

引用格式：

汪中华, 尹妮. 农业技术进步偏向对粮食全要素生产率的影响[J]. 农业现代化研究, 2022, 43(6): 1029-1041.
Wang Z H, Yin N. The effects of agricultural technological progress bias on the total factor productivity of grain[J]. Research of Agricultural Modernization, 2022, 43(6): 1029-1041.
DOI: 10.13872/j.1000-0275.2022.0093



农业技术进步偏向对粮食全要素生产率的影响

汪中华, 尹妮*

(哈尔滨理工大学经济与管理学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要：“藏粮于技”是粮食稳产高产的重要保障。基于 2002—2020 年 26 个主要粮食生产省份的面板数据，利用三要素嵌套 CES 生产函数以及 DEA-Malmquist 模型测度农业技术进步偏向和粮食全要素生产率，并运用空间滞后模型分析农业技术进步偏向对粮食全要素生产率的影响。结果表明，我国农业技术进步是非中性的，不同时间、地区以及不同粮食作物的农业技术进步偏向性均存在差异。研究期间我国整体技术进步偏向农业机械要素。不同于小麦整体的农机偏向型技术进步模式，稻谷、玉米的技术进步特征有明显的生化偏向性。2002—2020 年间，粮食全要素生产率波动明显，且粮食主产区的综合生产效率明显优于非主产区。当前我国农机偏向型技术进步模式不利于粮食全要素生产率提升，具有明显的负向溢出效应，非主产区生化偏向型技术进步对粮食全要素生产率的促进作用更加明显。符合粮食技术进步偏向特征的技术创新更能促进粮食增产增收。因此，可以利用技术创新替代稀缺资源，在发挥农业机械化优势的同时，根据粮食生产自有禀赋发展并应用新型生物化学型技术，促进技术进步与粮食提效的良性循环。

关键词：农业技术进步偏向；全要素生产率；嵌套 CES 生产函数；DEA-Malmquist；空间滞后模型

中图分类号：F323.3 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-0275 (2022) 06-1029-13

The effects of agricultural technological progress bias on the total factor productivity of grain

WANG Zhong-hua, YIN Ni

(School of Economics and Management, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract : “Storing grain in technology” is an important guarantee of stable and high grain production. Based on a panel data of 26 major grain-producing provinces from 2002 to 2020, this research seeks to measure the bias of agricultural technological progress and grain total factor productivity by the three-factor nested CES production function and the DEA-Malmquist model and to analyze the influence of agricultural technological progress bias on grain total factor productivity by the spatial lag model. Results show that, China’s agricultural technological progress was non-neutral, and there were differences in the bias of agricultural technological progress at different times, regions, and different food crops. During the research period, China’s overall technological progress was biased towards agricultural machinery elements. Different from the agricultural machinery-biased model of wheat, the characteristics of rice and maize had obvious biochemical bias. From 2002 to 2020, the total factor productivity of grain fluctuated significantly, and the comprehensive production efficiency of the main grain producing areas was significantly better than that of the non-main producing areas. Currently, China’s agricultural machinery-biased model of technological progress is not conducive to the promotion of the total factor productivity of grain and has obvious negative spillover effects. In addition, biochemical-biased technological progress in non-major production areas has a more significant effect on the total factor productivity of grain. Technological innovation that conforms to the biased characteristics of grain technological progress can better promote grain production and income. Therefore, to promote a virtuous cycle of technological progress and food efficiency, this paper suggests to replace scarce resources with technological innovation, to give a full play to the advantages of agricultural mechanization, and to develop and apply new biochemical technologies according to the endowments of grain production.

基金项目：国家社会科学基金项目 (20BMZ156)。

作者简介：汪中华 (1970—)，女，黑龙江哈尔滨人，博士，教授，博士生导师，主要从事区域经济发展战略研究，E-mail: wangzhonghua@hrbust.edu.cn；通信作者：尹妮 (1998—)，女，河南南阳人，硕士研究生，主要研究方向为农业资源经济管理，E-mail: yinnizw@163.com。

收稿日期：2022-06-13，**接受日期：**2022-11-01

Foundation item: National Social Science Foundation of China (20BMZ156).

Corresponding author: YIN Ni, E-mail: yinnizw@163.com.

Received 13 June, 2022; **Accepted** 1 November, 2022

Key words : agricultural technology progress bias; total factor productivity; nested CES production function; DEA-Malmquist; spatial lag model

“国无农不稳，民无粮不安。”在中国粮食生产总量保持稳定增长态势的同时，发展大环境的不确定性导致粮食生产并不稳定，资源环境的约束持续增加粮食增产提质的难度^[1]。受制于耕地、水利等资源约束以及要素相对价格的变化，当前资源消耗型粮食生产模式亟需转向依赖技术创新的生产模式，以激活粮食生产新动能，实现粮食长期安全。作为一个人口大国，中国以大约 9% 的土地支撑着 20% 的人口，这种要素绝对差异使得中国的农业技术是非中性的，按照农业经济学家 Hayami 和 Ruttan^[2] 提出的诱致性技术创新理论，中国的初始禀赋使其农业生产应用更多节约土地的“生化偏向型”技术进步模式^[3-4]。但一些研究表明，自改革开放以来，中国粮食生产呈现出明显的利用机械替代劳动要素的“农机偏向型”技术进步特征^[5]。2021 年，农业农村部发布的粮食增产类主推技术中，化肥良种型核心技术将近一半，机械装备类智能化技术占 40%。通过技术进步完成对稀缺资源的替代，进而不同程度地消除无弹性的土地以及劳动供给的生产约束，带来差异化的粮食增产效应^[6-8]。

实际研究中通常用粮食全要素生产率反映粮食生产过程中的资源配置效率，作为一个综合性指标，它能够反映技术效率、技术进步和规模效率对产量增长的贡献情况^[9]。因此，现有研究多从粮食全要素生产率的测度出发，结合影响因素研究讨论粮食全要素生产率的演变^[10-11]。随着对粮食全要素生产率时空演变情况的深入研究，粮食生产空间格局的关联性逐渐成为分析粮食生产必须考虑的前提^[12]。技术进步是粮食生产综合效率提升的关键，具有公共物品属性的农业技术对粮食全要素生产率具有空间溢出作用^[13]。技术进步的要害偏向特征也会随着技术扩散对粮食全要素生产率的影响产生溢出效应。然而现有研究大多从技术进步中性的视角出发，分别叙述农机偏向型技术进步或者生化偏向型技术进步对粮食生产效率的作用^[14-15]。部分考虑到农业技术进步非中性的研究，采用的方法是将全要素生产率进行分解，从投入角度得到农机投入偏向的技术进步和生化投入偏向的技术进步^[16]。这种直接分解会造成技术进步影响的内生性，难以解释为何中国的农业技术进步偏向对于粮食生产的影响具有异质性。总体来说，关于技术进步和粮食生产效率的研究一直是学术讨论的热点话题之一。当前研究主要是在测算粮食全要素生产率的基础上分析技术效

率、技术进步指数以及规模效率的作用，难以明晰我国农业技术进步的实际作用路径。事实上，“生化偏向型”以及“农机偏向型”技术进步是当前中国农业技术进步的一般形态，不少研究已经证实这两种技术进步模式在粮食生产中的作用大相径庭，但是缺乏统一框架下的影响研究。另外，如果不考虑技术进步的外部性或粮食生产的空间依赖性，会低估技术进步对全社会粮食生产的影响。

鉴于此，本文以诱致性技术进步理论为基础，利用三要素二层嵌套 CES 生产函数，测度并识别中国主要粮食生产省份的农业技术进步偏向；使用 DEA-Malmquist 模型评估粮食全要素生产率，关注粮食主产区与非主产区粮食生产效率的变化特征，采用空间滞后模型，在技术进步有偏的情境下，分析当前中国的农机偏向型技术进步会抑制粮食全要素生产率的原因，对于探索适宜的技术进步模式，打破资源限制，提升粮食生产质效具有重要意义。

