

中国农业机械化高速发展阶段的要素替代机制研究

潘彪, 田志宏*

(中国农业大学经济管理学院, 北京 100083)

摘要: 剖析中国农业机械化高速发展时期农业机械对劳动力的替代情况, 研究要素替代的阶段特征及延续性, 是一个兼具理论意义和政策参考价值的课题。该文利用超越对数成本函数测算了2004—2016年小麦、玉米和水稻3大粮食作物生产中机械对劳动力的替代弹性, 重点关注了作物和地区差异及其时空变化特征。结果表明: 1) 中国农业机械化出现了“黄金十年”发展期, 主要原因是实现了机械对劳动力广泛、有效和持续替代, 小麦、玉米和水稻生产中的替代弹性分别达到0.581、1.324和1.153。2) 随着机械化水平提高, 机械对劳动力的替代弹性趋于下降, 粮食作物机械化水平进一步提升的难度加大。3) 替代弹性存在地区差异, 南方低缓丘陵区 and 西南丘陵山区普遍高于其他区域, 机械化水平提升空间较大, 有望保持快速增长。4) 替代弹性的时空收敛性变化特征解释了当前农机化进程放缓的现象, 也意味着继续推进农业机械化面临着一定的困难和挑战。如果未来中国农业机械化要延续“黄金十年”的增长趋势, 需要打破现有发展格局, 重点从提升丘陵山区机械化水平, 推进全面、全程机械化等方面着手。

关键词: 农业; 机械化; 作物; 黄金十年; 劳动力价格; 替代弹性; 时空收敛性

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.09.001

中图分类号: S23

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2018)-09-0001-10

潘彪, 田志宏. 中国农业机械化高速发展阶段的要素替代机制研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 1—10. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.09.001 <http://www.tcsae.org>
Pan Biao, Tian Zhihong. Mechanism of factor substitution during rapid development of China's agricultural mechanization[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(9): 1—10. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.09.001 <http://www.tcsae.org>

0 引言

农业机械化是实现农业现代化的重要前提和标志。进入新世纪以来, 中国农机装备总量迅速增加, 机械化进程稳步推进, 农作物耕种收综合机械化水平从2001年的32.3%增长到2016年的65.2%, 平均每年上升2.2个百分点。其中, 2004—2014年平均增幅达到2.7个百分点, 十年间进展相当于过去45 a, 被称为农业机械化发展的“黄金十年”^[1-2]。农业生产方式实现了以人畜力为主到机械作业为主的历史性跨越, 确保了农业生产能力的稳定和提高。这一时期, 小麦、玉米和水稻等粮食作物作为农机化工作的重点, 机械化水平快速提升, 为粮食产量“十二连增”提供了重要支撑^[3-4]。

然而, 在经历长期的高速发展以后, 近年来农业机械化推进速度逐步放缓, 小麦和玉米的综合机械化水平甚至出现了小幅下降。对此, 有学者认为中国农业机械化进入了由中级阶段向高级阶段转型的攻坚克难时期, 提升质量和效益将成为发展的关键^[1,5]。那么, 这是否意

味着中国农业机械化高速发展阶段已经结束? 未来农机化水平的提升空间还有多大? 回答这些问题需要对农业机械化进程及其背后的决定因素和作用机制进行深入剖析。

诱致性技术变迁理论为农业生产的机械化提供了经济学理论基础。该理论认为要素相对价格变动决定了技术变革的方向, 也就是说技术变革会倾向于节约稀缺而昂贵的要素, 使用充裕而便宜的要素。具体到农业生产中, 机械和劳动力投入存在一定比例的替代关系, 农机作业价格和农业劳动力工资的相对变化决定着两者之间的替代方向和替代强度, 同时也决定着农业机械化的推进速度^[6]。2001年以来, 中国工业化和城镇化进程中吸纳了大量的劳动力, 农业劳动力出现结构性短缺, 劳动价格急剧攀升^[7], 2001—2016年农业劳动力名义工资上升了6.8倍, 而机械化农具的价格仅上涨23.8% (数据来源于《全国农产品成本收益资料汇编》和《中国统计年鉴》)。农业生产中急需使用机械替代劳动, 缓解成本上升带来的压力^[8-9], 成为中国农业机械化进入高速发展阶段的主要推动力。

对于农业生产中机械对劳动力的替代作用, 学者们利用生产函数和成本函数进行了大量的研究, 取得丰富的成果。基于生产函数的分析中, 一些学者分析了整个农业生产中机械(资本)对劳动力的替代作用^[10-12]。还有学者们对粮食^[13]、水稻、小麦和玉米^[14]、油菜^[15]、柑橘^[16]等具体作物进行了研究, 可惜的是, 这些研究普遍误用了弹性计算公式, 影响了结果的准确性^[4,11,17]。在指出前

收稿日期: 2018-03-09 修订日期: 2018-04-03

基金项目: 农业部农业法制建设与政策调研项目“农机新产品补贴试点机制研究”(121721301122441201); 农业部农业行业管理业务经费项目“农机购置补贴政策实施与WTO规则衔接对策”(121721301124031203)

作者简介: 潘彪, 男, 河南开封人, 博士研究生, 主要从事农业机械化技术经济、农业经济理论与政策研究。Email: panbiao1993@cau.edu.cn

*通信作者: 田志宏, 男, 甘肃临洮人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事农业经济理论与政策、农村发展与农业机械化研究。

Email: cauthz@cau.edu.cn

人的误区后,王欧等^[4]发现 2003—2014 年农业机械化的发展有效替代了劳动力并促进了全国粮食产量的增加,且替代强度在不同粮食品种之间表现出时空差异;郑旭媛等^[17]认为粮食生产中机械对劳动力的替代弹性呈现出长期下降趋势,随着机械投入比例的上升,替代难度逐渐增加。更具体地,王晓兵等^[18]发现玉米生产中劳动力与机械投入存在显著的替代关系,两者相对价格变动是影响玉米机械化水平的主要因素;Wang 等^[19]发现粳稻、小麦、玉米、棉花、大豆、油菜等作物的劳动机械替代弹性在 0.10~0.98 之间,差异较大;王水连和辛贤发现不同种植规模、地块细碎程度和机械化程度下,甘蔗种植机械对劳动力的替代存在差异^[20]。但需要注意的是,基于生产函数分析机械和劳动力的替代关系,都是将要素价格作为外生变量^[21],本质上反映的是价格变化以后要素替代在技术上实现的可能性,也就是技术替代效应,与希克斯(Hicks)提出的替代弹性概念存在一定差别^[4]。与此同时,采用超越对数生产函数来测算替代弹性时,还存在多重共线性和内生性等问题。

为此,更多的学者转向采用成本函数^[11]。例如,刘玉梅分析了河北和山东 2 省小麦生产农户的机械和劳动力替代关系^[22];陈书章等研究了 1991—2012 年全国及 5 个小麦主产区的技术进步和要素需求与替代行为^[23];Liu 等把农业机械细分为大、中、小 3 种类型,分析了玉米生产中的要素替代问题^[9];吴丽丽等测算了 1991—2013 年全国水稻、小麦和玉米 3 种粮食平均后的要素替代弹性^[21];晏百荣等测算了 1990—2014 年苹果生产的要素替代弹性^[24];林善浪等把劳动力选择性转移因素纳入成本函数,分析了种植业的机械与劳动替代弹性^[7]。这些文献基于成本函数测算了农作物生产中的要素替代弹性,均发现机械对劳动有显著的替代作用,随着劳动力价格的快速上涨,农业生产中偏向于使用更多的机械。

