

数字经济对农业碳减排的影响效应分析

李炳军, 赵冰冰, 孟凡琳

(河南农业大学 信息与管理科学学院, 郑州 450046)

摘要: 在“双碳”目标与数字化转型战略的双重驱动下,深入探究数字经济如何赋能农业碳减排及其作用路径,对推动农业数字化转型及低碳发展具有重要意义。以河南省18市为研究对象,基于“直接影响—中介传导—门槛效应”的理论分析框架,综合运用固定效应模型、中介效应模型和门槛回归模型,实证检验数字经济对农业碳减排的影响机制及阶段性特征。研究发现:①2011—2023年河南省农业碳排放强度整体呈下降趋势,且第二阶段(2017—2023年)降幅显著大于第一阶段(2011—2016年)。②数字经济对农业碳排放强度具有显著抑制作用,但第一阶段抑制效应强于第二阶段。③机制分析显示,数字经济的碳减排作用具有明显的传导机制演化特征。在第一阶段,数字经济主要通过直接效应发挥减碳作用,而在第二阶段,城镇化水平在数字经济促进农业碳减排中发挥部分中介效应,中介效应占比为41.85%。④门槛效应分析表明,第一阶段农业经济发展水平未呈现显著门槛作用,而第二阶段存在显著的双重门槛效应。当农业经济发展水平超过阈值(1.128万元/人)时,数字经济的碳减排作用得以充分发挥并持续增强。通过揭示数字经济影响农业碳减排的动态机制与阶段性约束,深化了对数字经济与农业碳减排关系的理论认知,并为制定差异化农业低碳政策提供了实证依据和决策参考。

关键词: 数字经济; 农业碳排放强度; 中介效应; 门槛效应; 阶段异质性

中图分类号: F323.2; F49

文献标志码: A

文章编号: 1004-3918(2026)02-0450-12

Analysis of the Impact of Digital Economy on Agricultural Carbon Emission Reduction

LI Bingjun, ZHAO Bingbing, MENG Fanlin

(College of Information and Management Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Under the dual strategic imperatives of achieving the “carbon peak and carbon neutrality” targets and implementing comprehensive digital transformation, an in-depth exploration into how the digital economy empowers agricultural carbon emission reduction is conducted, and its specific operational pathways are clarified. Such investigation is recognized as holding substantial importance for advancing digital transition in the agricultural sector and promoting development along a low-carbon trajectory. This study focuses on the eighteen cities of Henan Province as analytical units and adopts a comprehensive theoretical framework that integrates direct effects, mediating transmission, and threshold conditions. Methodologically, an integrated approach combining fixed effects models, mediation models, and threshold regression models is employed to empirically investigate the mechanisms and the distinct phased characteristics through which agricultural carbon reduction is influenced by the digital

收稿日期: 2025-09-08

修回日期: 2026-01-05

接受日期: 2026-01-07

基金项目: 河南省高校哲学社会科学基础研究重大项目(2024-JCZD-21);河南省高校人文社会科学研究一般项目(2024-ZZJH-025);河南农业大学繁荣哲学社会科学应用类项目(FRZS2025B07)

作者简介: 李炳军(1968-),男,教授,博士,主要研究方向为农业系统工程

通信作者: 孟凡琳(1992-),女,讲师,博士,主要研究方向为产业低碳发展, E-mail: fanlin_meng@163.com

引用格式: 李炳军,赵冰冰,孟凡琳. 数字经济对农业碳减排的影响效应分析[J]. 河南科学, 2026, 44(2): 450-461.

Li B J, Zhao B B, Meng F L. Analysis of the impact of digital economy on agricultural carbon emission reduction[J]. Henan Science, 2026, 44(2): 450-461.

economy. The key findings are summarized as follows: ① Agricultural carbon emission intensity in Henan Province is observed to exhibit a consistent and statistically significant declining trajectory from 2011 to 2023. Moreover, a comparative assessment reveals that the magnitude of reduction during the second phase (2017–2023) is found to be substantially more pronounced than that observed during the first phase (2011–2016). ② A significant and statistically robust inhibitory effect on agricultural carbon emission intensity is demonstrated by the development of the digital economy. However, the strength of this direct suppressive influence is determined to be more potent in the initial phase relative to the subsequent phase. ③ Mechanism analysis reveals that the carbon reduction effect exerted by the digital economy demonstrates distinct evolutionary characteristics in its transmission pathways. During the first phase, the digital economy primarily achieves emission reductions through direct effects. In contrast, during the second phase, the level of urbanization emerges as a significant partial mediator in the process through which the digital economy promotes agricultural carbon reduction, with this indirect pathway accounting for approximately 41.85% of the total observed impact. ④ Threshold effect analysis provides further nuanced insights. No statistically significant threshold characteristic is exhibited by agricultural economic development level in the first phase. In the second phase, however, a significant double threshold effect is identified. This result indicates that the carbon reduction efficacy of the digital technologies becomes contingent upon reaching a critical level of agricultural economic maturity. When agricultural economic development level surpasses the threshold of 11 280 yuan per person, the carbon mitigation potential of the digital economy is fully activated and subsequently exhibits a self-reinforcing, progressively strengthening pattern with further economic advancement. By clarifying the dynamic mechanisms through which the digital economy influences agricultural carbon reduction and identifying the critical stage-specific constraints governing this relationship, this study contributes to a deeper theoretical understanding of the interconnection between digital economic development and agricultural decarbonization. Furthermore, the findings provide a solid empirical foundation and serve as actionable, evidence-informed references for formulating differentiated policy frameworks and strategic measures aimed at effectively promoting low-carbon development in the agricultural sector.

Key words: digital economy; agricultural carbon emission intensity; mediation effect; threshold effect; phase heterogeneity

0 引言

随着全球气候变化加剧和极端天气频发,减少碳排放、推动绿色低碳发展成为全球共识。农业作为重要的碳排放来源,其碳排放约占全球排放总量的14%,已成为碳减排的重点领域^[1]。进入数字经济时代,以人工智能、大数据、云计算、物联网等为代表的数字技术与农业生产经营全流程、全链条、全方位深度融合,重塑了农业的生产模式和组织方式,提升了传统农业生产要素利用率,有效降低了化石能源消耗与碳排放强度,为农业降碳增效提供全新的技术路径与发展契机^[2]。基于此,本文深入研究数字经济对农业碳减排影响的复杂机制,为新时期数字化与碳减排目标并行下的农业数字化、低碳化协同发展提供理论参考。

