

doi:10.19920/j.cnki.jmsc.2025.12.006

规模经营、要素投入结构与粮食生产碳排放效率^①

——基于中国农户调查数据

王瑞雪^{2,6}, 韩 赟¹, 陈建成⁶, 邓祥征^{3,1,4,5}

- (1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层格局与模拟院重点实验室, 北京 100101;
2. 辽宁大学亚澳商学院, 沈阳 110136; 3. 北京工商大学, 北京 100048; 4. 中国科学院
大学经济管理学院, 北京 100190; 5. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 101408;
6. 北京林业大学经济管理学院, 北京 100083)

摘要: 粮食生产部门是中国农业碳排放的重要来源,在当前“双碳”目标与粮食安全双重压力下,厘清规模经营对要素投入结构与粮食生产碳排放效率的影响,已成为破解中国农业绿色低碳转型难题的关键路径. 本文通过厘清规模与效率差异的理论逻辑,基于 2023 年在中国山东省、江西省、四川省、辽宁省四省开展的 1 150 份入户调查数据,通过构建广义倾向得分匹配法(GPSM)反事实假设,估计经营规模对粮食生产碳排放效率的平均处理效应,并通过回归调整方法和中介效应模型深入分析了影响机制,明确了要素投入结构在其中的中介作用. 研究结果表明,经营规模与碳排放效率呈“U 型”非线性关系. 优化要素投入结构是保障经营规模对粮食生产碳排放效率产生积极效应的关键. 进一步适度扩大农户经营规模将有助于促进我国粮食绿色可持续发展. 本文为政府在新发展阶段合理引导规模经营与优化资源配置提供了科学依据,并提出了通过调整要素投入结构来推动粮食绿色生产的政策建议.

关键词: 经营规模; 粮食生产; 碳排放效率; 要素投入结构

中图分类号: F062 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2025)12-0073-15

0 引 言

面对全球粮食安全日益严峻的挑战和环境可持续发展压力加剧的双重约束,推动减污降碳与粮食安全的协同增效,已成为确保农业可持续发展的关键路径. 中国政府对此高度重视,并将农业绿色发展作为国家战略部署的核心内容之一. 2022 年国家发展改革委等多部门在“十四五”规划中明确提出,要大力推进农业规模化与绿色转型的协同发展,推动农业经营从传统的高碳、高投入生产方式向绿色、低碳的可持续发展模式转变. 这一战略不仅彰显了中国政府对低碳农业发展的坚定决心,也体现了粮食生产与生态环境保护协

调发展的重要性.

在此基础上,2023 年中共中央、国务院、农业农村部、国家发展和改革委员会、财政部等部门陆续发布了《中共中央国务院关于做好 2023 年全面推进乡村振兴重点工作的意见》、《全国现代设施农业建设规划(2023—2030 年)》等一系列重要政策文件,明确强调要加速推进农业经营的集约化与规模化发展,积极推进生态低碳农业的建设. 进一步确立了规模化经营在农业绿色转型中的核心地位^[1]. 因此,推动农业经营规模与绿色效率的协调发展,对于实现国家“降碳减排”与粮食安全双重目标具有重要战略意义.

① 收稿日期: 2024-11-01; 修订日期: 2025-05-13.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72304263; 72221002; 72303087).

作者简介: 王瑞雪(1995—),女,河南周口人,博士,讲师. Email: wangrx_simlab@163.com

中国农业发展正面临着保障粮食安全与推进绿色低碳转型的双重挑战. 随着保障国家粮食安全与应对气候变化之间的矛盾愈发突出, 如何在实现粮食增产的同时减少化肥、农药的过度使用, 推进农业向绿色低碳转型^[2], 成为亟需解决的关键问题. 与此同时, 乡村振兴战略的实施和农村土地制度改革的深化, 为农业规模化和集约化经营提供了有力的政策支持, 加速了农业现代化的进程^[3]. 近年来, 随着农村土地流转和新型农业经营主体的发展, 农业经营格局呈现出由传统小农向规模经营演进的趋势. 农业农村部数据显示, 截至 2023 年 10 月末, 全国纳入名录管理的家庭农场已超过 400 万家, 农民专业合作社超过 220 万家, 规模经营主体体系初具规模. 然而, “大国小农”的基本格局尚未根本改变, 2022 年小农户经营的耕地面积占比仍超过 70%. 与此同时, 尽管我国种植业化肥利用率已提升至 40% 以上, 但单位面积施用强度仍显著高于全球平均水平, 农药残留、土壤污染及农业碳排放的问题依然严峻.

在此背景下, 明确经营规模与粮食绿色生产效率之间的关系显得尤为重要^[4]. 深入探究经营规模对碳排放效率的影响, 有助于为优化农业生产管理和制定绿色发展政策提供科学依据, 并为实现国家粮食安全与农业可持续发展的战略目标提供理论和实证支持.

基于 2023 年在中国山东省、江西省、四川省、辽宁省四省 1 150 份入户调查数据, 本文运用广义倾向得分匹配方法 (generalized propensity score matching, GPSM), 结合中介效应模型, 系统地评估了经营规模的决定因素及其对粮食生产碳排放效率的异质性影响. 首先, 本文在运用 GPSM 方法

估计广义倾向得分的阶段, 考察了农户禀赋特征对于规模选择的影响, 并在此基础上精确匹配不同规模农户. 其次, 本文进一步探讨了要素投入结构在经营规模与碳排放效率之间所扮演的中介角色, 尤其关注生产资本的差异化配置在经营规模对碳排放效率的影响中所发挥的中介作用. 最后, 基于对农户资源投入与碳排放效率之间关系的明确分析, 本文揭示了未来农户实现适度规模经营的可行路径, 为实现粮食生产的低碳化和农业的绿色转型提供了政策参考和实践路径.

本文的贡献主要体现在以下三个方面: 第一, 立足低碳绿色发展的时代背景, 构建了一个全新的分析框架, 系统阐释了经营规模与生产率在绿色农业发展中的相互作用机制, 为粮食绿色转型提供了坚实的理论基础; 第二, 创新性地引入 GPSM 模型, 有效克服了传统 PSM 模型在处理连续变量方面的局限性, 并结合中介效应模型, 验证了经营规模对粮食生产碳排放效率的因果关系及其作用路径, 丰富了该领域的实证研究方法; 第三, 基于微观农户数据, 深入探讨了要素投入结构对碳排放效率的中介效应. 通过详实的实证分析, 本文提出了提升农业绿色生产效率的政策建议, 强调优化要素配置的重要性, 为政策制定提供了具有实践价值的参考依据.

1 文献回顾、理论分析与研究假设

本节旨在构建理论框架, 以阐释经营规模对粮食生产碳排放效率的作用路径, 并揭示了要素投入结构在其中所扮演的中介角色, 形成了本文的核心理论框架, 具体如图 1 所示.

