

我国小麦生产的要素替代关系研究

高道明¹ 王丽红² 田志宏^{1*}

(1. 中国农业大学 经济管理学院, 北京 100083;
2. 北京市农村经济研究中心, 北京 100192)

摘 要 为识别劳动力价格快速上涨背景下我国农业生产要素替代关系及其程度的演变特征,本研究基于超越对数生产函数模型,采用 15 个小麦主产区 1981—2016 年的面板数据在全国和区域 2 个层面估算主要生产要素的产出弹性和替代弹性。结果表明:1)农业机械和化肥投入可以有效替代劳动力并提高小麦产量;2)相比化肥,机械对劳动力的替代效应更加显著且持久;3)平原地区机械对劳动力的替代效应以及小麦产出的促进效应始终强于非平原地区。鉴于此,一方面要打破推进机械化的制度约束,激励农户加快投入结构的调整,另一方面要因地制宜引导机械技术的研发和创新,促进区域机械化平衡发展。

关键词 劳动力价格上涨;要素替代;替代弹性;产出弹性;农业机械化

中图分类号 F326.1 **文章编号** 1007-4333(2018)06-0169-08 **文献标志码** A

Research on the factor substitution relationships of wheat production

GAO Daoming¹, WANG Lihong², TIAN Zhihong^{1*}

(1. College of Economics and Management, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
2. Beijing Rural Economic Research Center, Beijing 100192, China)

Abstract To identify the substitution relationships between different agricultural factors and their degree against the background of rapidly rising labor price, a translog production model was applied to evaluate of the output and substitution elasticity of the main factors based on the panel data of 15 major wheat producing provinces from 1981—2016. The results showed that: Firstly, agricultural machinery and fertilizer could effectively substitute labor and increase the wheat yield. Secondly, machinery was a better substitute for labor than fertilizer. Finally, the substitution degree of machinery for labor and its promoting in the plain area was consistently higher than the non-plain area. In conclusion, the institutional restriction should be broken for fast boosting mechanization and make advance on the research and innovation of machinery technology according to circumstances.

Keywords labor price rising; factor substitution; substitution elasticity; output elasticity; agricultural mechanization

1 问题的提出

改革开放以来,中国经历了世界历史上规模最大、速度最快的工业化和城镇化进程,与之相伴的是大量农村劳动力持续向非农部门转移。21 世纪以来,中国农村劳动力短缺问题显著凸显,农业劳动力价格快速攀升。2000—2016 年间农业劳动力价格增长 4.5 倍,远高于同期化肥和机械增幅(图 1)。显然,我国农业生

产要素禀赋结构及其相对价格已发生根本性变化。根据农业诱致性技术变迁理论,生产要素相对价格变化会伴随着要素替代和投入结构的调整。事实上,我国除劳动力以外的其他农业生产要素投入急剧增加,其中化肥施用量和机械总动力在过去 10 年分别保持 2.3% 和 4.9% 的年均增速。然而,这是单纯的生产扩张结果还是由于农民用资本要素代替日益稀缺劳动力的生产决策?有待于进一步的实证检验。

收稿日期: 2017-09-23

基金项目: 农业财政项目(121721301122441201); 农业财政项目(农财 2015-20-2130106)

