



华中农业大学学报(社会科学版)

Journal of Huazhong Agricultural University(Social Sciences Edition)

ISSN 1008-3456,CN 42-1558/C

## 《华中农业大学学报(社会科学版)》网络首发论文

题目: “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?  
作者: 李亚玲, 陈同勤, 易福金  
DOI: 10.13300/j.cnki.hnwkxb.2025.03.001  
收稿日期: 2024-11-26  
网络首发日期: 2025-04-09  
引用格式: 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/OL]. 华中农业大学学报(社会科学版).  
<https://doi.org/10.13300/j.cnki.hnwkxb.2025.03.001>



**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。

# “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?

李亚玲<sup>1</sup>, 陈同勤<sup>1</sup>, 易福金<sup>2,3\*</sup>

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



**摘要** 中国种植业具有巨大减排增汇潜力, 对实现“双碳”目标发挥重要作用。本文基于全国县级数据, 采用固定效应模型分析农地经营规模对作物种植碳排放、碳汇及净碳汇强度的影响, 并通过联立方程模型从要素投入强度、种植结构和作物单产等多维度检验其影响路径。结果表明: (1) 随着农地经营规模扩大, 作物种植净碳汇强度呈“U型”变化, 拐点出现在人均农地经营规模为 2.25 公顷时, 其中作物种植碳排放强度呈“倒 U 型”变化, 碳汇强度呈“U 型”变化, 净碳汇强度的变化由碳汇强度的变化主导; (2) 农地经营规模增加导致化肥投入强度呈“倒 U 型”变化, 从而主导了作物种植碳排放强度的“倒 U 型”变化; (3) 农地经营规模扩大引起的种植结构从“非粮化”向“趋粮化”转变是作物种植碳汇强度呈“U 型”变化的主要因素, 鉴于作物种植的碳汇效应远大于碳排放效应, 这一因素也成为净碳汇强度呈“U 型”变化的决定性因素。因此, 从长期来看, 应加快农业规模化经营转型进程, 以推动种植业低碳发展; 但在转型初期, 需加强政策干预, 以减轻其给种植业低碳发展带来的负面影响。

**关键词** 农地经营规模; 作物种植; 碳排放; 碳汇; 净碳汇

**中图分类号:** F323.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-3456(2025)03-0001-15

**DOI 编码:** 10.13300/j.cnki.hnwkxb.2025.03.001

为应对全球气候变化, 2020 年习近平总书记在第七十五届联合国大会上提出我国二氧化碳(CO<sub>2</sub>)排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和的“双碳”目标。农业部门兼具碳源和碳汇的双重属性, 对减少碳排放和增加碳汇起到关键作用。根据联合国粮食及农业组织统计, 近年来农业用地释放出的温室气体超过全球人为温室气体排放总量的 30%, 农业生产活动造成的碳排放占比达到 14%。作为农业大国, 中国农业生产活动造成的碳排放占全球农业生产碳排放总量的比重达到 10% 左右, 其中种植业所产生的碳排放占比超过一半。如果基于全生命周期核算体系, 将种植业投入品生产和运输过程中造成的碳排放也纳入核算系统, 种植业碳排放的占比将会更大。同时, 种植业生产是农业生态系统固碳的主要来源, 作物吸收 CO<sub>2</sub> 并储存在土壤中是缓解气候变化的有效手段<sup>[1-2]</sup>, 仅按照农作物播种面积计算, 中国种植业每年就能吸收超过 22 亿吨的 CO<sub>2</sub><sup>[3]</sup>。由此可见, 种植业生产既能通过降低碳排放助力碳达峰目标实现, 又能通过增加生态系统固碳能力推进碳中和目标实现<sup>[4]</sup>, 2022 年印发的《农业农村减排固碳实施方案》重点强调了种植业减排固碳的任务。因此, 在中国“双碳”战略下, 如何充分发挥种植业的减排增汇作用至关重要。

收稿日期: 2024-11-26

基金项目: “十四五”国家重点研发计划子课题“增值肥料社会价值链、经济价值链研究”(2023YFD170020X-04); 国家自然科学基金-盖茨基金国际合作重点项目“农业综合天气指数保险研究和实施”(72261147758); 安徽省高等学校科学研究项目(人文社会科学)“数字技能驱动我国农户健康膳食转型的效应识别和动力机制研究”(2024AH052424)。

\* 为通讯作者。

在实现“双碳”目标进程中,中国种植业恰好也处于由传统小农经济向规模化经营转型的关键阶段。土地流转政策、专业合作社发展、农村劳动力非农转移、农业劳动力老龄化以及快速城镇化均带来了中国农地经营规模的快速扩张<sup>[5-6]</sup>。根据中国农村经营管理统计年报数据统计,近10年中国土地流转总面积增长约4倍,土地经营面积超过50亩的农户数量增加近2倍,近20年人均土地经营面积增加了约60%。中国小农户正在逐渐向大规模经营转型,规模化经营成为种植业发展的必然趋势<sup>[7]</sup>。农地经营规模变化引致生产要素投入、种植结构和作物单产等发生调整,将会给中国种植业减排固碳带来诸多不确定性,具体路径有以下几个方面。第一,农地经营规模扩大促进生产技术进步,引起农业化学用品和农用能源等要素使用效率发生变化<sup>[8-9]</sup>,改变农业化学用品、农用能源等生产要素的投入强度,引起种植业要素投入关联碳排放相应变化。第二,农地经营规模扩大引致作物间的成本和收益相对优势发生转变<sup>[10]</sup>,导致作物种植结构发生变化,从而农地管理碳排放和作物光合作用碳汇水平相应变化。第三,农地经营规模扩大导致劳动力、土地和其它生产要素的配置结构发生调整<sup>[11]</sup>,引起作物单产发生变化,鉴于作物单产水平直接影响其生命周期内的碳吸收量<sup>[12]</sup>,单产变化将会带来种植业碳汇的改变。基于此,在农业向规模化经营转型的关键阶段,亟需厘清农地经营规模对作物种植碳排放、碳汇及净碳汇的影响及其作用路径。这不仅有助于充分发挥中国种植业在实现“双碳”目标中的关键作用,也能够为全球其他正在或即将经历农业规模化经营转型的国家提供种植业减排增汇的经验借鉴。

现有围绕作物种植净碳汇的研究主要从时空动态、驱动机制以及经济耦合等维度展开。在时空动态方面,多数学者基于省级或县域尺度揭示了种植业净碳汇具有空间正相关性但呈现显著区域异质性<sup>[13-18]</sup>。在驱动机制层面,学者们通过地理探测器、LMDI分解等模型识别出种植结构<sup>[19]</sup>、机械化水平<sup>[20]</sup>、保护性耕作推广<sup>[21]</sup>、财政支持<sup>[22]</sup>、经济因素<sup>[23]</sup>等种植业净碳汇增长的正向驱动因子,以及城镇化水平<sup>[24]</sup>、效率和劳动力<sup>[23]</sup>等抑制因素。此外,经济耦合视角的研究进一步揭示了碳—经效益协调度的区域分化特征<sup>[25]</sup>以及数字普惠金融通过技术创新提升净碳汇效率的传导机制<sup>[26]</sup>。值得注意的是,尽管现有文献已系统探讨多种因素对作物种植净碳汇的影响,但对农地经营规模变化对作物种植净碳汇的影响及其机制仍缺乏深度解析。已有相关研究主要聚焦农地经营规模与作物种植碳排放的关系,发现二者之间存在正向关联<sup>[27]</sup>、负向关系<sup>[28-32]</sup>、“U型”和“倒U型”的非线性关系<sup>[33-34]</sup>,结论不同的主要原因在于碳排放核算系统边界和样本区域的差异。但是,这些研究普遍局限于作物种植碳排放单一维度分析,既未将碳汇效应纳入研究框架,也未能系统揭示经营规模通过生产要素配置、种植结构调整及作物单产波动等多重路径对作物种植净碳汇产生的影响,理论和现实指导价值有限。农地经营规模的变化不仅影响作物种植碳排放,也同步影响作物种植碳汇能力,二者的净效应需通过碳源—碳汇协同分析才能准确评估。因此,突破现有理论困境需构建包含碳源—碳汇双系统的综合分析框架,系统解析农地规模经营对作物种植净碳汇的影响及其作用路径。

