农业资源与环境学报 CSCD核心期刊 中文核心期刊 中国科技核心期刊
JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT
欢迎投稿 http://www.aed.org.cn

数字乡村建设对种植业碳排放的影响

史战文, 焦裕樊, 崔许锋, 靳韶佳

引用本文:
史战文, 焦裕樊, 崔许锋, 等. 数字乡村建设对种植业碳排放的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(6): 1593-1602.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13254/j.jare.2025.0660

史战文, 焦裕樊, 崔许锋, 等. 数字乡村建设对种植业碳排放的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(6): 1593-1602.
SHI Z W, JIAO Y F, CUI X F, et al. Impact of digital village construction on carbon emissions from planting industry [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2025, 42(6): 1593-1602.

开放科学 OSID

数字乡村建设对种植业碳排放的影响

史战文[1], 焦裕樊[1], 崔许锋[1], 靳韶佳[2*]

(1.中南财经政法大学工商管理学院, 武汉 430073; 2.武汉纺织大学数学与统计学院, 武汉 430200)

摘 要:数字乡村建设如何系统影响种植业碳排放,是关乎农业绿色转型成效的重要议题。本研究基于2011—2022年我国30个省级面板数据,构建数字乡村建设水平测算体系,运用双向固定效应模型、中介效应模型、调节效应模型及门槛效应模型,分析数字乡村建设对种植业碳排放的影响。结果表明:数字乡村建设对种植业碳排放具有显著抑制效应,其水平每提升1%,种植业碳排放量平均降低3.41×10^6 t,该结论经多种稳健性检验后依然成立。农业全要素生产率是关键中介变量,数字乡村建设通过提升全要素生产率间接实现碳减排。农业公共投资正向调节数字乡村的减排效能,农业绿色创新水平单门槛值1 293,超过该阈值后数字乡村建设的减排效应进一步强化。研究揭示数字乡村建设通过技术赋能与管理优化实现系统性减排。结合上述核心机制,建议从数字基建部署、全要素生产率提升、公共投资优化与绿色创新能力建设等方面入手,制定差异化的政策体系,以助推农业绿色低碳发展。

关键词:数字乡村建设;种植业碳排放;农业全要素生产率;超效率SBM模型

中图分类号:X321 **文献标志码**:A **文章编号**:2095-6819(2025)06-1593-10 **doi**: 10.13254/j.jare.2025.0660

Impact of digital village construction on carbon emissions from planting industry

SHI Zhanwen[1], JIAO Yufan[1], CUI Xufeng[1], JIN Shaojia[2*]

(1.School of Business Administration, Zhongnan University of Economics and Law, Wuhan 430073, China; 2. School of Mathematics and Statistics, Wuhan Textile University, Wuhan 430200, China)

Abstract: The issue of how digital village construction systematically affects carbon emissions from planting industry is a crucial topic regarding the effectiveness of agricultural green transformation. This study was based on the panel data of 30 provincial regions in China from 2011 to 2022. A measurement system for the level of digital village construction was constructed, and the two-way fixed-effect model, mediation effect model, moderation effect model, and threshold effect model were employed to analyze the impact of digital village construction on carbon emissions from planting industry. The results showed that digital village construction had a significant inhibitory effect on carbon emissions from planting industry. For every 1% increase in its level, the carbon emissions from planting industry decreased by an average of 3.41×10^6 t. This conclusion remained valid after various robustness tests. Agricultural total factor productivity was the key mediating variable. Digital village construction indirectly achieved carbon emission reduction by enhancing total factor productivity. Agricultural public investment positively moderated the emission reduction effectiveness of digital village construction. There was a single threshold value of 1 293 for the level of agricultural green innovation. After exceeding this threshold, the emission reduction effect of digital village construction was further strengthened. The study revealed that digital village construction achieved systematic emission reduction through technological empowerment and management optimization. Considering the above core mechanisms, it was recommended to formulate a differentiated policy system by focusing on digital infrastructure deployment, total factor productivity improvement, public investment optimization, and green innovation capacity building to promote the green and low-carbon development of agriculture.

Keywords: digital village construction; carbon emissions from planting industry; agricultural total factor productivity; super-efficient SBM model

收稿日期:2025-07-02 **录用日期**:2025-09-18

作者简介:史战文(1988—),男,河南商丘人,博士,讲师,研究方向为农业低碳。E-mail:szw@zuel.edu.cn

***通信作者**:靳韶佳 E-mail:sjjin@wtu.edu.cn

基金项目:教育部人文社会科学研究青年基金项目(24YJC630091);湖北省教育厅哲学社会科学研究项目(23G072,23Q164)

Project supported: Humanities and Social Science Fund of Ministry of Education of China(24YJC630091); Philosophy and Social Sciences Research Project of Hubei Provincial Department of Education(23G072,23Q164)

在全球气候变化与“双碳”战略深度推进的时代背景下，乡村振兴与绿色低碳转型的耦合发展成为农业现代化的核心命题。加快建设绿色智慧的数字生态文明，是国家推动“美丽中国”和“数字中国”双重战略的关键举措[1]，数字技术以前所未有的广度和深度渗透至农业生产全链条[2]，正深刻重塑农业发展的模式和路径[3]。2021年中央网信办等七部门联合印发的《数字乡村建设指南1.0》明确将“推动农业绿色低碳发展”纳入核心目标，凸显了数字技术在破解农业环境约束中的战略地位。加快推进数字乡村建设，已成为实现农业农村领域经济有效减排的关键路径[4]。种植业作为农业主体部门，其碳排放强度高与结构转型缓慢的现实压力日益突出。如何借助数字技术驱动种植业碳减排，已成为实现中国式农业现代化的重大理论与实践命题。因此，深入研究种植业碳排放对于实现“双碳”目标具有重大意义[5]。

