

中国小麦绿色全要素生产率时空特征及影响因素

代瑞熙, 许世卫*

(中国农业科学院农业信息研究所, 北京 100081)

摘要: 小麦生产向绿色化转型是保障中国粮食安全以及小麦产业可持续高质量发展的必然要求, 该研究以面源污染和碳排放量作为非期望产出, 使用超效率 SBM-ML 模型测算了 2004—2019 年 15 个省份的小麦绿色全要素生产率, 并使用 Tobit 模型在经济水平、财政投资、资源禀赋、生产条件等 4 个方面, 对小麦绿色全要素生产率的影响因素进行了实证分析。结果表明, 在时间变化上, 小麦绿色全要素生产率在 2004—2019 年间整体处于下降态势, 说明小麦产量提高的同时确实付出了环境破坏的代价, 技术“退步”是导致这一现象的主要原因。在综合考虑现有播种面积和面积变化趋势的情况下, 将样本省份分为三类产区, 其中第二产区(山西、内蒙、湖北等省份)绿色生产效率最高、第三产区(黑龙江、云南、宁夏等省份)次之、第一产区(河北、江苏、安徽等省份)最低, 考虑到第一产区依旧是未来小麦供给的主要区域, 应该尽可能在保障产量的同时, 加快推进第一产区小麦绿色生产转型。在影响因素方面, 小麦总播种面积和人均小麦播种面积对绿色全要素生产率的影响最为显著, 说明可以继续推进小麦播种面积向第一产区集中, 但是对于规模种植户要加大绿色技术培训, 农村固定投资和小麦最低收购价对于小麦绿色全要素生产率均有负面影响, 原因在于这二者的目的在于经济产出和产量提升, 对于环境保护缺乏关注。另外, 技术进步对各项影响因素的响应积极性要明显高于技术效率, 这说明相较于技术研发, 中国小麦产业体系在新技术推广等方面存在更大短板。应当完善中国小麦产业支持保护政策, 在产量充足的情况下, 尽可能考虑环境保护的现实需求。适当扩大休耕补贴覆盖范围, 缓解第一产区生态压力。在进行新技术研发的同时, 要更加侧重于对绿色生产技术的推广宣传作用, 提升农户对绿色生产的认知和技术熟练度。研究结果为准确把握当下小麦绿色生产现状以及未来小麦绿色化转型的政策制定提供一定参考。

关键词: 农业; 模型; 小麦; 绿全要素生产率; 超效率 SBM-ML 指数; 影响因素

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.08.035

中图分类号: F323.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-08-0304-11

代瑞熙, 许世卫. 中国小麦绿色全要素生产率时空特征及影响因素[J]. 农业工程学报, 2022, 38(8): 304-314. doi:

10.11975/j.issn.1002-6819.2022.08.035 <http://www.tcsae.org>

Dai Ruixi, Xu Shiwei. Spatiotemporal characteristics and influencing factors of the green total factor productivity of wheat in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(8): 304-314. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.08.035 <http://www.tcsae.org>

0 引言

小麦作为两大口粮作物之一, 是中国粮食产业乃至国民经济的重要组成部分, 对于保障国家粮食安全, 维护民生稳定有着不可忽视的作用。多年来, 在“中国人的饭碗要牢牢端在自己手中”这一理念的影响下, 小麦产量在过去 20 年间内以年均 1.9% 的速度持续上涨, 并在 2021 年达到历史最高水平 1.37 亿 t, 为保障粮食安全做出了巨大贡献。但是在以粮食数量供给为优先追求的前提下, 小麦的生产过程普遍存在要素过量投入现象, 化肥、农药、水资源等生产资料的投入量远高于世界平均水平^[1-2], 不仅压缩了小麦种植户收益, 还导致了面源污染、土壤有机质含量下降、地下水漏斗区面积扩大等问题, 给资源环境保护带来极大压力^[3], 削弱了粮食可持续生产能力, 为未来粮食安全的有效保障和社会经济的稳

定发展埋下隐患。对此, 很多学者从多方面给出了自身建议, 如完善配方施肥技术、建立休耕补偿制度、建设高标准农田等^[4-6], 虽然实现路径不同, 但是学者们普遍认为, 在转型过程中, 必须优先保障中国作为人口大国的粮食安全问题, 再兼顾考虑农户收入、环境保护等现实约束, 所以要实现粮食产业的高质量发展, 仍然需要在保障生产效率的前提下, 逐步推动生产方式向绿色方向转型, 寻求效率提高与环境保护二者之间的兼容^[7-10], 不过就目前小麦产业的现实状况而言, 在小麦产量连续多年稳居历史高位, 粮食数量安全能够得到一定保障的前提下, 如何实现绿色化转型和高质量发展, 是小麦产业更值得思考的现实问题。

在粮食安全的数量要求以及农业可持续发展的质量要求下, 绿色全要素生产率具有可以兼顾考虑生产效率以及生态保护的优势, 这让诸多学者认为提高绿色全要素生产率是确保农业可持续发展的必由之路。目前学术界关于农业绿色全要素生产率的研究已经浩瀚如烟, 总结来看, 当前对于农业绿色全要素生产率的研究重心主要集中在三个方面, 第一是农业绿色全要素生产率的贡献来源, 将全要素生产率进一步拆解为技术进步和技术

收稿日期: 2022-03-07 修订日期: 2022-04-10

基金项目: 国家现代农业产业技术体系资助项目(CARS-03-46)

作者简介: 代瑞熙, 博士, 研究方向: 农业信息分析与政策。

Email: dai363070751@163.com

*通信作者: 许世卫, 博士, 研究方向: 农业监测预警。

Email: xushiwei@caas.cn

效率，厘清全要素生产率进步的主要驱动力^[11-12]；第二是对农业绿色全要素生产率的时空变化特征的研究，一方面是时间维度上论证绿色全要素生产率水平的进步与否，另一方面是研究空间维度上是否存在省份内部与省份之间的技术收敛性^[13-14]；第三是关于农业绿色全要素生产率的影响因素研究，目的在于通过理论和实证分析各项影响因素与绿色全要素生产率的相关程度，为中国农业的绿色转型路径提供相关建议和参考^[15]。

虽然现有文献对于绿色全要素生产率的研究已经较为全面，但是由于不同学者的研究侧重点不同，所以导致在非期望产出的选取和测量上有多种方式，并不存在统一标准。另外，现有关于农业绿色全要素生产率的研究选取对象都以农业或者粮食等大领域为研究对象，针对具体产业的绿色全要素生产率的研究还较为少见，尤其是小麦产业，目前仅有黄伟华等^[16]以化肥价格为代理变量，分析了环境规制强度对于小麦绿色全要素生产率的促进作用。鉴于此，本文选择以小麦为研究对象，通过梳理小麦生产过程中各个环节污染物的产生，建立较为完善的小麦绿色生产的非期望产出指标，使用超效率 SBM (Slack Based Model) 模型，测算 2004—2019 年中国小麦的绿色全要素生产率，在此基础上，分析小麦绿色全要素生产率变动的影响因素，为日后小麦产业绿色转型的路径选择和政策制定提供一定参考。