有鉴于此,本文将在科学核算作物种植碳排放、碳汇和净碳汇强度的基础之上,探究农地经营规模对作物种植碳排放强度、碳汇强度及净碳汇强度的影响,并从生产要素投入、种植结构和作物单产多重维度探讨其中的作用路径。本研究的边际贡献在于:第一,在已有农地经营规模对作物种植碳排放的影响的研究基础上,将农地经营规模对作物种植碳汇和净碳效应的影响引入同一框架进行系统分析。第二,基于生产要素投入、种植结构和作物单产等多重维度,对农地经营规模影响作物种植碳排放强度、碳汇强度和净碳汇强度的路径进行规范的实证检验。

## 一、理论分析与研究假说

### 1. 农地经营规模与作物种植碳排放强度

农地经营规模变化将会使得生产要素投入和种植结构产生变化,由于生产要素投入和稻田甲烷( $\text{CH}_4$ )排放是作物种植的两大碳排放主要来源,农地经营规模改变引起作物种植碳排放相应改变(图1)。一方面,农地经营规模的变化影响生产要素投入。在农地经营规模扩张的初始阶段,在产量最

大化目标驱动下,农户倾向于增加投入农业化学品和机械等生产要素<sup>[35]</sup>,从而引起生产要素投入关联的种植业碳排放强度增加。随着农地经营规模的进一步扩大,促进生产技术进步和优化生产要素配置结构,生产要素的使用效率提高,引起投入强度的减少<sup>[9]</sup>,从而减少生产要素投入关联的种植业碳排放强度。因此,随着农地经营规模的扩大,农业化学品和机械等生产要素投入关联碳排放强度呈现先增加后减少的“倒U型”变化趋势。另一方面,农地经营规模的变化引起种植结构调整。由于经济作物的收益更高,在农户收益最大化目标驱动下,农地经营规模的扩大将会促进经济作物种植的增加,带来种植结构“非粮化”效应<sup>[36-37]</sup>。随着农地经营规模的进一步增加,土地密集型的粮食作物生产要素配置效率提高,劳动密集型的经济作物生产机会成本增加,当土地和劳动力等要素禀赋达到某一临界点时,种植结构转向“趋粮化”<sup>[38-39]</sup>。水稻作为主要的粮食作物,随着农地经营规模的增加,其播种面积的变化也将遵循由减少转为增加的趋势。因此,随着农地经营规模的扩大,种植结构调整引起的稻田CH<sub>4</sub>排放强度呈现先减少后增加的“U型”变化趋势。总体上,由于农业化学品投入产生的碳排放为种植业的第一大碳排放来源,农地经营规模扩大带来的作物种植碳排放强度变化趋势将由农业化学品投入关联碳排放强度主导,呈现“倒U型”变化特征。基于此,提出如下研究假说。

H<sub>1</sub>:农地经营规模扩大对中国作物种植碳排放强度的影响呈“倒U型”的变化趋势。

H<sub>2</sub>:农地经营规模会通过化学品和机械等要素投入和种植结构的调整影响作物种植碳排放强度。

## 2. 农地经营规模与作物种植碳汇强度

农地经营规模的变化导致种植结构和作物单产发生改变,由于不同的作物类型及其单产水平对应差异化的作物光合作用CO<sub>2</sub>吸收能力,导致作物种植的碳汇强度相应变化。首先,农地经营规模的变化会引起种植结构的调整,其中粮食作物的碳吸收率远高于经济作物<sup>[40]</sup>,粮食作物与经济作物之间的种植结构调整会对作物种植碳汇强度产生重要影响。根据前文论述,随着农地经营规模的扩大,种植结构呈现出由“非粮化”向“趋粮化”的趋势转变,从而使作物种植碳汇强度呈现先减后增的“U型”变化趋势。其次,农地经营规模的变化引起作物单产改变,作物的经济产量直接影响其生命周期内的碳吸收量<sup>[12]</sup>。在农地经营规模扩张的初始阶段,收益最大化目标下农户倾向于采用精耕细作的生产经营模式,使得作物单产提高<sup>[41-42]</sup>,从而促进作物种植碳汇强度的增加。随着农地经营规模的进一步扩大,技术进步和要素配置优化无法抵消农地经营规模扩大带来的边际产出损失,技术进步内涵将慢于规模外延扩张<sup>[43]</sup>,作物单产表现出减少趋势,使得作物种植碳汇强度相应减少。综上所述,随着农地经营规模的扩大,种植结构调整引起的作物种植碳汇强度变化呈现先减少后增加的“U型”变化趋势,单产变化导致作物种植碳汇强度呈现先增加后减少的“倒U型”变化趋势。总体上,由于作物播种面积变化是作物光合作用碳汇变化的主要驱动因素<sup>[44]</sup>,因此农地经营规模扩大对作物种植碳汇强度产生的影响将主要由种植结构调整决定,呈现“U型”变化特征。基于此,提出如下研究假说。

H<sub>3</sub>:农地经营规模扩大对作物种植碳汇强度的影响呈“U型”的变化趋势。

H<sub>4</sub>:农地经营规模会通过种植结构调整和作物单产影响作物种植碳汇强度。

## 3. 农地经营规模与作物种植净碳汇强度

作物种植净碳汇强度是作物种植碳汇强度和碳排放强度的差值,从前文分析可知,随着农地经营规模的扩大,作物种植碳排放强度呈现“倒U型”的变化趋势,作物种植碳汇强度呈现“U型”的变化趋势。由于种植业是净碳汇部门,碳汇效应远高于碳排放效应,因此作物种植净碳汇强度的变化趋势仍由碳汇强度的变化趋势主导,呈现先减少后增加的“U型”变化趋势,故提出如下研究假说。

H<sub>5</sub>:农地经营规模扩大对作物种植净碳汇强度的影响呈“U型”的变化趋势。

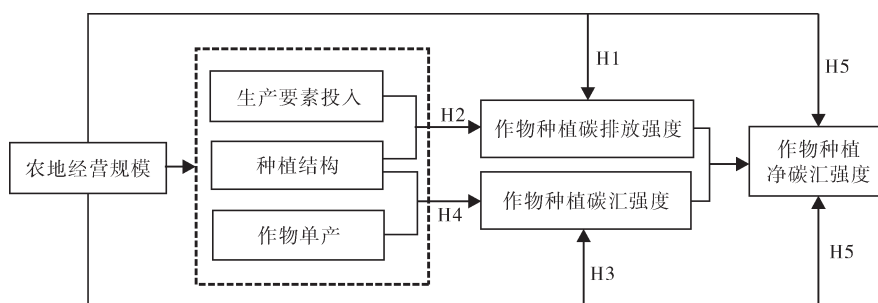


图 1 理论分析框架

## 二、识别策略、变量选择与特征性事实

### 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地经营规模对作物种植碳排放、碳汇和净碳汇强度的影响,模型设定如下:

$$\ln Carbon_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Scale_{it} + \alpha_2 Scale_{it}^2 + \alpha_3 Z_{it} + \alpha_4 T_t + \sigma_i + \epsilon_{it} \quad (1)$$

在式(1)中, $\ln Carbon_{it}$ 为被解释变量,分别表示*i*地区第*t*年的作物种植碳排放、碳汇及净碳汇强度,以上变量均进行对数化处理。由于净碳汇强度在极少数地区可能出现负数,本文将其转换为1再取对数。本文的核心解释变量为 $Scale_{it}$ ,表示*i*地区第*t*年的农地经营规模。考虑到农地经营规模与作物种植碳排放、碳汇和净碳汇强度之间可能存在非线性关系,在模型中增加农地经营规模的二次项( $Scale_{it}^2$ )进行估计。 $Z_{it}$ 表示一系列控制变量。 $T_t$ 为时间虚拟变量,用于控制不随地区改变但随时间改变的技术进步等因素的干扰。 $\sigma_i$ 为个体效应,控制地区层面的土壤肥力和地形特征等不随时间改变的变量。 $\alpha_0$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 和 $\alpha_4$ 为待估参数, $\epsilon_{it}$ 为随机扰动项。