当前我国正处于实现全面乡村振兴与碳中和目标的战略交汇期，农业生产仍面临资源环境约束趋紧的挑战，探究数字乡村建设对种植业碳排放的影响机制，不仅关乎农业绿色转型的成败，更是实现中国式农业现代化的重大命题。已有文献为理解这一命题提供了重要基础。一方面，数字技术在农业环境治理中的正向效应已经显现。其应用能够优化要素投入、减少化肥农药等资源消耗[6-7]，从而有效降低环境压力，推动农业绿色低碳发展[8]。另一方面，针对种植业碳排放本身的研究已较为丰富，涵盖种植业碳排放量测算[9]、种植业碳补偿率[10]、种植业碳生产率[11]、种植业碳排放效率[12]以及种植业碳排放的时空特征[13]等多个方面。同时，已有研究也表明数字乡村建设在缩小城乡收入差距[14]、提高农业绿色全要素生产率[15]、改善乡村人居环境[16]、助力乡村包容性绿色增长与农业高质量发展[17]等方面具有积极作用。然而，现有研究缺少系统性地考察数字乡村建设这一综合性、系统性工程[18]对种植业碳排放的直接影响与内在作用机理，特别是缺乏在统一框架下对其影响因素、传导路径及边界条件的深入剖析。因此，本研究的核心问题是：数字乡村建设通过何种机制影响种植业碳排放？其影响效果受到哪些关键因素的调节或制约？

基于此，本研究在厘清数字乡村建设对种植业碳排放影响机理的基础上，从数字基础建设、乡村农业数字化以及乡村生活数字化这三个维度构建数字乡村建设水平测算指标体系，科学测度数字乡村建设水平。其次，系统地实证检验数字乡村建设对种植业碳排放的直接影响及其作用机制。本研究引入农业全要素生产率作为中介变量，量化数字技术通过要素配置优化实现的间接减排效应；同时将农业公共投资与绿色创新水平纳入分析体系，分别检验其对数字减排效应的调节作用与门槛特征。这一研究框架不仅能填补数字乡村建设背景下种植业碳排放影响因素的研究空白，更为“双碳”目标下农业绿色转型提供兼具理论深度与实践价值的政策参考。

1　理论分析与研究假说

1.1　数字乡村建设对种植业碳排放的直接影响

数字乡村建设作为一个涵盖多维度、多层次的复杂系统工程[18]，其核心构成主要包括：一是数字基础设施的广泛普及与深度覆盖[19]，为乡村数字化转型奠定了坚实的硬件基础；二是数字技术在农业生产、经营、管理等全链条环节的深度嵌入与应用[2,20]，推动农业数字化转型；三是乡村治理与公共服务的数字化赋能[21]，旨在提升治理效能、改善民生福祉并促进城乡均等化。这些子系统协同作用，通过以下关键路径对种植业碳排放产生直接抑制效应：首先，数字技术的嵌入能有效提升资源利用效率，并显著减少环境污染[8]，从源头上大幅减少了传统粗放管理模式下的直接或间接温室气体排放。其次，数字乡村建设为数字技术创新[22]的研发、推广与应用提供了平台与动力，直接降低了单位面积农机柴油消耗及其碳排放。再者，基于大数据分析的数字平台能够提高交易匹配度[19]。这有效缩短了供应链条，减少了因储存不当、运输低效和销售滞后造成的农产品产后损失，从而削减了隐含在其中的碳排放。最后，数字化监管手段和信息技术服务[23]构建了更有效的环境治理框架。一方面，这增强了对种植主体环境行为的实时监测与合规约束能力；另一方面，通过便捷的信息传播渠道，加速了科学施肥、保护性耕作、有机种植等减排固碳技术的普及与应用，直接引导和规范了低碳生产行为。综上所述，数字乡村建设可以通过源头减量、过程降耗、流通减损和监管引导直接作用于种植业生产、管理、流通等关键碳排放环节，系统性抑制种植业碳排放。基于此，提出如下假说：

H1：数字乡村建设水平的提升对种植业碳排放具有显著的直接抑制效应。

1.2　数字乡村建设对种植业碳排放的间接影响

数字乡村建设对于种植业碳排放的影响不仅体现在直接层面，还体现在通过农业全要素生产率对种

植业碳排放产生间接影响。其作用机制在于：物联网、大数据、人工智能等数字技术的深度嵌入，能够缓解农业生产中劳动力、资本与土地的要素错配，并实现对化肥、农药等高隐含碳投入品的精准化动态管理，从而驱动农业生产方式向智能化、集约化转型，最终显著提升农业全要素生产率[24-25]。而农业全要素生产率的提升，意味着单位农产品产出的资源消耗强度降低。具体表现为：其一，直接减少因化肥过量施用导致的N_2O排放以及化肥生产过程中的隐含CO_2排放[26]；其二，通过精准灌溉降低水泵能源消耗，产生资源节约效应；伴随着节能降耗型技术的应用普及，其进一步替代传统高碳生产方式低碳技术偏向效应。最终导致种植业碳排放系统性下降，形成从数字乡村建设到农业全要素生产率提升再到种植业碳排放间接削减的作用链条，为农业低碳转型提供了内生动力。据此，提出如下假说：

