

doi:10.16060/j.cnki.issn2095-8072.2024.03.003

资本深化、偏向性技术进步与农业全要素生产率

李平¹ 吴雪松² 王天琛³

(1. 山东理工大学经济与管理学部, 山东淄博 255012; 2. 山东理工大学经济学院, 山东淄博 255012;
3. 东北师范大学经济与管理学院, 长春 130117)

摘要: 生产要素的投入结构和农业技术进步是推动农业高质量发展, 实现乡村全面振兴的重要内容, 如何实现要素投入与技术进步方向的匹配以提升农业全要素生产率成为关键问题。本文在考虑农业生产投入结构的基础上, 基于标准化 CES 生产函数推导出包含偏向性技术进步指数和资本深化程度的 ATFP 函数, 系统刻画了偏向性技术进步、资本深化与要素效率对农业全要素生产率的影响机制。研究表明, 与基期相比, 我国农业部门的资本深化水平与资本偏向性技术进步指数均出现了较大增长, 资本深化与技术进步偏向的匹配关系会显著影响二者交互效应的大小和方向, 交互效应进一步对 ATFP 产生正向或负向的影响, 这种影响也会因为省份和农业主产区要素投入结构和要素效率的差异而有所不同。本文同时也解释了 1985 年至今我国农业要素投入结构变化与 ATFP 相对稳定的矛盾所在, 为农业进一步发展及当前农业要素投入结构下 ATFP 的提高提供了一定启示。

关键词: 资本深化; 偏向性技术进步; 要素效率; 农业全要素生产率

中图分类号: F32 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095 - 8072(2024)03 - 0030 - 17

一、引言

农业是百业之基, 支撑着国民经济的建设和发展。2023年中央农村工作会议指出要锚定建设农业强国目标, 阐明了推进乡村全面振兴的战略要求和主攻方向, 推进乡村全面振兴就是要解决好农业的发展问题。当前我国农业发展面临着农业劳动力流失、农业资本的持续性深化、技术进步偏向模糊等问题, 以农业全要素生产率 (agricultural total factor productivity, 下称 ATFP) 提升为农业发展的主要着眼点, 对于解决农业现存问题, 建设农业强国具有现实意义。ATFP 能够反映技术偏向与要素禀赋的匹配情况, 通过一维数据说明增长的效率和质量, 即农业发展中技术进步作用的大小 (Mizobuchi, 2015)。农业对中国经济发展的推动作用不亚于非农部门 (Cao et al., 2013), 解决好农业发展问题, 释放出农业积压的土地和劳动力等稀缺生产要素有助于加速经济发展和产业结构转型, 发挥农业的基础性作用, 也有助于协调城乡均衡发展, 共享发展成果。

以往对于全要素生产率的研究几乎均是建立在中性技术进步假定之上 (Antonelli & Quatraro, 2010), 然而技术进步存在强有偏性, ATFP 的增长也不是技术进步的替代变量, 非中性的技术进步会导致资本和劳动要素收入份额出现“剪刀差”现象。

在技术不断创新发展的同时会根据要素禀赋状况和要素配置的匹配关系形成技术进步偏向，同时要素投入也会根据时下技术产生投入结构的改变，两者具有较为复杂的变迁路径。已有研究实证检验了技术进步偏向与要素投入及要素生产效率的关系（Nin et al., 2003；王雅俊和王书斌，2011；王林辉和袁礼，2015），但基于农业要素禀赋转变的背景下，研究偏向性技术进步和ATFP关系的相关文献较为缺乏。自1985年中央一号文件《关于进一步活跃农村经济的十项政策》发布后，我国农业生产经历了持续性的资本深化。^①农业部门劳动力从1985年3.04亿人降低到2022年1.77亿人，占总人口比重从31.2%降至12.5%，占比年均降速约为1.1%；^②农、林、牧、渔业固定资产投资额从1985年35.91亿元增加至2022年29223.43亿元，年均增速119.28%，人均固定资产投资额同期从11.82元升至16510.41元，年均增加121.3%；^③农业机械总动力同期从3.81亿千瓦发展到11.06亿千瓦，人均机械总动力由1.15瓦增加到6.25瓦，年均增加1.04%。从数据上看，中国农业要素禀赋结构出现资本要素多于劳动力要素，进而形成农业资本深化的现象（罗浩轩，2013；匡远配和唐文婷，2015）。在劳动力深度转移但人地比例没有发生根本性变化的情况下，资本深化及其对劳动、土地要素的替代是ATFP增长的重要源泉（李谷成，2015）。为匹配农业资本深化现状，防止低效率要素的扩张，及时测度技术进步偏向使其最大限度耦合于农业资本深化现状，有助于充分发挥技术进步在农业经济领域的突出作用（Farooq et al., 2020；Chu et al., 2022；Delay et al., 2022）。

研究发现，不仅资本深化与技术进步偏向的不同匹配关系会对ATFP产生异质性影响，不同省份间资本存量及要素投入结构存在的较大差异也会造成资本深化程度不同所引起的生产率效应和要素替代效应的异质性（李谷成，2015）。基于农业资本深化程度提高的现实出发，本文通过探讨资本深化和偏向性技术进步交互效应的大小和方向以及交互效应如何作用于ATFP的增长，对实现技术进步偏向与农业资本深化相耦合，推动ATFP的提高和农业高质量发展具有实际参考意义。通过比较资本存量和要素效率在不同省份和主产区之间的差异可以进一步得出资本深化和偏向性技术进步的交互效应在不同维度的考量上亦有差异。

二、文献综述

在理论框架方面，Hicks（1932）最早定义了技术进步偏向，之后出现了索罗和哈罗德两类技术进步偏向的分支。Acemoglu（2002）对技术偏向做了重新解释且进一步扩展到非生产要素领域。关于要素配置与技术进步偏向的研究贯穿于技术偏向发展脉络之中，并在不断衍生中形成了许多不同的观点，如Hayami & Ruttan（1970）建立在要素价格相对变化基础上的诱致性技术（induced innovation）进步理论，Antonelli（2016）从要素禀赋方面理解技术变迁的技术一致性（technological

① 数据来源：中华人民共和国年度人力资源和社会保障事业发展统计公报，<http://www.mohrss.gov.cn/>。

② 数据来源：国家统计局，<http://www.stats.gov.cn/>。

③ 数据来源：作者计算。基准数据来源于国家统计局，1马力=0.746千瓦。

congruence) 理论, 以及 Acemoglu & Zilibotti (2001) 建立在技术扩散基础上的技术进步应基于自身特征进行私有化处理的适宜性技术进步 (appropriate technology) 理论等。上述几种观点涉及的技术进步理论均建立在不同地区要素禀赋条件上, 强调技术进步偏向与要素禀赋结构的匹配性, 而这种匹配性会影响生产中投入要素的生产效率和替代弹性, 进而对要素投入结构和产业结构演变形形成引致效应。基于上述观点的要素投入与技术进步是一种动态平衡和波动跟随的关系, 协调好技术偏向和要素禀赋演化对提高全要素生产率有突出作用。

