

邵喜武, 朱雪, 牛奕涵, 等. 数据要素的农业碳减排效应及其机制研究 [J]. 地理科学, 2025, 45(9): 2013–2023. [Shao Xiwu, Zhu Xue, Niu Yihan et al. Effects and mechanisms of data elements in agricultural carbon emission reduction in China. Geographical Science, 2025, 45(9): 2013–2023.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.20250113; cstr: 32176.14.geoscience.20250113

数据要素的农业碳减排效应及其机制研究

邵喜武¹, 朱雪¹, 牛奕涵¹, 官然¹, 邵诗迪²

(1. 吉林农业大学经济管理学院, 吉林 长春 130118; 2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102)

摘要: 数据要素作为数字经济时代的核心生产要素, 在各行业的碳减排发展中都发挥着重要的驱动作用。本文选择 2013—2022 年中国 30 个省(区、市)作为研究样本, 深入探究数据要素对农业碳减排的激励效应与溢出效应。首先利用普通面板回归模型分析数据要素对农业碳减排的激励效应, 然后利用中介效应模型对数据要素与农业碳排放之间的传导机制进行检验, 最后使用空间杜宾模型分析数据要素对农业碳排放的空间溢出效应, 最终得出结论: ①数据要素具有显著的环境激励效应, 能够促进区域农业碳减排。②在数据要素对农业碳排放的抑制作用中, 存在着监督效应、资源效应与成本效应的中介作用。③数据要素会对农业碳排放产生显著的溢出效应, 即数据要素在抑制本地农业碳排放的同时, 会对相邻地区的农业碳排放产生抑制作用。基于上述分析, 本文从技术创新、政策制定与数据监督 3 个方面提出了切实可行的建议。

关键词: 数据要素; 农业碳减排; 激励效应; 农业绿色低碳发展

中图分类号: F327; X24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2025)09-2013-11

近年来极端天气频发, 温室气体排放成焦点。就温室气体排放源而言, 农业生产过程中产生的温室气体排放量占据着相当大的比例^[1]。中国农业碳排放以“非二氧化碳”(甲烷与氧化亚氮)气体为主, 占据全国温室气体排放量的 70%^[2]。在保障农业高质量发展的前提下实现农业碳减排, 是亟待解决的问题。近年来, 各行业面临数字化转型, 数据要素驱动作用关键, 渗透各领域。数据要素作为一种新型生产要素, 与土地、劳动力、资本和技术并列为 5 大基础性生产要素, 同时又具有无形性、非稀缺性、易复制性等特征^[3]。在经济高质量发展与可持续低碳发展背景下, 数据要素对绿色可持续发展作用关键, 受到各国(地区)政府高度重视。2022 年以来中国出台一系列政策, 强调加强科技支撑, 利用数据要素评估减排效果, 推进农业数据开放共享, 赋能农业生产与碳足迹管理, 加强碳减排^[4-5]。由此可见, 数据要素崛起为农业绿色低碳发展指明了方向^[6]。

在数字化转型的背景下, 当前研究主要从数据和数字两方面分析碳减排路径。在数据要素赋能碳减排路径方面, 数据要素密度能显著促进城市零碳变革^[7]、抑制资源型城市碳排放^[8], 并且在影响效应中存在绿色技术创新^[9]、绿色生产力^[10]、数字生产力^[11]等方面的中介效应。在数字赋能碳减排方面, 已有研究认为数字经济^[12]、数字化转型^[13]、数字普惠金融^[14]是扎实推进城市碳减排的现实路径和关键动力。因此, 实现要素的高速流动作用, 推进城市经济低碳发展, 有利于城市碳减排, 实现“双碳”发展目标^[15]。

收稿日期: 2025-01-01; **修订日期:** 2025-05-22

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFD1501105), 吉林省社会科学基金项目(2021A17)资助。[Foundation: National Key Research and Development Program of China(2023YFD1501105), Jilin Provincial Social Science Fund Project(2021A17).]

作者简介: 邵喜武(1972—), 男, 吉林松原人, 教授, 博导, 主要从事农村发展研究。E-mail: xiwushao@126.com

通信作者: 朱雪。E-mail: xuezhu0928@126.com

综上所述, 现有研究存在以下 2 方面的不足: ①大多数文献的研究多集中于数据要素对碳排放的影响, 较少研究从农业视角分析数据要素对农业碳排放的影响。②尽管已有研究探究了数字化转型等对农业碳排放的减排效应, 但忽视了数据要素在其中的具体机制与效应。基于此, 本文以中国 30 个省份 2013—2022 年数据为研究样本, 利用中介效应模型和空间杜宾模型分析数据要素的农业碳减排效应, 以期丰富其测度理论体系, 拓展现有研究框架, 系统探讨数据要素降低农业碳排放影响效应的作用机制, 为农业绿色低碳发展及实现“双碳”目标提供理论与经验参考。

1 数据来源与模型方法

1.1 数据来源

本文以数据的有效性为前提, 统计了中国 30 个省份 2013—2022 年面板数据, 其中数据要素指标数据来源于 2014—2023 年《中国统计年鉴》^[16]、《中国信息产业年鉴》^[17]、《中国科技统计年鉴》^[18] 等。农业碳排放数据来源于 2014—2023 年《中国统计年鉴》^[16]、《中国农村统计年鉴》^[19] 以及 IPCC (<https://www.ipcc.ch/>, 数据下载日期 2024-09-27) 等机构公布的数据。其余控制变量的数据来自于《中国统计年鉴》^[16]、《中国农村统计年鉴》^[19] 以及 EPS 数据平台 (<https://www.epsnet.com.cn/>, 2024-09-27)。其中, 人均国内生产总值等增量数值取自然对数处理, 少量缺失数据采取线性插值法进行补齐。由于数据的可获取性, 最终采用 2013—2022 年中国 30 个省份的面板数据进行实证分析, 其中西藏及港澳台数据缺失较多, 不予分析。

