

数字乡村建设对农业碳排放的影响和空间效应研究

何奇苾¹, 李折周^{2*}

(1. 延安大学乡村发展研究院, 陕西 延安 716000; 2. 福州外语外贸学院国际商学院, 福州 350202)

摘要: 数字乡村建设是我国农业绿色低碳发展的关键驱动因子。本研究以中国2011-2021年31个省份(除港澳台)数据为研究样本, 融合静态面板回归与动态空间计量方法, 系统考察数字乡村建设对农业碳排放的直接影响、中介路径、非线性影响机制及空间效应等。结果表明: (1) 推动数字乡村建设可有效抑制农业碳排放, 其中农业技术进步是关键。(2) 不同地理区域内, 数字乡村建设对农业碳排放的影响呈非均衡性分布特征。“胡焕庸线”以东、非粮食主产区数字乡村建设的碳减排效应更显著。(3) 数字乡村建设对农业碳排放的影响存在农业产业集聚门槛, 呈负向非线性特征。(4) 数字乡村建设在降低农业碳排放方面存在空间溢出效应, 且间接效应大于直接效应。因此, 应大力推进数字乡村建设, 以现代信息技术赋能农业绿色生产, 助力农业碳减排高效发展。

关键词: 数字乡村建设; 农业碳排放; 农业产业集聚; 空间溢出效应

中图分类号: F323

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2025)04-0091-11

Impact and Spatial Effects of Digital Rural Construction on Agricultural Carbon Emissions

HE Qicong¹, LI Zhezhou^{2*}

(1. Rural Development Institute, Yan'an University, Yan'an 716000; 2. International Business School, Fuzhou University of International Studies and Trade, Fuzhou 350202, China)

Abstract: Digital rural construction is a key driver for green and low-carbon agricultural development in China. Using data from 31 provinces (excluding Hong Kong, Macao, and Taiwan) in China from 2011 to 2021 as a research sample, this paper integrates static panel regression and dynamic spatial econometrics to systematically investigate the direct impacts, mediating paths, non-linear threshold mechanisms, and spatial spillover effects of digital rural construction on agricultural carbon emissions. Statistical analyses confirm that: (1) Advancing digital rural development can effectively reduce carbon emissions from agricultural activities, with technological advances in agriculture as a key mechanism. (2) Regional disparities exist in how digital rural initiatives affect farming-related carbon emissions. The carbon emission reduction effect of digital rural construction is more significant in the areas east of the 'Hu Huanyong Line' and in non-major grain-producing areas. (3) Dual agricultural industry agglomeration threshold exists in digital rural construction, with negative non-linear characteristics. (4) Digital rural construction has spatial spillover effects in reducing agricultural carbon emissions, and the indirect effect is greater than the direct effect. Therefore, the construction of digital village should be vigorously promoted, and modern information technology should be used to empower green agricultural production and help the efficient development of agricultural carbon emission reduction.

Key words: Digital rural construction; Agricultural carbon emission; Agricultural industry agglomeration; Spatial spillover effect

收稿日期: 2025-05-11

基金项目: 国家社会科学基金项目(21BRK033); 福建省自然科学基金项目(2023J05219); 福建省社会科学基金项目(FJ2022BF076)

作者简介: 何奇苾(2002-), 女, 在读硕士, 从事农业经济研究。

通信作者: 李折周, E-mail: lizhezhou@fzfu.edu.cn

农业农村绿色低碳发展是全面推进乡村振兴、实现农业农村现代化的关键抓手。2025年中央一号文件对推进我国“三农”工作进行系统部署,明确提出要发挥农业科技协同作用,打好农业农村污染治理攻坚战。目前农业碳排放占我国碳排放总量的14%左右,成为温室气体排放的主要来源之一^[1]。农业生产碎片化、农用化学品施用过度化以及农业产业链狭窄化是我国农业碳排放的主要诱因。因此,改变传统资源消耗型农业生产方式刻不容缓,寻求农业发展新动能是推动我国农业智慧化、低碳化发展的重要引擎。

随着数字革命浪潮席卷我国“三农领域”,党和国家高度重视数字经济对农业农村高质量发展的变革作用^[2]。以数字经济发展为依托的数字乡村建设,不仅是实现农业战略强国的必由之路,也是实现农业固碳减排的根本依托。一方面,物联网、云平台等数字信息技术在智慧育种、设施智能化调控等多个环节赋能农业精细化管理,减少农业风险的同时促进绿色农业高效发展。另一方面,数字农业基础设施的渗透下沉提高了新兴农业生产方式的边际贡献率,减少了农业污染治理成本,为降低农业碳排放提供了技术支撑。那么,在数字技术赋能农业现代化发展的背景下,数字乡村建设能否显著降低农业碳排放?其作用轨迹是什么?是否存在空间溢出效应?研究以上问题有助于多维度厘清数字乡村建设对农业碳排放的影响机理,为区域协同减排提供理论依据。

