刘慧敏,刘 爽,尚 杰.国家农业绿色发展先行区政策对农业碳排放的影响研究 [J]. 中国环境科学, 2026,46(1):555-567.
Liu H M, Liu S, Shang J. The impact of the establishment of national agricultural green development pilot zones on agricultural carbon emissions [J]. China Environmental Science, 2026,46(1):555-567.

国家农业绿色发展先行区政策对农业碳排放的影响研究

刘慧敏[1],刘 爽[2],尚 杰[1*] (1.东北林业大学经济管理学院,黑龙江 哈尔滨 150040；2.东北农业大学马克思主义学院,黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要：基于 2013~2023 年 284 个城市面板数据,通过国家农业绿色发展先行区创建工作构建准自然实验,利用双重差分法,就国家农业绿色发展先行区政策对农业碳排放的影响进行系统剖析.研究发现:①国家农业绿色发展先行区政策能够显著减少农业碳排放,国家农业绿色发展先行区政策对农业碳排放的影响在 10%的统计水平显著为负,系数为-0.008,这一负向影响在经过平行趋势检验、安慰剂检验、PSM-DID 分析、排除其他政策影响、处置内生性等诸多稳健性检验后依然成立;②国家农业绿色发展先行区政策通过提升农业生产效率、推动数字普惠金融发展、推动乡村创新创业而减少农业碳排放.国家农业绿色发展先行区政策对农业碳全要素生产率、数字普惠金融发展指数、乡村创新创业指数的影响显著为正,系数为 0.019, 0.008, 0.018,这三项指标提升都有利于减少农业碳排放.③国家农业绿色发展先行区政策对农业碳排放的负向影响存在异质性.国家农业绿色发展先行区政策对农业碳排放的负向影响在南方地区、非粮食主产区、高农业财政地区显著,系数分别为-0.008, -0.016, -0.015.为此,建议加大国家农业绿色发展先行区创建范围,进一步发挥国家农业绿色发展先行区政策的农业碳减排效应.

关键词：国家农业绿色发展先行区；农业碳排放；可持续发展；试点；双重差分
中图分类号：X321/324,F321.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)01-0555-13

The impact of the establishment of national agricultural green development pilot zones on agricultural carbon emissions. LIU Hui-min[1], LIU Shuang[2], SHANG Jie[1*] (1.College of Economics and Management, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2.School of Marxism, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China). *China Environmental Science*, 2026,46(1)：555~567

Abstract：The establishment of National Agricultural Green Development Pilot Zones (NAGDPZ) was regarded as a major policy initiative aimed at facilitating the green transformation of agriculture and was expected to significantly influence agricultural carbon emissions. However, limited research had been conducted in this area. Based on panel data from 284 cities spanning the period from 2013 to 2023, a quasi-natural experiment was constructed using the implementation of the NAGDPZ. The difference-in-differences (DID) method was employed to systematically evaluate the effect of the NAGDPZ policy on agricultural carbon emissions.The following findings were obtained:(1) The NAGDPZ policy was found to significantly reduce agricultural carbon emissions. A statistically significant negative effect at the 10% level was observed, with an estimated coefficient of −0.008. The robustness of this result was confirmed through parallel trend tests, placebo tests, propensity score matching DID (PSM-DID), exclusion of potential confounding policies, and controls for endogeneity.(2) Mechanism analysis revealed that the emission reduction effect was primarily driven by improvements in agricultural production efficiency, the development of digital inclusive finance, and the promotion of rural innovation and entrepreneurship. Specifically, the NAGDPZ policy had a significantly positive impact on agricultural total factor productivity, the digital inclusive finance index, and the rural innovation and entrepreneurship index, with coefficients of 0.019, 0.008, and 0.018, respectively.(3) Heterogeneity analysis indicated that the carbon reduction effect varied across regions. Significant negative impacts were observed in southern China, non-major grain-producing areas, and regions with higher levels of agricultural financial support, with coefficients of −0.008, −0.016, and −0.015, respectively. In light of these findings, it is recommended that the establishment of NAGDPZ be expanded to further enhance the policy's effectiveness in reducing agricultural carbon emissions.

Key words：national agricultural green development pilot zones；agricultural carbon emissions；sustainable development；pilot；the difference-in-differences (DID) method

农业碳排放是农业绿色发展问题核心构成,推进农业绿色发展、加强农村生态环境治理,必须有效减少农业碳排放.国家农业绿色发展先行区是我国促进农业绿色发展的大规模示范创建的重要尝试,

收稿日期：2025-06-25
基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金项目(2572024AW77);黑龙江省哲学社会科学研究规划年度项目(24GLC023);国家社会科学基金后期资助项目(20FGLB059)
* 责任作者, 教授, shangjie2005@126.com

是推进农业绿色转型的重要政策构成,受到国家高度关注.2019 年开始,中央一号文件多次指出要“创建农业绿色发展先行区”“支持国家农业绿色发展先行区建设”“建设国家农业绿色发展先行区”“推进农业绿色发展先行区和观测试验基地建设”.农业低碳发展作为践行农业绿色发展理念的重要路径,是国家农业绿色发展先行区(下文部分内容将国家农业绿色发展先行区简称为先行区)创建的核心目标之一.那么,先行区政策是否能有效减少农业碳排放?这一问题的回应对先行区政策的深入推进与农业碳减排的实现具有重要现实价值.

农业碳排放是学界重要焦点,学界对其测度与影响因素等主题展开了系统分析.就农业碳排放的计算而言,大致可分为三类,第一类是在计算农业碳排放时,以能源作为碳源进行计算[1];第二类是在计算农业碳排放时仅考虑种植业活动中涉及的碳源[2-3];第三类则是在计算农业碳排放时综合考虑种植业与畜牧业活动产生的二氧化碳、甲烷和一氧化二氮等多种温室气体[4-7].在明晰农业碳排放来源后,现有研究对国家[8-9]、省域[10-11]、市域[12-13]、县域[14-15]等层面的农业碳排放进行了测度,也有部分研究就微观农户层面[16]的农业碳排放问题进行了分析.在测度农业碳排放的基础上,学界剖析了农业碳排放的影响因素.一方面,现有研究分析了数字金融[17]、经济发展[18]、产业结构[19]、对外贸易[20]、城乡关系[21]、科技发展[22]等诸多因素对农业碳排放的影响;另一方面,现有研究高度重视政策作用,论证了环境保护类政策[23-24]、高标准农田建设[25-26]、农业补贴政策[27-28]、粮食主产区政策[29-30]、农业保险政策[31]对农业碳排放的减量作用.

国家农业绿色发展先行区作为农业绿色发展重要政策组成,亦受到学界关注.现有研究对先行区的农业绿色发展模式[32-33]及其问题[34]进行了分析,且探索了先行区创建对城乡融合发展的重要作用[35].少数研究还进一步探索了先行区创建的生态效益,指出农业绿色发展先行区设立能提升农业绿色全要素生产率[36],先行区创建能减少化肥使用[37].另外,少数研究已认识到先行区对农业碳排放的影响.如,Du 等[38]基于 2011~2020 年中国四十余地级市面板数据,探讨了先行区对农业碳减排的影响,发现该政策显著降低了碳排放量.

综上,学界对农业碳排放进行了深入探讨,为农业碳排放治理实践提供了科学支撑,尤其 Du 等[38]初步识别了先行区政策对农业碳排放的作用,为先行区的农业碳减排效应识别提供了较早的学术支持,具有重要意义.然而,现有研究仍存在待完善之处:①在分析先行区政策对农业碳排放影响时还需考虑更多批次试点;②现有研究在分析先行区政策对农业碳排放作用时仅考虑了少数地区,未考量该政策在更广阔范围对农业碳排放的作用,不利于全面了解该政策的碳减排效应;③先行区政策影响农业碳排放的作用机制需进一步解构.