1 研究方法数据来源

1.1 农业技术进步偏向指数测度方法

农业生产要素替代弹性的变化会直接影响生产效率，而且会间接带来要素积累，影响种粮主体的决策。按照诱致性技术进步理论，当生产要素间存在互补性时，价格效应（技术进步偏向使用昂贵的稀缺要素）会占支配地位；而当两者存在替代性时，市场规模效应（技术进步偏向使用充裕要素）会占支配地位。这种要素相互作用在农业生产中表现为某种技术进步路径会提高特定生产要素的边际产出，改变要素的边际替代率，影响最终产出。其主要机理为：在两种生产资料投入比固定时，如果技术进步对农机要素边际产出的作用效果更大，那么技术进步更有利于提高农业机械要素的收入份额，采用农机偏向型技术进步会增加更多的最终产出。

从中国农业生产要素的总体使用情况来看，土地与劳动力要素必要但是稀缺，因此生产过程中会更多地使用生化资料以及农机资料节约两种生产要素^[17]。本文基于粮食生产技术的功能性特征，将生产资料分为两类：农业机械（ K ）和生化资料（ E ），建立附加生产要素的（ KE ） L 型 CES 生产函数，不仅能够直观显示农机技术与生化技术之间的关系，而且能够很好地展示农机型技术与生化型技术哪类技术对粮食生产贡献更大，以此验证诱致性技术进步理论在我国的适用性。具体模型形式如下：

$$Y = \left\{ (1-\beta)(A_L L)^{(\varepsilon_{KEL}-1)/\varepsilon_{KEL}} + \beta \left[\alpha (A_U K)^{(\varepsilon_{KE}-1)/\varepsilon_{KE}} + (1-\alpha)(A_S E)^{(\varepsilon_{KE}-1)/\varepsilon_{KE}} \right]^{\varepsilon_{KEL}(\varepsilon_{KEL}-1)/\varepsilon_{KEL}(\varepsilon_{KE}-1)} \right\}^{\varepsilon_{KEL}/(\varepsilon_{KEL}-1)} \quad (1)$$

式中： Y 是最终粮食产出， L 、 E 、 K 分别是劳动投入、生化资料投入以及农业机械投入。 α 是生产资料的分配参数， β 反应生产过程中劳动要素与生产资料的贡献份额； A_L 、 A_U 、 A_S 分别度量了劳动要素、农机生产资料以及生化资料的技术效率； ε_{KE} 为农机要素与生化资料的替代弹性， ε_{KEL} 为嵌套后生产资料与劳动要素的替代弹性。

参照王林辉和袁礼^[3]对技术进步偏向指数的设计思路，将农业技术进步偏向 (B) 定义为：

$$\begin{aligned} B_{it} &= \frac{1}{w_{S_{it}}} \times \frac{dw_{S_{it}}}{d(A_{S_{it}}/A_{U_{it}})} \times \frac{d(A_{S_{it}}/A_{U_{it}})}{dt} \\ &= \frac{\varepsilon_{KE}-1}{\varepsilon_{KE}} \times \frac{A_{U_{it}}}{A_{S_{it}}} \times \frac{d(A_{S_{it}}/A_{U_{it}})}{dt} \\ &= \frac{\varepsilon_{KE}-1}{\varepsilon_{KE}} \times \left(\frac{\dot{A}_{S_{it}}}{A_{S_{it}}} - \frac{\dot{A}_{U_{it}}}{A_{U_{it}}} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中： i 和 t 分别表示样本和年份， $w_{S_{it}}$ 是农机与生化资料的边际产出比。 $A_{U_{it}}$ 、 $A_{S_{it}}$ 分别代表农机资料和生化资料的技术效率， $\dot{A}_{U_{it}}$ 和 $\dot{A}_{S_{it}}$ 表示两种技术效率的变化率。可以看到，技术进步偏向受生产资料的替代弹性以及两者之间相对效率的增长率决定。当 $\varepsilon_{KE} < 1$ 时，两种要素互补，如果此时 $A_{U_{it}}/A_{S_{it}}$ 上升， $B_{it} < 0$ ，技术进步偏向生化型技术进步；若 $A_{U_{it}}/A_{S_{it}}$ 下降，技术进步偏向农机型技术进步模式。当 $\varepsilon_{KE} > 1$ ，两种生产资料是替代关系，若 $A_{U_{it}}/A_{S_{it}}$ 下降，技术进步偏向于生化资料，即技术向节约土地的方向发展。若 $\varepsilon_{KE}=1$ ，则技术进步是中性的。

1.2 粮食全要素生产率测度

DEA-Malmquist 是一种不需要设定特定函数形式，用生产过程中产出投入的复杂变化反映决策单元的全要素生产率 (TFP)，并能将综合效率分解进行纵向比较的模型^[18]。本文考虑到粮食生产受资源短缺以及环境约束的双重负荷，选择投入导向型模型测度粮食全要素生产率。具体的计算公式如下：

$$\begin{aligned} M(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) &= \frac{D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_0^t(x^t, y^t)} \\ &\times \sqrt{\frac{D_0^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})} \times \frac{D_0^t(x^t, y^t)}{D_0^{t+1}(x^t, y^t)}} \\ &= TE \times EFF \\ &= PE \times SE \times TE \end{aligned} \quad (3)$$

式中： M 为在时期 t 的技术条件下，时期 t 到 $t+1$ 的全要素生产率 (TFP)。 x 、 y 分别为各时期投入产出集。TE 表示技术进步变化指数，反映的是生产前沿面的外推；EFF (技术效率指数) 反映一段时期内实际产量与最大产量的差距，可进一步分解为纯技术效率变化指数 (PE) 与规模效率变化指数 (SE)。

1.3 面板空间模型

粮食生产受资源禀赋影响较大，粮食全要素生产率表现出明显的空间依赖性。不同技术来源的农业技术进步对粮食全要素生产率既有直接作用又有间接作用。因此，本文尝试建立空间滞后模型 (式 4)，从空间视角研究农业技术进步偏向与粮食全要素生产率的关系。

$$\begin{aligned} A_{it} &= \alpha + \beta_1 B_{it} + \beta_2 C_{it} + \rho_1 W \ln A_{it} + \varepsilon_{it} \\ i &= 1, 2, 3, \dots, N; t = 1, 2, 3, \dots, T \end{aligned} \quad (4)$$

$\varepsilon_{it} \sim N[\sigma^2 I]$
式中： i 和 t 分别为地区及年份， A 为粮食全要素生产率， B 代表农业技术进步偏向指数， β_i 是直接影响系数 ($i=1, 2$)， ρ_1 是空间滞后项系数， C 为控制变量集。 W 为 $n \times n$ 阶空间邻接权重矩阵。

1.4 数据来源与指标选取

粮食作物整个生产过程较为复杂，因此本文筛选出我国三大主粮 (稻谷、小麦、玉米) 的主要生产主体，研究对象包含全国 26 个省份^[19]。按照地区粮食贡献度和自然地理区域划分，将 26 个研究对象分为东部、中部和西部三个区域。东部包含福建、广东、河北、江苏、辽宁、山东、浙江；中部包含安徽、河南、黑龙江、湖北、湖南、吉林、江西、山西；西部包含甘肃、广西、贵州、海南、内蒙古、宁夏、陕西、四川、新疆、云南、重庆。按照粮食生产功能区划分为粮食主产区 and 粮食非主产区。主产区包括黑龙江、吉林、内蒙古、辽宁、河北、河南、山东、江苏、安徽、江西、湖北、湖南、四川；非主产区包括浙江、广东、福建、海南、贵州、云南、宁夏、广西、陕西、甘肃、重庆、山西、新疆。另结合各地区地势地形、种植制度以及各省粮食播种面积和产出情况，划分玉米、小麦、稻谷优势生产区域，具体见表 1。