1 概念界定与指标选取

1.1 绿色全要素生产率概念界定

绿色全要素生产率是指在绿色理念下生产系统中各项要素的综合生产率，由绿色及全要素生产率两个概念组合而来。绿色生产的概念首先出现在工业领域，是指尽可能在保持原有产出水平的前提下，降低原材料的投入和各项污染物的产出，之后这一观念逐渐扩散到农业领域，在保障农产品产出水平的前提下，尽可能降低各项生产资料的投入以及生产过程中所产生的各项污染和碳排放量。另外，绿色生产强调的是产出品生产过程，其他相关环节并不涉及在内，例如化肥的节约使用，仅研究其在农业生产环节，并不追溯至化肥生产、运输等其余环节。全要素生产率的概念由 Tinbergen^[17]在上世纪五十年代提出，用以衡量生产过程中利用到的所有要素的综合生产率，不过在此概念提出时，绿色生产的理念还未深入人心，产出指标的选取都以期望产出为准，没有考虑生产对环境所带来的负外部性，二十一世纪初期，Byerlee 等^[18]认为从可持续发展的角度出发，也需要加入一些能够衡量生态系统健康程度的指标，并将其与生产效率联系起来，Hailu 等^[19]在对加拿大造纸行业生产效率的实证分析中，首次将不良产出纳入到衡量体系之内，让绿色生产理念与全要素生产率概念得以结合，形成了绿色全要素生产率的概念。绿色全要素生产率与传统的全要素生产率相比，最大的区别就在于产出衡量指标的选定，由原先的单一的经济效益目标，转变为经济效益与生态效益并重的双重目标。

值得一提的是，受 Costanza 等^[20]的生态系统服务价

值理论的影响，有部分学者在衡量农业绿色全要素生产率的过程中，不仅考虑了非期望产出，同时将生态系统服务价值作为正向生态效益考虑在内^[21-22]。但是事实上，Costanza 的理论是用以计算自然界生态系统的服务价值，例如谢高地等^[23]对青藏高原等生态系统服务价值的测算，但是并不适合对稻田、麦地等人为改造的生态系统进行服务价值测算，理由主要有以下两点：第一，稻田、麦地等生态系统是以耕地为基础，在人为改造下形成的，但是如果不进行人为改造，耕地本身依然可以发挥其自身在生态系统中的服务价值，现有的研究方法并无法明确区分耕地原有生态系统服务价值以及人为改造后获得的服务价值；第二，就目前国内较为流行的生态价值评价法都以谢高地等^[24]的理论为基础，但是在该理论中，将美学景观等文化服务也计算在内，但是文化服务所产生的效益应该归属于社会效益，而非生态效益。综上，本文在计算小麦绿色全要素生产率的过程中，对于生态效益的衡量，仅考虑小麦生产过程中对环境产生的各项污染和碳排放量，并不将麦田的生态系统价值考虑在内。

1.2 指标选取

小麦绿色全要素生产率的衡量，需要从产出和投入两个角度选取测度指标，在测算过程中需要同时兼顾到小麦生产过程中的各项投入、经济收益以及对环境带来的负面影响，在借鉴传统全要素生产率测算指标选取的基础上，依据生态农业等相关理论，最终确定产出-投入指标。对于影响因素的选取，在前人研究的基础上^[25-28]，结合本文的研究目的，从经济水平、财政投资、资源禀赋、生产条件等 4 个方面选取影响因素指标。

1) 产出指标，产出指标包括期望产出指标和非期望产出指标。为避免价格因素的影响，期望产出选取小麦历年亩均产量，用以表示小麦生产过程中产生的正向效益。由表 1 可知，非期望产出方面，本文选取化肥、农药造成的面源污染和碳排放量作为小麦生产过程中的生态损耗。其中化肥造成的面源污染，参考刘建霞等^[29]的研究成果，本文设定小麦氮肥利用率为 35%，大气流失率为 7%，土壤流失比例为 49%，地面径流率为 9%；磷肥利用率设定为 15%，土壤残留比例为 70%，大气流失率为 5%，其余为地面径流率；对于农药施用的面源污染核算，现有研究一般都直接计算其环境成本，较为成熟的方法是采用 Leach 等^[30]提出的农药环境核算方法，但是小麦种植中使用农药种类较多，对于有效成分、毒性系数以及接触人群的确定均有较大难度，考虑到计算的可行性，参考杨腾等^[31]的研究，施用农药造成的环境成本平均约为粮食总产值的 1%，在此基础上，本文考虑到不同地区农药施用强度的区别，以 1% 作为均值，赋予各地区相应的计算权重；碳排放量的确定上，首先依据小麦生产过程，确定化肥、农药、机械、灌溉为主要碳源，但是在农药施用环境成本的计算中测算的是农药施用的总成本，为避免重复，碳排放量的测算中将农药剔除，化肥、机械、灌溉的碳排放系数分别参考 West 等^[32]、IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 以及 Dubey 等^[33]的研究成果。

2) 投入指标, 投入指标的选取主要包含劳动力、资本投入与土地 3 个方面, 其中劳动力指标选取每亩用工天数, 反映生产过程中劳动力投入水平; 资本投入方面, 种子是小麦生产的基础, 化肥和农药是小麦增产的主要因素, 同时考虑到机械以及灌溉对于小麦生产效率的提高也有着不可忽视的作用, 并且小麦是中国机械化水平最高和生产用水量最高的农作物, 因此选取种子费用、化肥折纯量、农药费用、机械作业费、排灌费作为代表小麦生产资本投入的各项指标; 土地方面土地投入指标选取土地成本, 包含流转低租金和自营地折租两个部分。

表 1 小麦绿色全要素生产率测算指标选取

Table 1 The selection of wheat green total factor productivity measurement index

指标类别 Indicator category	分项指标 Indicator name	指标内容 Indicator description	单位 Unit
投入指标 Input indicator	劳动力	用工天数	d·667 m ²
		种子费用	元·667 m ²
		化肥折纯量	kg·667 m ²
	资本	农药费用	元·667 m ²
		机械作业费	元·667 m ²
		排灌费	元·667 m ²
产出指标 Output indicator	土地	土地成本	元·667 m ²
	期望产出	小麦产量	kg·667 m ²
	非期望产出	化肥面源污染	kg·667 m ²
		农药面源污染	元·667 m ²
		碳排放量	kg·667 m ²

3) 影响因素指标, 对于小麦绿色全要素生产率影响因素, 本文从经济水平、财政投资、资源禀赋、生产条件等 4 个方面来进行指标挑选。其中经济水平对于绿色全要素生产率的影响可以从两方面论述, 经济发达省份往往在科技、装备、人才等方面更有优势, 会对绿色全要素生产率的提高起到正向促进作用, 但是对于经济过度的追求又可能会对资源环境带来负面影响, 财政投资、资源禀赋和生产条件对绿色全要素生产率的影响与经济水平类似, 都具备双重影响, 强大的政府财力、良好的资源禀赋以及优质的生产条件会在一定程度上提升小麦的生产效率, 但是具备这些条件的地区, 往往又会因为自身优势被规划为粮食主产省, 进而将数量产出作为第一追求目标, 忽视生产过程中的财政负担、过量投入以及资源压力等问题, 综上, 由于数量目标和环境目标这两者在实际操作中的兼容性问题, 会使得各项影响因素对小麦绿色全要素生产率的影响复杂化, 所以为了正确把握现阶段这四方面因素对于小麦绿色全要素生产率的影响方向和程度, 还需要采用计量模型来进行实证分析。

在具体的指标选取上, 经济水平方面选取当地的第一产业增加值, 财政支持力度选取农业农村固定资产投资额以及是否为小麦最低收购价政策执行省份, 资源禀赋选取小麦总播种面积以及受灾面积, 小麦播种面积越大, 说明该省份在小麦生产资源禀赋上相对于其他省份具备一定的比较优势, 受灾面积的大小也能够说明当地气候条件是否更加适合小麦生产, 生产条件选取人均小麦耕地面积和机械总动力两个方面, 其中人均小麦耕地面积

由小麦总播种面积除以乡村人数得来。

2 研究方法数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 超效率 SBM 模型

目前学术界对于生产效率的测算主要有数据包络分析 (Data Envelopment Analysis, DEA) 和随机前沿分析 (Stochastic Frontier Approach, SFA) 两种方法, 其中 DEA 是基于非参数线性规划的计算思想, 对于具体的生产函数形式不做规定, 相比较 SFA 更加简单灵活, 并且由于绿色全要素生产率具有多投入多产出的特点, DEA 相比较 SFA 更能满足计算需求。传统 DEA 模型依据规模报酬的可变与否可以分别选取 CCR 或者 BCC 模型进行测算, 但是这些模型都是径向模型, 在实际生产过程中, 要素投入的比例变化往往会更加符合非径向的特点, 这也会导致效率测算的结果出现偏差, 因此 Tone^[34]提出了基于松弛的效率测度的非径向 SBM 模型, 并且为了解决决策单元效率相近的问题, Tone^[35]还提出了超效率 SBM 模型, 测算思路为当多个决策单元效率为 1 时, 剔除一个决策单元后再进行测算, 从而可以给予不同决策单元间更好的效率区分度。

