

# 农业机械化对粮食生产的空间溢出效应 ——基于江苏省13个地级市的空间计量分析

吴智豪<sup>1,2</sup> 党敬淇<sup>1,3</sup> 季晨<sup>1,2\*</sup>

(1. 浙江大学 中国农村发展研究院,杭州 310058;

2. 浙江大学 公共管理学院,杭州 310058;

3. 浙江大学 管理学院,杭州 310058)

**摘要** 为研究不同地区农业机械化发展水平对粮食生产的空间溢出效应及其作用机制,在理论分析基础上,利用2000—2016年江苏省13个地级市的面板数据,采用空间杜宾计量模型进行了实证分析。研究发现:1)江苏省粮食产量和农业机械化发展水平在地理上呈现出空间相关性;2)江苏省农业机械化水平对粮食生产存在显著的空间溢出效应,本地区农业机械化水平提升会显著促进周边地区粮食产量增加;3)对比混合线性回归、双重固定效应模型和空间杜宾模型的估计结果显示,若不考虑空间因素则会导致农业机械化水平对粮食生产直接效应和总效应的系统性估计偏误;4)空间溢出效应在不同粮食品种之间具有异质性,江苏省玉米生产机械化空间溢出效应较高。

**关键词** 农业机械化; 粮食产量; 空间溢出效应; 空间计量; 江苏省

中图分类号 F325.2

文章编号 1007-4333(2020)12-0184-16

文献标志码 A

## Spatial spillover effect of agricultural mechanization on grain production:

### Based on spatial econometric analysis of 13 cities in Jiangsu Province

WU Zhihao<sup>1,2</sup>, DANG Jingqi<sup>1,3</sup>, JI Chen<sup>1,2\*</sup>

(1. Center for Agriculture and Rural Development, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. School of Public Affairs, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

3. School of Management, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract** In order to study the spatial spillover effect of agricultural mechanization development level on grain production in different regions and its mechanism, based on theoretical analysis and using the panel data of 13 prefecture-level cities in Jiangsu Province from 2000 to 2016, the spatial Durbin econometric model was used for empirical analysis. The results showed that: The grain yield and the level of agricultural mechanization in Jiangsu Province displayed geographical spatial correlation and aggregation effect. The level of agricultural mechanization in Jiangsu Province had a significant spatial spillover effect on grain yield. Comparing the estimation results of pooled ordinary linear regression, two-way fixed effect and spatial Durbin models, it showed that the systematic estimation errors of direct effect and total effect of agricultural mechanization level on grain yield occurred if the spatial factors were not considered. The spatial spillover effect was heterogeneous among different grain varieties. The spatial spillover effect of corn production mechanization in Jiangsu Province was higher.

**Keywords** agricultural mechanization; food production; spatial spillover effect; spatial econometrics; Jiangsu Province

收稿日期: 2020-04-24

基金项目: 浙江省社科规划项目(20 NDJC042YB); 浙江省教育厅项目(Y201941192)

第一作者: 吴智豪, 硕士研究生, E-mail: 21822062@zju.edu.cn

通讯作者: 季晨, 副教授, 主要从事农村区域发展与产业经济研究, E-mail: jichen@zju.edu.cn

粮食生产一直以来是农业发展中不可避免的一个基础性问题,确保粮食产量持续稳定增长对于保障中国的粮食安全和社会稳定具有十分重要的意义。然而,随着改革开放以来中国城镇化的不断发展,农村人口大量流出,农业劳动力逐渐从农业部门转入工业部门,农业劳动人口的减少使得粮食面临减产的可能性<sup>[1]</sup>。但是即便如此,作为中国最大的粮食生产基地之一的江苏省,其粮食产量自2003年起不仅没有减少,反而呈现出持续稳定增长的趋势,至2015年成功实现粮食产量“十二连增”并一直保持平稳态势<sup>[2-3]</sup>。此外,江苏省的农业机械化水平随着粮食产量的增加也出现了同步的提升,截至2018年,全省农业机械化水平达到84%<sup>①</sup>。世界农业发展的历史和经验事实表明,粮食产量的增长离不开农业机械化水平的发展和提升,农业机械化不仅能够有效促进粮食生产效率提升,也在很大程度上弥补了当前农村人口大量流出造成的农业劳动力不足,缓解了粮食生产过程中劳动力缺乏带来的压力<sup>[4]</sup>。

另一方面,已有文献表明农业机械化对粮食生产的作用路径不仅通过本地区农业机械化水平的提升来实现,其他地区的农业机械化发展也能够以跨区作业的方式来影响本地区的粮食生产<sup>[5]</sup>。在历史上,为了规避耕地细碎化对农业发展造成的地理约束,中国农民早已通过农业劳动力的地区间流动实现了跨区服务,促进了农业生产的规模效应提升,最终演变为今天的大规模农机跨区作业<sup>[6]</sup>。农机跨区作业对粮食生产可能产生的影响是农业机械化空间溢出效应的重要表现<sup>[7]</sup>。江苏省的农机跨区作业在全国起步较早、发展较快,跨区作业的组织管理水平、生产效率和规模效益等均处于全国领先水平;近年来,江苏省参与跨区作业的联合收割机在9万台次以上,跨区作业收入稳定在40亿元以上<sup>②</sup>。因此,考察农机跨区作业对于粮食生产的影响,也即研究农业机械化的空间溢出效应,具有非常重要的理论和现实意义。

中国的粮食生产问题一直是学术界关注的重大课题,许多学者曾经围绕农业机械化水平与粮食生产之间的关系,从不同角度、采用不同方法进行了大量的研究,但相对而言仍然缺乏关于农业机械化空

间溢出效应的严谨和系统性考察。现有研究中涉及农业机械化发展水平对粮食生产影响的研究较少考虑其空间溢出效应,例如王跃梅等<sup>[8]</sup>利用农业机械总动力表征农业资本,得出其对粮食生产没有显著性影响的结论;孙良顺<sup>[9]</sup>的研究表明农业机械总动力与粮食生产的关系在粮食主产区不显著,而在非主产区对粮食生产的产出弹性为负;万三敏<sup>[10]</sup>通过计算认为河南农业机械化与粮食增量和农业经济发展之间不存在显著正相关关系。仅有少部分研究从全国的宏观角度考察了中国农业机械化对粮食生产的空间溢出效应,例如伍骏骞等<sup>[11]</sup>利用国内28个省份的统计数据进行实证分析,并指出若未考虑空间溢出效应,则农业机械化对粮食的增产作用会产生系统性高估。故本研究在伍骏骞等<sup>[11]</sup>的基础上,以农机跨区作业发展较完善的国家重要产粮基地江苏省作为研究对象,采用涵盖了更完善控制变量的地市级水平面板数据进行系统全面的考察,并在基准结果的基础上进一步实施若干稳健性检验和不同粮食品种的异质性分析,既为农业机械化对粮食生产的影响提供了更严谨的因果识别策略及分析方法,又能够有针对性地研究国家重点农业区域农业机械化空间溢出效应的深层次作用机制和影响路径,不仅弥补了相关领域的研究缺陷,也可以对各地区农业机械化发展和农机跨区作业提供重要的政策启示。

基于上述经验事实和文献分析,利用2000—2016年江苏省13个地级市粮食产量和农业生产要素投入的面板数据,采用空间杜宾计量模型作为实证策略构造回归方程进行实证分析,系统性考察了江苏省农业机械化发展水平对粮食生产的空间溢出效应,并为政府相关部门制定或调整农业机械化发展政策提供建议,以期推动粮食生产中农业机械的合理、高效利用,促进地区间农业机械化水平的持续提升和协同发展,实现中国粮食生产的集约化。

## 1 理论基础和分析框架

微观经济学和农业经济学中的生产理论表明,劳动力、土地、机械和化肥等农业投入要素依然是与粮食生产直接相关的主要因素,也是确保粮食产量持续增长的重要基础<sup>[12]</sup>。然而,随着农业现代化和城镇化的推进,各要素对粮食生产的贡献率也在发

