

# 减排增汇目标下中国粮食生产效率的测度及分布动态演进

杨 骞<sup>1</sup>, 司祥慧<sup>2</sup>, 王 珏<sup>2</sup>

(1. 山东财经大学经济学院, 济南 250014; 2. 山东财经大学公共管理学院, 济南 250014)

**摘要:** 考虑粮食生产中的净碳汇和面源污染排放, 构建全局 EBM 模型测算 2001—2018 年中国 30 个省份及三大功能区的粮食生产效率, 借助分布动态模型考察中国粮食生产效率的动态演进趋势。研究发现: (1) 中国粮食生产效率总体水平不高, 样本期间呈现先降低后增长的态势, 主产区粮食生产效率高于主销区和产销平衡区。(2) 三大功能区粮食生产效率的分布动态存在差异, 主产区由“多级分化”趋向于“两级分化”, 地区差距逐渐缩小; 主销区分化程度有所加剧; 产销平衡区“多级分化”逐渐加强。(3) 中国粮食生产效率总体上存在向中高水平聚集的趋势。相比高效率省份分布流动性较强, 低效率省份存在明显的“贫困陷阱”, 粮食低水平发展的恶性循环不易突破。

**关键词:** 碳中和; 粮食生产效率; EBM 模型; 核密度估计; 马尔科夫链

习近平总书记强调, 农业基础地位任何时候都不能忽视和削弱, 手中有粮、心中不慌在任何时候都是真理。稳定粮食生产对保障人民群众基本生活、稳固经济社会发展大局、支撑全面实施乡村振兴至关重要。党和国家高度重视粮食安全问题, 2020 年中央农村工作会议指出, 牢牢把住粮食安全主动权, 年年抓紧粮食生产; 2021 年“中央一号文件”提出, 稳定粮食产量, 提升粮食和重要农产品供给保障能力。2020 年我国粮食生产喜获“十七连丰”, 粮食产量连续 6 年在 1.3 万亿斤以上, 保持了稳中有进、稳中向好的势头。然而长期以来, 粮食总需求呈刚性增长, 工业化、城镇化发展和农业生产用地矛盾不断加剧, 资源环境约束日益强化等诸多因素使得粮食生产能力逐渐接近极限, 粮食总产量的“天花板”逐渐显现<sup>[1]</sup>, 对保障我国粮食安全构成潜在威胁。中国粮食生产面临着农业资源稀缺和环境恶化的双重约束<sup>[2]</sup>, 依赖增加要素投入提高粮食产量的空间越来越小<sup>[3-5]</sup>。实现粮食产量稳步提升, 必须由原来依靠要素投入的粗放型生产方式转变为依靠优化资源配置的集约型生产方式。因此, 提高粮食生产效率成为增强粮食生产能力、保障国家粮食安全的根本途径。

农业经济快速发展是以资源过度消耗、面源污染严重、生态环境恶化等为代价的<sup>[6-9]</sup>。第二次全国污染普查公报显示, 农业总化学需氧量 (COD)、总氮 (TN) 和总磷 (TP) 排放量分别为 1067.13 万 t、141.49 万 t 和 21.20 万 t, 分别占总排放量的 49.77%、46.52% 和 67.21%, 表明农业已经成为整个 COD、TN 和 TP 排放的主要来源。农业发展已不能再局限于单纯地追求产量的增加, 还必须充分考虑资源环境的承载力, 注重农业经济与环境质

收稿日期: 2021-05-24; 修订日期: 2021-08-08

基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2019MG029); 山东省高等学校青创科技支持计划 (2020RWE001)

作者简介: 杨骞 (1983-), 女, 山东泗水人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事资源环境经济研究。

E-mail: yangqian4787@sina.com

量的协调性<sup>[10]</sup>。同时, 2020年中国提出的碳达峰、碳中和“30·60”目标, 将成为农业绿色、低碳、循环发展的内生动力。农业作为国民经济的基础产业, 具有碳源和碳汇的双重属性<sup>[11-13]</sup>。已有研究表明农业领域是一个巨大的碳汇, 而不是碳源<sup>[14,15]</sup>。提升农业系统碳汇能力, 对实现碳达峰、碳中和目标具有重要的现实意义。由此可见, 新时期农业发展不仅担负起保障国家粮食安全, 还肩负起改善生态环境、应对气候变化的重要任务。

在此背景下, 运用包含面源污染和净碳汇的数据包络分析方法对中国粮食生产效率进行实证研究, 在科学测度中国粮食生产效率的基础上, 进一步考察中国粮食生产效率分布的动态演进趋势, 不仅有助于正确认识减排增汇目标下中国粮食生产效率的现状, 也可为合理农业发展布局、实现中国粮食生产效率提升、减少农业面源污染、增加农业净碳汇多重目标提供决策依据。

科学评价粮食生产效率一直是农业经济领域的热点问题。从现有学界对于粮食生产效率的测度来看, DEA (Data Envelopment Analysis) 模型作为一种非参数前沿效率分析法, 能够避免误设生产函数的弊端, 在模拟多产出的生产过程方面具有显著优势, 目前已成为测度粮食生产效率的主流方法。如丁文斌等<sup>[16]</sup>采用投入导向的BBC模型测度湖北省粮食生产效率, 发现湖北省粮食生产投入要素运行效率不足。魏丹等<sup>[17]</sup>采用CCR模型测度主产省粮食生产效率, 发现大部分省份均未达到技术有效和规模有效, 投入和产出的结构不合理。杨林等<sup>[18]</sup>运用产出导向的BBC模型考察中国粮食生产效率, 发现增加各要素投入能够有效提高粮食生产总效率。肖红波等<sup>[19]</sup>利用投入导向的BBC模型测度中国粮食生产效率, 发现中国粮食平均综合技术效率不高, 纯技术效率相对偏低。早期学者多采用径向、角度的传统DEA模型, 然而径向模型要求投入产出同比例增长, 角度模型则需要以投入或产出不变为前提假设, 这与实际情况相背离<sup>[20]</sup>。为解决以上问题, 已有学者尝试运用非径向和非角度的SBM (Slacks-Based Measure) 模型, 如曾福生等<sup>[21]</sup>采用非径向SBM模型衡量中国粮食生产效率, 发现农业生产大省和经济较发达地区粮食生产效率较高, 粮食生产非有效地区要素投入存在大量的冗余。陈宝珍等<sup>[22]</sup>运用改进的SBM-DEA模型对中国粮食生产效率进行测算, 发现中国粮食生产效率偏低, 但总体呈缓慢上升趋势, 降低资源消耗和污染排放是改善中国粮食生产效率的主要途径。李思勉等<sup>[23]</sup>运用SBM模型对三大功能区粮食生产效率进行测度, 发现粮食生产效率走势整体基本趋于平稳。然而, SBM模型会损失有效前沿面上投入产出的目标值与实际值之间的原始比例, 导致效率测度偏误的问题<sup>[24,25]</sup>。相比之下, EBM (Epsilon-Based Measure) 模型作为一种混合距离测算方法, 同时兼顾了投入产出的目标值与实际值的径向比及各个投入产出的非径向松弛变量, 能够有效克服上述两种DEA模型的缺陷<sup>[26-29]</sup>, 成为诸多学者测度效率的方法之一。如师傅等<sup>[27]</sup>、李兰冰等<sup>[28]</sup>利用EBM模型分别测度了中国能源效率和中国高技术产业效率。从现有文献看, 采用EBM模型对粮食生产效率进行测度的研究较少。

在投入产出指标选择方面, 目前在投入及期望产出方面的选择较为一致, 研究差异主要体现在非期望产出的选择上。已有研究大多选择粮食生产活动排放的面源污染作为非期望产出, 如闵锐等<sup>[7]</sup>将COD、TN、TP作为非期望产出, 张利国等<sup>[8]</sup>、赵丽平等<sup>[9]</sup>将TN、TP作为非期望产出。部分学者考虑了碳排放的问题, 如李思勉等<sup>[23]</sup>将粮食生产过程中产生的碳排放作为非期望产出。然而随着经济社会绿色低碳发展理念的贯彻落实, 资源环境约束日趋严格, 单独的污染排放指标无法准确、全面地衡量环境污染程度。田旭等<sup>[30]</sup>将粮食生产过程中产生氮、磷、碳的排放量之和作为非期望产出。全面考虑粮食生

