

# 农业科技创新对粮食生产碳排放的影响

## ——以中国三大粮食功能区为例

韩冬<sup>1</sup>, 钟钰<sup>2\*</sup>

1. 河南工学院管理学院, 新乡 453002

2. 中国农业科学院农业经济与发展研究所, 北京 100081

**摘要** 以中国三大粮食功能区 2011—2020 年面板数据为样本, 构建农业科技创新量化指标体系, 测算农业科技创新及粮食生产碳排放量水平, 并以动态面板模型检验了农业科技创新对粮食生产碳排放的抑制作用及影响路径。研究表明: 2011—2020 年三大粮食功能区的农业科技创新水平呈现上升趋势、粮食生产碳排放量有所下降, 组间异质性明显; 农业科技创新对粮食生产碳排放量有明显的抑制作用, 这一作用在粮食主销区更加显著; 技术效应和人力资本效应在农业科技创新减碳过程中发挥了重要作用。建议加快农业科技创新步伐, 继续以农业科技创新实现粮食生产中的碳减排, 重视生产效率、资源利用效率及人力资本水平的提升, 并根据三大粮食功能区的异质性制定减碳相应政策, 实现粮食产业绿色升级转型。

**关键词** 农业科技创新; 粮食生产; 碳排放

探寻粮食生产碳排放减量机制是推动中国粮食产业走高质量发展之路、实现中国“双碳”目标的关键举措。2023 年中央一号文件指出, 要推动乡村产业高质量发展、推进农业绿色发展。截至 2022 年中国粮食生产已经实现“十八连丰”, 有力保障了口粮绝对安全, 但在中国粮食生产能力不断

增强的同时, 粮食生产赖以依存的资源环境也付出了较大代价<sup>[1]</sup>。农药化肥过度施用引发的面源污染<sup>[2]</sup>, 地下水超采形成“漏斗区”与水资源濒临枯竭<sup>[3]</sup>, 耕地只用不养、超强开发引发地力下降<sup>[4]</sup>以及农业碳排放日益加剧等问题<sup>[5]</sup>, 不仅已成为制约粮食持续增产的关键, 也是影响粮食质量安全的严重

收稿日期: 2023-02-26; 修回日期: 2023-05-16

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(21ZDA056); 中国农业科学院科技创新工程项目(10-IAED-01-2022); 国家社会科技基金青年项目(22CJY018); 河南科技智库调研课题(HNKJZK-2023-03B)

作者简介: 韩冬, 讲师, 研究方向为粮食安全、粮食贸易, 电子信箱: handong0326@163.com; 钟钰(通信作者), 研究员, 研究方向为粮食安全、农产品贸易, 电子信箱: zhongyu@caas.cn

引用格式: 韩冬, 钟钰. 农业科技创新对粮食生产碳排放的影响——以中国三大粮食功能区为例[J]. 科技导报, 2023, 41(16): 32-42; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.16.003

隐患。可见,以牺牲资源环境为代价的粮食增产模式不可持续,中国粮食产业亟需走出一条资源消耗少、环境保护好之路。2020年9月,中国明确提出了力争2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和的“双碳”目标。当前中国农粮系统产生的二氧化碳量占中国碳排放总量的14%<sup>[6-7]</sup>,推动粮食产业碳减排有助于实现“双碳”目标。因此,以“双碳”目标为契机、以绿色可持续发展为目的,推动粮食产业碳减排并探寻粮食产业碳减排的影响因素和作用机制,对保障中国粮食数量、质量安全以及守好“三农”基本盘具有重要现实意义。

现有研究围绕农业碳减排已经取得较为丰富的成果,主要聚焦于3个方面。一是农业碳排放量的计算方法,已有研究多采用碳源法,即根据碳排放的来源和系数汇总计算碳排放总量。田红宇和关洪浪<sup>[5]</sup>根据各类碳源的碳排放系数和化肥、农药、农膜等碳源使用数量汇总计算中国粮食生产中的碳排放总量,田云和吴海涛<sup>[8]</sup>根据畜牧业碳源及对应系数计算中国畜牧业产生的碳排放总量。二是农业碳排放的区域分布特征。现有研究指出中国农业碳排放量明显下降,但区域之间以及区域内部存在差异,东部地区碳排放量下降趋势更显著,碳排放高强度省域稳定、低强度省域扩大,粮食主销区内部碳排放强度差距进一步扩大<sup>[7-10]</sup>。三是农业碳排放的影响因素。化肥施用量、粮食作物种植面积显著影响了农业碳排放量<sup>[11-12]</sup>。科技创新对农业碳排放量也有显著影响,但其影响似乎具有两面性,科技创新促进了粮食“清洁生产”,带来了碳减排效应<sup>[5]</sup>,但科技创新也带来了农业经济增长、资源投入增加,反而提升了农业碳排放量<sup>[13]</sup>。具体到粮食产业,已有研究肯定了中国粮食生产中的碳排放量超标现象和省际碳排放强度具有较强的异质性,指出了粮食生产的“高碳-低效益”特征<sup>[10,14-15]</sup>,同时提出了粮食主产区普遍存在碳排放的回弹效应<sup>[13]</sup>,新疆、黑龙江和河南等省份和自治区的农膜、化肥和灌溉等产生的碳排放量逐年上升<sup>[16]</sup>。

习近平总书记曾多次指出“绿水青山就是金山银山”,以绿色低碳促进中国粮食产业转型升级、助力“双碳”目标实现,是推动生态文明建设与积极履

行大国责任的重要体现。现有研究围绕中国农业碳排放取得了较为丰富的研究成果,也探讨了科技创新对农业碳排放量的影响,但针对粮食产业碳排放量的变化情况现有研究并未取得一致的研究结论,且探讨农业科技创新促进碳减排的机制方面相对较少。在“谷物基本自给、口粮绝对安全”与“绿色可持续”的双重目标下,以农业科技创新推动粮食产业转型升级并以此实现粮食产业碳减排,不仅是落实粮食持续增产的可行路径,也是满足人民“吃的健康”的粮食质量安全的必然选择。据此,本研究在分析农业科技创新对粮食生产碳排放量影响机理基础上,剖析中国各省份粮食产业碳排放量、农业科技创新演变情况,并实证检验农业科技创新对粮食产业碳排放量的影响路径。