第一作者: 高道明,博士研究生, E-mail: gdmhd@126.com

通讯作者: 田志宏,教授,博士生导师,主要从事农业经济管理研究, E-mail: cautzh@cau.edu.cn

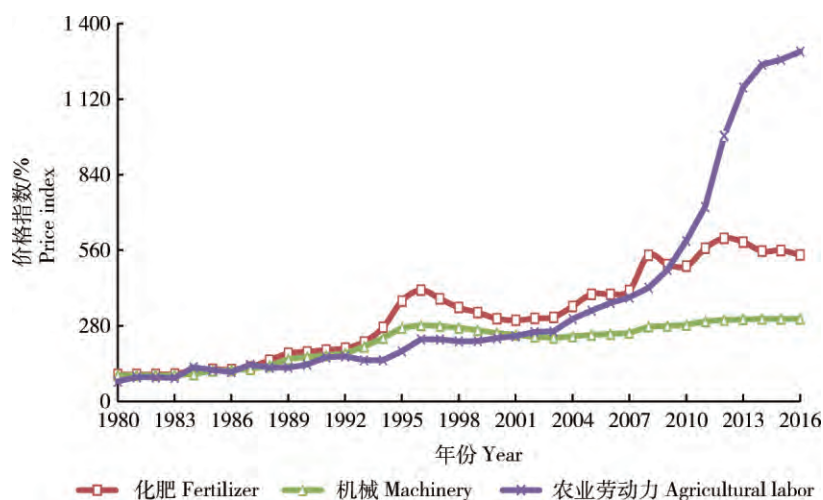


图1 我国主要农业生产要素价格的变化(1980—2016年)^①

Fig. 1 Changes in the price index of major agricultural production factors in China from 1980 to 2016

对各种农业生产要素之间的替代关系进行实证研究是农经领域的重要课题,总体可分为3类。第一类是为诱致性技术变迁理论提供经验证据。诱致性技术变迁理论由 Hayami 等^[1]提出,其涵义是要素相对价格变化会对技术变革产生诱致性作用,同时微观生产主体会通过价格信号实现廉价要素对昂贵要素的替代。Bingwager^[2]构建了一个多要素超越对数成本函数模型分析美国 1912—1968 年农业生产的要素需求和替代关系,研究结果支持了该理论。Nghiep^[3]对日本农业,Thirtle 等^[4]对南非农业的研究结果同样显示了农业技术变迁存在诱致性技术变革偏向。第二类是探讨要素市场外生价格冲击对农业增长的影响。例如,Dong^[5]的实证研究发现,美国农业能源-资本和能源-劳动力在 2000—2011 年间表现出替代性,能源价格上涨降低了其使用强度及产出贡献。第三类分析农村要素市场干预政策效果。例如,Fischer^[6]利用墨西哥农场数据的研究发现,劳动力和中间投入品之间具有高替代弹性,投入品补贴政策无法达到刺激农村就业的目标。

在劳动力价格快速、持续上升的背景下,中国农业生产中的要素替代关系也日益引起学者们广泛的兴趣,相关研究成果不断丰富和深化,主要表现在 3 个方面:一是测度方法多元化,例如马凯等^[7]利用不变替代弹性生产函数测度了 1978—2008 年中国粮食生产中机械与劳动力的替代关系;Liu 等^[8]利用

超越对数成本函数考察了河北和山东两省小麦生产要素替代状况,发现化肥对劳动力替代弹性高于机械;王欧等^[9]基于 2003—2014 年农户数据利用超越对数生产函数对粮食生产中的机械与劳动力替代弹性进行了测算。二是研究对象从农业总体或粮食生产扩展到经济作物,例如李谷成等^[10]发现化肥和机械对劳动力的显著替代使得劳动力净流出没有损害油菜生产;向云等^[11]发现柑橘生产中化肥与机械具有互补性,均能显著替代劳动力。三是将非传统要素纳入研究框架,例如李志俊^[12]发现人力资本提高了资本对土地的替代能力。目前看来还存在两点不足:一是现有研究多数以粮食整体为对象,由于不同粮食品种生产的要素替代过程差异较大,有必要对单项产品开展分析;二是现有研究大多在全国或某一地区层面展开,较为缺乏对区域差异性的探讨。

有鉴于此,本研究基于 1981—2016 年 15 个小麦主产区的面板数据,利用超越对数生产函数测算主要投入要素的产出弹性和要素间替代弹性,进而探明劳动力价格上涨对我国农业发展的影响,为制定农业要素市场政策提供参考依据。选择小麦作为研究对象,主要基于 2 个方面的考虑:一是小麦在整个国家粮食安全战略中处于非常重要的地位,二是面对劳动力价格上涨的冲击,小麦生产的要素投入结构调整非常迅速,2016 年小麦综合机械化水平达到 94%,而水稻和玉米分别只有 79%和 83%^②。

① 数据来源:《中国统计年鉴》和《全国农产品成本收益资料汇编》。

② 数据来源于 2016 年全国农业机械化统计年报,经作者整理计算得出。

2 模型构建与数据说明

2.1 超越对数生产函数模型构建

要素替代弹性是衡量要素之间替代难易程度的关键参数,而选取合理的函数形式是测算要素替代弹性的前提。自20世纪70年代起,基于超越对数生产函数的要素替代弹性研究大量兴起,主要源于该函数具有易估计和包容性优势^[13],一方面只需投入产出数量即可利用线性模型方法估计,另一方面可视为对任意函数的二阶泰勒展式近似,无须对相关参数施加先验设定。本研究将采取超越对数生产函数对我国小麦生产的要素替代关系进行实证分析。

