

玉米生产环境成本及全要素生产率的时空研究

王欢¹, 穆月英^{1*}, 侯玲玲²

(1. 中国农业大学经济管理学院, 北京 100083; 2. 北京大学现代农业学院, 北京 100871)

摘要: 论文在把玉米生产省(区)按生产能力划分为三类产区的基础上, 纳入环境成本, 系统分析了2004—2014年各地区玉米生产的环境成本全要素生产率及其分解的变化, 并明确了三类产区在未来玉米产量保障中的地位和作用。研究结果表明: 1) 玉米生产环境成本全要素生产率呈现下降趋势, 生产方式整体仍属于粗放型, 同时玉米生产正转向劳动节约型和环境可持续型; 2) 第一主产区具有产量和环境可持续性优势, 未来仍将是我国玉米供给主要产区, 第二主产区和其他产区在要素管理和技术水平以及环境可持续性方面仍有待提高, 能够为未来玉米需求提供更高保障。

关键词: 玉米生产; 全要素生产率; 环境成本; DEA-Malmquist

中图分类号: X22; F326.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3037(2017)07-1204-13

玉米作为中国三大粮食作物之一, 除满足最基本的口粮需求外, 更是畜牧业发展的基础。随畜产品需求的不断增长, 玉米产业迅速成长为国民经济的重要部分。2008年实施玉米临储政策以来, 我国玉米种植面积大幅增加。然而受国内消费需求增长放缓、玉米加工产品进口冲击等影响, 造成玉米市场供过于求。为调节玉米产量, 缓解收储量、财政补贴等负担加重的问题, 2015年农业部发布了“关于‘镰刀弯’地区玉米结构调整的指导意见”, 2016年国家发改委等部门提出取消几个玉米主产省的临时收储政策。另一方面, 已有研究表明, 长期来看我国未来玉米消费量增长快于生产量, 可能产生较大的供需缺口^[1-2]。在种植相对收益和播种面积双双下降、主产区临时收储政策变动的背景下, 玉米生产潜力即生产效率是能否保证未来玉米供应的关键。

从投入产出看, 我国用占世界35%的化肥投入量生产了占世界21%的粮食^[3]。投入物的国内区域分布上, 粮食主产区化肥、农药投入总额占全国50%以上^[4]。化肥、农药等过量使用, 最终会影响生产系统的效率和可持续性^[5]。同时, 随着我国机械化作业的不断发展, 农业机械电力投入带来的温室效应对农业生产环境产生了负面影响。因此, 在探讨玉米生产效率问题时, 应当考虑环境因素, 从可持续发展的角度评估玉米生产潜力。

关于粮食作物生产效率问题, 已有研究多从以下几个方面进行: 一是针对粮食生产效率的地区比较研究。如对各地粮食生产潜力及实际效率情况的对比分析^[6-7]。主产区是

收稿日期: 2016-06-27; 修订日期: 2017-01-17。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300210); 北京市社科基金重点项目(15JGA020); 现代农业产业技术体系北京市果类蔬菜产业创新团队项目(BAIC01-2016)。[**Foundation items:** National Key Research and Development Plan, No. 2016YFD0300210; Key Project of Beijing Social Science Fund, No. 15JGA020; Fruit Vegetables Industry Technology System of Beijing Innovation Team, No. BAIC01-2016.]

第一作者简介: 王欢(1991-), 女, 陕西宝鸡人, 博士研究生, 主要研究方向为农业经济理论与政策。E-mail: abcwanghuan@163.com

***通信作者简介:** 穆月英(1963-), 女, 山西大同人, 博士(后), 教授, 博士生导师, 主要研究方向为农业经济理论与政策。E-mail: yueyingmu@cau.edu.cn

我国粮食生产问题的关键,许多学者针对主产区生产效率进行了研究,如针对某一主产区省生产效率的分析^[8-9]、主产区生产效率的对比^[10-13]以及农户层面生产技术效率分析^[14-17]。二是对粮食生产效率动态变化规律探究。在稳定粮食生产和饲料粮供给的诉求下,提高生产效率是提升粮食生产能力的必要渠道,已有研究主要对中国粮食生产的效率增长情况及影响因素展开了讨论^[18-20],同时验证了我国粮食生产技术效率的收敛趋势^[21-23]。

通过对已有文献进行整理,发现粮食作物生产效率相关研究多集中于主产区各时期生产效率变化的分析,较少考虑生产的资源环境约束。我国玉米种植范围较广,非主产区对保障玉米供应的作用不容忽视。从环境可持续角度来看,环境成本是评价玉米生产潜力的重要隐性成本。生产效率有多种衡量方式,在高集约化玉米生产方式和环境约束的背景下,我国玉米产量提高有赖于要素投入以外的因素,因此,代表技术进步、组织生产创新等因素的全要素生产率(Total Factor Productivity, TFP)能够较好地反映我国未来的玉米生产潜力。

基于上述考虑,本文选择化肥、农药、机械电力等3项主要投入进行玉米生产环境成本估算,将其纳入TFP分析的投入要素,运用Malmquist指数方法从不同产区和环境友好型生产潜力演变角度对玉米环境成本TFP及其分解的时间动态变化和空间产区差异进行分析。

1 模型推导与TFP表达

生产前沿面TFP测算模型可分为参数和非参数方法。非参数方法测算TFP主要依靠DEA-Malmquist指数法,具有不需对生产函数结构做先验假定、不需估计参数、允许技术非效率行为存在以及能对TFP变动进行分解等优点。鉴于玉米生产过程中投入的可控性,本文采用投入导向型、可变规模报酬的DEA-Malmquist指数法,考虑规模报酬变化,将技术效率(或称综合效率,TE)变化分解为纯技术效率(PTE)和规模效率(SE)变化。

