

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2026.07.011

刘新智, 刘家益, 周韩梅, 等. 数字经济对农业碳排放的影响机制与空间效应研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2026, 48(7): 131-145.

数字经济对农业碳排放的影响机制与空间效应研究

刘新智^{1,2,3}, 刘家益¹, 周韩梅¹, 王浩力¹

1. 西南大学 经济管理学院, 重庆 400715;

2. 西南大学 中国西部非公经济发展与扶贫反哺协同创新中心, 重庆 400715;

3. 西南大学 普惠金融与农业农村发展研究中心, 重庆 400715

摘要: 充分发挥数字经济对农业碳减排的推动作用, 促进农业绿色转型, 对于有效实现“双碳”目标至关重要。基于 2012—2022 年中国 30 个省份(不含西藏、香港、澳门、台湾)的面板数据, 实证分析数字经济发展对农业碳排放的影响机制、门槛效应和空间溢出效应。研究发现: 数字经济发展显著降低了农业碳排放; 在高农业科技投入地区和东部地区, 数字经济的农业碳减排效应更显著; 农村金融、农业产业结构高级化和农业规模经营是数字经济促进农业碳减排的重要路径; 数字经济发展对农业碳排放的影响存在农业基础设施建设水平的单一门槛效应, 当农业基础设施建设水平超过门槛值 0.660 2 时, 数字经济的农业碳减排效应较小; 空间溢出效应显示, 数字经济发展不仅能降低本地区的农业碳排放, 还能带动周边地区农业碳减排, 当地理阈值超过 450 km 后, 空间外溢效果显著为负。因此, 应重视数字经济在农业碳减排中的支撑作用, 关注农村金融、农业产业结构高级化和农业规模经营的渠道作用, 因地制宜发挥数字经济的农业碳减排效应, 充分利用数字经济对农业碳排放的空间溢出效应。

关键词: 数字经济; 农业碳排放; 农业规模经营; 门槛效应;

空间衰减边界

中图分类号: F490

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2026)07-0131-15

Research on the influence mechanisms and spatial effects of the digital economy on agricultural carbon emissions

Liu Xinzh^{1,2,3}, Liu Jiayi¹, Zhou Hanmei¹, Wang Haoli¹

收稿日期: 2025-12-22

基金项目: 重庆市研究生科研创新项目(CYS25101); 重庆市社会科学规划重大项目(2025WT21); 重庆市社会科学规划重点项目(2023WMHJ04); 西南大学研究阐释党的二十届三中全会精神专项(SWU2509315); 西南大学 2035 先导计划“国民经济双循环赋能乡村振兴”项目(SWUPilotPlan025); 重庆市教委人文社会科学研究项目党建专项(22SKDJ003)。

作者简介: 刘新智, 教授, 主要从事数字乡村与乡村振兴、区域创新与协调发展研究。

1. School of Economics and Management, Southwest University, Chongqing 400715, China;
2. Innovation Center of Non-Public Economic Development and Anti-Compensation for Poverty Reduction in Western China, Southwest University, Chongqing 400715, China;
3. Research Center for Inclusive Finance and Agricultural & Rural Development, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Giving full play to the driving role of the digital economy in agricultural carbon emission reduction and accelerating the green transformation of agriculture are crucial for effectively realizing the “dual carbon” goals. Based on the panel data from 30 Chinese provinces from 2012 to 2022 (excluding Xizang, Hong Kong, Macao and Taiwan), this study empirically investigated the impact mechanisms, threshold characteristics, and spatial spillover effects of the digital economy development on agricultural carbon emissions. The results revealed that the development of the digital economy significantly reduced agricultural carbon emissions, with stronger effects observed in regions featuring higher agricultural technology investment and in eastern China. Rural finance, industrial structure upgrading, and large-scale agricultural operations served as key pathways through which the digital economy promoted carbon reduction. Moreover, there existed a single threshold effect of agricultural infrastructure construction level on the impact of the digital economy development on agricultural carbon emissions. When the agricultural infrastructure index exceeded 0.660 2, the carbon emission reduction effect became weaker. Spatial spillover effects further demonstrated that the development of the digital economy not only reduced local agricultural carbon emissions but also generated positive spillovers in surrounding regions, while the effect turned negative beyond a geographical distance of 450 km. Therefore, attention should be paid to the supporting role of the digital economy in agricultural carbon emission reduction, focusing on the mediating roles of rural finance, upgrading of agricultural industrial structure, and agricultural scale operation. The carbon emission reduction effect of the digital economy should be adapted according to local conditions, and the spatial spillover effects of the digital economy on agricultural carbon emissions should be fully utilized.

Key words: digital economy; agricultural carbon emissions; agricultural scale operation; threshold effect; spatial attenuation boundary

农业是国民经济发展的基础产业,对保证国民经济正常运转和社会稳定有着重要的战略地位。但在农业生产过程中,农业活动造成的温室气体排放问题愈发严峻,农业生产与生态环境之间的矛盾日益凸显,成为制约农业高质量发展的重要瓶颈。在数字技术影响生产方式的背景下,研究数字经济对农业碳排放的影响、探索数字化转型拉动农业绿色发展无疑成为我国实现经济可持续发展目标的有效途径,更是落实碳达峰、碳中和战略的重要实践支撑。

随着信息技术的迅速发展和互联网普及,数字经济这一新型经济模式迅速崛起,改变了经济发展方式和产业结构,农业绿色发展迎来了数字技术新动能赋予的新机遇。大数据、人工智能和区块链等技术能够提升农业生产过程的精细化管理水平,从而使得化肥、农药等农业投入品的使用强度明显降低,有效减小了农业污染物排放与处理带来的环境压力。此外,数字经济还能丰富信息数据,全面实现农业产业供应链数字化,加速推进小农户同现代农业体系的融合,实现农业绿色发展的经济效益和社会效益双丰收。然而,在过往研究中,少有文献从农业视角出发,探究数字经济作用于农业碳排放的内在机理。

目前学术界对农业碳排放的研究主要涉及如下两个领域:一是农业碳排放的时空特征。有学者从时间维度上指出我国农业碳排放总量呈现出鲜明的“先增后减”趋势^[1-2],也有学者从空间维度上发现我国农业

碳排放展现出“西高东低”的地域性差异^[3]。二是农业碳排放的影响因素。国外有学者认为,农业产值的增长^[4]和技术进步^[5]能减少二氧化碳排放量,从而实现农业碳减排的目的。国内部分学者聚焦某些特定因素,并详细探讨这些因素对农业碳排放的影响机制,如数字普惠金融^[6]、农业规模经营^[7]、农业保险^[8]等,而更多的学者则倾向于从多个角度揭示农业碳排放的驱动因素,如农业机械化水平、地形起伏度、农业产业集聚^[9]等。

