数字经济发展对农业碳排放强度的影响及其空间溢出效应
——基于30省份的面板数据分析

李晓榕[1,2], 罗万云[1,2], 赵栋淳[1,2]
(1.新疆大学 经济与管理学院, 新疆 乌鲁木齐 830046;
2.新疆大学 新疆创新管理研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘　要: [目的]探究数字经济发展在农业碳减排过程中的作用机制,系统揭示其对农业碳排放强度的影响特征与空间溢出规律,旨在为推进农业绿色低碳转型及高质量发展提供理论依据与决策参考。[方法]基于2015—2023年中国30个省份的面板数据,构建双向固定效应模型、调节效应模型与空间杜宾模型,实证检验数字经济发展对农业碳排放强度的影响方向、作用机制及其空间溢出效应。[结果]①数字经济发展对农业碳排放强度具有显著的抑制作用,数字经济水平每提高1%,农业碳排放强度则下降7.0%。数字经济水平是促进农业绿色低碳转型的有效驱动力。②在作用机制上,财政支农支出正向强化了数字经济的减排效应,而城镇化水平在此过程中则发挥了负向调节作用。③空间效应方面,数字经济的发展对农业碳减排具有显著的跨区域空间溢出作用。④异质性分析表明,数字经济对农业碳排放强度的抑制作用在东部及中部地区、粮食主产区以及畜牧业区尤为显著。[结论]数字经济能显著降低农业碳排放强度,且具有明显的空间溢出与区域结构性异质性特征,是赋能农业绿色低碳转型的重要新动能。

关键词: 数字经济; 农业碳排放强度; 空间溢出效应; 调节效应
文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)05-0300-13 **中图分类号:** F326.3, X322

文献参数: 李晓榕, 罗万云, 赵栋淳.数字经济发展对农业碳排放强度的影响及其空间溢出效应[J].水土保持通报,2026,46(5):300-312. Li Xiaorong, Luo Wanyun, Zhao Dongchun. Impact of digital economy development on agricultural carbon emission intensity and its spatial spillover effects [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(5):300-312.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.006 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.05.006**

Impact of digital economy development on agricultural carbon emission intensity and its spatial spillover effects
—Based on panel data analysis of 30 provinces

Li Xiaorong[1,2], Luo Wanyun[1,2], Zhao Dongchun[1,2]
(1.*School of Economics and Management*, *Xinjiang University*, *Urumqi*, *Xinjiang* 830046, *China*;
2.*Center for Innovation Management Research of Xinjiang*, *Xinjiang University*, *Urumqi*, *Xinjiang* 830046, *China*)

Abstract: [Objective] The mechanism through which the digital economy contributes to agricultural carbon emission reduction was explored, and its impact on agricultural carbon emission intensity and its spatial spillover patterns were systematically revealed, in order to provide a theoretical basis and decision-making reference for promoting the green and low-carbon transformation of agriculture and its high-quality development. [Methods] Using panel data from 30 Chinese provinces from 2015 to 2023, this study constructed a two-way fixed effects model, a moderating effect model, and a spatial Durbin model to empirically examine the direction, mechanisms, and spatial spillover effects of digital economy development on agricultural carbon emission intensity. [Results]

收稿日期:2025-12-04 **修回日期:**2026-04-02 **采用日期:**2026-04-03
资助项目:国家社会科学基金青年项目"南疆四地相对贫困多维度识别与协同治理研究"(21CJY038)
第一作者:李晓榕(1999—),女(汉族),甘肃省民勤县人,博士研究生,研究方向为人口,资源与环境经济学。Email:lxr110516@126.com。
通信作者:罗万云(1990—),男(汉族),甘肃省永靖县人,博士,副教授,博士生导师,主要从事资源经济学方面的研究。Email:luowanyun0824@126.com。

① Digital economy development significantly inhibited agricultural carbon emission intensity. A 1% increase in the digital economy level reduced agricultural carbon emission intensity by 7.0%, establishing it as an effective driver for the green and low-carbon transformation of agriculture. ② Regarding mechanisms, fiscal support for agriculture positively reinforced the emission reduction effect of the digital economy, whereas the level of urbanization played a negative moderating role in this process. ③ In terms of spatial effects, digital economy development had significant cross-regional spatial spillover effects on agricultural carbon emission reduction. ④ Heterogeneity analysis showed that the inhibitory effect of the digital economy on agricultural carbon emission intensity was particularly pronounced in the eastern and central regions, major grain-producing areas, and animal husbandry regions. [Conclusion] The digital economy significantly reduces agricultural carbon emission intensity, demonstrating notable spatial spillover effects and regional structural heterogeneity. It represents a crucial new driver for enabling the green and low-carbon transformation of agriculture.

Keywords: digital economy; agricultural carbon emission intensity; spatial spillover effect; moderating effect

应对气候变化与实现“双碳”目标是当前全球面临的重大战略议题。农业作为全球重要的温室气体排放源之一,其绿色低碳转型对实现国家气候目标及高质量发展至关重要[1]。近年来,数字经济作为重构资源配置与生产方式的新型经济形态,正以前所未有的速度向农业领域渗透,为破解农业高碳排放与稳定增长之间的矛盾提供了全新路径。

现有研究普遍认为,数字经济已成为推动农业绿色低碳转型的重要力量,其对农业碳排放的影响逐渐成为国内外学界关注的焦点。相关文献围绕数字经济影响农业碳排放的内在机理、实证研究展开了系统探讨。理论机理方面,国内外研究形成高度共识,且国际前沿进一步拓宽了微观实践与全球视角。数字经济通过改变农业生产方式、促进技术进步和优化要素配置,对农业碳排放产生显著影响。一方面,数字技术嵌入农业生产全过程,助力精准施肥、智能灌溉与农机智能调度,减少化肥、农药、能源等高碳要素投入,提升资源利用效率,降低碳排放强度[2]。国际层面,欧美学者基于全球农场尺度的精准农业实证证实,遥感、传感器、大数据等数字工具的规模化应用,可量化削减氮肥损耗与灌溉能耗,进一步验证了该微观减排路径的普适性[3];另一方面,数字经济通过降低信息不对称与交易成本,优化农业要素配置效率,推动规模化经营与产业链延伸,在提升农业产出的同时缓解碳排放约束,这一结论在发展中国家小农农业场景中同样得到有效检验[4]。在此基础上,国内外研究均强调绿色技术创新的中介作用,国内学者聚焦本土知识溢出与低碳技术扩散效应,国际研究则从全球技术转移视角出发,证实数字经济是推动跨国低碳农业技术落地、缓解发展中国家数字鸿沟制约的核心枢纽[5]。实证层面,研究多基于省级[6]或地市级[7-8]面板数据,采用固定效应模型、系统GMM等方法,普遍发现数字经济发展水平的提升显著降低了农业碳排放或农业碳排放强度,这一结论在控制经济发展水平、产业结构、财政支农力度等因素后依然稳健。随着研究的深入,学者开始引入空间计量方法,探讨数字经济的空间溢出效应。相关结果表明数字经济不仅能够抑制本地区农业碳排放,还通过技术扩散,市场一体化和要素跨区域流动,对邻近地区产生显著的减排影响,显示出区域协同减排的特征[9-10]。同时,部分研究从非线性视角出发,探讨数字经济发展水平不同阶段对种植业碳排放的影响差异。相关研究利用门槛模型和分位数回归方法发现,数字经济对种植业碳排放的影响呈现显著的阶段性特征,即在数字基础设施和数字应用水平较低阶段,其减排效应并不明显,而当数字经济发展达到一定阈值后,其对种植业碳排放的抑制作用显著增强,甚至在部分情形下呈现倒U形特征[11]。

