

规模经营与技术进步对农业绿色低碳发展的影响*

——基于设立粮食主产区的准自然实验

魏梦升¹ 颜廷武¹ 罗斯炫²

摘要：党的二十大报告明确了加快推动绿色发展、扎实推进乡村生态振兴、建设美丽中国的重大战略目标。农业绿色低碳发展是实现这一目标的必然选择，而实现“增产”与“减碳”双赢是推进农业绿色低碳发展的题中之义。为了揭示粮食主产区增产压力下的农业碳减排机制与路径，本文运用1999—2019年中国省级面板数据，以2004年国家设立13个粮食主产区为准自然实验，基于规模经营与技术进步的协同作用视角，对设立粮食主产区的碳减排效应开展实证考察。基准回归结果表明，设立粮食主产区虽然提高了农业碳强度，但对农业碳排放具有显著削减效应。影响机制分析发现：设立粮食主产区通过规模经营实现碳减排效应，劳动力转移对设立粮食主产区的碳减排效应具有调节作用；设立粮食主产区促进了技术进步，从而实现碳减排效应；规模经营与绿色技术进步具有协同效应，二者的协同作用强化了设立粮食主产区的碳减排效应。进一步分析表明，设立粮食主产区的碳减排效应主要通过降低化肥施用强度实现，而不是机械使用强度。地区异质性分析发现，设立粮食主产区在山东、黑龙江、江苏、辽宁4个省份具有更强的碳减排效应。据此，本研究为探索设立粮食主产区碳减排效应的作用机制和优化路径提供了经验证据。

关键词：碳减排效应 粮食主产区 规模经营 技术进步 绿色低碳发展

中图分类号：F323.2 **文献标识码：**A

一、引言

绿色是农业农村发展的鲜明底色。推动形成绿色低碳发展新格局，既有利于满足人民日益增长的美好生活需要，又有利于实现碳达峰碳中和的战略目标。党的二十大报告进一步指出协同推进降碳、

*本文研究受到教育部哲学社会科学研究重大课题攻关项目“乡村产业兴旺科技支撑的体制机制研究”（编号：21JZD030）的资助。感谢《中国农村经济》《中国农村观察》第六届“三农论坛”上徐志刚教授、曹建民教授和吴方卫教授的宝贵意见，同时感谢匿名审稿专家的建设性意见，文责自负。本文通讯作者：颜廷武。

减污、扩绿、增长，推进绿色低碳发展。同时，农业绿色发展是“十四五”时期生态文明建设的重要内容，也是农业供给侧结构性改革的必然要求。中国农业依靠资源消耗的粗放式发展没有得到根本性扭转，资源和环境对农业高质量发展的约束趋紧。乡村振兴必须守住生态安全底线，乡村生态环境保护任务仍然繁重（魏后凯，2022）。为此，党的二十大报告明确提出加快发展方式绿色转型，推动形成绿色低碳的生产方式，《“十四五”全国农业绿色发展规划》^①也明确提出主要农产品温室气体排放大幅度降低和农业用能效率提升等目标。在“双碳”目标下农业绿色发展的关键是实现农业碳减排，以低碳推动农业绿色转型已成为广泛共识（金书秦等，2021）。必须看到，农业生产本身也是二氧化碳排放的重要来源之一（何可等，2021）。国家统计局数据显示，2020年中国粮食播种面积占农作物总播种面积的69.7%^②，粮食产业碳减排无疑是农业减排固碳的重中之重（田云和尹恣昊，2022）。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中关于绿色生态指标也明确指出单位国内生产总值二氧化碳排放降低18%的目标^③。因此，探索一条兼顾粮食稳产增产和农业减排固碳双赢的绿色低碳转型之路，成为中国农业绿色低碳发展必须面对的巨大挑战。

规模经营与技术进步是实现绿色低碳发展的根本路径（邵帅等，2022）。现有文献探讨了农业规模经营对农业绿色低碳发展的作用机制，但关于农业规模经营与绿色低碳发展的确切关系尚未有定论。在宏观层面，有学者发现农业经营规模扩大会改变化肥和机械的使用强度，从而对农业绿色低碳发展产生负向影响（马贤磊等，2019）。然而，也有学者证明适度规模经营有利于农业绿色低碳发展（姜松等，2021）。在微观层面，大量学者基于农业规模经营视角，探讨农户绿色低碳生产行为的异质性。已有研究从碳足迹、化学品投入角度出发，发现粮食作物种植规模扩大会提高水肥利用效率，从而有助于实现农业绿色低碳发展（Pan et al., 2017; 徐湘博等，2022）。也有学者通过实证分析得出规模经营农户会投入更多化肥和农药的结论，即规模经营会对农业绿色低碳发展产生负面影响（田云等，2015）。部分研究还考察了农业规模经营对化肥农药减量的非线性动态影响，发现化肥农药投入强度与农业经营规模呈正U型关系（赵昶等，2021）。此外，也有学者基于技术进步视角，对农业绿色低碳发展相关问题开展研究。技术进步对农业绿色低碳发展具有关键作用，这一观点已经成为学界普遍共识（杨莉莎等，2019）。综合来看，现有研究普遍认为技术进步能减少农业化学品投入、提高能源和农机具使用效率，进而实现农业绿色低碳发展。

粮食主产区承担着粮食和重要农产品的稳产保供职能，其绿色低碳发展问题备受关注，已有学者分别对粮食主产区相关政策和农业碳减排开展了十分有益的探索，也有文献考察了设立粮食主产区对碳排放的影响，得出粮食主产区相关政策的实施具有碳减排效应，并发现增加粮食种植比例是一条农

^①参见《农业农村部 国家发展改革委 科技部 自然资源部 生态环境部 国家林草局关于印发〈“十四五”全国农业绿色发展规划〉的通知》，http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/07/content_5635867.htm。

^②数据来源：国家统计局官网，<https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>。

^③资料来源：《（两会授权发布）中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》，http://www.xinhuanet.com/2021-03/13/c_1127205564_2.htm。

业碳减排路径（杨晨等，2021）。然而，现有研究在深入揭示粮食主产区相关政策的碳减排机制方面存在不足。一是，鲜有研究综合分析粮食主产区相关政策的减碳机制，除规模经营之外，技术进步或者其他因素是否也能实现农业碳减排效应？在粮食主产区，农业生产的集聚特征更有可能发挥农机具和农业基础设施的技术效应，技术进步可能会加强粮食主产区的碳减排效应。二是，少有研究注意到规模经营与技术进步的相互促进关系。一个不容忽视的事实是，没有规模经营，粮食生产技术效率将大打折扣（高鸣和宋洪远，2014），缺乏恰当的农业技术，盲目扩大经营规模，必将带来生产效率的损失（Sheng et al., 2019）。因此，本文提出一个合理推测，粮食主产区可能通过规模经营与技术进步的协同作用实现“增产”和“减碳”目标双赢。并且，本文尝试探析规模经营与技术进步在农业绿色低碳发展中的作用机制，为推动中国粮食安全和农业绿色低碳发展提供依据。

鉴于此，本文以2004年国家设立13个粮食主产区为一项外部政策冲击准自然实验，从规模经营与技术进步的协同作用视角切入，解析设立粮食主产区的碳减排机制。相比于已有文献，本文创新之处有如下两点：其一，本文构建规模经营、技术进步以及二者协同作用的理论分析框架，分析劳动力转移的调节效应，以期更全面地阐释农业碳减排机制，为深入推进农业绿色低碳发展提供科学决策依据；其二，本文考察13个粮食主产区碳减排效应的异质性，对不同地区设立粮食主产区的碳减排效应开展规范识别与评价，准确评估碳减排作用方向，能够更合理地解释政策干预的异质性效果，有助于粮食主产区相关政策因地制宜地调整和完善。

综上，本文对粮食主产区相关政策是否具有“增产”和“减碳”双重效应开展分析，从理论和实证两个方面提供经验证据，为中国农业保障粮食安全和加快实现“双碳”目标提供了有益参考和政策启示。

二、政策回顾与碳减排逻辑

（一）粮食主产区相关政策回顾

粮食主产区肩负保障国家粮食安全的重大战略任务。中国未设立粮食主产区之前，城镇化、市场化导致粮食生产的区域格局发生了变化，农业生产方式也发生了深刻变革，耕地“非粮化”加剧。农业发展受到前所未有的冲击，特别是粮食安全受到威胁。1999—2003年间，中国粮食生产出现连续下滑，粮食播种面积、单产和总产量全面下降；到2003年，粮食播种面积只有9914万公顷，比1998年减少了12.6%（朱希刚，2004），长此以往，中国粮食安全将受到动摇。为保障粮食安全，2004年国家通过行政干预设立13个省份为粮食主产区。事实上，在2003年底中国就明确界定，将黑龙江、辽宁、吉林、河南、湖北等13个省份作为粮食主产省份^①。此后，农业产业政策向粮食主产区倾斜。粮食主产区相关政策涵盖一揽子农业政策，大体可以概括为对粮食种植的支持和奖励，以及对粮食的收购等。具体包含以下3点：第一，政府对粮食种植户给予支持保护补贴、农机购置补贴、农业保险

^①参见《财政部关于印发〈关于改革和完善农业综合开发若干政策措施的意见〉的通知》，http://www.mof.gov.cn/gp/xxgk/ml/gjnyzhkfbgs/200806/t20080625_2502826.htm。

支持等优惠政策；第二，政府加强粮食主产区的农业综合开发，农业综合开发项目以改造中低产农田为重点任务，改善粮食主产区的农业基础设施；第三，政府实施粮食收储、产粮大县奖励、建设大型商品粮基地、健全粮食流通体系等一系列激励政策（蒋黎和朱福守，2015）。