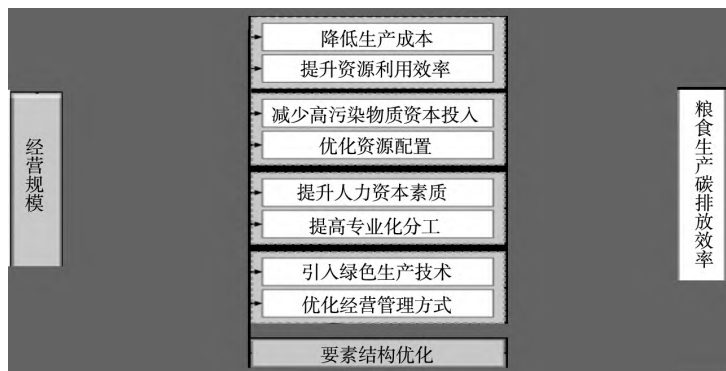


图 1 理论框架构建

Fig. 1 Construction of the theoretical framework

1.1 经营规模对粮食生产碳排放效率的影响

已有大量研究深入探索农户经营规模与生产率之间的复杂关系^[5],但二者之间的实证结果长期以来存在分歧^[6].在中国、印度等以“小农经济”为主的发展中国家,许多研究表明经营规模与生产率呈现反向或“倒 U 型”关系,即小规模农户通过精细化土地管理和高强度劳动投入,往往实现较高的生产率^[7,8].相较之下,在美国等以规模化耕作为主的发达国家,扩大经营规模显著提升了农业生产效率^[9].部分发展中国家也有类似特征^[10].在低碳绿色理念的约束下,如何科学厘清经营规模与绿色生产效率的关系,已成为农业管理部门和政策制定者亟需解决的重要课题。

国内外实证结论的不一致激发了学者们对经营规模与粮食生产碳排放效率关系的深入思考^[11].传统经济学观点认为,规模扩张能够有效提高生产要素的配置效率,从而提升生产率^[12].然而,针对以小农经济为主的中国农业现状,该理论并不完全适用.小规模农户由于技术、资本和管理能力的不足,提升碳排放效率面临诸多困难^[13].因此,经营规模与碳排放效率之间的关系呈现出高度非线性和动态性,使中国农业在绿色转型过程中面临“效率与规模”的悖论,迫切需要探索新的理论视角与实证验证,以寻求符合中国国情的解决方案。

在当前生态环境约束愈发突出的背景下,传统生产模式已无法满足农业可持续发展的需求.合理扩张经营规模不仅是资源优化配置的必然趋

势,也是提升绿色生产效率的迫切需要.图 2 展示了经营规模与粮食生产碳排放效率的阶段性关系变化.在农业转型初期,由于管理成本上升、技术投入不足等因素,导致生产效率下降^[14].随着经营规模的进一步扩大,规模经济效应逐渐显现,对粮食生产碳排放效率产生显著的正向影响^[13].

值得注意的是,中国情境下的经营规模与粮食生产碳排放效率更倾向于“U 型”特征.这一特征根植于中国独特的土地制度安排与小农经济特性.一方面,长期以来以家庭联产承包责任制为基础的农村土地制度,导致了土地权属高度分散、流转市场不完善.小规模经营主体受限于资源禀赋和风险承受能力,普遍缺乏引入现代绿色生产技术的动力与能力,形成“技术锁定”现象,进而在规模扩张初期阶段对粮食生产碳排放效率产生了抑制效应.另一方面,在中国,土地规模的扩张主要通过市场化自然流转实现,而非强制整合.具备较强管理能力和经营素质的农户更倾向于扩大经营规模^[15],并能够积极引入现代化绿色生产技术,从而降低对环境的负面影响^[16],促进粮食生产碳排放效率的提升.由此可见,中国背景下经营规模与粮食生产碳排放效率呈现出“初期下降—后期提升”的“U 型”非线性演变轨迹.基于上述分析,本文判断中国的经营规模与粮食生产碳排放效率之间的关系仍处于农业转型期,呈现“U 型”关系特征,因此提出第一个假设。

假设 1 经营规模与粮食生产碳排放效率之间存在“U 型”的非线性关系。

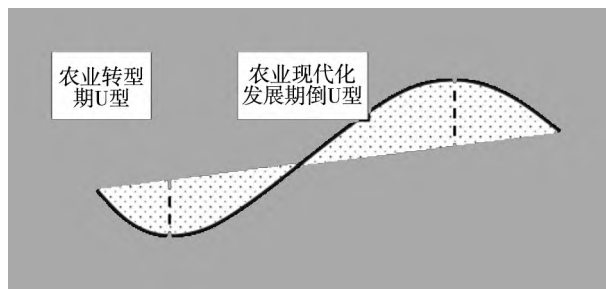


图 2 经营规模与粮食生产碳排放效率的关系

Fig. 2 Relationship between farm scale and carbon emissions efficiency
in grain production

1.2 要素投入结构对粮食生产碳排放效率的影响

理论上,在理想的完全竞争市场中,不同规模的农场之间不应存在效率差异.然而,由于要素市

场的分割、土地流转机制不完善以及劳动力供给结构的变化,导致不同规模的农户在资源获取与配置方面存在显著差异.大规模农场通过有效配置土地、资本和技术资源,实现了规模经济与碳排

放效率的提升^[17,18]. 在资源错配背景下,要素投入结构的优化成为连接规模经营与绿色生产效率的重要途径^[19].

要素投入结构优化理论强调,生产效率不仅取决于投入数量,更在于要素配置的合理性和优化程度^[20]. 传统农业往往依赖于高强度的物质资本投入,如化肥和农药,尽管在短期内可提高产出,但从长期来看,这种模式对环境造成的破坏及资源的过度消耗限制了粮食生产碳排放效率的提升^[21]. 因此,探索要素投入结构优化对粮食生产碳排放效率的影响,已成为现代农业可持续发展的重要议题. 此外,随着要素投入结构的优化,土地、劳动力与资本等要素配置将更加合理,资源利用效率也随之提升,为粮食生产碳排放效率提供内在动力.

关于优化要素投入结构对粮食生产碳排放效率的影响路径尚存争议. 相关研究表明,在减少物质资本投入的同时,若未能同步提高劳动力与技术投入的效率,碳排放效率的提升可能受到限制^[22]. 因此,合理的要素配置应当是在降低对物质资本依赖的基础上,增强对土地资本与管理效率的投入,以实现各生产要素之间的动态平衡,进而推动粮食生产碳排放效率的持续提高. 基于此,本文将要素投入结构定义为化肥、农药等化学品的投入比例,提出第二个假设.

假设 2 要素投入结构优化显著影响粮食生产碳排放效率,其优化路径为降低化肥、农药等物质资本的投入.

1.3 要素投入结构优化的中介效应

规模经济效应在要素投入结构的优化中发挥着关键作用. 根据资本积累理论,扩大经营规模通常伴随资本与技术的增加,这为农户优化要素投入结构提供了更广阔的空间^[23]. 大规模农场通过分摊固定成本,显著降低单位生产成本,从而减少对传统物质资本的过度依赖. 这一资源配置的优化不仅提升了生产效率,还有效避免了资源浪费,增强了整体经济效益.

大规模农场在引入绿色生产技术方面具有更大的灵活性. 根据市场准入理论,经营主体能否进入更高效要素市场、技术市场与产品市场,是其获取能力和效率提升的关键^[24]. 人力资本理论认为,教育水平和技能训练决定了个体在技术采纳

过程中的学习能力和适应能力. 大规模农户通常具备更高的人力资本水平^[25]. 规模农户引入绿色技术的过程不仅减少了对高污染、高消耗物质资本的依赖,还激励了农户对绿色技术和人力资本的投资,进而提高资源利用效率和生产的可持续性.

优化要素投入结构的效果体现在两个方面. 一方面,通过减少对传统物质资本的依赖,生产过程变得更加环保. 另一方面,这一优化直接推动了碳排放效率的提升,形成良性循环. 因此,经营规模的扩大不仅体现了资本与技术的积累,更是提升粮食生产碳排放效率的重要驱动力. 基于上述分析,本文提出第三个假设.

假设 3 经营规模的扩大通过促进要素投入结构优化,进而提升粮食生产碳排放效率.

2 实证研究设计

为了全面阐述经营规模对粮食生产碳排放效率的影响,本文的分析采用了 GPSM 模型和中介效应模型. 首先, GPSM 模型能够在不同经营规模的个体之间实现禀赋上的一致性,减少由于农户规模差异导致的选择性偏差. 其次,利用中介效应模型,进一步探讨经营规模通过何种机制影响绿色效率,特别是关注经营规模对要素结构配置等方面的间接影响.