设 Y_{it} 代表 i 省第 t 年的小麦产出, L_{it} 、 M_{it} 、 F_{it} 和 C_{it} 分别劳动力、机械、化肥和其它要素投入,小麦生产函数可表示为:

$$\begin{aligned} \ln Y_{it} = & \beta_0 + \beta_L \ln L_{it} + \beta_M \ln M_{it} + \beta_F \ln F_{it} + \\ & \beta_C \ln C_{it} + 0.5\beta_{LL}(\ln L_{it})^2 + 0.5\beta_{MM}(\ln M_{it})^2 + \\ & 0.5\beta_{FF}(\ln F_{it})^2 + 0.5\beta_{CC}(\ln C_{it})^2 + \beta_{LM} \ln L_{it} \ln M_{it} + \\ & \beta_{LF} \ln L_{it} \ln F_{it} + \beta_{LC} \ln L_{it} \ln C_{it} + \beta_{MF} \ln M_{it} \ln F_{it} + \\ & \beta_{MC} \ln M_{it} \ln C_{it} + \beta_{FC} \ln F_{it} \ln C_{it} + \mu_i + \varphi_t + \varepsilon_{it} \quad (1) \end{aligned}$$

式中: μ_i 为个体效应,代表不随时间变化的省份个体异质性; φ_t 为年份效应,用来控制各省份共同面临的外在冲击,例如国家农业政策实施等。由式(1)可得 i 省 t 年各投入要素的产出弹性,以劳动力产出弹性为例:

$$\eta_{L, it} = \frac{\partial \ln Y_{it}}{\partial \ln L_{it}} = \beta_L + \beta_{LL} \ln L_{it} + \beta_{LM} \ln M_{it} + \beta_{LF} \ln F_{it} + \beta_{LC} \ln C_{it} \quad (2)$$

Boisvert^[14]基于超越对数生产函数推导出Hick替代弹性^①的计算公式,得到了广泛运用。本研究将借鉴这一成果,以机械与劳动力替代关系为例,其替代弹性为:

$$\sigma_{ML, it} = \frac{\eta_{M, it} + \eta_{L, it}}{1 + 2\left(\beta_{ML} - 2\frac{\eta_{L, it}}{\eta_{M, it}}\beta_{MM} - 2\frac{\eta_{M, it}}{\eta_{L, it}}\beta_{LL}\right)} \quad (3)$$

式中: $\eta_{M, it}$ 代表机械的产出弹性; $\sigma_{ML, it}$ 的值域为

$(-\infty, +\infty)$,如果该弹性值小于0,机械和劳动力之间为互补关系,反之为替代关系。 $\sigma_{ML, it}$ 绝对值越大,两种要素的关系就越强。

2.2 变量测度与数据来源

小麦产出用单位面积产量来衡量,劳动力、机械、化肥和其它投入分别用单位面积用工量、机械作业费、化肥费和其他投入费来衡量,其中其他投入费由物质与服务费扣除机械作业费和化肥费得出。数据取自《全国农产品成本收益资料汇编》,研究样本区间为1981—2016年。考察省份包括15个小麦主产省(自治区)^②,这些省小麦产量占全国产量95%以上。为了消除价格变动影响,利用农业生产资料价格指数将机械作业费、化肥费和其它投入费折算为1980年的不变价格。农业生产资料价格指数来自《中国统计年鉴》。表1显示了各变量的描述性统计。

3 实证结果与分析

3.1 模型估计及结果

用上述面板样本进行实证研究,首先需要确定是使用混合OLS、固定效应还是随机效应模型。对面板数据的F检验和BP-LM检验均在1%显著性水平上拒绝了“不存在个体效应”的原假设,说明不应使用混合OLS回归。进一步的稳健Hausman检验在1%显著性水平上拒绝了模型中“个体效应与解释变量不相关”的原假设,说明固定效应模型是合适的选择;年度虚拟变量的联合Wald检验在1%显著性水平上拒绝了“所有系数都为零”的原假设,模型应包含时间效应,即进行双向固定效应估计。考虑到本研究面板数据具有“截面小、时序长”特点,利用Modified Wald检验、Pesaran CD检验和Wooldridge检验对可能存在的组间异方差、截面相关以及组内自相关进行检验,发现样本数据只存在组间异方差和同期相关^③。