为此,本文系统分析先行区政策对农业(狭义农业)碳排放的影响,揭示其作用机制,并探索其地区异质性,以期论证先行区政策的农业碳减排效应,为先行区创建工作深入开展提供学术支持;并明确先行区政策对农业碳排放作用规律,为农业碳减排提供科学思路.边际贡献为:①综合探索第一二批次先行区对农业碳排放影响,以更深入识别先行区政策对农业碳排放的作用;②系统剖析先行区政策在全国范围对农业碳排放的影响,探索该政策在更广阔范围内的效应;③探索先行区政策对农业碳排放影响机制,解构先行区政策对农业碳排放的作用规律;④系统剖析先行区政策对农业碳排放影响的异质性,以为政策因地制宜发展提供支撑.

1 理论分析与研究假设

1.1 政策背景:国家农业绿色发展先行区政策中的农业低碳发展问题

国家农业绿色发展先行区是在农业可持续发展、农业绿色发展理念指导下开展的试点建设工作.在国家农业绿色发展先行区创建过程中,农业低碳发展问题日益受到关注.2016 年 8 月,农业部(现农业农村部)等 8 部委联合印发了《关于印发国家农业可持续发展试验示范区建设方案的通知》,该《通知》指出建设国家农业可持续发展试验示范区,核心在于贯彻绿色发展理念,促进农业可持续发展;该《通知》在申请创建试验示范区的主体应符合的基本条件中提及相关主体应当符合“低碳”这一要求;同时,其关于减少化肥等化学物资使用的内容直接与农业碳排放的核心碳源关联.2017 年,农业部(现农业农村部)等 8 部委联合印发了《关于启动第一批国家

农业可持续发展试验示范区建设开展农业绿色发展先行先试工作的通知》,该通知在试点目标方面指出要在产业制度上努力形成“绿色循环低碳的生产制度”;在生活方式上“宣传、普及简约适度、绿色低碳的生活方式”;在试点任务的重要内容中也指出要“建立农业绿色循环低碳生产制度”.2022 年,《农业农村部办公厅关于开展第三批国家农业绿色发展先行区创建工作的通知》中指出先行区要以“打造绿色低碳农业产业链为重点”;在申报条件方面指出要“农业减排固碳、森林覆盖、农田林网控制较好”;在重点任务方面,指出要“推进农业产业链低碳循环化”,并围绕该主题进行了专项说明.2023 年,《农业农村部办公厅关于开展第四批国家农业绿色发展先行区创建工作的通知》中,在创建任务中指出要“突出全链开发,培育发展绿色低碳产业”,并围绕该主题进行系统论述;在遴选条件中也指出要遴选“绿色低碳农业产业链健全”地区.从 2016~2023 年的政策文件中可以看出,先行区政策对于农业低碳发展问题十分关注.

1.2　国家农业绿色发展先行区政策对农业碳排放影响的直接效应

国家农业绿色发展先行区的创建有助于减少碳源,从而减少农业碳排放:①从政策导向来看,先行区政策文件要求实施化肥农药使用量零增长行动,促进农膜回收利用.在先行区创建任务指引下,被选为试点的地区为完成考核要求,将加强化肥等农业化学物资的减量与回收工作,通过构建负面清单、强化激励等手段减少农业化学物资,这将直接减少农业碳排放.②从技术发展和装备更新来看,先行区相关政策文件明确提出推进农业绿色技术发展,这将有效减少农业活动中化学物资的使用,进而降低由其产生的碳排放;此外,先行区政策文件还提出要创制绿色农机装备,这将减少农业机械化进程中农业柴油等物资应用产生的碳排放;另外,先行区进一步提出要推动农业生产数字化、智能化改造,而数字化技术的嵌入亦有利于减少农业化学物资应用,减少碳排放.③从农业劳动力的素质提升来看,先行区相关政策文件要求加强新型农民培训,提高劳动力素质.农业劳动力素质提升有利于农业劳动力更好地应用各种绿色农业技术和绿色农机装备,依靠绿色技术和装备实现农业经济发展,减少对农业化学物资的依赖;同时通过培训,将提升劳动力环保意识,促使其在具体农业实践中有意识地减少化学物资,从而减少农业碳排放.④从社会环境塑造来看,先行区创建过程通过强化宣传教育,提升试点地区社会主体的绿色发展观念,这将进一步引导相关主体在农业生产经营过程中主动减少农业化学物资应用,采取更为绿色的农业物资和技术,进而减少农业碳排放.综上,提出假说:

假说 1:国家农业绿色发展先行区政策能够减少农业碳排放.

1.3　国家农业绿色发展先行区政策对农业碳排放影响的间接机制

1.3.1　生产效率提升机制

农业活动中,化肥、农药、农膜与农用柴油等农业物资的应用是农业碳排放的重要来源[2-4],因此,当这些农业物资减少时,农业碳排放也将减少.但是,若在生产效率未提升时,贸然减少农业物资,虽有利于减少农业碳排放,但亦将影响农业产出.当农业生产效率提高时,同样的农业物资投入将产生更多的农业产出;或者同样的农业产出,只需更少的农业物资投入.此时,农业物资的减少将不会制约农业经济发展.因此,生产效率的提升是在当前保障农业经济发展要求下实现农业物资高效应用而减少农业碳排放的关键.正如现有研究指出,农业技术进步是推动农业低碳发展的关键驱动力[39],提升农业生产效率是农业减排的有效途径[40].先行区政策能够提升农业生产效率:①现有研究指出农业机械化[41]和数字化[42]有利于促进农业技术进步,提升农业生产效率,而先行区创建工作高度重视各种先进技术装备的应用与推广,将有效提升农业生产效率;②先行区政策重视农业劳动力的培训和教育,通过培训和教育,将改善农业劳动力的劳动效率,使其更好地应用各种农业技术与装备,这亦能提升农业生产效率;③先行区政策强调要落实耕地保护制度,牢牢守住耕地和永久基本农田保护红线,不断提升耕地质量,且要求推进水利工程建设,这些基础建设工作为高水平的农业生产经营打下坚实的基础,这亦有利于高效发挥农业物资作用,实现效率提升.为此,提出假说:

假说 2:国家农业绿色发展先行区政策通过提升农业生产效率而减少农业碳排放.

1.3.2　数字金融发展机制

先行区政策能够推动

数字普惠金融发展而降低农业碳排放.一方面,数字普惠金融的发展能减少农业碳排放.数字普惠金融依托其数字化特性具备较高的渗透性,能提升金融服务在乡村的覆盖面,使农户获得更多金融支持.数字金融机构还能为农户经营决策提供支持,降低农户绿色生产风险,提升农户使用绿色技术、绿色生产方式意愿[43],从而减少农业碳排放.现有研究亦指出,数字普惠金融可通过降低农业碳排放强度等途径,助推农业绿色低碳高质量发展[44].另一方面,先行区政策将为数字普惠金融发展提供动力:①先行区政策实施过程中要求推进包括低碳技术在内的各种先进农业技术及农业装备应用,这些政策落实所需的资金,虽然地方财政会承担部分,但亦需金融机构进行资金补充,以为农户、农业企业提供贷款支持,这为数字普惠金融发展提供了更广阔的乡村市场;②先行区政策要求探索绿色金融服务先行先试地区的有效方式,加大绿色信贷及专业化担保支持力度.数字普惠金融与绿色金融虽非完全一致,但二者间存在较多交织,先行区的设立为数字普惠金融等符合绿色金融发展理念的相关金融服务、产品提供了机遇.为此,提出假说:

假说 3:国家农业绿色发展先行区政策通过推动数字普惠金融发展而减少农业碳排放.