已有众多国内外学者对农业技术进步和 ATFP 的关系进行了广泛探讨, 切入视角涉及农场规模和土地政策 (Rahman & Salim, 2013)、技术效率和配置效率 (Plastina & Lence, 2018)、数字普惠金融 (任健华和雷宏振, 2022) 和农业产业结构 (孙学涛和王振华, 2021) 等。也有学者从农业要素投入和农业技术进步的偏向出发, 考虑两者协调效应对 ATFP 的影响, 例如付明辉和祁春节 (2016) 从国际视角出发实证检验了不同要素禀赋类型国家农业技术进步的要害偏向, 结论认为在不同要素禀赋的国家间, 技术进步总体上偏向于节约劳动力要素。孙学涛和王振华 (2021) 利用 SARAR 模型证明了农业部门的资本偏向型技术进步对产业结构升级产生促进作用, 而农业部门的劳动偏向型技术进步会对产业结构升级产生抑制作用。姜钰等 (2024) 使用 SFA 生产函数对我国技术偏向、要素配置和林业的全要素生产率做了研究, 并证实林业的技术进步多数年份里偏向资本和林地, 部分地区林业的要素投入与要素效率状态未完全相适应。上述学者对农业技术进步和 ATFP 做了广泛研究, 但仍可在视角和细节等方面加以完善: (1) 鲜有文献从国内视角出发考察农业要素投入结构、农业技术进步偏向与 ATFP 的关系。(2) 一些研究对农业资本存量数据的统计缺少对折旧的考虑, 而且样本限于农业而不包括林业、渔业等部门。(3) 研究方法多采用非参数估计方法, 而此方法只能测度出技术进步偏向对 ATFP 的综合影响, 无法反映出对某一要素投入的具体偏向特征 (李静等, 2018)。(4) 部分研究嵌套工业领域的研究框架, 未对工农研究特点做出一个明确的区分。相对于工业生产, 农业生产具有更强的自然性和地域性 (龚斌磊, 2022), 研究中要突出考虑地形、气候等自然因素对农业生产的影响, 进而得出具有实际意义的 ATFP。

综上, 学界就农业资本、技术和全要素生产率虽已做了广泛深入的探讨, 但仍存在不足之处, 本文将尝试做出一些补充与扩展: 第一, 将偏向性技术进步理论与资本深化的交互关系扩展到农业部门, 结合 CES 生产函数构建了资本深化和偏向性技术进步对 ATFP 影响的理论框架。区别于传统的要素增强型 CES 生产函数增长核算方法, 本文将传统的 CES 生产函数标准化后, 通过数理论证推导出资本深化和偏向性技术进步对 ATFP 交互效应的作用机制, 在此基础上阐释交互项如何进一步影响 ATFP。第二, 利用 CES 生产函数测算出农业的要素替代弹性与要素生产效率, 借用数理模型进一步描绘九大农业主产区资本深化程度的变化趋势、资本偏向性技术进步指数的演变程度及二者的交互效应对 ATFP 大小和方向的影响, 并进一步推算其交互效应对 ATFP 的动态占比。第三, 基于对资本—劳动要素替代弹性和生产效率纵向维度和横向维度

的对比分析，从偏向性技术进步视角解释要素投入结构的动态演变与ATFP相对稳定的矛盾。非中性技术情境下，ATFP的增长取决于要素投入数量和要素使用效率两部分，而要素使用效率则进一步取决于要素与技术偏向的匹配程度，要素生产效率会影响到交互效应的实际效用水平。

三、理论分析与研究假说

(一) 基于 CES 生产函数的理论分析

基于Acemoglu (2002) 对于偏向性技术进步的定義，对技术进步偏向研究要考虑因技术进步形成的投入要素替代弹性的变化，也要考虑替代弹性变化对要素相对边际产出的影响。CES生产函数不仅包含要素替代弹性系数，也包含反映要素边际生产率变化的要素增强型技术进步等参数(李小平和李小克, 2018)，因此本文利用CES生产函数研究资本深化、偏向性技术进步以及二者的匹配程度对ATFP的影响。要素增强型CES生产函数通常表示为如下特定形式：

$$Y_t = F(\Gamma_t^K K_t, \Gamma_t^L L_t) = Y_0 \left[\pi_0 \left(\frac{\Gamma_t^K}{K_t} \right)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + (1 - \pi_0) \left(\frac{\Gamma_t^L}{L_t} \right)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} \quad (1)$$

$$\sigma = - \frac{d(K/L)}{d(MP_L/MP_K)} \frac{MP_L/MP_K}{K/L} \quad (2)$$

(1) 式中，下标 t 为时间标识， Y_t 、 K 和 L_t 分别为实际产出水平、资本投入和劳动投入； Γ_t^K 和 Γ_t^L 分别为资本和劳动的生产效率水平，亦称资本增强型技术进步水平和劳动增强型技术进步水平； $\sigma \in [0, +\infty)$ 为资本要素和劳动要素的要素替代弹性系数，

(2) 式为 σ 的展开式，表示要素边际产出之比变化一个百分比而导致的要素投入比例变化的百分比；分配参数 $\pi_0 \in (0, 1)$ ，在本文中表 示资本分布参数。

标准增长核算方法存在的要素市场竞争性前提和指数基准的问题(Sturgill, 2014)，导致分析结果缺乏可比性和真实性，本文借鉴Klump et al. (2007)、León-Ledesma等(2010)的做法对要素增强型CES生产函数的一般形式进行标准化处理，得到如下标准化要素增强型CES生产函数：

$$Y_t = F(\Gamma_t^K K_t, \Gamma_t^L L_t) = Y_0 \left[\pi_0 \left(\frac{\Gamma_t^K K_0}{\Gamma_0^K K_t} \right)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + (1 - \pi_0) \left(\frac{\Gamma_t^L L_0}{\Gamma_0^L L_t} \right)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} \quad (3)$$

(3) 式中， Y_0 、 K_0 和 L_0 分别为基期产出水平，基期的资本和劳动投入。

偏向性技术进步指数(biased technological change index, BTCl)取决于要素替代弹性和要素增强型技术进步两部分(Acemoglu, 2002)，为避免要素替代弹性导致的要素增强与技术进步偏向不能同时识别的问题(Diamond et al., 1978)，要素增强型技术进步通常表示为特定形式：

$$\Gamma_t^i = \Gamma_0^i e^{g_i(t, t_0)}; i = K, L \quad (4)$$

(4) 式可进一步化简为 $g_i(t, t_0) = \ln(\Gamma_t^i) / (\Gamma_0^i)$ ， $t = t_0$ 是标准化的基期； Γ_0^i 为基期的要

素增强型技术水平； $g_i(t, t_0)$ 为要素 i 的增强型技术进步函数，其数理含义为 t 期 i 要素增强型技术进步 Γ_t^i 相对于其基期 Γ_0^i 水平的对数值，其经济含义为：若 $g_i(t, t_0) > 0$ ，则表明 i 要素生产效率相对于基期水平上升，反之则相反。 $g_i(t, t_0)$ 越大，则 i 要素生产效率水平较基期越高。将 (4) 式做对数处理并综合要素相对边际产出定义进行化简，利用 σ 进一步标准化简化结果可得：

$$BTCl_{t,t_0} = \frac{\sigma - 1}{\sigma} [g_k(t, t_0) - g_L(t, t_0)] = \frac{\sigma - 1}{\sigma} \ln \left(\frac{\Gamma_t^K / \Gamma_0^K}{\Gamma_t^L / \Gamma_0^L} \right) \quad (5)$$

(5) 式表示技术进步影响资本—劳动边际技术替代率 (marginal rate of substitution, MRTS) 的方向和程度，其实质是技术进步导致的要素相对生产率的变化。在 $\sigma \neq 1$ 且 $g_k(t, t_0) \neq g_L(t, t_0)$ 的前提下， $BTCl(t, t_0)$ 若非负，则表示技术进步使资本—劳动边际技术替代率上升，呈现为资本偏向型 (劳动节约型) 技术进步；反之资本—劳动边际技术替代率降低，呈现为劳动偏向型 (资本节约型) 技术进步。

为明确技术进步的时变性和技术进步轨迹，减少因数据非正态性质导致的样本数据高峰度和高偏度对回归结果的影响。本文放松现有研究将 (4) 式中 $g_i(t, t_0)$ 设定为固定增长率指数增长形式的研究假设 (León-Ledesma et al., 2010; 陆菁和刘毅群, 2016; 袁礼和欧阳峤, 2018)，将 $g_i(t, t_0)$ 做 Box-Cox 变换后表示如下：

$$g_i(t, t_0) = \frac{\gamma_i t_0 \left(\left(\frac{t}{t_0} \right)^{\lambda_i} - 1 \right)}{\lambda_i}; i = K, L \quad (6)$$