根据国家统计局公开数据，2003—2021年中国粮食产量实现“十八连丰”，2015—2021年连续7年粮食产量保持在0.65万亿公斤以上，2021年粮食主产区粮食播种面积占全国粮食作物播种面积的比例约为75%，粮食产量占比超过78%^①。这充分说明，粮食主产区在保障国家粮食安全方面发挥重要作用。自粮食主产区设立以来，农业政策和财政资金向粮食主产区倾斜（魏后凯和王业强，2012），粮食主产区内农业生产活动也更为集中和频繁。为了保障粮食稳产增产，粮食主产区可能投入更多农业生产资料。因此，粮食主产区为中国粮食增产作出巨大贡献的同时，可能带来农业碳排放增长。从农业碳排放来源结构看，农业碳排放第一大来源是化学品投入（伍国勇等，2020），具体包括化学肥料、农药、农膜等农资。其中，施用化学肥料带来的农业碳排放比重最大。化肥也被称为“粮食的粮食”，粮食主产区增产可能在很大程度上依赖化肥大量施用。相关研究表明，化肥施用量对粮食产量的贡献达到56.81%，中国每公顷耕地化肥施用量约为世界平均值的3.9倍（常佳悦等，2019）。为应对粮食增产带来的环境问题，中国颁布多项治理生态环境的农业政策，特别是2013年以来，中国形成针对农业环境污染的综合整治方案，具体措施包括节水灌溉工程、化肥农药零增长、畜禽粪污和农作物秸秆资源化等。那么，国家设立粮食主产区实现粮食增产的同时，究竟是增加还是减少了农业碳排放？其作用机制是什么？对这些问题学界尚未给出明确回答。因此，有必要针对粮食主产区碳减排问题开展理论分析和实证检验。

（二）实施粮食主产区相关政策的碳减排逻辑

从粮食主产区自身资源禀赋和政策目标方向的现实出发，本文构建粮食主产区相关政策的碳减排逻辑。首先，相较于非粮食主产区，优越的自然条件和政策的大力扶持，为粮食主产区农业规模经营创造了有利条件。粮食主产区，农业生产趋向规模化，种植结构趋向专业化，农业生产环节更容易实现专业分工。农业专业分工会产生规模经济效应，优化农业生产要素配置，实现农业技术和农业基础设施的共享。据此推断，粮食主产区可能通过规模经营获得规模经济效应，提高农业生产资料使用效率，从而实现农业碳减排^②。其次，由于农业政策支持和生产聚集特征，粮食主产区内农机具等农业机械装备更有可能实现高效作业，即通过内嵌式环保技术达到精准施肥、科学施药、节水灌溉等效果，进而实现农业碳减排。最后，规模经营与技术进步二者之间并非相互独立，规模经营与技术进步之间若能产生正向交互影响，发挥协同作用，则能放大粮食主产区相关政策的碳减排效应。鉴于此，本文接下来从规模经营、技术进步以及两者的协同作用三个方面讨论设立粮食主产区的碳减排逻辑。

^①数据来源：《中国统计年鉴》（2004—2022年，历年），<https://data.cnki.net/yearBook/single?id=N2022110021>。

^②本文考虑的粮食主产区相关政策主要涵盖对粮食作物生产的扶持和奖励政策，粮食主产区相关政策更有利于粮食作物规模经营，通过规模经营实现的碳减排必然主要得益于粮食作物生产而非经济作物生产。

1. 规模经营的碳减排逻辑。2004—2010年间，中国的农业综合开发项目重点扶持粮食主产区，项目主要目标正是“化零为整”，实现农业生产集中连片经营（许庆等，2011）。粮食主产区相关政策不仅通过土地整治扩大农户地块规模，还通过推进农业种植结构调整鼓励农户从多品种种植调整到单一粮食品种专业化种植，从而实现主产区粮食连片规模经营（张露和罗必良，2020）。总之，粮食主产区相关政策极有可能促进粮食集约化生产，粮食规模经营带来规模经济效应，促进实现农业碳减排。劳动力转移也会深刻影响粮食规模经营。从短期来看，劳动力转移可能导致农户投入过量化学品代替农业劳动投入。但是，从长期来看，随着劳动力转移不断深化，农村剩余劳动力不断外流，可以缓解粮食主产区农业生产内卷化（程名望等，2015），劳动力转移进一步促进土地流转，有利于发展适度规模经营，实现对粮食主产区化学品投入的削减作用（罗斯炫等，2020）。综合上述分析，本文认为，粮食主产区相关政策可能促进粮食规模经营，获得规模效应，从而实现粮食主产区碳减排。并且，劳动力转移可能对粮食主产区碳减排效应具有调节作用。

2. 技术进步的碳减排逻辑。在新古典经济学中，索洛余值被定义为全要素生产率的增长率（Solow, 1957）。而农业全要素生产率增长反映技术进步，技术进步是提高粮食主产区粮食和重要农产品稳定供给的关键因素之一（黄季焜等，2009）。设立粮食主产区之前，农业生产以分散细碎的方式为主，农业技术发挥空间有限。有学者论证了中国1999—2003年农业技术推广和扩散并不成功，造成技术进步与农业效率损失并存的现象（陈卫平，2006）。但也有学者认为，现代非农部门能以资本形式反哺农业部门，从而促进农业部门技术进步（陈宗胜和黎德福，2004）。设立粮食主产区之后，粮食主产区相关政策也促进了主区内全要素生产率（total factor productivity, 简称TFP）提升（Allan et al., 2006），农业科技在粮食主区内得到了更广泛的推广和应用，例如，新品种培育、化肥减施技术、生物农药技术、秸秆还田技术等。更重要的是，粮食主区内投入的先进农机具装备具有高效作业功能和内嵌式环保技术（孙杰等，2019），通过农机具提供的精准施肥、施药与节水灌溉提高农资利用效率，有利于实现粮食主产区的碳减排。

3. 基于规模经营与技术进步协同作用的碳减排逻辑。早有研究表明，规模经营与技术进步的协同作用能实现环境与经济兼容发展（董直庆等，2014）。粮食主产区的规模经营与技术进步并非相互独立。首先，随着“刘易斯拐点”到来和人口红利消失，中国粮食主产区农业发展必然走向专业化，粮食主产区相关政策促进主区内作物种植结构“趋粮化”（仇童伟和罗必良，2018）。粮食规模经营降低机械替代劳动的难度，同时为绿色低碳技术应用提供有利条件。其次，技术进步可促进农业生产可分性，农业分工会正向影响农业规模经营，这说明粮食主产区技术进步也可正向影响农业规模经营（何秀荣，2016）。由此可见，粮食规模经营与技术进步可能互相促进，二者的协同作用共同促使粮食主产区实现碳减排。

综上所述，本文构建设立粮食主产区实现农业碳减排的理论分析框架，如图1所示。

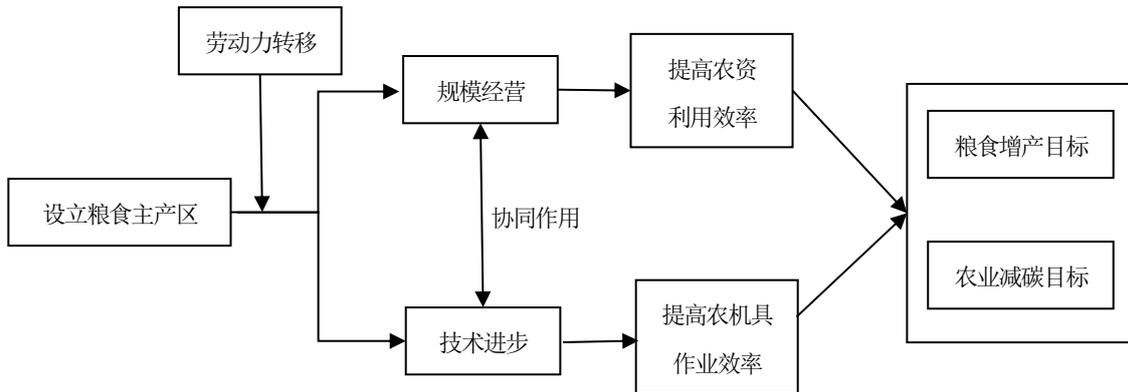


图1 粮食主产区农业碳减排理论分析框架

据此，本文提出如下5个研究假说。

- H1: 设立粮食主产区能够有效减少粮食主产区的农业碳排放。
- H2: 设立粮食主产区通过促进农业规模经营实现农业碳减排。
- H3: 设立粮食主产区的碳减排效应受到劳动力转移调节作用的影响。
- H4: 设立粮食主产区促进技术进步，进而实现农业碳减排。
- H5: 规模经营与技术进步相互促进，协同实现粮食主产区的农业碳减排。

三、研究设计与特征事实

(一) 变量选取

1.被解释变量。本文被解释变量为农业碳排放和农业碳强度。农业碳排放是指单位面积农业生产带来的碳排放（吨/公顷），农业碳强度是指单位产值带来的碳排放（吨/万元）。具体测算时，参考《2006年IPCC国家温室气体清单指南》^①中的系数指标，借鉴田云和尹恣昊（2022）构建的农业碳排放测算体系，本文把农业碳排放范畴定义为农业物资投入、农业能源使用、水稻种植和畜禽养殖四个方面。鉴于畜禽养殖种类繁多，统计数据严重缺失，本文中的农业碳排放测算聚焦种植业领域。种植业碳排放来源包括三个方面：一是农资投入，包括化肥、农药、农膜在生产使用过程中带来的碳排放；二是农业能源使用，包括农业机械使用（主要为农用柴油）和农业灌溉用电带来的碳排放；三是农业翻耕导致土壤中有机碳流失带来的碳排放。本文参考李波等（2011）的做法，设定如下农业碳排放测算公式：

$$DNTP = (\sum P_i \times T_i) / area \quad (1)$$

^①资料来源：《2006年IPCC国家温室气体清单指南》，<https://www.ipcc.ch/report/2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>。

(1) 式中： $DNTP$ 表示农业碳排放； P_i 表示第 i 类碳源的碳排放系数^①； T_i 表示第 i 类碳源消耗的绝对量； $(\sum P_i \times T_i)$ 表示各碳源的碳排放加总量； $area$ 表示农作物总播种面积。

本文参考伍国勇等（2020）的做法，设定如下农业碳强度测算公式：

$$TQD = (\sum P_i \times T_i) / TOVA \quad (2)$$

(2) 式中： TQD 表示农业碳强度； $TOVA$ 表示种植业总产值；其他符号含义与（1）式中保持一致。

2. 核心解释变量。本文把设立粮食主产区作为一项准自然实验，以 2004 年为处理发生的时间点。本文核心解释变量为设立粮食主产区 ($treat_i$)，表示地区是否被设为粮食主产区。若第 i 个地区为粮食主产区， $treat_i$ 取值为 1；反之，则 $treat_i$ 取值为 0。 $post_i$ 表示设立粮食主产区前后年份虚拟变量，当 $t \geq 2004$ 时时， $post_i$ 取值为 1；反之，则 $post_i$ 取值为 0。 $treat_i$ 与 $post_i$ 交乘项的系数反映设立粮食主产区的处理效应。为便于表述，以下本文将 $treat_i \times post_i$ 简称为政策交乘项。