同时,本文基于生产要素投入、种植结构和作物单产等多重维度检验农地经营规模对作物种植碳排放和碳汇强度的影响路径,农地经营规模对作物种植净碳汇强度的影响路径可通过上述结果进行总结分析。由于农地经营规模与种植结构之间可能存在互为因果关系,农地经营规模的大小直接影响种植结构,反之种植结构也会影响农地经营规模,本文选取农地经营规模的滞后一期变量及其平方项作为工具变量进行参数估计,以解决模型潜在的内生性问题。滞后一期的农地经营规模与当期的农地经营规模高度相关,但对当期的种植结构不会产生直接影响,满足工具变量的相关性和外生性的条件。弱工具变量检验结果表明F统计量的最小值远大于经验值10,并且F统计量的最小值远大于弱工具变量偏差为10%的临界值,不存在弱工具变量问题,能够确保工具变量的有效性。同时,考虑到农地经营规模对生产要素投入强度、种植结构和作物单产的影响并非完全独立,本文构建联立方程模型(SEM)检验农地经营规模对中国种植业碳排放和碳汇强度的影响路径。由于三阶段最小二乘法(3SLS)能充分考虑模型的内生性问题与各方方程扰动项之间的相关性,本研究在引入工具变量后,采用3SLS方法对SEM模型进行估计,以保证估计结果的一致性和有效性。具体模型设定如下:

$$\begin{cases} \ln Input_{it} = \beta_0 + \beta_1 Scale_{it} + \beta_2 Scale_{it}^2 + \beta_3 Z_{it} + \beta_4 T_t + \sigma_i + \mu_{1,it} \\ \ln Structure_{it} = \gamma_0 + \gamma_1 Scale_{it} + \gamma_2 Scale_{it}^2 + \gamma_3 Z_{it} + \gamma_4 T_t + \sigma_i + \mu_{2,it} \\ \ln Yield_{it} = \delta_0 + \delta_1 Scale_{it} + \delta_2 Scale_{it}^2 + \delta_3 Z_{it} + \delta_4 T_t + \sigma_i + \mu_{3,it} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, $Input_{it}$ 、 $Structure_{it}$ 和 $Yield_{it}$ 分别表示与生产要素投入、种植结构和作物单产对应的影响路径变量。其中, $Input_{it}$ 表示生产要素投入强度,包括化肥、农药和农业机械的投入强度, $Structure_{it}$ 表示作物种植结构,包括水稻播种面积占比和粮食作物播种面积占比,前者用于检验农地经营规模通过改变水稻播种面积对稻田甲烷排放、从而对作物种植碳排放强度产生影响的途径,后者用于检验农地经营规模通过调整粮食作物和经济作物的种植结构对作物种植碳汇强度产生影响的途径。

$Yield_{it}$ 表示作物单产,包括粮食作物和经济作物单产,用于检验农地经营规模通过影响作物单产对作物种植碳汇强度产生影响的途径。以上变量均进行对数化处理。在进行影响路径检验的模型中,同样增加农地经营规模的二次项( $Scale_{it}^2$ )以考察农地经营规模与上述路径分析变量之间是否存在非线性关系。 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 和 $\beta_4$ 为待估参数, $\mu_{it}$ 为随机扰动项。

## 2. 变量选择与说明

(1)被解释变量。本文被解释变量为作物种植碳排放、碳汇和净碳汇强度,即单位面积的作物种植碳排放、碳汇和净碳汇量。本文选取大田作物核算作物种植碳排放、碳汇和净碳汇强度,包括水稻、小麦、玉米、大豆、棉花和油菜籽,占农作物总播种面积的比重高达70%。

1)作物种植碳排放强度。本文结合区域作物生产投入数据与相应的温室气体排放因子对碳排放强度进行核算,公式如下:

$$CE_i = \left( \sum_c \sum_s \sum_g T_{ics} \cdot EF_{icg} \cdot GWP_g \right) / A_i \quad (3)$$

其中, $CE_i$ 为*i*地区作物种植碳排放强度, $A_i$ 表示*i*地区作物的总播种面积。 $T_{ics}$ 为*i*地区作物*c*与碳源*s*相关的生产活动数据, $EF_{icg}$ 为*i*地区作物*c*与碳源*s*相关的温室气体*g*的排放因子, $GWP_g$ 为温室气体*g*的全球增温潜值,即将温室气体*g*排放量转换成 $CO_2$ 当量的系数。根据IPCC第六次综合报告,100年时间尺度下氧化亚氮( $N_2O$ )的全球增温潜值为273, $CH_4$ 的全球增温潜值为27.9。具体来看,农业化学品投入碳排放的生产活动数据为化肥、农药等化学品的投入量,对应的排放因子包括化学品生产、运输和施用过程中的温室气体排放因子。农用能源投入碳排放的生产活动数据包括农业机械使用过程中的柴油和电力消耗量,对应的排放因子为柴油和电力等能源的温室气体排放因子。水稻种植碳排放的生产活动数据为水稻播种面积,对应的排放因子为稻田 $CH_4$ 排放因子。本文选取的各类碳源排放因子考虑了作物和地区的差异性,种植业碳排放核算结果能够更加贴合中国的实际生产情况,各碳源排放因子参考Li等的研究<sup>[34]</sup>。

2)作物种植碳汇强度。作物种植的碳汇来源主要包括生物固碳和农田土壤固碳。生物固碳主要来源于作物在生长过程中通过光合作用吸收 $CO_2$ ,土壤固碳主要来自于农作物残留以及肥料施用。由于土壤固碳的内部动态运作机制极为复杂,且无法在短时间内形成稳定的碳汇,参考已有研究,在进行碳汇核算时没有将农田土壤固碳作用纳入考虑<sup>[22,45]</sup>。作物种植碳汇强度核算公式如下:

$$CS_i = \left( \sum_c Y_{ic} \cdot SR_c / HI_c \right) / A_i \quad (4)$$

其中, $CS_i$ 表示*i*地区作物种植碳汇强度, $A_i$ 表示*i*地区作物的总播种面积。 $Y_{ic}$ 为*i*地区作物*c*的经济产量; $SR_c$ 为作物*c*的碳吸收率,即作物*c*合成单位有机质所吸收的碳量; $HI_c$ 为作物*c*的经济系数,即作物的经济产量与生物产量的比例。农作物经济系数与碳吸收率参考杨果等的研究<sup>[45]</sup>。

3)作物种植净碳汇强度。作物种植净碳汇强度由碳汇强度减去碳排放强度得到,公式如下:

$$NC_i = CS_i - CE_i \quad (5)$$

(2)核心解释变量。本文的核心解释变量为农地经营规模。考虑到农地经营规模对种植业碳排放、碳汇和净碳汇可能存在非线性影响,在模型中同时引入农地经营规模的平方项。由于数据可得性问题,无法获取种植业从业人数数据,本文用农林牧渔从业人数代替种植业从业人数,由耕地面积除以农林牧渔从业人数衡量农地经营规模,尽管可能导致农地经营规模指标存在一定程度的低估,但不会对估计结果造成严重影响。

(3)路径分析变量。由于化肥、农药和机械等生产要素投入和稻田 $CH_4$ 排放是作物种植碳排放的重要来源,因此本文选取化肥投入强度、农药投入强度、机械投入强度和水稻播种面积占比为路径分析变量,探讨农地经营规模对作物种植碳排放强度的影响路径。同时,由于粮食作物的平均碳吸收率远高于经济作物,且作物的经济产量直接影响其生命周期内的碳吸收量<sup>[12]</sup>,故选取粮食作物播种面积占比、粮食和经济作物单产为路径分析变量,考察农地经营规模对作物种植碳汇强度的影响路径。

(4)控制变量。为了消除其他相关因素对估计结果的干扰,在模型中加入一系列控制变量。主要包括以下两类:第一,农业生产相关变量:农作物总播种面积和受灾面积占比;第二,农产品与投入要素的价格相关变量:作物相对价格指数(作物价格指数除以农产品价格指数)、农业生产资料(化肥、农药和柴油)相对价格指数(化肥、农药和柴油价格指数除以农业生产资料价格指数),并以2002年为基期对指数进行平减。

(5)数据来源与变量描述性统计分析。本文采用2002—2017年全国范围内的县级层面数据展开分析,数据主要来源于中国农业科学院的《中国分县农业农村经济数据库》。由于该数据库2017年之后收录的数据只覆盖少数县区,因此本文所采用的数据截止到2017年。尽管数据的时效性并非最新,但由于涵盖较长时间的全国县级层面的种植业生产信息,仍然能够有效地识别农地经营规模对作物种植碳排放、碳汇和净碳汇强度的边际影响。同时,由于数据库中仅统计了县级的氮肥施用总量,没有统计分作物的氮肥施用量,导致无法核算不同作物的农地 $N_2O$ 排放量,由于最大熵法能够最有效利用已有数据信息进行估计<sup>[46]</sup>,本研究采用最大熵法对县级层面分作物的氮肥施用量进行估算(详见附录)。价格指数、劳动力工资指数和灌溉费用等数据来自于《中国农村统计年鉴》、《中国统计年鉴》和《全国农产品成本收益资料汇编》。本文剔除部分关键变量遗漏严重的样本及异常值数据后,保留了我国除北京市、西藏和港澳台外的29个省(市、自治区),共1471个县的数据。变量说明与描述性统计见表1。