## 1 理论分析及假设提出

碳排放指的是生产生活中产生的二氧化碳。作为生产活动的重要组成部分,粮食生产也会形成碳排放。例如,粮食生产需要投入化肥、农药、农膜等农资,农资的生产与使用会产生碳排放;其次,粮食生产中农用机械耗费的柴油等化石燃料燃烧会引起碳排放;再者,灌溉、翻耕等活动需要耗费电能,发电过程也会带来碳排放。

降低农业生产碳排放的主要方法为减少“碳源”生产要素投入和提高生产要素使用效率,科技创新能降低能源耗费、促进节能减排<sup>[17]</sup>,是上述2种方法得以实现的前提<sup>[5]</sup>。在降低“碳源”生产要素投入方面,科技进步能够促进“清洁生产”,推动传统农业向“低碳”转型<sup>[18-19]</sup>。第一,近年来广泛使用的测土配方施肥、病虫害绿色防控、秸秆还田等技术,实现了粮食生产中的合理施肥施药和资源循环利用,降低了碳排放。第二,以数字化为代表的科技创新有助于实现粮食生产精细化、科学化管理,如大数据、卫星遥感监测、作物生长诊断调控等技术的使用,实现了粮食生产的精准作业,降低了化肥、农药等生产资料投入,从而降低了碳排放。在提高生产要素使用效率方面,科技创新有助于优化要素资源配置,提升生产效率,降低碳排放强度<sup>[20-22]</sup>。

近年来以数字化为方向的科技创新,优化了粮食生产中的要素资源配置,并对资本、劳动力等其他要素的效率提升具有倍增作用<sup>[23]</sup>,在保障粮食产出水平的前提下降低了碳排放强度。

基于上述分析,提出本文第1个研究假设,即H<sub>1</sub>:农业科技创新能够降低粮食生产中的碳排放量。农业科技创新通过“技术效应”的直接作用与“人力资本效应”的间接作用实现了粮食生产中的碳排放量下降。从直接作用来讲,农业科技创新显著提升了粮食单产,在保障产量的同时降低了粮食碳排放量。近年来中国在良种培育、种植与生产技术等方面取得了重大突破,农业技术对农业产出增长贡献率持续上涨,2021年已达61.0%<sup>[24]</sup>,粮食单产提升以非碳源的“技术”要素投入拉动,保障了中国粮食增产与减碳并行。此外,当前农业科技创新以“绿色可持续”为方向,推动了生物育种、测土配方、遥感监测等新技术在粮食生产中的应用,提升了施药施肥、病虫害防治等多个环节农资投入的适配度,增强了其他要素的使用效率,同样实现了单产提升与减碳并行。从间接作用来讲,农业科技创新提升了广大中小农户的劳动技能、知识水平和环保意识。“大国小农”是中国的基本农情,2020年中国户均耕地经营规模为6.5亩,仍有超过2.3亿户家庭经营耕地面积在10亩以下<sup>[25]</sup>,因此,农业新科技、新技术与新观念的落地离不开广大中小农户。一方面,“科技下乡、科技兴粮”活动使得广大中小农

户知识水平提升、掌握了较为先进的生产技术,将更多新机械、新方法应用于粮食生产中,而非继续加大农药化肥投入,在提升生产效率的同时降低了生产中的碳排放;另一方面,新技术的推广也使得广大中小农户理解了绿色生态理念,在粮食生产过程中自觉减少农药化肥施用量,形成了粮食生产中的“减碳”效应。因此,本文提出第2、3个研究假设,即H<sub>2</sub>:粮食单产提升的“技术效应”是农业科技创新降低粮食生产碳排放量的路径之一。H<sub>3</sub>:农户知识技能水平提升的“人力资本效应”是农业科技创新降低粮食生产碳排放量的路径之一。

## 2 研究设计与数据来源

### 2.1 指标体系

#### 2.1.1 农业科技创新

农业科技创新是新技术、新方法在农业领域的实践,农业科技创新离不开创新环境、产业支撑和资金、人力等创新投入,也需要产出创新成果以服务于农业生产、带来经济收益和社会收益。参照李洪文和黎东升<sup>[26]</sup>、华坚和潘雪晴<sup>[27]</sup>相关研究,构建农业科技创新评价指标体系。如表1所示,农业科技创新共采用了4个一级指标,包括农业科技创新环境、支撑水平、投入水平和产出水平。农业科技创新环境主要由经济环境和文化环境构成,经济越发达、教育资源越丰富,则农业科技创新的基础越

表1 农业科技创新评价指标体系

一级指标	二级指标	量化方式	指标方向
农业科技创新环境	经济环境	人均地区生产总值/(万元/人)	+
	教育环境	地区普通高等学校数量/个 本专科授予学位数/万人	+
农业科技创新支撑水平	产业基础	农作物播种面积/千hm <sup>2</sup>	+
		农业机械总动力/万kW·h	+
	信息基础	软件和信息技术服务业增加值/亿元 通信、计算机、电子等主营业务收入/亿元	+
农业科技创新投入水平	资金投入	农业研发经费投入强度	+
	人才投入	农业研究与试验发展人员全时当量/人	+
农业科技创新产出水平	经济效益	农业总产值/亿元	+
		农民收入增长率	+
	科技成果	农业植物新品种专利授权数/件 技术市场成交额/亿元	+

好。农业科技创新支撑水平采用了产业基础和信  
息基础2个二级指标,农业产业基础越好,越容易  
激发农业科技创新和应用新技术与新方法。随着  
信息时代的到来,当下科技创新以信息化为导向,  
信息产业越发达,越有可能带动农业科技创新。农  
业科技创新投入从资金和人才2方面衡量,资金与  
人才投入越多,越有可能形成农业新技术。农业科  
技创新产出则从经济效益和科技成果2方面来衡  
量,经济效益越高、科技成果越丰富,则代表农业科  
技创新实践中的应用度就越广、回报越多。