总地来看,对于农业生产中的要素替代情况,已有研究进行了一些有益的探索,但不够透彻和全面,主要存在 3 个方面的不足:1)对农作物之间的差异关注不够,农业生产中机械对劳动力的替代方式和替代强度不同,各作物的机械化水平存在明显差异,简单加总或平均影响结果的准确性,仅分析单个产品则又容易以偏概全。2)受作业地形等自然条件的影响,要素替代在技术上的难易程度不同,在机械和劳动力相对价格发生变化时,各地形区域替代弹性的差异需要进一步探究。3)在农业机械化发展的不同阶段,机械对劳动力替代的难易程度和替代强度都存在差异^[4],早在 1986 年 Binswanger 就把农业机械分为动力密集型机械和控制密集型机械,认为前者应用较早,而后者只在劳动工资快速上涨以后才能推广使用^[25]。中国农业机械化发展过程中,耕地环节的机械化明显快于播种和收获环节,而植保环节机械化则刚起步,对于不同机械化发展阶段中机械对劳动替代强度的差异,已有研究中未予以充分重视,阶段性特征尚不明确。

理论和实践都表明,在劳动力和机械的相对价格快速上涨过程中,农业生产中机械会对劳动产生长期替代,

此外在表现为农业机械化水平的持续提升。那么,在中国农业机械化“黄金十年”高速发展期,机械对劳动力的替代情况是什么样的?有何阶段性特征?更为重要的是,这种替代能否延续以及如何延续?这是本文所要回答的问题。鉴于此,本文以农业生产中历来最受重视的粮食为研究对象,具体选择小麦、玉米和水稻 3 种作物,利用成本函数分析 2004—2016 年间各省机械对劳动力的替代弹性,识别作物差异、地区差异及其时空变化特征,并做出合理解释,以期全面把握要素替代机制,对中国农业机械化进程形成清晰认识,明确未来的增长速度、空间以及制约因素,为相关政策的制定和调整提供参考。

1 方法和数据

1.1 超越对数成本函数

在估计农业生产中机械和劳动力之间的替代关系之前,需要先设定成本函数的具体形式。超越对数函数(translogfunction)属于平方响应面模型,具有易估计和包容性特征,不需要对替代弹性等特定参数施加先验设定,在揭示要素替代关系等方面具有很强的优势^[11]。Binswanger 设定的基于超越对数成本函数(translogcost function)的多要素投入分析框架^[26],为诱致性技术变迁理论建立了微观基础,同时考虑了农业生产中多要素投入的情况,在相关研究中得到了广泛应用^[7,9,23,27-31]。借鉴 Binswanger^[26]的基本模型,本文设定了包含产出水平(y)、劳动力(L)、机械(M)、化肥和农药(以下简称“生化”, B)、其他物质和服务(O)以及时间变量(t)的超越对数成本函数模型,具体模型形式为:

$$\begin{aligned} \ln C = & \gamma_0 + \alpha_y \ln y + \alpha_L \ln t + \sum_{i=1}^4 \beta_i \cdot \ln p_i + \\ & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \beta_{ij} \ln p_i \cdot \ln p_j + \frac{1}{2} \gamma_{yy} \ln y \cdot \ln y + \\ & \gamma_{ty} \ln t \cdot \ln y + \sum_{i=1}^4 \gamma_{iy} \ln p_i \cdot \ln y + \\ & \sum_{i=1}^4 \gamma_{it} \ln p_i \cdot \ln t + \frac{1}{2} \gamma_{tt} \ln t \cdot \ln t \end{aligned} \quad (1)$$

式中 C 表示总生产成本,元; p_i 和 p_j 为要素 i 和 j 的价格,分别为劳动力价格,元/d;机械、生化、其他物质和服务价格,元/667 m²; $i, j=L, M, B, O$, γ, α, β 为待估计参数。

计算各投入要素之间的替代弹性,关键在于获得 β_{ij} 的估计值。直接对 (1) 式进行估计,可能面临严重的多重共线性问题^[11]。对此,可以根据谢泼德引理(Shephard Lemma),推导出各投入要素的成本份额函数:

$$\begin{aligned} S_i = & \frac{p_i \cdot x_i}{C} = \frac{\partial \ln C}{\partial \ln p_i} = \\ & \beta_i + \sum_{j=1}^4 \beta_{ij} \cdot \ln p_j + \gamma_{iy} \ln y + \gamma_{it} \ln t \end{aligned} \quad (2)$$

式中 S_i 为要素投入份额,%; x_i 为要素投入量,分别为劳动力投入量, d/667 m²;机械、生化、其他物质和服务投入量,元/667 m²。为满足系统方程估计的要求,需要对

超越对数成本函数和成本份额函数添加对称性和价格齐次性限制。

$$\text{对称性: } \beta_{ij} = \beta_{ji} \quad (3)$$

价格齐次性:

$$\sum_{i=1}^4 \beta_i = 1; \sum_{i=1}^4 \beta_{ij} = \sum_{j=1}^4 \beta_{ij} = 0; \sum_{i=1}^4 \gamma_{iy} = 0; \sum_{i=1}^4 \gamma_{iu} = 0 \quad (4)$$

1.2 要素替代弹性的估算方法

成本函数中常见的替代弹性有 4 种: 交叉价格弹性 (cross-price elasticity, CPE)、Allen 替代弹性 (allen partial elasticity of substitution, AES)、Morishima 替代弹性 (morishima elasticity of substitution, MES) 和影子替代弹性 (shadow elasticity of substitution, SES)^[32]。与 CPE、AES 和 MES 相比, SES 更接近与 Hicks 对替代弹性的原始定义, 且经实证检验其对要素之间替代关系的刻画更符合实际, 结果的稳健性也更强^[11,21]。因此, 本文选择采用基于超越对数成本函数的影子替代弹性 SES 来刻画中国粮食生产中机械和劳动的替代关系。根据 Mcfadden^[33]、Mundlak^[34]和郝枫^[11]的研究, 影子替代弹性可以由最小成本函数 $C(y; p)$ 推导得出:

$$\begin{aligned} \text{SES}_{ij} &= \frac{\partial \ln(C_i(y; p)/C_j(y; p))}{\partial \ln(p_j/p_i)} = \\ &= \left(-\frac{C_{ii}}{C_i C_i} + 2 \frac{C_{ij}}{C_i C_j} - \frac{C_{jj}}{C_j C_j} \right) / \left(\frac{1}{p_i C_i} + \frac{1}{p_j C_j} \right) = \\ &= [S_i / (S_i + S_j)](E_{ij} - E_{ji}) + [S_j / (S_i + S_j)](E_{ji} - E_{ii}) \quad (5) \end{aligned}$$

式中 C_i 和 C_j 分别为最小成本函数对要素 i 和 j 价格的偏导数, C_{ii} 和 C_{jj} 为二阶导数, C_{ij} 为混合偏导数, S_i 为要素投入份额, E_{ii} 和 E_{jj} 为要素 i 和 j 的需求自价格弹性; E_{ij} 和 E_{ji} 为交叉价格弹性。SES_{ij} 具有对称性, 即 SES_{ij}=SES_{ji}, 这意味着机械对劳动的替代弹性与劳动对机械的替代弹性大小相同。在具体计算中, S_i 已知, E_{ij} 可以参考 Binswanger^[26]的研究, 由 (2) 式中 β_{ij} 的估计值计算得出:

$$E_{ij} = \frac{\beta_{ij}}{S_i} + S_j \quad i, j = L, M, B, O \quad i \neq j \quad (6)$$

$$E_{ii} = \frac{\beta_{ii}}{S_i} + S_i - 1 \quad i = L, M, B, O \quad (7)$$

1.3 数据来源与处理

本文采用 2004—2016 年省级面板数据进行分析。以 2004 年起始年份的依据有 3 点: 1) 2004 年为用工荒现象在东部沿海地区大量出现的时间^[7], 农业劳动日工价进入快速上涨阶段; 2) 中国在 2004 年相继出台了农机购置补贴、良种补贴等多项财政支农政策, 农业发展进入国内支持保护阶段; 3) 中国农业机械化发展从 2004 年开启“黄金十年”, 阶段性特征明显。本文的主要研究对象为小麦、玉米和水稻 3 大粮食作物, 这 3 种作物的种植面积占中国农作物种植面积的比例超过 50%, 其产量占粮食总产量的比例超过 80%。更为重要的是, 粮食作

