

农业绿色增长核算：基于多区域投入产出模型的 立体分解

陈晓东 王芳 苗壮*

摘 要：厘清农业绿色增长的来源是探索其低碳与高质量发展路径的前提与基础。基于对现有增长核算理论的拓展，本文采用多区域投入产出模型（MRIO）估算农业部门的能源与环境要素足迹并纳入全要素生产率（TFP）核算框架。首先聚焦资源与环境要素的“隐含”足迹测算，将其作为资源利用与环境排放“直接”数量的合理替代；其次利用全球43个主要经济体农业部门数据构建生产前沿面，改进边界调整测度模型和全局Luenberger生产率指数分解模型，不仅能观测农业绿色全要素生产率总体增长水平，也可按照技术创新和效率提升的不同来源，实现投入/产出变量对GTFP变化贡献的立体分解与全面识别。结果显示，提升农业绿色全要素生产率的最有效途径为推动农业能源利用（足迹）技术的创新与农业用地效率的提升。从区域视角，发达经济体主要依靠技术进步驱动，而发展中经济体主要依靠效率提升驱动。时间维度上，农业生产率呈现出增长态势。效率提升促进了早期的生产率提高，中期的生产率提升主要依靠技术创新的正面影响；近期技术创新和效率提升都产生了积极影响。未来，农业部门效率提升与技术创新的“取长补短”应成为领先群组与落后群组相互学习的

* 陈晓东，博士研究生，香港科技大学公共政策学部，电子邮箱：xchenha@connect.ust.hk；王芳，教授，四川农业大学管理学院，电子邮箱：wangfangscnd@sicau.edu.cn；苗壮（通讯作者），教授，西南财经大学经济学院，电子邮箱：miaozhuang@swufe.edu.cn。本文获得国家自然科学基金（72373120；72074183）以及国家社会科学基金重大项目（22&ZD102）资助。感谢匿名审稿人宝贵意见，文责自负。

“新常态”；对于中国而言，能源利用、碳排放及污染物足迹，以及农业用地技术创新能力不足是全要素生产率相对较低的主要原因。因此，中国后期应当重点提高农业部门的环境友好型技术创新能力，切实发挥绿色技术对经济低碳转型发展的引擎作用。

关键词：农业绿色增长 全要素生产率 投入产出 能源与环境要素足迹

一 引言

1960~2010年，全球人口从约30亿增加至约70亿，超越了之前两千年的人口增长数量（United Nations, 1999；Lanz等，2018），不断增加的人口数量意味着更多的收入与食物需求。在此期间，全球人均GDP增长约2.5倍（World Bank, 2016），且得益于农业生产率的提高，全球农业产量提高3倍，才避免了全球性食物短缺（Alston和Pardey, 2014）。作为全球最大的发展中国家以及人口大国，处理好农业、农村、农民问题对实现中华民族的伟大复兴具有重要意义。中国政府对“三农”问题高度重视，并将粮食安全作为治国理政的头等大事。事实上，中国对全球农业发展做出了巨大的贡献，中国用仅占世界7.6%的耕地面积养活了占世界18.9%的人口，得益于各发展阶段的农业政策调整对农业增长的正面影响，中国农业全要素生产率不断提高，促使粮食产量2004~2015年实现“十二连增”（FAO, 2015；张涛，2018）。展望未来，全球人口极有可能在2060年前突破100亿（United Nations, 2015），而农业部门发展面临的不确定性因素仍然较多。因此，需要进一步探寻农业全要素生产率及其效率提升和技术创新的作用路径，本文将对此展开理论与实证分析。

生产率研究在增长核算分析中起到至关重要的作用（Sheng等，2019；余泳泽等，2019）^①。学者们主要利用生产函数估计投入要素系数来进行增长核算研究，从而测算全要素生产率变化，并将观测到的经济增长分解为两

① 非常感谢审稿专家的提醒，本文所提及的增长核算均为经济增长质量（TFP）核算，并非经济增长总量核算。关于经济增长总量的核算可参考许宪春（2021）。

部分：投入增加与技术进步。Gong（2020）指出，传统增长核算研究主要存在两个缺陷：一是固定系数不能反映投入产出关系的时空演化。二是已有文献与Hicks（1932）提出的诱导创新理论以及Romer（1986）、Lucas（1988）提出的内生增长理论相矛盾。鉴于此，Gong（2020）将诱导创新理论和内生增长理论纳入其分析框架，使得生产函数具有变系数的特质，称为新增长核算框架；并引入随机前沿分析方法，将生产率变化分解为投入嵌入（Input-embodied）和投入自由（Input-free）两部分。

新增长核算研究将生产理论向前推进了一大步。然而，随着工业化水平与城镇化率的快速提升，资源消耗及其导致的环境污染问题（即负外部性）可能会对现有生产率测算产生重大影响（尹朝静等，2016），其根源在于传统增长核算和新增长核算框架都缺少资源与环境约束影响的相关分析。现实中，人类社会快速的工业化与城镇化进程对资源与环境带来负面效应，而资源短缺与环境恶化将反噬经济增长。有限资源基础与人口增长指数之间的收缩预测可追溯到托马斯·马尔萨斯牧师所处时代，而资源与环境约束的相关影响在当今学术界已有广泛讨论。例如，Cassou和Hamilton（2004）对两部门内生增长模型的最优经济发展模式进行探索，并在该框架中同时考虑清洁投入与高污染投入；Wilson和Damania（2005）从政治角度考察了影响经济增长的腐败、政治竞争、环境政策和环境后果等。总体而言，加入资源与环境因素（要素）可丰富现有增长核算理论研究，相关早期文献（Banker等，1984）提出了一种非参数方法（即数据包络分析），用来估计技术无效率和相应的生产率，但其所提出的数学规划模型难以适用于所有规模收益，且在实证研究中忽略了资源与环境要素。Hailu等（2001）扩展了原有生产技术，能够包含非期望（温室气体以及污染物等）在内的多种产出；但在其框架中，要求对投入导向或产出导向^①予以选择，不能同时符合投入最小化和产出最大化的实际需求。本文在现有的非参数方法与模型基础上，考虑资源短缺与环境恶化的科学现实，提出了一种考虑足迹

① 以肥料（投入）和诱导增加值（产出）为例。投入导向模型是指生产者在固定产量的情况下要求肥料使用量最小化，而产出导向模型是指生产者在固定肥料使用量的情况下实现增加值最大化。

的全新“立体”绿色增长核算框架。

纳入资源与环境要素予以测算的全要素生产率可称为“绿色全要素生产率”或“环境全要素生产率”(林伯强和谭睿鹏, 2019)。相关学者对此进行了大量研究, 如陈诗一(2010)运用方向距离函数对中国工业全要素生产率进行测算, 发现将环境约束视为“负产出”的实际全要素生产率比传统不考虑环境因素的估算值偏低, 并验证中国实施的系列节能减排政策有效推动了工业绿色生产率的持续提升; 杜江等(2016)构建了省级种植业投入产出与污染排放面板数据, 利用基于乘法结构的Malmquist指数测算了中国农业全要素生产率, 发现1991~2013年中国农业环境全要素生产率增长主要是由技术进步推动的; 付明辉和祁春节(2016)对1995~2013年28个国家的农业净资本存量进行估计, 并运用Malmquist指数测算了样本期内的偏向性技术进步, 发现大部分国家的投入偏向型技术进步促进了农业全要素生产率的提高。基于方向性距离函数以及Luenberger生产率指标, 邵帅等(2022)对1996~2018年中国30个省级地区的绿色全要素生产率进行了测算, 并重点关注碳排放绩效, 发现城市化水平与碳排放水平存在倒“U”形关系。纪建悦等(2023)以民间投资为视角, 运用方向性距离函数研究了环境规制对绿色全要素生产率的影响, 发现环境规制与绿色全要素生产率同样存在倒“U”形关系, 并认为中国现阶段处于拐点左侧, 只有提高环境规制强度才能促进绿色全要素生产率提升。张宁(2022)运用方向性距离函数测算了中国火力发电企业的全要素生产率。以上研究多基于方向性距离函数, 但其需要人为设置权重向量, 这会使计算结果出现某种程度的偏误。综上所述, 传统增长核算分解框架较为“平面”, 部分文献涉及的生产率分解可视为“横向分解”, ^①其分解分析限于确认投入要素贡献, 即确定生产率变化受到何种投入要素(如土地和资本)影响, 仅能提供增加/减少相关投入的证据。假设一个经济体的财政支出有限, 传统增长核算可确认应优先考虑投入何种生产要素(例如肥料)及相应投资金额。然而, 该框架并没有回答化肥的研发投入、扩大化肥生产规模以及模仿其他先进经济体的化肥生产技术所需资金。也有研究

① 横向分解和纵向分解构成立体分解, 其中, 横向分解表示特定变量分解, 纵向分解表示特定来源分解。

(如 Färe 等, 1994) 致力于“纵向分解”, 即将生产率变化分解为效率提升(追赶效应)和技术创新(前沿面移动), 而忽略了考察要素贡献的横向分解。由此可见, 以往研究未能建立包含资源利用、碳排放或污染物排放的隐含足迹的全要素分析框架, 也无法在此基础上从兼顾纵向分解和横向分解的立体角度对全要素生产率变化进行全面分解。

本文的边际贡献主要集中于两个方面。首先, 拓展现有文献的研究深度。本文将多区域投入产出模型测算出的资源与环境要素足迹纳入理论体系, 构成“多区域投入产出模型+数据包络分析+生产率指数分解”的完整科学测度链条, 拓展现有增长核算框架。基于现有文献, 本文在构建研究框架过程中充分吸纳了资源与环境价值理论和外部性理论 (Nordhaus, 2006), 以考虑隐含足迹的有限资源和环境负荷为约束, 实现多区域投入产出模型应用与全要素生产率分解的有机结合。在考虑资源与环境要素足迹的研究视角下, 现有文献可能存在以下改进空间: 第一, 与资源利用、碳排放或污染物排放的“直接”数量相比, 资源与环境要素的“全面”足迹更能科学衡量其对社会经济影响的外部性。大多数文献仅考虑了资源利用、碳排放或污染物排放的“显性”数量 (如张宁, 2022), 并未考虑资源利用、碳排放或污染物排放的“隐含”足迹^①; 或对资源利用、碳排放或污染物排放足迹有所涉及, 但缺乏将上述足迹纳入增长核算框架的考量 (如 Zhang 等, 2020), 进而无法对资源利用、碳排放或污染物排放足迹的全面外部效应进行科学的测度。第二, 以往文献较多关注单一非期望产出 (碳排放或污染物排放), 而在大多数情况下, 多种非期望产出的相互作用可能导致分析结论存在偏误^②。

其次, 本文从“三维”“立体”角度揭示了生产效率 (静态) 和生产率 (动态) 的“内部构造”, 揭示了单个投入/产出变量对全要素生产率变化的

① 足迹一般意义上是指企业机构、活动、产品或个人通过交通运输、食品生产和消费以及各类生产过程等引起的资源利用、温室气体排放及污染物排放等的集合。本文主要涉及全球 43 个主要经济体的农业部门通过生产、运输、消费等过程引起的能源利用足迹、二氧化碳排放足迹以及主要大气污染物排放足迹。

② 此处, 多种非期望产出相互作用是指, 某种污染物的排放增加可能会通过化学反应增加其他污染物的排放 (又称“二次污染”); 不同种类污染物会导致绩效评价结果略有不同。

贡献及其来源(即技术创新和效率提升)。在全面考虑资源与环境要素足迹的前提下,本文运用非参数框架及方法对2000~2014年全球43个主要经济体的农业经济增长进行核算与分解。在此基础上,进一步实现对总体生产率的“横—纵”相结合的多角度立体分解。^①具体而言,第一,从横向角度,将纳入资源与环境要素足迹的总体生产率变化分解为单项投入/产出变量贡献。第二,从纵向角度,将总体生产率变化分解为总体前沿面移动(技术创新)和总体追赶效应(效率提升)。第三,从横向角度,将总体技术创新和总体效率提升分解到单项投入/产出变量^②。综上,本文所构建的绿色增长核算分解框架将增长的驱动因素(投入/产出变量)影响纳入资源与环境足迹的生产率增长路径,包括各变量对技术创新和效率提升的具体贡献^③。

本文率先将提出的分解框架应用于农业部门^④,主要有以下考虑,首先,农业为国民经济其他产业提供粮食、副食品、工业原料等,是其他部门的产业基础,其绿色增长核算可为其他部门提供借鉴。其次,根据《世界粮食安全和营养状况》,2019年全球近6.9亿人面临饥饿威胁,占全球比重基本维持在8.9%。本文尝试探索驱动农业绿色可持续发展的有效路径,从而为缓解全球局部区域的饥荒问题提供科学证据与实践方案。最后,传统增长核算在农业部门得到了广泛的应用,能为验证本文实证结论的稳健性提供有力支撑。与传统增长核算采用的参数框架不同,本文采用的非参数框架不需要对函数形式和经济行为作出具体假设,而是运用线性规划技术,构建前沿面并进行全要素生产率的分解分析。实证结果表明:①能源

① 如图1所示。

② 例如,本文的框架可以将技术创新与效率提升分解至所有投入产出变量中。以技术创新为例,本文可以分解出能源使用技术的创新(清洁能源的开采技术)、减排技术的创新(脱硫脱硝技术的创新)以及农业机械总动力的创新(耕作技术的创新等)对总技术进步的贡献。