参照杨玉敬<sup>[28]</sup>相关研究方法,在采用上述指标  
体系对农业科技创新水平进行量化时,为克服不同  
指标之间的差异,先对原始数据进行无量纲化处  
理,再用考虑时间变量的熵值法进行计算:

$$e_j = -\frac{1}{\ln(n)} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^n X'_{ij}} \ln \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^n X'_{ij}} \quad (1)$$

式中, $e_j$ 为第 $j$ 项指标的熵值<sup>[28]</sup>, $X'_{ij}$ 为 $i$ 省 $t$ 年的第 $j$ 项  
指标的标准化数值, $t=1,2,\dots,n$ 。

测算出各指标熵值后,再采用式(2)计算出农  
业科技创新水平:

$$Tec_{it} = \sum_{i=1}^p S_{it} R_{it} \quad (2)$$

式中, $Tec_{it}$ 为 $i$ 省 $t$ 年的农业科技创新水平, $S_{it}$ 代  
表运用熵值法计算后得到的 $i$ 省 $t$ 年农业科技创新水  
平各项指标权重值; $R_{it}$ 为 $i$ 省 $t$ 年农业科技创新水平  
各项指标的标准化值; $p$ 为每一子系统中指标个  
数。

### 2.1.2 粮食生产碳排放

参照李波等<sup>[29]</sup>、田红宇和关洪浪<sup>[6]</sup>的测算方法,  
根据化肥、农药等粮食生产中的6个碳排放来源及  
对应的碳排放系数,对中国粮食生产中的碳排放量  
进行了测算,具体计算依据见表2。

表2 农业碳排放测算依据

碳源	量化指标	碳排放系数
化肥	化肥使用量	0.8956/(kg/kg)
农药	农药使用量	4.9341/(kg/kg)
农膜	农膜使用量	5.18/(kg/kg)
柴油	柴油使用量	0.5927/(kg/kg)
翻耕	农作物播种面积	312.6/(kg/km <sup>2</sup> )
农业灌溉	实际灌溉面积	18.5/(kg/hm <sup>2</sup> )

粮食生产碳排放计算公式为:

$$p_{it} = \lambda_{it} P_{it} = \lambda_{it} \sum T_{it} \delta_{it} \quad (3)$$

式中, $p_{it}$ 为粮食生产碳排放量, $\lambda_{it}$ 为粮食种植面积  
占农作物种植面积比重, $P_{it}$ 为农作物生产碳排放总  
量, $T_{it}$ 为各碳排放源的量, $\delta_{it}$ 是各碳排放源的系数。

## 2.2 模型设定

### 2.2.1 农业科技创新对粮食生产碳排放的影响

考虑到粮食生产中各项要素,如农药化肥等资  
源投入具有依赖性,粮食生产碳排放量可能具有刚  
性特征,同时为控制遗漏变量和内生性问题,本研  
究将滞后一期粮食碳排放量也纳入模型,构造动态  
面板模型见式(4):

$$p_{it} = \alpha + \beta_1 Tec_{it} + \beta_2 p_{it-1} + \eta \sum controls_{it} + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

式中, $p_{it-1}$ 为滞后一期粮食生产碳排放量, $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\eta$ 为  
待估参数, $controls_{it}$ 为影响粮食碳排放的其他控制  
变量, $\varepsilon_{it}$ 为残差项。

### 2.2.2 路径检验

为检验技术效应和人力资本效应在农业科技  
创新减碳中的作用机制,本研究借鉴温忠麟等<sup>[30]</sup>提  
出的中介效应模型进行验证。验证过程分为3步,  
第1步同式(4),第2、第3步如下:

$$M_{it} = \alpha + \delta_2 Tec_{it} + \eta \sum controls_{it} + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

$$p_{it} = \alpha + \beta_2 p_{it-1} + \delta_3 Tec_{it} + \phi M_{it} + \eta \sum controls_{it} + \theta_{it} \quad (6)$$

式中, $\delta_2$ 为农业科技创新对中介变量的效应, $\delta_3$ 为控  
制了中介变量后农业科技创新对粮食生产碳排放  
的影响, $M_{it}$ 为中介变量, $\phi$ 是控制了农业科技创新  
后中介变量对粮食生产碳排放的影响, $\theta_{it}$ 为残差  
项,其余变量与式(4)一致。

若 $\delta_2$ 、 $\delta_3$ 、 $\phi$ 均显著,则 $M_{it}$ 具有部分中介效应;  
若 $\delta_2$ 、 $\phi$ 显著但 $\delta_3$ 不显著,则 $M_{it}$ 具有完全中介效  
应。

## 2.3 变量选取

在研究中以粮食生产碳排放量 $p_{it}$ (万t)为因变  
量,以农业科技创新水平 $Tec_{it}$ 为自变量,以技术效  
应 $Yie_{it}$ 和人力资本效应 $Hum_{it}$ 为中介变量。技术效  
应以粮食平均单产(kg/hm<sup>2</sup>)表征,人力资本参照李  
谷成、邓悦等用农村人口平均受教育年限(年)衡  
量<sup>[31-32]</sup>的研究方法。由于影响粮食碳排放量的因

素较多,参照夏四友,田红宇和关洪浪等相关研究<sup>[5,9]</sup>,将城镇化率 $urb_{it}$ 、财政支农力度 $fin_{it}$ 、受灾率 $dis_{it}$ 、农村人口规模 $peo_{it}$ 、产业结构 $Str_{it}$ 作为本研究控制变量,相应量化指标分别为:城镇人口占总人口比例、农林水支出和粮油储备支出占财政总支出比例、受灾面积占农作物播种面积比例、农村人口规模以及第一产业增加值占总增加值比例。

