

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2025.03.041

李明亮, 蒲娟, 孔荣, 等. 保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率的影响——基于双碳目标视角[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(3): 285-294
Li Mingliang, Pu Juan, Kong Rong, et al. Impact of conservation tillage machinery on green total factor productivity of grain: Based on a dual-carbon perspective [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(3): 285-294

保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率的影响^{*}

——基于双碳目标视角

李明亮¹, 蒲娟¹, 孔荣², 余国新¹, 赵兰兰¹

(1. 新疆农业大学经济管理学院, 乌鲁木齐市, 830052;
2. 西北农林科技大学经济管理学院, 陕西杨凌, 712100)

摘要: 探讨保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率的影响, 有助于为保障粮食安全和实现农业高质量发展提供借鉴。基于“双碳视角”, 采用 SBM—GML 指数法测度 2005—2021 年 31 个省份粮食绿色全要素生产率, 构建空间杜宾模型定量分析保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率的空间溢出效应。研究发现: 样本期内, 粮食绿色全要素生产率年均值为 1.025, 说明我国粮食绿色生产水平得到一定程度的改善; 大多数地区粮食绿色全要素生产率呈波动上升趋势, 但提升程度较小; 地区间粮食绿色全要素生产率变动情况存在一定差异, 平原地区的粮食绿色生产水平要明显优于丘陵山区。保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率具有显著的正向空间溢出效应, 主要通过促进技术进步来提高粮食绿色全要素生产率。保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率的影响因地形和粮食功能区而异。因此, 未来应加大保护性耕作技术推广力度, 不断完善农机补贴政策, 扎实推进农机服务供需信息交流平台建设并强化农业科技创新以提高农机装备水平。

关键词: 保护性耕作机械; 粮食绿色全要素生产率; 农机跨区作业; 异质性分析

中图分类号: F323.3; F326.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-5553 (2025) 03-0285-10

Impact of conservation tillage machinery on green total factor productivity of grain: Based on a dual-carbon perspective

Li Mingliang¹, Pu Juan¹, Kong Rong², Yu Guoxin¹, Zhao Lanlan¹

(1. College of Economics and Management, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, 830052, China;
2. College of Economics and Management, Northwest A & F University, Yangling, 712100, China)

Abstract: Exploring the impact of conservation tillage machinery on green total factor productivity (GTFP) of grain can provide valuable insights for ensuring food security and achieving high-quality agricultural development. From the perspective of the “dual-carbon” goal, this study uses the SBM—GML index method to measure the GTFP of grain in 31 provinces of China from 2005 to 2021, and constructs a spatial Durbin model to quantitatively analyze the spatial spillover effect of conservation tillage machinery. The study finds that: during the sample period, the annual average GTFP of grain nationwide was 1.025, indicating an improvement in green grain production levels. While most regions showed a fluctuating upward trend in GTFP of grain, the degree of improvement remained modest. There are some differences in the changes of GTFP of grain across regions, with the green production levels of grain in plain areas being significantly higher than those in hilly and mountainous regions. Conservation tillage machinery has a significant positive spatial spillover effect on GTFP of grain, which is mainly promoted by technological progress. The impact of conservation tillage machinery on GTFP of grain varies depending on terrain and the grain functional zones. Therefore, in the future, we should focus on promoting conservation tillage technologies, improving the agricultural machinery subsidy policies, strengthening the construction of information exchange platforms for the

收稿日期: 2024 年 1 月 26 日 修回日期: 2024 年 6 月 17 日

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(72163032)

第一作者: 李明亮, 男, 1997 年生, 安徽滁州人, 硕士研究生, 研究方向为农业经济。E-mail: 1260768180@qq.com

通讯作者: 余国新, 男, 1965 年生, 河南南阳人, 博士, 教授, 博导; 研究方向为农业经济与管理。E-mail: ygx@xjau.edu.cn

supply and demand of agricultural machinery services, and advancing the innovation of agricultural science and technology to enhance the levels of agricultural machinery and equipment.

Keywords: conservation tillage machinery; green total factor productivity of grain; cross-regional operations of agricultural machinery; heterogeneity analysis

0 引言

我国粮食总产量从1978年的 3.05×10^5 kt增至2022年的 6.87×10^5 kt,且连续8年稳定在 6.5×10^5 kt以上。但同时,粮食安全也面临着水土资源约束趋紧、种粮劳动力成本不断攀升以及农业面源污染加剧等严峻挑战,严重制约粮食生产的可持续性。因此,在以农业高质量发展和可持续增长为目标的新发展格局背景下,如何加快推进粮食生产绿色低碳转型已成为当前亟待解决的重要课题。2023年“中央一号文件”明确提出,要提升粮食综合生产能力,加强农业生态环境保护,全力推进我国粮食生产绿色发展。相比于传统耕作方式,保护性耕作兼具经济、生态和社会效益,其不仅可以增强土壤蓄水能力,提高土壤肥力,降低农业生产成本^[1],而且能减轻环境污染,显著提高农作物产量^[2]。随着农机跨区作业的不断完善与发展,以农业机械为载体的保护性耕作能否促进粮食绿色生产并实现空间外溢?解答这一问题对有效推广机械化保护性耕作、保障粮食安全和实现农业可持续发展具有重要意义。

已有研究表明,保护性耕作具有固碳减排效应,但多集中于自然科学领域,依靠田间试验,进行定位测试。如陈庆等^[3]研究证实了保护性耕作能够提高农田土壤有机碳密度和降低温室气体排放。苗贺等^[4]研究表明长期保护性耕作可以提高氮利用率,即在减少氮肥施用量的同时实现粮食稳产高产。当然,也有部分学者基于宏观视角,探究保护性耕作的固碳减排效应。李园园等^[5]研究发现保护性耕作机械能够促进本地区及周边地区保护性耕作净碳汇增加。余志刚等^[6]实证表明秸秆还田对农业绿色全要素生产率具有促进作用,主要通过促进技术进步来提高农业绿色全要素生产率。此外,关于农业机械化空间溢出效应的研究,已有学者从粮食产量^[7]、农业种植结构^[8]、农业生产效率^[9]、农业产值^[10]以及农业碳排放^[11]等不同角度展开丰富讨论。