表1 变量说明与描述性统计分析

| 变量类别   | 变量含义            | 平均值   | 标准差    | 最小值      | 最大值      |
|--------|-----------------|-------|--------|----------|----------|
| 被解释变量  | 作物种植碳排放强度(吨/公顷) | 1.226 | 2.225  | 0.086    | 187.135  |
|        | 作物种植碳汇强度(吨/公顷)  | 3.689 | 2.550  | 0.000    | 200.932  |
|        | 作物种植净碳汇强度(吨/公顷) | 2.472 | 3.285  | -180.282 | 200.846  |
| 解释变量   | 农地经营规模(公顷/人)    | 0.510 | 0.956  | 0.000    | 43.952   |
|        | 农地经营规模平方项(公顷/人) | 1.174 | 25.334 | 0.000    | 1931.803 |
| 路径分析变量 | 化肥投入强度(吨/公顷)    | 0.831 | 4.728  | 0.000    | 286.691  |
|        | 农药投入强度(吨/公顷)    | 0.015 | 0.138  | 0.000    | 10.036   |
|        | 机械投入强度(千瓦/公顷)   | 4.813 | 5.310  | 0.000    | 317.593  |
|        | 水稻播种面积占比        | 0.315 | 0.201  | 0.000    | 1.000    |
|        | 粮食作物播种面积占比      | 0.569 | 0.153  | 0.049    | 1.000    |
|        | 粮食作物单产(吨/公顷)    | 5.698 | 1.541  | 0.447    | 47.351   |
|        | 经济作物单产(吨/公顷)    | 1.783 | 1.096  | 0.156    | 51.313   |
|        | 农作物总播种面积(万公顷)   | 6.092 | 5.421  | 0.028    | 65.009   |
|        | 作物受灾面积占比        | 0.264 | 0.225  | 0.000    | 0.881    |
|        | 化肥相对价格指数        | 1.001 | 0.089  | 0.688    | 1.259    |
| 控制变量   | 农药相对价格指数        | 0.781 | 0.127  | 0.563    | 1.152    |
|        | 柴油相对价格指数        | 1.059 | 0.118  | 0.758    | 1.486    |
|        | 水稻相对价格指数        | 0.995 | 0.143  | 0.514    | 1.630    |
|        | 粮食作物相对价格指数      | 0.983 | 0.120  | 0.655    | 1.320    |
|        | 经济作物相对价格指数      | 1.064 | 0.116  | 0.686    | 1.418    |

注:在实证分析中,被解释变量和路径分析变量进行取对数处理。

3. 特征性事实

在进行实证分析之前,本文结合样本数据对中国农地经营规模、种植业碳排放、碳汇和净碳汇强度的基本变化趋势进行特征事实分析。从图2可以看出,中国农地经营规模呈现明显的上升趋势,增长约为42.25%。与此同时,作物种植碳汇、碳排放及净碳汇强度也基本呈现增加态势,碳排放强度上升约1.10%,碳汇强度增加约为5.00%,净碳汇强度增加约7.15%。从结构上来看,就作物种植碳汇而言,水稻、玉米和小麦三大主粮作物的贡献较大,占比依次为37.02%、36.96%和12.37%,经济作

物只能发挥较小的碳汇作用。就作物种植碳排放而言,化肥投入为最大的碳排放来源,占比约为51.44%。稻田CH<sub>4</sub>排放和农药投入产生的碳排放占比也较大,分别约为27.65%和12.62%,机械和其他来源碳排放占比较小。通过上述分析,初步判断农地经营规模的增加伴随着作物种植碳汇、碳排放及净碳汇强度的同步变化,需借助实证分析方法进一步识别农地经营规模对作物种植净碳汇效应的边际影响。

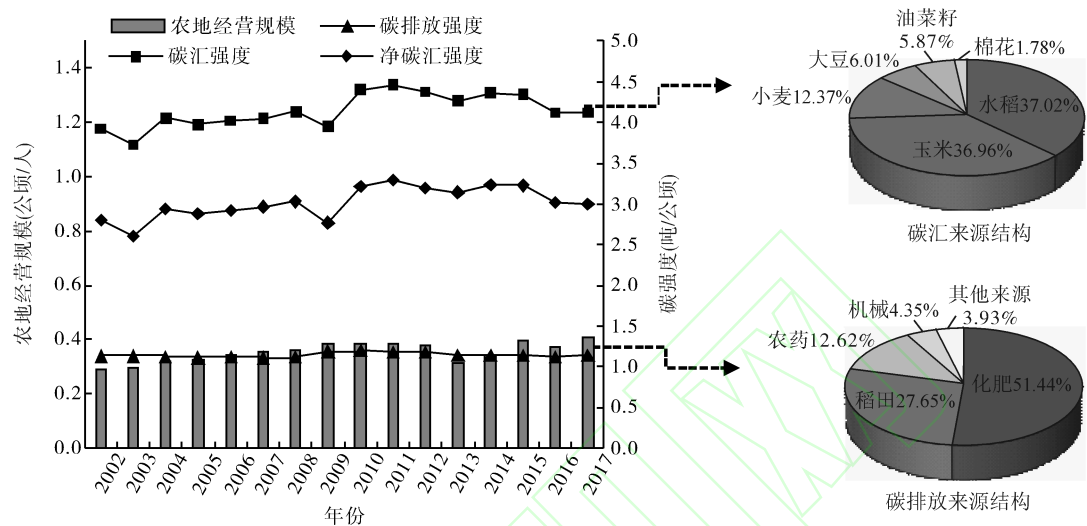


图2 农地经营规模与作物种植碳排放、碳汇和净碳汇强度变化及结构特征

三、基准回归结果与讨论

1. 基准回归结果

表2中第(1)、(3)和(5)列分别为农地经营规模对作物种植碳排放、碳汇和净碳汇强度的线性影响估计结果。由结果可知,农地经营规模对种植业碳排放、碳汇和净碳汇强度均造成了显著的线性影响。第(2)、(4)和(6)列分别汇报了同时加入农地经营规模及其平方项的模型估计结果,以识别农地经营规模对作物种植碳排放、碳汇和净碳汇强度的非线性影响。第(2)列结果表明,农地经营规模及其平方项对作物种植碳排放强度的影响分别显著为正和显著为负,表明随着农地经营规模的扩大,作物种植碳排放强度呈先增加后减少的“倒U型”变化趋势,拐点出现在农地经营规模为3.21公顷/人处。第(4)列中,农地经营规模及其平方项对作物种植碳汇强度的影响分别显著为负和显著为正,表明随着农地经营规模的扩大,作物种植碳汇强度呈先减少后增加的“U型”变化趋势,拐点出现在农地经营规模为2.06公顷/人处。第(6)列中,农地经营规模及其平方项对作物种植净碳汇强度的影响分别显著为负和显著为正,表明随着农地经营规模的增加,作物种植净碳汇强度呈“U型”变化趋势,拐点出现在农地经营规模为2.25公顷/人处。作物种植净碳汇强度的“U型”变化趋势主要由碳汇强度的变化趋势主导,由于作物种植碳排放强度呈现相反的“倒U型”变化趋势,净碳汇强度变化趋势的拐点出现在碳汇强度变化趋势的拐点之后。综上所述,本文中的假说H1、假说H3和假说H5均得到验证。

2. 稳健性检验

(1)“(倒)U型”关系检验。由于以二次项系数是否显著作为判断是否存在“(倒)U型”关系的标准过于薄弱,本文利用Utest方法对农地经营规模对作物种植碳排放、碳汇和净碳汇强度之间的变化关系进行进一步验证<sup>[47-48]</sup>。结果如表3所示,农地经营规模区间为0.00~43.95公顷/人之间,前文估计的极值点均处于该区间内。作物种植碳排放强度方程的左侧区间的斜率为显著为正,右侧区间斜率显著为负,农地经营规模对作物种植碳排放强度的影响呈“倒U型”变化的结果得以验证。同时,作物种植碳汇和净碳汇强度方程的左侧区间的斜率显著为负,右侧区间斜率显著为正,农地经营规