本研究采用可行的广义最小二乘法(FGLS)对固定效应模型的异方差和同期相关进行修正,估计结果见表2列(4)。作为比较,列(1)~(3)分别给出

① 要素替代弹性概念最早由Hicks(1932)提出,指的是在给定产出及其他要素价格不变的条件下,要素投入变动对要素相对价格变动的反应敏感程度。Robinson(1933)给出一个基本等价但更为流行的定义,即“给定产出变化时,边际替代率百分比变化引起的要素比率百分比变化”。

② 15个主产省(自治区)分别是河南、山东、河北、安徽、江苏、新疆、陕西、湖北、四川、山西、甘肃、内蒙古、云南、宁夏和黑龙江。

③ Modified Wald检验的 P 值均为0.0000,强烈拒绝“不存在组间异方差”的原假设;Pesaran CD检验的 P 值均为0.0000,强烈拒绝“不存在同期相关”的原假设;Wooldridge检验的 P 值为0.2061,接受“不存在一阶组内自相关”的原假设。

表1 变量的描述性统计

Table 1 Descriptive statistical analysis of variables

变量 Variable	单位 Unit	均值 Mean	标准差 Standard deviation	最小值 Minimum	最大值 Maximum
产出 Output	kg/667 m ²	275.9	81.1	98.2	494.3
劳动力投入 Labor input	工日/667 m ²	10.6	5.9	0.3	35.0
机械投入 Machinery input	元/667 m ²	8.3	6.3	0.2	24.5
化肥投入 Fertilizer input	元/667 m ²	15.5	6.0	2.4	34.3
其它投入 Other inputs	元/667 m ²	22.0	6.1	10.6	41.1

表2 面板模型估计结果

Table 2 Estimated results of panel model

变量 Variable	(1) Pooled OLS	(2) RE	(3) FE	(4) FGLS
lnL	0.647*** (0.202)	0.214(0.387)	0.214(0.392)	0.284(0.179)
lnM	0.500* (0.233)	0.282(0.271)	0.282(0.275)	0.241* (0.141)
lnF	0.876** (0.300)	0.412(0.352)	0.412(0.357)	0.264(0.237)
lnC	0.175(0.513)	-0.294(0.428)	-0.294(0.434)	-0.43(0.323)
0.5×(lnL) ²	0.024(0.014)	0.030(0.019)	0.030(0.019)	0.031** (0.015)
0.5×(lnM) ²	0.032** (0.013)	0.009(0.015)	0.009(0.015)	0.013(0.009)
0.5×(lnF) ²	0.094** (0.043)	0.066(0.043)	0.066(0.044)	0.042* (0.025)
0.5×(lnC) ²	0.194* (0.092)	0.143* (0.074)	0.143* (0.075)	0.144** (0.061)
lnL×lnM	-0.053(0.036)	-0.061(0.054)	-0.061(0.054)	-0.063** (0.030)
lnL×lnF	-0.047(0.041)	-0.041(0.063)	-0.041(0.064)	-0.033(0.048)
lnL×lnC	-0.158** (0.062)	-0.033(0.096)	-0.033(0.097)	-0.042(0.052)
lnM×lnF	0.000(0.026)	0.031(0.034)	0.031(0.035)	0.02(0.024)
lnM×lnC	-0.114(0.071)	-0.053(0.077)	-0.053(0.078)	-0.028(0.042)
lnF×lnC	-0.284** (0.097)	-0.137(0.108)	-0.137(0.109)	-0.08(0.076)
常数 Constant	2.108** (0.829)	4.086*** (1.162)	4.079*** (1.179)	4.388*** (0.620)
个体效应 Individual effects	否	是	是	是
时间效应 Time effects	否	是	是	是
样本数 Number of obs	540	540	540	540
R ² R-squared	0.846 6	0.799 4	0.771 9	
Wald χ^2 Wald chi-squared	—	—	—	56 313.21

说明:括号内数值为回归系数的标准误;***、**和*分别表示1%、5%和10%的显著性水平。

Note: number in the round bracket is standard error. ***, ** and * represent the significance in the 1%, 5% and 10% level, respectively.