产所造成的环境代价,方能体现绿色农业发展的要求。农业生态系统是一个巨大的碳库,如果忽视农业碳汇对环境的改善作用,势必会扭曲粮食绿色生产的效率。因此,在碳排放基础上增加碳吸收,以碳吸收量与碳排放的差额即净碳汇作为期望产出能够体现粮食生产减排增汇作用,这与中国实现碳达峰、碳中和的目标相一致。

从粮食生产效率区域特征来看,由于各地区资源禀赋、经济发展、农业政策等方面的分化日益凸显,中国粮食生产效率存在明显差异性。多数研究从不同区域层面对粮食生产效率值进行比较,得出中国粮食生产效率空间分异特征。乔世军<sup>[31]</sup>对1992—1997年粮食生产效率比较,发现中国粮食生产效率在空间上呈现南高北低的格局。田旭等<sup>[30]</sup>研究发现2004—2012年中国的粮食生产效率地区间差异明显,呈现中部、西部、东部依次递减的趋势。陈宝珍等<sup>[22]</sup>研究发现2006—2015年中国粮食生产效率呈现出东北地区、中部地区、西部地区和东部地区依次递减的趋势。马林静等<sup>[32]</sup>研究发现2001—2012年主产区粮食生产效率最高,其次是主销区、平衡区。谭忠昕等<sup>[33]</sup>对2004—2016年三大功能区粮食生产效率比较,发现主产区、主销区、平衡区粮食生产效率依次递减。在已有的区域划分中,三大功能区担任着建设并固定粮食生产的重要职能,分析功能区粮食生产效率对优化农业生产布局、实行精准化管理具有重要意义。然而,以上研究聚焦于粮食生产效率不同区域的空间特征,缺少对中国粮食生产效率分布动态及演进趋势的实证分析。目前考察分布动态演进的方法主要包括核密度估计(Kernel Density Estimation)和马尔科夫链分析(Markov Chain Analysis)。深入揭示中国粮食生产效率随时间推移的动态分布特征及演变规律,可以为制定与实施差异化的区域农业生产政策提供重要依据<sup>[34]</sup>。

与已有研究相比,本文可能的边际贡献体现如下:第一,科学测算中国粮食生产过程中的碳吸收、碳排放与面源污染排放;第二,构建包含净碳汇和面源污染的全局EBM模型对中国粮食生产效率进行测度,揭示中国分省及粮食主产区、主销区、平衡区三大功能区粮食生产的绿色效率;第三,借助核密度估计和马尔科夫链分布动态模型,对中国粮食生产效率的分布动态及演进趋势进行实证考察。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 研究方法

#### 1.1.1 DEA-EBM模型

假设粮食生产系统有 $k=1, \dots, K$ 个决策单元(Decision Making Unit, DMU),决策单元 $k$ 投入 $I$ 种要素 $x_i$  ( $i=1, \dots, I$ ),生产 $N$ 种期望产出 $y_n$  ( $n=1, \dots, N$ )和 $Z$ 种非期望产出 $b_z$  ( $z=1, \dots, Z$ )。Pastor等<sup>[35]</sup>提出了全局参比方法,能够实现相同决策单元的效率或无效率的跨期可比性,并避免出现无可行解现象。全局参比的粮食生产效率可能性集合PPS(Production Possibilities Set)如下:

$$PPS^T = \left\{ (x', y', b') \mid \begin{cases} \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^K \lambda_j^i x_{ji}^i \leq x_i^i; & \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^K \lambda_j^i y_{jn}^i \geq y_n^i \\ \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^K \lambda_j^i b_{jz}^i \leq b_z^i; & \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^K \lambda_j^i = 1; \lambda \geq 0 \end{cases} \right\} \quad (1)$$

式中:  $(x', y', b')$  表示模型的最优解;  $x_{ji}^i$ 、 $y_{jn}^i$ 、 $b_{jz}^i$  分别表示第 $j$ 个决策单元的第 $i$ 种投入要素、第 $n$ 种期望产出及第 $z$ 种非期望产出,且 $x_i^i$ 、 $y_n^i$ 、 $b_z^i$ 均大于0;  $\lambda_j^i$ 表示权重,增加 $\lambda=1$ 的约束条件表示规模报酬可变(Variable Return-to-Scale, VRS),去除 $\lambda=1$ 的约束

条件则表示规模报酬不变 (Constant Return-to-Scale, CRS)。

本文考虑到某一地区农业自然资源等生产要素不会发生较大变化, 选择 CRS 假设<sup>[36]</sup>。在 CRS 假设下, 全局参比的非期望 EBM 效率测度模型<sup>[24,29]</sup>, 计算公式如下:

$$\begin{aligned} \gamma^* = \min & \frac{\theta - \varepsilon_x \sum_{i=1}^T \sum_{k=1}^I \frac{\omega_i^- s_i^-}{x_{ki}}}{\delta + \varepsilon_y \sum_{n=1}^T \sum_{k=1}^N \frac{\omega_n^+ s_n^+}{y_{kn}} + \varepsilon_b \sum_{z=1}^T \sum_{k=1}^Z \frac{\omega_z^{b-} s_z^{b-}}{b_{kz}}} \\ \text{s.t. } & \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^K \lambda_j^t x_{ji}^t + s_i^- = \theta x_{ki}, i = 1, 2, \dots, I \\ & \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^K \lambda_j^t y_{jn}^t - s_n^+ = \delta y_{kn}, n = 1, 2, \dots, N \\ & \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^K \lambda_j^t b_{jz}^t + s_z^{b-} = \delta b_{kz}, z = 1, 2, \dots, Z \\ & \lambda_k^t \geq 0, s_i^-, s_n^+, s_z^{b-} \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $\gamma^*$  表示规模报酬不变条件下的最佳效率;  $x_{ki}$ 、 $y_{kn}$ 、 $b_{kz}$  分别为第  $k$  个决策单元的第  $i$  种投入要素、第  $n$  种期望产出、第  $z$  种非期望产出;  $s_i^-$ 、 $s_n^+$ 、 $s_z^{b-}$  分别表示第  $i$  种投入要素、第  $n$  种期望产出、第  $z$  种非期望产出的松弛变量;  $\omega_i^-$ 、 $\omega_n^+$ 、 $\omega_z^{b-}$  分别表示投入要素、期望产出、非期望产出的权重;  $\theta$  为径向部分规划参数;  $\delta$  表示产出扩大比例;  $\varepsilon$  表示非径向部分的重要程度,  $\varepsilon \in [0, 1]$ 。当  $\varepsilon=0$  时, EBM 模型转换成径向模型; 当  $\varepsilon=1$  时, EBM 模型转换成 SBM 模型。

### 1.1.2 核密度估计

核密度估计分析方法<sup>[29,37]</sup>是研究空间非均衡分布的重要工具。本文选择已有研究中常用的高斯核函数, 计算公式如下:

$$f(x) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N K\left(\frac{X_i - x}{h}\right) \quad (3)$$

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad (4)$$

式中:  $f(x)$  表示密度估计值;  $K(\cdot)$  为核函数;  $N$  为考察值个数 (个);  $X_i$  为独立同分布的考察值;  $x$  为均值;  $h$  为带宽。

### 1.1.3 马尔科夫链

马尔科夫链分析方法<sup>[37]</sup>通过构造状态转移概率矩阵, 刻画研究对象在样本考察期内的动态演进过程。假定随机过程  $\{X_t, t \in T\}$ , 任一时期的  $T$  以及任意状态  $j$ 、 $i$  以及  $i_n$  ( $n=0, 1, 2, \dots, t-2$ ), 满足式 (5)。  $X$  在  $t$  时期的状态  $j$  的概率分布只取决于  $t-1$  时期的状态  $i$ , 与  $(0, \dots, t-2)$  时期的状态  $(i_0, \dots, i_{t-2})$  无关。

$$P\{X_{(t)}=j|X_{(t-1)}=i, X_{(t-2)}=i_{t-2}, \dots, X_{(0)}=i_0\} = P\{X_{(t)}=j|X_{(t-1)}=i\} = P_{ij} \quad (5)$$

