

引用格式：

白子明, 张筱晨, 李翠霞. 农机跨区作业发展对农业绿色全要素生产率的影响——基于空间溢出效应视角 [J]. 农业现代化研究, 2024, 45(3): 443-454.

Bai Z M, Zhang X C, Li C X. The impacts of cross-region operation of agricultural machine development on the agricultural green total factor productivity: From the perspective of the spatial spillover effects[J]. Research of Agricultural Modernization, 2024, 45(3): 443-454.

DOI: 10.13872/j.1000-0275.2024.0045



## 农机跨区作业发展对农业绿色全要素生产率的影响 ——基于空间溢出效应视角

白子明, 张筱晨, 李翠霞\*

(东北农业大学经济管理学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

**摘要:** 探讨农机跨区作业发展对农业绿色全要素生产率的影响, 有助于为实现农业生产绿色转型的总目标提供重要的参考借鉴。基于 2010—2020 年 30 省数据, 运用 SBM—GML 模型测算农业绿色全要素生产率, 进一步构建空间杜宾模型实证分析农机跨区作业发展对其影响。结果表明: 1) 农机跨区作业面积和农业绿色全要素生产率呈现波动变化态势, 且二者均存在空间自相关关系。2) 农机跨区作业发展对农业绿色全要素生产率有显著的提升作用, 且存在正向空间溢出效应, 农机跨区作业发展每提升 1%, 农业绿色全要素生产率提升 0.993%, 其中本地上升 0.175%, 邻近地区上升 0.819%。3) 在东部、中部、粮食主产区和粮食主销区, 直接效应不显著, 空间溢出效应显著; 在西部地区 and 粮食产销平衡区的各效应均显著。因此, 应当鼓励引导发展农机跨区作业服务, 实现区域内“农机共享”; 因地制宜选择农机跨区服务发展模式, 提升区域资源配置优化; 提升农机跨区作业管理效率, 维护农机跨区作业秩序。

**关键词:** 农机跨区作业; 农业绿色全要素生产率; SBM—GML 模型; 空间杜宾模型; 空间溢出效应

**中图分类号:** F306.2; F323.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0275 (2024) 03-0443-12

### The impacts of cross-region operation of agricultural machine development on the agricultural green total factor productivity: From the perspective of the spatial spillover effects

BAI Zi-ming, ZHANG Xiao-chen, LI Cui-xia

(College of Economics and Management, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China)

**Abstract:** Discussing the impacts of the cross-region operation of agricultural machinery development on agricultural green total factor productivity (AGTFP) provides an essential reference for realizing the general goal of green transformation of agricultural production. Based on a data of 30 provinces from 2010 to 2020, this paper evaluated the agricultural green total factor productivity by the SBM-GML model, and empirically analyzed the impacts of the cross-region operation of agricultural machinery development by the spatial Durbin model. Results show that: 1) cross-region operation of agricultural machinery and agricultural green total factor productivity show fluctuating changes, and both have spatial autocorrelations; 2) cross-region operation of agricultural machinery development has a significant promotion effect on the agricultural green total factor productivity, and there is a positive spatial spillover effect; for every 1% increase in cross-region operation of agricultural machinery development, the agricultural green total factor productivity will be increased by 0.993%, with a local increase of 0.175%, and other areas increase of 0.819%; and 3) In the eastern regions, central regions, main grain-producing regions, and main grain-marketing areas, the direct effect is insignificant while the spatial spillover effect is significant; in the western regions, the balance of grain production and marketing area, both effects are significant. Therefore, it is vital to encourage and guide the development of cross-region operation services for agricultural machinery, to achieve “sharing of agricultural machinery” within the region; to choose

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (71673042); 中宣部文化名家暨“四个一批”人才自选项目 (201801); 黑龙江省哲学社会科学基金专项项目 (23XZT045)。

**作者简介:** 白子明 (1997—), 男, 内蒙古呼伦贝尔人, 博士研究生, 主要研究方向为农业经济, E-mail: b220801013@neau.edu.cn; 通信作者: 李翠霞 (1969—), 女, 辽宁抚顺人, 博士, 教授, 主要研究方向为农业经济、畜牧经济, E-mail: licuixia@neau.edu.cn。

**收稿日期:** 2024-01-15; **接受日期:** 2024-05-30

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (71673042); Cultural Celebrities and “the Four Kinds of First Batch” Talents Project Item (201801); Special Project of Philosophy and Social Science Foundation of Heilongjiang Province (23XZT045).

**Corresponding author:** LI Cui-xia, E-mail: licuixia@neau.edu.cn.

**Received** 15 January, 2024; **Accepted** 30 May, 2024

the development mode of cross-region operation services for agricultural machinery according to local conditions, to enhance the optimization of regional resource allocation; to enhance the efficiency of the management of cross-region operation for agricultural machinery, and to maintain the order of cross-area operation for agricultural machinery.

**Key words :** agricultural machinery cross-region operation; agricultural green total factor productivity; SBM-GML model; spatial Durbin model; spatial spillover effects

改革开放以来,我国的农业发展接连迈上新台阶,伴随而来的资源消耗和环境污染问题也日益突出。高消耗、高投入的生产方式与农业生态环境之间的矛盾愈发明显。为此,中央一号文件多次强调,提升农业绿色全要素生产率,加速推动农业绿色转型<sup>[1]</sup>,可见提升农业绿色全要素生产率是推动农业绿色高质量发展的重要内容<sup>[2]</sup>。在影响农业绿色全要素生产率的诸多因素中,农业机械化是改善农业资源配置效率直接有效的措施之一<sup>[3-4]</sup>。自2004年实施《农业机械化促进法》以来,我国农机化进入高速发展阶段,农机跨区作业已成为我国农机化道路的特色模式<sup>[5]</sup>,跨区作业实现了农机的空间流动,为实现空间溢出效应创造可能性。那么,在农机社会化服务体系日趋完善的背景下,农机跨区作业发展究竟对农业绿色全要素生产率有何作用?该作用能否实现空间外溢?该作用是否呈现时空异质性?回答这些问题对于提升农业绿色发展水平、加快农业现代化建设进程具有重要意义。

现有研究从生产条件、社会特征、经济发展、政府规制等方面对农业绿色全要素生产率的影响因素展开了诸多探索<sup>[6-10]</sup>,大量研究表明,技术进步是提升农业绿色全要素生产率的源泉<sup>[11-12]</sup>。农机化是农业现代化的重要支撑,农机使用推动了农业生产由劳动密集型向资本集约型转变,促进了技术进步,是提升农业绿色发展水平的重要途径<sup>[2]</sup>。由于小农户和兼营农户更倾向于购买农机服务而非直接投资农机<sup>[13]</sup>,加之农业生产社会化服务体系日趋完善,“农民购买服务,农机跨区作业”的生产性服务形式发展愈发成熟,形成了具有中国特色农业机械化发展的道路<sup>[14]</sup>。学者们对于农机跨区作业的研究主要集中在其对粮食生产的影响。农机跨区作业通过区域流动在不同地区示范、传播先进粮食生产技术,实现农机替代农业劳动力<sup>[15]</sup>,并与当地农机服务组织相互竞争,从而产生技术溢出效应<sup>[16]</sup>,引起粮食生产技术效率的空间集聚。同时,农机跨区作业能够发挥绿色技术扩散的媒介作用,具备较强的要素替代和碳减排效应,其推广能有效改善要素配置<sup>[17]</sup>,提升农机运行效率,避免额外的化石燃料耗费,减少碳排放<sup>[18]</sup>,为农业绿色生产提供新的可能。