农业碳排放相关研究主要集中在碳排放测度方法、碳源识别及影响因素三个方面。关于碳排放测度方法,当前主流测算方法包括排放因子法、生命周期法、投入产出法与实测法等,其中排放因子法因公式体系完善、数据库丰富,在农业碳排放测算中应用最为广泛^[3]。关于农业碳排放来源,有学者重点关注种植业,认为化肥、农药、农膜、农用柴油的使用及农业灌溉、土地耕作等是重要的碳排放来源;也有学者将畜牧业纳入碳源研究,指出饲料生产、养殖设施日常运行会产生碳排放,牲畜粪便管理不当也会释放大量的甲烷等温室气体^[4]。关于农业碳排放影响因素,现有研究常采用对数平均迪氏指数(Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI)模型、Kaya恒等式和STIRPAT(Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology)模型等方法,从多维

度分析影响农业碳排放的关键因素^[5],发现农业产业结构^[6]、城镇化^[7]及技术进步^[8]等因素在农业碳减排中发挥重要作用。

进入数字经济时代,数字技术逐步渗透至农业生产经营的各个环节^[9],通过农田精准管理、科学化肥施用以及灾害实时预警等手段,减少农药、化肥等高碳农业生产资料的过度使用,在农业碳排放控制方面展现出巨大潜力^[10]。基于此,学者们逐渐将研究重点聚焦于数字经济对农业碳减排的影响。有研究发现数字经济对农业碳排放的影响存在显著区域差异:农业主产区的碳减排效果最为显著,其次是产销平衡区,而主销区相对较弱^[11];也有研究持不同观点,指出中东部地区数字经济带来的碳减排成效显著,西部地区尚不明显^[12];还有研究认为数字经济不仅能直接抑制农业碳排放,还可以通过优化能源结构^[13]间接发挥减碳作用。

综上所述,现有研究在数字经济对农业碳减排的影响方面仍存在以下不足:一是大多研究未能从理论层面构建数字经济影响农业碳减排的逻辑机制框架,难以深入揭示二者之间复杂的非线性与动态互动关系;二是不同发展阶段中,数字经济对农业碳排放强度的影响路径和效应机制可能存在异质性,而这一特征在现有研究中尚未得到充分考察。鉴于此,本文构建数字经济影响农业碳减排的理论框架,并以河南17个省辖市和济源市(以下简称“河南省18市”)为研究对象,采用固定效应模型、中介效应模型和门槛模型实证分析2011—2023年河南省数字经济对农业碳减排的影响机制及其阶段性特征,为政府制定推动数字经济驱动农业低碳转型的政策提供理论支撑。

1 理论分析

1.1 数字经济对农业碳减排的直接影响

数字基础设施是数字经济驱动农业碳减排的基础条件,完善农村数字基建既能打破地理限制、促进农业资源高效配置,减少因时空约束导致的能耗与碳排放^[14],也能助力数字技术发挥传播教育作用,培养农户低碳意识,推动农业绿色低碳转型。

数字产业化为农业碳减排提供了核心支撑。信息通信、互联网、电信及软件服务等产业协同作用,推动了智能农田系统、精准农业装备与全产业链大数据平台的构建,实现了生产过程的自动化与精细化管理。依托5G、物联网和人工智能等技术,可对

农业能耗和生产状态进行动态监控与实时调控,提升资源利用效率,减少化肥、农药等高碳投入品的过度使用,从而有效降低无效能耗与碳排放。

在数字基础设施及数字产业化的支撑下,数字金融成为发挥数字经济减排效应的关键环节。数字金融凭借普惠性优势弥补了传统金融在农村地区覆盖不足与服务供给不均的短板,有效拓宽了农民的融资渠道。在数字金融的支持下,农户对高效、低碳农业经营模式的采纳意愿增强,从而直接助力农业碳排放降低^[15]。此外,数字金融通过为农户及相关企业提供技术创新资金支持,推动低碳新技术与新品种的研发突破,不仅提高了资源利用效率,也促进了农业生产环节的节能减排,为实现农业碳减排目标提供了重要支撑^[16]。基于此,提出以下假设:

H1:数字经济能够显著促进农业碳减排。

1.2 城镇化水平的中介传导机制

数字经济可通过间接提升城镇化水平助力农业碳减排。数字技术打破了劳动力市场信息壁垒^[17],使农村剩余劳动力能低成本、便捷地获取城市就业信息,精准匹配岗位、缩短求职周期,更快实现稳定就业,进而加速农村人口向城镇集聚融入,提升城镇化水平。而城镇化水平的提高,进一步促进了资本、技术的流动与扩散,推动农业生产方式由劳动密集型向技术密集型转变。在此过程中,精准农业、智慧灌溉、绿色肥料、智能农机等技术手段被广泛利用,显著提高了资源利用效率,减少了化肥、农药等的过度使用,进而抑制农业碳排放^[18]。此外,城镇化还推动了能源消费结构的优化。随着城镇化水平的提升,农村地区能源消费逐步由煤炭、秸秆等高碳能源向电力、天然气等清洁能源转变,不仅提高了农村地区的能源利用效率,也减少了高碳能源燃烧过程中产生的大量温室气体排放,进一步降低了农业生产环节的碳排放水平。基于此,提出以下假设:

H2:城镇化水平在数字经济对农业碳减排的影响中具有中介作用。

1.3 农业经济发展水平的门槛效应

农业经济发展水平在数字经济与农业碳排放的关系中表现出显著的阈值效应。在农业经济欠发达阶段,农业生产多以小规模、分散经营为主^[19],数字技术面临较高的初期投资和维护成本,且农业经营者资本积累不足,数字素养有限,导致数字技术采用率低,削弱了数字经济在碳排放控制方面的潜在作用^[20]。随着农业经济发展水平跨越特定阈值,农业

生产方式逐步由依赖传统人力向现代化、集约化模式转型,先进农业机械的推广显著提升了生产效率,化肥、农药等生产要素的使用也趋于精细化与科学化^[21]。在生产结构持续优化与农业技术迭代创新的推动下,知识外溢与技术扩散效应日益凸显,促进了区域农业资源的循环利用与效能提升,有助于缓解农业生产对生态环境的负面影响,逐步实现经济效益与环境效益的协同发展^[22]。基于此,提出以下假设:

H3:农业经济发展水平在数字经济促进农业碳减排过程中存在门槛效应。

综上所述,数字经济对农业碳减排的影响并非通过单一渠道,而是依托多层次、多路径的传导机制。一方面,数字经济通过数字基础设施、数字产业化与数字金融等支撑,直接优化农业生产中的投入结构与资源利用效率,从源头减少碳排放;另一方面,数字经济还可通过提升城镇化水平间接发挥减排效应。此外,数字经济的农业碳减排效应还受到农业经济发展水平的制约,表现出阶段异质性特征,农业经济发展水平较低时,由于数字技术应用有限,碳减排潜力的发挥受到限制,随着农业经济发展水平的提升,精准农业等数字技术逐步推广应用,生产要素配置效率不断提高,从而有助于降低农业碳排放。数字经济促进农业碳减排的理论框架如图1所示。

