

农业机械化、化肥投入与粮食单产

——基于河南省市域面板数据分析

闫梦云

重庆三峡科技大学财经学院，重庆

收稿日期：2026年6月12日；录用日期：2026年6月25日；发布日期：2026年7月30日

摘要

粮食安全是国家安全的重要基石，耕地总量约束下提升粮食单产是稳固“中原粮仓”供给能力。本文选取2016~2020年河南省18个地级市平衡面板数据，先开展VIF多重共线性检验剔除高度耦合控制变量，依次构建基准OLS、地市个体固定效应模型，并采用更换被解释变量、5%双侧缩尾开展多重稳健检验。实证表明：不控制地市固有禀赋时农机显著抑制单产、化肥显著提升单产；控制区域固定效应后两大核心变量不再显著；农机、化肥对粮食总产量具备稳定正向拉动。耕地细碎化、化肥边际报酬递减、农村用电统计口径混杂共同制约河南单产提升，据此提出农机适配改造、化肥减量增效等优化路径。

关键词

农业机械化，化肥投入，粮食单产，面板数据，稳健性检验，河南省

Agricultural Mechanization, Chemical Fertilizer Input and Grain Yield per Unit Area

—Evidence from Municipal Panel Data of Henan Province

Mengyun Yan

School of Finance and Economics, Chongqing Three Gorges University, Chongqing

Received: June 12, 2026; accepted: June 25, 2026; published: July 30, 2026

Abstract

Food security is an important cornerstone of national security. Under the constraint of total cultivated

land, improving grain yield per unit area is the core path to stabilize the supply capacity of the "Central Plains Granary". Based on the balanced panel data of 18 prefecture-level cities in Henan Province from 2016 to 2020, this paper first carries out VIF multicollinearity test to eliminate highly coupled control variables, constructs benchmark OLS and municipal individual fixed effect models in turn, and carries out multiple robustness tests by replacing the explained variable and 5% two-sided winsorization. The empirical results show that agricultural machinery significantly restricts yield per unit and chemical fertilizer significantly improves yield per unit without controlling municipal inherent endowments; after controlling regional fixed effects, the two core variables are no longer significant; agricultural machinery and chemical fertilizer have a stable positive pull on total grain output. Fragmented cultivated land, diminishing marginal returns of chemical fertilizer and mixed statistical caliber of rural electricity jointly restrict the improvement of grain yield per unit area in Henan, and optimization paths such as adaptive transformation of agricultural machinery and reduction and efficiency improvement of chemical fertilizer are put forward accordingly.

Keywords

Agricultural Mechanization, Fertilizer Input, Grain Yield per Unit Area, Panel Data, Robustness Test, Henan Province

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

河南常年粮食总产量稳居全国第二位，是保障国家粮食安全核心产区，耕地规模难以扩张背景下，提升单位土地产出成为稳产关键抓手。传统认知中农机、化肥能够持续推高粮食单产，但多地实证数据显示要素增产效果存在明显分化。已有调研证实耕地细碎化会直接阻碍机械化作业落地，农户种植地块零散会压缩有效耕作时长，从源头削弱农机增产潜力[1]。同时国内粮食种植普遍存在过量施肥问题，化肥投入增速长期大幅超过粮食产出增速，投入效益持续走低[2]。

仅依靠省级宏观数据无法捕捉河南省内各地市耕地、地形、农业发展差异，现有同类实证研究普遍存在两处短板：一是变量相关性过高却未做共线性处理，回归估计存在偏差；二是仅单一基准回归，缺少多重稳健性验证。基于此，本文依托 2016~2020 年河南 18 地市平衡面板，规范处理多重共线性，构建固定效应模型缓解遗漏变量问题，同时设置两套稳健方案，区分单产效率、总产量规模两类指标对比分析，厘清农机、化肥差异化产出作用。

本文边际贡献：第一，通过 VIF 检验剔除高度相关控制变量，规避多重共线性带来估计失真；第二，引入地市固定效应，控制地形、土壤等不随时间变动的固有区域禀赋；第三，更换被解释变量、极端值缩尾双重稳健检验，多角度验证结论可信度；第四，分开讨论要素对单产、总产量的不同影响，区分效率与规模两类作用逻辑。

2. 文献综述与研究假设

从粮食总产量维度，机械化的增产价值已形成统一结论。依托全国县级面板与农机购置补贴准自然实验测算发现，农业机械化能够显著拉升粮食产出，粮食产出关于机械化水平弹性可达 1.28 [3]。省际面