1.3.3 乡村创新创业机制 先行区政策能推动乡村创新创业而降低农业碳排放.一方面,乡村创新创业水平提升能减少农业碳排放:①乡村创新水平提升能减少农业碳排放.研究[45]认为乡村创新包含技术、品牌、绿色、数字创新.技术、绿色与数字创新将为耕地上农业活动提供更先进的技术支持,且推进农业的绿色化和数字化发展,减少化肥等化学品的使用,进而减少耕地利用碳排放.正如现有研究指出,技术创新[46]、农业数字化[47]具有积极的碳减排效应.而品牌创新方面,在低碳、绿色发展理念日益受到关注的当前,乡村品牌的创新往往会突出“绿色”“低碳”等诸多特征,这亦有利于引导农户与农业企业采取措施减少农业碳排放;②乡村创业水平提升也能减少农业碳排放.现有研究指出,在政府环境规制的作用下,新创企业往往更加重视低碳问题,其将采取更适合低碳理念的运行方式,这有利于减少农业碳排放强度,促进农业可持续发展[17].另一方面,先行区政策能为乡村创新创业水平提升提供政策、资金、人员等支持.首先,先行区政策明确提出要推进农业绿色技术发展,这将为农业绿色技术创新提供政策指导,激活乡村创新活力;此外,乡村创新创业水平的提升离不开财政资金,而先行区政策明确提出要加强对先行区的财政资金支持,这将有力地巩固乡村创新创业的基础;第三,人才是促进和保障科技事业繁荣的主体,创新创业水平的提升需要足够的人才,先行区政策要求加强农民等主体的培训,这有利于提升乡村主体知识水平,培育乡村创新创业人才.为此,提出假说:

假说 4:国家农业绿色发展先行区政策通过推动乡村创新创业而减少农业碳排放.

2 研究设计

2.1 变量设置

2.1.1 被解释变量 以农业碳排放作为被解释变量.参考研究[2-4],农业碳排放总量等于化肥施用折纯量、农药使用量、农用塑料薄膜使用量、农用柴油使用量、农作物总播种面积以及有效灌溉面积分别与其碳排放系数的乘积之和.参考文献[12],上述化肥等指标的碳排放系数分别为 0.8956kg/kg、4.9341kg/kg、5.1800kg/kg、0.5927kg/kg、312.60kg/km^2、25kg/hm^2.其中,相关数据主要基于统计年鉴获取.对于无法从统计年鉴等公开渠道获取的指标数据,参考文献[12,48−49],以耕地权重为系数利用省级层面数据倒推市级层面数据.该方法的合理性在于:①耕地是狭义农业生产的载体,是农业碳排放核心区域.以耕地面积为权重进行农业碳排放相应指标的折算,能较好地反映农业碳排放的空间分布特征;②耕地面积与农业投入量成正比;③省域内各地区农业政策和技术推广体系较为统一、农业技术水平基本相当,因此省域内各地区的农业生产方式和单位面积投入强度大致相近;④已有研究采用类似方法进行折算[12,48-49].

2.1.2 解释变量 解释变量为先行区政策实施情况,以先行区政策虚拟变量进行表征.截至目前,共有四批先行区,其中第一、二批先行区名单在 2017 年 12 月和 2019 年 10 月公布,第三、四批先行区名单在 2022 年与 2023 年公布.现有研究[35,38]在基于先行区设置准自然实验时,多考虑 2017 年公布的第一批城市.综合考虑研究区间设置和研究[37],本文将第

一、二批先行区都纳入分析,以更好识别先行区作用.分析时,参考研究[35,37-38]对先行区的设置情况,当一个城市或其所管辖的县区被选入先行区创建名单,本文设定该城市在入选创建名单后的各年份为处理组(72 个城市),反之为对照组(212 个城市).由于第一、二批先行区名单公布时间在下半年,其效应可能在来年才开始显现,为此第一批先行区以 2018 年为界限,第二批先行区以 2020 年为限.

2.1.3　控制变量　参考研究[2-4,12],选择以下控制变量:①农业经济增长水平,农业碳排放与地区农业经济发展之间有着密切关联,经济发展会影响农业碳排放,以城市农业产值表征;②地区产业结构,地区产业结构反映地区经济发展情况,亦会影响地区农业发展,以城市第二产业增加值占比表征;③农业灌溉水平,农业灌溉水平一定程度上体现地区农业基础设施建设情况,亦会影响农业碳排放,利用城市农业有效灌溉面积与城市耕地面积之比表征;④地区教育重视水平,地区教育的发展与政府的教育重视程度和投入息息相关,而这又与农业劳动力素质以及环保理念的传播有着密切关联,用城市财政中的教育支出占一般公共预算支出的比重表征;⑤地区科技发展重视水平,必要的科技投入是科技发展的重要基础,而科技发展对于减少农业碳排放具有重要意义,用城市财政中的科技支出占一般公共预算支出之比表征;⑥地区信息化发展水平,信息化的推进对于农业污染治理具有现实价值,电信业务与地区信息化发展有着紧密关系,以城市电信业务收入情况表征.

2.1.4　工具变量　研究利用工具变量模型处置内生性.以城市河流密度作为工具变量,理由为:①河流密度为自然禀赋,对当前农业碳排放而言具有较强外生性,农业碳排放变化无法影响地区河流密度,二者间反向因果较弱;②地区河流密度与先行区的设立存在较强的相关性,其一,当地区河流密度较大时,地区农业发展条件较好,对于农药、化肥的依赖程度较低,能较好地实现农业绿色发展,而先行区设立地区本就要求地区具备较好的农业绿色发展水平,因此河流密度较大地区更有可能选为先行区.利用城市河流密度乘年份进行面板化.

2.1.5　机制变量　研究机制变量的设定如下:①农业生产效率以农业碳全要素生产率表征,使用非期望产出 SBM-DEA 模型进行计算,计算思路参考文献[50-52].同样的,无法从统计年鉴等公开渠道获取的指标数据,参考现有研究做法[12,43-44],利用城市与省级耕地比例为权重系数,用省级指标进行转化.②数字普惠金融发展指数则使用北京大学数字金融研究中心发表的北京大学数字普惠金融指数[53].③乡村创新创业发展水平则使用浙江大学中国农村发展研究院发布的“中国乡村创新创业指数”中的涉农创新指数作为表征[45].

2.2　模型设置

2.2.1　基准回归模型　采用交错双重差分法分析国家农业绿色发展先行区对农业碳排放影响,设定如下:

$$\mathrm{AC}_{it}=c_1+c_{\mathrm{did}}\mathrm{did}_{it}+\lambda Z_{it}+\nu_i+\mu_t+\varepsilon_{it} \tag{1}$$

式中:AC_{it} 为第 i 个城市第 t 年的农业碳排放;did_{it} 是国家农业绿色发展先行区的虚拟变量,根据上文选取规则,被选为处理组的城市在其入选试点当年及其后都赋值为 1,即 did_{it}=1,否则为 0;Z_{it} 为控制变量;ν_i、μ_t 表示城市和年份固定效应;ε_{it} 为随机扰动项;c_1 为截距项;c_{did}、λ为待估计系数.

2.2.2　事件分析法　设定以下模型来检验国家农业绿色发展先行区政策碳减排效应的平行趋势:

$$\mathrm{AC}_{it}=\omega_0+\sum_{k=-7}^{k=5}\omega_k\times D_{i,t_0+k}+\lambda Z_{it}+\nu_i+\mu_t+\varepsilon_{it} \tag{2}$$

式中:D_{i,t_0+k} 是虚拟变量,表示国家农业绿色发展先行区创建开始的第 k 年;具体来说,t_0 表示城市 i 成为国家农业绿色发展先行区的第 1 年,k 表示成为国家农业绿色发展先行区后的年份数;ω_0 为截距项.

2.2.3　工具变量模型　本文以工具变量模型处理内生性,其一阶段模型设定如下:

$$\overline{\mathrm{did}_{it}}=c_2+c_{\mathrm{IV}}\mathrm{IV}_{it}+\lambda Z_{it}+\nu_i+\mu_t+\varepsilon_{it} \tag{3}$$

式中:$\overline{\mathrm{did}_{it}}$ 为基于工具变量拟合国家农业绿色发展先行区设置情况,IV 为工具变量,c_2 为式(3)截距项,c_{IV} 为工具变量系数,其余变量如式(1).第二阶段用第一阶段拟合的国家农业绿色发展先行区设置情况放入式(1).

$$\mathrm{AC}_{it}=c_3+\overline{c_{\mathrm{did}}}\,\overline{\mathrm{did}_{it}}+\lambda Z_{it}+\nu_i+\mu_t+\varepsilon_{it} \tag{4}$$

式中:c_3 为式(4)截距项,$\overline{c_{\mathrm{did}}}$ 是基于工具变量拟合的国家农业绿色发展先行区设置情况 $\overline{\mathrm{did}_{\mathrm{it}}}$ 的系数.此时,由于国家农业绿色发展先行区设置情况 $\overline{\mathrm{did}_{it}}$ 是由工具变量和其他外生变量决定,因此 $\overline{c_{\mathrm{did}}}$ 是无偏的.