2 研究设计

2.1 模型设定

2.1.1 基准模型

为了检验数字经济对农业碳减排的影响,构建如下固定效应模型:

$$ACI_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 DE_{it} + \alpha_2 Z_{it} + \mu_i + \delta_t + \varepsilon_{it}, \quad (1)$$

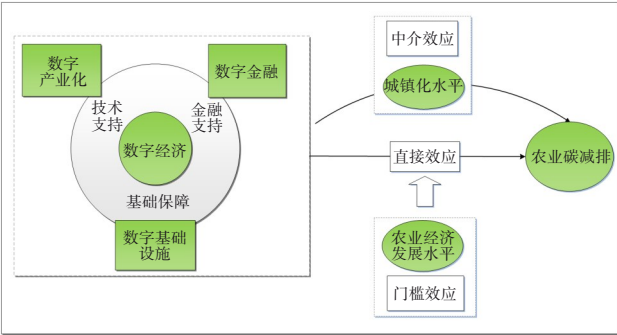


图1 数字经济促进农业碳减排的理论框架

Fig.1 Theoretical framework of digital economy promoting agricultural carbon emission reduction

式中: i 代表城市; t 代表时间; ACI_{it} 代表城市 i 在时间 t 的农业碳排放强度; DE_{it} 代表城市 i 在时间 t 的数字经济发展水平; Z_{it} 代表所有的控制变量; α_0 表示常数项; α_1 、 α_2 表示估计系数; μ_i 表示城市 i 不随时间变化的个体固定效应; δ_t 则代表时间固定效应; ε_{it} 代表随机扰动项。

2.1.2 中介效应模型

为了进一步讨论数字经济对农业碳减排的作用机制,检验城镇化水平是否发挥中介作用,构建如下中介效应检验模型:

$$ACI_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 DE_{it} + \alpha_2 Z_{it} + \mu_i + \delta_t + \psi_{it}, \quad (2)$$

$$UR_{it} = \beta_0 + \beta_1 DE_{it} + \beta_2 Z_{it} + \mu_i + \delta_t + \eta_{it}, \quad (3)$$

$$ACI_{it} = \gamma_0 + \gamma_1 DE_{it} + \gamma_2 UR_{it} + \gamma_3 Z_{it} + \mu_i + \delta_t + \sigma_{it}, \quad (4)$$

其中: UR_{it} 代表中介变量(即城镇化水平); ψ_{it} 、 η_{it} 、 σ_{it} 代表随机扰动项,其他的变量定义同前。检验步骤如下:首先,检验数字经济发展水平对农业碳排放强度的总效应,若式(2)中数字经济发展水平的系数 α_1 显著,则表明具备开展中介效应分析的前提;其次,构建数字经济发展水平对中介变量的回归方程,检验其系数 β_1 的显著性;最后,将数字经济发展水平与城镇化水平同时纳入对农业碳排放强度的回归方程中,通过直接效应系数 γ_1 和中介变量系数 γ_2 的显著性,结合间接效应($\beta_1 \gamma_2$)判断中介效应是否存在。

2.1.3 门槛效应模型

数字经济对农业碳减排的影响可能随农业经济发展水平不同而呈现出非线性特征。为精准识别并检验这一特征,借鉴 Hansen^[23]提出的门槛效应模型,以农业经济发展水平为门槛变量,结合 Bootstrap 抽样,构建如下模型进行检验:

$$ACI_{it} = \rho_0 + \rho_1 DE_{it-1} \times I(DEV_{it} \leq \theta_1) + \rho_2 DE_{it-1} \times I(\theta_1 < DEV_{it} \leq \theta_2) + \dots + \rho_n DE_{it-1} \times I(\theta_{n-1} < DEV_{it} \leq \theta_n) + \rho_{n+1} DE_{it-1} \times I(DEV_{it} > \theta_n) + \omega Z_{it} + \mu_i + \delta_t + \tau_{it}, \quad (5)$$

式中: DEV_{it} 为门槛变量,即农业经济发展水平; n 表示门槛数量; ρ_0 表示常数项; $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n, \rho_{n+1}$ 表示估计系数; $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ 表示待估算的门槛值; $I(\cdot)$ 为指示函数; τ_{it} 代表随机扰动项,其他的变量与前文相同。

2.2 变量说明

2.2.1 被解释变量

农业碳排放强度(ACI)使用各市农业碳排放总量与农业总产值的比例来衡量。本文重点关注种植

业的碳排放,借鉴相关文献^[24],种植业碳排放主要源于农药、化肥、薄膜和柴油等投入,以及翻耕、农业灌溉和水稻种植等生产活动。基于政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)发布的碳排放系数法^[25],结合不同碳源的排放特征及其相应系数,测算出各市农业碳排放总量后,进一步计算农业碳排放强度。计算公式如下所示:

$$C_i = \sum_{j=1}^m C_j^i = \sum_{j=1}^m A_j^i \times B_j^i, \tag{6}$$

$$ACI_i = \frac{C_i}{AGDP_i}, \tag{7}$$

其中: C_i 表示地区*i*的农业碳排放总量; C_j^i 表示地区*i*碳源*j*的碳排放量; A_j^i 是地区*i*碳源*j*的排放系数; B_j^i 是地区*i*碳源*j*的消耗量; $m=7$,表示化肥、农药、薄膜、柴油、翻耕、农业灌溉及水稻种植七大碳源; ACI_i 表示地区*i*的农业碳排放强度; $AGDP_i$ 表示地区*i*的农业总产值。各个碳源的排放系数如表1所示。

表1 农业碳源的碳排放系数

Tab.1 Carbon emission coefficient of agricultural carbon sources

碳排放源	碳排放系数	参考来源
化肥	0.896 kg C/kg	West 和 Marland ^[26] 、 美国橡树岭国家实验室
农药	4.934 kg C/kg	美国橡树岭国家实验室
薄膜	5.186 kg C/kg	南京农业大学农业资源与生态研究所
柴油	0.593 kg C/kg	政府间气候变化专门委员会(IPCC)
翻耕	312.6 kg C/hm ²	中国农业大学生物与技术学院
农业灌溉	20.476 kg C/hm ²	Dubey 和 Lal ^[27]
水稻种植	17.85 g C/m ²	闵继胜和胡浩 ^[28]

