粮食生产的能源投入及技术变动趋势

刘英基

（河南师范大学 公共政策与社会管理创新研究中心，河南 新乡 453007）

摘　要： 为探究中国粮食生产的能源投入及技术变动趋势，构建了粮食生产超越对数生产函数模型，基于全国 30 个省份面板数据进行实证分析。结果显示，化肥、农药、农用柴油等能源投入对粮食生产的影响较大，化肥、农药的边际作用呈递减趋势，劳动力、农用柴油、机械动力的边际作用呈递增趋势，各能源要素与劳动力的替代关系明显。为此，在中国未来的粮食生产中，要提高化肥、农药、农用柴油等能源要素的利用效率，通过技术创新提升农业机械动力、劳动力的生产贡献程度，推动粮食生产向精细化和能源节约方向转变。

关键词： 粮食生产；生产技术；能源要素；农业技术创新

中图分类号：F307.11　　**文献标识码：** A　　**文章编号：**1672－0202(2015)03－0104－10

一、引言

中国粮食总产量由 2004 年的 4.6947 亿公斤增长到 2013 年的 6.0194 亿公斤，用全球 7% 的耕地和 6.5% 的淡水资源生产出了占全球 25%（2013 年全球粮食总产量是 25 亿吨）的粮食。然而，中国粮食生产依然处于依靠能源投入的粗放型发展阶段，是以石油为原料的化肥、农药、除草剂和农业柴油的大量使用促进粮食增产的。在工业化和城镇化进程中，中国耕地面积增加空间有限，影响粮食总产量的最重要因素是单产水平，研究粮食生产的重点逐渐放在粮食生产的影响因素方面。化肥使用量、农药使用量、农业机械动力和劳动力是影响粮食生产的重要因素，而依靠化肥、农药等要素投入增加粮食生产水平的效果具有负面效应，通过技术进步影响粮食产量成为重要选择[1]。农民人均种粮纯收入、政府财政支持、有效灌溉、农业机械总动力和农村用电量对粮食生产具有重要影响[2]，农田基础设施、经济制度也是影响粮食生产技术效率的重要因素[3]。灌溉面积、化肥使用量、受灾面积等是影响粮食生产水平的显著因素，提高粮食产量水平要注重做好农田水利建设、科学施肥、增强防灾抗灾能力和完善支持政策[4]。以石油等为主要原料或动力来源的化肥、农药、农膜的生产和使用、农业机械、农田灌溉直接或间接消耗的化石能源所产生的碳排放对生态环境恶化具有明显影响，土壤退化、水资源短缺等生态环境压力对粮食生产负面影响较大，粮食质量安全难以实现[5]。

中国粮食生产的能源消耗总量由 1985 年的 3081 万吨标准煤上升到 2012 年的 6784.43 万吨标准煤，27 年增长了 120%。以石油为基础的粮食生产要素中，农业机械总动力、化肥、农药、农膜

收稿日期：2015－03－16　　**DOI：**10.7671/j.issn.1672－0202.2015.03.011

基金项目：国家科技支撑计划(2013BAD07B14－6)；河南省高等学校哲学社会科学研究“三重”重大项目(2014－SZZD－15)

作者简介：刘英基(1975—)，男，河南汝南人，河南师范大学公共政策与社会管理创新研究中心副教授，主要研究方向为技术经济学。E－mail：liuchx1229@163.com

和农用柴油的投入量分别由 1991 年的 29388.6 万千瓦、2590.3 万吨、76.1 万吨、64.21 万吨和 863.1 万吨增加到 102559.1 万千瓦、5838.8 万吨、180.6 万吨、283.3 万吨和 2107.6 万吨,分别增长了 249%、125.4%、137.3%、271% 和 144%①。石油能源的大量投入,使其成为温室气体排放的重要来源,也导致农业生态环境污染日趋严重。中国粮食生产面临着水资源短缺加剧、耕地面积日趋减少、生态环境资源压力加大和国际粮食市场动荡、国内粮食需求持续增加的现实挑战。化肥、农药、农用柴油等石化能源的高强度、低效率使用,使碳、磷、氮等过度排放,造成大气、水体和土壤污染。农业污染导致的土壤、水体质量下降日益严重,根据国家环境保护部、统计局和农业部 2010 年联合发布的《第一次全国污染源普查公报》数据显示,中国农业面源污染非常严重,2007 年的农业化学需氧量(COD)排放量是 1324.09 万吨,占全部化学需氧量排放总量的 43.7%;农业生产的总磷和总氮排放量为 28.47 万吨和 270.46 万吨,分别占排放总量的 67.4% 和 57.2%。现阶段,农业污染已经超过了工业污染,为了避免引发环境灾害,必须推动农业技术创新,优化要素投入组合,提高技术效率,推动粮食可持续生产。粮食生产要实现能源节约、生态环保、可持续发展,需要依靠科技进步和积极利用生态友好型农业技术实现尽可能少的水资源、化肥、农药等投入,以资源节约与环境保护为核心,优化劳动力、耕地、水资源、农药、种子、化肥和机械动力等要素与生产技术组合。强调能源再利用和清洁生产,实现粮食生产的经济、生态和社会效益最大化[6]。