数字经济的快速渗透为农业绿色转型和可持续发展提供了新的契机。有学者认为数字经济能够显著降低农业碳排放^[10-11],也有学者认为数字乡村建设对农业碳排放的影响呈现“倒 U 型”格局^[12],初期因基建投资加剧排放,后期随技术成熟转向减排。从影响机制看,数字经济发展能够通过农业社会化服务水平^[10]、农业绿色技术创新^[13]影响农业碳排放,还有学者从农旅融合视角论证数字赋能可以通过规范农户行为促进绿色生产^[14]。相反,有部分学者认为数字经济会增加农业碳排放,由于不同地区数字经济与绿色发展水平失衡、传统农村产业数字化结构调整困难,数字经济促进农业绿色发展的功能有所减弱^[15],并且随着环境规制水平的提高,数字化转型可在一定程度上提高农业碳生产率水平^[16]。

综上,尽管目前在数字经济影响农业碳排放问题上已开展了一定研究,但仍存在一些研究空间:一是现有研究大多聚焦工业领域或者整体领域,需要进一步加强对数字经济与农业碳排放的整合分析研究;二是已有研究在进行中介效应分析时,其作用机制较为单一,应丰富机制研究;三是现有的数字经济与农业碳排放的文献中,关于门槛效应和空间溢出效应的研究还需要加强。因此,本研究实证分析 2012—2022 年我国数字经济发展对农业碳排放的影响机制、门槛效应和空间溢出效应。边际贡献主要体现在如下几方面:一是从农业层面深入考察数字经济的碳减排效应,解释数字经济在推动农业绿色发展、降低碳排放上的积极作用;二是进一步构建中介效应模型,从农村金融、农业产业结构高级化和农业规模经营 3 个方面剖析数字经济影响农业碳排放的作用机制,丰富机制研究;三是结合地理学第一定理,计算数字经济对农业碳排放的空间衰减边界,为我国因地制宜制定农业碳减排政策提供实证参考。

1 理论分析与研究假设

1.1 数字经济对农业碳排放的直接影响

内生增长理论将研发投入和技术进步视为促进经济持续增长的内生因素,将数据要素纳入农业全要素生产函数中,除了能够激励土地和劳动力等传统因素实现帕累托最优配置,还能依靠精准衔接模式克服传统农业生产体制的弊端。数字化农业通过智能传感器、大数据分析等技术,能够实现农业精准化管理,提高生产效率和资源利用率^[17]。一方面,结合卫星遥感、物联网等数字技术手段能够有效识别出土地碎片化的特征,减少因为低效耕作造成的能源浪费及碳排放;另一方面,采用大数据驱动的劳动力智能匹配系统,可以有效解决人力资源匹配失衡问题,提高作业效率,减少间接排放。区块链技术依托“技术信任”重构农业供应链,其去中心化特性有效缓解了信息不对称引发的资源错配问题。在农业生产环节,应用追溯系统来解决化肥、农药等农业投入品的质量信息不对称问题,引导农户践行绿色替代和精准施用;在农业流通环节,共享实时信息能够降低交易成本,减少物流环节的碳排放。农业生产者运用精准信息驱动型策略提高资源管理效率,降低农业部门的碳足迹。基于此,本研究提出以下假设:

假设 1:数字经济发展能显著降低农业碳排放。

1.2 数字经济对农业碳排放的影响机制

本研究从农村金融、农业产业结构高级化和农业规模经营 3 个方面探讨数字经济对农业碳排放的影响机制。

第一,数字经济通过农村金融促进农业碳减排。数字经济的渗透能提高农村金融市场的运行效率,新兴金融科技能大幅降低传统金融服务的交易成本^[18]。数字经济还能通过农村金融打破传统金融市场的信

息壁垒,让农户和企业更高效地获得金融服务与资金支持,降低农业生产与农村经济发展的融资成本^[19]。一方面,农村金融市场借助绿色信贷、农业保险等金融手段,引导农业生产从传统高碳模式转向数字化绿色模式;另一方面,将区块链技术进行创新性应用并融合卫星遥感技术,能推动农田生态固碳价值量化并转化为金融资产,直接推动农业低碳转型与可持续发展。

第二,数字经济通过农业产业结构高级化促进农业碳减排。数字技术有利于传统初级农产品产业链延伸,并向精深加工、流通及服务等领域拓展升级,提升整个农业体系的技术含量,优化农业内部的价值分配,促进农业体系向专业化、高级化转型。一方面,数字技术加快劳动力、资本等生产要素在农、林、牧、渔业等各部门之间自由流动,推动要素从低效率领域向高效率领域优化配置^[20]。数字技术能提升信息透明度,降低交易成本,缓解部门之间存在的信息不对称问题,从而在生产要素重新配置时提升边际报酬与产出水平,解决因资源配置低效产生的高碳排放问题。另一方面,数字技术优势部门通过溢出效应将先进的知识和绿色低碳技术推广到其他部门,使得这些部门能够在短时间内实现技术升级,推动农业整体向低碳方向转型。

第三,数字经济通过农业规模经营促进农业碳减排。我国农业规模经营包括土地规模经营和服务规模经营^[21]。从投入角度来看,对于土地规模经营,数字技术可以提供准确、高效的土地供求信息,缓解农业经营主体在土地资源配置中的信息不对称问题,减少土地流转的交易费用^[22];对于服务规模经营,一些农资零售商开始通过参与土地托管来实现产业链纵向整合,以降低为小农户服务的交易成本^[23],这种方式有助于推广先进的绿色生产方式,农资零售商可以直接了解客户的实际需求,提高精准化服务水平。从产出视角来看,对于土地规模经营,将数字经济整合进规模化农业运营,能够通过精细化管理与智能化决策有效提升农业生产效率,并重塑农业成本结构;服务规模经营则通过专业化、标准化服务,提高农产品期望产出并降低非期望产出。基于此,提出以下假设:

假设 2a:数字经济通过农村金融促进农业碳减排;

假设 2b:数字经济通过农业产业结构高级化促进农业碳减排;