物是中国农业机械化的重点, 近十几年中, 小麦、玉米和水稻的生产机械化快速推进, 特别是玉米和水稻生产关键环节机械化获得突破, 耕种收综合机械化水平分别由 82.8%、40.7% 和 38.4% 上升至 94.2%、83.1% 和 79.2%, 涵盖了不同的机械化发展阶段。对于样本省份的选择, 为保证数据信息的完备性和准确性, 本文尽可能选择了数据较齐全的省份。其中, 小麦选择了河北、山西、河南、山东等 15 个省, 玉米选择了河北、辽宁、吉林、黑龙江等 18 个省, 水稻 (早籼稻、中籼稻、晚籼稻和粳稻 4 种水稻的平均) 选择了河北、黑龙江、湖北、湖南等 20 个省, 2004—2016 年所选样本省份的种植面积之和均占到该作物总种植面积的 90% 以上。

本文使用的数据来源于 2005—2017 年《全国农产品成本收益资料汇编》和《中国统计年鉴》, 对于个别缺失数据由相邻年份数据替代, 具体数据的来源和处理如下:

1) 产出水平。亩均产值容易受外生的产品市场价格变动的影响, 小麦、玉米和水稻同属于粮食作物, 同质性高, 本文使用亩均产量来衡量产出水平, 数据来源于《全国农产品成本收益资料汇编》。

2) 劳动力投入和劳动力的价格。《全国农产品成本收益资料汇编》中对于劳动力的统计包括家庭劳动力和雇工劳动, 给出了 2 种劳动的亩均投入量以及劳动日工价和雇工工价。对此, 劳动力总投入可由家庭劳动力投入折价和雇工折价加总得出。对于劳动力的价格, 参考吴丽丽等^[21]、林善浪等^[7]的研究, 采用劳动总投入除以总用工量得出。

3) 机械投入和机械价格。机械作业投入采用《全国农产品成本收益资料汇编》亩均机械作业费与排灌费之和。对于机械投入的价格, 参考已有研究的普遍做法, 使用《中国统计年鉴》中各省的机械化农具价格指数来代替。

4) 生化投入和生化投入的价格。生化投入包括化肥投入和农药投入, 由《全国农产品成本收益资料汇编》中统计的亩均投入金额加总得出。生化投入的价格由《中国统计年鉴》中各省化学肥料价格指数和农药及农药械价格指数加权得出, 以两者的投入比例为权重。

5) 其他物质与服务投入和其他物质于服务的价格。其他物质与服务投入包括种子费、农膜费、水费、畜力费、工具材料费、管理费等其他直接或间接投入, 不包括土地成本, 由亩均物质与服务费用减去机械投入和生化投入得出, 数据来源于《全国农产品成本收益资料汇编》。其他物质与服务的价格由其他农业生产资料价格指数来表示。

对于其中涉及到投入额和价格的数据, 均折算为 1998 年不变价格。其中劳动力投入和价格用各省农村居民消费价格指数进行折算, 机械投入用机械化农具价格指数进行折算, 生化投入用加权的生化价格指数折算, 其他物质与服务投入用其他农业生产资料价格指数折算。主要变量的描述性统计见表 1。

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

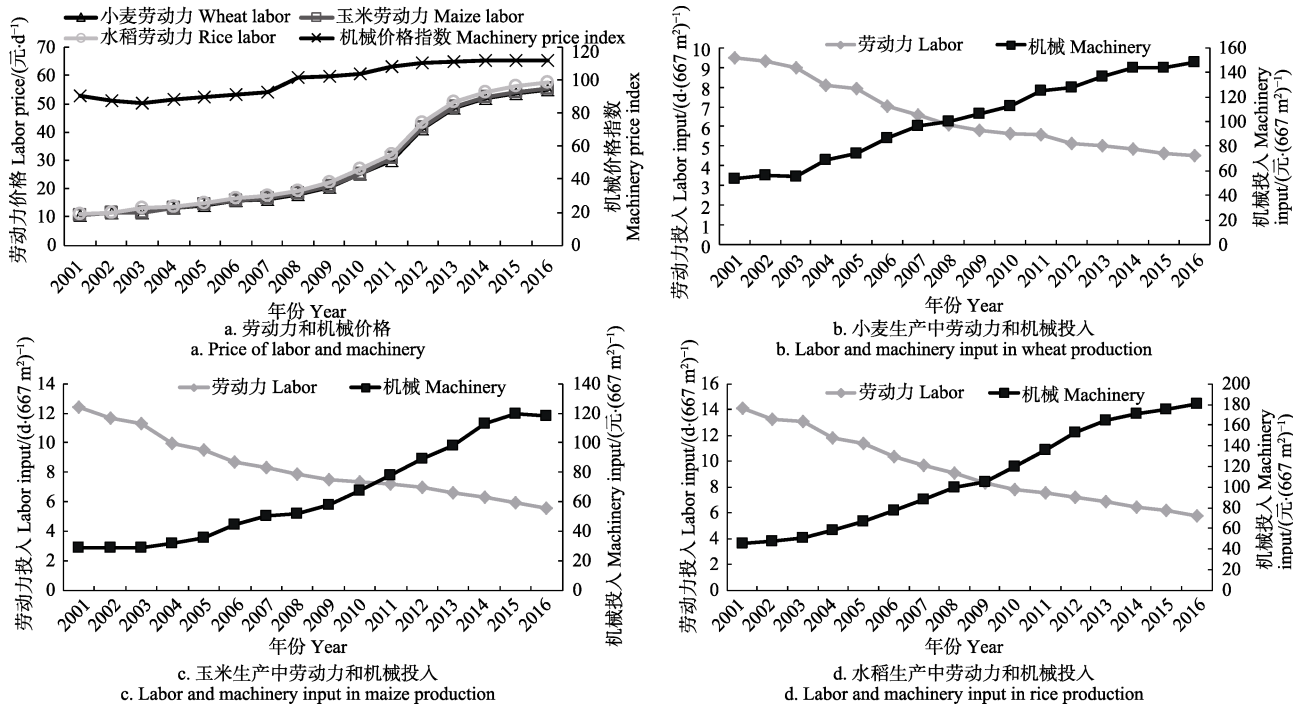
作物 Crops	变量名称 Variable name	均值 Mean	标准差 Std. Dev.	最小值 Max	最大值 Min	样本量 Sample
小麦 Wheat	产量/(kg·(667 m ²) ⁻¹)	340.39	75.69	100.90	494.28	195
	劳动力价格/(元·d ⁻¹)	26.35	16.42	8.53	92.66	195
	机械价格/(元·(667 m ²) ⁻¹)	98.70	12.96	71.51	136.05	195
	生化价格/(元·(667 m ²) ⁻¹)	137.83	23.34	93.59	188.66	195
	其他物质与服务价格 /(元·(667 m ²) ⁻¹)	140.31	32.83	79.72	235.78	195
	劳动力成本份额/%	32.87	12.06	10.15	73.81	195
	机械成本份额/%	27.85	9.18	4.54	44.26	195
	生化成本份额/%	22.54	5.71	10.15	39.94	195
	其他成本份额/%	16.74	6.47	6.70	35.24	195
	产量/(kg·(667 m ²) ⁻¹)	463.48	84.24	250.00	690.60	234
玉米 Maize	劳动力价格/(元·d ⁻¹)	25.10	12.72	8.44	57.59	234
	机械价格/(元·(667 m ²) ⁻¹)	99.74	13.49	71.51	136.05	234
	生化价格/(元·(667 m ²) ⁻¹)	138.08	22.95	92.65	188.59	234
	其他物质与服务价格 /(元·(667 m ²) ⁻¹)	140.06	32.36	79.72	235.78	234
	劳动力成本份额/%	43.87	8.93	25.87	71.96	234
	机械成本份额/%	17.68	8.98	1.30	34.94	234
	生化成本份额/%	23.27	5.24	11.00	34.25	234
	其他成本份额/%	15.18	5.45	5.90	35.03	234
	产量/(kg·(667 m ²) ⁻¹)	496.36	68.96	361.80	717.10	260
	劳动力价格/(元·d ⁻¹)	30.01	15.49	9.30	76.53	260
水稻 Rice	机械价格/(元·(667 m ²) ⁻¹)	102.87	12.85	74.80	136.00	260
	生化价格/(元·(667 m ²) ⁻¹)	132.59	20.42	87.76	180.43	260
	其他物质与服务价格 /(元·(667 m ²) ⁻¹)	138.72	30.93	79.70	235.80	260
	劳动力成本份额/%	43.41	10.58	24.00	71.00	260
	机械成本份额/%	22.84	9.15	2.00	47.00	260
	生化成本份额/%	21.18	6.01	10.00	37.00	260
	其他成本份额/%	12.58	5.14	4.00	32.00	260