粮食全要素生产率的指标体系构建参照张丽和李容^[20]的研究，选取乡村从业人口、粮食播种面积以及农业机械总动力、农用化肥折纯量作为投入指标；粮食总产出作为产出指标。农业技术进步偏向指数的测度数据来自相应年份的《全国农产品成本收益资料汇编》以及《中国农村统计年鉴》，其中农机资料费用以单位面积机械投入价值表示，生

表 1 玉米、稻谷、小麦生产优势区域
Table 1 Main planting areas of maize, rice, and wheat

品种	区域	省份	备注
玉米	西南玉米产区	重庆、四川、云南、贵州	《玉米优势区域布局规划(2008—2015)》
	黄淮海平原夏玉米产区	河南、山东	
	北方春玉米产区	内蒙古、黑龙江、吉林、辽宁、甘肃、宁夏、新疆	
稻谷	东南沿海优势区	广东、广西、福建、海南	《水稻优势区域布局规划(2008—2015)》
	东北早熟稻产区	辽宁、吉林、黑龙江	
	长江流域优势区	江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、贵州、云南	
小麦	南方冬小麦产区	云南, 四川、江苏、安徽	《小麦优势区域布局规划(2008—2015)》
	西部春小麦产区	甘肃、宁夏、新疆	
	北部冬小麦产区	山西、陕西、河北、山东、河南	

化资料费用则以单位粮食生产过程中化肥、农用药等生化型投入要素价值总和表示, 由于样本研究时间跨度较长, 单位面积机械投入价值以及单位面积生化投入价值均以 2002 年为基期, 利用农业生产资料价格指数作平减。劳动力价格用单位劳动用工投入所花费的人工成本代替, 以消除农业生产的季节性影响^[21]; 此外, 考虑到农业生产部门相较于其他经济部门对土地以及劳动要素反映更加剧烈, 产

业结构优化水平也相对滞后, 粮食生产水平与农田水利设施和自然灾害的联系也很密切^[15,21]。因此, 除却反映技术进步偏向的解释变量外, 进一步增加农地经营规模用于反映农地经营情况; 增加城镇化水平反映劳动力流动情况; 采用有效灌溉率用以控制农业生产条件的影响; 采用受灾面积占农作物播种面积的比重来反映自然灾害对粮食生产的影响。具体的指标定义见表 2。

表 2 变量定义与描述
Table 2 Variable definition and description

变量性质	变量	变量解释
被解释变量	劳动投入 (万人)	乡村人口中 16 岁以上实际参加生产经营活动并取得实物或货币收入的人员
	土地投入 (10^3 hm^2)	日历年度内收获的粮食作物在全部土地上的播种或移植面积
	农机投入 (万 kW)	全部农业机械动力的额定功率之和
	肥料投入 (万 t)	农业生产中折纯后的氮、磷、钾肥以及复合肥施用量
	产出 (万 t)	农业生产经营者日历年度内生产的全部粮食数量
核心解释变量	劳动力投入 (元/日)	单位劳动用工投入日的用人总数
	生化资料施用量 (kg/hm^2)	单位面积粮食生产施用的种子、化肥、农膜总量
	农机资料投入量 (kW/hm^2)	单位面积粮食生产投入的机械动力
	劳动力价格 (元)	每日农业生产产品花费的资金总和
	生化资料费用 (元/ hm^2)	单位面积粮食种植所需的化肥、种子、农药以及农膜综合费用
	农机资料费用 (元/ hm^2)	单位面积粮食种植的租赁作业费用与燃料动力费用
控制变量	产出 (万 t)	农业生产经营者日历年度内生产的全部粮食数量
	农地经营规模 (hm^2)	每户农业生产经营者经营耕地面积
	产业结构 (%)	第一产业产值占国民经济总产值的比重
	城镇化水平 (%)	年末城镇人口占总人口的比重
	有效灌溉率 (%)	有效灌溉面积占农作物总播种面积的比重
	农业灾害率 (%)	受灾面积占农作物总播种面积的比重

2 结果与分析

2.1 农业技术进步偏向测度结果分析

2.1.1 农业技术进步偏向的典型事实特征 采用广义非线性最小二乘法对式 (1) 的双层嵌套 CES 生产函数进行参数估计, 得到各样本的要素替代弹性 (表 3)。可以看到, 2002—2020 年间各省份农机资料与生化资料替代弹性均值为 0.948, 两者总体是

互补的^[22], 主要是由于整个粮食生产过程中两种生产资料往往协同使用。但具体看各区域农机生化资料合成品的结构变化情况, 农机生产资料与劳动生产资料间的替代弹性有很大差别, 甘肃、宁夏、贵州等地粮食生产模式主要是以简单便捷的生化投入为主, 生产资料间有明显替代作用。江苏、安徽、湖南等 16 个省份的替代弹性小于 1, 这些地区粮食生产要素投入结构较为稳定, 农机生产资料以及生

化资料的协同使用更利于粮食生产。各省份农机—生化成品与劳动要素的替代弹性差别不大，大概在0.245左右，说明生产资料成品与劳动之间是互补关系。

图1显示了我国各区域技术进步偏向指数的时间演变趋势。可以看到，有偏的农业技术进步在各区域是广泛存在的，整个研究期间，全国及各地区技术进步偏向度均有所波动，但大多数年份全国范围内的技术进步指数大于0，这些时期技术进步方

向始终偏向于密集使用农机要素。这与我国现代化农业生产中农业机械化比重持续提高的现实情况相符合。具体来看，中国早期的农业技术进步偏向生物化学型，以此达到节约土地的目的，符合我国农业发展的时代特征。2004年起，中央一号文件连续强调“三农”主题，城乡二元经济发展的特点又要求农业劳动要素更多地被机械技术替代，劳动要素成本增加使得节约劳动成为这一时期农业生产的典型特征，机械化技术进步成为粮食生产的主要推动力。

表3 26个粮食生产省份要素替代弹性结果

Table 3 Results of the factor substitution elasticities in 26 grain-producing provinces

省份	农机要素与生化资料的替代弹性 ($\epsilon_{K,E}$)	嵌套后生产资料与劳动要素的替代弹性 ($\epsilon_{K,E,L}$)	省份	农机要素与生化资料的替代弹性 ($\epsilon_{K,E}$)	嵌套后生产资料与劳动要素的替代弹性 ($\epsilon_{K,E,L}$)
宁夏	15.321	0.189	湖南	0.883	0.197
浙江	9.887	0.198	海南	0.876	0.210
甘肃	5.200	0.173	四川	0.860	0.239
江西	4.054	0.289	广西	0.852	0.183
山东	3.483	0.222	河北	0.771	0.260
黑龙江	2.411	0.247	陕西	0.480	0.203
辽宁	2.065	0.220	重庆	0.413	0.201
河南	1.893	0.263	安徽	0.408	0.274
贵州	1.753	0.279	内蒙古	0.376	0.259
湖北	1.393	0.265	云南	0.368	0.258
山西	0.998	0.222	新疆	0.329	0.220
广东	0.947	0.179	江苏	0.297	0.235
福建	0.928	0.201	均值	0.948	0.245
吉林	0.918	0.245			