1.2 模型设计

1.2.1 数据要素评价指标体系构建

本文立足数据要素内涵, 遵循客观、层次分明及数据可获原则, 综合前人研究, 从数据传播共享、数据应用环境、数据要素管理与数据开发应用 4 个层面选取 24 个指标^[20-21], 构建了一个全面的数据要素评价指标体系(表 1)。

1.2.2 农业碳排放测算

农业碳排放测算参考 Zhu 等^[22] 研究, 从农地利用碳排放、水稻培育碳排放、农田土壤碳排放、畜禽养殖碳排放和秸秆焚烧碳排放 5 个方面进行测算。具体测算如下: ①农地利用碳排放(E_{land})。结合农业生产实际, 从化肥施用、农膜使用、柴油消耗、灌溉、机械作业及农田翻耕等角度衡量其真实水平^[23]; ②水稻培育碳排放(E_{crop})。统计不同省份的水稻种植甲烷排放系数, 并以此为基础测度各省水稻种植的碳排放水平^[24]; ③农田土壤碳排放(E_{straw})。依据碳排放系数法选取土地种植面积测度各省农田土壤的碳排放水平^[25]; ④畜禽养殖碳排放(E_{live})。根据家庭实际养殖过程中的畜禽占比, 选取猪、牛、马、驴、骡、山羊、绵羊以及家禽(以鸡鸭等小型非反刍动物为代表)8 种常见的畜禽进行碳排放估算^[26]; ⑤秸秆焚烧碳排放(E_{burn})。选用水稻、小麦、玉米、棉花、豆类和油料等农作物产量为依据, 通过草谷比系数估算秸秆生产量, 由此计算秸秆焚烧释放的碳排放量^[27]。综上所述, 农业碳排放水平的公式表述为:

$$Agr = (E_{land} + E_{crop} + E_{straw} + E_{live} + E_{burn}) / GDP_{agri} \quad (1)$$

式中, Agr 为各省份农业碳排放水平, GDP_{agri} 为各省份农业生产总值。

1.2.3 中介变量与控制变量选取

探究数据要素对农业碳减排的激励效应机制, 本研究以监督效应、资源效应与成本效应为中介变量展开分析。监督效应通过确定区域农业碳排放水平与浓度, 并实现实时监控

表 1 数据要素评价指标体系

Table 1 Data element evaluation index system

准则层	指标层	衡量方式	属性	权重
数据传播共享	互联网网页	人均互联网网页数	+	15.495
	邮政业务	人均邮政业务量	+	9.006
	电信业务	人均电信业务量	+	4.991
	移动互联网用户	人均移动互联网用户数	+	1.124
	移动电话拥有量	人均居民年末移动电话拥有量	+	1.297
	广播节目普及程度	广播节目综合人口覆盖率	+	0.185
	电视节目普及程度	电视节目综合人口覆盖率	+	0.221
	光缆线路	光缆线路长度占建成区面积比重	+	2.055
	高等教育资源	高等学校平均在校生人数	+	1.132
数据要素管理	快递业务发展	快递业务收入占GDP比重	+	5.245
	邮政营业网点	人均邮政营业网点数量	+	1.627
	信息技术服务	信息技术服务收入占GDP比重	+	7.264
	数字产业发展	新产品销售收入占GDP比重	+	4.480
	数字普惠金融	数字普惠金融指数	+	1.344
	电子商务规模	电子商务销售额占GDP比重	+	3.530
	企业信息化	有电子商务交易活动的企业占比	+	1.310
	高技术产业机构	人均高技术产业机构数	+	3.943
数据开发应用	高技术产业项目	人均高技术产业项目数	+	4.987
	高技术产业R&D经费	人均高技术产业R&D经费支出	+	5.884
	高技术产业专利申请	人均高技术产业专利申请数	+	4.996
	高技术产业R&D人员	高技术产业R&D人员全时当量	+	8.794
	互联网域名	人均互联网域名数	+	7.710
	互联网宽带接入端口	人均互联网宽带接入端口数	+	1.403
	财政科学技术与教育支出	科学技术与教育支出占财政支出比重	+	1.979

反馈, 增强数据要素降碳效果^[28], 故监督效应使用每万平方公里内环境气象观测站个数来衡量。资源效应通过资金投入推动数字技术研发应用, 提升农业生产效率与资源利用率以实现碳减排^[29]。因此, 本文的资源效应使用农业固定资产投资占全社会固定资产投资的比重来计算。成本效应通过支持农业数字化基建、技术研发推广及环境监测管理, 强化数据要素碳减排应用效果, 推动农业低碳转型与可持续发展^[30]。本研究成本效应使用农林水事务支出占一般预算支出的比重来测度。

为避免遗漏重要解释变量对实证检验结果造成偏差, 本文参考相关文献, 选取的控制变量及衡量指标如下: ①农村基础设施建设水平(*Inf*): 取农村人均宽带接入用户数的对数值^[31]; ②农村医疗服务水平(*Med*): 以农村每万人村卫生室数量表征^[32]; ③经济发展水平(*Eco*): 用各省人均国内生产总值的对数值表示^[33]; ④人力资本水平(*Hum*): 以各省份高等学校在校生人数占总人口比重表征^[27]; ⑤技术市场发展水平(*Tec*): 取技术市场成交额占地区生产总值比重表示^[29]; ⑥人口密度(*Pop*): 以各省常住人口与建成区面积比重来表征^[30]。

1.2.4 中介效应模型

中介效应模型是探讨变量作用机制传导路径的常用且高效量化工具。为验证数据要素与农业碳排放的影响中是否存在中介变量的传导路径, 本文采用因果逐步回归检验法构建中介效应模型, 引入监督效应、资源效应与成本效应作为中介变量。其数学表达式如下:

$$Agr_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Data_{it} + \beta_1 Inf_{it} + \beta_2 Med_{it} + \beta_3 Eco_{it} + \beta_4 Hum_{it} + \beta_5 Tec_{it} + \beta_6 Pop_{it} + \mu_i + \sigma_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

$$M_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Data_{it} + \beta_1 Inf_{it} + \beta_2 Med_{it} + \beta_3 Eco_{it} + \beta_4 Hum_{it} + \beta_5 Tec_{it} + \beta_6 Pop_{it} + \mu_i + \sigma_t + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

$$Agr_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Data_{it} + \eta M_{it} + \beta_1 Inf_{it} + \beta_2 Med_{it} + \beta_3 Eco_{it} + \beta_4 Hum_{it} + \beta_5 Tec_{it} + \beta_6 Pop_{it} + \mu_i + \sigma_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