假定, 有 n 个地区, 地区 i 在年份 t 上的投入集为 \mathbf{x} , 期望产出集为 \mathbf{y}_1 , 非期望产出集为 \mathbf{y}_2 , 那么含有非期望产出的超效率 SBM 模型为:

$$\theta = \min \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\mathbf{x}}{x_{ik}}}{\frac{1}{\mathbf{y}_1 + \mathbf{y}_2} \left(\sum_{r=1}^d \frac{y_r^d}{y_{rk}^d} + \sum_{s=1}^u \frac{y_s^u}{y_{sk}^u} \right)} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{x} = \sum_{j=1, j \neq j_0}^n x_{ij} * \lambda_j + s_1^- \\ \mathbf{y}^d = \mathbf{y}_{rj}^d + s_2^+; \mathbf{y}^u = \mathbf{y}_{sj}^u + s_3^- \\ \lambda_j \geq 0; i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n; r=1, 2, \dots, \mathbf{y}_1; s=1, 2, \dots, \mathbf{y}_2; \end{cases}$$

式中 y^d 表示期望产出矩阵中的元素, y^u 表示非期望产出矩阵中的元素, k 为地区编号, m 为年份编号, r 为期望产出编号, s 为非期望产出编号, λ_j 表示被评估单元的权重系数, s_1^- 、 s_2^+ 、 s_3^- 分别表示投入、期望产出和非期望产出的松弛变量, θ 表示绿色生产效率值, θ 的数值越高, 说明该地区小麦的绿色生产效率水平越高。

2.1.2 Malmquist-Luenberger 指数

因为 DEA 自身计算思想的限制, 超效率 SBM 的测算结果只是反映出来某一时期、某一地区的小麦绿色生产效率, 无法动态地反映出生产效率的变动情况, Malmquist-Luenberger 指数不仅可以解决这一问题, 还可以分析出效率变化来源, 将其拆解为技术进步 TC 和技术效率 EC, 其中技术进步反映前沿面的变动情况, 技术效率反映通过管理方式改革、规模报酬等途径致使决策单元生产效率向前沿面的靠近情况。本文将构建投入导向下, 可变规模报酬的超效率 SBM-ML 指数模型。

假定 D_0^t 为决策单元, 投入产出集分别为 \mathbf{x} 、 \mathbf{y} , 非期望产出集合为 \mathbf{u} , $t+1$ 期生产活动相对于 t 期生产活动的

Malmquist-Luenberger 指数可以表示为：

$$ML_GTFP = \left(\frac{1 + \overline{D}_O^t(x^t, y^t, u^t; g_{y^t}, -g_{u^t})}{1 + \overline{D}_O^t(x^{t+1}, y^{t+1}, u^{t+1}; g_{y^{t+1}}, -g_{u^{t+1}})} * \frac{1 + \overline{D}_O^{t+1}(x^t, y^t, u^t; g_{y^t}, -g_{u^t})}{1 + \overline{D}_O^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, u^{t+1}; g_{y^{t+1}}, -g_{u^{t+1}})} \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中 g_y 和 g_u 分别表示期望产出和非期望产出扩张的方向变量，通过对 (2) 式的分解，可以将 ML_GTFP 进一步分解成为技术进步变化指数和技术效率变化指数。

$$ML_GTFP = \left(\frac{1 + \overline{D}_O^t(x^t, y^t, u^t; g_{y^t}, -g_{u^t})}{1 + \overline{D}_O^t(x^{t+1}, y^{t+1}, u^{t+1}; g_{y^{t+1}}, -g_{u^{t+1}})} \cdot \frac{1 + \overline{D}_O^{t+1}(x^t, y^t, u^t; g_{y^t}, -g_{u^t})}{1 + \overline{D}_O^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, u^{t+1}; g_{y^{t+1}}, -g_{u^{t+1}})} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{1 + \overline{D}_O^t(x^t, y^t, u^t; g_{y^t}, -g_{u^t})}{1 + \overline{D}_O^{t+1}(x^t, y^t, u^t; g_{y^t}, -g_{u^t})} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{1 + \overline{D}_O^{t+1}(x^t, y^t, u^t; g_{y^t}, -g_{u^t})}{1 + \overline{D}_O^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, u^{t+1}; g_{y^{t+1}}, -g_{u^{t+1}})} \right)^{1/2} = \left(\frac{1 + \overline{D}_O^{t+1}(x^t, y^t, u^t; g_{y^t}, -g_{u^t})}{1 + \overline{D}_O^t(x^t, y^t, u^t; g_{y^t}, -g_{u^t})} \cdot \frac{1 + \overline{D}_O^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, u^{t+1}; g_{y^{t+1}}, -g_{u^{t+1}})}{1 + \overline{D}_O^t(x^{t+1}, y^{t+1}, u^{t+1}; g_{y^{t+1}}, -g_{u^{t+1}})} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{1 + \overline{D}_O^{t+1}(x^t, y^t, u^t; g_{y^t}, -g_{u^t})}{1 + \overline{D}_O^t(x^t, y^t, u^t; g_{y^t}, -g_{u^t})} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{1 + \overline{D}_O^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, u^{t+1}; g_{y^{t+1}}, -g_{u^{t+1}})}{1 + \overline{D}_O^t(x^{t+1}, y^{t+1}, u^{t+1}; g_{y^{t+1}}, -g_{u^{t+1}})} \right)^{1/2} = TC \cdot EC \quad (3)$$

式中 TC (Technical Change) 表示技术进步水平，EC (Efficiency Change) 表示技术效率变化情况，两者乘积表示绿色全要素生产率 GTFP (Green Total Factor Productivity)，如果乘积大于 1，说明 GTFP 水平增加，反之，说明 GTFP 水平减少。其中技术效率还可以继续分解成为纯技术效率 PEC (Pure Efficiency Change) 和规模效率 SEC (Scale Efficiency Change)，纯技术效率表示因为管理模式、规章制度等因素导致的效率水平变化，规模效率则表示规模变动下导致的效率水平变化，反映了现有规模和最优规模的差异。

2.1.3 面板 Tobit 模型

对小麦绿色全要素生产率的影响因素进行分析，使用上述模型计算得来的小麦绿色全要素生产率作为被解释变量，解释变量的选取具体可见上文。由于被解释变量均为 0 以上数值，属于受限被解释变量，选用 Tobit 模型来进行估计是合适的，本文使用的样本数据为面板数据，因此最终选定面板 Tobit 模型来进行具体分析，具体模型如下：

$$y_{i,t} = \begin{cases} a + bx_{i,t} + \varepsilon_{i,t}, & \text{if } y_{i,t}^* > 0 \\ 0, & \text{if } y_{i,t}^* \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 $y_{i,t}$ 表示地区 i 在 t 时期的小麦绿色全要素生产率， a 表示计量模型回归方程的截距项， b 表示各项影响因素的回归系数， $x_{i,t}$ 为各项影响因素， $\varepsilon_{i,t}$ 表示随机扰动项， $y_{i,t}^*$ 不可观测，当 $y_{i,t}^* > 0$ 时，采用上式进行回归。

2.2 数据来源与处理

考虑到数据的可获取性，本文采用 2004—2019 年河北、山西、内蒙古等 15 个省份的面板数据，考虑到这 15 个省份在小麦种植规模以及小麦消费市场上的差异，为了对样本区域进行更好的区别分析，依据现实情况和参考前人研究基础^[36]，将 15 个样本省份区分别划分为小麦第一产区、第二产区及第三产区，具体划分结果如表 2 所示。