③ 本文在理论以及实证部分均采用“横—纵”的分解顺序,也可采取“纵—横”顺序进行实证,两者结果相同。

④ 虽然种植业和林业发展对于农业固碳、减排成效显著,但因数据的不可获得性,本文在计算时未对其予以考虑,感谢审稿专家的建议,当然文责自负。

利用、碳排放及污染物排放足迹是农业生产效率低的主要影响因素，能够验证资源与环境的价值理论和外部性理论，并充分体现将资源与环境要素足迹纳入核算框架的科学性；②在整个样本期内，全球43个主要经济体农业生产率平均增长0.616%，其中效率提升起到主要的推动作用（0.380%），而技术创新的贡献亦不可忽略（0.236%）；③先进经济体组全要素生产率增长较快，而落后经济体组全要素生产率增长缓慢（甚至出现倒退）；④样本经济体农业全要素生产率增长总体保持连续性；⑤在样本期内，技术创新与效率提升是促进农业全要素生产率增长的最有效途径。未来，先进经济体应进一步促进农业部门的效率提升，而落后经济体应加快自身技术创新。

本文剩余部分安排如下：第二部分对本文研究方法（即多区域投入产出模型、边界调整测度模型及Luenberger生产率指数分解）的理论模型与架构分解进行介绍，第三部分对数据来源及其统计性特征予以阐述，第四部分对全球主要经济体农业部门的全要素生产率进行实证分析，第五部分提出研究结论和政策建议。

二 理论模型与架构分解

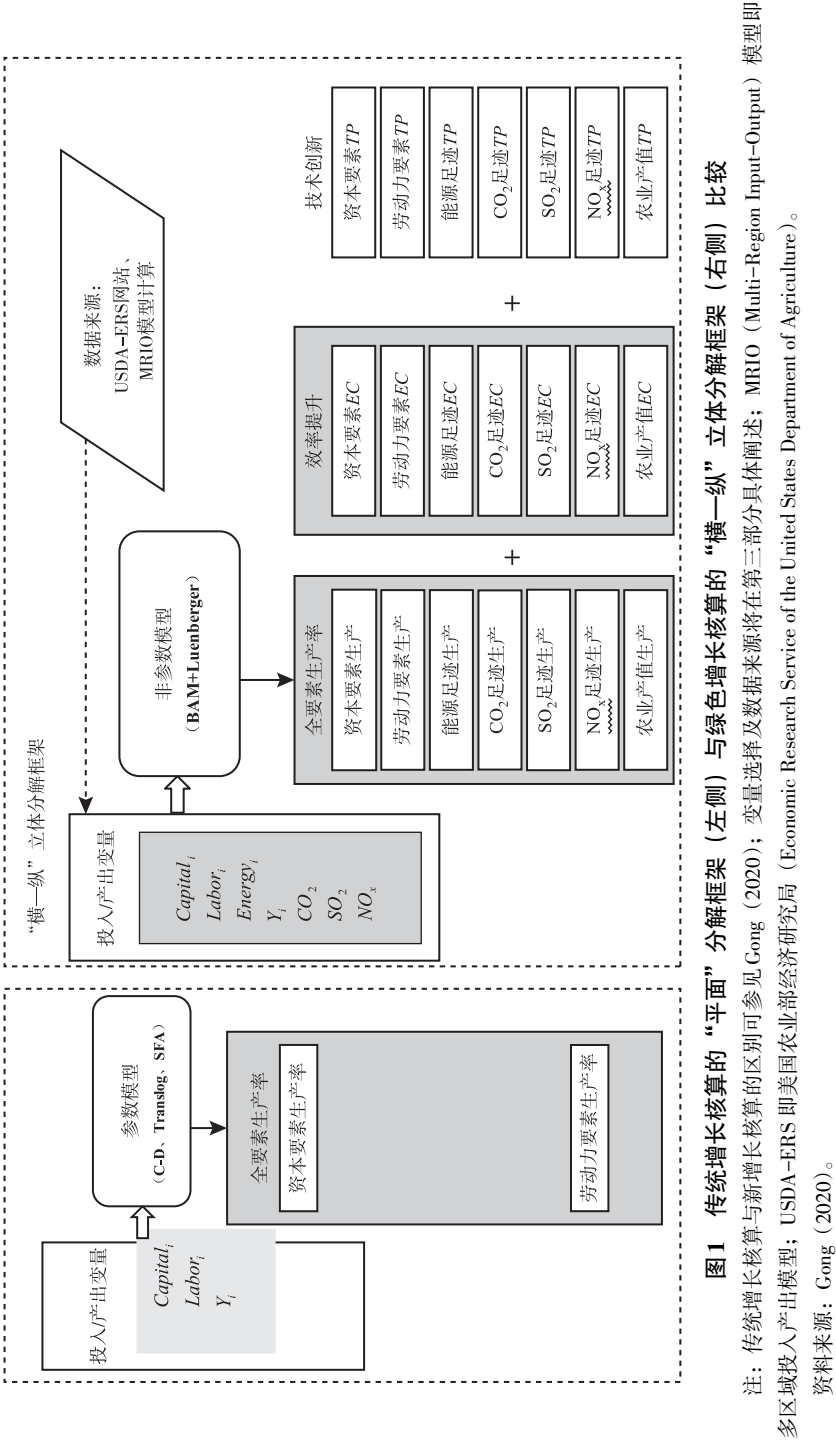
在传统生产函数（技术）框架中，劳动力和资本是经济体宏观生产活动的主要投入要素，如图1左侧所示。在全球供应链背景下，不同经济体的企业将各种资源要素用于生产商品和提供服务，同时也会产生温室气体与环境污染等副产品。为了表征生产函数，本文将资本（可表现为不同形式）、能源和劳动力作为投入要素，将农业生产总值作为衡量产出的主要指标。事实上，任何生产活动都可能诱发副产品（非期望产出）的产生，如固体废弃物、废水和空气污染物排放。

借鉴Wang等（2020）的研究，本文仅考虑温室气体与大气污染物的常见排放种类（即 CO_2 、 SO_2 和 NO_x ）。不同于已有研究仅考虑资源与环境要素“直接”数量的研究（如Huang等，2007），本文充分考虑全球生产活动的内在联动性以及数据的可获得性，选择将能源利用的“隐含”足迹作为投入变量，并将碳排放以及污染物排放的“隐含”足迹等副产品作为非期望产

出变量。

图1展示了传统增长核算与本文提出的绿色增长核算面向农业部门生产绩效评估的不同分解框架。事实上,采用参数方法与模型的传统增长核算(如C-D函数等)只能估计全要素生产率的总体增长(图1左侧显示),如Gong(2018, 2020)采用随机前沿分析(SFA)可分解出资本等对经济增长的影响,但此类研究无法构建包含多个产出(包括非期望产出)的框架。另外,参数方法与模型更无法确定资源利用、碳排放以及污染物排放足迹的效率提升(如管理经验的溢出效应)与技术创新(如机器设备的更新换代)对生产率的影响。针对参数方法与模型的固有不足,图1右侧描述了属于非参数方法的数据包络分析(DEA)的分解框架。本文采用的绿色增长核算框架可从源头上将纳入资源与环境要素足迹的全要素生产率分为技术创新和效率提升两部分,并将变量分解作为根源分解的补充,从根源角度解析出本文重点关注的资源与环境要素足迹等个体变量对全要素生产率及其效率提升和技术创新的贡献。基于此,既可挖掘出对效率提升或技术创新贡献最大的投入/产出变量,也可比较某变量的效率提升或技术创新对全要素生产率的有效性,从而有效弥补现有增长核算研究的不足。在本文的理论框架下,如上文所述,全要素生产率可被分解为技术创新和效率提升。其中,技术创新表现为生产前沿面整体向外移动,即实现以同样的投入要素组合产出更多的期望产出(技术水平不断提高,使得既定生产要素投入前提下的生产函数不断向外移动)。以农业宏观生产过程为例,假设劳动力和资本两种投入要素比例不变,采用新的育种技术、灌溉技术和农作物智能温度控制技术等,可以大幅提高农业产值。效率提升是指在现有技术水平下,通过增强各种资源要素的集约性与协调性,使既有技术水平的生产潜能得以更大程度地释放。如农业生产管理水平的不断提高、农户种植养殖技能的提升、土地流转、农业专业化合作等,可以优化要素配置,同时提高要素利用效率,从而提高农业产出。

具体而言,本文的理论架构是基于多区域投入产出模型、农业绿色生产技术框架、边界调整测度模型和全局Luenberger生产率指数分解模型提出的全新框架。



(一) 多区域投入产出模型

基于多区域投入产出(MRIO)模型将全球供应链背景下农业能源利用、碳排放与污染物排放足迹核算作为研究的起点,构建农业绿色生产技术框架(生产函数),进而采用边界调整测度模型完成农业生产无效率值测算,并结合全局Luenberger生产率指数分解,论证劳动力或资本等传统要素以及能源利用、碳排放及污染物排放足迹能否促进农业全要素生产率的提升或技术创新。需要指出的是,后文使用的农业能源利用足迹、农业CO₂足迹、农业SO₂足迹和农业NO_x足迹数值均由多区域投入产出模型估算而来。为了更好地说明其计算过程,本部分以农业能源利用为例,运用MRIO模型阐释全球供应链背景下主要经济体农业子部门之间的商品与服务转移。假定全球共有 Q 个经济体,每个经济体都存在 M 个子部门;在 Q 个经济体中,每一个经济体的子部门最终产出都被 Q 个经济体作为中间投入或最终产品消费。表1展示了多区域投入产出模型的基本结构形式,其均衡关系的数学表达如下:

$$X = ZI + Y \quad (1)$$

$QM \times I$ 矩阵 X 和 Y 分别代表了总产出和最终需求, Z_{ip}^{jq} 代表 j 地区 i 部门供应给 q 地区 p 部门的中间投入,为 $QM \times QM$ 矩阵。此外,定义了适合长度为 I 的求和向量。为了得到 $ZI=AX$,本文定义中间产品投入系数矩阵 Z_{ip}^{jq}/X_p^q ,借鉴标准投入产出模型,式(1)可以扩展为:

$$X = (I - A)^{-1}Y = (I + A + A^2 + \cdots + A^q)Y = LY \quad (2)$$

式(2)中, I 代表单位矩阵, $L = (I - A)^{-1} = (I + A + A^2 + \cdots + A^q)$ 代表Leontief逆矩阵;在全球供应链背景下,可迭代(重复)的生产过程可以用 $(I + A + A^2 + \cdots + A^q)Y$ 表示,具体而言, IY 代表了最终需求的直接生产, AY 代表了产生最终需求所需的第一级中间投入; A^2Y 代表了产生第一级中间投入所需的第二级中间投入;以此类推, A^qY 代表了产生第 $q-1$ 级中间投入所需的第 q 级中间投入。全部生产过程可通过上述迭代过程完整地予以表征。

为了提升测度全要素生产率的科学性,本文选取农业部门的能源利用、碳排放及污染物排放足迹,将其作为类似研究中资源与环境要素的合理替

代。以农业能源为例，式（2）可进一步扩展为模拟全球不同地区的产业部门之间的能源利用足迹。具体而言，本文定义 \hat{f} 为对角矩阵； f_{ji}^j 表示第 j 区域第 i 部门的能源利用与增加值的比值。所有地区部门的能源投入可以表示为 $E = \hat{f}L\hat{Y}$ 。因此，农业部门能源最终产出的分块矩阵可表示如下：

$$E = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & \cdots & E_{1M} \\ E_{21} & E_{22} & \cdots & E_{2M} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ E_{M1} & E_{M2} & \cdots & E_{MM} \end{bmatrix} \tag{3}$$

需要注意的是，分块矩阵 E_{ip} 是一个 $M \times M$ 矩阵，其中，子矩阵 E_{ip}^{jq} 代表隐含在 q 地区 p 部门由 j 地区 i 部门供应的中间投入。沿着矩阵中的行对农业能源投入进行加总，即可估计出总的供应链所需的能源投入。以 q 地区 p 部门为例，最终产出的总能源可表示为 $E_p^q = \sum_{i,j} E_{ip}^{jq}$ 。该核算过程反映了某个经济体利用能源的最终生产总量。不同于传统核算方法，分块矩阵 E_{ip} 可以估算出全球生产活动中利用能源的最终生产总量。相同的数学处理方式同样适用于农业 CO_2 、农业 SO_2 与农业 NO_x 的排放过程。基于多区域投入产出模型，全球农业部门的生产过程均可以被模拟出来。例如在 q 地区 p 部门，与农业相关的生产过程需要源自全球供应链的农业能源投入（ E_p^q ），以及生产过程中的经济产出（ Y_p^q ）。同时，实际生产活动会产生一定的副产品，如本文考虑的 CO_2 （ C_p^q ）、 SO_2 （ S_p^q ）和 NO_x （ N_p^q ）。

表1 多区域投入产出表结构

| 投入 \ 产出 | | 中间消耗 | | | 最终需求 | 总产出 |
|---------|-------|--------------|-----|--------------|-------|-------|
| | | R^1 | ... | R^Q | | |
| 中间投入 | R^1 | $Z^{(1, 1)}$ | ... | $Z^{(1, Q)}$ | Y^1 | X^1 |
| | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| | R^Q | $Z^{(Q, 1)}$ | ... | $Z^{(Q, Q)}$ | Y^Q | X^Q |
| 增加值 | | V^1 | ... | V^Q | | |
| 总投入 | | $(X^1)^T$ | ... | $(X^Q)^T$ | | |

资料来源：Wang等（2020）。

(二) 农业绿色生产技术框架

借助多区域投入产出模型,可估算出全球不同经济体农业部门资源与环境要素足迹。在此基础上,生产单元(特定经济体)利用农业投入(即不同形式的资本^①、劳动力和能源利用足迹,分别由 K 、 Lab 和 E 代理)产生期望产出(农业总产出,由 Y 代理),以及碳排放和污染物排放足迹(即二氧化碳 CO_2 、二氧化硫 SO_2 和氮氧化物 NO_x ,分别由 C 、 S 和 N 代理)等非期望产出。因此,第 i 个经济体的农业生产可能性集($APPS$)可表示为:

$$APPS = \left\{ (K, E, Lan, Lab, R, A, M, F, Lc, Y, C, S, N) : \begin{array}{l} (E, Lan, Lab, R, A, M, F, Lc) \\ can\ produce(Y, C, S, N) \end{array} \right\} \quad (4)$$