尽管现有研究在数字经济发展与农业碳排放关系的探讨方面积累了有益成果,但仍存在以下不足。①现有文献多以“农业碳排放总量”为核心考量,相对忽视了更能反映农业经济活动环境代价与效率特征的“农业碳排放强度”指标;②数字经济减排效应受宏观条件约束,鲜有将“财政支农政策”“城镇化进程”这两大农业核心政策变量纳入同一框架,检验二者的调节作用;③数字经济对农业碳排放强度的空间网络传导与溢出特征仍需更系统、精确的量化检验。综上所述,现有研究虽关注数字经济与农业绿色发展之间的关系,但对于数字经济是否显著影响农业碳排放强度、其作用机制如何以及是否存在空间溢出效应仍缺乏系统分析。基于此,本文围绕以下科学问题展开研究:①数字经济发展是否对农业碳排放强度产生显著影响? ②财政支农与城镇化水平是否改变数字经济的减排作用路径? ③数字经济是

否通过空间溢出效应影响邻近地区农业碳排放强度？为回答上述问题，本文构建计量模型进行实证分析，并从空间视角探讨数字经济推动农业低碳转型的实现路径，以期为依靠数字经济手段实现农业的低碳转型提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 理论假设

农业碳排放强度是指单位农业产值对应的碳排放水平，反映农业生产过程中资源利用效率与环境约束之间的综合表现。与碳排放总量相比，碳排放强度更能体现农业绿色转型的效率特征。在数字经济快速发展的背景下，以数据为核心的新型生产要素不断嵌入农业生产体系，通过信息技术、数字平台与智能装备重构农业资源配置方式，从而可能对农业碳排放强度产生深刻影响。然而，这种影响是否显著、通过何种机制实现、是否具有空间扩散特征，仍有待系统检验。

1.1.1 数字经济对农业碳排放强度的影响

（1）数字经济对农业碳排放的直接影响。从要素配置与技术进步视角看，数字经济通过数据整合、信息共享和智能决策等方式，提高农业生产的精准化与智能化水平。一方面，农业物联网、精准施肥系统与智能农机装备能够优化水、肥、药及能源等投入结构，减少过量投入和能源浪费，从源头上降低农业生产环节的碳排放[12]。另一方面，数字平台通过强化产销对接和供应链协同，提高农产品流通效率，减少仓储与运输环节的资源损耗。根据绿色技术进步理论，当技术进步具有节能属性时，能够在不降低产出的前提下降低单位排放水平[13]。因此，数字经济的发展可能通过提升资源配置效率和劳动生产率，实现农业“增产不增排”甚至“增产减排”。

据此，提出假说H1：数字经济发展能够显著降低农业碳排放强度。

（2）数字经济对农业碳排放的间接影响。数字经济对农业碳排放强度的影响并非孤立发生，而是嵌入于特定的制度环境与区域发展结构之中，其作用效果在不同情境下可能呈现显著差异。基于此，有必要从制度供给与结构转型两个维度考察其调节机制。①财政支农支出可能强化数字经济的减排效应。政府通过农机购置补贴、绿色生产补贴以及数字基础设施建设等政策工具，降低农户采纳低碳技术与数字技术的边际成本，缓解其在数字化转型过程中的资金约束，从而提升数字技术在农业生产中的嵌入程度。财政支持不仅有助于加快数字要素在农业部门的扩散与应用，而且通过改善要素配置效率与技术替代路径，增强数字经济的资源节约与减排功能[14]。因此，财政支农支出可能在数字经济与农业碳排放强度之间发挥显著的正向调节作用。②城镇化进程可能对数字经济的减排效应产生结构性影响。一方面，城镇化通过促进城乡要素流动与技术溢出，优化农业生产组织形式，提高规模化与专业化水平，为数字技术的推广应用提供有利条件[15]；另一方面，伴随劳动力外流与农业人口老龄化加剧，农业部门的人力资本结构可能趋于弱化，从而制约数字技术的吸收与转化能力，削弱其潜在的减排效应。由此，城镇化水平可能在不同阶段呈现异质性调节特征，对数字经济影响农业碳排放强度的方向与强度产生差异化影响。

据此，提出假说H2：财政支农支出与城镇化水平对数字经济影响农业碳排放强度具有调节作用。

1.1.2 数字经济对农业碳排放强度影响的空间溢出效应

根据地理学第一定律，空间单元之间存在相互关联性，这种关联性在经济活动高度联系的地区尤为明显[16]。农业碳排放不仅受本地生产行为影响，还可能受到邻近地区技术扩散、产业关联和要素流动的影响。数字经济具有明显的网络外部性特征，其发展往往通过信息共享、技术示范与产业联动等方式向周边地区扩散。一方面，数字基础设施互联互通强化了区域间信息流动[17]；另一方面，高数字化水平地区的绿色生产经验可能通过技术溢出带动周边地区农业生产方式转型。因此，数字经济可能不仅影响本地区农业碳排放强度，还对邻近或经济相似地区产生外溢效应[18-19]。

据此，提出假说H3：数字经济对周边地区以及经济相似地区的农业碳排放强度具有空间溢出效应。

基于上述理论分析，本文构建了相应的理论分析体系，具体框架结构如图1所示。

1.2 变量选取

1.2.1 被解释变量：农业碳排放强度

在广义农业口径下，本文聚焦于种植业与畜牧业这两大核心碳排放源。基于此，借鉴李波[20-21]和田云等[22]诸多学者的主流方法，采用IPCC系数法对2015—2023年30个省份的相关数据进行了核算。其中，种植业碳排放量主要源自农用物资投入、农业活动中农机运行所消耗的大量柴油能源，灌溉设施所需的电力消耗以及农田翻耕和开垦过程中不可避免导致的碳排放；畜牧业碳排放核算主要涵盖畜禽肠道发酵过程中产生的甲烷（CH_4），以及粪便管理过程

中排放的甲烷(CH_4)与氧化亚氮(N_2O)。具体计算公式为

$$C=\sum T_i \cdot \varepsilon_i \quad (1)$$

式中:C为农业的碳排放总量(10^4 t);T_i为第i种碳源的投入数量;ε_i表示对应碳源的碳排放系数,主要碳源及碳排放系数详见表1—2。

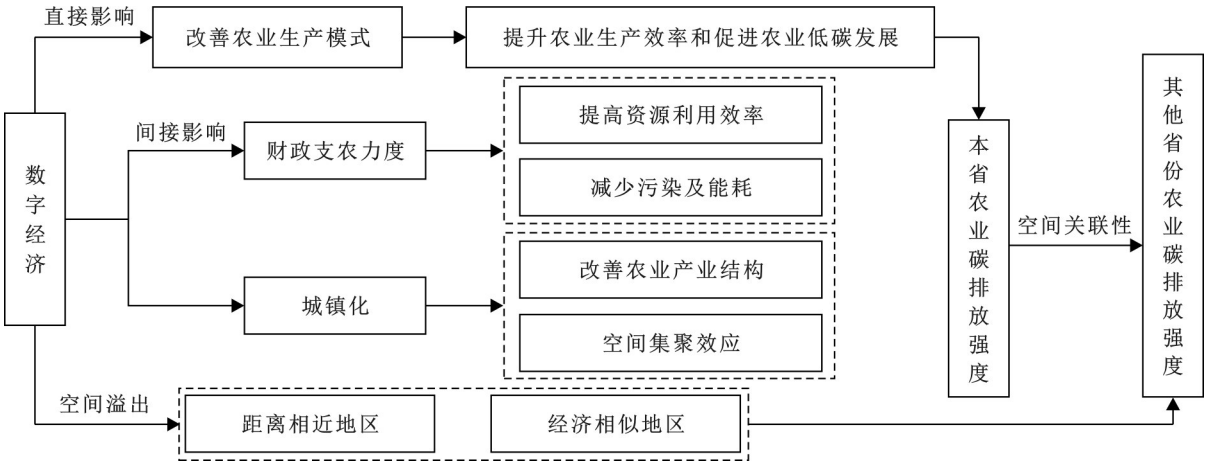


图1　数字经济对农业碳排放强度影响的理论框架

Fig.1　Theoretical framework of digital economy impact on agricultural carbon emission intensity

