

化肥对中国粮食产量变化贡献率的研究

麻坤¹, 刁钢^{2*}

(1 河北科技大学经济管理学院, 河北石家庄 050061; 2 河北农业大学商学院, 河北保定 071000)

摘要:【目的】化肥在中国粮食产量的增加中发挥了重要作用, 但中国单位面积化肥施用量已远超其他国家。虽然田间试验已证明减少化肥施用量不会导致粮食产量大幅下降, 但部分经济学家和粮食生产者对减少化肥施用量仍持谨慎态度。科学评价我国现阶段化肥对粮食产量变化的贡献率, 对国家层面制定合理的化肥施用决策具有重要的参考价值。已有研究侧重于利用时间序列模型分析粮食产量与化肥投入量及其他因素的关系, 而不同省份粮食生产力存在差异, 并且化肥对粮食产量变化的贡献率是动态变化的。故本研究利用面板数据模型更好地描述中国粮食生产的投入产出关系, 并更准确地反映不同阶段化肥对粮食产量变化的贡献率。【方法】研究收集了 1995—2015 年中国 30 个省份粮食投入产出数据, 分别估计了柯布道格拉斯和二项式函数形式的粮食生产函数的三种面板回归模型, 并利用固定效应和随机效应检验方法对不同面板模型的优劣进行评判, 最终判定随机效应模型优于混合效应和固定效应模型。根据随机效应模型回归结果求解了单位面积粮食产量对化肥的施用量弹性系数, 借鉴全要素生产率概念, 利用粮食生产函数和化肥施用量弹性计算了化肥对单位面积粮食产量变化的贡献率, 据此评价化肥施用量对粮食产量的实际影响。【结果】实证结果表明, 化肥施用量的弹性系数显著, 固定弹性系数为 0.17, 可变弹性系数呈明显的倒 U 形变化趋势, 说明化肥投入已经进入边际报酬递减阶段, 继续增加化肥施用量无法实现粮食产量的增加; 但由于化肥施用量弹性系数数值较高, 并且大于其他要素, 表明化肥的增产效力不可替代。而化肥对粮食产量变化的贡献率计算结果则表明化肥对单位面积粮食产量变化的贡献逐渐变小, 趋向于 0, 说明化肥带来的粮食增长效应已不明显。2015 年粮食投入产出数据分析结果也说明适当减少化肥施用量并不会导致粮食产量大幅减少, 防灾技术、农业机械化程度的提高等其他要素对粮食产量的增加发挥了更大的作用。【结论】建议在国家层面严格控制化肥施用量, 通过调整施肥方式, 优化施肥结构等措施提高化肥利用效率, 进一步发挥技术要素对粮食增产的作用。

关键词: 化肥施用量; 粮食产量; 随机效应模型; 弹性系数; 贡献率

Research on the contribution rate of fertilizer to grain yield in China

MA Kun¹, DIAO Gang^{2*}

(1 Economic and Business College, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050061, China;
2 Business College, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China)

Abstract: 【Objectives】 Chemical fertilizers play very important roles in the grain production of China, however, fertilizer quantity applied per unit area in China is far higher than other countries. Some field trials have shown that reducing fertilizer rate did not lead to a significant drop in grain production, some economists and grain producers remain cautious about reducing fertilizer rate. So it is important to scientifically evaluate the contribution rates of chemical fertilizers to the grain yields in China, and to make rational fertilizer application decision at the country level. The existing studies mainly analyzed the relationship between grain yield and fertilizer input as well as other factors using time series models, but the grain productivities varied from one province to the others, and the effect of fertilizers on grain yield changes is also dynamically changing. So this study chose panel data model to better depict input-output relationship of grain production in China, and reflect

