

数字经济对种植业碳排放的影响研究

——基于环境库兹涅茨曲线的实证检验

刘 纯

贵州大学经济学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2023年9月25日; 录用日期: 2023年11月30日; 发布日期: 2023年12月8日

摘 要

数字经济作为一种新兴的经济形态,对种植业碳减排有重要作用。文章基于2011~2020年中国31个省份的面板数据,采用熵权法构建数字经济综合评价指标体系,使用碳排放系数法测算各省份种植业碳排放总量,通过双向固定效应模型实证考察数字经济对种植业碳排放的影响,并验证数字经济与种植业碳排放之间的倒U型关系。研究发现:数字经济发展显著降低了种植业碳排放量,该结论在经过工具变量、替换核心解释变量和替换被解释变量的稳健性检验后仍成立。数字经济与种植业碳排放量之间存在显著的倒U型关系。数字经济的减碳效应在东部地区和西部地区尤为显著。基于研究结论,本文提出如下建议:完善农村地区数字经济基础设施建设,推动数字技术与农业生产的深度融合;发展农业农村新产业新业态,促进农村产业结构升级;重视各地区之间数字经济均衡发展,避免“数字鸿沟”问题进一步扩大。

关键词

种植业碳排放, 数字经济, 环境库兹涅茨曲线(EKC)

Research on the Impact of Digital Economy of Planting Industry Carbon Emission

—Based on Environmental Kuznets Curve Test

Chun Liu

School of Economics, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: Sep. 25th, 2023; accepted: Nov. 30th, 2023; published: Dec. 8th, 2023

Abstract

The digital economy, as an emerging economic form, plays an important role in reducing planting

文章引用: 刘纯. 数字经济对种植业碳排放的影响研究[J]. 运筹与模糊学, 2023, 13(6): 6302-6314.

DOI: 10.12677/orf.2023.136622

industry carbon emissions. Based on the Panel data of 31 provinces in China from 2011 to 2020, this paper uses the entropy weight method to build a comprehensive evaluation index system for the digital economy, uses the carbon emission coefficient method to calculate the total planting industry carbon emissions of each province, empirically examines the impact of the digital economy on planting industry carbon emissions through the two-way fixed effect model, and verifies the inverted U-shaped relationship between the digital economy and planting industry carbon emissions. The study found that the development of digital economy significantly reduced planting industry carbon emissions. This conclusion is still valid after the robustness test of instrumental variables estimation, replacement core explanatory variables and replacement explained variables. There is a significant inverted U-shaped relationship between the digital economy and planting industry carbon emissions. The carbon reduction effect of the digital economy is particularly significant in the eastern and western regions. Based on the research findings, this article proposes the following suggestions: improve the construction of digital economy infrastructure in rural areas and promote the deep integration of digital technology and agricultural production; develop new industries and formats in agriculture and rural areas, and promote the upgrading of rural industrial structure; and attach importance to the balanced development of digital economic equilibrium among regions to avoid further expansion of the “digital divide”.

Keywords

Planting Industry Carbon Emission, Digital Economy, EKC

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近百年来,受人类活动和自然因素的共同影响,大量排放的温室气体使人类社会正在经历以全球变暖为显著特征的气候变化。自1950年以来,世界平均温度升温速度为 $0.15^{\circ}\text{C}/10$ 年,而中国的平均气温增速为 $0.26^{\circ}\text{C}/10$ 年,高于世界平均水平。预计到本世纪中叶,全球气候系统变暖的情况将更加严重,气候变化对自然生态系统和社会经济系统的不利影响和风险将不断加剧。国际社会已经日益认识到全球气候变暖给人类社会带来的巨大威胁和挑战,并采取了一系列措施来积极应对气候变化。随着《联合国气候变化框架公约(UNFCCC)》《京都议定书》和《巴黎协定》等气候协议相继发布,碳中和已经逐渐成为全球共同的价值观。随着“30·60”双碳目标的提出,我国对实现碳中和目标达到了更高的层面。2023年《政府工作报告》也指出“加强生态环境保护,促进绿色低碳发展”,体现了我国实现双碳目标的决心。在我国积极稳步推进碳达峰碳中和的进程中,虽然工业能源部门的碳排放量是我国碳排放总量的最大来源,但是在双碳目标下,种植业碳排放在实现碳中和路径上的重要作用不容忽视。

传统农业长期处于技术停滞的低效率均衡状态,重新对传统农业的生产要素进行配置不会使农业劳动生产率显著提高,因此需要引入新的生产要素对传统农业加以改造[1]。以农业机械、农药、化肥等为代表的工业生产要素为传统农业发展注入了新的动力,工业技术在带来劳动力节约、劳动生产率和土地产出率大幅提高的同时,也造成了生态环境恶化等问题,客观上需要新的技术进步。当前,依托互联网、云计算、人工智能等新兴技术,数字经济已经成为增强经济发展的新动能,党的二十大报告提出要“加快发展数字经济”。数据显示2022年我国农业数字经济渗透率为10.5%,同比提升0.4个百分点。权衡