对于投入 $x \in R_+^N$,产出 $y \in R_+^M$,生产可能集 S^t , s 期生产活动相对于当期生产可能集 S^t 的基于投入定义的距离函数及 t 到 $t+1$ 期的综合Malmquist指数可以表示为^[24]:

$$D_i^t(x^s, y^s) = \sup \{ \lambda \mid (x^s / \lambda, y^s) \in S^t \} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} M(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) &= (M_t \times M_{t+1})^{1/2} = \left[\frac{D_i^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_i^t(x^t, y^t)} \times \frac{D_i^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_i^{t+1}(x^t, y^t)} \right]^{1/2} \\ &= Effch \times Techch \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $Effch$ 为技术效率变化; $Techch$ 为技术水平变化。Malmquist指数大于1代表TFP增长;小于1代表TFP下降;等于1代表TFP水平保持不变。

$$Effch = \frac{D_i^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_i^t(x^t, y^t)} \quad (3)$$

$$Techch = \left[\frac{D_i^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_i^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})} \times \frac{D_i^t(x^t, y^t)}{D_i^{t+1}(x^t, y^t)} \right]^{1/2} \quad (4)$$

$Effch$ 代表规模报酬不变且要素自由处置下的相对效率变化,反映决策单元(Decision Making Unit, DMU)对生产可能性边界的追赶,大于1说明DMU向技术边界靠近,

相对技术效率提高。*Techch*代表技术进步,测度技术边界的移动,大于1代表技术边界外扩,即技术进步,反之代表技术边界内陷,即技术“退步”。

根据当期 DEA-Malmquist (Contemporaneous DEA-Malmquist) 和序列 DEA-Malmquist (Sequential DEA-Malmquist) 指数^[25]的定义,可以将技术“退步”的原因解释为通过产能利用率 (Capacity Utilization) 和劳动力储备 (Labor Hoarding) 影响技术边界扩张的“商业周期”因素 (Business Cycle)^[26-27]。

可变规模报酬假定下,技术效率变化可以进一步分解为纯技术效率和规模效率的变化。纯技术效率代表制度和管理水平,规模效率代表在一定制度和管理水平下,现有规模与最优规模的差异。

2 玉米生产环境成本的测算方法

关于农业生产相关环境成本核算的方法一直以来是学界研究的重点,目前尚没有针对农业生产各个环节所产生环境成本进行全面测算的成熟体系。本文考虑到玉米生产中引起环境问题的3类主要投入,将对化肥、农药、机械电力投入的环境成本分别进行估算,加总得到玉米生产总环境成本。

2.1 化肥环境成本的生命能值测算

针对化肥环境成本核算的方法中以市场价值法和生命能值分析法两类较为常见^[28],为避免受市场价格和环境标准水平设定的影响,本文将采用生命能值分析法 (Emergy Analysis, EMA) 估算玉米生产化肥施用的环境成本。EMA的基本思想是将污染影响转化为能值损失再进行货币化处理^[29],以污染物剂量估算为基础,能够得到较为科学可靠的结果,是目前化肥环境成本核算研究中主要运用的方法^[30-31],可分为5个步骤:

第一步,确定不同渠道化肥的污染物种类。本文中大气污染物包括氨气、氧化二氮、氮氧化物,土壤污染物为重金属镉,水体污染物为硝态氮和铵态氮。

第二步,根据氮磷元素的转移和转化比例以及污染物产生剂量的研究成果,测算化肥施用所产生污染物的影响剂量:

$$Dose_i = M \times C_{ci} \times (W_c/W_f) \quad (5)$$

式中: $Dose_i$ 表示污染物*i*产生的剂量 (kg); M 表示氮肥或磷肥施用折纯量 (kg); C_{ci} 表示营养元素流转系数,即氮、磷肥扩散到环境并转化为污染物的比例,是不同污染渠道排放或残留比例与污染物剂量比例的乘积,来自已有研究成果^[28,32-33]; W_c/W_f 是污染物与氮或五氧化二磷的分子量之比。

第三步,采用伤残调整生命年 (Disability Adjusted Life Years, DALY) 法,估算污染物对人类健康的影响:

$$DALY_i = C_{di} \times Dose_i \quad (6)$$

式中: $DALY_i$ 表示污染造成的生命损害年累计数 (a); C_{di} 为污染物影响强度 (a/kg),取值采用Eco_indicator 99的系列评估值。

第四步,估算化肥施用对环境质量影响的能值:

$$U = \sum_{i=1}^n Emergy_i = \sum_{i=1}^n (DALY_i \times C_m) \quad (7)$$

式中: U 代表化肥环境影响总数值数 (seJ); $Emergy_i$ 代表污染物 i 的能数值; C_m 表示单位劳动力年能值消费量, 根据 Odum^[34], 取 9.35×10^{13} seJ/a。

第五步, 根据我国各年能值货币比率数, 将环境影响的总数值数折算为经济成本:

$$E_{\text{dollar}} = U/C_g \quad (8)$$

式中: C_g 表示单位宏观经济价值的能值载荷 (seJ/元), 参照李双成等^[35]对 1996 年我国单位 GDP 能值载荷值, 按统计年鉴公布的物质流基础数据进行相应比例调整得到历年能值载荷。

2.2 农药环境成本的农药环境核算

农药对环境的影响较为复杂, 由于缺少针对我国系统、全面的农药剂量-反应研究, 难以直接估算出农药环境成本。已有关于农药环境成本的估算主要是利用现有资料信息的量化处理^[36], 存在连续性差的问题。本研究拟采用 Leach 等^[37]提出的农药环境核算 (Pesticide Environmental Accounting, PEA) 方法。PEA 方法是在环境影响指数 (Environmental Impact Quotient, EIQ)^[38]基础上对农药环境影响进行货币化的方法。该方法考虑到农药对农药施用者、农产品采摘者、消费者、地表水、水生态、鸟类种群、蜜蜂种群以及益虫的影响, 以发达国家农药环境成本为基线折算估计缺乏农药污染数据的发展中国家的环境成本^[39], 具体计算公式如下:

$$TEC_p = rate_p \times \frac{active_p}{100} \times \sum_{c=1}^8 [EC_c \times F_c \times (F_{agemp}|c=1,2)] \times F_{gdppc} \quad (9)$$