注:由于水稻种植主要排放温室气体甲烷(CH₄),先将CH₄排放量置换成标准碳,将转换系数取值为6.818^[13]。

2.2.2 核心解释变量

数字经济(DE)促进农业碳减排是一个多要素协同驱动的复杂过程。数字基础设施为农业碳排放监测、数据采集与信息传输提供基础支撑;数字产业化通过带动数字装备、软件服务与人才供给提升,加速低碳技术研发迭代与规模化应用,为农业碳减排提供持续的技术供给;数字金融则凭借普惠性优势,为农业低碳转型提供多层次、可持续的资金保障。三者相互耦合、协同发力,共同构成多维联动的农业碳减排体系^[29]。基于此,从数字基础设施、数字产业化、数字金融三个方面构建数字经济发展水平评价指标体系(表2)。

表2 数字经济发展水平评价指标体系

Tab.2 Evaluation index system for the development level of digital economy

一级指标	二级指标	单位	指标属性
数字基础设施	长途光缆线密度	km/km ²	+
	人均互联网宽带接入端口	个/人	+
	移动电话普及率	%	+
数字产业化	人均电信业务总量	万元/人	+
	信息传输、计算机服务和软件从业人员占比	%	+
	每百人使用互联网用户数	户/百人	+
	数字普惠金融覆盖广度		+
数字金融	数字普惠金融使用深度		+
	数字化程度		+

2.2.3 控制变量

农业碳排放强度受到多种因素的综合影响,其中产业升级(IU)、作物结构(STRU)、农业机械投入强度(MI)是具有代表性的关键因素。产业升级作为优化要素配置的关键路径,通过重塑农业产业链、提升资源利用效率,能够有效降低系统碳排放^[6];作物结构的调整则直接改变了不同碳排放特征的农作物种植比例,从而影响整体碳源构成^[30];农业机械投入强度的提升则通过提高农业生产效率降低碳排放强度^[31]。具体而言,本文以第二产业和第三产业产值占GDP的比重衡量产业升级(IU),以粮食作物播种面积与作物总播种面积之比衡量作物结构(STRU),并以农机总功率与作物播种面积之比衡量农业机械投入强度(MI)。

2.2.4 中介变量

城镇化水平(UR),以城镇常住人口占总人口比重衡量,反映乡村人口向城镇地区转移的规模和速度。

2.2.5 门槛变量

农业经济发展水平(DEV),以第一产业产值与农业人口的比重(万元/人)衡量,即农业人均产值。

2.3 数据来源

选取2011—2023年河南省18市的面板数据作为研究样本,碳源消耗量、数字经济评价指标、城镇化水平、农业经济发展水平、产业升级、作物结构及农业机械投入强度等相关数据主要来源于《河南统计年鉴》《中国城市统计年鉴》和《中国统计年鉴》;数字普惠金融覆盖广度、数字普惠金融使用深度及数字化程度的数据来源于北京大学数字金融研究中心;由于长途光缆线密度和人均互联网接入端口数无法获取,根据各市电信业务总量占所属省份比重

换算得到;少量缺失数据采用线性插值法进行填补。各变量的描述性统计见表3。

表3 主要变量描述性统计

Tab.3 Descriptive statistics of key variables

变量	样本数/个	平均值	标准差	最小值	最大值
ACI	234	0.276	0.085	0.072	0.498
DE	234	0.267	0.132	0.030	0.783
IU	234	0.884	0.064	0.723	1.064
STRU	234	0.743	0.068	0.580	0.882
MI	234	8.271	2.698	4.175	20.372
UR	234	0.508	0.098	0.315	0.800
DEV	234	0.959	0.333	0.412	2.132

3 实证结果

3.1 农业碳排放强度结果分析

图2表明,2011—2023年河南省农业碳排放强度总体呈阶段性下降趋势,由2011年的0.359降至2023年的0.190,全期累计降幅约47.08%。其中,2011—2016年为平缓下降阶段,碳排放强度由0.359降至0.299,累计降幅为16.71%;2017—2023年下降幅度明显增大,由0.303大幅降至0.190,累计降幅为37.29%,约为前一阶段的2.23倍。从年度变化幅度看,2011—2023年整个样本期内,农业碳排放强度最大单年降幅出现在2019年,农业碳排放强度下降14.87%;其次是2020年,下降14.63%,表明加速下降阶段的关键碳减排贡献主要集中在2019—2020年。

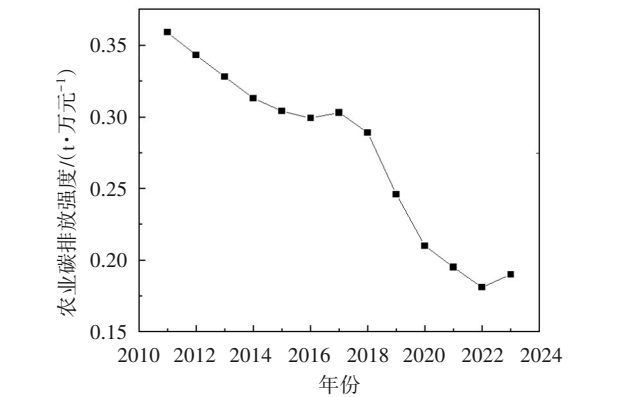


图2 2011—2023年河南省农业碳排放强度

Fig.2 Agricultural carbon emission intensity in Henan Province from 2011 to 2023

图3展示了2011—2023年河南省农业碳排放量总体趋势及碳源结构分布。化肥与翻耕始终是农业碳排放的主要来源,两者合计占比超过70%,其中化

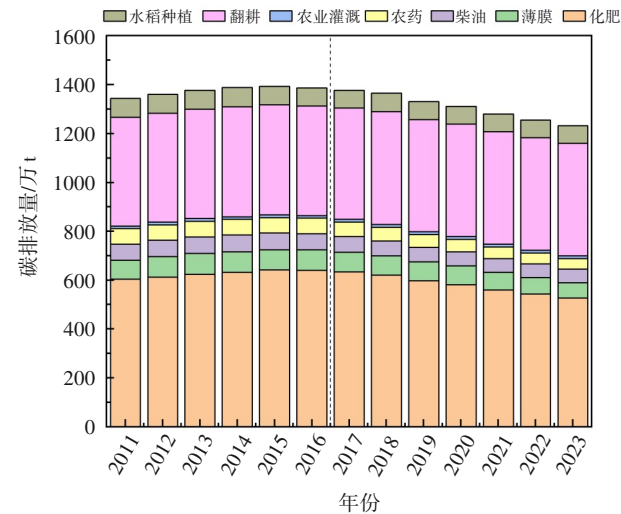


图3 2011—2023年河南省碳排放量趋势及碳源分布

Fig.3 Trends of carbon emissions and carbon source distribution in Henan Province from 2011 to 2023