表 2 样本省份小麦产区划分结果及依据

Table 2 The results and basis of wheat production area classification

产区 Production area	省(区) Province (region)	划分依据 Classification basis
第一产区 The first production area	河北、江苏、安徽、山东、河南	种植面积均在 $2\,000 \times 10^3 \text{hm}^2$ 以上，并且在 2004—2019 年之间，小麦种植面积均呈现上涨趋势
第二产区 The second production area	山西、内蒙、湖北、四川、陕西、甘肃、新疆	种植面积在 $500 \sim 1\,100 \times 10^3 \text{hm}^2$ 左右，并且在 2004—2019 年之间，多数省份的小麦种植面积数量都较为稳定
第三产区 The third production area	黑龙江、云南、宁夏	种植面积在 $500 \times 10^3 \text{hm}^2$ 以下，并且在 2004—2019 年之间，小麦种植面积呈现持续下滑状态

本文所有计量模型所使用数据均来自公开统计数据，其中化肥、农药、机械、灌溉等各项生产资料数据来自于《全国农产品成本收益资料汇编》，小麦播种面积、产量、柴油用量、第一产业增加值、农村固定资产投资额、机械总动力、灌溉面积、受灾面积、价格指数等数据来自《中国统计年鉴》和《中国农村统计年鉴》。对于部分年份下某些省份的数据缺失，例如 2018 年黑龙江省小麦成本收益数据的缺失，选择以相邻年份的均值差分法进行补齐，同时为了避免价格变化对回归结果造成影响，对于每个变量都依据相应的价格指数，以 2004 年为基期进行折算。

3 结果与分析

3.1 小麦绿色全要素生产率时间特性分析

利用 MatLab 软件对小麦绿色全要素生产率进行测算，计算结果如表 3 所示，可以看出，中国小麦绿色全要素生产率整体上经历了“先上涨、后降低、再上涨”3 个阶段。在最开始阶段，中国小麦绿色全要素生产率随时间变化上升，但是上升速率逐年下降，从 2004—2005 年度的 1.233 到 2005—2006 年度的 1.100；然后在第二阶段，在 2006—2014 年之间，中国小麦绿色全要素生产率常年低于 1，在 2009—2010 年度，绿色全要素生产率最低为

0.883, 但是这一阶段中国小麦单产水平不断上涨, 说明在这一时期, 中国小麦生产中存在要素过度投入、以牺牲环境为代价的生产模式; 第三阶段为 2014 年至今, 小麦绿色全要素生产率虽然存在明显的波动变化, 但是常年都稳定在 1 以上, 原因可能在于这一阶段中国绿色生产观念的普及, 在中央一号文件的指示精神下, 2016 年原农业部印发《到 2020 年化肥农药使用量增长行动方案》, 各地也加大了绿色高效、节能环保生产模式的探索和推广力度。

表 3 2004—2019 年中国小麦绿色全要素生产率及分解

Table 3 The wheat green total factor productivity and decomposition in China from 2004 to 2019

年度 Year	绿色全要素 生产率 GTFP	纯技术效率 PEC	规模效率 SEC	技术进步 TC	技术效率 EC
2004—2005	1.233	0.985	1.038	1.206	1.022
2005—2006	1.100	0.981	0.955	1.175	0.936
2006—2007	0.962	1.080	0.970	0.919	1.047
2007—2008	0.914	0.901	1.056	0.961	0.952
2008—2009	0.907	1.068	1.022	0.830	1.092
2009—2010	0.883	1.012	1.040	0.839	1.052
2010—2011	0.950	0.971	0.944	1.037	0.916
2011—2012	0.943	1.055	1.023	0.874	1.080
2012—2013	0.931	1.054	0.957	0.923	1.010
2013—2014	0.945	0.939	0.971	1.036	0.912
2014—2015	1.001	1.013	1.008	0.980	1.021
2015—2016	1.094	0.995	1.124	0.978	1.118
2016—2017	1.001	1.008	0.923	1.075	0.930
2017—2018	1.130	1.253	0.942	0.958	1.180
2018—2019	0.985	0.900	1.090	1.004	0.981
均值 Mean	0.994	1.011	1.003	0.981	1.014

在 2004—2019 年之间, 中国小麦绿色全要素生产率为 0.994, 整体呈下降趋势, 从变化来源上来看, 技术效率均值为 1.014, 其中纯技术效率为 1.011, 规模效率为 1.003, 说明小麦绿色生产水平在不断向最优生产水平靠近, 管理经验提高、制度改善以及规模效应为小麦绿色全要素提供了增长动力。技术进步为 0.981, 是造成小麦绿色全要素生产率下降的主要原因, 可以解释为新技术研发与绿色生产需求的不匹配, 在过去中国粮食安全保障的前提下, 小麦生产的优先目标在于保障产量, 技术进步的路径也以提高产量为首要目标, 如果以产量和绿色双重标准来衡量技术进步, 会导致二者之间的错位现象^[37], 在 2006—2014 年之间, 技术进步均值为 0.924, 2014—2019 年之间, 技术进步均值为 0.998, 说明随着时间推移, 当绿色生产观念普及程度加深时, 新技术研发会更加贴合如今粮食安全与生态保护的双重目标。

3.2 小麦绿色全要素生产率空间特性分析

依据上文中对样本省份的分类, 对各产区小麦绿色全要素生产率进行计算分解, 具体结果如表 4 所示。整体上看, 所有产区都出现不同程度的效率退步现象, 其中第二产区退步最慢, 第一产区退步最快, 原因在于第一产区作为中国小麦最主要的生产区域, 小麦播种面积和产量都占据全国整体的 80% 以上, 单产水平也远高于

其他产区, 虽然在资源禀赋上具备一定优势, 但是在小麦保供上也具有更大责任, 第一产区的小麦生产相比较其他产区更需要考虑小麦的产量问题, 绿色生产只能是保障产量之后的次要目标, 最终导致第一产区小麦绿色全要素生产率相比较其他产区有较大幅度下滑。第三产区绿色全要素生产率均值为 0.985, 主要是因为宁夏均值太低, 在各项生产资料投入量均高于全国平均水平的前提下, 宁夏小麦单产水平仅为全国水平的 60% 左右, 说明相对于其他省份, 宁夏的自然资源禀赋确实不适合小麦生产, 这也说明第三产区小麦播种面积小且绿色全要素生产率下降的主要原因在于资源禀赋限制。

表 4 2004—2019 年各省小麦绿色全要素生产率均值及分解

Table 4 The mean value and decomposition of wheat green total factor productivity of each province from 2004 to 2019

产区 Production area	省(区) Province (region)	绿色全要素生产 率 GTFP	纯技术 效率 PEC	规模 效率 SEC	技术 进步 TC	技术 效率 EC
第一产区 The first production area	河北 Hebei	0.961	1.018	1.003	0.942	1.020
	江苏 Jiangsu	0.994	1.001	1.000	0.992	1.001
	安徽 Anhui	0.955	0.983	1.002	0.970	0.985
	山东 Shandong	0.991	1.005	1.000	0.986	1.005
	河南 Henan	1.019	0.993	1.002	1.024	0.995
	均值 Mean	0.984	1.000	1.001	0.983	1.001
第二产区 The second production area	山西 Shanxi	0.997	0.958	1.016	1.024	0.974
	内蒙古 Inner Mongolia	0.935	0.996	1.000	0.939	0.996
	湖北 Hubei	0.979	1.001	0.994	0.984	0.995
	四川 Sichuan	0.980	0.992	1.006	0.982	0.998
	陕西 Shaanxi	1.025	1.006	1.061	0.961	1.067
	甘肃 Gansu	1.096	1.005	1.076	1.013	1.082
	新疆 Xinjiang	0.941	0.988	1.000	0.953	0.988
	均值 Mean	0.992	0.992	1.021	0.979	1.014
第三产区 The third production area	黑龙江 Heilongjiang	1.009	1.040	0.981	0.988	1.021
	云南 Yunnan	1.068	1.047	0.965	1.057	1.010
	宁夏 Ningxia	0.888	0.952	1.028	0.907	0.979
	均值 Mean	0.985	1.012	0.991	0.982	1.003