式中:  $P_{ij}$  表示样本考察期内某一省份的粮食生产效率从  $t-1$  时期的  $i$  类型转移到  $t$  时期  $j$  类型的概率;  $n_{ij}$  为粮食生产效率水平由第  $i$  种状态转移到  $j$  种状态发生的次数 (次);  $n_i$  为第  $i$  种粮食生产效率水平状态出现的总次数 (次)。  $P_{ij}$  可利用极大似然估计法求得, 公式如下:

$$P_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i} \quad (6)$$



## 1.2 指标选取与数据来源

### 1.2.1 指标选取

#### (1) 投入指标

① 土地投入：以粮食作物播种面积衡量土地投入。② 劳动投入：以粮食种植业劳动人数衡量劳动投入，由于目前官方统计机构并未公布粮食种植业劳动人数，参照闵锐等<sup>[7]</sup>、杨林等<sup>[18]</sup>、范丽霞<sup>[38]</sup>构建权重系数 $\alpha=(\text{农业产值}/\text{农林牧渔总产值})\times(\text{粮食作物播种面积}/\text{农作物播种总面积})$ ，首先以从广义农业（即农林牧渔业）从业人员中剥离出狭义农业（即种植业）从业人员，以此为基础进一步分离出粮食种植业劳动人数。③ 资本投入：以机械总动力衡量资本投入，参照闵锐等<sup>[7]</sup>、马林静等<sup>[32]</sup>、范丽霞<sup>[38]</sup>构建权重系数 $\beta=(\text{粮食作物播种面积}/\text{农作物播种总面积})$ ，对农业机械总动力进行计算调整，以从狭义农业投入总量中剥离出粮食种植业的资本投入量。④ 农药投入：以农药使用量衡量农药投入，根据权重系数 $\beta$ 进行调整计算出粮食种植业的农药投入。⑤ 化肥投入：以年度实际用于农业生产的化肥施用折纯量衡量化肥投入，根据权重系数 $\beta$ 进行调整计算，包括氮肥、磷肥、钾肥、复合肥的折纯量。⑥ 农膜投入：以农用塑料薄膜使用量衡量农膜投入，根据权重系数 $\beta$ 调整计算出粮食种植业的农膜投入。⑦ 灌溉投入：以农业用水量衡量灌溉投入，根据权重系数 $\beta$ 调整计算出粮食种植业的灌溉投入。

#### (2) 产出指标

① 粮食产量：以农业生产经营者日历年内生产的全部粮食数量作为期望产出。② 净碳汇：以粮食生产活动中产生的碳吸收量与碳排放量的差值即净碳汇作为期望产出。其中，碳排放包括农地利用活动过程以及农作物秸秆露天焚烧产生的碳排放和人工湿地的碳排放<sup>[39,40]</sup>。本文考虑了粮食种植生产过程中直接或间接产生的碳排放，包括化肥、农药、农膜、柴油、灌溉和翻耕六类碳源<sup>[41]</sup>。具体计算公式如下：

$$C = \sum C_i = T_i \times \omega_i \quad (7)$$

式中： $C$ 表示粮食种植业碳排放总量（kg）； $C_i$ 表示各类碳源排放量（kg）； $T_i$ 表示各类碳源量； $\omega_i$ 表示各类碳源排放系数。各类碳源排放系数详见表1。

对于碳汇的测算，主要考虑了粮食作物<sup>①</sup>生长全生命周期的碳吸收量<sup>[11,41-43]</sup>。具体计算公式如下：

$$\sum E_i = \sum \varepsilon_i \times Y_i \times (1 - r) / HI_i \quad (8)$$

式中： $E_i$ 表示各类粮食作物碳吸收量（万t）； $\varepsilon_i$ 表示各类粮食作物碳吸收率； $Y_i$ 表示各类粮食作物经济产量（万t）； $r$ 表示各类粮食作物含水量（%）； $HI_i$ 表示各类粮食作物经济系数。各类粮食作物碳吸收率、含水量及经济系数详见表2。

③ 面源污染：本文主要考虑了化肥造成的面源污染作为非期望产出。面源污染包括农田化肥、畜禽养殖、农田有机固体废物和农村生活产生的COD、TN和TP<sup>[44,45]</sup>。化肥产生的氮磷污染不存在争议，但是其他方面是否被视作污染存在争议<sup>[46]</sup>。在核算过程中，假定所有的化肥投入都会对水环

表1 碳排放系数

Table 1 Carbon emission coefficient

碳排放源	碳排放系数
化肥	0.8956 kg C · kg <sup>-1</sup>
农药	4.9341 kg C · kg <sup>-1</sup>
农膜	5.18 kg C · kg <sup>-1</sup>
柴油	0.5927 kg C · kg <sup>-1</sup>
灌溉	266.48 kg C · hm <sup>-2</sup>
翻耕	312.6 kg C · hm <sup>-2</sup>

注：根据IPCC（2006）发布的碳排放系数整理所得。

① 粮食作物按品种包括稻谷、小麦、玉米、谷子、高粱、薯类和豆类。

境造成潜在污染影响<sup>[44]</sup>。根据化肥折纯的化学成分得到农田化肥类单元产污系数，氮肥、磷肥、复合肥（氮磷钾养分比例为1：1：1）的TN产污系数分别为1、0、0.33，TP产污系数分别为0、0.44、0.15。计算公式如下：TN=氮肥施用量×1×流失率+复合肥施用量×0.33×流失率，TP=磷肥施用量×0.44×流失率+复合肥施用量×0.15×流失率。

1.2.2 数据来源

本文以2001—2018年中国30个省份（不包括西藏、港澳台地区）的粮食种植业投入产出数据为研究样本。第一产业从业人员数据来源于各省统计年鉴，对缺失的2018年新疆第一产业从业人员采用插值法估算；2001—2003年农业用水量数据来源于《中国水资源统计公报》；其余数据均来源于历年的《中国统计年鉴》。表3是对投入产出变量的描述性统计。

2 结果分析

2.1 中国粮食生产效率的测度结果

根据前文构建的EBM模型，测算得到2001—2018年30个省份及三大功能区<sup>②</sup>的粮食生产效率，并按照均值进行排名。部分年份测度结果见表4。

表3 变量描述性统计

Table 3 Descriptive statistics of variables

变量	单位	观测数/个	均值	标准差	最大值	最小值
粮食作物播种面积	千hm <sup>2</sup>	540	3678.566	2885.305	14283.080	55.640
粮食种植业劳动人数	万人	540	352.739	268.611	1480.159	9.411
机械总动力	万kW	540	1967.423	2008.370	9863.674	39.686
农药使用量	万t	540	3.568	2.901	11.641	0.088
化肥施用折纯量	万t	540	120.251	99.617	538.312	3.397
农用塑料薄膜使用量	万t	540	47216.500	43448.287	229174.530	380.645
粮食种植业用水量	亿m <sup>3</sup>	540	79.284	59.644	304.555	2.252
粮食产量	万t	540	1856.103	1553.349	7615.780	34.140
净碳汇	万t	540	1360.501	1285.996	6251.572	24.264
面源污染指数	—	540	0.033	0.006	0.049	0.027

注：根据各省统计年鉴、《中国水资源公报》和《中国统计年鉴》整理计算所得。

② 《国家粮食安全中长期规划纲要（2008—2020年）》，根据各地粮食生产的资源禀赋条件、区域比较优势以及消费特点，将我国30个省份划分为粮食主产区、主销区和平衡区，其中粮食主产区包括河北、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、江苏、安徽、江西、山东、河南、湖北、湖南、四川13个地区；粮食主销区包括北京、天津、上海、浙江、福建、广东、海南7个地区；粮食产销平衡区包括山西、广西、重庆、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆10个地区。

表4 2001—2018年全国及各个省份的粮食生产效率

Table 4 Grain production efficiency of China and its provincial-level regions in 2001-2018