肥碳排放占比最高,达到44.90%。各碳源碳排放量的变化趋势与农业碳排放强度整体走势基本一致。2016年前农药、柴油、水稻和薄膜碳排放量小幅波动;2016年后多数碳源碳排放量逐年下降,仅农业灌溉逐年低速增长。

3.2 数字经济赋能农业碳减排的机制分析

由农业碳排放强度测算结果可知,河南省农业碳排放强度在2016年前后呈现出明显的阶段性差异,这一变化恰逢2016年农业部印发《“十三五”全国农业农村信息化发展规划》,该规划强调数字技术与土地、资本、劳动力、农机装备等生产要素的深度融合与协同配置,为农业生产过程的精细化管理、要素投入减量增效与资源利用效率提升提供了条件,从而引发农业碳减排机制的深层调整。鉴于2016年前后碳排放强度变化趋势差异显著,将研究期划分为2011—2016年(第一阶段)和2017—2023年(第二阶段)两个阶段,以便更针对性地剖析其作用机制。

3.2.1 基准回归

在基准回归分析前,首先开展 Hausman 检验。结果显示,2011—2016年和2017—2023年两个阶段的 p 值均小于0.001,在1%的显著水平上拒绝随机效应模型适用的原假设,因此选用个体固定效应模型进行估计。基准回归结果见表4。

回归结果表明,2011—2016年,未加入控制变量时,数字经济发展水平的回归系数为-0.387,在1%水平上显著为负;加入控制变量后,其系数仍然

表4 基准回归结果

Tab.4 Baseline regression results

变量	ACI			
	2011—2016年		2017—2023年	
DE	-0.387*** (-12.71)	-0.436*** (-9.81)	-0.376*** (-4.95)	-0.233*** (-4.02)
IU		0.278** (1.98)		1.497*** (3.76)
STRU		0.041 (0.843)		1.444*** (4.65)
MI		-0.002 (-1.16)		-0.090*** (-8.25)
时间固定效应	是	是	是	是
个体固定效应	是	是	是	是
样本数/个	108	108	126	126
R ²	0.645	0.667	0.186	0.570

注：*、**、***分别代表在10%、5%、1%的水平上显著，括号内为标准误。

显著为负。在2017—2023年，未加入控制变量时，数字经济发展水平每提升1%，农业碳排放强度平均降低0.376%；加入控制变量后，农业碳排放强度平均降低0.233%，但仍通过1%水平的显著性检验。综上，两个阶段中无论是否纳入控制变量，数字经济均显著抑制农业碳排放强度，但在第二阶段其作用有所减弱，初步验证了假设1。控制变量在不同阶段也表现出显著差异：产业升级对农业碳排放强度的正向影响在第二阶段显著增加；作物结构在第一阶段对农业碳排放强度没有显著影响，在第二阶段呈显著正向影响；农业机械投入强度在第一阶段不显著，但在第二阶段表现为显著负向影响，凸显了农业机械化技术的大规模应用在降低农业碳排放强度方面的积极作用。这些发现进一步丰富了对数字经济碳减排机制的理解。

3.2.2 内生性分析

数字经济与农业碳减排之间可能存在双向因果关联，从而引发模型内生性问题。一方面，数字经济通过数字技术渗透、要素优化配置与生产效率提升，降低农业碳排放强度；另一方面，农业碳减排目标约束、绿色监管强化以及低碳产品市场需求扩张，也可倒逼数字技术研发迭代与应用深化，促进数字经济水平提升^[13]。为缓解模型中可能存在的内生性问题，采用工具变量法(IV-2SLS)进行估计。2011—2016年和2017—2023年的解释变量虽然相同，但数字经济发展的阶段特征鲜明。2011—2016年，数字经济处于初级阶段，以邮政为代表的传统通信与物

流网络是其核心基础设施。借鉴黄群慧等^[32]的研究，选取邮政业务总量(IV1)作为2011—2016年的工具变量。该变量是早期支撑数字经济运行的传统实体网络的核心表征，与数字经济发展密切相关。同时，作为历史形成的基础通信物流设施，其布局与农业碳排放没有直接因果联系，满足外生性要求。2017—2023年，数字经济逐步转向技术融合与创新驱动，其发展高度依赖地区长期积累的信息化基础。为捕捉这一长期形成的基础条件，参考赵涛等^[33]的研究，选取2000年各城市固定电话普及率，并构造其与年份虚拟变量的交互项作为2017—2023年的面板工具变量(IV2)。该指标具有严格的历史前定特征，能够体现地区信息化禀赋对数字技术长期发展的持续影响，满足相关性条件，且其本身与农业生产及碳排放过程无直接关联，从而具备良好的外生性。结果如表5所示。

表5 工具变量回归结果

Tab.5 Results of instrumental variable regression

变量	ACI			
	2011—2016年		2017—2023年	
IV1	0.001*** (4.82)			
IV2			0.001*** (3.99)	
DE		-0.524*** (-2.95)		-0.319** (-2.00)
控制变量	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是
个体固定效应	是	是	是	是
Kleibergen-Paap rk LM		3.524* {0.061}		12.810*** {0.000}
Cragg-Donald Wald F		48.885 [16.38]		22.519 [16.38]
样本数/个	108	108	126	126
R ²	0.989	0.956	0.978	0.909

注：{ }中为Kleibergen-Paap rk LM识别不足检验的p值；[]中为Cragg-Donald Wald F弱工具变量检验在10%水平上的临界值；*、**、***分别代表在10%、5%、1%的水平上显著，括号内为标准误。

由表5可知，在识别不足检验中，2011—2016年Kleibergen-Paap rk LM统计量为3.524($p<0.1$)，2017—2023年Kleibergen-Paap rk LM统计量为12.810($p<0.001$)，均拒绝“识别不足”的原假设。在弱识别检验中，2011—2016年和2017—2023年的Cragg-Donald Wald F统计量分别为48.885和22.519，均大于10%水平上的临界值，拒绝“弱工具

变量”的原假设。因此,工具变量选取合理,且利用上述工具变量矫正内生性问题后,数字经济仍然显著降低农业碳排放强度。

3.2.3 稳健性检验

从以下三方面进行稳健性检验:①剔除省会城市样本;②在基准模型中进一步引入政府干预(GOV)作为额外控制变量;③替换回归模型,采用随机效应模型替代固定效应模型。回归结果见表6,其中(1)至(3)列与上述检验逐一对应。结果显示,无论采用何种稳健性检验方式,数字经济对农业碳排放强度的影响均在1%水平上显著为负,与基准结果一致,表明结论稳健可靠。