1 文献综述与理论机制

1.1 文献综述

目前对于数字乡村建设与农业碳减排的关系研究尚不充分,主要探讨了数字经济^[3]、数字普惠金融^[4]等因素对农业碳排放的影响,农业数字化转型能有效促进农业碳减排已成为共识。作为建设数字中国的重要内容,数字乡村建设通过推动农业规模经营^[5]、促进农业科技进步^[6]等降低农业碳排放。并且考虑到数字技术的外部性和共享性,数字乡村建设可以发挥空间溢出效应带动周围地区农业碳减排协同发展^[7]。综合来看,前人研究成果为本研究奠定了方法论基础与理论支撑,但仍存在一定的深化空间。第一,目前鲜有文献探讨数字乡村建设对农业碳排放的非线性影响机制。第二,缺乏从时空演变角度探究数字乡村建设和农业碳排放的关联性。

因此,本研究创新性地将农业产业集聚作为

门槛变量纳入分析框架,深入探讨数字乡村建设的农业碳减排效应在不同农业产业集聚水平下的非线性特征,基于空间杜宾模型揭示数字乡村建设对农业碳排放的空间溢出效应与协同减排作用,以期丰富现有研究维度,为农业碳减排差异化政策的制定提供一定的计量支撑。

1.2 理论分析与研究假设

1.2.1 数字乡村建设对农业碳排放的直接效应

数字乡村建设经由多维传导机制对农业碳足迹产生显著影响。首先,乡村数字基础设施建设以现代信息技术为载体,基于互联网、大数据分析,农民可以借助智能灌溉、无人化农机等农业智能装备体系提高农业生产效率,减少农用化学品造成的农业碳排放^[8]。其次,乡村数字经济建设以数字技术赋能农村经济提质增效,农村电商平台为解决传统农产品流通中存在的损耗大、信息不对称等问题提供技术支持,精准对接市场,减少流通环节造成的农业碳排放^[9];农村数字普惠金融的普及为农业绿色生产和清洁能源项目提供了信贷支持,推动了农业绿色低碳项目的落地。最后,乡村数字服务建设将现代信息技术与乡村治理有机结合,通过培育基层干部数字技能提高乡村治理效率。对乡村废弃物循环利用的数字化监管可显著提高村民的环保意识,有效改善农村人居环境,全方位助力农业碳减排。基于上述理论探讨,提出假设H₁:数字乡村建设能够显著降低农业碳排放。

1.2.2 数字乡村建设对农业碳排放的间接效应

数字乡村建设以数据要素驱动技术革命,推动低碳农业高质量发展。智慧农业技术的突破培育了农业向智能化、低碳化方向发展的新动能^[10]。一方面,智慧种植与智能养殖技术依托数据信息要素建立低碳高效的循环模式,精准调控减少碳足迹;此外,算法驱动下种植业的布局调整在考虑自然资源和市场需求的因素下,优化各类农作物的种植布局,实现生态效应和经济效益共赢。另一方面,数字乡村建设通过搭建农业科技成果转化与推广平台,旨在激发涉农企业和农户的低碳意识,改善传统的高能耗生产方式,推动低碳农业纵深发展。基于上述理论探讨,提出假设H₂:数字乡村建设通过农业技术进步助力农业碳减排。

1.2.3 农业产业集聚在数字乡村建设降低农业碳排放中的门槛效应

农业产业集聚是指通过优化调整农业生产活

动的空间布局,实现专业化分工和规模化生产,提高农业生产要素配置效率^[11]。数字乡村建设通过农业数据要素的跨区域流通打造农业产业循环体系,进而促进农业产业集聚新格局的形成。但是,在农业产业集聚水平较低时,薄弱的农业基础设施和碎片化的农业生产模式可能面临农业生产效率低下和资源无效利用等困境。当农业产业集聚达到一定水平后,专业化分工可减少生产过程中对重复性碳源的使用,促进农用物资等生产要素投入合理化,降低农业碳排放。基于上述理论探讨,提出假设 H₃:数字乡村建设对农业碳排放的影响存在农业产业集聚门槛。

1.2.4 数字乡村建设对农业碳排放的空间溢出效应

数字乡村建设通过发挥空间溢出效应,利用数据要素的强渗透性和高传播性突破时空限制,促进跨地域交流与合作^[12]。一方面,数字乡村建设通过打造智慧农业示范项目形成可复制性的高效低碳管理模式,使毗邻地区通过观摩学习、技术培训等方式吸收先进经验。另一方面,数字乡村建设通过建立数字技术服务平台,以技术扩散、人才交流等路径推动建立区域间协同减排机制,降低异地农户低碳技术探索成本,推动形成绿色低碳协同发展新格局^[13]。基于上述理论探讨,提出假设 H₄:数字乡村建设不仅可以显著降低当地农业碳排放,而且通过空间溢出效应促进还能邻近地区的农业低碳化发展。

2 研究设计

2.1 基准回归模型

为全面深入探讨数字乡村建设对农业碳排放的效应,构建双向固定效应模型如下:

$$\ln AC_{it} = a_0 + a_1 Digit_{it} + a_2 Control_{it} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_i \quad \dots\dots (1)$$

式中,*i*表示省份、自治区、直辖市;*t*表示年份;*a*₀为截距项,*a*₁和*a*₂为核心解释变量和控制变量的系数;*lnAC*_{*it*}为农业碳排放;*Digit*_{*it*}为数字乡村建设;*Control*_{*it*}为一系列控制变量;*μ*_{*i*}表示个体固定效应,*γ*_{*t*}表示时间固定效应,*ε*_{*i*}为随机扰动项。