2 结果与分析

在中国农业机械化发展的“黄金十年”，小麦、玉米和水稻 3 大粮食作物的生产中机械对劳动替代弹性的大小和变动趋势，以及各作物和各地区间的差异，是分析和讨论的重点。

2.1 机械和劳动力的价格及投入量变动情况

在进行实证分析之前，本文先分析了 2001—2016 年全国小麦、玉米和水稻生产中劳动力和农业机械这 2 种投入要素的价格以及投入量的变化情况。从图 1a 中可以发现，2001—2016 年 3 种作物使用的劳动力价格水平大致相同，且都呈现出 S 型上升趋势，整体增长了 5 倍以上，其中，2004—2013 年间为快速上升阶段，2014—2016 年增速逐渐放缓；同一时期机械化农具的价格基本保持稳定，仅增长了 23.8%。由此可以看出 2001—2016 年间劳动力和机械的比价不断上升，劳动力变得相对昂贵。这种价格相对变化使得生产中的要素投入比例发生调整，劳动力投入快速下降而机械投入迅速上升，出现了明显要素替代。更进一步地，与价格变化相似，劳动力投入的下降速度以及机械投入的增长速度都有所放缓（图 1b~1d），表明机械对劳动力的替代强度逐步下降，这在一定程度上解释了近年来机械化水平增幅减小的现象。



注：数据来源于《全国农产品成本收益资料汇编》和《中国统计年鉴》（2002—2017）。
Note: The data comes from National agricultural product cost and income data compilation, China Statistical Yearbook (2002—2017).

图 1 2001—2016 年劳动力和机械的价格及投入变化情况
Fig.1 Changes of labor and machinery price and its usage (2001—2016)

机械对劳动的替代直观的反映在农业机械化水平的提升上。表 2 给出了 2001—2016 年小麦、玉米和水稻在

耕、种、收 3 个环节的机械化水平的变化情况。其中有 3 点值得注意：1）每种作物 3 个生产环节的机械化水平普

遍提升,这表明在农业生产的各个环节中,都存在明显的机械替代劳动力现象;2)耕地环节的机械化水平明显高于播种和收获环节,这主要是因为耕地中需要的是动力密集型机械,而后2个环节偏向于需要控制密集型机械,在劳动力价格上升后,最先使用动力密集型机械替代劳动力,这符合Binswanger^[25]对机械化阶段的划分;3)小麦的机械化水平明显高于玉米和水稻,在2001—2016年增长有限,而玉米和水平的机械化水平相对较低但增速较快,特别是在播种和收获环节的机械化水平取得了长足进步。从更深的层次来看,各作物在机械化水平和发展速度上的差异,主要源于机械对劳动替代强度的不同,如果对各种作物采用加总或平均的方式展开分析,可能会对要素替代效应做出误判。

表2 3种粮食作物耕种收环节的机械化水平

Table 2 Comprehensive mechanization rate of 3 crops

年份 Year	小麦 Wheat			玉米 Maize			水稻 Rice			%
	机耕 Ploughing	机播 Sowing	机收 Harvesting	机耕 Ploughing	机播 Sowing	机收 Harvesting	机耕 Ploughing	机播 Sowing	机收 Harvesting	
2001	87.06	72.79	69.72	58.12	45.43	1.63	64.96	4.78	18.02	
2002	87.82	72.99	69.89	60.05	46.64	1.74	66.82	6.10	20.59	
2003	88.58	74.10	72.79	62.04	46.90	1.89	68.74	6.00	23.40	
2004	89.35	80.86	76.21	64.10	47.78	2.50	70.71	6.34	27.34	
2005	90.13	79.54	76.14	66.22	52.69	3.12	72.74	7.14	33.50	
2006	90.92	79.57	78.32	68.42	58.72	4.73	74.83	9.00	38.80	
2007	91.71	78.01	79.17	70.69	60.47	7.23	76.98	11.06	46.20	
2008	92.51	81.28	83.84	73.03	64.62	10.61	79.19	13.73	51.16	
2009	95.58	84.37	86.07	83.55	72.48	16.91	83.27	16.71	56.69	
2010	97.82	85.32	88.46	88.11	76.52	25.80	97.27	20.86	64.49	
2011	98.79	85.95	91.05	93.77	79.90	33.59	91.00	26.24	69.32	
2012	98.90	86.52	92.32	93.79	82.30	42.47	93.29	31.67	73.35	
2013	98.90	86.69	98.32	97.67	84.08	51.57	95.09	36.10	80.91	
2014	97.25	86.98	95.08	87.92	83.86	57.78	98.05	39.56	84.63	
2015	97.06	87.54	95.23	89.92	86.62	64.18	98.94	42.26	86.21	
2016	99.16	87.89	93.74	94.81	83.85	66.68	99.31	44.45	87.11	

注:数据来源于《全国农业机械化统计年报》(2001—2016),其中2001—2007年3种作物的机耕比例未单独统计,笔者根据2008—2016年平均增长率估计得出。

Note: The data comes from *National Agricultural Mechanization Statistical Yearbook* (2001—2016), the rate of mechanized ploughing is not counted separately among 2001—2007, the author estimates the rate based on the average growth rate from 2008 to 2016.

2.2 成本份额函数回归结果

基于省级面板数据对(2)式构建的成本份额函数进行回归时,为区分省际差异,在模型中加入了省份虚拟变量。除价格和产量以外,生产要素的投入受到一些其他共同因素的影响,各要素投入份额方程的随机干扰项之间存在相关性,本文采用系统估计的方式。由于被解释变量是投入份额,各要素投入份额相加总和为1,误差协方差矩阵是奇异的,系统估计必须随机去掉一个方程。本文在实际估计中去掉了其他投入份额,仅估计劳动力

(S_l)、机械(S_m)和生化(S_b)成本份额方程,在得到3个份额方程的估计系数以后,利用(3)、(4)式计算出其他投入份额方程的各系数。为消除异方差和序列自相关的影响,本文采用迭代似不相关法(iterative seemingly unrelated regression)进行系统估计。

表3中给出了成本份额方程系统回归结果。3种粮食作物的Breusch-Pagan统计量的P值均为0.000,显著拒绝成本份额方程的扰动项相互独立的原假设,采用系统回归能够提高估计效率。回归结果中,绝大部分变量的系数都通过了显著性检验,且所有方程的 R^2 都在0.8以上,模型的整体拟合程度较高。