式中: TEC_p 为根据 PEA 计算的农药 p 的总环境成本 (元); $rate_p$ 为农药 p 施用总量 (kg); $active_p$ 是农药产品中有效成分比例; EC_c 是单位农药环境成本基线, 根据 Leach 等的研究结果, 将其转换为 2004 年人民币价格; F_c 为农药毒性折算系数, 根据 EIQ 指数对农药毒性的分类赋予不同折算系数^[38]; F_{agemp} 为农药接触人数调整系数, 等于中国与发达国家农业劳动力占全部劳动力比例的比值; F_{gdppc} 为劳动力成本调整系数, 等于中国与发达国家人均 GDP 的比值。发达国家指标水平为德国、英国、美国以 GDP 总量为权重的加权平均, 采用购买力平价 GDP。由于农药种类较多, 本文选择除草剂莠去津和杀虫剂乐果、乙拌磷 3 类在玉米生产中使用较为广泛的农药进行研究, 农药使用比例来自已有研究^[40]。

2.3 机械电力环境成本估算

机械和电力投入中引起温室效应的主要是 CO_2 。对机械和电力投入的环境成本估算主要分为 3 个步骤。第一是对农业整体和玉米生产中的 CO_2 排放量进行估算。本文 CO_2 排放量估算采用农业生产各部分碳转换系数进行计算^[41]。考虑到化肥生产、农作物生长以及机械、电力使用, 构建 CO_2 排放量估计公式:

$$CO_2 = (k_1 \times G_f + k_2 \times A_{crops} + k_3 \times W_{machine} + k_4 \times P_{electric}) \times \frac{44}{12\ 000} \quad (10)$$

式中: G_f 为化肥施用量 (t); A_{crops} 为农作物种植面积 (hm^2); $W_{machine}$ 为玉米生产机械总动力 (kW); $P_{electric}$ 为玉米生产用电总量 (kWh); k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 为碳转换系数, 其中 $k_1 = 857.54 \text{ kg C} \cdot \text{t}^{-1}$, $k_2 = 16.47 \text{ kg C} \cdot \text{hm}^{-2}$, $k_3 = 0.18 \text{ kg C} \cdot \text{kW}^{-1}$, $k_4 = 0.18 \text{ kg C} \cdot (\text{kWh})^{-1}$ 。在计算玉米 CO_2 排放量时, 为避免重复, 仅考虑机械和电力投入造成的排放量。

第二是根据现有资料对环境影响货币化。已有研究表明, 发展中国家温室气体排放引起气候变化所带来的环境成本占 GDP 的 5% 左右, CO_2 对全球气候变暖的增温贡献为

60%，大气中20%的CO₂来源于农业活动和土地利用方式转换等过程^[36,42]。代入各年GDP总值，估算出农业CO₂排放的总环境成本。

第三利用总环境成本和总排放量计算单位排放环境成本，并与第一步得到的玉米机械电力CO₂排放量相乘得到玉米生产机械电力投入的环境成本。

3 数据来源、变量设置及模型测算

3.1 数据来源与变量设置

我国北方春玉米区和黄淮海夏玉米区中11个省（区）种植面积在100万hm²以上，种植面积和产量占全国的81.9%和83.1%，是玉米主产区^[43]。考虑到种植规模差异，以种植面积200万hm²为限可将玉米主产区分为第一主产区和第二主产区。为了考察主产区以外其他产区的供给调节和保障作用，选取9个省（区）作为其他产区样本。总样本玉米总产量和总播种面积占全国的97%以上，代表性较强。各类产区所包含省（区）及产区特点见表1。

表1 全国玉米产区分类

Table 1 Classification of corn production districts in China

产区	省（区）	产区特点
第一主产区	河北、内蒙古、黑龙江、吉林、辽宁、山东、河南	种植面积在200万hm ² 以上，总产量占全国比重65%，平均玉米播种面积比例42.81%
第二主产区	山西、四川、云南、陕西	种植面积在100万hm ² 以上，总产量占全国比重的17%，平均玉米播种面积比例26.72%
其他产区	江苏、安徽、湖北、广西、重庆、贵州、甘肃、宁夏、新疆	种植面积在100万hm ² 以下，总产量占全国比重的15%左右，平均玉米播种面积比例13.62%

测算环境成本和DEA-Malmquist指数以每公顷玉米的产出和投入为标准。产出变量选取玉米产量（kg），投入变量选取玉米生产过程中几类主要投入：种子费（元）、化肥费（元）、农药费（元）、机械作业费（元）、用工（d）以及环境成本（元）。数据来自《中国农村统计年鉴》、《全国农产品成本收益资料汇编》、《中国统计年鉴》、《中国电力年鉴》、《电力工业统计资料汇编》以及世界银行。为剔除物价影响，投入费用和环境成本分别以2004年为基期按各省玉米生产价格指数和GDP平减指数平减^①。

3.2 变量的描述性统计

3类产区玉米单产及投入随时间变化趋势如图1所示。由图1(a)可知，单产整体呈上升趋势，第一主产区单产最高，其次是其他产区，表明第一主产区在单产方面具有优势，第二主产区虽然具有总规模优势，但单产方面仍有较大进步空间；由图1(b)可知，种子费和农药费整体呈增长趋势，各产区种子费差距较小，第一主产区种子费最低，第二主产区与其他产区比较相近，第一主产区农药投入最大，其次是其他产区，第二主产区最少，各产区的分布特点反映出种子与农药投入间的互补性；由图1(c)可知，劳动力投入持续降低，机械费持续增加，两项投入相反的变化趋势反映出人力被机械代替的现象，第一主产区劳动力投入最低而机械费用投入最高，表明具有较高的机械化作业水

