合并、拆分等导致区划变化的县级单位（共计 20 个），保留仅更名的县级单位，剩余 1577 个样本。第三步，为了消除异常值的影响，对所有连续变量在 1 和 99 分位点上进行缩尾处理。第四步，针对单一被解释变量缺失的样本，通过缺失值检验（Nicholson et al., 2015）来验证这些缺失值的存在是否会导致回归结果出现偏差。检验结果显示，农药使用量、化肥施用量和地膜使用量缺失值的存在对回归结果无显著影响，因此本文不进行缺失值填补处理。经过一系列严格筛选，最终得到 1577 个样本 2001—2009 年的平衡面板数据。

^①使用双重差分模型的一个关键前提是存在共同趋势，即在政策实施前，实验组和对照组具有相同的发展趋势，这就要求样本数据延伸至政策实施前。农机购置补贴政策自 2004 年开始试点，至 2009 年覆盖中国全部县级地区，因此选取 2001—2009 年县级面板数据即可满足本文对数据的要求。

^②从全国范围来看，产生秸秆较多的玉米、小麦、水稻等作物的收获时间一般是每年的 5 月至 12 月，而当年作物秸秆的焚烧一般要持续到下一年种植季开始（即 5 月）之前，可见当年种植作物的秸秆焚烧时间跨度应为当年 5 月至次年 4 月，因此本文用当年 5 月至次年 4 月的秸秆焚烧火点数目之和来代表当年的焚烧总量。例如，2001 年的秸秆焚烧火点总量为 2001 年 5 月至 2002 年 4 月的月度火点数目的加总。

^③由于行政区划调整、统计口径变化等原因，每年的样本数量均有所变动，2001 年为 3107 个，2002 年为 3068 个，2003 年为 3110 个，2004 年为 3113 个，2005—2008 年为 2075 个，2009 年为 2076 个。

（二）模型设定

双重差分模型（Difference-in-Differences, DID）是政策评估领域的主要研究方法之一，已有许多学者（Nunn and Qian, 2014）运用双重差分方法对政策效果进行评估。由于农机购置补贴政策是在县级层面依照试点次序逐年展开的，因此本文将农机购置补贴政策视为一项“准自然实验”，设立如下多时点双重差分模型：

$$\ln Y_{i,t} = \alpha_0 + \alpha_1 P_{i,t} + \sum_j \alpha_j \ln C_{i,t} + \mu_i + \theta_t + \varepsilon_{i,t} \quad (1)$$

其中， $Y_{i,t}$ 代表第 i 个县第 t 年的农业机械化水平以及污染性农业生产行为，其中污染性农业生产行为包括化肥施用、农药使用、地膜使用及秸秆焚烧。为了消除异方差的影响，并方便对不同的污染性农业生产行为进行直观比较，本文对被解释变量及控制变量均作取对数处理。虚拟变量 $P_{i,t}$ 取值为 0 或 1，取 1 代表第 i 个县第 t 年实施了农机购置补贴政策，取 0 代表第 i 个县第 t 年未实施农机购置补贴政策。 $C_{i,t}$ 为控制变量，包括农作物播种面积、粮食生产水平、农业产值占比以及农村居民收入。 μ_i 和 θ_t 分别表示个体固定效应和时间固定效应， $\varepsilon_{i,t}$ 为随机干扰项。本文重点关注系数 α_1 ，它反映了剔除其他因素干扰后农机购置补贴政策的净影响。

进一步，本文对农机购置补贴政策影响污染性农业生产行为的作用机制进行检验，主要检验以下两种机制：一是农机购置补贴政策能否通过调整农业种植结构影响污染性农业生产行为，其中农业种植结构用粮食播种面积占农作物总播种面积的比例测度；二是农机购置补贴政策能否通过促进农业劳动力转移影响污染性农业生产行为，其中农业劳动力转移由农业人口净流失量测度。

本文的中介变量（粮食播种面积占比、农业人口净流失量）并不是外生的随机干预变量，如果将内生的中介变量简单地加入到原有的多时点双重差分模型中，可能导致估计结果有偏。此外，本文的中介变量对不同污染性农业生产行为的影响还可能存在差异。鉴于此，本文无法应用传统的中介效应检验模型进行机制检验。考虑到现有研究已经验证了粮食播种面积占比及农业人口净流失量对污染性农业生产行为的影响，本文只需检验政策变量对中介变量的影响，即可验证农机购置补贴政策影响污染性农业生产行为的机制。具体模型设定如下：

$$M_{i,t} = \tau_0 + \tau_1 P_{i,t} + \sum_j \tau_j \ln C_{i,t} + \mu_i + \theta_t + \varepsilon_{i,t} \quad (2)$$