表3 成本份额方程回归结果

Table 3 Regression result of elements share equation

份额 方程 Share equa- tion	变量 Variable	小麦 Wheat		玉米 Maize		水稻 Rice	
		系数 Coefficient	Z 值 Z value	系数 Coefficient	Z 值 Z value	系数 Coefficient	Z 值 Z value
S_l	lny	-0.0579**	-2.21	-0.0468	-1.56	-0.0033	-0.07
	lnp _l	0.1397***	9.11	0.0949***	13.78	0.1296***	8.18
	lnp _m	-0.0812***	-6.78	0.0121	1.36	-0.0033	-0.23
	lnp _b	-0.0674***	-7.43	-0.0681***	-9.11	-0.0623***	-7.28
	lnr	-10.2504***	-2.62	0.0909***	3.71	-4.6275	-1.35
	常数项	78.8841***	2.66	—	—	35.5613	1.37
R^2		0.9303		0.8478		0.8927	
S_m	lny	0.0021	0.11	-0.0018	-0.09	-0.0207	-0.52
	lnp _l	-0.0812***	-6.78	0.0121	1.36	-0.0033	-0.23
	lnp _m	-0.0241	-0.65	-0.0816***	-3.35	-0.0979***	-2.95
	lnp _b	0.1046***	6.31	0.0832***	7.20	0.1165***	7.74
	lnr	24.0001***	7.18	11.7524***	5.27	7.2022**	2.08
	常数项	-182.3652***	-7.20	-89.2156***	-5.28	-54.4951**	-2.08
R^2		0.9276		0.9306		0.8830	
S_b	lny	-0.0052	-0.31	-0.0221	-1.43	-0.0385	-1.57
	lnp _l	-0.0674***	-7.43	-0.0681***	-9.11	-0.0623***	-7.28
	lnp _m	0.1046***	6.31	0.0832***	7.20	0.1165***	7.74
	lnp _b	-0.0334**	-2.31	0.0078	0.74	-0.0433***	-3.66
	lnr	2.1846	0.87	-4.4536**	-2.36	-3.6002*	-1.75
	常数项	-16.4564	-0.87	34.0263**	2.38	27.7243*	1.78
R^2		0.8784		0.8924		0.8991	
N		195		234		260	
个体效应		已控制		已控制		已控制	
B-P 统计量		64.109 (0.000)		199.594 (0.000)		241.604 (0.000)	

注:***、**和*分别表示1%、5%和10%的显著性水平;B-P统计量为Breusch-Pagan统计量。

Note: ***, ** and * represent the signification at the level of 1%, 5% and 10%; B-P is Breusch-Pagan statistical magnitude.

2.3 替代弹性分析

进一步地,根据表3中的估计结果以及(5)~(7)式,笔者测算出了2004—2016年各省小麦、玉米和水稻生产中机械对劳动的替代弹性,并重点从作物差异、地

区差异以及替代强度的时空变化情况 3 个角度展开分析讨论。

2.3.1 替代弹性的作物差异

整体来看, 2004—2016 年小麦、玉米和水稻 3 种粮食作物机械对劳动替代弹性的均值远大于 0, 分别为 0.581、1.324 和 1.153 (图 2)。这表明机械和劳动力之间存在较强的替代关系, 随着劳动力相对价格的快速上涨, 粮食生产中更多的使用农业机械, 推动中国农业机械化进入“黄金十年”。

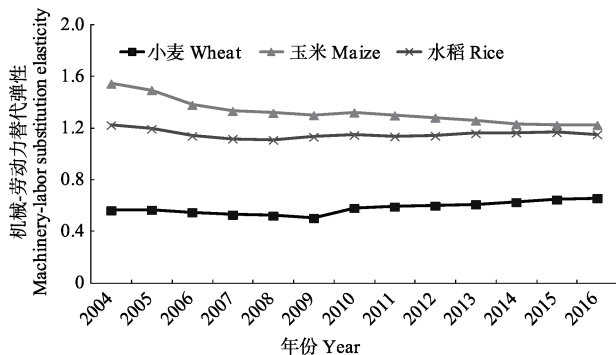


图 2 2004—2016 年 3 种粮食作物生产中机械对劳动的替代弹性

Fig.2 Substitution elasticity of machinery to labor of 3 crops (2004—2016)

具体来看, 各作物生产中机械对劳动替代弹性的大小和变化情况存在明显差异, 玉米和水稻的替代弹性远高于小麦, 这主要源于其关键环节的生产机械化实现了重要突破。与此同时, 2004—2016 年间玉米、水稻生产中的替代弹性都有明显的下降趋势, 分别从 1.545 和 1.224 下降至 1.225 和 1.152, 而小麦生产中的替代弹性基本稳定在 0.6 左右。3 种粮食作物替代弹性的差异主要是其处于不同的机械化水平引起的, 在机械化水平较低时, 农业生产中机械投入相对较少, 而随着劳动力价格上涨发生了要素替代, 机械投入占比增加, 进一步替代劳动的

难度不断加大, 替代弹性也就随之下降。

2.3.2 替代弹性的地区差异

受作业地形等因素影响, 各省农业机械化发展处于不同阶段, 其粮食生产中机械对劳动的替代弹性差异明显。图 3 中依次给出了各省 2004—2016 年 3 种作物替代弹性的均值。全国范围内来看, 3 种作物的替代弹性都呈现出由东北至西南地区逐渐增加的现象, 替代强度的分布大体一致。从图 3a 小麦中可以发现, 黑龙江的替代弹性最低, 仅为 0.063, 这意味着机械对劳动力的替代已非常微弱, 这主要是因为其生产中机械的投入量非常充裕甚至是过量, 以 2016 年为例, 其小麦机耕、机播和机收面积均超过总播种面积 (机械作业面积数据来源于《全国农业机械化统计年报》, 播种面积数据来源于《中国统计年鉴》)。云南和贵州的替代弹性较高, 分别为 1.007 和 0.964, 这 2 省的小麦机播和机收水平还比较低, 机械进一步替代劳动力的空间较大。就玉米来说, 新疆、黑龙江和内蒙古 3 省的替代弹性较低, 分别为 1.061、1.079 和 1.094, 而广西、云南和湖北的替代弹性较高, 分别为 3.822、3.789 和 3.118 (图 3b)。类似地, 就水稻来说, 内蒙古和黑龙江的替代弹性较低, 分别为 0.919 和 0.924, 贵州的替代弹性最高, 达到 2.071 (图 3c)。

进一步地, 本文参考《全国农业机械化发展第十三个五年规划》, 把全国划分为 6 个地形区域, 比较了各区域替代弹性的差异。从表 4 中可以发现, 在 3 种作物中, 西南丘陵山区和南方低缓丘陵区的替代弹性明显高于其它区域, 印证了郑旭媛等^[17]提出的坡耕地比例较高地区的替代弹性大于比例低的地区的观点, 同时符合中国北方平原和旱田地区机械化发展较快, 南方水田地区特别是西南丘陵山区发展较慢的实际。这 2 个地区的机械化水平低、替代弹性高的特征意味着机械对劳动进一步替代的空间较大, 在全国农业机械化增速整体放缓的背景下, 有可能继续保持高速增长。相应地, 在这些地区实施购机补贴、推进宜机化等措施有望取得显著效果。