表 2 农地经营规模对作物种植碳排放、碳汇和净碳汇强度影响的基准回归结果 N=13518

| 变量             | 碳排放强度                            |                                  | 碳汇强度                             |                                  | 净碳汇强度                            |                                  |
|----------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|                | (1)                              | (2)                              | (3)                              | (4)                              | (5)                              | (6)                              |
| 农地经营规模         | −0.046 <sup>*</sup><br>(0.027)   | 0.045 <sup>***</sup><br>(0.017)  | 0.116 <sup>**</sup><br>(0.058)   | −0.099 <sup>***</sup><br>(0.031) | 0.057 <sup>*</sup><br>(0.032)    | −0.054 <sup>*</sup><br>(0.028)   |
| 农地经营规模平方项      |                                  | −0.007 <sup>***</sup><br>(0.000) |                                  | 0.024 <sup>***</sup><br>(0.005)  |                                  | 0.012 <sup>***</sup><br>(0.004)  |
| 农作物总播种面积       | −0.018 <sup>***</sup><br>(0.003) | −0.019 <sup>***</sup><br>(0.003) | −0.026 <sup>***</sup><br>(0.005) | −0.026 <sup>***</sup><br>(0.005) | −0.018 <sup>***</sup><br>(0.005) | −0.017 <sup>***</sup><br>(0.005) |
| 作物受灾面积占比       | 0.011<br>(0.009)                 | 0.008<br>(0.008)                 | 0.004<br>(0.014)                 | −0.000<br>(0.014)                | −0.008<br>(0.014)                | −0.010<br>(0.014)                |
| 化肥相对价格指数       | 0.064<br>(0.050)                 | 0.074<br>(0.051)                 | 0.333 <sup>***</sup><br>(0.101)  | 0.317 <sup>***</sup><br>(0.098)  | 0.243 <sup>**</sup><br>(0.101)   | 0.235 <sup>**</sup><br>(0.100)   |
| 柴油相对价格指数       | 0.048<br>(0.048)                 | 0.046<br>(0.048)                 | 0.256 <sup>***</sup><br>(0.074)  | 0.257 <sup>***</sup><br>(0.071)  | 0.209 <sup>***</sup><br>(0.070)  | 0.209 <sup>***</sup><br>(0.069)  |
| 农药相对价格指数       | 0.007<br>(0.057)                 | 0.020<br>(0.056)                 | 0.050<br>(0.079)                 | 0.032<br>(0.077)                 | −0.021<br>(0.074)                | −0.030<br>(0.073)                |
| 水稻相对价格指数       | 0.096 <sup>***</sup><br>(0.035)  | 0.086 <sup>**</sup><br>(0.035)   |                                  |                                  |                                  |                                  |
| 粮食作物相对价格指数     |                                  |                                  | −0.241 <sup>***</sup><br>(0.060) | −0.237 <sup>***</sup><br>(0.060) | −0.228 <sup>***</sup><br>(0.062) | −0.227 <sup>***</sup><br>(0.062) |
| 常数项            | −0.091<br>(0.100)                | −0.119<br>(0.101)                | 0.874 <sup>***</sup><br>(0.154)  | 0.968 <sup>***</sup><br>(0.148)  | 1.036 <sup>***</sup><br>(0.144)  | 1.085 <sup>***</sup><br>(0.142)  |
| 时间固定效应         | 已控制                              | 已控制                              | 已控制                              | 已控制                              | 已控制                              | 已控制                              |
| 地区固定效应         | 已控制                              | 已控制                              | 已控制                              | 已控制                              | 已控制                              | 已控制                              |
| R <sup>2</sup> | 0.141                            | 0.210                            | 0.063                            | 0.100                            | 0.040                            | 0.050                            |

注：①\*\*\*、\*\*和\*分别表示1%、5%和10%的显著性水平；②括号内为稳健标准误。下同。

模对作物种植碳汇和净碳汇强度的影响均呈“U型”变化的结果得到验证。

表 3 农地经营规模与作物种植碳排放、碳汇和净碳汇的关系检验结果(验证“(倒)U型”关系)

| 变量   | (1)   |         | (2)    |        | (3)    |        |
|------|-------|---------|--------|--------|--------|--------|
|      | 碳排放强度 |         | 碳汇强度   |        | 净碳汇强度  |        |
|      | 下限    | 上限      | 下限     | 上限     | 下限     | 上限     |
| 区间   | 0.000 | 43.952  | 0.000  | 43.952 | 0.000  | 43.952 |
| 斜率   | 0.045 | −0.583  | −0.099 | 2.011  | −0.054 | 1.016  |
| T值   | 2.659 | −18.720 | −3.235 | 5.230  | −1.940 | 3.480  |
| P> t | 0.040 | 0.000   | 0.001  | 0.000  | 0.026  | 0.000  |

(2)排除“S型”关系。为了排除农地经营规模与作物种植碳排放、碳汇和净碳汇强度之间存在“S型”关系的可能性,本文将农地经营规模的三次项加入模型重新进行估计。由表 4 可知,农地经营规模三次项均不显著,说明农地经营规模与作物种植碳排放、碳汇和净碳汇强度不存在“S型”关系,这为前文估计结果的稳健性进一步提供了支持。

四、影响路径结果与讨论

1. 农地经营规模对作物种植碳排放强度的影响路径检验结果

表 5 第(2)和(6)列结果表明,农地经营规模的平方项对化肥和机械投入强度的影响均显著为负,表明随着农地经营规模的增加,化肥和机械投入强度均呈“倒U型”变化趋势,拐点分别出现在经营规模为 1.97 公顷/人和 2.33 公顷/人处。这是因为在农地经营规模扩大初期,化肥和机械等现代农业

要素的使用对相对稀缺的劳动力产生替代作用，使得作物种植碳排放强度增加。当农地经营规模扩大到一定程度时，有利于农户采用测土配方施肥等现代生产方式和更加先进的农业机械，减少化肥和机械等生产要素的投入强度，从而促进作物种植碳减排。从第(3)和(4)列结果可以看出，农地经营规模对农药投入强度的影响显著为正，但农地经营规模平方项对农药投入强度的影响不显著，表明随着农地经营规模的增加，农药投入强度呈增加趋势。农地经营规模扩大促进作物单一化种植，导致生产过程中的病虫害风险增加，因此需要增加施用农药以降低产量下降的风险，从而导致作物种植碳排放强度增加。第(8)列中，农地经营规模及其平方项对水稻播种面积占比的影响分别显著为负和显著为正，表明随着农地经营规模扩大，水稻播种面积占比呈“U型”变化趋势，拐点出现在经营规模为3.88公顷/人处。当农地经营规模扩大初期，农户倾向于种植更多的经济作物，从而减少水稻种植，以实现利润最大化；随着农地经营规模的进一步扩大，农户会因劳动力成本的增加，减少劳动密集型经济作物的种植，转向增加水稻等土地密集型作物的种植，由此带来稻田CH<sub>4</sub>排放的“U型”变化。根据中国作物种植碳排放核算结果，化肥和机械投入所产生的碳排放在作物种植碳排放中所占比例远远高于农药和稻田CH<sub>4</sub>排放，其中化肥投入为最大的碳排放来源，因此农地经营规模扩大导致作物种植碳排放强度呈现“倒U型”变化趋势是由化肥投入强度的变化趋势主导，尽管农地经营规模对农药投入强度和水稻播种面积占比分别造成了线性增加和“U型”影响，但是不能扭转农地经营规模对作物种植碳排放强度造成的“倒U型”影响。因此，本文所提出的假说H<sub>2</sub>得到验证。

2. 农地经营规模对作物种植碳汇强度的影响路径检验结果

表6第(2)列结果表明，农地经营规模及其平方项对粮食作物播种面积占比的影响分别显著为负和显著为正，这表明随着农地经营规模扩大，粮食作物播种面积占比呈“U型”变化趋势，拐点出现在经营规模为3.20公顷/人处，变化趋势与上述水稻播种面积占比的“U型”变化趋势的解释相同。由于粮食作物的碳吸收率远高于经济作物<sup>[40]</sup>，粮食作物播种面积占比的“U型”变化趋势将会导致作物种植碳汇强度也呈现“U型”变化趋势。第(4)和(6)列中，农地经营规模的平方项对粮食作物和经济作物单产的影响均显著为负，这表明随着农地经营规模增加，作物单产均呈“倒U型”变化趋势，粮食作物和经济作物的拐点分别出现在经营规模0.65和0.57公顷/人处。在农地经营规模扩张的初始阶段，在收益最大化目标驱动下，农户会采用精耕细作的生产经营模式，使得作物单产提高，从而促进作物种植碳汇强度的增加；而随着农地经营规模的进一步扩大，作物单产会因土壤质量下降和劳动力监管成本上升等问题出现下降趋势，使得作物种植碳汇强度减少。综上所述，由于作物播种面积的变化是造成作物种植碳汇强度变化的决定性因素，因此农地经营规模扩大带来的作物种植碳汇强度呈现“U型”变化趋势是由种植结构由“非粮化”转向“趋粮化”的趋势主导，尽管农地经营规模对粮食和经济作物单产均造成了相反的“倒U型”影响，但是不能扭转农地经营规模通过种植结构调整对作物种植碳汇强度造成的“U型”影响。因此，本文所提出的假说H4得到验证。

