



胡平波,刘金.数字乡村发展提升农业生态效率的机理与实证检验[J].中国人口·资源与环境,2025,35(3):162-173.[HU P B, LIU J. Mechanisms of improving agricultural ecological efficiency through digital village development and its empirical analysis[J]. China population, resources and environment, 2025, 35(3): 162-173.]

数字乡村发展提升农业生态效率的机理与实证检验

胡平波^{1,2}, 刘金¹

(1. 江西财经大学统计与数据科学学院, 江西 南昌 330013;
2. 江西财经大学财经数据科学重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要 农业生态效率是促进农业可持续发展的基础,研究数字乡村发展对农业生态效率的提升作用具有重要的理论与现实意义。随着数字乡村不断发展,农业生产经营需要的数字要素、生态要素和传统农业要素成本都将越来越低,从而促使传统农业向生态农业生产经营方式转变。该研究通过构建数理模型,使用比较静态分析方法分析了数字乡村发展促进农业生态效率提升的直接作用机理,以及农村产业融合、农村居民收入在数字乡村发展促进农业生态效率提升中的间接作用机理;在此基础上,以2011—2022年中国30个省份的面板数据为样本,运用双向固定效应模型和中介效应模型进行了实证检验。研究表明:①整体上,数字乡村发展对农业生态效率具有显著提升作用,在经过重新测度被解释变量、排除其他影响因素、更换解释变量等一系列稳健性检验后,这一结论依旧成立。在数字乡村发展的4个维度上,数字产业发展和数字服务水平对农业生态效率的提升作用显著,数字化资金投入和数字信息基础对农业生态效率的提升作用不显著。②异质性分析表明,数字乡村发展对东部和中部地区农业生态效率的提升作用显著,但该作用在西部地区不显著;在北方地区和农业规模化经营程度高的地区,数字乡村发展对农业生态效率的提升效应更为明显。③数字乡村发展主要通过提高农村产业融合水平和农村居民收入,进而促进农业生态效率提升。因此,在数字乡村发展过程中,不同区域需要因地制宜制定数字乡村发展政策,并不断促进农村产业融合与农村居民收入的中介传导作用,以更好地促进对农业生态效率的提升作用。

关键词 数字乡村;生态效率;产业融合;收入;农业

中图分类号 F323.2 文献标志码 A 文章编号 1002-2104(2025)03-0162-12 DOI:10.12062/cpre.20241129

生态效率的概念最早由德国学者 Schaltegger 等^[1]提出。农业生态效率是生态效率在农业领域的拓展,指在保证农产品产出的前提下,尽量减少农业要素投入和资源消耗,降低环境污染^[2]。长期以来,中国农村缺乏提升农业生态效率的长效抓手,单纯依靠资金、技术和产业政策来促进生态农业发展的效果有限。但是,数字乡村发展为农业生态效率提升提供了新动能。那么,数字乡村发展是如何提高农业生态效率的呢?

2019年,中共中央办公厅、国务院办公厅印发的《数字乡村发展战略纲要》指出:“数字乡村是伴随网络化、信息化和数字化在农业农村经济社会发展中的应用,以及农民现代信息技能的提高而内生的农业农村现代化发展和转型进程。”2023年中央一号文件《中共中央 国务院关

于做好2023年全面推进乡村振兴重点工作的意见》中提出“深入实施数字乡村发展行动”。随着数字乡村的深入发展,智慧农业建设中,大数据、物联网和智能设备等技术优化了农业生产流程,有利于提升农业生态价值与效率。同时,智慧美丽乡村建设中,数字技术在乡村生态环境监测、污染治理和资源管理等关键环节的应用,有效改善了乡村生态环境,为持续提升农业生态效率提供环境支撑。基于此,分析数字乡村发展在农业生产中的作用,揭示数字乡村发展对农业生态效率提升的作用机制具有重要的理论价值和现实意义。

1 文献综述

学术界关于数字乡村发展的研究主要集中在探索数

收稿日期:2024-06-18 修回日期:2024-12-11

作者简介:胡平波,博士,教授,博导,主要研究方向为数量经济、应用统计、数字农业、农民合作社。E-mail:huxingling0304@163.com。

通信作者:刘金,博士生,主要研究方向为数字乡村、农村经济。E-mail:jxljrs@163.com。

基金项目:国家自然科学基金地区项目“农民合作社数字化发展的促进机制与支持政策研究”(批准号:72163007);国家社会科学基金重大项目“农业社会化服务推动生产绿色转型的机制与对策研究”(批准号:23&ZD110);江西省研究生创新专项资金项目“数字赋能促进农村产业结构优化升级的机理与实证研究”(批准号:YC2022-B146)。

字乡村发展路径^[3-4]、数字乡村发展促进乡村振兴^[5-6]、促进农村居民就业创业^[7-8]、提高农民收入和优化乡村治理等方面^[9-11]。随着研究的不断深入,关于数字乡村发展对农业生产效率影响的研究也逐渐展开。既有研究表明,数字乡村发展可以推动农业规模化经营^[12],数字技术能够促进农业生产精细化、标准化、自动化、智能化,实现农业生产集约化^[13]。数字普惠金融的发展有利于农业生产中的要素流动和技术扩散^[14],数字化推广方式能够提高农业绿色化水平等^[15]。但是,系统地研究数字乡村发展促进农业生态效率提升的文献较少。

学术界关于农业生态效率的研究集中在农业生态效率的测度及影响因素两个方面。一方面,在农业生态效率的测度方法中,DEA模型及其拓展模型为主流测度模型^[16-18]。其中,Tone^[19]构建了包含非期望产出的DEA-SBM模型,考虑了变量松弛问题,测度结果更为准确,得到了广泛应用。此外,还有学者使用比值法^[20]、生命周期法和随机前沿法等方法^[21-22]。在农业生态效率的测度对象选择中,研究初期,国内大多数学者测度广义农业(农林牧渔业)的生态效率^[23-24]。其优点是测度面广,但由于投入产出的对应关系及面源污染估计的复杂性,测算的精度较低,狭义农业(种植业)的生态效率测度逐渐被广泛采纳^[25]。在农业生态效率的测度指标选取中,大多数学者从投入产出角度构建指标体系。其中,投入指标主要包含劳动力、土地、化肥、农药等要素投入,产出指标主要包含以农业总产值为代表的期望产出和以农业碳排放、农业污染排放为代表的非期望产出^[26-28]。另一方面,在农业生态效率影响因素的研究中,学者们主要研究政策措施^[29]、资源环境和经济社会发展等因素对农业生态效率的影响^[30-31]。

梳理既有相关文献发现,以往学者对数字乡村发展与农业生态效率的研究非常丰富,但鲜有学者研究数字乡村发展对农业生态效率提升的影响机制。实际上,数字乡村发展强调数字要素的作用,结合生态要素和传统农业要素进行农业生产经营,促使传统农业向生态农业的经营方式转变。探索数字要素协同下的农业生产,在如何保证农业产值的同时,降低资源环境成本,促使农业生态效率提升具有重要意义。因此,本研究以数字乡村发展推动传统农业向生态农业转型为切入点,构建数理模型考察数字乡村发展对农业生态效率的提升作用,并运用计量模型进行实证检验。

本研究可能的边际贡献在于:第一,构建数字乡村发展下的生态农业生产函数,分析数字乡村发展提升农业生态效率的作用机理。第二,从农村产业融合和农村居民收入两方面阐释其间接作用渠道,拓展了提升农业生