其中， $M_{i,t}$ 是中介变量，包括粮食播种面积占比和农业人口净流失量。其他变量含义同上。

（三）变量描述

1. 被解释变量。基于前文的理论分析，本文选取农业机械化水平以及化肥施用、农药使用、地膜使用及秸秆焚烧这四种典型的污染性农业生产行为作为被解释变量。本文认为，化肥、农药、农膜使用量越大，秸秆焚烧火点数目越多，农业生产对生态环境的破坏程度越高。

2. 解释变量。本文核心解释变量为“是否实施了农机购置补贴政策”。根据农机购置补贴试点县名单，本文构造了虚拟变量 $P_{i,t}$ ， $P_{i,t}$ 取值为 0 表示第 i 个县第 t 年还没有实施农机购置补贴政策；若试点县于某一年开始实施农机购置补贴政策，则该年及其后年份的 $P_{i,t}$ 均取值为 1。

3.控制变量。农机购置补贴政策试点县的选取基本遵循了以下三条标准：一是试点县耕地相对集中，粮食生产能力强；二是试点县具有较强的农业机械需求；三是试点县具备一定的财政实力（周振等，2016b）。基于此，结合已有文献和可得数据，本文控制了粮食生产水平、农作物播种面积、农业产值占比以及农村居民收入四个变量。这四个变量为农机购置补贴政策试点县选取时考虑的主要因素，且与化肥施用、秸秆焚烧等污染性农业生产行为存在较强的相关性，控制上述变量可以在一定程度上解决由于遗漏变量导致的内生性问题。

4.中介变量。本文选取了两个中介变量：一是粮食播种面积占比，用各县粮食播种面积占农作物总播种面积的比例测度；二是农业人口净流失量，用县级农林牧渔业从业人员的年度变化量测度。

表1 变量定义与描述性统计

变量名称	变量定义	均值	标准差	最小值	最大值
农业机械化水平	农业机械总动力（千瓦）	294420.300	298006.800	13447.000	1544000.000
化肥施用	化肥施用量（按折纯法计算） （吨）	21363.510	21011.060	96.000	108801.000
农药使用	农药使用量（吨）	619.475	737.924	4.000	3945.000
地膜使用	地膜使用量（吨）	430.636	542.502	4.000	2992.000
秸秆焚烧	秸秆焚烧火点数目（个）	26.060	53.417	0.000	340.000
农机购置补贴政策	是否实施农机购置补贴政策： 已实施=1，未实施=0	0.400	0.490	0.000	1.000
粮食生产水平	粮食单位面积产量（吨/公顷）	4.950	1.603	0.989	9.123
农作物播种面积	农作物总播种面积（公顷）	70558.810	52929.210	2941.000	276950.000
农业产值占比	农业产值占农林牧渔业总产值 的比例（%）	55.018	14.621	0.161	99.750
农村居民收入	农村居民人均纯收入（元）	3335.060	1825.527	770.000	9966.000
粮食播种面积占比	粮食播种面积占农作物总播种 面积的比例（%）	66.711	15.475	16.928	96.377
农业人口净流失量	当年农林牧渔业从业人员数减 去上一年农林牧渔业从业人员 数（人）	-3261.498	18785.830	-108100.000	74200.000

注：表中数据为2001—2009年的均值。

四、回归结果与讨论

（一）农机购置补贴政策对农业机械化水平的影响

本文首先检验农机购置补贴政策是否必然导致农业机械化水平的提高。表2报告了农机购置补贴政策对农业机械化水平影响的估计结果，（1）列与（2）列为不加控制变量的估计结果，（3）列与（4）列为加入控制变量的估计结果。回归结果显示，农机购置补贴政策对当年以及下一年的农业机械化水平都有显著的正向影响。根据（3）列和（4）列的估计结果，农机购置补贴政策实施后，实施县当年