综上,现有研究对于本文提供了重要的借鉴,本研究旨在进一步辩证分析农机跨区作业发展与农业绿色全要素生产率的关系。此外,农机跨区作业具备流动特征,其空间外溢效应也不可忽视。厘清农机跨区作业发展与农业绿色全要素生产率之间的关系,进一步探究该影响的空间溢出效应,对于推动农业绿色转型、实现农业高质量发展具有重要的现实意义。鉴于此,本文基于2010—2020年全国30省(区、市)(不含港澳台和西藏地区)的面板数据,运用SBM—GML模型测度各省份农业绿色全要素生产率,并构建空间杜宾模型,实证检验农机跨区作业发展对农业绿色全要素生产率的影响及其空间溢出效应,以进一步厘清二者之间的关系,为提升农业绿色全要素生产率和促进农业绿色发展提供经验借鉴。

## 1 概念界定与理论分析

### 1.1 概念界定

农机跨区服务的出现拓展了我国农业机械化的发展路径<sup>[19-20]</sup>。借鉴农业农村部规章管理办法,本文对农机跨区作业的概念界定如下。农机跨区作业是指驾驶操作联合耕整机、联合播种机、联合收割机等各类农业机械,跨越县级以上行政区域进行有偿作业服务的活动。现有研究对农机跨区作业的测度多采用农业机械总动力、农机具数量等,但这些数据没有凸显农机跨区的特征,因此本文运用《中国农业机械工业年鉴》中农机跨区作业面积衡量各地区农机跨区作业的发展程度。

### 1.2 理论分析

分工和专业化理论指出,分工专业化是提升生产效率的关键要素,但由于农业生产的特性,无法完成类似工业生产部门的细致分工。马歇尔将专业分工与规模经济、报酬递增联系起来,在新古典经济学框架下讨论了分工效应。类似地,农业生产分工的效果有限。但是,农业专业化水平的提高可以通过从工业部门引入机器实现。农户可以通过使用农机,增加生产迂回度,加深社会分工程度<sup>[20]</sup>。农机跨区作业发展对农业绿色全要素生产率的影响主要体现在增加期望产出和降低非期望产出两方面。一方面,农机是家庭劳动力的替代品,通过规模化

作业改善土地、劳动、水等生产要素的投入效率，增加农作物产出，实现规模经济<sup>[15]</sup>。另一方面，新型绿色农机可以提升农药、化肥、农膜、柴油等化学用品的利用效率，避免过量投入并减少环境破坏<sup>[21]</sup>，减少田间土壤翻耕导致的碳排放和面源污染<sup>[22]</sup>。基于此，本文提出假说 1。

假说 1：农机跨区作业发展对本地农业绿色全要素生产率有显著的促进作用。

空间计量经济学认为，一个地区的地理特征和经济属性与邻近地区同一特征和属性存在相关关系<sup>[23]</sup>。生态环境是一个复杂的系统，在空间上存在显著的扩散性，因此一个地区的农业绿色全要素生产率可能对其他地区产生影响<sup>[24]</sup>。类似地，农机跨区作业发展也可能对其他地区产生空间溢出。中国幅员辽阔，地区间作物生产周期差异明显，加之各地区农业生产资源禀赋不同，对农机的需求存在结

构性差距，为农机的跨区作业提供了可能。农机跨区作业服务将先进装备、科学技术和人力资本引入农业生产，带动技术外溢，各类生产要素向周边区域流动。农机跨区作业为其他地区提供翻耕、播种、收割等服务，能够改变接受服务地区的农业生产方式，通过生产要素配置、种植结构调整和技术进步等途径提升邻近地区的农业绿色全要素生产率。此外，农机跨区作业发展程度较高的地区会对周围区域形成示范效应与竞争效应，邻里间的互相效仿使得农机跨区作业绿色效应的空间扩散能力得到增强<sup>[25]</sup>。基于此，本文提出研究假说 2，并构建了农机跨区作业发展对农业绿色全要素生产率的本地直接效应和空间溢出效应的理论分析框架图（图 1）。

假说 2：农机跨区作业发展对农业绿色全要素生产率有正向空间溢出效应，能有效提升其他地区的农业绿色全要素生产率。

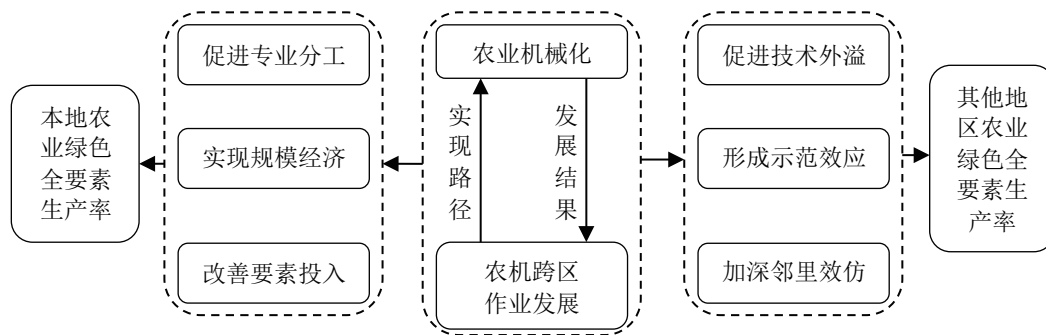


图 1 理论分析框架

Fig. 1 Theoretical analysis framework

## 2 研究设计

### 2.1 研究方法

2.1.1 SBM—GML 指数 现有关于全要素生产率的测度主要采用了增长核算法（GA）、随机前沿方法（SFA）和数据包络分析方法（DEA），其中 DEA 无需设定生产函数的形式，且不必考虑各变量之间的权重和数据量纲，很好地避免了生产函数设定偏误导致的测量结果偏差，在测算独立决策单元多投入多产出的生产效率时非常适用。然而 DEA 有边际报酬不变的严格径向要求和规模报酬不变的模型假定，与现实生产情况不符。为解决这一问题，Tone<sup>[26]</sup> 将松弛变量纳入 DEA 模型，构建了非径向非角度的标准效率模型，即 Slacks—Based Measure（SBM）模型。为进一步提高 SBM 模型与实际生产之间的匹配程度，Tone<sup>[27]</sup> 还提出了包含非期望产出的 SBM 模型。因此，本文构建了包含非期望产出的规模报酬可变型 SBM 模型，计算公式为：

$$\rho = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_i}}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} \left( \sum_{k=1}^{s_1} \frac{s_r^g}{y_r^g} + \sum_{k=1}^{s_2} \frac{s_k^b}{y_k^b} \right)} \quad (1)$$

$$s.t. \begin{cases} x_0 = \lambda x + s^- \\ y_0^g = \lambda y^g - s^g \\ y_0^b = \lambda y^b + s^b \\ s^- \geq 0, s^g \geq 0, s^b \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式（1）、式（2）分别为包含非期望产出的 SBM 模型及其约束条件，其中， $\rho$  为各决策单元的综合效率， $m$ 、 $s_1$ 、 $s_2$  分别为投入要素、期望产出和非期望产出的数量， $s_i^-$  和  $x_i$  分别表示投入冗余和投入变量， $s_r^g$  和  $y_r^g$  分别表示期望产出不足和期望产出变量， $s_k^b$  和  $y_k^b$  分别表示非期望产出过剩和非期望产出变量， $x$ 、 $y^g$ 、 $y^b$  分别表示决策单元估计需要的投入、期望产出和非期望产出变量值， $s^-$ 、 $s^g$ 、 $s^b$  分别为投入冗余、期望产出不足和非期望产出过剩， $\lambda$  为权重向量。