式中, Agr_{it} 是地区 i 在 t 时间的农业碳排放水平, $Data_{it}$ 是地区 i 在 t 时间的数据要素水平, Inf_{it} 、 Med_{it} 、 Eco_{it} 、 Hum_{it} 、 Tec_{it} 和 Pop_{it} 分别表示地区 i 在 t 时间内的农村基础设施建设水平、农村医疗服务水平、经济发展水平、人力资本水平、技术市场发展水平和人口密度。 $\beta_n (n=1, 2, \dots, 6)$ 为控制变量 n 的回归系数, α_0 为回归模型的常数项, α_1 为数据要素的回归系数, η 为中介变量系数, μ_i 是双重固定中的个体固定效应, σ_t 是时间固定效应, ε_{it} 是干扰项。 M_{it} 为中介变量, 分别表示城市 i 在 t 时间的监督效应、资源效应与成本效应指标。

1.2.5 空间溢出效应模型

数据要素在空间位置中的流动会使区域间产生联动效应, 忽略空间因素在数据要素与农业碳减排联系中的影响, 会使研究结论不够深刻, 甚至产生偏差。而空间杜宾模型可以将数据要素与农业碳排放的空间相关性纳入解释范围, 准确地梳理空间溢出效应与空间滞后变量的影响, 因此本文使用空间杜宾模型进行空间溢出效应分析, 其数学表达式为:

$$Agr_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Data_{it} + \rho W \times Data_{it} + \sum_{n=1}^m \beta_n Con_{it} + \sum_{n=1}^m \rho_n W \times Cont_{it} + \mu_i + \sigma_t + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

式中, W 为空间权重矩阵, $W \times Data_{it}$ 是数据要素的空间滞后项, ρ 为数据要素空间滞后项的回归系数, $W \times Con_{it}$ 是控制变量空间滞后项, m 为控制变量的个数, $\rho_n (n=1, 2, \dots, m)$ 为控制变量 n 空间滞后项的回归系数。

2 实证分析

2.1 数据要素对农业碳减排的激励效应

2.1.1 基准回归结果检验

不加入控制变量的基准回归结果如公式(6)所示, 数据要素对农业碳排放的回归结果是-1.719, 并且在 1% 的水平下显著, 表明数据要素对农业碳排放存在显著的抑制作用。加入控制变量后重新进行回归得到公式(7)的数据, 回归结果为-0.574, 同样在 1% 的水平下显著, 该结果仍然证明数据要素对农业碳排放会产生抑制作用。

$$Agr_{it} = -1.719 \times Data_{it} + 1.058 \quad (6)$$

$$Agr_{it} = -0.574 \times Data_{it} + 0.079 \times Inf_{it} - 0.025 \times Med_{it} - 0.351 \times Eco_{it} - 22.521 \times Hum_{it} + 2.208 \times Tec_{it} + 0.246 \times Pop_{it} + 2.881 \quad (7)$$

2.1.2 稳健性检验

为提高研究结论的可信度, 本文分别使用改变样本容量法、调整样本期、增加控制变量、改变数据要素测度方式和模型替换法进行稳健性检验(表 2)。在进行稳健性检验时, 本文将剔除北京、上海、广东后的检验结果记于模型(1)中, 将样本期在 2013—2022 年的检验结果记于模型(2), 增加农村消费能力作为控制变量后检验结果记于模型(3), 将熵值法替换数据要素 TOPSIS 的测算方法后的检验结果记于模型(4), 采用混合效应的面板回归模型替换原有模型的检验结果记于模型(5)。观察表中数据可知, 数据要素对农业碳排放的回归结果为负且在 1% 水平下显著, 与基准回归一致, 表明研究的统计模型及估计结果具有稳健性。

表 2 基准回归稳健性检验结果

Table 2 Benchmark regression robustness test

变量	模型(1)	模型(2)	模型(3)	模型(4)	模型(5)
数据要素	-1.010 ^{***} (-4.82)	-0.567 ^{***} (-3.67)	-1.525 ^{***} (-4.97)	-0.385 ^{***} (-2.92)	-1.338 ^{***} (-5.75)
农村基础设施建设水平	0.134 ^{***} (3.53)	0.053(1.52)	0.085 ^{**} (2.58)	0.070 ^{**} (2.06)	-0.146 ^{***} (-3.58)
农村医疗服务水平	-0.023 ^{***} (-3.12)	-0.027 ^{***} (-3.84)	-0.025 ^{***} (-3.63)	-0.027 ^{***} (-3.84)	-0.006 [*] (-1.67)
人力资本水平	-19.254 ^{***} (-6.45)	-23.458 ^{***} (-8.45)	-22.350 ^{***} (-8.42)	-24.045 ^{***} (-8.94)	-10.132 ^{***} (-3.77)
技术市场发展水平	1.673 ^{***} (3.01)	2.001 ^{***} (3.97)	1.997 ^{***} (3.95)	2.123 ^{***} (3.94)	1.222 ^{**} (2.03)
经济发展水平	-0.415 ^{***} (-7.23)	-0.298 ^{***} (-5.56)	-0.353 ^{***} (-6.78)	-0.354 ^{***} (-6.49)	-0.286 ^{***} (-6.73)
人口密度	0.206 ^{**} (2.48)	0.123(1.53)	0.322 ^{***} (4.20)	0.276 ^{***} (3.67)	-0.326 ^{***} (-6.63)
农村消费能力			0.161 ^{***} (3.49)		
常数项	3.749 ^{***} (4.45)	3.382 ^{***} (4.16)	2.234 ^{***} (2.86)	2.663 ^{***} (3.40)	6.510 ^{***} (9.96)
样本数	270	270	300	300	300
R-squared	0.781	0.767	0.779	0.762	0.521
研究个体数	27	30	30	30	30