农业机械化水平平均提高 3.7%，下一年农业机械化水平平均提高 4.2%。这表明农机购置补贴政策的效果在实施当年不能全部体现，农机购置补贴政策对农业机械化水平具有持续影响，一种可能的解释是，农业机械具有耐用品的属性，补贴政策虽然可以在当年显著提高农机装备存量，但机械化的推广使用需要一定的时间，因此导致了政策对农业机械化水平的持续影响。该实证结果表明，农机购置补贴政策确实为农业机械化水平重要的外生冲击。

表 2 农机购置补贴政策对农业机械化水平影响的回归结果

	因变量：农业机械化水平			
	(1)	(2)	(3)	(4)
农机购置补贴政策（当年）	0.044*** (0.009)		0.037*** (0.009)	
农机购置补贴政策（上一年）		0.053*** (0.010)		0.042*** (0.010)
常数项	11.870*** (0.008)	11.870*** (0.008)	9.240*** (0.327)	9.255*** (0.326)
控制变量	否	否	是	是
地区固定效应	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是
观测值	14065	14065	13715	13715
R ²	0.367	0.367	0.386	0.386

注：本文选择使用县级层面的聚类标准误以获得稳健的估计结果；***、**和*分别表示 1%、5%和 10%的显著性水平，后文同。

（二）农机购置补贴政策对污染性农业生产行为的影响

表 3 报告了农机购置补贴政策对当年污染性农业生产行为的影响效果，表 4 报告了农机购置补贴政策对下一年污染性农业生产行为的影响效果。估计结果表明：第一，农机购置补贴政策的实施显著减少了当年及下一年的地膜使用量。根据表 3 和表 4 中（1）列的估计结果，农机购置补贴政策的实施，使试点县当年地膜使用量平均减少了 4.5%，下一年地膜使用量平均减少了 4.7%。第二，农机购置补贴政策的实施会显著增加下一年的秸秆焚烧火点数目。根据表 3 和表 4 中列（2）的估计结果，政策实施后，当年秸秆焚烧火点数目没有显著变化，下一年秸秆焚烧火点数目平均增加了 7.8%，这表明农机购置补贴政策对秸秆焚烧火点数目的影响具有滞后性。第三，农机购置补贴政策对化肥施用量和农药使用量的影响不显著。根据表 3 和表 4 中（3）列和（4）列的估计结果，农机购置补贴政策对当年及下一年的化肥施用量和农药使用量均没有显著影响，可能的原因在于，政策补贴的农机具主要适用于机耕、机播等生产环节，对有助于化肥和农药减量的农机具补贴力度较弱。综上可知，农机购置补贴政策会对污染性农业生产行为中的地膜使用和秸秆焚烧行为产生影响，而对农药使用、化肥施用行为无显著影响，且这种政策的影响具有一定的滞后性。研究假说 1 得证。

表3 农机购置补贴政策对当年污染性农业生产行为影响的回归结果

	地膜使用	秸秆焚烧	化肥施用	农药使用
	(1)	(2)	(3)	(4)
农机购置补贴政策（当年）	-0.045*** (0.015)	0.028 (0.032)	0.003 (0.007)	0.017 (0.012)
常数项	1.654*** (0.525)	2.556*** (0.754)	4.911*** (0.431)	1.735*** (0.502)
控制变量	是	是	是	是
地区固定效应	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是
观测值量	13747	10380	13788	13756
R ²	0.116	0.293	0.180	0.124

表4 农机购置补贴政策对下一年污染性农业生产行为影响的回归结果

	地膜使用	秸秆焚烧	化肥施用	农药使用
	(1)	(2)	(3)	(4)
农机购置补贴政策（上一年）	-0.047*** (0.016)	0.078** (0.034)	0.004 (0.009)	0.005 (0.015)
常数项	1.640*** (0.525)	2.627*** (0.753)	4.914*** (0.431)	1.728*** (0.502)
控制变量	是	是	是	是
地区固定效应	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是
观测值量	13747	10380	13788	13756
R ²	0.116	0.293	0.180	0.124

（三）农机购置补贴政策影响污染性农业生产行为的机制

本文进一步检验了农机购置补贴政策影响污染性农业生产行为的机制，结果如表5所示。其中，（1）列和（2）列分别报告了农机购置补贴政策对当年及下一年粮食播种面积占比的影响，（3）列和（4）列分别报告了农机购置补贴政策对当年及下一年农业人口净流失量的影响。