十八大报告指出,要增强农业综合生产能力,坚持以我为主、加快推进农业发展方式转变,更加注重粮食生产的数量、质量、效益并重,更加注重农业技术创新和农业可持续的集约发展,走资源节约、产出高效、环境友好的粮食安全道路。实现粮食丰产与资源生态永续利用的协调兼顾。中国粮食生产既要克服资源约束持续推进粮食产量提升,更要考虑生态环境成本,实现向数量与质量并重的粮食安全目标转变。已有研究主要从推动粮食总产量的角度分析化肥施用量、耕种面积、灌溉、机械总动力、农业劳动力、粮食价格、自然灾害、农业政策等因素的作用,而从节约能源投入角度对粮食生产影响因素及要素技术组合优化的实证研究尚不多见。本文运用全国 30 个省份的面板数据,实证分析粮食单产的能源投入等的要素贡献、产出弹性与替代关系,以考察粮食生产的要素替代可能性与技术变动趋势,为政府制定提高粮食生产效率和实现可持续发展的相关政策提供科学依据。

二、指标选择、模型构建与数据来源

(一)粮食生产的能源消耗与指标选择

全球粮食生产实践表明,在石油农业条件下,粮食生产水平越高,能源消耗越多。发达国家的化肥、农药、柴油等能源要素在传统农业生产投入中的比重为 85%,在有机农业生产中也达到了 60%。改革开放以来,中国粮食单产持续提高,1978 - 2013 年增长了 5 倍多,也由此带来了化肥、农药、农用柴油等以石油为原料的能源投入持续攀升。2013 年,中国农业能源消耗超过了 9 千万吨标准煤,其中,化肥的总产量和消费量均超过了世界总量的 1/3②,过量的能源消耗已成为中国粮食生产的魔咒。为了探究中国粮食生产中的能源节约和粮食生产技术变动趋势,本文选择粮食生

① 根据历年《中国统计年鉴》(国家统计局编,中国统计出版社出版)的数据计算。

② 数据是根据历年《中国统计年鉴》、《中国农村统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》的数据计算、整理,本文以下部分相同。

产中的化肥、农药、农业柴油等能源投入和农业劳动力、机械动力等要素作为分析指标。

(1)化肥投入。新世纪以来,中国粮食生产中的化肥消耗量以超过年均5%的速度增加。2013年化肥消耗总量达到7153.7万吨,分别是美国、日本、德国的3.84倍、55.6倍和34.4倍。中国粮食生产的施肥强度为32.3千克/亩,而美国、日本和欧盟的农业生产施肥强度分别为7.81千克/亩、23.36千克/亩、7.53千克/亩。显然,中国粮食生产处于依靠能源投入的粗放型生产阶段,与以技术投入为主的集约型发展存在较大差距。中国每年在化肥生产过程中需消耗7500万吨煤炭、超过100亿立方米天然气、超过500亿千瓦时电力和65万吨石油,化肥是典型的高能耗产业和国家实施节能减排的重点行业。推动中国粮食生产的精细化、集约化,发展生态、高效农业需要通过技术进步提升化肥使用效率、优化化肥生产结构、减少化肥投入量和投入强度。

(2)农药投入。为了保障和促进农作物生长,防止病虫害,提高粮食产量,中国近年来的农药使用量呈快速增加趋势。1991年,农药使用量为76.15万吨,2012年达到创纪录的180.6万吨,比1991年增长了1.4倍。除了在2000年的农药使用量稍有下降外,其它年份都呈快速增加趋势。农药和化肥生产一样也是能源密集型化工产业。据估算,2012年中国农药生产消耗能源折合8.45$\times10^5$吨标准煤。在粮食生产过程中,农药的使用效率不高,仅有10%~20%的农药能够被农作物枝叶吸收,而剩余部分都散落在土壤和水中,造成土壤和水污染。