上述 SBM 模型估算出的农业绿色全要素生产率是静态的，未能有效处理生产单元在各期生产前沿的非一致性，不能进行跨期比较。为规避方向距离函数无可解的问题，本文构建 Global Malmquist Luenberger (GML) 指数，分析农业绿色全要素生产率的跨期变动情况，并进一步将其分解为技术效率变动、技术进步变动，具体计算公式为：

$$M^{t,t+1} = \frac{1 + D_t(x^t, y^t, b^t)}{1 + D_{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})} \times \left[ \frac{1 + D_t^G(x^t, y^t, b^t)}{1 + D_t(x^t, y^t, b^t)} \frac{1 + D_{t+1}^G(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})}{1 + D_{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})} \right] = E^{t,t+1} \times T^{t,t+1} \quad (3)$$

式中： $M^{t,t+1}$  表示第  $t$  到  $t+1$  期的农业绿色全要素生产率的变化情况，当  $M^{t,t+1} > 1$  时农业绿色全要素生产率提升，当  $M^{t,t+1} < 1$  时农业绿色全要素生产率下降， $E^{t,t+1}$ 、 $T^{t,t+1}$  分别为技术效率变化指数与技术进步变化指数， $t$  为年份， $x$ 、 $y$ 、 $b$  分别为投入、期望产出、非期望产出， $D^G(x^t, y^t, b^t)$  为参照集方向向量。

本文测算农业绿色全要素生产率选取的指标如表 1 所示。具体而言，选取劳动、土地、机械、化肥、农药、农膜、柴油、水资源等为投入指标。选取各省的农林牧渔业总产值表征期望产出，为了剔除价格波动的影响，利用农林牧渔总产值指数对其进行平减处理。同时为更好地体现农业发展对环境污染造成的综合影响，选取农业面源污染和农业碳排放作为非期望产出。其中，对农业面源污染量的计算借鉴了吴小庆等<sup>[28]</sup>的做法，以化肥污染、农药污染及农膜污染测度农业面源污染水平，各污染源导致的污染量用要素施用量乘以要素流失率计算所得，化肥、农药、农膜的流失率分别为 65%、50%

和 10%。与工业相比，农业碳排放的源头更加多样，包含农地利用活动导致的碳排放、农作物生长发育产生的温室气体排放、反刍动物养殖释放的气体和废弃物。农地利用活动是农业碳排放的第一大来源，分析该环节的碳排放非常具有代表性<sup>[29]</sup>，因此本文所指的农业碳排放主要指农地利用活动产生的碳排放，其计算方式主要参考了李波等<sup>[30]</sup>的研究。

最终，基于上述计算方法和投入产出指标设定，测度 2010—2020 年农业绿色全要素生产率，然而 SBM—GML 指数测算结果反映的是农业绿色全要素生产率环比增长率，而非农业绿色全要素生产率的绝对指数。为满足实证研究的需要，借鉴相关研究的做法，以 2009 年为基期，通过累乘运算即可得到其余各年份的农业绿色全要素生产率。

2.1.2 全局空间自相关检验 全局空间自相关指标可从整体层面测度变量的空间相关关系，本文利用全局莫兰指数分析农机跨区作业发展和农业绿色全要素生产率的全局空间演变特征，计算公式如下：

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

式中： $I$  为全局莫兰指数， $n$  为样本量， $x_i$ 、 $x_j$  是空间位置  $i$  和  $j$  的变量， $\bar{x}$  为观测均值，空间权重  $W_{ij}$  表示空间位置  $i$  和  $j$  的邻近关系。全局莫兰指数的取值范围为  $[-1, 1]$ ，取值介于 0 到 1 时意味着正相关，取值介于 -1 到 0 时意味着负相关，取值为 0 时意味着不存在空间自相关性。

2.1.3 空间杜宾模型 空间计量分析常用的模型有空间自回归模型 (SAR)、空间误差模型 (SEM) 和空间杜宾模型 (SDM)，在满足一定条件时，三个模型可以相互转化。由于 SDM 包含自变量和因变

表 1 农业绿色全要素生产率测算指标  
Table 1 Indicators for measuring the AGTFP

指标类型	变量名称	指标名称	指标说明
投入指标	生产要素	劳动力投入 (万人)	各省当年第一产业就业人员数
		农用土地投入 (万 hm <sup>2</sup> )	各省当年农作物总播种面积
		农用机械投入 (万 kW)	各省当年农业机械总动力
		化肥投入 (万 t)	各省当年化肥施用折纯总量
		农药投入 (万 t)	各省当年农药使用总量
		农膜投入 (万 t)	各省当年农膜使用总量
		农用柴油投入 (万 t)	各省当年农用柴油使用总量
		农用水资源投入 (亿 m <sup>3</sup> )	各省当年农业用水使用总量
产出指标	期望产出	农林牧渔总产值 (亿元)	各省当年平减的农林牧渔总产值
	非期望产出	农业碳排放 (万 t)	当年各省农业碳排放量
		农业面源污染 (万 t)	当年各省农业面源污染量

量的滞后项，在数据生成过程中无论是空间滞后还是空间误差形式，该模型都可以给出系数的无偏估计，并且不会对潜在的空间溢出效应产生影响。基于此，本文先构建 SDM 模型，然后再通过一系列的检验，决定是否采用特殊形式的 SAR 或 SEM，SDM 模型设定如下：

$$Y_{it} = \beta_0 + \rho \sum_{j=1}^n W_{ij} Y_{jt} + \theta X_{it} + \varphi \sum_{j=1}^n W_{ij} X_{jt} + \alpha_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

式中： $Y_{it}$  表示被解释变量在  $i$  地区  $t$  时期的观测值， $Y_{jt}$  表示被解释变量在  $j$  地区  $t$  时期的观测值， $X_{it}$  为解释变量在  $i$  地区  $t$  时期的观测值， $X_{jt}$  表示解释变量在  $j$  地区  $t$  时期的观测值， $W_{ij}$  为权重矩阵， $\rho$  为被解释变量的空间回归系数， $\theta$  为不考虑空间效应时解释变量的回归系数， $\varphi$  为解释变量的空间回归系数， $\beta_0$  为常数项， $\alpha_i$  表示空间固定效应， $\delta_t$  为时间固定效应， $\varepsilon_{it}$  为空间自相关误差项。