2.1 模型构建

GPSM 模型 传统的倾向得分匹配模型 (PSM) 通常用于评估二元变量的影响,但在本文中农户经营规模并非简单的二元变量,而是一个连续变量. 与传统 PSM 相比, GPSM 能够对连续型变量的处理效应进行评估^[26].

1) 模型设定. Hirano 和 Imbens (2004 年) 将倾向函数定义为在观察到的协变量条件下实际处理的条件密度. 假设从一个调查数据总体中随机抽取了一组随机样本,存在 $i = 1, \dots, N$ 个体,可观察到一个 $p \times 1$ 的处理前协变量向量 \mathbf{X}_i , 这些协变量共同影响经营规模的选择,接收的处理变量即经营规模为 T_i , 处理变量 $t \in D$ 对应每个个体的潜在产出水平为 $Y_i(t)$. 基于此,处理强度变化所带来的因果效应可以通过平均剂量反应函数来表示

$$\mu(t) = E[Y_i(t)] \quad (1)$$

式中 $Y_i(t)$ 表示处理强度 t 下的潜在产出。

设 $r(t, x) = f_T | X(t | x)$, 则 GPSM 可以表示为 $R = r(T, X)$. 即, 在具有相同 $r(t, x)$ 值的区间内, $T = t$ 的概率与 X 的值无关

$$X \perp I(T = t) | r(t, x) \quad (2)$$

其中 $I(\cdot)$ 是指示函数, 满足设定条件时等于 1, 其他情况下等于 0. 结合适当的无混淆性假设, 这一平衡属性意味着给定 GPSM 的处理分配是无混淆的。

2) 无混淆性假设. 为了评估规模大小对碳排放效率的影响, 假设给定处理前变量 X , 处理的分配是弱无混淆的, 潜在产出水平定义为

$$Y(t) \perp T | X, \forall t \in T \quad (3)$$

这一假设意味着在控制协变量 X 后, 处理强度 T 的选择性偏误可以得到有效消除, 进而解决内生性问题. 对于每一个 t , 有

$$f_T(t | r(t, X), Y(t)) = f_T(t | r(t, X)) \quad (4)$$

该假设被证明可以使用 GPSM 消除由协变量差异引起的偏差, 使得经营规模对碳排放效率的影响能够被精准捕捉。

3) 剂量反应函数. 为了评估经营规模对碳排放效率的边际效应, 捕捉不同经营规模下的平均碳排放效率, 即

$$\begin{aligned} \beta(t, r) &= E\{Y(t) | r(t, X) = r\} \\ &= E(Y | T = t, R = r) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\mu(t) = E[\beta\{t, r(t, X)\}] \quad (6)$$

式(6)表示不同经营规模水平下, 粮食生产碳排放效率的平均变化趋势, 以揭示适度经营规模的最优区间。

此外, GPSM 的匹配效果依赖于是否满足平衡条件 (Balancing Property), 即在控制广义倾向得分 R 时, 处理强度与潜在产出独立, 克服选择性偏误问题。

4) GPSM 的模型应用与估计过程. 第一步是估计得分 $r(t, X)$. 第二步是估计结果的条件期望. 第三步是估计剂量-反应函数。

第一, 估算协变量的处理分配的条件概率分布. 经过检验证实变量服从正态分布, 其条件取决于协变量

$$g(T_i) | X_i \sim N\{h(\gamma, X_i), \sigma^2\} \quad (7)$$

式中 $g(T_i)$ 是处理变量的适当变换, 可能是恒等函数. $h(\gamma, X_i)$ 是协变量的线性函数, 且包含与碳排放效率直接相关的变量, 它取决于参数向量 γ . 在此过程中, 主要通过 Kolmogorov-Smirnov 法进行拟合优度检验, 如果正态分布模型统计上不成立, 则需要使用不同的处理变量变换 $g(T_i)$. 基于此估计出 γ 和 σ^2

$$\hat{R}_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi\hat{\sigma}^2}} \exp\left[-\frac{1}{2\hat{\sigma}^2}\{g(T_i) - h(\gamma, X_i)\}^2\right] \quad (8)$$

式中 γ 和 σ^2 为式(7)中的估计参数。

第二, 估计给定处理和 GPSM 结果的条件期望. 根据处理强度 T 和得分值 R 构造出产出变量 Y 的条件期望值, 考虑复杂模型

$$\begin{aligned} \varphi\{E(Y_i | T_i, R_i)\} &= \psi(T_i, R_i; \alpha) \\ &= \alpha_0 + \alpha_1 T_i + \alpha_2 T_i^2 + \alpha_3 T_i^3 + \alpha_4 R_i + \\ &\quad \alpha_5 R_i^2 + \alpha_6 R_i^3 + \alpha_7 T_i R_i \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $\psi(\cdot)$ 是一个将预测因子 $T_i, R_i; \alpha$ 与条件概率 $E(Y_i | T_i, R_i)$ 联系起来的连接函数。

第三, 估计剂量反应函数. 在式(8)的基础上, 将处理强度值 T 替换为处理变量 t , 将得分值 R 替换为得分值估计函数 $\hat{r}(t, X_i)$, 以此通过在不同的经营规模水平下对条件期望函数进行评估, 可得到估计剂量反应函数

$$\begin{aligned} E\{\widehat{Y(t)}\} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{\beta}\{t, \hat{r}(t, X_i)\} = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varphi^{-1}\{t, \hat{r}(t, X_i); \hat{\alpha}\} \end{aligned} \quad (10)$$

式中 $\hat{\alpha}$ 是第二步中估计的参数向量. Hirano 和 Imbens 指出, 可以使用基于估计方程的展开式来计算估计的剂量反应函数的渐近标准误差。

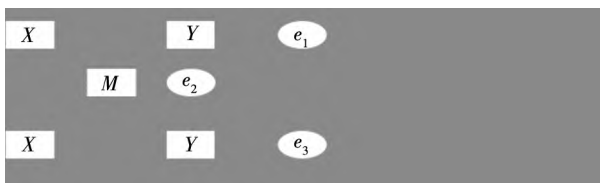


图3 中介效应模型原理

Fig. 3 The principle of the mediation effect model

中介效应模型. 为了进一步探究经营规模对粮食生产碳排放效率的影响机制与实践路径, 参考 Baron 和 Kenny 的中介效应逐步回归方法^[27],

构建了经营规模、要素投入结构与粮食生产碳排放效率的中介效应模型。图 3 展示了该模型的原理。

本文具体的模型构建如下

$$Y_i = \theta_1 + c \text{ size}_i + \sum_m \beta_m \text{ controls}_i + \varepsilon_1 \quad (11)$$

$$M_i = \theta_2 + a \text{ size}_i + \sum_m \beta_m \text{ controls}_i + \varepsilon_2 \quad (12)$$

$$Y_i = \theta_3 + c' \text{ size}_i + b M_i + \sum_m \beta_m \text{ controls}_i + \varepsilon_3 \quad (13)$$

式中 Y 为被解释变量,代表粮食生产碳排放效率。 size 为核心解释变量,代表经营规模。 M 是中介变量,代表要素投入结构。 controls 是相关协变量, θ 为截距项, ε 为随机误差项, a 、 b 、 c 、 c' 和 β 为变量的回归系数。若系数 c 显著,则拒绝 $c = 0$ 的原假

设,若系数 a 显著,系数 b 显著,则拒绝 $a = 0$ 、 $b = 0$ 的原假设。若同时满足以上两个条件,则中介效应显著,若满足以上两个条件的同时,系数 c' 不显著,则称为完全中介。