(3)农业机械动力和农用柴油投入。农业机械动力是用于农业生产的各类机械动力的总和,主要包括耕作、排灌、收获、运输和植物保护的机械动力(农用机械的动力引擎包括电动机和内燃机,其功率单位均可折算成瓦特)。农业机械动力的基础在于农业机械化程度,即在农业生产过程中采用适用的机械设备提高农业生产技术水平、生产效率和经济效益、生态效益的过程。提升农业机械化程度对促进农业生产集约化、抵御自然灾害,进而提高农业生产效率、增加产量水平、降低生产成本具有重要的现实意义。现阶段,中国农业机械化程度依然相对较低,2012年每千公顷耕地的大型拖拉机的使用量为43.6台、收割机使用量为6.8台。而早在2007年,德国就达到了每千公顷耕地大型拖拉机使用量为64.6台和收割机使用量为7.2台。日本的机械化程度更高,分别达到了433.9台和221.2台。农业机械动力增加替代农业劳动力流出满足农业生产需要,同时也提高了农业生产效率。2012年,全国农用大中型拖拉机为485.2万台、小型拖拉机为1797.2万台、农用排灌电动机为1248.8万台、农用排灌柴油机为982.3万台,农用机械总动力达到102559万千瓦。农业机械化程度的提高一方面提升了农业生产效率和集约化程度,另一方面对石油燃料等能源的消耗也随之显著增加。2012年中国农业生产消耗的石油能源中仅农用柴油使用量就达2107.6万吨,占农业生产所消耗各类燃油总量的90%左右。

(4)农业劳动力投入。农业劳动力是影响粮食生产的基本因素,随着中国城镇化和工业化进程的加快,农业劳动力流向城市二三产业已成为客观趋势,未来农业生产中"谁来种田"和"谁会种田"将成为影响中国粮食生产的突出问题之一。国家统计局的抽样调查数据显示,2011、2012、2013年中国农民工总数分别达25278万人、26261万人和26894万人,农民工总数的持续增加意味着农业劳动力的不断减少。二三产业附加值高于农业附加值,二三产业从业人员工资水平上涨也意味着农民种粮机会成本的增加,种粮比较收益进一步下降,从而更影响农业劳动力投入的积极性。在农业劳动力流出规模持续扩大和农业生产从业人员不断减少的情况下,如何才能保证粮食生产的可持续,实现粮食产量的持续增加;能否通过生产技术优化粮食生产要素投入结构,通过财政政策支持和鼓励高技能劳动力从事粮食生产和提升高产粮食作物的种植比重,推动农业劳动力

和高产粮食作物的结合,从而实现粮食可持续增产成为值得研究的现实问题。

为了深入分析中国粮食生产的能源投入、替代关系与技术变动趋势,选择以下具体的产出和要素投入指标。粮食产出指标选择各省份的粮食单产水平,即每亩产量(公斤,Y);粮食生产的主要影响因素,能源投入指标分别选择每亩化肥投入量(公斤,F)、每亩农药使用量(公斤,P)、每亩农用柴油使用量(公斤,D);非能源要素投入指标选择每亩劳动用工(日,L)、每亩机械动力投入(千瓦,M)。在回归方程的计量分析中,增加自变量数目能够提高回归方程的拟合优度。然而,由于自变量数目增多的同时,估计参数会成倍增加,从而增大计量分析的复杂性;由于上述要素投入合计已占粮食生产总成本的九成左右,本文选择这些指标能够有效说明粮食生产实际。

(二)模型构建与数据来源

超越生产函数能够较好的对生产要素的产出弹性和替代弹性进行估计,反映要素间的互动关系和不同要素的技术进步差异[7],从而为优化要素组合和推动技术进步提供科学依据。基于中国粮食生产的主要要素投入,本文构建如下超越对数生产函数模型:

$$\begin{aligned}\ln Y_t = {} & \beta_0 + \beta_y \ln Y_{t-1} + \beta_l \ln L_t + \beta_f \ln F_t + \beta_p \ln P_t + \beta_d \ln D_t + \beta_m \ln M_t + \beta_{lf} \ln L_t \ln F_t + \\ & \beta_{lp} \ln L_t \ln P_t + \beta_{ld} \ln L_t \ln D_t + \beta_{lm} \ln L_t \ln M_t + \beta_{fp} \ln F_t \ln P_t + \beta_{fd} \ln F_t \ln D_t + \beta_{fm} \ln F_t \ln M_t + \\ & \beta_{pd} \ln P_t \ln D_t + \beta_{pm} \ln P_t \ln M_t + \beta_{dm} \ln D_t \ln M_t + \beta_{ll} (\ln L_t)^2 + \beta_{ff} (\ln F_t)^2 + \beta_{pp} (\ln P_t)^2 + \\ & \beta_{dd} (\ln D_t)^2 + \beta_{mm} (\ln M_t)^2 \end{aligned} \tag{1}$$

其中,β_0 为常数,β_i 为需要估计的系数。

农业劳动力投入的产出弹性为:

$$\eta_l = \frac{dY/Y}{dL/L} = \frac{d\ln Y_t}{d\ln L_t} = \beta_l + \beta_{lf} \ln F_t + \beta_{lp} \ln P_t + \beta_{ld} \ln D_t + \beta_{lm} \ln M_t + 2\beta_{ll} \ln L_t \tag{2}$$