对各产区的绿色全要素生产率进行分解, 各产区的技术效率都大于 1, 技术进步都小于 1, 这与全国平均水平类似, 无论在哪个产区, 技术“退步”都是导致小麦绿色全要素生产率下降的主要原因。在技术效率方面, 第一产区和第二产区的规模效率上涨, 第三产区的规模效率下降, 事实上, 在 2004—2019 年之间, 中国小麦播种面积也不断地向单产水平更高的主产省份集中, 这说明过去十余年时间的播种面积调整, 不仅有利于中国小麦产量的提升, 而且由于主产省份有着更适合小麦生产的资源禀赋, 对于中国小麦的绿色生产转型也有一定裨益。在纯技术效率方面, 第三产区纯技术效率获得提高, 第一产区保持不变, 第二产区则出现下降, 可能的原因在于由于第三产区小麦播种面积的下降, 经过筛选之后, 剩余的种植区域相较以前更加适合小麦种植, 而且剩余的小麦种植户也有着更好的管理经验以及技术熟练度, 第一产区相比较第二产区, 户均小麦种植面积

更大，更有动机去采用和学习更优的生产技术，并且在小麦种植形成规模的前提下，种植户之间也更有可能形成技术追赶的条件，第二产区省份的小麦种植户种植面积较小，对于小麦种植技术以及管理经验的改善缺乏动机。

3.3 小麦绿色全要素生产率影响因素分析

3.3.1 小麦绿色全要素生产率影响因素的实证分析

使用 Stata14.0 软件对小麦绿色全要素生产率的影响因素进行实证分析，选取小麦绿色全要素生产率、技术效率和技术进步作为被解释变量，解释变量的选取已在上文中给出，值得说明的是，虽然在上文中将目标省份分为了三类产区，但是在实证分析过程中，考虑到小麦最低收购价执行省份与第一产区省份高度重合，仅湖北省为执行小麦最低收购价的第二产区，其余执行省份均为第一产区，因此为避免多重共线性，本文只选取是否为最低收购价执行区这一指标来反映地区差异。最终得出结果如表 5 所示。

表 5 中国小麦绿色全要素生产率面板 Tobit 回归结果
Table 5 The panel Tobit regression results of wheat green total factor productivity in China

指标 Index	解释变量 Explanatory variables	绿色全要素生产率 GTFP	技术效率 EC	技术进步 TC
经济水平 Economy levels	第一产业增加值	-0.012 (0.058)	0.017 (0.060)	-0.026 (0.030)
	农村固定投资额	-0.976 (0.070)	-0.021 (0.072)	-0.082** (0.036)
财政投资 Financial investments	是否为最低收购价 执行区	-0.073 (0.082)	-0.062 (0.085)	-0.031 (0.043)
	小麦总播种面积	0.122** (0.061)	0.030 (0.063)	0.112*** (0.032)
资源禀赋 Resource endowment	受灾面积	-0.015 (0.038)	0.023 (0.395)	-0.035* (0.020)
	人均小麦播种面积	-0.135** (0.067)	-0.014 (0.070)	-0.134*** (0.035)
生产条件 Production conditions	农机总动力	0.012 (0.078)	-0.033 (0.081)	0.029 (0.041)
	截距项	0.747 (0.407)	0.953** (0.422)	0.762 (0.211)

注：括号内数据为标准差，***表示在 1% 水平显著，**表示在 5% 水平显著，*表示在 10% 水平显著，下同。

Note: The data in brackets are standard deviations, *** means significant at 1% level, ** means significant at 5% level, * means significant at 10% level, the same below.

在经济水平方面，对三项被解释变量的回归结果都不显著，对于绿色全要素生产率和技术进步的回归结果为负值，对技术效率的回归结果为正值，说明经济水平的提高，对于小麦绿色生产技术的研发并没有带来积极影响，并且有可能存在过于追求经济水平而忽视环境保护的发展模式，最终虽然在很大程度上促进了农业经济水平的提高，但是却也造成了不少的环境负面产出，尽管经济发达地区的农户在技术使用熟练度上占据一定优势，但是整体而言，经济发展与绿色环保并未能做到很好的匹配。

在财政投资方面，虽然只有农村固定投资额对技术进步的回归结果显著，但是值得注意的是回归系数均为

负值。可能的原因在于财政投资的目标追求与绿色发展存在一定冲突。以小麦最低收购价为例，中国小麦最低收购价出台的目的在于保障小麦的产出数量，因此为提高农民种粮积极性，设定了政策收购的托底价格。在小麦最低收购价的框架下，对于农民而言，只需要将小麦产量提高，就可以获得最高收益，因此对于绿色生产的考虑不够，上文中第一产区的小麦绿色全要素生产率在三类产区中排名倒数第一，也佐证了这一观点，并且从回归结果来看，农村固定投资也有类似问题，这说明中国财政在农业领域的投入与中国农业绿色转型之间还存在机制上的契合问题。

在资源禀赋方面，小麦总播种面积对小麦绿色全要素生产率的影响系数为 0.122，且在 5% 的水平上显著，并且从技术进步的回归结果来看，可以明显看出驱动力主要来自技术进步。主要原因可能来自于 3 个方面，第一，小麦播种面积大的地区多为主产省份，本身在气候条件、土壤环境等方面就适合小麦生产；第二，播种面积较大的省份之间更容易形成规模效益，并且在考虑社会化服务的情况下，更大的小麦播种面积，也有利于节约生产要素的投入；第三，播种面积较大的省份，对小麦新型生产技术的研发会有所侧重，在大面积加持下，农户采用新技术的单位成本变低，也会更有动机尝试新的技术，并且相比较非第一产区，农户也能够更快地获得更好的技术熟练度。受灾面积对于小麦绿色全要素生产率的影响系数为负值，这与预期相符，但是影响效果并不显著，有可能是因为中国农业基础设施的完善，使得小麦生产对自然灾害有了较好的抵御能力。

在生产条件方面，人均小麦播种面积与小麦绿色全要素生产率之间呈现负相关关系，并且在 5% 的水平上显著，主要驱动力来自于技术进步。这可能的解释在于种植面积更大的规模种植户相比较其他农户而言，小麦种植收入会在家庭收入中占据更高的比例，因此，对新技术的采用导向会更加倾向于产量优先，与绿色生产目标产生背离，并且规模种植户相对于小农户往往会脱离精耕细作的种植模式，其生产方式可能会更加粗放。农机总动力与小麦绿色生产率之间呈现正相关关系，这说明虽然机械的使用会带来二氧化碳排放等负面产出，但是在整体而言，对于小麦绿色全要素生产率仍有正面影响。

另外值得一提的是，就整体而言，各项影响因素对于技术进步影响的显著性要明显大于技术效率，这说明中国小麦产业在技术研发这一环节对于外界因素的响应会更加积极，但是新技术研发完成之后的推广缺乏明显动力，这也是中国现代小麦产业体系仍需补上的短板。

3.3.2 稳健性检验

为了进一步确保实证分析的科学性和稳定性，对上述模型结果进行稳健性检验是有必要的。理论上，小麦绿色全要素生产率是衡量小麦绿色生产效率的综合性指标，受多种要素影响，本文在上文中选取了经济水平、财政投资、资源禀赋和生产条件四方面的影响因素进行实证分析，但是由于现实情况中小麦绿色全要素生产率