3. 农地经营规模对作物种植净碳汇强度的影响路径结果分析

根据前文结果，随着农地经营规模的扩大，作物种植碳排放强度呈现“倒U型”变化趋势，拐点出现在人均经营规模为3.21公顷处；作物种植碳汇强度呈现“U型”变化趋势，拐点出现在人均经营规模为2.06公顷处；作物种植净碳汇强度呈“U型”变化趋势，拐点出现在人均经营规模为2.25公顷处。

表4 农地经营规模与作物种植碳排放、碳汇和净碳汇强度的关系检验结果(排除“S型”关系)N=13518

| 变量             | (1)               | (2)                  | (3)                 |
|----------------|-------------------|----------------------|---------------------|
|                | 碳排放强度             | 碳汇强度                 | 净碳汇强度               |
| 农地经营规模         | 0.024<br>(0.022)  | -0.159***<br>(0.051) | -0.106**<br>(0.043) |
| 农地经营规模平方项      | -0.004<br>(0.004) | 0.045***<br>(0.016)  | 0.030**<br>(0.012)  |
| 农地经营规模三次项      | -0.000<br>(0.000) | -0.001<br>(0.001)    | -0.001<br>(0.001)   |
| 常数项            | -0.108<br>(0.101) | 0.996***<br>(0.148)  | 1.110***<br>(0.142) |
| 控制变量           | 已控制               | 已控制                  | 已控制                 |
| 时间固定效应         | 已控制               | 已控制                  | 已控制                 |
| 地区固定效应         | 已控制               | 已控制                  | 已控制                 |
| R <sup>2</sup> | 0.210             | 0.101                | 0.051               |

表 5 农地经营规模对作物种植碳排放强度的影响路径检验结果(SEM—3SLS) N=2157

| 变量             | 化肥投入强度    |           | 农药投入强度    |           | 机械投入强度    |           | 水稻播种面积占比  |           |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                | (1)       | (2)       | (3)       | (4)       | (5)       | (6)       | (7)       | (8)       |
| 农地经营规模         | -0.150*   | 0.197     | 0.132**   | 0.242**   | -0.066    | 0.126     | -0.018    | -0.194**  |
|                | (0.090)   | (0.193)   | (0.053)   | (0.113)   | (0.047)   | (0.100)   | (0.036)   | (0.076)   |
| 农地经营规模平方项      |           | -0.050**  |           | -0.016    |           | -0.027**  |           | 0.025***  |
|                |           | (0.022)   |           | (0.013)   |           | (0.011)   |           | (0.009)   |
| 作物总播种面积        | -0.110*** | -0.111*** | 0.019***  | 0.019***  | -0.009*** | -0.010*** | 0.008***  | 0.009***  |
|                | (0.005)   | (0.005)   | (0.003)   | (0.003)   | (0.003)   | (0.003)   | (0.002)   | (0.002)   |
| 作物受灾面积占比       | -0.265**  | -0.277**  | 0.142*    | 0.138*    | -0.045    | -0.052    | 0.080     | 0.087*    |
|                | (0.125)   | (0.125)   | (0.073)   | (0.074)   | (0.065)   | (0.065)   | (0.049)   | (0.049)   |
| 化肥相对价格指数       | -1.730*** | -1.811*** |           |           |           |           |           |           |
|                | (0.618)   | (0.619)   |           |           |           |           |           |           |
| 农药相对价格指数       |           |           | 0.331     | 0.334     |           |           |           |           |
|                |           |           | (0.446)   | (0.447)   |           |           |           |           |
| 柴油相对价格指数       |           |           |           |           | -0.220    | -0.163    |           |           |
|                |           |           |           |           | (0.321)   | (0.320)   |           |           |
| 水稻相对价格指数       |           |           |           |           |           |           | 0.502***  | 0.509***  |
|                |           |           |           |           |           |           | (0.170)   | (0.170)   |
| 常数项            | 1.275     | 1.137     | -6.253*** | -6.327*** | 1.872***  | 1.688***  | -3.681*** | -3.573*** |
|                | (0.821)   | (0.823)   | (0.517)   | (0.526)   | (0.422)   | (0.427)   | (0.246)   | (0.249)   |
| 时间固定效应         | 已控制       | 已控制       | 已控制       | 已控制       | 已控制       | 已控制       | 已控制       | 已控制       |
| 地区固定效应         | 已控制       | 已控制       | 已控制       | 已控制       | 已控制       | 已控制       | 已控制       | 已控制       |
| R <sup>2</sup> | 0.245     | 0.247     | 0.393     | 0.393     | 0.285     | 0.287     | 0.586     | 0.588     |

表 6 农地经营规模对作物种植碳汇强度的影响路径检验结果(SEM—3SLS) N=2157

| 变量             | 粮食作物面积占比 |           | 粮食作物单产    |           | 经济作物单产    |          |
|----------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
|                | (1)      | (2)       | (3)       | (4)       | (5)       | (6)      |
| 农地经营规模         | 0.014    | -0.160*** | -0.099*** | 0.022     | -0.088*** | 0.017    |
|                | (0.018)  | (0.040)   | (0.016)   | (0.034)   | (0.026)   | (0.056)  |
| 农地经营规模平方项      |          | 0.025***  |           | -0.017*** |           | -0.015** |
|                |          | (0.004)   |           | (0.004)   |           | (0.006)  |
| 作物总播种面积        | 0.007*** | 0.007***  | 0.000     | -0.000    | -0.001    | -0.001   |
|                | (0.001)  | (0.001)   | (0.001)   | (0.001)   | (0.002)   | (0.002)  |
| 作物受灾面积占比       | 0.024    | 0.030     | 0.035     | 0.031     | 0.011     | 0.007    |
|                | (0.026)  | (0.026)   | (0.022)   | (0.022)   | (0.036)   | (0.036)  |
| 粮食作物相对价格指数     | -0.101   | -0.084    | 0.197**   | 0.185**   |           |          |
|                | (0.097)  | (0.097)   | (0.089)   | (0.089)   |           |          |
| 经济作物相对价格指数     |          |           |           |           | 0.398***  | 0.395*** |
|                |          |           |           |           | (0.143)   | (0.142)  |
| 常数项            | -0.186   | -0.089    | 1.705***  | 1.638***  | -0.081    | -0.144   |
|                | (0.134)  | (0.135)   | (0.119)   | (0.120)   | (0.215)   | (0.216)  |
| 时间固定效应         | 已控制      | 已控制       | 已控制       | 已控制       | 已控制       | 已控制      |
| 地区固定效应         | 已控制      | 已控制       | 已控制       | 已控制       | 已控制       | 已控制      |
| R <sup>2</sup> | 0.237    | 0.242     | 0.280     | 0.289     | 0.286     | 0.290    |

作物种植净碳汇强度的变化趋势主要由作物种植碳汇强度的变化趋势主导,由于作物种植碳排放强度与碳汇强度呈现相反的变化趋势,作物种植净碳汇强度的拐点出现在作物种植碳汇强度的拐点之后。就农地经营规模影响作物种植净碳汇强度的路径而言,仍然可以从农地经营规模分别影响生产

要素投入强度、作物种植结构和单产几条路径进行解释。由于作物种植的碳汇效应远超过碳排放效应,由前文分析可知,农地经营规模的扩大导致种植结构由“非粮化”转向“趋粮化”,这一变化是导致作物种植碳汇强度呈现“U型”变化特征的主导因素,进而成为作物种植净碳汇强度呈现相同“U型”变化趋势的决定性因素。与此同时,农地经营规模的增加导致化肥投入强度呈现“倒U型”变化特征,这将会引起作物种植净碳汇强度的“U型”变化曲线的拐点相较于作物种植碳汇强度的“U型”变化曲线的拐点向右偏移。尽管作物单产和其他要素投入强度的不同变化趋势可能会对上述路径产生一定的干扰,但均不构成决定性因素。