假设 2c:数字经济通过农业规模经营促进农业碳减排。

1.3 数字经济对农业碳排放的门槛效应

新结构经济学认为,基础设施的质量和普及程度能够有效降低农业供应链的交易费用。一方面,农村地区数字化基础设施建设有助于打破区域间人员流通壁垒,优化配置资源,降低因地理位置和时间上的差异所导致的能源损耗^[24];另一方面,完善道路、灌溉、仓储等基础设施能够有效降低交易成本,减少资源浪费。在农业基础设施水平较低的地区,数字经济通过信息集成和物流优化等手段,弥补传统基础设施不足带来的局限,发挥碳减排效应。当农村地区的基础设施建设水平逐步完善,基础设施发挥的作用逐渐减小,数字经济推动低碳转型的边际效应就会有所减弱。相较于农业基础设施水平较高的地区,农业基础设施水平较低的地区在逐步完善基础设施建设水平的过程中,能够进一步发挥数字经济对农业碳排放的抑制作用,减少非期望产出。基于此,提出以下假设:

假设 3:数字经济对农业碳排放的影响存在农业基础设施建设水平的门槛效应。

1.4 数字经济对农业碳排放的空间溢出效应

我国各地区之间的农业经济活动存在密切的关联,数字经济具备突破行政区划、塑造区域联动的能力。农业碳排放具有外部性。就负外部性而言,农业碳排放通过大气和水体传播影响周边地区的生态系统;就正外部性而言,碳减排措施带来的环境效应在区域范围内成为环境效应的公共品。从知识溢出效应来看,农业大数据中心等数字基础设施能降低信息的获取成本与技术的模仿成本,使得先进地区积累起来的算法模型、管理经验等能通过平台共享等方式向周边地区推广;从技术扩散效应看,数字化农业装备往往存在规模经济和网络外部性,高应用地区的示范效应、供应链配套会使得外溢地区更容易获得技术服务;

从资源流动角度看, 数字经济依托基础设施带来的信息和技术交流, 使得各地区在交互过程中共享知识与技术, 带动其他地区实现技术创新, 有利于改善其他地区的农业碳排放问题^[25]。基于此, 提出以下假设:

假设 4: 数字经济对农业碳排放的影响存在空间溢出效应。

本研究的理论框架如图 1 所示。

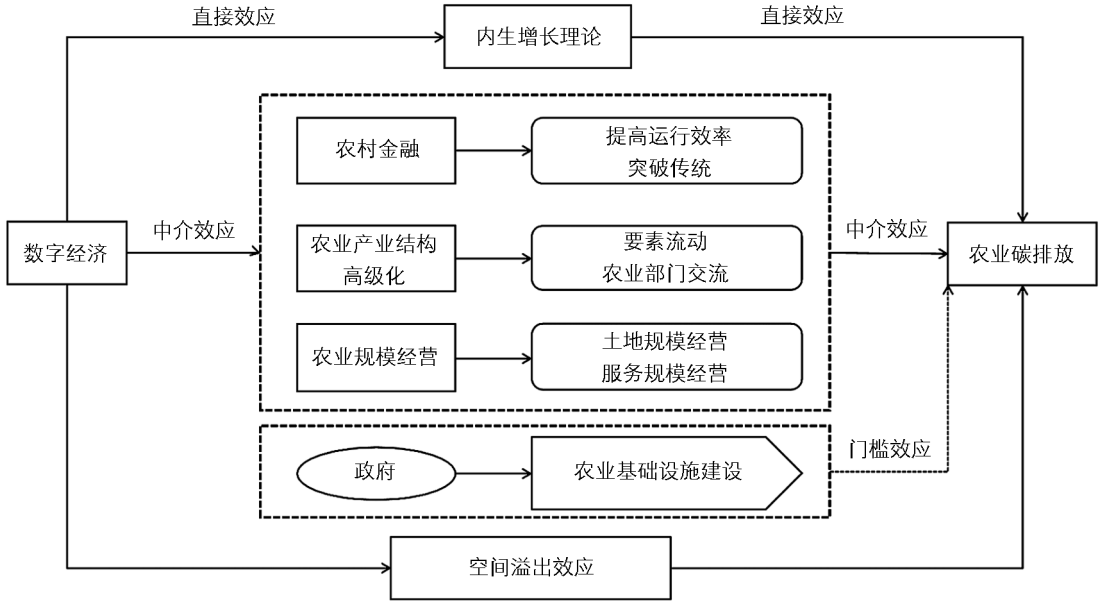


图 1 理论框架

2 研究设计

2.1 模型设计

2.1.1 基准模型

为考察数字经济对农业碳排放的影响, 基准模型设定如下:

$$Carb_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Digi_{it} + \alpha_2 Control_{it} + \mu_i + \sigma_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中: i 表示省份; t 表示年份; $Carb_{it}$ 为农业碳排放强度; $Digi_{it}$ 为数字经济发展水平; $Control_{it}$ 表示控制变量; α_0 为截距项; μ_i 表示控制个体效应; σ_t 表示控制时间效应; ε_{it} 表示残差项。

2.1.2 中介效应模型

采用江艇^[26]的方法, 探讨数字经济发展如何影响农业碳排放。中介效应模型设定如下:

$$M_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Digi_{it} + \alpha_2 Control_{it} + \mu_i + \sigma_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

式中: M_{it} 代表农村金融、农业产业结构高级化、农业规模经营水平。其余设定与式(1)相同。

2.1.3 门槛效应模型

构建如下回归模型, 探究数字经济发展对农业碳排放强度的非线性动态影响:

$$Crab_{it} = \beta_0 + \beta_1 Digi_{it} I(Ainfra \leq \delta) + \beta_2 Digi_{it} I(Ainfra > \delta) + \beta_3 Control_{it} + \mu_i + \sigma_t + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

式中: $Ainfra$ 代表农业基础设施建设水平; δ 为门槛值; β_1 和 β_2 分别表示数字经济在不同门槛区间的影响系数。其余设定与式(1)相同。

2.1.4 空间计量模型

选取空间杜宾模型探讨数字经济发展对农业碳排放的空间溢出效应, 模型设计如下:

$$Crab_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Digi_{it} + \rho W_{ij} Crab_{it} + \eta W_{ij} Digi_{it} + \alpha_2 Control_{it} + \mu_i + \sigma_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