的影响因素过于庞杂,不可避免地会出现遗漏变量的问题,因此,为了解决这一问题,同时也为了提升上文模型结果的稳健性,本文使用补充变量法来进行稳健性检验。具体操作方式为在保留上述四类影响因素的同时,在回归模型中再次加入其余有可能对小麦绿色全要素生产率产生影响的变量,将其作为控制变量,来观测原本四类影响因素回归结果的稳定性。新加入解释变量的选取参考前文的研究成果从中筛选得出,主要选取城市化水平、金融环境以及贸易开放程度等 3 个方面^[38-40],其中城市化水平的代理指标为城市人口占当地总人口的比例;金融环境的指标选取分为金融规模和金融效率,其中金融规模指当地存款规模,金融效率指当地存款数与贷款数之比,当存款数越高时,也意味着当地有着更高的放款条件,金融效率也会越高,贸易开放条件指标选取当地的进出口总额和外商直接投资额。在加入上述控制变量之后,依旧使用面板 Tobit 模型进行回归,得出结果如表 6 所示。

对比两个模型的结果,可以看出,在多数影响因素的实证结果上,两个模型基本都保持了一致,说明模型结果具备稳健性,计量回归结果具有一定的可信度。两个模型结果的差距主要表现在第一产业增加值和是否为最低收购价执行区这两个变量上,在添加控制变量的情况下,第一产业增加值对于小麦绿色全要素生产率和技术效率的影响变得更为显著,是否为最低收购价执行区对于技术效率的影响也变为在 1%的水平上显著,原因在于控制变量的增加使得模型的构建更为科学,各要素对被解释变量的影响被剥离地更为细致,并且从回归结果的变动上来看,主要为影响要素显著性的变化,回归结果的方向并无明显变动,这也从侧面说明了模型构建的稳定性。

表 6 中国小麦绿色全要素生产率影响因素稳健性检验

Table 6 The robustness test of wheat green total factor productivity influencing factors in China

指标 Index	解释变量 Explanatory variables	绿色全要素生 产率 GTFP	技术效率 EC	技术进步 TC
经济水平 Economy levels	第一产业增加值	-0.066 *	0.059 *	-0.090
		(0.037)	(0.033)	(0.058)
财政投资 Financial investments	农村固定资产投资额	0.047	0.055	-0.027 **
		(0.031)	(0.041)	(0.012)
	是否为最低收购价 执行区	-0.041	-0.110 ***	-0.049
		(0.040)	(0.040)	(0.057)
资源禀赋 Resource endowment	小麦总播种面积	0.281 **	0.030	0.041 **
		(0.013)	(0.020)	(0.020)
	受灾面积	0.015	0.010	-0.002
		(0.025)	(0.027)	(0.015)
生产条件 Production conditions	人均小麦播种面积	-0.109 *	0.061	-0.101 ***
		(0.061)	(0.546)	(0.032)
	农机总动力	0.039	-0.008	0.031
		(0.042)	(0.022)	(0.027)
	截距项	0.556	0.119	0.672
		(0.402)	(0.603)	(0.432)
	控制变量	是	是	是

4 结论与政策建议

4.1 结论

本文基于中国整体农业绿色转型的大背景下,以小麦产业为例,对 2004—2019 年间中国 15 个省份的小麦绿色全要素生产率进行了测算,并在将其分为第一产区、第二产区和第三产区的基础上,探讨了小麦全要素生产率在时间和空间两个维度上的变化情况,并对其影响因素进行了实证分析,得出主要结论如下。

1) 虽然中国小麦单产在过去十余年时间得到了大幅增长,但是中国小麦绿色全要素生产率却整体呈现下降趋势,说明中国在过去十余年间确实存在要素过量投入以及以牺牲环境为代价换来的粮食足量供应,但是在最近几年,小麦绿色全要素生产率波动上涨,说明中国小麦绿色生产转型已经开展,并取得了一定成效。从绿色全要素率的分解来看,技术“退步”是引起绿色全要素生产率下降的主要原因,这表明中国小麦生产技术的发展路径与小麦生产的绿色转型之间存在矛盾点。

2) 分区域来看,中国小麦绿色全要素生产率在第二产区(山西、内蒙、湖北等省份)最高,第三产区(黑龙江、云南、宁夏等省份)次之,第一产区(河北、江苏、安徽等省份)最低,说明中国小麦第一产区虽然在保障粮食安全上做出了突出贡献,但是对于环境破坏的代价也是最大的。并且由于第一产区的小麦生产条件以及单产水平都远高于其他产区,所以在过去十余年的时间内,小麦种植区域不断向第一产区集中,并且这一趋势还在持续,为降低第一产区生态压力,应该尽快将单一产量的目标追求,转变为产量供给与环境保护有机结合的双重目标。

3) 从影响因素上来看,小麦总播种面积和人均小麦播种面积对小麦全要素生产率的影响最为显著,但是影响方向相反,应该继续保持小麦播种面积向第一产区集中的趋势,但同时要注意加大对小麦第一产区的规模种植户绿色生产技术的推广和绿色生产理念的宣传力度。财政支持力度对于小麦绿色全要素生产率的影响为负相关,这说明中国目前的财政投入虽然对小麦生产起到了一定贡献,但是主要以产量为优先目标,对于环境保护这一维度缺乏考量。

4.2 政策建议

针对以上结论,本文提出以下政策建议:

第一,完善中国小麦产业支持保护政策,在稳住产量的同时,要注重对生态保护层面的激励作用。从上文中的回归结果来看,最低收购价作为目前我国小麦产业支持政策体系的核心政策,对于小麦绿色全要素生产率的提升却起到了负面作用,原因在于最低收购价的执行目的在于稳定农户种粮收益,确保农户种粮积极性,对于农户的激励作用更多在于增产效应,同理,种粮直补、农机购置补贴等配套政策对于农户的作用也都集中在增收效果,缺乏绿色生产方面的激励作用。为实现下一阶段小麦绿色化转型,应该积极探索将生态保护补偿机制纳入支持政策体系之中,可以考虑在审批环节,对于绿色化肥、农药等产品的申报给予一定侧重,同时探索制

定绿色生产补贴政策, 对农户绿色生产技术的应用给予一定支持, 平衡农户的生产投入决策, 提高农户绿色生产的主观能动性。

第二, 考虑适当扩大第一产区休耕补贴制度覆盖范围, 落实“藏粮于地”战略。从地区间对比的结果来看, 第一产区作为小麦生产的主战场, 但是绿色全要素生产率在三个产区中最低, 说明第一产区在完成生产任务的同时, 还承担了极大的环保压力, 目前, 中国小麦产量处于历史最高水平, 已经形成推动第一产区小麦产业绿色转型的有利条件, 并且考虑到现实情况, 在未来第一产区还将继续承担小麦生产的主要任务, 维持第一产区小麦的可持续生产能力势在必行。可以综合考虑当年小麦产量、储备、贸易条件、市场需求等多方面因素, 制定科学的休耕面积确定机制, 划定来年休耕面积, 并尽可能将休耕份额优先给予第一产区。

第三, 应该更加注重小麦绿色技术的研究、宣传、培训和推广。从绿色全要素生产率的分解结果来看, 因为技术需求与供给不匹配导致的技术“退步”问题是导致小麦绿色全要素生产率降低的主要原因, 因此应该引导科研部门在研究方向上尽可能由提高产量这一目标转为产量和质量兼而有之, 在绿色肥料、节水灌溉等绿色生产技术研发上增加投入, 提升小麦绿色生产的技术需求与科研部门技术研发方向的匹配程度。另外, 针对技术效率提升缺乏动力这一问题, 还应充分利用基层农技部门和地方专业种植户, 对普通农户形成点对点、点对面的技术培训网络, 在提升农户绿色技术熟练度的同时, 还可完成对农户绿色生产理念的培养。

[参 考 文 献]