一般而言,农业生产活动表现出两个特征:一是非期望产出是不可避免的,只有生产停止,非期望产出才能被完全遏制(Non-Jointness,即零结合性)。其含义可以由如下生产集合体现:

$$\left\{ (K, E, Lan, Lab, R, A, M, F, Lc, Y, C, S, N) \in APT \right\} \quad (5)$$

$$\left\{ only\ Y = 0, \ can\ C, S, N = 0 \right\}$$

二是减少非期望产出将以牺牲期望产出为代价(即弱可处置性),可以由如下生产集合体现:

$$\left\{ (K, E, Lan, Lab, R, A, M, F, Lc, Y, C, S, N) \in APT \right\} \quad (6)$$

$$\left\{ \alpha \in (0, 1) \right\}$$

则:

$$\left\{ [(K, E, Lan, Lab, R, A, M, F, Lc), \alpha(Y, C, S, N)] \in APT \right\} \quad (7)$$

在式(5)和式(6)~(7)的约束下,式(4)中的生产活动可以恰当地根据农业宏观生产过程的投入/产出变量来定义。因此,该项生产活动称为农业绿色生产技术(Agricultural Production Technology, APT)。运用农业

① 在本文中,资本包含如下变量:土地(Lan)、农业研发(R)、动物饲料(A)、机械(M)、肥料(F)和畜牧资本(Lc)。

绿色生产技术框架，可估计观测值与前沿面之间的静态绩效差距（农业生产无效率值）。

（三）边界调整测度模型

传统的数据包络分析模型通常以测算无效率值为目标，如基于松弛测度（Slack-Based Measure, SBM）、基于极差调整测度（Range-Adjusted Measure, RAM）和基于方向性距离函数（Directional Distance Function, DDF）测度。但近期研究成果相继表明，上述模型存在一定的改进空间，例如，SBM和DDF模型需要预设主观权重向量，而RAM模型存在无法识别决策单元绩效的情况（Cooper等，2011）。另外，现有效率测度模型大多以投入减少为前提条件，但随着科技发展时代进步，这一条件并不能够完全符合现实中的农业生产情况。鉴于此，本文使用自然可处置与管理可处置联合边界调整测度模型，具体而言，对于农业能源利用足迹以及劳动力数量等普通投入要素，将其设置为自然可处置，经济含义为通过减少投入，以达到前沿，使决策单元有效；而对于农业科技研发投入而言，将其设置为管理可处置，通过增加投入来提高决策单元的效率（Sueyoshi和Goto，2012）。采用Cooper等（2011）提出的边界调整测度模型（Bound-Adjusted Measure, BAM）并进行改进，继而构建第*i*个经济体在第*t*期的最佳实践边界，如式（8）所示：

$$\begin{aligned}
 SASI_i^t(x, y, b) = \max & \left[\frac{\sum_{m=1}^M S_m^t / L_m^t + \sum_{n=1}^N S_n^x / L_n^x + \sum_{o=1}^O S_o^y / U_o^y + \sum_{r=1}^R S_r^b / L_r^b}{M + N + O + R} \right] \\
 \text{s.t. } & \sum_{i=1}^I t_{mi} \lambda_i - S_m^t = t_{mi}'; \quad \sum_{i=1}^I x_{ni} \lambda_i + S_n^x = x_{ni}'; \\
 & \sum_{i=1}^I y_{oi} \lambda_i - S_o^y = y_{oi}'; \quad \sum_{i=1}^I b_{ri} \lambda_i + S_r^b = b_{ri}'; \\
 & \sum_{i=1}^I x_{pi} \lambda_i \geq \min x_{pi}; \quad \sum_{i=1}^I y_{qi} \lambda_i \leq \max y_{qi}; \\
 & \sum_{i=1}^I b_{ri} \lambda_i \geq \min b_{ri}; \quad \lambda_i \geq 0; \quad \forall n, o, r \geq 0; \\
 & S_n^x, S_o^y, S_r^b \geq 0.
 \end{aligned} \tag{8}$$

式(8)中,假设第 i 个决策单元将 M 种科技投入 $t=(t_1, \dots, t_m) \in R_M^+$ 和 N 种普通投入 $x=(x_1, \dots, x_n) \in R_N^+$ 投向农业生产活动,产生 O 种期望产出 $y=(y_1, \dots, y_o) \in R_O^+$ 并伴随着 R 种非期望产出 $b=(b_1, \dots, b_r) \in R_R^+$ 。 $(x_i^t, t_i^t, y_i^t, b_i^t)$ 代表第 i 个经济体在 t 时期的普通投入、科技投入、期望产出及非期望产出数量。 $(S_m^t, S_n^x, S_o^y, S_r^b)$ 代表第 i 个经济体在 t 时期的科技投入、普通投入、期望产出及非期望产出的松弛变量。 λ 定义为权重向量^①。向量 $(U_m^t, L_n^x, U_o^y, L_r^b)$ 表示投入和非期望产出的下限(期望产出的上限)与观测值之间的差值,可表示为:

$$\begin{aligned} U_m^t &= \max t_{mi'} - t_{mi'}, \quad m \in M, i' \in I \\ L_n^x &= x_{ni'} - \min x_{ni}, \quad n \in N, i' \in I \\ U_o^y &= \max y_{oi} - y_{oi'}, \quad o \in O, i' \in I \\ L_r^b &= b_{ri'} - \min b_{ri}, \quad r \in R, i' \in I \end{aligned} \quad (9)$$

其中,当第 i 个经济体的投入、非期望产出(期望产出)的数量为全球农业生产技术框架投入/产出变量中的最小值(最大值)时,式(8)将会出现不可行解:

$$\begin{aligned} \max t_{mi} &= t_{mi'} \\ x_{ni'} &= \min x_{ni} \\ \max y_{oi} &= y_{oi'} \\ b_{ri'} &= \min b_{ri} \end{aligned} \quad (10)$$

因此,本文定义:

$$\begin{aligned} \max t_{mi} &= t_{mi'} \\ x_{ni'} &= \min x_{ni} \\ \max y_{oi} &= y_{oi'} \\ b_{ri'} &= \min b_{ri} \end{aligned} \quad (11)$$

以式(9)~(11)为约束,式(8)才可以被完整定义。

(四) 全局 Luenberger 生产率指数分解模型

与农业绿色生产技术框架结合使用的BAM模型只能估算变量的静态无

① 需要注意的是,若对权重向量 λ 无约束,则式(8)代表规模报酬不变;当增加约束条件 $\sum \lambda = 1$ 时,式(8)表示规模报酬可变。

效率水平，并不能揭示其生产率的动态变化^①。除了效率估计之外，非参数框架与方法仍可作为生产率测量的基础工具（Pastor等，2020），Malmquist生产率指数（MPI）（Caves等，1982）与Luenberger生产率指数（LPI）（Chambers，1996）分解较为常见。其中，MPI基于Shephard的导向性距离函数设立，能够对生产率变化进行乘法形式的分解（简泽等，2020），但对生产率收益存在高估的可能（Boussemart等，2023）。LPI为基于差分方向性距离函数的分解指标，能够兼顾投入缩减和产出扩张需求，并以加法结构来度量生产率的动态变化。因此，后者具有更为灵活的分解形式，可将整体生产率的变化分解为单个投入/产出变量。

本文将边界调整测度模型和全局Luenberger生产率指数分解模型综合使用，与以往文献存在明显差异，如王兵和宫明丽（2017）运用BAM模型测算了2003~2014年中国29个省（区、市）的水资源系统效率，技术层面未考虑BAM模型的目标函数分母存在“0”值的情况，内容层面未考虑动态绩效变化。又如，邵帅等（2022）以及张宁（2022）在各自研究框架内采用Luenberger指数分解，但均以松弛测度（SBM）或者方向性距离函数（DDF）的模型测算为前提，而Cooper等（2011）明确指出，与边界调整测度模型相比，上述模型存在改进空间。

当期无效率值（ CIE ）是测量全局Luenberger生产率指数的基础。可以用某一时间段内观察到的数据作为参考，计算某一经济体某一变量的无效率率值，并用 CIE 表示：

$$CIE_i(t) = IE(x_i^t, y_i^t, b_i^t) = CIE_{ix}(t) + CIE_{iy}(t) + CIE_{ib}(t)$$

$$= \frac{1}{P+Q+R} \sum_{p=1}^P \frac{S_{tp}^{ix}}{L_{tp}^{ix}} + \frac{1}{P+Q+R} \sum_{q=1}^Q \frac{S_{tq}^{iy}}{U_{tq}^{iy}} + \frac{1}{P+Q+R} \sum_{r=1}^R \frac{S_{tr}^{ib}}{L_{tr}^{ib}} \quad (12a)$$

为研究在资源有限和环境负荷的约束下全球主要经济体农业部门的全要素生产率变化，在定义农业绿色生产技术时，将土地（ Lan ）、畜牧资本（ Lc ）、机械（ M ）、肥料（ F ）、动物饲料（ A ）、能源利用足迹（ E ）、劳动力

① 本文的生产效率是指单位投入的产出水平，反映了一定投入的当期效果（静态）。而生产率则是劳动者在跨期内创造的劳动成果与相应的劳动消耗的比值变化（动态）。

(*Lab*)、农业研发(*R*)作为投入,农业总产出(*Y*)作为期望产出(Gong, 2020),农业CO₂足迹(*C*)、SO₂足迹(*S*)和NO_x足迹(*N*)作为非期望产出。进而,对于同期前沿面,经济体的整体无效率与单一变量无效率存在以下数量关系:

$$CIE_i(t) = \sum_{\alpha \in \{Lan, Lc, M, F, A, E, Lab, R, Y, C, S, N\}} CIE_{i\alpha}(t) \quad (13a)$$

此外,受Oh(2010)的启发,本文构建覆盖整个时间跨度内所有生产活动数据的全球主要经济体的共同前沿面,进而计算全局无效率值(*GIE*)。简而言之,对全球主要经济体农业部门的投入/产出数据进行汇总以构建全局农业生产技术前沿,进而采用以下公式来估算全局无效率值:

$$\begin{aligned} GIE(i) &= IE(x_i, y_i, b_i) = GIE_x(i) + GIE_y(i) + GIE_b(i) \\ &= \frac{1}{P+Q+R} \sum_{p=1}^P \frac{S_p^{ix}}{L_p^{ix}} + \frac{1}{P+Q+R} \sum_{q=1}^Q \frac{S_q^{iy}}{U_q^{iy}} + \frac{1}{P+Q+R} \sum_{r=1}^R \frac{S_r^{ib}}{L_r^{ib}} \end{aligned} \quad (12b)$$

类似地,基于共同前沿面计算的全局无效率值也可分解为单个变量:

$$GIE_i(t) = \sum_{\alpha \in \{Lan, Lc, M, F, A, E, Lab, R, Y, C, S, N\}} GIE_{i\alpha}(t) \quad (13b)$$

通过类似方式,既可根据同期(共同)前沿面测算的相关无效率值来估算与某一投入/产出变量相关技术无效率值,也可将同期前沿面与共同前沿面的无效率水平予以比较来观察生产率变化。在获得当期与全局无效率值的基础上,可进一步定义同期无效率值和全局无效率值的差异为技术差距:

$$\begin{aligned} &GIE_i^t(Lan, Lc, M, F, A, E, Lab, R, Y, C, S, N) \\ &= CIE_i^t(Lan, Lc, M, F, A, E, Lab, R, Y, C, S, N) + TG_i^t(Lan, Lc, M, F, A, E, Lab, R, Y, C, S, N) \end{aligned} \quad (14)$$

在此基础上,借鉴Chambers(1996)提出的常规Luenberger生产率指数,本文给出了全局LPI生产率指数的分解公式。值得注意的是,如式(13a)和式(13b)所示,可以得到单个投入/产出变量的无效率水平。类似地,生产

率增长及其组成来源（效率提升与技术创新）也可分解为单个投入/产出变量的贡献。在兼顾传统的劳动力与资本要素的前提下，本文更关注农业能源利用和环境压力对全要素生产率的影响。具体而言，生产率变化可由式（15）表示：

$$\begin{aligned} LTFP_i^{t,t+1} &= \sum_{\alpha \in (Lan, Lc, M, F, A, E, Lab, R, Y, C, S, N)} LTFP_{i\alpha}^{t,t+1} \\ &= \sum_{\alpha \in (Lan, Lc, M, F, A, E, Lab, R, Y, C, S, N)} [GIE_{i\alpha}(t) - GIE_{i\alpha}(t+1)] \end{aligned} \quad (15)$$

式（15）中， $LTFP_{i\alpha}^{t,t+1}$ 代表了投入产出要素集 α 的生产率增长，其他参数定义均与前文一致。Gong（2020）试图将全要素生产率全部归因于投入要素。与其不同的是，本文将全要素生产率分解至每一项投入/产出变量（即全变量分解），并借鉴 Färe 等（1994）的研究将生产率增长分解为技术创新（ TP ）和效率提升（ EC ）^①：

$$\begin{aligned} EC_i^{t,t+1} &= \sum_{\alpha \in (Lan, Lc, M, F, A, E, Lab, R, Y, C, S, N)} EC_{i\alpha}^{t,t+1} \\ &= \sum_{\alpha \in (Lan, Lc, M, F, A, E, Lab, R, Y, C, S, N)} [CIE_{i\alpha}(t) - CIE_{i\alpha}^{t+1}(t+1)] \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} TP_i^{t,t+1} &= \sum_{\alpha \in (Lan, Lc, M, F, A, E, Lab, R, Y, C, S, N)} TP_{i\alpha}^{t,t+1} \\ &= \sum_{\alpha \in (Lan, Lc, M, F, A, E, Lab, R, Y, C, S, N)} [TG_{i\alpha}(t) - TG_{i\alpha}^{t+1}(t+1)] \end{aligned} \quad (17)$$