了混合 OLS、随机效应(RE)和固定效应(FE)的估计结果。基于 FGLS 的估计结果利用似然比(LR)检验进行二次项和交互项的联合显著性检验,在 1%显著性水平上拒绝“二次项和交互项系数全部为零”的原假设,支持了超越对数生产函数的设定。

3.2 要素产出弹性和替代弹性分析

从表 2 的估计结果可计算出小麦生产中多年各要素的产出弹性和替代弹性,具体见表 3 和图 2、3。这里,作者着重讨论劳动、机械、化肥的产出效应和相互替代关系。

表 3 小麦生产要素的产出弹性和替代弹性

Table 3 Factors' output and Substitution elasticity in the wheat production

时期 Period	产出弹性 Output elasticity			替代弹性 Substitution elasticity		
	劳动力 Labor	机械 Machinery	化肥 Fertilizer	机械-劳动力 Machinery- Labor	化肥-劳动力 Fertilizer- Labor	机械-化肥 Machinery- Fertilizer
1981—2016 年	0.02	0.09	0.09	-0.37	-0.28	1.38
2000—2016 年	-0.04	0.13	0.13	0.55	0.32	1.39
2010—2016 年	-0.07	0.15	0.14	0.84	0.40	1.34

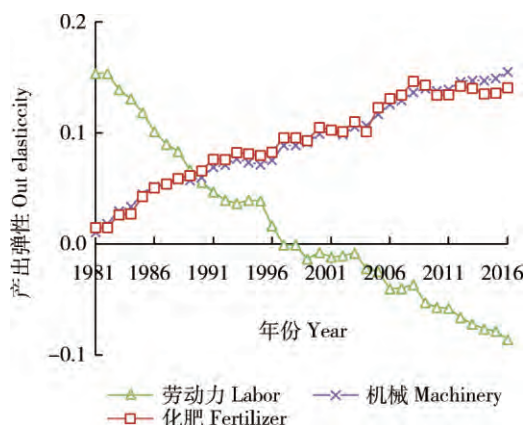


图 2 1981—2016 年中国小麦生产要素产出弹性的变动

Fig. 2 Changes of Chinese wheat production factors' output elasticity from 1981 to 2016

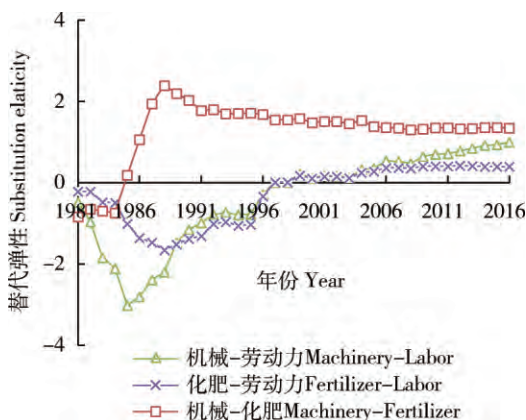


图 3 1981—2016 年中国小麦生产要素替代弹性的变动

Fig. 3 Changes of Chinese wheat production factors' substitution elasticity from 1981 to 2016

各要素产出弹性的变动趋势存在明显差异,劳动力产出弹性显著下降,机械和化肥则呈现增长趋势。具体来看,劳动力产出弹性从 1981 年的 0.15 降至 2016 年 -0.09,究其原因在于作为农村优质劳动力的男性青壮年劳动力大量转移降低了农业劳动力的人力资本水平,进而导致产出效率持续变差。根据盖庆恩等^[15]的估计,男性、女性、老人和儿童的农业生产效率之比分别为 1.00 : 0.76 : 0.71 : 0.57。近年来,化肥产出弹性增长停滞,保持在 0.14 的水平,说明化肥增产潜力释放殆尽,加大化肥投入对小麦增产作用不大。机械产出弹性在 2010 年超过了化肥并继续保持上涨,可见农业机械投入已在小麦增产中发挥主导作用。