态效率的路径。第三,实证检验数字乡村发展对农业生态效率提升的影响效应。本研究为促进农业生态效率提升提供了新的理论解释视角,同时为相关部门研究如何促进农业可持续发展提供参考。

2 作用机理分析

2.1 数字乡村发展促使传统农业向生态农业经营方式转变

2024年,国家修订了《数字乡村建设指南2.0》,建设内容包括8个方面,强调了智慧农业等乡村数字富民产业与智慧美丽乡村等建设内容。其中智慧农业强调生态效率,乡村新业态强调具有生态属性的产业,智慧美丽乡村强调乡村生态环境基础。因此,随着数字乡村的深入发展,粗放型的传统农业生产方式发生改变,生态农业逐渐成为现代农业生产经营的主要模式。

第一,在农业产前环节,通过数字乡村发展提供数据驱动和智能决策条件,确保农业资源投入的高效性。物联网和农业信息平台等提供的精准市场信息,有助于生产者根据当地的资源禀赋,精准定位所需发展的农业产业^[32]。农业经营者对气候、土壤、作物生长等关键信息进行大数据收集与分析,可以加强对农业产出条件的智能决策,为农业生产布局和生产资源投入提供精准化决策支持。第二,在农业生产环节,通过数字乡村发展实现农业生产精准提效,降低资源消耗。一方面,数字技术对土地、化肥、农药等生产要素进行科学配置,实现精准播种、智能喷水、合理施肥等精细化操作,在提高农业生产效率的同时,促进农业生产节本降耗^[33]。另一方面,通过数据监测平台对农业生产全过程中的土壤墒情、作物苗情、病虫害情和灾情等进行动态监测和数据采集,及时高效解决农业生产问题,降低资源消耗。第三,在农业产后环节,发挥数字乡村发展的市场连接特征,降低农产品市场交易成本。电商平台为农业经营者提供了线上营销服务,促进农产品交易数字化,并通过智慧物流系统实现农产品的快速配送,有助于农业经营者直接对接市场,减少交易成本,降低农产品损耗。

2.2 数字乡村发展促使农业生产要素成本价格下降

第一,随着数字乡村发展,农业生产经营运用数字要素的成本将越来越低。数字乡村发展强调乡村数字基础设施建设,强调涉农数据资源开发、汇集与共享,为数据要素应用于农业生产经营带来支撑与便利。这表明农业经营者花费同样的成本代价,可以更加便利地获取数字要素。第二,随着数字乡村发展,生态要素和传统农业生产要素的使用成本将越来越低。首先,数字乡村发展对生态要素获取成本产生影响。由于智慧农业是环境友好

型农业,将减少对农药、化肥等环境有害型生产原料的使用。乡村新业态和智慧美丽乡村的发展中也更加注重对生态环境的保护,因此,数字乡村发展中的生态要素供给增加,农业经营者获取生态要素的成本降低。其次,数字乡村发展对传统农业生产要素的使用成本产生影响。一方面,随着乡村新业态的逐步发展,越来越多的劳动力回流至乡村,这在一定程度上缓解了“空心村”中农业生产老龄化和兼业化的问题,使农业生产中的劳动力供给结构优化。另一方面,农村数字普惠金融的发展有效解决了涉农信贷中的难题,降低了农村居民获取资金要素的成本。

随着农业生产要素成本不断下降,数字要素应用于农业产前、产中和产后环节,既节省了农业要素投入,降低了资源环境损耗,又提升了农业生产效率。因此,在数字乡村发展下,传统农业向生态农业的经营转变,提高了农业生产要素的利用效率和配置效率,降低了环境污染和资源消耗,推动了农业生态效率持续提升。

基于此,将传统农业要素、数字要素和生态要素约束纳入生态农业生产函数,建立数字乡村发展对农业生态效率影响的数理模型,分析数字乡村发展对农业生态效率的直接作用机理。

2.3 数字乡村发展对农业生态效率的直接作用机理

在量化分析中,生态效率为产品经济价值与产品资源消耗和环境影响的比值^[34]。本研究将其应用到农业研究领域,农业生态效率为农业经济产出与包含资源环境消耗的农业生产成本之间的比值,具体公式如下:

$$\text{Eff} = \frac{Q}{C} \quad (1)$$

式(1)中:Eff表示农业生态效率;Q表示农业经济产出,即农业生产部门所提供的产品和服务价值;C表示包含资源环境消耗的农业生产成本。在确保农业经济产出的情况下,包含资源环境消耗的农业生产成本越低,农业生态效率越高。

区别于传统农业生产模式,数字乡村发展下的生态农业生产中,数字要素和生态要素均要纳入农业生产中。因此,将C-D生产函数拓展为:

$$Q = AD^\alpha N^\beta T^{1-\alpha-\beta} \quad (2)$$

式(2)中:A表示技术进步(不包括数字技术);D表示数字要素;N表示生态要素;T为传统农业要素,包含资金、劳动力等; α 和 β 分别表示数字要素和生态要素的产出弹性系数。

每一种要素的获取均存在成本,设对应的成本函数如下:

$$C = \delta D + \varepsilon N + \gamma T \quad (3)$$

式(3)中: δ 、 ε 、 γ 分别表示获取数字要素D、生态要素N和传统农业要素T的单位成本,且 $\delta > 0$ 、 $\varepsilon > 0$ 、 $\gamma > 0$ 。

在数字乡村发展初期,数字基础设施配套不足,涉农数字开发与利用条件受限,智慧农业建设不充分,农业经营者获取数字要素的难度相对较大,成本相对较高,在本模型中表现为 δ 值相对较大。当数字乡村发展越来越好时,数字基础设施配套性增强,涉农数字开发与利用平台完善,智慧农业建设完善。则农业经营者获取数字要素的难度相对较小,成本相对较低,在模型中表现为 δ 值相对较小。因此,本模型运用 δ 值的大小来反映数字乡村发展的总体水平, δ 值越小,则数字乡村发展水平越高,反之越低。

在数字乡村发展中,基于农业产值最大化原则,构建条件极值求解下的拉格朗日函数如下:

$$L(x) = AD^\alpha N^\beta T^{1-\alpha-\beta} + \lambda(C - \delta D - \varepsilon N - \gamma T) \quad (4)$$

式(4)中: $L(x)$ 为拉格朗日函数; λ 表示拉格朗日乘数。对拉格朗日函数 $L(x)$ 分别关于D、N、T和 λ 求偏导,可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial L(x)}{\partial D} = \alpha AD^{\alpha-1} N^\beta T^{1-\alpha-\beta} - \lambda \delta \\ \frac{\partial L(x)}{\partial N} = \beta AD^\alpha N^{\beta-1} T^{1-\alpha-\beta} - \lambda \varepsilon \\ \frac{\partial L(x)}{\partial T} = (1 - \alpha - \beta) AD^\alpha N^\beta T^{-\alpha-\beta} - \lambda \gamma \\ \frac{\partial L(x)}{\partial \lambda} = C - \delta D - \varepsilon N - \gamma T \end{cases} \quad (5)$$