综上所述,目前对于保护性耕作固碳减排效应和农业机械化空间溢出效应的研究已有大量探讨,为本文研究提供重要的借鉴和思路,但仍存在不足之处。第一,已有学者关注到农业机械化的空间减碳效应^[12],但既有文献鲜有从空间溢出视角分析保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率的影响。第二,保护

性耕作机械跨区作业具有区域异质性特征,而现有文献对保护性耕作机械跨区服务空间溢出效应的特征性考量仍有欠缺。

鉴于此,本文首先以2005—2021年中国31个省份(不含港、澳、台地区)为研究对象,运用SBM—GML指数测度各省粮食绿色全要素生产率变动情况;然后,基于农机跨区服务视角,利用空间计量模型实证检验保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率的空间溢出效应,并将粮食绿色全要素生产率分解为技术进步和技术效率,以此进一步考察其作用路径;最后,分别从时间维度、地形维度以及功能区维度进行异质性分析。本文可能的边际贡献:(1)基于双碳视角,对中国粮食绿色全要素生产率进行测度,并探究保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率是否存在空间溢出效应,以填补现有研究的不足;(2)基于农机跨区服务视角,探究不同类型保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率的影响程度与影响方式的差异,有利于为合理发展农机作业服务市场提供参考;(3)兼顾保护性耕作机械跨区服务的区域性特征,深入探析保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率的空间溢出效应在地形维度和粮食功能区维度下的异质性,以期有效推广保护性耕作机械提供针对性决策。

1 理论分析与研究假说

1.1 保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率的影响

随着农业机械化水平不断提升,以农业机械为载体的保护性耕作技术助推粮食绿色生产取得了卓越成效。具体来看,保护性耕作机械提升粮食绿色全要素生产率主要从以下3个方面实现。(1)保护性耕作机械能够促进粮食稳产增产。一方面,基于诱致性变迁理论,城镇化加快了农村劳动力非农就业进程^[13],使劳动力机会成本不断上升,显著提高了农户对农业机械作业的需求,不仅可以推动农业种植结构“趋粮化”发展^[14],也大大提高了粮食生产效率。另一方面,保护性耕作技术可以减少水土流失,增加土壤有机质含量,改善土壤结构,提高土壤肥力,使粮食作物能够汲取充足的养分^[15],最终实现粮食产量稳步提升。(2)保护性耕作机械可以助力粮食生产节本增效。一方面,农业机械化可以实现大规模作业,减少对人工劳动的依赖,从而节约人力成本^[16]。另一方面,保护性耕作技术如免耕播种可以通过减少机

械耕作次数^[17]，节省油耗、人工以及时间等成本；秸秆还田能够改善土地质量，减少农药、化肥的使用，从而降低农业生产成本^[18]。(3)保护性耕作机械具有持续显现的生态功能。一方面，农业机械化有助于优化农业种植结构，扩大粮食经营规模，消除粮食生产要素配置扭曲，提高资源利用率，从而降低粮食碳排放强度^[12]。另一方面，随着保护性耕作技术的深入推广，使有机质含量丰富的秸秆得到充分利用，从而有效解决化肥过量施用所造成的环境污染^[19]，同时也避免了秸秆焚烧所产生的温室气体排放^[6]，这对于推进粮食产业高质量发展具有重要作用。综上考虑，提出假说1：保护性耕作机械能够促进粮食绿色生产。

1.2 保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率的空间溢出效应

基于地理学第一定律可知，地理事物或属性在空间分布上存在关联性，且空间相距越近，其关联性越紧密^[20]。由于相邻地区在气候条件、资源禀赋、地理环境等方面具有相似性，粮食生产要素在相邻地区间转移更加便利，故一个地区粮食绿色生产水平很可能会对周边地区粮食绿色生产水平产生影响^[21]。随着我国农业机械化水平不断提升，农机跨区作业服务市场规模日益壮大。基于要素流动理论，以农业机械为载体的保护性耕作通过农机跨区作业形式服务于周边地区的粮食生产^[22]，从而提高周边地区粮食绿色全要素生产率。此外，保护性耕作机械还能通过推动邻近地区农机市场发展和产生示范效应间接实现空间溢出。一方面，保护性耕作机械跨区作业服务可能会因为其交易成本高、提供不及时以及质量不确定而导致规模不经济^[23]，这将促使本地保护性耕作服务市场发展以服务本地农户为主，从而充分发挥保护性耕作固碳减排效应的外溢。另一方面，当农业机械化水平高的地区展示出保护性耕作机械具有显著的节本增效优势时，将引起周边地区农户的学习和效仿，进而促进该地区保护性耕作作业面积增加，实现粮食绿色生产的空间外溢。综上考虑，提出假说2：保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率的影响存在空间溢出效应。

2 研究方法

2.1 模型设定

2.1.1 空间相关性检验

采用全局莫兰指数检验保护性耕作机械和粮食绿色全要素生产率的空间相关性，计算如式(1)所示。

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{s^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (1)$$

式中： I ——全局莫兰指数；

x_i ——第*i*个省份的保护性耕作机械或粮食绿色全要素生产率；

x_j ——第*j*个省份的保护性耕作机械或粮食绿色全要素生产率；

\bar{x} ——各地区保护性耕作机械或粮食绿色全要素生产率均值；

s^2 ——保护性耕作机械或粮食绿色全要素生产率方差；

W_{ij} ——空间权重矩阵。

全局莫兰指数取值范围为 $[-1, 1]$ ， $I > 0$ 表示存在空间正相关； $I < 0$ 表示存在空间负相关； $I = 0$ 表示空间呈随机性。选用空间邻近矩阵实证检验保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率的影响。

2.1.2 空间计量模型

为探究保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率的空间溢出效应，选用空间杜宾模型对其进行回归估计，构建模型如式(2)所示。

$$FGTFP_{it} = \beta_0 + \rho W_{it} FGTFP_{it} + \alpha_1 MP_{it} + \beta_1 W_{it} MP_{it} + \alpha_2 X_{it} + \beta_2 W_{it} X_{it} + e_i + f_t + \epsilon_{it} \quad (2)$$