式中: ρ 表示空间自相关系数; W_{ij} 表示空间权重; η 表示变量的待估计系数。其余设定与式(1)相同。

2.2 变量选取与描述性统计

2.2.1 核心被解释变量

本研究以农业碳排放强度(*Carb*)为核心被解释变量。参考田云等^[3]的研究,从 4 个方面综合评估我国农业碳排放量:一是农业能源利用,主要包括煤炭、汽油、天然气等 12 种能源的消耗,相应的碳排放系数参考蒋金荷^[27]的研究成果;二是农资消耗,主要涉及化肥、农药、农膜的使用情况,相应的碳排放系数参考李波等^[28]的研究成果;三是畜禽养殖,主要包括奶牛、非奶牛及大牲畜等动物的养殖活动,相应的碳排放系数参考 IPCC;四是水稻栽培,相应的碳排放系数参考闵继胜等^[29]的研究。由此,构建农业碳排放量计算公式如下:

$$E = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n T_i \times EF_i$$

(5)

式中: E 表示农业碳排放总量; E_i 代表各类碳排放的总和; T_i 表示不同碳源的实际数量; EF_i 对应的是各类碳源的碳排放系数。为确保测度的一致性,本研究根据 IPCC 第四次评估报告,将甲烷与一氧化二氮统一折算为标准碳,换算系数分别为 6.82 和 81.27^[11]。

2.2.2 核心解释变量

本研究以数字经济发展水平(*Digi*)为核心解释变量。借鉴已有研究,从数字基础设施、数字产业化和产业数字化 3 个方面构建评估体系^[30-33],并采用熵权法对各项指标赋权,具体指标体系如表 1 所示。

表 1 数字经济指标体系

一级指标	二级指标	属性	指标单位
数字基础设施	互联网宽带接入率	+	%
	互联网普及率	+	%
	移动电话设施规模	+	万个
	单位面积长途光缆长度	+	km/km ²
	域名数	+	万个
	农业气象观测业务站点个数	+	个
数字产业化	人均电信业务量	+	元/人
	信息软件业就业人员占比	+	%
	信息技术服务收入占 GDP 比例	+	%
	软件业务收入占 GDP 比例	+	%
	电信业务收入占 GDP 比例	+	%
产业数字化	电子商务交易活动企业数占比	+	%
	电子商务销售额	+	亿元
	数字普惠金融指数	+	—
	每百家企业拥有网站数	+	个
	快递量	+	万件
	农村宽带接入用户数	+	万户
	农村投递路线长度	+	km

2.2.3 控制变量

为避免遗漏变量存在偏误问题,本研究选取如下控制变量:① 农村经济发展水平(*Gdp*)^[30],采用第一产业增加值与第一产业从业人数比值衡量;② 产业结构升级(*Ins*)^[11],采用第一产业产值占总产值的比例

取对数衡量; ③ 农业财政支持($Afin$)^[34], 采用农业财政支出占财政总支出的比例衡量; ④ 城镇化水平($Urban$)^[35], 采用城镇人口占地区总人口的比例衡量; ⑤ 耕地灌溉水平(Irr)^[36], 采用耕地灌溉面积与农作物总播种面积的比值衡量; ⑥ 农作物受灾水平(Sz)^[37], 采用农作物受灾面积与农作物总播种面积的比值衡量; ⑦ 农村人力资本水平(Edu)^[38], 采用农村平均受教育年限衡量; ⑧ 农村人均用电量($Electr$)^[3], 采用农村用电量与农村人口数的比值衡量。

2.2.4 其他变量

机制变量主要有 3 个, 一是农村金融(Afl), 采用农村贷款额取对数来表示; 二是农业产业结构高级化($Advanced$), 综合粮经作物面积比、农牧产值比、农林牧渔服务业产值与农林牧渔业总产值比 3 个方面的指标^[39-40], 并运用熵值法进行权重赋值; 三是农业规模经营($Scale$), 采用农业服务业产值与农业从业人数的比值衡量^[41]。

门槛变量以农业基础设施建设水平($Ainfra$)来表示, 主要从水利基础设施和交通基础设施两方面来衡量^[42], 其中水利基础设施采用有效灌溉面积与农作物面积的比值来表示, 交通基础设施采用农村公路长度与省域面积的比值来表示。

2.3 数据来源

本研究选取 2012—2022 年中国 30 个省份(不包括西藏、香港、澳门、台湾)的面板数据。数据主要来源于《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国人口和就业统计年鉴》以及各省市统计年鉴等。个别数据缺失采用线性插值法或均值插值法填补。

3 实证结果与分析

3.1 基准回归

经过 BP 检验、Hausman 检验、多重共线性检验($VIF=2.39$), 选用固定效应模型对面板数据进行回归更为合适。表 2 汇报了基准回归结果, 其中, 第(1)列仅报告数字经济对农业碳排放的单变量回归, 第(2)列至第(4)列逐步加入控制变量。由第(4)列结果可知, 数字经济发展水平的影响系数在 $p=0.01$ 显著性水平下通过了检验, 其回归系数为 -0.1547 , 意味着数字经济发展能显著降低农业碳排放, 假设 1 成立。数字经济背景下, 农业生产者更倾向于采用低碳、环保的生产技术和方法, 以降低成本并满足市场对绿色农产品的需求。

表 2 基准回归分析结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
$Digi$	-0.1856^{***} (0.0554)	-0.1441^{***} (0.0392)	-0.1562^{***} (0.0457)	-0.1547^{***} (0.0458)
Gdp		-0.0019 (0.0015)	-0.0016 (0.0016)	-0.0015 (0.0016)
Ins		-0.0649 (0.2147)	-0.0713 (0.2059)	-0.0592 (0.2066)
$Afin$		0.3360^{***} (0.1188)	0.3452^{***} (0.1178)	0.3314^{***} (0.1133)
$Urban$			-0.0708 (0.0855)	-0.0913 (0.0841)

续表 2

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
<i>Irr</i>			−0.000 7** (0.000 3)	−0.000 8** (0.000 3)
<i>Sz</i>			0.001 5* (0.000 8)	0.001 8** (0.000 8)
<i>Edu</i>				−0.012 4** (0.004 8)
<i>Electr</i>				−0.002 3* (0.001 2)
个体效应	控制	控制	控制	控制
时间效应	控制	控制	控制	控制
常数项	0.301 1*** (0.004 2)	0.276 9*** (0.044 0)	0.316 1*** (0.051 1)	0.421 5*** (0.057 5)
样本量	330	330	330	330
<i>R</i> ²	0.220 8	0.285 8	0.298 5	0.313 8