2.2.4　影响机制分析模型　参考研究[54],利用两阶

段中介效应模型分析影响机制,第一阶段论证先行区政策对农业碳排放影响的公式见式(1).第二阶段论证先行区政策对机制变量影响的实证分析模型如下:

$$M_{it} = c_4 + c_{\text{did}}\text{did}_{it} + \lambda Z_{it} + \nu_i + \mu_t + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

式中:M_{it}为机制变量,c_4为截距项,其他变量设置如式(1).

2.3 数据来源

研究对象是中国 284 个地级及以上城市,选择 2013~2023 年作为研究期,主要是考虑 2013 年是党的十八大后第一年,中国特色社会主义进入新时代.城市层面和省级层面各变量原始数据主要来源于《中国城市统计年鉴》和各省市统计年鉴与农村统计年鉴,耕地面积来自自然资源部国土调查成果共享应用服务平台(https://gtdc.mnr.gov.cn/Share#/),数字普惠金融发展指数来自北京大学数字金融研究中心,乡村创新创业发展指数来自浙江大学中国农村发展研究院.各指标与耕地面积的部分缺失数据采用插补法进行补齐.农业产值利用种植业产品价格指数处理、农林牧渔业产值利用农业生产价格指数处理,其余涉及价格变动的数据使用 CPI 指数处理,以 2013 年为基年.在计量分析前对数据进行标准化以去除单位量纲的影响.

3 实证分析

3.1 基准回归

先行区政策对农业碳排放的影响结果见表 1,其中模型(1)为控制农业经济增长水平、地区产业结构、农业灌溉水平、地区教育重视水平的估计结果,模型(2)为控制所有控制变量的估计结果,相关指标都进行了共线性检验,VIF 值都低于 5,可知变量间不存在严重的共线性问题.由表 1 可知,先行区政策对农业碳排放的影响在 10%的统计水平显著为负,系数为−0,008,表明先行区政策能够显著减少农业碳排放,假说 1 成立.

表 1 国家农业绿色发展先行区政策对农业碳排放的影响

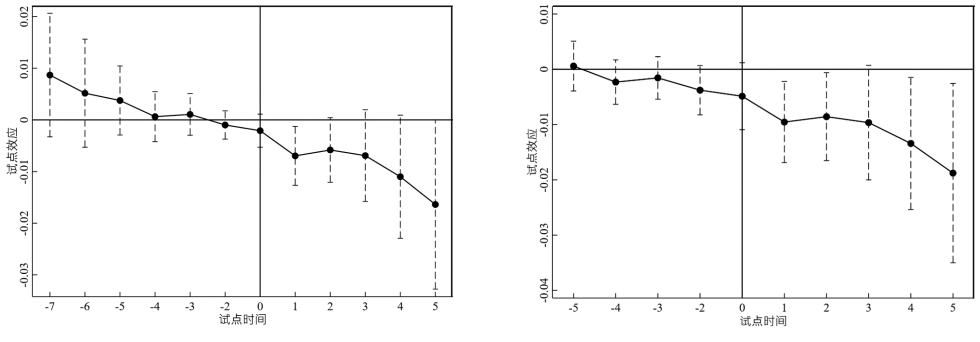
Table 1 The impact of the NAGDPZ policy on agricultural carbon emissions

变量	(1) 农业碳排放	(2) 农业碳排放
先行区政策	−0.008*(−1.782)	−0.008*(−1.755)
常数	0.186***(11.063)	0.175***(8.306)
观测值	3124	3124
R^2	0.240	0.241
城市数目	284	284
控制变量	部分	是

注:***、**和*分别表示1%、5%和10%的显著性水平,使用稳健性标准误差,括号内为t值,若未专门提及,则同时控制了城市固定效应和年份固定效应,下同.

3.2 稳健性检验

3.2.1 平行趋势检验 平行趋势检验是双重差分法最关键的检验,若平行趋势假设成立,那么处理组和对照组在处理前的差异可被认为是稳定的.图 1(a)展示了式(2)参数的变化,虚线为估计量 90%的置信区间.在先行区创建前,各虚拟变量对农业碳排放的作用都不显著,这表明在政策开始前处理组与对照组的差异是稳定的.而在政策开始后,滞后一期的结果显著为负,模型满足平行趋势假设.为进一步验证平行趋势的可靠性,考虑事前 5 期至滞后 5 期为平行趋势检验的时间区间,以提前 1 期为基准,发现图 1(b)同样显示通过平行趋势检验.



(a) (b)

图 1 国家农业绿色发展先行区政策对农业碳排放影响的平行趋势检验

Fig.1 Parallel trend test of the impact of the NAGDPZ policy on agricultural carbon emissions

3.2.2　安慰剂检验　与先行区政策同时作用的不可观测因素可能会影响基准回归的估计结果.为此,本文进一步就先行区政策的农业碳减排效应进行安慰剂检验.具体而言,本文随机选择试点城市,而后估计其对农业碳排放的影响,并将随机过程进行 500 次模拟,若所模拟的结果与基准回归结果相差甚远,表明先行区政策的碳减排效应没有受到不可观测因素的影响,模拟结果见图 2.由图 2 可知,所有估计值的系数距离左侧竖线表示的真实估计值较远,这说明先行区政策对农业碳排放的负向影响并非由不可观测因素所引起.

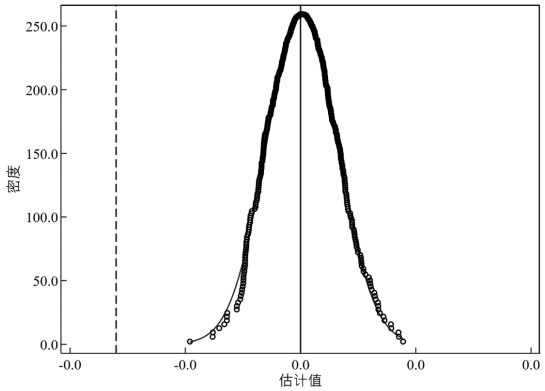


图 2　国家农业绿色发展先行区政策对农业碳排放影响的安慰剂检验

Fig.2　Placebo test on the impact of the NAGDPZ Policy on agricultural carbon emissions

3.2.3　PSM−DID 检验　先行区的设置并非完全随机的试点,其设置过程可能存在选择偏差.

表 2　PSM 匹配后国家农业绿色发展先行区政策对农业碳排放影响

Table 2　The impact of the NAGDPZ policy on agricultural carbon emissions after PSM matching

变量	(1) 农业碳排放	(2) 农业碳排放
先行区政策	−0.008*(−1.736)	−0.008*(−1.698)
常数	0.167***(6.824)	0.165***(6.775)
观测值	3,115	3,113
R^2	0.241	0.241
核匹配带宽	0.040	0.030
城市数目	284	284
控制变量	是	是

本文利用倾向评分匹配−双重差分(PSM−DID)模型以解决选择偏差问题.本文利用核匹配方法匹配样本城市,利用所有的控制变量作为协变量,核匹配的带宽分别为 0.010 和 0.020.在 PSM 计算过程中,两次匹配的 ATT 值都在 10%的统计水平显著,且匹配后所有协变量的标准偏差绝对值小于 10%,可知匹配后处理组的可观测变量整体上不存在显著差异.在完成匹配后,再次利用双重差分法进行计算,结果见表 2.由表 2 可知,先行区政策对农业碳排放仍然产生显著的负向影响.

3.2.4　排除其他政策的影响　在研究区间,除了先行区政策外,仍有其他环境治理工作或政策试点可能对农业碳排放产生负向影响.