① 信息来源:江苏人民政府网站,详见 [http://www.jiangsu.gov.cn/art/2019/4/10/art\\_60085\\_8310758.html](http://www.jiangsu.gov.cn/art/2019/4/10/art_60085_8310758.html)

② 信息来源:中华人民共和国人民政府网站,详见 [http://www.gov.cn/gzdt/2011-05/28/content\\_1872521.html](http://www.gov.cn/gzdt/2011-05/28/content_1872521.html)

生结构性变化,其中最显著的特征就是劳动力投入贡献率的下降和农业机械投入的贡献率上升<sup>[13-14]</sup>。不少文献已经证实,由于农业生产过程中劳动力和机械之间存在的替代关系,农业劳动力转移促进了农户的机械采纳行为,即农户可以通过购买生产性服务或增加机械投资的方式来应对劳动力资源的不足<sup>[15]</sup>。相关研究表明,对中国粮食生产的影响因素分解中,农业机械化发展水平的提升被认为是促进粮食产量不断增长的最重要原因<sup>[16]</sup>。

进一步地,考察农业机械化发展水平对粮食生产的影响,需要首先梳理出中国农业机械作业的发展沿革和主要模式。耕地细碎化导致的缺乏规模经营是实现中国农业机械化生产的主要障碍<sup>[17]</sup>。由于中国农业经营的小农基础,家庭联产承包责任制改革和要素禀赋特征,使得中国农户更愿意购买农业机械跨区作业服务,而不是自行购买农机具<sup>[18]</sup>。农机跨区作业即农业经营主体利用不同地理区域之间农作物成熟的时间差,组织联合收割机等农业机械跨区域流动作业的一种农机服务模式<sup>[19]</sup>。中国自上个世纪90年代开始推广农机跨区作业以来,这

种农业机械化生产服务已经逐渐发展成为一种成熟稳定的模式,其影响也在不断扩大<sup>[20-21]</sup>。

因此,中国农业机械化水平的提升离不开农机跨区作业服务的发展,而农机跨区作业正是机械化对农业生产在地理空间上造成溢出效应的具体表现<sup>[22]</sup>。在新经济地理学(Neo-economic geography)中,空间溢出效应(Spatial spillover effect)指单个空间单元某个变量变化所导致的空间影响,即单个区域某个变量变动对其他区域影响的度量<sup>[23-24]</sup>。某一地区的农业机械化水平得以发展,那么通过农机跨区作业的方式就可以将机械化带来的专业化和规模化优势传递到其他地区,弥补相应地区的劳动力短缺问题,并降低粮食生产过程中的投入成本,从而提高其他地区的粮食产量。这意味着某一地区的粮食生产不仅受到本地区农业机械投入的影响,还与其他地区的农业机械化发展水平密切相关:若某一地区的农业机械化发展水平较高,那么通过农机跨区作业服务,这种机械投入的要素禀赋优势可以向其他地区传递,并且优势会随着地理距离的增加而逐渐减弱(如图1所示)。

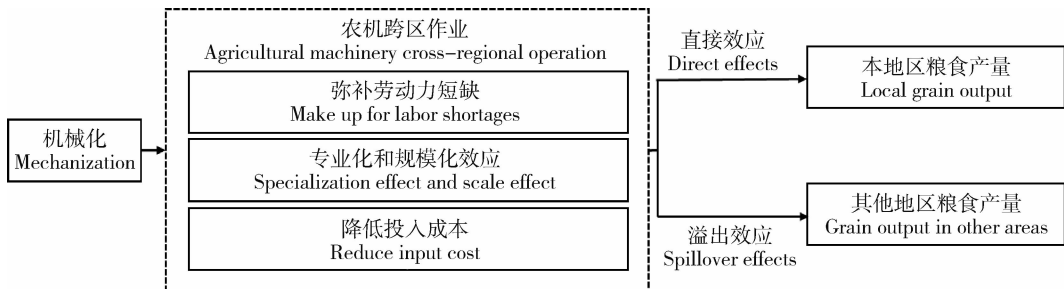


图1 机械化对粮食产量影响的理论分析

Fig. 1 Theoretical analysis of the impact of mechanization on grain yield

学术界对农业机械化影响粮食生产的讨论大多基于普通最小二乘法、固定效应回归或动态面板的广义矩估计等方法,考察农机使用量对本地区粮食生产的直接效果<sup>[11]</sup>。而空间计量经济学的兴起与发展,为检验和拓展区域经济增长理论和新经济地理学提供了有效的分析工具。高鸣等<sup>[20]</sup>分析了粮食生产技术效率的空间自相关性,强调了农业机械跨区作业是粮食生产技术效率产生空间收敛的重要原因;张露等<sup>[7]</sup>以小麦为例,分析得出农业分工深化及其跨区作业服务能够产生市场容量的空间溢出效应;虞松波等<sup>[25]</sup>认为农业机械化服务对本地区小麦成本效率具有正向显著的直接效应,并对周边地区产生空间溢出效应;陈实等<sup>[26]</sup>以湖北省为例,研究

了本地农业机械化水平的提升对周边地区水稻生产造成的空间挤出效应。尽管目前类似上述采用空间计量方法研究农业机械化与粮食生产之间关系的研究数量增多,但仍然未能阐明农业机械化水平的提升通过何种渠道、以何种方式对粮食生产提供动力,尤其缺乏对具体某一省份地市层面直接验证农机跨区作业对粮食生产的空间溢出效应的研究。另一方面,国内外越来越多的研究采用空间计量经济学方法对农业生产中要素投入的空间溢出效应进行了广泛考察,例如 Tong 等<sup>[27]</sup>通过研究发现,公共交通等基础设施的完善对地区农业总产值增加具有溢出效应;潘丹等<sup>[28]</sup>运用空间自相关理论和冷热点分析方法得出水稻、小麦和玉米过量施肥程度均呈现出较

强的空间自相关性。由此可见,农业生产要素投入尤其是机械投入对粮食生产确实有可能存在空间溢出效应。

综上所述,某一地区的农业机械化水平不仅对本地区粮食生产造成影响,同时还可能由于空间溢出效应的存在对其他地区产生影响,且这种空间溢出效应在很大程度上影响了粮食生产过程中机械投入的跨区域调配,对于政府合理高效推进农业机械化均衡发展、促进粮食生产持续增长,和相关农机服务企业优化资源配置、提升运营和生产管理水平等均具有重要的政策指导意义。然而,现阶段农业机械化水平对粮食生产空间溢出效应的存在与否、表现形式和效应的数值大小等,均无法通过上述理论分析得出一致的结论,需要利用数量分析工具进行进一步的实证研究。

## 2 实证策略和计量模型设定

为系统、全面地考察某一地区农业机械化水平对粮食生产的影响及对其他地区的空间溢出效应,本研究采取的实证策略如下:1)不考虑存在空间依赖性的情境,利用面板双重固定效应回归模型(Two-way fixed effect model),来估计基于不存在空间溢出效应假设下农业机械投入对本地区粮食生产的影响,作为基准结果(Baseline results)的对照;2)通过构建全域莫兰指数来测算相关变量的空间自相关性,为进一步的计量分析提供依据;3)最后,采用面板空间计量经济学模型进行回归估计,研究考虑空间溢出效应情况下,农业机械投入对本地区和其他地区粮食生产的影响。

在进行空间计量基准回归之前,本研究首先进行不存在空间溢出效应假设下的分析。考虑到地级市的面板数据可能由于不同地区之间和不同年份之间均存在不可观测效应从而产生内生性问题使得估计结果存在系统性偏误,本研究在参考 Bi 等<sup>[29]</sup>、Abman 等<sup>[30]</sup>、唐轲等<sup>[31]</sup>的基础上采用面板双重固定效应模型来建立计量模型进行实证检验,回归方程如下所示:

$$\ln Yie_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln Mac_{it} + \beta_2 \mathbf{X} + \mu_i + \lambda_t + \epsilon_{it} \quad (1)$$