H2：数字乡村建设通过提升农业全要素生产率间接抑制种植业碳排放。

1.3 农业公共投资的调节作用

农业公共投资作为影响碳排放的关键变量，其对数字乡村减排效应的调节机制主要体现在以下三方面：其一，公共投资通过完善数字基础设施强化减排效能[27-28]。当公共投资向农村互联网基站、智能监测终端等数字基建倾斜时，既能提升种植业生产的数字化监测精度，又能通过数据共享平台减少信息不对称，推动农户规模化采纳低碳生产技术，从而放大数字技术对种植业碳排放的抑制作用。其二，公共投资通过降低技术转化成本激活减排潜力[26,28]。农业公共投资可支持节能减排项目，在数字乡村场景下，这类投资可具体表现为对物联网溯源系统、无人机植保等数字技术的购置补贴，以及对农户开展数字技能培训的经费支持。这直接降低了小农户应用数字技术的门槛，使更多主体能通过数字化管理优化种植流程，进而强化数字乡村对种植业碳排放的削减效果。其三，公共投资通过搭建协同治理网络提升减排持续性[26]。农业公共投资需向生物质能源、保护性耕作等领域倾斜，而数字乡村建设可依托公共投资构建政府-企业-农户协同平台。政府通过数字平台发布低碳生产标准，企业提供技术解决方案，农户则借助公共投资支持的数字工具反馈生产数据，形成闭环管理。这种模式既保障了减排技术的持续应用，又通过公共投资的杠杆效应吸引社会资本参与，进一步巩固数字乡村的减排成果。基于此，提出如下假说：

H3：农业公共投资对数字乡村建设的减排效应具有正向调节作用，即农业公共投资水平越高，数字乡村建设对种植业碳排放的抑制效应越强。

1.4 农业绿色创新水平的门槛效应

农业绿色创新水平是数字技术与低碳生产深度融合的关键条件，绿色技术的创新能够在农业种植和生产中优化流程，提高单产，减少农业对化肥和农药的依赖，从而提升农业生产效率与效益[29]，其发展程度决定了数字乡村减排效应的非线性特征。而当农业绿色创新水平低于门槛值时，数字技术可能因缺乏高效固碳品种、节能农机研发等低碳技术协同而难以充分发挥减排潜力；当农业绿色创新水平突破门槛值后，数字技术与绿色创新的耦合效应增强，使数字乡村建设对种植业碳排放的抑制效应显著提升。据此，提出如下假说：

H4：数字乡村建设对种植业碳排放的影响受农业绿色创新水平的门槛约束，农业绿色创新水平越高，数字乡村建设的减排效应越强。

2 材料与方法

2.1 变量选取

2.1.1 被解释变量：种植业碳排放（*CE*）

参照丁宝根等[9]的研究，采用IPCC碳排放系数法，从化肥、农药、农膜、柴油、翻耕和灌溉6个方面对种植业碳排放进行测算，各类碳源碳排放系数分别为化肥0.89 kg·kg^{-1}、农药4.93 kg·kg^{-1}、农膜5.18 kg·kg^{-1}、柴油0.59 kg·kg^{-1}、翻耕312.60 kg·hm^{-2}、灌溉266.48 kg·hm^{-2}，计算公式为：

$$CE = \sum CE_a = \sum T_a \times \sigma_a \tag{1}$$

式中：CE表示种植业碳排放总量，10^4 t；T_a表示第a种碳源的投入量，10^4 t；σ_a表示第a种碳源的碳排放系数。

2.1.2 核心解释变量：数字乡村建设水平（*DVC*）

目前关于数字乡村建设水平的测算缺乏统一标准，因此，本研究围绕种植业碳排放和农业绿色低碳转型这一核心目标，在参照已有相关研究[18,30-31]的基础上，选取数字基础建设、乡村农业数字化以及乡村生活数字化3个一级指标12个二级指标构建数字乡村建设水平测算指标体系，如表1所示。为避免主观因素干扰，实现权重分配的客观性与科学性，采用熵值法对各指标权重进行赋值，具体步骤如下：

（1）对数据进行标准化处理：

$$x'_{ij} = [x_{ij} - \min(x_j)] / [\max(x_j) - \min(x_j)] \tag{2}$$

式中：x'_{ij}为标准化后的第i个省份的第j个指标数值。

(2)计算第j个指标下第i个样本占该指标的比例P_{ij}:

$$P_{ij}=x'_{ij}/\sum_{i=1}^{30}x'_{ij} \tag{3}$$

(3)计算第j个指标的熵值e_j:

$$e_j=-k\sum_{i=1}^{30}P_{ij}\ln(P_{ij}),k=1/\ln 30 \tag{4}$$

(4)计算第j个指标的信息效用值d_j:

$$d_j=1-e_j \tag{5}$$

(5)计算各项指标的权重w_{ij}:

$$w_{ij}=d_j/\sum_{j=1}^{12}d_j \tag{6}$$

2.1.3 中介变量:农业全要素生产率(*ATFP*)

本研究选用农业全要素生产率作为中介变量。该指标的核心内涵在于表征农业生产系统的要素协同水平和整体技术效率[24]。在参照已有相关研究[32]的基础上,构建农业全要素生产率测算指标体系,如表2所示。为确保农业全要素生产率测算具有跨期可比性,同时处理投入冗余与产出不足以及提升精度,采用前沿的超效率SBM模型对其进行测度,具体公式如下:

$$\min\rho=\frac{1-\frac{1}{m}\sum_{b=1}^{m}\frac{s_b^-}{x_{bk}}}{1+\frac{1}{q}\sum_{r=1}^{q}\frac{s_b^+}{y_{rk}}}$$

$$s.t.\quad \sum_{c=1,c\neq k}^{n}x_{bc}\varphi_c+s_b^-\leqslant x_{bk}$$

$$\sum_{c=1,c\neq k}^{n}y_{rc}\varphi_c-s_b^+\leqslant y_{rk} \tag{7}$$

$$\varphi,s^-,s^+\geqslant 0$$

$$b=1,2,\cdots,m;r=1,2,\cdots,q;c=1,2,\cdots,n(c\neq k)$$

式中:ρ代表效率值;x和y分别指代投入向量和产出向量;m和q分别为投入指标和产出指标的维度;n表示决策单元的数量;k表示被评价的决策单元;x_{bc}和y_{rc}分别表示第c个决策单元的第b个投入值和第r个产出值;s^+和s^-分别反映投入冗余与产出不足(松弛变量);φ为权重向量。

2.1.4 调节变量:农业公共投资(*API*)