2.2 变量设计

被解释变量. 粮食生产碳排放效率 (carbon emissions efficiency, CEE) 衡量粮食生产过程中资源的有效利用和环境保护之间的平衡。具体而言,碳排放效率不仅包括粮食产出与投入要素之间的比例,还考虑到生产过程中的环境影响。本文考虑了三类非期望产出,包括农用化学物品投入的 CO_2 排放、土壤 N_2O 排放和稻田 CH_4 排放。^② 分别介绍了粮食生产碳排放效率测算的模型构建与指标体系。指标体系设置具体如表 1 所示。

表 1 主要变量统计特征

Table 1 Statistical characteristics of the main variables

变量类型	变量名称	变量符号	定义与赋值
被解释变量	粮食生产碳排放效率	<i>Carbon emissions efficiency</i>	计算得到
核心解释变量	经营规模	<i>Farm size</i>	农户土地经营规模/亩
协变量	性别	<i>Gender</i>	性别:男=1,女=0
	年龄	<i>Age</i>	户主年龄/岁
	劳动力资源	<i>Labor</i>	家庭劳动力数量/人
	人力资本素质	<i>Education</i>	受教育年限/年
	非农经济收入	<i>Indus_income</i>	家庭务工收入/(万元)
	信息化水平	<i>Internet</i>	是否接入互联网:是=1,否=0
	社会化服务	<i>Service</i>	是否采用农业社会化服务:是=1,否=0
中介变量	要素投入结构	<i>Serv_num</i>	社会化服务项目数量/个
		<i>Subjects</i>	是否加入新型农业经营主体:是=1,否=0
中介变量	要素投入结构	<i>Factor structure</i>	化肥农药投入比重/%

解释变量。经营规模是影响生产效率的重要变量之一,体现了土地利用的广度和农户对资源的管理能力。

协变量. 为了减少遗漏变量对结果的偏差,回归模型中纳入了以下协变量:1) 性别。性别可能影响农户的生产决策和对新技术的接受程度;2) 年龄。年龄较大的农户可能积累了更多的农业生产经验,但也可能对新技术的接受度较低;3) 劳动力资源。家庭中劳动力人数是衡量劳动力资源投入的重要变量;4) 人力资本素质。受教育年限用于衡量家庭主要劳动力的教育水平,受教育程度高的劳动力通常能更好地理解并应用先进的农

业技术;5) 家庭务工收入。全家务工收入反映了家庭经济状况,经济条件较好的家庭可能有更多的资金用于购买先进设备和环保技术;6) 信息化水平。农户是否接入互联网影响农户获取农业技术信息渠道和速度;7) 社会化服务。主要通过两个指标来衡量,第一,是否采纳社会化服务是衡量农户是否使用了农业生产的外部专业服务,这种服务可能会提高绿色技术的应用。第二,接受外包服务的数量反映了农户对外包服务的依赖程度,接受度高可能意味着农户更专业化和集约化的生产;8) 经营组织模式。是否加入新型经营主体衡量农户是否与合作社或其他经营主体合作,这种合作

② 有需要者可向作者索要。

可能带来技术支持和市场信息,带来差异化结果。

中介变量. 本文的要素投入结构主要采用物化投入结构比来衡量,指的是化肥、农药等物质资本在所有要素投入中的比重,具体核算过程为化肥农药等农用化学品投入占农用化学品、劳动力和机械投入总量的比重,用以衡量粮食生产中对农用化学品的资源依赖程度. 比重越高,说明粮食生产过程中越倾向于以化学投入替代劳动或机械等其他要素,呈现出较强的资源密集型特征. 相反,比重较低则可能代表要素投入结构更趋向于机械化或劳动力密集型。

2.3 数据来源

本文基于2023年山东省、江西省、四川省、辽宁省四个粮食主产区的农户调查数据,收集了1705份问卷. 经过筛选,剔除无法区分作物投入类型和异常观测值后,得到有效问卷1150份. 调查地区涵盖了东部(山东省)、中部(江西省)、西南(四川省)和东北(辽宁省)不同的地理板块,反映了我国粮食主产区在自然条件、气候环境与发展

水平上的多样性;在生产模式上,辽宁省以大规模平原农场为主,山东地区以小规模平原农场为主,而四川地区和江西地区则以山地和丘陵地区的小农经营模式为主;在作物种类上,四省均以水稻、小麦和玉米为主,涵盖了我国粮食生产的主要作物体系。

3 结果和分析

3.1 描述性分析

图4展示了经营规模与粮食生产碳排放效率的线性拟合图和二次曲线拟合图. 左图的线性拟合结果显示,经营规模与粮食生产碳排放效率呈负相关关系. 右图的二次曲线拟合结果则表明,二者呈“U型”非线性关系. 该图为本关于经营规模影响粮食生产碳排放效率的假设提供了初步的支持,但具体结论仍需通过进一步的计量分析验证。

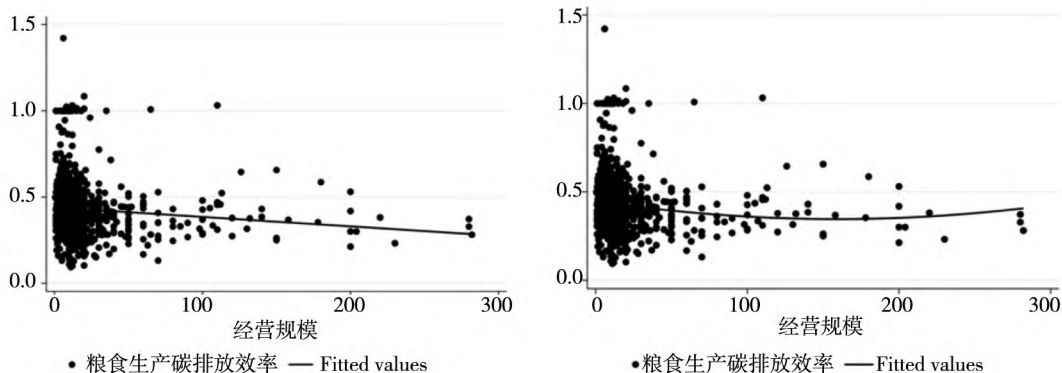


图4 经营规模与粮食生产碳排放效率拟合图

Fig.4 Farm size and carbon emissions efficiency fitting

3.2 GPSM 分析

经营规模的有序 Probit 回归. 表2结果显示,年龄、劳动力资源、人力资本素质和信息化水平对经营规模具有显著正向影响. 社会化服务数量的增加同样意味着经营规模的增长. 此外,性别和是否加入新型经营主体也与经营规模的扩大密切相关,表明性别差异影响了经营策略,而新型经营主体的加入为农场带来更多的资源和机会. 相对而言,非农经济收入和社会化服务的使用在统计上对经营规模的影响并不显著。

GPSM 的平衡条件检验. 在估计经营规模分

布的基础上,计算倾向得分值并进行匹配. 匹配的成功性需要通过平衡条件检验来验证,目的是确保匹配后的组在协变量上的分布均衡,从而减少选择偏差的影响. 本文依据经营规模的25%,50%,75%三个节点,选取6亩、10亩和18亩作为临界值,将数据样本分为四组. 表3展示了最终的匹配方式与平衡检验结果。

从表3可见,在未经调整的情况下,各协变量在不同经营规模区间的差异显著. 特别是性别和人力资本素质的显著性较强,表明该条件下的样本特征与其他区间存在显著差异. 这意味着,未经

调整的样本存在一定的选择偏差. 经过经营规模区间的分割后, 本文观察到不同区间的匹配效果. 各协变量的显著性在大多数区间有所改变, 表明通过区间分割改善了协变量的平衡性.

总体来看, 经过 GPSM 匹配后的样本能够通过平衡条件检验, 即在两个样本组之间进行匹配所使用的协变量不再存在系统差异或差异很小, 可以消除或尽可能削弱自选择性导致的估计偏误.