## 2.4 数据来源

为验证农业科技创新对粮食生产碳排放的影响,以中国三大粮食功能区相关数据为样本进行验证。依据2004年《中共中央国务院关于促进农民

增加收入若干政策的意见》<sup>[3]</sup>对不同粮食功能区相关表述及以往学者研究<sup>[4,7]</sup>,将中国大陆31省份划分为粮食主产区、主销区和产销平衡区。其中,主产区为黑龙江、河南、山东、四川、江苏、河北、吉林、安徽、湖南、湖北、内蒙古、江西、辽宁13个省,主销区为北京、天津、上海、浙江、福建、广东、海南7个省和直辖市,产销平衡区为山西、广西、重庆、贵州、云南、西藏、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆11个省、直辖市和自治区。研究使用数据获取于《中国统计年鉴》、《中国农村统计年鉴》及各省统计年鉴。原变量描述性统计结果如表3所示。

表3 描述性统计分析

变量类别	变量	均值	标准差	最小值	最大值
因变量	粮食种植碳排放量/万 t	3801.046	2970.749	180.826	10342.600
自变量	农业科技创新水平	0.187	0.118	0.0155	0.672
中介变量	技术效应/(kg/hm <sup>2</sup> )	27.146	4.798	14.349	40.843
	人力资本效应/(年/人)	7.713	0.838	3.819	9.909
	城镇化率	0.574	0.133	0.222	0.942
控制变量	财政支农力度	0.121	0.035	0.044	0.207
	受灾率	0.147	0.114	0	0.618
	农村人口规模/万人	1892.745	1299.410	212.000	5579.000
	产业结构	0.097	0.051	0.003	0.261

## 3 研究结果

### 3.1 农业科技创新及粮食生产碳排放测算结果

不同粮食功能区农业科技创新水平如图1所示。粮食主产区农业科技创新水平最高,主销区次之、产销平衡区再次之,主销区和主产区农业科技创新水平高于全国均值,且2011—2020年三大粮食功能区农业科技创新水平呈现明显上升趋势。具体而言,主产区中农业科技创新水平最高的省份为江苏,其次是山东、河南;主销区中农业创新水平最高的省份为广东,产销平衡区中农业创新水平最高的省份为陕西。农业科技创新受到诸多因素影响,粮食主产区在农业产业基础、环境、投入等方面具有较强优势,农业科技创新水平相对较高。中国粮食主销区大多为经济发达省份或地区,科技创新环境较好,带动了农业科技创新程度快速提升,主产区与主销区农业科技创新水平差距逐步缩小。

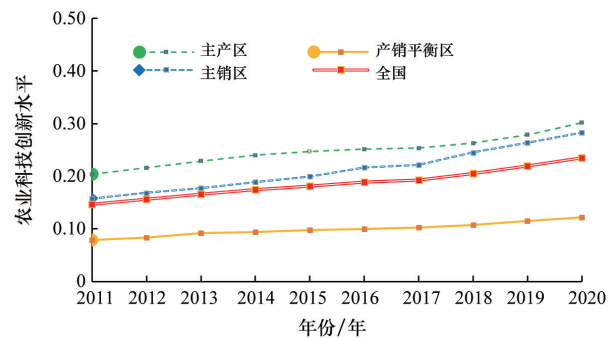


图1 各粮食功能区2011—2020年农业科技创新水平

不同粮食功能区粮食生产碳排放量趋势如图2所示,可见中国粮食生产碳排放分布及演变存在以下特征。第一,三大粮食功能区粮食生产碳排放量存在较大差距。总量指标和均值指标均显示,粮食主产区的粮食生产碳排放量明显高于主销区和产销平衡区。如2020年粮食主产区粮食生产碳排放总量、均值分别为78775万t、6060万t,主销区分

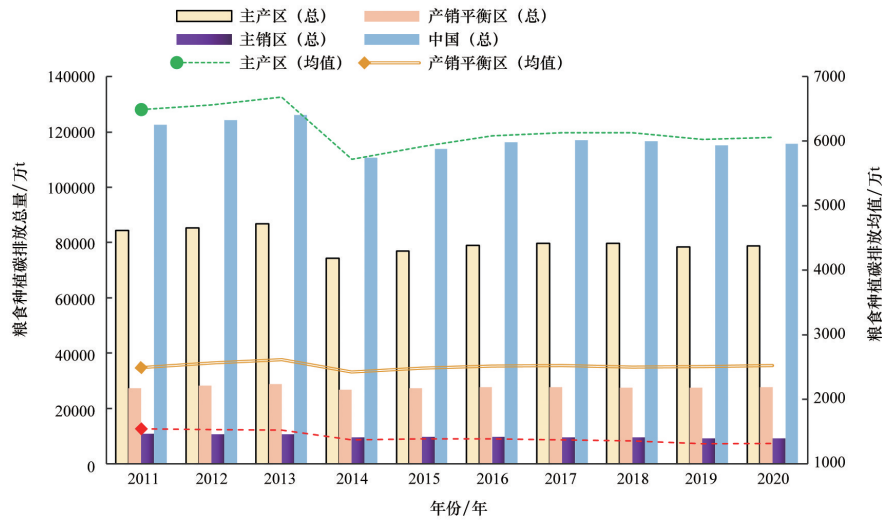


图2 各功能区2011—2020年粮食生产碳排放量

别为9188万t、1313万t，产销平衡区分别为27708万t、2519万t。第二，粮食生产碳排放量在2013年达到顶点，随后呈现出下降趋势。总量指标和均值指标均显示三大粮食功能区的粮食生产碳排放量在2013年后逐步下降，粮食主产区的粮食生产碳排放总量、均值从2013年的86854万t、6681万t下降至2020年的78775万t、6060万t，降幅分别为9.30%、9.30%，粮食主销区分别为13.68%、13.68%，产销平衡区均为3.51%、3.49%。2013年农业部发布了《小麦、玉米、水稻三大粮食作物区域大配方与施肥建议》<sup>[34]</sup>，提出了小麦、玉米、水稻的施肥建议，在一定程度上抑制了过量施肥现象，促进了粮食生产碳排放量的降低。第三，三大粮食功能区碳排放量变动趋势存在差异、分布逐步均衡。2013年粮食主产区、主销区和产销平衡区粮食生产碳排放量占全国总量的比例分别为68.84%、22.35%和8.81%，经计算组间方差为0.100，2020年分别为68.10%、23.95%、7.94%，组间方差为0.097，即主产区、产销平衡区碳排量占全国比例下降，主销区占比上涨，组间差距缩小。