收稿日期: 2017-09-26 接受日期: 2018-02-01

基金项目: 河北省人文社科重大攻关项目 (ZD201713); 河北农业大学社科基金 (ZB201705) 资助。

联系方式: 麻坤 E-mail: 15132180032@163.com; * 通信作者 刁钢 E-mail: mkbisheng@163.com

more accurately the contribution rates of fertilizers to grain yield changes in different stages. 【 **Methods** 】 Grain input-output data of 30 provinces from 1995 to 2015 were collected respectively. Three kinds of panel regression models of grain production functions in the form of C-D and binomial functions were estimated. By using methods of fixed effect test and random effect test to evaluate different panel models, the random effects model was finally judged to be better than the mixed effects and fixed effects models. Based on the regression results of random effects model, the elastic coefficients of grain yield to fertilizer application quantity per unit area were calculated. Using the concept of total factor productivity, the contribution rates of fertilizers were calculated using grain production function and fertilizer elasticity coefficients to evaluate actual impact of fertilizers on grain production. 【 **Results** 】 The empirical results showed that the elasticity coefficients were all significant, the fixed elastic coefficient was 0.17, and the variable elastic coefficients showed an obvious inverted U-shaped trend. It implied that the marginal fertilizer input had entered the stage of diminishing returns, continuing increase of fertilizer application quantity seemed unable to realize the increase of grain production. The elastic coefficient value of fertilizer application quantity was still high and bigger than other factors', which demonstrated the unsubstitutability of fertilizer to grain production increase, on the other side. The contribution rates of fertilizers to grain yield increase showed that the contribution of fertilizers was diminishing and trended to zero. The input-output data analysis result of 2015 also indicated that appropriate reduction of fertilizer input would not lead to a sharp decrease in grain production, as the improvement of disaster prevention technology, agricultural mechanization degree and other elements had played greater roles in the increase of grain production. 【 **Conclusions** 】 It is suggested that the rates of fertilizers should be strictly controlled at the county level, and the effect of fertilizer rate on yield increase should be improved by adjusting the way of fertilization and balancing the fertilization structure, meanwhile, contribution rates of technological factors to grain yields should be further promoted.

Key words: fertilizer application rate; grain yield; random effects model; elasticity coefficient; contribution rate

化肥是现代农业生产投入中的重要因素^[1], 适量施用化肥可以增加作物产量^[2-3], FAO 资料显示, 化肥对全球粮食产量的贡献率达 50%~60%^[4]。中国粮食增产与化肥施用量变化有着密切的关系^[5-6], 化肥对产量的贡献率曾高达 56.81%^[7]。但中国单位面积化肥投入量已过高, 2014 年中国每公顷化肥施用量达 531.9 kg, 约是世界平均水平的 3.9 倍, 高于欧美等发达国家。虽然韩国的化肥施用量曾一度高于中国, 但在 2007 年之后其化肥施用量持续下降直至低于中国的施用水平; 且相较于大部分国家单位面积化肥施用量的下降趋势而言, 中国一直保持上升趋势 (图 1); 然而 1995—2015 年统计数据说明, 1997—2003 年中国单位面积产量与化肥施用量之比已快速下降, 2003 年之后虽呈小幅波动, 但已相对平稳 (图 2)。Nathaniel 等^[8]认为中国化肥已严重过量, 李静等^[9]的研究也发现中国化肥利用效率与发达国家有着较大差距。虽然 Liu 等^[10]的试验证明减少 20% 的氮肥施用量不会降低作物产量, 但部分经济学家和粮食生产者对减少化肥施用量仍持谨慎态度。明确化肥对粮食产量变化的贡献率对评价化肥

的增产效用以及在国家层面制定合理的化肥施用决策有重要参考价值。

已有研究证实化肥与中国粮食产量的增加存在正相关关系。鲍先琬^[6]利用灰色关联方法计算中国化肥用量与粮食产量的关联系数, 发现两者有较高的关联程度, 周慧秋^[11]利用同样的方法计算东北地区粮食产量影响因子, 结果表明化肥施用量对粮食产量有正向影响, 其影响程度仅次于播种面积和有效灌溉面积。谢杰^[12]利用中国 1978—2004 年间的统计数据, 通过逐步回归和加权最小二乘回归方法, 构建了线性粮食生产函数, 回归结果表明土地和化肥投入是影响粮食生产的最主要因素, 均对粮食产量产生正向影响。

施用化肥的确可以补充土壤养分供给, 促进作物产量的增加。然而根据经济学的边际报酬递减理论, 随着单位土地面积化肥投入量的不断增加, 化肥投入对粮食增产的贡献率会逐渐下降。尹世久等^[13]对比中国四个时期跨度的粮食产量与其主要影响因素的灰色关联系数, 发现化肥与粮食产量的关联度由大变小。李红莉等^[14]利用调研数据, 分析了不同粮

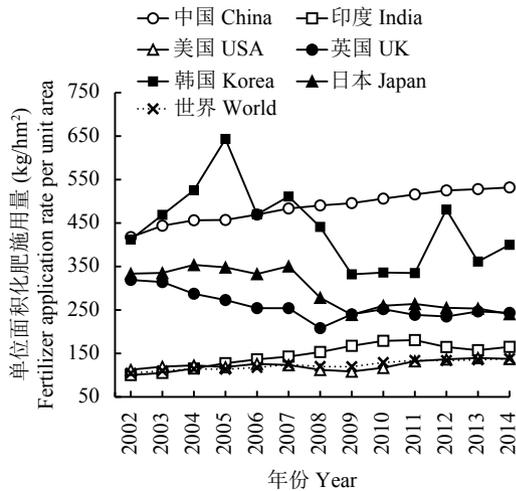


图 1 主要国家单位面积化肥施用量

Fig. 1 Fertilizer application rate in main countries

[数据来源于世界银行数据 Data from World bank data 2017]