式中： $FGTFP$ ——粮食绿色全要素生产率(被解释变量)；

α, β ——相关系数；

i ——省份；

t ——时间；

MP ——保护性耕作机械、免耕机械和秸秆还田机械(核心解释变量)；

X ——控制变量；

ρ ——空间自相关系数；

$W(\cdot)$ ——空间滞后变量；

e ——省份个体效应；

f ——时间效应；

ϵ ——误差项。

2.2 变量选取

2.2.1 被解释变量

被解释变量为粮食绿色全要素生产率。借鉴颜华等^[24]的经验，将粮食生产中的灌溉、农药、化肥、劳动力、农膜、土地和机械作为投入变量。粮食产量和粮食生产碳汇量作为期望产出，碳汇量的计算方法借鉴韩召迎等^[25]的方法，计算见式(3)。主要粮食作物经济系数、含水量和碳吸收率参考相关资料(表1)。粮食生产碳排放量作为非期望产出，并借鉴李波等^[26]的方法计算粮食碳排放量。采用SBM—GML指数法测度粮食绿色全要素生产率，由于所得结果是环比增长指

数的形式,故假定2005年各省粮食绿色全要素生产率为1,并将以2005年为基期进行累乘,以作为被解释变量。详细测算指标见表2。

$$C = \sum_i^k C_i = \sum_i^k ca_i \times Y_i \times (1 - wc_i) / HI_i \quad (3)$$

式中: C —— 粮食碳汇总量;

C_i —— 某种粮食的碳汇量;

k —— 粮食作物种类数;

ca_i —— 粮食作物碳吸收率;

Y_i —— 粮食作物经济产量;

wc_i —— 粮食作物的含水量;

HI_i —— 粮食作物经济系数。

表1 主要粮食作物经济系数、含水量和碳吸收率

Tab. 1 Economic coefficients, water content and carbon sequestration rates for major grain crops

粮食作物	经济系数	含水量/%	碳吸收率
小麦	0.40	12	0.485
稻谷	0.45	12	0.414
玉米	0.40	13	0.471
豆类	0.34	13	0.450
薯类	0.70	70	0.423

表2 粮食绿色全要素生产率测算指标体系

Tab. 2 Indicator system for measuring green total factor productivity of grain

指标类别	指标名称	指标评价
投入指标	劳动力投入	粮食生产从业人员数/万人
	土地投入	粮食播种面积/hm ²
	机械投入	粮食生产机械总动力/kW
	化肥投入	粮食生产化肥折纯量/kg
	农药投入	粮食生产农药实施量/kg
	农膜投入	粮食生产农膜使用量/kg
	灌溉投入	粮食生产有效灌溉面积/hm ²
产出指标	经济效益产出	粮食产量/kg
	生态效益产出	粮食生产碳汇量/kg
	非期望产出	粮食生产碳排放量/kg

2.2.2 核心解释变量

核心解释变量包括3个:(1)保护性耕作机械(CTMP):借鉴李圆圆等^[5]的方法,采用“联合收获机动力+(秸秆粉碎还田机数量+免耕播种机数量)×大中型拖拉机机械动力/大中型拖拉机数量”表示。(2)免耕机械(NTMP):采用大中型拖拉机机械动力与免耕播种机数量占大中型拖拉机数量比重的乘积表示。(3)秸秆还田机械(SRMP):采用“联合收获机动力+大中型拖拉机机械动力×秸秆粉碎还田机数量/大中型拖拉机数量”表示。

2.2.3 控制变量

控制变量包括5个:(1)农业保险水平(AGI):采用农业保险保费收入与第一产业增加值之比表示。(2)财政支农水平(FSA):采用农业财政支出额与农业从业人员之比表示。(3)农村经济发展水平(DPI):采用农村居民人均可支配收入表示。(4)农业受灾水平(ADL):采用受灾面积与农作物播种面积之比表示。(5)工业化水平(IND):采用第二产业增加值与国内生产总值之比表示。

2.3 数据来源与描述性统计

研究对象为2005—2021年中国31个省、市、自治区(港澳台除外)。数据主要来源于《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国农业机械工业年鉴》《中国保险年鉴》以及各省区市统计年鉴等。描述性统计结果见表3。

表3 各变量描述性统计

Tab. 3 Descriptive statistics for each variable

类型	变量	均值	标准差	最小值	最大值
被解释变量	粮食绿色全要素生产率 FGTFP	0.958	0.299	0.321	2.520
	保护性耕作机械 CTMP	4.292	7.571	0.025	45.20
	免耕机械 NTMP	1.054	2.249	0	12.26
核心解释变量	秸秆还田机械 SRMP	3.238	5.544	0.025	32.94
	农业保险水平 AGI	0.912	1.413	0	11.72
	财政支农水平 FSA	1.185	2.360	0.020	18.68
控制变量	农村经济发展水平 DPI	10.20	6.385	1.877	38.52
	农业受灾水平 ADL	0.188	0.144	0.006	0.936
	工业化水平 IND	0.442	0.088	0.158	0.615

3 结果与分析

3.1 粮食绿色全要素生产率测算分析

3.1.1 全国层面分析

由表4可知,我国粮食绿色全要素生产率从2015年的0.899增至2021年的1.077,呈波动变化趋势。分阶段看,2010年之前,除2006—2008年粮食绿色全要素生产率大于1,其余年份均小于1;2010年之后,除2013年、2014年粮食绿色全要素生产率呈下降趋势,其余年份均得到改善。因为“十一五”期间,国家出台了取消农业税、深化流通制改革以及粮食直补等一系列促进农业发展的政策措施,充分调动了农户种粮积极性,但是对农业可持续发展的重视度较低,从而导致粮食绿色