从图3各省份近10年碳排放量均值来看，中国13个粮食主产区碳排放量最高的省份为河南，均值为9466万t，其次为山东、黑龙江，辽宁、山西则相对较低。产销平衡区中新疆碳排放量均值相对较高为9055万t，主销区中碳排放量最低地区为北

京，仅有250万t。此外，从图3可见，粮食主产区、产销平衡区、主销区内部各省份碳排放量组间、组内均有明显差距。

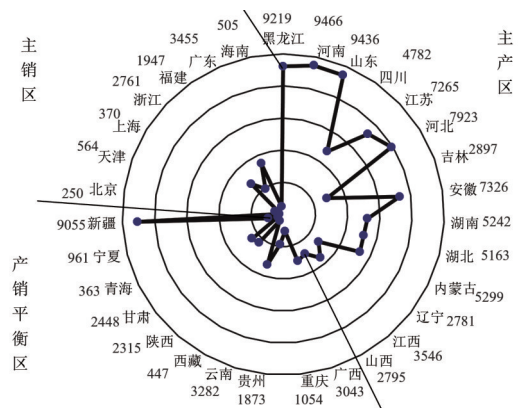


图3 各省份2011—2020年粮食种植碳排放量均值/万吨

### 3.2 基准回归分析

将粮食生产碳排放量当期及其滞后一期数据纳入同一面板，采用了动态面板模型估计农业科技创新对粮食生产碳排放的影响(表4)。其中，模型1为固定效应模型，模型2为差分广义矩估计法(difference generalized methods of moments, 简称差分GMM模型)。由于将当期数据及滞后一期数据纳入同一面板构成了动态面板数据模型，且农业科技创新与粮食生产碳排放量存在内生性可能，使用差分GMM模型可以解决模型因内生性导致的估计

偏误,同时又可以提高估计的效率<sup>[35-36]</sup>。如表4所示,在差分GMM模型中,AR1值为0.016,AR2值为0.330,说明扰动项差分不存在高阶自相关、扰动项不存在自相关,Sargan值为0.701,大于0.05,即不存在过度识别的问题,模型所选工具变量合理。

检验结果表明,差分GMM估计方法的2个适用条件得以满足,估计结果为无偏一致,更适用于本文模型。后文分析建立在模型2差分GMM计量检验结果基础上,为对比计量检验结果,同时将固定效应模型和差分GMM模型检验结果进行了汇报。

表4 农业科技创新与粮食生产碳排放回归结果

指标	基准回归		稳健性检验	
	模型1 固定效应模型	模型2 差分GMM模型	模型3 替换因变量	模型4 考虑样本选择偏误
$p_{it-1}$	0.526***(0.000)	0.137***(0.000)	0.376***(0.000)	0.192***(0.000)
$Tec_{it}$	-0.740***(0.001)	-0.259***(0.007)	-0.282***(0.026)	-0.453***(0.000)
$urb_{it}$	0.271(0.417)	0.797***(0.000)	-0.561***(0.000)	0.758***(0.000)
$fin_{it}$	-0.194(0.663)	0.270***(0.011)	-0.211(0.522)	0.306(0.442)
$dis_{it}$	0.060(0.299)	-0.017*(0.082)	-0.031***(0.027)	-0.032***(0.033)
$peo_{it}$	-0.001(0.993)	0.293***(0.000)	0.223***(0.000)	-0.174***(0.000)
$str_{it}$	0.430(0.330)	-0.083(0.603)	0.808***(0.000)	0.214(0.372)
常数项	3.681***(0.000)	48.160***(0.000)	-28.096***(0.000)	31.962***(0.000)
个体控制	是	是	是	是
时间控制	是	是	是	是
调整 $R^2$	0.982	—	—	—
AR1 值	—	0.016	0.003	0.011
AR2 值	—	0.330	0.214	0.403
Sargan 值	—	0.701	0.714	0.867
样本量	310	248	248	216

注:括号内表示估计量的P值,\*表示  $P<0.1$ ,\*\*表示  $P<0.05$ ,\*\*\*表示  $P<0.01$ 。

从模型2计量检验结果可见, $p_{it-1}$ 系数在1%的显著性水平下显著为正,即粮食生产碳排放量受到上一期碳排放量的显著正向影响,也就是说粮食生产碳排放存在较强路径依赖,化肥、农药、农机等碳源使用具有明显的刚性特征,模型1固定效应模型也支持这一结论,进一步证明了本文计量检验结果的可信度。 $Tec_{it}$ 系数在1%的显著性水平下显著为负,即粮食生产碳排放量受到农业科技创新水平的显著负向影响,也就是说农业科技创新对粮食生产碳排放量具有明显的抑制作用,假说1得到验证。在影响粮食生产碳排放量的其他因素中,模型2中 $urb_{it}$ 、 $fin_{it}$ 、 $peo_{it}$ 的回归系数分别在1%、5%和1%的显著性水平上显著为正,即城镇化率、财政支农力度、农村人口数量提升促进了粮食生产碳排放量的增加。近年来随着经济发展加快,中国城镇化率不断提升,耕地面积下降,为追求单产提升不得不增加

化肥农药等碳源农资的投入,引发了粮食生产碳排放量的上涨。财政支农力度提升促进了粮食产业发展,农村人口较多则耗费了更多农业资源,均增加了碳排放量。

### 3.3 稳健性检验

为验证本文计量检验结果的准确性,采用以下2种方式进行稳健性检验:一是替换因变量。使用了碳排放强度指标替换碳排放总量指标,碳排放强度为每单位播种面积中产生的碳排放量,以碳排放量相对值代替绝对值验证农业科技发展对粮食生产碳排放的影响。二是考虑样本选择偏误问题。由于北京、上海、天津和重庆这4个直辖市享有国家政策较多,第一产业占国内生产总值(GDP)的比重较低,因此删除了4个直辖市的数据,保留剩余省份样本数据重新进行计量检验,计量检验结果如表4所示。从表4模型3可见,粮食生产碳排放强