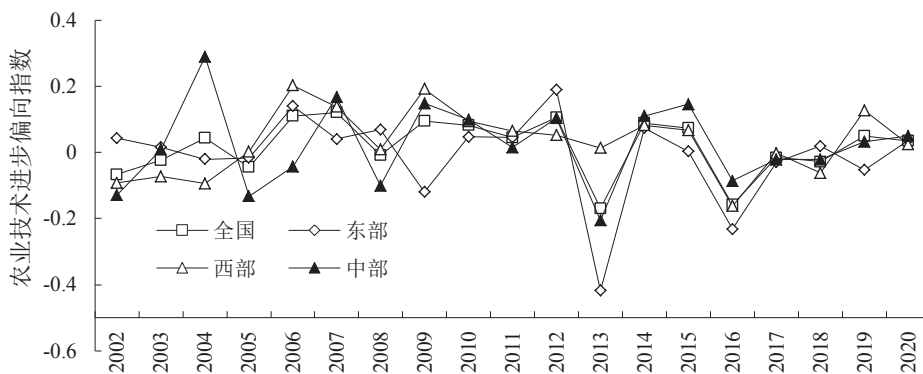


图1 我国各区域技术进步偏向指数变化趋势

Fig. 1 Variation trends of technological progress bias index in different regions of China

东部、中部和西部的农业技术进步方向变化趋势大致相同，均表现为生化技术与机械技术交替变化的发展趋势，缓解了粮食生产要素边际报酬递减规律的制约。东部8个省份近年来主要采用节约土地的生物化学型技术进步模式。西部地区以节约劳动的农机技术为主，对于生物化学型技术的应用有所减少。中部8个省份是传统的粮食主产区，生产机械化程度与土地规模均有利于机械技术发展，整

体技术进步偏向于农机型技术进步。
2.1.2 不同粮食作物技术进步偏向特征 考虑到不同粮食作物资源禀赋以及生长条件存在差异，进一步分析不同粮食作物技术属性的差异性，表4到表6分别显示了玉米、稻谷以及小麦优势产区的技术进步偏向指数。早期各玉米优势产区农业机械化 and 专业化发展受限，农业生产中更多地使用生物化学技术，因此整体技术进步模式表现为生化偏向型技术

进步。北方春玉米产区耕地资源较为丰富,规模化经营为机械技术进步提供有利条件,玉米农机偏向型技术进步指数呈上升趋势。与之相对,西南山地玉米产区地形状况复杂,推广机械作业难度较大,这些地区玉米生产主要以生化型技术进步模式为主^[23]。黄淮海地区则表现为农机偏向型技术进步与生化偏向型技术进步模式交替演进,农艺、农机结合是黄淮海平原玉米高产的必要条件。

稻谷生产的技术进步类型受自然条件影响较大,长江流域以及东北早熟稻产区拥有优质的水土资源,其稻谷种植的技术创新更多地表现为生化偏向型技术进步;传统花生—水稻复作的种植模式提升了东南沿海优势稻产区土壤的理化条件,因此相对于生物技术,东南沿海稻谷生产的技术创新重在控制土壤中水分的排灌技术以及栽培配套技术。

相较于普遍采用生化型技术进步模式的北方冬麦产区,西部春麦和南部冬麦产区大多采用农机型技术进步模式。甘肃、宁夏、新疆等西部小麦产区大部分处于高寒干冷地带,因此早期侧重于培育耐寒丰产的春麦良种,近年来受政策影响,转向发展具有明显节劳属性的农业机械技术。江苏、安徽、云南、四川等南部冬麦优势区主要采取两熟平作的种植方式,农业机械技术提升了这些区域粮食生产过程中耕、播、收的效率,从而获得较高产量。总之,虽然我国整体农业技术进步表现为节约劳动的农机偏向型技术进步,但是受生产禀赋以及要素成本等的影响,我国农业技术进步方向在不同粮食作物类型上具有非均衡性。

2.2 粮食全要素生产率测算结果及技术变化

中国内陆气候、地形复杂,不同地区的机械化

表 4 玉米生产优势区的技术进步偏向指数
Table 4 Technological progress bias indices of maize production advantage area

优势区	2002	2015	2020	
北方春玉米产区	内蒙古	-0.061	0.009	0.196
	黑龙江	-0.046	0.029	0.123
	吉林	-0.583	-0.022	0.064
	辽宁	-0.076	0.043	0.043
	甘肃	0.109	-0.057	0.090
	宁夏	0.255	0.195	0.029
	新疆	0.016	0.005	-0.218
	黄淮海平原夏玉米产区	河南	-0.582	-0.026
	山东	0.114	0.058	-0.058
西南玉米产区	重庆	0.074	0.262	-0.019
	四川	0.028	0.039	0.033
	云南	-0.552	0.019	-0.022
	贵州	0.184	-0.150	-0.153

表 5 稻谷生产优势区的技术进步偏向指数
Table 5 Technological progress bias indices of rice production advantage area

优势区	2002	2015	2020	
东南沿海优势区	广东	0.053	-0.124	-0.011
	广西	0.018	-0.044	0.036
	福建	0.040	0.025	0.002
	海南	0.131	0.063	0.076
长江流域优势区	江苏	-0.737	-0.044	-0.008
	浙江	0.079	0.004	-0.025
	安徽	-0.456	-0.090	0.029
	江西	-0.018	-0.005	-0.045
	湖北	-0.138	-0.037	0.184
	湖南	0.063	0.040	-0.025
	重庆	0.074	0.262	-0.019
	四川	-0.031	0.041	-0.589
	贵州	-0.324	-0.056	-0.184
东北早熟稻产区	云南	0.656	0.326	0.352
	辽宁	2.628	0.008	0.007
	吉林	0.884	0.312	-3.125
	黑龙江	-0.114	0.169	-0.136

表 6 小麦生产优势区的技术进步偏向指数
Table 6 Technological progress bias indices of wheat production advantage area

优势区	2002	2015	2020	
西部春小麦产区	甘肃	-0.159	0.050	0.140
	宁夏	-0.122	-0.028	-0.088
	新疆	-1.341	0.055	0.366
北部冬小麦产区	山西	0.048	-0.021	-0.054
	陕西	0.148	0.060	-0.022
	河北	0.064	-0.021	-0.001
	山东	0.019	0.020	-0.046
	河南	0.062	0.561	-0.049
南部冬小麦产区	江苏	0.078	0.029	0.013
	安徽	0.213	0.487	0.037
	云南	0.019	0.126	-0.006
	四川	0.363	-0.123	0.103

程度和劳动力人口都存在一定程度的差异。因此,必须对每个省份的粮食生产情况进行分析。图 2 显示了利用 deap2.1 软件得到的 2002—2020 年我国 26 个粮食生产省份的全要素生产率以及相应分解效率。结果发现,2002 至 2010 年,整体粮食全要素生产率波动明显,但只有 2003、2005、2009 年的相对效率小于 1,粮食生产是低效的。其中,技术动力不足是造成 2003 年和 2009 年粮食生产处于劣势地位的主要原因。2005 年纯技术效率以及规模效率均小于 1,说明这一年不仅存在要素流失,而且资源也没有有效配置。2010 年以后整体粮食投入利

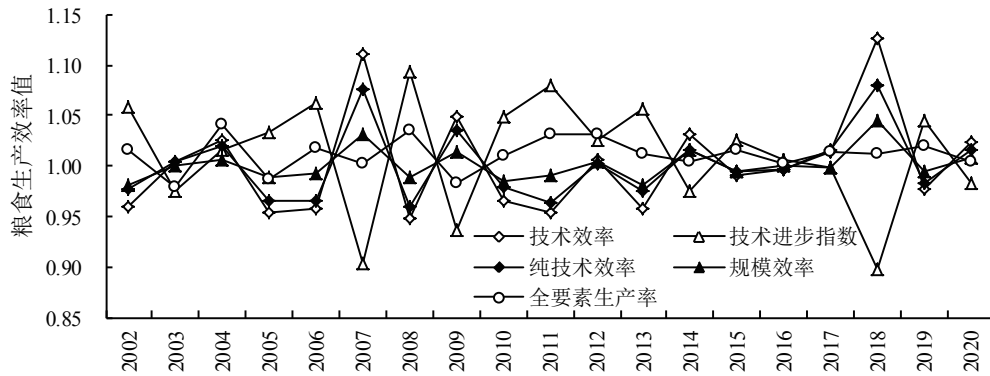


图2 2002—2020年粮食全要素生产率时序变化图

Fig. 2 Time series change of the total factor productivity of grain from 2002 to 2020