经济增长与环境污染的辩证关系一直是各国面临的重大问题。一方面,数字产业运作本身需要消耗大量能源,会对环境造成较大负担[2],另一方面,数字技术能够赋能传统产业,促进传统产业绿色低碳转型升级,体现了数字经济的减碳效应。数字经济在优化农业生产要素资源配置,推动农业高质量发展发挥了重大作用。但究竟数字经济的“亲碳”和“减碳”何者起主导作用?在推进农业高质量发展和实现农业现代化阶段,厘清数字经济与种植业碳排放的关系具有重要意义。

2. 文献综述

以全球变暖为显著特征的气候变化对自然生态系统和社会经济系统带来了严重威胁,国际社会已日益认识到全球气候变化带来的不利影响和潜在风险。因而学术界对农业低碳发展逐渐重视并进行了大量探索,目前关于农业碳排放的已有研究主要从以下三个方面展开。

第一,农业碳排放的测算以及时空分布。在哥本哈根世界气候大会召开前后,国内学者开始陆续对农业碳排放展开相关研究。李波等[3]正式提出“农业碳排放”的概念,采用碳排放系数法(IPCC)从化肥、农药、农膜、农用机械、翻耕、农业灌溉六个维度对农业碳排放进行了测算,但是该研究对碳源的选择较为单一,且只考虑种植业碳排放而忽略畜牧业碳排放。此后,有部分学者对中国农业碳排放进行了更为全面的测度,主要包括种植业和畜牧业碳排放等农业生产的主要部门[4][5]。在农业碳排放的时空分布方面,中国农业碳排放总体呈上升趋势,自1961年至2018年依次经历了平稳增长、快速增长和平稳达峰三个阶段[6],赵敏娟等[7]也认为中国农业碳排放于2016年已经实现农业“碳达峰”,且随着中国加快推进农业发展绿色低碳转型,农业碳排放于2018年之后将持续下降。此外,部分学者通过研究发现近二十年来各省份农业碳排放强度均呈下降趋势,且东部和中部地区下降速度相比于西部地区更快[8][9],但是农业碳排放强度的区域差异整体呈现扩大趋势[10]。

第二,影响农业碳排放的因素。目前学界研究农业碳排放的影响因素主要从宏观以及微观两个角度展开。从宏观来看,已有研究主要聚焦于财政支农投入[11]、政策性农业保险政策[12][13][14]、农地流转[15]等对农业碳排放的影响及其作用机制。从微观来看,已有研究主要关注农村居民收入水平、农业生产技术水平、农村劳动力数量、农地经营规模等方面对农业碳排放的降碳作用[16][17]。徐清华等[8]认为农业机械化通过促进农业规模化生产进而显著降低了本地农业碳排放的强度,并存在显著的负向空间溢出效应。

经济发展水平一直被认为是影响农业碳排放的重要因素。环境库兹涅茨曲线(EKC)理论用于检验环境污染与经济发展呈现倒U型曲线关系,大量学者对环境库兹涅茨曲线进行了实证检验。在农业领域中,化肥和农药投入等农业面源污染源排放量与经济增长总体上呈现显著的倒U型曲线关系[18]。在经济发展的进程中,很多国家形成了“先污染,后治理”的模式,部分学者反思可以利用经济发展促进低碳技术创新,加速环境污染程度由高污染向低污染水平转变,尽快进入高经济层次和低污染水平阶段,减轻我国在经济发展过程中付出的环境污染代价[19][20]。数字经济作为一种新兴的经济形态,也被纳入农业碳减排的研究领域之中,费威等[21]实证检验中国碳排放与数字经济之间存在倒U型关系,田红宇等[22]从“技术效应”和“结构效应”证明数字经济是降低粮食生产碳排放水平的重要作用机制。

第三,农业碳减排路径。现有研究针对农业低碳发展的基本现状提出了不同的碳减排路径,主要包括以下几点:科学构建农业碳排放和碳汇测算体系[23]、建立健全低碳农业认证体系、完善农业碳排放测算标准和碳市场等重点领域的建设[7]、加强在技术、政策、标准和规则等方面与国际衔接与合作等。程秋旺等[24]通过实证检验证明数字普惠金融是实现农业碳减排可行的数字化路径。

综上所述,从目前的研究来看,虽然有大量学者对农业碳排放的测算及时空分布、影响因素和碳减排路径做了大量探索,且有部分文献通过实证研究证明了农业领域中环境库兹涅茨曲线的存在性,但是

将数字经济这一概念引入环境库兹涅茨曲线进行验证的研究较少。且涉及数字经济与碳排放领域的文章多以城市层面展开研究,较少以种植业碳排放作为实证分析对象进行研究。基于已有文献,本文的创新点在于将数字经济引入环境库兹涅茨理论,验证数字经济发展水平与种植业碳排放之间的倒 U 型关系,实证检验数字经济作用于种植业碳排放的减碳效应。