表1　农业主要碳排放源和碳排放系数

Table 1　Main carbon emission sources and carbon emission coefficients of agriculture

碳源分类	排放源	排放系数	参考来源
农业能源利用	柴油	0.59 t/t	IPCC 2013[23]
	电力	1.77 t/t	
农用物资投入	化肥	0.89 kg/kg	美国橡树岭国家实验室[24]
	农药	4.93 kg/kg	
	农膜	5.17 kg/kg	
种植消耗	灌溉	266.48 kg/hm^2	闵继胜等[7]
	翻耕	312.60 kg/hm^2	王慧敏等[25]

注:排放因子为CO_2。

表2　畜牧业主要碳排放源和碳排放系数

Table 2　Main carbon emission sources and carbon emission coefficients in animal husbandry　单位:kg/(头·a)

牲畜种类	肠胃发酵 CH_4	粪便管理 CH_4	粪便管理 N_2O	参考来源
猪	1.00	4.00	0.53	
牛	54.33	7.00	1.24	
羊	5.00	0.17	0.33	
马	18.00	1.64	1.39	马于清等[26]
驴	10.00	0.90	1.39	
骡	10.00	0.90	1.39	
骆驼	46.00	1.72	1.39	

在农业碳排放量测算的基础上,计算农业碳排放强度。计算公式为

$$CED=C/S \quad (2)$$

式中:CED为农业的碳排放强度(t/万元);C为农业碳排放总量(10^4 t);S为农业的总产值(万元)。

1.2.2　核心解释变量:数字经济指数

数字经济发展水平的测度方法大体可分为两类[27]。①直接测算法,以中国信息通信研究院的研究为代表,该方法通过对传统产业数字化部分产值与信息通信技术(ICT)资本存量进行加总,从而估算数字经济的总体规模。然而,该方法对基础数据的准确性及数字经济概念界定的严谨性具有较高依赖。②指标测度法,即依据地区或行业特征,构建涵盖多维要素的综合指标体系,以此对数字经济发展水平进行系统性评估。本文在数字经济指数的测算上采取第2种测算方法,借鉴杨芳等[28]研究,从数字经济的基础设施建设、数字产业化、产业数字化、数字创新能力4个维度,设定12个二级指标,构建数字经济评价综合指标体系(表3)。为了保证数字经济评价体系的客观性与科学性,本研究采用熵值法确定各指标权重。

1.2.3　控制变量

基于中国农业领域碳排放的现状以及相关研究中影响因素的选取[29-30],本文引入农村居民消费支出(RCE,亿元)、第一产业就业人员数(PIP,万人)、农村居民人均可支配收入(RPI,元/人)、农村用电量(RCE, kW·h)、农业产值(AOV,亿元)、农业机械总动力(AMP, kW)、农业种植规模(APS, hm^2)、农作物受灾面积(ADA, hm^2)作为控制变量。农村居民消费支出(RCE)以各省份居民生产生活的消费开支为代表;农村居民人均可支配收入(RPI)表示衡量农

村居民家庭人均可用于最终消费支出与非义务性储蓄的总和，反映了农户的实际购买力与预算约束水平；第一产业就业人员数（PIP）指全社会劳动力中主要从事农、林、牧、渔业等第一产业生产活动的就业人员总量，用于表征农业部门的劳动力要素投入规模；农村用电量（REC）指统计范围内农村地区在农业生产与居民生活等活动中所消耗的电力总量；农业产值（AOV）是以货币形式表示的在一定时期内农业部门所生产的全部最终产品与服务的市场价值总和，用于衡量农业部门的综合产出规模；农业机械总动力（AMP）指农业生产经营过程中所使用的各类机械动力的总和，通常以功率单位计量，反映农业生产中资本替代劳动的机械化程度；农业种植规模（APS）以农作物总播种面积与农村常住人口的比值表达，用于衡量人均耕种强度与土地规模化经营水平；农作物受灾面积（ADA）以遭受自然灾害影响的农作物面积占总播种面积的比例表示，用于反映农业生产过程中面临的自然风险程度。鉴于农业碳排放受财政支农力度（FSA）和城镇化（UR）的双重影响，本文聚焦于财政支农力度与城镇化水平两个关键调节变量，分别以政府农业支出占财政总支出比重、城镇人口占年末常住人口比重予以度量，旨在深入考察其在农业碳减排中的作用机制。

表3 数字经济发展指标评价体系

Table 3 Evaluation system for digital economy development indicators

一级指标	二级指标
数字经济基础设施建设	计算机普及率/台
	互联网宽带接入用户数/万户
	移动电话普及率（部/百人）
数字产业化	电子商务销售额/亿元
	电信业务总量/亿元
	信息技术服务收入/亿元
产业数字化	每百家企业拥有网站数/个
	数字普惠金融指数
	有电子商务交易活动的企业比重/%
数字创新能力	规模以上工业企业R&D人员折合全时当量/人年
	规模以上工业企业R&D经费/亿元
	技术合同成交总额/亿元

1.3 数据来源与处理

根据数据的完整性与可得性，本文选取2015—2023年中国30个省份（西藏和港澳台除外）的面板数据作为研究样本。为深入探讨区域差异，本文参照国家统计局及已有研究标准，将研究区域划分为东部、中部和西部三大地带；同时，依据农业生产功能与对象特征，进一步将其细分为粮食主产区与非粮食主产区、种植业优势区与畜牧业优势区。选择2015年作为起点，主要是因为自2015年以来，中国在农业现代化和数字经济发展方面出台了一系列政策，为研究提供了制度和实践背景，例如《国家“十三五”农业发展规划（2016年）》《数字乡村发展战略纲要（2019年）》以及各地推进农业信息化、智慧农业建设的具体政策措施。农业碳排放强度（ACI），根据联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）推荐的碳排放系数法测算得出，所需基础数据来源于历年《中国农村统计年鉴》和《中国能源统计年鉴》。农村居民消费支出、第一产业就业人员数（PIP，万人）、农村居民人均可支配收入主要来源于历年《中国统计年鉴（2016—2024年）》，通过国家统计局官方网站（http://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/）获取；农村用电量、农业产值、农业机械总动力、农业种植规模、农作物受灾面积主要来源于历年《中国农村统计年鉴（2016—2024年）》，通过中国知网（CNKI）“中国经济与社会发展统计数据库”（https://data.cnki.cn/）获取。所用到的空间效应分析基于国家基础地理信息中心（http://www.webmap.cn/）发布的1∶400万中国省级行政区划矢量地图确定，该数据空间分辨率约为4 km。个别省份少数年份的“第一产业就业人员数”存在缺失，采用线性插值法进行平滑插值补充，并对所有连续变量在1%和99%分位上进行缩尾处理，以消除极端值对回归结果的潜在影响，确保数据的平衡性和结果的可靠性。同时，受数据可获取性限制，港澳台地区及西藏自治区未纳入省级层面的研究范围。