就替代弹性而言,3 种要素之间的相互关系及变动特征可归纳为 3 个方面。

第一,机械与化肥和劳动力的关系均经历从互补向替代的变化。20 世纪 90 年代中期是机械与化肥和劳动力关系的转折点,这也是农村劳动力大规模跨区域转移的开端。在这以前,机械-劳动力和化肥-劳动力之间呈互补关系。这并不难理解,施肥靠人工完成,施肥量越多意味着较多的劳动投入,机械化则主要是脱粒机、抽水机等普及,尚未具有明显劳动节约功能^[1]。农村劳动力非农转移后,农业生产的用工成本快速上升,机械与化肥和劳动力呈现出越来越强的替代关系。一方面增加机械投入大大减少劳动时间,尤其是大型拖拉机、插秧机和联合收割机等农业机械的普及,另一方面大幅增施化肥确保作物生长养分充足,减少田间管理的劳动投入。

因此,机械和化肥对劳动力的有效替代避免了劳动力外流对小麦生产的损害。

第二,机械对劳动力的替代效应比化肥更显著和持久。化肥-劳动力比价与机械-劳动价格比变化趋势相似,但机械-劳动力替代弹性在2004年以后明显大于化肥-劳动力替代弹性,值得一提的是,近期化肥的替代效应已出现弱化势头,机械则保持上升趋势。可见,在应对劳动力价格上涨问题上,机械投入的作用比化肥更有效和持久,这与吴丽丽等^[16]的研究结果相吻合。可能的原因是,化肥对劳动力的替代局限在田间管理环节,而机械对劳动力替代可发生在生产各个环节,劳动力价格上涨越厉害,农户越迫切在各个生产环节实现机械化。

第三,机械与化肥之间具有显著的替代关系。

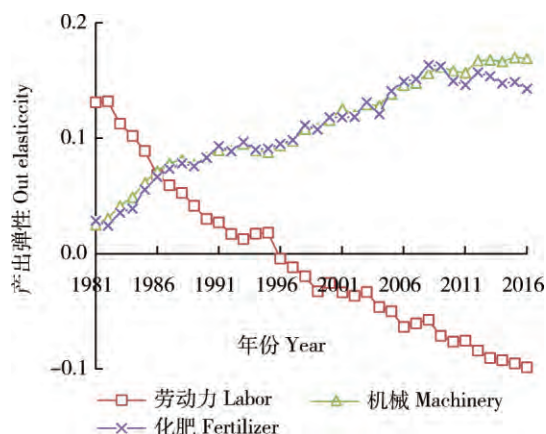


图4 1981—2016年平原地区小麦生产要素产出弹性的变动

Fig. 4 Changes of wheat production factors' output elasticity from 1981 to 2016 in the plain region

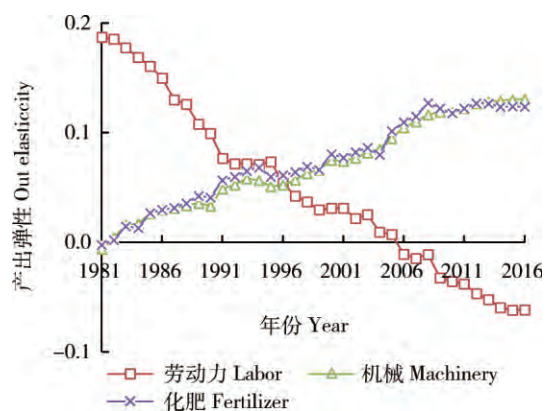


图6 1981—2016年非平原地区小麦生产要素产出弹性的变动

Fig. 6 Changes of wheat production factors' output elasticity from 1981 to 2016 in the non-plain region

根据速水和拉坦提出“二分农业技术”,即机械与化肥分别是劳动节约型技术与土地节约型技术的代表,二者的替代关系并不好解释。然而,这在以往的研究并不少见,例如Liu等基于农户调查数据的研究也有相似的结论^[8]。从生产实践来看,机械化发展确实有助于减少化肥投入,一个典型的例子是机械“深松翻”技术能够大大增加化肥溶解率,进而减少其施用量。因此,当前减少化肥补贴的政策取向与粮食安全保障并不冲突,因为化肥成本增加会促进机械技术运用,促使化肥减量不减产。