3.2.4 中介效应检验

理论分析表明,数字经济通过提升城镇化水平间接降低农业碳排放强度。为验证这一作用路径,构建中介效应模型进行检验,结果见表7。

回归结果表明,数字经济影响农业碳减排的机制存在显著的阶段性差异。2011—2016年,数字经济对城镇化水平呈现显著的正向影响,说明发展数字经济有助于提升城镇化水平;但城镇化水平对农业碳排放强度的直接作用未通过显著性检验。这意味着此阶段数字经济对农业碳减排的作用以直接效应为主,城镇化的传导路径尚未有效建立。2017—2023年,数字经济对城镇化水平的回归系数为0.092,而城镇化水平对农业碳排放强度的回归系数为-1.060,均通过了1%的显著性检验,表明数字经济可以通过城镇化水平降低农业碳排放强度,呈现部分中介效应,且中介效应占比为41.85%。据此,假设2得到验证。中介效应的阶段性差异,深刻反

表7 中介效应结果

Tab.7 Results of mediating effect

变量	UR		ACI	
	2011—2016年	2017—2023年	2011—2016年	2017—2023年
DE	0.365*** (21.66)	0.092*** (2.86)	-0.436*** (-9.81)	-0.233*** (-4.02)
UR			-0.186 (-0.65)	-1.060*** (-7.31)
控制变量	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是
个体固定效应	是	是	是	是
样本数/个	108	126	108	126
R ²	0.946	0.462	0.669	0.717

注:*,**、***分别代表在10%、5%、1%的水平上显著,括号内为标准误。

映出城镇化从规模扩张向质量提升转型,与数字经济从广泛连接向深度融合演进的过程高度同步。2011—2016年,数字经济借助电商普及等方式推动城镇化的规模扩张,但此阶段城镇化侧重于土地和人口等要素的规模增长,其知识外溢与绿色治理功能较弱,难以有效传导数字经济对农业生产与能源结构的优化作用。2017—2023年,在《2020年新型城镇化建设和城乡融合发展重点任务》等政策推动下,城镇化进程加速向绿色智慧方向转型,而数字经济也与物联网、人工智能等技术深度融合,促进了农业生产的精准化与集约化。这一转变使城镇化的核心功能,从传统要素集聚转向绿色技术集成与农业低碳发展,从而构成释放数字经济深层减排潜力的结构性基础。

表6 稳健性检验结果

Tab.6 Results of robustness tests

变量	ACI					
	2011—2016年	2017—2023年	2011—2016年	2017—2023年	2011—2016年	2017—2023年
DE	-0.466*** (-8.73)	-0.230*** (-3.82)	-0.423*** (-9.31)	-0.237*** (-4.29)	-0.449*** (-11.12)	-0.325*** (-4.88)
GOV			-0.243 (-1.30)	0.957*** (3.35)		
常数项	0.007 (0.03)	-1.375*** (-1.82)	0.128 (0.69)	-1.569*** (-4.26)	0.065 (0.45)	-0.248 (-1.42)
控制变量	是	是	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是		
个体固定效应	是	是	是	是		
样本数/个	102	119	108	126	108	126
R ²	0.639	0.605	0.673	0.612	0.663	0.264

注:*,**、***分别代表在10%、5%、1%的水平上显著,括号内为标准误。

3.2.5 门槛效应检验

选取农业经济发展水平(DEV)作为门槛变量,构建面板门槛模型,以考察数字经济对农业碳排放强度的非线性影响。在进行正式估计之前,首先检验农业经济发展水平是否存在门槛效应及其门槛个数。本文采用 Bootstrap 方法进行 500 次重复抽样,结果如表 8 所示。

研究表明,2011—2016 年单门槛效应检验的 p 值为 0.214,未通过 10% 的显著性水平检验,表明该阶段不存在显著的门槛效应。2017—2023 年单门槛与双门槛效应均在 1% 的水平上高度显著($p<0.001$),而三门槛效应不显著($p=0.910$),故农业经济发展水平在该阶段存在双门槛效应。据此,第二阶段采用双重门槛模型进行回归分析,得到第一门槛值为 0.861,第二门槛值为 1.128,门槛回归结果见表 9。

表 8 门槛效应结果
Tab.8 Results of the threshold effect

年份	门槛数	F 值	p 值	1% 临 界值	5% 临 界值	10% 临 界值
2011—2016	单门槛	10.94	0.214	28.756	19.370	15.042
	单门槛	56.29	0.000	36.254	27.736	24.633
2017—2023	双门槛	50.20	0.000	27.578	27.578	17.556
	三门槛	19.06	0.910	61.739	61.739	47.733

表 9 2017—2023 年门槛回归结果

Tab.9 Threshold regression results from 2017 to 2023

门槛变量	ACI
DEV≤0.861	0.141*
	(1.93)
0.861<DEV≤1.128	-0.072
	(-1.44)
1.128<DEV	-0.176***
	(-3.51)
常数项	-0.099
	(-0.48)
控制变量	是
样本数/个	126
R^2	0.823

注:*,**、***分别代表在 10%、5%、1% 的水平上显著,括号内为标准误。

回归结果表明,2017—2023 年,当农业经济发展水平处于较低水平($DEV\leq0.861$)时,农业碳排放强度的系数为 0.141,在 10% 水平上显著为正,表明当农业经济基础比较薄弱时,数字技术的引入可能会伴随直接能耗增加或诱发粗放型生产行为,从而

造成农业碳排放强度增加。当 $0.861<DEV\leq1.128$ 时,数字经济对农业碳排放强度的影响已由促进转为抑制,但此时抑制作用并不显著。当 $DEV>1.128$ 时,回归系数为-0.176,通过了 1% 水平上的显著性检验,表明当农业经济自身发展跨越较高的门槛后,数字经济能够稳定显著地发挥其碳减排效应。综上,假设 3 得到验证。

由两个阶段的门槛效应结果可知,门槛效应的显现是一个动态过程。在 2011—2016 年,由于农业经济整体水平偏低,且主要依赖传统生产方式,数字经济与农业之间的融合程度较低,导致农业生产系统缺乏有效承接数字技术所需的现代化管理、资金投入和技术基础,因此农业经济发展水平未能构成显著的门槛条件。进入 2017—2023 年,情况发生根本转变。随着农业现代化与数字技术深度融合,农业部门对数字技术的吸收与应用能力得到根本性提升。当农业经济发展水平跨越特定阈值后,便具备了将数字赋能高效转化为绿色生产力的能力,从而能充分释放数字经济的碳减排潜力。此时,农业经济发展水平呈现出显著的双重门槛特征,能够有效区分数字经济碳减排效应的强弱。