表 2 有序 Probit 模型

Table 2 Ordered Probit model

经营规模	Coef.	Std. Err.	z	$P > z $	[95 % Conf. Interval]	
Gender	0.134 **	0.063	2.14	0.033	0.011	0.257
Age	0.009 ***	0.004	2.59	0.009	0.002	0.016
Labor	0.035 *	0.025	1.91	0.058	0.013	0.084
Education	0.046 ***	0.011	4.07	0.000	0.024	0.067
Indus_income	0.008	0.006	1.23	0.217	-0.005	0.020
Internet	0.165 **	0.078	2.11	0.035	0.012	0.319
Service	-0.052	0.133	-0.39	0.696	-0.312	0.209
Serv_num	0.093 **	0.048	1.97	0.048	0.001	0.187
Subjects	0.429 ***	0.105	4.10	0.000	0.224	0.634
LR χ^2	50.38					
Pseudo R^2	0.071					

注: ***、** 和 * 分别表示 1%、5% 和 10% 显著的水平, 括号内为 t 值(下同).

表 3 GPSM 的平衡条件检验

Table 3 Test for balance condition of GPSM

平衡条件检验	未经调整	经营规模的区间分割			
		[0, 6]	(6, 10]	(10, 18]	(18, 282]
Farm_size					
Gender	0.119 ** (2.14)	0.026 (0.81)	0.018 (0.54)	-0.038 (-1.13)	-0.023 (-0.62)
Age	0.003 (0.87)	1.049 (1.44)	-0.455 (-0.63)	-2.021 (-1.89)	0.160 (0.197)
Labor	0.024 (1.17)	0.075 (0.78)	0.088 (0.94)	-0.025 (-0.26)	-0.096 (-0.92)
Education	0.026 *** (2.81)	0.174 (0.928)	0.456 (1.96)	-0.144 (-0.72)	-0.490 (-1.91)
Indus_income	0.002 (0.38)	0.981 (1.59)	-0.558 (-1.53)	-0.500 (-1.33)	0.290 (0.73)
Internet	0.108 * (1.66)	0.008 (0.26)	-0.006 (-0.17)	0.092 (1.81)	-0.069 (-1.94)
Service	-0.113 (-1.02)	0.060 (1.75)	-0.027 (-1.01)	-0.050 (-1.82)	0.041 (1.43)
Serv_num	0.059 (1.48)	0.170 (1.16)	-0.062 (-0.82)	-0.080 (-1.04)	0.063 (0.83)
Service	0.464 *** (5.54)	0.026 (1.15)	-0.013 (-0.636)	0.020 (0.87)	0.034 (1.87)
eq1_cons	2.846 *** (11.34)				
eq2_cons	0.889 *** (47.96)				

GPSM 匹配质量检验. 为进一步检验是否有效消除了样本间的系统选择性偏差, 本研究在平衡性检验的基础上, 采用核密度估计方法直观展示处理组与对照组在匹配前后倾向得分分布的变

化. 图 5 表明, 匹配前, 处理组与对照组在倾向得分上存在明显差异, 协变量分布存在较大不平衡. 匹配后, 两组倾向得分分布明显趋近, 表明该匹配过程在较大程度上消除了协变量分布的系统差异.

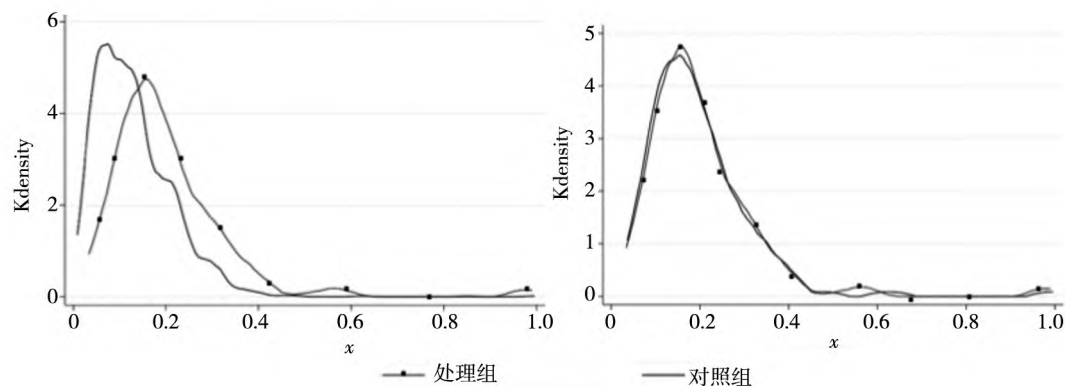


图 5 广义倾向得分核密度分布

Fig. 5 Kernel density distribution of GPSM

经营规模对粮食生产碳排放效率的处理效
应. 图 6 展示了通过 GPSM 方法分析的经营规模
和粮食生产碳排放效率之间的关系. 左侧为平均
“剂量反应”函数图, 右侧则展示了处理效应函数.

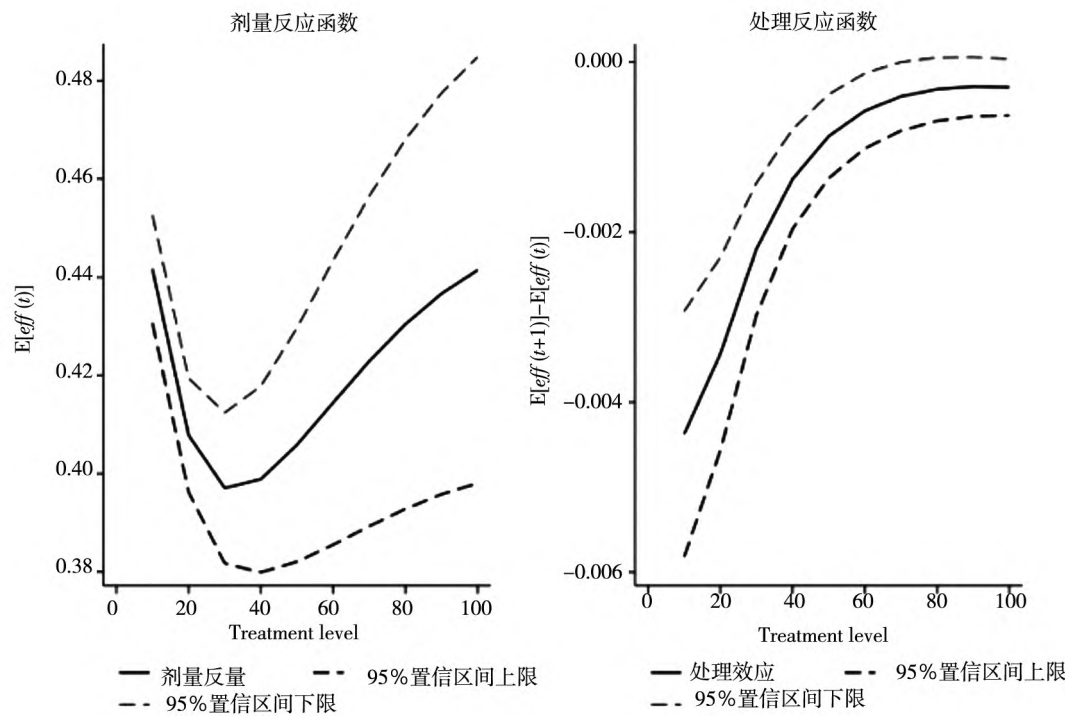


图 6 经营规模对粮食生产碳排放效率的剂量反应与处理效应

Fig. 6 Dose-response and treatment effects of farm size on carbon emissions efficiency in food production

从左侧剂量反应图可以看出, 经营规模与粮
食生产碳排放效率之间存在明显的“U 型”关系.
具体而言, 当经营规模小于 20 亩时, 粮食生产碳
排放效率相对较高. 然而, 当经营规模介于 20 亩 ~
60 亩之间时, 粮食生产碳排放效率有所下降. 而
当经营规模超过 60 亩时, 生产率又开始回升. 值
得注意的是, 在大规模农场中, 规模对粮食生产碳
排放效率的影响的统计显著性逐渐减弱, 同时平

均剂量反应函数的上下 95% 的置信区间逐渐变
宽. 这一现象主要是由于样本中的大规模农场相
对较少, 导致统计显著性下降, 但“U 型”特征依
然明显.