板中介效应研究进一步补充, 农机总动力扩张会带动粮食播种面积提升, 而播种面积在农机与总产量之间起到完全中介传导作用[4]。全国省级长面板数据同样佐证, 机械化智能化可以通过替代劳动力、提升资源利用、减少产后损耗三条路径夯实粮食安全基础[5]。

但聚焦单位面积粮食单产, 研究结论出现明显分化。基于山东种植主体微观调研, 运用结构方程模型验证, 土地细碎化对粮食单产存在显著负向直接作用, 还会通过压制机械化发展形成间接抑制效应[6]。针对丘陵山区农户的细分测算进一步说明, 细碎耕地对种植业产出的负面冲击更强[1]。落地河南省域视角, 分区域测算粮食生产效率可见, 豫北、豫中增产依托耕地资源, 豫南更需要加大农机投入力度, 但省内山区地块会大幅削弱农机作业效率[7]。灰色关联分析同样证实, 单纯增加农机总动力作用有限, 小型农机、实际机耕面积对河南粮食产出影响更强[8]。同时面板测算数据显示河南省农业劳动力总量偏多, 人力冗余环境下农机的劳动替代价值无法转化为单产提升动力[9]。据此提出假设 H1: 农业机械总动力对粮食单产存在显著负向影响, 对粮食总产量存在显著正向影响。

短期施用化肥可以快速补充土壤养分, 但长期高强度施肥会出现边际收益持续下滑。依托八省农户调研与成本收益面板测算, 国内小麦、玉米、水稻三大主粮均存在过量施肥情况, 平均过量投入幅度超过三成[10]。借助 C-D 生产函数测算四大粮食作物投入产出关系, 同样证实化肥投入普遍突破经济最优阈值[11]。超越对数生产函数的分解结果显示, 粮食生产体系内化肥、农药边际贡献逐年走低, 农机、柴油等资本要素收益稳步提升[12]。

聚焦河南本地施肥特征, 分小麦、玉米品类脱钩模型测算显示, 省内小麦产量与氮、磷肥存在负相关关系, 玉米氮肥投入与产出同样无正向关联, 仅钾肥能够稳定带动作物增产[13]。分地市空间测算进一步发现, 河南东部地市化肥施用环境风险偏高, 中西部风险更低, 各地地力差异直接改变化肥增产效果。由此提出假设 H2: 化肥投入对粮食单产的正向效应受地市固有土壤禀赋约束, 控制个体固定效应后不再显著, 对粮食总产量存在稳定正向拉动。

有效灌溉面积、粮食播种面积和核心解释变量相关性极高, 纳入模型会引发严重多重共线性, 本文予以剔除。多地灰色关联分析显示灌溉、播种规模是粮食产出主控因素, 但地市间影响排序差异巨大, 省域面板容易掩盖区域内部异质性。一产从业人数存在双向作用逻辑, 跨地市横向对比劳动力过剩压低单产, 单一地市时序内适度人力投入利于精细化田间管理; 农村用电量仅统计全域农村耗电, 无法拆分农业生产、居民生活两类用电, 难以精准识别农业基建真实增产价值。

3. 模型设定、变量定义与数据预处理

3.1. 模型设定

基准混合 OLS 模型 $y_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 x_{1it} + \alpha_2 x_{2it} + \alpha_3 cv_{2it} + \alpha_4 cv_{4it} + \varepsilon_{it}$ 式中, i 为各地市, t 为年份; y_{it} 代表粮食单产; x_1 农机总动力、 x_2 化肥折纯施用量为核心解释变量; cv_2 - 产就业人数、 cv_4 农村用电量为控制变量; ε_{it} 为随机扰动项。

地市个体固定效应模型

$$y_{it} = \beta_0 + \beta_1 x_{1it} + \beta_2 x_{2it} + \beta_3 cv_{2it} + \beta_4 cv_{4it} + \mu_i + \varepsilon_{it}$$

μ_i 为地市个体固定效应, 控制地形、土壤肥力、区位等不随时间变化的区域禀赋, 缓解遗漏变量偏误。

3.2. 变量定义

本文全部变量名称、测算口径、计量单位统一整理为变量定义表, 见表 1。

Table 1. Variable definition table
表 1. 变量定义表

变量类型	变量名称	符号	测算口径与单位
被解释变量	粮食单产	y	粮食总产量/粮食播种面积, 吨/公顷
被解释变量	粮食总产量	y_{total}	地市年度粮食总产量, 万公斤
核心解释变量	农业机械总动力	x_1	区域农机装备总规模, 万千瓦
核心解释变量	农用化肥折纯施用量	x_2	化肥折纯实物总量, 吨
控制变量	第一产业从业人数	cv_2	农林牧渔业劳动力, 万人
控制变量	农村用电量	cv_4	农村年度总用电量, 亿千瓦时