地区	2001年	2004年	2007年	2010年	2013年	2016年	2018年	均值	变化率/%	排名
北京	0.570	0.521	0.591	0.599	0.684	0.681	0.669	0.613	0.945	25
天津	0.653	0.640	0.603	0.617	0.642	0.702	0.878	0.661	1.761	23
河北	0.549	0.553	0.592	0.625	0.706	0.743	0.798	0.640	2.233	24
山西	0.446	0.648	0.535	0.527	0.595	0.607	0.657	0.575	2.307	28
内蒙古	0.899	1.000	0.866	0.828	0.891	0.939	1.000	0.918	0.630	7
辽宁	0.655	0.802	0.751	0.697	0.856	0.844	0.811	0.766	1.267	18
吉林	1.000	1.000	0.868	0.869	0.989	1.000	0.924	0.958	-0.461	3
黑龙江	0.940	0.919	0.855	0.981	1.000	1.000	1.000	0.954	0.362	4
上海	1.000	1.000	0.948	1.000	0.963	0.886	1.000	0.963	0.000	1
江苏	0.847	0.805	0.762	0.749	0.773	0.786	0.831	0.783	-0.117	16
浙江	0.734	0.689	0.667	0.679	0.640	0.644	0.675	0.676	-0.490	21
安徽	0.694	0.678	0.673	0.663	0.723	0.779	0.794	0.711	0.791	20
福建	0.657	0.616	0.595	0.585	0.598	0.592	0.628	0.604	-0.269	26
江西	1.000	0.827	0.798	0.783	0.881	0.881	1.000	0.858	0	11
山东	0.648	0.703	0.726	0.772	0.821	0.884	0.914	0.773	2.045	17
河南	0.791	0.875	0.958	0.882	0.894	0.962	1.000	0.899	1.392	8
湖北	1.000	1.000	0.766	0.741	0.774	0.784	0.818	0.830	-1.177	13
湖南	1.000	0.850	0.816	0.822	0.818	0.836	0.865	0.850	-0.850	12
广东	0.827	0.700	0.697	0.600	0.603	0.628	0.638	0.668	-1.514	22
广西	1.000	0.906	0.836	0.713	0.712	0.653	0.664	0.785	-2.382	15
海南	1.000	0.670	0.503	0.443	0.492	0.528	0.545	0.553	-3.507	29
重庆	1.000	1.000	0.869	0.832	0.864	0.902	1.000	0.898	0	10
四川	0.950	0.988	0.881	0.858	0.849	0.872	0.929	0.898	-0.132	9
贵州	1.000	1.000	0.910	0.855	0.864	0.993	1.000	0.923	0	5
云南	0.681	0.628	0.576	0.529	0.571	0.565	0.633	0.591	-0.427	27
陕西	0.692	0.824	0.788	0.756	0.732	0.757	0.771	0.757	0.641	19
甘肃	0.553	0.548	0.455	0.509	0.566	0.587	0.649	0.549	0.941	30
青海	1.000	0.930	0.961	0.668	0.663	0.704	0.752	0.809	-1.666	14
宁夏	0.913	1.000	0.907	0.826	0.869	0.926	1.000	0.921	0.538	6
新疆	1.000	0.971	0.848	0.960	1.000	0.889	1.000	0.959	0	2
主产区	0.844	0.846	0.793	0.790	0.844	0.870	0.899	0.834	0.370	1
主销区	0.777	0.691	0.658	0.646	0.660	0.666	0.719	0.677	-0.457	3
平衡区	0.828	0.846	0.769	0.718	0.744	0.758	0.813	0.777	-0.114	2
全国	0.823	0.810	0.753	0.732	0.768	0.785	0.828	0.778	0.034	—

注：限于篇幅，没有列出全部年份数据备案。

从全国层面来看，中国粮食生产效率由2001年的0.823上升至2018年的0.828，均值为0.778，平均增长率为0.034%。以上表明，中国粮食生产效率整体水平不高，未达到效率前沿，仍存在22.2%的提升空间。从省际层面来看，样本考察期内30个省份粮食生产效率表现出不同程度的变动趋势。其中，河北、山西、山东等省份粮食生产效率增长幅度较大，平均增长率超过2%；北京、内蒙古、黑龙江、陕西、甘肃、宁夏等地区粮食生

产效率平均增长幅度不足1%；广西、海南等地区粮食生产效率下降幅度较大，平均下降幅度超过2%；吉林、江苏、安徽、福建、湖南、四川、云南等省份粮食生产效率平均下降幅度不足1%。根据粮食生产效率均值排名，上海的粮食生产效率最高（0.963），相较于最优前沿面，上海粮食生产效率仍存在3.7%的提升空间；其次是新疆（0.959）、吉林（0.958）；云南（0.591）、山西（0.575）、海南（0.553）、甘肃（0.549）的粮食生产效率较低，均低于0.6。

图1a是全国及三大功能区粮食生产效率的分时期<sup>③</sup>变动趋势。样本考察期内主产区粮食生产效率均值水平最高，达到0.834，平均变化率为0.370%，高于全国水平；其次是产销平衡区和主销区，粮食生产效率均值分别为0.777和0.677，平均变化率为-0.114%和-0.457%。图1b是全国及三大功能区粮食生产效率的逐年变动趋势。以2011年为拐点，全国及三大功能区粮食生产效率均呈现出先下降后增长的变动趋势。这一现象说明国家在“十二五”期间提倡的建设“两型农业”、减少农业面源污染，以及“十三五”期间推行的化肥农药使用量零增长行动、推动农业向低碳循环方向发展等相关政策措施发挥了积极作用。其中，主产区“十三五”时期粮食生产效率均值水平最高，达到0.883；其次是“十二五”时期和“十五”时期粮食生产效率分别为0.837和0.836；“十一五”时期粮食生产效率最低。主销区及产销平衡区情况类似于主产区，“十一五”时期主销区和产销平衡区粮食生产效率均值水平最低，“十二五”及“十三五”时期有所回升，这说明农业绿色发展取得阶段性成果，但上升速度仍旧较为缓慢。

## 2.2 中国粮食生产效率的分布动态及演进趋势

为了进一步考察中国粮食生产效率分布的流动性及演化特征，本文采用核密度估计法对中国粮食生产效率的分布位置、分布态势、分布延展性等进行探究，同时借助马尔可夫链分析法对中国粮食生产效率的演进趋势进行预测。

### 2.2.1 中国粮食生产效率的分布动态

为了保证核密度估计精度和分布曲线平滑程度，选取2001年、2006年、2011年、

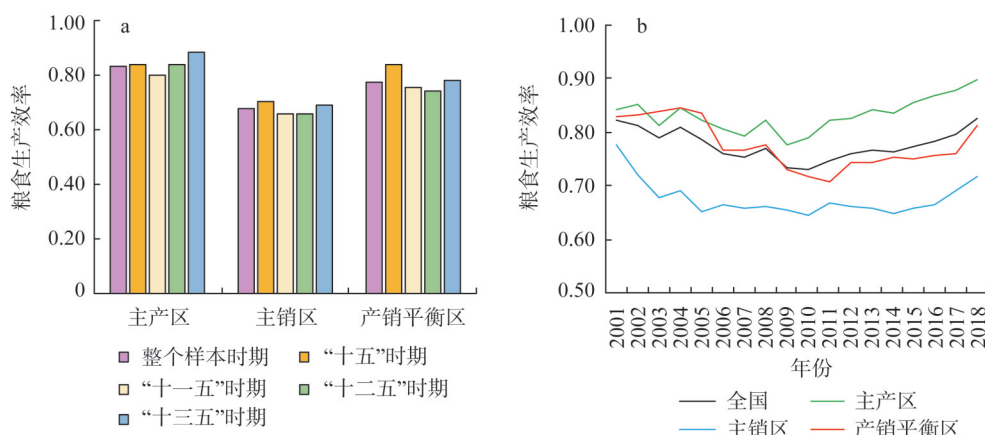


图1 全国及三大功能区粮食生产效率的演变趋势

Fig. 1 Evolution trend of grain production efficiency in China and its three major functional areas

<sup>③</sup> 相关文献的时期划分主观性较强且各不相同。本文参考国家“五年计（规）划”的划分标准，2001—2018年间就包括了第十个“五年计划”到第十三个“五年规划”，即“十五”到“十三五”。受数据限制，未达到“十三五”规划。



2016年、2018年作为观测年份,分析中国粮食生产效率的分布动态。在核密度估计分布图中,分布位置可以呈现粮食生产效率的高低;形状态势可以说明粮食生产效率的极化程度和空间差异情况,其波峰数量反映分化情况,波峰高度和宽度反映差异情况;延展性信息可以分析粮食生产效率的空间差异大小,若其拖尾越长,则表明差异越大。