3. 理论分析与研究假设

数字经济是继农业经济和工业经济之后的新型经济形态,是以数据要素为基础,利用现代信息技术实现跨时空信息传播,能够显著降低交易成本,有效破除农业高质量发展的要素供需矛盾,对于推动数字技术与农业深度融合和充分发挥数字经济的降碳效应有重要意义。数字经济发展降低种植业碳排放的理论逻辑如下:第一,数字经济通过技术进步逻辑降低种植业碳排放。数字要素与农业生产深度融合,已逐渐成为农业生产中至关重要的生产要素,促进传统农业向现代农业变革。随着现代信息技术在农业领域的应用,农户可以通过遥感设备、传感器、物联网等新兴技术实时精准监测农业生产,促进农药、化肥等生产资料减量增效,降低农业面源污染和种植业碳排放总量。第二,数字经济通过信息共享逻辑降低种植业碳排放。数字要素能够跨时空信息传递,其显著降低了信息获取的交易成本,缓解信息不对称问题,提高了农村地区信息传递效率。农民依托互联网获取现代农业生产技术知识,整体素质显著提高,促进形成农业绿色可持续发展的理念,从而降低种植业碳排放量。第三,数字经济通过结构优化逻辑降低种植业碳排放。数字要素渗透到农业生产经营全产业链条,促进传统农业数字化转型和农业价值链向二三产业延伸,衍生出农产品精深加工、农村电子商务、数字普惠金融、旅游康养等新产业新业态,促进农村地区产业结构优化,减少对高碳生产资料的依赖,实现农业高质量发展。因此,本文提出如下研究假设。

假设一:数字经济发展可以显著降低种植业碳排放水平。

从“双碳目标”的经济学内涵来看,碳中和是以经济增长与碳排放脱钩理论和环境库兹涅茨曲线(EKC)假说为基础,由“发展优先”到坚持“人与自然和谐共生”理念,是实现绿色低碳转型与农业高质量发展的现实要求。数字经济作为新一轮技术革命[25],从多方面形成了显著的农业碳减排效应[26]。然而,数字经济并非只有单纯的碳减排效应,很可能存在“绿色盲区”。由于数字产业本身就是高能耗产业,建设数字基础设施而产生的能源消耗对环境存在负外部性,由此可能产生额外的碳排放量。根据环境库兹涅茨曲线(EKC)假说,在数字经济发展初期,以粗放型的资源消耗带动发展而衍生出大量负面环境问题,因而在数字经济发展初期会促进种植业碳排放。当数字经济发展到较为成熟的阶段后,能够促进绿色低碳技术创新,提高生产资料利用效率,优化产业结构,从而显著降低种植业碳排放水平。因此,本文提出如下研究假设。

假设二:数字经济与种植业碳排放之间存在先促进再抑制的倒 U 型关系。

4. 研究设计

4.1. 模型设定

为考察数字经济发展对种植业碳排放的影响,本文利用中国 31 个省份 2011 年至 2020 年省级面板数据,构建双向固定效应模型展开实证。基准回归模型设定如下:

$$\ln CE_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Dige_{it} + \alpha_2 Control_{it} + \mu_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式(1)中, i 表示省份, t 表示年份, CE_{it} 为被解释变量种植业碳排放, $Dige_{it}$ 为核心解释变量数字经济发展水平, $Control_{it}$ 为控制变量, α_0 、 α_1 、 α_2 为待估参数,其中 α_1 为本文重点关注系数,预期为负值。

μ_i 为省份固定效应, δ_i 为年份固定效应, ε_{it} 为随机扰动项。

为验证环境库兹涅茨曲线(EKC), 证明种植业碳排放量与数字经济发展水平之间存在倒 U 型关系, 本文利用中国 31 个省份 2011 年至 2020 年省级平衡面板数据予以实证分析。模型设定如下:

$$\ln CE_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln Dige_{it} + \beta_2 (\ln Dige_{it})^2 + \beta_3 Control_{it} + \mu_i + \delta_i + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

式(2)中, $\ln Dige_{it}$ 为数字经济指数取对数, $(\ln Dige_{it})^2$ 为数字经济指数取平方, β_0 、 β_1 、 β_2 、 β_3 为待估参数, 其中若 β_2 与 β_1 系数相反且 β_2 系数为负, 即数字经济指数的二次项系数为负, 一次项系数为正, 则数字经济与种植业碳排放的倒 U 型曲线关系得以验证。其余变量与式(1)一致。

4.2. 变量选择

4.2.1. 被解释变量

种植业碳排放量(CE)。在实证过程中, 为避免极端值影响, 本文将种植业碳排放量取对数处理, 用 $\ln CE$ 表示。农业碳排放来源较为复杂, 目前学界主要通过种植业和畜牧业两个角度来对农业碳排放量进行测算, 由于本文只研究种植业产生的碳排放, 故参考李波等[3]和丁宝根等[27]学者的测算方法, 采用碳排放系数法(IPCC), 以柴油、化肥、农药、农膜、灌溉和翻耕为碳源对种植业碳排放进行测算, 并利用各自的碳排放碳源的使用量及碳排放系数估算出种植业碳排放量, 各要素碳排放系数及来源见表 1。

Table 1. Planting industry carbon emission sources and coefficients
表 1. 种植业碳排放碳源及系数

碳源	碳排放系数	来源
柴油	0.59 kg/kg	IPCC2013
化肥	0.89 kg/kg	美国橡树岭国家实验室
农药	4.93 kg/kg	美国橡树岭国家实验室
农膜	5.18 kg/kg	南京农业大学农业资源与生态环境研究所
灌溉	266.48 kg/hm ²	段华平等
翻耕	312.60 kg/km ²	李波等