参照田云等[27]的研究,以各地农林牧渔业固定资产投资额来表示。为了降低数据异方差性与极端值干扰,本研究取对数处理。为避免交互项引入导致的多重共线性,对*DVC*和*API*进行去中心化处理后再构造交互项。

2.1.5 门槛变量:农业绿色创新水平(*AGIN*)

农业绿色创新水平是衡量一个地区创新能力的

表2 农业全要素生产率测算指标体系

Table 2 Indicator system for measuring agricultural total factor productivity

指标 Index	变量 Variable	变量说明 Variable declaration	单位 Unit
投入要素	劳动力投入	种植业从业人员数量	10^4人
	土地投入	农作物播种总面积	10^3 hm^2
	农业机械投入	农业机械总动力	10^4 kW
	化肥投入	农用化肥投入	10^4 t
	农药投入	农药使用量	10^4 t
	农膜投入	农用塑料薄膜使用量	t
	灌溉投入	农业有效灌溉面积	10^3 hm^2
期望产出	农业总产值	种植业总产值	10^9 CNY

表1 数字乡村建设水平测算指标体系

Table 1 Indicator system for measuring the level of digital village construction

一级指标 First level indicator	二级指标 Secondary indicator	指标说明 Indicator description	方向 Direction	权重 Weight/%
数字基础设施	农村互联网普及水平	农村宽带接入户数	+	8.35
	移动通信终端覆盖率	农村每百户移动电话拥有量	+	7.92
	农业气象监测能力	农业气象观测业务站点数量	+	7.98
	农村电力保障水平	农村用电量/乡村人口	+	8.96
乡村农业数字化	现代农业载体密度	国家现代农业示范区、产业园数量/县级行政区域数量	+	8.04
	电商渗透率	淘宝村数量/行政村总数量	+	9.79
	数字金融渗透度	数字金融数字化程度指数	+	7.94
	数字创新活力	国内专利申请授权量	+	8.59
乡村生活数字化	移动支付普及率	移动支付指数	+	7.97
	数字消费支出水平	农村居民人均交通通信支出	+	8.05
	数字技术人才储备	信息传输、软件和信息技术服务业城镇单位就业人员数量	+	8.43
	数字金融覆盖广度	数字金融覆盖广度指数	+	7.98

重要指标之一[29]。专利授权量作为创新活动的最终产出，是衡量知识创造和技术应用水平的核心载体。因此，本研究选择绿色低碳专利授权量来衡量农业绿色创新水平。

2.1.6 控制变量

结合已有相关研究，控制变量选取财政支农力度（*FSA*）[28]、环境规制水平（*ER*）[27]、农业机械化程度（*ADM*）[33]、工业化水平（*LI*）[34]、城镇化率（*UR*）[33]。其中，财政支农力度以地方财政农林水事务支出占财政一般预算支出的比值来表示；环境规制水平以环境污染治理投资与地区生产总值之比来表示；农业机械化程度以农业机械总动力与乡村第一产业就业人员的比值来表示；工业化水平以工业增加值占地区生产总值之比来表示；城镇化率以各地区城镇人口占总人口的比值来表示。

2.2 研究模型

2.2.1 基准回归模型

为检验数字乡村建设对种植业碳排放的直接影响，本研究构建双向固定效应模型。考虑到数字乡村建设与碳排放可能存在双向因果，模型通过固定效应控制不随时间变化的混淆因素；后续稳健性检验引入被解释变量一期滞后项（*L.CE*），进一步缓解动态内生性。

$$CE_{it}=\alpha_0+\alpha_1 DVC_{it}+\alpha_2 X_{it}+u_i+v_t+\varepsilon_{it} \quad (8)$$

式中：DVC_{it}表示数字乡村建设水平；X_{it}表示一系列控制变量；u_i表示控制省份效应，v_t表示控制时间效应；ε_{it}表示残差项；α_0、α_1和α_2为待估系数。

2.2.2 中介效应模型

为了检验数字乡村建设对种植业碳排放的作用机制，构建中介效应模型：

$$ATFP_{it}=\beta_0+\beta_1 DVC_{it}+\beta_2 X_{it}+u_i+v_t+\varepsilon_{it} \quad (9)$$

$$CE_{it}=\gamma_0+\gamma_1 DVC_{it}+\gamma_2 ATFP_{it}+\gamma_3 X_{it}+u_i+v_t+\varepsilon_{it} \quad (10)$$

式中：$ATFP_{it}$表示农业全要素生产率。

2.2.3 调节效应模型

为验证农业公共投资在数字乡村建设对种植业碳排放的影响中是否具有调节作用，构建调节效应模型：

$$CE_{it}=\theta_0+\theta_1 DVC_{it}+\theta_2 X_{it}+\theta_3 DVC_{it}\times API_{it}+\theta_4 API_{it}+u_i+v_t+\varepsilon_{it} \quad (11)$$

式中：API_{it}表示农业公共投资。

2.2.4 门槛效应模型

为检验数字乡村建设对种植业碳排放的影响是否具有非线性，构建门槛效应模型：

$$CE_{it}=\delta_0+\delta_1 DVC_{it}\times I\left(AGIN\leqslant\rho_1\right)+\delta_2 DVC_{it}\times I\left(\rho_1<AGIN\leqslant\rho_2\right)+\delta_3 DVC_{it}\times I\left(AGIN>\rho_2\right)+\delta_4 X_{it}+u_i+v_t+\varepsilon_{it} \quad (12)$$