注: 括号内为t值, ***为P<0.01, **为P<0.05, *为P<0.10; 空白为无此项; 未含西藏及港澳台数据。

2.1.3 异质性检验

为了厘清数据要素对农业碳排放的影响是否存在区域异质性, 本文将研究区域划分为东部、中部与西部地区^①, 对不同地区数据要素与农业碳排放的关系进行检验, 得到模型(6)~(8)(表3)。数据显示, 数据要素对碳排放的检验系数在东部、中部与西部分别为-0.443、-2.338与-2.407, 均在1%的水平下显著, 表明数据要素在3大区域均能抑制农业碳排放, 但抑制作用呈现出“西部>中部>东部”的异质性特征。导致上述现象的原因是: 东部地区的水稻种植是主要碳源, 其排放量占全国农业碳排放量比重较大, 且现代农业起步早、生产结构稳定, 难以通过优化结构的途径降低碳排放, 故数据要素抑制效应较弱; 西部受经济与气候条件限制, 农业碳排放强度低, 在从传统农耕向现代化转型中, 数据要素流动推动耕作方式绿色低碳化, 也使得生产者的低碳意识得以持续提升, 因此碳减排效应最显著。

表 3 基准回归异质性检验结果

Table 3 Results of benchmark regression heterogeneity test

变量	模型(6)	模型(7)	模型(8)
数据要素	-0.443 ^{***} (-2.82)	-2.338 ^{***} (-2.83)	-2.407 ^{***} (-5.90)
农村基础设施建设水平	-0.030 (-0.92)	-0.168 (-1.53)	0.291 ^{***} (4.58)
农村医疗服务水平	-0.008 (-1.00)	-0.037 [*] (-1.80)	0.004 (0.35)
人力资本水平	-12.020 ^{***} (-3.98)	-10.052 (-1.11)	-14.548 ^{***} (-2.95)
技术市场发展水平	0.898 (1.47)	1.759 (1.60)	1.212 (1.35)
经济发展水平	-0.073 (-1.20)	-0.258 ^{**} (-2.23)	-0.560 ^{***} (-5.09)
人口密度	0.092 (1.44)	-0.787 ^{**} (-2.34)	0.296 ^{**} (2.63)
常数项	0.947 (1.32)	10.535 ^{***} (3.92)	4.088 ^{***} (3.01)
样本数	110	80	110
R-squared	0.767	0.750	0.892
研究个体数	11	8	11

注: 括号内为t值, ***为P<0.01, **为P<0.05, *为P<0.10; 未含西藏及港澳台数据。

① 根据《中共中央、国务院关于促进中部地区崛起的若干意见》和《国务院发布关于西部大开发若干政策措施的实施意见》将研究区域划分为东部地区(北京、天津、河北、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、海南和辽宁)、中部地区(山西、安徽、江西、河南、湖北、湖南、吉林和黑龙江)与西部地区(内蒙古、广西、重庆、四川、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆)。

2.2 数据要素对农业碳减排激励效应作用机制检验

2.2.1 成本效应

利用中介效应模型检验成本效应在数据要素影响农业碳排放过程中的中介作用(表 4)。模型(9)~(11)均在 1% 的水平下显著。模型(9)中,数据要素对农业碳排放的检验系数是-0.574,呈显著抑制作用;模型(10)中,数据要素对成本效应的检验系数是 2.111,呈显著促进作用;模型(11)控制成本效应后,数据要素与成本效应对农业碳排放的系数分别为-0.407、-0.079,表明成本效应会促进数据要素的碳减排作用。主要原因是:数据要素投入会增加农林水事务支出比重,数据要素会通过优化成本投入的资源分配方式,减少财政支出的合规成本,进而降低农业生产能耗、物耗与资源浪费,最终实现碳减排。

2.2.2 资源效应

将中介变量换为资源效应,利用中介效应模型重复上述检验(表 5)发现,模型(12)中数据要素对农业碳排放存在显著抑制作用;模型(13)中数据要素对资源效应有显著促进作用;模型(14)加入资源效应后,数据要素对农业碳排放存在 1% 的水平下呈显著抑制作用,但数值较模型(12)有所降低,而资源效应对农业碳排放的系数为-0.701,亦在 1% 的水平下呈显著抑制作用。综上所述,资源效应在数据要素对农业碳排放的抑制作用中存在中介效应。这是因为数据要素流动提升了农业生产信息透明度,大数据与人工智能等技术可精准测度土壤湿度、作物生长状况、农机效率等数据,从而实现优化资源配置,减少因资源错配产生的额外碳排放。

2.2.3 监督效应

表 6 为监督效应作为中介变量时的机制检验结果,模型(15)~(17)均在 1% 的水平下显著。模型(15)显示,数据要素对农业碳排放呈显著抑制作用;模型(16)表明,数据要素对监督效应呈显著促进作用;模型(17)中,数据要素与监督效应对农业碳排放的系数分别为-0.703、-0.033,说明监督效应是数据要素抑制农业碳排放的中介变量。导致上述现象的原因是:基于数据要素的大数据平台能够高效搜集、分析农业生产数据,助力农业部门实时监控种植与农业碳排放情况。结合数字分析工具实现精准监控,为政策调整与资源配置提供了依据,进而促进农业碳减排。

2.3 空间溢出效应检验

2.3.1 基准回归

本文通过空间杜宾模型探究数据要素对农业碳排放的空间溢出效应,结果如公式(8)所示。主效应回归显示,数据要素对本地农业碳排放的系数为-0.435,溢出效应系数为-4.444,二者均在 1% 的水平下显著,由此可知,数据要素在抑制本地农业碳排放的同时,亦会显著抑制相邻地区农业碳排放。导致上述情况的原因是,数据要素的高效利用能够优化农业生产流程,减少资源浪费,进而降低碳排放。同时,数据要素的流动和共享也促进