（1）列和（2）列的估计结果显示，农机购置补贴政策实施后，实施县当年粮食播种面积占农作物总播种面积的比值平均提高了0.941，下一年比值平均提高了1.470，这表明农机购置补贴政策的实施会促使试点县粮食播种面积占比显著提高。农机购置补贴政策导致的农业种植结构变化会对生态环境产生两方面影响：第一，考虑到大部分的农业机械适用于粮食作物（郑旭媛、徐志刚，2016），而地膜主要用于蔬菜、花卉、水果等经济作物，因此地膜使用量会伴随着粮食播种面积占比提高而减少。第二，由于秸秆主要来自于玉米、水稻、小麦等粮食作物，在回收渠道有限的情况下，政策试点县的秸秆总量会增加，秸秆焚烧火点数目也会相应增加（王舒娟、蔡荣，2014）。综上，农机购置补贴政策会通过改变农业种植结构对污染性农业生产行为产生影响，进而影响生态环境。

(4) 列的估计结果显示, 农机购置补贴政策对下一年农业人口净流失量有显著的负向影响, 这表明农机购置补贴政策可以加快农业劳动力转移。政策实施一年后, 更多的农业劳动力流向非农部门, 这意味着农机购置补贴政策实施带来的机械化水平提高强化了农业机械对人工的替代作用, 这与徐建国、张勋(2016)、李谷成等(2018)的研究结论一致。农业机械化实际上是机械对人力和畜力的替代, 也是资本对劳动力的替代。当机械要素相对劳动力更加丰富时, 农户倾向于利用机械代替劳动力, 从而将劳动力从农业生产中解放出来, 从事报酬更高的非农行业。劳动力向非农部门转移带来的另一个结果是劳动密集型农业生产行为减少, 如地膜使用和秸秆综合回收利用行为的减少(黄武等, 2012)。可见, 农业机械化水平提高导致的农业劳动力流出, 会改变农户对污染性投入要素的使用方式和对农业生产废弃物的处理方式, 进而对生态环境产生影响。综上, 研究假说2得证。

表5 农机购置补贴政策影响污染性农业生产行为机制的检验结果

	粮食播种面积占比	粮食播种面积占比	农业人口净流失量	农业人口净流失量
	(1)	(2)	(3)	(4)
农机购置补贴政策 (当年)	0.941*** (0.178)		-77.290 (534.100)	
农机购置补贴政策 (上一年)		1.470*** (0.218)		-1267.000*** (462.000)
常数项	64.170*** (7.478)	64.930*** (7.480)	-45489.000 (28535.000)	-46919.000 (28532.000)
控制变量	是	是	是	是
地区固定效应	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是
观测值量	13835	13835	12091	12091
R ²	0.053	0.056	0.011	0.011

五、稳健性检验

(一) 平行趋势检验

双重差分模型估计有效的前提之一是实验组和对照组在政策实施前满足平行趋势假设。考虑到各县农机购置补贴政策的试点年份不一致, 本文选取各县政策实施前一年作为该县的基准年, 以考察实验组和对照组的变化趋势。具体地, 本文检验了各县农机购置补贴政策实施前7年一直到政策实施后4年的趋势变化, 实证模型设定如下:

$$\ln Y_{i,t} = \alpha_0 + \sum_{k \geq -7}^4 \alpha_k P_{i,t_0+k} + \sum_j \alpha_j \ln C_{i,t} + \mu_i + \theta_t + \varepsilon_{i,t} \quad (3)$$

其中, t_0 代表农机购置补贴政策试点当年, P_{i,t_0+k} 为虚拟变量, 表示第 i 个县在 $t_0 + k$ 年是否实施了农机购置补贴政策, P_{i,t_0+k} 仅在 $t_0 + k$ 这一年取值为1, 其他年份均取值为0。其他变量含义与前文同。

如图 3 所示，在控制了一系列可观测变量的条件下，农机购置补贴政策实施前试点县与非试点县之间的农业机械总动力变化趋势并无明显差异，而政策实施后的每一年农业机械总动力在实验组和对照组之间均呈现出显著差异。可见，样本基本满足使用多时点双重差分法所要求的平行趋势。