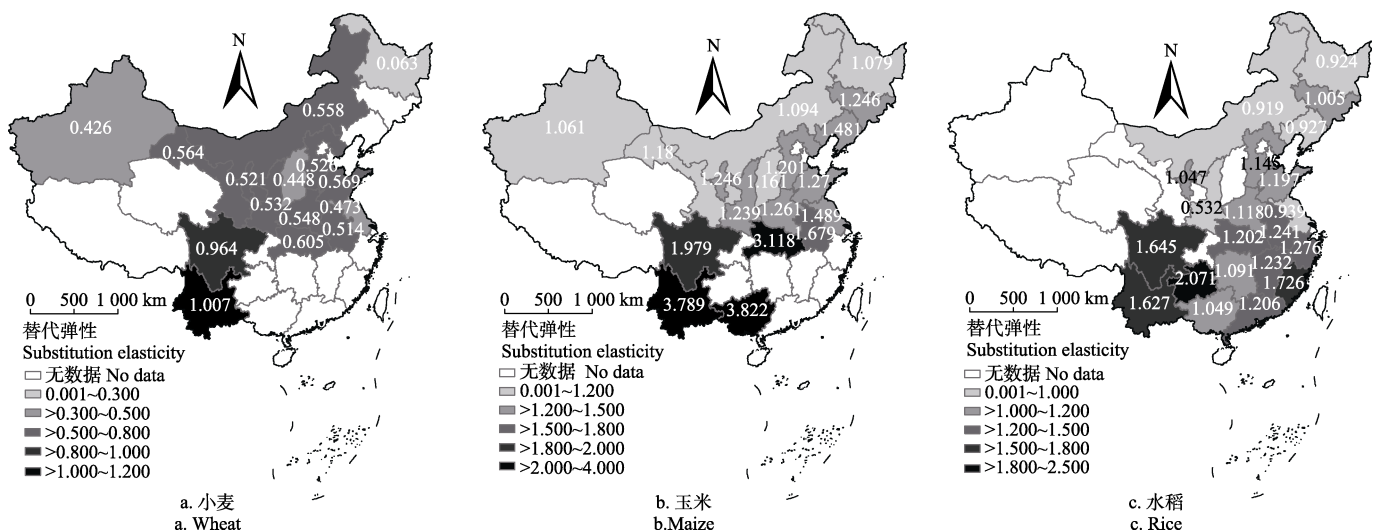


图 3 3 种粮食作物生产中机械对劳动替代弹性的区域性分布

Fig.3 Regional distribution of substitution elasticity of machinery to labor of 3 crops

表4 各地形区域不同年份3种粮食作物生产中机械对劳动的替代弹性

Table 4 Substitution elasticity of machinery to labor of 3 crops in different region

作物 Crops	地形区域 Regions	2004	2006	2008	2010	2012	2014	2016
小麦 Wheat	华北平原地区	0.513	0.469	0.481	0.544	0.576	0.625	0.663
	东北地区	0.245	0.428	0.279	0.360	0.356	0.195	0.330
	长江中下游地区	0.574	0.489	0.484	0.516	0.550	0.568	0.593
	西南丘陵区	1.040	1.019	0.923	0.999	0.986	0.936	0.985
	黄土高原及西北地区	0.514	0.496	0.452	0.476	0.500	0.549	0.584
玉米 Maize	华北平原地区	1.508	1.283	1.233	1.225	1.184	1.191	1.168
	东北地区	1.565	1.252	1.174	1.194	1.186	1.155	1.126
	长江中下游地区	3.556	2.357	1.992	2.077	1.726	1.656	1.488
	南方低缓丘陵区	2.664	3.394	5.344	5.407	4.712	3.671	2.447
	西南丘陵区	4.379	3.267	2.873	2.665	2.130	2.198	1.946
水稻 Rice	黄土高原及西北地区	1.333	1.249	1.185	1.194	1.146	1.108	1.096
	华北平原地区	1.104	1.085	1.097	1.234	1.151	1.169	1.147
	东北地区	1.032	0.979	0.899	0.924	0.911	0.946	0.935
	长江中下游地区	1.266	1.130	1.131	1.097	1.185	1.201	1.202
	南方低缓丘陵区	1.379	1.212	1.273	1.354	1.282	1.333	1.375
	西南丘陵区	2.595	1.808	1.803	1.653	1.628	1.523	1.472
	黄土高原及西北地区	1.178	1.055	0.970	1.027	1.041	1.017	1.217

注：各地形区域的省市划分的依据来源于《全国农业机械化发展第十三个五年规划》。

Note: The division of the topographic region based on the 13th five-year plan for the development of agricultural mechanization in China.

2.3.3 替代弹性的时空收敛性

为了更清晰直观的反映机械对劳动替代弹性的时空变化特征，表5中给出了2004—2016年15个小麦生产省、18个玉米生产省和20个水稻生产省历年替代弹性值的数据分布情况。从中可以发现，在3种作物的机械对劳动替代弹性均在不同程度上表现出时空收敛性，地区间的差异逐渐缩小，整体趋于稳定。其中，小麦的替代弹性在年际和省际之间的变动程度都较小，均值和标准差一直处于稳定状态，这与其生产中已基本实现了全程机械化有很大关系。玉米和水稻的替代弹性的收敛性特征明显，均值都有明显下降趋势，同时全距分别从5.90和3.04下降至1.50和0.94，标准差分别从1.70和0.69下降至0.41和0.24。

机械对劳动替代弹性的时空收敛性的原因有3点。1) 随着劳动力价格的快速上涨，各地区的农业生产中普遍使用机械替代劳动，农业机械化水平整体得到提升，在机械化水平提高以后，机械进一步替代劳动的难度增加，替代弹性普遍下降并趋于稳定，这是最主要的原因。2) 在购机补贴政策、土地平整以及宜机化项目带动下，特别是适宜于丘陵山区的中小型农机的推广和应用，作业地形对要素替代的制约作用减弱。3) 跨区作业通过农业机械的空间流动，促进了机械化水平的区域均衡^[35-36]，被认为是粮食生产技术效率空间收敛和粮食产量空间溢

出的重要原因^[37-38]，同样也可以用来解释替代弹性地区差异的缩小。

粮食生产中机械对劳动替代弹性的时空收敛性对中国农业机械化进程具有重要含义。1) 时间上替代弹性由强到弱的变化特征，在很大程度上解释了当前中国农业机械化进程放缓的现象。2) 空间上各地区替代弹性的差异缩小，表明在推进农业机械化的过程中各地区的农业机械化水平普遍得以提升，这符合农业机械化区域均衡发展的目标。3) 整体上的收敛性意味着未来粮食生产中机械对劳动的替代难度增加，机械化水平进一步提升空间有限。对此，有必要调整农业机械化发展格局，把机械化的重点由粮食作物扩展到经济作物、畜禽、林果等其他农产品。

表5 3种粮食作物生产中机械对劳动替代弹性值的分布特征

Table 5 Distribution characteristics of substitution elasticity of machinery to labor of 3 crops

作物 Crops	指标 Indicator	2004	2006	2008	2010	2012	2014	2016
小麦 Wheat	最大值	1.12	1.02	0.96	1.04	1.02	0.96	1.01
	最小值	0.19	0.40	0.09	0.09	0.10	-0.27	-0.02
	极差	0.93	0.62	0.87	0.95	0.92	1.23	1.03
	均值	0.56	0.55	0.5	0.55	0.57	0.57	0.62
	中位数	0.52	0.48	0.47	0.53	0.57	0.62	0.64
	标准差	0.23	0.20	0.20	0.22	0.21	0.27	0.23
玉米 Maize	最大值	7.03	7.15	5.34	5.41	4.71	3.01	2.45
	最小值	1.13	1.14	1.05	1.09	1.02	0.98	0.95
	极差	5.90	6.01	4.29	4.32	3.69	2.03	1.50
	均值	2.20	2.27	1.74	1.74	1.57	1.42	1.35
	中位数	1.47	1.41	1.28	1.27	1.24	1.16	1.21
	标准差	1.70	1.71	1.18	1.16	0.88	0.55	0.41
水稻 Rice	最大值	3.99	2.25	2.19	1.73	1.80	1.55	1.83
	最小值	0.95	0.9	0.87	0.79	0.82	0.87	0.89
	极差	3.04	1.35	1.32	0.94	0.98	0.68	0.94
	均值	1.41	1.20	1.19	1.20	1.20	1.20	1.21
	中位数	1.18	1.10	1.09	1.16	1.17	1.23	1.18
	标准差	0.69	0.33	0.35	0.27	0.28	0.21	0.24