式中：$AGIN$为农业绿色创新水平；ρ_1、ρ_2为门槛值；$I(\cdot)$为示性函数，当括号内条件满足时取值为1，否则取值为0。

2.3 数据来源

考虑数据的可获得性和一致性等因素，本研究选取2011—2022年我国30个省级行政区（不含港澳台及西藏）的面板数据作为研究样本。其中，数字乡村建设水平测算所涉及的基础数据来源于《中国统计年鉴》、国家统计局网站、中国淘宝村研究报告、农业农村部网站和北京大学数字普惠金融指数。种植业碳排放测算所涉及的基础数据来源于《中国农村统计年鉴》以及省级统计年鉴。各省绿色低碳专利授权数量来源于中国公共政策和绿色发展研究数据库（CPPGD）。其他各类变量涉及的原始数据主要来源于《中国统计年鉴》《中国农业年鉴》《中国农村统计年鉴》以及国家统计局网站等。实际分析中，对于部分指标在个别年份存在的数据缺漏问题，采用线性插值法予以补全。

3 结果与讨论

3.1 基准模型回归

多重共线性检验结果显示，方差膨胀因子值为2.68，明显小于5，由此可以判定各变量之间不存在严重的多重共线性问题。同时，根据LM检验、F检验以及Hausman检验结果可以确定时间、省份双固定效应模型适用于本研究。变量描述性统计结果见表3。

为确保数字乡村建设对种植业碳排放直接影响结果的稳健性，本研究采用逐步加入控制变量的方式进行回归，基准回归结果如表4所示。随着控制变量的逐步引入，数字乡村建设水平的系数绝对值虽有所变化，但其回归系数均在1%的统计水平上显著为负，表明数字乡村建设对种植业碳排放量具有显著的抑制作用。模型整体拟合优度稳定在0.99以上，表明控制变量的加入有效剥离了其他潜在因素的影响，使数字乡村建设的“净效应”估计更为准确。由列（6）结果可知，在控制其他因素后，数字乡村建设水平每提升1%，种植业碳排放量降低3.41×10^6 t。

控制变量中，财政支农力度系数显著为正，表明当前阶段财政支农投入可能更侧重于增产导向或存在效率瓶颈，未能有效转化为减排动力，甚至在一定

表3 变量描述性统计结果

Table 3 Descriptive statistical results of variables

变量类型 Variable type	变量名称 Variable name	符号 Symbol	样本量 Sample size	均值 Mean	标准差 Standard deviation	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value
被解释变量	种植业碳排放	*CE*	360	336.489	228.536	14.349	995.729
核心解释变量	数字乡村建设水平	*DVC*	360	0.344	0.127	0.069	0.699
中介变量	农业全要素生产率	*ATFP*	360	0.438	0.227	0.149	1.048
调节变量	农业公共投资	*API*	360	6.158	1.273	0.473	8.507
门槛变量	农业绿色创新水平	*AGIN*	360	1 650.572	3 103.592	7.000	22 737.000
控制变量	财政支农力度	*FSA*	360	0.114	0.033	0.040	0.204
	农业机械化程度	*ADM*	360	5.110	2.365	1.615	13.689
	环境规制水平	*ER*	360	0.014	0.009	0.003	0.094
	工业化水平	*LI*	360	0.334	0.080	0.100	0.574
	城镇化率	*UR*	360	0.601	0.121	0.350	0.896

表4 基准回归结果

Table 4 Benchmark regression results

变量 Variable	(1) *CE*	(2) *CE*	(3) *CE*	(4) *CE*	(5) *CE*	(6) *CE*
DVC	−491.148***	−507.724***	−408.994***	−378.188***	−325.149***	−341.480***
	(−3.46)	(−3.56)	(−3.49)	(−3.41)	(−3.30)	(−3.86)
ADM		4.937**	4.308**	4.369**	4.833***	5.245***
		(2.51)	(2.12)	(2.29)	(3.04)	(3.44)
FSA			531.457**	524.674**	573.642***	574.669***
			(2.58)	(2.70)	(2.79)	(2.83)
ER				−526.271**	−417.251**	−376.597*
				(−2.33)	(−2.12)	(−1.76)
LI					226.377**	225.136***
					(2.61)	(2.79)
UR						−216.138*
						(−1.72)
常数项	505.550***	486.030***	394.915***	392.047***	288.831***	422.022***
	(10.36)	(10.78)	(10.22)	(10.40)	(5.11)	(6.36)
省份固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
时间固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
N	360	360	360	360	360	360
R^2	0.991	0.991	0.992	0.992	0.992	0.993

注:括号内为t值;***、**、*分别表示在1%、5%、10%的水平下显著。下同。

Note:t-values are in parentheses; ***,** and * indicate significant at the 1%,5%,and 10% level,respectively. The same below.

程度上伴随碳排放增加,凸显了优化财政支农结构、强化其绿色导向的迫切性。环境规制水平系数显著为负,显示强化环境监管对抑制种植业碳排放具有积极作用。农业机械化程度系数显著为正,符合预期,反映了传统农机化石能源消耗是重要的碳排放来源。工业化水平系数显著为正,暗示工业化进程可能通过增加能源需求、改变土地利用方式等途径,间接提高种植业碳排放总量。城镇化率系数显著为负,表明城镇化带来的要素流动、技术扩散和生活方式的改变,也可能对农业减排产生一定的积极影响。上述结果验证了假说H1,即数字技术赋能农业绿色低碳转型的核心逻辑。

3.2 稳健性检验

为确保基准结论可靠性,依次采用三种方法进行稳健性检验。一是更换解释变量测度方法,采用主成分分析法重新测算数字乡村建设水平;二是滞后效应

处理，将被解释变量替换为一期滞后项（*L.CE*）以缓解内生性；三是缩尾处理，为减少异常值对研究结论的干扰，对基准回归中所有变量进行前后1%的缩尾处理，并使用处理后的数据进行回归。检验结果如表5所示，经上述的稳健性检验，数字乡村建设的估计系数均显著为负，与基准回归结果一致，表明本研究的基本结论稳健。