度受到上年度碳排放强度的显著正向影响以及农业科技发展水平的显著负向影响,即农业科技创新抑制了粮食生产碳排放强度。从表4模型4可见,删除了北京、上海、天津和重庆4个直辖市数据后,本研究核心解释变量依然稳定,农业科技发展对粮食生产碳排放仍然具有显著抑制作用。经过以上稳健性检验可知,稳健性检验结果与基准模型结果

不存在系统性偏差,研究结论可信,农业科技发展对粮食生产碳排放抑制作用显著。

### 3.4 粮食生产碳减排机制检验

理论分析指出,农业科技创新通过提升粮食单产的“技术效应”和提升劳动者知识技能水平的“人力资本效应”降低了粮食生产碳排放量,本文用三步法构建中介效应模型,计量检验结果见表5。

表5 中介效应检验

指标	技术效应		人力资本效应	
	(1) 技术效应	(2) 碳排放量	(3) 人力资本效应	(4) 碳排放量
$P_{t-1}$	—	0.157*** (0.000)	—	0.121*** (0.000)
$Tec_t$	0.216* (0.056)	-0.209* (0.077)	0.241*** (0.000)	-0.330*** (0.000)
$Yie_{it}$	—	0.201*** (0.000)	—	—
$Hum_{it}$	—	—	—	0.230*** (0.000)
其他变量	已控制	已控制	已控制	已控制
常数项	6.011*** (0.000)	52.423*** (0.000)	1.790*** (0.000)	50.574*** (0.000)
个体控制	是	是	是	是
时间控制	是	是	是	是
调整 $R^2$	0.472	—	0.444	—
AR1 P值	—	0.014	—	0.018
AR21 P值	—	0.416	—	0.216
Sargan P值	0.701	0.706	—	0.720
样本量	310	248	310	248

注:括号内表示估计量的P值,\*表示  $P < 0.1$ ,\*\*表示  $P < 0.05$ ,\*\*\*表示  $P < 0.01$ 。

表5中(1)(2)列为“技术效应”的检验结果。计量检验结果表明,(1)列中  $Tec_{it}$ 、(2)列中  $Tec_{it}$  和  $Yie_{it}$  系数均显著相关,这表明农业科技创新与“技术效应”具有显著的正相关性,“技术效应”在农业科技创新减碳中起到部分中介效应,中介效应占比为31.69%。农业科技创新带动了粮食育种、施肥施药等多个生产环节中生产效率、农资使用效率的提升,以推升单产、提高碳源使用效率降低了粮食生产中碳排放总量,农业科技创新的减碳作用有31.69%是通过“技术效应”实现的,“技术效应”在农业科技创新的减碳作用中发挥了重要推力。

表5中(3)(4)列为“人力资本效应”的检验结果。计量检验结果表明,(3)列中  $Tec_{it}$ 、(4)列中  $Tec_{it}$  和  $Hum_{it}$  系数均显著相关,这表明农业科技创新与“人力资本效应”具有显著的正相关性,“人力资本效应”在农业科技创新减碳中起到部分中介效应,

中介效应占比40.46%。中国“大国小农”的基本国情并没有改变,绿色生产技术和生态可持续理念在粮食生产中的推广实践还需要依靠广大中小农户。农业科技创新带动了广大中小农户绿色生产技术与知识的提升、理念的转变,真正将新技术、新方法融入到粮食生产实践中,农业科技创新的减碳作用有40.46%是通过“人力资本效应”实现的,“人力资本效应”在农业科技创新的减碳作用中发挥了重要推力。

### 3.5 异质性检验

中国三大粮食功能区在粮食生产功能定位、政府支持力度、经济发展水平以及农业科技创新能力等多方面存在差异,为验证农业科技创新在粮食生产不同功能区的影响差异,区分粮食主产区、主销区和产销平衡区再次进行了计量检验(表6)。结果显示农业科技创新对粮食生产的减碳作用在主

表6 异质性检验与政策效应检验

指标	粮食功能区异质性		
	粮食主产区	产销平衡区	主销区
$p_{it-1}$	0.315*(0.064)	-0.091(0.472)	0.320**(0.013)
$Tec_{it}$	-2.571(0.160)	-1.603(0.496)	-1.132*** (0.002)
其他变量	已控制	已控制	已控制
常数项	7.374*** (0.000)	-50.554(0.596)	3.225** (0.026)
个体控制	是	是	是
时间控制	是	是	是
样本量	104	88	56

注:括号内表示估计量的P值,\*表示 $P<0.1$ ,\*\*表示 $P<0.05$ ,\*\*\*表示 $P<0.01$ 。

销区显著,在主产区和产销平衡区的抑制作用不明显。主产区农业科技创新对粮食生产的减碳作用不显著的主要原因可能为:一是粮食主产区承担了更多粮食生产责任,农资大量投入削弱了农业科技创新的减碳效应。2011—2020年,主产区粮食产量增长了23.98%,占全国粮食总产量的比例从76.02%上涨至78.56%,主销区粮食产量占全国的比重从5.97%下降至4.29%,产销平衡区从18.02%下降至17.15%,中国粮食稳产保供责任进一步向主产区倾斜。在主产区耕地、水土等资源有限情况下,为保障粮食总产量稳定,不得不增加化肥、农膜、农药等农资的投入,削弱了农业科技创新在粮食生产中的减碳效应。二是农业科技创新提升了农业机械使用量,增加了能源需求削弱了农业科技创新的减碳效应。农业科技创新带来了农业产业发展,也推动了农业机械在粮食生产中的应用程度。2011—2020年,主产区农业机械总动力增长了8.86%,意味着主产区粮食生产机械化水平进一步提升,对电力、柴油等能源的需求也增加了,导致农业科技创新对粮食生产碳排放的抑制作用不显著甚至出现了碳排放的“回弹”效应。粮食产销平衡区农业科技创新减碳效应不显著的主要原因可能为,粮食产销平衡区农业科技创新水平相对较低,对粮食生产的减碳效应尚未完全显现。