令式(5)中的4个偏导数均为0,在均衡条件下,得到D、N和T的最优解为:

$$\begin{cases} D^* = \frac{\alpha C}{\delta} \\ N^* = \frac{\beta C}{\varepsilon} \\ T^* = \frac{(1 - \alpha - \beta)C}{\gamma} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: D^* 、 N^* 与 T^* 分别表示模型均衡状态下的数字要素、生态要素与传统农业要素投入量。将式(6)代入式(2),解得均衡农业经济产出 Q^* 的表达式为:

$$Q^* = A \left(\frac{\alpha}{\delta}\right)^\alpha \left(\frac{\beta}{\varepsilon}\right)^\beta \left(\frac{1 - \alpha - \beta}{\gamma}\right)^{1-\alpha-\beta} C \quad (7)$$

将式(7)代入式(1),求得均衡状态下的农业生态效率 Eff^* 为:

$$\text{Eff}^* = A \left(\frac{\alpha}{\delta}\right)^\alpha \left(\frac{\beta}{\varepsilon}\right)^\beta \left(\frac{1 - \alpha - \beta}{\gamma}\right)^{1-\alpha-\beta} \quad (8)$$

在数字乡村发展初期,智慧农业建设处于起步阶段,传统粗放型的农业生产方式对生态资源环境造成影响,生态要素相对稀缺,获取成本相对较高。随着数字乡村发展,在生态型农业生产方式下,获取生态要素的难度下

降,生态要素的单位成本 ε 降低。即随着数字乡村发展水平的提升,模型中 δ 值越小,使得 ε 值也越小,可用隐函数 $\varepsilon(\delta)$ 表示二者的函数关系,且 $\partial\varepsilon(\delta)/\partial\delta > 0$ 。同理,数字乡村发展水平的高低也会影响传统农业要素的单位成本 γ ,在模型中用隐函数 $\gamma(\delta)$ 表示二者的函数关系,且 $\partial\gamma(\delta)/\partial\delta > 0$ 。则式(8)可变形为:

$$\text{Eff}^* = A \left(\frac{\alpha}{\delta} \right)^\alpha \left(\frac{\beta}{\varepsilon(\delta)} \right)^\beta \left(\frac{1-\alpha-\beta}{\gamma(\delta)} \right)^{1-\alpha-\beta} \quad (9)$$

基于比较静态分析方法,对式(9)中参数 δ 求偏导得:

$$\frac{\partial \text{Eff}^*}{\partial \delta} = -A \left(\frac{\alpha}{\delta} \right)^\alpha \left(\frac{\beta}{\varepsilon(\delta)} \right)^\beta \left(\frac{1-\alpha-\beta}{\gamma(\delta)} \right)^{1-\alpha-\beta} \left(\frac{\alpha}{\delta} + \frac{\beta}{\varepsilon(\delta)} \times \frac{\partial \varepsilon(\delta)}{\partial \delta} + \frac{(1-\alpha-\beta)}{\gamma(\delta)} \times \frac{\partial \gamma(\delta)}{\partial \delta} \right) < 0 \quad (10)$$

由式(10)可知,随着数字乡村发展水平不断提高,农业生态效率不断提升。因此,提出研究假设H1。

H1:数字乡村发展能够提升农业生态效率。

2.4 数字乡村发展对农业生态效率的间接作用机理

2.4.1 农村产业融合的中介作用

(1)数字乡村发展促进农村产业融合。第一,促进农业产前、产中和产后环节上的关联产业融合。数字技术有助于打破农业供应端和销售端的信息壁垒,数字要素在产前、产中和产后的应用模糊了传统产业间的边界,促使产业链延伸并实现链上不同产业融合。第二,促进农业多功能融合发展。在现代农业产业体系下,农业生产具有价值多样性,基于数字要素的信息传播功能,农旅融合、农教融合等产业形态快速发展,发掘农业的经济、社会、文化和生态功能,推动农村产业融合。第三,促进农业与服务业融合发展。利用农业生产中积累的数据资源,有助于整合农业生产全过程中所需的各项服务,提高农业技术推广、农产品营销等多种类型服务水平,通过农业服务业融合提升农业生产服务能力。第四,促进农业与新型业态融合发展^[5]。在数字乡村发展下,农业经济产出呈现产业形态多样化的发展趋势,出现认养农业、休闲农业等新兴业态,促进农村产业深度融合发展。

(2)农村产业融合促进农业生态效率提升。第一,农村产业融合促进农业生产效率提升。农业、农产品加工业、服务业及其细分行业在空间上存在交叉重叠,通过农村产业融合发展,可以有效发挥产业融合集聚的规模经济效应,促进农业资源协调配置。此外,以农业生产为基础,多产业的协同发展可有效发挥范围经济效应,降低农业生产成本,促进农业生产效率提升。第二,农村产业融合提高农业生态产品价值。农村多产业融合发展推动农业价值链向上游延伸,促使农业生态产品价值被充分挖掘,农民将更有意愿发展生态农业,减少对环境资源的消

耗。鉴于此,提出研究假设H2。

H2:数字乡村发展通过促进农村产业融合来提升农业生态效率。

2.4.2 农村居民收入的中介作用

(1)数字乡村发展提高农村居民收入。第一,有效解决农产品市场销售问题。农产品能否及时销售,是影响农民增收的直接因素。乡村产业的数字化转型有效提高了农民对接市场的能力,也降低了消费者的搜寻成本^[35],能够从根本上解决农产品销售难题,助力农村居民收入增长。第二,拓展农村居民就业渠道。在农业生产中,数字要素与其他生产要素相互协调,提高了农业生产要素的使用效率,进而节约农业生产中的劳动力,有助于其从事其他工作岗位。同时,农村居民通过数字平台能够及时获取就业信息,降低就业市场的信息不对称,增加其就业机会,从而提高农村居民收入^[36]。第三,提升农村居民数字素养。通过“干中学”效应,农村居民不断学习、积累数字经验,提升自身数字素养,从而能够更高效地利用数字技术实现增收。第四,激活农村居民社会资本价值。数字化平台的应用能够打破空间障碍和距离限制,降低农村居民的社交成本,优化农村社会网络结构,促使多主体参与乡村建设,激发农村居民创业积极性,提高其收入水平。

(2)农村居民增收提高农业生态效率。第一,农村居民增收促进农业技术进步。收入提升能够改变农民资金短缺问题,加速农业资本积累,引入先进农业技术,购买现代化农业装备,从而提升农业生态效率。第二,农村居民增收能够提升农民环保意识。随着收入水平提高,农村居民对高质量农产品的需求增加,对居住环境的生态要求提高,从而促使农民在农业生产中减少化肥、农药等要素的投入,促进生态农业发展。鉴于此,提出研究假设H3。

H3:数字乡村发展通过提高农村居民收入来提升农业生态效率。

3 实证模型设计

3.1 模型设定

3.1.1 基准回归模型

采用双向固定效应模型检验数字乡村发展对农业生态效率的影响,具体模型设定如下:

$$\ln \text{Eff}_{it} = \varphi_0 + \varphi_1 \text{Dig}_{it} + \varphi_2 X_{it} + \tau_i + \nu_t + \mu_{it} \quad (11)$$

式(11)中:下标 i 表示省份;下标 t 表示年份;Eff为农业生态效率;Dig为数字乡村发展; X 为一系列控制变量,包括农业经济发展水平、财政支农水平、环境规制政策、农业受灾情况、农村创业活跃度和城乡居民收入差距; φ 为待估参数; τ 为省份固定效应; ν 为时间固定效应; μ 为