2.2 中介效应模型

为厘清数字乡村建设对农业碳排放的内在传导机制,借鉴江艇^[14]的两步法,构建中介效应模型如下:

$$MED_{it} = \beta_0 + \beta_1 Digit_{it} + \beta_2 Control_{it} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_i \quad \dots\dots (2)$$

式中,*MED*_{*it*}为中介变量,以农业技术进步表示;*β*₀为截距项,*β*₁和*β*₂为各变量系数,其他变量含义不变。

2.3 门槛效应模型

为研究数字乡村建设和农业碳排放之间是否存在非线性关系,构建门槛效应模型如下:

$$\begin{aligned} \ln AC_{it} = & \tau_0 + \tau_1 Digit_{it} \times I(Gather_{it} \leq h_1) + \\ & \tau_2 Digit_{it} \times (h_1 < Gather_{it} \leq h_2) + L + \\ & \tau_n Gather_{it} \times I(h_{n-1} < Gather_{it} \leq h_n) + \\ & \tau_n + 1 Digit_{it} \times I(Gather_{it} > h_n) + \\ & \varphi Control_{it} + \varepsilon_i \end{aligned} \quad \dots\dots (3)$$

式中,*Gather*_{*it*}为门槛变量,以农业产业集聚表示;*h*_{*i*}为门槛值,*I*(*)为示性函数,*τ*_{*i*}和*φ*为待估系数。

2.4 空间杜宾模型

为考察数字乡村建设对农业碳排放的空间溢出效应,构建空间杜宾模型为:

$$\begin{aligned} \ln AC_{it} = & \lambda_1 + \lambda_2 Digit_{it} + \lambda_3 Control_{it} + \\ & \rho_1 W_{ij} \ln AC_{it} + \rho_2 \sum_{i=1}^n W_{ij} Digit_{it} + \dots\dots (4) \\ & \rho_3 \sum_{i=1}^n W_{ij} Control_{it} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_i \end{aligned}$$

式中,*ρ*₁表示空间自相关系数;*ρ*₂和*ρ*₃为待估参数;*W*_{*ij*}表示空间权重矩阵,*μ*_{*i*}和*γ*_{*t*}表示个体和时间的固定效应。

2.5 变量选取

2.5.1 核心被解释变量:农业碳排放

参考李波等^[15]的研究,采用IPCC碳排放系数法衡量农业生产过程中的碳排放总量,具体公式如下:

$$AC = \sum AC_i = \sum T_i \times \delta_i \quad \dots\dots (5)$$

式中,*AC*为农业碳排放总量,*AC*_{*i*}表示第*i*种农业碳源的碳排放量,*T*_{*i*}和*δ*_{*i*}分别表示第*i*种碳源投入量及其对应的碳排放系数。各类农业碳源和碳排放系数如表1所示。同时,为验证研究结果的可靠性,选用农业碳排放强度作为因变量的替换变量进行稳健性检验。结合李宽等^[16]的研究,农业碳排放强度(*ACI*)以农业碳排放总量与农业总产值之比衡量。

2.5.2 核心解释变量:数字乡村建设

本研究在遵循指标体系构建的科学性和数据可获得性的基础上,参考《中国数字乡村发展报告(2022年)》,并结合已有研究^[18-21],从乡村数字基础设施建设、乡村数字经济建设以及乡村数字

表1 农业碳排放碳源、系数及参考来源

Table 1 Agricultural carbon emissions sources, coefficients, and reference sources

碳源 Carbon source	碳排放系数 Carbon emission coefficient	参考来源 Reference source
农膜	5.180 kg/kg	南京农业大学农业资源与生态环境研究所
灌溉	266.480 kg/hm ²	DUBEY ^[17]
化肥	0.896 kg/kg	美国橡树岭国家实验室
柴油	0.593 kg/kg	IPCC联合国气候变化政府间专家委员会
农药	4.934 kg/kg	美国橡树岭国家实验室
翻耕	312.600 kg/km ²	中国农业大学生物与技术学院

表2 数字乡村建设评价指标体系及参考来源

Table 2 Evaluation indicator system for digital rural development and reference sources

维度 Dimension	系统层 System layer	指标层 Indicator layer	权重 Weight	参考来源 Reference source
数字乡村建设	乡村数字基础设施建设	乡村居民家庭平均每百户计算机拥有量	0.037	韩海彬等 ^[12]
		乡村居民家庭平均每百户移动电话拥有量	0.024	杨雪等 ^[5]
		乡村互联网宽带接入用户数量	0.099	杨雪等 ^[5]
		乡村农业气象观测站点数	0.039	韩海彬等 ^[12]
	乡村数字经济建设	农业农村电子商务销售额	0.133	李媛等 ^[18]
		各省份淘宝村数量	0.342	张世斌等 ^[19]
		农村数字普惠金融指数	0.036	朱红根等 ^[20]
	乡村数字服务建设	乡村数字信息技术就业人数	0.104	杨雪等 ^[5]
		农村专利申请授权量	0.137	李媛等 ^[18]
		乡村投递路线里程	0.048	杨雪等 ^[5]