4. 稳健性检验

该部分同样利用Utest方法对农地经营规模对作物种植碳排放强度和碳汇强度的影响路径的“(倒)U型”关系进行进一步验证。结果如表7所示,农地经营规模区间为0.00~43.95公顷/人之间,存在“(倒)U型”影响的路径估计结果的极值点均处于该区间内。化肥投入强度、机械投入强度、粮食作物单产和经济作物单产等影响路径方程的左侧区间的斜率为显著为正,右侧区间斜率显著为负,表明农地经营规模对化肥和机械投入强度以及粮食作物和经济作物单产的影响呈“倒U型”变化的结果能够得以验证。同时,水稻播种面积占比和粮食作物播种面积占比的影响路径方程的左侧区间的斜率为显著为负,右侧区间斜率显著为正,农地经营规模对水稻和粮食作物播种面积占比的影响呈“U型”变化的结果同样得以验证。因此,估计结果具有稳健性。

表7 农地经营规模对作物种植碳排放强度和碳汇强度的影响路径的“(倒)U型”关系检验结果

| 变量      | (1)    |         | (2)    |        | (3)      |        |
|---------|--------|---------|--------|--------|----------|--------|
|         | 化肥投入强度 |         | 机械投入强度 |        | 水稻播种面积占比 |        |
|         | 下限     | 上限      | 下限     | 上限     | 下限       | 上限     |
| 区间      | 0.000  | 43.952  | 0.000  | 43.952 | 0.000    | 43.952 |
| 斜率      | 0.056  | -0.756  | 0.078  | -1.373 | -0.843   | 4.452  |
| T值      | 1.965  | -11.274 | 1.702  | -4.138 | -19.593  | 12.318 |
| $P> t $ | 0.025  | 0.000   | 0.045  | 0.000  | 0.000    | 0.000  |

| 变量      | (4)        |        | (5)    |        | (6)    |        |
|---------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|         | 粮食作物播种面积占比 |        | 粮食作物单产 |        | 经济作物单产 |        |
|         | 下限         | 上限     | 下限     | 上限     | 下限     | 上限     |
| 区间      | 0.000      | 43.952 | 0.000  | 43.952 | 0.000  | 43.952 |
| 斜率      | -0.057     | 1.227  | 0.051  | -1.673 | 0.123  | -2.386 |
| T值      | -2.675     | 4.644  | 1.896  | -6.782 | 3.154  | -6.830 |
| $P> t $ | 0.004      | 0.000  | 0.029  | 0.000  | 0.001  | 0.000  |

五、结论与启示

1. 研究结论

本文基于全国范围内县级层面数据,在核算中国作物种植碳排放、碳汇和净碳汇强度的基础上,探究农地经营规模对作物种植碳排放强度、碳汇强度及净碳汇强度的影响,并从农业生产要素投入、种植结构和作物单产多重维度分析其中的影响路径。研究结论如下:第一,随着农地经营规模的扩大,中国作物种植碳排放强度呈“倒U型”变化趋势,拐点出现在农地经营规模为3.21公顷/人处。农地经营规模增加引起的作物种植碳排放强度“倒U型”变化由化肥投入强度的“倒U型”变化主导,尽管农地经营规模扩大同时对农药投入强度和水稻播种面积占比分别造成了线性增加和“U型”影响,但是不能扭转碳排放强度的“倒U型”变化趋势。第二,随着农地经营规模的扩大,中国作物种植碳汇强度呈“U型”变化趋势,拐点出现在农地经营规模为2.06公顷/人处。农地经营规模扩大带来的作物种植碳汇强度“U型”变化趋势主要由种植结构从“非粮化”转向“趋粮化”的趋势决定,尽管农地经营规模增加对作物单产造成了相反的“倒U型”影响,但无法扭转作物种植碳汇强度的“U型”变

化趋势。第三,随着农地经营规模的增加,中国作物种植净碳汇强度呈“U型”变化趋势,拐点出现在农地经营规模为2.25公顷/人处。作物种植净碳汇强度的“U型”变化趋势主要由碳汇强度的变化趋势主导,由于作物种植碳排放强度呈现相反的“倒U型”变化趋势,净碳汇强度变化趋势的拐点出现在碳汇强度变化趋势的拐点之后。第四,鉴于作物种植的碳汇效应远超过碳排放效应,农地经营规模扩大引起种植结构由“非粮化”转向“趋粮化”是导致作物种植碳汇强度呈“U型”变化并最终决定作物种植净碳汇强度“U型”变化趋势的关键因素。尽管农地经营规模的增加导致化肥投入强度呈现“倒U型”变化,但未能逆转净碳汇强度的“U型”变化趋势。

## 2. 政策启示

(1)促进长期低碳发展。从长期来看,农地规模化经营转型有助于提升中国种植业的净碳汇效应。因此,应加快推进规模化经营转型,推动种植业低碳发展。为此,政策应着重以下具体措施。第一,提供财政支持和补贴。设立专项财政支持和补贴,鼓励农民扩大经营规模、提升农业生产效能。针对中小农户,可通过资金扶持、贷款优惠等方式,降低其转型的经济负担。第二,完善土地流转机制。通过政策引导和法律保障,推动土地流转市场的健康发展,优化土地资源配置,促进土地集中连片经营。简化土地流转手续,加强产权保护,确保土地流转顺畅进行。第三,鼓励合作社与农业企业参与。鼓励农民组建合作社或与农业企业进行合作,实现土地、资金、技术、人才等资源的共享和集中利用,进一步提升规模化经营效率,推动整体生产力的提升。

(2)应对短期碳排放增加。从短期来看,农地经营规模的扩大会导致作物种植碳排放增加,进而抑制净碳汇效应。因此,在规模化经营转型的初期阶段,应采取以下政策措施。第一,推广绿色低碳生产技术。加大绿色低碳生产技术的宣传和培训力度,鼓励农民采用精准施肥、滴灌、覆盖种植等高效低碳的生产方式。通过补贴政策支持农民购买节能设备和环保技术,减少碳排放。第二,合理控制农业化学品投入。出台农业化学品使用标准和监管措施,限制化肥和农药的过度使用,推动农民转向有机肥料和生物农药。通过农技推广服务为农民提供科学施肥和用药指导,实施精准施肥技术,减少化学品浪费。第三,优化作物品种结构。根据不同地区的气候、土壤和资源禀赋,制定因地制宜的作物品种结构调整方案,优先推广适应当地气候条件、高效吸碳的作物品种。减少碳排放较高的经济作物种植,鼓励多样化种植模式,以提升种植业的减排和碳汇能力。

(3)国际经验借鉴。对于其他正在或即将经历农业规模化经营转型的国家,本研究结论具有重要借鉴意义。这些国家在推动农业规模化经营转型时应着重以下几方面。第一,协调短期和长期发展目标。通过逐步优化生产要素投入结构,出台逐步减少对高排放投入品(如化肥、农药、柴油等)的依赖政策,转向低碳、高效的替代品。设立专项资金,鼓励农民采纳绿色技术(如精准农业、数字化农田监控技术、生态农业等),减少农业生产过程中的碳排放。第二,根据当地农业特点和资源禀赋,制定科学合理的种植结构调整方案。根据当地的气候、土壤条件和水资源等特点,制定适应性强的种植结构调整政策。通过生态补贴政策奖励采用生态友好型种植模式(如轮作、间作、有机种植)的生产者,推动低碳和可持续农业转型。第三,强化国际农业技术合作,推广适用于转型期较小规模经营主体的绿色低碳生产技术。鼓励各国共享成功的低碳农业技术,如低碳农业生产设备、精准施肥技术等,通过国际合作帮助发展中国家在提高农业生产效率的同时实现减排增汇,推动全球农业低碳化发展,以有效应对全球气候变化。

## 参 考 文 献

- [1] 潘根兴. 中国土壤有机碳库及其演变与应对气候变化[J]. 气候变化研究进展, 2008(5):282-289.
- [2] MAYER A, HAUSFATHER Z, JONES A D, et al. The potential of agricultural land management to contribute to lower global surface temperatures[J]. Science Advances, 2018, 4(8): eaaq0932.
- [3] 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.
- [4] 何可, 汪昊, 张俊飏. “双碳”目标下的农业转型路径: 从市场中来到“市场”中去[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2022(1): 1-9.