随机干扰项。

3.1.2 中介效应模型

为进一步检验农村产业融合和农村居民收入的间接作用,参考温忠麟等^[37]的研究,在基准回归模型(11)的基础上,建立如下模型:

$$\text{Med}_i = \chi_0 + \chi_1 \text{Dig}_i + \chi_2 X_i + \tau_i + \nu_i + \mu_i \quad (12)$$

$$\ln \text{Eff}_i = \eta_0 + \eta_1 \text{Dig}_i + \eta_2 \text{Med}_i + \eta_3 X_i + \tau_i + \nu_i + \mu_i \quad (13)$$

式中:Med为中介变量,表示农村产业融合或农村居民收入; χ 和 η 为待估参数;其余变量含义与前文一致。式(12)表示数字乡村发展对中介变量的影响,式(13)表示数字乡村发展和中介变量同时对农业生态效率的影响。

3.2 变量说明

3.2.1 被解释变量:农业生态效率

由于广义农业涉及农业、林业、畜牧业和渔业等多种产业部门,不同地区各部门产值在第一产业产值中的比重差异较大,测度广义农业效率值会产生偏差^[31]。因此,本研究使用包含两种非期望产出的超效率DEA-SBM模型,测算狭义农业的生态效率,将其作为被解释变量。参考王宝义等^[25]的研究成果,从投入产出角度选择11个指标:①投入指标包括劳动力(农业从业人员)、土地(农作物播种面积)、化肥、农药、农膜使用量、农业机械总动力、有效灌溉面积和大牲畜年底数。其中,农业从业人员根据农业总产值占农林牧渔业总产值的比例对第一产业从业人员进行折算得到。②期望产出指标为农业总产值。③非期望产出指标包括农业碳排放和农业污染排放。其中,农业碳排放为化肥(氮肥、磷肥、钾肥和复合肥)、农药、农膜、柴油、农业灌溉和农业播种的碳排放总量,具体测算方法参考李波等^[38]的研究;农业污染排放采用化肥氮流失量、磷流失量、农药无效利用量和农膜残留量4类污染排放的综合指数来表征,具体算法步骤详见方永丽等^[39]的研究。

3.2.2 解释变量:数字乡村发展

目前关于数字乡村发展的测度尚无统一的测算标准,本研究结合数字乡村发展内涵,并遵循指标选取的科学性、代表性和数据可得性的基本原则,参考朱红根等^[40]的做法,从数字化资金投入、数字产业发展、数字信息基础和数字服务水平4个维度构建数字乡村发展指标体系,并使用熵权法进行测度。

数字化资金投入是数字乡村发展的经济基础。具体包括3个方面:①农业生产投资,以农林牧渔业固定资产投资来衡量;②涉农金融投资,以涉农贷款余额来衡量;③物联网等信息技术投资,以农村交通运输、仓储和邮政业固

定资产投资来衡量。

数字产业发展是数字乡村发展的核心内容。具体包括4个方面:①国家现代示范项目,以国家现代农业示范区和产业园、国家农村产业融合发展示范园、农业产业化国家重点龙头企业的总数量来衡量;②数字基地,以淘宝村占行政村的比重来衡量;③数字交易水平,以电子商务销售额和采购额来衡量;④网络支付水平,以农村普惠金融发展指数来衡量。

数字信息基础是数字乡村发展的技术支撑。具体包括5个方面:①农业气象站,以农村气象观测业务个数来衡量;②智能手机普及率,以农村每百万户年末移动电话拥有量来衡量;③计算机普及率,以农村每百万户年末计算机拥有量来衡量;④广播电视普及率,以农村有线广播电视入户率来衡量;⑤互联网普及率,以农村互联网宽带接入用户数来衡量。

数字服务水平是数字乡村发展的外源动力。具体包括3个方面:①物联网等信息技术应用服务范围,以农村投递路线长度来衡量;②数字人才服务队伍,以农业技术人员数量来衡量;③数字服务消费水平,以农村居民家庭人均交通通信消费支出来衡量。

3.2.3 中介变量:农村产业融合和农村居民收入

对于农村产业融合,参考张林等^[41]和余晋晶等^[42]的研究成果,从农业产业链延伸、农业多功能拓展、农业服务业融合、农业新业态培育和农业技术渗透5个层面衡量农村产业融合水平,具体包括:①农业产业链延伸层面的第一产业产值占比和人均农副产品加工业总产值。在农村产业融合过程中,第一产业产值占比越低,表明农业向二三产业延伸的程度越高,因此第一产业产值占比是负向指标。②农业多功能拓展层面的休闲农业发展情况和乡村非农就业占比,其中,休闲农业发展情况用休闲农业营业收入占第一产业产值比重衡量。③农业服务业融合层面的人均农林牧渔服务业产值,由农林牧渔服务业产值与农村人口数的比值计算得到。④农业新业态培育层面的设施农业面积占比,由设施农业总面积与耕地总面积的比值计算得到。⑤农业技术渗透层面的单位耕地面积的机械总动力和劳动生产率,其中,劳动生产率用第一产业总产值与第一产业从业人员的比值计算得到。在此基础上,使用熵权法测度农村产业融合水平。对于农村居民收入,使用农村居民可支配收入来衡量。

3.2.4 控制变量

本研究选取的控制变量有:①农业经济发展水平。以农林牧渔业增加值/常住人口数来表示,并参照郭为等^[43]的研究,对其取自然对数。②财政支农水平。财政支农水平代表政府对农业发展的支持力度,以地方财政

事务支农支出/农作物总面积来衡量。③环境规制政策。政府的环境规制政策可以反映对农业资源环境的管制情况,采用环境污染治理投资总额占地区生产总值的比重衡量。④农业受灾情况。农业生产具有天然弱质性,自然环境对农业生产效率直接产生影响。以农作物受灾面积/总播种面积来衡量,并取自然对数。⑤农村创业活跃度。农村创业活跃度可以较好地反映农村非农产业发展潜能,通过产业间的联动对农业生态效率产生影响。采用农村居民私营单位就业人数进行衡量,并取自然对数。⑥城乡居民收入差距。以城镇人均可支配收入/农村人均可支配收入来衡量。变量定义与描述性结果见表1。

3.3 数据来源

2011年,农业部发布了第一个全国农业农村信息化发展五年规划,加快了云计算、大数据、人工智能等新一代信息技术在农业生产、经营、管理和服务中的应用,数字乡村得以快速发展。因此,使用2011—2022年30个省份数据进行实证检验。鉴于数据的可得性,研究未涉及西藏、香港、澳门和台湾。数据主要来自《中国统计年鉴》、《中国休闲农业年鉴》、《中国农村统计年鉴》、各省份统计年鉴、农业农村部官网、北京大学数字金融研究中心及阿里研究院。个别缺失数据使用趋势填补法和插值法补齐,对与价格相关的变量以2011年为基期使用相应的价格指数进行平减。

4 实证分析

4.1 基准回归结果分析

表2中列出了逐步加入控制变量的基准回归结果。由表2可知,逐一加入控制变量,核心解释变量数字乡村发展的系数均在1%水平上显著为正,表明数字乡村发展对农业生态效率具有显著促进作用,假设H1得到验证。