图2刻画了中国粮食生产效率的分布形态。从核密度的分布位置来看,中国粮食生产效率密度函数中心呈先左后右移动态势,其中,2011年核密度曲线较初始年份大幅左移,而2011年以后逐渐右移。以上说明,2006—2010年间中国粮食生产效率呈下降趋势,2011—2015年间、2016—2018年间则得到一定程度的改善。这一特征与前文测度结果相符。从核密度分布态势来看,中国粮食生产效率密度曲线以“双峰”分布为主,主峰峰值先上升后下降,主峰宽度先变窄后变宽,次峰宽度先变宽后变窄,表明中国粮食生产效率差异有减弱趋势。具体来看,2006年开始出现“高一低”两个波峰,两级分化趋势开始显现;2011年呈双峰分布,且主峰峰值达到最高,分化程度加强,这是由于初期农业现代化发展不平衡不充分问题突出;2016年和2018年均呈现双峰分布,二者高度差距有所减小,说明中国粮食生产效率分化程度逐渐降低,农业现代化发展战略取得长足发展。从核密度的分布延展性来看,中国粮食生产效率密度曲线延展性呈逐年收缩趋势,差异程度有所降低。2001年中国粮食生产效率分布存在拖尾现象,可能原因在于河北、辽宁、安徽、山东等粮食生产大省的生态环境污染严峻致使粮食绿色生产效率降幅较大。

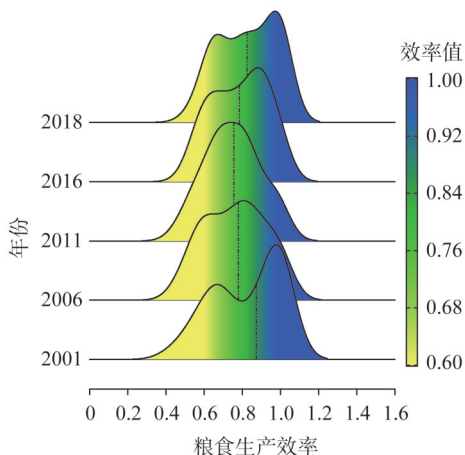


图2 中国粮食生产效率的分布动态

Fig. 2 Distribution dynamics of grain production efficiency in China

图3刻画了三大功能区粮食生产效率的分布形态。根据图3a,相较于2001年,2006年主产区粮食生产效率密度曲线峰值有所降低,分布区间大幅扩大,说明该时期主产区粮食生产效率增长的省份减少;2011年以后主产区粮食生产效率密度函数右移,“多峰”分布逐渐演变为“双峰”分布,分布区间逐渐缩小,说明该时期主产区粮食生产效率增长的省份逐渐增多,地区差距缩小。以上主产区粮食生产效率稳步提升,地区非均衡趋

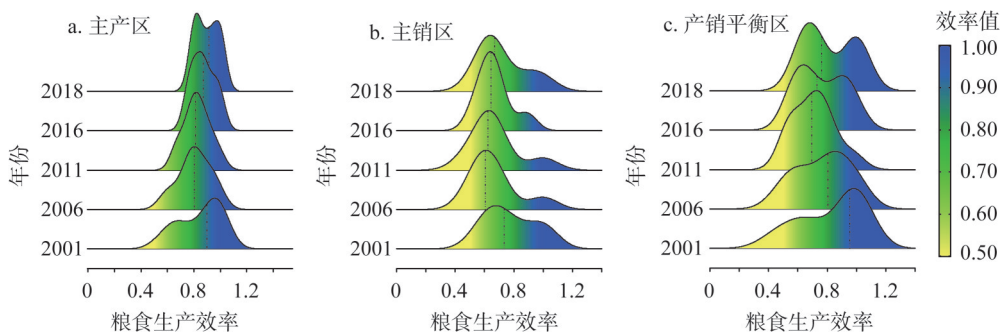


图3 三大功能区粮食生产效率的分布动态

Fig. 3 Distribution dynamics of grain production efficiency in three functional areas of China

势减弱的可能原因在于:一方面,2010年全国粮食主产区农业生产座谈会强调了进一步加大对主产区的支持力度,不断完善均衡性转移支付机制,建立健全对主产区的利益补偿机制,这一利好政策调动了地方抓粮和农民种粮的积极性,导致2011年起主产区粮食生产效率增长的省份逐渐增多;另一方面,“十三五”时期国家为加强生态文明建设、加快转变农业发展方式,打响了农业面源污染防治攻坚战,河北、吉林、江苏、安徽、山东、河南等粮食主产区省份为建设国家级绿色防控示范区,加强化肥农药污染防治工作,促进农业面源污染控制和农业的可持续发展,弥补了产粮大省在绿色效益方面的损失,缩小了主产区粮食生产效率的地区差距。根据图3b,相较于2001年和2011年,2016年主销区粮食生产效率密度函数中心没有明显变动,峰值“一大一小”分布明显,主峰、次峰高度差距加大,分布区间大幅缩小,以上说明该时期主销区粮食生产效率增长的省份减少,但分化程度加强;2018年主销区粮食生产效率密度曲线主峰峰值下降、次峰峰值上升并出现“多峰”分布,说明该时期主销区粮食生产效率地区差距有所缓和,但出现多级分化。以上主销区粮食生产效率分化程度有所加剧的原因,可能是主销区土地等种植资源有限,粮食储备成本太高,导致福建、广东等省份粮食缺口加大,需要依靠外省运粮,客观上形成地区间极化趋势。与此同时,自2008年“米袋子”省长负责制执行以来,没有明确的考核目标,从而加剧了主销区自给率不足和储备水平低等问题,其中,北京、上海等地区粮食生产面积和产量普遍下降,使得粮食生产效率比较不稳定,地区间出现多极分化。根据图3c,相较于2001年和2006年,2011年产销平衡区粮食生产效率密度函数向左移动,峰值增加、峰度宽度变窄并呈“双峰”分布,分布区间大幅缩小,说明该时期产销平衡区粮食生产效率增长的省份减少,甚至部分省份粮食生产效率存在下降,但两极分化程度有所缓解;2016年以后产销平衡区粮食生产效率密度函数逐渐右移,峰值小幅增加并出现“多峰”分布,说明该时期产销平衡区粮食生产效率存在多极分化,地区差距增大。产销平衡区内部粮食生产效率差距逐渐拉大,可能是2015年国家通过《关于打赢脱贫攻坚战的决定》,贵州、广西等地区实施粮仓精准扶贫,粮食产量稳定增收、储备粮规模充足,高效率水平集团显现,而其他地区由于粮食经济效益不高、政策支持不足等原因,为追求经济效益而减压粮食生产,与高效率水平集团间的差距进一步加大。

综上,中国粮食生产效率在大部分年份存在两极分化,但随着时间的推移分化程度有所下降。三大功能区粮食生产效率分布动态具有显著性差异,主产区粮食生产效率由多个均衡点趋向于两个均衡点收敛,地区差距逐渐缩小,在中等水平及高水平方向上聚集明显;主销区粮食生产效率由趋向于两个均衡点收敛向多个均衡点收敛方向转变,分化程度有所加剧,主要在低水平及中等水平方向上聚集;产销平衡区粮食生产效率由趋向于两个均衡点收敛向多个均衡点收敛方向转变,各省份之间粮食生产效率差距有所扩大,存在高效率水平集团。

### 2.2.2 中国粮食生产效率的演进趋势

基于2001—2018年中国粮食生产效率,利用马尔科夫链分析方法,时间跨度 $T$ 设定为1年、2年、3年、4年和5年,并将各省份的粮食生产效率划分为四种类型:低、中低、中高和高水平,测算不同时间跨度下中国粮食生产效率状态转移的概率矩阵,考察中国粮食生产效率转移规律。状态转移概率矩阵主对角线的数值表示粮食生产效率平稳转移的概率,非对角线的数值表示粮食生产效率向上转移或向下转移的概率。测算结果见表5。

根据测算结果,除低水平以外,其他类型省份对角线上的概率值并未明显高于非对角

表5 中国粮食生产效率的马尔科夫链转移概率矩阵

Table 5 Markov chain transfer probability matrix of grain production efficiency in China