- [1] 李雪, 顾莉丽, 李瑞. 我国粮食主产区粮食生产生态效率评价研究[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(2): 205-213.
Li Xue, Gu Lili, Li Rui. Evaluation of the ecological efficiency of grain production in my country's main grain producing areas[J]. Chinese Journal of Agricultural Machinery, 2022, 43(2): 205-213. (in Chinese with English abstract)
- [2] 郭小夏, 刘洪涛, 沈镭, 等. 新时期我国粮食生产安全保障应秉持底线思维[J]. 环境与可持续发展, 2020, 45(5): 88-91.
Guo Xiaoxia, Liu Hongtao, Shen Lei, et al. my country's grain production security in the new era should adhere to the bottom line thinking[J]. Environment and Sustainable Development, 2020, 45(5): 88-91. (in Chinese with English abstract)
- [3] 陈先鹏, 方恺, 吴次芳, 等. 2009—2015年中国耕地资源利用时空格局变化研究: 基于粮食安全与生态安全双重视角[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3): 291-296,306,315.
Chen Xianpeng, Fang Kai, Wu Cifang, et al. Research on the temporal and spatial pattern change of China's cultivated land resource utilization from 2009 to 2015: Based on the dual perspectives of food security and ecological security[J]. Soil and Water Conservation Bulletin, 2019, 39(3): 291-296,306,315. (in Chinese with English abstract)
- [4] 刘钦普, 濮励杰. 中国粮食主产区化肥施用时空特征及生态经济合理性分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 142-150.
Liu Qinpu, Pu Lijie. Temporal and spatial characteristics of chemical fertilizer application in China's main grain producing areas and analysis of ecological and economic rationality[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(23): 142-150. (in Chinese with English abstract)
- [5] 韩思雨, 张路, 陈亚杰. 粮食安全与生态安全双约束下江苏省耕地休耕规模探讨[J]. 农业工程学报, 2021, 37(23): 247-255.
Han Siyu, Zhang Lu, Chen Yajie. Discussion on the fallow scale of cultivated land in Jiangsu Province under the dual constraints of food security and ecological security[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(23): 247-255. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王珂, 李玲, 黎鹏. 基于生态安全和粮食安全的高标准农田建设研究[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(6): 706-713.
Wang Ke, Li Ling, Li Peng. Research on high-standard farmland construction based on ecological security and food security[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(6): 706-713. (in Chinese with English abstract)
- [7] 刘利花, 张丙昕, 刘向华. 粮食安全与生态安全双视角下中国省域耕地保护补偿研究[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 252-263.
Liu Lihua, Zhang Bingxin, Liu Xianghua. Research on China's provincial cultivated land protection compensation from the perspective of food security and ecological security[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(19): 252-263. (in Chinese with English abstract)
- [8] 汪成, 高红贵. 粮食安全背景下农业生态安全与绿色发展: 以湖北省为例[J]. 生态经济, 2017, 33(4): 107-109, 114.
Wang Cheng, Gao Honggui. Agricultural ecological security and green development under the background of food security: Taking Hubei Province as an example[J]. Ecological Economy, 2017, 33(4): 107-109, 114. (in Chinese with English abstract)
- [9] 何玲, 贾启建, 李超, 等. 基于生态系统服务价值与粮食安全的生态安全底线核算[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 215-224.
He Ling, Jia Qijian, Li Chao, et al. Ecological security

- bottom line accounting based on ecosystem service value and food security[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(1): 215-224. (in Chinese with English abstract)
- [10] 梁鑫源, 金晓斌, 孙瑞, 等. 多情景粮食安全底线约束下的中国耕地保护弹性空间[J]. *地理学报*, 2022, 77(3): 697-713.
Liang Xinyuan, Jin Xiaobin, Sun Rui, et al. The elastic space of China's cultivated land protection under the constraints of multi-scenario food security bottom line[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(3): 697-713. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王奇, 王会, 陈海丹. 中国农业绿色全要素生产率变化研究: 1992—2010 年[J]. *经济评论*, 2012(5): 24-33.
Wang Qi, Wang Hui, Chen Haidan. Research on the change of green total factor productivity in China's agriculture: 1992 — 2010[J]. *Economic Review*, 2012(5): 24-33. (in Chinese with English abstract)
- [12] 梁俊, 龙少波. 农业绿色全要素生产率增长及其影响因素[J]. *华南农业大学学报(社会科学版)*, 2015, 14(3): 1-12.
Liang Jun, Long Shaobo. Agricultural green total factor productivity growth and its influencing factors[J]. *Journal of South China Agricultural University(Social Science Edition)*, 2015, 14(3): 1-12. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李朝林, 符田风, 王利. 中国农业绿色全要素生产率的测度及其影响因素研究[J]. *淮南师范学院学报*, 2018, 20(3): 30-36, 71.
Li Chaolin, Fu Tianfeng, Wang Li. The measurement and influencing factors of China's agricultural green total factor productivity[J]. *Journal of Huainan Normal University*, 2018, 20(3): 30-36, 71. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李文华, 郭丰, 陈永强. 中国区域农业绿色全要素生产率分解及收敛性分析[J]. *重庆工商大学学报: 社会科学版*, 2019, 36(2): 29-39.
Li Wenhua, Guo Feng, Chen Yongqiang. Decomposition and convergence analysis of regional agricultural green total factor productivity in China[J]. *Journal of Chongqing Technology and Business University Social Science Edition*, 2019, 36(2): 29-39. (in Chinese with English abstract)
- [15] 郭永奇, 侯林岐. 中国粮食主产区粮食农业绿色全要素生产率测度及影响因素研究[J]. *科技管理研究*, 2020, 40(19): 223-229.
Guo Yongqi, Hou Linqi. Research on the measurement and influencing factors of green total factor productivity of food agriculture in China's main grain producing area[J]. *Science and Technology Management Research*, 2020, 40(19): 223-229. (in Chinese with English abstract)
- [16] 黄伟华, 祁春节, 方国柱, 等. 农业环境规制促进了小麦绿色全要素生产率的提升吗?[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(2): 459-471.
Huang Weihua, Qi Chunjie, Fang Guozhu, et al. Does agricultural environmental regulation promote the improvement of green total factor productivity of wheat?[J]. *Resources and Environment in the Yangtze River Basin*, 2021, 30(2): 459-471. (in Chinese with English abstract)
- [17] Tinbergen J. On the theory of long-term economic growth[J]. *Weltwirtschaftliches Archiv*, 1942, 55: 511-549.
- [18] Byerlee D, Murgai R. Sense and sustainability revisited: The limits of total factor productivity measures of sustainable agricultural systems[J]. *Agricultural Economics*, 2001, 26: 227-236.
- [19] Hailu A, Terrence S V. Non-parametric productivity analysis with undesirable outputs: An application to the Canadian pulp and paper industry[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 2001, 83(3):605-616.
- [20] Costanza R, Arge R, Groot R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387(15):253-260.
- [21] 周应恒, 杨宗之. 生态价值视角下中国省域粮食绿色全要素生产率时空特征分析[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(10): 1786-1799.
Zhou Yingheng, Yang Zongzhi. Analysis on the spatiotemporal characteristics of green total factor productivity of grain in China from the perspective of ecological value[J]. *Chinese Journal of Ecological Agriculture(Chinese and English)*, 2021, 29(10): 1786-1799. (in Chinese with English abstract)
- [22] 罗海平, 朱勤勤, 潘柳欣, 等. 粮食主产区农田生态系统服务价值动态演化与空间分异[J]. *统计与决策*, 2020, 36(4): 49-52.
Luo Haiping, Zhu Qinqin, Pan Liuxin, et al. Dynamic evolution and spatial differentiation of farmland ecosystem service value in the main grain producing area[J]. *Statistics and Decision Making*, 2020, 36(4): 49-52. (in Chinese with English abstract)
- [23] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. *自然资源学报*, 2003(2): 189-196.
Xie Gaodi, Lu Chunxia, Leng Yunfa, et al. The value assessment of ecological assets on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2003(2): 189-196. (in Chinese with English abstract)
- [24] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243-1254.
Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, et al. Improvement of ecosystem service valuation method based on equivalent factor of unit area value[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243-1254. (in Chinese with English abstract)