式中， $EC_{i\alpha}^{t,t+1}$ 和 $TP_{i\alpha}^{t,t+1}$ 分别代表投入产出要素集 α 对效率提升和技术创新的贡献，其他参数定义同前文。在此基础上，本文可以量化各投入/产出变量通过不同渠道（ EC 或 TP ）对经济增长的边际贡献，有助于挖掘提高全要素生产率进而促进农业绿色增长的最有效途径。

① 技术创新和效率提升之间存在相辅相成的关系和互动作用，如技术创新可以促进效率提升，而效率提升则进一步拉动技术创新的需求。由于篇幅所限，本文并未详细考察技术创新的动力和激励机制，例如政府支持、市场需求和知识溢出等。感谢审稿人的建议。

三 数据来源

本文利用全球主要经济体2000~2014年的平衡面板数据,对其农业部门全要素生产率进行立体分解。事实上,在研究期内选定的43个经济体的农业产值与碳排放量占全球的比重较大(2014年,43个经济体农业产值占全球的67.2%,碳排放量占全球的82%)^①。本文首先考虑了7种常见投入要素(Gong, 2020):肥料(F_{it} , 百万公吨),农业研发(R_{it} , 十亿美元),土地(Lan_{it} , 百万公顷旱作农田当量),劳动力(Lab_{it} , 百万人),机械(M_{it} , 百万台农用拖拉机等),畜牧资本(Lc_{it} , 百万头牛),动物饲料(A_{it} , 十亿Mcal代谢能^②)。另外,本文选取农业总产出(Y_{it} , 百万美元,以2004~2006年为不变价格)作为期望产出。上述投入/产出变量数据均来源于美国农业部经济研究处(USDA-ERS)^③。

需要指出:①对于土地,旱作农田当量包括旱作农田、灌溉农田和牧场,按相对质量进行加权;②劳动力的年龄范围为16~65岁;③机械的库存总量涵盖农业机械、拖拉机、收割机、脱粒机、挤奶机、水泵的总库存;④采用2004~2006年全球不变平均农产品价格计算作物和动物生产总值,并以购买力平价美元衡量农业生产值。

除传统的农业投入/产出变量外,本文还将资源与环境要素纳入核算框架。本研究所涉及的全球43个主要经济体^④的农业能源利用、碳排放和污染物排放的年度数据从Eora数据库获取(Eora将一个经济体划分为26个子

① 根据Eora数据库的全球MRIO表估算。

② Mcal为兆卡,即能量消耗单位。

③ 事实上,美国农业部-ERS (<https://www.ers.usda.gov/>) 提供了涵盖189个国家1961~2016年的农业数据(Kanemoto等, 2016),但Eora仅提供包含43个主要经济体以及ROW(Rest of the World)部分。考虑到数据的完整性和可得性,本文采用该平台所提供的2000~2014年数据。

④ 世界其他地区(ROW)汇总了其余经济体。由于ROW的异质性,本文省略了这个部分。

部门，并将农业部门独立出来，具体见 <https://www.worldmrio.com>)^①，并基于 Eora 数据库的全球 MRIO 表估算出农业资源与环境要素的“隐含”足迹（消费端核算）数据，进而更新至 2014 年，作为非期望产出的计算依据^②。表 2 报告了上述经济体农业投入/产出变量的统计特征（包括 8 个投入、1 个期望产出和 3 个非期望产出）。2000~2014 年的数据汇总显示，43 个主要经济体的农业部门平均使用 3798.79 亿吨能源利用足迹（标准油）、3305.7 万公顷土地，1469.5 万名劳动力、38.14 亿美元的农业研发、734.60 亿 Mcal 代谢能源动物饲料（Mcal 的可代谢能源动物饲料）、76.8 万台机械（农用拖拉机）、300.9 万公吨肥料、2831.4 万头牛畜牧资本，产生了 367.50 亿美元的农业总产出。此外，农业部门生产活动还产生了 24.095 Giga kg CO₂ 足迹、97.051 Giga g SO₂ 足迹和 98.266 Giga g NO_x 足迹^③。

表 2 2000~2014 年全球 43 个主要经济体农业部门投入/产出变量的描述性统计

| 投入变量 | 符号 | 单位 | 均值 | 标准差 | 最大值 | 最小值 |
|--------|------------|-------------|---------|----------|-----------|-------|
| 能源利用足迹 | <i>E</i> | 十亿吨 | 379.879 | 1138.268 | 20015.710 | 0.654 |
| 土地 | <i>Lan</i> | 百万公顷 | 33.057 | 71.716 | 316.316 | 0.011 |
| 劳动力 | <i>Lab</i> | 百万人 | 14.695 | 57.446 | 362.496 | 0.002 |
| 农业研发 | <i>R</i> | 十亿美元 | 3.814 | 6.887 | 45.564 | 0.006 |
| 动物饲料 | <i>A</i> | 十亿 Mcal 代谢能 | 73.460 | 147.310 | 1058.880 | 0.344 |
| 机械 | <i>M</i> | 百万台农用拖拉机 | 0.768 | 1.561 | 11.660 | 0.000 |
| 肥料 | <i>F</i> | 百万公吨 | 3.009 | 7.702 | 48.920 | 0.000 |
| 畜牧资本 | <i>Lc</i> | 百万头牛 | 28.314 | 66.698 | 304.104 | 0.035 |

① 虽然 EU 开发的 WIOD、OECD 开发的 ICIO、ADB 开发的 MRIO 数据库各有特色，但是 Eora 数据库更符合本文对于能源和污染物排放种类的研究需求与时间跨度要求。感谢审稿专家的建议，当然文责自负。

② 本文采用能源利用、碳排放及污染物排放的“隐含”足迹替代“直接”排放予以核算，更符合产品的全生命周期核算视角与责任分担，而两者数据的不一致对数据包络分析的结果有影响但差异不大。感谢审稿人的建议，当然文责自负。

③ Giga 为重量单位，1 Giga=10¹² kg。

续表

| 投入变量 | 符号 | 单位 | 均值 | 标准差 | 最大值 | 最小值 |
|--------------------|----------|---------|--------|---------|----------|-------|
| 产出变量: | | | | | | |
| 农业总产出 | <i>Y</i> | 十亿美元 | 36.750 | 85.420 | 595.170 | 0.073 |
| CO ₂ 足迹 | <i>C</i> | Giga kg | 24.095 | 51.352 | 395.211 | 0.090 |
| SO ₂ 足迹 | <i>S</i> | Giga g | 97.051 | 208.886 | 1862.598 | 1.624 |
| NO _x 足迹 | <i>N</i> | Giga g | 98.266 | 210.630 | 1943.828 | 1.812 |

注：表中展示了2000~2014年43个主要经济体数据的统计特征，样本量为645个。

资料来源：Eora数据库的全球MRIO表，美国农业部-ERS。

四 实证分析

本文将绿色增长核算的立体分解框架应用于全球43个主要经济体的农业部门，为量化农业部门经济增长的要素贡献度并确定促进农业绿色增长的有效途径奠定了基础。

(一) 农业绿色生产无效率

以式(9)~(11)作为约束，本文利用式(8)的BAM模型估算出选定变量的总体农业绿色生产无效率值，并利用式(12a)和式(12b)分别将总体无效率分解至当期前沿和共同前沿的三个部分，即与农业投入、农业总产值与环境外部性的相关无效率值。然而，上述三个部分过于笼统，无法明确提升农业生产效率的有效措施，如注重投资结构优化或节能减排等措施的“抑扬”与“先后”。为此，本文提出的式(13a)和式(13b)能够将上述三个部分的无效率值分解至单一变量，实现对改善农业生产无效率关键要素的精准定位。

对于中国而言，每年的农业绿色生产绩效大多处于生产前沿面，无效率值为0或接近于0。作为全球水稻、小麦、玉米、棉花、大豆、油菜、马铃薯等主要农作物的优势种植地，中国农业绿色生产效率较高的原因可能是农业制度改革与持续推行农业可持续发展政策的叠加效应

(吴伟光等, 2023)。具体而言, 一方面, 中国农业生产的传统模式注定了更注重土地、劳动力、农机等传统投入与可能产生污染的化肥农药等投入的相对均衡。另一方面, 中国政府高度重视农业可持续发展, 如国务院于2021年发布的《“十四五”推进农业农村现代化规划》中将畜禽粪污综合利用率等作为推进农业农村现代化的主要考核指标。未来, 中国政府应继续坚持农业可持续发展, 优化生产布局, 协调水资源与土地资源的长期利用; 同时, 推广耕地轮休制度, 高效利用水土资源。此外, 不断完善农业科技研发与推广体制, 也是加快推进中国农业可持续发展的重要驱动力。值得注意的是, 2011年、2014年中国农业绿色生产出现了不同程度的退步, 需要引起高度重视, 可能的原因是过度使用农业化肥(无效率值为0.06)以及农产品的国际竞争激烈给中国农业发展带来了一定程度的冲击(Huang等, 2007; Bureau等, 2019)。因此, 要有效参与和应对农产品的国际竞争, 就必须在开放中优化优势农产品的区域布局, 提高优势产业集中度, 将优势产业、优势产区做大做强(Besik等, 2023)。

图2展示了2000~2014年全球43个主要经济体农业无效率值的平滑三维核密度估计值。由图2可知, 2000~2014年无效率值呈现双“峰群”分布。具体而言, 农业生产无效率值的主峰群分布于(0, 0.2)附近, 次峰群处于(0.4, 0.6), 这与美国农业生产的无效率值分布较为相似(Chambers和Pieralli, 2020)。此类双峰群现象, 可被视为一个创新型程度较高和高效型经济体作为“领头羊”的经济体集群, 引领另一个创新型程度与技术效率均较低的经济体集群。位于主峰群的“领头羊”经济体是农业技术创新的主要推动力, 因而形成了差异性的效率边界。需要注意的是, 虽然无效率值大于0.6的经济体数量稀少, 但并不意味着在全球范围内不存在农业生产效率低的经济体, 可能是因为本研究缺乏对非洲、拉丁美洲等发展中经济体的考察。

从时间维度来看, 与前半段(2000~2007年)相比, 处于样本期后半段(2008~2014年)的无效率值在主峰群区的波峰更高, 群体效应更显著, 这意味着较多经济体的农业生产效率值在后期更接近于技术前沿。因此, 由

图2可知,全球农业生产无效率值分布呈现以下动态趋势。第一,无效率值从双峰分布逐渐转为单峰分布,波峰逐渐由无效率区间(0.4, 0.6)向无效率区间(0, 0.2)移动,即由低效率向高效率改善。第二,靠近前沿面的无效率峰值由低逐渐变高,说明无效率值差距逐渐缩小。第三,分水岭两侧的阶段性特征明显,2007年前双峰群分布更为显著,而2008年后呈现靠近技术前沿的单峰态势。

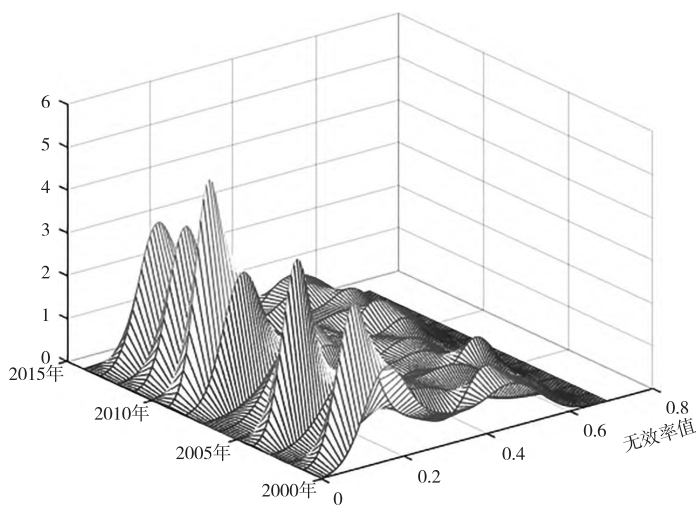


图2 农业无效率值的平滑三维核密度

资料来源: Eora 数据库的全球 MRIO 表, 美国农业部-ERS。

上述现象出现的原因可能是: ①全球农业部门对研究与试验发展(R&D)的投入不断增加。虽然发达国家的农业 R&D 投入占据主导地位, 但近年来以中国为代表的发展中国家的农业 R&D 投入年均增长率甚至高于部分发达国家, 新一轮科技革命为农业转型升级注入了新活力(谢玲红等, 2016)。②全球化背景下农业支持政策的变化。大多数发达国家对农业的支持重点倾向于促进农业市场化和提高竞争力, 政策方向逐渐由政府干预转变为市场干预与提高农业生产率和竞争力(黄季焜等, 2022)。③全球农业结构转型。农业结构转型促进了城镇化与工业化, 而城镇化与工业化又反哺农业结构转型, 相辅相成, 最终实现趋同。近年来, 随着农业结构转型,

全球城镇化趋势日益明显，并且农业生产力在农业发展中的作用进一步提升（Hussein，2016）。

分地区而言，四个经济体（中国、塞浦路斯、卢森堡和墨西哥）在样本期内的平均无效率值低于（或等于）平均值（或理解为效率值高于平均值），表明这些经济体接近于农业生产前沿面，能够较好地协调农业发展和环境保护之间的关系。在农业发展方面，四国主要有两种发展模式。首先是中国与墨西哥的发展模式。中国和墨西哥（无效率值分别为0.001和0.008）农业总产值相对较大。其次是塞浦路斯和卢森堡的发展模式。塞浦路斯和卢森堡的农业绿色生产效率得分大致相同（分别为0.010和0.008），也较接近于农业生产前沿面，不同于中国和墨西哥的发展模式，它们的农业生产总值相对较小，在43个经济体中分别排名第41位和第42位。塞浦路斯主要产品是柠檬、土豆和奶酪。卢森堡的农业部门以畜牧业、葡萄种植业和林业为特色，具有集约化特征。上述两个国家的发展模式与产业结构调整相对较易。