3.3 要素产出弹性与替代弹性的地区差异

为了识别社会经济条件和自然资源禀赋差异的影响,本研究进一步将15个小麦主产省为平原地区和非平原地区^①。图4~7分别显示了3种要素在

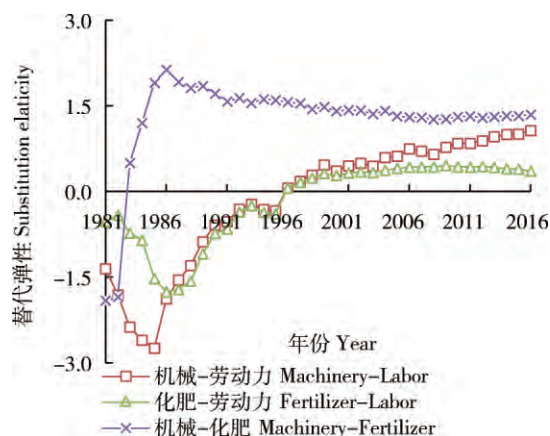


图5 1981—2016年平原地区小麦生产要素替代弹性的变动

Fig. 5 Changes of wheat production factors' substitution elasticity from 1981 to 2016 in the plain region

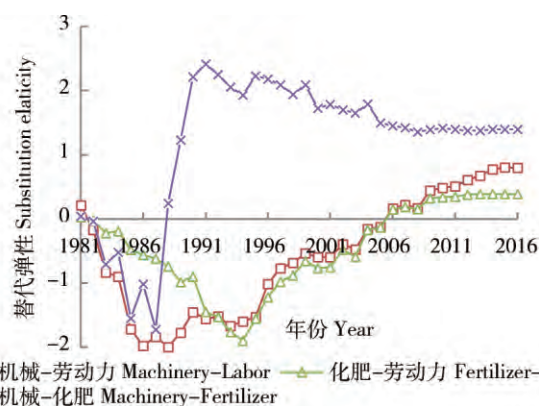


图7 1981—2016年非平原地区小麦生产要素替代弹性的变动

Fig. 7 Changes of wheat production factors' substitution elasticity from 1981 to 2016 in the non-plain region

① 平原地区分别是河南、山东、河北、安徽、江苏、新疆、内蒙古、和黑龙江;非平原地区分别是湖北、陕西、四川、山西、甘肃、云南、宁夏。

两类地区的产出弹性和替代弹性的变化状况。从变化方向和趋势来看,平原地区和非平原地区的劳动力、机械和化肥产出弹性以及相互间替代弹性与全国整体基本一致。

比较弹性强度发现,平原地区机械的增产效应以及对劳动力的替代效应始终强于非平原地区,这正是我国机械化区域发展不平衡的内在动因。非平原地区主要以丘陵山地为主,田块细碎化程度严重,分散且分布不均匀,高度落差大,田间道路设施薄弱,使得许多应用于平原地区的大型农机无法适应丘陵山地需求,甚至很多田块和田头连小型农机都无法正常抵达。值得一提的是,平原地区化肥对劳动力的替代强度开始弱化,可通过价格调控政策弱化农户用化肥代替劳动力投入的动机,减少农业面源污染。

4 结论与启示

本研究以1981—2016年15个小麦主产区为样本,通过超越对数生产函数模型得到了劳动力、机械、化肥的产出弹性以及相互替代弹性。主要结论如下:

1)农业机械和化肥投入可以替代劳动力并提高小麦产量。自90年代中期起,农业劳动力大规模开始向城市转移,机械和化肥与劳动力的关系由互补转为替代,并且随着劳动力价格的持续上涨,这种替代关系日益增强。与此同时,机械和化肥的产出弹性显著上升。

2)机械对劳动力的替代效应比化肥更加显著和持久。机械对劳动力的替代弹性明显大于化肥对劳动力的替代,并且前者保持上升趋势,而后者开始下降,说明机械在应对劳动力价格上涨问题上作用更明显和持久。主要原因是机械对劳动力的替代可发生在各生产环节,而化肥对劳动力的替代局限于田间管理环节。

3)平原地区机械对劳动力的替代效应和增产效应始终强于非平原地区。非平原地区耕地细碎且分散,机械作业难度和成本显著高于平原地区。因此,面临劳动力价格上涨的冲击时,该区域的机械投入表现出更小的劳动力替代强度以及产出效应。