2.5.5 门槛变量:农业产业集聚

借鉴杨秀玉等^[11]的研究方法,采用区位熵进行测算,即用各省(市、区)的农业总产值与全国农业总产值之比除以各省(市、区)的生产总值与全国生产总值之比衡量农业产业集聚(*Gather*)。

2.6 数据来源与描述性统计

本研究以我国2011–2021年31个省份(除港澳台)作为研究样本,原始数据均来自于国家统计局、各省份统计年鉴、农业农村部编制的《中国农村统计年鉴》和《中国农业统计年鉴》、北京大学数字普惠金融指数等。利用stata17对缺失值进行线性插值法填充。为提高研究的精确度和可信度,对所有变量进行双侧1%分位缩尾处理,并对

服务建设3个系统构建数字乡村建设评价指标体系,并采用熵值法测算,相关结果见表2。

2.5.3 控制变量

为避免遗漏变量造成模型产生估计偏差的问题,选取城镇化率(*City*)、种植结构(*lnCult*)、农田灌溉水平(*lnEnre*)、交通基础设施水平(*lnRoad*)以及农业受灾程度(*lnAd*)作为控制变量。其中,城镇化率以城镇人口数量与总人口数之比表示;种植结构以粮食作物播种面积与农作物总播种面积之比衡量;农田灌溉水平以有效灌溉面积与农作物总播种面积之比表征;交通基础设施水平以人均农村公路里程表示;农业受灾程度以农作物受灾面积占农作物总播种面积的比重进行衡量。

2.5.4 中介变量:农业技术进步

考虑到农业机械的研发和应用是先进技术提高农业生产效率的直接表现,借鉴陈国生等^[21]的方法,以农业机耕面积表征农业技术进步(*lnTec*)。

部分变量取对数。主要变量的描述性统计见表3。

3 结果与分析

3.1 基准回归分析

表4采用双向固定效应模型检验数字乡村建设对农业碳排放的影响。列(1)仅表明核心解释变量对农业碳排放的影响,估计系数在1%的水平上显著为负。列(2)为加入控制变量后的回归结果,估计系数符号和显著性均不变,即数字乡村建设可显著抑制农业碳排放增长,假设H₁成立。进一步从控制变量的回归结果来看,城镇化率、种植结构和农业受灾程度对农业碳排放有显著的正向影响,符合预期。高碳排放农作物的种

表3 变量描述性统计
Table 3 Descriptive statistics of variables

类型 Type	名称 Name	符号 Symbol	样本量 Sample size	均值 Mean value	标准差 Standard deviation	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value
被解释变量	农业碳排放总量	lnAC	341	5.373	1.124	2.682	6.887
	农业碳排放强度	ACI	341	0.192	0.064	0.043	0.399
解释变量	数字乡村建设	Digit	341	0.145	0.107	0.021	0.767
控制变量	城镇化率	City	341	0.586	0.131	0.228	0.896
	种植结构	lnCult	341	2.865	0.356	2.143	4.340
	农田灌溉水平	lnEnre	341	7.228	1.077	4.694	8.805
	交通基础设施水平	lnRoad	341	11.681	0.840	9.400	12.896
中介变量	农业受灾程度	lnAd	341	5.806	1.646	0.470	8.348
	农业技术进步	lnTec	341	7.696	1.359	2.382	9.586
门槛变量	农业产业集聚	Gather	341	1.235	0.763	0.042	4.233

表4 基准回归结果

Table 4 Benchmark regression results

变量 Variable	(1)	(2)
	lnAC	lnAC
Digit	-0.219*** (0.035)	-0.155*** (0.029)
City		2.415*** (0.249)
lnCult		0.060*** (0.015)
lnEnre		-0.143*** (0.044)
lnRoad		0.095 (0.058)
lnAd		0.010* (0.006)
_cons	2.539*** (0.078)	-0.422 (0.545)
时间效应/个体效应	Yes	Yes
N	341	341
Overall R ² /Adj.R ²	0.996	0.997

注:括号内为稳健标准误,“*”表示 $P<0.1$,”**”表示 $P<0.05$,”***”表示 $P<0.01$,下同。

Note: Robust standard errors are indicated in parentheses, *indicates $P<0.1$, **indicates $P<0.05$, ***indicates $P<0.01$, the same below.

植产生的大量甲烷、农村劳动力减少和农业灾后恢复对于农业化学用品以及农机作业的高度需求会显著增加农业碳排放。农田灌溉水平的估计系数在1%的水平上显著为负,可能是因为低碳电

力驱动灌溉设备逐渐取代传统高能耗的灌溉方式,提高水资源利用效率的同时也减少了农业碳排放。

3.2 内生性检验

考虑到模型中可能存在反向因果等内生性问题,参考赵涛等^[18]的研究,将上一年全国互联网用户数量分别与1984年各省份每百人固定电话数构造交互项后取对数(lnTool),以此作为各省份数字乡村建设的工具变量,采取两阶段最小二乘法(2SLS)进行回归,结果见表5。数字乡村建设的

表5 内生性检验
Table 5 Endogeneity test

变量 Variable	工具变量法 Instrumental variable method	
	(1)第一阶段 The first stage	(2)第二阶段 The second stage
	Digit	lnAC
lnTool	0.570*** (0.102)	
Digit		-0.279*** (0.095)
控制变量/时间固定/个体效应	Yes	Yes
N	341	341
Kleibergen-Paap rk LM	7.123[0.008]	
Cragg-Donald Wald F	354.645[16.38]	
Kleibergen-Paap rk Wald F	31.256[16.38]	

注: {} 中为P值; [] 中为 Stock-Yogo 弱工具变量检验10%水平上的临界值。

Note: P values are indicated in {}; critical values at the 10% level for the Stock-Yogo weak instrumental variable test are indicated in [].