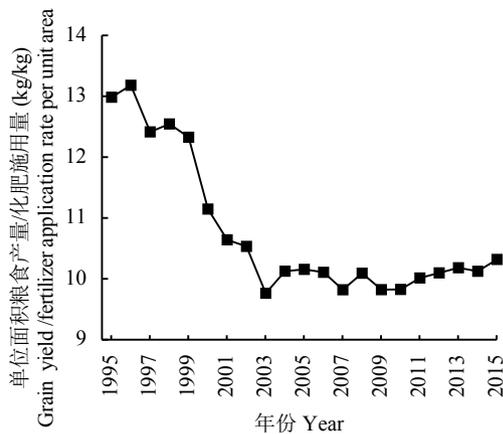


图 2 中国单位面积产量/化肥施用量

Fig. 2 Yield/fertilizer application rate per unit area in China

[数据来源于世界银行数据 Data from World bank data 2017]

食作物化肥施用量和效率的变化, 结果发现玉米的化肥施用量增加, 但增产效率却下降。Cerrato 等^[15]、Bélanger 等^[16]分别利用试验数据对比了几种不同的产量反应模型, 结果发现二项式方程对产量和化肥施用量的关系描述更为准确。张峰等^[17]借鉴了该模型, 利用 1990—2008 年间粮食产量与化肥施用量的统计数据估计了粮食生产的二项式函数模型, 验证了二者之间存在经济学意义上的倒 U 型关系, 即随着化肥施用量的增加, 粮食产量增加速度逐渐放缓。

二项式生产函数一般仅考虑化肥一项投入要素对产量的影响, 但根据前人研究, 粮食产量除了受化肥影响之外, 还受土地、灌溉面积等其他投入要素的影响。为了更准确地描述粮食产量和化肥投入量的关系, 需在粮食生产函数模型中纳入其他变

量。柯布道格拉斯生产函数 (C-D 函数) 可以综合考虑多个生产要素对于产量的影响, 并且其估计结果可以直接获得不同要素的弹性系数, 故被经济学家大量引用。王祖力等^[7]选取粮食播种面积、粮食成灾面积、劳动投入、化肥投入、其他物质投入等指标, 利用 1978—2006 年的数据估计了 C-D 形式的粮食生产函数, 结果显示化肥弹性系数为 0.2; 由于化肥投入量与播种面积可能存在共线性问题, 影响模型估计结果, 黄季焜等^[18]选用单位面积投入产出数据来克服这一问题, 其研究结果显示北方水稻单产对化肥投入弹性系数为 0.208, 南方的化肥弹性系数为 0.098, 南北方化肥投入弹性系数差距较大, 粮食生产的地区差异不容忽视; 除以上因素以外, 魏津瑜等^[19]考虑到农业技术投入和基础设施建设对粮食增产的影响, 将农业机械总动力、有效灌溉面积纳入总产量模型, 得出化肥弹性系数为 0.39; 吴英杰等^[20]则考虑了国家政策对粮食产量的影响, 将净农支出变量引入模型, 其估计的化肥弹性系数为 0.51。对比以上研究结论可以发现, 由于研究时间、区域、数据来源和研究方法的不同, 化肥对粮食产量影响程度的估计结果也不尽相同。鲍先琬^[6]、周慧秋^[11]的研究认为粮食产量与化肥施用量关联程度高, 但是尹世久等^[13]的结果却说明化肥与粮食产量的关联度已下降。魏津瑜等^[19]、吴英杰等^[20]估计的化肥投入总量的弹性系数较高, 而王祖力等^[7]估计的系数偏低。

已有研究侧重分析粮食产量与化肥投入量及其它因素的关系, 主要运用全国粮食投入产出的时间序列数据估计二项式或 C-D 函数形式的粮食生产函数, 通过化肥系数来描述化肥对粮食产量的静态影响。然而不同省份粮食生产力存在差异, 并且化肥对粮食产量变化的贡献率是动态变化的。张立席等^[21]将不同省份粮食生产力的差异性纳入模型构建中, 并将 1952—2006 年全国 30 个省份的面板数据分成 5 个不同时期, 采用固定效应模型对不同时期的粮食总产量对化肥施用量的弹性系数动态变化进行分析, 发现化肥弹性系数呈倒 U 型趋势。但固定效应模型假定每个省份的差异不随时间变化而变化, 这与粮食生产力不断发展的实际情况并不相符。本研究利用 1995—2015 年的粮食投入产出的省际面板数据, 分别估计了 C-D 生产函数和二项式两种形式粮食生产函数的混合效应、固定效应和随机效应模型, 并对模型进行了验证, 选择最优模型, 然后根据模型估计结果计算了化肥施用量的不变弹性和可变弹性, 以及化肥对粮食的增产贡献率, 通过对比