控制变量方面,农业经济发展水平对农业生态效率的影响显著为正,即当农业经济发展水平高时,农民不再

只关注农业生产效率,而趋向于使用绿色集约化的生产方式,促使农业可持续发展。财政支农水平对农业生态效率的提升作用在1%水平上显著。表明政府财政对生态农业的资金支持能够有效推动生态农业发展。环境规制政策的系数显著为正,表明政府部门实施的环境监管有利于降低农业污染,促使农业生态效率提升。农作物受灾情况的系数显著为负,可能原因是农作物受灾情况越严重,对农业生态系统平衡性的影响越大,导致农业生产效率下降,资源利用效率下降,抑制农业生态效率提升。农村创业活跃度的系数显著为负,原因是随着农村产业的发展,部分非农产业可能对乡村环境造成了负面影响。城乡居民收入差距的系数在10%水平上显著为负,表明在城镇化推进下,城乡居民的收入差距不利于农业生产要素流通,在一定程度上限制了农业生态效率提升。

4.2 数字乡村发展分维度回归结果分析

进一步检验数字化资金投入、数字产业发展、数字信息基础和数字服务水平对农业生态效率的影响(表3)。回归结果表明,数字化资金投入和数字信息基础尚未对农业生态效率产生显著影响。原因可能是,数字化资金投入和数字信息基础更多涉及数字乡村发展的基础设施建设,与农业生产的直接关联性不显著。数字产业发展和数字服务水平至少在5%的显著性水平上对农业生态效率有正向影响。前者的原因在于数字产业的发展有助于乡村产业的生态化转型。将数字要素应用于乡村产业的生产、加工、运输等环节,不断优化要素组合配置,可以有效降低生产活动中对资源环境的消耗,实现乡村经济发展和生态保护的协调共进,带动农业生态效率提升。后者的原因在于数字服务是推动农业生产者学习先进生产模式的新动能,这些生产模式通常更倾向于使用科学技术发展生态农业,在农业生态效率提升中发挥重要作用。

表1 变量的描述性统计

变量类型	变量名称	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
被解释变量	农业生态效率	360	0.713	0.369	0.151	1.388
解释变量	数字乡村发展	360	0.165	0.095	0.027	0.682
中介变量	农村产业融合	360	0.181	0.096	0.034	0.680
	农村居民收入	360	1.223	0.493	0.428	3.115
控制变量	农业经济发展水平	360	1.200	0.561	-0.593	2.214
	财政支农水平	360	2.390	5.807	0.291	55.186
	环境规制政策	360	0.017	0.022	0.001	0.221
	农业受灾情况	360	2.273	0.926	-0.879	4.242
	农村创业活跃度	360	0.038	0.045	0.001	0.422
	城乡居民收入差距	360	2.550	0.382	1.827	3.672

表2 基准回归结果

变量	农业生态效率						
	核心解释变量	1个控制变量	2个控制变量	3个控制变量	4个控制变量	5个控制变量	全部变量
数字乡村发展	1.784*** (0.537)	2.424*** (0.465)	2.327*** (0.430)	2.455*** (0.418)	2.427*** (0.417)	2.299*** (0.399)	2.402*** (0.402)
农业经济发展水平		1.677*** (0.316)	1.708*** (0.308)	1.739*** (0.273)	1.721*** (0.273)	1.667*** (0.281)	1.592*** (0.261)
财政支农水平			0.011*** (0.002)	0.011*** (0.002)	0.011*** (0.002)	0.011*** (0.002)	0.012*** (0.002)
环境规制政策				2.166*** (0.662)	2.116*** (0.634)	2.486*** (0.721)	2.474*** (0.713)
农业受灾情况					-0.022 (0.017)	-0.030** (0.014)	-0.029** (0.013)
农村创业活跃度						-0.083 (0.051)	-0.103* (0.053)
城乡居民收入差距							-0.440* (0.251)
常数项	-0.504*** (0.060)	-2.401*** (0.358)	-2.435*** (0.353)	-2.515*** (0.308)	-2.426*** (0.316)	-2.698*** (0.376)	-1.502* (0.769)
省份固定效应	是	是	是	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是	是	是	是
观测值	360	360	360	360	360	360	360
R ²	0.394	0.549	0.563	0.585	0.587	0.599	0.608

注: * P<0.10, ** P<0.05, *** P<0.01; 括号内数值为聚类稳健标准误。

表3 数字乡村发展分维度的回归结果

变量	数字化资金投入	数字产业发展	数字信息基础	数字服务水平
数字化资金投入	1.782 (2.356)			
数字产业发展		2.692*** (0.440)		
数字信息基础			2.489 (2.155)	
数字服务水平				19.772** (8.843)
常数项	-1.717* (0.845)	-1.055 (0.764)	-1.609* (0.794)	-1.819** (0.823)
控制变量	是	是	是	是
省份固定效应	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是
观测值	360	360	360	360
R ²	0.522	0.604	0.526	0.551

注: * P<0.10, ** P<0.05, *** P<0.01; 括号内数值为聚类稳健标准误。

4.3 内生性检验

本研究可能产生两方面的内生性:一方面,通过构建

指标体系测度数字乡村发展水平和农业生态效率,可能存在变量的测度误差。另一方面,数字乡村发展和农业生态效率之间可能存在双向因果关系。基于此,通过核心解释变量滞后和工具变量法来缓解内生性问题。

4.3.1 核心解释变量滞后一期

数字乡村发展影响农业生态效率的同时,农业生态效率的提升也会进一步促进数字技术在农业生产中的应用、创新与推广,从而加快数字乡村发展,即可能存在双向因果关系。为缓解此问题,借鉴郭家堂等^[44]的做法,将数字乡村发展滞后一期作为核心解释变量对农业生态效率进行回归。表4的回归结果显示,数字乡村发展滞后一期的系数在1%水平上显著为正,与前文基准回归结果一致。

4.3.2 工具变量法

参照黄群慧等^[45]和陈福中等^[46]的研究,选取1984年省级层面固定电话数量和数字乡村发展滞后项作为工具变量。首先,固定电话作为传统的信息通信手段,为新一代的信息技术发展奠定了基础,因此可以反映数字乡村发展水平,满足变量相关性要求。同时,1984年的固定电话数量对当前农业生态效率的影响较弱,满足变量外生性要求。在具体分析时,参考王凤婷等^[47]的做法,使用上



表4 内生性检验结果

变量	核心解释变量	工具变量法	
	滞后一期	第一阶段	第二阶段
数字乡村发展		2.162*** (0.487)	
数字乡村发展滞后一期	2.720*** (0.491)		
数字乡村发展滞后两期		1.132*** (0.122)	
固定电话数量		0.021** (0.010)	
Kleibergen-Paap rk LM 统计量		6.236**	
Kleibergen-Paap rk Wald F 统计量		65.959	
Hansen J 检验的 P 值		0.253	
控制变量	是	是	是
省份固定效应	是	是	是
时间固定效应	是	是	是
观测值	330	300	300

注:** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$; 括号内数值为聚类稳健标准误。

一年全国农村互联网用户数与1984年的固定电话数量相乘,将截面数据转化为面板数据。其次,数字乡村发展滞后两期显然与当前的数字乡村发展水平相关,但无法直接影响当前的农业生态效率,满足工具变量的相关性和外生性要求。

工具变量法的回归结果见表4。在第一阶段中,固定电话数量和数字乡村发展滞后两期均对农业生态效率具有显著影响,即满足工具变量与数字乡村发展之间的相关性要求。在第二阶段中,使用工具变量法缓解内生性问题后,数字乡村发展对农业生态效率存在正向显著影响,与基准回归结果保持一致。此外,在工具变量有效性的检验中,Kleibergen-Paap rk LM 统计量为6.236,通过显

著性检验,拒绝不可识别的原假设;Kleibergen-Paap rk Wald F 统计量为65.959,超过10%的临界值,即不存在弱工具变量问题;Hansen J 检验的 P 值为0.253,不能拒绝原假设,即不存在过度识别问题。表明工具变量的选取是合理的。