表4为本文主要变量的描述性统计结果。由表4可知，农业碳排放强度的均值为0.16，最大值为0.40，最小值为0.04；数字经济指数的均值为0.12，最大值为0.63，最小值为0.02。

1.4 研究方法

1.4.1 双向固定效应模型

参照唐重振等[31]关于农业碳排放强度的面板计量分析框架，本文构建双向固定效应模型以检验数字经济发展对农业碳排放强度的直接影响。具体操作上，采用Stata 18统计软件进行回归分析，通过引入个体与时间虚拟变量以控制不可观测的省际异质性与宏观经济时间冲击。基准模型设定为

$$CED_{it}=\partial+\beta DEI_{it}+\gamma X_{it}+\mu_i+\sigma_i+\varepsilon_{it} \quad (3)$$

式中:CED_{it},DEI_{it}分别代表i省份第t年的农业碳排放强度(t/万元)和数字经济指数(无量纲,经标准化处理);α代表截距项(常数项);X_{it}表示一系列主要的控制变量;β,γ分别表示数字经济指数和各个控制变量的回归系数;μ_i,δ_i,ε_{it}分别代表个体效应、时间效应和随机扰动项。

表 4　农业碳排放强度、数字经济指数及控制变量的描述性统计

Table 4　Descriptive statistics of agricultural carbon emission intensity, digital economy index and control variables

变量名称	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
农业碳排放强度(CED)	270	0.16	0.06	0.04	0.40
数字经济指数(DEI)	270	0.12	0.11	0.02	0.63
第一产业就业人员数(PIP)	270	16.05	5.54	9.89	22.22
农村居民消费支出(RCE)	270	9.44	0.30	8.80	10.22
农村居民人均可支配收入(RPI)	270	9.63	0.35	8.85	10.59
农村用电量(REC)	270	5.02	1.22	1.78	7.61
农业产值(AOV)	270	7.34	1.06	4.63	8.85
农业机械总动力(AMP)	270	7.69	1.15	4.54	9.50
农业种植规模(APS)	270	3.38	2.65	0.27	15.21
农业受灾面积(ADA)	270	0.11	0.10	0.00	0.70
财政支农力度(FSA)	270	0.12	0.04	0.03	0.23
城镇化水平(UR)	270	0.62	0.11	0.40	0.94

1.4.2　调节效应模型

为探究数字经济对农业碳排放强度的影响机制中,财政支农投入强度和城镇化水平是否发挥调节作用。本文设计基于交互项的调节效应模型,在基本面板回归模型的基础上,引入数字经济指数与财政支农投入强度、城镇化水平的交互项,以检验两类调节变量在数字经济作用于农业碳排放中的差异性影响。计算公式为:

$$CED_{it}=\partial_0+\beta DEI_{it}+\eta M+\lambda N+\gamma X_{it}+\mu_i+\sigma_i+\varepsilon_{it} \tag{4}$$

式中:α_0代表截距项(常数项);η表示其回归系数;M为财政支农力度(FSA)和城镇化(UR);N为数字经济指数与财政支农力度或城镇化的交互项。

1.4.3　空间杜宾模型

考虑到数字经济与农业碳减排可能存在的空间溢出特征,参照相关研究[30],本文采用空间计量方法进行拓展分析。具体操作步骤为:①利用地理信息系统(ArcGIS 10.8软件)结合国家基础地理信息中心数据,计算各省会城市间的球面距离,构建地理距离权重矩阵,并进行标准化处理;②通过计算 Stata 18 全局 Moran's I 指数检验核心变量的空间自相关性;最后,依次进行 LM 检验、Hausman 检验、LR 检验和 Wald 检验(表 5),根据检验结果拒绝了空间自回归(SAR)和空间误差(SEM)模型,最终确立并采用极大似然法(MLE)估计固定效应空间杜宾模型(SDM)。计算公式为

$$CED_{it}=\partial_1+\mu\sum_{j=1}^{n}W_{ij}CED_{it}+\eta X_{it}+\varphi\sum_{j=1}^{n}W_{ij}X_{ij}+\mu_i+\sigma_i+\varepsilon_{it} \tag{5}$$

$$CED_{it}=\omega\sum_{j=1}^{n}W_{ij}\varepsilon_{it}+\delta_{it} \tag{6}$$

式中:W_{ij}为空间面板权重矩阵;α_1为常数项/截距项;η为解释变量的回归系数向量;φ为空间滞后解释变量的回归系数向量;μ_i和δ_i分别表示地区固定效应和时间固定效应;ω为空间误差自相关系数;X_{it}表示城市i在第t年的解释变量向量,包含核心解释变量数字经济指数以及相关控制变量;ε_{it}为空间误差自相关项;δ_{it}为随机干扰项。本文选取地理距离权重矩阵作为空间权重设定,其中W定义为省份i与j间地理直线距离的倒数。

表 5　数字经济水平对农业碳排放强度效应的计量检验

Table 5　Measurement test of effects of digital economy development level on agricultural carbon emission intensity

变量	统计数值	p值
拉格朗日乘数检验(滞后项)	24.338	0.000
稳健拉格朗日乘数检验(滞后项)	1.670	0.196
拉格朗日乘数检验(误差项)	88.826	0.000
稳健拉格朗日乘数检验(误差项)	66.158	0.000
似然比检验(空间杜宾模型-空间自回归模型)	63.59	0.000
似然比检验(空间杜宾模型-空间误差模型)	83.94	0.000
沃尔德检验	85.39	0.000
豪斯曼检验	78.67	0.000

考虑到数字经济与农业碳排放强度之间的空间自相关性，本文采用莫兰指数（Moran's *I*）对2015—2023年数字经济发展水平和农业碳排放强度的空间关系进行了检验。从表6的结果来看，数字经济发展水平的莫兰指数均为正值，且在5%的显著性水平下显著，表明数字经济与空间之间存在正相关性。具体而言，数字经济的空间正相关性虽表现为显著的正值，但随着时间的推移，其空间扩展效应逐渐减弱，最终趋于稳定。相较之下，农业碳排放强度的空间自相关性在2020—2023年表现出显著的增强趋势，莫兰指数在此期间均显著为正，且在10%的显著性水平下得到验证，这一变化与"双碳"目标的提出高度契合。

表6 2015—2023年数字经济发展水平与农业碳排放强度全局Moran's *I*

Table 6 Global Moran's *I* of digital economy development level and agricultural carbon emission intensity (2015—2023)

年份	数字经济发展水平			农业碳排放强度		
	Moran's *I*	*Z*值	*p*值	Moran's *I*	*Z*值	*p*值
2015	0.10	3.82	0.00	−0.03	0.13	0.90
2016	0.06	2.75	0.01	0.01	1.19	0.23
2017	0.05	2.36	0.02	0.01	1.20	0.23
2018	0.04	2.16	0.03	0.01	1.40	0.16
2019	0.04	2.25	0.02	0.02	1.54	0.12
2020	0.04	2.19	0.03	0.03	1.88	0.06
2021	0.04	2.27	0.02	0.04	2.06	0.04
2022	0.04	2.28	0.02	0.05	2.28	0.02
2023	0.04	2.29	0.02	0.05	2.30	0.02