## 4 结论

探寻粮食生产碳排放减量机制是推动中国粮

食产业走高质量发展之路、实现“双碳”目标的关键举措,对增强人民福祉、实现生态文明具有重要意义。以中国31省份2011—2020年相关数据为依据,梳理了三大粮食功能区农业科技创新与粮食生产碳排放的现状及演变,并对农业科技创新在粮食生产中的碳减排效应及路径进行了分析。

1) 三大粮食功能区农业科技创新水平呈现上涨趋势,粮食生产碳排放量有所下降,且三大粮食功能区农业科技创新水平与粮食生产碳排放量存在较强异质性。三大粮食功能区农业科技创新水平均有较为明显提升,粮食主产区农业科技创新水平最高、增速最快;粮食生产碳排放量在2013年达到峰值后2014年有明显下降,但随后又呈现出小幅回弹趋势,粮食主产区粮食生产碳排放量明显高于粮食主销区、产销平衡区。

2) 农业科技创新对粮食生产碳排放有明显的抑制作用,这一作用在三大粮食功能区存在明显异质性。中国粮食生产碳排放具有刚性特征,农业科技创新的粮食生产碳减排作用明显,基准分析及稳健性检验支持了这一观点。农业科技创新对粮食生产的减碳效应在主销区更加显著,在主产区、产销平衡区显著性较弱。粮食生产责任向主产区的不断转移以及农业机械使用率的提升,增加了粮食主产区的能源投入,削弱了农业科技创新的减碳效应,这可能是农业科技创新在主产区减碳效应不显著的主要原因。

3) “技术效应”和“人力资本效应”在农业科技创新减碳过程中发挥了重要作用。农业科技创新提升了农业资源投入效率与人力资本水平,促进了农业科技新方法、新技能的实践与推广,增强了广大中小农户的绿色生态意识,实现了粮食生产中的碳减排。

在国际贸易摩擦加剧、食物刚需增加和生态环境保护约束日益增强的多重压力下,中国粮食产业发展转型迫切,要从过去的高投入、高消费、高资源环境为代价走向绿色增产增效之路。本研究表明,科技创新是实现粮食生产碳减排的关键路径,且这一路径功能发挥在粮食主产区和产销平衡区还有继续提升空间,面对粮食持续增产压力,各粮食功

能区需协同合作,避免粮食增产压力持续向主产区倾斜。此外,“技术效应”和“人力资本效应”是科技创新减碳作用实现的主要抓手,推动粮食产业绿色发展不能忽视技术和人才的培育。基于此,提出以下建议。

1) 重视农业科技创新的减碳效应,继续加快农业科技创新步伐。从良种培育、农业机械、种植技术等多环节全面增加科技在粮食生产中的贡献度,以农业科技创新实现粮食生产中的碳减排。

2) 针对“技术效应”在农业科技创新减碳中的重要作用,要将提升单产作为中国粮食产业发展的重要环节,以更高的资源、资本和人才使用效率实现粮食生产碳减排;针对“人力资本效应”在农业科技创新减碳中的重要作用,要重视培育普通中小农户的绿色生产理念,推动“科技下乡”促使中小农户掌握新技术、新方法,落实农业科技创新的减碳作用。

3) 压实各省份粮食安全主体责任,根据三大粮食功能区的异质性制定减碳相应政策。各省份均要严格落实粮食安全责任,降低主产区持续增产压力,避免粮食主产区继续增加碳源资源投入,增加粮食碳排放量。粮食产销平衡区要增加农业科技创新在粮食生产中的融合程度,发挥好农业科技创新的碳减排效应。

### 参考文献(References)

- [1] Han H, Zhang X. Static and dynamic cultivated land use efficiency in China: A minimum distance to strong efficient frontier approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 246: 119002.
- [2] 侯孟阳, 姚顺波. 异质性条件下化肥面源污染排放的EKC再检验——基于面板门槛模型的分组[J]. *农业技术经济*, 2019(4): 104-118.
- [3] 张雪靓, 孔祥斌. 黄淮海平原地下水危机下的耕地资源可持续利用[J]. *中国土地科学*, 2014, 28(5): 90-96.
- [4] 生秀东. 粮食主产区耕地质量下降的经济分析及提升策略[J]. *中州学刊*, 2021(12): 32-39.
- [5] 田红宇, 关洪浪. 数字经济对粮食生产碳排放的影响研究——来自长江经济带108个地级市的经验证据[J/OL]. [2023-02-05]. 中国农业资源与区划. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20220818.1050.012.html>.
- [6] 联合国粮农组织. 联合国2021年粮食系统峰会报告[EB/OL]. (2019-11-08)[2023-02-22]. <https://www.un.org/zh/food-systems-summit>.
- [7] 田云, 尹恣昊. 中国农业碳排放再测算: 基本现状、动态演进及空间溢出效应[J]. *中国农村经济*, 2022(3): 104-127.
- [8] 田云, 吴海涛. 产业结构视角下的中国粮食主产区农业碳排放公平性研究[J]. *农业技术经济*, 2020(1): 45-55.
- [9] 夏四友, 赵媛, 许昕, 等. 1997—2016年中国农业碳排放率的时空动态与驱动因素[J]. *生态学报*, 2019, 39(21): 7854-7865.
- [10] 贺青, 张俊飏. 粮食主产区农业碳排放的动态演进及驱动因素研究[J]. *生态经济*, 2023, 39(6): 123-128, 162.
- [11] 张灿强, 王莉, 华春林, 等. 中国主要粮食生产的化肥削减潜力及其碳减排效应[J]. *资源科学*, 2016, 38(4): 790-797.
- [12] 张扬, 李涵, 赵正豪. 中国粮食作物种植变化对省际农业碳排放量的影响研究[J/OL]. [2023-02-05]. 中国农业资源与区划. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20220831.1438.012.html>.
- [13] 黄晓慧, 杨飞, 陆迁. 粮食主产区农业碳排放回弹效应研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(12): 2780-2788.
- [14] 邓明君, 邓俊杰, 刘佳宇. 中国粮食作物化肥施用的碳排放时空演变与减排潜力[J]. *资源科学*, 2016, 38(3): 534-544.
- [15] 张军伟, 张锦华, 吴方卫. 我国粮食生产的碳排放及减排路径分析[J]. *统计与决策*, 2018, 34(14): 168-172.
- [16] 谢永浩, 刘争. 中国省域种植业碳汇量、碳排放量的时空分异及公平性研究[J]. *世界农业*, 2022(2): 100-109.
- [17] 张颂心, 王辉, 徐如浓. 科技进步、绿色全要素生产率与农业碳排放关系分析——基于泛长三角26个城市面板数据[J]. *科技管理研究*, 2021, 41(2): 211-218.
- [18] Greening L A, Greene D L, Difiglio C. Energy efficiency and consumption—the rebound effect a survey[J]. *Energy Policy*, 2000, 28(6-7): 389-401.
- [19] 田云, 尹恣昊. 技术进步促进了农业能源碳减排吗?——基于回弹效应与空间溢出效应的检验[J]. *改革*, 2021(12): 45-58.
- [20] 李成龙, 周宏. 农业技术进步与碳排放强度关系——不同影响路径下的实证分析[J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25(11): 162-171.
- [21] 胡中应. 技术进步、技术效率与中国农业碳排放[J]. *华东经济管理*, 2018, 32(6): 100-105.
- [22] 何艳秋, 成雪莹, 王芳. 技术扩散视角下农业碳排放区域溢出效应研究[J]. *农业技术经济*, 2022(4): 132-144.
- [23] Goldfarb A, Tucker C. Digital economics[J]. *Journal of Economic Literature*, 2019, 57(1): 3-43.