需要指出的是，前文仅对总体无效率予以阐述，并未考察各投入/产出变量的具体贡献。为了检验不同变量在时间维度的效率表现，图3绘制了主要投入/产出变量的无效率值及其变化趋势。除农业总产出变量外，其他投入/产出变量绩效总体呈现下降趋势，其表现可被理解为能够较好地适应农业生产技术运作环境，从而使得样本期间农业无效率值波动下降。除农业总产出外的其他变量与总体无效率值变化趋势基本一致。其中，在2007~2009年和2012~2014年，几乎所有变量都呈现了无效率值下降，而2002~2003年和2005~2007年则出现了无效率值上升。在全球金融危机期间，主要经济体的农业生产效率提升明显，表现出较强的抗金融风险能力。

（二）农业绿色全要素生产率

根据式（15），在规模报酬可变与规模报酬不变的前提下，分别根据当期前沿和共同前沿估算四类农业无效率值，^①进而估计生产率的动态变

① 四类农业无效率值包含：规模报酬不变下的当期前沿、规模报酬不变下的共同前沿、规模报酬可变下的当期前沿、规模报酬可变下的共同前沿。

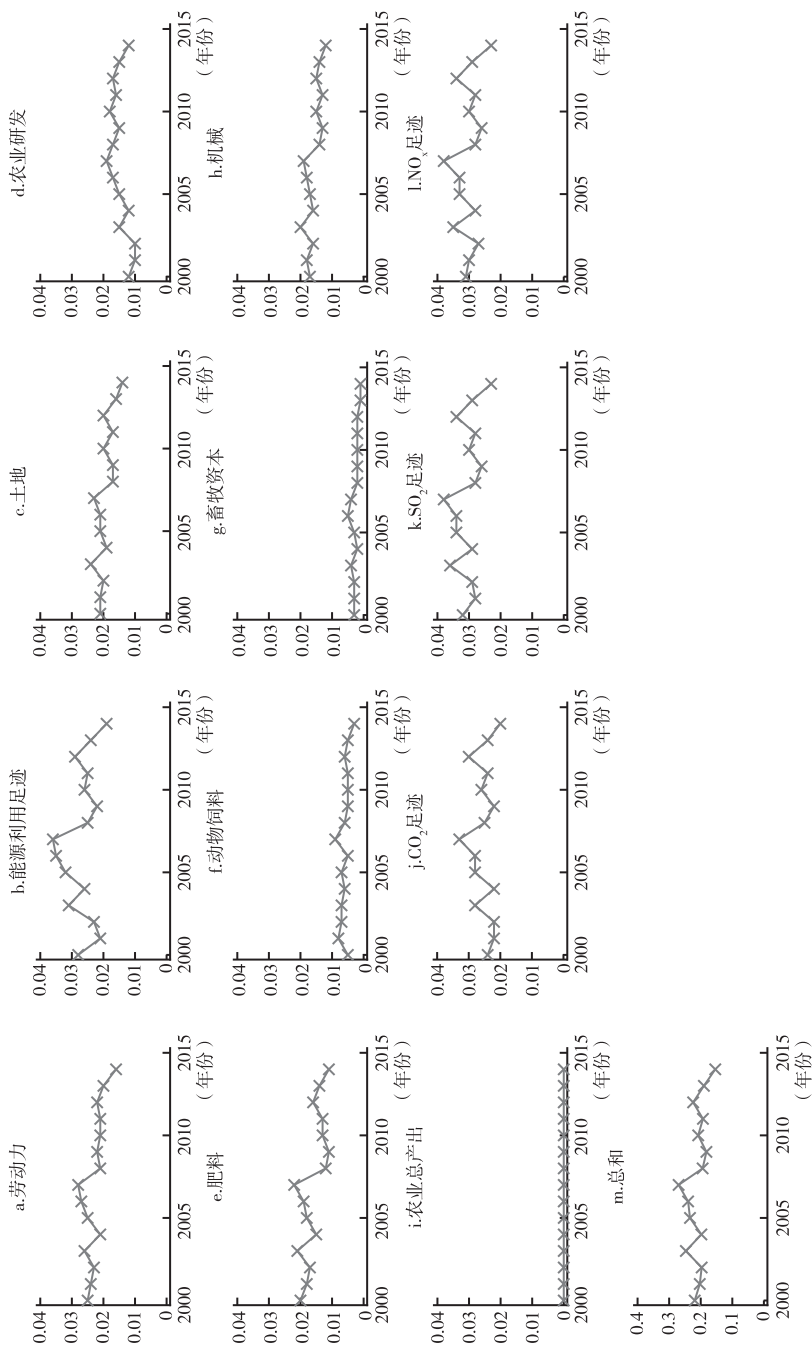


图3 农业生产投入/产出变量无效率值变化趋势

资料来源: Eora数据库的全球MRIO表, 美国农业部-ERS。

化。在非参数框架内，静态无效率值与全要素生产率的含义并不相同；具体而言，静态无效率值面向单一时段（静态），而 TFP 则针对跨越时期（动态）。以土地无效率与生产率为例，在效率最优的条件下，假设现有技术最多利用 1 单位土地产出 1 单位 GDP，如果某经济体使用 1 单位土地在第 t 年产出 0.5 单位 GDP，那么当年土地的低效率为 0.5。而在 $t+1$ 年，如果低效率继续维持在 0.5，则生产率变化为 0。表 3 列出了全球 43 个主要经济体在样本期内的农业全要素生产率均值及其按照变量的“横向”分解结果。

在样本期内，中国大陆农业全要素生产率总体增长为 -3.111%，其主要原因为 2011 年及 2014 年的绿色生产无效率值较大而导致 TFP 下降。从根源分解角度，其效率提升值（追赶效应）为正而技术创新（前沿面移动）为负，这表明与其他经济体相比，通过 2000~2014 年的不断努力，中国积极追赶发达国家生产前沿面且差距逐渐缩小，主要原因在于农业生产要素等的高效利用，但农用技术创新相对不足，仍有待进一步加强。^①结合变量的“立体分解”结果，中国农业全要素生产率的变化在样本期内主要由农机总动力的技术进步驱动，^②而其他变量的贡献较为有限，特别是与劳动力和农业污染物排放相关的变量。这意味着农业机械化主要推动了该时期农业全要素生产率增长。根据测算结果，在未来一段时间内，农民再教育以及农业减污降碳可能成为农业可持续发展的潜在增长点。特别地，农业 SO_2 和 NO_x 足迹的全要素绩效亟须改善（分别为 -0.595% 和 -0.592%）。但也需要指出，本文的数据仅更新到 2014 年，并不能反映中国近年来的农业可持续发展状况。

如表 3 所示，在样本期内，全球 43 个经济体的平均生产率增长为

① 限于篇幅，本文未报告所有国家的 EC 和 TP 值。在样本期内，中国的农业全要素生产率增长主要依靠 EC 的进步，而 TP 的贡献较小；美国的 EC 为负，但 TP 增长率较大。

② 需要指出，虽然农机总动力在样本期内的 TP 为 0，但实质上意味着中国在样本期内该变量的 TP 与其他经济体持平。

表3 2000~2014年全球主要经济体农业全要素生产率及变量分解：年平均

| 国家或地区 | 单位: % | | | | | | | | | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | Lab | E | Lan | R | F | A | Lc | M | Y | C | S | N | 总和 |
| 澳大利亚 | -0.458 | -0.527 | -0.329 | -0.416 | -0.275 | -0.098 | -0.213 | -0.424 | 0.000 | -0.504 | -0.595 | -0.595 | -4.435 |
| 奥地利 | 0.395 | 0.503 | 0.154 | 0.159 | 0.174 | 0.000 | 0.159 | 0.389 | 0.000 | 0.503 | 0.595 | 0.587 | 3.618 |
| 比利时 | 0.000 | -0.184 | -0.118 | -0.595 | -0.145 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | -0.187 | -0.224 | -0.236 | -1.688 |
| 保加利亚 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 巴西 | -0.187 | -0.022 | -0.459 | -0.543 | -0.270 | -0.312 | -0.271 | -0.333 | 0.000 | 0.029 | -0.012 | -0.085 | -2.464 |
| 加拿大 | -0.062 | 0.277 | 0.521 | 0.000 | 0.446 | -0.042 | 0.010 | 0.231 | 0.000 | 0.200 | 0.142 | 0.199 | 1.921 |
| 瑞士 | 0.474 | 0.203 | 0.058 | 0.429 | 0.558 | 0.000 | 0.000 | 0.321 | 0.000 | 0.545 | 0.536 | 0.566 | 3.689 |
| 中国大陆 | -0.533 | -0.389 | -0.309 | -0.276 | -0.093 | -0.172 | -0.059 | 0.000 | 0.000 | -0.247 | -0.512 | -0.521 | -3.111 |
| 塞浦路斯 | 0.380 | 0.335 | 0.102 | 0.253 | 0.231 | 0.123 | 0.000 | 0.276 | 0.000 | 0.344 | 0.512 | 0.513 | 3.069 |
| 捷克 | 0.053 | -0.136 | 0.013 | -0.399 | 0.150 | -0.106 | 0.000 | 0.123 | 0.000 | -0.053 | -0.090 | -0.050 | -0.494 |
| 德国 | -0.337 | -0.502 | 0.000 | -0.433 | -0.126 | 0.000 | -0.213 | -0.530 | 0.000 | -0.481 | -0.564 | -0.595 | -3.780 |
| 丹麦 | -0.372 | -0.055 | -0.269 | -0.519 | -0.220 | 0.127 | 0.101 | -0.405 | 0.000 | -0.191 | -0.027 | -0.055 | -1.885 |
| 西班牙 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 爱沙尼亚 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 芬兰 | 0.474 | 0.500 | 0.445 | 0.510 | 0.538 | 0.061 | 0.000 | 0.491 | 0.000 | 0.589 | 0.592 | 0.594 | 4.794 |

续表

| 国家或地区 | Lab | E | Lan | R | F | A | Lc | M | Y | C | S | N | 总和 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 法国 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 英国 | -0.385 | -0.382 | -0.188 | -0.325 | -0.045 | 0.000 | -0.079 | -0.395 | 0.000 | -0.454 | -0.595 | -0.592 | -3.440 |
| 希腊 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 克罗地亚 | 0.362 | 0.007 | 0.219 | 0.038 | 0.258 | 0.244 | 0.000 | 0.229 | 0.000 | 0.118 | 0.148 | 0.120 | 1.744 |
| 匈牙利 | 0.215 | 0.510 | 0.101 | 0.031 | 0.136 | 0.175 | -0.036 | -0.001 | 0.000 | 0.450 | 0.521 | 0.532 | 2.632 |
| 印度尼西亚 | 0.082 | -0.039 | -0.108 | 0.037 | -0.126 | 0.017 | -0.040 | -0.107 | 0.000 | -0.068 | -0.064 | -0.023 | -0.438 |
| 印度 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 爱尔兰 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 意大利 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 日本 | -0.179 | 0.098 | -0.313 | 0.289 | -0.199 | 0.097 | 0.000 | 0.376 | 0.000 | -0.474 | -0.255 | -0.572 | -1.133 |
| 韩国 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 立陶宛 | 0.548 | 0.383 | 0.522 | 0.239 | 0.549 | 0.022 | 0.000 | 0.446 | 0.000 | 0.589 | 0.593 | 0.595 | 4.486 |
| 卢森堡 | -0.124 | -0.150 | -0.164 | 0.000 | 0.000 | -0.065 | -0.018 | -0.099 | 0.000 | -0.169 | -0.168 | -0.168 | -1.125 |
| 拉脱维亚 | 0.148 | -0.190 | 0.187 | -0.124 | 0.196 | 0.000 | -0.090 | 0.175 | 0.000 | -0.062 | -0.012 | 0.000 | 0.227 |
| 墨西哥 | -0.325 | -0.167 | -0.462 | -0.443 | -0.228 | -0.004 | 0.100 | -0.325 | 0.000 | -0.437 | -0.461 | -0.310 | -3.063 |
| 马耳他 | 0.595 | 0.595 | 0.535 | 0.595 | 0.387 | 0.595 | 0.136 | 0.000 | 0.000 | 0.552 | 0.595 | 0.594 | 5.180 |