2 结果与分析

2.1 数字经济与农业碳排放强度发展现状分析

根据图2所示，考察期内全国30个省份的农业碳排放强度整体呈下降趋势，但区域间存在差异。2015年农业碳排放强度最高的前五省份依次为宁夏回族自治区、海南、江西、云南和甘肃省，其数值均超过0.26。2023年农业碳排放强度最高的5个省份依次为江苏省、青海省、甘肃省、江西省和云南省，其数值均在0.15以上；农业碳排放强度位于后3位的是贵州省、黑龙江省和天津市。这一分布特征反映出地形复杂，海拔较高的省份因更适宜发展种植业与畜牧业，其农业碳排放强度普遍高于地势平坦的平原，致使其农业碳排放量显著高于地势平坦地区。整体上，2015—2023年中国30省份的农业碳排放强度不断下降，但不同省份的下降趋势略有差异。

由图3可知，2015—2023年中国30省份数字经济指数呈现持续扩张态势，但区域异质性特征显著。东部地区表现出高强度的增长动能，以北京、江苏、广东为例，其数字经济指数分别从2015年的0.16，0.17和0.17升至2023年的0.63，0.64和0.64。研究期间增幅依次达2.94，2.76和2.76倍，这些地区的增长幅度显著高于全国平均水平，其数字产业的扩张节奏与既有经济发展基础呈现出较强关联性。相比之下，中西部地区的增长斜率相对平缓，青海、宁夏等西部省份的数字经济指数长期处于低位区间，前者2015—2023年指数仅从0.10提升至0.21，增幅为0.11，后者从0.10升至0.24，增幅为1.40倍，均明显低于东部典型省份的增长水平。从区域差距维度看，2023年数字经济指数的省际极值差，即广东0.64与青海0.21的差值已达0.43，较2015年的0.07扩大至6.14倍，高数字化省份与低数字化省份的分化趋势持续强化，区域差距呈进一步扩大的趋势，对数字经济赋能农业绿色转型构成潜在挑战。

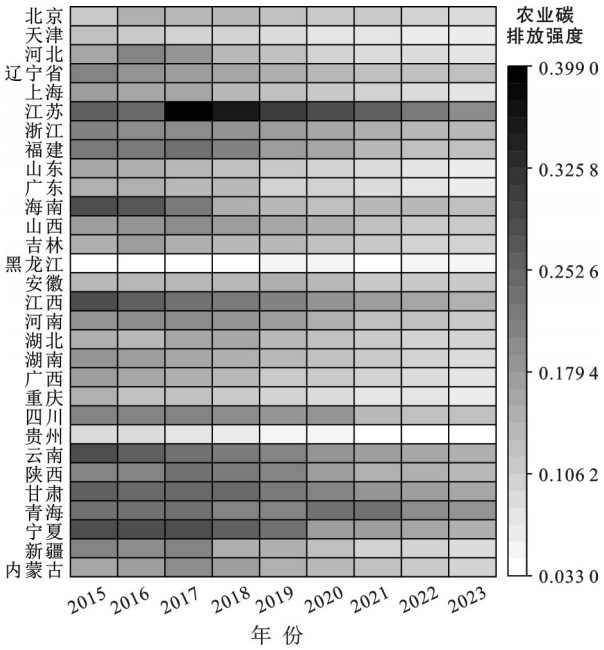


图2 各省份农业碳排放强度演变趋势

Fig.2 Evolution trend of agricultural carbon emission intensity in different province

2.2 数字经济与农业碳排放强度关系的检验

2.2.1 基准回归

表7为数字经济发展对农业碳排放强度影响的基准回归结果。列（1）在未引入任何控制变量的情况下，仅考察数字经济指数（DEI）对农业碳排放强度（CED）的影响，其回归系数为−0.08，并在5%的统计水平上显著，表明数字经济发展对农业碳排放强度产生负向影响。在逐步引入控制变量后〔列（2），列（9）〕，数字经济指数的估计系数仍然维持在

−0.05～−0.07,基本在5%或10%的统计水平上显著,表明在控制地区资源禀赋、产业结构和农业投入等因素后,数字经济发展仍然显著降低了农业碳排放强度。为进一步验证核心结论的稳健性并减少可能由内生性引致的估计偏差,本文在基准回归的基础上开展了稳健性检验。通过改变被解释变量,将其替换为农业碳排放量,发现数字经济指数的估计系数为−0.113,并在1%的显著性水平下通过统计检验,表明数字经济发展对农业碳排放强度具有稳定且显著的负向影响。同时,本文的估计结果与采用普通最小二乘法(OLS)所得结果在显著性上基本保持一致,从方法论角度进一步验证了基准回归模型的稳健性与可靠性,为假说1提供了经验证据。上述基准回归证实了数字经济对农业碳减排的直接促进作用。然而,这一过程是否受到外部宏观环境政策的干预?为此,本文进一步引入财政支农与城镇化水平,检验其潜在的调节机制。

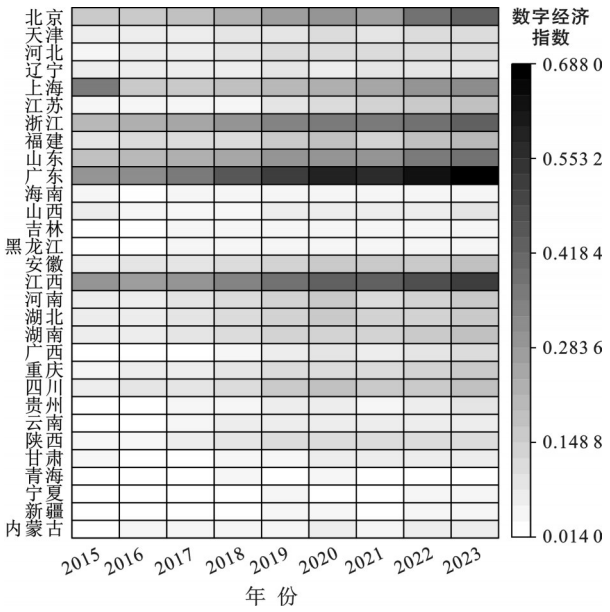


图3　各省份数字经济发展演变趋势

Fig.3　Evolution trend of digital economy development in different provinces

表7　数字经济发展对农业碳排放强度的影响估计

Table 7　Estimation of impact of digital economy development on agricultural carbon emission intensity

指标变量	农业碳排放强度								
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
数字经济指数	−0.08**	−0.06*	−0.07*	−0.05*	−0.04	−0.06**	−0.60***	−0.07*	−0.07*
	(2.18)	(1.77)	(1.88)	(1.92)	(1.37)	(1.73)	(1.82)	(1.86)	(1.86)
农村居民消费支出		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		(0.80)	(0.88)	(−0.27)	(−0.36)	(0.69)	(0.64)	(0.60)	(0.57)
第一产业就业人数			0.00	0.00	0.00	0.00**	0.00**	0.00**	0.00**
			(0.74)	(−0.01)	(−0.49)	(−2.21)	(−2.19)	(−2.30)	(−2.30)
农村居民人均可支配收入				0.00**	0.00**	0.00	0.00	0.00	0.00
				(2.09)	(1.94)	(−0.22)	(−0.22)	(−0.03)	(−0.07)
农村用电量					−0.00**	−0.00**	−0.00**	−0.00	−0.00
					(−1.95)	(−1.70)	(−1.73)	(−1.48)	(−1.54)
农业产值						−0.00***	−0.00***	−0.00***	−0.00***
						(−3.81)	(−3.43)	(−3.48)	(−3.51)
农业机械总动力							0.00	0.00	0.00
							(0.58)	(0.29)	(0.29)
农业种植规模								0.00	0.00
								(1.51)	(1.47)
农业受灾面积									0.01
									(−0.97)
常数项	0.25***	0.24***	0.23***	0.23***	0.23***	0.30***	0.29***	0.28***	0.29***
	(53.16)	(15.38)	(12.60)	(12.43)	(12.07)	(10.40)	(11.69)	(11.40)	(11.41)
年份固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是	是
省份固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是	是
样本数	270	270	270	270	270	270	270	270	270
R^2	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.95	0.95
豪斯曼检验 HAUS	chi2(7) =38.78 Prob>chi2=0.00								