3. 控制变量。由于农业碳排放和农业碳强度在不同农业经济发展水平下具有明显异质性，为使处理组省份和控制组省份农业碳排放和农业碳强度具有可比性，本文选取的控制变量包括产业结构、农业经济发展水平、城镇化率、人均地区生产总值、滞后一期的粮食单产、农业劳动力数量、农村劳动力平均受教育年限、土壤质量、农田灌溉条件和受灾率。产业结构用第一产业生产总值占地区生产总值的比例表征；农业经济发展水平用农林牧渔总产值与农村地区总人口的比值表征；城镇化率用各地区城镇人口占总人口的比例表征；人均地区生产总值以其平方值纳入模型，原因是随人均地区生产总值不断增长，农业碳排放和农业碳强度可能呈现先增后减的趋势（颜廷武等，2014）；滞后一期的粮食单产用滞后一期的粮食总产量与滞后一期的粮食播种面积比值表征；农业劳动力数量用第一产业从业人数表征；农村劳动力平均受教育年限采用加权平均法计算，本文把受教育程度为不识字或识字很少、小学、初中、高中、中专、大专以及大专以上 6 个层级分别赋值受教育年限为 0 年、6 年、9 年、12 年、12 年、15 年，再计算加权平均值得到农村劳动力平均受教育年限；土壤质量用水土流失面积表征；农田灌溉条件用有效灌溉面积表征；受灾率用农业受灾面积占农作物总播种面积的比例表征。

4. 机制分析变量。根据相关理论和已有文献，本文选取农业规模经营、劳动力转移和技术进步作为机制分析变量。借鉴杨晨等（2021）、田晓晖等（2021）的做法，农业规模经营用粮食播种面积占农作物总播种面积的比例表征，反映粮食经营规模变化^②。鉴于现有年鉴资料中没有农村劳动力外流情况相关宏观统计数据，本文参考李谷成等（2018）的做法，采用第一产业从业人数占总从业人数的

^① 化肥、农药、农膜、农用柴油、灌溉用电和翻耕的农业碳排放系数分别为 0.8956 千克/千克、4.9341 千克/千克、5.18 千克/千克、0.5927 千克/千克、19.8575 千克/公顷和 312.6 千克/公顷。

^② 在农业规模经营的变量测度上，鉴于人均经营耕地面积指标在《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》仅更新到 2012 年，本文以人均经营耕地面积（1999—2012 年）表征农业经营规模，并做了稳健性检验。替换新变量的回归结果表明，本文关于农业碳减排效应的作用机制的回归结果比较稳健。

比例反向表征劳动力转移。本文选取机械化水平与绿色技术进步作为技术进步的代理变量。机械化水平用农业机械总动力与第一产业从业人数的比值来表征，即农业劳均机械总动力。本文参考陈诗一（2010）的研究，把种植业总产值作为期望产出，农业碳排放作为非期望产出，两者共同作为产出指标，并选取农业劳动力投入（第一产业从业人数）、土地投入（农作物总播种面积）、机械投入（农业机械总动力）、化肥投入（化肥折纯量）和灌溉投入（有效灌溉面积）5个投入指标。本文运用序列DEA方法^①，把13个省级单位当作决策单元，测算绿色技术进步。

5.其他变量。本文还在模型中纳入其他变量：化肥施用强度用化肥折纯量与种植业播种面积的比值表征，机械使用强度用农业机械总动力与种植业播种面积的比值表征。

（二）数据来源

本文使用1999—2019年中国省级数据，包括31个省份21年的连续面板观测数据。数据来源如下：各地区农用化肥施用量（按折纯法计算）、农药使用量、农膜使用量、农用柴油使用量、农作物总播种面积、粮食播种面积、有效灌溉面积、种植业总产值、农林牧渔总产值、粮食总产量、农村地区总人口、农村劳动力受教育年限、水土流失面积、农业受灾面积、农业机械总动力、农林牧渔总产值指数及种植业总产值指数来自2000—2020年《中国农村统计年鉴》。各地区第一产业从业人数、城镇人口、总人口、地区生产总值、消费者价格指数均来自国家统计局^②。为消除通货膨胀的影响，本文对相关指标做平减处理。其中，本文以1999年为基期的消费者价格指数对地区生产总值做平减，以农林牧渔总产值指数对农林牧渔总产值做平减，以种植业产值指数对种植业总产值做平减。各变量描述性统计结果如表1所示。

表1 变量描述性统计

变量名称	单位	均值	标准差	最小值	最大值
农业碳排放	吨/公顷	0.843	0.238	0.458	1.693
农业碳强度	吨/万元	0.480	0.269	0.111	1.548
设立粮食主产区		0.419	0.494	0.000	1.000
产业结构	%	29.273	14.750	2.735	71.285
农业经济发展水平	万元/人	1.094	0.824	0.130	4.091
城镇化率	%	51.009	15.259	20.714	94.151
人均地区生产总值	万元/人	16.952	30.939	0.065	270.810
滞后一期的粮食单产	千克/公顷	4921.482	1117.463	2405.547	14183.3
农村劳动力数量	万人	961.054	738.111	37.090	3564.000
农村劳动力平均受教育年限	年	7.977	1.142	2.457	10.446
土壤质量	万公顷	301.296	287.575	0.000	1462.500

^①需要说明的是，本文运用MaxDEA6.0软件，先基于混合距离函数SBM模型下的Malmquist-Luenberger指数核算出绿色全要素生产率，再分解出技术进步（technology change，简称TC）。

^②数据来源：国家统计局网站，<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>。

表1 (续)

农田灌溉条件	万公顷	194.423	151.520	10.924	617.759
受灾率	%	23.596	16.224	0.000	0.936
农业规模经营	公顷	0.154	2.317	0.017	93.561
劳动力转移	%	40.397	16.627	1.907	81.834
绿色技术进步		2.032	0.909	1.000	6.124
机械化水平	千瓦时/人	3.230	2.526	0.383	35.366
化肥施用强度	吨/公顷	0.331	0.121	0.108	0.751
机械使用强度	千瓦时/公顷	5.657	3.317	1.204	24.626

(三) 特征事实

在构建计量模型之前, 本文先通过特征事实分析, 从整体上观察中国农业碳排放和农业碳强度变化情况, 并以 2004 年设立粮食主产区为时间节点, 对比分析设立粮食主产区前后的农业碳排放和农业碳强度情况。图 2 展示了 1999—2019 年中国农业碳排放趋势, 图 3 展示了 1999—2019 年中国农业碳强度趋势。

图 2 显示, 1999—2019 年间, 从整体趋势来看, 非粮食主产区的农业碳排放高于粮食主产区, 并且两者之间差距不断拉大。2004 年以前, 粮食主产区和非粮食主产区的农业碳排放几乎呈同步增长趋势; 2004 年设立粮食主产区之后, 非粮食主产区农业碳排放仍保持较高增长速度, 相比较而言, 粮食主产区农业碳排放增长速度却显著下降。甚至在 2014 年之后, 粮食主产区农业碳排放呈现明显下降趋势。这表明, 粮食主产区的集中生产方式并没有在单位面积上产生更多的农业碳排放绝对量。

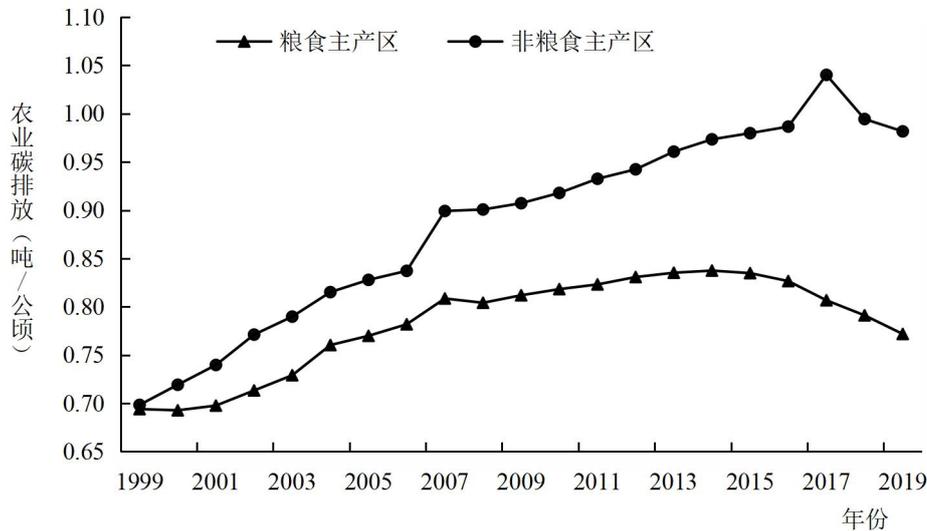


图 2 1999—2019 年中国农业碳排放情况

图 3 显示, 1999—2019 年, 从整体趋势来看, 粮食主产区的农业碳强度始终高于非粮食主产区。2004 年之前, 粮食主产区和非粮食主产区的农业碳强度都较高, 且二者之间有明显差距。但 2004 年之后, 粮食主产区和非粮食主产区的农业碳强度下降速率变快, 且 2005—2009 年, 粮食主产区和非

粮食主产区的农业碳强度差距快速缩小。2010—2019年，粮食主产区和非粮食主产区的农业碳强度下降速度变缓，二者之间农业碳强度相差较少。粮食主产区农业碳强度始终高于非粮食主产区这一状况说明，粮食主产区内的农业活动在单位产值上产生了更多的碳排放量。究其原因，相较于粮食主产区，非粮食主产区种植经济作物的比例更大，经济作物往往比粮食作物具有更高附加值，从而降低了农业碳强度。