同理,可得化肥、农药、农用柴油、农用机械动力的产出弹性:

$$\eta_f = \beta_f + \beta_{lf} \ln L_t + \beta_{fp} \ln P_t + \beta_{fd} \ln D_t + \beta_{fm} \ln M_t + 2\beta_{ff} \ln F_t \tag{3}$$

$$\eta_p = \beta_p + \beta_{lp} \ln L_t + \beta_{fp} \ln F_t + \beta_{pd} \ln D_t + \beta_{pm} \ln M_t + 2\beta_{pp} \ln P_t \tag{4}$$

$$\eta_d = \beta_d + \beta_{ld} \ln L_t + \beta_{fd} \ln F_t + \beta_{pd} \ln P_t + \beta_{dm} \ln M_t + 2\beta_{dd} \ln D_t \tag{5}$$

$$\eta_m = \beta_m + \beta_{lm} \ln L_t + \beta_{fm} \ln F_t + \beta_{pm} \ln P_t + \beta_{dm} \ln D_t + 2\beta_{mm} \ln M_t \tag{6}$$

粮食生产要素替代弹性是指在特定技术条件和要素价格水平下,要素投入比重的相对变动与边际技术替代率相对变动的比值,替代弹性越大说明要素间的替代性越高。能源要素与劳动力、农业机械动力的替代弹性计算如下:

化肥与劳动力的替代弹性为,

$$\sigma_{FL} = \frac{d(\frac{F}{L})}{\frac{F}{L}} \left[\frac{d(\frac{MP_L}{MP_F})}{\frac{MP_L}{MP_F}} \right]^{-1} = \frac{d(\frac{F}{L})}{d(\frac{MP_L}{MP_F})} \frac{\frac{MP_L}{MP_F}}{\frac{F}{L}} \tag{①}$$

其中,$\frac{MP_L}{MP_F} = \frac{\frac{dY}{dL}}{\frac{dY}{dF}} = \frac{\eta_L}{\eta_F} \frac{F}{L}$ ②

由①、②可得,

$$\sigma_{FL} = \frac{d(\frac{F}{L})}{d(\frac{MP_L}{MP_F})}\frac{\eta_l}{\eta_f} = \frac{\eta_L}{\eta_F}\left[\frac{d(\frac{MP_L}{MP_F})}{d(\frac{F}{L})}\right]^{-1} = \frac{\eta_L}{\eta_F}\left[\frac{d(\frac{\eta_l}{\eta_f}\frac{F}{L})}{d(\frac{F}{L})}\right]^{-1} \quad ③$$

其中，$\frac{d(\frac{\eta_l}{\eta_f}\frac{F}{L})}{d(\frac{F}{L})} = \frac{\eta_l}{\eta_f} + \frac{F}{L}\frac{d(\frac{\eta_l}{\eta_f})}{d(\frac{F}{L})}$ ④

$$d(\frac{\eta_l}{\eta_f}) = -\frac{\eta_l}{\eta_f}d\eta_f + \frac{1}{\eta_f}d\eta_l \quad ⑤$$

$$d(\frac{F}{L}) = -\frac{F}{L^2}dL + \frac{1}{L}dF \quad ⑥$$

将⑤，⑥代入④可得：$\frac{d(\frac{\eta_l}{\eta_f})}{d(\frac{F}{L})} = \frac{-\frac{\eta_l}{\eta_f}d\eta_f + \frac{1}{\eta_f}d\eta_l}{-\frac{F}{L^2}dL + \frac{1}{L}dF} = \frac{-\frac{\eta_l}{\eta_f}\frac{d\eta_f}{dL} + \frac{1}{\eta_f}\frac{d\eta_l}{dL}}{-\frac{F}{L^2} + \frac{1}{L}\frac{dF}{dL}}$ ⑦

将⑦代入③，整理可得

$$\sigma_{fl} = [1 + (-\beta_{lf} + \frac{\eta_f}{\eta_l}\beta_{ll})(-\eta_f + \eta_l)^{-1}]^{-1} \quad (7)$$

同理，可计算得出：

化肥与农业机械动力的替代弹性为 $\sigma_{fm} = [1 + (-\beta_{fm} + \frac{\eta_f}{\eta_m}\beta_{mm})(-\eta_f + \eta_m)^{-1}]^{-1}$ (8)

农药与劳动力的替代弹性为 $\sigma_{pl} = [1 + (-\beta_{lp} + \frac{\eta_p}{\eta_l}\beta_{ll})(-\eta_p + \eta_l)^{-1}]^{-1}$ (9)

农药与机械动力的替代弹性为 $\sigma_{pm} = [1 + (-\beta_{pm} + \frac{\eta_p}{\eta_m}\beta_{mm})(-\eta_p + \eta_m)^{-1}]^{-1}$ (10)

农用柴油与劳动力的替代弹性为 $\sigma_{dl} = [1 + (-\beta_{ld} + \frac{\eta_d}{\eta_l}\beta_{ll})(-\eta_d + \eta_l)^{-1}]^{-1}$ (11)