表 3　控制其他政策时国家农业绿色发展先行区政策对农业碳排放的影响

Table 3　The impact of the NAGDPZ policy on agricultural carbon emissions when controlling other policies

变量	(1) 农业碳排放	(2) 农业碳排放	(3) 农业碳排放	(4) 农业碳排放
先行区政策	−0.008*(−1.753)	−0.008*(−1.755)	−0.008*(−1.755)	−0.008*(−1.755)
国家生态文明试验区	−0.000(−0.088)			
绿色金融改革创新试验区		0.002(0.403)		
农业面源污染防治攻坚战			−0.034***(−6.351)	
蓝天保卫战				−0.034***(−6.351)
常数	0.175***	0.175***	0.175***	0.175***
	(8.217)	(8.294)	(8.306)	(8.306)
观测值	3,124	3,124	3,124	3,124
R^2	0.241	0.241	0.241	0.241
城市数目	284	284	284	284
控制变量	是	是	是	是

为减少同期环境治理工作或政策试点对国家农业绿色发展先行区政策对农业碳排放作用的干扰,本文进一步将相关的治理工作与政策试点作为控制变量纳入分析体系.农业面源污染防治攻坚战与蓝天保

卫战是面向全国所有地区开展的治理工作,分别以2015 年 4 月 10 日发布的《关于打好农业面源污染防治攻坚战的实施意见》与 2018 年 6 月 27 日发布的《打赢蓝天保卫战三年行动计划》作为节点,在相关政策文件出台之前各年份设为 0,之后设为 1.国家生态文明试验区与绿色金融改革创新试验区属于政策试点,参考双重差分法对政策试点的设置,若城市 i 第 t 年入选了某一试点,那么城市 i 在 t 年及之后年份其对应的政策取值为 1,否则为 0.由表 3 可见,先行区政策依然对农业碳排放产生显著负向影响.

3.2.5 内生性处置 为进一步提升分析的可靠性,利用工具变量模型进行内生性处置,结果见下表 4.由表 4 可知,基于工具变量的先行区政策拟合值对农业碳排放依然产生显著的负向影响,可知在处置内生性后,先行区政策的碳减排效应依然成立.此外,工具变量也通过了弱工具变量检验、不可识别检验、过度识别检验等.

3.2.6 负权重检验 考虑到分析过程中负权重的可能影响,研究利用 Bacon 分解与 CD 分解对基准模型的负权重进行检验,结果 Bacon 分解发现负权重影响较小,CD 分解则未发现负权重的存在,表明负权重对分析的作用较小,未显著影响先行区的农业碳减排效应.

3.2.7 其他稳健性检验 为提升基准回归稳健性,进行以下检验:①调整被解释变量,考虑到农业化肥、农药、农膜和柴油的使用与农业碳排放密切相关,以这些农业物资的实际使用情况为被解释变量,再次进行双重差分,结果见表 5 模型(1);②调整估计模型,将分析模型修改为仅考虑地区固定效应的回归模型,其他设定不变,结果见表 5 模型(2);③进一步减少极端值,将数据进行 5%和 95%分位的缩尾处置,从而更好地减少极端值和异常值的可能影响,结果见表 5 模型(3);④调整研究地区.考虑到北京市作为首都,与其他地区存在较大差异,为此将北京从研究地区中移除,结果见表 5 模型(4);⑤调整研究时间.将研究区间缩短到近十年,即 2014~2023 年,结果见表 5 模型(5).由表 5 可知,在各种稳健性检验下,先行区政策对农业碳排放的影响始终显著为负.

表 4 基于工具变量的国家农业绿色发展先行区政策对农业碳排放的影响

Table 4 Impact of policy on agricultural carbon emissions in NAGDPZ based on instrumental variables

变量	(1) 国家农业绿色发展先行区政策	(2) 农业碳排放
工具变量	117.813***(4.493)	
基于工具变量的先行区政策拟合值		−0.114*** (−3.64)
观测值	3,124	3,124
城市数目	284	284
控制变量	是	是
弱工具变量检验(Cragg−Donald Wald F 统计量)	22.051	
不可识别检验(Kleibergen−Paap rk LM 统计量)	13.333	
汉森 J 统计量(所有工具变量的过度识别检验)	0.000	

表 5 国家农业绿色发展先行区试点对农业碳排放影响的多元稳健性检验

Table 5 The multi−dimensional robustness test of the impact of the NAGDPZ on agricultural carbon emissions

变量	(1) 农业碳排放	(2) 农业碳排放	(3) 农业碳排放	(4) 农业碳排放	(5) 农业碳排放
先行区政策	−0.010*(−1.727)	−0.020***(−4.457)	−0.007*(−1.844)	−0.008*(−1.718)	−0.008*(−1.671)
常数	0.179***(7.470)	0.138***(6.819)	0.138***(3.600)	0.173***(7.777)	0.167***(7.716)
观测值	3124	3124	3124	3113	2840
城市数目	284	284	284	283	284
R^2	0.198	0.156	0.283	0.240	0.246
控制变量	是	是	是	是	是

3.3 影响机制分析

表 6 为先行区政策对机制变量的影响,模型也通过共线性检验,VIF 值都低于 5.由表 6(1)(2)可知,先行区政策能显著提升农业碳全要素生产率,即先行区政策有利于提升农业生产效率.而农业生产效率提升能减少化肥和农业机械的运用,实现农业碳减排[40].因此,先行区政策能通过提升农业生产效率而减少农业碳排放,假说 2 成立.由表 6(3)(4)可知,先行区政策显著推进数字普惠金融发展.而数字普惠金融发展有利于推动农业低碳发展[43-44].因此,

先行区政策能推动数字普惠金融发展而减少农业碳排放,假说 3 成立.由表 6(5)(6)可知,先行区对乡村创新创业指数产生显著的正向影响,表明先行区政策实施能够有效提升乡村创新创业水平.而乡村创新活动和创业活动都有利于推进可持续发展[46-47],减少农业碳排放.因此,先行区政策能够推动乡村创新创业水平提升而减少农业碳排放,假说 4 成立.

表 6　国家农业绿色发展先行区政策对机制变量的影响

Table 6　The impact of the NAGDPZ policy on mechanism variables

变量	(1) 农业碳全要素生产率	(2) 农业碳全要素生产率	(3) 数字普惠金融发展指数	(4) 数字普惠金融发展指数	(5) 乡村创新创业指数	(6) 乡村创新创业指数
先行区政策	0.019*(1.771)	0.019*(1.759)	0.009***(2.721)	0.008***(2.738)	0.019**(2.510)	0.018**(2.481)
常数	−0.164***(−3.388)	−0.154***(−3.015)	0.094***(7.553)	0.083***(6.658)	0.150***(4.918)	0.131***(4.016)
观测值	3124	3124	3124	3124	2926	2926
R^2	0.488	0.488	0.992	0.992	0.606	0.609
城市数目	284	284	284	284	266	266
控制变量	部分	是	部分	是	部分	是

注:乡村创新创业机制分析因数据缺失只分析了266个城市,对比其他分析的样本少了18个城市.

3.4　异质性分析

3.4.1　区域异质性分析　我国农业南北差异较大,因此先行区政策对农业碳排放的影响在南北地区可能存在差异,为此以各城市所处区域为依据对样本城市划分,而后分别计算,结果见表 7 模型(1)(2).可知,北方地区先行区政策对农业碳排放的影响为负但不显著,南方地区为负且显著.一方面,北方地区畜牧业发达,本文计算农业碳排放时仅考虑狭义农业(种植业)碳排放,未测度畜牧业碳排放,北方地区先行区政策的碳减排作用可能更多体现在畜牧业方面,而在本文的测度中未能较好体现.另一方面,从先行区的数量而言,先行区分布存在不均衡性,南方地区先行区数量远多于北方地区,以第一批先行区为例,南方地区先行区数量占总先行区数量的 70%左右,且有浙江省这种全省试点地区,因此更好地发挥了先行区政策对农业碳排放的减量效应.