3.3. 数据来源与预处理

本文样本为 2016~2020 年河南省 18 个地级市平衡面板, 全部原始指标取自历年《河南统计年鉴》¹。原始样本存在 8 行全变量缺失观测值, 直接剔除后保留 90 组有效样本。变量相关矩阵测算可见, 化肥施用量与有效灌溉面积相关系数高达 0.9366, 农机、化肥、灌溉、播种面积四组变量两两相关系数均突破 0.8, 完整变量回归中化肥 VIF 高达 14.29, 超过临界值 10。为消除多重共线性, 剔除高度耦合的有效灌溉面积、粮食播种面积, 仅保留两组控制变量。处理后全部变量 VIF 最大值 7.67, 均值 4.70, 共线性问题完全消除。为保证回归结果不受极端值干扰, 对所有变量进行 1%水平上的双侧缩尾处理, 最终得到的变量描述性统计结果如下表所示, 后续回归均基于处理后的面板数据展开。

Table 2. Descriptive statistics for variables
表 2. 变量描述性统计

变量	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
y	90	0.4876	0.1072	0.2721	0.7330
y_{total}	90	365.9542	254.6554	22.3600	934.3000
x_1	90	565.7669	379.2850	72.0000	1462.0000
x_2	90	380993.60	264038.40	24042.00	913410.00
cv_2	90	124.1034	82.6924	4.9200	333.7400
cv_4	90	18.9706	15.2992	1.8300	67.800

各地市粮食单产区间跨度较大, 区域农业发展不均衡; 见表 2, 农机、化肥数值量级极高, 回归系数偏小属于量纲差异导致的正常现象; 农村用电量离散程度较低, 样本分布稳定。

4. 实证回归结果与分析

4.1. 分模型独立回归结果展示

4.1.1. 基准 OLS 回归模型(被解释变量: 粮食单产 y)

基准 OLS 结果与理论预判完全匹配。农机总动力 1%水平显著为负, 印证细碎耕地会阻碍机械化发挥增产价值的已有结论[6]。化肥投入 1%显著正向, 但系数数值极小, 直观体现化肥边际报酬持续递减特征, 和全国农户调研测算结果保持一致[10]。一产就业人数 5%显著为负, 反映河南省域层面农业劳动力

¹数据来源: 河南省统计局, 《河南统计年鉴》(2016~2020)。 <https://tjj.henan.gov.cn/tjfw/tjcbw/tjnj/>

总量过剩，人力冗余会压低单位土地产出效率[9]。见表 3，农村用电量无统计显著性，根源是统计口径混合农业生产与居民生活用电，无法精准衡量农业基建真实投入水平。

Table 3. Benchmark OLS regression
表 3. 基准 OLS 回归

变量	系数	稳健标准误	t 值	P> t
x_1 农机总动力	-0.0001779	0.0000558	-3.19	0.002
x_2 化肥施用量	0.00000037	8.15E-08	4.54	0
scv_2 - 产就业人数	-0.0004526	0.0002156	-2.1	0.039
scv_4 农村用电量	-0.0001164	0.0006668	-0.17	0.862
常数项	0.5056826	0.0259529	19.48	0
地市固定效应	未控制	—	—	—
观测值 N	90	—	—	—
R^2	0.1203	—	—	—
F 统计量	5.5	—	—	0.0005

4.1.2. 地市个体固定效应模型(被解释变量：粮食单产 y)

控制地市土壤、地形固有禀赋后，两大核心变量全部失去统计显著性，验证假设 H2。分地市化肥产出关联测算显示，河南各地地力差异巨大，简单跨地市混合回归会掩盖区域施肥效果分化[13]。一产就业人数系数由负转正，说明横向跨市对比会形成虚假负相关，仅观察单一地市时序数据，适度人力投入能够保障精细化田间操作，提升单产水平。见表 4。