时间跨度	类型	低	中低	中高	高
T=1	低	0.831	0.169	0.000	0.000
	中低	0.081	0.721	0.191	0.007
	中高	0.000	0.059	0.684	0.257
	高	0.000	0.029	0.353	0.618
T=2	低	0.820	0.172	0.008	0.000
	中低	0.078	0.688	0.227	0.008
	中高	0.000	0.125	0.625	0.250
	高	0.010	0.063	0.323	0.604
T=3	低	0.800	0.183	0.017	0.000
	中低	0.100	0.642	0.242	0.017
	中高	0.000	0.158	0.575	0.267
	高	0.000	0.056	0.400	0.544
T=4	低	0.750	0.232	0.018	0.000
	中低	0.125	0.607	0.259	0.009
	中高	0.000	0.170	0.527	0.304
	高	0.012	0.071	0.417	0.500
T=5	低	0.731	0.250	0.019	0.000
	中低	0.154	0.558	0.279	0.010
	中高	0.000	0.183	0.490	0.327
	高	0.013	0.128	0.333	0.526

线上的概率值，说明各省份粮食生产效率并不稳定，保持初始状态的概率较小，内部流动性较强。在状态转移概率矩阵中，中国粮食生产效率的状态转移主要趋向于中高水平，其次是中低水平，向低水平和高水平状态转移的概率较小。原因可能在于，初期粮食生产与自然资源禀赋、经济发展水平密切相关，随着农业现代化水平提高，先进生产种植技术能够弥补部分省份先天条件的不足，从而促进较低效率水平省份粮食生产效率的增长。

具体来看，如果初始年份某一省份的粮食生产效率处于低水平，在各类时间跨度条件下保持初始状态的概率均超过 70%，存在明显的“贫困陷阱”。低效率水平省份的自然经济条件以及粮食育种和生产技术都比较落后，从而抑制其粮食生产效率的增长。但随着时间跨度的增大，农业现代化战略逐步推进，粮食生产低效率水平省份平稳转移的概率有所下降，向上转移的概率正逐步增加，低水平发展的恶性循环有所突破。

如果初始年份某一省份的粮食生产效率处于中低水平，一步转移后，该省份继续保持中低水平粮食生产效率的概率为 72.1%，向上转移的概率为 19.8%；当时长为 5 年时，该省份粮食生产效率平稳转移的概率下降至 55.8%，向上转移的概率上升至 44.2%。如果初始年份某一省份的粮食生产效率处于中高水平或高水平，一步转移后，该省份粮食生产效率平稳转移的概率分别为 68.4%和 61.8%，向下转移的概率分别为 31.6%和 38.2%；当时长为 5 年时，该省份粮食生产效率平稳转移的概率分别降至 49%和 52.6%，向下转移的概率升至 51%和 47.4%。可以发现：2001—2018 年处于各粮食生产效率水平的省份都有向中高水平转移趋势，随着时间跨度的增加，这种转移发生的概率正逐渐增大。产生以上转移趋势的可能原因，一是中国粮食生产功能区在地理位置上紧密相连，区域内生



产要素整合和先进技术扩散,促进了生产功能区的共同发展,具体表现为效率水平较高的产粮大省通过其自身的资源优势和技术创新,间接带动周围地区粮食产业发展,形成示范效应和辐射作用;二是2015年以来国家建立健全粮食安全省长负责制,要求各地方人民政府必须承担起保障本地区粮食安全的主体责任,这一制度调动了地方的粮食生产积极性,强化了粮食安全属地责任,使得各地区粮食生产能力建设加强,粮食储备数量增加。因此,按照上述演进规律,中国粮食生产效率存在增长趋同趋势,中高效率水平的省份将成为粮食的生产主体。

### 3 结论与讨论

碳达峰、碳中和战略目标对中国农业绿色低碳发展提出了更高的要求,迫切需要探索农业高质量发展路径。粮食生产是农业工作第一要务,提高粮食生产效率是保障粮食安全、实现农业永续发展的根本动力。本文采用包含净碳汇和面源污染的全局EBM模型对2001—2018年中国30个省份及三大功能区的粮食生产效率进行测算,以此为基础揭示中国粮食生产效率的空间分布,同时结合核密度估计和马尔可夫链分析方法,考察中国粮食生产效率的分布动态及演进趋势。研究结论如下:(1)样本考察期内,中国粮食生产效率总体水平不高,均值为0.778,仍旧存在较大的提升空间。中国粮食生产效率总体呈现先降低后增长的趋势,但部分省份出现负增长情况。(2)中国粮食生产效率空间非均衡性特征明显。上海、新疆、吉林等地区的粮食生产效率较高;云南、山西、海南、甘肃的粮食生产效率较低。从三大粮食功能区来看,大部分年份主产区粮食生产效率高于全国水平,粮食生产效率按照均值由高到低的排名依次为主产区、产销平衡区、主销区。(3)中国粮食生产效率在部分年份存在两级分化现象,但随着时间推移不同省份间粮食生产效率的差距逐渐缩小。三大功能区粮食生产效率分布动态存在显著性差异,主产区由“多极分化”趋向于“两极分化”,地区差距逐渐缩小;主销区分化程度有所加剧;产销平衡区“多极分化”逐渐加强,高效率水平集团显现。(4)中国粮食生产效率在不同时期存在状态转移的可能性,主要趋向于中高水平。相比于高效率水平省份分布流动性较强、持续性较弱,低效率水平省份存在明显的“贫困陷阱”,粮食低水平发展的恶性循环不易突破。

根据本文的研究结果,得出以下政策启示:

第一,进一步加快转变粗放型的粮食生产方式以实现粮食种植业的高质量发展。研究结果表明,中国粮食生产效率总体水平不高,粮食生产发展面临着生产要素使用效率低、配置不合理等问题。“高投入—高产出”的粮食生产模式不仅使得粮食市场竞争力下降,而且导致农业面源污染及农业碳排放问题日趋严峻,农业可持续发展面临挑战。通过促进生产要素变革,提升农业现代化水平,不断提高粮食绿色生产效率,国家的粮食安全及资源环境问题才能得到有效保障与解决。正如习近平总书记强调指出,要推进农业供给侧结构性改革,提高农业综合效益和竞争力。因此,不断落实“藏粮于地、藏粮于技”战略,加大劳动力、农业机械化、农用生产物资等生产要素的变革,推动粮食生产向规模化、集约化、信息化转变,全面提升粮食生产现代化水平。

第二,正确认识三大粮食生产功能区的定位及责任。研究表明,不同粮食功能区的生产效率存在较大差异,各个功能区的粮食生产效率存在较为一致的特征。在粮食生产效率空间非均衡的现实条件下,应着眼于本区域的种植特点和发展能力,实施差异化的



区域农业政策。保持对主产区已有政策支持力度的同时完善利益补偿机制,保障产粮大区的经济效益和良性循环;也要压实主销区和产销平衡区稳定粮食生产责任,确保粮食种植面积不减少、产量不下降,保持应有的自给率,共同维护好国家粮食安全。正如习近平总书记指出,要发挥各地区比较优势,促进生产力布局优化。因此,划定粮食生产功能区,既要突出主产区,发挥其产能优势;也要充分考虑主销区和产销平衡区的粮食生产责任,引导非主产区更好地保护和提升粮食产能。

第三,积极探索地区间粮食生产发展的合作交流机制。研究表明,中国粮食生产效率在不同时期存在状态转移的可能性。粮食生产效率增长趋同趋势是地区粮食生产协同提升的突破口,要注重粮食生产的整体效能,否则“木桶效应”就会愈加显现,部分地区粮食供给压力会不断增大。政府应注重粮食产业发展的空间联动性,增强地区间劳动、资本和农业现代化技术等生产要素的自由流动,建立地区一体化的农业生产要素市场,破除农业生产要素流通的壁垒和地方保护主义的藩篱。正如习近平总书记提出,坚持开放包容,推动联动增长。因此,构建粮食生产协同联动机制,发挥粮食生产效率水平较高地区的辐射带头作用,推动先进生产技术和经验向落后省份扩散,以点带面、串点成线,促进粮食生产效率水平较低地区提质增效,从而实现粮食生产跨地区协同提升。