结合 (4) 式，(6) 式中 γ_i 为要素增强型技术的增长速率，影响 Γ_t^i 的增长速率； λ_i 为技术曲率，影响 Γ_t^i 增长轨迹； γ_i 和 λ_i 共同决定了 Γ_t^i 的位置和形状。 $g_i(t, t_0)$ 表示 i 要素生产效率相对于基期水平的提升，其数值大小同要素生产效率呈正相关关系。

(二) 机制分析与理论假说

为进一步梳理资本深化、偏向性技术进步与 ATFP 增长的作用机制，本文借鉴 León-Ledesma et al. (2010) 的函数处理思路，采用 Kmenta 近似法，以 (3) 式中 σ 为自变量并做对数处理后，在 $\sigma=1$ 处做一阶泰勒展开，令 $k_t = \ln \left(\frac{K_t/K_0}{L_t/L_0} \right)$ 表征资本深化程度，可得：

$$\begin{aligned} \ln y_t = & \pi_0 \ln k_t + \frac{\pi_0(1-\pi_0)(\sigma-1)}{2\sigma} (\ln k_t)^2 + \pi_0 \left[1 + \frac{(1-\pi_0)(\sigma-1)}{\sigma} k_t \right] g_K(t, t_0) \\ & + (1-\pi_0) \left[1 - \frac{\pi_0(\sigma-1)}{\sigma} k_t \right] g_L(t, t_0) + \frac{\pi_0(1-\pi_0)(\sigma-1)}{2\sigma} [g_K(t, t_0) - g_L(t, t_0)]^2 \end{aligned} \quad (7)$$

(7) 式中，人均产出函数可以分解为资本深化水平项和 ATFP 水平项。为避免资本深化净值对资本深化和技术偏向的交互效应产生干扰，本文参考李小平和李小克 (2018) 的函数处理方式，进一步去除资本深化净值项，整理可得：

$$\begin{aligned} atfp_t = \ln ATFP_t = & \pi_0 \left[1 + \frac{(1-\pi_0)(\sigma-1)}{\sigma} k_t \right] g_K(t, t_0) \\ & + (1-\pi_0) \left[1 - \frac{\pi_0(\sigma-1)}{\sigma} k_t \right] g_L(t, t_0) + \frac{\pi_0(1-\pi_0)(\sigma-1)}{2\sigma} [g_K(t, t_0) - g_L(t, t_0)]^2 \end{aligned} \quad (8)$$

(8)式为标准化ATFP的对数函数,是由偏向性技术进步函数和资本深化函数组合形成的复合函数,其中 k_t 是相对于基期水平资本劳动比值的对数值,即标准化资本深化程度, $k_t > 0$ 表明资本深化程度较基期上升且数值越大资本深化程度越高。

区别于以往研究,本文以要素替代弹性和要素效率变化代表技术进步偏向,阐释了资本深化和偏向性技术进步会对资本和劳动要素的边际产出和边际技术替代率产生影响,进而会影响到ATFP。基于(5)式可知,要素增强型技术进步函数的变动取决于要素生产效率,而资本深化与偏向性技术进步对 $g_i(t, t_0)$ 产生影响,结合(8)式可知资本深化和偏向性技术进步必然会对ATFP产生影响。为进一步探究其中的影响机制,本文对 k_t 求偏导可得:

$$\frac{\partial atfp_t}{\partial k_t} = \frac{\pi_0(1-\pi_0)(\sigma-1)}{\sigma} [g_K(t, t_0) - g_L(t, t_0)] = \pi_0(1-\pi_0) \cdot BTCL_{t, t_0} \cdot \left(\frac{\sigma-1}{\sigma}\right)^2 \quad (9)$$

根据(9)式可知,ATFP增长的正负取决于资本深化水平和偏向性技术进步指数的组合效应。根据要素替代弹性理论,资本深化水平的持续上升,会导致资本—劳动要素的边际技术替代率递减。由(5)式可得,若劳动要素生产效率水平大于资本要素生产率水平,即农业生产出现劳动增强型技术进步时,结合农业资本深化现状,二者会进一步削弱资本—劳动要素边际技术替代率递减规律的作用,此时资本偏向性技术进步指数为正,即资本深化同ATFP呈正相关关系。如果起始状态时资本要素生产效率高于劳动要素生产效率,即农业生产出现资本增强型技术进步时,此时的资本偏向性技术进步指数为负,即资本增强型技术进步缩小了资本深化对资本—劳动要素边际技术替代率递减的削弱作用,其具体表现为边际技术替代率递减效应的增强,使得资本深化与ATFP呈负相关关系。同时为进一步考察不同省份和主产区的资本深化程度、技术进步偏向和交互效应的差异,本文以资本存量差异为基础进行了对比分析。考察结果显示,在1985~2022年间我国各省份和主产区之间资本深化程度和要素生产效率存在差异,其导致与资本深化相关的技术进步偏向和交互效应在本文研究的样本期内出现明显的差异,据此本文提出以下假说:

假说1:在其他条件不变时,偏向性技术进步与各主产区要素深化方向具有一致性,这种一致性作用于ATFP增长且一致性程度呈现增长趋势。

假说2:在农业资本深化持续阶段,偏向性技术进步与资本深化的正向匹配将推动ATFP的增长,且增长速度与匹配程度显著相关。

假说3:受限于资本存量和要素效率差异,资本深化程度在不同主产区之间变化速度不同,进而导致资本深化和偏向性技术进步交互效应对ATFP增长的作用在各省份和主产区之间存在异质性。

四、变量选取、数据处理与参数估计

(一) 变量选取和数据处理

本文原始数据来自历年《中国统计年鉴》《中国经营管理统计年报》《中国农村政策与改革统计年报》《中国农村合作经济统计年报》和《中国国民经济和社会发展

统计公报》等，数据以1985年为基期进行平减处理。

1. 农业（农林牧渔业）总产值（ Y_t ）：基准数据源自国家统计年鉴的“农、林、牧、渔业”总产值，包括各个系统的全部农林牧渔业生产单位产值部分和非农行业单位附属的农林牧渔业生产活动单位的产值部分。因所公布数据均是按当年价格计算，不利于观测农业总产值的长期变动趋势，本文以总产值变动指数对各省份农业生产总值进行平减处理后使用。

2. 农业资本投入（ K_t ）：基准数据源自统计年鉴的“各行业固定资产投资额”。资本投入核算依据永续盘存法对农业资本存量进行估算，公式如下：

$$K_t = I_t + (1 - \delta)K_{t-1} \quad (10)$$

其中， K_t 和 K_{t-1} 表示当期和前一期的资本存量； I_t 表示当期资产投资，选取农业固定资本形成总额作为当期资产投资（Young, 2003；李谷成, 2014）； δ_t 表示当期折旧率，在此取5.6%（龚斌磊, 2022）。令 $D_t=K_{t-1}$ ， δ 作为资本折旧额并对（10）式变形处理可得：

$$K_t = K_{t-1} + I_t - D_t \quad (11)$$

3. 资本总成本份额（ R_t^K ）：用平减后的农业总产值减去实际劳动总收入得到实际资本总收入，然后以实际资本总收入与实际农业总产值的比值表示。

4. 劳动投入（ L_t ）：由第一产业从业人数与各省农户人均收入乘积表示。

5. 劳动总成本份额（ W_t^L ）：劳动投入乘以劳动价格（ w_t ）得到名义劳动收入后，用农村居民消费价格指数进行平减处理计算出实际劳动收入，然后以实际劳动收入与实际农业总产值的比值表示。其中劳动价格以农业人均可支配收入表示。

通过对样本数据进行统计分析可得图1(图中资本对应左纵轴、农业产值与劳动力对应右纵轴)。除农业劳动力数量外，农业生产总值、资本投入量和人均资本总体呈上升趋势。经历38年发展我国农业生产总值增加了36倍，资本投入量从1985年的35.91亿元增加到2022年29223.43亿元，农业劳动力从3.04亿人减少到1.77亿人，人均资本由11.82元增加至16510.41元。综合图