续表

| 国家或地区 | Lab | E | Lan | R | F | A | Lc | M | Y | C | S | N | 总和 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 荷兰 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 挪威 | 0.448 | 0.570 | 0.563 | 0.527 | 0.419 | 0.324 | 0.338 | 0.487 | 0.000 | 0.527 | 0.595 | 0.595 | 5.393 |
| 波兰 | -0.511 | -0.586 | -0.313 | -0.294 | -0.391 | -0.211 | 0.000 | -0.163 | 0.000 | -0.593 | -0.595 | -0.595 | -4.253 |
| 葡萄牙 | 0.372 | 0.092 | 0.269 | 0.159 | 0.270 | -0.084 | 0.000 | 0.393 | 0.000 | 0.004 | 0.072 | 0.095 | 1.641 |
| 罗马尼亚 | 0.584 | 0.462 | 0.545 | 0.380 | 0.595 | 0.012 | 0.093 | 0.195 | 0.000 | 0.022 | 0.389 | 0.447 | 3.723 |
| 俄罗斯 | 0.496 | 0.444 | 0.523 | 0.392 | 0.323 | 0.000 | 0.049 | 0.240 | 0.000 | 0.339 | 0.355 | 0.376 | 3.536 |
| 斯洛伐克 | 0.522 | 0.492 | 0.517 | 0.450 | 0.584 | 0.009 | 0.000 | 0.051 | 0.000 | 0.555 | 0.586 | 0.594 | 4.360 |
| 斯洛文尼亚 | 0.539 | 0.410 | 0.305 | 0.476 | 0.591 | 0.000 | 0.066 | 0.541 | 0.000 | 0.523 | 0.578 | 0.595 | 4.625 |
| 瑞士 | 0.452 | 0.518 | 0.491 | 0.423 | 0.287 | 0.101 | 0.000 | 0.454 | 0.000 | 0.530 | 0.593 | 0.586 | 4.435 |
| 土耳其 | 0.000 | 0.318 | 0.153 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.153 | 0.000 | 0.255 | 0.272 | 0.367 | 1.517 |
| 中国台湾 | -0.360 | -0.529 | -0.106 | 0.107 | -0.119 | 0.004 | -0.071 | -0.364 | 0.000 | -0.486 | -0.431 | -0.407 | -2.763 |
| 美国 | 0.000 | 0.037 | 0.347 | 0.031 | 0.185 | 0.000 | -0.031 | 0.068 | 0.000 | -0.016 | -0.264 | -0.368 | -0.011 |
| 均值 | 0.077 | 0.067 | 0.080 | 0.027 | 0.108 | 0.019 | -0.002 | 0.058 | 0.000 | 0.052 | 0.065 | 0.065 | 0.616 |

注：按照经济体名称简写的英文首字母排序。
资料来源：Eora 数据库的全球 MRIO 表，美国农业部-ERS。

0.616%，与Gong（2020）估算的0.760%基本一致。^①在12个投入/产出变量中，肥料、土地、劳动力（分别为0.108%、0.080%和0.077%）等对总生产率增长的贡献较大，其次是能源利用足迹、SO₂足迹与NO_x足迹（分别为0.067%、0.065%和0.065%），机械、CO₂足迹、农业研发和动物饲料（分别为0.058%、0.052%、0.027%和0.019%）等的贡献也不容忽视。相反，与农业总产出和畜牧资本（分别为0.000%和-0.002%）相关的全要素生产率变化停滞，甚至为负。综上所述，2000~2014年，鉴于土地与劳动力等要素的稳定性，全要素生产率增长依赖于肥料投入。相比之下，与畜牧资本相关的全要素生产率变化为-0.002%，应在全球范围内进一步优先考虑提升其生产率。未来，全球范围内畜牧业相关的技术扩散和贸易自由化可能会带来正面影响。

从经济体维度，马耳他和挪威等的生产率增长均超过5.000%，而澳大利亚和波兰等的生产率下降超过-4.000%，美国略有下降（-0.011%）。

为更好地比较不同经济体的总体增长及其要素贡献，本文采用Gong（2020）的三种分类方法，第一种为发达经济体和发展中经济体（按发展类别）；第二种为高收入经济体、中上收入经济体、中低收入经济体及低收入经济体（按收入类别）；第三种根据《2008年世界发展报告：世界银行的农业促进发展》（Mondiale, 2008），可归纳为三种农业经营类型：农业经济体、转型经济体和城市化经济体（按城乡类别）。表4列出了发达经济体和发展中经济体的组间区别。

从全样本角度，全要素生产率的增长（0.616%）主要由效率提升（追赶效应）驱动（0.380%），而技术创新（前沿面移动）的贡献也不可忽略（0.236%）。从效率提升角度，土地与劳动力（分别为0.066%和0.063%）对其贡献最大，说明先进的管理经验可以通过上述两个要素发挥作用。畜牧

① 事实上，本文结果与Gong（2020）略有差异，这可能是由多种因素导致的。首先，本文以全球43个经济体为研究对象，而Gong（2020）选取107个国家作为研究样本。其次，本文拓展了非参数框架及模型应用，而Gong（2020）对参数框架的随机前沿分析方法予以修正。再次，本文的样本期为2000~2014年，Gong（2020）的样本期为1962~2004年。最后，本文将资源与环境要素足迹纳入框架，而Gong（2020）仅考虑了传统投入/产出变量。

资本的 EC 为负(-0.022%),并抵消了 TP 的正效应(0.020%),显示了样本期内农场畜牧资本的生产率变化主要由技术创新驱动。技术创新的主要贡献为能源利用足迹(0.055%)和机械(0.043%)。本文提出的增长核算框架的立体分解结果表明,重视能源利用足迹和机械等要素是提高 TP 的有效途径。

比较A组发达经济体和发展中经济体的分类结果,前者的平均全要素生产率增长较快(0.848%),而后的平均全要素生产率下降(-0.575%)。这表明全要素生产率的增长主要由发达经济体推动,而发展中经济体呈现倒退趋势。进一步, TP 对经济体全要素生产率的影响为 0.491% ,超过了 EC 的 0.358% ,表明技术创新表现突出。而发展中经济体的全要素生产率下降归因于 TP (-1.068%)[尽管 EC 产生了一定的积极效应(0.493%)]。研究发现,发达经济体的肥料和土地(分别为 0.140% 和 0.114%)的全要素生产率增长明显。对于肥料而言,发达经济体更多地依赖 EC (0.109%),而不是 TP (0.031%),相比之下,发展中经济体的 TP 负效应(-0.111%)超过 EC 的正效应(0.054%)。值得注意的是,从高收入经济体组和城市化经济体组的两个分类(分别为B组和C组)也可观察到类似结论。相反,低收入经济体组和农业经济体组仍属于粗放型增长模式,要实现农业高质量发展仍然任重道远。

本文进一步验证了Basu和Weil(1998)以及Gong(2020)的结论,即在一定的投入要素组合下,各国农业生产能力较有限;在农业生产技术方面,领先经济体的全要素生产率增长更多地依赖于肥料、机械及能源利用足迹等要素的贡献,而落后经济体的全要素生产率增长较多地依赖于土地和劳动力等要素的投入。事实上,受技术外溢限制,落后经济体必须经历较依赖资源禀赋(如土地和劳动力)的一段时期^①。在此基础上,本文结论证明:在样本期内,落后经济体早期增长依赖于投入, EC 表现突出,而领先经济体的 TP 表现突出。这可以解释为落后经济体通过更多的投入追赶领

① 笔者非常感谢审稿人指出这一结论需要增加不同子时期的领先经济体和落后经济体对 TP/EC 的依赖程度比较,并观测发展中国家对 TP 的依赖程度是否呈现逐渐上升趋势。限于篇幅,相关分析读者若有兴趣,可联系笔者。

表 4 按不同经济体分类：2000~2014 年全要素生产率及其年均增长的立体分解

| 经济体类别 | 指标 | Lab | E | Lan | R | F | A | Lc | M | Y | C | S | N | 单位：% | |
|-------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--|
| | | | | | | | | | | | | | | 总和 | |
| 全样本 | TFP | 0.077 | 0.067 | 0.080 | 0.027 | 0.108 | 0.019 | -0.002 | 0.058 | 0.000 | 0.052 | 0.065 | 0.065 | 0.616 | |
| | TP | 0.014 | 0.055 | 0.014 | -0.029 | 0.008 | 0.016 | 0.020 | 0.043 | 0.000 | 0.032 | 0.029 | 0.034 | 0.236 | |
| | EC | 0.063 | 0.012 | 0.066 | 0.056 | 0.100 | 0.003 | -0.022 | 0.015 | 0.000 | 0.020 | 0.036 | 0.031 | 0.380 | |
| A. 发展类别 | | | | | | | | | | | | | | | |
| A.1 发达经济体 | TFP | 0.105 | 0.076 | 0.114 | 0.055 | 0.140 | 0.036 | 0.004 | 0.080 | 0.000 | 0.066 | 0.090 | 0.083 | 0.848 | |
| | TP | 0.043 | 0.075 | 0.050 | 0.000 | 0.031 | 0.032 | 0.030 | 0.066 | 0.000 | 0.051 | 0.057 | 0.056 | 0.491 | |
| | EC | 0.062 | 0.001 | 0.063 | 0.056 | 0.109 | 0.003 | -0.026 | 0.014 | 0.000 | 0.015 | 0.033 | 0.027 | 0.358 | |
| A.2 发展中经济体 | TFP | -0.067 | 0.020 | -0.095 | -0.119 | -0.056 | -0.067 | -0.031 | -0.053 | 0.000 | -0.019 | -0.060 | -0.028 | -0.575 | |
| | TP | -0.133 | -0.046 | -0.172 | -0.179 | -0.111 | -0.067 | -0.032 | -0.073 | 0.000 | -0.061 | -0.110 | -0.083 | -1.068 | |
| | EC | 0.066 | 0.067 | 0.077 | 0.060 | 0.054 | 0.000 | 0.000 | 0.020 | 0.000 | 0.043 | 0.050 | 0.055 | 0.493 | |
| B. 收入类别 | | | | | | | | | | | | | | | |
| B.1 高收入经济体 | - | | | | | | | | | | | | | | |
| | TFP | 0.084 | 0.075 | 0.098 | 0.059 | 0.127 | 0.036 | 0.006 | 0.068 | 0.000 | 0.064 | 0.075 | 0.065 | 0.758 | |
| | TP | 0.047 | 0.063 | 0.051 | 0.002 | 0.037 | 0.029 | 0.037 | 0.067 | 0.000 | 0.042 | 0.038 | 0.036 | 0.448 | |
| B.2 中上收入经济体 | EC | 0.036 | 0.012 | 0.046 | 0.057 | 0.091 | 0.007 | -0.030 | 0.001 | 0.000 | 0.022 | 0.037 | 0.029 | 0.309 | |
| | TFP | 0.121 | 0.105 | 0.092 | -0.030 | 0.106 | -0.007 | -0.014 | 0.056 | 0.000 | 0.064 | 0.109 | 0.131 | 0.735 | |
| | TP | -0.029 | 0.090 | -0.042 | -0.099 | -0.047 | 0.000 | -0.010 | 0.002 | 0.000 | 0.046 | 0.068 | 0.087 | 0.066 | |
| | EC | 0.149 | 0.016 | 0.134 | 0.069 | 0.153 | -0.007 | -0.005 | 0.054 | 0.000 | 0.019 | 0.041 | 0.045 | 0.669 | |

续表

| 经济体类别 | 指标 | Lab | E | Lan | R | F | A | Lc | M | Y | C | S | N | 总和 |
|-------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| B.3 中低收入经济体 | TFP | -0.267 | -0.195 | -0.154 | -0.138 | -0.047 | -0.086 | -0.029 | 0.000 | 0.000 | -0.124 | -0.256 | -0.260 | -1.556 |
| | TP | -0.267 | -0.195 | -0.154 | -0.138 | -0.047 | -0.086 | -0.029 | 0.000 | 0.000 | -0.124 | -0.256 | -0.260 | -1.556 |
| | EC | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| B.4 低收入经济体 | TFP | 0.082 | -0.039 | -0.108 | 0.037 | -0.126 | 0.017 | -0.040 | -0.107 | 0.000 | -0.068 | -0.064 | -0.023 | -0.438 |
| | TP | 0.082 | -0.039 | -0.108 | 0.037 | -0.126 | 0.017 | -0.040 | -0.107 | 0.000 | -0.068 | -0.064 | -0.023 | -0.438 |
| | EC | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| C. 城乡类别 | | | | | | | | | | | | | | |
| C.1 城市化经济体 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | TFP | 0.096 | 0.079 | 0.103 | 0.021 | 0.128 | 0.025 | -0.002 | 0.058 | 0.000 | 0.086 | 0.093 | 0.099 | 0.785 |
| | TP | 0.032 | 0.065 | 0.029 | -0.045 | 0.021 | 0.015 | 0.027 | 0.045 | 0.000 | 0.053 | 0.044 | 0.056 | 0.342 |
| C.2 转型经济体 | EC | 0.064 | 0.014 | 0.074 | 0.065 | 0.107 | 0.010 | -0.029 | 0.013 | 0.000 | 0.034 | 0.049 | 0.042 | 0.443 |
| | TFP | 0.027 | 0.007 | 0.026 | 0.028 | 0.075 | -0.029 | -0.001 | 0.018 | 0.000 | -0.059 | -0.037 | -0.019 | 0.035 |
| | TP | -0.067 | 0.002 | -0.018 | 0.001 | -0.040 | 0.015 | -0.020 | -0.015 | 0.000 | 0.007 | -0.003 | 0.009 | -0.128 |
| C.3 农业经济体 | EC | 0.094 | 0.005 | 0.044 | 0.027 | 0.115 | -0.044 | 0.019 | 0.033 | 0.000 | -0.066 | -0.034 | -0.029 | 0.163 |
| | TFP | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| | TP | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| C.3 农业经济体 | EC | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| | TFP | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| | TP | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

注：第一栏为按发展水平、收入水平和城乡类别分类的经济体。在此基础上，第二栏为衡量农业增长的三个指标，即全要素生产率（TFP）、技术创新（TP）和效率提升（EC）。需要注意的是，TP和EC是TFP的不同根源（即 $TFP=TP+EC$ ）。其余列展示了绿色增长核算框架的立体分解结果，其中第三至十四列依次为12个变量的根源分解，第十五列则是对投入产出变量贡献的汇总。

资料来源：Eora数据库的全球MRIO表，美国农业部-ERS。

先经济体的生产前沿面，而领先经济体受益于技术进步。当然，领先经济体需要进一步保持技术创新优势，而落后经济体则需应对来自制度和基础设施等方面的挑战。未来，“取长补短”应成为两组经济体相互学习的大趋势：落后经济体需以农业技术创新提升全要素生产率，而领先经济体必须注重生产要素的集约利用。