Table 4. Regression results of individual fixed effects
表 4. 个体固定效应回归结果

变量	系数	稳健标准误	t 值	P > t
x_1 农机总动力	-0.0001236	0.0002084	-0.59	0.561
x_2 化肥施用量	0.000000166	0.000000195	0.85	0.406
scv_2 - 产就业人数	0.0002313	0.0000752	3.07	0.007
scv_4 农村用电量	0.0003544	0.0007662	0.46	0.65
常数项	0.4587522	0.1682741	2.73	0.014
地市固定效应	控制	—	—	—
观测值 N	90	—	—	—
组内 R^2	0.0438	—	—	—
F 统计量	24.3	—	—	0

4.1.3. 稳健检验一：替换被解释变量(被解释变量：粮食总产量 y_{total})

更换总产量作为被解释变量，农机、化肥全部显著正向，见表 5，完全印证假设 H1 后半段，与中介效应研究结论保持统一，农机扩张主要通过拓宽播种面积拉升总产出[4]。农机能够拓展可耕作土地范围，但无法改善单位地块产出效率，这也是细碎化环境下农机总量扩张抑制单产、拉动总产的核心逻辑。农

村用电量显著为负，再次佐证该指标包含大量非农用电，农村居民用电占比越高的地市，农业资源投入力度越弱。

Table 5. Regression results of robustness test by replacing the explained variable
表 5. 替换被解释变量稳健检验回归结果

变量	系数	稳健标准误	t 值	P> t
x_1 农机总动力	0.1249427	0.048428	2.58	0.012
x_2 化肥施用量	0.0000876	0.000086	10.19	0
σ_2 - 产就业人数	-0.2791045	0.2239204	-1.25	0.216
σ_4 农村用电量	-1.465072	0.2887074	-5.07	0
常数项	23.93514	11.63457	2.06	0.043
地市固定效应	未控制	—	—	—
观测值 σ_N	90	—	—	—
R^2	0.9373	—	—	—
F 统计量	277.08	—	—	0

4.1.4. 稳健检验二：5%双侧缩尾处理(被解释变量：缩尾后粮食单产 y_{win})

剔除极端单产样本后，核心变量系数符号、显著性与基准 OLS 完全保持一致，见表 6，仅数值小幅微调，说明本文基准实证结论不受区域极端高产、低产样本干扰，统计稳定性较强。农村用电量依旧无显著影响，和基准回归结论完全统一。

Table 6. Regression results with 5% two-tailed winsorization robust standard errors
表 6. 5%双侧缩尾稳健检验回归结果

变量	系数	稳健标准误	t 值	P > t
x_1 农机总动力	-0.0001812	0.0000545	-3.33	0.001
x_2 化肥施用量	0.000000368	8.11E-08	4.54	0
σ_2 - 产就业人数	-0.0004472	0.0002101	-2.13	0.036
σ_4 农村用电量	-0.0001789	0.0006539	-0.27	0.785
常数项	0.5096431	0.0230872	22.07	0
地市固定效应	未控制	—	—	—
观测值 σ_N	90	—	—	—
R^2	0.1389	—	—	—
F 统计量	5.55	—	—	0.0005

4.2. 多重稳健性综合总结

综合四组独立模型结果可形成完整统一逻辑：从单产效率维度，农机负向、化肥正向仅存在于不控制地市禀赋的简单回归，剥离各地先天耕地、地形差异后两大要素均无显著作用；从总产量规模维度，农机、化肥具备稳定正向增产效果。极端值缩尾、更换被解释变量、固定效应三套检验相互支撑，本文实证结论具备充分可靠性。

4.3. 异质性说明

本文仅覆盖 2016~2020 五年 18 个地市短面板，若分平原/丘陵、分种植规模分组回归，各组样本数量过少，系数极易失真，因此不再开展异质性检验，依靠多重稳健检验完成结论验证。

5. 机制讨论

5.1. 核心实证机制解读

第一，农机对单产、总产量作用分化根源在于耕地细碎化约束。已有结构方程模型测算证实土地细碎化对粮食单产存在显著负向直接效应，并通过阻碍机械化推广形成间接抑制路径[6]。河南丘陵山地分布广泛，细碎地块难以适配大型农机，单纯增加机械存量无法提升单位产出，但可以拓展整体耕作面积，拉升粮食总产量。第二，化肥边际报酬持续递减是核心约束。全国范围测算证实三大主粮普遍存在过量施肥，平均过量投入幅度超过三成[10]，河南小麦氮磷肥与产出呈负相关关系，粗放增施化肥的单产提升空间持续收窄[13]，剥离地市地力差异后化肥不再具备显著增产作用。第三，农业劳动力作用存在时空维度分化。省域横向对比劳动力总量过剩压低单产，单一地市时序内适度人力投入可以完成精细化田间管理；适度流转耕地、扩大经营规模能够缓解人力冗余带来的效率损失[1]。第四，农村用电总量指标存在天然缺陷，混合生产、生活用电，无法单独核算农业基建电力投入，难以精准评估惠农政策产出效益。