用效能相对较好。2017年至2018年的技术变动指数触底，但综合粮食全要素生产率仍具有优势，说明技术效率的优势一定程度上弥补了现有技术进步与技术前沿之间的差距，更加证明了技术进步的重要性。

表7进一步显示了不同粮食产区粮食全要素生产率的差异。可以看出：我国粮食主产区综合粮食生产效率优于非主产区。四川、河南、湖南、湖北等粮食生产集中区，土壤资源丰富，良好的农业生产基础以及产粮重心的集聚帮助发挥这些地区生产

表7 2002—2020年我国各地区粮食全要素生产率均值

Table 7 The average total factor productivity of grain in various regions of China from 2002 to 2020

功能区	省份	全要素生产率	纯技术效率	规模效率	技术效率	技术进步指数
主产区	安徽	1.017	1.011	1.000	1.008	1.012
	河北	1.024	1.013	1.001	1.013	1.013
	河南	1.017	1.000	1.008	1.008	1.010
	湖北	1.003	0.993	1.000	0.993	1.012
	湖南	1.006	0.998	1.000	0.998	1.011
	吉林	1.005	1.000	1.000	1.000	1.005
	江苏	1.008	1.001	1.000	1.001	1.009
	江西	1.012	1.001	0.999	1.000	1.017
	黑龙江	1.022	1.000	1.000	1.000	1.022
	辽宁	1.025	1.008	1.001	1.010	1.015
	内蒙古	1.029	1.012	1.003	1.015	1.017
	四川	1.002	1.001	1.004	1.001	1.008
	山东	1.014	1.001	1.005	1.006	1.010
	均值		1.014	1.003	1.002	1.004
非主产区	山西	1.039	1.033	0.999	1.032	1.011
	陕西	1.019	1.007	1.000	1.008	1.015
	新疆	1.014	1.001	1.000	1.002	1.013
	云南	1.009	1.002	0.998	1.001	1.015
	浙江	1.004	0.998	0.998	0.996	1.010
	重庆	1.000	0.997	1.003	1.005	1.005
	福建	1.011	1.002	1.001	1.003	1.011
	甘肃	1.017	1.006	1.003	1.010	1.012
	广东	1.005	0.998	1.000	0.999	1.009
	广西	1.007	0.996	1.000	0.997	1.012
	贵州	0.990	0.986	0.998	0.986	1.010
	海南	1.020	1.000	1.006	1.006	1.015
	宁夏	1.020	1.000	1.010	1.010	1.015
	均值		1.012	1.002	1.001	1.004
全国均值		1.013	1.003	1.001	1.004	1.012

经营的规模效应；黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古等北部省份技术效率更占优势，粮食生产重心的北移进一步促进这些地区农业现代化发展，农业机械的投入以及育种方式的改进提升了这些地区的粮食产量。安徽、河北、江苏、江西四省技术进步变化指数较高，技术进步驱动生产前沿面外移，促使这些产粮大省一直处于规模报酬递增阶段。粮食非主产区中，广西、广东、贵州、云南、浙江和重庆六省实际产量与最大产量之间仍有差距，陕西、山西、新疆等地规模效率同样偏低，但是这些地区技术进步指数较高，技术创新在粮食生产中占据主要地位，因此整体粮食生产仍处于效率递增的潜力带。

2.3 农业技术进步偏向对粮食全要素生产率的影响

2.3.1 模型选择与检验 由表 8 可知，2002—2020 年的莫兰指数均在 5% 的统计水平上显著为正，这意味着粮食全要素生产率普遍存在较高程度的空间依赖性。受粮食生产的规模经济以及邻近区域相似的种植条件等影响，粮食生产效率有明显的空间趋同特征，距离越短，空间相关性越强。此外，劳动力要素转移以及农地的流转打破了经营壁垒，加速了粮食生产中投入要素的自由流动，因此，某地区的粮食生产效率提升，不仅会影响本地粮食生产规模效率以及技术效率，而且在空间范围内会作用于周围地区粮食生产。

表 8 2002—2020 年粮食全要素生产率莫兰指数

Table 8 Moran index of the total factor productivity of grain from 2002 to 2020

年份	Moran's I 指数	P 值	年份	Moran's I 指数	P 值
2002	0.025	0.043	2012	0.039	0.015
2003	0.025	0.041	2013	0.028	0.033
2004	0.032	0.026	2014	0.041	0.014
2005	0.032	0.026	2015	0.035	0.021
2006	0.025	0.043	2016	0.031	0.028
2007	0.048	0.008	2017	0.030	0.030
2008	0.026	0.038	2018	0.027	0.036
2009	0.039	0.016	2019	0.032	0.026
2010	0.024	0.043	2020	0.031	0.027
2011	0.023	0.047			

利用 Hausman 检验筛选固定效应或是随机效应模型。结果发现检验值为 70.460，通过了 1% 显著性水平检验，采用固定效应模型更加合理。个体固定效应模型的拟合优度 R^2 为 0.180，小于时间固定以及时空双固定效应模型（均为 0.274）。综合 LR 检验、LM-lag 检验和 LM-error 检验结果发现（表 9），使用时间固定效应空间滞后模型是最优的。

2.3.2 空间计量结果分析 表 10 报告了农业技术进步偏向和粮食全要素生产率空间滞后模型的回归结果。可以看出，农业技术进步偏向以及农业灾害率的提高不利于粮食全要素生产率的提升，而农地经营规模的扩大有利于提高粮食全要素生产率。具体来看，农业技术进步偏向指数每提高 1%，当地粮食生产效率将下降 0.016%，也即技术进步偏向农机生产资料不利于粮食全要素生产率提升。结合第一

部分研究结果，解放劳动生产是城乡二元经济结构下的主要目的，由此引致的农机型技术进步造成我国农业生产时土地稀缺约束更加明显，过度应用农机型技术进步偏离当前资源的最优配置，技术效率存在损失。除此之外，参考 Zhang 等^[24]的研究结论，农业机械存在外包服务，微观角度上的农户租用省外机械服务当前并未体现。由于普遍上升的劳动力成本，更多年轻人倾向进入其他行业获取非农收入，农村留下的年迈劳动力对农业现代化的接收程度有限，主要进行简单的种植工作。农机型技术进步模式的普及并不能在短期内实现粮食生产效率的提升。

农地经营规模系数为 0.003，说明目前我国农地经营规模仍具有显著的规模效应。经营规模的扩大利于资源高效利用，能够提高农业生产率，促进

表 9 LM 检验结果

Table 9 LM test results

检验方法	空间误差模型		空间滞后模型	
	检验值	p 值	检验值	p 值
Lagrange multiplier	30.809	0.000	35.247	0.000
Robust Lagrange multiplier	0.109	0.741	4.547	0.033