①鉴于数据的可得性，2004—2012年采用各省（区）玉米生产价格指数进行平减，2013和2014年采用各省（区）农产品生产价格指数进行平减。

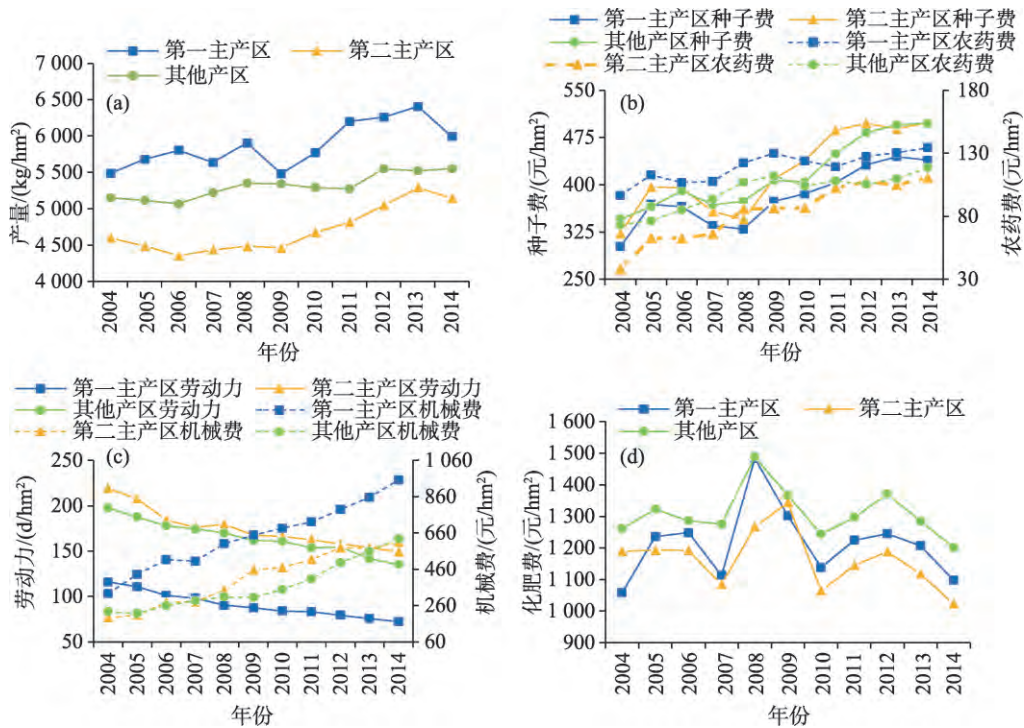


图1 2004—2014年各产区玉米产出及投入变化趋势

Fig. 1 Evolution of corn production yield and costs in three production districts from 2004 to 2014

平; 由图1(d)可知, 3类产区的化肥费用波动较为相似, 均以2008—2009年为顶点呈现倒“U”型变化特征, 这与2007年以来我国粮食化肥使用强度的降低趋势有关^[44], 各产区相差较小。

3.3 加入环境成本的 TFP 测算及分析

3.3.1 玉米生产的环境成本

考察期内各省(区)环境成本估算结果如表2所示。2004—2014年平均总环境成本为232.60元/hm², 高于农药费, 是构成玉米生产成本的重要部分。环境成本构成中化肥的环境成本最高, 为148元/hm², 约占总环境成本的63.63%。从各省(区)来看, 总环境成本最高的为甘肃省, 达到了314.81元/hm², 最低的贵州省为168.04元/hm², 可见不同省(区)之间环境成本差异较大。产区对比上, 第一主产区总环境成本低于其他两类产区, 为212.20元/hm², 第二主产区和其他产区基本相当, 分别为244.26元/hm²和243.29元/hm²。各产区环境成本构成表明, 第一主产区化肥环境成本远低于其他两类产区, 农药和机械电力环境成本最高。说明得益于化肥的合理施用, 第一主产区具有一定的环境可持续优势。

从环境成本及其构成的变化来看(图2), 3类产区环境成本存在缓慢上升趋势, 其中第一产区环境成本上升幅度最小, 表明第一主产区在向环境可持续型生产转型方面存在一定优势。从环境成本构成来看, 化肥始终是环境成本的主要来源, 但化肥环境成本占比存在下降趋势, 表明随生产方式的转变, 化肥施用逐渐合理化, 对环境成本的贡献率降低。

表2 2004—2014年各省(区)玉米生产环境成本平均值

Table 2 Average environmental cost of each province from 2004 to 2014

(元/hm²)

产区分类	省(区)	化肥环境成本	农药环境成本	机械电力环境成本	总环境成本
第一主产区	河北	101.93	26.91	87.85	216.70
	内蒙古	133.81	16.76	93.50	244.08
	黑龙江	75.04	22.30	100.30	197.64
	吉林	79.30	33.88	97.90	211.07
	辽宁	103.53	23.12	64.68	191.33
	山东	116.25	32.76	79.04	228.05
	河南	100.20	30.70	65.64	196.53
	平均	101.44	26.63	84.13	212.20
第二主产区	山西	114.77	11.23	84.46	210.46
	四川	153.75	22.99	37.29	214.04
	云南	217.24	27.95	16.17	261.37
	陕西	203.75	15.48	71.93	291.16
	平均	172.38	19.41	52.46	244.26
其他产区	江苏	170.84	30.48	55.08	256.41
	安徽	148.42	29.39	50.94	228.74
	湖北	178.42	26.82	29.29	234.54
	广西	189.71	10.48	21.47	221.67
	重庆	162.02	17.47	6.13	185.62
	贵州	144.47	13.62	9.94	168.04
	甘肃	203.66	19.24	91.91	314.81
	宁夏	191.30	31.04	63.24	285.58
	新疆	171.52	15.25	107.45	294.21
	平均	173.37	21.53	48.39	243.29
	全部平均		148.00	22.89	61.71