4.4 稳健性检验

为增强结论的稳健性,采用更换被解释变量、排除其他影响因素、更换解释变量和变量缩尾处理的方式进一步验证结论(表5)。
 ①更换被解释变量。在不考虑非期望产出中农业污染排放的情况下,重新测度农业生态效率并进行回归。此外,构建广义农业生态效率指标体系,进行被解释变量替换的模型估计。广义农业生态效率的测度借鉴李谷成等^[23]和郭海红等^[48]的研究,投入指标包括劳动力(农林牧渔业从业人数)、土地(农作物播种面积)、化肥、农药、农膜使用量、农业机械总动力和有效灌溉面积;期望产出为农林牧渔业总产值;非期望产出包括农业碳排放和面源污染。其中,农业碳排放为农用物资、水稻生长和畜禽养殖的农业碳排放总量;面源污染为农田化肥、畜禽养殖、农田固废的化学需氧量和总氮(磷)排放量的综合指数。
 ②排除其他影响因素。考虑到样本研究期间碳交易试点政策实施对农业生态效率的影响^[49],本研究加入碳交易试点政策的虚拟变量进行回归。此外,考虑到农业生态效率中各投入要素的影响,在原有控制变量的基础上,进一步控制了农业从业人员、农作物播种面积、化肥、农药、农膜使用量、农业机械总动力、有效灌溉面积以及大牲畜年底数八个变量进行回归。
 ③更换解释变量。使用熵权Topsis法重新测度数字乡村发展水平,进行解释变量替换的模型估计。
 ④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。经上述的稳健性检验,数字乡村发展的估计系数均显著为正,与基准回归结果一致,表明本研究的基本结论稳健。

表5 稳健性检验结果

变量	重新测度农业生态效率	广义农业生态效率	排除碳交易试点政策影响	排除投入要素影响	更换解释变量	缩尾处理
数字乡村发展	2.338*** (0.357)	1.632*** (0.301)	2.300*** (0.375)	2.087*** (0.311)	3.186*** (0.521)	2.592*** (0.460)
常数项	-1.902** (0.742)	-2.189*** (0.659)	-1.479* (0.767)	-0.718 (0.906)	-1.876** (0.770)	-1.382* (0.788)
控制变量	是	是	是	是	是	是
省份固定效应	是	是	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是	是	是
观测值	360	360	360	360	360	360
R ²	0.622	0.495	0.612	0.680	0.623	0.603

注:* $P < 0.10$, ** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$; 括号内数值为聚类稳健标准误。

5 进一步分析

5.1 异质性分析

5.1.1 区域异质性

数字乡村发展对农业生态效率的提升效应,可能受不同区域经济发展水平影响而产生差异。因此,将样本划分为东部、中部和西部地区,三大区域的异质性检验结果见表6。可以发现,数字乡村发展对三大区域的农业生态效率均存在提升效应,但该作用仅在东部和中部地区显著,在西部地区不显著。可能原因是,东部和中部地区的经济发展水平及资源集聚度相对较高,数字化基础条件较完善,使得数字、资金和技术等生产要素流动更加有效,带来农业生产过程高效化、资源利用集约化和生产技术前沿化发展,促使农业生态效率提升。西部地区经济发展水平较低,数字化资金投入相对薄弱,在发展初期更侧重于数字乡村发展的基础设施建设,尚未对农业生态效率提升产生显著效果。

不同区域的自然环境、资源禀赋等因素可能会带来不同的环境效应,进而影响农业生态效率。因此,参照丛胜美等^[50]的研究,以秦岭—淮河线为界,进行南北地区划分,检验数字乡村发展对农业生态效率的异质性影响。从回归结果来看,南北地区数字乡村发展对农业生态效率的影响均显著,但北方地区数字乡村发展的系数大于南方地区。可能原因是:南北地区具有不同的气候、地形等环境特征,资源基础存在差异,相比南方地区,北方地区的生态环境压力较大^[51],因此,数字要素投入带来的集约化生产效果会更明显,更能降低对资源环境的消耗,从而对农业生态效率的提升作用更显著。

5.1.2 农业规模化经营程度异质性

考虑到农业规模化经营程度不同地区的农业生产效

率存在差异,数字乡村发展对农业生态效率可能产生不同的影响^[52]。因此,研究不同农业规模化经营程度下,数字乡村发展对农业生态效率的异质性影响。参考徐灏龙等^[53]的研究,以人均耕地面积衡量农业规模化经营程度,并计算其中位数将研究样本划分为高、低两组。由表6可知,在不同的农业规模化经营程度下,数字乡村发展对农业生态效率均具有显著提升作用,但在农业规模化经营程度高的地区,数字乡村发展的提升作用效果更明显。原因是,在农业规模化经营程度高的地区,经营主体多为农业专业大户、家庭农场主等新型农业生产者,对数字化信息技术的接受能力更强,更有意愿参与到智慧农业生产中。且这些地区的生产资源集聚性更强,获取农业生产要素相对容易,农业数字化应用场景丰富,从而对农业生态效率的提升效果更显著。在农业规模化经营程度低的地区,农业生产资源相对分散,数字要素、生态要素和传统农业要素的获取成本相对较高,数字乡村发展对农业生态效率的提升效应相对缓慢。

5.2 间接作用分析

为验证假设H2和H3,对农村产业融合和农村居民收入在数字乡村发展提升农业生态效率中的间接作用进行检验,结果见表7。由表7可知,数字乡村发展对农村产业融合的回归系数显著为正。在同时加入核心解释变量数字乡村发展和农村产业融合这一中介变量后,数字乡村发展系数的显著性未发生变化,但是系数值由2.402减小到2.115,且农村产业融合与农业生态效率显著相关,表明农村产业融合在数字乡村发展与农业生态效率之间具有部分中介效应,假设H2得到验证。通过数字乡村发展加快数字要素共享利用,有助于形成不同产业间的数据共享机制。作为促进农村产业融合的重要技术手段,数字化在农村产业链、价值链和供应链的整合过程中发挥关键作用,

表6 异质性检验结果

变量	东中西区域			南北区域		农业规模化经营程度	
	东部	中部	西部	南方	北方	高	低
数字乡村发展	1.813*** (0.399)	3.731** (1.361)	1.391 (3.946)	1.945*** (0.290)	3.847** (1.474)	2.862*** (0.919)	1.483*** (0.491)
常数项	-1.663** (0.628)	-3.637 (1.923)	0.110 (1.572)	-1.061 (0.943)	-2.823*** (0.911)	-3.491*** (0.732)	-0.480 (1.144)
控制变量	是	是	是	是	是	是	是
省份固定效应	是	是	是	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是	是	是	是
观测值	132	96	132	180	180	180	180
R ²	0.938	0.919	0.912	0.948	0.912	0.923	0.941

注:** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$;括号内数值为聚类稳健标准误。东部地区包括北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东和海南;中部地区包括山西、吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖北和湖南;西部地区包括内蒙古、广西、重庆、四川、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆。