不同指标值及其变化趋势,明确目前化肥投入对粮食产量的实际影响。

1 材料来源与研究方法

1.1 材料来源

本研究收集了1995—2015年中国30个省份(含直辖市)的粮食总产量、化肥施用量、农机动力、有效灌溉面积比例、成灾面积比例数据,数据来自万德数据库(2017)和《中国统计年鉴》。由于统计数据并未将粮食与其他农作物生产的单位面积农机动力、灌溉面积和成灾面积的数据加以区分,并且我国的粮食播种面积占农作物总播种面积的60%以上,故本研究采用统计年鉴中农作物的投入数据来代替粮食生产投入数据。

1.2 研究方法

1.2.1 粮食生产函数模型 柯布道格拉斯生产函数是美国数学家柯布(Cobb C W)和经济学家保罗·道格拉斯(Paul H Douglas)探讨投入和产出关系时创造的生产函数(公式1),该生产函数综合考虑了资本、劳动力和技术等多种要素对产出的影响,是经济学中使用最广泛的一种生产函数形式。将该函数公式两边取对数,可以将其转化为线性回归模型(公式2)。C-D模型估计的化肥弹性系数是固定不变的,而以往的研究结论显示化肥投入存在边际报酬递减趋势,其弹性系数会在不同时期发生变化,利用二项式生产函数模型(公式3)可以计算出化肥的可变弹性系数。为了对比化肥施用量对粮食产量的静态和动态影响,本研究分别估计了这两种形式的粮食生产函数模型。

柯布道格拉斯粮食生产函数(模型1):

$$AFPD_t = A \cdot FER_t^{\alpha_1} \cdot \prod_1^n X_{it}^{\alpha_{i+1}} \quad (1)$$

公式1取自然对数:

$$\ln AFPD_t = \ln A + \alpha_1 \ln FER_t + \sum_1^n \alpha_{i+1} X_{it} \quad (2)$$

二项式粮食生产函数(模型2):

$$AFPD_t = \beta_0 + \beta_1 AFER_t + \beta_2 AFER_t^2 + \sum_1^n \beta_{i+2} X_{it} \quad (3)$$

式中: t 表示时间;AFPD表示单位面积粮食产量;AFER表示单位面积化肥施用量; X 表示除化肥以外其他影响粮食产量的因素。

1.2.2 混合效应、固定效应和随机效应模型 考虑到各省粮食生产的异质性,本研究选用面板数据来估计全国粮食生产函数。利用面板数据进行模型估计时,

会涉及面板数据回归模型的选择问题。面板数据回归模型主要包含三类:混合效应模型、固定效应模型和随机效应模型。混合效应模型假定各省粮食生产不存在差异,直接将所有数据进行混合,然后再进行估计,这样的估计结果不能反映出不同省份之间的生产力差异对全国粮食生产函数的影响;固定效应模型考虑了各省粮食生产的差异,但假定这种差异是固定的,不随时间变化而变化;而随机效应模型则假定各省粮食生产力的差异是随机变化的。

对于模型选择方面,不同学者相继给出若干判断标准。本研究主要利用Eviews软件中的固定效应和随机效应两种检验方法来选定模型。固定效应检验的原假设是固定效应模型优于混合效应模型,主要依据 F 统计量的显著性来判定。如果 F 统计量显著,则接受原假设;反之,则拒绝原假设。随机效应检验的原假设是随机效应模型优于固定效应模型,主要依据 χ^2 统计量的显著性来判定。如果 χ^2 统计量显著,则接受原假设;反之,则拒绝原假设。

1.2.3 粮食生产函数模型变量选择 本研究主要分析单位面积粮食产量和化肥施用量的关系,已有部分研究只分析化肥投入一个变量对粮食产量的影响,但粮食产量受多种因素影响,除了化肥之外,土地和农业基础设施等资本投入要素、劳动力要素、技术要素投入也是影响粮食总产量的重要因素。基于已有针对粮食产量影响因素的研究结论和成果,本研究在模型中引入了四个控制变量:有效灌溉面积比例、粮食成灾面积比例、单位面积农业劳动力、单位面积农机总动力。但是由于我国的农业劳动力并不是完全从事粮食生产,利用农业劳动力数量作为粮食生产劳动力数量的替代变量效果较差,所以在模型中剔除了单位面积农业劳动力这一变量。根据已有研究成果,公式2中化肥施用量的系数代表化肥施用量弹性,符号预期为正,表示化肥施用量变化1%引起的粮食产量变化的百分比;公式3中,化肥施用量一次项的预期系数为正,二次项的系数预期为负。农机总动力和灌溉面积与粮食产量之间的关系预期是正相关的,成灾面积与粮食产量的关系预期是负相关的(表1)。