注：*、**、*** 分别表示在 $p=0.1$ 、 $p=0.05$ 、 $p=0.01$ 水平有统计学意义。括号内数值为稳健标准误。下同。

3.2 内生性和稳健性检验

3.2.1 内生性检验

参照赵涛等^[31]的作法，使用上一年全国信息传输、软件和信息技术服务业的投资总额与 1984 年各省份每百人固定电话拥有量的交互项作为当期数字经济发展水平测度的工具变量指标。表 3 汇报了工具变量回归分析的第二阶段结果。在不可识别检验中，Anderson LM 统计量在 $p=0.01$ 的显著性水平上顺利通过了检验，表明工具变量能够被有效识别；在弱工具变量检验中，Cragg-Donald Wald F 统计量超过了 Stock-Yogo 在 $p=0.1$ 显著性水平下所设定的临界值，由此拒绝弱工具变量的原假设。表 3 第(2)列结果显示，数字经济发展水平的回归系数显著为负，佐证了本研究主要结论的可靠性。此外，本研究选取了解释变量的滞后 1 期值作为工具变量，并利用两阶段最小二乘法进行估计检验，回归结果见表 3 第(3)列至第(4)列，数字经济发展水平的回归系数仍然显著为负，这进一步验证了本研究核心结论的稳健性。

3.2.2 稳健性检验

替换核心解释变量，采用熵权 Topsis 法重新计算数字经济发展水平。结果见表 3 第(5)列，数字经济发展水平的回归系数在 $p=0.01$ 水平上显著为负，符合前文结论。剔除北京、上海、天津、重庆 4 个直辖市的观测数据，回归结果见表 3 第(6)列，数字经济发展水平对农业碳排放的影响系数在 $p=0.01$ 显著性水平下通过检验，表明在不同区域发展差异的背景下，数字经济仍然能有效抑制农业碳排放。对所有变量进行 1%的缩尾处理，回归结果见表 3 第(7)列，数字经济发展的回归系数在 $p=0.01$ 水平下显著为负，进一步验证了数字经济能够促进农业碳减排。通过 3 种不同的稳健性检验可知，在各种检验方法下，数字经济对农业碳排放的负向影响始终在 $p=0.01$ 水平上有统计学意义，表明数字经济在促进农业碳减排方面具有较强的稳健性，验证了假设 1。

表 3 内生性检验及稳健性检验回归结果

变量	工具变量法		滞后 1 期		(5) 替换核心 解释变量	(6) 剔除 直辖市	(7) 1%的 缩尾处理
	(1)	(2)	(3)	(4)			
	第一阶段 数字经济 发展水平	第二阶段 农业碳排放 强度	第一阶段 数字经济 发展水平	第二阶段 农业碳排放 强度			
数字经济发展水平		-2.442 7*** (0.844 7)		-2.510 9*** (0.840 9)	-0.151 2*** (0.041 9)	-0.178 0*** (0.048 1)	-0.161 1*** (0.046 2)
滞后 1 期数字经济发展水平	0.015 5*** (0.004 6)		0.016 2*** (0.004 4)				
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制
个体效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制
时间效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制
不可识别检验	18.792 0***		20.402 0***				
弱工具变量检验	19.413 0 (16.380 0)		21.291 0 (16.380 0)				
样本量	330	330	300	300	330	286	330

3.3 异质性分析

3.3.1 农业科技投入异质性

本研究依据各省份 2012—2022 年农业科技投入的平均值将 30 个省份分成高农业科技投入、低农业科技投入两个样本组进行异质性分析,结果如表 4 所示。在高农业科技投入组中,数字经济发展水平对农业碳排放的影响仍然显著为负,而低农业科技投入组的回归值无统计学意义。就高农业科技投入组而言,这些省份能灵活运用数字技术精炼农业生产的各个环节,提高资源配置效率。从人才维度来看,政府通过农业科技人才专项计划等措施吸引优质劳动力涌入,可以提高本地的科创水平并加快本地的农业科技成果转化落地。相较于高农业科技投入组,低农业科技投入组受资源约束、传统农业生产体系固化等因素的制约,还应充分利用农业生产资源开展环境治理和碳减排工作。

表 4 异质性回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	高农业科技投入	低农业科技投入	东部地区	中西部地区
数字经济发展水平	-0.254 8** (0.107 3)	-0.022 8 (0.051 2)	-0.063 8** (0.023 5)	-0.126 7 (0.127 4)
控制变量	控制	控制	控制	控制
个体效应	控制	控制	控制	控制
时间效应	控制	控制	控制	控制
样本量	204	126	121	209
R ²	0.423 0	0.498 7	0.469 6	0.438 9

3.3.2 区位异质性

按数字经济发展水平将 30 个省份划分为东部地区和中西部地区两大板块进行分组检验,结果如表 4 所示。东部地区的数字经济对农业碳排放产生了显著的抑制作用,其回归系数为-0.063 8,而中西部地区的检验结果无统计学意义。可能的解释是:东部地区是我国经济发达区域,能够推广精准农业与智慧农业

模式，提高农业产出效率，有效减少农业活动中所产生的温室气体排放；相较于东部地区，中西部地区在基础设施建设、人力资源配置、科技创新驱动等方面存在差距，这些因素导致数字技术在农业领域的渗透率较低，难以发挥数字经济的农业碳减排效应。

4 影响机制分析

基于理论分析框架，本研究引入农村金融、农业产业结构高级化和农业规模经营 3 个作用机制。由表 5 第(1)列可知，数字经济发展水平对农村金融的回归系数显著为正，表明数字经济发展对农村金融服务具有促进作用，由于前文已在理论部分分析了农村金融会直接抑制农业碳排放，故农村金融是数字经济抑制农业碳排放的作用机制之一。由表 5 第(2)列可知，数字经济发展水平对农业产业结构高级化的回归系数显著为正，说明数字经济通过减少信息差或者加速技术应用，促使资源向智慧农业和绿色加工等高附加值领域集中，从而推动农业产业结构高级化，故农业产业结构高级化是数字经济抑制农业碳排放的作用机制之一。由表 5 第(3)列可知，数字经济发展水平的回归系数依旧显著为正，表明随着数字经济发展水平的提升，农业规模经营的水平有所上升，故农业规模经营是数字经济抑制农业碳排放的作用机制之一。

为提高中介效应检验的可靠性，进一步采用 Sobel 检验对 3 个中介变量进行验证，结果显示，Sobel 检验的 p 值均小于 0.01，符合显著性标准，且 Bootstrap 检验所得的中介效应置信区间均不包含 0。由此，本研究提出的假设 2a、假设 2b 和假设 2c 得到验证。