进一步，本文将样本期划分为三个子期，并对增长核算框架的立体分解结果进行跨期比较，结果如表5所示。2000~2005年，全要素生产率为负（-0.354%），表明该时期总体为粗放型增长。2005~2010年，农业部门实现了增长模式转变，全要素生产率增长至0.722%，并于2010~2014年实现了大幅增长（1.698%）。进一步，本文的立体分解框架能够挖掘促进发展模式转变的根源。2000~2005年，全球农业全要素生产率主要由 EC 驱动，而2005~2010年则由 TP 驱动，最终 EC 与 TP 实现了协同提升。综上所述，在三个子期内，农业技术显著进步推动了生产率增长，而效率提升的贡献度呈现先降后升的趋势。

五 结论和政策建议

伴随着经济的持续增长，全球能源消费急剧攀升，环境负外部性问题迫切需要加以解决。如何平衡能源利用、经济发展与环境保护的关系，是全球尤其是以中国为代表的发展中国家转变经济增长方式的关键。本文构建了包含能源利用、温室气体与污染物排放足迹的绿色增长核算框架用于测度全要素生产率并进行立体分解，以宏观视角审视农业高质量发展的驱动因素，从技术创新和效率提升来源辨识投入/产出变量的“抑扬”与“先后”影响，为全球增长模式转变提供了新的启示。不同于以往研究，本文贡献主要在于：聚焦资源与环境要素的“隐含”足迹测算，将其作为资源利用与环境排放“直接”数量的合理替代；构建农业生产前沿面，以观测农业绿色全要素生产率总体增长情况，并且按照技术创新和效率提升的不同来源，实现投入/产出变量对 TFP 变化贡献的立体分解与全面识别。

本文构建了一个连续的生产集合，以估计现有“最先进的”农业生产

表5 全要素生产率及其立体分解结果的跨期比较：2000~2014年

| 时期 | Lab | E | Lan | R | F | A | Lc | M | Y | C | S | N | 总和 |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 全样本 | | | | | | | | | | | | | |
| TFP | 0.077 | 0.067 | 0.080 | 0.027 | 0.108 | 0.019 | -0.002 | 0.058 | 0.000 | 0.052 | 0.065 | 0.065 | 0.616 |
| TP | 0.014 | 0.055 | 0.014 | -0.029 | 0.008 | 0.016 | 0.020 | 0.043 | 0.000 | 0.032 | 0.029 | 0.034 | 0.236 |
| EC | 0.063 | 0.012 | 0.066 | 0.056 | 0.100 | 0.003 | -0.022 | 0.015 | 0.000 | 0.020 | 0.036 | 0.031 | 0.380 |
| 2000~2005年 | | | | | | | | | | | | | |
| TFP | -0.043 | -0.074 | -0.006 | -0.028 | 0.009 | -0.010 | -0.024 | -0.030 | 0.000 | -0.068 | -0.041 | -0.038 | -0.354 |
| TP | -0.192 | -0.099 | -0.150 | -0.144 | -0.269 | -0.037 | -0.017 | -0.092 | 0.000 | -0.114 | -0.166 | -0.168 | -1.447 |
| EC | 0.149 | 0.025 | 0.144 | 0.116 | 0.278 | 0.027 | -0.007 | 0.062 | 0.000 | 0.046 | 0.125 | 0.130 | 1.093 |
| 2005~2010年 | | | | | | | | | | | | | |
| TFP | 0.154 | 0.090 | 0.122 | 0.021 | 0.133 | 0.014 | -0.036 | 0.063 | 0.000 | 0.059 | 0.059 | 0.043 | 0.722 |
| TP | 0.169 | 0.140 | 0.140 | -0.001 | 0.183 | 0.028 | 0.003 | 0.048 | 0.000 | 0.096 | 0.154 | 0.149 | 1.109 |
| EC | -0.015 | -0.050 | -0.018 | 0.022 | -0.050 | -0.014 | -0.039 | 0.015 | 0.000 | -0.037 | -0.095 | -0.106 | -0.387 |
| 2010~2014年 | | | | | | | | | | | | | |
| TFP | 0.131 | 0.216 | 0.134 | 0.103 | 0.201 | 0.062 | 0.069 | 0.162 | 0.000 | 0.194 | 0.206 | 0.221 | 1.698 |
| TP | 0.079 | 0.143 | 0.062 | 0.078 | 0.134 | 0.068 | 0.087 | 0.207 | 0.000 | 0.136 | 0.118 | 0.141 | 1.252 |
| EC | 0.052 | 0.073 | 0.072 | 0.025 | 0.067 | -0.006 | -0.018 | -0.045 | 0.000 | 0.058 | 0.088 | 0.080 | 1.446 |

资料来源：Eora数据库的全球MRIO表，美国农业部经济研究处（USDA-ERS）。

前沿，在此基础上对全球43个主要经济体2000~2014年的全要素生产率增长进行测算。结果显示，全要素生产率增长模式及来源（技术创新和效率提升）、各变量的组分从区域和时间角度都显示出不同的特征。

首先，就全要素生产率而言，技术创新和效率提升对其增长均有贡献，其中效率提升影响更为显著，与农业能源利用相关的技术创新和与农业土地相关的效率提升表现突出。其次，在整个样本期内，在不同群组中，发达经济体和发展中经济体的生产率增长模式各不相同。聚集在领先群组（即发达经济体、高收入经济体、城市化经济体）中的经济体具有较为显著的生产率增长。相反，处于落后群组（即发展中经济体、低收入经济体和农业经济体）的经济体生产率增长较慢。最后，从趋势演化角度，随着时间的推移，农业生产率呈现增长态势。效率提升促进了早期的生产率提升，而技术创新贡献为负；中期的生产率提升主要依靠技术创新的正面影响，而效率提升的逆向效应起到阻碍作用；近期，技术创新和效率提升都产生了积极影响，同步促进了生产率增长。就中国而言，按照足迹核算的污染排放，其承担的环境责任应远低于发达国家；经根源分解，能源利用足迹、农业CO₂足迹、土地等要素是导致全要素生产率相对较低的主要原因；相较于发达国家，中国除机械外的其他要素生产率仍有提升空间，特别是与劳动力和农业污染物排放等相关要素的生产率。

本文分别为落后群组、领先群组两个类别提供异质性绿色增长思路，以促进全球主要经济体农业部门的高质量发展。

落后群组方面，由追赶效应驱动增长，技术创新仍有待加强，虽总体生产率不高，但农业部门的“追赶效应”仍优于领先群组，这也导致了全球农业部门的发展仍由“追赶效应”驱动。这显示出，落后群组在积极向领先群组学习发展经验，但其技术创新远弱于领先群组。落后群组后期应进一步增强其在“追赶效应”上的优势。具体而言，肥料和土地等要素的效率提升应是其工作重心，本文研究结果显示，土地是其“追赶效应”的主要推动力，而肥料则是其“追赶效应”中唯一落后于领先群组的要素。事实上，落后群组的土地等要素呈高产出状态，长期高强度、超负荷利用土地。因此，在落后群组倡导“科学、绿色施肥”，既能提高土地生产

率,维持其土地要素的优势地位,也能提高肥料要素的“追赶效应”。但仍需要指出,落后群组的“技术创新”总体呈现倒退趋势,为此,较为有效的改善路径为加强农业研发与农业新型基础设施建设。研究结果显示,落后群组的农业研发等要素的“前沿面移动”最为滞后。另外,落后群组的技术前沿面倒退的重要影响因素也包括农业能源、碳排放与污染物排放的 TFP 表现欠佳。因此,在环境要素的约束下,在发展经济的同时,落后群组须加强环境友好型农业技术创新。

对于中国而言,在样本期内,农业生产效率较高(无效率值较低),而技术创新相对缓慢,这验证了要素投入仍是现阶段农业经济增长的主要动力,而技术创新等发挥的作用相对有限。对此,本文提出如下政策建议。

第一,当农业能源消费、碳排放与污染物排放等均使用生产端数据核算时,中国农业部门的生产效率的全球排名远低于相关数据均使用消费端数据时的全球排名。根据本文的研究思路,在基于消费侧的核算框架下,所有生产端的消耗与排放应合理分配给产品最终消费国。因此,中国未来应在应对气候谈判与国际合作中致力于改变传统的以生产端为基础的碳排放与污染物排放核算体系,大力倡导构建以消费端为主导的足迹核算框架。

第二,经根源分解,与能源利用足迹、 CO_2 足迹、土地等要素相关的技术水平不变是导致全要素生产率较低的主要原因。因此,中国应当提高农业部门资源与环境友好型技术创新能力,切实发挥绿色技术对经济集约发展以及低碳转型发展的引擎作用。具体而言,农业治理重点在源头,农业部门需要推广新技术,优化农机装备结构,加快推动绿色、智能、复式、高效的农机技术装备的普及,同时兼顾生物质能源开发、使用与推广。此外,政府部门可以通过制定区域性、阶梯性的消费税减免政策引导农村居民的绿色能源利用行为,以减少能源利用足迹进而促进农村能源生产和消费方式变革。治理农业 CO_2 足迹的重点在于过程,应抓住国家实现“双碳”目标的机遇期,依托国家农业科技创新联盟和现代农业产业技术体系,组织开展农业农村减排固碳联合攻关,形成一批综合性技术解决方案,减少农业人均碳足迹、碳强度,补齐农业农村绿色低碳科技短板。此外,应当

优化农业农村减排固碳的监测指标、关键参数、核算方法。统筹中央和地方各级力量，优化不同区域农田、农用地、养殖场等监测点位的设置，推动构建科学布局、分级负责的监测评价体系，开展甲烷、氧化亚氮排放和农田、渔业固碳等定位监测。对于土地要素，影响其生产率的主要是某些自然属性（如土壤、地形、地势、气候）以及科技水平和管理方式，一方面，需要根据土地的适宜性（如宜农、宜林、宜牧等），因地制宜地确定土地合理利用方向，充分发挥不同土地类型的优势，做到地尽其利；另一方面，扩大土地经营规模并采用优良品种与科学管理以实现规模经济，增加单位面积上的人力、财力、物力投入量，实现土地持续增产和高产。

第三，相较于发达国家，中国除机械外的其他要素的生产率仍有提升空间，特别是与劳动力和农业污染物排放相关的要素的生产率。因此，对于中国而言，破解劳动生产率低的难题，可根据农民收入结构的变化，与时俱进地推动户籍、土地等制度改革，通过税收、补贴等形式引导农业富余劳动力转移与土地流转，并且提高农民的科技素养，以尽快补齐现代化农业发展的短板，夯实国民经济的基础；对于与农业污染物排放相关要素的生产率，根据本文的实证结果，中国应该加大在污染物排放末端治理的科技研发与推广力度，加强立法、执法与监督的强制性约束，以绿色生产带动“节能减污降碳”的协同治理，促进农业高质量发展。

领先群组方面，技术创新促进增长，但其内部技术提升有限。领先群组的技术创新水平远高于落后群组，或许正因为如此，其“追赶效应”也较为有限。因此，进一步促进区域经济一体化可能是其破局的良方。相对而言，领先群组不太可能承接落后群组的技术转移，但相近经济体之间的技术扩散可进一步提高其农业部门的全要素生产率。领先群组应实行区域经济一体化，加强区域市场开放，以实现更大范围的规模经济并提升在全球范围内进行贸易的整体动能。在经济全球化的背景下，各经济体应当抓住机遇，发挥其农业部门的比较优势并积极扩大对外贸易（培育农业跨国产业组织）。实现进出口市场多元化，减小因主要贸易对象国经济波动而对本国农业造成的影响；从本国国情出发，实行灵活的贸易政策以调节进出口贸易。

需要指出的是,在本文提出的政策建议中,容易实施的措施包括强化要素管理,如确定土地的合理利用方向,充分发挥不同类型的土地优势或扩大土地经营规模并依托优良品种与科学管理来实现规模经济;重点关注新技术推广,优化农机装备结构,加快绿色、智能、复式、高效的农机技术装备的普及,兼顾生物质能源开发、使用与推广。较难实施的措施是农业自主技术创新,需要高水平的技术人才与研发资金持续投入。最难实施的措施是改变传统的以生产端为基础的碳排放与污染物排放核算体系。因全球尺度的核算涉及利益链广、操作难度大,需要与有不同利益诉求的经济体进行多轮斡旋。此外,在全球化背景下,农业绿色增长仍然需要全球范围的合作与共同努力,鼓励多元利益相关者的参与和合作,以推动农业增长方式的变革。从联合国可持续发展目标SDGs的视角农业实现可持续发展的路径和策略具体如下:第一,减少不平等。研究表明,全球各国的农业全要素生产率与农业要素投入效率存在巨大的差距。例如,发达经济体的农业全要素生产率远高于发展中国家。可能的解决策略包含:落实对发展中国家,特别是最不发达国家的特殊和区别待遇以及取消农业出口补贴。此外,倡导基于消费端核算的资源与环境足迹,有利于各国更公平地分担环境责任。

第二,负责任的消费和生产。消费和生产动能支撑着全球经济增长,但随着城镇化的推进,气候变化和环境污染对全球的消费和生产模式产生了巨大的影响。本文所提出的指标关键在于测算环境压力下各国农业可持续发展的绩效。基于本文的测算结果,在未来的一段时间,全球农业可持续发展的关键在于生产技术创新。此外,还应减少全球物流与供应环节中的粮食损失。

第三,农业绿色生产技术的扩散。农业绿色生产技术在发展中国家的扩散有助于实现SDGs中的无贫穷和零饥饿目标等。根据本文的测算结果,技术扩散对于发展中国家而言,仍然是生产率增加的主要驱动因素。中国应该围绕农业部门的清洁生产开展一批具有前瞻性、战略性、颠覆性的科技攻关项目,建设一批国家科技资源共享服务平台等创新基地平台。