表7 中介效应检验结果

变量	农业生态效率	农村产业融合		农村居民收入	
		未加入中介变量	加入中介变量	未加入中介变量	加入中介变量
数字乡村发展	2.402*** (0.402)	0.320*** (0.100)	2.115*** (0.469)	1.469*** (0.288)	1.624*** (0.465)
农村产业融合			0.898** (0.367)		
农村居民收入					0.530** (0.254)
常数项	-1.502* (0.769)	-0.356 (0.284)	-1.183 (0.800)	-0.061 (0.378)	-1.470* (0.804)
控制变量	是	是	是	是	是
省份固定效应	是	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是	是
观测值	360	360	360	360	360
R ²	0.608	0.525	0.619	0.968	0.619

注: * $P < 0.10$, ** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$; 括号内数值为聚类稳健标准误。

产生规模经济和范围经济效应,降低农业生产成本,促进农业生态效率提升。同理,农村居民收入在数字乡村发展促使农业生态效率提升中发挥中介作用,假设H3得到验证。由理论分析可知,数字乡村发展能够有效解决农产品市场销售问题,拓展农民就业渠道,提升农民数字素养,增加农民人力资本价值,从而提高了农村居民收入。随着农村居民收入的增加,农业经营者对先进技术的采用意愿和能力也随之提升,进而提高农业生态效率。

6 结论与启示

本研究分析了数字乡村发展提升农业生态效率的作用机理,并使用2011—2022年中国省级面板数据进行实证检验。得出如下结论:①数字乡村发展对农业生态效率具有显著促进作用。从数字乡村发展分维度上看,数字化资金投入、数字产业发展、数字信息基础和数字服务水平对农业生态效率具有不同的提升效应,其中,数字产业发展和数字服务水平的提升作用效果显著。②数字乡村发展对农业生态效率的影响存在区域异质性,按照东中西地区划分,在东部和中部地区,数字乡村发展对农业生态效率的提升作用显著,而在西部地区的提升作用不显著;按照南北区域划分,相较于南方地区,数字乡村发展在北方地区的提升效应更显著。此外,数字乡村发展在农业规模化经营程度高的地区对农业生态效率影响更为显著。③数字乡村发展在促进农业生态效率提升的过程中,农村产业融合和农村居民收入具有部分中介效应。

基于以上结论,得出如下启示。

第一,在加强数字基础设施建设的同时,要统筹推动数字乡村发展。在数字乡村发展初期,需要注重数字化

资金投入方向和数字信息基础设施建设。虽然这些基础设施建设对农业生态效率的提升作用尚不显著,但却是进一步推进数字乡村发展的基础。在建设基础设施的同时,还应同步推进乡村数字产业发展,提高数字服务水平,形成与基础设施建设的良性互动和协同效应,从而提高数字乡村发展水平,促进农业生态效率不断提升。

第二,不同区域政府可因地制宜制定政策,以更好发挥数字乡村发展对农业生态效率的提升作用。东部地区充分利用本地数字经济发展的有利条件,形成数字乡村发展促进农业生态效率提升的良好示范,并积极开展线上线下学习交流互动,进一步发挥技术扩散效应,促进区域间联动发展。中部地区应加大农业就业创业、技能创新应用的政策支持力度,进一步提高数字技术在农业生产领域的场景应用。西部地区充分利用国家政策支持,在提高乡村数字化资金投入和数字信息基础建设的同时,聚焦支持乡村数字产业的某些项目优先发展,发挥数字技术的普惠效应。此外,深化农村土地制度改革,完善土地流转市场,适度提高农业规模化经营水平,为智慧农业创造良好发展环境。

第三,加快促进农村产业融合并提高农村居民收入水平。持续推进乡村振兴战略,通过政策引导、企业协同、农民合作社等多主体参与至乡村产业数字化建设中,优化乡村产业结构,以增强农村产业融合水平,从而最大限度地发挥其中介作用。同时,提高乡村人才引进力度,积极开展现代化新农人的培育工作,充分发挥新农人的带动作用,以确保更多农村居民积极利用数字化信息技术来拓宽其增收渠道,从而获得乡村产业数字化转型带来的经济和生态红利。

参考文献

- [1] SCHALTEGGER S, STURM A. Ökologische rationalität: ansatzpunkte zur ausgestaltung von ökologieorientierten managementinstrumenten [J]. Die unternehmung, 1990, 44(4): 273-290.
- [2] 崔许锋, 王雨菲, 张光宏. 面向低碳发展的农业生态效率测度与时空演变分析: 基于SBM-ESDA模型[J]. 农业经济问题, 2022, 43(9): 47-61.
- [3] SALEMINK K, STRIJKER D, BOSWORTH G. Rural development in the digital age: a systematic literature review on unequal ICT availability, adoption, and use in rural areas [J]. Journal of rural studies, 2017, 54: 360-371.
- [4] 殷浩栋, 霍鹏, 汪三贵. 农业农村数字化转型: 现实表征、影响机理与推进策略[J]. 改革, 2020(12): 48-56.
- [5] 田野, 叶依婷, 黄进, 等. 数字经济驱动乡村产业振兴的内在机理及实证检验: 基于城乡融合发展的中介效应[J]. 农业经济问题, 2022, 43(10): 84-96.
- [6] 张蕴萍, 栾菁. 数字经济赋能乡村振兴: 理论机制、制约因素与推进路径[J]. 改革, 2022(5): 79-89.
- [7] 赵佳佳, 魏娟, 刘天军. 数字乡村发展对农民创业的影响及机制研究[J]. 中国农村经济, 2023(5): 61-80.
- [8] 张琛, 马彪, 彭超. 农村电子商务发展会促进农村劳动力本地就业吗?[J]. 中国农村经济, 2023(4): 90-107.
- [9] 林海, 赵路森, 胡雅琪. 数字乡村建设是否能够推动革命老区共同富裕[J]. 中国农村经济, 2023(5): 81-102.
- [10] 陈享光, 汤龙, 唐跃桓. 农村电商政策有助于缩小城乡收入差距吗: 基于要素流动和支出结构的视角[J]. 农业技术经济, 2023(3): 89-103.
- [11] 苏岚岚. 数字治理促进乡村治理效能提升: 关键挑战、逻辑框架和政策优化[J]. 农业经济问题, 2024(6): 58-75.
- [12] 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.
- [13] 李丽莉, 曾亿武, 郭红东. 数字乡村建设: 底层逻辑、实践误区与优化路径[J]. 中国农村经济, 2023(1): 77-92.
- [14] 唐建军, 龚教伟, 宋清华. 数字普惠金融与农业全要素生产率: 基于要素流动与技术扩散的视角[J]. 中国农村经济, 2022(7): 81-102.
- [15] 毛慧, 刘树文, 彭澎, 等. 数字推广与农户化肥减量: 来自陕西省苹果主产区的实证分析[J]. 中国农村经济, 2023(2): 66-84.
- [16] 洪开荣, 陈诚, 丰超, 等. 农业生态效率的时空差异及影响因素[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2016, 15(2): 31-41.
- [17] 吴振华, 雷琳. 基于三阶段DEA模型的农业土地生态效率研究: 以河南省为例[J]. 生态经济, 2018, 34(10): 76-80.
- [18] YAO X C, CHEN W W, SONG C C, et al. Sustainability and efficiency of water-land-energy-food nexus based on emergy-ecological footprint and data envelopment analysis: case of an important agriculture and ecological region in northeast China [J]. Journal of cleaner production, 2022, 379: 134854.
- [19] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis [J]. European journal of operational research, 2001, 130(3): 498-509.
- [20] 聂弯, 于法稳. 农业生态效率研究进展分析[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(9): 1371-1380.
- [21] 黄玛兰, 李晓云, 曾琳琳. 农户资本禀赋对水稻生产生态效率的影响: 以湖北省为例[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(10): 75-84.
- [22] DENG X Z, GIBSON J. Improving eco-efficiency for the sustainable agricultural production: a case study in Shandong, China [J]. Technological forecasting and social change, 2019, 144: 394-400.
- [23] 李谷成, 范丽霞, 闵锐. 资源、环境与农业发展的协调性: 基于环境规制的省级农业环境效率排名[J]. 数量经济技术经济研究, 2011, 28(10): 21-36.
- [24] 潘丹, 应瑞瑶. 中国农业生态效率评价方法与实证: 基于非期望产出的SBM模型分析[J]. 生态学报, 2013, 33(12): 3837-3845.
- [25] 王宝义, 张卫国. 中国农业生态效率的省际差异和影响因素: 基于1996—2015年31个省份的面板数据分析[J]. 中国农村经济, 2018(1): 46-62.
- [26] 侯孟阳, 姚顺波. 空间视角下中国农业生态效率的收敛性与异质特征[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(4): 116-126.
- [27] 王宝义, 张卫国. 中国农业生态效率测度及时空差异研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(6): 11-19.
- [28] 胡平波, 钟漪萍. 政府支持下的农旅融合促进农业生态效率提升机理与实证分析: 以全国休闲农业与乡村旅游示范县为例[J]. 中国农村经济, 2019(12): 85-104.
- [29] 黄玛兰, 曾琳琳, 李晓云. LCA和DEA法相结合的农业生态效率研究: 兼顾绿色认知和环境规制的影响[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2022(1): 94-104.
- [30] 张利国, 谭笑, 肖晴川, 等. 基于气候资源投入的中国农业生态效率测度与区域差异[J]. 经济地理, 2023, 43(4): 154-163.
- [31] 田伟, 杨璐嘉, 姜静. 低碳视角下中国农业环境效率的测算与分析: 基于非期望产出的SBM模型[J]. 中国农村观察, 2014(5): 59-71.
- [32] 夏显力, 陈哲, 张慧利, 等. 农业高质量发展: 数字赋能与实现路径[J]. 中国农村经济, 2019(12): 2-15.
- [33] 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.
- [34] 吕彬, 杨建新. 生态效率方法研究进展与应用[J]. 生态学报, 2006, 26(11): 3898-3906.
- [35] BAKOS Y. The emerging role of electronic marketplaces on the internet [J]. Communications of the ACM, 1998, 41(8): 35-42.
- [36] 丁建军, 万航. 中国数字乡村发展的空间特征及其农户增收效应: 基于县域数字乡村指数与CHFS的实证分析[J]. 自然资源学报, 2023, 38(8): 2041-2058.
- [37] 温忠麟, 叶宝娟. 中介效应分析: 方法和模型发展[J]. 心理科学进展, 2014, 22(5): 731-745.
- [38] 李波, 张俊彪, 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.
- [39] 方永丽, 曾小龙. 中国省际农业生态效率评价及其改进路径分析[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(1): 135-142.
- [40] 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, 44(3): 21-33.
- [41] 张林, 温涛. 数字普惠金融如何影响农村产业融合发展[J]. 中