3.3 中介效应检验

加入农业全要素生产率进行进一步回归，验证了农业全要素生产率在数字乡村建设影响种植业碳排放中的传导作用，中介效应检验结果如表6所示。

在中介效应检验中，数字乡村建设水平对农业全要素生产率的影响显著为正，表明数字乡村建设可通过优化要素配置、推动技术创新等途径提升农业全要素生产率。农业全要素生产率对种植业碳排放的回归系数显著为负，说明农业全要素生产率的提高能通过改善生产效率、减少要素浪费等方式抑制种植业碳排放。进一步看，当引入农业全要素生产率作为中介变量后，数字乡村建设水平对种植业碳排放的直接效应仍显著为负，虽然系数绝对值较基准回归有所减小，但是农业全要素生产率的中介效应依旧显著，这表明数字乡村建设不仅能直接抑制种植业碳排放，还能通过提升农业全要素生产率间接实现减排效果。据此，假说H2得以验证。

表5 稳健性检验结果

Table 5 Results of robustness test

变量 Variable	（1）更换测度方法 Replace the measurement method *CE*	（2）滞后效应处理 Lag effect processing *L.CE*	（3）缩尾处理 Winsorize *CE*
DVC（主成分分析法）	−306.892** （−2.57）		
DVC		−350.038*** （−3.93）	−359.156*** （−4.14）
常数项	530.197*** （4.66）	467.767*** （7.00）	436.937*** （6.05）
控制变量	控制	控制	控制
省份固定效应	控制	控制	控制
时间固定效应	控制	控制	控制
N	360	330	360
R^2	0.992	0.993	0.993

表6 中介效应检验结果

Table 6 Results of mediation effect test

变量 Variable	（1）*CE*	（2）*ATFP*	（3）*CE*
DVC	−341.480*** （−3.86）	1.005*** （3.24）	−253.666*** （−2.91）
ATFP			−87.341** （−2.10）
常数项	422.022*** （6.36）	0.095 （0.18）	430.280*** （6.61）
控制变量	控制	控制	控制
省份固定效应	控制	控制	控制
时间固定效应	控制	控制	控制
N	360	360	360
R^2	0.993	0.941	0.993

3.4 调节效应检验

调节效应检验结果如表7所示。农业公共投资与数字乡村建设交互项的系数为负且在5%水平上显著，这表明农业公共投资强化了数字乡村建设对种植业碳排放的负向影响。这意味着当地区农业公共投资增加时，数字乡村建设在推动种植业碳减排方面的效果更为显著，可能得益于公共投资对数字基础设施完善、技术推广应用的支持作用，进而放大了数字技术的减排效能。该结果验证了假说H3，即农业公共投资在数字乡村建设减排过程中的正向调节机制，为优化财政支农政策与数字技术协同发力提供了实证依据。

表7 调节效应检验结果

Table 7 Results of moderation effect test

变量 Variable	（1）*CE*	（2）*CE*
DVC	−341.480*** （−3.86）	−359.448*** （−3.98）
DVC×*API*		−41.676** （−2.15）
常数项	422.022*** （6.36）	355.666*** （4.75）
控制变量	控制	控制
省份固定效应	控制	控制
时间固定效应	控制	控制
N	360	360
R^2	0.993	0.993

3.5 门槛效应检验

本研究将Bootstrap次数设定为500。门槛效应检验结果显示，数字乡村建设对种植业碳排放单门槛效应在1%的水平上显著，而双门槛效应未通过显著性检验。因此，本研究采用单门槛模型进行分析，得出农业绿色创新水平的门槛值为1 293。

单门槛模型回归结果如表8所示，当农业绿色创新水平低于1 293时，数字乡村建设水平每提升1%，种植业碳排放量平均降低2.07×10^6 t；当农业绿色创新水平在1 293以上时，数字乡村建设的抑制效应增强至2.74×10^6 t。这意味着农业绿色创新水平是调节数字乡村减排效应的关键阈值，当绿色创新能力突破门槛值后，数字技术对种植业碳排放的优化作用显著提升，这可能得益于高创新水平下数字技术与农业绿色生产的深度融合，如低碳技术研发、资源利用效率提升等机制的协同发力。该结果揭示了数字乡村建设减排效应的非线性特征，验证了假说H4，为分阶段制定基于绿色创新能力的差异化数字减排政策提供了理论依据。

表8 单门槛模型回归结果

Table 8 Regression results of single threshold model

变量 Variable	*AGIN*
	CE
DVC	−206.565***
(*AGIN*<1 293)	(−2.81)
DVC	−273.847***
(*AGIN*≥1 293)	(−3.95)
常数项	396.594***
	(5.40)
控制变量	控制
省份固定效应	控制
时间固定效应	控制
N	360
R^2	0.578

4 结论与建议

4.1 结论

(1)数字乡村建设对种植业碳排放具有显著的直接抑制效应。在经过一系列稳健性检验后，该结论依然成立。基准回归结果表明，数字乡村建设水平每提升1%，种植业碳排放量平均降低3.41×10^6 t。这证实了数字技术通过源头减量、过程降耗、流通减损和监管引导等路径，能够系统性地赋能农业绿色低碳转型。

(2)数字乡村建设通过提升农业全要素生产率间接实现碳减排。中介效应检验表明，农业全要素生产率是关键的传导路径。数字技术通过优化要素配置、推动技术和管理创新，显著提升了农业生产效率，进而通过资源节约效应和低碳技术偏向效应，间接导致了种植业碳排放的系统性下降。

(3)农业公共投资发挥了正向调节作用。调节效应模型结果表明，公共投资通过完善数字基础设施、降低技术应用成本、搭建协同治理网络等方式，有效放大了数字乡村建设的减排效能，二者存在良好的政策协同效应。

(4)数字乡村建设的减排效应受到农业绿色创新水平的非线性影响。门槛模型识别出单一门槛值为1 293。当农业绿色创新水平跨越该门槛后，数字乡村建设的边际减排效应显著增强。这揭示了数字技术与绿色创新存在深度耦合效应，只有当绿色创新能力积累到一定阈值后，数字技术的减排潜力才能被充分激发。