全要素生产率下降。“十二五”期间,我国农业综合生产能力不断提升,农业生态建设稳步推进。“十三五”期间,国家明确提出要大力发展生态友好型农业,即在确保粮食安全的同时,显著提高农业资源保护水平和利用效率。因此,2010 年之后,我国粮食绿色全要素生产率得到持续改善。从粮食绿色全要素生产率分解结果看,我国粮食绿色技术进步 *TC* 和技术效率 *EC* 的年均值都大于 1,说明在观察期内,技术进步和技术效率都得到一定改善。其中,技术进步年均值为 1.026,增长 2.6%;技术效率年均值为 1.013,增长 1.3%。由此可见,技术进步是粮食绿色全要素生产率提高的主因。

表 4 2005—2021 年中国粮食绿色全要素生产率及其分解

Tab. 4 Green total factor productivity of grain and its decomposition in China from 2005—2021

时期	<i>FGTFP</i>	<i>TC</i>	<i>EC</i>
2005—2006	0.899	0.942	0.962
2006—2007	1.050	0.901	1.203
2007—2008	1.012	1.113	0.922
2008—2009	0.951	0.876	1.095
2009—2010	0.986	1.070	0.935
2010—2011	1.024	1.066	0.966
2011—2012	1.034	1.020	1.015
2012—2013	1.002	1.023	0.982
2013—2014	0.979	0.998	1.001
2014—2015	1.012	0.997	1.015
2015—2016	1.119	1.008	1.117
2016—2017	1.058	1.190	0.902
2017—2018	1.065	0.993	1.085
2018—2019	1.086	1.082	1.007
2019—2020	1.049	1.032	1.017
2020—2021	1.077	1.104	0.977
平均值	1.025	1.026	1.013

3.1.2 省域层面分析

由表 5 可知,除湖北省和广西壮族自治区外,其余 29 个省、市、自治区粮食绿色全要素生产率年均值都大于 1,但省域之间粮食绿色全要素生产率增长情况存在差异。粮食绿色全要素生产率排名前 10 的地区,平原地区有 7 个(北京、天津、河北、辽宁、黑龙江、山东、河南),丘陵山区有 3 个(浙江、福建、江西)。其中,增长幅度最大的浙江省粮食绿色全要素生产率年均值为 1.075,增长 7.5%;而广西壮族自治区粮食绿色全要素生产率年均值仅为 0.969,下降率为 3.1%。从粮食绿色全要素生产率分解结果看,全国各省粮食绿色技术进步指数均大于 1;粮食绿色技术效率指数大于 1 的地区有天津、河北、陕西等 21 个省、市、自治区,占比达 67.74%,表明我国大部分省份粮食绿色全要素生产率增加主要依赖于技术进步。

表 5 中国粮食绿色全要素生产率指数及其分解

Tab. 5 Grain green total factor productivity index and its decomposition in China

地区	<i>FGTFP</i>	<i>TC</i>	<i>EC</i>	地区	<i>FGTFP</i>	<i>TC</i>	<i>EC</i>
北京	1.054	1.054	1.000	湖南	1.031	1.050	1.028
天津	1.054	1.054	1.007	广东	1.000	1.009	1.007
河北	1.036	1.018	1.028	广西	0.969	1.021	0.966
山西	1.018	1.011	1.010	海南	1.026	1.136	0.994
内蒙古	1.028	1.027	1.000	重庆	1.021	1.002	1.020
辽宁	1.053	1.033	1.062	四川	1.007	1.005	1.010
吉林	1.014	1.017	0.996	贵州	1.018	1.003	1.017
黑龙江	1.051	1.030	1.017	云南	1.011	1.005	1.017
上海	1.024	1.016	1.005	西藏	1.028	1.024	1.002
江苏	1.017	1.041	1.036	陕西	1.003	1.036	1.005
浙江	1.075	1.017	1.066	甘肃	1.016	1.008	1.012
安徽	1.019	1.012	1.016	青海	1.008	1.009	0.998
福建	1.072	1.007	1.053	宁夏	1.002	1.005	0.997
江西	1.033	1.011	1.030	新疆	1.014	1.008	1.006
山东	1.060	1.060	1.000	平原地区	1.037	1.035	1.013
河南	1.041	1.054	0.989	丘陵山区	1.018	1.020	1.012
湖北	0.983	1.019	0.999				

3.2 空间相关性分析

利用 Stata 16.0 测算保护性耕作机械和粮食绿色全要素生产率的全局莫兰指数,结果见表 6。

表 6 保护性耕作机械与粮食绿色全要素生产率的全局莫兰指数

Tab. 6 Global Moran index of conservation tillage machinery and green total factor productivity of grain

年份	保护性耕作机械		粮食绿色全要素生产率	
	<i>Moran's I</i>	<i>P</i> 值	<i>Moran's I</i>	<i>P</i> 值
2005	0.121	0.160	0.204	0.048
2006	0.146	0.106	0.209	0.036
2007	0.163	0.075	0.146	0.130
2008	0.333	0.001	0.189	0.053
2009	0.355	0.001	0.146	0.128
2010	0.368	0.000	0.215	0.034
2011	0.352	0.001	0.226	0.028
2012	0.339	0.001	0.205	0.042
2013	0.348	0.001	0.320	0.003
2014	0.354	0.001	0.207	0.042
2015	0.370	0.000	0.273	0.010
2016	0.384	0.000	0.208	0.021
2017	0.393	0.000	0.454	0.000
2018	0.393	0.000	0.445	0.000
2019	0.403	0.000	0.412	0.000
2020	0.405	0.000	0.461	0.000
2021	0.410	0.000	0.394	0.000

除个别年份外,全局莫兰指数均通过 5% 的显著性检验,表明二者存在显著的正空间相关性。同时,保护性耕作机械和粮食绿色全要素生产率全局莫兰指数分别由 2005 年的 0.121 和 0.204 上升至 2021 年的 0.410 和 0.394,说明随着时间的推移,二者空间相关性增强。

3.3 计量分析

3.3.1 计量模型选择

由表 7 可知, Hausman 检验值为 42.00 ($P = 0.000$),表明应选择固定效应模型。Wald 检验和 LR 检验均在 1% 和 5% 水平下显著,表明空间杜宾模型不能退化为空间误差模型和空间滞后模型。因此,选用固定效应空间杜宾模型。