表 10 空间滞后模型计量结果
Table 10 Measurement results of the spatial lag model

变量	空间滞后模型		空间效应分解					
			直接效应		间接效应		总效应	
	回归系数	<i>p</i> 值	回归系数	<i>p</i> 值	回归系数	<i>p</i> 值	回归系数	<i>p</i> 值
农业技术进步偏向	-0.016	0.029	-0.016	0.036	-0.006	0.073	-0.022	0.038
农地经营规模	0.003	0.006	0.003	0.005	0.001	0.034	0.004	0.007
产业结构	-0.011	0.647	-0.008	0.711	-0.003	0.743	-0.011	0.718
城镇化水平	0.021	0.410	0.022	0.396	0.008	0.432	0.030	0.400
有效灌溉率	-0.014	0.223	-0.014	0.216	-0.005	0.269	-0.020	0.222
农业灾害率	-0.133	0.000	-0.134	0.000	-0.050	0.001	-0.184	0.000
A-Spatial Rho	0.281	0.000						

粮食生产。产业结构以及城镇化水平对粮食全要素生产率的影响并不显著，这表明目前产业结构以及城镇化水平对粮食全要素生产率的作用尚且模糊。水资源短缺一直是我们国家农业生产受制约的主要原因，但节水灌溉技术的发展一定程度上能够促进水资源的循环利用，满足农业生产对水资源的需求，这种方向相反的动态作用造成有效灌溉率与粮食全要素生产率之间没有显著的相关性。

2.3.3 空间溢出效应分解 当空间计量模型中同时包含被解释变量及其空间滞后项，估计系数不能像传统计量模型那样直接反映边界效应。因此，需要分解解释变量的作用，转化为直接效应（直接影响）、间接效应（邻里溢出）和总效应（共同影响）进行统计检验。结合表 10 的分解结果可知，技术进步偏向的直接效应系数是 -0.016，空间溢出效应系数为 -0.006，均在 10% 的结果上显著，且直接影响大于间接效应。这表明当前我国农机偏向型技术进步不仅直接抑制粮食全要素生产率的提升，也会间接抑制其他地区的粮食全要素生产率。因为在技术空间扩散的过程中存在要素流动，要素偏向特性也会发生外溢，农机的空间外溢效应直接表现为农机跨区流动，但运输成本以及种植条件等约束限制了跨区服务市场的发展，农机型技术进步对粮食增产作用明显受限。此外，广泛的农机偏向型技术进步使得生产过程中农机要素投入饱和，土地对生产的约束作用更加强烈，农机偏向型技术与土地稀缺存在错配，使得最终粮食生产的资源配置效率下降。

农地经营规模直接效应系数为 0.003，空间溢出效应系数为 0.001。由此可见，在该地区扩大经营规模，可以充分发挥规模经营的效益，激发生产要素的最大潜力，有效提高土地生产能力；其他地区农地经营规模优势也会带动粮食生产链发展，加速该地区粮食生产。农业灾害率的直接影响回归系数为 -0.134，空间溢出回归系数为 -0.050，说明农

业灾害不仅不能显著提升粮食全要素生产率，而且会对其他省市的粮食全要素生产率产生类似的影响。产业结构、城镇化水平、有效灌溉率三者的直接效应以及空间溢出效应也不具有统计显著性。

2.4 内生性检验

由于粮食全要素生产率遗漏潜在影响因素会导致残差项自相关，而且受要素结构变化的作用，技术进步促进全要素生产率提高之后，人们倾向选择对粮食生产更有益的技术进步模式。技术进步与全要素生产率之间可能互为因果。因此，为了精准体现农业技术进步偏向对粮食全要素生产率的作用，本文首先将滞后一期的被解释变量纳入计量模型，采用两阶段系统 GMM 模型进行回归；另外，引入核心解释变量（技术进步偏向指数）的滞后项作为工具变量对可能存在的逆向因果关系进行处理^[25-26]。

表 11 中模型（1）为两阶段系统 GMM 的估计结果。可以看到，核心解释变量的系数符号以及系数数值没有太大变化。AR(2) 的检验结果接受了“扰动项无序列相关”的原假设，同时，Sargan 检验结果认为工具变量有效，说明上文回归结果具有稳健性。模型（2）和模型（3）是引入滞后一期的技术进步偏向指数为工具变量后进行系统 GMM 以及 2SLS 回归的结果。两种估计方法均未改变农业技术进步偏向指数对粮食全要素生产率具有显著抑制作用的结论。Cragg-Donald Wald 检验拒绝了弱工具变量的假设，LM 检验结果也表明模型不存在过度识别问题。由此可见，剔除可能存在的内生性之后，农机偏向型技术进步对粮食全要素生产率提升仍具有显著抑制作用。

2.5 异质性分析

考虑到不同粮食作物的要素配置、技术效率以及生产效率均存在差异，进一步分组考察玉米、稻谷以及小麦生产技术进步偏向对粮食全要素生产率的直接影响（表 12）。结果发现，玉米农业技术进

表 11 内生性检验结果
Table 11 Endogeneity test results

变量	模型 (1)		模型 (2)		模型 (3)	
	回归系数	<i>p</i> 值	回归系数	<i>p</i> 值	回归系数	<i>p</i> 值
L.A	-0.267	0.000				
B	-0.011	0.002	-0.015	0.046	-0.070	0.069
控制变量	控制		控制		控制	
Sargan 检验	20.574	1.000	112.940	0.999		
AR(2) 检验	-1.050	0.295	-0.310	0.760		
Anderson LM 统计量					21.124	0.000
Cragg-Donald Wald F 统计量					10.801	
观测值	442		494		468	

步偏向与粮食全要素生产率之间的系数显著为负, 稻谷的影响统计上不显著。结合上文研究结果可知, 玉米与稻谷整体技术进步偏向特征均为生化型技术进步, 玉米种植的生化型技术进步模式能够显著促进玉米产量提升。但是对于现代化稻谷种植, 其生产效率的提升不仅需要继续优化生化型技术进步, 也需要加强农机型技术进步创新。小麦的技术进步

偏向指数与全要素生产率之间的系数为 0.019, 说明对小麦来说, 偏向农机型的技术进步模式更能够促进全要素生产率的提高。而当前我国小麦生产过程中, 农机技术所占比重越来越高, 机械使用程度也在不断加深, 使用农机型技术可以有效促进小麦增产增收。

此外, 将粮食种植地区分为主产区和非主产区,

表 12 不同粮食作物技术进步偏向对粮食全要素生产率的回归结果

Table 12 Regression results of the technological progress bias of different grain crops on the total factor productivity of grain

变量	玉米		稻谷		小麦	
	回归系数	<i>p</i> 值	回归系数	<i>p</i> 值	回归系数	<i>p</i> 值
农业技术进步偏向	-0.038	0.037	-0.005	0.635	0.019	0.081
农地经营规模	0.009	0.259	0.005	0.549	0.012	0.374
产业结构	-0.066	0.135	-0.002	0.958	0.035	0.350
城镇化水平	-0.207	0.006	-0.173	0.006	-0.203	0.003
有效灌溉率	0.050	0.576	-0.029	0.579	0.057	0.444
农业灾害率	-0.231	0.000	-0.208	0.000	-0.187	0.000
常数项	1.126	0.000	1.144	0.000	1.086	0.000

进而验证技术进步偏向对于不同类型粮食功能区粮食全要素生产率的影响是否存在异质性 (表 13), 从结果来看: 不同粮食功能区模型结果具有相似性, 相对于粮食主产区, 非主产区农业技术进步的偏向性特征对粮食全要素生产率的影响更加显著。非主产区农机型技术进步偏向指数每提升 1%, 本地粮食生产效率将下降 0.026%, 按照林毅夫等^[27]的研究结论, 要素禀赋结构决定了经济体最适宜的技术模式, 结合技术进步偏向指数的定义, 主产区农机偏向型技术进步并非是能提升全要素生产率的适宜型技术进步。就现阶段粮食生产中农业机械技术应用情况看, 机械技术受自然地形、农户意愿以及作物类型差异等的约束, 机械化还存在较大的进步空间。