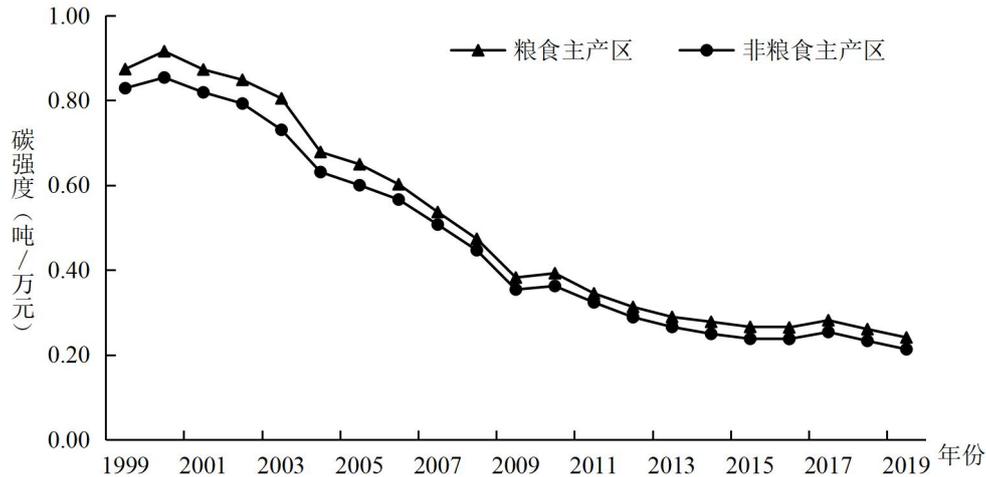


图3 1999—2019年中国农业碳强度情况

综合图2和图3可以看出，1999—2019年，中国农业碳排放整体呈现波动上升趋势，相较于非粮食主产区，粮食主产区在单位面积上的碳排放量更少，说明粮食主产区没有因为粮食稳产增产而产生更多的农业碳排放量。中国农业碳强度整体上呈现明显下降趋势，但粮食主产区在单位产值上的碳排放量始终高于非粮食主产区。本文特征事实分析结果与伍国勇等（2020）、田云和尹恣昊（2022）等研究结果基本一致。

（四）识别策略

就粮食主产区相关政策识别而言，准确估计粮食安全相关政策对碳排放影响的“净效应”较为困难。原因有以下3点：其一，粮食主产区相关政策从制定到发布再到施行，往往具有时滞效应，可能导致粮食主产区相关政策评估出现偏差；其二，近20年来，以粮食安全为导向的农业政策层出不穷，本文难以将粮食主产区相关政策一一剥离、分门别类地开展识别和估计；其三，因为大多数农业政策或多或少与宏观经济指标存在高度关联性，因此本文在构建实证模型时，必须尽可能地避免因遗漏变量和反向因果等产生的内生性问题。

为有效解决上述难点问题，本文将2004年国家设立13个粮食主产区这一事件作为识别因果关系的宝贵契机。选择这一事件的原因主要有如下3点：其一，在所有农业政策中，设立粮食主产区是保障国家粮食安全重大战略目标的代表性政策（罗斯炫等，2020）；其二，设立粮食主产区政策的内涵极其丰富，除了从行政区域上划分粮食主产区和非粮食主产区之外，还包括保障粮食安全的一揽子政策措施，而这些政策作用方向具有一致性，这可以为识别和剥离设立粮食主产区的处理效应提供条件

和便利；其三，其余面向全国的普惠性农业政策不会对粮食主产区和非粮食主产区碳减排效应的组间差异造成干扰，换言之，设立粮食主产区相对于某个地区来说是外生的，这一定程度上避免了反向因果产生的内生性问题。

1. 基准回归模型。本文将设立粮食主产区作为一次外部冲击的准自然实验，以 2004 年为政策干预时间节点，把全国 31 个省份分为实验组和控制组。具体而言，13 个粮食主产区省份被归为实验组，分别为黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、河北、河南、山东、江苏、安徽、江西、湖北、湖南、四川，其他 18 个省份被归为控制组。本文利用 1999—2019 年 21 期 31 个省份的面板数据，构建 2004 年前后处理组和控制组的“反事实”，借助双重差分法控制省份固定效应和年份固定效应，消除处理组和控制组之间因地区和时间不同造成的经济发展、气候地貌等差异的影响，并在模型中加入一系列控制变量。因此，本文构建双重差分模型，模型设定如下：

$$Y_{it} = \alpha_1 + \beta_1(treat_i \times post_t) + \gamma_1 X_{it} + \mu_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

(3) 式中： Y_{it} 表示第 i 个省份 t 时期的农业碳排放或农业碳强度。 $treat_i$ 为地区虚拟变量，表示第 i 个省份是否为粮食主产区。当省份 i 为粮食主产区时，变量取值为 1；反之，则取值为 0。 $post_t$ 表示设立粮食主产区时间节点的虚拟变量。当 $t \geq 2004$ 时，取值为 1；反之，则取值为 0。 X_{it} 表示一系列农业生产相关控制变量， μ_i 表示省份固定效应， δ_t 表示年份固定效应， ε_{it} 表示随机误差项， α_1 表示常数项， β_1 和 γ_1 为待估计参数。(3) 式控制双向固定效应之后，待估计参数 β_1 为设立粮食主产区对农业碳排放影响的净效应。

2. 平行趋势检验与政策动态效应分析。为保证双重差分模型能真正识别设立粮食主产区与农业碳减排的因果关系，基准回归结果成立就必须保证在政策实施前处理组和控制组具有相同的趋势。本文参考 Moser and Voena (2012) 的做法，运用事件研究法开展平行趋势检验，并进一步分析粮食主产区相关政策的动态影响。具体做法是：先以设立粮食主产区的当期（2004 年）为基准组，检验若未实施粮食主产区相关政策，处理组和控制组在时间趋势上的变动是否具有一致性，再生成政策实施当期和后 15 期年份虚拟变量和政策虚拟变量的交乘项，来分析政策处理效应的动态变化情况。模型形式设定如下：

$$Y_{it} = \alpha_2 + \sum_{t=1}^5 \beta_{pret} D_{pret} + \beta_{current} D_{current} + \sum_{s=1}^{15} \beta_{posts} D_{posts} + \gamma_2 X_{it} + \mu_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

(4) 式中： D_{pret} 、 $D_{current}$ 、 D_{posts} 分别表示设立粮食主产区的前 5 期、设立当期以及之后 15 期的年份虚拟变量分别与对应 $treat_i$ 变量的交乘项，年份虚拟变量和政策虚拟变量的交乘项； β_{pret} 、 $\beta_{current}$ 、 β_{posts} 分别为对应估计系数； α_2 表示常数项； γ_2 为待估计参数；其他符号含义与 (3) 式中相同。

3. 规模经营机制检验。如果粮食主产区相关政策能够实现粮食主产区碳减排，那么粮食主产区如何能够在粮食增产压力下发挥政策的碳减排效应？从理论分析来看，粮食主产区极有可能通过规模经

营实现农业碳减排，故本文将从规模经营视角开展机制检验。首先，为检验设立粮食主产区是否通过规模经营获得规模效应以实现碳减排，本文在基准回归模型的基础上做出调整，构建两个模型，模型形式设定如下：

$$scale_{it} = \alpha_3 + \beta_2(treat_i \times post_t) + \gamma_3 X_{it} + \mu_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

$$Y_{it} = \alpha_4 + \beta_3(treat_i \times post_t) + \beta_4 scale_{it} + \gamma_4 X_{it} + \mu_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

(5)式和(6)式中： $scale_{it}$ 表示农业规模经营； α_3 、 α_4 表示常数项； β_2 、 β_3 、 β_4 、 γ_4 均为待估计参数；其他符号含义与(3)式中相同。

本文基于劳动力转移视角，进一步分析设立粮食主产区的碳减排效应。随着中国经济不断发展和城镇化进程不断加快，劳动力转移正是实现规模经营的主要前提和重要基础。本文考虑劳动力转移与农业碳排放往往存在非线性关系，在模型中加入劳动力转移变量的平方项，检验劳动力转移对设立粮食主产区碳减排效应的调节作用。本文构建三重差分模型，模型形式设定如下：

$$Y_{it} = \alpha_5 + \beta_5 DID_{it} + \omega DID_{it} \times transfer_{it} + \theta transfer_{it} + \gamma_5 X_{it} + \mu_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (7)$$

$$Y_{it} = \alpha_6 + \beta_6 DID_{it} + \omega DID_{it} \times transfer_{it} + \theta transfer_{it} + \kappa transfer_{it}^2 + \tau(DID_{it} \times transfer_{it}^2) + \gamma_6 X_{it} + \mu_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (8)$$

(7)式和(8)式中： DID_{it} 表示 $treat_i \times post_t$ ，即政策交乘项； $transfer_{it}$ 表示劳动力转移； $transfer_{it}^2$ 表示劳动力转移的平方项； α_5 、 α_6 表示常数项； β_5 、 β_6 、 ω 、 θ 、 κ 、 τ 、 γ_5 、 γ_6 均为待估计参数；其他符号含义与(3)式中相同。

4. 技术进步机制检验。除规模经营之外，技术进步可能同样能够具有碳减排效应。从国家对生态保护和农业绿色低碳发展的总体要求来看，在粮食主产区内，技术进步必然体现在农机具作业效率的提升上，即通过内嵌式环保技术实现农业生产资料的高效利用。为检验技术进步的碳减排效应，本文构建如下模型：

$$M_{it} = \alpha_7 + \beta_7(treat_i \times post_t) + \gamma_7 X_{it} + \mu_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (9)$$

$$Y_{it} = \alpha_8 + \beta_8(treat_i \times post_t) + \beta_9 M_{it} + \gamma_8 X_{it} + \mu_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (10)$$

(9)式和(10)式中： M_{it} 表示技术进步，以绿色技术进步和机械化水平两个变量表征； α_7 、 α_8 表示常数项； β_7 、 β_8 、 β_9 、 γ_7 、 γ_8 均为待估计参数；其他符号含义与(3)式中相同。

5. 协同作用机制检验。规模经营与技术进步若都能实现粮食主产区内农业生产的碳减排，规模经营与技术进步两者之间是否存在协同作用？为探究规模经营与技术进步的互动关系，本文构建如下两个模型：

$$M_{it} = \alpha_9 + \beta_{10} scale_{it} + \gamma_9 X_{it} + \mu_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (11)$$

$$scale_{it} = \alpha_{10} + \beta_{11}M_{it} + \gamma_{10}X_{it} + \mu_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (12)$$

(11) 式和 (12) 式中: α_9 、 α_{10} 表示常数项; β_{10} 、 β_{11} 、 γ_9 、 γ_{10} 为待估计参数; 其他符号含义与 (3) 式相同。