估计系数仍在1%的水平下显著为负,在不可识别检验中, LM 统计量的 P 值为0.008,排除工具变量不可识别的问题;在弱工具变量检验中,两种 F 值均大于 $Stock-Yogo$ 在10%上的临界值,拒绝弱工具变量的原假设,所选变量较为合理,本模型不存在内生性问题。

3.3 稳健性检验

为增强回归结果的可靠性,采用以下方法进行稳健性检验:(1)为减少变量选择的主观影响,

将核心被解释变量替换为农业碳排放强度后进行回归;(2)考虑到政策影响的时滞性,对农业碳排放进行滞后一期处理;(3)由于我国直辖市在经济总量、科技发展水平等方面具有先天优势^[14],可能影响研究结果,因此在样本中剔除北京、天津、上海和重庆4个直辖市后再次进行回归,结果见表6。回归系数均在1%的水平下显著为负,表明基准回归结果具有显著的稳健性,进一步验证了假设 H_1 。

表6 稳健性检验
Table 6 Robustness test

变量 Variable	稳健性检验 Robustness test		
	(1)替换核心被解释变量 Replace the core explained variable	(2)滞后一期因变量 Lagged dependent variable	(3)剔除直辖市 Excluding municipalities directly under the central government
	ACI	$\ln AC$	$\ln AC$
$Digit$	-0.024*** (0.009)	-0.113*** (0.032)	-0.135*** (0.025)
控制变量	Yes	Yes	Yes
时间效应	Yes	Yes	Yes
个体效应	Yes	Yes	Yes
N	341	310	297
$Adj.R^2$	0.917	0.998	0.998

3.4 中介效应

为探究数字乡村建设抑制农业碳排放的作用机制,加入中介变量农业技术进步后进行回归,结果见表7。无论是否加入控制变量,农业技术进步的估计系数均在1%的水平下显著为正,表明数字乡村建设可通过推动农业技术进步有效降低农业碳排放,假设 H_2 成立。在农业生产方面,智慧农业的普及推动农业生产向智能化、低碳化

方向转型,数据信息赋能精细化管理提高了农物资利用率,最终降低农业碳排放。在农产品流通方面,数字化平台的建设有利于提高农业信息传递效率,帮助农民准确了解农产品市场需求,科学确定农业生产要素的供给,减少对于生产流通中不必要环节的投入,实现农业碳减排。

3.5 异质性分析

3.5.1 地理区位异质性

以“胡焕庸线”为界,将全国划分为东部和西部两类地区,检验数字乡村建设对农业碳排放的影响是否存在区域差异,回归结果见表8列(1)和列(2)。通过组间系数差异性检验,表明存在显著的区域差异。结合系数值和显著性水平来看,数字乡村建设对“胡焕庸线”以东地区农业碳排放的抑制作用更显著。东部地区经济发达,农业现代化水平较高,土地流转机制完善,数字技术在农业集约化应用中更易推广,因此数字乡村建设的降碳效应较强。而西部地区数字基础设施覆盖率远低于东部,智慧农业技术渗透率低。小规模农户因技术应用成本高、数字技能不足等原因

表7 中介效应检验
Table 7 Mediating effect test

变量 Variable	(1)	(2)
	$\ln Tec$	$\ln Tec$
$Digit$	0.742*** (0.137)	0.238*** (0.087)
控制变量	No	Yes
时间效应	Yes	Yes
个体效应	Yes	Yes
N	341	341
$Adj.R^2$	0.052	0.984

难以普及先进农业技术,从而限制了数字乡村建设对农业碳减排的助力作用。

3.5.2 农业生产功能异质性

根据2003年财政部的划分标准,将研究样本划分为粮食主产区和非粮食主产区进行异质性分析,以期在各区域内实现农业资源的合理有效配置和农业生产的升级优化,结果见表8列(3)和列(4),同样通过组间系数差异性检验。其中,非粮

食主产区数字乡村建设的回归系数在1%的水平下显著为负,但在粮食主产区抑制作用并不明显。这可能是由于粮食主产区生产结构刚性较强,种植结构调整受限,导致数字化技术应用对于农业降碳的效果较弱。而非粮食主产区在调整种植结构方面具有较大的灵活性,将“以需定产”作为农业生产经营的主要依据,在降低农业碳排放的同时提高了农业经济效益。

表8 异质性分析
Table 8 Heterogeneity analysis

变量 Variable	胡焕庸线 HU Huanyong line		农业生产功能 Agricultural production function	
	(1)东部 East	(2)西部 West	(3)粮食主产区 Major grain-producing areas	(4)非粮食主产区 Non-major grain-producing areas
	lnAC	lnAC	lnAC	lnAC
<i>Digit</i>	-0.132*** (0.040)	-0.248* (0.043)	-0.096 (0.060)	-0.235*** (0.030)
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes
时间效应	Yes	Yes	Yes	Yes
个体效应	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>N</i>	275	66	143	198
<i>Adj.R</i> ²	0.997	0.999	0.980	0.994
组间系数差异 <i>P</i> 值	0.000		0.000	

注:组间系数差异*P*值根据交互项模型的Chow检验估计结果计量得出。

Note: The *P* value for the difference in between-group coefficients was calculated based on the Chow test estimation results of the interaction model.