粮食主产区相对广泛的作物类型也在一定程度上弱化了农机型技术进步对粮食生产的作用。以水稻和小麦的生产为例, 水稻对早期幼苗的移植条件要求较高, 机械移植相较于人工移植成本更高; 而

我国当前小麦生产已经实现播、种、收的全面机械化, 因此农机型技术偏向对粮食全要素生产率的促进作用更加显著^[28]。非主产区粮食产、销、购流动性大, 市场规模效应以及生产要素的价格效应更加显著, 农业技术创新在这两种效应的加持下偏向特征明显, 与劳动要素互补且具有节约土地属性的生化型技术进步更加适宜非主产区的农业生产, 表现为生化型技术进步不仅利于当地粮食全要素生产率提高, 而且对其他地区粮食全要素生产率具有一定的正向促进作用。因此, 在粮食生产过程中, 除了要因地制宜发展不同的技术进步模式外, 注重整体技术水平提升同样重要。

3 结论与建议

3.1 结论

1) 2002—2020 年间, 我国整体农业技术进步表现出农机偏向型特征。早期技术进步方向倾向于

表 13 主产区和非主产区技术进步偏向与粮食全要素生产率的回归结果

Table 13 Regression results of the technological progress bias and the total factor productivity of grain in main and non-main production areas

粮食功能区	变量	空间滞后模型		空间效应分解					
				直接效应		间接效应		总效应	
		回归系数	p 值	回归系数	p 值	回归系数	p 值	回归系数	p 值
非主产区	农业技术进步偏向	-0.026	0.018	-0.026	0.023	-0.002	0.527	-0.027	0.024
	农地经营规模	0.016	0.128	0.016	0.125	0.001	0.561	0.017	0.134
	产业结构	0.001	0.986	0.004	0.897	0.001	0.891	0.005	0.892
	城镇化水平	-0.154	0.340	-0.155	0.319	-0.010	0.635	-0.165	0.322
	有效灌溉率	-0.020	0.777	-0.020	0.776	-0.001	0.941	-0.021	0.784
	农业灾害率	-0.143	0.000	-0.142	0.000	-0.009	0.474	-0.151	0.000
	A-Spatial Rho	0.057	0.460						
主产区	农业技术进步偏向	-0.006	0.556	-0.005	0.591	-0.001	0.669	-0.006	0.596
	农地经营规模	0.003	0.017	0.003	0.015	0.001	0.173	0.004	0.019
	产业结构	0.007	0.838	0.011	0.743	0.003	0.747	0.014	0.739
	城镇化水平	0.079	0.087	0.081	0.079	0.015	0.246	0.096	0.082
	有效灌溉率	-0.006	0.806	-0.006	0.787	-0.001	0.844	-0.007	0.794
	农业灾害率	-0.203	0.000	-0.203	0.000	-0.039	0.073	-0.242	0.000
	A-Spatial Rho	-0.006	0.556	-0.005	0.591	-0.001	0.669	-0.006	0.596

生化型技术进步主要是由国家政策以及相对丰裕的劳动力要素带动。受城乡二元经济结构的影响，当前我国农业技术进步更多地表现为节约劳动要素的农机偏向技术进步特征。各区域农业技术表现为生化偏向型与农机偏向型技术进步交替变化的特征。

2) 2002—2020年间，粮食全要素生产率波动明显，各省粮食全要素生产率均为正增长，受粮食生产重心日渐北移的影响，北部粮食主产区全要素生产率处于前沿地位。粮食生产中技术进步指数对粮食全要素生产率的贡献度更大。不同粮食功能区的全要素生产率差异明显，技术进步的驱动作用在粮食主产区更加显著。

3) 粮食全要素生产率具有显著的正向空间依赖性。当前我国整体农机偏向型技术进步模式存在生产率损失，农机跨区服务市场的限制以及劳动力成本约束造成短期内农机偏向型技术进步抑制粮食全要素生产率的提升，在粮食非主产区这种农机偏向型技术进步模式的抑制作用更加显著。

4) 有偏的农业技术进步对异质性粮食作物全要素生产率的贡献作用显著，表现为符合粮食作物要素禀赋变化的技术进步更利于提升粮食生产效率：具有明显生化型技术优势的稻谷以及玉米，偏向生化型的技术进步更利于促进作物增产；小麦生产的机械化程度较高，因此机械技术对小麦全要素生产率的正向作用更明显。

3.2 建议

因地制宜、因势利导发挥技术进步的引领作用

对于助力粮食生产资源消耗导向到技术创新导向的转型，保障粮食安全意义深远。基于此，本文提出以下建议：

1) 增强省际粮食生产互助，重视农业技术创新。建立信息化粮食生产链，增加技术进步偏向与要素禀赋结构的匹配度，减少生产以及非生产阶段的无效损耗。在粮食生产投入要素有限的情况下，通过技术进步提高粮食生产的技术效益。

2) 聚焦农机装备以及生化技术创新。我国农业技术进步整体偏向农机型技术进步，因此农机型技术需要控量提效，提升农业机械使用效率。促进农机资源共享，统筹调动拖拉机等机械设备，实现农机技术进步对粮食生产的促进作用。在追求增产增收的同时切实保持土壤肥力，重视生物技术创新，实施良种工程、高效施肥技术等项目，为土地高质量产粮续航。借助国家的农业扶持政策，聚合优势资源，攻克“卡脖子”的关键核心技术。

3) 平衡技术进步偏向的间接效应。结合各地区自有禀赋进行分类指导，补齐落后地区粮食生产基础设施短板。经济发达地区可以同时推动农机型技术进步与生化型技术进步，集中优势进行农业技术推广，吸纳农业高素质人才，加快农业现代化发展。具有土地资源优势的城市优化资源配置，以节约劳动的农机型技术进步为主，辅以生化型技术。鼓励拥有大规模土地的农地经营者采用大型农机等提高生产效率，对于小规模经营主体，降低小型农机使用成本，推广科学的耕作方式，鼓励其积极采