4.2 建议

(1)持续推进数字基础设施的均衡布局与融合应用。各级政府应将继续加大对农村地区5G网络、物联网、遥感监测等新型基础设施的投入，优先覆盖国家农业主产区和示范基地。重点推动数字技术在智能灌溉、精准施肥、病虫害监测等关键碳排放环节的深度应用，夯实数字减排的“硬件”基础。

(2)实施以提升全要素生产率为核心的数字化改造工程。政策支持应超越简单的技术补贴，转向对农业生产全过程进行数字化、智能化系统改造。鼓励开发与推广基于大数据和AI的智能决策系统，帮助农户优化投入品使用、降低生产成本，将全要素生产率提升作为实现农业减排降耗的核心途径。

(3)优化公共投资结构，强化其对数字减排的杠杆作用。公共财政支出应更具针对性，从增产导向转向绿色增效导向。建议设立数字绿色农业专项基金，用于补贴农户采用智能农机、节水灌溉设备等低碳数字装备，并投资于政府企业农户数据共享平台建设，最大化公共投资的调节增益。

(4)实施差异化的区域策略，重点突破绿色创新门槛。对于农业绿色创新水平低于门槛值的地区，政策应侧重于“补短板”，通过引进转化先进绿色技术、加强农业绿色科技研发投入来培育本地创新能力。对于创新水平较高的地区，则应侧重于“促融合”，鼓励数字企业与农业科研机构合作，开发数字技术与低碳品种、固碳技术相结合的集成解决方案，充分发挥其跨越门槛后的强化减排效应。

参考文献：

[1] 韩先锋, 勾亚楠, 肖远飞, 等. 数字生态文明建设中制度创新的力量：政策协同赋能的视角[J]. 中国工业经济, 2024(11): 62-80. HAN X F, GOU Y N, XIAO Y F, et al. The power of institutional innovation in the construction of digital ecological civilization: a perspective of policy synergy empowerment[J]. *China Industrial*

Economics, 2024(11): 62-80.

[2] 韩旭东, 刘闯, 刘合光. 农业全链条数字化助推乡村产业转型的理论逻辑与实践路径[J]. 改革, 2023(3): 121-132. HAN X D, LIU C, LIU H G. The theoretical logic and practical path of the digitalization of the whole agricultural chain to promote the transformation of rural industries[J]. *Reform*, 2023(3): 121-132.

[3] RABIYA A, PABLO M, RAFIQ A. The digitization of agricultural industry: a systematic literature review on agriculture 4.0[J]. *Smart Agricultural Technology*, 2022, 2: 100042.

[4] 胡江峰, 黄庆华. 数字乡村建设对农业农村碳减排成本的影响：机理与实证[J]. 中国人口·资源与环境, 2025, 35(2): 78-87. HU J F, HUANG Q H. Impact of digital village construction on carbon abatement costs in agriculture and rural areas: mechanisms and empirical evidence[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2025, 35(2): 78-87.

[5] 黄娜, 倪远之, 张敏, 等. 长三角地区种植业碳排放时空动态格局及减排路径[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(2): 505-517. HUANG N, NI Y Z, ZHANG M, et al. Spatio-temporal dynamic pattern and emission reduction pathways of carbon emissions from the cropland production system in the Yangtze River Delta region[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2025, 42(2): 505-517.

[6] ZITO F, GIANNOCCARO N I, SERIO R, et al. Analysis and development of an IoT system for an agrivoltaics plant[J]. *Technologies*, 2024, 12(7): 106.

[7] LAJOIE-O'MALLEY A, BRONSON K, VAN DER BURG S, et al. The future (s) of digital agriculture and sustainable food systems: an analysis of high-level policy documents[J]. *Ecosystem Services*, 2020, 45: 101183.

[8] MA D, ZHU Q. Innovation in emerging economies: research on the digital economy driving high-quality green development[J]. *Journal of Business Research*, 2022, 145: 801-813.

[9] 丁宝根, 赵玉, 邓俊红. 中国种植业碳排放的测度、脱钩特征及驱动因素研究[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(5): 1-11. DING B G, ZHAO Y, DENG J H. Calculation, decoupling effects and driving factors of carbon emission from planting industry in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(5): 1-11.

[10] 吴昊玥, 何宇, 黄瀚蛟, 等. 中国种植业碳补偿率测算及空间收敛性[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(6): 113-123. WU H Y, HE Y, HUANG H J, et al. Estimation and spatial convergence of carbon compensating rate of planting industry in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(6): 113-123.

[11] 伍国勇, 孙小钧, 于福波, 等. 中国种植业碳生产率空间关联格局及影响因素分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(5): 46-57. WU G Y, SUN X J, YU F B, et al. Spatial correlation pattern and influencing factors of China's crop production carbon productivity[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(5): 46-57.

[12] 吉雪强, 张跃松. 长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络结构及动因[J]. 自然资源学报, 2023, 38(3): 675-693. JI X Q, ZHANG Y S. Spatial correlation network structure and motivation of carbon emission efficiency in planting industry in the Yangtze River Economic Belt[J]. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(3): 675-693.

[13] 李绵德, 周冬梅, 朱小燕, 等. 河西走廊2000—2020年农业碳排放时空特征及其影响因素[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(4): 940-952. LI M D, ZHOU D M, ZHU X Y, et al. Spatial-temporal characteristics of agricultural carbon emissions and influencing factors in the Hexi Corridor from 2000 to 2020[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(4): 940-952.

[14] 徐彩瑶, 钱晨, 孔凡斌. 数字乡村建设能否缩小城乡收入差距：基于农业科技进步中介和门槛效应的实证检验[J]. 农业技术经济, 2024(12): 4-24. XU C Y, QIAN C, KONG F B. Can digital village construction narrow urban-rural income gap: an empirical test based on the mediating and threshold effect of agricultural scientific and technological progress[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2024(12): 4-24.