5.2. 政策启示与结论

农机发展由总量扩张转向适配提质。同步推进高标准农田、土地综合整治化解地块细碎问题，丘陵山区推广中小型轻便农机，同步发展农机社会化服务，提升机械化实际作业效率[5]。全面推行化肥减量增效精准农业。普及测土配方施肥、有机肥替代技术，控制氮磷肥投入、合理补充钾肥，缓解过量施肥带来的边际收益下滑问题[7]。优化农业劳动力配置，引导农村剩余劳动力有序非农转移，培育新型职业农民，依托耕地流转发展适度规模经营，化解劳动力冗余对单产的抑制作用[1]。完善农业专项统计口径，单独核算灌溉、农机生产专用用电量，拆分农业与农村居民用电数据，精准评估农业基础设施增产效果。

本文依托 2016~2020 年河南省 18 地市平衡面板数据，完成多重共线性剔除、基准 OLS、地市个体固定效应回归，同时设置更换被解释变量、5%双侧缩尾两套稳健检验，得出四点核心结论：第一，不控制地市固有土壤、地形禀赋时，农机总动力显著抑制粮食单产，化肥投入显著正向拉动单产；纳入地市固定效应后二者全部失去统计显著性，地市先天农业资源禀赋是关键遗漏变量，简单混合回归存在估计偏误。第二，从总产量规模维度，农机、化肥均显著正向，说明传统要素增产价值集中于种植规模扩张，难以改善单位土地产出效率，和已有中介效应研究结论保持一致[4]。第三，一产从业人数作用存在明显维度分化，跨地市横向对比劳动力过剩压低单产，单一地市时序内适度人力利于精细化耕作；农村用电总量因统计口径混杂，无法有效识别农业电力投入增产效益。第四，5%双侧缩尾剔除极端样本后基准 OLS 核心结论不变，多重稳健检验共同证明本文实证结论可靠。本文存在一定局限：样本时间跨度较短，未纳入气候、土壤有机质、农业补贴等变量；后续可拓展更长时序面板，细分不同区域开展异质性分析，进一步完善要素作用机制。

参考文献

- [1] 王兆林, 吕秋杭. 耕地细碎化对农户种植业收入的影响——“非粮化”和耕地流转率的调节效应[J]. 西部论坛, 2024, 34(3): 111-124.
- [2] 赵志坚, 胡小娟, 彭翠婷, 等. 湖南省化肥投入与粮食产出变化对环境成本的影响分析[J]. 生态环境学报, 2012, 21(12): 2007-2012.

- [3] 余澳, 李进, 贾卓强. 农业机械化智能化保障粮食安全的机理与路径研究[J]. 农村经济, 2024(11): 33-44.
- [4] 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.
- [5] 李春婷, 曾靖. 农业机械化水平对粮食产量的影响研究——基于粮食播种面积的中介效应[J]. 湖北农业科学, 2023, 62(6): 233-239.
- [6] 郝梦雨, 谢彦明, 郝峻锋, 等. 土地细碎化抑制粮食单产的机理及破解路径研究[J]. 西南林业大学学报(社会科学), 2026, 10(1): 63-68, 128.
- [7] 李轩, 柴琰, 赵昊骧. 河南省粮食生产效率测算及影响因素研究[J]. 粮食问题研究, 2023(5): 20-23.
- [8] 万三敏. 河南粮食总产及农业经济发展关键因素分析——基于面板数据分析[J]. 中国农业资源与区划, 2014, 35(3): 78-84.
- [9] 史常亮, 朱俊峰. 我国粮食生产中化肥投入的经济评价和分析[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(9): 57-63.
- [10] 刘英基. 有偏技术进步、替代弹性与粮食生产要素组合变动[J]. 软科学, 2017, 31(4): 27-30.
- [11] 王玉姝. 化肥施用对粮食产量和环境的影响[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南农业大学, 2021.
- [12] 杨铭, 刘青利. 基于改进广义灰色关联度的河南省粮食生产影响因素分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2015, 40(9): 174-180.
- [13] 赵奇, 范春丽, 杨玉珍. 2004-2012 年河南五地市粮食产量影响因子的灰色关联分析[J]. 河南科学, 2014, 32(12): 2486-2490.