表 5 中介效应检验回归结果

变量	(1)	(2)	(3)
	农村金融	农业产业结构高级化	农业规模经营
数字经济发展水平	2.089 8** (0.965 1)	0.820 8*** (0.190 6)	0.631 7** (0.303 2)
控制变量	控制	控制	控制
个体效应	控制	控制	控制
时间效应	控制	控制	控制
R^2	0.750 6	0.740 8	0.838 6
Sobel 检验	$p=0.000\ 0$	$p=0.000\ 0$	$p=0.006\ 5$
Bootstrap 检验 95%置信区间	[0.419 9, 0.865 7]	[0.311 1, 0.721 3]	[0.032 9, 0.203 3]

5 门槛效应分析

根据前文的理论分析，数字经济对农业碳排放的影响会受到农业基础设施建设水平的影响。本研究采用 Bootstrap 反复抽样法对农业基础设施建设水平(A_{infra})进行估计，结果显示， A_{infra} 的门槛值只存在单一门槛效应，门槛值为 0.660 2，且估计值被包含在 95%的置信区间中。表 6 为根据门槛模型得出的估计结果，当农业基础设施建设水平不超过门槛值时，数字经济发展水平对农业碳排放的回归系数为-0.197 2，表明数字经济的发展能够大幅度减少农业碳排放。当农业基础设施建设水平超过门槛值时，回归系数为-0.069 0，表明随着农业基础设施建设的完善，数字经济对农业碳排放的抑制作用减弱。可能的解释是：当农业基础设施建设水平较低时，引入数字经济能够通过技术赋能弥补传统农业短板，大幅降低农业碳排放。当农业基础设施建设水平超过门槛值后，农业基础设施的完善本身已大幅优化了农业生产效率，数字经济发挥作用的空间有限，此时数字经济的碳减排效应更多体现在对现有系统的精细化管理和局部优化上。假设 3 成立。

表 6 门槛效应回归结果

变量	基准回归	门槛回归
数字经济发展水平	−0.154 7 *** (0.045 8)	
数字经济发展水平 ($A_{infra} \leq 0.660\ 2$)		−0.197 2 *** (0.026 0)
数字经济发展水平 ($A_{infra} > 0.660\ 2$)		−0.069 0 *** (0.019 5)
控制变量	控制	控制
个体效应	控制	控制
时间效应	控制	控制
样本量	330	330
R^2	0.313 8	0.294 4

6 空间效应分析

6.1 空间自相关检验

本研究通过邻接矩阵分析我国各省份之间数字经济与农业碳排放的空间关系，并进行全局莫兰指数检验。结果表明，在 2012—2022 年，数字经济与农业碳排放的全局莫兰指数均通过了 $p=0.05$ 显著性水平检验，存在空间集聚特征。经过 LM 检验、LR 检验和 Wald 检验，采用空间杜宾模型进行分析最为合适。在此基础上，进一步构建邻接矩阵和空间经济地理权重距离矩阵，借助空间杜宾模型实证检验数字经济对农业碳排放的影响效应，具体结果如表 7 所示。空间自回归系数显著为正，说明农业碳排放存在明显的空间关联效应，本地的农业碳排放与邻地的农业碳排放会因经济和地理距离的影响存在正向关联。

表 7 空间溢出效应检验结果

变量	邻接矩阵	经济、地理权重矩阵
数字经济发展水平	−0.122 2 *** (0.027 1)	−0.146 4 *** (0.028 5)
直接效应	−0.126 7 *** (0.027 9)	−0.147 3 *** (0.028 6)
间接效应	−0.066 5 *** (0.019 8)	−0.031 6 * (0.018 9)
总效应	−0.193 2 *** (0.042 7)	−0.178 9 *** (0.036 7)
空间自回归系数	0.370 1 *** (0.060 1)	0.178 2 ** (0.087 2)
sigma2_e	0.000 1 *** (0.000 0)	0.000 1 *** (0.000 0)
控制变量	控制	控制
个体效应	控制	控制
时间效应	控制	控制
样本量	330	330

进一步采用偏微分方法拆解估计结果,发现数字经济发展水平、直接效应、间接效应、总效应的数值均在 $p=0.01$ 显著性水平上为负值,表明数字经济发展不仅能直接抑制本地区的农业碳排放,还会通过对相邻地区的间接影响反作用于自身。从效应分解的系数对比来看,两种空间权重矩阵下,数字经济发展水平的直接效应和间接效应系数均显著为负,且直接效应的绝对值大于间接效应,表明数字经济对本地区的农业碳减排效应更强。这主要是因为数字经济对本地农业的绿色技术渗透、资源配置优化作用更为直接,减排效应更强,而对周边地区的影响会受区域间要素流动成本、技术推广效率的限制,其减排作用的强度相对较弱。

6.2 空间衰减边界

根据地理学第一定律,随着省份之间的距离增加,变量的空间相关性会减弱。由于数字基础设施发展的区域不均衡、农业产业集聚的梯度差异、技术推广的地理衰减等因素,数字经济对农业碳排放的空间溢出效应存在区域范围。由图 2 可以看出,当距离阈值小于 250 km 时,数字经济对邻近省份的农业碳排放起促进作用,这主要是由于短距离内缺少跨区域的资源共享机制,导致重复投资和碎片化运营,加剧农业碳排放;当地理距离阈值在 250 km 至 450 km 时,数字经济对农业碳排放的间接效应值呈现出在 0 周围波动的现象,并且影响效果不再显著;当地理距离阈值超过 450 km 时,空间溢出效应呈下降趋势,且间接效应值由正转负,整体呈现地理距离衰减特征,即负向空间效应随着地理距离的增加而衰减,这主要是由于数字经济的覆盖范围突破地理阈值后规模效应逐渐显现,边际成本随之下降,能够有效抑制农业碳排放。假设 4 成立。