表 7 空间计量模型检验结果

Tab. 7 Results of spatial econometric modelling tests

检验方法	统计量值	P 值
豪斯曼检验 Hausman test	42.00	0.000
沃尔德(滞后)检验 Wald-lag test	22.04	0.001
沃尔德(误差)检验 Wald-error test	15.09	0.020
似然比(滞后)检验 LR-lag test	34.63	0.000
似然比(误差)检验 LR-error test	52.39	0.000

3.3.2 计量模型结果

利用固定效应空间杜宾模型进行回归估计,结果见表 8。

表 8 保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率的空间杜宾模型回归结果

Tab. 8 Spatial Durbin model regression results of conservation tillage machinery on green total factor productivity of grain

解释变量	(1)		(2)		(3)	
	估计系数	t 值	估计系数	t 值	估计系数	t 值
CTMP	0.009***	3.13				
NTMP			0.050***	5.55		
SRMP					0.009*	2.21
AGI	0.020*	1.87	0.020*	1.84	0.019*	1.78
FSA	0.083**	1.93	0.081*	1.90	0.088**	2.04
DPI	0.016*	1.88	0.018**	2.11	0.014	1.56
ADL	-0.102	-1.40	-0.106	-1.47	-0.098	-1.34
IND	0.089	0.42	0.163	0.77	0.032	0.15
W×CTMP	0.016***	3.18				
W×NTMP			0.048***	2.96		
W×SRMP					0.025***	3.71
W×AGI	0.088***	4.34	0.080***	4.00	0.092***	4.48
W×FSA	0.062	0.73	0.090	1.08	0.045	0.53
W×DPI	-0.029**	-2.43	-0.020*	-1.74	-0.030**	-2.48
W×ADL	-0.141	-1.05	-0.119	-0.90	-0.146	-1.08
W×IND	-0.140	-0.31	0.112	0.24	-0.222	-0.48
rho	0.353***	6.16	0.351***	6.09	0.356***	6.25
R ²	0.456		0.486		0.417	
N	527		527		527	

注: *、**、*** 分别表示在 10%、5%、1% 的水平下显著。下同。

空间自回归系数 ρ 在 1% 水平下显著为正,表明粮食绿色全要素生产率存在一定的空间相关性。核心解释变量方面,保护性耕作机械、免耕机械及秸秆还田机械对粮食绿色全要素生产率的直接影响系数和空间滞后项系数均在 10% 和 1% 水平下显著为正,表明保护性耕作机械能够促进本地区及周边地区粮食绿色生产。一方面,采用保护性耕作机械技术可以减少机械耕地次数,提高土壤有机质含量、增强土壤蓄水能力,达到粮食生产绿色可持续发展的目的。具体来看,免耕机械不仅能提高土壤透气性和保水性,加快粮食作物的生长和根系发育,还可以减少机械整地、旋耕作业,具有明显的节本增效作用;秸秆还田机械不仅可以使粮食作物秸秆残茬覆盖地表,增加土壤肥力,提高粮食产量,而且还避免了秸秆焚烧所造成的温室气体排放和资源浪费的问题。另一方面,随着农业机械化水平不断提升,保护性耕作机械能够以跨区作业形式直接服务于周边地区,并且保护性耕作机械还可以通过推动邻近地区农机市场发展和产生示范效应间接提升周边地区粮食绿色全要素生产率。因此,假说 1 和假说 2 得到验证。

控制变量方面,农业保险对粮食绿色全要素生产率的直接影响系数为 0.020,空间滞后项系数为 0.088,分别在 10% 和 1% 水平下显著为正,表明农业保险水平的提高能够促进本地区及周边地区粮食绿色生产。这是因为农业保险可以发挥分散和转移风险职能,并能有效缓解农户资金约束,从而提高农户采纳农业绿色技术的积极性,提升粮食绿色全要素生产率;此外,农业保险能够发挥信息传递效应和示范效应,推动周边地区农业保险发展,从而提高周边地区粮食绿色生产水平。财政支农和农村经济发展对粮食绿色全要素生产率的直接影响系数分别为 0.083 和 0.016,在 5% 和 10% 水平下显著为正,表明财政支农和农村经济发展可以促进粮食绿色生产。这是因为财政支农和农村经济发展可以提高农户收入,为其采纳先进的农业生产技术和扩大粮食生产规模给予充足的资金支持,从而实现粮食规模化高效生产。农村经济发展的空间滞后项系数为 -0.029,且在 5% 水平下显著为正,表明农村经济发展不利于邻近地区粮食绿色全要素生产率提升。这是因为农村经济发展水平高的地区,可能会对周边地区的粮食产业产生“虹吸效应”,从而不利于周边地区粮食绿色生产。农业受灾水平的直接影响系数和空间滞后系数为负,但不显著。这是因为我国对粮食生产出台了一系列保护政策,从而对灾害形成有效防范。工业化对粮食绿色全要素生产率的直接影响系数为正,空间滞后项系数为负,但均不显

著。这是因为工业化的快速发展,研发出许多先进的农机设备,大大提高了粮食生产效率,但在一定程度上也侵占了农业资源,从而并未发挥显著性作用。

3.3.3 空间溢出效应分析

为深入探析保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率的空间溢出效应,利用偏微分法将总效应分为直接效应和间接效应,结果见表 9。保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率的总效应为 0.039,在 1%水平下显著为正,即保护性耕作机械每提高 1%,粮食绿色全要素生产率提高 0.039%;其中直接效应为 0.011,间接效应为 0.028,均在 1%水平下显著为正,表明保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率具有空间溢出效应。未来应加大保护性耕作推广力度,促进农业机械跨区作业服务市场发展,充分发挥保护性耕作机械的溢出效应和示范效应,以期实现各地区粮食绿色生产。

表 9 空间杜宾模型各变量空间效应分解

Tab. 9 Decomposition of the spatial effects of the variables of the spatial Durbin model