3.6 门槛效应

为检验数字乡村建设和农业碳排放之间是否存在非线性关系,本研究将农业产业集聚作为门槛变量构建门槛效应模型。如表9和表10所示,

农业产业集聚通过双重门槛检验,第一门槛值为1.445,第二门槛值为1.723,均通过显著性检验,假设H₃成立。

进一步观察门槛模型回归结果发现,当农业产

表9 门槛效应检验结果
Table 9 Threshold effect test results

门槛变量 Threshold variable	模型 Model	<i>F</i> 值 <i>F</i> value	<i>P</i> 值 <i>P</i> value	BS次数 BS frequency	临界值 Critical value		
					10%	5%	1%
					<i>Gather</i>	单一门槛	68.720
	双重门槛	27.450	0.093	300	26.927	32.464	40.811

业集聚水平小于等于1.445时,数字乡村建设的估计系数为-0.068;当其介于1.445和1.723时,数字乡村建设的估计系数为-0.260;当其大于等于1.723时,数字乡村建设的估计系数为-0.693,对农业碳排放的抑制作用明显增强。整体来看,随着农业产业集聚水平的提高,其赋能效果逐渐提高,数字乡村建设

对农业碳减排呈边际贡献递增的非线性特征。

4 拓展研究

4.1 数字乡村建设和农业碳排放空间自相关检验

通过检验核心解释变量与核心被解释变量的全局莫兰指数,可判断是否存在显著的空间相关

表 10 门槛效应回归结果
Table 10 Threshold effect regression results

变量 Variable	lnAC
<i>Digit</i> ($Gather \leq 1.445$)	-0.068*** (0.038)
<i>Digit</i> ($1.445 < Gather < 1.723$)	-0.260*** (0.085)
<i>Digit</i> ($Gather \geq 1.723$)	-0.693*** (0.107)
控制变量/时间效应/个体效应	Yes
<i>N</i>	341
<i>Adj.R</i> ²	0.819

性,结果见表 11。整体来看,数字乡村建设和农业碳排在时空演变视角下呈稳定的空间协同效应。同时,二者的全局莫兰指数随时间推移呈上升的趋势,表明各省份数字乡村建设和农业碳排放的空间集聚能力有所增强。

4.2 空间效应模型检验

结合表 12 中 *LM* 和 *Wald* 检验结果可知,数字乡村建设对农业碳排放的影响具有不可忽略的空间效应,且空间杜宾模型不会转化为空间误差或空间滞后模型。*Hausman* 和 *LR* 检验均显著,选用包含时间和个体的双向固定空间杜宾模型更为合理。

由于空间杜宾模型中的回归系数无法直接反映变量之间的真实关系,本研究采用偏微分方法对空间效应进行分解^[22],相关结果见表 13。数字

表 11 全局莫兰指数
Table 11 Global moran index

年份 Year	数字乡村建设 Digital rural construction			农业碳排放 Agricultural carbon emissions		
	莫兰指数 Moran's I	Z 值 Z value	P 值 P value	莫兰指数 Moran's I	Z 值 Z value	P 值 P value
	2011	0.086	0.992	0.161	0.000	1.051
2012	0.102	1.131	0.129	0.004	1.170	0.121
2013	0.018	0.431	0.333	0.016	1.568	0.058
2014	0.089	1.022	0.153	0.033	2.076	0.019
2015	0.083	0.979	0.164	0.029	1.971	0.024
2016	0.130	1.396	0.081	0.032	2.054	0.020
2017	0.191	2.009	0.022	0.027	1.919	0.028
2018	0.258	2.596	0.005	0.024	1.859	0.032
2019	0.270	2.691	0.004	0.026	1.936	0.026
2020	0.304	2.913	0.002	0.029	2.032	0.021
2021	0.380	3.623	0.000	0.031	2.085	0.019

表 12 相关检验
Table 12 Related tests

相关检验 Related tests	统计值 Statistical value	P 值 P value
<i>LM-error</i>	42.390	0.000
<i>Robust LM-error</i>	9.178	0.002
<i>LM-lag</i>	3.629	0.058
<i>Robust LM-lag</i>	11.595	0.001
<i>Hausman</i>	184.690	0.000
<i>LR-ind/time/both</i>	55.480	0.000
<i>Wald-SAR</i>	24.680	0.000
<i>Wald-SEM</i>	51.270	0.000

续表 12

Table 12 Continue

相关检验	统计值	P值
Related tests	Statistical value	P value
<i>LR - SDM/SAR</i>	24.830	0.000
<i>LR - SDM/SEM</i>	48.370	0.000

注:SDM为空间杜宾模型;SAR为空间滞后模型;SEM为空间误差模型。

Note: SDM indicate Spatial Durbin Model; SAR indicate Spatial Autoregressive Model; SEM indicate Spatial Error Model.