种植业碳排放量的估算公式为:

$$CE = \sum CE_i = \sum T_i \cdot \gamma_i \quad (3)$$

式(3)中 CE 为种植业碳排放总量, CE_i 表示第 i 种碳源的碳排放量, T_i 表示第 i 种碳源的使用量, γ_i 表示第 i 种碳源的碳排放系数。

根据式(3)进行测算, 可以估算出我国 2011 年至 2020 年种植业碳排放总量, 具体如图 1 所示。2011 年至 2020 年我国种植业碳排放总量呈先上升后下降的趋势, 且在 2015 年达到了峰值, 种植业碳排放总量为 10,692 万吨。在 2015 年后, 种植业碳排放总量逐年下降, 说明我国在 2015 年已实现种植业“碳达峰”。我国在 2015 年发布农业面源污染治理“一控两减三基本”政策并采取了休耕等固碳措施。政策要求控制农业用水总量, 减少化肥和农药的施用总量和解决秸秆焚烧、畜禽污染、地膜回收等问题, 可见政策的实施有助于农业低碳绿色转型, 我国距离实现“碳中和”目标更进一步。

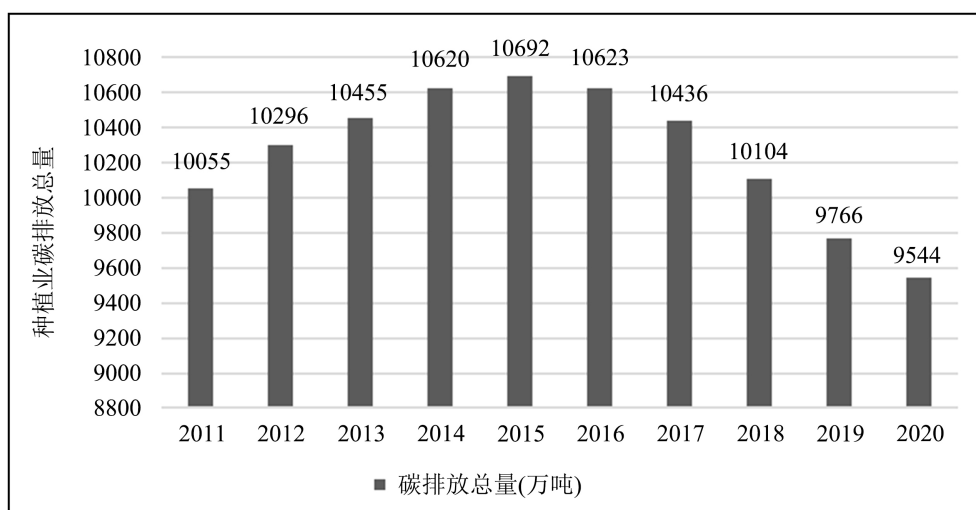


Figure 1. Total carbon emissions from the national planting industry, 2011~2020

图 1. 2011 年~2020 年全国种植业碳排放总量

4.2.2. 核心解释变量

数字经济(Dige)。在实证过程中,为避免极端值影响估计结果和满足经典线性假定,本文将数字经济取对数处理,用 $\ln Dige$ 表示,数字经济的平方项用 $(\ln Dige)^2$ 表示。由于目前数字经济指标尚未形成统一的测度标准,且大多数学者都选择使用部分相关指标来量化数字经济,故本文参考赵涛[28]的研究方法,从互联网普及率、互联网行业就业情况、互联网产业产出情况、移动互联网用户数和数字普惠金融发展五个维度构建数字经济发展评价指标体系,具体如表 2 所示。其中互联网行业就业情况用软件和信息技术服务业就业人员与总就业人员之比表示,互联网产业产出情况用电信业务总量除以年末常住人口表示,移动互联网用户数可以直接使用移动电话普及率表示。本文采用熵权法测度数字经济发展水平,以上五个指标能够反映各省份互联网发展状况和数字金融水平,能够较好的反映各省份数字经济发展水平。

Table 2. Evaluation index system for digital economy development

表 2. 数字经济发展评价指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	指标单位	指标属性
数字经济综合发展指数	互联网普及率	每百人互联网用户数	%	+
	互联网相关就业	计算机服务和软件从业人员占比	%	+
	互联网相关产出	人均电信业务总量	万元/人	+
	移动互联网用户数	每百人移动电话数	部/百人	+
	数字金融普惠发展	中国数字普惠金融指数	-	+

各省份 2011 年和 2020 年数字经济发展水平如图 2 所示。经过十年的发展,全国数字经济水平明显提升,但是各省份之间数字经济发展水平差距明显,2020 年北京市、上海市、浙江省、广东省数字经济综合发展水平已超过 0.75,互联网基础设施发展水平较高以及人才聚集的省市,对数字经济发展有更高的优势,而黑龙江省 2020 年数字经济综合发展指数仅为 0.56,可见不同省份之间“数字鸿沟”问题愈发明显。