表 4 成本效应机制检验结果

Table 4 Cost-effectiveness mechanism test			
变量	模型(9)	模型(10)	模型(11)
数据要素	-0.574*** (-3.97)	2.111*** (7.03)	-0.407*** (-2.62)
成本效应			-0.079*** (-2.69)
农村基础设施建设水平	0.079** (2.35)	0.070 (1.01)	0.084** (2.54)
农村医疗服务水平	-0.025*** (-3.67)	-0.033** (-2.27)	-0.028*** (-4.05)
人力资本水平	-22.521*** (-8.31)	1.280 (0.23)	-22.419*** (-8.37)
技术市场发展水平	2.208*** (4.30)	-5.250*** (-4.92)	1.793*** (3.38)
经济发展水平	-0.351*** (-6.61)	-0.121 (-1.09)	-0.360*** (-6.85)
人口密度	0.246*** (3.27)	-1.050*** (-6.73)	0.163** (2.02)
常数项	2.881*** (3.72)	15.617*** (9.71)	4.115*** (4.62)
R-squared	0.768	0.654	0.775

注:括号内为t值,***为P<0.01,**为P<0.05,样本数为300;研究个体数为30;空白为无此项;未含西藏及港澳台数据。

表 5 资源效应机制检验结果				表 6 监督效应机制检验结果			
Table 5 Test of resource effect mechanism				Table 6 Test of supervision and effect mechanism			
变量	模型(12)	模型(13)	模型(14)	变量	模型(15)	模型(16)	模型(17)
数据要素	-0.574*** (-3.97)	0.176*** (2.90)	-0.697*** (-4.96)	数据要素	-0.574*** (-3.97)	3.938*** (5.08)	-0.703*** (-4.71)
资源效应			-0.701*** (-4.98)	监督效应			-0.033*** (-2.89)
农村基础设施建设水平	0.079** (2.35)	-0.019 (-1.33)	0.092*** (2.85)	农村基础设施建设水平	0.079** (2.35)	0.038 (0.21)	0.077** (2.34)
农村医疗服务水平	-0.025*** (-3.67)	-0.009*** (-3.27)	-0.019*** (-2.78)	农村医疗服务水平	-0.025*** (-3.67)	-0.020 (-0.53)	-0.025*** (-3.63)
人力资本水平	-22.521*** (-8.31)	-4.881*** (-4.30)	-19.098*** (-7.11)	人力资本水平	-22.521*** (-8.31)	-2.178 (-0.15)	-22.449*** (-8.40)
技术市场发展水平	2.208*** (4.30)	0.722*** (3.36)	1.702*** (3.39)	技术市场发展水平	2.208*** (4.30)	4.257 (1.55)	2.068*** (4.07)
经济发展水平	-0.351*** (-6.61)	0.004 (0.20)	-0.354*** (-6.96)	经济发展水平	-0.351*** (-6.61)	0.192 (0.67)	-0.357*** (-6.81)
人口密度	0.246*** (3.27)	0.123*** (3.92)	0.159** (2.15)	人口密度	0.246*** (3.27)	-1.094*** (-2.72)	0.282*** (3.75)
常数项	2.881*** (3.72)	-0.748** (-2.31)	3.406*** (4.55)	常数项	2.881*** (3.72)	9.234** (2.23)	2.578*** (3.35)
R-squared	0.768	0.448	0.788	R-squared	0.768	0.520	0.776

注: 括号内为t值, ***P<0.01, **P<0.05; 样本数为300; 研究个体数为30; 空白为无此项; 未含西藏及港澳台数据。

了农业技术创新和知识扩散, 相邻地区通过学习和模仿先进的数据应用模式, 也能有效降低自身的农业碳排放。

$$\begin{aligned} Agr_{it} = & -0.435 \times Data_{it} - 0.103 \times Inf_{it} + 0.172 \times Med_{it} + 0.150 \times Hum_{it} - 3.772 \times Tec_{it} + \\ & 0.439 \times Eco_{it} - 4.444 \times W \times Data_{it} + 0.192 \times W \times Inf_{it} + 1.611 \times W \times Med_{it} + \\ & 1.462 \times W \times Hum_{it} - 11.735 \times W \times Tec_{it} - 2.523 \times W \times Eco_{it} + 6.910 \end{aligned}$$

(8)

2.3.2 溢出效应

上述分析表明数据要素对农业碳排放存在显著空间溢出效应, 因此, 本文通过偏微分方程将其分解为直接、间接与总效应(表 7)。其中, 直接效应的系数为-4.417, 表明数据要素对本地农业碳排放有显著抑制作用; 间接效应系数为-1.692, 表明其对邻近省份农业碳排放存在显著负向影响; 总效应系数为-6.108, 表明数据要素对全国农业碳排放有显著抑制作用。形成上述现象的原因主要是数据要素通过技术溢出与政策扩散形成双重减排机制; 直接效应中, 物联网、AI 等技术优化本地资源配置, 精准施肥减少过量投入, 直接降低碳排放; 间接效应源于区域竞争与学习, 数字农业

表 7 空间溢出效应检验结果			
Table 7 Spatial spillover effect test			
变量	直接效应	间接效应	总效用
数据要素	-4.417*** (-22.12)	-1.692*** (-10.71)	-6.108*** (-53.96)
农村基础设施建设水平	0.071 (1.60)	-0.085* (-1.92)	-0.014 (-0.45)
农村医疗服务水平	-0.172*** (-29.09)	-0.052*** (-11.01)	-0.224*** (-68.28)
人力资本水平	-1.504*** (-30.04)	-0.514*** (-15.69)	-2.018*** (-84.84)
技术市场发展水平	3.206*** (10.92)	-1.282*** (-4.66)	1.924*** (10.33)
经济发展水平	-0.287*** (-4.51)	0.549*** (9.13)	0.262*** (11.13)

注: 括号内为t值, ***为P<0.01, *为P<0.10; 未含西藏及港澳台数据。

试点成果通过政策模仿、技术扩散等方式外溢至邻近省份,形成“技术示范-邻近采纳”链条;总效应体现出数据要素既重塑了本地生产方式,又构建全国低碳农业网络,其抑制效应为技术革新与政策协同的空间多维映射。