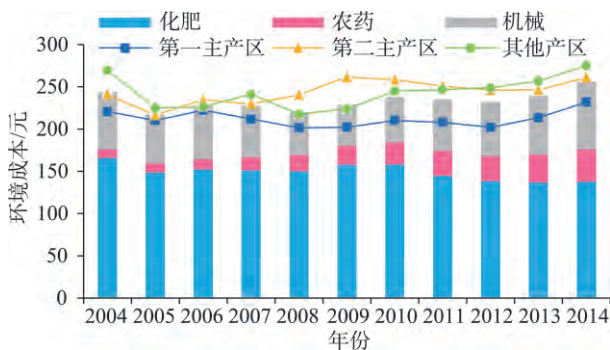


图2 2004—2014年各产区玉米生产环境成本及其结构变化趋势

Fig. 2 Structural evolution of environmental cost per unit area

玉米生产从单一产量目标向产量和环境可持续双重目标转型中伴随着生产模式的转变,这一过程可能存在新生产模式与自身发展条件不适应的情况,造成产能未能完全被利

3.3.2 环境成本 TFP 的时间动态变化

利用 DEAP 2.1 对环境成本 TFP 进行测算,结果如表 3。整体来看,除 2009—2010、2011—2012、2012—2013 年外,大多数年份环境成本 TFP 下降,说明加入环境成本后玉米的生产潜力存在下降趋势。环境成本 TFP 变化与技术进步一致,表明技术“退步”是环境成本 TFP 下降的主要原因。

技术“退步”的原因可以从两个方面解释。首先是生产模式的转变。

表3 2004—2014年样本总体环境成本TFP变化及其分解

Table 3 Evolution and decomposition of total factor productivity of all samples from 2004 to 2014

时段	技术效率	技术进步	纯技术效率	规模效率	TFP
2004—2005年	0.981	0.927	1.015	0.967	0.910
2005—2006年	0.993	0.945	0.991	1.002	0.939
2006—2007年	0.976	1.015	0.985	0.990	0.990
2007—2008年	1.012	0.955	1.007	1.004	0.967
2008—2009年	1.029	0.922	0.984	1.046	0.949
2009—2010年	1.032	0.973	1.021	1.011	1.004
2010—2011年	1.002	0.940	0.997	1.005	0.941
2011—2012年	1.000	1.009	0.990	1.009	1.008
2012—2013年	1.004	1.036	1.020	0.984	1.040
2013—2014年	0.983	0.942	1.003	0.981	0.926
平均	1.001	0.966	1.001	1.000	0.967

注:根据环境成本TFP测算。下同。

用,形成技术边界内陷。其次是劳动力的投入不足。一方面我国农村青壮劳动力外出打工的情况十分普遍,造成技术创新和新技术引进不足,另一方面玉米价格偏低影响了农民技术和要素投入的积极性^[45-46]。

技术效率在波动中上升,是促进环境成本TFP增长的因素。表明对资源管理效率的提高使整体生产向最优生产可能性边界靠近。从技术效率变化的分解来看,技术效率的增加主要来自于纯技术效率,表明管理和技术水平提高是技术效率增长的主要动力。

3.3.3 环境成本TFP的产区比较

各产区玉米生产环境成本TFP变化及分解如表4。TFP整体呈下降趋势;从产区对比来看,第一主产区环境成本TFP下降最慢,其他产区下降最快。表明综合考虑了玉米生产的要素投入和环境成本后,第一主产区在生产潜力上具有相对优势。

从TFP分解来看,第一主产区技术效率和技术进步均出现“恶化”。技术效率水平降低主要来自规模效率,表明考察期内第一主产区投入规模逐渐与最优规模背离。由于规模效率的提高,第二主产区和其他产区技术效率分别以年均0.2%和0.8%的速度增长,表明投入规模优化带来技术效率提高。但存在技术“退步”,原因有3个方面:第一,两类产区在环境友好型生产转型中相对落后,在技术追赶中可能因为依赖已有模式造成与自身发展条件的不适应,阻碍生产潜能利用;第二,受自然条件和产业发展水平限制,两类产区规模化和专业化不足,使生产潜能难以完全发挥;第三,非优势产区农户常常兼业化程度更高,生产资料投入和技术创新不足,形成技术边界内陷。

3.3.4 玉米生产各投入产出比的变化

为探究环境成本TFP变化原因及产区差异,本文将从各项投入产出比变化方面做进一步分析。各项投入产出比变化的计算公式如下:

$$\Delta Z_i = \frac{y_{14}}{x_{i,14}} - \frac{y_{04}}{x_{i,04}} \quad (11)$$

式中: ΔZ_i 表示第*i*种投入的投入产出比变化值; y_{14} 和 y_{04} 分别表示2014和2004年玉米单产; $x_{i,14}$ 和 $x_{i,04}$ 表示2014和2004年第*i*种投入。投入产出比的变化可以从单要素角度

表4 各省(区)2004—2014年平均年环境成本TFP变化及其分解

Table 4 Average environmental TFP in each province from 2004 to 2014

产区分类	省(区)	技术效率	技术进步	纯技术效率	规模效率	TFP
第一主产区	河北	1.002	1.012	1.011	0.992	1.014
	内蒙古	1.001	0.976	1.000	1.001	0.978
	黑龙江	1.000	1.027	1.000	1.000	1.027
	吉林	1.000	1.010	1.000	1.000	1.010
	辽宁	0.981	0.967	1.000	0.981	0.949
	山东	0.983	0.983	0.986	0.996	0.966
	河南	0.978	0.991	0.992	0.986	0.969
	平均	0.992	0.995	0.998	0.994	0.988
第二主产区	山西	0.997	0.915	1.000	0.997	0.912
	四川	1.000	0.995	1.000	1.000	0.995
	云南	1.018	0.973	1.000	1.018	0.990
	陕西	0.993	0.980	0.994	0.999	0.974
	平均	1.002	0.966	0.999	1.004	0.968
其他产区	江苏	1.003	0.962	1.004	0.999	0.966
	安徽	1.005	0.974	1.000	1.005	0.979
	湖北	0.977	0.962	0.998	0.979	0.940
	广西	1.057	1.014	1.002	1.055	1.072
	重庆	1.000	0.862	1.000	1.000	0.862
	贵州	0.987	0.822	1.000	0.987	0.811
	甘肃	1.041	0.963	1.038	1.003	1.002
	宁夏	1.001	0.981	1.001	1.000	0.982
	新疆	1.000	0.970	1.000	1.000	0.970
	平均	1.008	0.946	1.005	1.003	0.954
全部平均	1.001	0.966	1.001	1.000	0.967	