变量	直接效应		间接效应		总效应	
	估计系数	t 值	估计系数	t 值	估计系数	t 值
CTMP	0.011***	3.85	0.028***	4.44	0.039***	6.40
NTMP	0.056***	6.18	0.095***	4.44	0.151***	6.61
SRMP	0.011***	2.99	0.041***	4.80	0.052***	6.38
AGI	0.029***	2.70	0.139***	4.72	0.168***	4.97
FSA	0.097**	2.24	0.146	1.17	0.243*	1.69
DPI	0.014**	1.82	-0.034**	-2.30	-0.020*	-1.63
ADL	-0.119*	-1.72	-0.265	-1.46	-0.384**	-1.97
IND	0.092	0.41	-0.123	-0.17	-0.031	-0.04

3.3.4 作用路径分析

为进一步探究保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率的提升路径,将粮食绿色全要素生产率拆分为粮食绿色技术进步和粮食绿色技术效率,分别进行空间回归估计,结果见表 10。

表 10 保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率提升的路径分析
Tab. 10 Path analysis of total factor productivity enhancement of grain greening by conservation tillage machinery

变量	TC			EC		
	直接效应	间接效应	总效应	直接效应	间接效应	总效应
CTMP	0.017*** (9.10)	0.025*** (3.03)	0.042*** (5.00)	0.002 (1.06)	0.005 (0.45)	0.007 (0.61)
NTMP	0.069*** (9.11)	0.070*** (2.17)	0.139*** (4.65)	0.005 (0.61)	-0.077* (-1.65)	-0.072 (-1.52)
SRMP	0.021*** (8.32)	0.025*** (2.49)	0.046*** (4.33)	0.004 (1.40)	0.015 (1.06)	0.019 (1.24)
控制变量	已控制					
观测值	527			527		

保护性耕作机械对粮食绿色技术进步的直接效应、间接效应和总效应均在 1%水平下显著为正,而对粮食绿色技术效率的影响不显著,表明保护性耕作机械主要通过促进粮食绿色技术进步来提高粮食绿色全要素生产率。

3.4 异质性分析

3.4.1 地形维度

为探析保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率的影响是否存在地形异质性,参考现有研究[14],将北京、天津、河北、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、上海、江苏、安徽、山东和河南 12 个省份作为平原地区,其余 19 个省份作为丘陵山区进行划分,分别进行实证检验,结果见表 11。平原地区保护性耕作机械及其不同耕作机械对粮食绿色全要素生产率的直接效应、间接效应以及总效应均显著为正,表明在平原地区,保护耕作机械跨区作业行为较为普遍。这是因为平原地区交通便利、地形平坦,为农机跨区作业创造了良好基础。然而,丘陵山区保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率的直接效应为正但不显著,间接效应却显著为负。这是因为丘陵山区地势复杂,道路狭窄崎岖,耕地细碎化程度较高,不利于农业机械化发展和规模化经营,从而显著增加了推广保护性耕作技术和农机跨区作业的难度。

表 11 地形维度下空间杜宾模型回归结果

Tab. 11 Spatial Durbin model regression results in the topographic dimension

变量	平原地区			丘陵山区		
	直接效应	间接效应	总效应	直接效应	间接效应	总效应
CTMP	0.017*** (8.35)	0.026*** (4.83)	0.043*** (6.68)	0.009 (1.05)	-0.044*** (-2.60)	-0.035* (-1.66)
NTMP	0.055*** (10.26)	0.099*** (7.59)	0.154*** (9.40)	0.063* (1.91)	-0.400*** (-3.01)	-0.336** (-2.40)
SRMP	0.021*** (6.95)	0.026*** (3.12)	0.047*** (4.89)	0.007 (0.64)	-0.044** (-2.43)	-0.037 (-1.63)
控制变量	已控制					
观测值	204			323		

3.4.2 功能区维度

为考察保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率的影响是否存在功能区异质性,基于《国家粮食安全中长期规划纲要(2008—2020 年)》,将我国 31 个省、市、区划入粮食产销区,分别为粮食主产区(河北、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、江苏、安徽、江西、山东、河南、湖北、湖南、四川)、粮食主销区(北京、天津、上海、浙江、福建、广东、海南)和粮食产销平衡区(山西、广西、重庆、贵州、云南、西藏、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆),分别进行实证检验,结果见表 12。不同粮食产销区保护

性耕作机械对粮食绿色全要素生产率的影响存在显著差异性。其中,保护性耕作机械及其不同耕作机械对主产区粮食绿色全要素生产率的影响显著为正;对主销区粮食绿色全要素生产率的影响为负,但并不显著;对产销平衡区粮食绿色全要素生产率的影响系数较高,但显著性较弱。产生这种差异的原因是因为粮食主产区相比于其他地区土壤肥沃,地势平坦,耕地连片,为保护性耕作机械作业及跨区服务提供了有利基

础。因此,保护性耕作机械能够显著促进该地区粮食绿色生产。粮食主销区以工业化和城市化为主导,非农收入成为农户增收的主要来源,加之该地区耕地数量有限,农机作业成本高,从而未能充分发挥保护性耕作机械的固碳减排效应。粮食产销平衡区多位于西部地区,随着“西部大开发”战略深入推进,使该地区近年来经济发展迅速,且十分重视生态农业和粮食绿色高质量发展。

表 12 功能区维度下空间杜宾模型回归结果

Tab. 12 Spatial Durbin model regression results under functional area dimension

变量	粮食主产区			粮食主销区			粮食产销平衡区		
	直接效应	间接效应	总效应	直接效应	间接效应	总效应	直接效应	间接效应	总效应
CTMP	0.014*** (4.65)	0.026** (2.32)	0.040*** (4.01)	0.101 (0.29)	-0.130 (-0.21)	-0.029 (-0.03)	0.027* (1.82)	0.145 (1.37)	0.172 (1.52)
NTMP	0.060*** (6.35)	0.036 (1.22)	0.096*** (3.88)	0.206 (0.24)	-0.277 (-0.22)	-0.071 (-0.04)	0.093** (2.12)	0.195*** (0.79)	0.288 (1.09)
SRMP	0.016*** (3.94)	0.044*** (2.65)	0.060*** (3.84)	0.118 (0.28)	-0.235 (-0.28)	-0.117 (-0.10)	0.037* (1.68)	0.287* (1.65)	0.324* (1.72)
控制变量	已控制								
观测值	221			119			187		