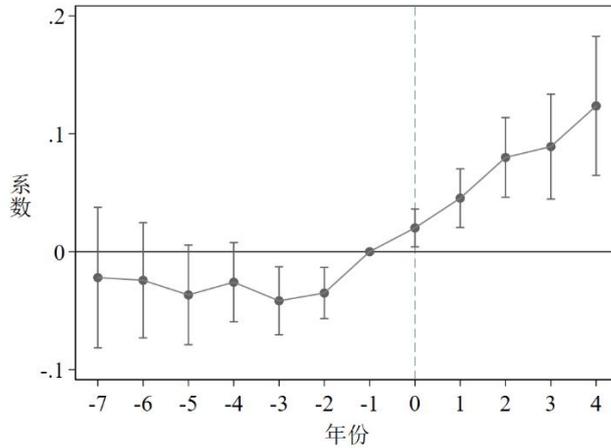


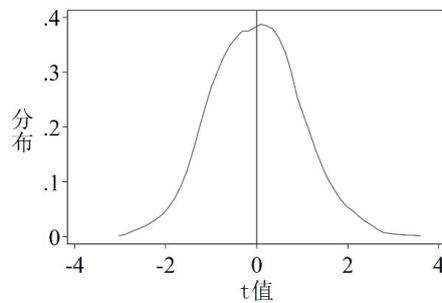
图 3 平行趋势检验结果

注：①本图描绘了由（3）式得到的 P_{i,t_0+k} 的逐年估计系数 α_k ，置信区间为 95%；②横轴的“-1”代表政策实施前一年，“0”代表政策实施当年，“1”代表政策实施后一年，依此类推。

（二）安慰剂效应

为检验上文的实证结果是否由不可观测因素驱动，借鉴 Cai et al. (2016) 的研究，本文通过随机分配试点县进行安慰剂检验。具体地，随机产生一个农机购置补贴政策试点县名单，从而产生一个错误的估计： α_1^{false} 。由于该政策试点是随机生成的，因此安慰剂检验的政策虚拟变量不会对因变量产生显著影响，即 $\alpha_1^{false} = 0$ 。若 α_1^{false} 的估计系数在统计上显著偏离于零，则表明模型设定存在识别偏误。

为了避免小概率事件对估计结果的干扰，本文把（1）式重复回归 1000 次，纵向合并 1000 次的回归系数及标准误后，得到图 4 所示的核密度分布图。大样本情况下，当置信水平为 95% 时， t 临界值为 1.96。这意味着，当 $t > 2$ 时，拒绝原假设的可能性超过 95%。由图 4 可知，农机购置补贴政策对农业机械化水平、地膜使用以及秸秆焚烧的影响系数的 t 值分布在 0 附近，这表明本文的实证结果并非是由不可观测的其他因素导致，本文核心结论得到进一步验证。



(a) 农业机械化水平

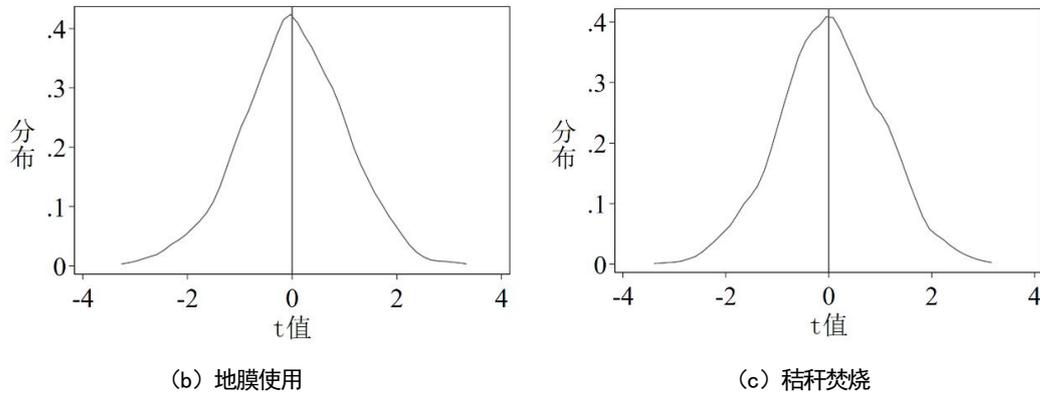


图4 安慰剂检验结果

六、主要结论与政策含义

本文利用农机购置补贴政策“先试点、再逐步推广”的准自然实验特征，通过构建多时点双重差分模型估计了农机购置补贴政策对试点县农业机械化水平和四种污染性农业生产行为的影响，并检验了农机购置补贴政策影响污染性农业生产行为的作用机制，以此来评估农业机械化的环境效应。