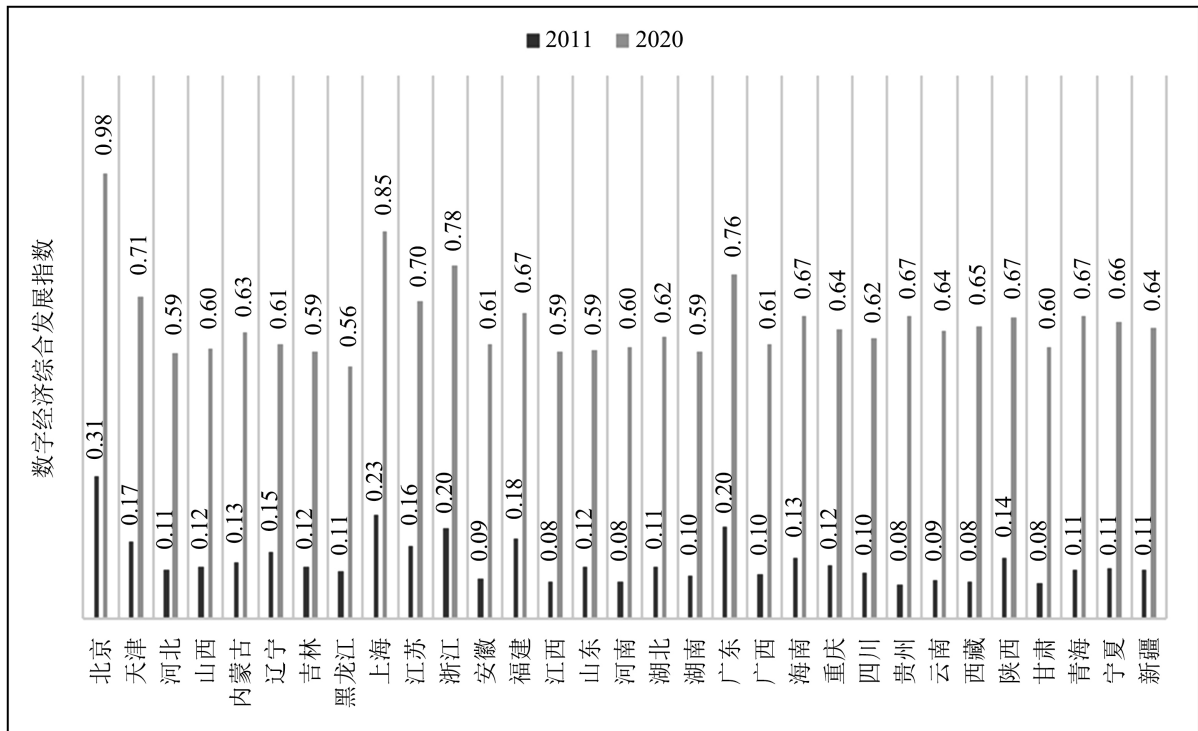


Figure 2. Comprehensive development index of digital economy in 2011 and 2020

图 2. 2011 年和 2020 年各省份数字经济综合发展指数

4.2.3. 控制变量

考虑到影响种植业碳排放的因素较多，为缓解遗漏变量对实证结果的影响，保证实证结果的稳健性，本文参考已有研究成果[26] [27] [28]，引入经济发展水平(lnGDP)、产业结构(lnSTRU)、第一产业增加值(lnFirst)、人力资本水平(Human Capital)、人口密度(lnPOPU)作为本文的控制变量。其中经济发展水平用人均 GDP 来表示，以控制数字经济发展水平可能存在的非线性影响，产业结构用第一产业产值占 GDP 比重来表示，第一产业增加值可直接由国家统计局获得，人力资本水平用高等学校在校生人数与总人口之比来表示，人口密度用地区总人口数与地区行政区划面积来表示之比来表示。实证过程中，考虑到不同量纲的数据波动较大，本文将人均 GDP、产业结构、第一产业增加值和人口密度取对数处理。

4.3. 数据来源

考虑到数据可得性问题，本实证研究中所使用的数据为 2011 年至 2020 年 31 个省(市)的面板数据(不含台湾、香港、澳门)。种植业碳排放测算所使用化肥和农药施用量、农膜用量、农机柴油用量、灌溉和翻耕面积均来源于《中国统计年鉴》和《中国农村统计年鉴》。数字经济测算和控制变量所需要的数据来自《中国统计年鉴》，数字普惠金融指数来自北京大学数字普惠金融指标数据，时间跨度为 2011 年至 2020 年。部分缺失值用线性插补法和邻近年均值法补齐。各变量描述性统计结果如表 3 所示。

Table 3. Descriptive statistical results of variables

表 3. 变量描述性统计结果

变量类型	变量	观测数	均值	标准差	最小值	最大值
被解释变量	lnCE	310	2.338	0.486	1.157	2.998

Continued

	Dige	310	0.371	0.174	0.077	0.982
解释变量	lnDige	310	0.308	0.124	0.074	0.684
	(lnDige) ²	310	0.110	0.083	0.006	0.468
	lnGDP	310	4.702	0.191	4.215	5.217
控制变量	lnSTRU	310	0.879	0.394	-0.523	1.417
	lnFirst	310	3.094	0.496	1.844	3.745
	HC	310	0.020	0.006	0.008	0.041
	lnPOPU	310	2.313	0.649	0.401	3.594