2.3.3 稳健性检验

为确保数据要素对农业碳排放空间溢出效应结果的可信度,本文通过一阶空间权重矩阵替换二阶矩阵回归、空间邻接权重矩阵替换二阶矩阵回归、熵值法替换数据要素的TOPSIS 测算方式回归 3 种方式进行稳健性检验(表 8)。结果显示,主效应与溢出效应回归系数均为负值,且至少在 10% 水平下显著,表明数据要素对本地农业碳排放有显著抑制作用,且存在负向空间溢出效应,与基准回归结果一致,可以证明结论具有稳健性。

表 8 空间溢出效应稳健性检验结果

Table 8 Results of robustness test for spatial spillover effect						
变量	稳健性检验方法(1)		稳健性检验方法(2)		稳健性检验方法(3)	
	主效应	溢出效应	主效应	溢出效应	主效应	溢出效应
数据要素	-0.485* (-1.92)	-3.474*** (-3.29)	-0.165** (-2.53)	-4.781*** (-3.78)	-1.654*** (-22.96)	-24.013*** (-70.65)
税负水平	-0.686*** (-7.05)	-0.423 (-1.09)	-0.751*** (-6.37)	0.195 (0.58)	0.331*** (10.28)	-0.374** (-2.48)
交通基础设施水平	-0.012*** (-4.54)	0.086*** (8.43)	-0.023*** (-7.56)	0.083*** (6.11)	-0.015*** (-15.72)	0.023*** (4.82)
人力资本水平	-3.307 (-1.55)	2.078 (0.29)	-9.358*** (-3.34)	-33.492*** (-3.67)	0.376*** (53.28)	5.469*** (125.56)
技术市场发展水平	-1.461*** (-3.22)	2.409 (1.26)	0.236 (0.35)	0.662 (0.34)	-7.690*** (-43.76)	-71.764*** (-81.50)
人口密度	-0.372*** (-9.43)	0.785*** (6.12)	-0.330*** (-6.87)	1.287*** (10.31)	-0.374** (-2.47)	-3.742*** (-7.86)
rho	0.309*** (2.80)		0.550*** (6.43)		4.183*** (65.79)	
sigma2_e	0.019*** (12.18)		0.024*** (11.85)		0.002*** (11.71)	
R-squared	0.830		0.755		0.725	

注:括号内为t值,***为P<0.01,**为P<0.05,*为P<0.1;样本数为300;研究个体数为30;未含西藏及港澳台数据。

3 结论与建议

3.1 结论

本文统计了 2013—2022 年中国 30 个省(区、市)的样本数据,利用普通面板回归模型探究了数据要素与农业碳排放之间的关系,通过中介效应模型深入分析了数据要素与农业碳排放之间的影响机制,最后借助空间杜宾模型讨论了数据要素对农业碳排放的空间溢出效应,得出如下结论:①数据要素具有显著的环境激励效应,能够促进区域农业碳减排。本文通过分析普通面板回归模型结果发现,数据要素对农业碳排放的回归系数显著为负,由此证明数据要素能够明显抑制地区农业碳排放,碳减排效应明显。②数据要素对农业碳排放的抑制作用中,存在监督效应、资源效应与成本效应的中介作用。就作用机制而言,监督效应、资源效应与成本效应在数据要素影响农业碳排放的传导路径中扮演着重要角色。中介效应模型的回归结果表明,在加入上述变量作为中介变量后,数据要素对农业碳排放的回归结果产生了显著变化,在上述变量的作用下,数据要素对农业碳排放的抑制

作用呈现出减弱或增强的特征,由此证明了数据要素在农业碳排放的影响中存在监督效应、资源效应与成本效应的中介作用。③数据要素会对农业碳排放产生显著的溢出效应。本文在利用空间杜宾模型进行回归分析时发现数据要素对农业碳排放的主效应系数显著为负,溢出效应系数显著为负,这表明数据要素在抑制本地农业碳排放的同时,会对邻域农业碳排放水平产生抑制作用。后续对空间溢出效应的分解中也证明了上述结论。

3.2 建议

根据上述结论,加强数据要素减排效应,构建“技术创新-政策激励-数据监督”三位一体的减排体系。本文围绕技术创新、政策制定与数据监督 3 个方面提出如下建议:①推进农村生产活动数字化转型,实现农业碳减排发展目标。一方面,在农机设备中可集成北斗定位与碳传感器模块,实时采集耕作、播种、收割环节的碳排放数据。例如,在插秧机作业过程中同步监测单位面积柴油消耗及尾气排放量,通过边缘计算生成碳足迹热力图。另一方面,打造 AI 驱动的精准确管理模型,基于数字化技术设定动态优化农药投入方案。例如华北小麦主产区试点数据显示,该方案可使氮肥利用率提升 25%,灌溉水量减少 18%,同步降低温室气体排放。因此,可在全国范围内推广该方案,更精准实现农业碳减排。②因地制宜制定农业发展政策,动态激励农业碳减排。一方面,实施阶梯式技术补贴政策。对采用智能灌溉系统的农户,可按减排量分档给予 30%~70% 的设备购置补贴;对参与碳汇交易的新型农业经营主体,提供 5 a 期的低息贷款支持。在上述政策中,可将村集体作为对象进行考察实施。另一方面,设立专项基金或提供税收优惠,鼓励数字产业进行创新发展,同时减轻农业生产部门的数据应用成本,通过设立激励机制,促进农业生产部门主动寻求数字化路径,积极加入农业碳减排行列。③搭建数字化监测网络,形成数字驱动型农业碳减排体系。第一,部署多源遥感监测体系,推进农业环境监测基站建设,结合无人机低空遥感,构建“天基监测-空基核查-地面传感”的 3 级网络。黑龙江三江平原试点数据表明该技术组合可使秸秆焚烧监测精度达 95%。第二,建设农业碳大数据中枢。整合气象、土壤、生产等多源数据,构建国家级农业碳账户平台,形成“田块-县域-省域”3 级数字孪生系统,为政策制定提供动态决策支持。