式中:被解释变量  $\ln Yie_{it}$  表示地级市  $i$  在  $t$  年粮食

总产量的自然对数。核心解释变量  $\ln Mac_{it}$  表示地级市  $i$  在  $t$  年所投入农业机械总动力的自然对数,反映该地级市的农业机械化水平,其估计系数  $\beta_1$  衡量了该市农业机械化水平高低对其粮食生产的影响。矩阵  $\mathbf{X}$  表示可能对地区粮食生产造成影响的控制变量集合,包含一系列农业生产过程中的要素投入变量,以排除其他因素对核心解释变量估计造成的干扰。 $\mu_i$  表示地区固定效应,控制只随地区变化而不随时间变化的不可观测因素对估计结果的内生影响; $\lambda_t$  表示年份固定效应,控制只随时间变化不随地区变化的不可观测因素对估计结果的内生影响; $\epsilon_{it}$  表示回归方程的随机误差项。

在此基础上,本研究进一步运用数量方法考察各地区粮食生产和农业机械化水平是否存在空间自相关性。目前最为常用测量空间相关性的方法是由 Moran<sup>[32]</sup> 在 1950 年提出的莫兰指数(Moran's I)<sup>[33]</sup>。该指数在数学意义上对地理学第一定律进行了阐述:任何事物之间均相关,而离得较近的事物总比离得较远的事物相关性要高<sup>[34]</sup>。全域莫兰指数主要应用于空间数据的统计分布规律分析,表现其聚集效果<sup>[35]</sup>,故本研究选择全域莫兰指数进行空间自相关性测算,其计算公式为:

$$\text{Moran's I} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (Y_i - \bar{Y})(Y_j - \bar{Y})}{s^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij}} \quad (2)$$

式中: $s^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 / n$  为样本方差; $\bar{Y} = \sum_{i=1}^n Y_i / n$  为样本平均值。 $Y_i$  表示地级市  $i$  的粮食生产或农业机械总动力实际数值, $n$  为地级市总数; $\mathbf{W}$  为空间权重矩阵,空间权重矩阵  $\mathbf{W}$  中的元素  $\omega_{ij}$  表示两个不同地级市  $i$  和  $j$  之间经济距离的倒数<sup>①</sup>,刻画了各地级市两两之间确定的空间权重值,体现了空间计量经济学中地理区域之间相互关联、相互影响的本质特征。 $\mathbf{W}$  是一个对称矩阵,则有  $\omega_{ij} = \omega_{ji}$ ,主对角线元素  $\omega_{11} = \omega_{22} = \omega_{33} = \dots = \omega_{nn} = 0$ 。经过空间自相关性的测算,本研究最后利用空间计量经济学的方法来实证农业机械化水平对粮食生产的影响,并从中分离出直接影响和空间溢出效应。面板数据的空间计量经济学模型主要包含空间自回

① 两地之间的经济距离一般采用通勤成本来表示,本研究考虑到数据准确性和可得性要求,并基于相关文献,采用 Google 地图提供的两地之间驾驶机动车辆所消耗的时间来进行计算,这也满足农机跨区作业时农业机械行驶的实际情况<sup>[14]</sup>。

归模型(Spatial autoregressive model, SAR)和空间滞后模型(Spatially lagged X model, SLM)两种类型,其中 SAR 模型包含了空间滞后变量,考虑的是某地区的被解释变量对于邻近地区被解释变量的依赖情形,而 SLM 模型则假设某区域的被解释变量依赖于其邻居的自变量的情形<sup>[36-37]</sup>。本研究在 SAR 和 SLM 的基础上,引入一种新的空间面板计量经济学方法——空间杜宾模型(Spatial durbin model, SDM)<sup>[22]</sup>。SDM 是 SAR 和 SLM 相结合产物,在 SDM 中,某地区被解释变量同时会受到其相邻地区解释变量和被解释变量的影响。相比传统的空间计量模型,SDM 具有以下优点:1)它可以忽略空间变量的具体生成机制和表现形式,确保该模型下的系数均为无偏估计量<sup>[38]</sup>;2)该模型纳入了解释变量的空间滞后项与被解释变量之间的相关性<sup>[23]</sup>;3)它对于空间溢出效应的范围没有提前的限制<sup>[39]</sup>。基于此,本研究提供如下面板 SDM 计量方程:

$$\ln Yie_{it} = \alpha_0 + \delta W \ln Yie_{jt} + \alpha_1 \ln Mac_{it} + \alpha_2 X + \beta_1 W \ln Mac_{jt} + \beta_2 WX + \mu_i + \lambda_t + \epsilon_{it} \quad (3)$$

式中:被解释变量  $\ln Yie_{it}$  和解释变量  $\ln Mac_{it}$  分别表示地级市  $i$  在  $t$  年粮食总产量和农业机械总动力的自然对数; $W \ln Yie_{jt}$  和  $W \ln Mac_{jt}$  分别表示在  $t$  年纳入了地级市  $i$  与其他地级市  $j$  之间空间权重的被解释与解释变量的空间滞后变量。其他相关变量的含义均与回归方程(1)中相同。

### 3 数据、变量与描述性统计

江苏省作为中国重要的粮食生产基地,从种植面积来看,粮食作物种植面积占比始终保持在 62% 以上,位居全国第一;从粮食产量来看,与全国粮食生产发展趋势相同,经历 1999—2003 年的粮食减产低潮期后,到 2015 实现历史性的“十二连增”,是中国重要的粮食主产区之一<sup>[40]</sup>。与此同时,伴随着粮食产量的增长,江苏省农业机械总动力呈现持续增长趋势,作为在全国率先开展农机化的产粮大省,江苏省在苏北发展出一批农机跨区作业队伍,使其向四周辐射专业化的农机服务。因此,通过研究江苏省农业机械化水平对粮食生产的空间溢出效应在一定程度上对中国实现农业现代化目标和稳定粮食产量具有较大的参考价值。

本研究数据来源于《江苏农村统计年鉴》<sup>[4]</sup>,该

年鉴提供了地市级农作物产量、农业机械总动力、农作物播种面积、农村劳动力情况以及农业能源及物质消耗等相关统计量,较为全面地覆盖了粮食产出和投入的相关数据。结合相关文献,根据研究目标和实证模型对数据的要求,本研究最终选择江苏省 13 个地级市 2000—2016 年的面板数据作为研究样本。被解释变量为粮食产量( $Yie$ ),核心解释变量为农业机械总动力( $Mac$ ),选择农业机械总动力来表征农业机械化发展水平是主流文献通常采用的方法<sup>[11]</sup>。本研究的其他控制变量包括:粮食播种面积( $Are$ ),耕地资源作为农业生产的基本要素之一,直接影响了粮食的产出水平<sup>[41]</sup>;种植业从业人员( $Lab$ ),用以表征从事农业生产的劳动力数量,劳动作为农业生产的基础性投入要素对粮食生产具有较大影响,并与农业机械形成替代或互补关系<sup>[42]</sup>;化肥施用折纯量( $Fer$ ),农药使用量( $Che$ ),均作为现代农业的重要投入要素作用于粮食产量增长,并且与农业机械形成替代或互补关系<sup>[43-44]</sup>;农膜使用量( $Plas$ ),农用柴油使用量( $Die$ ),农村用电量( $Elec$ ),用来表示基础设施等农业生产过程中的其他投入要素<sup>[45]</sup>。本研究所需数据的变量说明和描述性统计见表 1。