- [5] 徐志刚. 发展规模化经营[J]. 农业经济与管理, 2023(1): 13-16.
- [6] WANG S, BAI X., ZHANG X, et al. Urbanization can benefit agricultural production with large-scale farming in China[J]. *Nature Food*, 2021, 2(3): 183-191.
- [7] HUANG J, DING J. Institutional innovation and policy support to facilitate small-scale farming transformation in China[J]. *Agricultural Economics*, 2016, 47(S1): 227-237.
- [8] 仇童伟, 罗必良. 农业要素市场建设视野的规模经营路径[J]. 改革, 2018(3): 90-102.
- [9] WU Y, XI X, TANG X, et al. Policy distortions, farm size, and the overuse of agricultural chemicals in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(27): 7010-7015.
- [10] QIU T, CHOY S T B, LI S, et al. Does land renting-in reduce grain production? Evidence from rural China[J]. *Land Use Policy*, 2020, 90: 104311.
- [11] 仇焕广, 刘乐, 李登旺, 等. 经营规模、地权稳定性与土地生产率: 基于全国4省地块层面调查数据的实证分析[J]. 中国农村经济, 2017(6): 30-43.
- [12] 李克让. 土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环[M]. 北京: 气象出版社, 2002: 260-265.
- [13] 陈罗焯, 薛领, 雪燕. 中国农业净碳汇时空演化特征分析[J]. 自然资源学报, 2016, 31(04): 596-607.
- [14] 吴昊玥, 孟越, 黄瀚蛟, 等. 中国耕地利用净碳汇与农业生产的时空耦合特征[J]. 水土保持学报, 2022, 36(05): 360-368+376.
- [15] 戴小文, 陈逸, 何艳秋, 等. 中国农业净碳汇的时空分异及耦合特征分析: 以2000—2022年为例[J/OL]. 环境科学, 2025, 1-20.
- [16] 周镨基, 刘璇, 皮修平. 外部性视阈下湖南省水稻生产净碳汇时空演绎及驱动因素分析[J/OL]. 环境科学, 2025, 1-19.
- [17] 田云, 王骁睿, 尹志昊, 等. 中国农业净碳汇再测算: 现状特征、时空格局及其影响因素[J]. 中国农业科学, 2024, 57(22): 4507-4521.
- [18] WANG L, SHI P, LUO J, et al. Region-county characteristics of spatiotemporal dynamic evolution and influencing factors on agricultural net carbon sink in Hexi region of Gansu Province[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 169: 112817.
- [19] SHEN X, YAN R, JIANG M. How does planting structure change affect the agricultural net carbon sink? Evidence from the Jiangsu coastal economic Belt[J]. *Ecological Indicators*, 2025, 170: 112949.
- [20] 贯君, 张少鹏, 任月, 等. 中国农业净碳汇时空分异与影响因素演进分析[J]. 中国环境科学, 2024, 44(02): 1158-1170.
- [21] 李园园, 薛彩霞, 柴朝卿, 等. 中国保护性耕作净碳汇的时空分异特征及其驱动力[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(10): 15-23.
- [22] 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, (06): 123-134.
- [23] 田云, 张君. 地理分区视角下的农业碳效应驱动机理研究[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2020, (02): 78-87+165-166.
- [24] 李波, 王春好, 张俊飏. 中国农业净碳汇效率动态演进与空间溢出效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(12): 68-76.
- [25] 田云, 张俊飏, 罗小锋. 中国种植业净碳效益与经济效益协调性区域比较研究[J]. 经济地理, 2014, 34(03): 142-148.
- [26] 钱力, 张轲, 宋俊秀. 数字普惠金融能否促进农业净碳汇效率——基于面板门槛模型的检验[J]. 经济学报, 2024, 11(04): 123-149.
- [27] 王珊珊, 张广胜. 非农就业对农户碳排放行为的影响研究: 来自辽宁省辽中县的证据[J]. 资源科学, 2013, 35(9): 1855-1862.
- [28] 谷保静, 段佳莹, 任琛琛, 等. 规模化经营推动中国农业绿色发展[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5): 709-715.
- [29] 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(111): 40-58.
- [30] 魏梦升, 颜廷武, 罗斯炫. 规模经营与技术进步对农业绿色低碳发展的影响: 基于设立粮食主产区的准自然实验[J]. 中国农村经济, 2023(2): 41-65.
- [31] YAN M, LUO T, BIAN R, et al. A comparative study on carbon footprint of rice production between household and aggregated farms from Jiangxi, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(6): 1-13.
- [32] ORTIZ-GONZALO D, VAAST P, OELOFSE M, et al. Farm-scale greenhouse gas balances, hotspots and uncertainties in small-holder crop-livestock systems in Central Kenya[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 248: 58-70.
- [33] 刘琼, 肖海峰. 土地经营规模与财政支农政策对农业碳排放的影响[J]. 资源科学, 2020, 42(6): 1063-1073.
- [34] LI Y, YI F, YUAN C. Influences of large-scale farming on carbon emissions from cropping: evidence from China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2023, 22(10): 3209-3219.
- [35] 张露, 罗必良. 农业减量化: 农户经营的规模逻辑及其证据[J]. 中国农村经济, 2020(2): 81-99.
- [36] 易小燕, 陈印军. 农户转入耕地及其“非粮化”种植行为与规模的影响因素分析: 基于浙江、河北两省的农户调查数据[J]. 中国农村观察, 2010(6): 2-10.
- [37] 曾福生. 建立农地流转保障粮食安全的激励与约束机制[J]. 农业经济问题, 2015(1): 15-23.
- [38] 徐志刚, 谭鑫, 郑旭媛, 等. 农地流转市场发育对粮食生产的影响与约束条件[J]. 中国农村经济, 2017(9): 26-43.
- [39] 毕雪昊, 周佳宁, 邹伟. 家庭劳动力约束下经营规模对农户种植结构选择的影响[J]. 中国土地科学, 2020, 34(12): 68-77.
- [40] 谢婷, 张慧, 苗洁, 等. 湖北省农田生态系统温室气体排放特征与源汇分析[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5): 839-848.

- [41] 陈杰,苏群.土地流转、土地生产率与规模经营[J].农业技术经济,2017(1):28-36.
- [42] 丁吉萍,黄季焜,盛誉.从单产和利润再看农户适度规模经营:来自东北、华北农户粮食生产的实证分析[J].农林经济管理学报,2021,20(1):19-28.
- [43] 郑志浩,高杨,霍学喜.农户经营规模与土地生产率关系的再探究:来自第三次全国农业普查规模农户的证据[J].管理世界,2024,40(1):89-108.
- [44] 赵荣钦,秦明周.中国沿海地区农田生态系统部分碳源/汇时空差异[J].生态与农村环境学报,2007(2):1-6,11.
- [45] 杨果,陈瑶.中国农业源碳汇估算及其与农业经济发展的耦合分析[J].中国人口·资源与环境,2016,26(12):171-176.
- [46] WANG T, YI F, WU X, et al. Calamitous weather, yield risk and mitigation effect of harvest mechanisation: Evidence from China's winter wheat[J]. Australian Journal of Agricultural and Resource Economics, 2024, 68(2): 386-412.
- [47] 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.
- [48] 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.

## “Promote” or “Inhibit”: How Does Farmland Operation Scale Expansion Affect the Net Carbon Sequestration Effect in Crop Production?

LI Yaling, CHEN Tongqin, YI Fujin\*

**Abstract** China's crop production sector holds significant potential for emission reduction and carbon sequestration, playing a crucial role in achieving the “Dual Carbon” goals. Based on county-level data across China, this study employs a fixed effects model to analyze the impact of FOS on carbon emission intensity, carbon sequestration intensity, and net carbon sequestration intensity in crop production. A simultaneous equations model is further applied to examine influencing pathways through multidimensional factors, including input intensity, cropping structure, and crop yield. The results reveal that: (1) As FOS expands, the net carbon sequestration intensity of crop production follows a “U-shaped” curve, with an inflection point at a per capita FOS of 2.25 hectares. Specifically, carbon emission intensity exhibits an “inverted U-shaped” trend, while carbon sequestration intensity shows a “U-shaped” pattern, with the latter dominating the net carbon sequestration dynamics. (2) The “inverted U-shaped” trajectory of carbon emission intensity is primarily driven by fertilizer input intensity, which similarly follows an “inverted U-shaped” response to FOS expansion. (3) The transition in cropping structure from “non-grain-oriented” to “grain-oriented” practices, induced by FOS expansion, is the key factor behind the “U-shaped” trend in carbon sequestration intensity. Given that the carbon sequestration effect of crop production far outweighs its emission effect, this structural shift also becomes the decisive factor for the “U-shaped” net carbon sequestration intensity. Therefore, accelerating the transition to large-scale agricultural operations is essential for long-term low-carbon development in crop production. However, during the initial stages of this transition, targeted policy interventions are necessary to mitigate potential adverse impacts on emission reduction and carbon sequestration.

**Key words** farmland operation scale; crop production; carbon emissions; carbon sequestration; net carbon sequestration

(责任编辑:金会平)