参考文献(References):

- [1] Liu L C, Hu X T, Li L X et al. Understanding China's agricultural non-carbon-dioxide greenhouse gas emissions: Subnational insights and global trade dynamics[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2024, 106: 107487.
- [2] 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. [Jin Shuqin, Lin Yu, Niu Kunyu. Promoting green transformation of agriculture through low carbon: Characteristics of China's agricultural carbon emissions and its emission reduction paths. *Reform*, 2021(5): 29-37.]
- [3] 朱高立, 张建, 范业婷, 等. 环境规制对资源型城市资源错配的影响及其空间异质性 [J]. *地理科学*, 2025, 45(6): 1182-1192. [Zhu Gaoli, Zhang Jian, Fan Yeting et al. Impact of environmental regulation on resource misallocation in resource-based cities. *Geographical Science*, 2025, 45(6): 1182-1192.]
- [4] 李鹏, 胡思洋, 薛秋霖. 社会救助数字信息平台金融大数据应用困境、生成逻辑与治理研究——一个迈向合作治理的系统分析框架 [J]. *兰州学刊*, 2025(1): 95-109. [Li Peng, Hu Siyang, Xue Qiuji. Research on dilemmas, formation logic and governance of financial big data application in social assistance digital information platform—A system analysis framework towards cooperative governance. *Lanzhou Academic Journal*, 2025(1): 95-109.]
- [5] 谢艳乐, 毛世平. 数字技术如何驱动农业全产业链融合发展——来自西瓜特色产业的经验证据 [J]. *中国农村经济*, 2024(10): 64-83. [Xie Yanle, Mao Shiping. How digital technology drives integrated development of the whole agricultural industry chain—Empirical evidence from the characteristic watermelon industry. *Chinese Rural Economy*, 2024(10): 64-83.]
- [6] 王琪. 数据要素与高质量出版双向驱动——从新质生产力出发 [J]. *河南大学学报 (社会科学版)*, 2024, 64(6): 129-35+56. [Wang Qi. Two-way driving of data elements and high-quality publishing—Starting from new productive forces. *Journal of Henan University (Social Science Edition)*, 2024, 64(6): 129-135+56.]
- [7] 庞磊, 焦世杰. 数据要素密度、产业链数智固碳与中国零碳变革 [J]. *商业研究*, 2025(1): 20-28. [Pang Lei, Jiao Shijie. Data element density, digital-intelligent carbon sequestration in industrial chains and China's zero-carbon transformation.]

- tion. *Commercial Research*, 2025(1): 20-28.]
- [8] 郭家堂, 骆品亮. 数据要素对县级资源型城市低碳化发展的影响及其机制——来自省级公共数据开放平台的证据 [J]. *资源科学*, 2024, 46(10): 1944-1958. [Guo Jiatang, Luo Pinliang. Impact of data elements on low-carbon development of county-level resource-based cities and its mechanism—Evidence from provincial public data open platforms. *Resources Science*, 2024, 46(10): 1944-1958.]
- [9] Liu X, He Z, Deng Z X et al. Analysis of spatiotemporal disparities and spatial spillover effect of a low-carbon economy in Chinese provinces under green technology innovation[J]. *Sustainability*, 2024, 16(21): 9434.
- [10] 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. [Tian Hongyu, Guan Honglang. Research on the impact of digital economy on carbon emissions from grain production—Empirical evidence from 108 prefecture-level cities in the Yangtze River Economic Belt. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(8): 145-157.]
- [11] 杜传忠, 曹效喜, 刘书彤. 数据要素市场化与地区绿色低碳发展——来自数据交易平台建设的准自然实验 [J]. *经济与管理研究*, 2025, 46(4): 25-44. [Du Chuansong, Cao Xiaoxi, Liu Shutong. Marketization of data elements and regional green and low-carbon development—A quasi-natural experiment from data trading platform construction. *Research on Economics and Management*, 2025, 46(4): 25-44.]
- [12] 王圣云, 房方, 王石. 数字经济对中国省域人类福祉碳强度的影响及空间溢出效应分析 [J]. *地理科学*, 2025, 45(5): 950-962. [Wang Shengyun, Fang Fang, Wang Shi. Impact and spatial spillover effect of digital economy on carbon intensity of human well-being in China. *Geographical Science*, 2025, 45(5): 950-962.]
- [13] 马少娟, 何卓, 许勇. 数字化建设、平台经济与全要素碳生产率 [J]. *统计与信息论坛*, 2025, 40(5): 47-59. [Ma Shaojuan, He Zhuo, Xu Yong. Digitization construction, platform economy and total factor carbon productivity. *Journal of Statistics and Information*, 2025, 40(5): 47-59.]
- [14] Wang C Y, Liu H F, Ma S L. Analysis of the effect of digital financial inclusion on agricultural carbon emissions in China[J]. *Global Nest Journal*, 2024, 26(8): 06313.
- [15] He Z, Ma S J, Deng Z X et al. Carbon emission reduction enabled by informatization construction: An analysis of spatial effects based on China's experience[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, 31(24): 35595-35608.
- [16] 国家统计局. 中国统计年鉴 [M]. 2014—2023. 北京: 中国统计出版社, 2014—2023. [National Bureau of Statistics. China statistical yearbook. 2014—2023. Beijing: China Statistics Press, 2014—2023.]
- [17] 工业和信息化部. 中国信息产业年鉴 [M]. 2014—2023. 北京: 中国工信出版社, 2014—2023. [Ministry of Industry and Information Technology. China information industry yearbook. Beijing: China Industrial and Information Technology Press, 2014—2023.]
- [18] 科学技术部. 中国科技统计年鉴 [M]. 2014—2023. 北京: 中国统计出版社, 2014—2023. [Ministry of Science and Technology. China science and technology statistical yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2014—2023.]
- [19] 国家统计局. 中国农村统计年鉴 [M]. 2014—2023. 北京: 中国统计出版社, 2014—2023. [National Bureau of Statistics. China rural statistical yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2014—2023.]
- [20] 陈晔婷, 何思源, 刘金涛, 等. 政策赋能、数据要素配置与新质生产力 [J]. *统计与决策*, 2024, 40(19): 31-37. [Chen Yeting, He Siyuan, Liu Jintao et al. Policy empowerment, allocation of data elements and new productive forces. *Statistics & Decision*, 2024, 40(19): 31-37.]
- [21] 任保平, 李婧瑜. 数据成为新生产要素的政治经济学阐释 [J]. *当代经济研究*, 2023(11): 5-17. [Ren Baoping, Li Jingyu. A political economy interpretation of data as a new production factor. *Contemporary Economic Research*, 2023(11): 5-17.]
- [22] Zhu X, Shao X W. Spatiotemporal evolution of agricultural carbon emissions intensity in China and analysis of influencing factors [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 19202.
- [23] 孙聪, 夏恩君, 黄洁萍, 等. “三农”视角下中国乡村共同富裕的碳减排效应与机制检验 [J]. *中国农业资源与区划*, 2025, 46(1): 34-46. [Sun Cong, Xia Enjun, Huang Jieping et al. Carbon emission reduction effect and mechanism test of rural common prosperity in China from the perspective of “Three rural issues”. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2025, 46(1): 34-46.]
- [24] Rahman F, Rahman M M, Rahman G K M M et al. Effect of organic and inorganic fertilizers and rice straw on carbon sequestration and soil fertility under a rice-rice cropping pattern[J]. *Carbon Management*, 2016, 7(1-2): 41-53.
- [25] Gao W L, Xie D Y. Pathways towards low-carbon sustainable agriculture: How farmland size affects net carbon emissions[J]. *Climate Policy*, 2024, 24(10): 1395-1409.
- [26] Tang K, He C, Ma C et al. Does carbon farming provide a cost-effective option to mitigate GHG emissions? Evidence from China[J]. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 2019, 63(3): 575-92.
- [27] 夏文浩, 霍瑜, 逯渊, 等. 新疆农业碳排放的时空差异与空间溢出效应分析 [J]. *干旱区地理*, 2024, 47(6): 1084-1096. [Xia Wenhao, Huo Yu, Lu Yuan et al. Analysis on temporal-spatial differences and spatial spillover effects of agricultural carbon emissions in Xinjiang. *Arid Land Geography*, 2024, 47(6): 1084-1096.]
- [28] 徐杰, 李红晔, 韩先锋. 市场型环境规制对企业价值的影响效应——来自碳排放权交易试点政策的证据 [J]. *中国人口*