右侧处理效应函数图则展示了经营规模增加
一个单位对粮食生产碳排放效率的边际影响. 在
规模小于 20 亩的农场中, 边际影响较为显著. 而
在规模介于 20 亩 ~ 60 亩之间的中等规模农场

中,边际影响较小,甚至可能呈现负面效应.对于规模超过 60 亩的农场,边际影响再次增加,表明进一步扩张规模仍然可以提升碳排放效率.

3.3 影响机制检验

前文分析表明,经营规模对粮食生产碳排放效率的影响主要通过要素投入结构这一路径.表 4 中的中介效应模型估计探讨了经营规模与粮食生产碳排放效率之间的关系,并引入了化肥和农药等农用物资投入占比作为中介变量.大规模和小规模的临界点参考了图 6 的拐点,样本平均数 18.215 亩被用作为分界点.

在全样本和小规模农户中,经营规模的扩大与粮食生产碳排放效率之间呈负相关关系.尤其在小规模农户中,规模扩大对粮食生产碳排放效率的影响系数为 -0.002,且在 1% 水平下显著.这一结果与假设 1 的前半部分相符,说明在初始阶段,经营规模的扩大导致资源利用效率降低,并造成对化肥和农药的过度依赖.然而,在大规模农户中,经营规模的扩大与碳排放效率之间呈现正相关关系,相关系数为 0.011,在 5% 的水平下显著.这表明,随着农场的进一步扩张,其碳排放效率开始提升,验证了假设 1 的后半部分,即在达到一定规模后,规模经济效应、技术升级以及资源优化配置有助于提升碳排放效率.因此,结果支持了经营规模与粮食生产碳排放效率之间的“U 型”非线性关系.

要素投入结构对粮食生产碳排放效率有显著的负面影响.在全样本中,每增加一个单位的化肥和农药投入比,碳排放效率显著下降,系数为 -0.021,且在 5% 水平下显著.这表明,过度使用化肥和农药对环境效率有害,支持了假设 2. 在小规模农户中,化肥和农药投入比对碳排放效率的负面影响更加显著,进一步验证了优化要素投入结构的重要性.

进一步的中介效应分析结果显示,经营规模通过影响要素投入结构,间接影响了碳排放效率.在全样本中,经营规模对化肥和农药投入比具有负向作用,系数为 -0.002,且在 1% 的水平下显著.这表明,规模扩大有助于减少对化肥和农药的依赖,从而优化要素投入结构.此外,化肥和农药投入比的降低显著提升了碳排放效率,这一间接效应在全样本和小规模农户中均显著.尽管大规模农户的中介效应不如小规模农户显著,但整体趋势仍支持假设 3,即通过扩大经营规模促进要素投入结构的优化,最终提升粮食生产碳排放效率.

综合上述分析结果,三个假设均得到了强有力的支持.经营规模与粮食生产碳排放效率之间的关系呈现“U 型”,要素投入结构的优化通过降低化肥和农药投入来提升碳排放效率,而经营规模的扩大进一步通过优化要素投入结构来促进这一效应的实现.

表 4 中介效应模型的估计结果
Table 4 Estimation results of the mediation effect model

	全样本			小规模			大规模		
	碳排放效率	要素投入结构	碳排放效率	碳排放效率	要素投入结构	碳排放效率	碳排放效率	要素投入结构	碳排放效率
经营规模	-0.002 *** (-5.12)	-0.002 *** (-9.97)	0.113 *** (4.81)	-0.003 * (-1.80)	-0.003 ** (-2.13)	0.141 *** (4.70)	0.010 ** (2.16)	-0.012 *** (-6.50)	0.088 ** (2.41)
要素投入结构			-0.020 ** (-3.10)			-0.002 * (-1.73)			0.002 (0.20)
中介效应	-0.001 *** (-4.43)			-0.002 * (-1.85)			-0.001 * (-1.80)		
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
N	1 150	1 150	1 150	873	873	873	277	277	277
R ²	0.322	0.342	0.458	0.733	0.729	0.741	0.356	0.400	0.356

3.4 稳健性检验

该节采用精确断点回归设计(SRDD)对经营规模对粮食生产碳排放效率的影响进行稳健性检验.

为了检验经营规模对粮食生产碳排放效率的

影响,本文在 SRDD 分析中继续使用普通农户的经营规模进行分组检验.根据普通农户经营规模的 25 分位、50 分位和 75 分位,将其从低到高分组为四组,分别与所有新型经营主体组成子样本进行 SRDD 分析.从表 5 的结果可以看出,无论核函

数的形式和带宽取值如何,经营规模较小时,其对粮食生产碳排放效率呈现负效应,这意味着在小规模经营的情况下,农户的碳排放效率受到抑制.然而,随着经营规模的逐渐增大,其对粮食生产碳排放效率的影响则转为正向效应.表明当规模达到一定程度时,适度的规模扩张能够有效提升碳排放效率.

具体来看,在不同的带宽设定下,低于 25 分位的农户,其局部 Wald 统计量显示出显著的负效应,如在三角核的局部 Wald50 设定中,系数为 -0.049,且在 5% 水平下显著.当经营规模处于 25 分位 ~ 50 分位和 50 分位 ~ 75 分位时,虽然负效应依旧存在,但相对减弱,具体如局部 Wald100

的系数分别为 -0.040 和 -0.035,显示出经营规模的增加对碳排放效率的负面影响正在削弱.当经营规模超过 75 分位时,正效应的出现更为明显.而对于矩形核估计,在局部 Wald100 的设定下,其系数达到 0.007,并在 1% 的水平下显著,表明大规模经营的农户在碳排放效率方面表现出较强的优势.

总体来看 SRDD 分析结果进一步为本文的结论提供了稳健性证据,验证了经营规模与粮食生产碳排放效率之间存在的“U”型关系,即适度扩大经营规模不仅有助于提高碳排放效率,还进一步支持了本文关于优化经营规模与提升碳排放效率之间关系的理论框架.

表 5 经营规模与粮食生产碳排放效率的 SRDD 实证结果
Table 5 SRDD empirical results on farm size and grain production carbon emissions efficiency

参数设定		<25th	25th ~ 50th	50th ~ 75th	>75th
三角核	局部 Wald50	-0.049 ** (- 2.24)	-0.035 ** (- 2.00)	-0.032 ** (- 2.09)	0.003 ** (2.25)
	局部 Wald100	-0.042 *** (- 2.17)	-0.040 ** (- 2.05)	-0.035 * (- 2.00)	0.005 *** (2.12)
	局部 Wald200	-0.040 ** (- 2.14)	-0.047 * (- 1.98)	-0.043 (- 1.76)	0.001 ** (2.02)
矩形核	局部 Wald50	-0.046 *** (- 2.37)	-0.045 ** (- 2.02)	-0.040 ** (- 2.03)	0.003 * (1.97)
	局部 Wald100	-0.050 ** (- 2.01)	-0.047 *** (- 2.22)	-0.043 * (- 1.85)	0.007 *** (2.16)
	局部 Wald200	-0.054 (- 1.76)	-0.048 (- 1.86)	-0.042 * (- 1.91)	0.005 ** (2.12)

3.5 异质性检验

为了进一步检验本文的结论的稳健性及区域异质性.本文进一步采用了 Bootstrap 法进行了主效应的稳健性检验,及各区域的异质性检验,如表 6 所示.主效应检验结果表明,经营规模的一次项系数为负,平方项系数为正,且均在 5% 的水

平上显著,验证了经营规模与碳排放率之间显著的“U 型”关系.区域异质性检验旨在探索该结论在各类子样本中是否依旧稳健.结果显示,所有分样本的检验均支持上述结论.这表明,中国农场的规模尚未到达最优水平,适度提高经营规模能够促进粮食绿色生产.