- 国农村经济,2022(7):59-80.
- [42] 余晋晶,葛扬. 农业土地流转、农村产业融合与农民收入增长[J]. 山西财经大学学报,2023,45(9):78-93.
- [43] 郭为,王静,李承哲,等. 不患寡而患不均乎:发展旅游能促进共同富裕吗:基于CFPS(2010—2018)数据的分析[J]. 旅游学刊,2022,37(10):12-25.
- [44] 郭家堂,骆品亮. 互联网对中国全要素生产率有促进作用吗?[J]. 管理世界,2016(10):34-49.
- [45] 黄群慧,余泳泽,张松林. 互联网发展与制造业生产率提升:内在机制与中国经验[J]. 中国工业经济,2019(8):5-23.
- [46] 陈福中,蒋国海,董康银. 数字经济对制造业绿色转型的空间溢出效应[J]. 中国人口·资源与环境,2024,34(5):114-125.
- [47] 王凤婷,王浩,孔凡斌. 农村数字化发展对农业全要素碳生产率的提升效应[J]. 中国人口·资源与环境,2024,34(3):79-90.
- [48] 郭海红,刘新民. 中国农业绿色全要素生产率时空演变[J]. 中国管理科学,2020,28(9):66-75.
- [49] YU Z H, MAO S P, LIN Q N. Has China's carbon emissions trading pilot policy improved agricultural green total factor productivity?[J]. Agriculture, 2022, 12(9):1444.
- [50] 丛胜美,耿鹏鹏,罗必良. 市场化、南北差距及其根源:基于作物性质的政治经济学考察[J]. 南方经济,2022,41(1):1-18.
- [51] 许宪春,雷泽坤,窦园园,等. 中国南北平衡发展差距研究:基于“中国平衡发展指数”的综合分析[J]. 中国工业经济,2021(2):5-22.
- [52] 盖庆恩,李承政,张无珂,等. 从小农户经营到规模经营:土地流转与农业生产效率[J]. 经济研究,2023,58(5):135-152.
- [53] 徐灏龙,陆铭. 求解中国农业困局:国际视野中的农业规模经营与农业竞争力[J]. 学术月刊,2021,53(6):58-71.

Mechanisms of improving agricultural ecological efficiency through digital village development and its empirical analysis

HU Pingbo^{1,2}, LIU Jin¹

(1. School of Statistics and Data Science, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang Jiangxi 330013, China;

2. Key Laboratory of Data Science in Finance and Economics, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang Jiangxi 330013, China)

Abstract Agricultural ecological efficiency is the foundation for sustainable agricultural development, and it is of great theoretical and practical significance to study the role of digital village development in enhancing agricultural ecological efficiency. With the continuous development of digital villages, the costs of digital, ecological, and traditional agricultural factors needed for agricultural production and operation are expected to decrease, thereby facilitating the transformation of traditional agriculture to ecological agricultural production and operation modes. This study constructed a mathematical model and used the comparative static analysis method to analyze the direct mechanisms by which digital village development promoted agricultural ecological efficiency. This study also analyzed the indirect mechanisms of rural industrial integration and rural residents' income in this process. Based on this, the study used panel data from 30 Chinese provinces between 2011 and 2022 as a sample to conduct an empirical test using the two-way fixed effects model and the mediation effects model. The results showed that: ① Overall, digital village development had a significant positive effect on agricultural ecological efficiency. This conclusion remained valid after a series of robustness tests, including re-measuring the dependent variable, excluding other influencing factors, and substituting explanatory variables. Among the four dimensions of digital village development, digital industry development and digital service levels had a significant positive effect on agricultural ecological efficiency, while digital financial investment and digital information infrastructure had no significant effect. ② Heterogeneity analysis showed that digital village development had a significant positive effect on agricultural ecological efficiency in the eastern and central regions, but this effect was not significant in the western region. In northern regions and areas with a high degree of agricultural scale management, the effect of digital village development on enhancing agricultural ecological efficiency was more pronounced. ③ Digital village development primarily improved agricultural ecological efficiency by enhancing rural industrial integration and increasing rural residents' income. Therefore, in the process of digital village development, different regions need to formulate policies according to local conditions and constantly promote the mediating effects of rural industrial integration and rural residents' income to better enhance agricultural ecological efficiency.

Key words digital village; ecological efficiency; industrial integration; income; agriculture

(责任编辑:田红)