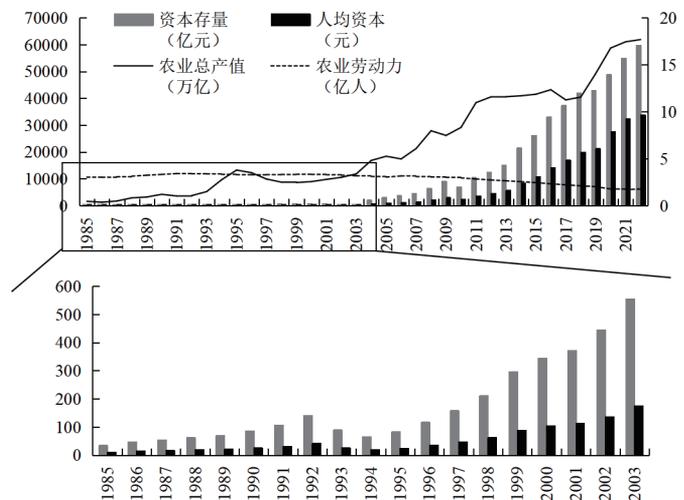


图1 样本数据指标统计分析

1和上述数据可得，我国人均资本正在不断增加，且增速呈现出稳中有进的态势。

（二）参数估计方法

基于标准化要素增强型CES生产函数构建的ATFP测算体系，关键在于对函数参

数的估计。Klump et al. (2007) 通过标准化供给面系统法缓解了参数识别的偏误, 提高了估计的准确性。本文借鉴其系统构建思路, 在(4)式的基础上, 构建如下标准化供给面系统方程组:

$$\begin{aligned} \ln \frac{Y_t}{Y_0} &= \ln \zeta + \frac{\sigma}{\sigma-1} \ln \left[\pi_0 \left(\frac{\Gamma_t^K K_t}{\Gamma_0^K K_0} \right)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + (1-\pi_0) \left(\frac{\Gamma_t^L L_t}{\Gamma_0^L L_0} \right)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right] \\ \ln R_t^K &= \ln \left[\frac{\pi_0}{1+\mu} \frac{\zeta Y_0}{K_0} \right] + \frac{1}{\sigma} \ln \left[\frac{Y_t / (\zeta Y_0)}{K_t / K_0} \right] + \frac{\sigma-1}{\sigma} \ln \left(\frac{\Gamma_t^K}{\Gamma_0^K} \right) \\ \ln W_t^L &= \ln \left[\frac{(1-\pi_0)}{1+\mu} \frac{\zeta Y_0}{L_0} \right] + \frac{1}{\sigma} \ln \left[\frac{Y_t / (\zeta Y_0)}{L_t / L_0} \right] + \frac{\sigma-1}{\sigma} \ln \left(\frac{\Gamma_t^L}{\Gamma_0^L} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

式中 W_t^L 和 R_t^K 分别为劳动和资本收入份额, ζ 为标准化参数, 标准化基期变量均以样本算术平均值表示。要素替代弹性 σ 和标准化参数 ζ 由标准化供给面系统估计可得。

五、实证分析

(一) 参数估计结果分析

为减少内生性和异方差对估计结果的影响, 本文采用非线性似不相关估计(NLSUR)对标准化供给面系统方程组(12)式的参数进行估计, 结果如表1所示: 各省份的参数估计结果均在1%水平上显著, 要素替代弹性的估计结果分布于最低海南的0.381与最高上海的0.699之间, 全国农业整体上的要素替代弹性为0.528。

表1 1985~2022年中国各省份要素替代弹性估计结果

省份	要素替代弹性	省份	要素替代弹性	省份	要素替代弹性
北京	0.625*** (20.18)	浙江	0.568*** (42.73)	海南	0.381*** (22.00)
天津	0.605*** (33.91)	安徽	0.597*** (59.16)	重庆	0.499*** (54.14)
河北	0.484*** (39.70)	福建	0.516*** (61.64)	四川	0.550*** (54.92)
山西	0.595*** (39.27)	江西	0.588*** (61.67)	贵州	0.512*** (33.52)
内蒙古	0.494*** (38.51)	山东	0.564*** (54.12)	云南	0.498*** (51.58)
辽宁	0.553*** (46.24)	河南	0.548*** (51.49)	陕西	0.531*** (58.61)
吉林	0.607*** (47.12)	湖北	0.505*** (58.95)	甘肃	0.504*** (25.25)
黑龙江	0.440*** (37.20)	湖南	0.579*** (58.81)	青海	0.443*** (26.75)
上海	0.699*** (22.46)	广东	0.504*** (33.76)	宁夏	0.442*** (25.24)
江苏	0.579*** (57.84)	广西	0.502*** (45.80)	新疆	0.385*** (17.03)

注: ***, **, *分别表示在1%、5%、10%水平上显著, 括号内为t值。

(二) 中国农业部门资本深化和技术进步偏向的交互效应

结合各省份要素替代弹性分布以及资本分配参数的估计结果, 我们可以估计各期资本生产效率水平 Γ_t^k 和劳动生产效率水平 Γ_t^l 。根据(5)式得到标准化偏向性技术进步指数($BTCL_{t,t_0}$), 根据(8)式得到标准化全要素生产率的对数值 $atfp_t$ 和资本深化程度 k_t 。为明晰我国宏观层面的ATFP地区^①变化情况及演变趋势、资本深化程度和资本深化与偏向性技术进步的交互效应, 我们将计算得到的各项标准化数据进行分区平均化处理, 具体如图2所示。分析图2可知, 在资本深化变化趋势方面与基期相比各地区资本深化程度波动上升, 黄土高原区、四川盆地及周边地区和云贵高原区的资本深化程度最高, 这也从侧面反映了两地农业固定资产投资额保持正向增长, 农业资本增长速度超过农业劳动力增长速度, 进而导致农业资本深化程度不断提高的同时资本使用与劳动要素使用逐渐失衡的情况。青藏高原区和北方干旱半干旱区资本深化程度较低, 究其原因在于两地农业劳动力人口较多, 地区经济增长点多在于石油、有色金属、盐化工和电力等资源开发领域以及机器制造、食品和纺织等工业门类, 农业生产也多以旱作农业和草原牧业为主, 对于农业固定资产投资较少。