取科学施肥技术。

参考文献：

- [1] 张亨明, 章皓月, 朱庆生. “双循环”新发展格局下我国粮食安全隐忧及其消解方略[J]. 改革, 2021(9): 134-144.
Zhang H M, Zhang H Y, Zhu Q S. Hidden worries of China's food security and its resolution strategy under the new development pattern of “dual circulation”[J]. Reform, 2021(9): 134-144.
- [2] Hayami Y, Ruttan V W. Agricultural productivity differences among countries[J]. American Economic Review, 1970, 60(5): 895-911.
- [3] 王林辉, 袁礼. 要素丰裕度、技术进步偏向性与中国农业部门要素收入分配结构[J]. 东北师大学报(哲学社会科学版), 2015(1): 70-80.
Wang L H, Yuan L. Factor abundance, directed technical change and the factor income distribution structure of agriculture in China[J]. Journal of Northeast Normal University (Philosophy and Social Sciences), 2015(1): 70-80.
- [4] 孔祥智, 张琛, 张效榕. 要素禀赋变化与农业资本有机构成提高——对 1978 年以来中国农业发展路径的解释[J]. 管理世界, 2018, 34(10): 147-160.
Kong X Z, Zhang C, Zhang X R. Change of factor endowment and improvement of agricultural capital organic composition: An explanation of China's agricultural development path since 1978[J]. Management World, 2018, 34(10): 147-160.
- [5] 陈苏, 胡浩, 傅顺. 要素价格变化对农业技术进步及要素替代的影响——以玉米生产为例[J]. 湖南农业大学学报(社会科学版), 2018, 19(3): 24-31.
Chen S, Hu H, Fu S. Effect of the price variation of factor on agricultural technological progress and factor substitution: A case study of corn[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Social Sciences), 2018, 19(3): 24-31.
- [6] 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 Y J. Biased technology progress, substitution elasticity and factors combination change of Chinese grain production[J]. Soft Science, 2017, 31(4): 27-30.
- [7] 付明辉, 祁春节. 要素禀赋、技术进步偏向与农业全要素生产率增长——基于 28 个国家的比较分析[J]. 中国农村经济, 2016(12): 76-90.
Fu M H, Qi C J. Factor endowments, technological progress biases, and agricultural total factor productivity growth: Based on a comparative analysis of 28 countries[J]. Chinese Rural Economy, 2016(12): 76-90.
- [8] 何悦, 王鸿飞. 玉米产业降本增效的潜力及途径——基于要素偏向性技术进步视角[J]. 科技管理研究, 2021, 41(12): 131-138.
He Y, Wang H F. Potential and ways of cost-saving and efficiency increase of corn industry: Based on factor-biased technological progress perspective[J]. Science and Technology Management Research, 2021, 41(12): 131-138.
- [9] 李明文, 王振华, 张广胜. 东北玉米种植结构调整与粮食高质量增长——基于全要素生产率视角[J]. 农业现代化研究, 2019, 40(5): 745-754.
Li M W, Wang Z H, Zhang G S. Adjustment of corn planting structure and the high-quality growth of grain in Northeast China from the perspective of the total factor productivity[J]. Research of Agricultural Modernization, 2019, 40(5): 745-754.
- [10] 张志新, 孙振亚, 林立. 农业技术进步、规模效率与粮食安全——以东北三省粳稻、玉米为例[J]. 资源开发与市场, 2022, 38(2): 178-185.
Zhang Z X, Sun Z Y, Lin L. Agricultural technological progress, scale efficiency and food security: A case of japonica rice and corn in the three provinces of northeast China[J]. Resource Development & Market, 2022, 38(2): 178-185.
- [11] 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 disequilibrium and convergence analysis of technical efficiency of grain production in China[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2015(4): 4-12.
- [12] 伍国勇, 张启楠, 张凡凡. 中国粮食生产效率测度及其空间溢出效应[J]. 经济地理, 2019, 39(9): 207-212.
Wu G Y, Zhang Q N, Zhang F F. Research on grain production efficiency and its spatial spillover effects in China[J]. Economic Geography, 2019, 39(9): 207-212.
- [13] 杨义武, 林万龙, 张莉琴. 农业技术进步、技术效率与粮食生产——来自中国省级面板数据的经验分析[J]. 农业技术经济, 2017(5): 46-56.
Yang Y W, Lin W L, Zhang L Q. Agricultural technological progress, technical efficiency and grain production: An empirical analysis of provincial panel data in China[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2017(5): 46-56.
- [14] Amare D, Endalew W. Agricultural mechanization: Assessment of mechanization impact experiences on the rural population and the implications for Ethiopian smallholders[J]. Engineering and Applied Sciences, 2016, 1(2): 39.
- [15] 周振, 孔祥智. 农业机械化对我国粮食产出的效果评价与政策方向[J]. 中国软科学, 2019(4): 20-32.
Zhou Z, Kong X Z. Agricultural machines subsidy policy and the grain output of China: DID empirical analysis based on national County-level data[J]. China Soft Science, 2019(4): 20-32.
- [16] 尹朝静, 付明辉, 李谷成. 技术进步偏向、要素配置偏向与农业全要素生产率增长[J]. 华中科技大学学报(社会科学版), 2018, 32(5): 50-59.
Yin C J, Fu M H, Li G C. Biased technological progress, biased factor allocation and agricultural TFP growth in China[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Social Science Edition), 2018, 32(5): 50-59.
- [17] 张在一, 杜锐, 毛学峰. 我国诱致性农业技术创新路径——基于十种农作物劳动力节约技术变革的研究[J]. 中国软科学, 2018(9): 15-25.
Zhang Z Y, Du R, Mao X F. The path to induced agricultural technology innovation in China: A research on labor-saving technological change based on ten crops[J]. China Soft Science, 2018(9): 15-25.
- [18] 黄佩佩, 魏凤. “一带一路”沿线国家粮食全要素生产率时空演变及驱动因素[J]. 世界农业, 2022(5): 5-15.
Huang P P, Wei F. Spatio-temporal evolution and driving factors of grain total factor productivity in countries along the “Belt and Road”[J]. World Agriculture, 2022(5): 5-15.

- [19] 宦梅丽, 侯云先. 农机服务、农村劳动力结构变化与中国粮食生产技术效率 [J]. 华中农业大学学报 (社会科学版), 2021(1): 69-80, 177.
Huan M L, Hou Y X. Mechanization services, rural labor structure change and technical efficiency in China's food crop production[J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2021(1): 69-80, 177.
- [20] 张丽, 李容. 农机服务发展与粮食生产效率研究: 2004—2016——基于变系数随机前沿分析 [J]. 华中农业大学学报 (社会科学版), 2020(2): 67-77, 165.
Zhang L, Li R. Research on agricultural machinery service development and grain production efficiency: 2004-2016: Based on stochastic frontier analysis of variable coefficients[J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2020(2): 67-77, 165.
- [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, 160.
Wu L L, Li G C, Zhou X S. The demand and substitution relations of grain production factors[J]. Journal of Zhongnan University of Economics and Law, 2016(2): 140-148, 160.
- [22] 邓明. 基于嵌套 CES 生产函数的多要素 Morishima 替代弹性估计 [J]. 数量经济技术经济研究, 2017, 34(7): 145-161.
Deng M. Estimation of multi-factor morishima substitution elasticities based on nested CES production function[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2017, 34(7): 145-161.
- [23] 高芸, 钟钰, 刘晓雪. 粮食增产千亿斤: 压力抑或潜力?——基于技术进步方向和关键要素的判断 [J]. 农业现代化研究, 2022, 43(4): 587-597.
Gao Y, Zhong Y, Liu X X. China's grain production increase by another 50 billion tons: Pressure or potential? Judgement based on the technical progress direction and key inputs[J]. Research of Agricultural Modernization, 2022, 43(4): 587-597.
- [24] Zhang X, Yang J, Thomas R. Mechanization outsourcing clusters and division of labor in Chinese agriculture[J]. China Economic Review, 2017, 43: 184-195.
- [25] 余东华, 张鑫宇, 孙婷. 资本深化、有偏技术进步与全要素生产率增长 [J]. 世界经济, 2019, 42(8): 50-71.
Yu D H, Zhang X Y, Sun T. Capital deepening, biased technological progress and total factor productivity growth[J]. The Journal of World Economy, 2019, 42(8): 50-71.
- [26] 涂正革, 陈立. 技术进步的方向与经济高质量发展——基于全要素生产率和产业结构升级的视角 [J]. 中国地质大学学报 (社会科学版), 2019, 19(3): 119-135.
Tu Z G, Chen L. The direction of technological progress and high-quality economic development: Based on the perspective of TFP and industrial structure upgrading[J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition), 2019, 19(3): 119-135.
- [27] 林毅夫, 董先安, 殷韦. 技术选择、技术扩散与经济收敛 [J]. 财经问题研究, 2004(6): 3-10.
Lin Y F, Dong X A, Yin W. Technique choice, technological diffusion and economic convergence[J]. Research on Financial and Economic Issues, 2004(6): 3-10.
- [28] 宦梅丽, 侯云先, 吕静. 农机作业服务对中国粮食生产技术效率的影响: 基于共同前沿方法的考察 [J]. 农林经济管理学报, 2022, 21(2): 136-145.
Huan M L, Hou Y X, Lü J. Agricultural mechanization service and technical efficiency in China's grains production: A meta analysis[J]. Journal of Agro-Forestry Economics and Management, 2022, 21(2): 136-145.

(责任编辑: 王育花)