- [24] 黄祖辉, 傅琳琳. 建设农业强国: 内涵、关键与路径[J]. 求索, 2023(1): 132-141.
- [25] 农业农村部政策与改革司. 2020年中国农村政策与改革统计年报[M]. 北京: 中国农业出版社, 农村读物出版社, 2021: 3-4.
- [26] 李洪文, 黎东升. 农业科技创新能力评价研究——以湖北省为例[J]. 农业技术经济, 2013(10): 114-119.
- [27] 华坚, 潘雪晴. 农业科技创新对粮食产业高质量发展的影响——基于30个省份面板数据分析[J]. 华东经济管理, 2022, 36(7): 55-64.
- [28] 杨玉敬. 数字经济与乡村振兴耦合协调发展水平研究[J]. 技术经济与管理研究, 2022(7): 14-19.
- [29] 李波, 张俊飏, 李海鹏. 中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(8): 80-86.
- [30] 温忠麟, 张雷, 侯杰泰, 等. 中介效应检验程序及其应用[J]. 心理学报, 2004(5): 614-620.
- [31] 李谷成, 郭伦, 高雪. 劳动力成本上升对我国农产品国际竞争力的影响[J]. 湖南农业大学学报(社会科学版), 2018, 19(5): 1-10.
- [32] 邓悦, 吴忠邦, 罗连发. 农业机械化促进了农民增收吗?——基于农村人力资本调节效应的分析[J]. 南京农业大学学报(社会科学版), 2023, 23(1): 169-180.
- [33] 中共中央 国务院. 关于促进农民增加收入若干政策的意见[EB/OL]. (2003-12-31)[2023-02-22]. [http://www.gov.cn/gongbao/content/2004/content\\_63144.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2004/content_63144.htm).
- [34] 中国农业部. 小麦、玉米、水稻三大粮食作物区域大配方与施肥建议[EB/OL]. (2013-07-19)[2023-02-22]. [http://www.zzys.moa.gov.cn/tzgg/201307/t20130729\\_6310551.htm](http://www.zzys.moa.gov.cn/tzgg/201307/t20130729_6310551.htm).
- [35] 周稳海, 赵桂玲, 尹成远. 农业保险对农业生产影响效应的实证研究——基于河北省面板数据和动态差分GMM模型[J]. 保险研究, 2015(5): 60-68.
- [36] Arellano M, Bond S. Some tests of specification for panel data: Monte carlo evidence and an application to employment equations[J]. Review of Economic Studies, 1991, 58(2): 277-297.

## Research on the impact of agricultural science and technology innovation on carbon emission of grain production: A case study of China's three grain functional areas

HAN Dong<sup>1</sup>, ZHONG Yu<sup>2\*</sup>

1. School of Management, Henan University of Technology, Xinxiang 453002, China

2. Institute of Agricultural Economics and Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

**Abstract** Based on the panel data of China's three grain functional areas from 2011 to 2020, a quantitative index system of agricultural science and technology innovation was constructed, and then the level of agricultural science and technology innovation and carbon emission level of grain production were calculated. A dynamic panel model was used to test the inhibition effect and influence path of agricultural science and technology innovation on carbon emission of grain production. The results found that from 2011 to 2020, the level of agricultural science and technology innovation in the three grain functional areas showed an increasing trend, the carbon emissions of grain production decreased, and the inter-group heterogeneity was obvious. Agricultural scientific and technological innovation had a significant inhibitory effect on the carbon emission of grain production, and this effect was more significant in the main grain marketing areas. The technology effect and the human capital effect played an important role in the process of carbon reduction in agricultural science and technology innovation. It was recommended to accelerate the pace of agricultural science and technology innovation, continue to achieve carbon reduction in grain production through agricultural science and technology innovation, pay attention to the improvement of production efficiency, resource utilization efficiency and human capital level, and formulate corresponding policies for carbon reduction according to the heterogeneity of the three grain functional areas to realize the green upgrading and transformation of grain industry.

**Keywords** agricultural science and technology innovation; grain production; carbon emission ●



(责任编辑 徐丽娇)