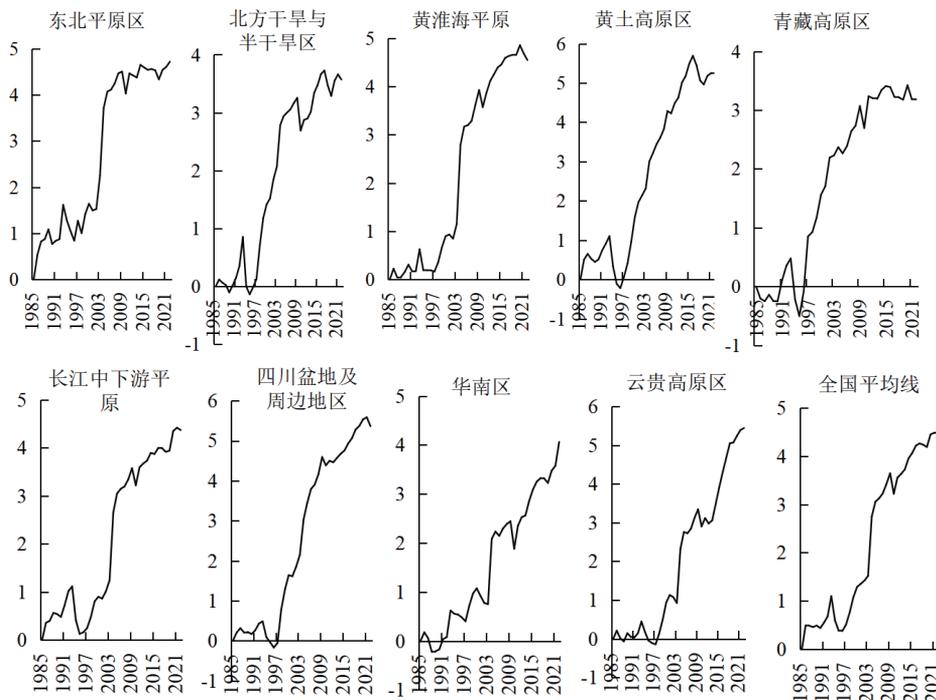


图2 1985~2022年农业主产区及全国平均资本深化程度变化趋势

① 全国农业区划委员会根据农业生产条件、特征和发展方向、重大问题和关键措施及行政单位的完整性等原则, 综合考虑地形气候等农业生产必要条件, 形成的《中国综合农业区划》将全国划分为九大农业主产区: 东北平原区A: 黑龙江、吉林、辽宁; 北方干旱半干旱区B: 内蒙古、新疆、甘肃、宁夏; 黄淮海平原C: 北京、天津、河北、山东、河南; 黄土高原区D: 山西、陕西; 青藏高原区E: 青海, 西藏 (不参与本文统计); 长江中下游平原区F: 江苏、上海、浙江、安徽、江西、湖南、湖北; 四川盆地及周边地区G: 四川、重庆; 华南区H: 福建、广东、海南, 台湾、香港和澳门 (不参与本文统计); 云贵高原区I: 云南、贵州、广西。

图3报告了各主产区及全国平均资本偏向性技术进步指数，从中可以看出资本偏向性技术进步的演变具有两个显著特征：第一，中国农业发展具有明显的资本驱动型技术增长趋势，全国农业产业BTCI上涨幅度为14.27。在小农经济的基础上，伴随着长期的资本积累、农业科技创新及中国现代化进程，农业逐渐走向产业化、工业化与数字化的发展道路。农业结构逐渐从种养为主转变为食品和深加工为主，农业技术发展呈现出显著的资本化趋势。第二，黄土高原区、四川盆地及周边地区和云贵高原区BTCI高于全国平均发展水平，北方干旱半干旱区、黄淮海平原、长江中下游平原区、华南区和青藏高原区BTCI低于全国平均发展水平，东北平原区BTCI与全国平均发展水平持平。黄土高原区通过农业生产技术的大规模应用提高了集约化农业的生产力，推动高原农业向绿色发展转型（岳邦瑞等，2010；He et al., 2021），其发展呈现出明显的资本偏向性技术进步。四川盆地及周边地区和云贵高原区的农业发展离不开地区现代农业发展政策的推动，吸引了大量的农业资本，两地域内省份均有较高的农业科技进步贡献率。黄淮海平原、长江中下游平原区、北方干旱半干旱区、青藏高原区和华南区地域农业劳动人口密度较高且与基期相比农业资本变化率与劳动力变化率动态差距较小，导致了资本深化程度低于全国平均水平。

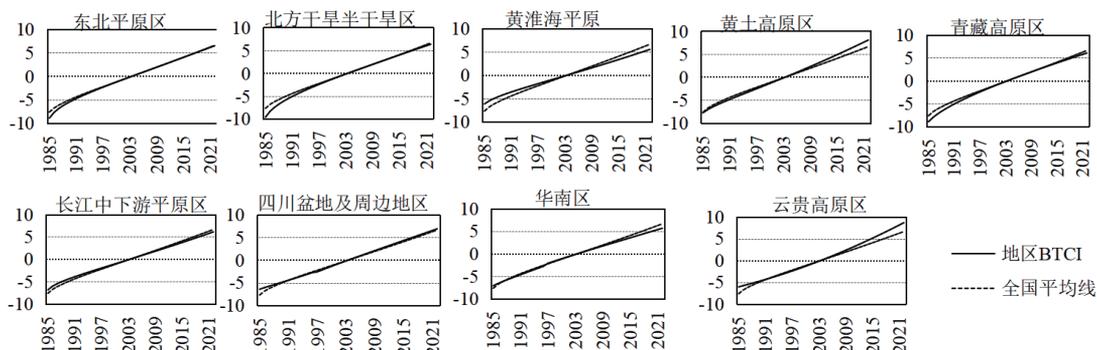


图3 1985~2022年农业主产区及全国平均BTCI变化趋势

根据图4可得，从样本整体的时间趋势看，1985~2022年中国ATFP呈现波动上升的趋势，全国平均ATFP增长0.03，东北平原区、黄土高原区、四川盆地及周边地区和云贵高原区ATFP始终领先于全国平均水平，黄淮海平原、长江中下游平原区和华南区ATFP低于全国平均水平。结合图2和图3可知，随着资本深化的加深与BTCI的增长使得北方干旱半干旱区和青藏高原区分别

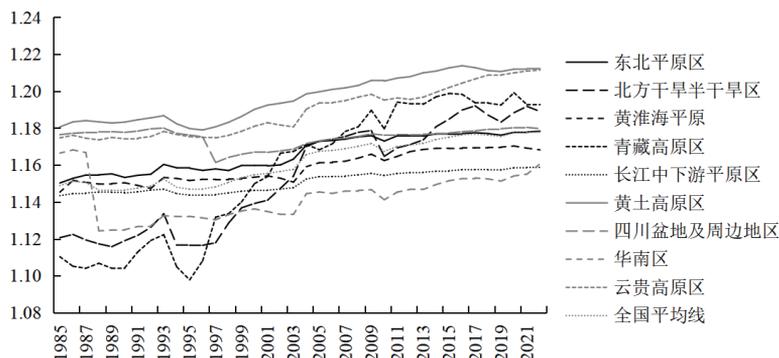


图4 基于CES生产函数下1985~2022年中国宏观ATFP地区变化

在2004年和2001年超过全国平均线且呈现出较高的ATFP增长水平。

为进一步研究各地区资本深化、资本偏向性技术进步与农业全要素生产率的是否存在交互效应等问题，通过（9）式计算可得资本深化和偏向性技术进步的交互效应大小及其时变趋势。据图5可以看出，对于整个中国农业层面，资本深化和技术进步偏向的交互效应占ATFP的比重由负转正，各地区交互效应增长趋势同ATFP增长趋势相匹配。结合图5与上文分析可知北方干旱半干旱区与青藏高原区的ATFP增长中，资本深化与技术偏向的交互效应占ATFP增长的比重较高且占比有加速增长的趋势。

基于上述分析，本文假说1得到证明。在各地农业发展中，技术进步偏向与要素深化方向具有一致性，农业资本深化程度虽然在占比结构上有所差异，但在整体深化程度上不断加深且农业技术进步偏向资本，进而导致了在ATFP增长中技术进步方向由劳动偏向型逐渐转变为资本偏向型，其作用也逐渐从提高劳动效率逐渐转变为提高资本使用效

率上，ATFP中资本技术增长占比增加。据1985~2022年统计数据验证，资本深化和偏向性技术进步的一致性对我国ATFP

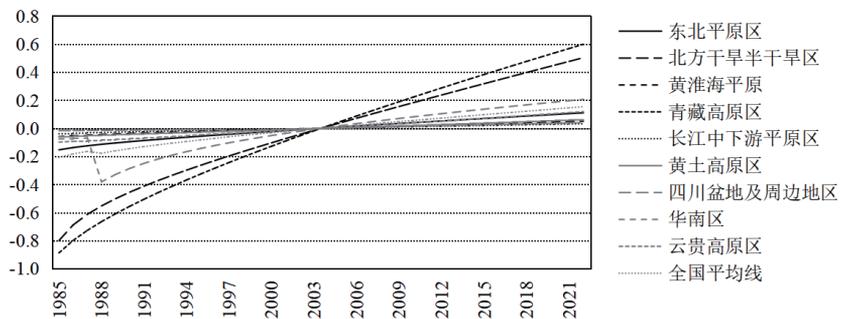


图5 资本深化、资本偏向性技术进步的交互效应占ATFP增长比重

的增长起到正向作用且总体呈加速增长趋势。

（三）资本深化和偏向性技术进步的交互效应对ATFP的影响

前文从ATFP的构成剖析了资本深化和偏向性技术进步的交互效应。为进一步研究交互效应对ATFP的影响，本文参考李小平和李小克（2018）做法并结合（7）式，将传统的索罗余值测算全要素生产率的对数函数改写为全要素生产率增长率函数：

$$\frac{\Delta atfp_t}{atfp_t} = \exp \left[\ln \frac{y_{t+1}}{y_t} - \pi_0 \ln \frac{k_{t+1}}{k_t} - \pi_0 (1 - \pi_0) \frac{\sigma - 1}{2\sigma} \ln(k_{t+1} k_t) \ln \frac{k_{t+1}}{k_t} \right] - 1 \quad (13)$$