从被解释变量的变化趋势上看(图 2),江苏省 2000—2016 年粮食产量整体相对稳定,生产能力始终保持在较高水平。17 年间粮食最低产量为 2003 年的 2 471.85 万 t,最高产量为 2015 年的 3 561.34 万 t,并且从 2003 年开始均保持稳定增长态势。这表明,虽然在农业生产部门存在劳动力不断转出的趋势,但是对于江苏省粮食产量的变化并没有产生实质性的影响,相反粮食产量还有所增加;与此同时,作为核心解释变量的农业机械总动力一直呈现出上升的趋势(如图 2 所示),有可能与农村劳动力形成替代关系。从总量上看,尽管土地制度并没有发生较大改变,但是江苏省农业机械总动力仍然表现出不断发展的趋势:2015 年的农业机械总动力达到 4 825.49 万 kW,约为 1978 年的 5.64 倍;2016 年全省农业机械总动力达到 4 906 万 kW,仍存在较大幅度的增长。截至 2016 年,全省农业机械化水平超过 80%,其中玉米的机械播种和收割率分别达到 90% 和 81%,并在原有水平上稳步上升;水稻种植机械化的总面积达到 165.73 万  $hm^2$ ,机插率超过 75%,机械化水平不断提高;稻麦秸秆还田率也达到

表 1 变量描述性统计  
Table 1 Descriptive statistics of variables

变量 Variables	符号 Symbol	均值 Mean	标准差 Std. dev.	最小值 Min. value	最大值 Max. value
粮食产量, t Grain yield	Yie	2 610 092.00	1 507 608.00	591 627.00	7 080 599.00
农业机械总动力, kW Agricultural machinery	Mac	2 863 062.00	1 530 822.00	992 200.00	7 123 300.00
粮食播种面积, hm <sup>2</sup> Grain acreage	Are	401 950.30	231 251.90	94 060.00	981 570.00
种植业从业人员, 人 Plant industry labor	Lab	631 476.90	428 900.60	118 600.00	2 071 400.00
化肥施用折纯量, t Chemical fertilizers	Fer	257 207.00	180 274.90	51 835.00	703 405.00
农药使用量, t Pesticide use	Che	6 831.47	3 675.87	1 660.00	15 967.00
农膜使用量, t Plastic use	Plas	6 913.97	5 900.33	1 265.00	30 314.00
农用柴油使用量, t Agricultural diesel use	Die	69 188.99	52 985.74	15 230.00	265 033.00
农村用电量, 万 kW Rural electricity use	Elec	902 434.00	1 250 145.00	19 691.00	6 097 800.00

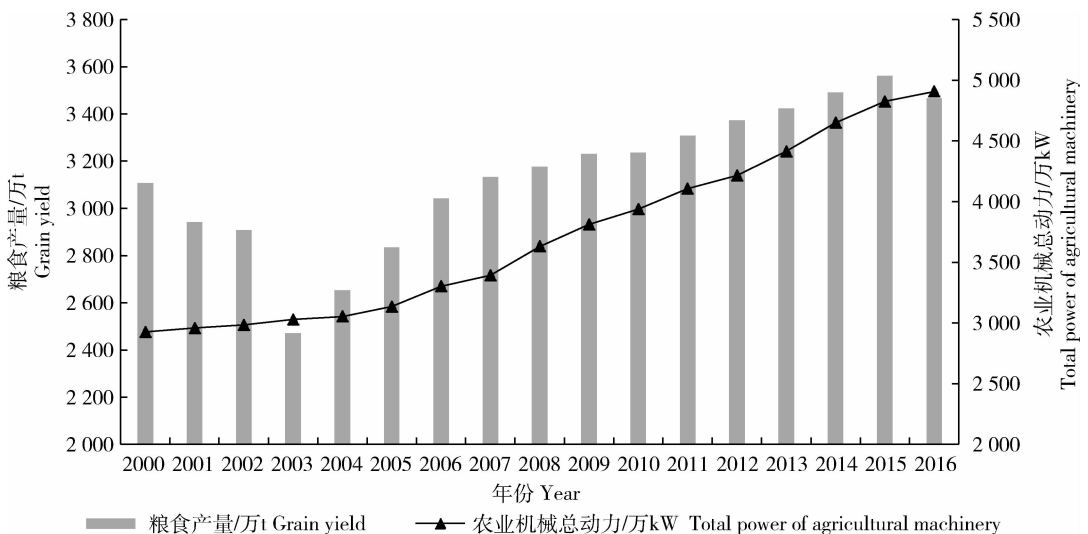


图 2 2001—2016 年江苏省粮食产量和农业机械总动力<sup>[4]</sup>

Fig. 2 Jiangsu's grain output and total power of agricultural machinery from 2001 to 2016<sup>[4]</sup>

了53%，还田面积超过272万 $\text{hm}^2$ <sup>①</sup>。另外，江苏省农业机械跨区作业持续增长，2016年农机跨区收入稳定在7亿元左右，已达到较高水平<sup>②</sup>。

图3提供了2000—2016年江苏省13个地级市的粮食总产量和农业机械总动力之和在地理空间上的分布情况。图中，所有地级市粮食产量的大小通过颜色深浅表示，颜色越深，表示该市的粮食总产量越大；反之则越小。农业机械总动力之和的大小则用圆形图案的面积表示，圆形面积越大越高代表农机总动力越大；反之则越小。分别观察各市粮食总产量和农业机械总动力之和的空间分布规律可以发现，粮食产量较大或者农机总动力较大的地区，其周边的地市也呈现出相似的特点，两变量各自可能存

在空间上的关联性，也即空间溢出效应。另一方面，粮食产量较大的地级市，其代表农机总动力的圆形图案面积也相应越大；反之亦然，这说明两变量之间也存在一定的统计相关性。最后，通过交叉对比某一地级市的农业机械总动力和其周边地市的粮食产量，不难发现若某一地级市的农业机械化发展水平较高，其周边地市的粮食产量也越大。综上，可以从图中直观发现，某地的农业机械化水平的提升可能不仅对本地级市的粮食产量产生促进作用，也有可能通过农业机械跨区作业在地理空间上对周边地市的粮食生产造成一定的积极影响，这意味着农业机械化对粮食生产产生了空间溢出效应。

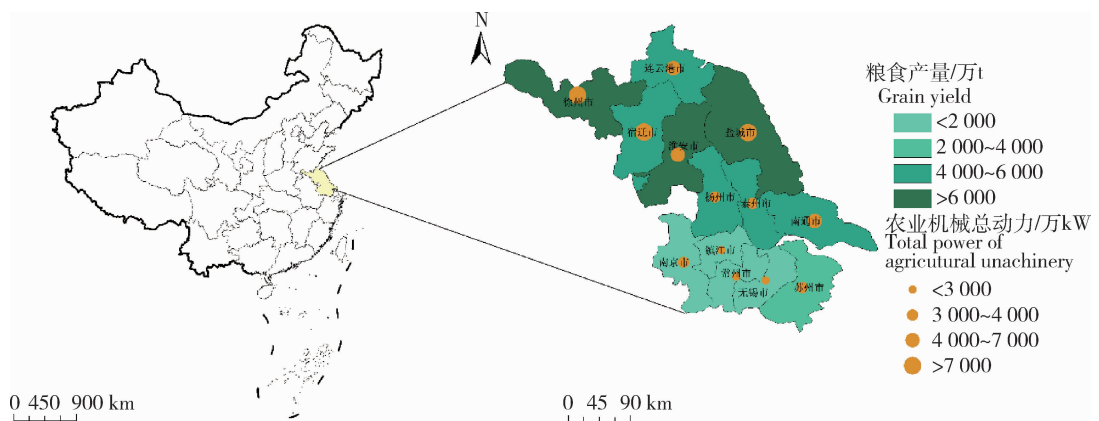


图3 2000—2016年江苏省各市粮食产量和农业机械总动力空间分布

Fig. 3 Jiangsu's distribution of grain yield and total movement of agricultural machinery in prefecture-level cities from 2000 to 2016