2.1.4 空间溢出效应分解 使用传统空间回归模型的点估计判定空间溢出效应可能会导致错误结论，因此本文采用空间计量模型偏微分估计方法，将基础空间杜宾模型改写成向量形式，根据因变量对自变

量求偏导数，即得到直接效应、间接效应和总效应。

## 2.2 变量选取与数据来源

2.2.1 变量选取 选取农业绿色全要素生产率为被解释变量。选取农机跨区作业发展为核心解释变量。选取城镇化水平、农业受灾程度、粮食作物占比、农业结构、受教育程度等为控制变量。

2.2.2 数据来源 农机、化肥、农药、农膜、农用柴油、农业用水、农作物播种面积、农业受灾程度、粮食作物占比以当年实际情况为准，上述数据来源于《中国农村统计年鉴》。第一产业就业人员数据来源于《中国统计年鉴》和各省份统计年鉴。农机跨区作业数据来源于《中国农业机械工业年鉴》。农业结构数据来源于《中国统计年鉴》。城镇人口、年末总人口、乡村人口受教育年限数据来源于《中国人口和就业统计年鉴》。农业生产性服务业产值数据来源于《中国第三产业统计年鉴》。由于 2010 年以来我国出台了大量政策文件支持农业机械化发展，同时考虑到西藏及港澳台地区农业生产的特殊性和数据缺失性，本文的研究范围为 2010 至 2020 年除港、澳、台地区和西藏自治区以外的 30 个省(区、市)，部分缺失数据用线性插值法补齐，各变量的描述性统计见表 2。

表 2 变量描述性统计  
Table 2 Descriptive statistics of variables

变量种类	变量名称	变量定义与说明	均值	标准差
被解释变量	农业绿色全要素生产率	根据 2.1.1 测得	1.639	0.812
核心解释变量	农机跨区作业发展 (km <sup>2</sup> )	农机跨区作业面积	5.725	1.637
控制变量	城镇化率 (%)	城镇人口与年末总人口之比	0.584	0.125
	受灾程度 (%)	农业受灾面积与总播种面积之比	0.161	0.121
	粮食作物 (%)	粮食播种面积与总播种面积之比	0.661	0.144
	受教育程度 (年)	乡村 6 岁以上人口平均受教育年限 <sup>[6]</sup>	2.042	0.078
	农业结构 (%)	农业产值占农林牧渔总产值比重	0.528	0.086
其他变量	滞后农机跨区作业发展 (km <sup>2</sup> )	滞后一期农机跨区作业面积	5.737	1.640
	农业生产性服务 (亿元/万人)	农业辅助性活动产值与乡村人数之比	0.576	1.183

## 3 结果与分析

### 3.1 农机跨区作业发展的总体特征

我国农机跨区作业总面积变化趋势如图 2 所示。结果显示，2010—2020 年间，我国农机跨区作业总面积呈现波动变化，其中 2010—2013 年为快速增长期，作业面积由 2.87 万 km<sup>2</sup> 增长至 3.65 万 km<sup>2</sup>，年均增速达到 8.35%。这一时期由于非农产业和城镇化水平高速发展，农村劳动力向城市非农业部门转移、增加非农就业时间成为农户的经济首选，加之农机购置补贴范围和强度日益完善，农户对节约

或替代劳动的农机具购置、农机作业服务的需求有明显增长，农机跨区作业面积也不断扩大<sup>[31]</sup>。但 2013 年以来农机跨区作业面积有所减少。主要原因是：一方面，2014 年农业部调整了农机跨区作业面积的统计口径，导致全国汇总层面的农机跨区作业面积数据出现下降。另一方面，农业种植结构趋向稳定，农机总动力在经历快速增长后趋向饱和，我国农机保有量达到了一定的峰值，各省农机保有量基本能满足本省的作业需求，因此跨区作业的总面积有所减少<sup>[32]</sup>，但区域内跨区机耕、机播、机械植保、机收等机械作业服务市场仍然较为稳定，农机

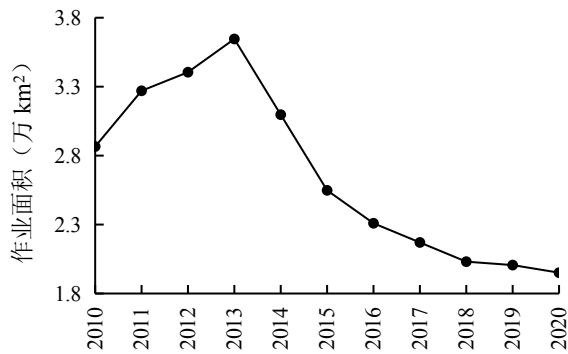


图 2 2010—2020 年农机跨区作业总面积变化趋势图

Fig. 2 Trends in the total area of cross-region operation of agricultural machinery from 2010 to 2020

跨区作业发展总体上保持较好的发展态势<sup>[33]</sup>。

### 3.2 农业绿色全要素生产率的动态演进

我国农业绿色全要素生产率及其分解项的变化特征如图 3 所示。我国农业绿色全要素生产率变动指数在 2010—2020 年间呈现波动增长的趋势，年均增长率为 0.41%。这印证了党中央在“十二五”时期（2011 至 2015 年）大力推动“两型农业建设”和“十三五”时期（2016 至 2020 年）推行绿色低碳生产对农业绿色发展起到了积极促进作用。2017 年以来农业绿色全要素生产率变动指数增长速度较为迅猛，年均增长率达到 6.76%，表明随着乡村振兴等政策的颁布实施以及十九大报告提出的绿色农业高质量发展理念深入贯彻，农业绿色发展水平快速提升，农业绿色全要素生产率不断提高。从分解项来看，技术效率变化与技术进步变化都呈现波动变化的趋势，其中技术效率由 1.018 波动减少至 1.016，年均减少 0.02%，技术进步由 1.109 增长至 1.116，年均增长 0.06%。技术进步在绝大部分年份数值都大于 1，且变化趋势与农业绿色全要素生产率变动指数的变化趋势高度吻合，表明长期来看，技术进步是我国农业绿色全要素生产率增长的

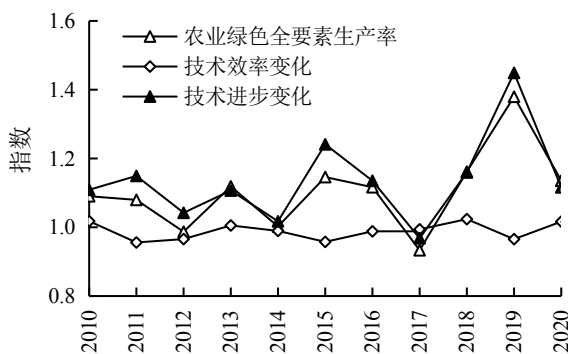


图 3 2010—2020 年农业绿色全要素生产率及其分解项变化  
Fig. 3 Changes of the AGTFP and its decomposition terms from 2010 to 2020