四、回归结果与分析

(一) 基准回归结果

本文在使用双重差分法的基础上, 控制双重固定效应, 包括省份固定效应和年份固定效应。基准回归结果如表 2 所示。

表 2 设立粮食主产区的碳减排效应基准回归结果

变量或指标名称	农业碳排放				农业碳强度			
	回归 1		回归 2		回归 3		回归 4	
	系数	标准误	系数	标准误	系数	标准误	系数	标准误
政策交乘项	-0.086***	0.014	-0.064***	0.014	0.032*	0.020	0.052***	0.022
产业结构			-0.259***	0.063			0.040	0.177
农业经济发展水平			0.031***	0.014			0.003	0.018
城镇化率			-1.836***	0.228			-0.886***	0.231
人均地区生产总值的平方项			0.048***	0.017			-0.107***	0.019
滞后一期的粮食单产			0.206***	0.045			-0.054	0.051
农业劳动力数量			0.019	0.025			0.098***	0.042
农村劳动力平均受教育年限			-0.050	0.057			0.116	0.163
土壤质量			0.018**	0.007			0.018	0.014
农田灌溉条件			-0.010	0.032			0.039	0.027
受灾率			0.005	0.025			0.050	0.038
常数项	0.870***	0.005	-0.067	0.397	0.647***	0.007	0.530	0.570
年份固定效应	已控制		已控制		已控制		已控制	
省份固定效应	已控制		已控制		已控制		已控制	
观测值数	651		630		651		630	
R ²	0.907		0.933		0.863		0.884	

注: ①***、**和*分别表示 1%、5%和 10%的显著性水平; ②由于样本期内上海市土壤质量变量值均为 0, 损失 21 个观测值, 因此, 回归 2、回归 4 最终观测值数为 630 个; ③标准误为稳健标准误。

表 2 回归 1 和回归 2 为设立粮食主产区对农业碳排放影响的估计结果。由回归 1 和回归 2 结果可知, 不论模型中是否加入控制变量, 政策交乘项在 1%统计水平上显著, 且系数方向为负。这一结果表明, 设立粮食主产区对农业碳排放具有显著削减作用, 即假说 H1 得以验证。对比回归 1 和回归 2 结果可知, 政策交乘项估计系数数值从-0.086 变为-0.064, 说明回归 2 中加入控制变量可以有效地减少遗漏变量导致的估计偏误。

由回归 3 和回归 4 结果可知：当不加入控制变量时，政策交乘项变量在 10%统计水平上显著，且系数方向为正；当加入控制变量时，政策交乘项变量在 1%统计水平上显著，且系数方向为正，说明设立粮食主产区会正向影响农业碳强度。设立粮食主产区导致农业碳强度增加的可能原因是粮食价格多年维持低位徘徊，粮食主产区以粮食种植为主，种植收益不高，并且种植业总产值未体现粮食补贴。相反地，非粮食主产区种植经济作物比例高可以带来更高的经济收益，从而降低农业碳强度。

(二) 平行趋势检验

平行趋势检验是指在控制一系列可观测因素前提下，若未设立粮食主产区，处理组和控制组的农业碳排放和农业碳强度具有相同变化趋势，用来检验双重差分模型估计结果是否真实反映粮食主产区政策与农业碳减排的因果关系。图 4 和图 5 为平行趋势检验与处理效应动态变化趋势图。

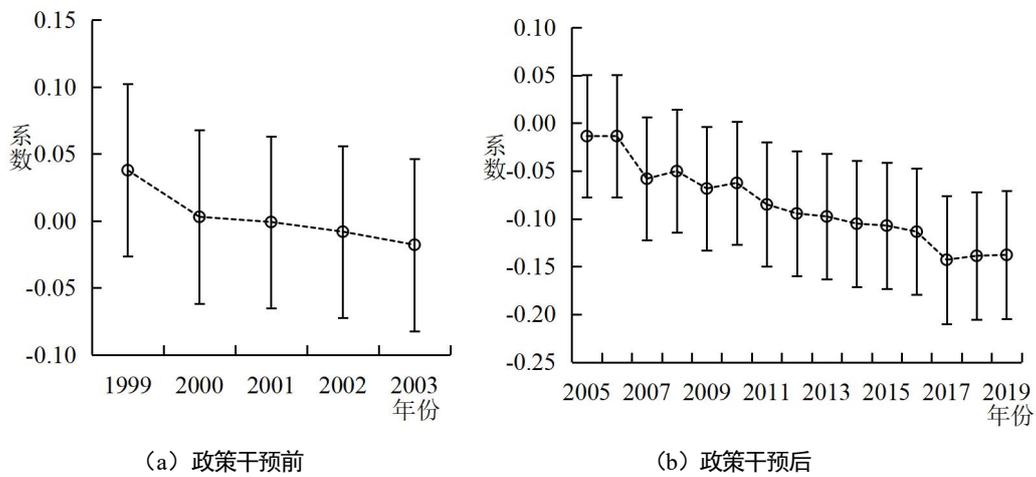


图 4 平行趋势检验与处理效应动态变化趋势：农业碳排放

注：①竖线表示参数的 90%置信区间；②事件分析法以政策实施当期（2004 年）为基期。

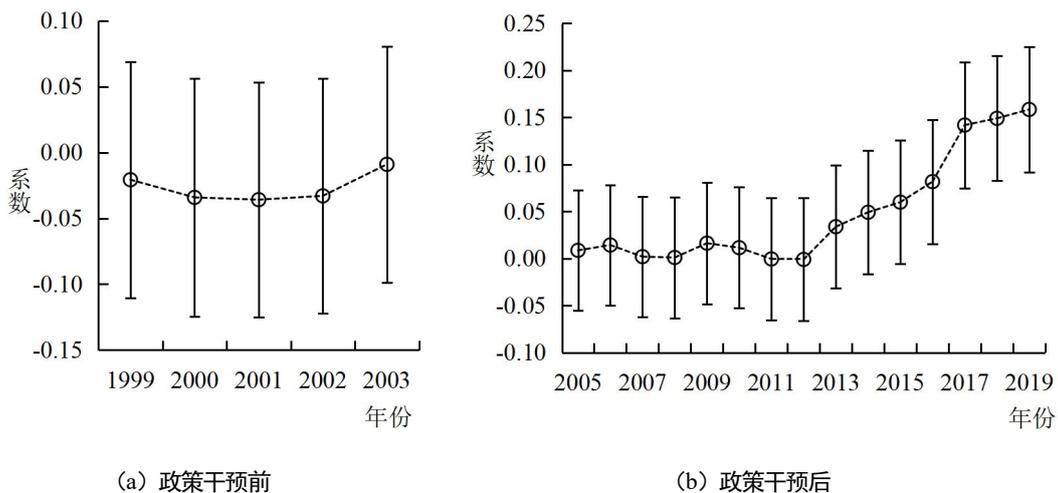


图 5 平行趋势检验与处理效应动态变化趋势：农业碳强度

注：①竖线表示参数的 90%置信区间；②事件分析法以政策实施当期（2004 年）为基期。

由图 4 和图 5 可知, 无论是对农业碳排放还是对农业碳强度而言, 1999—2003 年系数 β_{pret} 一直在 0 值徘徊, 说明在设立粮食主产区之前, 处理组和控制组之间具有可比性, 因此, 本文暂未发现违背平行趋势检验的证据。由表 3 可知, 无论是否加入控制变量, 在 1999—2003 年粮食主产区相关政策实施之前, 估计系数均联合不显著, 说明政策实施前处理组和控制组之间不存在趋势上的差异。在 2005—2019 年粮食主产区相关政策实施之后, 设立粮食主产区和年份虚拟变量交乘项通过了 1% 水平的联合显著性检验, 这一结果佐证了平行趋势检验的合理性。

表 3 政策实施时点前后不同时期的联合假设检验结果

时间区间和原假设	被解释变量	未加入控制变量		加入控制变量	
		F 统计量	p 值	F 统计量	p 值
政策实施前: 1999—2003 年 $H_0: \beta_{pre5} = \dots = \beta_{pre1} = 0$	农业碳排放	0.69	0.631	0.66	0.650
	农业碳强度	0.24	0.944	0.21	0.956
政策实施后: 2005—2019 年 $H_0: \beta_{post1} = \dots = \beta_{post15} = 0$	农业碳排放	4.29	0.000	2.76	0.000
	农业碳强度	1.13	0.329	2.37	0.000

(三) 政策动态效应

基准回归结果表明, 设立粮食主产区对农业碳排放具有显著的削减效应。本文运用事件分析法进一步分析政策效果的时变效应, 讨论自 2004 年以来粮食主产区相关政策效果具体如何变化。

如图 4 所示, 对于农业碳排放而言, 2005—2019 年间估计系数 β_{posts} 整体呈现出较为均匀的波动下降趋势。具体趋势分析如下: 第一阶段为 2005—2007 年, 粮食主产区相关政策的碳减排效应加速下降, 这一趋势说明设立粮食主产区后, 政策的碳减排作用立竿见影; 第二阶段为 2008—2014 年, 估计系数 β_{posts} 保持持续下降趋势, 说明在全球经济危机和粮食价格大起大落背景下, 国家设立粮食主产区不但保障了粮食安全, 而且具有碳减排效应; 第三阶段为 2015—2019 年, 估计系数 β_{posts} 仍然处在下降趋势。这说明在 2015 年原农业部印发《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》和《到 2020 年农药使用量零增长行动方案》政策背景下^①, 不仅化肥农药可以实现减量, 而且设立粮食主产区的碳减排效应也非常明显。

如图 5 所示, 对于农业碳强度而言, 2005—2019 年间, 粮食主产区相关政策的碳减排效应先保持基本稳定, 随后出现上升趋势。具体趋势分析如下: 第一阶段为 2005—2011 年, 这一时段粮食主产区政策对农业碳强度基本无显著影响; 第二阶段为 2012—2019 年, 粮食主产区相关政策的碳减排效应开始逐年上升, 说明设立粮食主产区会正向影响农业碳强度。

从现实情况来看, 粮食主产区以种植粮食作物为主, 而粮食作物种植效益偏低已经成为不争的事

^①参见《农业部关于印发〈到 2020 年化肥使用量零增长行动方案〉和〈到 2020 年农药使用量零增长行动方案〉的通知》, http://www.moa.gov.cn/nybg/2015/san/201711/t20171129_5923401.htm。