3.4.2　粮食主产区异质性分析　粮食主产区与非粮食主产区在农业生产领域承担不一样的责任,因此先行区政策对农业碳排放的影响在粮食主产区和非主产区间可能存在差异,以各城市所属省份是否为粮食主产区为依据进行划分,而后分别计算,结果见表 7 模型(3)(4).可知,粮食主产区样本下先行区政策对农业碳排放的影响为负但不显著,而非粮食主产区显著为负.究其原因,可能在于粮食主产区存在稳定粮食生产以保障国家粮食安全的任务,因此其需将粮食产量放在首位,因此对化肥等农业物资具有更强的依赖性,更需要依靠这些农业物资保障粮食生产稳定,因此难以充分发挥先行区政策对其农业碳排放的减量效应.

表 7　国家农业绿色发展先行区政策对农业碳排放影响的异质性分析结果

Table 7　Heterogeneity analysis results of the impact of the NAGDPZ Policy on agricultural carbon emissions

变量	(1) 农业碳排放	(2) 农业碳排放	(3) 农业碳排放	(4) 农业碳排放	(5) 农业碳排放	(6) 农业碳排放
先行区政策	−0.008(−0.760)	−0.008*(−1.788)	−0.003(−0.477)	−0.016***(−2.633)	−0.015**(−2.089)	0.001(0.224)
常数	0.228***(6.548)	0.163***(4.700)	0.227***(7.556)	0.104***(2.998)	0.172***(4.185)	0.140***(8.701)
观测值	1430	1694	1859	1265	1111	2013
城市数目	130	154	169	115	101	183
类型	北方地区	南方地区	粮食主产区	非粮食主产区	高农业财政地区	低农业财政地区
R^2	0.267	0.258	0.310	0.175	0.348	0.220
控制变量	是	是	是	是	是	是

3.4.3　农业财政支出异质性分析　先行区政策作为一项政府推进的政策试点,与政府财政支出之间有着密切关联.当地区农业财政支出较高时,能够更好地推进先行区政策要求落地,进而更有效地减少

农业碳排放.本文以 2013 年各城市财政中的农林水支出作为衡量指标,首先计算出 284 个城市农林水支出均值,将当年高于均值的城市设置为高农业财政地区,反之为低农业财政地区,分别进行计算,结果见表 7 模型(5)(6).由表 7 模型(5)(6)可知,高农业财政地区样本的先行区政策对农业碳排放的影响显著为负,低农业财政地区则不显著.这是由于先行区诸多减碳政策的实施都需要财政作为支持,农业财政不足将影响碳减排效应的实现.

4 结论

4.1 国家农业绿色发展先行区政策能够显著减少农业碳排放.先行区政策对农业碳排放的影响在10%的统计水平显著为负,系数为-0.008,这一负向影响效应在经过平行趋势检验、安慰剂检验、PSM-DID 分析、排除其他政策影响等诸多稳健性检验后依然成立.

4.2 国家农业绿色发展先行区政策通过提升农业生产效率、推动数字普惠金融发展、推动乡村创新创业而减少农业碳排放.先行区政策对农业碳全要素生产率、数字普惠金融发展指数、乡村创新创业指数的影响显著为正,系数 0.019, 0.008, 0.018,而这些变量的提升都有利于减少农业碳排放.

4.3 国家农业绿色发展先行区政策对农业碳排放的负向影响存在异质性.先行区政策对农业碳排放的负向影响在南方地区、非粮食主产区、高农业财政地区显著,系数分别为-0.008, -0.016, -0.015.

5 建议

推进农业碳减排对于碳达峰、碳中和目标实现具有现实价值,结合研究结论提出以下建议:

国家农业绿色发展先行区政策能显著减少农业碳排放,为此建议:①扩大先行区创建范围,将更多地区纳入先行区建设,激发地区政府推进农业绿色发展积极性,以减少农业碳排放;②鼓励各省在加快国家农业绿色发展先行区创建时,实施省级层面的农业绿色发展先行区试点,以培育更多农业绿色发展高水平地区,为国家级先行区范围扩大提供主体支持;③积极推进先行区创建过程中所形成的有利于农业碳减排的先进模式、经验和做法推广,以供非试点地区学习转化,发挥先行区示范效应.

国家农业绿色发展先行区政策通过提升农业生产效率、推动数字普惠金融发展、推动乡村创新创业而减少农业碳排放,为此建议:①加快推进先行区农业技术、装备发展,并强化农业基础设施建设,以为农业生产效率提升提供技术、装备和基础设施保障;②进一步推动数字普惠金融嵌入乡村经济活动,多途径提升乡村经济主体数字化素养,增强数字普惠金融渗透力度,以解决乡村金融力量不足的现实;③强化乡村民众教育培训,构建更友好的乡村创新创业政策体系与金融体系,为乡村民众的创新创业活动提供支持,并积极引导乡村创新创业活动的绿色化、低碳化发展方向.

国家农业绿色发展先行区政策对农业碳排放的负向影响存在异质性,为此建议:①加大北方地区先行区数量,为北方地区先行区碳减排效应实现提供政策支持;②强化种业科学投入和加大高效绿肥研发,在保障粮食产量同时减少粮食生产对化肥等农业化学物资的依赖,更好发挥先行区政策在粮食主产区的碳减排效应;③加大农业财政对先行区的支持,在立足本地财政基础上,积极寻求更高级别行政单位的财政支持,同时加快社会融资和完善金融支撑体系建设,丰富先行区建设资金来源.

相比现有研究, 本文在试点批次、分析范围、作用机制等方面都有所拓展.但受制于研究进展,仍存在一些不足, 待未来完善:(1)研究数据方面,研究部分数据通过省级数据倒推, 该方法虽得到了已有研究应用, 具备一定科学性, 但仍非真实数据,未来有待真实数据公布后, 进一步验证;(2)本文在利用省级层面数据估算城市层面数据时,虽参考现有研究做法,使用耕地这一与农业碳排放高度相关的指标作为估算依据,但是其仍存在局限,未来将进一步综合经济、环境污染、耕地、人口、农作物种植情况等多种数据构建更为科学的降尺度模型,以估算市域层面农业碳排放相关数据;(3)先行区政策对农业碳排放的影响机制丰富, 本文虽分析了三类机制,但是其仍可能存在其他机制, 更丰富的作用机制未来需要进一步进行剖析.

参考文献:

[1] Li B, Gao Y. Impact and transmission mechanism of digital economy on agricultural energy carbon emission reduction [J]. International

Review of Economics & Finance, 2024,95.doi:10.1016/j.iref.2024.103457.

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

[3] Wu Y, Du H, Wei X. Big data development and agricultural carbon emissions: Exacerbation or suppression? A quasi-natural experiment based on the establishment of the national big data comprehensive pilot zone [J]. Journal of Environmental Management, 2024,368.doi:10.1016/j.jenvman.2024.122178.

[4] 章胜勇,尹朝静,贺亚亚,等.中国农业碳排放的空间分异与动态演进——基于空间和非参数估计方法的实证研究 [J]. 中国环境科学, 2020,40(3):1356-1363.
Zhang S Y, Yin C J, He Y Y, et al. Spatial differentiation and dynamic evolution of agricultural carbon emission in China——Empirical research based on spatial and non-parametric estimation methods [J]. China Environmental Science, 2020,40(3):1356-1363.

[5] 田　云,张俊飚,李　波.中国农业碳排放研究:测算、时空比较及脱钩效应 [J]. 资源科学, 2012,34(11):2097-2105.
Tian Y, Zhang J B, Li B. Agricultural carbon emissions in China: calculation, spatial-temporal comparison and decoupling effects [J]. Resources Science, 2012,34(11):2097-2105.

[6] 何艳秋,戴小文.中国农业碳排放驱动因素的时空特征研究 [J]. 资源科学, 2016,38(9):1780-1790.
He Y Q, Dai X W. Phase characteristics and regional differences in agriculture carbon emissions in China [J]. Resources Science, 2016, 38(9):1780-1790.

[7] 史新杰,谭雪勤,周　茹,等.基于机器学习的河南省农业碳排放驱动因素分析和情景预测 [J]. 中国环境科学, 2025,45(10):5885-5893.
Shi X J, Tan X Q, Zhou R, et al. Driving factors analysis and scenario prediction of agricultural carbon emissions in Henan Province based on machine learning [J]. China Environmental Science, 2025,45(10): 5885-5893.