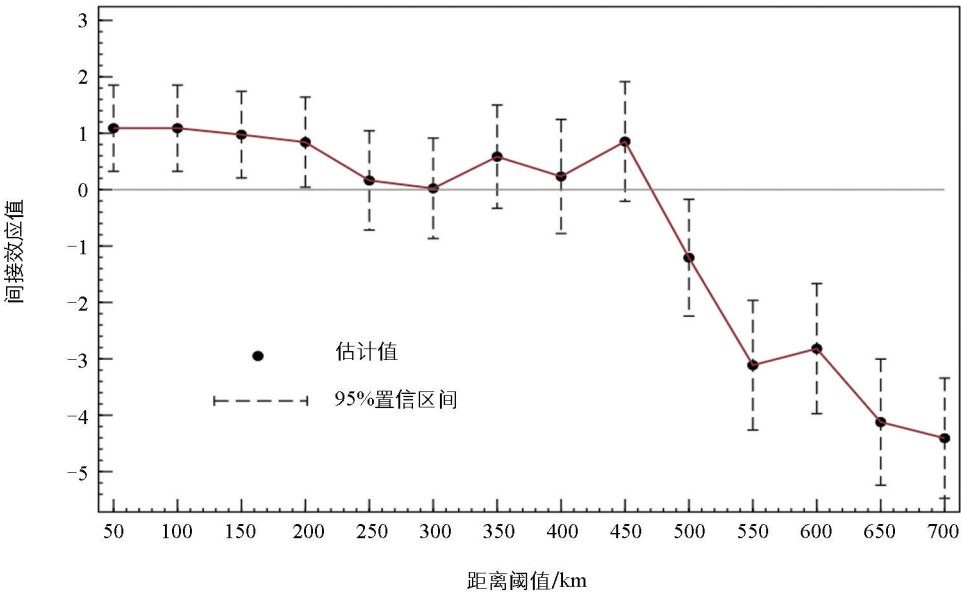


图 2 空间距离溢出效应

7 结论与对策建议

7.1 结论

在全球气候变化形势日趋严峻和“双碳”目标深入推进的背景下,数字经济在推动农业绿色转型中发挥着重要作用,其对农业碳排放的影响具有重要的理论和实践价值。为此,本研究利用 2012—2022 年我国 30 个省份的面板数据探讨数字经济发展对农业碳排放的影响。研究结论如下:第一,数字经济发展能有效减少农业碳排放,该结论经过多项稳健性检验后仍然成立;第二,数字经济发展对农业碳排放的负向影响在农业科技投入和地区差异上存在异质性,就农业科技投入异质性而言,高农业科技投

入地区的数字经济发展对农业碳排放具有显著的抑制作用,就区位异质性而言,相较于中西部地区,东部地区的农业碳减排效应更显著;第三,农村金融、农业产业结构高级化和农业规模经营是数字经济促进农业碳减排的重要路径;第四,农业基础设施建设水平对数字经济抑制农业碳排放存在门槛作用,当农业基础设施建设水平超过门槛值时,数字经济对农业碳排放的抑制作用减弱;第五,空间效应分析表明,数字经济发展不仅能降低本地区的农业碳排放,还能带动周边地区农业碳减排,当地理阈值超过 450 km 后,空间外溢效果显著为负。

7.2 对策建议

基于上述结论,本研究提出如下对策建议:

第一,强化数字经济在农业碳减排中的支撑作用,推动农业绿色转型。为充分发挥数字经济在农业碳减排中的支撑作用,应结合“双碳”目标和乡村振兴战略,制定针对性措施。一方面,强化数字农业在国家战略规划中的核心地位。将数字农业纳入 2035 年远景目标纲要的重点任务,通过制定专项计划,推动智能农业设备、物联网技术和精准农业管理系统普及,优化农业生产流程,降低化肥、农药、农膜的使用强度。另一方面,强化跨部门沟通协作,实行项目导向与责任明确的工作机制,界定各部门在促进农业领域数字经济融合与实现碳达峰目标中的具体职责和任务,推进各项任务在各自职责范围内全面落实,并建立健全数字经济背景下农业碳排放管理的专项督查机制,定期对各层级、各部门农业碳减排目标落实情况开展专项督查,最大限度发挥农业碳减排的引领作用。

第二,充分发挥农村金融、农业产业结构高级化和农业规模经营在数字经济碳减排中的关键作用。在农村金融方面,充分利用数字技术提升金融服务农业的效率,创新绿色金融产品和服务,引导社会资本流向低碳农业项目,扶持农业规模化经营主体,鼓励绿色技术创新,激发农村经济活力。在农业产业结构高级化方面,依托数字技术培育产业比较优势,推动传统产业向高附加值生态农业、农产品深加工和农文旅融合领域发展,提升全要素生产率。在农业规模经营方面,依托数字技术推动农业生产的精准化、智能化和规模化,而农业规模经营与新型城镇化的正向联动^[43],能进一步整合土地、劳动力等生产要素,不仅能提升农业生产效率、降低单位产出的农业碳排放,还能够通过构建数字化农业管理平台,实现农业生产过程可视化、可溯化和可优化。

第三,因地制宜处理数字经济对农业碳排放的影响效应。就农业基础设施建设水平而言,在农业基础设施建设水平较为完善的地区,数字经济的碳减排潜力可能会因边际效用递减现象而受到限制,此时应重点提升数字技术与农业基础设施的融合度,借助大数据分析优化供应链管理,减少运输环节的碳排放,实现规模经济与范围经济的协同效应。而对于农业基础设施建设水平相对较低的地区,应该优先解决公共物品供给不足的问题,包括但不限于农村电网改造、扩大宽带覆盖范围及完善冷链物流体系等。就农业科技投入而言,高农业科技投入的地区应充分利用其技术优势,促进数字技术与农业科技融合创新,并寻求经济增长的新动能和创新机遇,主动承担数字经济发展过程中的创新成本^[44],这不仅能激发地区创新生态活力,维持经济发展优势,还能发挥示范效应,引领周边地区的科技进步与产业升级。对于农业科技投入水平较低的地区,则需通过政策引导和市场机制,吸引社会资本投入农业科技研发,逐步缩小与高投入地区的差异。就东部、中西部地区而言,东部地区应凭借先进的数字经济发展水平和较高的环境规制水平,进一步探索数字技术在农业领域的应用,积极研发与推广碳减排模式和先进技术,以期达到农业绿色发展的帕累托最优状态;中西部地区应根据当地的资源禀赋和比较优势,借鉴东部地区的成功经验,量身定制符合本地区特色的数字经济与农业碳减排策略。

第四,充分发挥数字经济对本地区和相邻地区农业碳排放的抑制作用。首先,统筹规划数字经济发展的区域空间布局,依托东部地区在数字经济领域的领先优势,通过技术外溢、知识共享和资本联动等途径,促进中西部地区数字经济协同发展,缓解中西部地区的农业碳减排压力。其次,推动数字基础设施与农业

基础设施的空间均衡建设,缩小地区间发展差距,借助政策协同和要素流动打破行政边界限制,为数字经济助力农业碳减排营造开放且高效的区域合作环境。最后,增强区域间农业绿色低碳发展的协同效应,依托数字技术创新促进资源要素在区域内的优化配置,实现信息高效互通,建立区域联动减排体系,形成“以点带面”的农业碳减排格局,全面提升区域整体绿色低碳发展水平。

参考文献:

- [1] 张希栋,杨程博,刘静. 我国农业碳排放时空演变特征研究 [J]. 环境保护, 2023, 51(1): 42-48.
- [2] 温涛,孙鹏翔,张林. 中国农业碳排放的动态演进与区域格局 [J]. 经济地理, 2024, 44(10): 165-175.
- [3] 田云,尹忞昊. 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.
- [4] Rehman A, Ma H Y, Irfan M, et al. Does carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and GHG emissions influence the agriculture? Evidence from China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(23): 28768-28779.
- [5] Gerlagh R. Measuring the value of induced technological change [J]. Energy Policy, 2007, 35(11): 5287-5297.
- [6] 高国生,王奇珍,支海兵. 数字普惠金融对农业碳排放强度的影响效应分析 [J]. 经济问题, 2024(1): 57-65.
- [7] 操小娟,靳婷. 土地流转、农业规模经营与农业碳排放——基于土地流转政策的准自然实验 [J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2024(4): 153-163.
- [8] 张军伟,费建翔,徐永辰. 金融支持对绿色农业发展的激励效应 [J]. 中南财经政法大学学报, 2020(6): 91-98.
- [9] 尹忞昊,田云,卢奕亨. 中国农业碳排放区域差异及其空间分异机理 [J]. 改革, 2023(10): 130-145.
- [10] 陈中伟,汤灿. 数字经济发展对农业碳排放的影响及其时空效应 [J]. 科技管理研究, 2023, 43(12): 137-146.
- [11] 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.
- [12] Guo H H. The agricultural carbon reduction effect of digital rural construction under the dual carbon target [J]. PLoS One, 2024, 19(4): e0299233.
- [13] 卢京宇,郭俊华. 数字经济赋能农业绿色发展的碳减排效应 [J]. 江西财经大学学报, 2024(3): 78-90.
- [14] Zhong Y P, Tang L R, LI Y. Role of digital empowerment in developing farmers' green production by agro-tourism integration in xichong, sichuan [J]. Agriculture, 2022, 12(11): 1761.
- [15] Huang T T. Research on the mechanism and path of digital economy promoting green development of the agricultural sector [J]. The Frontiers of Society, Science and Technology, 2023, 5(4): 63-67.
- [16] 白婉婷,陈建成,侯建,等. 数字化转型如何影响农业碳生产率?——来自中国的经验证据 [J/OL]. 中国农业资源与区划. (2024-03-09) [2025-12-22]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3513.S.20240307.1036.002>.
- [17] 黄庆华,郑淇,王浩力,等. 新质生产力推进农村三产融合的理论逻辑与实证检验 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2026, 48(3): 105-118.
- [18] 星焱. 农村数字普惠金融的“红利”与“鸿沟” [J]. 经济学家, 2021(2): 102-111.
- [19] 周肖肖,贾梦雨,赵鑫. 绿色金融助推企业绿色技术创新的演化博弈动态分析和实证研究 [J]. 中国工业经济, 2023(6): 43-61.
- [20] 杨昊达,彭山桂,林萍萍. 财政支农对农业绿色全要素生产率的空间影响与作用机制 [J]. 中国农业资源与区划, 2025, 46(4): 51-64.
- [21] 蔡保忠. 农业生产托管与农业绿色低碳转型——一个理论分析框架 [J]. 吉首大学学报(社会科学版), 2022, 43(3): 125-132.
- [22] 刘子涵,辛贤,吕之望. 互联网农业信息获取促进了农户土地流转吗 [J]. 农业技术经济, 2021(2): 100-111.
- [23] 陈义媛. 农业生产规模化背景下的社会化服务模式转型:以农资销售模式的转型为例 [J]. 中国农村观察, 2025(1): 107-124.
- [24] 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, 47.
- [25] 周韩梅,刘新智,孔芳霞. 数字经济发展能否减少中国雾霾污染?——基于空间杜宾模型的检验 [J]. 当代经济管理,

2024, 46(4): 1-11.

[26] 江艇. 因果推断经验研究中的中介效应与调节效应 [J]. 中国工业经济, 2022(5): 100-120.

[27] 蒋金荷. 中国城镇住宅碳排放强度分析和用能政策反思 [J]. 数量经济技术经济研究, 2015, 32(6): 90-104.

[28] 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.

[29] 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.

[30] Zhang L, Pang J X, Chen X P, et al. Carbon emissions, energy consumption and economic growth: evidence from the agricultural sector of china's main grain-producing areas [J]. Science of the Total Environment, 2019, 665: 1017-1025.

[31] 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): 65-75.

[32] 王军, 朱杰, 罗茜. 中国数字经济发展水平及演变测度 [J]. 数量经济技术经济研究, 2021, 38(7): 26-42.

[33] 王迎, 史亚茹, 于津平. 数字经济与国内价值链分工 [J]. 中南财经政法大学学报, 2023(2): 118-130.

[34] 李宽, 史磊, 张弘. 我国新型农业经营主体发展对农业碳排放强度的影响: “减碳效应”或“增碳效应” [J]. 农业技术经济, 2024(11): 51-73.

[35] 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.

[36] 史常亮. 数字经济赋能农业全要素生产率增长: 效应与机制 [J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2024, 23(3): 94-109.

[37] 邓悦, 肖杨, 许弘楷. 新型农业经营主体对劳动力流动的影响效应 [J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2024(2): 23-37.

[38] 王凤婷, 王浩, 孔凡斌. 农村数字化发展对农业全要素碳生产率的提升效应 [J]. 中国人口·资源与环境, 2024, 34(3): 79-90.

[39] 金芳, 金荣学. 农业产业结构变迁对绿色全要素生产率增长的空间效应分析 [J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2020(1): 124-134.

[40] 杨紫依, 马凤才. 农业产业结构调整影响农业生产效率的空间效应研究 [J]. 中国农业资源与区划, 2025, 46(12): 219-232.

[41] 宋燕平, 范祥祺, 耿鹏鹏. 规模经营与农业绿色发展——基于农业绿色全要素生产率的观察 [J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2024(4): 57-70.

[42] 邓晓兰, 鄢伟波. 农村基础设施对农业全要素生产率的影响研究 [J]. 财贸研究, 2018, 29(4): 36-45.

[43] 王博, 李祺佳, 张天星. 农业规模经营与新型城镇化互动关系研究——基于 273 个地级市的实证分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2026, 48(1): 134-147.

[44] 白雄, 韩绵绵, 张文瑞. 数字经济发展赋能绿色经济增长: 后发优势与隧道效应 [J]. 统计与决策, 2024, 40(1): 23-28.

责任编辑 廖坤