实^①。《全国农产品成本收益资料摘要》数据显示，2004—2019年间，三大粮食作物净利润由每亩196.5元降低到每亩-30.53元。并且，2016—2019年间，三大粮食作物净利润连续4年出现亏损^②。由此，本文可以合理推断，相较于非粮食主产区，粮食主产区农业总产值增长率赶不上农业碳排放绝对量增长率，从而导致粮食主产区相关政策提高了农业碳强度。

五、碳减排机制检验

（一）规模经营的碳减排机制检验结果

表4回归1结果显示，设立粮食主产区能显著促进粮食规模经营。表4中回归2估计结果表明，粮食规模经营有助于实现农业碳减排。结合基准回归模型估计结果，政策交乘项估计系数绝对值从0.064变为0.028，这说明理论分析中规模效应的碳减排机制得到验证，即假说H2得证。另外，表4中回归3结果显示，粮食规模经营对农业碳强度并无显著影响。借鉴Heckman et al. (2013)的方法，本文进一步量化粮食规模经营对实现农业碳减排的影响大小，估计参数 $(\hat{\beta}_3 \times \hat{\beta}_2)$ 与 $\hat{\beta}_1$ 的比值即农业规模经营影响农业碳减排作用大小。结果表明，粮食主产区相关政策碳减排作用的56.28%能由农业规模经营来解释。

表4 规模经营影响机制的模型估计结果

变量或指标名称	农业规模经营 回归1		农业碳排放 回归2		农业碳强度 回归3	
	系数	标准误	系数	标准误	系数	标准误
政策交乘项	0.073***	0.009	-0.028**	0.014	0.047**	0.022
农业规模经营			-0.494***	0.072	0.071	0.081
常数项	0.571***	0.258	0.215	0.376	0.489	0.575
控制变量	已控制		已控制		已控制	
年份固定效应	已控制		已控制		已控制	
省份固定效应	已控制		已控制		已控制	
观测值数	630		630		630	
R ²	0.903		0.940		0.884	

注：①***和**分别表示1%和5%的显著性水平；②标准误为稳健标准误；③控制变量与表2相同。

本文基于劳动力转移视角，对粮食主产区碳减排机制做进一步分析。表5回归1结果显示，劳动力转移的三重交乘项在1%统计水平上显著，且系数方向为正，说明劳动力转移效应越强，粮食主产区相关政策对农业碳排放的削减作用越大。表5回归2结果显示，劳动力转移平方项三重交乘项在1%统计水平上显著，且系数方向为负，说明劳动力转移对粮食主产区相关政策的调节作用具有非线性特

^①资料来源：《中央一号文件解读：怎样实现良田全部种粮？》，http://www.moa.gov.cn/ztlz/jj2022zyyhjw/wjjd_29031/202/t20220223_6389342.htm。

^②数据来源：《全国农产品成本收益资料摘要2021》，<https://data.cnki.net/v3/Trade/yearbook/single/N2021120016?zcode=Z009>。

征。综合表 5 回归 1 和回归 2 结果可知，设立粮食主产区的碳减排效应随劳动力转移呈现为有拐点的正 U 型非线性特征。具体分析如下：越过拐点之前为第一阶段，此时粮食主产区相关政策的碳减排效应受到劳动力转移的负向调节作用，越过拐点之后为第二阶段，此时随着劳动力进一步转移，第二阶段表现为劳动力转移能加强粮食主产区的碳减排效应。综合上述机制分析可知，劳动力转移对粮食主产区政策的碳减排效应具有调节作用，即 H3 得证。

表 5 劳动力转移对粮食主产区碳减排影响的模型估计结果

变量或指标名称	农业碳排放				农业碳强度			
	回归 1		回归 2		回归 3		回归 4	
	系数	标准误	系数	标准误	系数	标准误	系数	标准误
政策交乘项	-0.208***	0.033	-0.455***	0.065	0.118***	0.054	0.233**	0.109
劳动力转移	-0.214**	0.078	-0.914***	0.262	-0.160	0.108	0.162	0.268
政策交乘项×劳动力转移	0.356***	0.068	1.556***	0.281	-0.160	0.116	-0.722	0.480
劳动力转移的平方项			0.773***	0.231			-0.357	0.244
政策交乘项×劳动力转移的平方项			-1.389***	0.317			0.649	0.546
控制变量	已控制		已控制		已控制		已控制	
年份固定效应	已控制		已控制		已控制		已控制	
省份固定效应	已控制		已控制		已控制		已控制	
观测值数	630		630		630		630	
R ²	0.935		0.937		0.885		0.8856	

注：①***和**分别表示 1%和 5%的显著性水平；②标准误为稳健标准误；③控制变量与表 2 相同。

(二) 技术进步的碳减排机制检验结果

仅仅从规模经营和劳动力转移角度解释粮食主产区的碳减排效应显然不够充分。接下来，本文将从技术进步视角展开分析，进一步检验技术进步能否促进粮食主产区实现碳减排。

表 6 回归 1 结果显示，政策交乘项变量在 1%统计水平上显著，且估计系数为正，说明粮食主产区相关政策能促进粮食主产区的绿色技术进步。表 6 回归 2 结果显示，政策交乘项变量在 1%统计水平上为正，说明粮食主产区相关政策能够提高机械化水平，结合表 6 回归 3 估计结果可知，粮食主产区相关政策通过提高机械化水平实现对农业碳排放的削减作用。由表 6 回归 1 和回归 4 结果可知，粮食主产区政策通过绿色技术进步实现对农业碳强度的削减作用。技术进步由绿色技术进步和机械化水平表征，因此，以上实证结果表明，粮食主产区相关政策对技术进步具有正向影响，并且设立粮食主产区能通过技术进步实现农业碳减排，即假说 H4 得证。

表 6 技术进步对粮食主产区碳减排效应影响的模型估计结果

变量或指标名称	绿色技术进步		机械化水平		农业碳排放		农业碳强度	
	回归 1		回归 2		回归 3		回归 4	
	系数	标准误	系数	标准误	系数	标准误	系数	标准误
政策交乘项	0.183***	0.039	0.094***	0.035	-0.072***	0.014	0.071***	0.022
绿色技术进步					0.041	0.024	-0.105***	0.025
机械化水平					-0.058***	0.014	0.197***	0.031
控制变量	已控制		已控制		已控制		已控制	
年份固定效应	已控制		已控制		已控制		已控制	
省份固定效应	已控制		已控制		已控制		已控制	
观测值数	630		630		630		630	
R ²	0.964		0.942		0.934		0.889	

注：①***表示 1% 的显著性水平；②标准误为稳健标准误；③控制变量与表 2 相同。

(三) 规模经营与技术进步的协同作用检验结果

表 7 回归 1 估计结果显示，农业规模经营在 1% 统计水平上显著，且系数方向为正，说明粮食规模经营对绿色技术进步具有显著正向影响。表 7 回归 2 估计结果显示，农业规模经营不显著，说明粮食规模经营对机械化水平无显著影响。表 7 回归 3 估计结果显示，绿色技术进步在 1% 统计水平上显著，且系数方向为正，说明绿色技术进步对农业规模经营有显著正向影响。相比之下，粮食规模经营对绿色技术进步的正向影响作用更大。总体而言，绿色技术进步与粮食规模经营之间互相关联、相得益彰，即规模经营与技术进步具有协同作用，从而加强粮食主产区相关政策的碳减排效应。假说 H5 得以验证。

表 7 规模经营与技术进步协同作用检验的模型估计结果

变量或指标名称	绿色技术进步		机械化水平		农业规模经营	
	回归 1		回归 2		回归 3	
	系数	标准误	系数	标准误	系数	标准误
绿色技术进步					0.043***	0.011
机械化水平					0.002	0.014
农业规模经营	0.782***	0.225	0.031	0.190		
控制变量	已控制		已控制		已控制	
年份固定效应	已控制		已控制		已控制	
省份固定效应	已控制		已控制		已控制	
观测值数	630		630		630	
R ²	0.964		0.941		0.894	

注：①***表示 1% 的显著性水平；②标准误为稳健标准误；③控制变量与表 2 相同。

综上，设立粮食主产区虽然增加了主产区的农业碳强度，但显著降低了粮食主产区的农业碳排放。当前粮食主产区相关政策以保障粮食安全这一目标为宗旨，农业总产值中也不包含粮食补贴，故粮食

主产区农业碳强度难免会出现增加。

从机制检验结果中不难发现，粮食主产区相关政策通过规模经营获得较强的规模效应，从而实现了粮食主产区的农业减碳目标，劳动力转移对粮食主产区的碳减排效应具有调节作用。此外，技术进步在一定程度上为粮食主产区碳减排做出了贡献。从碳减排作用大小来看，规模效应和技术效应对粮食主产区碳减排效应都具有较强的解释力。协同机制分析表明，粮食规模经营与绿色技术进步相辅相成，二者之间具有较强的协同作用，共同促进粮食主产区碳减排。但必须承认的是，在国家粮食安全目标和“双碳”目标的双重约束下，粮食主产区绿色低碳发展问题仍然任重道远。若中国农业未来能在发展适度规模经营的基础上，在粮食主产区加强绿色低碳技术在粮食生产各环节中的推广和应用，以此获得更强的规模经营效应和绿色技术效应，则可以预见，粮食主产区的农业碳排放会进一步下降，农业碳强度可能也会随之出现拐点并下降。

六、进一步讨论

以上机制分析验证了理论分析部分提出的4个研究假说。本文接下来讨论粮食主产区相关政策的碳减排传导路径与13个粮食主产区之间碳减排效应的异质性。

（一）粮食主产区相关政策的碳减排传导路径检验

农业碳排放（本文所指种植业）是农业生产过程中由翻耕、化肥、农药、农膜、农用柴油以及灌溉用电所直接或间接导致的碳排放，碳排放量占比前两位的分别是化肥与农用柴油（李波等，2011）。因此，本文从化肥施用强度和机械使用强度两个方面，探究粮食主产区相关政策的碳减排路径问题。表8回归1结果显示，设立粮食主产区对化肥施用强度存在显著削减作用，说明化肥减施是粮食主产区相关政策实现碳减排效应的一条路径。表8回归2结果显示，设立粮食主产区对机械使用强度暂未发现显著影响。整体来看，粮食主产区相关政策实现农业碳减排的路径，主要通过降低化肥施用强度而非机械使用强度。