3.5 稳健性检验

为证实结果的可靠性,采用替换权重矩阵、替换被解释变量、替换核心解释变量以及数据缩尾处理等方法进行稳健性检验。选择经济地理矩阵进行保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率空间回归分析,结果见表 13 列(1);采用 SBM—DDF 法测度粮食绿色全要素生产率,并将其作为被解释变量进行回归估计,结果见

表 13 列(2);将保护性耕作农机具数量作为核心解释变量进行回归估计,结果见表 13 列(3);为消除极端值影响,对所述变量进行 1%水平上的缩尾处理,结果见表 13 列(4)。稳健性检验结果显示,保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率的作用方向及显著性与基准回归结果(表 8)基本一致,表明保护性耕作机械能够促进本地区 and 邻近地区粮食绿色生产这一结论是稳健的。

表 13 稳健性检验

Tab. 13 Robustness testing

变量	(1)		(2)		(3)		(4)	
	估计系数	t 值	估计系数	t 值	估计系数	t 值	估计系数	t 值
CTMP	0.016***	7.63	0.003***	2.94	0.008***	4.48	0.006**	2.01
NTMP	0.062***	7.32	0.015***	4.79			0.051***	5.84
SRMP	0.021***	7.35	0.003***	2.23			0.004	1.01
W×CTMP	0.033***	4.25	0.004***	2.46	0.013***	2.72	0.022***	4.17
W×NTMP	0.081**	2.50	0.014***	2.57			0.049***	3.07
W×SRMP	0.043***	4.43	0.007***	2.83			0.033***	4.85
控制变量	已控制							
rho	0.108*	1.65	0.234***	3.70	0.386***	6.89	0.366***	6.68
R ²	0.417		0.338		0.530		0.482	
观测值	527		527		527		527	

4 结论与建议

4.1 结论

基于 2005—2021 年中国 31 个省份(港澳台除

外)面板数据,通过构建空间计量模型,探究保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率的影响。

1) 考察期内,我国粮食绿色全要素生产率年均值为 1.025,表明中国粮食绿色生产水平得到改善;大多

数省份粮食绿色全要素生产率呈波动上升趋势,但提升程度较低,且省域间粮食绿色生产水平增长情况存在差异;分区域看,平原地区的粮食绿色生产状况要优于丘陵山区。

2) 保护性耕作机械及其不同耕作机械对粮食绿色全要素生产率存在显著的正向空间溢出效应,即保护性耕作机械对本地区和周边地区粮食绿色生产均具有促进作用;从作用路径看,保护性耕作机械主要通过促进粮食绿色技术进步来提高粮食绿色全要素生产率。

3) 保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率的影响在地形和粮食功能区维度上存在异质性。地形维度上,保护性耕作机械对平原地区粮食绿色全要素生产率存在显著的促进作用,对丘陵山区表现出负向溢出。粮食功能区维度上,保护性耕作机械对主产区粮食绿色全要素生产率的影响最为显著,对主销区并不显著,对产销平衡区粮食绿色全要素生产率的提升具有较大潜力。

4.2 建议

1) 研究表明,保护性耕作机械有利于实现粮食绿色生产,但要想充分发挥保护性耕作的固碳减排效应,则需要大力推广保护性耕作技术,提升农户对保护性耕作技术的采纳意愿。因此,政府应加强保护性耕作的宣传力度,给予农户科学的技术指导,并完善农机补贴政策,从而为保护性耕作技术的广泛应用提供有力支持。

2) 以小农户为主的家庭经营是我国农业经营的主要形式,这意味农户主要是通过购买农机作业服务进行保护性耕作。为推动保护性耕作机械服务市场的高质量发展,应搭建农机服务供需信息交流平台,以助力农机服务组织与小农户有效对接,实现保护性耕作机械在区域间得到有效配置,从而充分释放保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率的溢出效应。

3) 保护性耕作机械对粮食绿色全要素生产率的作用效果在平原地区和丘陵山区之间、粮食产销区之间存在差异,因此,各地区应根据当地气候条件和耕地环境,因地制宜开发保护性耕作机械化技术与配套农机装备,增强保护性耕作技术及其农机具的适用性、稳定性和操作性,以期加快推动各地区粮食绿色低碳发展。

参 考 文 献

[1] 刘红梅,李睿颖,高晶晶,等. 保护性耕作对土壤团聚体及微生物学特性的影响研究进展[J]. 生态环境学报, 2020, 29(6): 1277-1284.
Liu Hongmei, Li Ruiying, Gao Jingjing, et al. Research progress on the effects of conservation tillage on soil aggregates and microbiological characteristics [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(6): 1277-1284.

[2] 邓远远,朱俊峰. 保护性耕作技术采纳的增产与稳产效应[J]. 资源科学, 2023, 45(10): 2050-2063.
Deng Yuanyuan, Zhu Junfeng. Effect of conservation tillage technology adoption on yield increasing and stabilizing [J]. Resources Science, 2023, 45(10): 2050-2063.

[3] 陈庆,李长江,张俊丽,等. 保护性耕作农田固碳减排效应分析——以陕西户县、大荔和临渭区为例[J]. 西北农业学报, 2016, 25(11): 1686-1695.
Chen Qing, Li Changjiang, Zhang Junli, et al. Analysis of farmland carbon sequestration and greenhouse gas mitigation under conservation tillage: Case study of Huxian, Dali and Linwei district [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2016, 25(11): 1686-1695.

[4] 苗贺,袁磊,杨森茵,等. 基于¹⁵N示踪的东北黑土地保护性耕作农田减氮增产调控机制[J]. 应用生态学报, 2023, 34(4): 876-882.
Miao He, Yuan Lei, Yang Miaoyin. Mechanisms of conservation tillage on nitrogen-fertilizer reduction and maize grain improvement in mollisols of northeast China: Insight from a ¹⁵N tracing study [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(4): 876-882.