[15] 杜建军, 章友德, 刘博敏, 等. 数字乡村对农业绿色全要素生产率的影响及其作用机制[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(2): 165-175. DU J J, ZHANG Y D, LIU B M, et al. Impact of digital village construction on agricultural green total factor productivity and its mechanisms[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2023, 33(2): 165-175.

[16] LIU B, ZHAN J, ZHANG A X. Empowering rural human settlement: digital economy's path to progress[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 427: 139243.

[17] 谢帮生, 陈鎏鹏, 周子渭. 数字乡村建设能助力乡村包容性绿色增长吗？基于双重机器学习的因果推断[J]. 中国人口·资源与环境, 2024, 34(12): 167-179. XIE B S, CHEN N P, ZHOU Z W. Can digital rural construction help promote inclusive and green growth in rural areas: causal inference based on dual machine learning[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2024, 34(12): 167-179.

[18] 朱红根, 陈晖. 中国数字乡村发展的水平测度、时空演变及推进路径[J]. 农业经济问题, 2023(3): 21-33. ZHU H G, CHEN H. Measurement, spatial-temporal evolution and promotion path of digital village development in China[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2023(3): 21-33.

[19] 朱秋博, 白军飞, 彭超, 等. 信息化提升了农业生产率吗[J]. 中国农村经济, 2019(4): 22-40. ZHU Q B, BAI J F, PENG C, et al. Do information communication technologies improve agricultural productivity[J]. *Chinese Rural Economy*, 2019(4): 22-40.

[20] 田秀娟, 李睿. 数字技术赋能实体经济转型发展：基于熊彼特内生增长理论的分析框架[J]. 管理世界, 2022, 38(5): 56-73. TIAN X J, LI R. Digital technology empowers the transformation and development of real economy: an analysis framework based on Schumpeter's endogenous growth theory[J]. *Journal of Management World*, 2022, 38(5): 56-73.

[21] HE Z M, CHEN M L, GU D M. How digital village construction affects to the effectiveness of rural governance: research on the NCA and QCA methods[J]. *Cities*, 2025, 156: 105514.

[22] WANG L, CHEN Y Y, RAMSEY T S, et al. Will researching digital

technology really empower green development[J]. *Technology in Society*, 2021, 66: 101638.

[23] SHI P H, HUANG Q H. Alignment of words and actions government environmental attention and enterprise digital transformation[J]. *Technological Forecasting & Social Change*, 2025, 210: 123888.

[24] 龚勤林, 乔涛, 冷玉婷. 数字经济与农业全要素生产率: 技术进步和要素流动的视角[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2025(2): 15-27. GONG Q L, QIAO T, LENG Y T. Digital economy and agricultural total factor productivity: from the perspective of technological progress and factor flow[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*(*Social Sciences Edition*), 2025(2): 15-27.

[25] 徐旭初, 杨威, 吴彬. 乡村数字经济赋能农业全要素生产率提升的多元路径: 基于浙江省县级数据的组态分析[J]. 中国农村经济, 2024(10): 84-103. XU X C, YANG W, WU B. Multiple pathways for rural digital economy empowering agricultural total factor productivity: a configuration analysis based on county-level data from Zhejiang Province[J]. *Chinese Rural Economy*, 2024(10): 84-103.

[26] 张广胜, 王珊珊. 中国农业碳排放的结构、效率及其决定机制[J]. 农业经济问题, 2014, 35(7): 18-26. ZHANG G S, WANG S S. China′s agricultural carbon emission: structure, efficiency and its determinants[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2014, 35(7): 18-26.

[27] 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. TIAN Y, YIN M H. Re-evaluation of China′s agricultural carbon emissions: basic status, dynamic evolution and spatial spillover effects[J]. *Chinese Rural Economy*, 2022(3): 104-127.

[28] 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. The influence and mechanism of digital economy on agricultural carbon emission[J]. *Reform*, 2024(9): 84-99.

[29] 徐俊武, 王茹雪. 数字普惠金融对农业绿色经济效率的影响研究: 基于有调节的中介效应模型[J]. 华中科技大学学报(社会科学版), 2025, 39(2): 130-140. XU J W, WANG R X. Impact of digital inclusion financial on the efficiency of agricultural green economy: based on a moderated intermediary effect model[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology* (*Social Science Edition*), 2025, 39(2): 130-140.

[30] 张岳, 张博, 周应恒. 数字乡村建设对农民收入的影响: 基于收入水平与收入结构的视角[J]. 农林经济管理学报, 2023, 22(3): 350-358. ZHANG Y, ZHANG B, ZHOU Y H. Impact of digital village construction on farmers′ income: based on the perspective of income level and income structure[J]. *Journal of Agro-Forestry Economics and Management*, 2023, 22(3): 350-358.

[31] 刘桉志, 杨树果. 乡村数字化对农业绿色低碳发展的影响: 基于耦合协调度和中介效应模型的实证[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(5): 1211-1219. LIU A Z, YANG S G. Impact of rural digitization on agricultural green and low-carbon development: empirical evidence based on coupled coordination degree and mediation effect models[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, 41(5): 1211-1219.

[32] 刘继为, 姜安隆. “双碳”目标下河北省农业生态效率时空演进特征及影响因素[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(3): 792-803. LIU J W, JIANG A L. Characteristics of spatial and temporal evolution of agriculture eco-efficiency and the influencing factors in Hebei Province under the goal of “carbon peaking and carbon neutrality” [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2025, 42(3): 792-803.

[33] 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 Y, CAI Y R, ZHANG H J. 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.

[34] 尹上岗, 杨山, 李在军. 长三角地区生态城镇化空间格局及影响因素[J]. 自然资源学报, 2022, 37(6): 1494-1506. YIN S G, YANG S, LI Z J. Spatial pattern and influencing factors of ecological urbanization in the Yangtze River Delta[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(6): 1494-1506.