2 模型估计结果及化肥对粮食产量变化的贡献率分析

2.1 粮食生产函数模型的估计结果分析

本研究利用Eviews9.0分别计算了公式1和2两种形式的混合效应、固定效应和随机效应模型。由

表 1 模型中变量的基本情况
Table 1 Variables in the model

变量 Variable	计算方法 Computing method	代码 Code	与因变量关系 Relationship with dependent variable
单位面积粮食产量 (kg/hm ²) Grain yield per unit area	粮食产量/粮食播种面积 Grain yield/ grain acreage	AFPD	
单位面积化肥施用量 (kg/hm ²) Fertilizer application rate per unit area	化肥施用总量/农作物播种面积 Total fertilizer application rate/crop planting area	AFER	一次项为正, 二次项为负 First degree term is positive, Quadratic term is negative
单位面积农机动力 (kwh/hm ²) Mechanical power per unit area	农机总动力/农作物播种面积 Total mechanical power/crop planting area	AAMP	正相关 Positive correlation
有效灌溉面积比例 (%) Percentage of effective irrigation area	有效灌溉面积/农作物播种面积 Effective irrigation area/crop planting area	IRAP	正相关 Positive correlation
粮食成灾面积比例 (%) Percentage of grain disaster area	成灾面积/农作物播种面积 Grain disaster area/crop planting area	AFAP	负相关 Negative correlation

于面板数据可能存在异方差和序列相关问题而导致系数显著性检验结果不可靠, 故回归结果的标准差采用了面板修正 (PCSE) 标准差以修正这种偏误。固定效应检验的 F 统计量值分别为 91.67 (模型 1) 和 95.88 (模型 2), 高度显著, 故判定固定效应模型优于混合效应模型。随机效应检验采用豪斯曼检验方法, 模型 1 和 2 的 χ^2 值为 0, 概率为 1, 高度显著, 故判定随机效应模型优于固定效应模型。两个模型的回归结果基本符合假设, 且与已有研究较为一致 (表 2)。化肥施用量系数符号与预期一致, 且显著性水平较高, 表明化肥对单位面积粮食产量增加有正向影响, 模型 2 中化肥二次项系数显著为负, 表明化肥投入对产量的影响符合倒“U”趋势; 两种函数

形式的随机效应模型估计结果显示, 有效灌溉面积比例的系数与假设相反且不显著, 这可能是由于有效灌溉面积数据包含非粮食作物面积, 所以灌溉面积对单位面积粮食产量增加的效果不明显; 两个模型中成灾面积比例系数都是统计显著的, 符号均为负, 说明成灾面积对单位面积粮食产量有明显的负面作用; 两个模型的单位面积农机总动力系数高度显著, 但相比化肥系数而言数值较小, 说明在现有的土地政策下农业机械化虽然在粮食增产方面发挥了一定作用, 但作用仍不明显。农业机械化程度和成灾面积是粮食生产中的技术要素投入, 模型结果说明目前技术要素在粮食增产中的作用仍不及化肥。

表 2 模型回归结果
Table 2 Model results

柯布道格拉斯函数 (模型 1) Cobb-Douglas function (Model 1)				二项式函数 (模型 2) Binomial function (Model 2)			
变量 Variable	混合效应 Pooled effect	固定效应 Fixed effect	随机效应 Random effect	变量 Variable	混合效应 Pooled effect	固定效应 Fixed effect	随机效应 Random effect
常数项 Constant	1.476*** (0.069)	1.928*** (0.130)	1.864*** (0.121)	常数项 Constant	2.813*** (0.141)	3.347*** (0.148)	3.284*** (0.190)
LOG (AFER)	0.213*** (0.014)	0.166*** (0.025)	0.170*** (0.023)	AFER	6.879*** (0.512)	4.938*** (0.495)	5.055*** (0.487)
LOG (IRAP)	0.166*** (0.016)	-0.065** (0.030)	-0.042 (0.027)	AFER ²	-4.510*** (0.429)	-2.706*** (0.347)	-2.801*** (0.343)
LOG (AFAP)	-0.105*** (0.008)	-0.056*** (0.005)	-0.058*** (0.005)	IRAP	0.008*** (0.001)	-0.002 (0.002)	-0.000 (0.002)
LOG (AAMP)	-0.073*** (0.013)	0.085*** (0.013)	0.075*** (0.013)	AFAP	-0.023*** (0.002)	-0.015*** (0.001)	-0.015*** (0.001)
R ²	0.507	0.911	0.583	AAMP	-0.019*** (0.006)	0.027*** (0.007)	0.023*** (0.007)
				R ²	0.500	0.914	0.587

注 (Note): 括号中为 PCSE 稳健标准差 Figures inside brackets were PCSE; ***, **, * 分别表示 1%、5%、10% 的显著性水平 Represent significance levels of 1%, 5% and 10%, respectively.