主要动力源泉，而农技推广方面的不足以及粗放的农业生产方式抑制了技术效率提升，进而导致技术效率未能充分发挥对农业绿色全要素生产率的促进作用。

### 3.3 空间相关性分析

在进行空间自相关检验之前，需要判定研究对象的空间位置关系，即分析各个研究对象之间是否共用同一地理边界或地理距离在某一范围内，本文选取 Rook contiguity 准则构建邻接空间权重矩阵  $W_{ij}$ ，用以描述和判定空间上的相对地理位置关系，进一步利用 Stata 18.0 软件分别测算农机跨区作业发展和农业绿色全要素生产率的全局莫兰指数，结果如表 3 所示。

表 3 空间相关性检验结果

Table 3 Results of the spatial correlation test

年份	农机跨区作业发展		农业绿色全要素生产率	
	Moran's I	Z-value	Moran's I	Z-value
2010	0.413***	3.960	0.150*	1.559
2011	0.355***	3.381	0.077	0.954
2012	0.350***	3.335	-0.031	0.035
2013	0.319***	3.060	0.109	1.199
2014	0.363***	3.370	0.012	0.390
2015	0.365***	3.419	0.117*	1.449
2016	0.376***	3.615	0.203**	2.157
2017	0.374***	3.572	0.159*	1.609
2018	0.364***	3.472	0.285***	2.644
2019	0.350***	3.355	0.333***	3.008
2020	0.333***	3.226	0.403***	3.579

注：\*\*\* 表示在 1% 统计水平上显著。

表 3 的结果显示，2010 至 2020 年农机跨区作业发展的莫兰指数均为正数且通过了 1% 水平的显著性检验，说明农机跨区作业发展存在显著的正向空间溢出效应。农机跨区作业服务发展水平相似的地区呈现显著的空间聚集现象，即一个地区的农机跨区服务发展或衰落会引致周边区域的农机跨区作业服务发展程度发生同方向变动。农业绿色全要素生产率的莫兰指数绝大部分年份通过显著性检验且呈现逐渐扩大的趋势，表明我国各地农业绿色全要素生产率的空间集聚分布态势不断加强。综合来看，农机跨区作业发展与农业绿色全要素生产率二者之间很可能存在空间相关关系，有必要进一步采用空间计量模型进行分析。

### 3.4 农机跨区作业对农业绿色全要素生产率的影响

3.4.1 模型选择与检验 本文运用的数据为短面板数据，不需要考虑单位根问题，默认所有变量为平稳序列。方差膨胀因子 (VIF) 检验结果显示，VIF 最大值为 2.47 且远小于 10，VIF 平均值 1.63 大于 1 且



小于5，各变量不存在严重多重共线性，可以进一步进行实证检验。借鉴“从具体到一般”和“从一般到具体”的研究思路筛选模型形式，结果如表4所示。首先，LM检验均通过1%水平检验，证明存在空间效应，需要采用包含空间因素的面板回归。其次，Hausman检验通过1%水平检验，表明固定效应模型优于随机效应模型。最后，LR检验、Wald检验均在1%水平下显著，证明SDM不会退化为SEM和SAR。综上，选取双向固定效应SDM模型分析农机跨区作业发展对农业绿色全要素生产率的影响。

表4 模型选择的相关检验  
Table 4 Correlation test for the model selection

检验方法	检验名称	检验统计量
LM 检验	LM-Error	197.569***
	LM-Error Robust	59.598***
	LM-Lag	158.968***
	LM-Lag Robust	20.997***
LR 检验	LR-Both-Ind	36.580***
	LR-Both-Time	234.950***
	LR-SDM-SEM	25.260***
	LR-SDM-SAR	20.650***
Wald 检验	Wald-SDM-SEM	26.150***
	Wald-SDM-SAR	21.060***
Hausman 检验	Hausman	37.400***

注：\*\*\*表示在1%统计水平上显著。

3.4.2 模型结果分析 表5汇报了双向固定效应SDM的估计结果，同时列出了随机效应模型、固定效应模型的估计结果作为参考。SDM模型显示，农机跨区作业发展对农业绿色全要素生产率有显著正向影响。可能的影响路径有两条，一方面，农机跨区作业助推先进装备、科学技术和人力资本嵌入农业生产，提升农用化学品投入的集约度和规范性，避免

过量投入导致环境破坏。根据农业农村部实验数据，在同等的粮食产量水平下，农机深施基肥可节约肥料20%以上，机械化高效施药的利用率比传统施药方法高30%以上<sup>[34]</sup>，因此农机跨区作业发展可以有效保护耕地质量，减少温室气体和面源污染物排放，提升农业绿色全要素生产率。另一方面，农机跨区作业发展在更大区域范围内实现了农机对农业劳动力的取代，既有效整合了农业生产环节，又避免了小农户过度购买农机具造成的资源浪费和能源消耗，促进农业绿色全要素生产率提升。由此假设1初步得以验证。

### 3.5 空间溢出效应分析

上述结果初步表明，农机跨区作业发展对农业绿色全要素生产率有显著的促进作用，纳入空间矩阵 $W$ 后的系数依旧正向显著。由于存在空间滞后项，仅依靠点估计的参数测量影响程度可能会产生偏差。SMD模型中的回归系数无法完全描述影响系数，需基于估计结果的方差-协方差矩阵对总效应、直接效应和溢出效应进行计算与分解，分解结果如表6所示。

对比直接效应、间接效应和总效应系数发现，农机跨区作业发展对农业绿色全要素生产率有0.993的显著正向总效应，其中空间溢出效应（间接效应）为0.819，约占总效应的比重为82.48%，为本地直接效应的4.68倍，进一步说明农机跨区作业发展对农业绿色全要素生产率影响具有较强的空间溢出作用，不仅能提升本地区农业绿色全要素生产率，还能带动其他地区的农业绿色全要素生产率增长。其原因可能是随着农机跨区作业的发展，农机服务形式和服务能力都显著改善，其技术外溢的特性进一步强化，先进的生产技术和管理经验流向周边区域，为其农业生产注入新的活力。通过为其他地区提供

表5 模型估计结果  
Table 5 Results of the model estimation

变量	随机效应模型		固定效应模型		SDM 模型	
	系数	标准误	系数	标准误	系数	标准误
农机跨区作业发展	0.200***	0.053	0.118*	0.062	0.109*	0.058
$W \times$ 农机跨区作业发展	—	—	—	—	0.443***	0.126
$\rho$	—	—	—	—	0.443***	0.057
控制变量	已控制	—	已控制	—	已控制	—
$W \times$ 控制变量	—	—	—	—	已控制	—
地区控制	未控制	—	已控制	—	已控制	—
时间控制	未控制	—	已控制	—	已控制	—
$N$	330	—	330	—	330	—
$R^2$	0.415	—	0.652	—	0.364	—

注：\*和\*\*\*分别表示在10%和1%统计水平上显著。

表 6 SDM 的空间效应分解结果  
Table 6 Results of the spatial effects decomposition for the SDM

变量	直接效应		间接效应		总效应	
	系数	标准误	系数	标准误	系数	标准误
农机跨区作业发展	0.175***	0.068	0.819***	0.227	0.993***	0.271
控制变量			已控制			
地区控制			已控制			
时间控制			已控制			
<i>N</i>			330			
<i>R</i> <sup>2</sup>			0.364			