第四,统筹推进粮食绿色低碳发展助力碳达峰、碳中和。党的十八大以来,农业绿色发展的质量效益和竞争力不断提高,但目前农业绿色低碳发展空间潜力巨大。根据测算数据,中国粮食生产过程中的碳吸收量高于碳排放量,2018年中国粮食生产中净碳汇高达5亿t。为实现“30·60”碳达峰、碳中和目标,中国粮食生产不仅要重视农用生产物资的总氮、总磷和二氧化碳污染排放问题,加快形成节约资源和保护环境的绿色低碳生产方式,而且要积极探索、培育及壮大农业碳减排和碳交易市场,为发展有机农业及碳汇增收创造有利条件。因此,加快完善粮食生产领域碳达峰实施方案、推动落实粮食生产减排固碳各项措施,为实现碳达峰碳中和目标提供更好的支撑和更大的贡献。

### 参考文献(References):

- [1] 陈秧分,王介勇,张凤荣,等.全球化与粮食安全新格局.自然资源学报,2021,36(6):1362-1380. [CHEN Y F, WANG J Y, ZHANG F R, et al. New patterns of globalization and food security. Journal of Natural Resources, 2021, 36(6): 1362-1380.]
- [2] 陈秧分,王介勇.对外开放背景下中国粮食安全形势研判与战略选择.自然资源学报,2021,36(6):1616-1630. [CHEN Y F, WANG J Y, China's food security situation and strategy under the background of opening-up. Journal of Natural Resources, 2021, 36(6): 1616-1630.]
- [3] 杨锦英,韩晓娜,方行明.中国粮食生产效率实证研究.经济学动态,2013,(6):47-53. [YANG J Y, HAN X N, FANG X M. An empirical study on grain production efficiency in China. Economic Perspectives, 2013, (6): 47-53.]
- [4] 刘立涛,刘晓洁,伦飞,等.全球气候变化下的中国粮食安全问题研究.自然资源学报,2018,33(6):927-939. [LIU L T, LIU X J, LUN F, et al. Research on China's food security under global climate change background. Journal of Natural Resources, 2018, 33(6): 927-939.]
- [5] 成升魁,李云云,刘晓洁,等.关于新时代我国粮食安全观的思考.自然资源学报,2018,33(6):911-926. [CHENG S K, LI Y Y, LIU X J, et al. Thoughts on food security in China in the New Period. Journal of Natural Resources, 2018, 33(6): 911-926.]
- [6] 李谷成,范丽霞,闵锐.资源、环境与农业发展的协调性:基于环境规制的省级农业环境效率排名.数量经济技术经济研究,2011,(10):21-36. [LI G C, FAN L X, MIN R. The coordination of agricultural development with environment and resource. The Journal of Quantitative and Technical Economics, 2011, (10): 21-36.]
- [7] 闵锐,李谷成.“两型”视角下我国粮食生产技术效率的空间分异.经济地理,2013,33(3):144-149. [MIN R, LI G C. Grain's production efficiency and its spatial distribution in China from the "two-oriented (resource and environment)" perspective. Economic Geography, 2013, 33(3): 144-149.]

- [8] 张利国, 鲍丙飞. 我国粮食主产区粮食全要素生产率时空演变及驱动因素. 经济地理, 2016, 36(3): 147-152. [ZHANG L G, BAO B F. Empirical analysis on spatio-temporal evolution and driving forces of food total factor production in major grain producing areas of our country. Economic Geography, 2016, 36(3): 147-152.]
- [9] 赵丽平, 王雅鹏, 何可. 我国粮食生产的环境技术效率测度. 华南农业大学学报: 社会科学版, 2016, 15(3): 28-37. [ZHAO L P, WANG Y P, HE K. Measurement and analysis of environmental technology efficiency based on grain production. Journal of South China Agricultural University: Social Science Edition, 2016, 15(3): 28-37.]
- [10] 钱宸, 李凡, 李先德, 等. 基于农户经济和环境“双优”目标的粮食主产区化肥施用优化模拟分析: 以邯郸地区小麦生产为例. 自然资源学报, 2021, 36(6): 1481-1493. [QIAN C, LI F, LI X D, et al. Analysis of fertilizer-use optimization under the joint framework of economic rationality and environmental sustainability: Evidence from wheat farmers in Handan, Hebei province. Journal of Natural Resources, 2021, 36(6): 1481-1493.]
- [11] 田云, 张俊飏. 中国农业生产净碳效应分异研究. 自然资源学报, 2013, 28(8): 1298-1309. [TIAN Y, ZHANG J B. Regional differentiation research on net carbon effect of agricultural production in China. Journal of Natural Resources, 2013, 28(8): 1298-1309.]
- [12] 陈罗辉, 薛领, 雪燕. 中国农业净碳汇空间集聚与分异. 生态环境学报, 2015, 24(11): 1777-1784. [CHEN L Y, XUE L, XUE Y. Spatial agglomeration and variation of China's agricultural net carbon sink. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(11): 1777-1784.]
- [13] 杨果, 陈瑶. 中国农业源碳汇估算及其与农业经济发展的耦合分析. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(12): 171-176. [YANG G, CHEN Y. China's agriculture carbon sink estimation and its coupling analysis with agricultural economy development. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(12): 171-176.]
- [14] 刘允芬. 农业生态系统碳循环研究. 自然资源学报, 1995, 10(1): 1-8. [LIU Y F. A study on carbon cycle in the agro-ecological system of China. Journal of Natural Resources, 1995, 10(1): 1-8.]
- [15] 谢淑娟, 匡耀求, 黄宁生. 中国发展碳汇农业的主要路径与政策建议. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(12): 46-51. [XIE S J, KUANG Y Q, HUANG N S. Main paths and policy proposals for the development of carbon-sinking agriculture in China. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(12): 46-51.]
- [16] 丁文斌, 徐通, 王雅鹏. 粮食主产省粮食生产投入要素效率DEA分析: 基于1990—2004年湖北省投入要素的实证分析. 西北农林科技大学学报: 社会科学版, 2007, 7(4): 56-60. [DING W B, XU T, WANG Y P. DEA method-based efficiency evaluation of input factors in grain production of major grain production provinces: Empirical analysis based on the input factors of Hubei in 1990-2004. Journal of Northwest Agriculture and Forestry University: Social Science Edition, 2007, 7(4): 56-60.]
- [17] 魏丹, 王雅鹏. 粮食主产省粮食生产要素配置效率评价. 统计与决策, 2011, (2): 60-63. [WEI D, WANG Y P. Evaluation of allocation efficiency of grain production factors in major grain producing provinces. Statistics and Decision, 2011, (2): 60-63.]
- [18] 杨林, 许丹. 基于粮食生产效率的财政补贴政策地区差异化研究. 经济学动态, 2011, (12): 81-84. [YANG L, XU D. Research on the regional difference of fiscal subsidy policy based on grain production efficiency. Economic Perspectives, 2011, (12): 81-84.]
- [19] 肖红波, 王济民. 新世纪以来我国粮食综合技术效率和全要素生产率分析. 农业技术经济, 2012, (1): 36-46. [XIAO H B, WANG J M. Analysis of the comprehensive technical efficiency and total factor productivity of grain in China since the new century. Journal of Agrotechnical Economics, 2012, (1): 36-46.]
- [20] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. European Journal of Operational Research, 2001, 130(3): 498-509.
- [21] 曾福生, 高鸣. 我国粮食生产效率核算及其影响因素分析: 基于SBM-Tobit模型二步法的实证研究. 农业技术经济, 2012, (7): 63-70. [ZENG F S, GAO M. Grain production efficiency accounting and its influencing factors in China: An empirical study based on SBM-Tobit two-step model. Journal of Agrotechnical Economics, 2012, (7): 63-70.]
- [22] 陈宝珍, 任金政. 粮食生产生态效率测算与改善路径. 江苏农业学报, 2019, 35(1): 211-218. [CHEN B Z, REN J Z. Measurement and improvement of ecological efficiency in grain production. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2019, 35(1): 211-218.]
- [23] 李思勉, 何蒲明. 我国粮食绿色生产效率及影响因素研究: 基于粮食功能区的比较分析. 生态经济, 2020, 36(9): 116-120. [LI S M, HE P M. Study on green production efficiency of grain and its influencing factors in China: A comparative analysis based on the grain functional area. Ecological Economy, 2020, 36(9): 116-120.]
- [24] AVKIRAN N K, TONE K, TSUTSUI M. Bridging radial and non-radial measures of efficiency in DEA. Annals of Oper-