农用柴油与机械动力的替代弹性为 $\sigma_{dm} = [1 + (-\beta_{dm} + \frac{\eta_d}{\eta_m}\beta_{mm})(-\eta_d + \eta_m)^{-1}]^{-1}$ (12)

由于港、澳、台和西藏的数据难以收集，选取 2001－2013 年中国 30 个省级面板数据进行计量研究。粮食单产、农药、农用柴油使用量等数据来源于 2002－2014 年的《中国农村统计年鉴》、《中国统计年鉴》等，粮食作物的每亩劳动用工量、化肥使用量、机械动力等数据源于《全国农产品成本收益资料汇编》。

三、实证研究

（一）超越对数生产函数模型估计及结果分析

根据对粮食生产的要素、样本及数据来源情况，利用全国 30 个省级面板数据对超越对数生产函数模型进行估计。为了科学选择计量模型，首先对面板数据进行 Hausman 检验，检验值为 136.36，且在 1% 水平显著；进行 F 检验，检验值为 56.33，在 1% 水平显著，这说明选择个体固定效

应面板数据模型较好。运用 Eviews6.0 进行面板数据回归分析,结果显示,拟合优度 R^2 值为 0.99,调整后的拟合优度 R^2 为 0.97,这说明个体固定效应模型进行估计的可信度较高。化肥、农药、农用柴油等能源投入和劳动力、农用机械动力等要素对粮食生产作用的计量结果见表 1:

表 1　超越对数生产函数的面板回归分析结果

指标	系数	标准差	t - 统计量	P 值
C	2.33656***	2.37943	4.4402	0.0068
lnL	0.35375***	0.3018	0.930855	0.0046
lnF	0.139059**	1.5200	0.629429	0.0133
lnP	0.17118*	0.54706	0.581631	0.0920
lnD	0.283637*	1.184121	0.540490	0.0983
lnM	0.2456***	0.39524	1.195861	0.0028
lnL * *lnF*	-0.41708	0.04143	-2.784926	0.1764
lnL * *lnP*	-0.28934	0.03773	-1.502837	0.2415
lnL * *lnM*	-0.37401	0.04816	-1.198007	0.2970
lnL * *lnD*	-0.19831	0.03363	-1.363137	0.0815
lnF * *lnP*	0.46107*	0.06430	1.404493	0.0329
lnF * *lnD*	0.46107*	0.06430	1.404493	0.0329
lnF * *lnM*	0.12196**	0.03631	2.548552	0.0125
lnP * *lnD*	0.13133	0.05336	0.963636	0.1363
lnP * *lnM*	0.15163	0.04631	0.863663	0.2964
lnD * *lnM*	0.35163**	0.03366	1.332663	0.0323
$(lnL)^2$	1.955040*	3.175850	1.875101	0.0840
$(lnF)^2$	-0.147090	1.832575	1.147372	0.2152
$(lnP)^2$	-0.228849**	0.09114	-0.511290	0.0361
$(lnD)^2$	0.126477*	0.094253	1.341889	0.0507
$(lnM)^2$	0.171800*	0.03207	-4.631648	0.0619
R - squared		0.994473		
Adjusted R - squared		0.970981		
F - statistic		56.33283		
Hausman		136.36		

注: *** 表示 1% 水平显著, ** 表示 5% 水平显著, * 表示 10% 水平显著。

1. 能源投入对粮食生产的贡献

实证结果显示,中国粮食生产由粗放型向集约型方式转变相对缓慢,化肥、农药、农用柴油等能源消耗对粮食生产依然具有重要作用,能源投入量与粮食单产呈显著的正相关关系。这与李光泗、朱丽莉(2014)等对粮食生产的劳动、机械、化肥等要素贡献的实证结果一致,即回归系数都大于零,其中劳动力的贡献程度最大[8]。

由表 1 可见,化肥投入量的回归系数显著为正值、平方项的回归系数为负值,这说明在中国的粮食生产过程中,过度依赖化肥投入的粗放型模式尽管对当期粮食增产作用显著,但对粮食进一步增产的作用持续减弱,其原因是近年来过量的化肥投入增量使其对粮食产量的边际作用呈减弱趋势。高强度的化肥施用量会造成土壤板结、环境污染和耕地可持续生产能力下降等问题,对粮食进一步增产的促进作用将减弱。从理论上看,化肥作为粮食生产的投入要素在一定技术条件下必然受到边际报酬递减规律的制约,单位面积耕地的化肥投入对粮食增产的作用在经历了实际粮

食产量增量持续增加后将呈边际递减趋势。化肥与机械动力、农药的交叉项回归系数均为正值,说明在劳动力投入持续下降、耕地面积难以增加的情况下,化肥与机械动力、化肥与农药共同对粮食增产产生正向作用。