[8] Sadowski A, Wojcieszak-Zbierska M M, et al. Agricultural production in the least developed countries and its impact on emission of greenhouse gases – An energy approach [J]. Land Use Policy, 2024, 136.doi:10.1016/j.landusepol.2023.106968.

[9] Song Z, Guan J, Han M. Mapping agricultural greenhouse gas emissions via multi-national supply chains: Evidence from Asia and the Pacific Countries [J]. Land, 2024,13(12):2106-2106.

[10] 章胜勇,尹朝静,贺亚亚,等.中国农业碳排放的空间分异与动态演进——基于空间和非参数估计方法的实证研究 [J]. 中国环境科学, 2020,40(3):1356-1363.
Zhang S Y, Yin C J, He Y Y, et al. Spatial differentiation and dynamic evolution of agricultural carbon emission in China——Empirical research based on spatial and non-parametric estimation methods [J]. China Environmental Science, 2020,40(3):1356-1363.

[11] 仝昊天,夏恩君,孙　聪,等.设施农业发展对农业碳排放效率的影响 [J]. 中国环境科学, 2024,44(12):7079-7094.
Tong H T, Xia E J, Sun C, et al. Impact of facility agriculture development on agricultural carbon emission efficiency [J]. China Environmental Science, 2024,44(12):7079-7094.

[12] 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.
Xu Q H, Zhang G S. Spatial spillover effect of agricultural mechanization on agricultural carbon emission intensity: an empirical analysis of panel data from 282 cities [J]. China Population, Resources and Environment, 2022,32(4):23-33.

[13] 张军涛,韩祁祺.黄河流域农业碳排放时空演变特征及影响因素研究 [J]. 环境科学研究, 2025,38(4):754-766.
Zhang J T, Han Q Q. Spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors of agricultural carbon emissions in the Yelow River Basin [J]. Research of Environmental Sciences, 2025,38(4):754-766.

[14] 章楠楠,徐皓帆,李志文,等.基于机器学习的广东省县域农业碳排放时空演变及驱动因素研究 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(12):1994-2007.
Zhang N N, Xu H F, Li Z W, et al. Spatiotemporal evolution and driving factors of agricultural carbon emissions at county level in Guangdong Province based on machine learning [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024,32(12):1994-2007.

[15] 郑　瑞,姜　春,谢　臻,等.2001~2020 年福建省县域单元农业碳排放核算和时空演变特征分析 [J]. 水土保持通报, 2024,44(3):430-440,451.
Zheng R, Jiang C, Xie Z, et al. Accounting and analyzing spatial-temporal evolution characteristics of agricultural carbon emissions at county units of Fujian Province during 2001~2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(3):430-440,451.

[16] 沈玉洁,裴小涵,赵敏娟.互联网使用对农业碳排放效率的影响——来自豫湘黑三省粮食种植户的实证检验 [J]. 资源科学, 2024,46(7): 1314-1329.
Shen Y J, Pei X H, Zhao M J. The impact of Internet use on agricultural carbon emission efficiency: Empirical evidence from grain farmers in Henan, Hunan, and Heilongjiang [J]. Resources Science, 2024,46(7):1314-1329.

[17] 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 P T, Wang L. Spatial effect of digital inclusive finance on agricultural carbon emission intensity and mechanism [J]. Resources Science, 2023,45(3):593-608.

[18] 秦雨新,李树超.农业经济增长与农业碳排放强度空间溢出效应实证研究 [J]. 湖北农业科学, 2023,62(4):232-238.
Qin Y X, Li S C. An empirical study on the spatial spillover effects of agricultural economic growth and agricultural carbon emission intensity [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2023,62(4):232-238.

[19] 何艳秋,王鸿春,刘云强.产业集聚视角下农业碳排放的空间效应 [J]. 资源科学, 2022,44(12):2428-2439.
He Y Q, Wang H C, Liu Y Q. Spatial effects of agricultural carbon emissions from the perspective of industrial agglomeration [J]. Resources Science, 2022,44(12):2428-2439.

[20] 陈宇斌,王　森,陆　杉.农产品贸易对农业碳排放的影响——兼议数字乡村发展的门槛效应 [J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2022,(6):45-57.
Chen Y B, Wang S, Lu S. The impact of agricultural products trade on

agricultural carbon emissions——The threshold effect of digital rural development [J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2022,(6):45-57.

[21] 谢会强,吴晓迪.城乡融合对中国农业碳排放效率的影响及其机制 [J]. 资源科学, 2023,45(1):48-61.
Xie H Q, Wu X D. Impact and its mechanism of urban-rural integration on the efficiency of agricultural carbon emissions in China [J]. Resources Science, 2023,45(1):48-61.

[22] 庞洪伟,刘鑫雨,巩艳红,等.物联网发展、科技创新与农业碳排放强度 [J]. 经济问题, 2024,(2):77-83.
Pang H W, Liu X Y, Gong Y H, et al. Internet of things development, technological innovation and agricultural carbon intensity [J]. On Economic Problems, 2024,(2):77-83.

[23] Bauernschuster S, Pichler M, Ingalls M, et al. Discursive and biophysical dimensions of land sparing policies in Laos: Implications for greenhouse gas emissions and food security [J]. Land Use Policy, 2022,120.doi:10.1016/j.landusepol.2022.106293.

[24] 王 磊,马金铭.非正式环境规制促进农业碳减排了吗——基于社会公众环境关注的视角 [J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2024,24(6):80-94.
Wang L, Ma J M. Has informal environmental regulation promoted carbon emission reduction in agriculture? —From the perspective of public environmental concern [J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition), 2024,24(6):80-94.

[25] 陈宇斌,王 森.农业综合开发投资的农业碳减排效果评估——基于高标准基本农田建设政策的事件分析 [J]. 农业技术经济, 2023,(6):67-80.
Chen Y B, Wang S. Evaluation of agricultural carbon emission reduction effect of agricultural comprehensive development investment: event analysis is based on high-standard farmland construction [J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2023,(6):67-80.

[26] 熊飞雪,赵星磊,郭子毅,等.土地整治对农业碳排放的影响研究——基于高标准农田建设政策的准自然实验 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023,31(12):2022-2032.
Xiong F X, Zhao X L, Guo Z Y, et al. Research on the effects of rural land consolidation on agricultural carbon emissions: a quasi-natural experiment based on the high-standard farmland construction policy [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023,31(12):2022-2032.

[27] Balogh J M. The impacts of agricultural subsidies of Common Agricultural Policy on agricultural emissions: The case of the European Union [J]. Agricultural Economics (Czech Republic), 2023, 69(4):140-150.

[28] Zhang Z, Chen U, Ashok K, et al. Effects of agricultural subsidy policy adjustment on carbon emissions: A quasi-natural experiment in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2025(487):144603.

[29] 杨 晨,胡珮琪,刁贝娣,等.粮食主产区政策的环境绩效:基于农业碳排放视角 [J]. 中国人口·资源与环境, 2021,31(12):35-44.
Yang C, Hu P Q, Diao B D, et al. Environmental performance evaluation of policies in main grain producing areas: from the perspective of agricultural carbon emissions [J]. China Population, Resources and Environment, 2021,31(12):35-44.

[30] 贺 青,张俊飚.粮食主产区政策对农业碳排放的影响 [J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2023,(4):47-55.
He Q, Zhang J B. The impacts of policies in main grain-producing areas on agricultural carbon emissions [J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Science Edition), 2023,(4):47-55.

[31] 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.
Zhang Z, Tian Y, Chen C B. Can policy-supported agricultural insurance guide agricultural carbon emission reduction? [J]. Journal of Hunan Agricultural University(Social Sciences), 2023,24(2):29-38.

[32] 罗 娟,姚宗路,孟海波,等.我国农业绿色发展现状与典型模式——基于第 1 批国家农业绿色发展试点先行区的数据 [J]. 江苏农业科学, 2020,48(18):1-5.
Luo J, Yao Z L, Meng H B, et al. The current situation and typical models of green development in China's agriculture: Based on the data of the first batch of national pilot zones for green development in agriculture [J] Jiangsu Agricultural Sciences, 2020,48(18):1-5.