3 结论

农业生产中机械对劳动力的替代强度决定着机械化的推进速度。本文基于超越对数成本函数，分析了中国农业机械化高速发展阶段小麦、玉米和水稻3大粮食作物生产中机械对劳动的替代作用，重点关注了替代弹性在作物和地区之间的差异及其时空变化特征，得到4点主要结论：

1) 从2004年中国农业机械化经历了“黄金十年”的高速发展，机械化水平显著提升，其主要原因在于实现了机械对劳动力广泛、有效和持续的替代，小麦、玉米和水稻3大粮食作物的替代弹性分别达到0.581、1.324和1.153。2) 随着农业机械化水平的提升，机械对劳动力的替代难度不断加大，替代弹性趋于下降，粮食作物

机械化水平进一步增长空间有限。3) 全国各地区机械对劳动力的替代弹性存在明显差异, 呈现出由东北向西南递增的现象; 南方低缓丘陵区 and 西南丘陵山区的替代弹性明显高于其它区域, 机械化水平提升空间大, 有望维持较高增速。4) 机械对劳动替代弹性的时空收敛性变化特征解释了当前中国农业机械化推进速度放缓的现象, 同时也意味着单纯依靠粮食作物的机械化来拉动农业整体机械化水平已成为过去, 农机化的发展格局和工作重点需要做出相应调整。

当前劳动力和农业机械的价格都处于平稳状态, 而机械对劳动的替代强度趋于下降, 如果未来机械化发展要延续“黄金十年”的增长趋势必将面临着前所未有的困难和挑战, 需要打破现有发展格局, 以创造性思维加以应对。具体来说, 需要从 5 个方面着手: 1) 重视南方低缓丘陵区 and 西南丘陵山区的农业机械化, 积极推进“地适机”和“机适地”等宜机化工作, 使这些地区成为拉动全国机械化发展的引擎; 2) 把机械化发展的重点由粮食作物扩展到经济作物, 同时关注畜禽养殖、林果业、设施农业及农产品初加工等领域的机械化, 实现全面机械化; 3) 推进作物品种、栽培技术与机械装备集成配套, 解决植保、中耕施肥、秸秆处理等薄弱环节“机械换人”的难题, 实现全程机械化; 4) 通过购机补贴政策等促进措施, 推广新型复式机具和信息化智能机具, 直接减少作业环节和劳动力参与; 5) 积极推进农地流转, 促进适度经营, 同时开展土地平整及高标准农田建设, 改善农机作业环境, 提高作业效率, 为机械对劳动力的高效替代提供条件。

[参 考 文 献]

- [1] 白人朴. 我国农业机械化十年巨变凸显四大特点[J]. 南方农机, 2014(2): 9—11.
- [2] 刘玉. 黄金十年后的农业机械化[J]. 南方农机, 2016(3): 16—17.
- [3] 杨进. 中国农业机械化服务与粮食生产[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
Yang Jin. Mechanization and Division of Labor in Chinese Agricultural Production[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [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 Ou, Tang Ke, Zheng Huamao. The influence of agricultural mechanization on labor substitution and grain production[J]. Chinese Rural Economy, 2016(12): 46—59. (in Chinese with English abstract)
- [5] 罗锡文. 补短板促全面提升我国农业机械化发展水平[J]. 现代农业装备, 2017(5): 7—12.
Luo Xiwen. Improve the weakness, promote the comprehensive, raise the level of agricultural mechanization in China.[J]. Modern Agricultural Equipment, 2017(5): 7—12. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王丽红. 石油价格波动对我国农业的影响研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2009.
Wang Lihong. Impacts of the Oil Price Fluctuation on China's Agriculture[D]. Beijing: China Agricultural University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [7] 林善浪, 叶炜, 张丽华. 农村劳动力转移有利于农业机械化发展吗: 基于改进的超越对数成本函数的分析[J]. 农业技术经济, 2017(7): 4—17.
Lin Shanlang, Ye Wei, Zhang Lihua. Did rural labor selective transfer enhance agriculture mechanization? An analysis based on modified translog function[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2017(7): 4—17. (in Chinese with English abstract)
- [8] 纪月清. 非农就业与农机支持的政策选择研究: 基于农户农机服务利用视角的分析[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
Ji Yueqing. Non-farm Work and Government Policy Choice on Support for Agricultural Machinery: An Empirical Analysis on Farmer's Machinery Service Utilization[D]. Nangjing: Nangjing Agricultural university, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [9] Liu Y M, HW Y, Jetté-Nantel S, et al. The influence of labor price change on agricultural machinery usage in Chinese agriculture[J]. Canadian Journal of Agricultural Economics, 2014, 62(2): 219—243.
- [10] 李志俊. 中国农业要素的替代弹性: 人力资本的作用及农业技术变迁[J]. 财经论丛, 2014(7): 10—15.
Li Zhijun. Substitution Elasticity of China's agriculture: The role of human capital and technological changes[J]. Collected Essay on Finance and Economics, 2014(7): 10—15. (in Chinese with English abstract)
- [11] 郝枫. 超越对数函数要素替代弹性公式修正与估计方法比较[J]. 数量经济技术经济研究, 2015(4): 88—105.
Hao Feng. Formula Correction and estimation methods comparison on elasticity of substitution within translog functions[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2015(4): 88—105. (in Chinese with English abstract)
- [12] 刘岳平, 钟世川. 技术进步方向、资本-劳动替代弹性对中国农业经济增长的影响[J]. 财经论丛, 2016(9): 3—9.
Liu Yueping, Zhong Shichuan. The impact of the direction of technological progress, the substitution elasticity between capital and labor on the growth of agricultural economics[J]. Collected Essay on Finance and Economics, 2016(9): 3—9. (in Chinese with English abstract)
- [13] 刘英基. 有偏技术进步、替代弹性与粮食生产要素组合变动[J]. 软科学, 2017, 31(4): 27—30.
Liu Yingji. Biased technology progress, substitution elasticity and factors combination change of Chinese grain production[J]. Soft Science 2017, 31(4): 27—30. (in Chinese with English abstract)
- [14] 胡瑞法, 冷燕. 中国主要粮食作物的投入与产出研究[J]. 农业技术经济, 2006(3): 2—8.
Hu Ruifa, Leng Yan. Research on input and output of major food crops in China[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2006(3): 2—8. (in Chinese with English abstract)
- [15] 尹朝静, 范丽霞, 李谷成, 等. 劳动力成本上升背景下油菜生产发展方式转型研究[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(6): 297—304.
Yin Chaojing, Fan Lixia, Li Gucheng, et al. Research on the