表5 2004—2014年各产区各投入产出比的变化

Table 5 Output-input ratio in each production district from 2004 to 2014

	化肥 (kg/元)	农药 (kg/元)	机械/ (kg/元)	种子 (kg/元)	环境成本 (kg/元)	劳动力 (kg/d)
第一主产区	0.28	-12.23	-10.54	-4.51	0.99	35.56
第二主产区	1.17	-74.87	-15.30	-3.92	0.62	13.49
其他产区	0.54	-23.64	-13.97	-3.75	1.08	14.98
平均	0.66	-36.92	-13.27	-4.06	0.90	21.34

注：根据2004、2014年投入产出数据计算。

体现生产效率的变化。如表5, 农药、机械、种子方面存在显著下降。表明单产的增长一定程度上是以更大的要素投入为代价, 反映出我国玉米粗放型生产模式。

化肥、环境成本和劳动力投入产出比有所提高。化肥投入产出比增长代表施肥效率的提高, 与前文结论一致, 环境

成本投入产出比增长代表单位产出环境损失的下降, 生产环境向可持续型转变。劳动力投入产出比增长表明机械等其他投入对劳动力的替代, 生产向劳动力节约型转变。从各产区来看, 第一主产区环境成本投入产出比略低于其他产区但高于第二主产区, 劳动力投入产出比增长远高于其他两类地区。表明第一主产区生产现代化程度处于领先地位, 但环境友好型转变速度方面有提高的空间。

4 结论和建议

本文利用2004—2014年全国20个玉米生产省(区)的投入产出数据,在将其分为第一主产区、第二主产区、其他产区的基础上,对比分析了纳入环境影响的环境成本TFP及其分解的差异,得出的主要结论如下:

第一,玉米单产普遍增长,但目前玉米生产仍为粗放式增长。第二,由于生产能力的利用和劳动力储备不足,造成技术“退步”普遍存在,是玉米生产环境成本TFP降低的主要根源。技术效率呈增长趋势,是拉动环境成本TFP增长的主要动力。第三,化肥、环境成本和劳动力投入产出比呈增长趋势,化肥利用效率提高,环境成本贡献率降低,我国玉米生产向可持续型和劳动力节约型转变。第四,第一主产区在单产、总产量、机械化程度、环境可持续以及环境成本TFP方面都具有优势,是保障我国玉米供应的有利支撑;第二主产区具有较好的玉米生产基础,技术效率存在增长趋势,能为玉米供应提供补充;其他产区单产具有一定优势,可持续转变速度也处于领先地位,但环境成本TFP存在劣势。

针对以上结论,提出以下对策建议:注重新技术的推广和普及,优化要素投入,降低环境成本;第一主产区应以优化生产规模和推广环境友好型技术为主提高生产优势和环境友好型生产转变速度;第二主产区应以提高投入要素管理水平为主,为未来玉米供给提供更高保障;其他产区应继续发挥后发优势,注重生产技术的充分利用,提高投入产出比。

参考文献(References):

- [1] 翁凌云. 基于生物质能源背景下我国玉米供需平衡分析 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2010. [WENG L Y. Analysis on China's Corn Supply and Demand Balance Based on the Background of Biomass Energy. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010.]
- [2] 杨艳涛, 吴敬学. 基于市场均衡模型的中国玉米供需变化与趋势预测 [J]. 经济问题, 2014(12): 98-103. [YANG Y T, WU J X. Prediction of the changes and trend of Chinese corn supply and demand based on the model of market equilibrium. On Economic Problems, 2014(12): 98-103.]
- [3] 钱克明. 转方式调结构加快“十三五”现代农业发展 [N]. 人民政协报, 2015-06-15(04). [QIAN K M. Adjust the structure to speed up the development of modern agriculture in 13th five-year planning period. People's Political Consultative Conference Newspaper, 2015-06-15(04).]
- [4] 蔡荣. 农业化学品投入状况及其对环境的影响 [J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(3): 107-110. [CAI R. Agri-chemicals inputs and its impact on environment. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(3): 107-110.]
- [5] LIU X M, CHEN B M. Efficiency and sustainability analysis of grain production in Jiangsu and Shaanxi Provinces of China [J]. Journal of Cleaner Production, 2007, 15(4): 313-322.
- [6] NEUMANN K, VERBURG P H, STEHFEST E, et al. The yield gap of global grain production: A spatial analysis [J]. Agricultural Systems, 2010, 103(5): 316-326.
- [7] YAO S J, LIU Z. Determinants of grain production and technical efficiency in China [J]. Journal of Agricultural Economics, 1998, 49(2): 171-184.
- [8] 赵贵玉, 王军, 张越杰. 基于参数和非参数方法的玉米生产效率研究——以吉林省为例 [J]. 农业经济问题, 2009(2): 15-21, 110. [ZHAO G Y, WANG J, ZHANG Y J. Study on the efficiency of maize production based on parametric and non-parametric analysis: Case of Jilin Province. Issues in Agricultural Economy, 2009(2): 15-21, 110.]
- [9] 王千, 金晓斌, 周寅康, 等. 基于DEA_Malmquist的河北省县级粮食生产效率评价 [J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(6): 51-55. [WANG Q, JIN X B, ZHOU Y K, et al. Evaluation of grain production efficiency on county level in Hebei