上述结论具有重要的政策含义。机械化已成为农业生产中应对劳动力价格上涨和数量紧缺的关键措施。一方面,加快破除推进机械化的制度约束。由于机械有效利用的重要前提是扩大经营规模,应

积极推动农地产权制度改革、加强农村社保体系建设以及消除农民市民化的制度束缚来促进土地经营权集中。在土地经营权难以流转的地方,通过构建和完善农机社会化服务体系获得规模经营的效果。另一方面,因地制宜推进引导农业机械技术的研发和创新。针对平原地区,着重改良大型农机具,加速提升机械作业效率与质量;针对丘陵山区,加快研究和推广适应这些地区、产品特点和需求的中小型农机具,努力降低机械成本。

参考文献 References

- [1] 速水佑次郎,拉坦. 农业发展的国际分析[M]. 郭熙保,张进铭译. 北京:中国社会科学出版社,2000
Hayami Y J, Ruttan V W. *Agricultural Development: An International Perspective* [M]. Guo X B, Zhang J M translated. Beijing: China Social Sciences Press, 2000 (in Chinese)
- [2] 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
- [3] Nghiep L T. The structure and changes of technology in prewar Japanese agriculture [J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 61(4): 687-693, 1979.
- [4] Thirtle C, Townsend R F, Van Zyl J. Testing the induced innovation hypothesis in South African agriculture (an error correction approach) [J]. *Social Science Electronic Publishing*, 1995, 19(1): 145-157
- [5] Dong S. Declining energy intensity in the U. S. agricultural sector: Implications for factor substitution and technological change [J]. *Sustainability*, 2015, 7(10): 13192-13205.
- [6] Fischer B. Factor substitution in Mexican agriculture [J]. *European Review of Agricultural Economics*, 1980, 7(4): 365-375
- [7] 马凯,史常亮,王忠平. 粮食生产中农业机械与劳动力的替代弹性分析[J]. 农机化研究, 2011(8): 6-9
Ma K, Shi C L, Wang Z P. Analysis of substitute relation between rural labor and agro-mechanism in grain production [J] *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2011, 33 (8): 6-9 (in Chinese)
- [8] Liu Y M, Hu W Y, Jetté-Nantel S, Tian Z H. The influence of labor price change on agricultural machinery usage in Chinese agriculture [J]. *Canadian Journal of Agricultural Economics*, 2014, 62(2): 219-243
- [9] 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. Substitution intensity of agricultural machinery on labor and its influence in grain output [J]. *Chinese Rural Economy*, 2016(12):46-59 (in Chinese)
- [10] 李谷成, 梁玲, 尹朝静, 冯中朝. 劳动力转移损害了油菜生产吗? 基于要素产出弹性和替代弹性的实证[J]. 华中农业大学学报: 社会科学版, 2015(1):7-13
- Li G C, Liang L, Yin C J, Feng Z C. Did labor transfer harm production of rapeseeds in China? Based on factor production elasticity and substitution elasticity[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University: Social Sciences Edition*, 2015(1):7-13 (in Chinese)
- [11] 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 Y, Qi C J, Wang W X. 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)
- [12] 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 Z J. Substitution elasticity of China's agriculture: The role of human capital and technological changes[J]. *Collected Essays on Finance and Economics*, 2014(7):10-15 (in Chinese)
- [13] 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, 122
- Hao F. Formula correction and estimation methods comparison on elasticity of substitution within translog function [J]. *Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2015(4):88-105, 122 (in Chinese)
- [14] Boisvert R N. The translog production function: Its properties, its several interpretations and estimation problems[R]. Ithaca: Cornell University, Working Paper, NO. A. E. Res. 82-28, 1982
- [15] 盖庆恩, 朱喜, 史清华. 劳动力转移对中国农业生产的影响[J]. 经济学(季刊), 2014(3):1148-1170
- Gai Q E, Zhu X, Shi Q H. Labor's migration and Chinese agricultural production[J]. *China Economic Quarterly*, 2014, 13(3):1148-1170 (in Chinese)
- [16] 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[J]. 中南财经政法大学学报, 2016(2):140-148
- Wu L L, Li G C, Zhou X S. The demand and substitution relations of grain production factor[J]. *Journal of Zhongnan University of Economics and Law*, 2016, 215(2):140-148 (in Chinese)

责任编辑: 王岩