- abstract)
- [25] 安博文, 李春玉, 侯震梅. 农业全要素生产率影响因素分析: 来自新疆 81 个县域的经验数据[J]. 内蒙古农业大学学报(社会科学版), 2021, 23(5): 28-35.
An Bowen, Li Chunyu, Hou Zhenmei. Analysis of influencing factors of agricultural total factor productivity: Experience data from 81 counties in Xinjiang[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Social Science Edition), 2021, 23(5): 28-35. (in Chinese with English abstract)
- [26] 尚杰, 许雅茹. 生态资本与农业绿色全要素生产率: 基于碳强度视角[J]. 生态经济, 2020, 36(6): 107-111, 123.
Shang Jie, Xu Yaru. Ecological capital and agricultural green total factor productivity: Based on the perspective of carbon intensity[J]. Ecological Economy, 2020, 36(6): 107-111, 123. (in Chinese with English abstract)
- [27] 李欠男, 李谷成, 尹朝静, 等. 河北省县域农业绿色全要素生产率的空间特征[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(7): 845-852.
Li Qiannan, Li Gucheng, Yin Chaojing, et al. Spatial characteristics of green total factor productivity in county-level agriculture in Hebei Province[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(7): 845-852. (in Chinese with English abstract)
- [28] 刘涛, 李继霞. 中国林业绿色全要素生产率时空分异及其影响因素[J]. 世界林业研究, 2020, 33(6): 56-61.
Liu Tao, Li Jixia. Temporal and spatial differentiation of green total factor productivity in China's forestry and its influencing factors[J]. World Forestry Research, 2020, 33(6): 56-61. (in Chinese with English abstract)
- [29] 刘建霞, 徐卫华, 黄璜, 等. 中国夏秋粮生产化肥施用环境成本估算[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(6): 225-232.
Liu Jianxia, Xu Weihua, Huang Huang, et al. Estimation of environmental costs of fertilizer application in China's summer and autumn grain production[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(6): 225-232. (in Chinese with English abstract)
- [30] Leach A W, Mumford J D. Pesticide environmental accounting: A method for assessing the external costs of individual pesticide applications[J]. Environmental Pollution, 2008, 151(1): 139-147.
- [31] 杨腾, 孙艳华. 中国稻田生态系统服务净价值评估[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(3): 159-172.
Yang Teng, Sun Yanhua. Assessment of the net value of rice field ecosystem services in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(3): 159-172. (in Chinese with English abstract)
- [32] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2002, 91(1/2/3): 217-232.
- [33] Dubey A, Lal R. Carbon footprint and sustainability of agricultural production systems in Punjab, India, and Ohio, USA[J]. Journal of Crop Improvement, 2009, 23(4): 332-350.
- [34] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001(3): 498-509.
- [35] Tone K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2002(1): 32-41.
- [36] 高鸣, 宋洪远. 粮食生产技术效率的空间收敛及功能区差异: 兼论技术扩散的空间涟漪效应[J]. 管理世界, 2014(7): 83-92.
Gao Ming, Song Hongyuan. Spatial convergence of technical efficiency of grain production and differences in functional areas: Also on the spatial ripple effect of technological diffusion[J]. Management World, 2014(7): 83-92. (in Chinese with English abstract)
- [37] 王欢, 穆月英, 侯玲玲. 玉米生产环境成本及全要素生产率的时空研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(7): 1204-1216.
Wang Huan, Mu Yueying, Hou Lingling. A Spatio-temporal study on environmental cost and total factor productivity of corn production[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(7): 1204-1216. (in Chinese with English abstract)
- [38] 刘战伟. 新型城镇化提升了中国农业绿色全要素生产率吗? 基于空间溢出效应及门槛特征[J]. 科技管理研究, 2021, 41(12): 201-208.
Liu Zhanwei. Has new urbanization improved China's agricultural green total factor productivity? Based on spatial spillover effect and threshold characteristics[J]. Science and Technology Management Research, 2021, 41(12): 201-208. (in Chinese with English abstract)
- [39] 张翱翔, 邓荣荣. 数字普惠金融对农业绿色全要素生产率的影响及空间溢出效应[J]. 武汉金融, 2022(1): 65-74.
Zhang Aoxiang, Deng Rongrong. The Impact of digital inclusive finance on agricultural green total factor productivity and spatial spillover effect[J]. Wuhan Finance, 2022(1): 65-74. (in Chinese with English abstract)
- [40] 陈燕翎, 庄佩芬, 彭建平. 贸易开放对农业经济高质量发展的影响: 基于农业绿色全要素生产率的视角[J]. 生态经济, 2021, 37(12): 105-114.
Chen Yanling, Zhuang Peifen, Peng Jianping. The impact of trade opening on the high-quality development of agricultural economy: Based on the perspective of agricultural green total factor productivity[J]. Ecological Economy, 2021, 37(12): 105-114. (in Chinese with English abstract)

Spatiotemporal characteristics and influencing factors of the green total factor productivity of wheat in China

Dai Ruixi, Xu Shiwei^{*}

(Agricultural Information Institute, CAAS, Beijing 100081, China)

Abstract: Green transformation can be an inevitable requirement to ensure food security in China, particularly for the sustainable development and high quality of wheat production in recent years. Green Total Factor Productivity (GTFP) has been one of the most important indicators to measure economic and environmental efficiency. It is necessary to accurately evaluate the wheat production for the decision-making on the green transformation. Taking the 15 Provinces in China as the research objects, this study aims to investigate the spatiotemporal characteristics and influencing factors of wheat GTFP from 2004 to 2019 using the Slack-Based Measure (SBM) model with the Malmquist-Luenberger (ML) index. Among them, the non-desired outputs were set as the carbon emissions and the surface source pollution by chemical fertilizers and pesticides. A Panel Tobit model was also selected to empirically analyze the influencing factors of wheat GTFP in four aspects, including economic level, financial investment, resource endowment, and production conditions. The robustness of the model was then tested to add the control variables. The results show that there was an overall declining trend in the wheat GTFP from 2004 to 2019, indicating that the wheat production increased at the expense of environmental damage, due mainly to the technological regression. The 15 Provinces were classified into three categories in the spatial dimension, according to the wheat sown area and trends. The inter-regional comparisons demonstrated that the second production region (Shanxi, Inner Mongolia, Hubei and other provinces) was the most efficient level, the third region (Heilongjiang, Yunnan, Ningxia and other provinces) was the second, and the first region (Hebei, Jiangsu, Anhui and other provinces) was the least. The reason was that the third region was better served as the smallest sown area in wheat production, whereas, and the first region as the main wheat production area presented a higher yield with less consideration for ecological protection. Therefore, it was necessary to accelerate the wheat green production transition in the first region, which still remained the main production region of future wheat supply. In terms of influencing factors, the total wheat sown area and wheat sown area per capita posed the most significant impact on the GTFP, indicating that the wheat sown area was still concentrated in the first production area. However, green technology training increased for large-scale growers in recent years. The rural fixed investment and the minimum purchase price of wheat presented a negative impact on the GTFP, due to the improved yield and economic output with less concern for environmental protection. In addition, the technological progress was significantly more positive than the technological efficiency in response to all influencing factors, indicating a greater lacking of the new technologies promotion in the wheat industry system, compared with new technological research. Therefore, it was a high demand for the decision-making on the wheat industry support and protection in the practical needs of environmental protection under the sufficient yield. The coverage of fallow subsidies should be appropriately expanded to relieve the ecological pressure area in the first production. The promotion of new technologies can greatly contribute to enhancing technical proficiency in green production. The finding can provide a strong reference for the green transformation of wheat production.

Keywords: agriculture; models; wheat; green total factor productivity; super-efficient SBM-ML index; influence factors