在全球气候变暖的趋势下,病虫害发生频率增加,农药的作用也更加重要。农药投入量的回归系数显著为正,其平方项回归系数显著为负,说明农药对当期粮食增产具有促进作用,但对进一步的粮食增产作用呈边际贡献递减趋势,其原因在于中国以农户家庭为生产单位的分散、小规模经营耕种方式等因素使农药使用方式混乱,农药施用技术落后,农药浪费现象严重,中国农药有效利用率仅有30%左右,仅有不足20%的农药能够附着于农作物茎叶上,大部分则流失到土壤或水体中,造成浪费和污染。这导致农药在粮食生产中尽管短期作用显著,但长期影响是负面的。这与牛亮云等运用灰关联熵模型测算的化肥、农药对粮食产出贡献大,但效率较低的研究结果相似[9]。农药与劳动力交叉项的回归系数均为负值,这说明农药施用量使其组合对粮食增产的作用弱化;农药与机械动力、农用柴油交叉项系数显著为正,说明粮食生产机械化和农药的组合实现了粮食增产协同作用。

农用柴油使用量及其平方项的回归系数均显著为正值,说明农用柴油对粮食生产的当期影响较大,且其促进增产的长期边际贡献也呈增强趋势。农用柴油使用量与劳动力交叉项的回归系数显著为正,这说明,农用柴油施用量与劳动力能够协同促进粮食生产;而农用柴油使用量与化肥、农药、机械动力的交叉项对粮食生产具有显著的正向作用,这说明农用柴油支持的化肥、农药要素投入能够促进粮食产量的增加;在电力不足的情况下,农业机械动力与农用柴油使用量依然高度相关联,共同提高粮食生产效率。

2. 非能源要素对粮食生产的影响

劳动力对粮食生产的作用明显。劳动力及其平方项的回归系数均显著为正,说明劳动力对粮食生产的现实作用和边际贡献均呈持续增强趋势。劳动力与化肥、农药、农用柴油使用量、机械动力交叉项的回归系数均为负值,且其T检验值均较大。这表明在化肥、农药和农用柴油投入量持续增加的情况下,能源投入与劳动力之间的协同作用减弱。随着农业科技的发展。农业机械动力在耕、种、收等环节中对粮食生产的作用非常显著,农业机械动力及其平方项对粮食单产的回归系数均显著为正值,随着农业机械动力对粮食单产的现实作用和边际贡献均呈增强趋势。机械动力与化肥、农药、农用柴油使用量交叉项的回归系数均为正值,这说明机械动力在粮食生产中的作用日益增强。也印证了何蒲明、娄方舟,陈书章、宋春晓等关于劳动力、农用机械动力对粮食生产具有显著作用的研究结论[10,11]。

(二)要素产出弹性与替代弹性分析

根据超越对数生产函数模型的估计结果,结合粮食生产要素投入数据,运用(2)~(6)式分别计算出中国粮食生产的化肥、农药、农用柴油、劳动和机械动力的产出弹性;利用(7)~(12)计算化肥、农药、农用柴油等能源要素与劳动、机械动力等生产要素间的替代弹性。

1. 产出弹性

由见表2可见,化肥、农药、农用柴油等能源要素和劳动力、机械动力等生产要素的产出弹性均大于零,其中劳动力的产出弹性最大,其次是化肥、机械动力。能源要素对粮食生产的产出弹性呈上升趋势,化肥、农药和农用柴油的产出弹性分别从2001年的0.0736、0.0435、0.0531上升到了2013年的0.1303、0.0635、0.0665,这说明中国的粮食生产依然处于能源要素驱动阶段。尽管粮食科技取得了显著突破,化肥、农药技术取得了巨大进步,但粮食增产对化肥、农药和柴油等能源要素的依赖程度依然较高。化肥的平均产出弹性低于劳动的平均产出弹性,但其增长速度比较快。