在（13）式的基础上并结合DEA-Malmquist方法分别以技术进步偏向是否可知及技术进步是否可分两个大类三个视角进行比较，明晰资本深化和偏向性技术进步的交互效应如何影响ATFP的大小和方向，以此作为本文稳健性研究的重要内容，对比结果如图6所示。据图6，以技术效率为统计口径的DEA-Malmquist方法测算出的农业生产效率，其统计方法以技术效率和规模效率的乘积表示，缺乏对技术进步偏向和要素禀赋条件的考虑，从而导致以该方法统计的农业生产效率在不同发展阶段具有相当的不稳定性，这会迷惑农业生产决策的制定，背离了农民经济行为“安全第一的拇指原则”（safety first rules of thumb），不符合农民风险规避的偏好（Roumasset, 1976; Ellis, 1993）。余值法允许偏向性技术进步的存在，但在技术进步偏向未知

时，模型无法准确识别技术进步偏向的大小和程度，无法准确识别技术进步对农业生产效率变化的驱动机制（李小平和李小克，2018），仅考虑要素投入而忽视技术进步方向和大小，容易将农业发展简单理解为“投入—产出”类型行业，将ATFP的大小与要素投入视作绑定

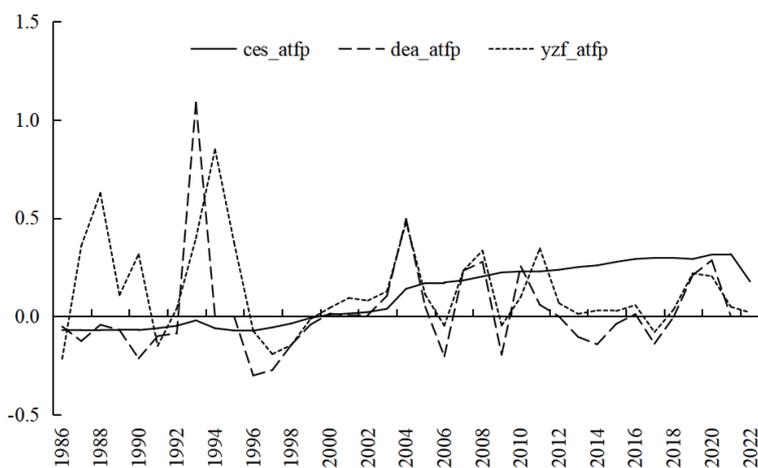


图6 不同算法下ATFP的增长率情况(%)

关系。随着农业资本深化水平的不断加深，不考虑农业投入要素禀赋条件变化和技术偏向的要素投入对ATFP增长的作用无限趋小，要素投入的失衡将对农业发展产生负向影响。

相较于上述农业生产效率测算方法，由考虑到农业本身要素禀赋条件和技术进步偏向的CES生产函数测算方法测算的ATFP具有较高的稳定性和科学性，它从要素替代弹性出发，将标准化的ATFP分解成资本深化和偏向性技术进步两部分，根据1985~2022年农业发展数据并结合图5对农业资本深化程度、技术进步偏向和交互效应进行分析，得出二者的匹配程度会直接影响ATFP增长的大小和方向的结果。如图6所示，当资本深化和技术进步偏向正向匹配时，ATFP增长率呈现出上涨趋势；当二者错配或失衡时，ATFP增长率会降低，因考虑到要素投入和技术进步的匹配关系，ATFP降低的幅度也远小于公式法测算的结果。由此本文假说2得到证明，即在农业资本深化持续阶段，偏向性技术进步与资本深化的匹配程度将影响ATFP的增长大小和方向。

（四）交互效应在不同省份间是否存在异质性

前文分析中将我国农业全要素生产率分析划分为9个农业主产区和1个全国平均线，为进一步分析资本深化和偏向性技术进步与ATFP的交互效应在不同省份间是否存在异质性，本文从30个省份出发，以2006年全面取消农业税为分界线将研究时段划分为1985~2006年和2007~2022年两个阶段。在此基础上分别以标准化资本深化程度、标准化偏向性技术进步指数和交互效应占比指数三种关键指标进行纵向维度和横向维度的对比研究（表2）。

由表2可知，在1985~2006年阶段各省份和主产区BTCI均为负值，该阶段农业生产的技术偏向于劳动要素的使用，资本深化与偏向性技术进步呈现出负向匹配的关系，其交互效应占ATFP的比重为负值，交互效应对ATFP增长的推动作用较小。在2007~2022年阶段各省份和主产区资本深化水平和BTCI均为正值且呈现上升趋势，

表 2 1985~2022 年中国各省份间样本指标的异质性

地区	1985-2006年				2007-2022年			
	资本深化	BTCI	ATFP	交互占比	资本深化	BTCI	ATFP	交互占比
A	2.50	-3.21	1.16	-3.21	4.47	3.86	1.18	0.07
辽宁	1.64	-2.92	1.13	-2.92	4.10	3.10	1.14	0.02
吉林	3.93	-2.82	1.17	-2.82	5.09	4.01	1.18	0.01
黑龙江	1.92	-3.89	1.17	-3.89	4.24	4.46	1.21	0.16
B	2.13	-3.30	1.14	-3.30	3.29	3.80	1.18	0.30
内蒙古	3.48	-3.80	1.16	-3.80	4.75	3.90	1.18	0.06
甘肃	1.21	-2.70	1.13	-2.70	4.10	3.10	1.14	0.02
宁夏	2.17	-3.38	1.14	-3.38	5.09	4.01	1.18	0.01
新疆	1.66	-3.33	1.11	-3.33	4.24	4.46	1.21	0.16
C	2.04	-2.36	1.15	-2.36	4.24	3.21	1.17	0.03
北京	0.41	-1.64	1.11	-1.64	3.11	3.10	1.14	0.05
天津	3.54	-0.99	1.10	0.01	3.94	1.48	1.11	0.03
河北	3.70	-4.04	1.17	-4.04	4.67	4.33	1.19	0.05
山东	1.56	-3.05	1.17	-3.05	4.88	4.04	1.18	0.01
河南	1.00	-3.10	1.20	-3.10	4.61	4.53	1.22	0.03
D	3.16	-3.18	1.19	-3.18	4.85	4.66	1.21	0.04
山西	2.08	-2.83	1.17	-2.83	4.70	4.18	1.19	0.02
陕西	4.23	-3.52	1.21	-3.52	4.75	3.90	1.18	0.06
E	3.13	-3.38	1.13	-3.38	3.14	3.69	1.19	0.36
青海	3.13	-3.38	1.13	-3.38	3.14	3.69	1.19	0.36
F	2.84	-2.63	1.15	-2.63	3.82	3.55	1.16	0.02
上海	3.33	-0.93	1.02	-0.93	1.60	0.78	1.02	0.00
江苏	2.85	-2.94	1.15	-2.94	4.35	3.72	1.15	0.01
浙江	1.93	-2.78	1.14	-2.78	3.56	3.35	1.15	0.02
湖北	4.20	-3.36	1.18	-3.36	3.80	3.98	1.18	0.05
湖南	3.45	-2.94	1.17	-2.94	4.63	4.81	1.22	0.02
安徽	2.65	-2.62	1.16	-2.62	4.08	4.09	1.19	0.02
江西	1.49	-2.82	1.20	-2.82	4.58	4.72	1.22	0.04
G	3.45	-1.84	1.17	-1.84	4.82	4.10	1.18	0.02
重庆	4.15	-0.84	1.15	-0.84	5.07	3.56	1.16	0.03
四川	2.75	-2.84	1.18	-2.84	4.57	4.64	1.19	0.02
H	2.71	-2.66	1.13	-2.66	2.91	3.36	1.15	0.13
福建	1.61	-3.55	1.20	-3.55	4.58	4.72	1.22	0.04
广东	3.06	-2.45	1.14	-2.45	4.71	4.11	1.18	0.01
海南	3.47	-1.99	1.06	-1.99	4.88	4.04	1.18	0.01
I	1.85	-3.09	1.18	-0.04	4.00	5.28	1.20	0.07
广西	0.68	-3.32	1.18	-3.32	3.83	4.83	1.21	0.08
贵州	3.21	-2.63	1.18	-2.63	1.68	1.62	1.07	0.24
云南	1.66	-3.31	1.18	-3.31	5.07	3.56	1.16	0.03
平均线	1.15	-2.85	1.15	-2.85	3.95	3.95	1.18	0.12