注:①*,**,***分别表示在10%,5%和1%水平上显著;②括号内数值为聚类到省份层面的稳健标准误。下同。

2.2.2 调节效应分析

本文在基准模型的基础上,引入调节效应模型,分别构建数字经济指数与财政支农力度、城镇化水平的交互项,并将其逐一纳入回归分析中,相关结果详见表8。从财政支农力度的调节效应来看,在仅引入数字经济指数的基准回归中,其回归系数为−0.10,且在1%的显著性水平上通过检验,表明数字经济发展整体上有助于降低农业碳排放强度。进一步引入财政支农力度及其与数字经济指数的交互项后,数字经济指数的系数绝对值扩大至−0.15,依然在1%的显著性水平上显著。同时,数字经济指数与财政支农力度的交互项系数为−1.85,并在5%的统计水平上显著为负。这一结果表明,财政支农力度在数字经济影响农业碳排放强度的过程中发挥了显著的正向调节作用,即在财政支农投入水平较高的地区,数字经济对农业碳排放强度的抑制效应更为显著。进一步考察城镇化水平的调节效应发现,在不考虑交互项的基准回归中,数字经济指数的回归系数为0.11,并在1%的显著性水平上显著为正;而城镇化水平本身的回归系数为−0.15,同样在1%的统计水平上显著。当引入数字经济指数与城镇化水平的交互项后,数字经济指数的回归系数转为−0.36,并在1%的显著性水平上显著,而交互项系数为0.72,且在1%的水平上显著为正,说明城镇化水平对数字经济减排效应具有显著的削弱作用。尽管在整体样本中数字经济展现出显著的减排潜力与调节机制,但考虑到我国幅员辽阔,各地区自然资源禀赋与农业产业结构差异巨大,有必要进一步考察该效应的结构性与区域性特征。

2.2.3 异质性分析

(1)区域异质性分析。为进一步分析不同区域发展对农业碳排放强度的影响,本文参考相关研究[16]将全国分为东部、中部和西部3个经济区域(具体划分详见表9),并深入探究3个区域数字经济增长与农业碳排放强度的关联性。虽然中国农业生产受自然条件影响明显,但本文在研究中采用东中西部三大区域划分,主要基于两方面考虑:①东中西部划分更能反映我国区域间经济发展水平、产业结构和政策环境的差异,便于分析数字经济对农业碳排放的影响;②三大区域划分在已有文献中使用广泛,数据统计口径统一,可保证研究结果的可比性与稳健性。

表8 财政支农力度与城镇化水平在数字经济影响农业碳排放中的调节作用检验

Table 8 Test of moderating effects of fiscal support for agriculture and urbanization level on impact of digital economy on agricultural carbon emissions

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
数字经济指数	−0.10*** (0.04)	−0.15*** (0.04)	0.11*** (0.04)	−0.36*** (0.14)
财政支农力度		0.18 (0.12)		
DEI×FSA		−1.85** (0.89)		
城镇化水平			−0.15*** (0.04)	−0.15*** (0.04)
DEI×UR				0.72*** (0.20)
控制变量	是	是	是	是
省份固定效应	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
样本数	270	270	270	270
R^2	0.91	0.93	0.91	0.93

注:DEI为数字经济指数,FSA为财政支农力度,UR为城镇化水平。下同。

相关回归分析的结果详见表10,可用以揭示各区域间的异质性。由表10可知,东部地区的数字经济指数对农业碳排放强度的影响表现为负相关,回归系数为−0.27,并且通过了1%的显著性水平检验,表明数字经济的增长在一定程度上有助于减少农业碳排放,这离不开数字经济与东部地区农业生产的深度融合;中部地区数字经济发展对农业碳排放强度的影响最为显著,其回归系数为−0.72,通过了1%水平下的显著性检验;西部地区数字经济指数的回归系数为0.58,回归结果通过了10%水平下的检验,但其系数为正。

表9 三大区域主要包含的省份

Table 9 Main provinces included in three regions

区域划分	涵盖省份
东部地区	北京市、天津市、河北省、辽宁省、上海市、江苏省、浙江省、福建省、山东省、广东省、海南省
中部地区	山西省、吉林省、黑龙江省、安徽省、江西省、河南省、湖北省、湖南省
西部地区	四川省、贵州省、云南省、陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区、重庆市、广西壮族自治区、内蒙古自治区

注:不包括西藏和港澳台地区数据。

表 10　数字经济发展水平对农业碳排放强度影响的异质性分析

Table 10　Heterogeneity analysis of impact of digital economy development level on agricultural carbon emission intensity

变 量	东部地区	中部地区	西部地区
数字经济指数(DEI)	−0.27*** (−0.08)	−0.72*** (−0.26)	0.58* (−0.34)
样本量	88	64	88
R^2	0.52	0.55	0.61
F	24.55	10.04	71.53

(2)农业生产功能异质性分析。粮食生产功能区对农业碳排放强度的贡献份额是不可忽视的[31]。一方面,不同的粮食生产功能区在种植模式、生产方式等方面有所不同;另一方面,“趋粮化”趋势驱动了粮食增产,进而改变了传统高投入、高能耗的化学品施用模式,对农业碳排放产生深远影响。因此,本文在参照农业部印发的《全国粮食生产发展规划(2006—2020年)》对粮食主产区和非粮食主产区划分的基础上进行了回归分析。从表11可以看出,粮食主产区的数字经济指数(DEI)的估计系数为−0.44,且在1%的显著性水平下显著为负,说明数字经济的提升能够显著减少农业碳排放强度。相较之下,非粮食主产区的数字经济指数(DEI)系数为−0.20,同样在1%的显著性水平下显著为负,但其对农业碳排放强度的影响相对较小。

表 11　农业生产功能区分组异质性分析

Table 11　Grouped heterogeneity analysis of agricultural production functional areas

变 量	粮食主产区	非粮食主产区
数字经济指数(DEI)	−0.44***(0.12)	−0.20***(0.06)
控制变量	是	是
时间固定效应	是	是
省份固定效应	是	是
样本量	117	153

(3)农业生产对象异质性分析。考虑到农业中种植业和养殖业两个部门的差异,参考学界相关研究采用400 mm年降水量线作为分界标准[20],以此来区分种植区和畜牧区,并针对这两个区域进行异质性分析,结果详见表12。在种植业区,数字经济指数的估计系数为−0.78,在5%的显著性水平下显著为负,表明数字经济的发展可以显著减少种植业区的碳排放强度。但与畜牧业区相比,其减排效果较弱。畜牧业区的估计系数为−1.39,并且在10%的显著性水平下显著为负,这表明数字经济对碳排放的减排效果在畜牧业区更加显著。

表 12　农业生产对象分组异质性分析

Table 12　Grouped heterogeneity analysis of agricultural production objects

变 量	种植业区	畜牧业区
数字经济指数(DEI)	−0.78**(0.57)	−1.39*(0.45)
控制变量	是	是
时间固定效应	是	是
省份固定效应	是	是
样本量	216	54