2.2 化肥施用量弹性及其对粮食产量变化的贡献率分析

已有研究主要通过关联系数、粮食生产函数中的化肥系数和化肥弹性系数来判断化肥对粮食产量的影响。关联系数只能说明粮食产量和化肥投入之间关系的紧密程度，并不能说明化肥投入对粮食产量的具体影响；粮食生产函数中的化肥系数的符号和大小代表化肥对粮食产量的影响方向和程度，但不同形式的方程估计的系数会有差异；化肥投入的弹性系数是指每增加 1% 的化肥投入带来的粮食产量增加的百分比，描述的是化肥变化率与粮食产量变化率的关系，反映的是比例关系，不能反映增量的变化；化肥贡献率则借鉴了全要素生产率的概念，指在粮食产量增加中化肥贡献的百分比，化肥贡献率可利用化肥投入弹性乘以化肥施用量变动的百分比计算获得，该指标剥离了其他因素对产量增加的影响，更能直观说明化肥对粮食产量变化的影响。故本文利用 C-D 和二项式的随机效应模型回归结果求解了化肥施用量的弹性，并计算化肥施用量对粮食产量的贡献率，以此来分析不同时期化肥施用量对粮食产量变化的实际影响。

1) 柯布道格拉斯生产函数形式

将公式 2 两边分别对 AFER 求一阶导数，

$$\frac{dAFPD_t}{dAFER_t} = \alpha_1 \frac{AFPD_t}{AFER_t}$$

则化肥施用量弹性为：

$$E_{d1} = \frac{dAFPD_t}{dAFER_t} \cdot \frac{AFER_t}{AFPD_t} = \alpha_1 \tag{4}$$

2) 二项式生产函数形式

将公式 3 两边分别对 AFER 求导数，

$$\frac{dAFPD_t}{dAFER_t} = \beta_1 + 2\beta_2 AFER_t$$

则化肥施用量的弹性为：

$$E_{d2} = \frac{dAFPD_t}{dAFER_t} \cdot \frac{AFER_t}{AFPD_t} = (\beta_1 + 2\beta_2 AFER_t) \cdot \frac{AFER_t}{AFPD_t} \tag{5}$$

3) 化肥对粮食增产的贡献率

将公式 1 两边全微分，可发现各要素对粮食产量变化的贡献率：

$$\frac{dAFPD_t}{AFPD_t} = \frac{dA_t}{A_t} + \alpha_1 \frac{dAFER_t}{AFER_t} + \sum_{i=1}^n \alpha_{i+1} \frac{dX_{it}}{X_{it}}$$

因此，化肥对粮食增产的贡献率 =

$$E_d \cdot \frac{dAFER_t}{AFER_t} \tag{6}$$

依据公式 4 和 5，结合随机效应模型回归结果，分别求解出化肥施用量的弹性；根据公式 6，结合公式 4 和 5 的结果，可以计算出化肥施用量在粮食增产中的贡献率。模型 1 估计的化肥弹性系数是固定值 0.17；模型 2 估计的化肥弹性系数是可变的，图 3 描述了单位面积粮食产量对化肥施用量的弹性系数的变化趋势，可以发现化肥施用量弹性系数的变化符合倒“U”型曲线，该弹性系数在 2000 年左右达到最大值，2000 年以后开始呈现出明显下降的趋势。这说明化肥投入已经超过了经济学的最优施用量，进入边际报酬递减阶段，在其他要素投入相对稳定的情况下，再增加化肥施用量并不能带来预期的产量增加，反而会增加生产成本、污染农业生产环境。

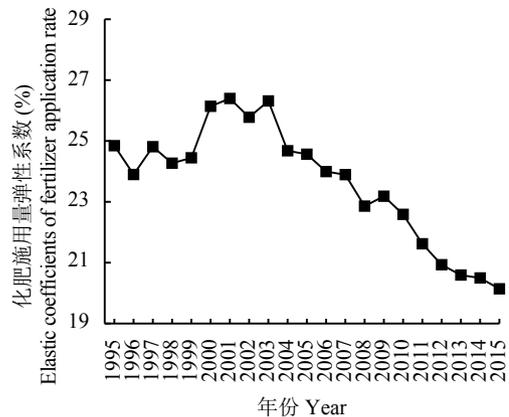


图 3 模型 2 估算的粮食产量对化肥施用量的弹性系数
Fig. 3 Elasticity coefficients of grain yield to fertilizer application rate estimated with Model 2

图 4 描述了单位面积粮食产量变化率以及模型 1 和 2 的化肥施用量对单位面积粮食产量变化的贡献率。其中，模型 1 的贡献率由公式 4 的弹性 E_{d1} 与化肥施用量变化率的乘积计算的固定弹性贡献率，模型 2 的贡献率是由公式 5 的弹性 E_{d2} 与化肥施用量变化率的乘积计算的变动弹性贡献率。从图 4 可以发现，利用模型 1 和 2 估计结果计算的化肥对单位面积粮食产量变化的贡献率均呈现出小幅波动，但总体呈现出下降趋势。

模型 1 的估计结果表明，化肥施用量的固定弹性系数大于其他要素，虽然根据模型 2 估计的化肥施用量的可变弹性系数出现了下降趋势，但在 2015 年仍然保持 0.2 的正弹性值，这意味着只要增加化肥的施用量还能带来一定程度的粮食产量的增加，化肥的增产效力不可替代。正是基于这一指标