注：①表中字母A~I为全国农业区划委员会划分的九大农业区代码，见上文。②为突出各指标变化情况，表2指标均以指数表示。③海南省数据基准选取为1988年，重庆市数据基准选取为1997年，平均线为全国平均水平。

两者的交互效应占ATFP的比重由负转正，黑龙江、新疆、贵州、北方干旱半干旱区、青藏高原区和华南区两者的交互效应占ATFP增长的比重较大。对样本指标纵向考察可得不同省份和主产区参与对比的样本指标均呈增长趋势且增长只存在量的大小，不存在质的差别，即2007~2022年各指标均呈现正值增长状态。不同的资本深化

和偏向性技术进步的匹配效果会对ATFP产生不同的作用，两者呈正向匹配时，其交互效应对ATFP的提高起到促进作用，反之，如果偏向性技术进步指数或者资本深化水平之间有一方或者双方都出现负值，偏向于资本以外要素，则两者的交互效应对ATFP的增加起到削弱作用。

进一步对样本期内各指标进行横向考察可知，相比于其他省份，甘肃、宁夏、河北、山东、江西、福建和云南有更快的资本深化速度，河北、山东、河南、湖北、湖南、江西、四川、福建、东北平原区、北方干旱半干旱区、黄土高原区、青藏高原区和云贵高原区等省份和主产区具有高于全国平均水平的BTCI。^①相比于其他省份和主产区，河北、山东、河南、湖北、福建、东北平原区、北方干旱半干旱区、黄土高原区和青藏高原区存在较高资本深化程度和BTCI从而具有较高的交互效应占比。通过研究发现交互效应占比较低区域具有较高的劳动力数量并且劳动要素效率高于资本效率，进而导致资本要素的使用无法对该类地区形成有效的劳动要素替代，使得交互效应占ATFP的比重较低。

在样本期内，要素禀赋结构和技术进步偏向是动态变化的，但ATFP的增长相对稳定，这便构成了要素投入结构的动态演变与ATFP相对稳定的矛盾。总体上看，样本期内所有省份和主产区的资本深化程度均呈现一定程度的上涨，这与中国经济发展现状类似，伴随着物价通胀和劳动力价格的不断提升，如何利用好资本深化与技术偏向的交互效应成为农业发展的一件大事。根据表2可以得出结论，高效地利用资本，更好地发挥出资本深化和技术进步偏向匹配的交互效应，有利于在保证ATFP相对稳定的同时，改善ATFP增长动力的结构。通过实现要素禀赋与技术偏向的匹配，会提高要素投入的准确度和投入要素的使用效率，有利于推动农业的高质量发展，加速农业强国目标的实现。

通过上述分析可证实本文所提出的假说3，即受限于资本存量和要素效率差异，资本深化程度在不同省份变化速度不同，进而导致资本深化、偏向性技术进步对ATFP的交互效应在省份之间存在异质性。

六、结论与启示

本文在借用Acemoglu（2002）关于偏向性技术进步的定義与识别准则的基础上采用了标准化CES生产函数，构建了标准化三方程组供给面系统对农业全要素生产率、资本深化程度和偏向性技术进步指数进行了测算和分析。研究表明，资本深化与技术进步偏向的匹配程度对于非中性技术进步环境下的ATFP增长变化具有一定程度的影响作用。第一，技术进步在ATFP增长中作用的大小和方向内涵于偏向性技术进步与资本深化方向的匹配关系中，技术进步偏向于富裕要素的使用会提高要素的使用效率，进而推动ATFP的增长。反之，技术偏向于稀缺资源的使用会不利于ATFP的长效增长。第二，ATFP增长的大小受到技术进步偏向与资本深化交互效应的直接

^① 本文对样本指标大小的评判标准均基于与全国平均线的比较。

影响,对于具有较高资本深化水平和BTCI的省份和主产区,其交互效应对ATFP的作用更大,反之,具有较低资本深化水平或BTCI的省份和主产区,其交互效应占比较小。第三,通过对资本深化、BTCI和交互效应等指标进行纵向和横向的动态比较,可以得证由于不同省份之间资本深化水平和投入要素生产效率的不同,资本深化与偏向性技术进步的交互效应的大小和方向不同,导致了ATFP增长的方向也不同。资本深化和技术进步偏向存在正向匹配且匹配程度较高的省份和主产区交互效应作用为正,存在负向匹配或匹配程度较低的省份和主产区,交互效应对ATFP的增长会起到负向或阻碍的作用。

中国农业生产长期处于大而不强、多而不优、受自然环境约束较大的状态。鉴于我国农业资本存量持续显著性上升和农业劳动力大规模离乡退农的现实,农业发展要着重考虑农业要素投入和技术进步偏向的匹配关系。本文提出如下建议:(1)各省份和主产区应该及时把握住农业投入要素结构的变化,根据各地投入要素禀赋状况,及时调整当地农业技术进步方向,加速投入要素间的有效替代,优化投入要素的配置和组合,缓解稀缺要素的使用压力。(2)对于农业劳动力流失严重的省份,应尽快调整技术进步的偏向,与资本偏向性技术进步发展的前端省份和主产区实现平台互联、经验共享、人才互通,加快农业机械化和规模化建设,引导地区内农业设备发展、农业技术偏向、农业基础设施的配套等向资本要素的使用上靠拢,弥补因“人口红利”消失而导致的农业发展漏洞。(3)协调农业要素投入结构与技术进步偏向时也要充分考虑省份间要素结构的异质性和投入要素的效率水平,农业技术偏向的投入结构包括但不限于资本偏向性和劳动偏向性两种,也包括土地和新型的数字要素等,所以资本深化并不代表资本要素的生产效率高于其他要素,各地区的农业发展应当首先发挥禀赋要素的作用,通过农业职业教育、土地要素的集约化生产、数字技术的普及和使用等,实现农业发展由“粗”转“精”,转向高质量发展,避免因要素投入的盲目性而导致劳资关系的恶化,损害农业经济的运行效率。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 龚斌磊.中国农业技术扩散与生产率区域差距[J].经济研究,2022(11):102-120.
- [3] 姜钰,李冉,姜崧.技术进步偏向与要素配置对我国林业全要素生产率的影响[J].科技管理研究,2024(2):70-80.
- [4] 匡远配,唐文婷.中国农业资本深化问题研究[J].农业经济问题,2015(10):60-68+111-112.
- [5] 陆雪琴,章上峰.技术进步偏向定义及其测度[J].数量经济技术经济研究,2013(8):20-34.
- [6] 罗浩轩.中国农业资本深化对农业经济影响的实证研究[J].农业经济问题,2013(9):4-14+110.
- [7] 李谷成,范丽霞,冯中朝.资本积累、制度变迁与农业增长——对1978~2011年中国农业增长与资本存量的实证估计[J].管理世界,2014(5):67-79+92.
- [8] 李谷成.资本深化、人地比例与中国农业生产率增长——一个生产函数分析框架[J].中国农村经济,2015(1):14-30+72.
- [9] 陆菁,刘毅群.要素替代弹性、资本扩张与中国工业行业要素报酬份额变动[J].世界经济,2016(3):118-143.