表 2　2001 ~ 2013 年粮食生产的能源要素产出弹性与替代弹性

年份	产出弹性					替代弹性					
	化肥	农药	柴油	劳动	机械	化肥劳动	化肥机械	农药劳动	农药机械	柴油劳动	柴油机械
2001	0.0736	0.0435	0.0531	0.7311	0.0396	0.8461	0.0715	0.8583	0.0072	1.0247	0.0227
2002	0.0632	0.0323	0.0430	0.7182	0.0421	0.8066	0.0526	0.8143	-0.0207	0.9693	0.0017
2003	0.0683	0.0461	0.0462	0.7282	0.0431	0.8251	0.0601	0.8696	0.0056	0.9844	0.0058
2004	0.0713	0.0481	0.0433	0.7362	0.0463	0.8355	0.0607	0.8773	0.0034	0.9658	-0.0059
2005	0.0863	0.0463	0.0481	0.7632	0.0506	0.8909	0.0792	0.8669	-0.0085	0.9834	-0.0049
2006	0.0981	0.0530	0.0503	0.7861	0.0563	0.9344	0.0903	0.8905	-0.0065	0.9876	-0.0120
2007	0.0893	0.0536	0.0536	0.7931	0.0628	0.8930	0.0675	0.8919	-0.0188	1.0019	-0.0188
2008	0.1036	0.0568	0.0563	0.7868	0.0663	0.9607	0.0872	0.9057	-0.0194	1.0183	-0.0205
2009	0.1062	0.0518	0.0586	0.8012	0.0698	0.9648	0.0867	0.8841	-0.0390	1.0246	-0.0231
2010	0.1230	0.0569	0.0606	0.8013	0.0718	1.0569	0.1095	0.9035	-0.0315	1.0352	-0.0231
2011	0.1233	0.0611	0.0631	0.8161	0.0736	1.0443	0.1082	0.9173	-0.0259	1.0417	-0.0215
2012	0.1330	0.0633	0.0663	0.8105	0.0786	1.1113	0.1165	0.9273	-0.0322	1.0620	-0.0254
2013	0.1303	0.0635	0.0665	0.8203	0.0866	1.0820	0.1034	0.9259	-0.0501	1.0579	-0.0427
均值	0.0984	0.0520	0.0545	0.7763	0.0606	0.9459	0.0850	0.8871	-0.0182	1.0121	-0.0129

农用柴油使用量的产出弹性的增长速度也较快,其原因在于农田灌溉、农业机械的作用日趋上升。何蒲明、陈书章、李光泗、牛亮云等的实证研究也印证了上述结论[8-11]。

劳动力和机械动力的粮食产出弹性。劳动产出弹性最大,且呈现出一定的增长趋势,从 2001 年的 0.7311 持续增长到 2013 年的 0.8203。其原因在于由于农村劳动力大量流向了第二、三产业,劳动力在粮食生产中的边际贡献出现增长状态,尤其是部分地区的精细化、生态化农业生产,劳动力的作用将更加突出。农业机械动力的产出弹性也呈较快的速度上升,但低于劳动、化肥的产出弹性,这说明中国粮食生产过程中的农业机械动力尚不足以超过化肥、劳动力等要素的作用程度,化肥、柴油和农业劳动力素质结构对农业机械动力的效率也产生重要影响。

2. 替代弹性

当替代弹性 $\sigma_i > 0$,说明两要素存在替代关系;当 $\sigma_i < 0$ 时,说明两要素存在互补关系[12,13]。由表 2 可见,2001 ~ 2013 年粮食生产的能源投入与劳动力、机械动力间存在着显著的替代关系和部分互补关系。

化肥与劳动力、机械动力的替代弹性均大于零,且呈稳定增长趋势。化肥与劳动力的替代弹性较高,平均水平达 0.9459,由于粮食生产中的有机肥、高效复合肥投入不断增加和劳动力投入持续减少,这反映了劳动力流出背景下粮食生产的化肥驱动特征;化肥与机械动力的替代弹性为正说明中国粮食生产中机械动力投入能够促进化肥的集约化使用。

农药与劳动力的替代弹性平均值为 0.8871,且呈稳定增长趋势,其原因是随着农药研发技术的提升,尤其是杀虫剂、除草剂、植物调节剂等广泛使用,再加上农村劳动力成本显著增加,二者之间的替代关系呈增强趋势;农药与机械动力的替代弹性平均值为负,说明农药与机械动力之间是互补关系,在劳动力成本上升和粮食生产规模化、机械化过程中需要通过农药来进行作物生长调节和保护。

农用柴油使用量与劳动力的替代弹性大于零,2001 ~ 2013 年的均值为 1.0121,最大值为 1.0620,农用柴油通过支持耕、种、收及运输、灌溉等的机械化来代替持续流出的农村劳动力;2001

~2013年农用柴油使用量与机械动力之间的替代弹性均值为-0.0129,且2004年以来的替代弹性均小于零,农用柴油是机械动力的主要动力来源,粮食生产中的农业机械动力和农用柴油施用量的互补关系,在协同作用中促进粮食增产。

四、结论与建议

中国农业生产总体上处于依靠能源投入推动粮食增产的粗放型阶段。化肥、农药、农用柴油等能源投入在粮食当期增产中具有重要作用,化肥、农药对粮食单产的长期贡献呈边际递减趋势,劳动力、农用柴油、农业机械对粮食生产的长期作用呈边际递增趋势,粮食生产的要素组合关系处于动态变化之中。现阶段,中国粮食生产面临着人均耕地面积持续下降、生态环境压力持续增大、粮食需求不断增加的严峻形势[14]。如何在提高化肥、农药等利用效率,减少能源投入、保障粮食安全的基础上推动粮食生产方式转型[15],实现粮食生产的可持续发展成为亟待解决的现实问题。为此,提出以下政策建议:

一是依靠科技创新提升化肥、农药的利用效率,减少化肥、农药投入强度,发展精细农业、有机农业。化肥、农药是石油农业阶段粮食生产的核心要素,中国粮食生产中的化肥、农药的投入强度已经越过了最优点,存在着使用过量、效率低、边际作用下降的趋势。现阶段,中国存在着通过科技创新发展有机、高效化肥和低毒、无害化控制病虫害方式,减少化肥、农药使用量,提升化肥、农药使用效率的技术和政策空间。加大对化肥、农药的技术研发,通过推动农业规模化经营、劳动力技能提升和财政支持等发展精细农业、有机农业是有效减少能源投入和保障粮食丰产的重要措施。

二是提高农业机械动力、农田灌溉效率,控制农用柴油使用量。农业机械动力与劳动力有显著的替代关系,通过科技进步推动和提升农业机械效率是农业现代化的重要内容,也是减少能源消耗的重要措施。农用柴油的另一个重要用途是农田灌溉等领域,政府积极加强农田水利基础设施建设,因地制宜的发展节水灌溉技术是提升灌溉效率,控制农用柴油使用量的重要途径。

三是加大财政投入和农业劳动力技能培训的支持力度。劳动力与化肥、农药等能源要素存在显著的替代关系。加大财政支持力度和农业技能培训强度,积极吸引有知识、有技能的农民投入粮食生产。提升粮食生产中劳动力的投入量和劳动效率能够提升化肥、农药和农用柴油的生产效率,有效控制化肥、农药和农用柴油使用量,从而提升粮食生产的精细化程度与能源节约。

参考文献:

[1]屈宝香,李文娟,钱静斐. 中国粮食增产潜力主要影响因素分析[J]. 中国农业资源与区划,2009,(4):34-39.
[2]高金兰,马晓群,张庆国,等. 安徽省粮食单产趋势变化及主要经济因素影响分析[J]. 中国农学通报,2013,(3):108-115.
[3]黄金波,周先波. 中国粮食生产的技术效率与全要素生产率增长:1978-2008[J]. 南方经济,2010,(9):40-52.
[4]黄 勇,朱信凯. 基于指数分解法的中国粮食增量贡献要素研究[J]. 农业技术经济,2014,(6):92-102.
[5]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[J]. 农业经济问题,2013,(12):15-24.
[6]王征兵. 中国农业发展方式应转向精细密集农业[J]. 农业经济与管理,2011,(1):16-20.
[7]CHRISTENSEN L R,JORGENSON D W,LAU L J. Transcendental logarithmic production frontiers[J]. Review of Economics Statistics. 1973,55.
[8]李光泗,朱丽莉. 农村劳动力流动背景下我国粮食生产技术变动分析[J]. 中国科技论坛,2014,(7):143-148.

[9]牛亮云,侯　博,吴林海. 基于灰关联熵的中国农业能源投入与粮食产出关系研究[J]. 财贸研究,2012,(2):45-53.

[10]何蒲明,娄方舟. 我国粮食综合生产能力分析——基于劳动投入与种粮收益的视角[J]. 农业技术经济,2014,(4):72-79.

[11]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.

[12]STEVENSON R. Measuring Technological Bias[J]. American Economic Review,1980,70(1):162-173.

[13]BINSWANGER H. The Measurement of Technical Change Biases with Many Factors of Production[J]. The American Economic Review,1974,64(6):964-976.

[14]姚延婷,陈万明,李晓宁. 环境友好农业技术创新与农业经济增长关系研究[J]. 中国人口.资源与环境,2014,(8):122-130.

[15]CHEN SHUZHANG,OXLEY L,XU ZHENG,WANG YANQING, MA HENGYUN. The Dynamic Adjustments ofFactor Inputs in China's Major Wheat Producing Areas[J]. Economic Modeling,2013,33(1):450-457.

Energy Input and Technological Trends of Chinese Grain Production

LIU Ying-Ji

(*Institution for Public Policy and Social Management Innovation Research*, *Henan Normal University*, *Xinxiang* 453007, *China*)

Abstract: Based on the panel data of 30 provinces, we constructed a Trans-log Production Function model of grain production, and analyzed the Energy input and the technological trends of Chinese grain production. The results show that: the impact of fertilizers, pesticides, diesel oil and other energy factors have larger influence on grain production, the marginal contribution of chemical fertilizers, pesticides is decreasing, and the marginal contribution of labor factors, agricultural diesel, agricultural machinery is increasing. The substitution elasticity between energy and labor factors is large. Improving the efficiency of fertilizers, pesticides, diesel oil and other energy input, promoting the energy factor alternation from mechanical power and labor by technological innovation and expenditure are important measures to change the traditional grain production mode to organic, refined and energy saving production model.

Key Words: grain production; production technology; energy factors; technology innovation