## 4 实证分析

### 4.1 面板双重固定效应模型估计

根据第2节中提供的实证策略和计量模型，本研究在考虑变量的空间相关性之前，首先通过面板双重固定效应模型考察本地农业机械化对粮食生产的直接效应。表2报告了由回归方程式(1)所得的6个模型估计结果，其中模型1、3、5相比模型2、4、6没有控制地区固定效应和年份固定效应；而不同模型包含的控制变量也有所区别，变量个数从模型1、2向模型5、6逐渐增加。从各模型中核心解释变量 $\ln\text{Mac}$ 的估计系数显著性水平可以看出，无论是否

控制固定效应还是增减控制变量个数，模型核心估计量始终保持基本稳健。模型1的估计结果表明，当模型中仅包含农业机械总动力1个解释变量的情况下，农业机械化水平每提高1%，会造成粮食产量约60%以上的增长。随着控制变量个数的不断增加和双重固定效应得到控制，其他要素投入和不可观测因素对核心解释变量回归造成的干扰被依次剥离，农业机械化水平对本地区粮食生产的平均偏效应逐渐减少。最终模型6报告了控制所有其他要素投入和双重固定效应后的模型估计结果，这意味着农业机械化水平提升1%会对粮食产量产生5%以上的促进作用。对比模型1~6的估

① 信息来源：中国江苏网，详见 [http://jsnews.jschina.com.cn/jsyw/201703/t20170317\\_228148.shtml](http://jsnews.jschina.com.cn/jsyw/201703/t20170317_228148.shtml)

② 信息来源：江苏省委新闻网，详见 <http://www.zgjssw.gov.cn/m/shixianchuanzhen/lianyungang/201604/t2782412.shtml>

计结果不难发现,未控制固定效应的面板 OLS 回归结果可能会对核心解释变量系数造成系统性高估;进一步地,若江苏省各地市之间由于农业机械的跨区作业而存在空间自相关性,那么面板固定

效应回归则会由于忽略了空间溢出效应而对农业机械化的区域增产效果造成系统性低估。因此,本研究需要考察江苏省各地市之间是否存在上述空间自相关性。

表 2 面板双重固定效应模型估计结果  
Table 2 Two-way fixed effect model estimates

变量 Variables	模型 1 Model 1	模型 2 Model 2	模型 3 Model 3	模型 4 Model 4	模型 5 Model 5	模型 6 Model 6
农业机械总动力 lnMac Agricultural machinery	0.600*** (0.057)	0.544*** (0.058)	0.229*** (0.031)	0.059* (0.035)	0.128*** (0.034)	0.054** (0.026)
粮食播种面积 lnAre Grain acreage			0.998*** (0.068)	0.97*** (0.052)	1.024*** (0.078)	1.032*** (0.055)
化肥施用折纯量 lnFer Chemical fertilizers			0.146** (0.070)	0.102 (0.064)	-0.021 (0.078)	0.048 (0.052)
种植业从业人员 lnLar Plant industry labor					-0.056*** (0.018)	-0.032 (0.027)
农药使用量 lnPes Pesticide use					-0.006 (0.040)	0.039 (0.037)
农膜使用量 lnPlas Plastic use					0.005 (0.018)	0.013 (0.120)
农用柴油使用量 lnDie Agricultural diesel use					-0.018 (0.045)	0.026 (0.024)
农村用电量 lnEle Rural electricity use					0.030** (0.012)	0.023 (0.021)
地区固定效应 Prefecture FE	No	Yes	No	Yes	No	Yes
年份固定效应 Year FE	No	Yes	No	Yes	No	Yes
观测值 Observations	221	221	221	221	221	221
R <sup>2</sup>	0.595	0.796	0.872	0.953	0.891	0.956

注:括号内的数值为怀特异方差稳健标准误;\*\*\*、\*\*、\* 分别表示在 1%、5% 和 10% 水平显著。下同。

Note: The White heteroskedasticity-robust standard errors are in brackets. \*\*\*, \*\* and \* mean significant effects of the variables at 1%, 5% and 10% levels, respectively. The same below.

#### 4.2 基于全域莫兰指数的空间自相关性测量

本研究根据式(2)分别计算了 2000—2016 年江苏省粮食产量和农业机械总动力的全域莫兰指数(图 4)。从图 4 中可以发现,上述两个变量的全域 Moran's I 均为正值,且距离 0 值较远;虽然不同年份之间 Moran's I 数值大小存在一定的波动情况,

但总体而言均呈现逐年上升的趋势;所有 Moran's I 数值的计算均在 5% 的水平上显著。上述结果表明,江苏省各地市粮食生产和农业机械化水平均存在显著的空间自相关性,也即呈现出一定的空间聚集现象,并且该效应随着年份增加而逐渐增强。

诚然,该指数只意味着粮食产量和农业机械总



动力两个变量自身的空间相关性,仍无法判断农业机械总动力对粮食生产的影响。基于此,本研究需

进一步利用空间计量经济学方法实证研究江苏省各地市农业机械化水平对粮食生产的空间溢出效应。

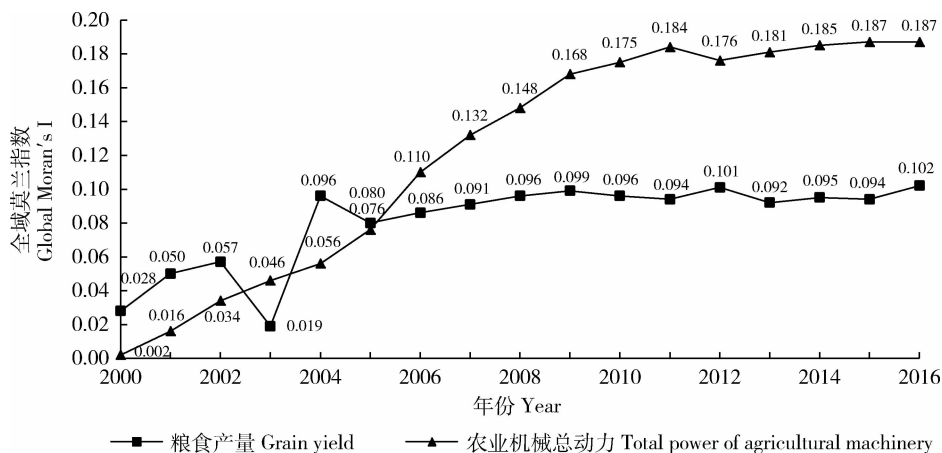


图4 2000—2016年江苏省各地级市粮食产量和农业机械总动力的全域莫兰指数

Fig. 4 2000—2016 Jiangsu's global Moran's I of grain output and total power of agricultural machinery

### 4.3 考虑空间自相关性的SDM估计

根据以上核心变量全域 Moran's I 测算结果呈现出的空间溢出效应特征,本节将采用 SDM 方法来实证分析考虑存在空间自相关情境下江苏省农业机械化水平对粮食生产的影响。利用式(3)提供的 SDM 回归方程,和江苏省 13 个地级市 2000—2016

年的数据得到的各模型估计结果报告在表 3 中。需要指出的是,由于 SDM 方法并不是简单的线形回归,所以最终得到的估计系数并不能直接反映空间溢出效应的大小,而需要通过偏微分的方法进一步将其分解才能得到。表 4 提供了各模型中估计系数分解得到的直接影响、空间溢出效应和总效应数值。