注：\*\*\* 表示在 1% 统计水平上显著。

翻耕、播种、收割等服务，能够改变接受服务地区的农业生产方式，实现周边地区生产要素配置优化、种植结构调整和技术进步等，最终提升邻近地区的农业绿色全要素生产率。进一步地，农业绿色发展程度较高的地区会对周围区域形成示范效应与竞争效应，促进农业绿色全要素生产率良性互动<sup>[21]</sup>。由此假说 1 和假说 2 得以验证。农业生态系统的整体性特征决定了农机跨区作业发展对提升中国农业绿色发展水平具有十分重要的意义和作用。

### 3.6 内生性处理与稳健性检验

3.6.1 内生性处理 本文采用滞后核心解释变量法降低内生性可能导致的偏误（见表 7）。估计结果表明，滞后一期的农机跨区作业对农业绿色全要素生产率的影响依然为正，分解后的各项效应也均显著为正。因此，考虑内生性问题后，前文的回归结果依然成立。

3.6.2 稳健性检验 为确保估计结果的可靠性，本文采取替换核心解释变量、替换权重矩阵两种方式进

表 7 内生性处理结果  
Table 7 Results of the endogeneity treatment

变量	农业绿色全要素生产率	
	系数	标准误
滞后一期农机跨区作业发展	0.127**	0.063
<i>W</i> × 滞后一期农机跨区作业发展	0.329**	0.132
直接效应	0.180**	0.073
间接效应	0.653***	0.241
总效应	0.833***	0.289
$\rho$	0.452***	0.060
控制变量	已控制	已控制
地区控制	已控制	已控制
时间控制	已控制	已控制
<i>N</i>		300
<i>R</i> <sup>2</sup>		0.367

注：\*\*、\*\*\* 分别表示在 5%、1% 统计水平上显著。

行稳健性检验，结果见表 8。首先，考虑到灌溉、翻耕等生产机械化服务是农业生产性服务的重要组成部分，农机跨区作业的发展在一定程度上丰富了农业生产性服务业的服务形式和服务种类，因此用

表 8 稳健性检验结果  
Table 8 Results of the robustness test

变量	替换核心解释变量		地理距离矩阵		地理距离平方矩阵	
	系数	标准误	系数	标准误	系数	标准误
农业生产性服务	0.072***	0.019	—	—	—	—
<i>W</i> × 农业生产性服务	0.080**	0.038	—	—	—	—
农机跨区作业发展	—	—	0.168***	0.063	0.106*	0.060
<i>W</i> × 农机跨区作业发展	—	—	2.290***	0.364	0.842***	0.139
直接效应	0.087***	0.023	0.186***	0.070	0.272***	0.086
间接效应	0.265***	0.081	4.442***	1.355	4.707***	1.410
总效应	0.184***	0.067	1.459***	0.292	1.644***	0.329
$\rho$	0.442***	0.057	0.456***	0.133	0.420***	0.076
控制变量		已控制		已控制		已控制
<i>W</i> × 控制变量		已控制		已控制		已控制
地区控制		已控制		已控制		已控制
时间控制		已控制		已控制		已控制
<i>N</i>		330		330		330
<i>R</i> <sup>2</sup>		0.269		0.483		0.454

注：\*、\*\*、\*\*\* 分别表示在 10%、5%、1% 统计水平上显著，—表示不包含此统计量。



生产性服务业的发展情况表征农机跨区作业发展是较为合适的，选取人均农业生产性服务产值的对数值代替原核心解释变量进行稳健性检验。其次，分别用地理距离矩阵和地理距离平方矩阵替换原矩阵进行稳健性检验。结果显示，三个模型中农机跨区作业发展对农业绿色全要素生产率的正向影响依然显著，纳入空间因素  $W$  后影响方向仍显著为正。进一步的分解结果显示，总效应、直接效应和间接效应也显著为正，而且间接效应的系数更大，与原估计结果相似。综上所述，两种稳健性检验的结果都证明了原估计结果是可靠的。

### 3.7 异质性分析

近年来，我国陆续推出各项战略以解决经济发展不平衡问题，但各区域间农业生产效率仍有较大差距，在考虑不同地区间的差异后，农机跨区作业发展的绿色效应如何变化？表9结果显示，农机跨区作业发展对农业绿色全要素生产率的影响呈现明显差异。从空间区位来看，在东部地区和中部地区，农机跨区作业发展的直接效应不显著，但空间溢出效应明显，在西部地区的直接效应和空间溢出效应均显著。可能是因为东部地区和中部地区的经济发展水平较高，农机装备产业较为发达，以采棉机为例，中国销量领先的采棉机品牌分别是铁建重工和沃得农机，总部分别位于湖南省郴州市和江苏省镇江市<sup>[35]</sup>，为农机跨区作业服务发展奠定了基础。因此，在东部和中部地区更容易通过农机跨区作业的形式实现技术外溢，带动周边地区绿色生产效率。西部地区的农业绿色全要素生产率的基数较小、潜力较大，新的服务要素进入有助于农业绿色全要素

生产率快速提升。

从功能区位来看，在粮食主产区和粮食产销平衡区，农机跨区作业发展的间接效应均正向显著，在粮食主销区不显著。主要原因可能是粮食主产区和产销平衡区得益于早期的工业化基础和惠农政策，农机社会化服务发展起步较早，更易充分发挥优势，通过农业技术进步和规模效益提升两条路径，使得农机跨区作业的绿色溢出效应充分发挥。粮食主销区对农业生产性服务的发展需求与发展速度较小，各类生产要素的继续投入对生产效率的提升十分有限<sup>[20]</sup>，从而对农机跨区作业产生了“挤出效应”，未能充分发挥其绿色效应。

从阶段划分来看，两个阶段内农机跨区作业发展对农业绿色全要素生产率的整体影响显著为正，空间溢出效应也始终显著为正。但就直接效应而言，2010—2013年不显著，而2014—2020年显著为正，可能的原因是，2013年农业部发布《关于大力推进农机社会化服务的意见》提到“发展农机中介服务，开展跨区作业信息咨询和机具调度，为农机服务供需双方搭建沟通桥梁”，自此农机中介服务的发展对本地区和周边地区都发挥了积极作用。

## 4 结论与启示

### 4.1 研究结论

农机跨区作业是我国农机化发展过程中形成的特色模式，探究农机跨区作业发展与农业绿色全要素生产率之间的关系有助于提升农业绿色发展水平、推动农业现代化进程。本文基于2010—2020年省级面板数据，运用SBM—GML模型测算了农