研究发现：第一，农机购置补贴政策显著提升了地区农业机械化水平，且该影响具有持续性。第二，农机购置补贴政策对不同污染性农业生产行为的影响存在差异，且具有一定的滞后性。具体而言，农机购置补贴政策显著减少了当年及下一年的地膜使用量，增加了下一年秸秆焚烧火点数目，但对化肥施用量和农药使用量的影响不显著。第三，农机购置补贴政策主要是通过提高粮食作物播种面积占比和促进农业劳动力转移间接影响生态环境。

本文的研究启示在于：第一，学者在研究农机购置补贴政策效果时，不能仅从经济角度测算政策的成本收益，还须关注政策对生态环境的短期和长期影响，否则会高估或者低估政策的实际收益。第二，国家在农机购置补贴政策的设计中要重视机械化水平提升在农业绿色转型中的作用，实施更为精准的农机购置补贴政策，既要注重机械化的广度，又要兼顾机械化的深度，特别在绿色生产技术的薄弱环节要加快推进全程机械化。第三，要注重政策的连锁效应。本文研究发现，农机购置补贴政策可以通过改变农业种植结构和促进农业劳动力转移间接对生态环境产生影响。这说明，在农业政策制定过程中，不能仅着眼于政策的直接作用，还需要通盘考虑宏观经济、人口、技术发展趋势等因素，深入分析政策传导链条，全面评估可能产生的政策连锁效应，从而制定更加合理有效的政策措施。第四，要注重政策影响的差异性。本文的研究发现，农业机械化水平提高并不一定产生负的环境效应，例如在增加秸秆焚烧火点数目的同时，也降低了地膜使用量，这说明政策影响的评估不能依靠单一指标，而应建立一套综合评价体系，从多个角度评估政策效应。

参考文献

- 葛继红、周曙东，2011：《农业面源污染的经济影响因素分析——基于1978~2009年的江苏省数据》，《中国农

村经济》第5期。

2. 何萍、温作民、刘梅娟, 2018: 《中国碳税政策实施效应研究综述》, 《林业经济问题》第3期。
3. 黄武、黄宏伟、朱文家, 2012: 《农户秸秆处理行为的实证分析——以江苏省为例》, 《中国农村观察》第4期。
4. 李谷成、李焯阳、周晓时, 2018: 《农业机械化、劳动力转移与农民收入增长——孰因孰果?》, 《中国农村经济》第11期。
5. 刘钦普, 2014: 《中国化肥投入区域差异及环境风险分析》, 《中国农业科学》第18期。
6. 卢洪友、杜亦譔、祁毓, 2015: 《中国财政支出结构与消费型环境污染: 理论模型与实证检验》, 《中国人口·资源与环境》第10期。
7. 吕炜、张晓颖、王伟同, 2015: 《农机具购置补贴、农业生产效率与农村劳动力转移》, 《中国农村经济》第8期。
8. 王姣、肖海峰, 2007: 《我国良种补贴、农机补贴和减免农业税政策效果分析》, 《农业经济问题》第2期。
9. 王舒娟、蔡荣, 2014: 《农户秸秆资源处置行为的经济分析》, 《中国人口·资源与环境》第8期。
10. 魏巍贤、赵玉荣, 2017: 《可再生能源电价补贴的大气环境效益分析》, 《中国人口·资源与环境》第10期。
11. 吴银毫、苗长虹, 2017: 《我国农业支持政策的环境效应研究: 理论与实证》, 《现代经济探讨》第9期。
12. 徐建国、张勋, 2016: 《农业生产率进步、劳动力转移与工农业联动发展》, 《管理世界》第7期。
13. 张佰秋, 2017: 《农用塑料地膜污染现状与防控对策》, 《吉林农业》第12期。
14. 张海涛、任景明, 2016: 《农业政策对种植业面源污染的影响分析》, 《生态与农村环境学报》第6期。
15. 郑旭媛、徐志刚, 2016: 《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》, 《经济学(季刊)》第1期。
16. 周家俊、周德, 2019: 《农业机械投入对化肥减量化的作用效果研究》, 《农村经济与科技》第13期。
17. 周振、孔祥智, 2019: 《农业机械化对我国粮食产出的效果评价与政策方向》, 《中国软科学》第4期。
18. 周振、马庆超、孔祥智, 2016a: 《农业机械化对农村劳动力转移贡献的量化研究》, 《农业技术经济》第2期。
19. 周振、张琛、彭超、孔祥智, 2016b: 《农业机械化与农民收入: 来自农机具购置补贴政策的证据》, 《中国农村经济》第2期。
20. 朱浩宇、贾安都、王子芳、龙翼、严冬春、徐国鑫、高明, 2021: 《化肥减量对紫色土坡耕地磷素流失的影响》, 《中国环境科学》第1期。
21. 朱佳雷、王体健、邓君俊、姜爱军、刘冬晴, 2012: 《长三角地区秸秆焚烧污染物排放清单及其在重霾污染天气模拟中的应用》, 《环境科学学报》第12期。
22. 朱岩、曹莹、张亚辉、曾鸿鹄、覃礼堂、闫振广、郑磊、刘征涛, 2017: 《有机磷农药对锯齿新米虾的毒性及敏感性分析》, 《中国环境科学》第2期。
23. 左喆瑜、付志虎, 2021: 《绿色农业补贴政策的环境效应和经济效应——基于世行贷款农业面源污染治理项目的断点回归设计》, 《中国农村经济》第2期。
24. Cai, X., Y. Lu, M. Wu and L. Yu, 2016, "Does Environmental Regulation Drive Away Inbound Foreign Direct Investment? Evidence from a Quasi-Natural Experiment in China", *Journal of Development Economics*, 123: 73-85.