表3 考虑空间自相关性的SDM估计结果

Table 3 The SDM estimates considering spatial spillover effect

变量 Variables	s 模型 7 Model 7	模型 8 Model 8	模型 9 Model 9	模型 10 Model 10
农业机械总动力 lnMac Agricultural machinery	0.489*** (0.079)	0.051 (0.036)	0.050 (0.035)	0.020 (0.022)
粮食播种面积 lnAre Grain acreage		0.905*** (0.047)	0.912*** (0.048)	0.953*** (0.050)
化肥施用折纯量 lnFer Chemical fertilizers		0.087 (0.066)	0.090 (0.065)	0.020 (0.053)
种植业从业人员 lnLar Plant industry labor			-0.016 (0.024)	-0.049* (0.026)
农药使用量 lnPes Pesticide use				0.056 (0.038)
农膜使用量 lnPlas Plastic use				-0.009 (0.019)

表 3(续)

变量 Variables	模型 7 Model 7	模型 8 Model 8	模型 9 Model 9	模型 10 Model 10
农用柴油使用量 lnDie Agricultural diesel use				0.031 (0.022)
农村用电量 lnEle Rural electricity use				0.042** (0.018)
粮食产量空间加权 $W \times \ln Yie$ Space weighted grain yield	0.715** (0.046)	0.741*** (0.033)	0.740*** (0.032)	0.722*** (0.041)
农业机械总动力空间加权 $W \times \ln Mac$ Space weighted agricultural machinery	-0.249 (0.158)	0.077 (0.064)	0.091 (0.072)	0.242** (0.089)
粮食播种面积空间加权 $W \times \ln Are$ Space weighted grain acreage		-0.562*** (0.081)	-0.568*** (0.083)	-0.496*** (0.125)
化肥施用折纯量空间加权 $W \times \ln Fer$ Space weighted chemical fertilizers		-0.059 (0.072)	-0.070 (0.106)	-0.125 (0.169)
种植业从业人员 $W \times \ln Lar$ Space weighted plant industry labor			0.024 (0.043)	0.249** (0.094)
农药使用量空间加权 $W \times \ln Pes$ Space weighted pesticide use				-0.033 (0.057)
农膜使用量空间加权 $W \times \ln Plas$ Space weighted plastic use				-0.003 (0.060)
农用柴油使用量空间加权 $W \times \ln Die$ Space weighted agricultural diesel use				-0.191 (0.111)
农村用电量空间加权 $W \times \ln Ele$ Space weighted rural electricity use				0.039 (0.047)
地区固定效应 Prefecture FE	Yes	Yes	Yes	Yes
年份固定效应 Year FE	Yes	Yes	Yes	Yes
观测值 Observed value	221	221	221	221
$R^2$	0.589	0.914	0.914	0.919

表 3 中模型 7 的估计结果仅包含农业机械总动力及其空间滞后项系数,模型 8~10 则报告了逐渐增加控制变量后的模型估计结果,其中模型 10 包含了所有控制变量和固定效应,因此本研究将模型 10 的回归系数作为研究的基准结果。基准回归结果表明,当控制其他条件不变时,农业机械化水平提升会显著促进本地粮食生产,农业机械总动力每提高 1

个百分点,会在 1% 水平上使得本地的粮食产量增加 0.08%;同时,农业机械化水平提升也会对周边地市粮食生产产生溢出效应,本地农业机械总动力每提高 1%,会显著使得周边地市的粮食产量产生 0.87% 的增长;因此上述本地农业机械化水平提升带来的粮食增产总效应约为 0.94%。该回归结果意味着,某一地市农业机械化水平的提升能够

通过农机跨区作业的方式将发展的优势传递给其他地区。模型7~9的其他核心解释变量估计系数与基准回归结果基本相似,这既说明本研究的模型设定合理,估计结果较为稳健,也进一步证实了农业机械化水平提升对粮食生产的空间溢出效应确实存在。

此外,在对比了SDM估计结果与上述得到的普通线性回归模型估计结果后不难发现,不考虑不同地区之间空间自相关性的线性估计量会导致农业机械化水平提升对本地粮食增产效应的系统性高估,由于其空间溢出效应被忽视,最终使得农业机械化带来的总效应被低估;而对比SDM估计结果与

固定效应模型回归结果则发现,固定效应模型直接剔除了变量可能存在的空间溢出效应,使得农业机械化水平提升对本地粮食增产效应被系统性低估。本研究的估计结果是对已有相关研究的有效补充:在潘丹等<sup>[28]</sup>仅计算空间自相关性的基础上,采用了可以进一步探究因果关系的空间计量方法;在伍骏骞等<sup>[11]</sup>采用国内部分省级面板数据的基础上,采用江苏省市级面板数据得出了与前者一致的结论;此外,本研所得结果与陈实等<sup>[26]</sup>采用湖北省水稻生产的结论相呼应,丰富了空间计量方法在农业机械化和粮食经济领域的应用,也对区域农业机械化发展提供了一定的政策指导。

表4 直接影响、空间溢出效应和总效应分解

Table 4 Direct effect, spatial spillover effect, and total effect

变量 Variables	直接影响 Direct effect		空间溢出效应 Spatial spillover effect		总效应 Total effect	
	系数 Coef	标准误 Std error	系数 Coef	标准误 Std error	系数 Coef	标准误 Std error
	模型7 Model 7					
农业机械总动力 lnMac Agricultural machinery	0.514***	0.077	0.351**	0.375	0.864**	0.379
模型8 Model 8						
农业机械总动力 lnMac Agricultural machinery	0.076**	0.035	0.408**	0.166	0.484***	0.174
粮食播种面积 lnAre Grain acreage	0.933***	0.054	0.395	0.311	1.327***	0.338
化肥施用折纯量 lnFer Chemical fertilizers	0.09	0.067	0.007	0.198	0.097	0.221
模型9 Model 9						
农业机械总动力 lnMac Agricultural machinery	0.081**	0.037	0.458**	0.196	0.538***	0.207
粮食播种面积 lnAre Grain acreage	0.937***	0.054	0.382	0.331	1.318***	0.361
化肥施用折纯量 lnFer Chemical fertilizers	0.091	0.072	-0.011	0.344	0.080	0.380
种植业从业人员 lnLar Plant industry labor	-0.014	0.026	0.047	0.145	0.033	0.159

表 4(续)

变量 Variables	直接影响		空间溢出效应		总效应	
	Direct effect		Spatial spillover effect		Total effect	
	系数 Coef	标准误 Std error	系数 Coef	标准误 Std error	系数 Coef	标准误 Std error
模型 10 Model 10						
农业机械总动力 InMac Agricultural machinery	0.075***	0.029	0.866***	0.291	0.939***	0.306
粮食播种面积 InAre Grain acreage	0.994***	0.056	0.647	0.425	1.640***	0.453
化肥施用折纯量 InFer Chemical fertilizers	0.002	0.069	-0.370	0.59	-0.368	0.637
种植业从业人员 InLar Plant industry labor	-0.006	0.039	0.705**	0.334	0.699*	0.361
农药使用量 InPes Pesticide use	0.055	0.041	0.032	0.19	0.087	0.208
农膜使用量 InPlas Plastic use	-0.009	0.035	-0.026	0.236	-0.035	0.267
农用柴油使用量 InDie Agricultural diesel use	-0.004	0.036	-0.558	0.372	-0.561	0.397
农村用电量 InEle Rural electricity use	0.056**	0.029	0.223	0.179	0.279	0.196

#### 4.4 稳健性检验

为保证上述呈现的回归结果在不同情形下保持稳定,本研究还进行了如下稳健性检验<sup>①</sup>:1)采用空间滞后模型(SLM)替代基准回归中的SDM方法进行估计;2)采用空间自回归模型(SAR)替代基准回归中的SDM方法进行估计;3)保持基准回归的SDM估计方法不变,将怀特异方差稳健标准误替换为普通标准误进行估计;4)保持基准回归的SDM估计方法不变,采用一阶邻近权重矩阵作为空间权重矩阵进行估计,一阶邻近权重矩阵即0-1矩阵,当地区*i*和地区*j*相邻时为1,否则为0。

此外,本研究进一步基于上述回归结果进行了直接影响、空间溢出效应和总效应分解计算。除SLM方法由于回归方程的结构原因无法计算以外,其他3个模型的估计和计算结果在系数方向、大小