4 结论与政策建议

本文在数字经济驱动农业碳减排理论分析的基础上,基于河南省 18 市 2011—2023 年的面板数据,实证检验了数字经济对农业碳排放强度的影响机制及其阶段性特征。得到如下结论。①数字经济显著降低了农业碳排放强度,2011—2016 年数字经济的碳排放强度抑制效应强于 2017—2023 年。②数字经济的碳减排作用具有明显的传导机制演化特征。2011—2016 年其作用主要通过直接效应实现;2017—2023 年,城镇化水平发挥了部分中介效应,且中介效应占比达 41.85%。这表明,数字经济对农业碳减排的影响逐渐由直接技术渗透,转向通过推动城镇化进程间接促进减排,形成复合型传导路径。③数字经济在影响农业碳减排过程中存在门槛效应。2011—2016 年,薄弱的农业经济基础与数字化转型条件不足,使得农业经济发展水平未能发挥显著的门槛作用;2017—2023 年,随着农业现代化与数字技术深度融合,农业经济发展水平在跨越特定阈值后,成为数字经济碳减排潜力得以充分释放的关键条件,形成了显著的双重门槛效应。

根据上述研究结论,提出如下政策建议。

1)实施分阶段、差异化的数字赋能农业碳减排策略。针对数字经济作用于农业碳排放的阶段化特征,前期应将工作重心放在数字技术在农业生产环节的落地应用与广度渗透上,夯实生产环节减排的技术基础;后期则需要深化数字技术与城镇化进程的融合程度,充分释放城镇在要素整合、技术扩散与治理协同中的中介传导效能,构建起“数字赋能—城镇联动—农业碳减排”的完整路径,实现从单一环节减排到全系统减排的升级。

2)要着力筑牢农业经济发展根基,破除数字技术驱动碳减排的“效能门槛”。研究表明,农业经济发展水平是数字经济充分释放碳减排效应的核心前置条件。需通过提高农业全要素生产率、延伸产业链与价值链、加大农业基础设施及公共服务供给等路径,推动农业经济稳步跨越发展阈值,从而为数字技术深度嵌入农业碳减排场景、实现碳减排效能转化奠定坚实基础。

3)数字经济赋能农业碳减排的过程中,其效应易受阶段性波动与结构性约束影响,因此亟需通过两大举措增强政策响应弹性:一是建立多维度动态监测机制,建立包含碳排放、数字发展、城镇化与农业经济等核心指标的监测体系,实现对政策成效与机制变化的定期跟踪评估;二是完善跨主体协同治理框架,推动跨部门、跨层级治理主体的联动协作,最终促成政策从单一技术推广向系统生态优化的深度转型。

参考文献:

- [1] Wang H J, Qiu T W. The effects of farmer cooperatives on agricultural carbon emissions reduction: Evidence from rural China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 450: 41881.
- [2] 李媛,阮连杰. 数字经济背景下中国式农业农村现代化的拓展路径与政策取向[J]. *西安财经大学学报*, 2023, 36(2): 21-29.
Li Y, Ruan L J. The expansion path and policy orientation of Chinese-style agricultural and rural modernization under the background of digital economy [J]. *Journal of Xi'an University of Finance and Economics*, 2023, 36 (2) : 21-29.
- [3] 马志超. 黄河流域农业碳排放与经济增长时空耦合关系研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2024, 45(12): 15-26.
Ma Z C. Research on the spatio-temporal coupling relationship between agricultural carbon emissions and economic growth in the Yellow River Basin[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2024, 45(12): 15-26.
- [4] Xie T T, Huang Z T, Tan T, et al. Forecasting China's agricultural carbon emissions: A comparative study based on deep learning models [J]. *Ecological Informatics*, 2024, 82: 102661.
- [5] 魏振香,吴晓娟. 山东省农业低碳发展及驱动因素分析[J]. *河南科学*, 2021, 39(11): 1878-1886.
Wei Z X, Wu X J. Analysis of agricultural low-carbon development and driving factors in Shandong Province [J]. *Henan Science*, 2021, 39(11): 1878-1886.
- [6] 张小蓉,杨燕. 山西省农业碳排放演化趋势及影响因素研究[J/OL]. *中国农业资源与区划*, 2025: 1-15. <https://link.cnki.net/urlid/11.3513.S.20250313.1426.016>.
Zhang X R, Yang Y. Research on the evolution trend and influencing factors of agricultural carbon emissions in Shanxi Province [J/OL]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2025: 1-15. <https://link.cnki.net/urlid/11.3513.S.20250313.1426.016>.
- [7] 易钰杰,古川. 城镇化背景下小农结构的农业碳排放影响[J]. *农村经济*, 2023(11): 116-124.
Yi Y J, Gu C. The impact of smallholder structure on agricultural carbon emissions under the background of urbanization [J]. *Rural Economy*, 2023(11): 116-124.
- [8] Ismael M, Srouji F, Boutabba M A. Agricultural technologies and carbon emissions: Evidence from Jordanian economy [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(11): 10867-10877.
- [9] 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]. *中国农业资源与区划*, 2023, 44(8): 145-157.
Tian H Y, Guan H L. Research on the impact of digital economy on carbon emissions from grain production—Empirical evidence from 108 prefecture-level cities in the Yangtze River Economic Belt [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(8): 145-157.
- [10] 田云,廖华. 数字经济对农业碳排放的影响及作用机制研究[J]. *改革*, 2024(9): 84-99.
Tian Y, Liao H. Research on the impact and mechanism of digital economy on agricultural carbon emissions [J]. *Reform*, 2024(9): 84-99.
- [11] 杨尚钊. 数字经济发展对农业碳排放的影响及区域异质性分析——兼论技术创新的中介效应[J]. *西南农业学报*, 2025, 38(5): 1117-1128.
Yang S Z. Analysis of the impact of digital economy development on agricultural carbon emissions and regional het-