表9 异质性分析结果  
Table 9 Results of the heterogeneity analysis

变量	直接效应		间接效应		总效应	
	系数	标准误	系数	标准误	系数	标准误
东部地区	-0.153	0.095	0.625***	0.180	0.472**	0.216
中部地区	0.167	0.111	0.693***	0.240	0.860***	0.313
西部地区	0.482***	0.104	0.516**	0.241	0.998***	0.317
粮食主产区	0.120	0.145	1.097**	0.542	1.217*	0.656
粮食主销区	-0.162	0.135	-0.125	0.116	-0.287	0.176
粮食产销平衡区	0.301***	0.079	0.319**	0.153	0.620***	0.183
2010—2013年	0.013	0.012	0.071***	0.027	0.084**	0.033
2014—2020年	0.084***	0.024	0.197***	0.070	0.280***	0.085
控制变量			已控制			
地区控制			已控制			
时间控制			已控制			
$N$	132	99	99	143	77	110
$R^2$	0.055	0.681	0.426	0.605	0.818	0.481

注：\*、\*\*和\*\*\*分别表示在10%、5%和1%统计水平上显著。

业绿色全要素生产率,从整体视角刻画了农机跨区作业发展和农业绿色全要素生产率的现实特征,进一步构建空间杜宾模型实证分析了农机跨区作业发展对农业绿色全要素生产率的影响,并对其空间溢出效应和异质性进行了讨论。研究发现:

1) 农机跨区作业发展对本地区农业绿色全要素生产率有显著正向影响,基于估计结果的方差—协方差矩阵分解后依然成立。农机跨区作业发展每提升 1%,本地区农业绿色全要素生产率提升 0.175%。

2) 农机跨区作业发展对农业绿色全要素生产率有显著正向空间溢出效应,农机跨区作业发展每提升 1%,能够带动周边地区绿色全要素生产率提升 0.819%。

3) 农机跨区作业发展的影响存在时空异质性,在东部和中部地区、粮食主产区和粮食主销区直接效应不显著,空间溢出效应显著;在西部地区和粮食产销平衡区的各效应均显著;在 2014—2020 年各效应均显著。

#### 4.2 政策启示

1) 鼓励引导发展农机跨区作业服务,实现区域内“农机共享”。针对不同农业生产主体进行差异化引导,增加大中型农机跨区作业服务补贴力度,探索与作业量挂钩的补贴办法;加强省域间合作,完善公路等基础设施网络建设,突破区域间行政割裂以及缺乏统筹的分散格局,为农机跨区作业的承接与服务提供便利条件;打造一体化农机跨区作业服务的信息平台,解决区域农机服务市场失灵问题,实现区域间服务资源的合理流动和科学调配,缩减跨区域农机服务市场交易成本,充分发挥农机跨区作业的绿色空间溢出效应。

2) 因地制宜选择农机跨区服务发展模式,促进区域资源配置优化。立足各区域的资源禀赋和产业优势,选择适合本地区实际生产状况的农机作业服务模式;充分发挥东部地区和中部地区改革发展的先行地作用,简化农机作业补贴落实和监管程序,提升政策执行效率,强化农机化管理部门在农机化发展规划、农机技术推广和培训等方面的职能,为农机在区域内外高效流动奠定基础;在西部地区、粮食产销平衡区,积极培育适度规模的种植大户、家庭农场、农民专业合作社等新型农业经营主体,同时扶持农技人员、农机能手等组建专业化的农机作业服务团队,在提升本地区农业机械化发展水平的基础上促进先进农机和技术外溢。

3) 提升农机跨区作业管理效率,维护农机跨

区作业秩序。优化跨区作业证、大件运输许可证等各类证书的颁发流程,实现优先审批、优先办理、优先发放;协调农机协会和跨区作业中介服务组织,牵头组建跨区作业队,对所有跨区作业队进行统一管理,确保农机有序流动,维护跨区作业秩序;农机行政管理部门应当组织有跨区作业经验的业务骨干人员全程跟踪,提供快捷、优质、高效的服务,及时发布跨区作业服务信息、农机安全知识、天气预报等信息,确保跨区作业有序进行。

#### 参考文献:

- [1] 李芬妮,张俊飏,何可.非正式制度、环境规制对农户绿色生产行为的影响——基于湖北 1105 份农户调查数据[J].资源科学,2019,41(7):1227-1239.  
Li F N, Zhang J B, He K. Impact of informal institutions and environmental regulations on farmers' green production behavior: Based on survey data of 1105 households in Hubei Province[J]. Resources Science, 2019, 41(7): 1227-1239.
- [2] 郑宏运,李谷成.农业资源再配置的生产率效应评估[J].华中农业大学学报(社会科学版),2021(5):45-53,193.  
Zheng H Y, Li G C. Assessment of the productivity effect of agricultural resource reallocation[J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2021(5): 45-53, 193.
- [3] 薛超,史雪阳,周宏.农业机械化对种植业全要素生产率提升的影响路径研究[J].农业技术经济,2020(10):87-102.  
Xue C, Shi X Y, Zhou H. Influence path of agricultural mechanization on total factor productivity growth in planting industry[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2020(10): 87-102.
- [4] 王翌秋,徐丽,曹蕾.“双碳”目标下农业机械化与农业绿色发展——基于绿色全要素生产率的视角[J].华中农业大学学报(社会科学版),2023(6):56-69.  
Wang Y Q, Xu L, Cao L. Agricultural mechanization and agricultural green development under the “dual carbon” goal: A perspective based on green total factor productivity[J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2023(6): 56-69.
- [5] Jiang M J, Hu X J, Chunga J, et al. Does the popularization of agricultural mechanization improve energy-environment performance in China's agricultural sector?[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 276: 124210.
- [6] 马国群,谭砚文.环境规制对农业绿色全要素生产率的影响研究——基于面板门槛模型的分析[J].农业技术经济,2021(5):77-92.  
Ma G Q, Tan Y W. Impact of environmental regulation on agricultural green total factor productivity: Analysis based on the panel threshold model[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2021(5): 77-92.
- [7] 陈芳,杨梅君.农产品国际贸易对中国农业绿色全要素生产率的影响[J].华南农业大学学报(社会科学版),2021,20(5):94-104.  
Chen F, Yang M J. Influence of international trade in agricultural products on agricultural green total factor productivity in China[J]. Journal of South China Agricultural University (Social Science Edition), 2021, 20(5): 94-104.