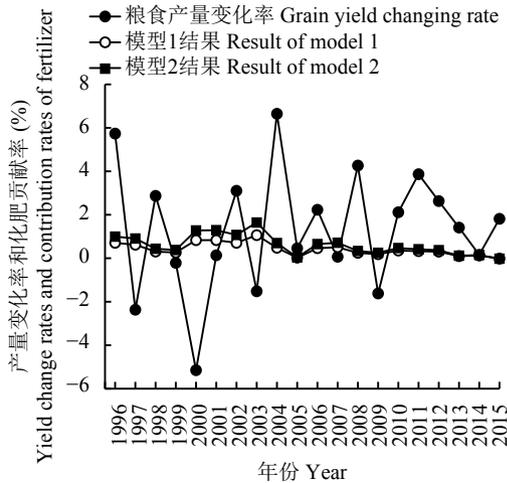


图 4 单位面积粮食产量变化率及由模型估算的化肥贡献率

Fig. 4 Grain yield per unit area change rates and the estimated contribution rates of fertilizers

值的引导, 当前化肥施用总量仍居高不下。然而从图 4 化肥对粮食产量变化贡献率可以看出, 1995—2014 年间的单位面积粮食产量变化波动频繁, 且程度较大, 甚至出现单位面积粮食产量减少的情况, 虽然化肥对粮食产量的变动都呈现正向影响, 但两个模型估计的化肥对粮食产量变动的贡献率均低于 2%, 并且 2005 年为最低值, 仅为 0.03% (模型 1) 和 0.05% (模型 2), 虽然此后略有波动, 总体而言, 化肥对粮食产量变化的贡献率已渐趋近于 0, 这意味着化肥对粮食的增产潜力已基本被挖掘完。2015 年单位面积化肥施用量已呈略微下降趋势, 但粮食产量却实现 1.81% 的增加, 这说明其他生产要素对粮食增产的贡献率在上升, 而化肥对粮食产量增加的作用在下降。

3 结论与建议

本研究根据 1995—2015 年全国 30 个省份的面板数据估计了柯布道格拉斯和二项式函数形式的粮食生产函数模型, 回归结果显示单位面积粮食产量对化肥施用量的弹性系数是正向显著的, 且数值大于单位面积农机总动力等其他要素, 证明了化肥是影响粮食单产的重要因素, 对保障我国粮食产量稳定增长发挥了不可替代的作用。然而根据模型 2 估计的化肥可变弹性系数已经处于下降趋势, 并且依据两个模型结果计算的化肥在粮食变化中的贡献率均逐渐趋近于零, 这说明在目前中国粮食产量增加过程中化肥的作用已经很低, 继续增加化肥施用量并不会带来产量大幅增加。2015 年粮食投入产出数

据分析结果也说明适当减少化肥施用量并不会导致粮食产量大幅减少, 相反由于防灾技术、农业机械化的提高, 其他要素对粮食产量的增加发挥了更大的作用。故建议一方面在从国家层面严格控制化肥施用量的继续增加, 在稳定化肥投入总量的同时, 通过调整施肥方式、优化施肥结构、对传统化肥增效改性等措施提高化肥的增产效率^[22]; 另一方面加强农业生产和防灾技术研发与推广、继续提高农业机械化程度, 进一步发挥其他技术要素在提高化肥利用效率、促进粮食增产中的作用。

参考文献:

- [1] 林源, 马骥. 农户粮食生产中化肥施用的经济水平测算—以华北平原小麦种植户为例[J]. 农业技术经济, 2013, (1): 25–31.
Lin Y, Ma J. Calculation of economic level of fertilizer application in household grain production—a case study of wheat growers in north China Plain[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2013, (1): 25–31.
- [2] Adviento-Borbe M A A, Linquist B. Assessing fertilizer N placement on CH₄ and N₂O emissions in irrigated rice systems[J]. Geoderma, 2016, 266: 40–45.
- [3] Qian C, Yu Y, Gong X, *et al.* Response of grain yield to plant density and nitrogen rate in spring maize hybrids released from 1970 to 2010 in Northeast China[J]. The Crop Journal, 2016, 4(6): 459–467.
- [4] 曾希柏, 陈同斌, 林忠辉, 胡清秀. 中国粮食生产潜力和化肥增产效率的区域分异[J]. 地理学报, 2002, (5): 539–546.
Zeng X B, Chen T X, Lin Z H, Hu Q X. Grain productivity and its potential as related to fertilizer consumption among different counties of China[J]. Journal of Geographical Science, 2002, (5): 539–546.
- [5] 赵俊晔, 李秀峰, 王川. 近年我国粮食产量变化的主要影响因素分析[J]. 中国食物与营养, 2006, (9): 9–12.
Zhao J Y, Li X F, Wang C. The main influencing factors of grain yield changes in China in recent years[J]. Food and Nutrition in China, 2006, (9): 9–12.
- [6] 鲍先琬. 化肥、环境与中国农业的可持续发展[J]. 统计与决策, 2007, (1): 73–74.
Bao X W. Fertilizer, environment and agriculture sustainable development in China[J]. Statistics and Decision, 2007, (1): 73–74.
- [7] 王祖力, 肖海峰. 化肥施用对粮食产量增长的作用分析[J]. 农业经济问题, 2008, (8): 65–68.
Wang Z L, Xiao H F. Effect of fertilizer application on grain yield growth[J]. Issues in Agricultural Economy, 2008, (8): 65–68.
- [8] Nathaniel D M, James S G, *et al.* Closing yield gap through nutrient and water management[J]. Nature, 2012, 490(7419): 254–257.
- [9] 李静, 李晶瑜. 中国粮食生产的化肥利用效率及决定因素研究[J]. 农业现代化研究, 2011, 32(5): 565–568.
Li J, Li J Y. Fertilizer using efficiency of China's grain production and its determining factors[J]. Research of Agricultural Modernization, 2011, 32(5): 565–568.
- [10] Liu Y N, Li Y C, Peng Z P, *et al.* Effects of different nitrogen fertilizer management practices on wheat yields and N₂O emissions