和显著性等方面与基准估计结果基本一致,表明上述的基准估计结果保持稳健。相较之下,SLM和SAR两种估计方法对农业机械化水平和粮食产量之间关系的表达不如SDM全面和准确;由于不可观测因素的差异,不同地市和年份之间或多或少存在异方差或自相关问题,需要在模型的回归估计中加以控制;而采用地理距离权重矩阵相比一阶邻近权重矩阵而言,能够更准确地刻画不同地市之间的空间关联性,从而使得估计结果更加准确。综上所述,基准回归的估计结果不仅保持稳健,而且最为一致和有效。

#### 4.5 不同粮食品种的异质性分析

基于上述全样本回归和分解得到的结果,本研究考虑到由于江苏省内不同品种的粮食作物种植结

① 囿于篇幅所限,正文中未提供稳健性检验的结果,备索。

构、地理空间分布与种植环境等均存在明显差别,而造成农业机械使用量与粮食产量的差异,进一步划分子样本进行研究,考察江苏省农业机械化水平提升对不同粮食品种是否存在异质性影响。考虑到粮食作物在江苏省种植的广泛性和代表性,本研究将水稻、小麦、玉米和大豆产量的变化作为异质性分析的研究对象,除将农业机械总动力在不同品种作物之间进行拆分外<sup>①</sup>,回归模型、控制变量和分解方法均与上述模型 10 相一致,所得结果报告在表 5 中。

由表 5 可见,农业机械化水平对不同粮食生产的直接影响和空间溢出效应均存在明显差异。其中,农业机械化水平提升仅对本地水稻生产具有直接的促进作用,而对本地小麦、玉米和大豆生产并无显著效果,而农机跨区作业产生的溢出效应则对除小麦以外的其他所有粮食生产均具有显著促进作用,其中玉米生产过程中的空间溢出效应更大,说明玉米更容易通过农机跨区作业达到增产的效果;最终总效应表现与空间溢出效应方向和大小基本一致。<sup>②</sup>

表 5 不同粮食品种的异质性分析

Table 5 Heterogeneity analysis of different grain varieties

变量 Variables	直接影响 Direct effect		空间溢出效应 Spatial spillover effect		总效应 Total effect	
	系数 Coef	标准误 Std error	系数 Coef	标准误 Std error	系数 Coef	标准误 Std error
	水稻 Rice	0.800***	0.269	1.541*	0.856	2.341**
小麦 Wheat	0.058	0.135	0.568	0.683	0.627	0.692
玉米 Corn	-0.606	0.418	5.772***	1.120	5.166***	1.151
大豆 Soybean	-0.661	0.572	2.080***	0.810	1.420**	0.557

## 5 结论与讨论

由于不同地区之间存在空间上的相关性,因此在分析某一地区农业机械化发展水平对粮食生产的作用机制时不能局限于该地区内部,还需要研究与其他地区之间的空间交互影响。本研究利用 2000—2016 年江苏省 13 个地级市粮食产量和农业生产要素投入的面板数据,采用空间杜宾计量模型作为实证策略构造回归方程进行实证分析,系统性考察了江苏省农业机械化发展水平对粮食生产的空间溢出效应。研究发现:1)江苏省粮食产量和农业机械化发展水平均在地理上呈现出显著的空间相关

性,两者的全域莫兰指数长期处于 0.1 以上;2)江苏省农业机械化水平对粮食生产存在显著的空间溢出效应,本地区农业机械化水平提升会显著促进周边地区粮食产量增加,据测算,本地农业机械化水平每提升 1%,会使得周边地市粮食产量增加 0.87%;3)对比普通线性回归、双重固定效应模型和空间杜宾模型的估计结果显示,若不考虑空间因素则会导致农业机械化水平对粮食生产直接效应和总效应的系统性估计偏误,其中未控制固定效应的普通线性回归会导致直接效应高估和总效应低估,双重固定效应模型会导致直接效应和总效应均被低估;4)空间溢出效应在不同粮食品种之间具有异质性,江苏省

① 由于《江苏农村统计年鉴》<sup>[4]</sup>中只含有农业机械总动力这一变量,无法直接得到分别作用于不同粮食品种的农业机械动力的多少。本研究利用 2000—2016 年《全国农产品成本收益资料汇编》<sup>[46]</sup>提供的数据,选择江苏省这 4 种粮食作物各自所需的机械作业费占总机械作业费的比重作为权重,计算该品种粮食作物生产所需的农业机械总动力。

② 产生上述现象的原因可能与江苏省农业机械的分布,江苏省农机全国范围跨区作业,以及江苏省粮食种植结构的差异有关。江苏省农业机械发展主要集中在苏北地区,通过农机跨区作业向其他地区提供专业化服务。对于粮食种植结构而言,按播种面积和产量由高到低依次为水稻、小麦、玉米和大豆,2016 年江苏省的产量分别为 2 001 万、1 322 万、294 万和 51 万 t<sup>[4]</sup>,且水稻主要种植在苏南地区,小麦在苏南、苏中、苏北的种植面积比较接近,玉米主要种植在苏北地区,大豆苏中和苏北较多<sup>[40]</sup>。由于苏北是小麦、玉米、大豆的主要种植地,且三者所占份额较小,所以本地机械化水平并不能促进本地该品种的粮食生产;而苏北地区的农业机械通过跨区可以提高苏南地区的粮食产量,无论该品种主要种植在苏北还是苏南;小麦的溢出效应不显著的原因可能在于江苏省农机全国跨区作业与小麦生产时间重叠。

玉米生产机械化的空间溢出效应较高,而小麦生产机械化并未呈现出空间溢出效应特征。

基于上述结论,可以为江苏省甚至全国农业机械化生产提供如下政策启示:第一,考虑到由于农业机械跨区作业方式的存在,使得农机服务可以通过进一步专业化分工分享技术进步从而产生更广泛的经济效益,因此可以鼓励农业机械跨区作业服务形成产业集群,扩大服务规模,优化作业模式,建立健全运营机制,完善相关流程标准,促进整个行业共同发展。结合江苏省实际情况,从区域发展的角度看,苏北、苏中后发优势明显,应当在这些地区着重发展专业化的农机队伍,重点打造沛县一带的农机服务相关企业等经营主体,并向周边地区推广。第二,由于农业机械化水平提升对粮食生产具有显著的空间溢出效应,不仅对本地农业生产经营具有促进作用,更能极大改善周边地区的机械周转和使用率,有效提升粮食生产作业效率,因此各级政府之间需要进一步加强相关部门的交流与合作,协调和优化区域内农业机械服务的资源配置和产业分布,努力为农机跨区作业服务的进一步发展提供良好保障;在条件允许的情况下考虑建立统一的农业机械跨区作业服务信息平台,辅助相关农机服务经营主体实现自发的流动与科学的配置。第三,不同品种的粮食作物在生产过程中对机械投入的反馈不同,空间溢出效应也存在明显差异,相关政府部门和企业等应当考虑到不同作物品种生长季节、要素需求和机械作业特点的不同,有针对性地改进农业机械跨区服务的规模和质量。

诚然,本研究还存在如下局限:第一,囿于数据资料所限,实证研究仅包含江苏省数据而未能有效覆盖全国,因此缺乏对于农机跨省作业情境的考察;第二,核心解释变量农业机械总动力是一个总体而非细分的概念,并未提供各类农业机械的细分数据,因此无法考察不同农业机械类型之间空间溢出效应的差异;第三,尽管采用的数据和实证策略最大限度地控制了可能对估计结果造成干扰的变量和不可观测效应,但遗漏变量和选择性偏误带来的内生性问题仍然构成了本研究结果的一个潜在威胁。未来,在数据完善的基础上,我们将进一步考察农业机械化对粮食生产溢出效应在全中国的分布情况,并纳入农机跨县、跨市、跨省的分解及不同农业机械种类的异质性分析等。