- [8] 刘战伟. 新型城镇化提升了中国农业绿色全要素生产率吗?——基于空间溢出效应及门槛特征[J]. 科技管理研究, 2021, 41(12): 201-208.  
Liu Z W. Has new urbanization promoted the agriculture green total factor productivity in China? Based on spatial spillover effect and threshold characteristics[J]. Science and Technology Management Research, 2021, 41(12): 201-208.
- [9] 银西阳, 贾小娟, 李冬梅. 农业产业集聚对农业绿色全要素生产率的影响——基于空间溢出效应视角[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(10): 110-119.  
Yin X Y, Jia X J, Li D M. The impact of agricultural industrial agglomeration on green total factor productivity: Based on the perspective of spatial spillover effect[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022, 43(10): 110-119.
- [10] 张翱翔, 邓荣荣. 数字普惠金融对农业绿色全要素生产率的影响及空间溢出效应[J]. 武汉金融, 2022(1): 65-74.  
Zhang A X, Deng R R. Influence of digital inclusive finance on agricultural green total factor productivity and spatial spillover effect[J]. Wuhan Finance, 2022(1): 65-74.
- [11] 吕娜, 朱立志. 中国农业环境技术效率与绿色全要素生产率增长研究[J]. 农业技术经济, 2019(4): 95-103.  
Lü N, Zhu L Z. Study on China's agricultural environmental technical efficiency and green total factor productivity growth[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2019(4): 95-103.
- [12] 郭海红, 刘新民. 中国农业绿色全要素生产率时空演变[J]. 中国管理科学, 2020, 28(9): 66-75.  
Guo H H, Liu X M. Time-space evolution of China's agricultural green total factor productivity[J]. Chinese Journal of Management Science, 2020, 28(9): 66-75.
- [13] 纪月清, 钟甫宁. 非农就业与农户农机服务利用[J]. 南京农业大学学报(社会科学版), 2013, 13(5): 47-52.  
Ji Y Q, Zhong F N. Non-farm employment and the input of machinery service[J]. Journal of Nanjing Agricultural University (Social Sciences Edition), 2013, 13(5): 47-52.
- [14] 高鸣, 宋洪远. 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[J]. 管理世界, 2014(7): 83-92.  
Gao M, Song H Y. Spatial convergence and functional area difference of technical efficiency of grain production: Also on spatial ripple effect of technology diffusion[J]. Management World, 2014(7): 83-92.
- [15] Wang X B, Yamauchi F, Huang J K. Rising wages, mechanization, and the substitution between capital and labor: Evidence from small scale farm system in China[J]. Agricultural Economics, 2016, 47(3): 309-317.
- [16] 张露, 罗必良. 小农生产如何融入现代农业发展轨道?——来自中国小麦主产区的经验证据[J]. 经济研究, 2018, 53(12): 144-160.  
Zhang L, Luo B L. How can small farmers be incorporated into modern agricultural development? Evidence from wheat-producing areas of China[J]. Economic Research Journal, 2018, 53(12): 144-160.
- [17] 田红宇, 祝志勇. 中国粮食生产效率及影响因素分析——基于DEA-Tobit 两步法研究[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(12): 161-168.  
Tian H Y, Zhu Z Y. Analysis of food production efficiency and its influencing factors in China: Verification based on Malmquist-DEA and Tobit model[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(12): 161-168.
- [18] Bai Z M, Wang T Y, Xu J B, et al. Can agricultural productive services inhibit carbon emissions? Evidence from China[J]. Land, 2023, 12(7): 1313.
- [19] 伍骏骞, 方师乐, 李谷成, 等. 中国农业机械化发展水平对粮食产量的空间溢出效应分析——基于跨区作业的视角[J]. 中国农村经济, 2017(6): 44-57.  
Wu J Q, Fang S L, Li G C, et al. The spillover effect of agricultural mechanization on grain output in China: From the perspective of cross-regional mechanization service[J]. Chinese Rural Economy, 2017(6): 44-57.
- [20] 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.  
Fang S L, Wei L B, Wu J Q. The spatial spillover effect of agricultural mechanization and its distribution pattern: The perspective of interregional-service of agricultural machinery[J]. Management World, 2017(11): 65-78, 187-188.
- [21] 冯燕, 吴金芳. 合作社组织、种植规模与农户测土配方施肥技术采纳行为——基于太湖、巢湖流域水稻种植户的调查[J]. 南京工业大学学报(社会科学版), 2018, 17(6): 28-37.  
Feng Y, Wu J F. Cooperative organization, planting scale and farmer's soil testing formula adoption behavior: A survey of rice growers based on Taihu Lake and Chaohu Lake basin[J]. Journal of Nanjing Tech University (Social Science Edition), 2018, 17(6): 28-37.
- [22] Gooroochurn N, Hanley A. A tale of two literatures: Transaction costs and property rights in innovation outsourcing[J]. Research Policy, 2007, 36(10): 1483-1495.
- [23] Tobler W. On the first law of geography: A reply[J]. Annals of the Association of American Geographers, 2004, 94(2): 304-310.
- [24] 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 H, Guo X Y. 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.
- [25] 侯孟阳, 邓元杰, 姚顺波. 农村劳动力转移、化肥施用强度与农业生态效率: 交互影响与空间溢出[J]. 农业技术经济, 2021(10): 79-94.  
Hou M Y, Deng Y J, Yao S B. Rural labor transfer, fertilizer use intensity and agro-ecological efficiency: Interaction effects and spatial spillover[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2021(10): 79-94.
- [26] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 130(3): 498-509.
- [27] Tone K. Dealing with undesirable outputs in DEA: A slacks-based measure (SBM) approach[J]. GRIPS Research Report Series,



- 2003(3): 44-45.
- [28] 吴小庆, 王亚平, 何丽梅, 等. 基于 AHP 和 DEA 模型的农业生态效率评价——以无锡市为例 [J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(6): 714-719.
- Wu X Q, Wang Y P, He L M, et al. Agricultural eco-efficiency evaluation based on AHP and DEA model: A case of Wuxi City[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(6): 714-719.
- [29] Liu J G, Diamond J. China's environment in a globalizing world[J]. Nature, 2005, 435(7046): 1179-1186.
- [30] 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 B, Zhang J B, Li H P. 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.
- [31] 刘超, 朱满德, 陈其兰. 农业机械化对我国粮食生产的影响: 产出效应、结构效应和外溢效应 [J]. 农业现代化研究, 2018, 39(4): 591-600.
- Liu C, Zhu M D, Chen Q L. The effect of agricultural mechanization on grain production in China: Output effect, structure effect and spillover effect[J]. Research of Agricultural Modernization, 2018, 39(4): 591-600.
- [32] 陈杨, 张宗毅. 农机购置补贴的空间溢出效应研究 [J]. 农业现代化研究, 2019, 40(6): 1029-1037.
- Chen Y, Zhang Z Y. Study on the spatial spillover effect of agricultural machinery purchase subsidy[J]. Research of Agricultural Modernization, 2019, 40(6): 1029-1037.
- [33] 曹光乔, 吴萍. 如何把小农户“服务好”“带动好”——基于农机社会化服务视角 [J]. 农业经济问题, 2023, 44(10): 22-31.
- Cao G Q, Wu P. How to “serve” and “promote” smallholder farmers well: From the perspective of agricultural machinery socialization services[J]. Issues in Agricultural Economy, 2023, 44(10): 22-31.
- [34] 周晓时, 樊胜根. 破解“谁来种粮”难题: 全面推进农业机械化的基础与路径 [J]. 中州学刊, 2023(12): 54-60.
- Zhou X S, Fan S G. Solving the problem of “who will grow grain”: The foundation and path of comprehensively promoting agricultural mechanization[J]. Academic Journal of Zhongzhou, 2023(12): 54-60.
- [35] 陶素敏, 曹光乔, 应瑞瑶, 等. 农机制造业发展与农业生产技术效率——基于“空间溢出”和“后发追赶”效应的研究 [J]. 中国农村经济, 2023(10): 112-135.
- Tao S M, Cao G Q, Ying R Y, et al. Development of agricultural machinery manufacturing industry and agricultural production technical efficiency: Based on the “spatial spillover” and “catch-up” effects[J]. Chinese Rural Economy, 2023(10): 112-135.

(责任编辑: 王育花)