表 13 双向固定空间杜宾模型结果分解

Table 13 Results of the two-way fixed-space Durbin model decomposition

变量	直接效应	间接效应	总效应
Variable	Direct effect	Indirect effect	Total effect
<i>Digit</i>	-0.082*** (0.030)	-0.192*** (0.062)	-0.274*** (0.070)
<i>City</i>	1.783*** (0.226)	0.679 (0.641)	2.462*** (0.688)
<i>lnCult</i>	0.062*** (0.012)	0.102** (0.041)	0.164*** (0.044)
<i>lnEnre</i>	-0.068* (0.040)	-0.041 (0.110)	-0.109 (0.130)
<i>lnRoad</i>	0.164*** (0.055)	0.799*** (0.225)	0.963*** (0.261)
<i>lnAd</i>	0.007 (0.005)	0.013 (0.015)	0.019 (0.017)
<i>rho</i>		0.369*** (0.065)	

乡村建设对农业碳排放的直接、间接和总效应均在1%的水平上显著为负。即数字乡村建设可显著降低属地和邻近地区的农业碳排放,假设 H_4 得到验证。其中,间接效应大于直接效应,表明发达地区通过发挥数字乡村建设的带头示范作用,将成熟的农业生产经验和现代化的产业模式外溢至邻近欠发达地区,降低其探索农业数字技术的成本,提高先进成果转化率,促进欠发达地区农业绿色化转型,最终降低农业碳排放。

5 结论与建议

5.1 结论

本研究系统考察数字乡村建设对农业碳排放的作用路径及影响机理,得出主要结论如下:(1)数字乡村建设能够显著降低农业碳排放,是我国农业绿色低碳发展的中坚力量。(2)经机制检验发现,数字乡村建设通过促进农业技术进步有效

抑制农业碳排放。(3)数字乡村建设对“胡焕庸线”以东、非粮食主产区的农业碳减排效应更显著。(4)数字乡村建设对农业碳排放的影响存在农业产业集聚门槛。随着农业产业集聚水平的提升,数字乡村建设对农业碳排放的抑制作用呈边际递增的特征。(5)数字乡村建设不仅降低本区域农业生产活动的碳排放,并通过技术扩散效应和要素流动机制对邻近地区产生协同减排作用。

5.2 政策建议

根据上述结论,提出以下建议:

(1)夯实数字乡村建设,推动数字技术赋能绿色农业低碳高效发展。加快推进农业数字信息基础设施全覆盖进程,为农村农业发展变革提供物质基础。引入先进农业数字技术对粮食主产区进行遥感监测和智能管理,实现精准施肥、有效灌溉。结合人工智能和大数据分析完善农业数字化监测预警系统,减少灾害导致的资源浪费和要素

重复投入,助力农业减排固碳高质量发展。

(2)明确农业产业集聚空间规划,推动农业全产业链条清洁生产。一方面,政府主导布局农业产业集聚区,加强农业企业、科研机构和农户间的交流合作,促进新技术、新设备的推广应用,凝聚农业碳减排合力。另一方面,建立一体化农业生产管理体系,发挥规模经济效应,提高农业专业化分工水平,降低单位产出的资源消耗。通过集成生态耕作模式与节能减排技术、强化农业废弃物的多级资源化利用,推动农田生态网络的协调可持续发展。

(3)促进数据信息要素实现跨地域交流共享,推动区域间数字化农业协同发展。建设农业数字化信息移动服务平台,基于信息流发挥数字乡村建设的示范效应和溢出效应,发达地区通过智慧农业技术推广和知识扩散降低自身和邻近地区农业碳排放,促进跨区域协作共享,缩小地区农业发展水平差异,形成空间联合降碳减排新格局。

参考文献:

- [1] 闫坤,唐丹彤,甘天琦.中国农业减污降碳协同效应的量化评估与动态演化——基于边际减排成本的分析[J].中国农村经济,2024(9):22-41.
YAN K, TANG D T, GAN T Q. Quantitative evaluation and dynamic evolution of the synergistic effect of agricultural pollution and carbon reduction in China: An analysis based on marginal abatement cost[J]. Chinese Rural Economy, 2024(9): 22-41. (in Chinese)
- [2] 王胜,余娜,付锐.数字乡村建设:作用机理、现实挑战与实施策略[J].改革,2021(4):45-59.
WANG S, YU N, FU R. Digital rural construction: action mechanism, realistic challenge and implementation strategy[J]. Reform, 2021(4): 45-59. (in Chinese)
- [3] 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. Study 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. (in Chinese)
- [4] 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.
GAO G S, WANG Q Z, ZHI H B. Impact of digital financial inclusion on agricultural carbon emission intensity[J]. On Economic Problems, 2024(1): 57-65. (in Chinese)
- [5] 杨雪,王永平,王静.数字乡村发展对农业碳排放强度的影响效应及作用机制检验[J].统计与决策,2023,39(11):66-71.
YANG X, WANG Y P, WANG J. The impact effect of digital rural development on agricultural carbon emission intensity and its mechanism[J]. Statistics&Decision, 2023, 39(11): 66-71. (in Chinese)
- [6] 卢奕亨,尹恣昊,田云,等.农村产业融合对农业碳排放的非线性影响机制[J].华东经济管理,2025,39(2):48-59.
LU Y H, YIN M H, TIAN Y, et al. Nonlinear impact mechanism of rural industrial integration on agricultural carbon emissions[J]. East China Economic Management, 2025, 39(2): 48-59. (in Chinese)
- [7] 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, and high-quality economic development: Empirical evidence from urban China[J]. Journal of Management World, 2020, 36(10): 65-76. (in Chinese)
- [8] 冯伟.智慧农业中的无人机在农药喷洒中的应用研究[J].东北农业科学,2024,49(6):59-64.
FENG W. Application of UAV in pesticide spraying within smart agriculture[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2024, 49(6): 59-64. (in Chinese)
- [9] 徐晓鹏,刘慢慢.社交电商中多元信息源信任对消费者绿色农产品购买行为的影响[J].中国流通经济,2025,39(8):34-49.
XU X P, LIU M M. The impact of trust in multiple information sources on consumers' green agricultural products purchase behavior in social e-commerce[J]. China Business and Market, 2025, 39(8): 34-49. (in Chinese)
- [10] 张硕,刘惠明.新质生产力赋能农业污染防治困境与路径探析[J].东北农业科学,2025,50(2):100-105.
ZHANG S, LIU H M. Study on the problem and path of agricultural environmental pollution control empowered by new quality productivity[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2025, 50(2): 100-105. (in Chinese)
- [11] 杨秀玉,乔翠霞.农业产业集聚对农业碳生产率的空间溢出效应——基于财政分权的调节作用[J].中国人口·资源与环境,2023,33(2):92-101.
YANG X Y, QIAO C X. Spatial spillover effects of agricultural industry agglomeration on agricultural carbon productivity: Based on the regulatory role of fiscal decentralization[J]. China Population, Resources and Environment, 2023, 33(2): 92-101. (in Chinese)
- [12] 韩海彬,龚亚双.数字乡村建设对农业碳排放的空间溢出效应[J].农业工程学报,2025,41(1):298-307.
HAN H B, GONG Y S. Spatial spillover effects of digital rural construction on carbon emissions from agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(1): 298-307. (in Chinese)
- [13] 付舒斐,吕添贵,朱丽萌,等.农业绿色发展对耕地利用碳排放强度的影响机制和空间效应[J].中国农业大学学报,2025,30(4):286-299.
FU S F, LYU T G, ZHU L M, et al. Impact mechanism and spatial effects of agricultural green development on carbon emission intensity of cultivated land use[J]. Journal of China Agricultural University, 2025, 30(4): 286-299. (in Chinese)

- [14] 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.
JIANG T. Mediating Effects and moderating effects in causal inference[J]. China Industrial Economics, 2022(5): 100-120. (in Chinese)
- [15] 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.
LI B, ZHANG J B, LI H P. 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. (in Chinese)
- [16] 李宽, 史磊. 农村产业融合对农业碳排放的影响: 机制路径及空间溢出效应分析[J]. 中国农业资源与区划, 2024, 45(4): 1-14.
LI K, SHI L. Effects of rural industrial convergence on agricultural carbon emissions: Mechanism path and spatial spillover effect analysis[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2024, 45(4): 1-14. (in Chinese)
- [17] 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.
- [18] 李媛, 阮连杰. 中国数字乡村发展的测度、动态演进及驱动因素[J]. 统计与信息论坛, 2025, 40(1): 106-118.
LI Y, RUAN L J. Measurement, dynamic evolution, and driving factors of digital rural development in China[J]. Journal of Statistics and Information, 2025, 40(1): 106-118. (in Chinese)
- [19] 张世斌, 杨肃昌. 数字经济对城乡融合发展的空间溢出和门槛效应研究[J]. 统计与决策, 2025, 41(13): 117-122.
ZHANG S B, YANG S C. Study on the spatial spillover and threshold effects of digital economy on urban-rural integration [J]. Statistics & Decision, 2025, 41(13): 117-122. (in Chinese)
- [20] 朱红根, 周柏樊. 数字乡村建设与农业绿色发展: 理论与实证[J]. 世界农业, 2025(3): 42-54.
ZHU H G, ZHOU B F. Digital rural construction and green agricultural development: Theory and empirical research[J]. World Agriculture, 2025(3): 42-54. (in Chinese)
- [21] 陈国生, 萧烽, 黄鑫. 湖南农村人力资本与农业现代化耦合协调发展[J]. 经济地理, 2020, 40(10): 176-182.
CHEN G S, XIAO F, HUANG X. Coupling and coordinative development between rural human capital and agricultural modernization in Hunan Province[J]. Economic Geography, 2020, 40(10): 176-182. (in Chinese)
- [22] LESAGE J, PACE R K. Introduction to spatial econometrics[M]. Boca Raton: CRC Press, 2009: 190-210.

(责任编辑: 王 昱)