25. Crutzen, P. J., L. E. Heidt, J. P. Krasnec, W. H. Pollock, and W. Seiler, 1979, "Biomass Burning as a Source of Atmospheric gases CO, H₂, N₂O, NO, CH₃Cl and COS", *Nature*, 282(5736): 253-256.
26. Grossman, G. M. and A. B. Krueger, 1995, "Economic Growth and the Environment", *Quarterly Journal of Economics*, 110(2): 353-377.
27. Nicholson, J. S., P. R. Deboeck and W. Howard, 2015, "Attrition in Developmental Psychology: A Review of Modern Missing Data Reporting and Practices", *International Journal of Behavioral Development*, 41(1): 143-153.
28. Nunn, N., and N. Qian, 2014, "US food Aid and Civil Conflict", *The American Economic Review*, 104(6): 1630-1666.
29. Qiu, H., C. F. A. van Wessenbeck and W. C. M. van Veen, 2020, "Greening Chinese Agriculture: Can China Use the EU Experience?" *China Agricultural Economic Review*, 13(1): 96-123.
30. Yang, J., Z. Huang, X. Zhang and T. Reardon, 2013, "The Rapid Rise of Cross-regional Agricultural Mechanization Services in China", *American Journal of Agricultural Economics*, 95(5): 1245-1251.

(作者单位: ¹ 中国人民大学农业与农村发展学院;

² 中国人民大学中国财政金融政策研究中心)

(责任编辑: 胡 祎)

The Environmental Effects of Agricultural Mechanization: Evidence from Agricultural Machinery Purchase Subsidy Policy

TIAN Xiaohui LI Wei LI Rong

Abstract: Based on China's agricultural production data at the county level and satellite remote sensing data, from the perspective of the implementation of the agricultural machinery purchase subsidy policy, this article takes the quasi-natural experimental characteristics of the policy as exogenous shocks of agricultural mechanization and uses the Difference-in-differences (DID) approach to measure the impacts of agricultural machinery purchase subsidy policy on polluting agricultural production behaviors and its mechanisms. The results show that the agricultural machinery purchase subsidy policy has significantly improved the level of agricultural mechanization, and the impacts of the policy on polluting agricultural production behaviors are different and with a certain lag. Specifically, the policy has significantly reduced the use of plastic film in the current year and the next year, and increased the number of straw-burning points in the next year after the policy started, but had no significant impacts on the use of chemical fertilizer and pesticide. The mechanism analysis shows that the policy has changed the way farmers used polluting inputs and treated agricultural production waste by expanding the proportion of grain sown area and promoting the outflow of agricultural labor force, which has a corresponding impact on the ecological environment.

Keywords: Agricultural Mechanization; Production Behavior; Crop Structure; Labor Mobility; Difference-in-differences