2.3　数字经济对农业碳排放强度的空间溢出效应检验

上述异质性分析进一步明晰了数字经济减排效应的区域边界与结构特征。不仅如此,农业温室气体排放与数字数据要素的流动均具有典型的非闭合性与强烈的跨区域网络关联特征。因此,在验证了数字经济对本地区农业碳排放强度的直接影响后,本文继续探讨数字经济是否会通过信息共享、技术示范与产业联动等渠道,对邻近或经济关联地区的农业碳排放产生协同减排的溢出影响。由表13可知,数字经济发展对农业碳排放强度的直接效应、间接效应及总效应均通过显著性检验,假说3得到验证。其中,数字经济对本地区农业碳排放强度的直接效应系数为0.05,为正向影响,表明数字经济在本地的直接应用尚未充分转化为碳减排效果,短期内反而小幅提升了本地农业碳排放强度;间接效应系数为−0.34,在统计水平上显著为负,表明数字经济主要通过技术示范、要素流动等空间溢出渠道,对邻近和经济关联地区的农业碳排放强度产生了大幅抑制作用;受间接效应主导,总效应系数为−0.28,且在10%的统计水平上显著,表明数字经济对农业碳减排的贡献主要源于跨区域协同的空间溢出效应,而非本地直接效应。在控制变量方面,总效应分析显示,农村居民人均可支配收入对农业碳排放强度具有显著抑制作用,说明农民收入提升有助于改善农业生产要素配置并促进低碳技术采纳;相比之下,农业种植规模和农村用电量呈现显著正向影响,反映出规模扩张与能源消耗增加可能加剧农业碳排放。从效应分解结果看,直接效应中第一产业就业人数、农村居民可支配收入和农业产值均表现为显著的负向影响,有利于本地农业碳减排;间接效应方面,农村居民可支配收入呈现负向空间溢出,而农业种植规模和农村用电量则表现为正向外溢特征,表

明其分别对邻近地区农业碳排放产生抑制与强化作用。

表13 基于空间杜宾模型的数字经济对农业碳强度影响分解
Table 13 Decomposition of impact of digital economy on agricultural carbon intensity based on spatial Durbin model

变量	地理距离矩阵		
	直接效应	间接效应	总效应
数字经济指数	0.05* (0.03)	−0.34** (0.15)	−0.28* (0.16)
农村居民消费支出	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)
第一产业就业人员数	−0.00** (0.00)	0.00 (0.00)	−0.00 (0.00)
农村居民人均可支配收入	0.00** (0.00)	−0.00** (0.00)	−0.00** (0.00)
农村用电量	−0.00 (0.00)	0.00** (0.00)	0.00** (0.00)
农业产值	−0.00*** (0.00)	0.00 (0.00)	−0.00 (0.00)
农业机械总动力	0.00 (0.00)	−0.00 (0.00)	−0.00 (0.00)
农业种植规模	0.00 (0.00)	0.06*** (0.01)	0.06*** (0.02)
农业受灾面积	0.01 (0.01)	−0.05 (0.06)	−0.04 (0.06)

3 讨 论

（1）数字经济对农业碳减排的直接与调节机制探讨。研究发现数字经济能够显著降低农业碳排放强度，这与学界已有研究[8,12]结论一致。财政支农力度（FSA）显著增强了数字经济对农业碳排放强度的抑制效果，这验证了财政政策在引导技术扩散和激励绿色行为方面的有效性。在数字经济背景下，政府的财政支持，如农机购置补贴、绿色生产奖励、数字基础设施建设投资等，能够显著降低农户的成本，激发其采用数字技术和低碳生产方式的积极性。这种政策协同效应是数字经济减排潜力得以充分释放的关键。城镇化水平（UR）则表现出一定的削弱作用，说明城镇化对农业生产结构和劳动力素质的影响是复杂的。一方面，城镇化可以带来要素流动和规模化经营，有利于数字技术应用；但另一方面，若农村青壮年劳动力大量外流，导致农业劳动力结构老化，将削弱数字技术在农业生产中的吸收、学习和转化能力，形成“数字鸿沟”。

（2）异质性减排效应分析。数字经济对农业碳排放强度的抑制作用在东部和中部地区显著，而在西部地区不显著甚至呈现正向关系。这一空间分异格局与数字经济发展水平、农业经营规模及产业结构紧密相关[32]。此外，本文进一步从“农业生产功能”与“生产对象类型”角度展开异质性检验，发现数字经济在粮食主产区、种植业区与畜牧业区均具有显著的碳减排效应，尤其在畜牧业区由于规模化养殖与数字化管理结合紧密，减排效果更为突出，这与陈卫洪等[14]关于数字经济对种植业碳排放效率具有门槛效应的发现形成呼应。表明粮食主产区中，数字经济通过机械化、精准施肥、智能管理等方式提升生产效率与资源利用率，显著推动农业绿色转型与碳减排。非粮食主产区虽有减排效果，但受生产分散、数字化水平较低制约，作用强度弱于粮食主产区。同时，因为畜牧业区规模化经营的比重现已超过70%，这一现状为推动畜牧业的数字化转型奠定了坚实的基础。另外，畜牧业的集约化管理模式不仅促进了种植与养殖的有机结合，还实现了稻田养鸭和粪便还田等生态农业技术的广泛应用。

（3）农业低碳转型的空间溢出效应数字经济不仅能够降低本地区的农业碳排放强度，还能通过空间溢出效应显著抑制邻近地区的农业碳排放，这与田云等[20]关于农业碳排放存在空间依赖性与技术溢出效应的研究结论相符。这说明数字经济具有网络外部性与知识外溢特性，相邻或经济结构相似的省份之间，可通过技术模仿，人才流动，投资联动等渠道，形成低碳农业技术的扩散与协同转型。例如，高数字经济发展水平的省份，其在智慧农业、农业大数据应用方面的成功经验和技术，可能通过示范效应、人才培训、数字平台共享等方式，辐射带动周边省份提升农业生产效率和绿色化水平。这种跨区域的知识溢出和技术扩散，是实现区域农业碳减排整体目标的重要途径，也印证了“双碳”目标下区域协同治理的重要性。

（4）局限性与研究展望。限于篇幅，未来仍存在以下几个方面有待深入：①数字经济指标虽从多维度构建，但尚未完全涵盖数字技术与农业深度融合的微观应用场景（如农业大数据平台、区块链溯源等）；②主要基于省级宏观数据，未能揭示农户、合作社等微观主体的行为响应机制，未来可借助微观调查数据开展分析；③空间权重矩阵主要基于地理距离设定，未来将尝试构建经济-地理复合权重或基于数字基础设施连通性的网络权重，以更精准刻画数字经济的溢出路径，使研究结论更加全面。

4 结 论

(1) 数字经济发展对农业碳排放强度具有显著的抑制作用,是驱动农业绿色低碳转型的有效动力。在机制路径上,财政支农力度的提升能够产生积极的政策协同,显著正向调节并放大数字经济的减排效应;而现阶段的城镇化水平则在其中表现出明显的负向调节作用。

(2) 数字经济的农业减排效果呈现出显著的区域与结构异质性特征。在东中部地区、粮食主产区以及集约化程度较高的畜牧业区,数字经济的碳减排赋能效应尤为突出;而在西部地区及数字化基础薄弱区域,该减排效应存在滞后性,尚未得到有效释放。

(3) 数字经济赋能农业减排表现出显著的空间溢出特征。数字经济发展不仅能够有效降低本地区的农业碳排放强度,还能对邻近地区的农业碳排放产生显著的抑制作用,进而形成跨区域的协同减排红利。

参考文献(References)

[1] 黄祖辉.我国农业转型发展的制约与关键[J].农经,2025(增刊2):3-14.
Huang Zuhui. Restriction and key of agricultural transformation and development in China [J]. Agriculture Economics, 2025(S2):3-14.