## 参考文献 References

- [1] 应瑞瑶,郑旭媛.资源禀赋、要素替代与农业生产经营方式转型:以苏、浙粮食生产为例[J].农业经济问题,2013(12):15-24  
Ying R Y, Zheng X Y. Resources endowment, factor substitution and the transformation of agricultural production and operation: Example from food production in Jiangsu and Zhejiang[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2013(12): 15-24 (in Chinese)
- [2] 朱剑红,高云才.我国粮食产量“十二连增”[N].人民日报,2015-12-09(1)  
Zhu J H, Gao Y C. China's grain output increases in the 12th consecutive year[N]. *People's Daily*, 2015-12-09(1)
- [3] 江苏省统计局.江苏农村统计年鉴,2001—2017[M].北京:中国统计出版社,2001—2017  
Jiangsu Provincial Bureau Of Statistics. *Jiangsu Rural Statistical Yearbook (2001 - 2017)* [M]. Beijing: China statistical press, 2001—2017 (in Chinese)
- [4] 王欧,唐轲,郑华懋.农业机械对劳动力替代强度和粮食产出的影响[J].中国农村经济,2016(12):46-59  
Wang O, Tang K, Zheng H M. Effects of agricultural machinery on labor substitution intensity and grain output[J]. *Chinese Rural Economy*, 2016(12): 46-59 (in Chinese)
- [5] 纪月清,王亚楠,钟甫宁.我国农户农机需求及其结构研究:基于省级层面数据的探讨[J].农业技术经济,2013(7):19-26  
Ji Y Q, Wang Y N, Zhong F N. Research on farmers' demand for agricultural machinery and its structure in China: Discussion based on data at provincial level[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2013(7): 19-26 (in Chinese)
- [6] 刘凤芹.农业土地规模经营的条件与效果研究:以东北农村为例[J].管理世界,2006(9):71-79  
Liu F Q. A study of the conditions of the scale operation of farmland, and of the effect thereof: Taking the northeastern countryside as a case[J]. *Management World*, 2006(9): 71-79 (in Chinese)
- [7] 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 (in Chinese)
- [8] 王跃梅,姚先国,周明海.农村劳动力外流、区域差异与粮食生产[J].管理世界,2013(11):67-76  
Wang Y M, Yao X G, Zhou M H. Rural labor outflow, regional differences and food production [J]. *Management World*, 2013(11): 67-76 (in Chinese)
- [9] 孙良顺.水旱灾害、水利投资对粮食产量的影响[J].西北农林科技大学学报:社会科学版,2016,16(5):136-142

- Sun L S. Flood and drought disasters, water conservancy investment and grain yield[J]. *Journal of northwest A&F University: Social Sciences*, 2016, 16(5): 136-142 (in Chinese)
- [10] 万三敏. 中原经济区的农机化、农业经济与粮食增产: 基于重心理论[J]. 农机化研究, 2013, 35(8): 22-25  
Wan S M. Agricultural mechanization, rural economy and grain production of central plains economic region: Based on gravity theory[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2013, 35(8): 22-25 (in Chinese)
- [11] 伍骏骞, 方师乐, 李谷成, 徐广彤. 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, Xu G T. The spillover effect of agricultural mechanization on grain output in China: From the perspective of cross-regional mechanization service[J]. *China Rural Economy*, 2017(6): 44-57 (in Chinese)
- [12] Hayami Y, Ruttan V W. Factor prices and technical change in agricultural development: The United States and Japan, 1880-1960[J]. *Journal of Political Economy*, 1970, 78(5): 1115-1141
- [13] Wang X, Yamauchi F, Otsuka K, Huang J K. Wage growth, landholding, and mechanization in Chinese agriculture[J]. *World Development*, 2016(86): 30-45
- [14] 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  
Zheng X Y, Xu Z G. Endowment restriction, factor substitution and induced technological innovation: A case research on the grain producing mechanization in China[J]. *China Economic Quarterly*, 2017, 16(1): 45-66 (in Chinese)
- [15] Ji Y Q, Yu X H, Zhong F N. Machinery investment decision and off-farm employment in rural China[J]. *China Economic Review*, 2012, 23(1): 71-80
- [16] 田甜, 李隆玲, 黄东, 武拉平. 未来中国粮食增产将主要依靠什么: 基于粮食生产“十连增”的分析[J]. 中国农村经济, 2015(6): 13-22  
Tian T, Li L L, Huang D, Wu L P. What will China rely on to increase grain production in the future: Based on the analysis of “ten consecutive increases” in grain production[J]. *China Rural Economy*, 2015(6): 13-22 (in Chinese)
- [17] Ruttan V W. Technology, growth, and development: An induced innovation perspective[J]. *OUP Catalogue*, 2000, 62(1): 272-273
- [18] 芦千文, 吕之望, 李军. 为什么中国农户更愿意购买农机作业服务: 基于对中日两国农户农机使用方式变迁的考察[J]. 农业经济问题, 2019(1): 113-124  
Lu Q W, Lu Z W, Li J. Why do Chinese farmers prefer to purchase agricultural machinery operation services: Based on the evolution of use-pattern in China and Japan[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2019(1): 113-124 (in Chinese)
- [19] Yang J, Huang Z H, Zhang X B, Reardon T. The rapid rise of cross-regional agricultural mechanization services in China[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 2013, 95(5): 1245-1251
- [20] 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 technological efficiency of grain production: Also on spatial ripple effect of technological diffusion[J]. *Management World*, 2014(7): 83-92 (in Chinese)
- [21] Zhang X B, Yang J, Reardon T. Mechanization outsourcing clusters and division of labor in Chinese agriculture[J]. *China Economic Review*, 2017(43): 184-195
- [22] 杨进, 郭松, 张晓波. 中国的农机跨区作业发展: 以江苏沛县为例[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(2): 14-19  
Yang J, Guo S, Zhang X B. The development of trans-regional work of agricultural machinery in China: From the perspective of Peixian, Jiangsu[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2013, 34(2): 14-19 (in Chinese)
- [23] Lesage J, Pace R K. *Introduction to Spatial Econometrics* [M]. Boca Raton: CRC Press, 2009: 32-34
- [24] Anselin L. Spatial econometrics: Methods and models[J]. *Studies in Operational Regional Science*, 1988, 85(411): 310-330
- [25] 虞松波, 刘婷, 曹宝明. 农业机械化服务对粮食生产成本效率的影响: 来自中国小麦主产区的经验证据[J]. 华中农业大学学报: 社会科学版, 2019(4): 81-89  
Yu S B, Liu T, Cao B M. Effects of agricultural mechanization service on the cost efficiency of grain production: Evidence from wheat producing areas in China[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University: Social Sciences Edition*, 2019(4): 81-89 (in Chinese)
- [26] 陈实, 刘颖, 刘大鹏. 农技推广率、农业机械化与湖北省水稻生产[J]. 农业技术经济, 2019(6): 29-37  
Chen S, Liu Y, Liu D P. Agricultural technology extension rate, agricultural mechanization and rice production in Hubei Province[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2019(6): 29-37 (in Chinese)
- [27] Tong T T, Yu T E, Cho S, Jensen K, Ugarte D. Evaluating the spatial spillover effects of transportation infrastructure on agricultural output across the United States[J]. *Journal of Transport Geography*, 2013(30): 47-55
- [28] 潘丹, 郭巧苓, 孔凡斌. 2002—2015年中国主要粮食作物过量施肥程度的空间关联格局分析[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(4): 187-201  
Pan D, Guo Q L, Kong F B. Spatial correlation pattern analysis of overuse fertilization about major grain crops in China from 2002 to 2015[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(4): 187-201 (in Chinese)
- [29] Bi K W, Zhang Y H. Two-way fixed effects panel and