[33] 尹 丽,赵振洋,张永旺.风险不确定性感知会影响农业绿色生产行为吗?——来自农业绿色发展先行区的证据 [J]. 干旱区资源与环境, 2022,36(9):26-32.
Yin L, Zhao Z Y, Zhang Y W. Dose the risk uncertainty perception affect agricultural green production behavior?——Evidence from the agricultural green development going first area [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022,36(9):26-32.

[34] 卓 娜,柴智慧.乡村生态振兴背景下农业绿色发展路径研究——基于农业绿色发展先行区的案例 [J]. 农业经济, 2023,(7):7-11.
Zhuo N, Chai Z H. Research on the path of agricultural green development under the background of rural ecological revitalization: Based on the case of agricultural green development pilot zones [J]. Agricultural Economy, 2023,(7):7-11.

[35] 伍国勇,陈高哲,程建伟.农业环境规制对城乡融合发展的影响——基于国家农业绿色发展先行区的准自然实验 [J]. 中国人口·资源与环境, 2025,35(2):171-184.
Wu G Y, Chen G Z, Cheng J W. Impact of agricultural environmental regulation on urban-rural integration development: taking China's "agricultural green development pilot zones" as a quasi-natural experiment [J]. China Population, Resources and Environment, 2025, 35(2):171-184.

[36] 卢泓钢,丁永鹏,吴伟光.农业绿色发展先行区政策的效果评估——基于浙江省县域样本的实证研究 [J]. 研究与发展管理, 2024,36(4):24-34.
Lu H G, Ding Y P, Wu W G. Evaluation of the effectiveness of the agricultural green development pioneer zone policy—An empirical study based on county samples in Zhejiang Province [J]. R&D Management, 2024,36(4):24-34.

[37] 张志新,杨在顺,周家乐.国家农业绿色发展先行区化肥减量效果评估——兼论化肥减量与粮食安全的关系 [J/OL]. 中国农业资源与区 划 ,1-17 [2025-12-20].https://link.cnki.net/urlid/11.3513.S.20250110.1341.022.
Zhang Z X, Yang Z S, Zhou J L. Evaluation of the effect of chemical fertilizer reduction in national agricultural green development pilot zones: with a discussion on the relationship between chemical fertilizer reduction and food security [J/OL] Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planningl, 1-17[2025-12-20]. https://link.cnki.net/urlid/11.3513.S.20250110.1341.022.

edu.cn/kcms/detail/11.3513.S. 20250110.1341.022. HTML.

[38] Du Y, Liu H, Huang H, et al. The carbon emission reduction effect of agricultural policy——Evidence from China [J]. Journal of Cleaner Production, 2023,406.doi:10.1016/j.jclepro.2023.137005.

[39] 胡中应.技术进步、技术效率与中国农业碳排放 [J]. 华东经济管理, 2018,32(6):100-105.
Hu Z Y. Technical progress, technical efficiency and agricultural carbon emissions in China [J]. East China Economic Management, 2018,32(6):100-105.

[40] 王　惠,卞艺杰.农业生产效率、农业碳排放的动态演进与门槛特征 [J]. 农业技术经济, 2015,(6):36-47.
Wang H, Bian Y J. Dynamic evolution and threshold characteristics of agricultural production efficiency and agricultural carbon emissions [J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2015,(6):36-47.

[41] 吴海霞,郝含涛,史恒通,等.农业机械化对小麦全要素生产率的影响及其空间溢出效应 [J]. 农业技术经济, 2022,(8):50-68.
Wu H X, Hao H T, Shi H T, et al. Effect of agricultural mechanization on total factor productivity of wheat and its spatial spillover effect [J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2022,(8):50-68.

[42] 成德宁,黄诗琪.农村数字化能提高农业全要素生产率吗？[J]. 农业经济与管理, 2024,(2):38-51.
Cheng D N, Huang S Q. Can rural digitalization improve agricultural total factor productivity? [J]. Agricultural Economics and Management, 2024,(2):38-51.

[43] 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. 43. Impact of digital financial inclusion on agricultural carbon emission intensity [J]. Economic Issues, 2024,(1):57-65.

[44] 申　云,洪程程.数字普惠金融与农业绿色低碳发展:水平测度和机制检验 [J]. 金融理论与实践, 2023,(1):45-60.
Shen Y, Hong C C. Digital inclusive finance and green and low-carbon development of agriculture: Level measurement and mechanism verification [J]. Financial Theory & Practice, 2023,(1):45-60.

[45] 阮建青,杨奇明,叶武威,等.中国乡村创新创业发展:指数构建与测度分析 [J]. 经济与管理, 2024,38(5):9-18.
Ruan J Q, Yang Q M, Ye W W, et al. Rural entrepreneurship development in China: Index construction and measurement analysis [J]. Economy and Management, 2024,38(5):9-18.

[46] 胡　川,韦院英,胡　威.农业政策、技术创新与农业碳排放的关系研究 [J]. 农业经济问题, 2018,(9):66-75.
Hu C, Wei Y Y, Hu W. Research on the relationship between agricultural policy, technological innovation and agricultural carbon emissions [J]. Issues in Agricultural Economy, 2018,(9):66-75.

[47] 田　云,蔡艳蓉,张蕙杰.数字经济对农业碳排放效率的影响——基于门槛效应和空间溢出效应的检验 [J]. 农业技术经济, 2024,(11):89-107.
Tian Y, Cai Y R, Zhang H J. The impact of digital economy on agricultural carbon emission efficiency: Based on threshold effect and spatial spillover effect test [J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2024,(11):89-107.

[48] 唐　菁,张　娜,易　露,等.农业碳补偿率的空间格局及其驱动因素——来自长江经济带 108 个地级及以上城市的经验证据 [J]. 中国人口·资源与环境, 2024,34(9):76-92.
Tang J, Zhang N, Yi L, et al. Analysis of spatial patterns and driving factors of agricultural carbon offset rate: empirical evidence from 108prefectural - level and above cities in the Yangtze River Economic Belt [J]. China Population, Resources and Environment, 2024,34(9):76-92.

[49] 王韶华,吴海霞,肖　琴,等.极端高温对农业碳排放的影响 [J]. 中国人口·资源与环境, 2025,35(2):68-77.
Wang S H, Wu H X, Xiao Q, et al. Impact of extremely high temperatures on agricultural carbon emissions [J]. China Population, Resources and Environment, 2025,35(2):68-77.

[50] 李建英,战　爽.强化农村绿色基础设施投资提高农业全要素生产率 [J]. 经济与管理, 2023,37(5):55-62.
Li J Y, Zhan S. Research on the impact of rural green infrastructure investment in agricultural total factor productivity [J]. Economy and Management, 2023,37(5):55-62.

[51] 尚　杰,吉雪强,陈玺名.中国城镇化对农业生态效率的影响——基于中国 13 个粮食主产区 2009~2018 年面板数据 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020,28(8):1265-1276.
Shang J, Ji X Q, Chen X M. Study on the impact of China's urbanization on agricultural ecological efficiency: Based on panel data of 13 major grain-producing regions in China from 2009 to 2018 [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020,28(8):1265-1276.

[52] 吉雪强,崔益邻,张思阳,等.农地流转对农业碳排放强度影响的空间效应及作用机制 [J]. 中国环境科学, 2023,43(12):6611-6624.
Ji X Q, Cui Y L, Zhang S Y, et al. Study on the spatial effect and action mechanism of the influence of rural land transfer on agricultural carbon emission intensity [J]. China Environmental Science, 2023,43(12):6611-6624.

[53] 郭　峰,王靖一,王　芳,等.测度中国数字普惠金融发展:指数编制与空间特征 [J]. 经济学(季刊), 2020,19(4):1401-1418.
Guo F, Wang J Y, Wang F, et al. Measuring China's digital financial inclusion: Index compilation and spatial characteristics [J]. China Economic Quarterly, 2020,19(4):1401-1418.

[54] 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.

作者简介：刘慧敏(1996-),女,江西吉安人,博士研究生,主要从事农业生态经济研究.发表论文 8 篇.liuhuimin921@sina.com.