- from wheat fields in North China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(6): 1184–1191.
- [11] 周慧秋. 灰模型GM(1, N)在东北地区粮食综合生产能力预测中的应用研究[J]. *农业技术经济*, 2006, (3): 58–62.
Zhou H Q. Application of grey model GM (1, N) in predicting grain comprehensive production capacity in northeast China[J]. *Journal of Agro-technical Economics*, 2006, (3): 58–62.
- [12] 谢杰. 中国粮食生产函数的构建与计量分析[J]. *统计与决策*, 2007, (20): 74–76.
Xie J. Construction and econometric analysis of grain production function in China[J]. *Statistics and Decision*, 2007, (20): 74–76.
- [13] 尹世久, 吴林海, 张勇. 我国粮食产量波动影响因素的经验分析[J]. *系统工程理论与实践*, 2009, 29(10): 28–34.
Yin S J, Wu L H, Zhang Y. Empirical analysis of the factors influencing grain yield[J]. *Systems Engineering Theory and Practice*, 2009, 29(10): 28–34.
- [14] 李红莉, 张卫峰, 张福锁, 等. 中国主要粮食作物化肥施用量与效率变化分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(5): 1136–1143.
Li H L, Zhang W F, Zhang F S, *et al.* Chemical fertilizer use and efficiency change of main grain crops in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2010, 16(5): 1136–1143.
- [15] Cerrato M E, Blackmer A M. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer[J]. *Agronomy Journal*, 1990, 82(1): 138–143.
- [16] Bélanger G, Walsh J R, Richards J E, *et al.* Comparison of three statistical models describing potato yield response to nitrogen fertilizer[J]. *Agronomy Journal*, 2000, 92(5): 902–908.
- [17] 张锋, 胡浩. 中国化肥投入的污染效应及其区域差异分析[J]. *湖南农业大学学报(社会科学版)*, 2011, (6): 33–38.
- Zhang F, Hu H. Pollution effect of fertilizer application and regional differences in China[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Social Science Edition)*, 2011, (6): 33–38.
- [18] 黄季焜, 王巧军, 陈庆根. 农业生产资源的合理配置研究: 水稻生产的投入产出分析[J]. *中国水稻科学*, 1995, (1): 39–44.
Huang J K, Wang Q J, Chen Q G. Agricultural production resources allocation: Rice input and output analysis[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 1995, (1): 39–44.
- [19] 魏津瑜, 陈锐, 刘曰波. 影响我国粮食产量的因素分析及对策研究[J]. *中国农机化学报*, 2008, (5): 56–59.
Wei J Y, Chen R, Liu Y B. Analysis on the factors affecting grain yield in China and its countermeasures[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2008, (5): 56–59.
- [20] 吴英杰. 中国粮食产量影响因素实证分析: 1978—2005[J]. *经济研究导刊*, 2009, (7): 24–26.
Wu Y J. Empirical analysis on the factors affecting grain yield in China: 1978-2005[J]. *Economic Research Guide*, 2009, (7): 24–26.
- [21] 张立庠, 彭辉, 靳兴初. 不同阶段化肥施用量对我国粮食产量的影响分析—基于1952—2006年30个省份的面板数据[J]. *农业技术经济*, 2008, (4): 85–94.
Zhang L X, Peng H, Jin X C. Effect of fertilizer applying quantity on grain yield in China at different stages-based on panel data of 30 provinces in 1952-2006[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2008, (4): 85–94.
- [22] 赵秉强. 传统化肥增效改性提升产品性能与功能[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(1): 1–7.
Zhao B Q. Modification of conventional fertilizers for enhanced property and function[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(1): 1–7.