5. 实证结果与分析

5.1. 基准回归结果

本文采用双向固定效应模型考察数字经济对种植业碳排放的影响，考虑到面板数据可能会受到个体和时间维度上不可观测因素的干扰，因此本文控制了省份和年份层面上的固定效应，具体回归结果如表4所示。从基准回归结果来看，表4第(1)列仅将核心解释变量数字经济纳入回归模型，在控制可能影响种植业碳排放水平的省份以及年份固定效应后，发现数字经济对种植业碳排放的回归系数为-0.702，且在1%的水平上显著为负，说明数字经济能够降低种植业碳排放水平。在第(2)列加入控制变量后，发现数字经济发展水平对种植业碳排放的回归系数在1%的水平上显著为负，说明数字经济发展水平每提高1个单位，种植业碳排放量下降0.644个单位，从而验证了本文的假设一。数字经济的本质特征和先天优势已使其逐渐成为农业生产中至关重要的生产要素。一方面，数字经济可以利用其跨时空信息传递、降低交易成本、信息和数据共享等优势加速推动农村信息互联共享，通过知识溢出促进农村居民形成绿色低碳的消费理念，从而降低种植业碳排放。另一方面，数字经济能够降低信息不对称问题，使市场交易方式由传统的单方面由供给方流向需求方转变为产品供需双方双向流动，从而产生的个性化订单农业帮助农业生产者精准把握市场的需求，实现资源合理配置。此外，数字经济催生的数字化智能设备，能够帮助农民精准把握农业生产状况，智能科学的决策能够有效减少资源浪费而额外产生的农业碳排放，帮助农业生产降本增效，从而实现数字经济的碳减排效应。

为验证数字经济与种植业碳排放之间的倒U型关系，本文将数字经济平方项和数字经济指数取对数作为一次项引入模型，表4第(3)列和第(4)列报告了双向固定效应模型的回归结果。结果显示无论是否加入可能影响种植业碳排放的各省份之间差异的控制变量，反映数字经济发展水平的解释变量数字经济平方在1%的水平上显著为负，数字经济(lnDige)在1%的水平上显著为正。数字经济的二次项系数为负，一次项系数为正，且通过1%的显著性检验，说明数字经济与种植业碳排放之间存在显著的倒U型关系，从而验证了本文的假设二。也即是说，在数字经济发展初期，由于搭建支撑数字经济运转的基础设施需要较高的成本投入，且数字产业本身就是高能耗产业，会对环境带来较大负担，因而在数字经济发展初期会促进种植业碳排放。当数字经济发展到较为成熟的阶段后，能够促进绿色低碳技术创新，提高生产资料利用效率，优化产业结构，从而显著降低种植业碳排放水平。

在其余控制变量中，如表4第(2)列所示，人均GDP水平、产业结构、人口密度对农业碳排放的影响显著为正。其中人均GDP对种植业碳排放的影响在1%的水平上显著为正，说明人均GDP每增加1个百

分点，种植业碳排放增加 0.25 个百分点。人均 GDP 上升代表生活水平的提升，人们对产品需求的多样化，包括饮食结构的调整，这也对农业产量有了更高要求，从而增加种植业碳排放。产业结构在 1% 的水平上显著促进种植业碳排放，本文以第一产业产值占 GDP 比重来表示产业结构，当第一产业产值占 GDP 比重提升，说明第一产业的生产数量和质量提升，从而增加种植业碳排放。人口密度在 5% 的水平上显著促进种植业碳排放，当人口密度越大时，对于生产和生活所必需的元素数量需求会增加，从而促进种植业碳排放量的增加。

Table 4. Basic regression results

表 4. 基准回归结果

变量	(1) lnCE	(2) lnCE	(3) lnCE	(4) lnCE
Dige	-0.702*** (0.099)	-0.644*** (0.103)		
lnDige			0.926*** (0.198)	0.735*** (0.263)
(lnDige) ²			-1.526*** (0.132)	-1.515*** (0.204)
lnGDP		0.250*** (0.086)		0.239*** (0.081)
lnSTRU		0.310*** (0.082)		0.326*** (0.078)
lnFirst		-0.051 (0.086)		-0.211** (0.087)
HC		1.755 (1.637)		-1.978 (1.695)
lnPOPU		0.360** (0.178)		0.539*** (0.172)
_cons	1.575*** (0.038)	-0.667 (0.591)	1.269*** (0.048)	-0.982* (0.564)
N	310	310	310	310
Province	Yes	Yes	Yes	Yes
Year	Yes	Yes	Yes	Yes

Standard errors in parentheses, * $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$.

5.2. 异质性分析

数字经济在整体上显著降低了种植业碳排放水平，但是各地区之间数字经济发展水平不同，土地资源禀赋和自然资源基础差异较大，使得数字经济对种植业碳排放的影响存在区域异质性。本文将样本划分为东部地区、中部地区、西部地区和东北地区进行分组回归，考察数字经济对种植业碳排放影响的区域差异，区域异质性检验结果如表 5 所示。东部地区和西部地区的回归系数在 1% 的水平上显著为负。东部地区经济基础水平更好，数字经济与农业融合程度较高，容易形成农业规模化种植，更易发展现代农业。西部地区虽然数字经济发展起步较晚，但其增速较快，依托其自然资源禀赋，良好的森林碳汇基础，形成旅游康养、生态农业、电子商务等新业态，种植业低碳发展的潜力大。中部地区和东北地区数字经