- erogeneity—Also on the mediating effect of technological innovation [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2025, 38(5): 1117–1128.
- [12] 吴文洁, 李佳欣. 数字经济对农业碳排放强度的影响及空间溢出效应[J]. *西安石油大学学报(社会科学版)*, 2025, 34(2): 9–17.
Wu W J, Li J X. The impact and spatial spillover effect of digital economy on agricultural carbon emission intensity [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Social Sciences Edition)*, 2025, 34(2): 9–17.
- [13] 刘颖, 徐少雄. 数字经济发展对中国农业碳排放的影响研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2025, 46(3): 1–12.
Liu Y, Xu S X. Research on the impact of digital economy development on agricultural carbon emissions in China [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2025, 46(3): 1–12.
- [14] 刘震, 张晓星, 魏威岗. 农村数字经济发展对农业碳排放的影响——基于29个省份的面板数据分析[J]. *江苏大学学报(社会科学版)*, 2023, 25(3): 20–32.
Liu Z, Zhang X X, Wei W G. The impact of rural digital economy development on agricultural carbon emissions—Based on panel data analysis of 29 provinces [J]. *Journal of Jiangsu University (Social Sciences Edition)*, 2023, 25(3): 20–32.
- [15] 程秋旺, 许安心, 陈钦. “双碳”目标背景下农业碳减排的实现路径: 基于数字普惠金融之验证[J]. *西南民族大学学报(人文社会科学版)*, 2022, 43(2): 115–126.
Cheng Q W, Xu A X, Chen Q. The realization path of agricultural carbon emission reduction under the background of “double carbon” target: Verification based on digital financial inclusion [J]. *Journal of Southwest Minzu University (Humanities and Social Science)*, 2022, 43(2): 115–126.
- [16] 张正平, 王琼. 数字普惠金融发展对农业生产有资本替代效应吗?: 基于北京大学数字普惠金融指数和CFPS数据的实证研究[J]. *金融评论*, 2021, 13(6): 98–116.
Zhang Z P, Wang Q. Does digital financial inclusion affect capital–labor substitution in agricultural Production? An empirical research based on digital financial inclusion index of Peking University and CFPS data [J]. *Chinese Review of Financial Studies*, 2021, 13(6): 98–116.
- [17] 王欣宇. 数字经济推动农村产业融合发展研究[J]. *山西农经*, 2025(16): 44–46.
Wang X Y. Research on digital economy promoting the integrated development of rural industries [J]. *Shanxi Agricultural Economy*, 2025(16): 44–46.
- [18] 周子铭, 杨维诚. 高标准农田建设助力农民持续增收: 理论逻辑与实践路径[J]. *南京农业大学学报(社会科学版)*, 2025, 25(4): 176–188.
Zhou Z M, Yang W C. High–standard farmland construction helps farmers’ continuous income increase: Theoretical logic and practical path [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2025, 25(4): 176–188.
- [19] 魏滨辉, 罗明忠. 数字普惠金融对农业服务业的影响——来自中国地级市的经验证据[J]. *金融经济学研究*, 2023, 38(5): 61–74.
Wei B H, Luo M Z. The impact of digital inclusive finance on agricultural services—Empirical evidence from Chinese prefecture–level cities [J]. *Journal of Finance and Economics*, 2023, 38(5): 61–74.
- [20] 朱建军, 王慧敏, 张复宏. 数字素养对家庭农场农业生产服务供给的影响研究[J]. *农业经济与管理*, 2025(2): 52–63.
Zhu J J, Wang H M, Zhang F H. Research on the impact of digital literacy on the supply of agricultural production services of family farms [J]. *Agricultural Economics and Management*, 2025(2): 52–63.
- [21] 周云, 刘宗飞, Chinomso W I, 等. 城镇化对农业碳排放的抑制作用——基于农业经济发展水平的门槛效应[J/OL]. *安徽科技学院学报*, 2025: 1–9. <https://link.cnki.net/urlid/34.1300.N.20251201.1726.002>.
Zhou Y, Liu Z F, Chinomso W I, et al. The inhibiting effect of urbanization on agricultural carbon emissions—A threshold effect based on the level of agricultural economic development [J/OL]. *Journal of Anhui Science and Technology University*, 2025: 1–9. <https://link.cnki.net/urlid/34.1300.N.20251201.1726.002>.
- [22] 马骏, 旦增维旦, 高慧娴. 种植业集聚与农业面源污染的时空特征及影响分析——来自长江流域的证据[J]. *资源与产业*, 2023, 25(6): 115–129.
Ma J, Danzeng W D, Gao H X. Spatiotemporal characteristics and impact analysis of planting industry agglomeration and agricultural non–point source pollution—Evidence from the Yangtze River Basin [J]. *Resources and Industries*, 2023, 25(6): 115–129.
- [23] Hansen B E. Threshold effects in non–dynamic panels: Estimation, testing, and inference [J]. *Journal of Econometrics*, 1999, 93(2): 345–368.
- [24] 田云, 蔡艳蓉. 长江经济带农业碳排放EKC检验及其驱动因素分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(11): 2403–2417.
Tian Y, Cai Y R. EKC–based test for agricultural carbon emissions in Yangtze River Economic Belt and analysis of

- driving factors [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(11): 2403–2417.
- [25] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory[R]. 2006.
- [26] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 91 (1/2/3): 217–232.
- [27] Dubey A, Lal R. Carbon footprint and sustainability of agricultural production systems in Punjab, India, and Ohio, USA[J]. *Journal of Crop Improvement*, 2009, 23(4): 332–350.
- [28] 闵继胜, 胡浩. 中国农业生产温室气体排放量的测算[J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(7): 21–27.
- Min J S, Hu H. Calculation of greenhouse gas emissions from agricultural production in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(7): 21–27.
- [29] 孟凡琳, 赵冰冰, 李炳军. 数字赋能农业碳减排的组态效应分析[J/OL]. *河南农业大学学报*, 2025: 1–17. <https://doi.org/10.16445/j.cnki.1000-2340.20250919.001>.
- Meng F L, Zhao B B, Li B J. Analysis of the configuration effects of digital empowerment in agricultural carbon reduction [J/OL]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2025: 1–17. <https://doi.org/10.16445/j.cnki.1000-2340.20250919.001>.
- [30] Wang X L, Xu J Y, Wu Z S, et al. Effect of annual prescribed burning of wetlands on soil organic carbon fractions: A 5-year study in Poyang, China [J]. *Ecological Engineering*, 2019, 138: 219–226.
- [31] 刘康, 张寒, 王玲. 黄土高原作物种植碳足迹时空演化驱动因素及趋势预测[J]. *环境科学*, 2025, 46(5): 3148–3160.
- Liu K, Zhang H, Wang L. Spatial and temporal evolution of crop cultivation carbon footprint in the Loess Plateau: Driving force and trend prediction[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(5): 3148–3160.
- [32] 黄群慧, 余泳泽, 张松林. 互联网发展与制造业生产率提升: 内在机制与中国经验[J]. *中国工业经济*, 2019(8): 5–23.
- Huang Q H, Yu Y Z, Zhang S L. Internet development and manufacturing productivity improvement: Internal mechanism and Chinese experience [J]. *China Industrial Economics*, 2019(8): 5–23.
- [33] 赵涛, 张智, 梁上坤. 数字经济、创业活跃度与高质量发展——来自中国城市的经验证据[J]. *管理世界*, 2020, 36(10): 65–76.
- Zhao T, Zhang Z, Liang S K. Digital economy, entrepreneurship activity and high-quality development—Empirical evidence from Chinese cities[J]. *Journal of Management World*, 2020, 36(10): 65–76.

(编辑 关欣佳)