- [10] 李静,池金,吴华清.基于水资源的工业绿色偏向型技术进步测度与分析[J].中国人口·资源与环境,2018(10):131-142
- [11] 李小平,李小克.偏向性技术进步与中国工业全要素生产率增长[J].经济研究,2018(10):82-96.
- [12] 任健华,雷宏振.数字普惠金融、资本深化与农业全要素生产率[J].社会科学家,2022(6):86-95.
- [13] 孙学涛,王振华.农业生产效率提升对产业结构的影响——基于技术进步偏向的视角[J].财贸研究,2021(6):46-58.
- [14] 王雅俊,王书斌.广东省农业技术偏向与劳动力调整的定向分析[J].中国人口·资源与环境,2011(1):115-120.
- [15] 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.
- [16] 岳邦瑞,王军,雷玉山等.黄土高原旱作区新农村建设关键技术分析[J].人文地理,2010(1):85-88.
- [17] 袁礼,欧阳晓.发展中大国提升全要素生产率的关键[J].中国工业经济,2018(6):43-61.
- [18] Acemoglu, D., and F. Zilibotti, “Productivity Differences” , *The Quarterly Journal of Economics*, 2001,116(2):563-606.
- [19] Acemoglu, D., “Directed Technical Change” , *The Review of Economic Studies*, 2002,69(4): 781-809.
- [20] Antonelli, C., and F. Quatraro, “The Effects of Biased Technological Change on Total Factor Productivity: Empirical Evidence from a Sample of OECD Countries” , *The Journal of Technology Transfer*, 2010,35(4): 361-383.
- [21] Antonelli, C., “Technological Congruence and the Economic Complexity of Technological Change” , *Structural Change and Economic Dynamics*, 2016,38: 15-24.
- [22] Cao, K. H., and J. A. Birchenall, “Agricultural Productivity, Structural Change, and Economic Growth in Post-reform China” , *Journal of Development Economics*, 2013,104: 165-180.
- [23] Chu, A. C., P. F. Peretto, and X. Wang, “Agricultural Revolution and Industrialization” , *Journal of Development Economics*, 2022,158: 102887.
- [24] Diamond, P., D. McFadden, and M. Rodriguez, “Measurement of the Elasticity of Factor Substitution and Bias of Technical Change” , *Contributions to Economic Analysis*, 1978, 2: 125-147.
- [25] DeLay, N. D., N. M. Thompson, and J. R. Mintert, “Precision Agriculture Technology Adoption and Technical Efficiency” , *Journal of Agricultural Economics* ,2022,73(1): 195-219.
- [26] Ellis, F., *Peasant Economics*, Cambridge Books, 1993.
- [27] Farooq, M. S., S. Riaz, A. Abid, et al., “Role of Technology in Agriculture: A Systematic Literature Review” , *Electronics*, 2020,9(2): 319.
- [28] Goldsmith, R. W., “A Perpetual Inventory of National Wealth” , *Studies in Income and Wealth*, 1951,14: 5-73.
- [29] He, G., Z. Wang, J. Shen, Z. Cui, and F. Zhang, “Transformation of Agriculture On the Loess Plateau of China toward Green Development” , *Front Agriculture Sci. Eng.*, 2021,8(4): 491-500.
- [30] Hayami, Y., and V. W. Ruttan, “Factor Prices and Technical Change in Agricultural Development: The United States and Japan, 1880-1960” , *Journal of Political Economy*, 1970,78(5): 1115-1141.
- [31] Hicks, J., *The Theory of Wages*, Springer, 1963.
- [32] Klump, R., P. McAdam, and A. Willman, “Factor Substitution and Factor-augmenting Technical Progress in the United States: A Normalized Supply-side System Approach” , *The Review of Economics and Statistics*, 2007,89(1): 183-192.
- [33] León-Ledesma, M. A., P. McAdam, and A. Willman, “Identifying the Elasticity of Substitution with Biased Technical Change” , *American Economic Review*, 2010,100(4): 1330-1357.
- [34] Moghaddasi, R., and A. A. Pour, “Energy Consumption and Total Factor Productivity Growth in Iranian Agriculture” , *Energy Reports*, 2016, 2: 218-220.
- [35] Mizobuchi, H., Multiple Directions for Measuring Biased Technical Change, CEPA Working Papers Series, 2015.

- [36] Nin, A., C. Arndt, and P. V. Preckel, “Is Agricultural Productivity in Developing Countries Really Shrinking? New Evidence Using a Modified Nonparametric Approach”, *Journal of Development Economics*, 2003,71(2): 395–415.
- [37] Plastina, A., and S. H. Lence, “A Parametric Estimation of Total Factor Productivity and Its Components in US Agriculture”, *American Journal of Agricultural Economics*, 2018, 100(4): 1091–1119.
- [38] Rahman, S., and R. Salim, “Six Decades of Total Factor Productivity Change and Sources of Growth in Bangladesh Agriculture (1948–2008)”, *Journal of Agricultural Economics*, 2013, 64(2): 275–294.
- [39] Roumasset, J. A., *Rice and Risk: Decision Making among Low-income Farmers*, Amsterdam: North Holland Publ. Comp., 1976.
- [40] Sturgill, B., “Back to the Basics: Revisiting the Development Accounting Methodology”, *Journal of Macroeconomics*, 2014,42: 52–68.
- [41] Young, A., “Gold into Base Metals: Productivity Growth in the People’s Republic of China during the Reform Period”, *Journal of Political Economy*, 2003,111(6): 1220–1261.

【作者简介】李平：山东理工大学校长特别助理，经济学院教授，博士生导师。研究方向：国际经济、技术创新。

吴雪松：山东理工大学经济学院硕士研究生。研究方向：农业经济。

王天琛：东北师范大学经济与管理学院博士研究生。研究方向：劳动经济。

Capital Deepening, Biased Technological Progress and Agricultural Total Factor Productivity

LI Ping¹, WU Xue-song² & WANG Tian-chen³

(1. Department of Economics and Management, Shandong University of Technology, Zibo 255012, Shandong, China;

2. School of Economics, Shandong University of Technology, Zibo 255012, Shandong, China; 3. Business School, Northeast

Normal University, Changchun 130117, China)

Abstract: The organization of production factors and the advancement of agricultural technology are crucial elements for promoting the high-quality development of agriculture and achieving the comprehensive revitalization of rural areas. Matching the structure of factor input and the direction of technological progress to improve ATFP has become a key issue. Based on the input structure of agricultural production and the standardized CES production function, this paper derives the ATFP function, which incorporates a biased technological progress index and capital deepening degree, and systematically describes the influence mechanism of biased technological progress, capital deepening, and factor efficiency on ATFP. The results show that, compared with the base period, both the level of capital deepening and the technological progress index of capital bias in China’s agricultural sector have increased significantly. The relationship between capital deepening and technological progress bias will significantly impact the size and direction of their interaction effect. This interaction effect, in turn, will further influence the growth of ATFP and may have a positive or negative impact on ATFP. This effect will also vary due to differences in factor input structure and factor efficiency between provinces and major agricultural producing areas. At the same time, this paper also elucidates the contradiction between the shift in agricultural factor input structure and the relative stability of ATFP in China since 1985, offering insights for the future development of agriculture and the enhancement of ATFP within the existing agricultural factor input framework.

Keywords: capital deepening; biased technological progress; factor efficiency; agricultural total factor productivity (ATFP)

(责任编辑：山草)