[2] 祝树金,李啸霄.数字经济如何赋能地区绿色化发展:基于降低资本错配的视角[J].湖南大学学报(社会科学版),2025,39(6):30-40.
Zhu Shujin, Li Xiaoxiao. How does the digital economy empower regional green development: A perspective based on reducing capital misallocation [J]. Journal of Hunan University (Social Sciences), 2025, 39(6): 30-40.

[3] Balafoutis A, Beck B, Fountas S, et al. Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation, farm productivity and economics [J]. Sustainability, 2017,9(8):1339.

[4] Aker J C, Mbiti I M. Mobile phones and economic development in Africa [J]. Journal of Economic Perspectives, 2010,24(3): 207-232.

[5] 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 Shangzhao. Impact of digital economy development on agricultural carbon emissions and regional heterogeneity: Mediating effect of technological innovation [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2025, 38(5):1117-1128.

[6] 孟维福,石可敬,李建英.数字经济发展对农业碳排放的影响及作用机制[J].农村金融研究,2024(7):16-27.
Meng Weifu, Shi Kejing, Li Jianying. The impact and mechanism of digital economy development on agricultural carbon emissions [J]. Rural Finance Research, 2024(7):16-27.

[7] 郭丰,杨上广,任毅.数字经济、绿色技术创新与碳排放:来自中国城市层面的经验证据[J].陕西师范大学学报(哲学社会科学版),2022,51(3):45-60.
Guo Feng, Yang Shangguang, Ren Yi. The digital economy, green technology innovation and carbon emissions: Empirical evidence from Chinese city-level data [J]. Journal of Shaanxi Normal University (Philosophy and Social Sciences Edition), 2022,51(3):45-60.

[8] Zhong Ruoxi, He Qiang, Qi Yanbin. Digital economy, agricultural technological progress, and agricultural carbon intensity: Evidence from China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022,19(11):6488.

[9] 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.
Chen Zhongwei, Tang Can. Impact of digital economy development on agricultural carbon emissions and its temporal and spatial effects [J]. Science and Technology Management Research, 2023,43(12):137-146.

[10] 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.
Lu Jingyu, Guo Junhua. The green agricultural development empowered by the carbon emission reduction effect of digital economy [J]. Journal of Jiangxi University of Finance and Economics, 2024(3):78-90.

[11] 陈卫洪,耿芳艳,张宏胜.数字经济发展对种植业碳排放效率的影响研究:基于中介和门槛效应的实证检验[J].中国生态农业学报,2024,32(6):919-931.
Chen Weihong, Geng Fangyan, Zhang Hongsheng. A study on the impact of digital economy development on carbon emission efficiency in crop production system: Empirical tests based on mediation and threshold effects [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024,32(6): 919-931.

[12] 张向飞.基于农业物联网的数据智能传输与大田监测应用[D].上海:东华大学,2016.
Zhang Xiangfei. Intelligent data transmission and field monitoring application based on agricultural Internet of Things [D]. Shanghai: Donghua University, 2016.

[13] 何勇,戴馥霜,朱姜蓬,等.农业低空经济应用场景及产业发展现状与趋势[J].智慧农业,2025,7(6):1-17.
He Yong, Dai Fushuang, Zhu Jiangpeng, et al. Current status and trends of application scenarios and industrial

development in the agricultural low-altitude economy [J]. Smart Agriculture, 2025,7(6):1-17.

[14] 沈滨,贺仁驹.从“十四五”实践到“十五五”破局:人工智能赋能新型工业化的路径[J].经济问题,2025(12):1-9.
Shen Bin, He Renju. From the practice of the “14th Five-Year Plan” to the breakthrough of the “15th Five-Year Plan”: The path of AI empowering new industrialization [J]. Economic Problems, 2025(12):1-9.

[15] 代琳,齐云飞,严若泉.“双碳”目标视域下我国农业生态效率对碳减排评价影响分析及对策研究[J/OL].(2025-12-09).生态学报, https://doi.org/10.20103/j.stxb.202506111475.
Dai Lin, Qi Yunfei, Yan Ruoquan. Analysis and countermeasure research on the influence of agricultural ecological efficiency on carbon emission reduction evaluation from the perspective of dual carbon goals in China [J/OL]. (2025-12-09). Acta Ecologica Sinica, https://doi.org/10.20103/j.stxb.202506111475.

[16] 童伟伟,李玉霖,张董敏.农业服务化水平提升对中国农业碳排放强度的影响研究[J].中国农业资源与区划,2024,45(6):23-36.
Tong Weiwei, Li Yulin, Zhang Dongmin. Study on the influence of agriculture servitization on China's agricultural carbon emissions intensity [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2024,45(6):23-36.

[17] 田云,蔡艳蓉,张蕙杰.数字经济对农业碳排放效率的影响:基于门槛效应和空间溢出效应的检验[J].农业技术经济,2024(11):89-107.
Tian Yun, Cai Yanrong, Zhang Huijie. The impact of digital economy on agricultural carbon emission efficiency: Based on threshold effect and spatial spillover effect test [J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2024(11):89-107.

[18] 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.
He Yanqiu, Cheng Xueying, Wang Fang. Study on the regional spillover effect of agricultural carbon emission based on the perspective of agricultural technology diffusion [J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2022(4):132-144.

[19] 陈宇斌,王森,陆杉.农产品贸易对农业碳排放的影响:兼议数字乡村发展的门槛效应[J].华中农业大学学报(社会科学版),2022(6):45-57.
Chen Yubin, Wang Sen, Lu Shan. The impact of agricultural products trade on agricultural carbon emissions: The threshold effect of digital rural development [J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2022(6):45-57.

[20] 李波.我国农地资源利用的碳排放及减排政策研究[D].湖北 武汉:华中农业大学,2011.
Li Bo. Study on the carbon emission of agricultural land utilization and emission-reducted policy in China [D]. Wuhan. Hubei: Huazhong Agricultural University, 2011.

[21] 李波,张俊飚,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.
Li Bo, Zhang Junbiao, Li Haipeng. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2011,21(8):80-86.

[22] 田云,张俊飚,李波.中国农业碳排放研究:测算、时空比较及脱钩效应[J].资源科学,2012,34(11):2097-2105.
Tian Yun, Zhang Junbiao, Li Bo. Agricultural carbon emissions in China: Calculation, spatial-temporal comparison and decoupling effects [J]. Resources Science, 2012,34(11):2097-2105.

[23] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

[24] Nelson R G, Hellwinckel C M, Brandt C C, et al. Energy use and carbon dioxide emissions from cropland production in the United States, 1990—2004 [J]. Journal of Environmental Quality, 2009,38(2):418-425.

[25] 王慧敏,朱建军.农业数字化对化肥利用效率影响的实证研究[J].中国生态农业学报,2024,32(11):1857-1868.
Wang Huimin, Zhu Jianjun. An empirical study on the impact of agricultural digitalization on fertilizer utilization efficiency [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024,32(11):1857-1868.

[26] 马于清,曹丁戈,罗文海,等.基于生命周期的我国畜禽养殖业碳排放核算[J].中国环境科学,2024,44(5):2799-2810.
Ma Yuqing, Cao Dingge, Luo Wenhai, et al. The evaluation of the livestock and poultry production of carbon emissions in China based on life cycle assessment [J]. China Environmental Science, 2024,44(5):2799-2810.

[27] 续继.国内外数字经济规模测算方法总结[J].信息通信技术与政策,2019,45(9):78-81.
Xu Ji. Summary of digital economy measuring method [J]. Information and Communications Technology and Policy, 2019,45(9):78-81.

(下转第377页)