- 资源与环境, 2024, 34(7): 88-100. [Xu Jie, Li Hongye, Han Xianfeng. The impact of market-oriented environmental regulation on corporate value: Evidence from the pilot policy of carbon emission rights trading. *China Population, Resources and Environment*, 2024, 34(7): 88-100.]
- [29] 苏培添, 王磊. 数字普惠金融对中国农业碳排放强度影响的空间效应与机制 [J]. 资源科学, 2023, 45(3): 593-608. [Su Peitian, Wang Lei. Spatial effects and mechanisms of digital inclusive finance on agricultural carbon emission intensity in China. *Resources Science*, 2023, 45(3): 593-608.]
- [30] 尹恣昊, 田云, 卢奕亨. 中国农业碳排放区域差异及其空间分异机理 [J]. 改革, 2023(10): 130-145. [Yin Minhao, Tian Yun, Lu Yiheng. Regional differences in China's agricultural carbon emissions and their spatial differentiation mechanism. *Reform*, 2023(10): 130-145.]
- [31] 崔平, 彭鸽. 数据要素参与分配: 价值、困境与路径 [J]. 上海经济研究, 2022(6): 27-35. [Cui Ping, Peng Ge. Data elements participating in distribution: Value, dilemmas and paths. *Shanghai Journal of Economics*, 2022(6): 27-35.]
- [32] 唐要家, 唐春晖. 数据要素经济增长倍增机制及治理体系 [J]. 人文杂志, 2020(11): 83-92. [Tang Yaojia, Tang Chunhui. The multiplication mechanism of data elements in economic growth and its governance system. *Journal of Humanities*, 2020(11): 83-92.]
- [33] 王艳, 杨达. 中国式管理会计体系变革: 从数据要素到数据资产 [J]. 管理世界, 2024, 40(10): 171-189. [Wang Yan, Yang Da. Reform of China's management accounting system: From data elements to data assets. *Management World*, 2024, 40(10): 171-189.]

Effects and mechanisms of data elements in agricultural carbon emission reduction in China

Shao Xiwu¹, Zhu Xue¹, Niu Yihan¹, Gong Ran¹, Shao Shidi²

(1. College of Economics and Management, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, Jilin, China;

2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, Jilin, China)

Abstract: As a core production factor in the era of digital economy, data elements play an important driving role in the carbon emission reduction efforts of various industries. This paper selects 30 provinces (autonomous regions and municipalities) in China from 2013 to 2022 as research samples to explore in depth the incentive effect and spillover effect of data elements on agricultural carbon emission reduction. First, an ordinary panel regression model is used to analyze the incentive effect of data elements on agricultural carbon emission reduction. Then, a mediating effect model is employed to test the transmission mechanism between data elements and agricultural carbon emissions. Finally, a spatial Durbin model is applied to analyzing the spatial spillover effect of data elements on agricultural carbon emissions. The following conclusions are drawn: 1) Data elements have a significant environmental incentive effect, which can promote regional agricultural carbon emission reduction. 2) In the inhibitory effect of data elements on agricultural carbon emissions, there exist mediating roles of supervision effect, resource effect, and cost effect. 3) Data elements have a significant spillover effect on agricultural carbon emissions, that is, while inhibiting local agricultural carbon emissions, data elements can also inhibit agricultural carbon emissions in adjacent regions. Based on the above analysis, this paper puts forward practical suggestions from three aspects: technological innovation, policy formulation, and data supervision.

Key words: data element; agricultural carbon emission reduction; incentive effect; green agricultural low-carbon development