[5] 李园园,薛彩霞,柴朝卿,等. 保护性耕作机械能否带动保护性耕作净碳汇的空间外溢? ——基于农机跨区服务视角[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(2): 283-296.
Li Yuanyuan, Xue Caixia, Chai Chaoqing, et al. Can conservation tillage machinery drive the spatial spillover of the net carbon sink of conservation tillage? Based on the perspective of cross-zone service of agricultural machinery [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(2): 283-296.

[6] 余志刚,孙子烨,金鑫. 秸秆还田与农业绿色全要素生产率: 促进还是抑制? [J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(9): 36-45.
Yu Zhigang, Sun Ziyue, Jin Xin. Straw incorporation and agricultural green total factor productivity: Promotion or inhibition? [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(9): 36-45.

[7] Wu Z, Dang J, Pang Y, et al. Threshold effect or spatial spillover? The impact of agricultural mechanization on grain production [J]. Journal of Applied Economics, 2021, 24(1): 478-503.

[8] 马玉婷,高强. 粮食安全视角下农业机械化对农业种植结构的影响研究[J]. 现代经济探讨, 2023(10): 98-111.
Ma Yuting, Gao Qiang. A study on the impact of agricultural mechanization on agricultural cultivation structure from the perspective of food security [J]. Modern Economic Research, 2023(10): 98-111.

[9] 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.

- [10] 罗斯炫, 何可, 张俊飏. 修路能否促进农业增长? ——基于农机跨区作业视角的分析[J]. 中国农村经济, 2018(6): 67—83.
- [11] Han J, Qu J, Maraseni T N, et al. A critical assessment of provincial-level variation in agricultural GHG emissions in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 296: 113190.
- [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 Qinghua, Zhang Guangsheng. 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] 周旭海, 罗崇佳. 农机服务市场发育如何影响耕地撂荒: 理论分析与实证检验[J]. 湖南农业大学学报(社会科学版), 2023, 24(5): 18—26, 46.
Zhou Xuhai, Luo Chongjia. How the development of agricultural machinery service market affects farmland abandonment: Theoretical analysis and empirical test [J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Social Sciences)*, 2023, 24(5): 18—26, 46.
- [14] 黎星池, 朱满德. 农业机械化对种植结构“趋粮化”的空间溢出效应分析[J]. 农业现代化研究, 2021, 42(4): 684—693.
Li Xingchi, Zhu Mandede. Analysis on the spatial spillover effect of agricultural mechanization on the “tendency to grain production” in planting structure [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2021, 42(4): 684—693.
- [15] 崔钊达, 余志刚, 张培鸽. 保护性耕作技术采用有助于提高粮食生产技术效率吗? ——以玉米为例[J]. 农林经济管理学报, 2021, 20(4): 458—467.
Cui Zhaoda, Yu Zhigang, Zhang Peige. Does adoption of conservation tillage technology help improve technical efficiency of grain production? A case study of corn [J]. *Journal of Agro-Forestry Economics and Management*, 2021, 20(4): 458—467.
- [16] 郑旭媛, 徐志刚. 资源禀赋约束、要素替代与诱致性技术变迁——以中国粮食生产的机械化为例[J]. 经济学(季刊), 2017, 16(1): 45—66.
- [17] 司瑞石, 张雪倩. 免耕技术采纳对农地转入户家庭收入结构的影响——基于陕西、甘肃、宁夏的微观实证[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(7): 47—55.
Si Ruishi, Zang Xueqian. Impact of no-tillage technology adoption on family income structure of farmland transferee: Evidence from Shaanxi, Gansu, and Ningxia [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(7): 47—55.
- [18] 侯素素, 董心怡, 戴志刚, 等. 基于田间试验的秸秆还田化肥替减潜力综合分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(5): 70—78.
Hou Susu, Dong Xinyi, Dai Zhigang, et al. Comprehensive analysis of chemical fertilizer replacement potential by straw returning in field experiments [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(5): 70—78.
- [19] 余志刚, 王笑田, 崔钊达, 等. 秸秆还田技术应用是否减少了化肥面源污染? [J]. 农业现代化研究, 2023, 44(5): 834—844.
Yu Zhigang, Wang Xiaotian, Cui Zhaoda, et al. Does the application of straw returning to field technology reduce fertilizer non-point source pollution? [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2023, 44(5): 834—844.
- [20] Tobler W. On the first law of geography: A reply [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2004, 94(2): 304—310.
- [21] 张恒, 郭翔宇. 农业生产性服务业发展与农业全要素生产率提升: 地区差异性与空间效应[J]. 农业技术经济, 2021(5): 93—107.
Zhang Heng, Guo Xiangyu. The promotion effect of agricultural producer services on agricultural total factor productivity: Regional differences and spatial effect [J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2021(5): 93—107.
- [22] 方师乐, 卫龙宝, 伍骏骞. 农业机械化的空间溢出效应及其分布规律——农机跨区服务的视角[J]. 管理世界, 2017(11): 65—78, 187—188.
- [23] 马九杰, 赵将, 吴本健, 等. 提供社会化服务还是流转土地自营: 对农机合作社发展转型的案例研究[J]. 中国软科学, 2019(7): 35—46.
- [24] 颜华, 齐悦, 张梅. 农业生产性服务促进粮食绿色生产的效应及作用机制研究[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(2): 54—67.
Yan Hua, Qi Yue, Zhang Mei. Research on the effect and mechanism of agricultural producer services promoting green grain production [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(2): 54—67.
- [25] 韩召迎, 孟亚利, 徐娇, 等. 区域农田生态系统碳足迹时空差异分析——以江苏省为案例[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5): 1034—1041.
Han Zhaoying, Meng Yali, Xu Jiao, et al. Temporal and spatial difference in carbon footprint of regional farmland ecosystem—Taking Jiangsu Province as a case [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(5): 1034—1041.
- [26] 李波, 张俊飏, 李海鹏. 中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(8): 80—86.
Li Bo, Zhang Junbiao, Li Haipeng. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(8): 80—86.