- ations Research, 2008, 164(1): 127-138.
- [25] 杨国涛, 张特, 东梅. 中国农业生产效率与减贫效率研究. 数量经济技术经济研究, 2020, 37(4): 46-65. [YANG G T, ZHANG T, DONG M. Research on the efficiency of agriculture production and poverty reduction in the Rural China. The Journal of Quantitative and Technical Economics, 2020, 37(4): 46-65.]
- [26] TONE K, TSUTSUI M. An epsilon-based measure of efficiency in DEA: A third pole of technical efficiency. European Journal of Operational Research, 2010, 207(3): 1554-1563.
- [27] 师博, 沈坤荣. 城市化、产业集聚与EBM能源效率. 产业经济研究, 2012, (6): 10-16. [SHI B, SHEN K R. Urbanization, industrial agglomeration and EBM energy efficiency. Industrial Economics Research, 2012, (6): 10-16.]
- [28] 李兰冰, 刘秉镰. 中国高技术产业的效率评价与成因识别. 经济学动态, 2014, (9): 56-65. [LI L B, LIU B L. Efficiency evaluation and cause identification of China's high tech-industry. Economic Perspectives, 2014, (9): 56-65.]
- [29] 刘华军, 郭立祥, 乔列成, 等. 中国物流业效率的时空格局及动态演进. 数量经济技术经济研究, 2021, 38(5): 57-74. [LIU H J, GUO L X, QIAO L C, et al. Spatial-temporal pattern and dynamic evolution of logistics efficiency in China. The Journal of Quantitative and Technical Economics, 2021, 38(5): 57-74.]
- [30] 田旭, 王善高. 中国粮食生产环境效率及其影响因素分析. 资源科学, 2016, 38(11): 2106-2116. [TIAN X, WANG S G. Environmental efficiency and its determinants regarding China's grain production. Resources Science, 2016, 38(11): 2106-2116.]
- [31] 乔世君. 中国粮食生产技术效率的实证研究: 随机前沿面生产函数的应用. 数理统计与管理, 2004, (3): 11-16. [QIAO S J. The positive analysis of technical efficiency in China's grain production: A stochastic frontier approach. Journal of Applied Statistics and Management, 2004, (3): 11-16.]
- [32] 马林静, 王雅鹏, 吴娟. 中国粮食生产技术效率的空间非均衡与收敛性分析. 农业技术经济, 2015, (4): 4-12. [MA L J, WANG Y P, WU J. Spatial disequilibrium and convergence analysis of technical efficiency of grain production in China. Journal of Agrotechnical Economics, 2015, (4): 4-12.]
- [33] 谭忠昕, 郭翔宇. 基于超效率DEA方法的中国粮食生产效率评价分析. 农业现代化研究, 2019, 40(3): 431-440. [TAN Z X, GUO X Y. Evaluation and analysis of China's grain production efficiency: Based on the super efficiency DEA model. Research of Agricultural Modernization, 2019, 40(3): 431-440.]
- [34] 王美知, 魏凤. 哈萨克斯坦粮食生产效率动态演进及区域差异. 自然资源学报, 2021, 36(3): 594-605. [WANG M Z, WEI F. Dynamic evolution and regional differences of grain production efficiency in Kazakhstan. Journal of Natural Resources, 2021, 36(3): 594-605.]
- [35] PASTOR J T, LOVELL C A K. A global Malmquist productivity index. Economics Letters, 2005, 88(2): 266-271.
- [36] COELLI T J, RAO D. Total factor productivity growth in agriculture: A Malmquist index analysis of 93 Countries, 1980-2000. Agricultural Economics, 2005, 32(1): 115-134.
- [37] QUAH D. Galton's fallacy and tests of the convergence hypothesis. The Scandinavian Journal of Economics, 1993, 95(4): 427-443.
- [38] 范丽霞. 中国粮食全要素生产率的分布动态与趋势演进: 基于1978—2012年省级面板数据的实证. 农村经济, 2017, (3): 49-54. [FAN L X. Distribution dynamics and trend evolution of total factor productivity of grain in China: Based on provincial panel data in 1978-2012. Rural Economy, 2017, (3): 49-54.]
- [39] 李波, 张俊飏, 李海鹏. 中国农业碳排放时空特征及影响因素分解. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(8): 80-86. [LI B, ZHANG J B, LI H P. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(8): 80-86.]
- [40] 刘华军, 鲍振, 杨骞. 中国农业碳排放的地区差距及其分布动态演进: 基于Dagum基尼系数分解与非参数估计方法的实证研究. 农业技术经济, 2013, (3): 72-81. [LIU H J, BAO Z, YANG Q. Regional disparity of agricultural carbon emission and its distribution dynamic evolution in China: An empirical study based on Dagum Gini Coefficient decomposition and nonparametric estimation method. Journal of Agrotechnical Economics, 2013, (3): 72-81.]
- [41] 李波, 王春好, 张俊飏. 中国农业净碳汇效率动态演进与空间溢出效应. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(12): 68-76. [LI B, WANG C Y, ZHANG J B. Dynamic evolution and spatial spillover of China's agricultural net carbon sink. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(12): 68-76.]
- [42] 田云, 张俊飏, 罗小锋. 中国种植业净碳效益与经济效益协调性区域比较研究. 经济地理, 2014, 34(3): 142-148. [TIAN Y, ZHANG J B, LUO X F. Regional comparative analysis on the coordination degree between net carbon benefit and economic benefit of plant industry in China. Economic Geography, 2014, 34(3): 142-148.]
- [43] 尚杰, 杨滨键. 种植业碳源、碳汇测算与净碳汇影响因素动态分析: 山东例证. 改革, 2019, (6): 123-134. [SHANG J,

- YANG B J. Estimation of carbon source and carbon sequestration in planting industry and dynamic analysis of influencing factors of net carbon sequestration: A case study of Shandong province. *Reform*, 2019, (6): 123-134.]
- [44] 赖斯芸, 杜鹏飞, 陈吉宁. 基于单元分析的非点源污染调查评估方法. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(9): 1184-1187. [LAI S Y, DU P F, CHEN J N. Evaluation of non-point source pollution based on unit analysis. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2004, 44(9): 1184-1187.]
- [45] 陈敏鹏, 陈吉宁, 赖斯芸. 中国农业和农村污染的清单分析与空间特征识别. 中国环境科学, 2006, (6): 751-755. [CHEN M P, CHEN J N, LAI S Y. Inventory analysis and spatial distribution of Chinese agricultural and rural pollution. *China Environment Science*, 2006, (6): 751-755.]
- [46] 葛鹏飞, 王颂吉, 黄秀路. 中国农业绿色全要素生产率测算. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(5): 66-74. [GE P F, WANG S J, HUANG X L. Measurement for China's agricultural green TFP. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(5): 66-74.]

## The measurement and its distribution dynamic evolution of grain production efficiency in China under the goal of reducing pollution emissions and increasing carbon sink

YANG Qian<sup>1</sup>, SI Xiang-hui<sup>2</sup>, WANG Jue<sup>2</sup>

(1. School of Economics, Shandong University of Finance and Economic, Jinan 250014, China; 2. School of Public Administration and Policy, Shandong University of Finance and Economic, Jinan 250014, China)

**Abstract:** Considering the net carbon sink and non-point source pollution emissions in grain production, this paper constructs a global EBM model to calculate the grain production efficiency of 30 provincial-level regions and three functional areas in China from 2001 to 2018, and investigates the dynamic evolution trend of China's grain production efficiency with the help of dynamic distribution model. The results show that: (1) The overall level of grain production efficiency in China is not high, showing a trend of first decreasing and then increasing during the sample period, and the grain production efficiency in the main producing areas is higher than that in the main selling areas and the production and marketing balance areas. (2) There are differences in the distribution dynamics of grain production efficiency among the three functional areas. The main production areas change to "two-level differentiation" from "multi-level differentiation", and the regional gap is gradually narrowing. The differentiation degree of the main sales areas has been intensified. The "multi-level differentiation" in the production and marketing balance area has been gradually strengthened. (3) China's grain production efficiency has a trend of gathering to medium and high levels. Compared with the provinces with high efficiency, those with low efficiency have obvious "poverty trap", and the vicious circle of low-level food development is not easy to break.

**Keywords:** carbon neutrality; grain production efficiency; EBM model; kernel density estimation; Markov chain