济对种植业碳排放的回归系数为负但是未通过显著性检验。说明中部地区和东北地区数字经济发展水平偏低，数字技术与农业的融合尚不紧密，故数字经济的减碳效应还未显现。

Table 5. Regional heterogeneity test results

表 5. 区域异质性检验结果

变量	东部地区 (1)	中部地区 (2)	西部地区 (3)	东北地区 (4)
Dige	-0.741*** (0.191)	-0.326 (0.407)	-0.374*** (0.139)	-0.536 (0.443)
lnGDP	0.733*** (0.147)	-0.568*** (0.159)	-0.028 (0.110)	-0.036 (0.084)
lnSTRU	0.526*** (0.140)	-0.538*** (0.153)	0.223** (0.097)	-0.106 (0.073)
lnFirst	-0.111 (0.142)	0.398*** (0.120)	-0.253** (0.107)	0.355*** (0.123)
HC	-7.644 (5.227)	2.929 (1.929)	1.304 (1.510)	20.181*** (6.505)
lnPOPU	0.687 (0.453)	1.178* (0.658)	1.194*** (0.215)	-0.056 (0.482)
_cons	-3.579** (1.396)	1.361 (1.663)	1.699*** (0.418)	1.418 (1.613)
N	100	60	120	30
Province	Yes	Yes	Yes	Yes
Year	Yes	Yes	Yes	Yes

Standard errors in parentheses, * $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$.

5.3. 稳健性检验

本文通过三种方法来检验数字经济对种植业碳排放影响结果的稳健性。第一，工具变量法。工具变量法是解决内生性问题的主要方法之一。本文可能的内生性来源有两种。一是双向因果问题。种植业碳排放的持续增加会促进相关环境政策出台，并促进技术升级和节能增效，而种植业碳减排也离不开数字技术的应用。二是遗漏变量影响。虽然本文采用双向固定效应模型控制了省份及年份固定效应，但可能会遗漏重要解释变量，导致估计结果有偏。本文借鉴赵涛等[28]的方法，选取1984年每百人固定电话数与各省份上一年全国信息技术服务收入的交乘项作为工具变量。一方面，数字经济的发展是以传统信息基础设施为基础，两者满足相关性条件；另一方面，随着互联网等新兴通信技术的普及，传统通信设备如固定电话的使用频率降低，难以影响到种植业碳排放，故满足排他性条件。采用二阶段最小二乘法(2SLS)识别数字经济对种植业碳排放的净效应，结果如表6第(1)列所示，数字经济的回归系数在1%的水平上显著为负，证明了前述基准回归结果的稳健性。第二，替换核心解释变量。由于基准模型中仅使用熵权法测算数字经济指标可能存在主观性，故参考赵涛等[28]的方法，使用主成分分析法对数字经济指标重新进行测算，根据表6第(2)列结果所示，数字经济(Dige_PCA)对种植业碳排放影响的回归系数在1%的水平上显著为负，证明前述结果的稳健性。第三，替换被解释变量。本文用种植业碳排放强度(CEI)替换种植业碳排放量(lnCE)进行稳健性检验。种植业碳排放强度以种植业碳排放量与第一产业增加值之比来表

示。根据表 6 第(3)列结果所示,数字经济对种植业碳排放强度影响的回归系数在 1%的水平上显著为负,说明数字经济能够显著降低种植业碳排放强度,证明了上述结果的稳健性。

Table 6. Robustness test
表 6. 稳健性检验

变量	(1) lnCE	(2) lnCE	(3) CEI
Dige	-1.792 ^{***} (0.350)		-0.201 ^{***} (0.064)
Dige_PCA		-0.080 ^{***} (0.010)	
lnGDP	0.472 ^{***} (0.135)	0.323 ^{***} (0.085)	0.386 ^{***} (0.053)
lnSTRU	0.381 ^{***} (0.112)	0.347 ^{***} (0.079)	0.351 ^{***} (0.050)
lnFirst	-0.215 ^{**} (0.108)	-0.137 (0.085)	-0.606 ^{***} (0.053)
lnPOPU	0.791 ^{***} (0.275)	0.150 (0.168)	0.393 ^{***} (0.110)
HC	-0.369 (2.136)	1.514 (1.581)	1.388 (1.008)
_cons	-2.270 ^{***} (0.849)	-0.149 (0.556)	-1.580 ^{***} (0.364)
N	310	310	310
Province	Yes	Yes	Yes
Year	Yes	Yes	Yes

Standard errors in parentheses, * $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$.

6. 研究结论与政策建议

本文基于 2011 年至 2020 年中国 31 个省份的面板数据,采用双向固定效应模型考察了数字经济对种植业碳排放的影响,并验证数字经济与种植业碳排放之间是否存在倒 U 型关系。研究发现:第一,数字经济发展能够显著降低种植业碳排放水平,数字经济水平每提高一个百分点,种植业碳排放降低 0.644 个百分点,且这一结论在引入工具变量、替换核心解释变量和替换被解释变量的稳健性检验后仍成立。第二,数字经济与种植业碳排放水平之间存在显著的倒 U 型关系,即在数字经济发展初期会使种植业碳排放量显著上升,当数字经济发展趋于成熟会抑制种植业碳排放。第三,数字经济对种植业碳排放的抑制作用有明显的区域异质性,且数字经济的减碳效应在东部地区和西部地区更为显著,而在中部地区和东北地区不显著。

基于上述研究结论,本文提出如下政策建议:第一,完善农村地区数字经济基础设施建设,推动数字技术与农业生产的深度融合。利用物联网、云计算、人工智能等现代信息技术推动传统农业向智慧农业转型,实现资源合理配置,提高农业劳动生产率,促进农业农村现代化发展。第二,发展农业农村新产业新业态,促进农村产业结构升级。利用现代互联网信息技术,推动数字要素与传统农业互联互通,