表8 碳减排传导路径检验的模型估计结果

变量或指标名称	化肥施用强度		机械使用强度	
	回归1		回归2	
	系数	标准误	系数	标准误
政策交乘项	-0.035***	0.007	0.036	0.029
常数项	-0.362	0.223	0.020	1.026
控制变量	已控制		已控制	
年份固定效应	已控制		已控制	
省份固定效应	已控制		已控制	
观测值数	630		630	
R ²	0.928		0.943	

注：①***表示1%的显著性水平；②标准误为稳健标准误；③控制变量与表2相同。

(二) 粮食主产区相关政策碳减排效应的地区异质性检验

为考察每个粮食主产区的政策效应,本文加入 13 个省份虚拟变量与政策交乘项的三重交乘项做逐一回归^①。例如,本文将黑龙江作为处理组,将 18 个非粮食主产区省份作为控制组,控制变量和固定效应都与表 2 回归 2、回归 4 保持一致,从而回归得到黑龙江单个省份的政策效应。随后,本文依次对吉林、辽宁、内蒙古、河北、河南、山东、江苏、安徽、江西、湖北、湖南、四川采取相同的处理方式,最终得到 13 个粮食主产省份的政策效应。图 6 显示了 13 个省份虚拟变量与政策交乘项的三重交乘项变量的系数估计值(以农业碳排放为被解释变量)。

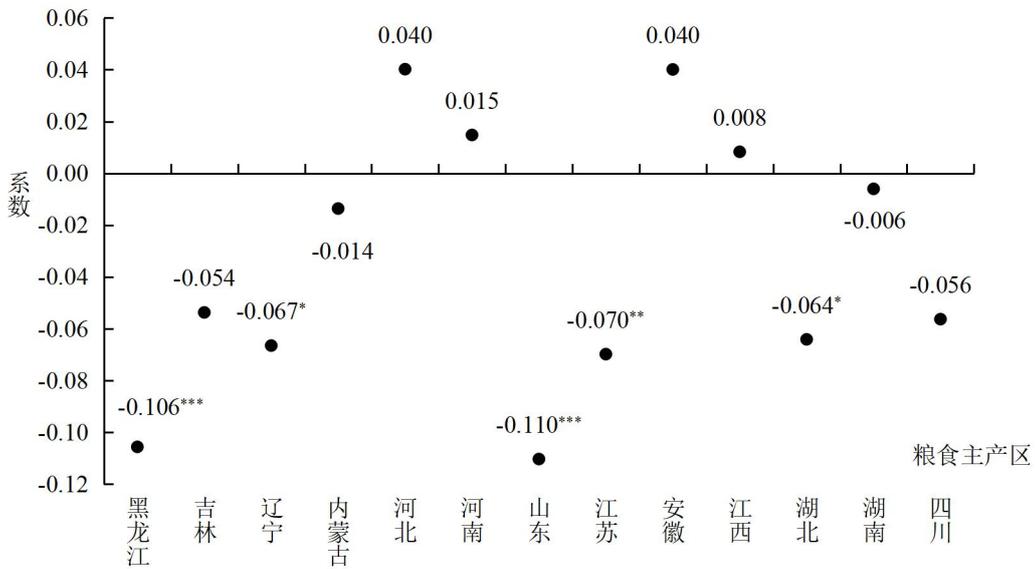


图 6 三重交乘项的系数估计值(以农业碳排放为被解释变量)

注: ①各点表示 13 个省份虚拟变量与政策交乘项的三重交乘项变量的系数估计值; ②***、**和*分别表示在 1%、5%和 10%水平上显著。

由图 6 可知,除河北、河南、安徽、江西之外的其余 9 个省份的政策交乘项都为负。其中,黑龙江、辽宁、山东、江苏、湖北 5 个省份的政策交乘项在统计上显著,表明设立粮食主产区在黑龙江、辽宁、山东、江苏、湖北 5 个省份存在显著的碳减排效应^②,再次印证了前文结果。从政策碳减排作用大小来看,设立粮食主产区在山东的碳减排效应最强,在黑龙江、江苏、辽宁 3 个省的碳减排效应次之,这与田伟等(2014)的研究结论基本一致。结合本文理论分析,其可能的原因是黑龙江和辽宁两个粮食主产省份的规模效应比其余省份更强。山东和江苏两个粮食主产省份的技术进步能带来绿色技术效应。据山东省统计局和江苏省农业农村厅有关数据显示,2020 年山东和江苏两省的农业科技贡

^①由于 13 个主产区的异质性检验包含农业碳排放和碳强度两个方面,共计 26 个回归结果,限于篇幅,本文不再展示控制变量和固定效应的具体结果。

^②当单独对每个省份估计时,样本量会大幅下降,所以,并不是所有省份的碳减排效应都显著。

献率分别为 64.56%和 70.00%^①，均明显高于全国平均水平的 60.70%^②。这说明，在适度规模经营的基础上，规模经营与技术进步发挥协同作用，加强了农业碳减排效应。图 7 显示了 13 个粮食主产省份虚拟变量与政策交乘项的三重交乘项变量的系数估计值（以农业碳强度为被解释变量）。需要注意的是，吉林、内蒙古、河南、湖北 4 个粮食主产省份的农业碳强度存在显著增加趋势。

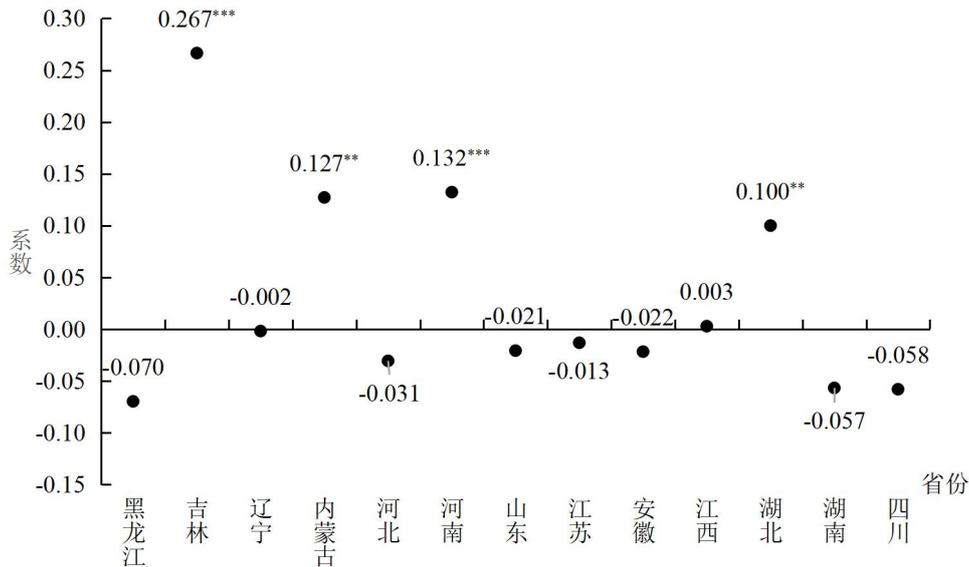


图 7 三重交乘项的系数估计值（以农业碳强度为被解释变量）

注：①各点表示 13 个粮食主产省份虚拟变量与政策交乘项的三重交乘项变量的系数估计值；②***和**分别表示 1% 和 5% 的显著性水平。

七、结论与政策启示

本文基于 1999—2019 年中国省级面板数据，以 2004 年国家设立 13 个粮食主产区为准自然实验，识别粮食主产区相关政策对农业碳减排的影响与作用机制。本文主要研究结论如下：第一，基准回归结果表明，从全国平均意义上来说，设立粮食主产区对农业碳排放存在显著的削减作用，但显著增强了粮食主产区的农业碳强度。第二，影响机制分析发现，粮食主产区相关政策碳减排效应主要得益于粮食规模经营效应，粮食主产区相关政策也能通过技术进步实现碳减排效应。此外，劳动力转移对粮食主产区相关政策的碳减排效应具有调节作用。第三，协同作用检验表明，粮食规模经营与技术进步相辅相成，两者发挥的协同作用可以加强粮食主产区的碳减排效应。这说明不仅要“藏粮于地”，更

^①资源来源：《山东农业总产值破万亿 高质量发展显成效》，http://www.moa.gov.cn/xw/qg/202102/t20210205_6361286.htm；《2020 年度农业农村基本数据》，http://coa.jiangsu.gov.cn/art/2021/4/22/art_12552_9764131.html。

^②资源来源：《农业农村部 2020 年我国农业科技进步贡献率达 60.7%》，http://www.moa.gov.cn/xw/shipin/xwzx/202111/t20211123_6382809.htm。

要“藏粮于技”。第四，传导路径分析表明，粮食主产区相关政策的碳减排效应主要通过降低化肥施用强度来实现，而非机械使用强度。第五，地区异质性分析结果表明，在规模经营与技术进步的协同作用下，粮食主产区相关政策在山东的碳减排效应最强，在黑龙江、江苏和辽宁3个省份的碳减排效应次之。但是，需要注意的是，在吉林、内蒙古、河南、湖北4个省份，粮食主产区相关政策带来农业碳强度的增加更显著。

粮食主产区低碳转型实质上强调保障粮食安全战略与农业绿色发展的平衡问题，农业生产除了力求粮食等重要农产品“数量”和“质量”安全之外，也需兼顾“环境”和“生态”安全，继而构建全面可持续发展的粮食安全体系。为此，本文结合研究结论提出如下4点政策启示：第一，国家政策应进一步完善粮食主产区集约化生产方式，发展适度规模经营以获得规模效应，更好发挥粮食主产区的稳产增产作用，并促进实现粮食主产区农业碳减排功能。第二，在产业转型升级和劳动力转移背景下，需因地制宜地推进农村剩余劳动力向第二产业和第三产业转移，发挥粮食主产区碳减排效应。第三，农业发展要实现资源节约和环境友好，需依赖规模经营与技术进步的协同作用。离开规模经营，绿色技术将无用武之地；缺乏绿色技术应用的规模经营又会陷入资源环境约束趋紧的困境。由此可见，粮食主产区在推进规模经营基础上，更应该加强科学技术的推广和应用，尤其是加大成熟适用绿色技术、绿色品种和信息技术投入，注重粮食增产目标与农业减碳增汇目标的有机结合。第四，设立粮食主产区符合国家战略需求，政策干预尽管取得了增产和减碳“双丰收”，但粮食主产区农业经营效益不高，难以发挥市场机制的作用，无法保证粮食主产区增产减碳功能的可持续性和韧性。需基于成本收益原则，在制定农业政策时充分考虑市场化有益激励措施，提高种粮综合效益，提高粮食主产区粮农积极性。