- based DEA_Malmquist. *Geography and Geo-Information Science*, 2010, 26(6): 51-55.]
- [10] SU H T, JIANG R Q, LIN N, et al. Efficiency evaluation of provincial grain production based on DEA [C]// International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence. Shanghai, 2009: 603-607.
- [11] 王军, 徐晓红, 王洪丽, 等. 中国核心优势产区玉米生产效率增长及其分解分析 [J]. 玉米科学, 2010, 18(6): 133-137, 142. [WANG J, XU X H, WANG H L, et al. Study on TFP of maize production in Chinese core advantage area. *Journal of Maize Sciences*, 2010, 18(6): 133-137, 142.]
- [12] 赵红雷, 贾金荣. 基于随机前沿分析的中国玉米生产技术效率研究 [J]. 统计与信息论坛, 2011, 26(2): 52-58. [ZHAO H L, JIA J R. Research on technical efficiency of maize production in China based on stochastic frontier analysis. *Statistics and Information Forum*, 2011, 26(2): 52-58.]
- [13] 高建凯. 中国 15 个主产省区玉米生产技术效率研究 [J]. 西部论坛, 2013, 23(6): 69-75. [GAO J K. Analysis of production technical efficiency of main corn planting areas in 15 provinces of China. *West Forum*, 2013, 23(6): 69-75.]
- [14] KALIRAJAN K P, HUANG Y P. Does China have a grain problem? An empirical analysis [J]. *Oxford Development Studies*, 2001, 29(1): 45-55.
- [15] 张忠明. 农户粮地经营规模效率研究——以吉林省玉米生产为例 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008. [ZHANG Z M. Study on the Efficiency of Farmers' Grain Land Scale: A Case Study of Maize Production in Jilin Province. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.]
- [16] LUIK H. Technical efficiency of Estonian grain farms in 2000–2006 [C]// Proceedings of the International Scientific Conference “Economic Science for Rural Development”. Finances, Taxes, Investment and Support Systems (72–78). Jelgava: Latvia University of Agriculture, 2009.
- [17] TOZER P R. Measuring the efficiency of wheat production of western Australian growers [J]. *Agronomy Journal*, 2010, 102(2): 642-648.
- [18] 刘树坤. 中国玉米生产技术效率分析 [D]. 北京: 中国农业大学, 2004. [LIU S K. The Analysis on Technical Efficiency of Chinese Maize. Beijing: China Agricultural University, 2004.]
- [19] 杨春, 陆文聪. 中国玉米生产率增长、技术进步与效率变化: 1990—2004 年 [J]. 农业技术经济, 2007(4): 34-40. [YANG C, LU W C. Maize productivity growth, technical progress and efficiency change in China: From 1990 to 2004. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2007(4): 34-40.]
- [20] 肖红波, 王济民. 新世纪以来我国粮食综合技术效率和全要素生产率分析 [J]. 农业技术经济, 2012(1): 36-46. [XIAO H B, WANG J M. Analysis on grain comprehensive technical efficiency and total factor productivity in China since the new century. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2012(1): 36-46.]
- [21] 赵红雷, 贾金荣. 中国玉米生产技术效率分析: 2001—2008——基于随机前沿生产函数 [J]. 西北农林科技大学学报 (社会科学版), 2011, 11(5): 56-61. [ZHAO H L, JIA J R. Research on technical efficiency of maize production in China from 2001–2008: Based on stochastic frontier production function. *Journal of Northwest A & F University (Social Science Edition)*, 2011, 11(5): 56-61.]
- [22] 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. The spatial convergence of the technical efficiency of grain production and the difference of functional area: On the spatial ripple effect of technology diffusion. *Management World*, 2014(7): 83-92.]
- [23] 马林静, 王雅鹏, 吴娟. 中国粮食生产技术效率的空间非均衡与收敛性分析 [J]. 农业技术经济, 2015(4): 4-12. [MA L J, WANG Y P, WU J. Spatial non-equilibrium and convergence analysis of the technical efficiency of grain production in China. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2015(4): 4-12.]
- [24] SHEPHARD R W. *Theory of Cost and Production Functions* [M]. Princeton: Princeton University Press, 1970.
- [25] HENDERSON D J, RUSSELL R R. Human capital and convergence: A production-frontier approach [J]. *International Economic Review*, 2005, 46(4): 1167-1205.
- [26] SHESTALOVA V. Sequential Malmquist indices of productivity growth: An application to OECD industrial activities [J]. *Journal of Productivity Analysis*, 2003, 19(2): 211-226.
- [27] 王兵, 颜鹏飞. 技术效率、技术进步与东亚经济增长——基于 APEC 视角的实证分析 [J]. 经济研究, 2007(5): 91-103. [WANG B, YAN P F. Technical efficiency, technical progress and East-Asian economic growth: Empirical analysis based on APEC's view. *Economic Research Journal*, 2007(5): 91-103.]