参考文献

- [1] 蔡跃洲、付一夫, 2017,《全要素生产率增长中的技术效应与结构效应——基于中国宏观和产业数据的测算及分解》,《经济研究》第1期。
- [2] 陈诗一, 2010,《中国的绿色工业革命: 基于环境全要素生产率视角的解释(1980–2008)》,《经济研究》第11期。
- [3] 程惠芳、陈超, 2019,《开放经济下知识资本与全要素生产率——国际经验与中国启示》,《经济研究》第10期。
- [4] 程名望、贾晓佳、仇焕广, 2019,《中国经济增长(1978–2015): 灵感还是汗水?》,《经济研究》第7期。
- [5] 付明辉、祁春节, 2016,《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》,《中国农村经济》第12期。
- [6] 黄季焜、解伟、盛誉等, 2022,《全球农业发展趋势及2050年中国农业发展展望》,《中国工程科学》第1期。
- [7] 纪建悦、许瑶、张懿, 2023,《民间投资视角下环境规制对绿色全要素生产率的影响研究》,《中国管理科学》第5期。
- [8] 简泽、徐扬、李玉花、黄莹珊, 2020,《生产率困境的形成与治理机制: 一个新的理论框架》,《管理世界》第1期。
- [9] 林伯强、谭睿鹏, 2019,《中国经济集聚与绿色经济效率》,《经济研究》第2期。
- [10] 鲁晓东、连玉君, 2012,《中国工业企业全要素生产率估计: 1999–2007》,《经济学(季刊)》第2期。
- [11] 邵帅、范美婷、杨莉莉, 2022,《经济结构调整、绿色技术进步与中国低碳转型发展——基于总体技术前沿和空间溢出效应视角的经验考察》,《管理世界》第2期。
- [12] 王兵、宫明丽, 2017,《中国城市水资源系统效率实证研究——基于网络BAM模型的分析》,《产经评论》第5期。
- [13] 王恕立、滕泽伟、刘军, 2015,《中国服务业生产率变动的差异分析——基于区域及行业视角》,《经济研究》第8期。
- [14] 吴伟光、许恒、王凤婷、熊立春, 2023,《“两山”理念的有效载体与实践: 林下经济的经济效应、环境效应及其协同逻辑》,《中国农村经济》第10期。
- [15] 谢玲红、魏国学、毛世平, 2016,《我国公共农业R&D投资变化及其国际比较研究》,《科技进步与对策》第2期。
- [16] 尹朝静、李谷成、范丽霞、高雪, 2016,《气候变化、科技存量与农业生产率增

- 长》,《中国农村经济》第5期。
- [17] 余泳泽、刘大勇、龚宇, 2019,《过犹不及事缓则圆: 地方经济增长目标约束与全要素生产率》,《管理世界》第7期。
- [18] 张涛, 2018,《政策干预和中国农业的增长: 1988-2013年》,《南开经济研究》第5期。
- [19] 张宁, 2022,《碳全要素生产率、低碳技术创新和节能减排效率追赶——来自中国火力发电企业的证据》,《经济研究》第2期。
- [20] Alston J., Pardey P. 2014. "Agriculture in the Global Economy." *Journal of Economic Perspectives* 28(1): 121-146.
- [21] Banker R., Charnes A., Cooper W. 1984. "Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis." *Management Science* 30(9): 1078-1093.
- [22] Basu Susanto, Weil David N. 1998. "Appropriate Technology and Growth." *Quarterly Journal of Economics* 113(4): 1025-54.
- [23] Boussemart Jean-Philippe, Briec Walter, Kerstens Kristiaan, Poutineau Jean-Christophe. 2003. "Luenberger and Malmquist Productivity Indices: Theoretical Comparisons and Empirical Illustration." *Bulletin of Economic Research* 55(4): 391-405.
- [24] Besik Deniz, Nagurney Anna, Dutta Pritha. 2023. "An Integrated Multitiered Supply Chain Network Model of Competing Agricultural Firms and Processing Firms: The Case of Fresh Produce and Quality." *European Journal of Operational Research* 307(1): 364-381.
- [25] Bureau Jean-Christophe, Houssein Guimbard, Sébastien Jean. 2019. "Agricultural Trade Liberalisation in the 21st Century: Has It Done the Business?" *Journal of Agricultural Economics* 70(1): 3-25
- [26] Cassou Steven P., Hamilton Stephen F. 2004. "The Transition from Dirty to Clean Industries: Optimal Fiscal Policy and the Environmental Kuznets Curve." *Journal of Environmental Economics and Management* 48(3): 1050-1077.
- [27] Caves Douglas, Christensen Laurits R., Diewert W. Erwin. 1982. "The Economic Theory of Index Numbers and the Measurement of Input, Output, and Productivity," *Econometrica, Econometric Society* 50(6): 1393-1414.
- [28] Chambers Robert G. 1996. "A New Look at Exact Input, Output, Productivity, and Technical Change Measurement." Department of Agricultural and Resource Economics, The University of Maryland, Working Paper 96-05.
- [29] Cooper W., Pastor J., Borrás F., Aparicio J., Pastor D. 2011. "BAM: A Bounded Adjusted Measure of Efficiency for Use with Bounded Additive Models." *Journal of Productivity Analysis* 35: 85-94.

- [30] Cui Qiang, Li Ye, Lin Jinagjing. 2018. "Pollution Abatement Costs Change Decomposition for Airlines: An Analysis from a Dynamic Perspective." *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 111: 96–107.
- [31] Food and Agriculture Organization. 2015. "Composition of Agricultural Area: 2000–2013."
- [32] Färe Rolf, Grosskopf Shawna, Norris Mary, Zhang Zhangyong. 1994. "Productivity Growth, Technical Progress and Efficiency Change in Industrialized Countries." *The American Economic Review* 84(1): 66–83.
- [33] Gong Binlei. 2018. "Agricultural Reforms and Production in China: Changes in Provincial Production Function and Productivity in 1978–2015." *Journal of Development Economics* 132: 18–31.
- [34] Gong Binlei. 2020. "New Growth Accounting." *American Journal of Agricultural Economics* 102(2): 641–661.
- [35] Hailu Atakelty, Veeman T. 2001. "Non-Parametric Productivity Analysis with Undesirable Outputs An Application to the Canadian Pulp and Paper Industry." *American Journal of Agricultural Economics* 83: 605–616.
- [36] Hicks John. 1932. *The Theory of Wages*. London: Macmillan.
- [37] Huang Jikun, Jun Yang, Xu Zhi, Rozelle Scott, Li Ninghui. 2007. "Agricultural Trade Liberalization and Poverty in China." *China Economic Review* 18: 244–265.
- [38] Hussein K. 2016. "IFAD Research Series 8–Fostering Inclusive Rural Transformation in Fragile States and Situations." Rome: International Fund for Agricultural Development.
- [39] Lanz Bruno, Dietz Simon, Swanson T. 2018. "Global Economic Growth and Agricultural Land Conversion under Uncertain Productivity Improvements in Agriculture." *American Journal of Agricultural Economics* 100(2): 545–569.
- [40] Lucas Robert E. 1988. "On the Mechanics of Economic Development." *Journal of Monetary Economics* 22(1): 3–42.
- [41] Kanemoto K., Moran D., Hertwich E. 2016. "Mapping the Carbon Footprint of Nations." *Environmental Science and Technology* 50(19): 10512–10517.
- [42] Mondiale Banque. 2008. "World Development Report: Agriculture for Development." Washington D.C.: The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank.
- [43] Hassine Nadia Belhaj, Kandil Magda. 2009. "Trade Liberalisation, Agricultural Productivity and Poverty in the Mediterranean Region." *European Review of Agricultural Economics* 36(1): 1–29.
- [44] Nordhaus William D. 2006. "After Kyoto: Alternative Mechanisms to Control Global

- Warming.” *The American Economic Review* 96(2): 31–34.
- [45] Oh Dong-hyun. 2010. “A Metafrontier Approach for Measuring An Environmentally Sensitive Productivity Growth Index.” *Energy Economics* 32(1): 146–157.
- [46] Pastor Jesus T., Lovell C. A., Knox Aparicio Juan. 2020. “Defining A New Graph Inefficiency Measure for the Proportional Directional Distance Function and Introducing A New Malmquist Productivity Index.” *European Journal of Operational Research* 281(1): 222–230.
- [47] Romer Paul M. 1986. “Increasing Returns and Long-Run Growth.” *Journal of Political Economy* 94(5): 1002–1037.
- [48] Sheng Yu, Jiping Ding, Jikun Huang. 2019. “The Relationship between Farm Size and Productivity in Agriculture: Evidence from Maize Production in Northern China.” *American Journal of Agricultural Economics* 101(3): 790–806.
- [49] Smith V. Kerry, Krutilla John V. 1979. “Resource and Environmental Constraints to Growth.” *American Journal of Agricultural Economics* 61(3): 395–408.
- [50] Solow Robert M. 1956. “A Contribution to the Theory of Economic Growth.” *Quarterly Journal of Economics* 70(1): 65–94.
- [51] Sueyoshi T., Goto M. 2012. “Weak and Strong Disposability vs. Natural and Managerial Disposability in DEA Environmental Assessment: Comparison between Japanese Electric Power Industry and Manufacturing Industries.” *Energy Economics* 34(3): 686–699.
- [52] United Nations , 1999, “The World at Six Billion.” New York: Population Division, Department of Economic and Social Affairs, United Nations Secretariat.
- [53] United Nations , 2015, *World Population Prospects: The 2015 Revision*, DVD Edition: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division.
- [54] Wilson John K., Damania Richard. 2005. “Corruption, Political Competition and Environmental Policy.” *Journal of Environmental Economics and Management* 49(3): 516–535.
- [55] Wang H., Pan Chen., Wang Q., Zhou P. 2020. “Assessing Sustainability Performance of Global Supply Chains: An Input-output Modeling Approach.” *European Journal of Operational Research* 285(1): 393–404.
- [56] Zhang Zengkai, Guan Dabo, Wang Ran, Meng Jing, Zheng Heran, Zhu Kunfu, Du Huibin. 2020. “Embodied Carbon Emissions in the Supply Chains of Multinational Enterprises.” *Nature Climate Change* 10: 1096–1101.

(责任编辑: 许雪晨)

segmentation is common in China and has had a significant impact on its economic development, the distortion caused by market segmentation is not yet significant enough to make domestic trade more difficult to conduct than international trade. The spatial gravity model also shows that with the development of the economy, the trade cost of China's domestic trade has significantly decreased compared to China's international trade, indicating that China's domestic trade has achieved relatively greater development from 2003 to 2009. In recent years, China has continuously strengthened the construction of domestic circulation and a unified national market, built a large number of high-speed railways to promote the flow of personnel and other factors, and carried out extensive business environment construction. Therefore, there should be a greater relative reduction in domestic trade costs. We should have more confidence in the current smooth domestic circulation and vigorous development of domestic trade.

Keywords: Domestic Trade; Dual Circulation; Gravity Model; Productivity Paradox

JEL Classification: F10;N70

Agricultural Green Growth Accounting: Three-dimensional Decomposition Based on Multi-regional Input-output Model

CHEN Xiaodong¹ WANG Fang² MIAO Zhuang³

(1.Division of Public Policy, Hong Kong University of Science of Technology;

2. School of Management, Sichuan Agricultural University; 3. School of Economics, Southwestern University of Finance and Economics)

Summary: Clarifying the source of agricultural growth is the premise and foundation of exploring the sustainable development of agriculture. The classic “all-in-one” indicator TFP in the black box is opened in this article by

decomposing it into technology and efficiency components in terms of input/output variables, using growth accounting techniques. The focus of this article is on identifying various pathways through which technology and efficiency affect TFP and figuring out the most effective channel to boost productivity, which is hard to systemically recognize previously. The corresponding empirical approximation to the agricultural production frontier is constructed using selected country-level data while bounded-adjusted linear programming techniques are used to decompose observed country-level agricultural TFP growth into two components in terms of input/output variables: technology and efficiency. Notably, the resource and environment factors (footprints) are also considered as input/output variables estimated using the multi-region input-output model. Also, the ideas of value of environmental resources and externality theory are embodied in the framework. During the sample period across 2000-2014, it is found that leading country group has strongest agricultural productivity growth and global agricultural productivity progressed over time. Besides, the most effective way to boost world agricultural productivity is to promote the performance of technology associated with agricultural energy use and efficiency related to agricultural land.

The productivity growth patterns and its two sources (technology and efficiency), as well as the components of individual variable exhibit measurable gaps, both from regional and temporal perspectives. Indeed, according to our classification, countries clustered into leading one (i.e., Developed, High-income, Urbanized group) are possessed with strongest historical productivity gains across the sample period. On the contrary, countries clustered into lagging one (i.e., Less developed, Lower middle-income and Agriculture-based group) exhibited the weakest productivity growth. Notably, different sources are quantitatively measured. Taking 43 economies across the sample period, both the technology and efficiency contribute to the productivity growth, whereas the effect of efficiency is more significant. In particular, the performance of technology associated with agricultural energy use and efficiency related to agricultural land is prominent. In terms of development level, varied growth patterns of productivity in developed and developing countries are exhibited. Technological progress of agricultural energy use in developed countries promotes most to their

productivity progress, whereas efficiency progress of agricultural land exhibited prominent effects on developing economies. Such analysis can also be applied to other country groups in order to find out the most effective pathways to boost agricultural economy. Temporally, the whole sample period is divided into three sub-periods. Obviously, the agricultural productivity exhibited growing trends over time. Specifically, in the earliest period efficiency promoted productivity whereas the contribution of technology is negative. In the middle period, productivity growth mainly relies on positive efficiency while converse effect of technology impedes the productivity growth. In terms of the latest period, both the technology and efficiency have ameliorated positively to promote the productivity growth.

Keywords: Green Growth Accounting; TFP; Multi-region Input-output Model; Energy and Environmental Footprints

JEL Classification: D24; Q10