促进农业产业链向二三产业延伸。加快推动数字乡村建设,充分发展农村电商、订单农业等新产业模式,充分利用生态资源发展休闲农业、生态农业、旅游康养等新业态,形成农业绿色可持续发展模式。第三,重视各地区之间数字经济均衡发展,为农业碳减排打好数字化基础,避免“数字鸿沟”问题进一步扩大。因地制宜调整各地区数字经济发展战略,利用“一带一路”战略进一步加强中西部地区对外开放程度,充分发挥中西部地区环境资源等比较优势,促进区域协调发展,实现农业绿色低碳转型。

参考文献

- [1] 舒尔茨. 改造传统农业[M]. 梁小民, 译. 北京: 商务印书馆, 2013: 122-146.
- [2] Williams, E. (2011) Environmental Effects of Information and Communications Technologies. *Nature*, **479**, 354-358. <https://doi.org/10.1038/nature10682>
- [3] 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.
- [4] 田云, 尹恣昊. 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.
- [5] 吴贤荣, 张俊飏, 田云, 李鹏. 中国省域农业碳排放: 测算、效率变动及影响因素研究——基于 DEA-Malmquist 指数分解方法与 Tobit 模型运用[J]. 资源科学, 2014, 36(1): 129-138.
- [6] 金书秦, 林煜, 牛坤玉. 以低碳带动农业绿色转型: 中国农业碳排放特征及其减排路径[J]. 改革, 2021(5): 29-37.
- [7] 赵敏娟, 石锐, 姚柳杨. 中国农业碳中和目标分析与实现路径[J]. 农业经济问题, 2022(9): 24-34.
- [8] 徐清华, 张广胜. 农业机械化对农业碳排放强度影响的空间溢出效应——基于 282 个城市面板数据的实证[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(4): 23-33.
- [9] 伍国勇, 刘金丹, 杨丽莎. 中国农业碳排放强度动态演进及碳补偿潜力[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(10): 69-78.
- [10] 夏四友, 赵媛, 许昕, 文琦, 崔盼盼, 唐文敏. 近 20 年来中国农业碳排放强度区域差异、时空格局及动态演化[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(3): 596-608.
- [11] 黄伟华, 祁春节, 聂飞. 财政支农、技术溢出与农业碳排放[J]. 软科学, 2023, 37(2): 93-102.
- [12] 陈建学, 陈盛伟, 牛浩. 农业保险发展对农业碳排放的影响机制研究——基于行为改变视角的中介效应分析[J]. 世界农业, 2023(5): 91-103.
- [13] 张壮, 田云, 陈池波. 政策性农业保险能引导农业碳减排吗? [J]. 湖南农业大学学报(社会科学版), 2023, 24(2): 29-38.
- [14] 徐雯, 张锦华. 政策性农业保险的碳减排效应——来自完全成本保险和收入保险试点实施的证据[J]. 保险研究, 2023(2): 20-33.
- [15] 吉雪强, 刘慧敏, 张跃松. 中国农地流转对农业碳排放强度的影响及作用机制研究[J]. 中国土地科学, 2023, 37(2): 51-61.
- [16] 陈宇斌, 王森. 农村劳动力外流、农业规模经营与农业碳排放[J]. 经济与管理, 2022, 36(6): 43-49.
- [17] 范东寿. 农业技术进步、农业结构合理化与农业碳排放强度[J]. 统计与决策, 2022, 38(20): 154-158.
- [18] 李海鹏, 张俊飏. 中国农业面源污染与经济发展关系的实证研究[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(6): 585-590.
- [19] 廉勇. 经济层次与环境污染: 基于碳排放的环境库兹涅茨曲线研究[J]. 统计与决策, 2021, 37(20): 146-150.
- [20] 王芳, 曹一鸣, 陈硕. 反思环境库兹涅茨曲线假说[J]. 经济学(季刊), 2020, 19(1): 81-100.
- [21] 费威, 于宝鑫, 王维国. 数字经济发展与碳减排——理论推演与实证检验[J]. 经济学家, 2022(11): 74-83.
- [22] 田红宇, 关洪浪. 数字经济对粮食生产碳排放的影响研究——来自长江经济带 108 个地级市的经验证据[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(8): 145-157.
- [23] 张俊飏, 何可. “双碳”目标下的农业低碳发展研究: 现状、误区与前瞻[J]. 农业经济问题, 2022(9): 35-46.
- [24] 程秋旺, 许安心, 陈钦. “双碳”目标背景下农业碳减排的实现路径——基于数字普惠金融之验证[J]. 西南民族大学学报(人文社会科学版), 2022, 43(2): 115-126.
- [25] West, T.O. and Marland, G. (2002) A Synthesis of Carbon Sequestration, Carbon Emissions, and Net Carbon Flux in Agriculture: Comparing Tillage Practices in the United States. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **91**, 217-232. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00233-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00233-X)

- [26] 缪陆军, 陈静, 范天正, 等. 数字经济发展对碳排放的影响——基于 278 个地级市的面板数据分析[J]. 南方金融, 2022(2): 45-57.
- [27] 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.
- [28] 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. <https://doi.org/10.19744/j.cnki.11-1235/f.2020.0154>