- [28] 向平安, 周燕, 黄璜. 洞庭湖湿地稻区化肥环境影响评估 [J]. 中国人口·资源与环境, 2007, 17(1): 81-84. [XIANG P A, ZHOU Y, HUANG H. The evaluation of environmental impact of fertilizer in wetland rice region of Dongting Lake area. *China Population, Resources and Environment*, 2007, 17(1): 81-84.]
- [29] 赖力, 黄贤金, 王辉, 等. 中国化肥施用的环境成本估算 [J]. 土壤学报, 2009, 46(1): 63-69. [LAI L, HUANG X J, WANG H, et al. Estimation of environmental costs of chemical fertilizer utilization in China. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(1): 63-69.]
- [30] 赵志坚, 胡小娟, 彭翠婷, 等. 湖南省化肥投入与粮食产出变化对环境成本的影响分析 [J]. 生态环境学报, 2012, 21(12): 2007-2012. [ZHAO Z J, HU X J, PENG C T, et al. The effect of fertilizer usage on grain output and environmental cost: An empirical study in Hunan Province. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(12): 2007-2012.]
- [31] 刘建霞, 徐卫华, 黄璜, 等. 中国夏秋粮生产化肥施用环境成本估算 [J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(6): 225-232. [LIU J X, XU W H, HUANG H, et al. Estimation of environmental cost of chemical fertilizer usage in China's summer and autumn grain production. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(6): 225-232.]
- [32] 鲁如坤, 时正元, 熊礼明. 我国磷矿磷肥中镉的含量及其对生态环境影响的评价 [J]. 土壤学报, 1992, 29(2): 150-157. [LU R K, SHI Z Y, XIONG L M. Cadmium contents of rock phosphates and phosphate fertilizers of China and their effects on ecological environment. *Acta Pedologica Sinica*, 1992, 29(2): 150-157.]
- [33] LEGG J O, MEISINGER J J. Soil nitrogen budgets [M]// STEVENSON F J. *Nitrogen in Agricultural Soils*. Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy, 1982: 530-566.
- [34] ODUM H T. *Environmental Accounting: Energy and Environmental Decision Making* [M]. New York: Wiley and Sons, 1996.
- [35] 李双成, 傅小锋, 郑度. 中国经济持续发展水平的能值分析 [J]. 自然资源学报, 2001, 16(4): 297-304. [LI S C, FU X F, ZHENG D. Emery analysis for evaluation sustainability of Chinese economy. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(4): 297-304.]
- [36] 向平安, 黄璜, 燕惠民, 等. 湖南洞庭湖区水稻生产的环境成本评估 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2187-2193. [XIANG P A, HUANG H, YAN H M, et al. Environmental cost of rice production in Dongting Lake area of Hunan Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(11): 2187-2193.]
- [37] LEACH A W, MUMFORD J D. Pesticide environmental accounting: A method for assessing the external costs of individual pesticide applications [J]. *Environmental Pollution*, 2008, 151(1): 139-147.
- [38] KOVACH J, PETZOLDT C, DEGNI J, et al. A method to measure the environmental impact of pesticides [J]. *New York's Food and Life Sciences Bulletin*, 1992(139): 1-8.
- [39] PRANEETVATAKUL S, SCHREINEMACHERS P, PANANURAK P, et al. Pesticides, external costs and policy options for Thai agriculture [J]. *Environmental Science and Policy*, 2013, 27(2): 103-113.
- [40] 张一宾. 近年来全球玉米用农药的市场及品种的发展 [J]. 农药市场信息, 2016(2): 46-47. [ZHANG Y B. Development of global maize pesticide market in recent years. *Pesticide Market News*, 2016(2): 46-47.]
- [41] WEST T O, MARLAND G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emission, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2002, 91(1/3): 217-232.
- [42] 宋文质, 王少彬, 苏维翰, 等. 我国农田土壤的主要温室气体 CO₂、CH₄和 N₂O 排放研究 [J]. 环境科学, 1996, 17(1): 85-92. [SONG W Z, WANG S B, SU W H, et al. Agricultural activities and emissions of greenhouse gases in China Region. *Environmental Science*, 1996, 17(1): 85-92.]
- [43] 郭庆海. 中国玉米主产区的演变与发展 [J]. 玉米科学, 2010, 18(1): 139-145. [GUO Q H. The development and evolution of the major maize producing areas in China. *Journal of Maize Sciences*, 2010, 18(1): 139-145.]
- [44] 栾江, 仇焕广, 井月, 等. 我国化肥施用量持续增长的原因分解及趋势预测 [J]. 自然资源学报, 2013, 28(11): 1869-1878. [LUAN J, QIU H G, JING Y, et al. Decomposition of factor contributed to the increase of China's chemical fertilizer use and projections for future fertilizer use in China. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(11): 1869-1878.]
- [45] 李庆, 林光华, 何军. 农民兼业化与农业生产要素投入的相关性研究——基于农村固定观察点农户数据的分析 [J]. 南京农业大学学报(社会科学版), 2013(3): 27-32. [LI Q, LIN G H, HE J. A correlation study on farmer's concurrent business behavior and changes in factors of production: Analysis based on a survey of farmers from rural fixed observation points. *Journal of Nanjing Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2013(3): 27-32.]

- [46] 修孟源. 兼业化程度对农户水稻种植技术选择的影响分析 [D]. 重庆: 西南大学, 2012. [XIU M Y. The Effect of Diversified Industry Degree on Farmers' Rice Cultivation Technology Adoption: A Case Study of Qian Yang Town. Chongqing: Southwest University, 2012.]

Research on Temporal and Spatial Evolutions of Environmental Cost and Total Factor Productivity of Maize Production in China

WANG Huan¹, MU Yue-ying¹, HOU Ling-ling²

(1. College of Economics and Management, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. School of Advanced Agricultural Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: This paper focuses on China's maize production and makes comparison of maize production in different producing districts. The paper divides 20 maize production provinces in China into three production districts, first main producing district, second main producing district and other producing district, based on the production scale and total yield in each province. After calculating the environmental total factor productivity of maize production in each province from 2004 to 2014, including the environment cost of chemical fertilizer, pesticide, machine and electricity, this paper makes comparison among three producing districts. The main results are as follows. Firstly, although the yield per unit area is increasing, the total factor productivity of corn production shows a downward trend, decreasing at the rate of 3.3% per year on average, which is mainly caused by the lack of production capacity exploitation and labor reservation; and maize production in China is still in extensive mode meanwhile it is experiencing a transition to labor-saving and environment-sustainable production. Secondly, the comparison between three producing districts shows that the first main producing district has the advantages in mechanization level, environmental sustainability and environmental total factor productivity and has high yield both in total and per unit area. As this district supplies about 65% of the total maize production in China, maize production in China can maintain at high level in the future. The second main producing district has advantage in maize production foundation and its technical efficiency increases at the rate of 2% on average, thus this district can ensure maize supply security by optimizing management of inputs. The other producing district has advantages in environment-sustainable transition rate and has high yield per unit area, thus it can make supplement of maize supply by applying advanced technology.

Key words: maize production; total factor productivity; environmental cost; DEA-Malmquist