表 6 Bootstrap 主效应稳健性验证与区域异质性检验结果
Table 6 Bootstrap validation of main effects and heterogeneity tests by region

变量	Bootstrap 法	山东	江西	四川	辽宁
经营规模	-0.002 *** (- 3.48)	-0.001 ** (- 2.44)	-0.057 (- 0.63)	-0.276 (- 1.29)	-0.002 *** (- 2.92)
经营规模的平方项	0.001 ** (2.33)	0.001 ** (2.30)	0.010 (0.66)	0.072 * (2.58)	0.001 ** (2.41)
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
常数项	Yes	0.144 *** (5.01)	0.421 ** (2.74)	0.098 (0.21)	0.461 *** (14.85)
N	1 150	517	115	101	417
R ²	Yes	0.697	0.490	0.945	0.326

4 结束语

4.1 结 论

本文基于 2023 年在中国山东、江西、四川、辽宁四省的 1 150 份农户入户调查数据,采用 GPSM 方法,结合中介效应与精确断点回归,深入研究了经营规模对粮食生产碳排放效率的影响。

研究表明,经营规模对粮食生产碳排放效率的影响呈现非线性“U 型”特征。第一,适度的经营规模扩张对中国的粮食生产碳排放效率具有显著的提升作用。长期以来以小农经济为主的中国,经营规模尚未达到合理的适度规模。具体而言,当经营规模小于 20 亩时,粮食生产碳排放效率相对较高;当经营规模介于 20 亩~60 亩之间时,碳排放效率有所下降;而当规模超过 60 亩后,碳排放效率再次上升。进一步扩张经营规模仍有提升碳排放效率的潜力;第二,优化要素投入结构对粮食生产碳排放效率具有正向影响。研究发现,化肥和农药投入比每增加 1 个百分点,碳排放效率平均下降 0.021 个百分点。因此,优化要素投入结构,减少对高污染化学品的依赖,是提升粮食生产碳排放效率的关键途径之一;第三,经营规模通过调整要素投入结构,间接影响了粮食生产碳排放效率。研究显示,经营规模与化肥农药等农用化学品投入比例之间存在显著的负相关关系,适度扩大经营规模能够有效降低化肥农药等的投入密度,从而提高碳排放效率。本文通过精确断点回归和异质性检验验证了研究结果的稳健性。

4.2 讨 论

本文基于山东省、江西省、四川省、辽宁省四省农户调查数据,揭示了经营规模与粮食生产碳排放效率之间的“U 型”非线性关系。这一关系表明,随着经营规模的适度扩张,化肥和农药等化学品的投入密度逐渐下降,从而提高了粮食的碳排放效率。这一发现与传统研究普遍发现的经营规模与粮食生产率之间的“倒 U 型”关系有所不同,特别是在发展中国家的相关研究中。这种差异可能由于传统研究未充分考虑粮食生产中的环境负

面效应,尤其是碳排放对效率的负向影响^[28-30]。

本研究强调,在提升粮食生产碳排放效率的过程中,应推动适度扩大经营规模,但同时必须警惕规模过度扩张可能带来的边际收益递减以及生态系统承载压力上升等潜在风险。在农业政策制定时,应坚持“适度规模经营”导向,避免一味追求规模扩张,合理引导不同类型农户走向绿色、高效的发展路径。对于中小规模农户而言,应重点加强农业绿色技术培训、资源支持和环保意识,提供精准的财政补贴和资源配套支持。引导农户从依赖传统物化投入转向依赖科技、人力与生态型投入,提高整体生产体系的绿色性与可持续性。对于大规模经营主体,应在鼓励其规模经济与技术进步的基础上,强化面源污染监管,防范因集约化生产导致的土壤退化、水体污染等环境负外部性。同时,在推动规模经营的过程中,应统筹考虑土地流转的制度安排与小农生计保障,通过建立灵活、多元的农业支持政策体系,推动粮食生产系统的社会-生态协同演化。这一结论与可持续发展目标一致,即通过提高资源利用效率和减少环境污染,推动农业的绿色转型^[31]。

尽管本文为经营规模与粮食生产碳排放效率的关系提供了新的见解,但仍存在一定的局限性:第一,样本的地理覆盖范围有限。本研究仅基于四省数据,虽具有一定的代表性,但尚难以全面反映全国多样化的生态与制度环境;第二,“U 型”关系的外推存在边界条件。本文揭示的“U 型”关系并不意味着规模越大碳排放效率就会无限提升,而仅反映了一个相对合理的区间范围。超大规模可能会导致土壤质量下降和长期碳排放效率下降^[32],需避免将结果简单推广至所有的规模情景^[33];第三,政策因素与自然环境变量的缺失可能影响模型解释力与识别效度。由于数据来源于 2023 年的农户调查数据,未能采用多期模型考量土地制度、环境规制等政策变量。同时,尽管本研究在建模过程中引入了省份虚拟变量,并通过多种稳健性检验方法缓解内生性偏误,但仍难以完全排除极端气候事件、年平均气温及降水等自然因素带来的潜在偏误;第四,尽管本研究已将要

素投入结构纳入分析框架,并以化肥与农药投入比重作为主要指标,初步揭示了结构优化对绿色效率的促进作用,但相关变量定义仍显局限,未

能充分体现生产要素的多样性.未来可结合微观层面数据进一步改进测度方式,以提高变量解释力.

参 考 文 献:

- [1] 仇焕广, 黄 青. 农业绿色转型与高质量协调发展的理论逻辑与实践[J]. 农业经济问题, 2025, (2): 15–23.
Qiu Huanguang, Huang Qing. The green transformation of agriculture and high-quality development: Theoretical logic and practice[J]. Issues in Agricultural Economy, 2025, (2): 15–23. (in Chinese)
- [2] 张俊彪, 何 可. “双碳”目标下的农业低碳发展研究: 现状、误区与前瞻[J]. 农业经济问题, 2022, (9): 35–46.
Zhang Junbiao, He Ke. Current situation, misunderstandings and prospects of agricultural low-carbon development under the targets of carbon peak and carbon neutrality[J]. Issues in Agricultural Economy, 2022, (9): 35–46. (in Chinese)
- [3] 甘 犁, 陈诗一, 冯帅章, 等. 全面建成小康社会后的贫困治理与乡村发展[J]. 管理科学学报, 2021, 24(8): 105–114.
Gan Li, Chen Shiyi, Feng Shuaizhang, et al. China's poverty alleviation and rural development after completing the task of building a prosperous society[J]. Journal of Management Sciences in China, 2021, 24(8): 105–114. (in Chinese)
- [4] Northrup D L, Basso B, Wang M Q, et al. Novel technologies for emission reduction complement conservation agriculture to achieve negative emissions from row-crop production[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2021, 118(28): e2022666118.
- [5] 徐志刚, 章 丹, 程宝栋. 中国粮食安全保障的农地规模经营逻辑——基于农户与地块双重规模经济的分析视角[J]. 管理世界, 2024, 40(5): 106–122.
Xu Zhigang, Zhang Dan, Cheng Baodong. The logic of farmland scale management for ensuring China's food security: An analysis from the perspective of dual economies of scale in households and plots[J]. Management World, 2024, 40(5): 106–122. (in Chinese)
- [6] Helfand S M, Taylor M P H. The inverse relationship between farm size and productivity: Refocusing the debate[J]. Food Policy, 2021, (99): 101977.
- [7] Omotilewa O J, Jayne T S, Muyanga M, et al. A revisit of farm size and productivity: Empirical evidence from a wide range of farm sizes in Nigeria[J]. World Development, 2021, (146): 105592.
- [8] Sheng Y, Ding J, Huang J. The relationship between farm size and productivity in agriculture: Evidence from maize production in Northern China[J]. American Journal of Agricultural Economics, 2019, 101(3): 790–806.
- [9] Key N. Farm size and productivity growth in the United States Corn Belt[J]. Food Policy, 2019, (84): 186–195.
- [10] Foster A, Rosenzweig M R. Barriers to farm profitability in India: Mechanization, scale and credit markets[C]//Conference Agriculture for Development-Revisited, University of California at Berkeley, October. 2010, (24): 1–2.
- [11] Hu J L, Wang S C. Total-factor energy efficiency of regions in China[J]. Energy Policy, 2006, 34(17): 3206–3217.
- [12] Rada N E, Fuglie K O. New perspectives on farm size and productivity[J]. Food Policy, 2019, (84): 147–152.
- [13] An Z, Yang Y, Yang X, et al. Promoting sustainable smallholder farming via multistakeholder collaboration[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2024, 121(21): e2319519121.
- [14] 杨子晖, 陈里璇, 罗 彤. 边际减排成本与区域差异性研究[J]. 管理科学学报, 2019, 22(2): 1–21.
Yang Zihui, Chen Lixuan, Luo Tong. Study on marginal abatement cost and regional differences[J]. Journal of Management Sciences in China, 2019, 22(2): 1–21. (in Chinese)
- [15] Wei Z H U. The relationship between farm size and fertilizer use efficiency: Evidence from China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2022, 21(1): 273–281.

- [16] Khafagy A, Vigani M. Technical change and the common agricultural policy[J]. *Food Policy*, 2022, (109): 102267.
- [17] Lin W, Wei Y. Economic forecasting with big data: A literature review[J]. *Journal of Management Science and Engineering*, 2024, 9(2): 254–270.
- [18] 段宏波, 汪寿阳. 中国的碳中和: 技术经济路径与政策选择[J]. *管理科学学报*, 2024, 27(2): 1–17.
Duan Hongbo, Wang Shouyang. China's carbon neutrality: Tech-economic pathways and policy options[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2024, 27(2): 1–17. (in Chinese)
- [19] Li T, Long H, Zhang Y, et al. Analysis of the spatial mismatch of grain production and farmland resources in China based on the potential crop rotation system[J]. *Land Use Policy*, 2017, (60): 26–36.
- [20] Solow R M. A contribution to the theory of economic growth[J]. *The Quarterly Journal of Economics*, 1956, 70(1): 65–94.
- [21] Vejan P, Khadiran T, Abdullah R, et al. Controlled release fertilizer: A review on developments, applications and potential in agriculture[J]. *Journal of Controlled Release*, 2021, (339): 321–334.
- [22] Foster A D, Rosenzweig M R. Are there too many farms in the world? Labor market transaction costs, machine capacities, and optimal farm size[J]. *Journal of Political Economy*, 2022, 130(3): 636–680.
- [23] Hu X, Li H, Zhang X, et al. How rent facilitates capital accumulation: A case study of rural land capitalization in Suzhou, China[J]. *Land Use Policy*, 2024, (139): 107063.
- [24] 王 健, 李明操, 蒋忠中, 等. 企业绿色技术创新的供应链溢出效应研究[J]. *管理科学学报*, 2025, 28(1): 77–99.
Wang Jian, Li Mingcao, Jiang Zhongzhong, et al. Supply chain spillover effects of green technology innovations[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2025, 28(1): 77–99. (in Chinese)
- [25] Hamilton S F, Richards T J, Shafran A P, et al. Farm labor productivity and the impact of mechanization[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 2022, 104(4): 1435–1459.
- [26] Bia M, Mattei A. A Stata package for the estimation of the dose-response function through adjustment for the generalized propensity score[J]. *The Stata Journal*, 2008, 8(3): 354–373.
- [27] Baron R M, Kenny D A. The moderator-mediator variable distinction in social psychological research: Conceptual, strategic, and statistical considerations[J]. *Journal of Personality and Social Psychology*, 1986, 51(6): 1172–1173.
- [28] Chopra R, Magazzino C, Shah M I, et al. The role of renewable energy and natural resources for sustainable agriculture in ASEAN countries: Do carbon emissions and deforestation affect agriculture productivity? [J]. *Resources Policy*, 2022, (76): 102578.
- [29] Wang R, Chen J, Li Z, et al. Factors analysis for the decoupling of grain production and carbon emissions from crop planting in China: A discussion on the regulating effects of planting scale and technological progress[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023, (103): 107249.
- [30] Huang T, Wen S, Zhang M, et al. Effect on greenhouse gas emissions (CH₄ and N₂O) of straw mulching or its incorporation in farmland ecosystems in China[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2024, (46): 223–232.
- [31] Guo Y, Chen Y, Searchinger T D, et al. Air quality, nitrogen use efficiency and food security in China are improved by cost-effective agricultural nitrogen management[J]. *Nature Food*, 2020, 1(10): 648–658.
- [32] Powlson D S, Whitmore A P, Goulding K W T. Soil carbon sequestration to mitigate climate change: A critical re-examination to identify the true and the false[J]. *European Journal of Soil Science*, 2011, 62(1): 42–55.
- [33] 王明喜, 鲍 勤, 汤 铃, 等. 碳排放约束下的企业最优减排投资行为[J]. *管理科学学报*, 2015, 18(6): 41–57.
Wang Mingxi, Bao Qin, Tang Ling, et al. Optimal emission reduction investment behavior of enterprises under carbon emission[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2015, 18(6): 41–57. (in Chinese)

Farm size, factor input structure, and carbon emissions efficiency in grain production: Insights from a survey of Chinese farmers

WANG Rui-xue^{2, 6}, HAN Ze¹, CHEN Jian-cheng⁶, DENG Xiang-zheng^{3, 1, 4, 5}

1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
2. Asia-Australia Business College, Liaoning University, Shenyang 110136, China;
3. Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;
4. School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
5. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China;
6. School of Economics and Management, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: The grain production sector is a significant contributor to agricultural carbon emissions in China, and under the double pressure of the current ‘dual-carbon’ target and food security, clarifying the impacts of large-scale operation on the factor input structure and the efficiency of carbon emissions from grain production has become a key path to solving the problem of green and low-carbon transformation of China’s agriculture. This study explores the theoretical link between farm size and efficiency disparities, utilizing household survey data collected in 2023 from 1 150 households across Liaoning, Shandong, Sichuan, and Jiangxi provinces. Employing the Generalized Propensity Score Matching (GPSM) method under counterfactual assumptions, the paper estimates the average treatment effect of farm size on carbon emission efficiency in grain production. Additionally, regression adjustment and mediation effect models are employed to analyze underlying mechanisms, highlighting the mediating role of factor input structure. The findings indicate a “U-shaped” nonlinear relationship between farm size and carbon emission efficiency, underscoring the importance of optimizing factor input structure to leverage the positive impacts of farm size on carbon emission efficiency in grain production. Further moderate expansion of farm size will support China’s pursuit of sustainable and green grain production. This research provides a scientific foundation for policymakers to guide rational scale management and resource optimization in the new development era, along with policy recommendations to promote green grain production through adjustments in factor input structure.

Key words: farm size; grain production; carbon emissions efficiency; factor input structure