参考文献

- 1.陈诗一，2010：《中国的绿色工业革命：基于环境全要素生产率视角的解释（1980—2008）》，《经济研究》第11期，第21-34、第58页。
- 2.常佳悦、李灵芝、赵庆华、朱小磊、续建国、李海平，2019：《使用不同有机肥改良土壤对日光温室夏秋茬番茄生长和产量的影响》，《农业工程技术》第13期，第18-22页。
- 3.陈卫平，2006：《中国农业生产率增长、技术进步与效率变化：1990—2003年》，《中国农村观察》第1期，第18-23页、第38页、第80页。
- 4.陈宗胜、黎德福，2004：《内生农业技术进步的二元经济增长模型——对“东亚奇迹”和中国经济的再解释》，《经济研究》第11期，第16-27页。
- 5.程名望、黄甜甜、刘雅娟，2015：《农村劳动力外流对粮食生产的影响：来自中国的证据》，《中国农村观察》第6期，第15-21页、第46页、第94页。
- 6.董直庆、蔡啸、王林辉，2014：《技术进步方向、城市用地规模和环境质量》，《经济研究》第10期，第111-124页。
- 7.高鸣、宋洪远，2014：《粮食生产技术效率的空间收敛及功能区差异——兼论技术扩散的空间涟漪效应》，《管理世界》第7期，第83-92页。
- 8.何可、李凡略、畅华仪，2021：《构建低碳共同体：地方性共识与规模养猪户农业碳交易参与——以农村沼气 CCER

碳交易项目为例》，《中国农村观察》第5期，第71-91页。

9.何秀荣，2016：《关于我国农业经营规模的思考》，《农业经济问题》第9期，第4-15页。

10.黄季焜、杨军、仇焕广、徐志刚，2009：《本轮粮食价格的大起大落：主要原因及未来走势》，《管理世界》第1期，第72-78页。

11.姜松、周洁、邱爽，2021：《适度规模经营是否能抑制农业面源污染——基于动态门槛面板模型的实证》，《农业技术经济》第7期，第33-48页。

12.蒋黎、朱福守，2015：《我国主产区粮食生产现状和政策建议》，《农业经济问题》第12期，第17-24页、第110页。

13.金书秦、林煜、牛坤玉，2021：《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》，《改革》第5期，第29-37页。

14.李波、张俊飏、李海鹏，2011：《中国农业碳排放时空特征及影响因素分解》，《中国人口·资源与环境》第8期，第80-86页。

15.李谷成、李烨阳、周晓时，2018：《农业机械化、劳动力转移与农民收入增长——孰因孰果？》，《中国农村经济》第11期，第112-127页。

16.罗斯炫、何可、张俊飏，2020：《增产加剧污染？——基于粮食主产区政策的经验研究》，《中国农村经济》第1期，第108-131页。

17.马贤磊、车序超、李娜、唐亮，2019：《耕地流转与规模经营改善了农业环境吗？——基于耕地利用行为对农业环境效率的影响检验》，《中国土地科学》第6期，第62-70页。

18.仇童伟、罗必良，2018：《种植结构“趋粮化”的动因何在？——基于农地产权与要素配置的作用机理及实证研究》，《中国农村经济》第2期，第65-80页。

19.邵帅、范美婷、杨莉莉，2022：《经济结构调整、绿色技术进步与中国低碳转型发展——基于总体技术前沿和空间溢出效应视角的经验考察》，《管理世界》第2期，第46-69页、第10页。

20.孙杰、周力、应瑞瑶，2019：《精准农业技术扩散机制与政策研究——以测土配方施肥技术为例》，《中国农村经济》第12期，第65-84页。

21.田伟、杨璐嘉、姜静，2014：《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》，《中国农村观察》第5期，第59-71页、第95页。

22.田晓晖、李薇、李戎，2021：《农业机械化的环境效应——来自农机购置补贴政策的证据》，《中国农村经济》第9期，第95-109页。

23.田云、尹恣昊，2022：《中国农业碳排放再测算：基本现状、动态演进及空间溢出效应》，《中国农村经济》第3期，第104-127页。

24.田云、张俊飏、何可、丰军辉，2015：《农户农业低碳生产行为及其影响因素分析——以化肥施用和农药使用为例》，《中国农村观察》第4期，第61-70页。

25.魏后凯，2022：《全面推进乡村振兴必须坚持底线思维》，《中国农村经济》第12期，第2-6页。

26.魏后凯、王业强，2012：《中央支持粮食主产区发展的理论基础与政策导向》，《经济学动态》第11期，第49-55页。

- 27.伍国勇、孙小钧、于福波、杨丽莎, 2020: 《中国种植业碳生产率空间关联格局及影响因素分析》, 《中国人口·资源与环境》第5期, 第46-57页。
- 28.徐湘博、李畅、郭建兵、张林秀, 2022: 《土地转入规模、土地经营规模与全生命周期作物种植碳排放——基于中国农村发展调查的证据》, 《中国农村经济》第11期, 第40-58页。
- 29.许庆、尹荣梁、章辉, 2011: 《规模经济、规模报酬与农业适度规模经营——基于我国粮食生产的实证研究》, 《经济研究》第3期, 第59-71页、第94页。
- 30.颜廷武、田云、张俊飏、汪洋, 2014: 《中国农业碳排放拐点变动及时空分异研究》, 《中国人口·资源与环境》第11期, 第1-8页。
- 31.杨晨、胡珮琪、刁贝娣、成金华、崔恒瑜, 2021: 《粮食主产区政策的环境绩效: 基于农业碳排放视角》, 《中国人口·资源与环境》第12期, 第35-44页。
- 32.杨莉莎、朱俊鹏、贾智杰, 2019: 《中国碳减排实现的影响因素和当前挑战——基于技术进步的视角》, 《经济研究》第11期, 第118-132页。
- 33.张露、罗必良, 2020: 《农业减量化: 农户经营的规模逻辑及其证据》, 《中国农村经济》第2期, 第81-99页。
- 34.赵昶、孔祥智、仇焕广, 2021: 《农业经营规模扩大有助于化肥减量吗——基于全国1274个家庭农场的计量分析》, 《农业技术经济》第4期, 第110-121页。
- 35.朱希刚, 2004: 《中国粮食供需平衡分析》, 《农业经济问题》第12期, 第12-19页。
- 36.Allan, N., H. Ma., J. Huang, and S. Rozelle, 2006, "Livestock in China: Commodity-Specific Total Factor Productivity Decomposition Using New Panel Data", *American Journal of Agricultural Economics*, 88(3): 680-695.
- 37.Heckman, J., R. Pinto, and P. Savelyev, 2013, "Understanding the Mechanisms Through Which an Influential Early Childhood Program Boosted Adult Outcomes", *American Economic Review*, 103 (6): 2052-2086.
- 38.Moser, P., and A. Voena, 2012, "Compulsory Licensing: Evidence from the Trading with the Enemy Act", *American Economics Review*, 102(1): 396-427.
- 39.Pan, D., F. Kong, N. Zhang, and R. Ying, 2017, "Knowledge Training and the Change of Fertilizer Use Intensity: Evidence from Wheat Farmers in China", *Journal of Environmental Management*, 197(7): 371-392.
- 40.Sheng, Y., J. Ding, and J. Huang, 2019, "The Relationship Between Farm Size and Productivity in Agriculture: Evidence from Maize Production in Northern China", *American Journal of Agriculture Economics*, 101(3): 790-806.
- 41.Solow, R. M., 1957, "Technical Change and the Aggregate Production Function", *Review of Economics and Statistics*, 39 (3): 312-320.

(作者单位: ¹华中农业大学经济管理学院;

²华中农业大学农业绿色低碳发展实验室)

(责任编辑: 柳 荻)

The Impacts of Scale Management and Technological Progress on Green and Low-carbon Development of Agriculture: A Quasi-natural Experiment Based on the Establishment of Major Grain-producing Areas

WEI Mengsheng YAN Tingwu LUO Sixuan

Abstract: The report to the 20th National Congress of the Communist Party of China defines the major strategic goals of accelerating green development, advancing rural ecological revitalization and building a beautiful China. A green and low-carbon development of agriculture is the inevitable choice to achieve this goal. Achieving a win-win situation of “increasing production” and “reducing carbon” is the meaning of promoting the green and low-carbon development of agriculture. In order to reveal the mechanism and path of agricultural carbon emission reduction under the pressure of increasing production in major grain-producing areas, this article uses the provincial panel data from 1999 to 2019 and takes 13 major grain-producing areas established in 2004 as a quasi-natural experiment. It empirically investigates the carbon emission reduction effect of the establishment of major grain-producing areas from the perspective of the synergistic effect of scale management and technological progress. The benchmark regression results show that the establishment of major grain-producing areas has significantly reduced agricultural carbon emissions, although it has increased agricultural carbon intensity. The mechanism analysis shows that the establishment of major grain-producing areas can achieve the carbon emission reduction effect through scale operation, and labor transfer has a regulatory effect on the carbon emission reduction effect of the establishment of major grain-producing areas. The establishment of major grain-producing areas has promoted technological progress, thus achieving the carbon emission reduction effect. There is a synergistic effect between green technology progress and scale management, which strengthens the carbon emission reduction effect of establishing major grain-producing areas. Further analysis shows that the carbon emission reduction effect of setting up major grain-producing areas has been mainly achieved by reducing the intensity of fertilizer application, rather than the intensity of machinery use. The regional heterogeneity analysis shows that the establishment of major grain-producing areas in Shandong, Heilongjiang, Jiangsu and Liaoning provinces has a stronger carbon emission reduction effect. Therefore, the study provides empirical evidence for designing the mechanism and optimization path of carbon emission reduction effect in major grain-producing areas.

Key words: Carbon Emission Reduction Effect; Major Grain-producing Area; Scale Management; Technological Progress; Green and Low-carbon Development