- transformation of rape production mode as the growth of labor cost[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(6): 297—304. (in Chinese with English abstract)
- [16] 向云, 祁春节, 王伟新. 柑橘生产的要素替代关系及增长路径研究: 基于主产区面板数据的实证分析[J]. *中国农业大学学报*, 2017(7): 200—209.
- Xiang Yun, Qi Chunjie, Wang Weixin. Key factor substitution and growth path of citrus production: An empirical analysis based on the panel data of main production area[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017(7): 200—209. (in Chinese with English abstract)
- [17] 郑旭媛, 应瑞瑶. 农业机械对劳动的替代弹性及区域异质性分析: 基于地形条件约束视角[J]. *中南财经政法大学学报*, 2017(5): 52—58.
- Zheng Xuyuan, Ying Ruiyao. Substitution elasticity between agro-mechanism and labor and its regional heterogeneity: An analysis from the perspective of constraints of terrain condition[J]. *Journal of Zhongnan University of Economics and Law*, 2017(5): 52—58. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王晓兵, 许迪, 侯玲玲, 等. 玉米生产的机械化及机械劳动力替代效应研究: 基于省级面板数据的分析[J]. *农业技术经济*, 2016(6): 4—12.
- Wang Xiaobing, Xu Di, Hou Lingling, et al. Study on the mechanization and mechanical labor force's substitution effect of maize production: Analysis based on the provincial panel data[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2016(6): 4—12. (in Chinese with English abstract)
- [19] 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.
- [20] 王水连, 辛贤. 中国甘蔗种植机械与劳动力的替代弹性及其对农民收入的影响[J]. *农业技术经济*, 2017(12): 32—46.
- Wang Shuilian, Xin Xian. The substitution elasticity of sugarcane planting machinery and labor force in China and its influence on farmers' income[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2017(12): 32—46. (in Chinese with English abstract)
- [21] 吴丽丽, 李谷成, 周晓时. 中国粮食生产要素之间的替代关系研究: 基于劳动力成本上升的背景[J]. *中南财经政法大学学报*, 2016(2): 140—148.
- Wu Lili, Li Gucheng, Zhou Xiaoshi. The demand and substitution relations of grain production factors[J]. *Journal of Zhongnan University of Economics and Law*, 2016(2): 140—148. (in Chinese with English abstract)
- [22] 刘玉梅. 农户对农机装备的需求研究: 以河北省和山东省为例[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009.
- [23] 陈书章, 宋春晓, 宋宁, 等. 中国小麦生产技术进步及要素需求与替代行为[J]. *中国农村经济*, 2013(9): 18—30.
- Chen Shuzhang, Song Chunxiao, Song Ning, et al. Technological progress, behaviors of demand for and substitution of production factors in wheat production of China[J]. *Chinese Rural Economy*, 2013(9): 18—30. (in Chinese with English abstract)
- [24] 晏百荣, 周应恒, 张晓恒. 农业劳动力价格上升对中国苹果生产要素投入结构的影响[J]. *农林经济管理学报*, 2017, 16(5): 563—572.
- Yan Bairong, Zhou Yingheng, Zhang Xiaoheng. Influence of agricultural labor price rising on Chinese apple production factors input structure[J]. *Journal of Agro-Forestry Economics and Management*, 2017, 16(5): 563—572. (in Chinese with English abstract)
- [25] Binswanger H P. Agricultural mechanization: A comparative historical perspective[J]. *The World Bank Research Observer*, 1986, 1(1): 27—56.
- [26] Binswanger H P. A Cost function approach to the measurement of elasticities of factor demand and elasticities of substitution[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 1974, 56(2): 377—386.
- [27] Binswanger H P. The measurement of technical change biases with many factors of production[J]. *The American Economic Review*, 1974, 64(6): 964—976.
- [28] Kako T. Decomposition analysis of derived demand for factor inputs: The case of rice production in Japan[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 1978, 60(4): 628—635.
- [29] Stevenson R. Measuring technological bias[J]. *American Economic Review*, 1980, 70(1): 162.
- [30] Meena P C, Kumar P, Reddy G P. Factor demand and output supply of wheat in Western India[J]. *Indian Journal of Agricultural Economics*, 2010, 65(4): 739—746.
- [31] Mensah-Bonsu A. Price and non-price determinants of farm household demand for purchased inputs: Evidence from Northern Ghana[J]. *Journal of Development & Agricultural Economics*, 2010(2): 54—64.
- [32] 王班班, 齐绍洲. 有偏技术进步、要素替代与中国工业能源强度[J]. *经济研究*, 2014(2): 115—127.
- Wang Banban, Qi Shaozhou. Biased technological progress, factor substitution and China's industrial energy intensity[J]. *Economic Research Journal*, 2014(2): 115—127. (in Chinese with English abstract)
- [33] Mcfadden D. Constant elasticity of substitution production functions[J]. *Review of Economic Studies*, 1963, 30(2): 73—83.
- [34] Mundlak Y. Elasticities of substitution and the theory of derived demand[J]. *Review of Economic Studies*, 1968, 35(2): 225.
- [35] Yang J, Huang Z H, Zhang X B, et al. The rapid rise of cross-regional agricultural mechanization services in China[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 2013, 95(5): 1245—1251.
- [36] Zhang X B, Yang J, Thomas R. Mechanization outsourcing clusters and division of labor in Chinese agriculture[J]. *China Economic Review*, 2017, 43(4): 184—195.
- [37] 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 Ming, Song Hongyuan. Spatial convergences and difference between functional areas of grain production technical efficiency: Concurrently discuss ripple effect in

- technology diffusion[J]. *Management World*, 2014(7): 83—92. (in Chinese with English abstract)
- [38] 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 Junqian, Fang Shile, Li Gucheng, 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. (in Chinese with English abstract)

Mechanism of factor substitution during rapid development of China's agricultural mechanization

Pan Biao, Tian Zhihong^{*}

(College of Economics and Management, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Since 2004, with the rapid rise of labor prices, the application of agricultural machinery in China's agricultural production has increased and the process of agricultural mechanization has been rapidly advancing in the "golden decade". It is a research subject with both theoretical significance and policy reference value to explore the substitution of labor by agricultural machinery during this period, and to study the phased characteristics and continuity of factor substitution. Based on the provincial panel data from 2004 to 2016, this paper uses the translog cost function to calculate the substitution elasticity between machinery and labor in the production of 3 major grain crops i.e. wheat, maize and rice, focusing on the difference between crops and between regions, and their spatial and temporal variations. The data used in this paper come from *National Agricultural Product Cost And Income Data Compilation*, and *China Statistical Yearbook* (2002—2017). The results showed that: 1) The development of China's agricultural mechanization experiences a "golden decade", mainly due to the widespread, effective, and sustained replacement of labor by agricultural machinery, the substitution elasticity between agricultural machinery and labor for wheat, maize and rice was 0.581、1.324 and 1.153, respectively, and the mechanization of maize and rice at key production link is remarkable. 2) The substitution elasticity of wheat was stable at around 0.6 during 2004-2016, while the substitution elasticity of maize and rice showed a long-term downward trend, which decreased from 1.545 and 1.224 to 1.225 and 1.152 respectively. It means that when agricultural mechanization reached a higher level, the difficulty of factor substitution gradually increased and the substitution elasticity tended to decline, and it is much more difficult to increase the mechanization level of grain crops in the future. 3) Affected by factors such as the topography of operations, the development of agricultural mechanization in various provinces is at different stages, and there is a clear difference of the substitution elasticity between agricultural machinery and labor in grain production. The substitution elasticity of the southern low-lying hilly region, and the hilly and mountainous area in the southwest is generally higher than that in other regions, and there is a large space to increase the agricultural mechanization level in these regions, which might keep a remarkable increase. 4) With the general increase of mechanization level, the substitution elasticity shows the characteristics of temporal and spatial convergence, and the regional differences are gradually reduced and the whole tends to be stable. This can be used to explain the slowdown of the speed of China's agricultural mechanization, and it also means that relying solely on the mechanization of food crops to stimulate the overall level of agriculture mechanization has become a thing of the past. In the future, the rapid growth of agricultural mechanization in China is faced with unprecedented difficulties and challenges, and it needs 5 aspects of measures to deal with this situation, such as enhancing the mechanization level of hilly and mountainous areas, promoting the mechanization toward whole and entire development, promoting the using of new multi-machinery and information-based smart machinery through machinery purchase subsidy policy, and reducing operational links and labor force participation directly.

Keywords: agriculture; mechanization; crops; golden decade; labor cost; substitution elasticity; temporal and spatial convergence