中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture

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

周应恒，杨宗之

Temporal and spatial characteristics of China's provincial green total factor productivity of grains from the ecological value perspective

ZHOU Yingheng and YANG Zongzhi

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.210106

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国畜牧业绿色全要素生产率演变及区域差异研究

Evolution of green total factor productivity and regional disparity in China's husbandry

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(4): 613–622

基于土地生态要素分区的坝上生态用地生态服务价值分析

Analysis of ecological service value of ecological land of Bashang area based on ecological factor division

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(6): 903–915

粮食安全视角下的环京津地区耕地生态补偿量化研究

Quantitative study on cultivated land ecological compensation in the area around Beijing and Tianjin from the perspective of grain security

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(7): 1052–1059

中国城镇化对农业生态效率的影响——基于中国13个粮食主产区2009—2018年面板数据

Study on the impact of China's urbanization on agricultural ecological effi–ciency:Based on panel data of 13 major grain–producing regions in China from 2009 to 2018

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(8): 1265–1276

重庆市农田生态服务价值时空变化特征及其驱动因素分析

Temporal and spatial variation and driving factors of farmland ecological service value in Chongqing

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(11): 1637–1648

延安市退耕还林(草)工程对生境质量时空格局的影响

Impact of the 'Grain for Green' project on the spatial and temporal pattern of habitat quality in Yan'an City, China

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(4): 575–586

关注微信公众号，获得更多资讯信息

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 10 月 第 29 卷 第 10 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Oct. 2021, 29(10): 1786−1799

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.210106

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 Y H, YANG Z Z. Temporal and spatial characteristics of China's provincial green total factor productivity of grains from the ecological value perspective[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(10): 1786−1799

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*

周应恒, 杨宗之**

(江西财经大学经济学院 南昌 330013)

摘 要: 绿色发展是我国未来粮食安全生产的重要内容, 衡量绿色生产率是探索粮食绿色增产方式的有效途径。本文在考虑粮食种植生态价值 (ESV) 的基础上, 运用全局要素生产率指数 (GML) 和超效率数据包络模型 (SBM) 从静态和动态两个角度切入, 测算 1997—2019 年中国粮食绿色全要素生产率和投入产出冗余率, 并采用空间探索性数据分析 (ESDA) 对粮食绿色全要素生产率的全局和局部空间特征进行研究。结果表明: 1) 研究期内粮食种植生态价值降低 0.39%, 由 1997 年的 6471.57 亿元下降到 2019 年的 6446.16 亿元, 损失 25.41 亿元, 其中东北、中部、西南地区有所提升, 而东部地区、西北地区有所下降; 2) 粮食绿色全要素生产率年均增长 0.60%, 由 1997 年的 0.9754 上升到 2019 年的 1.0990, 主要由技术进步驱动 (1.0308), 而技术效率 (0.9973) 的带动作用较弱; 3) 粮食绿色全要素生产率相对有效省 (市) 占比从 1997 年的 9.68% 提升至 2019 年的 67.74%, 在时空上呈现以东部为主, 并逐期向东北-中部-西北发展的格局; 4) 粮食绿色全要素生产率相对无效省 (市) 效率损失的主要原因为第一产业从业人员、农膜使用量和碳排放量存在冗余; 5) 粮食绿色全要素生产率呈现出向中部、西南部高效率区集聚的空间特征, 并且集聚程度在不断增强。基于此, 提倡要充分认识粮食生产活动的正负外部性, 严格管控农地非粮、非农化现象, 并促进先进农业技术推广及粮食绿色全要素生产率提升。

关键词: 粮食种植生态价值; 粮食绿色全要素生产率; 耕地非粮化; 超效率 SBM; 空间探索性数据分析 (ESDA)

中图分类号: F326.11 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Temporal and spatial characteristics of China's provincial green total factor productivity of grains from the ecological value perspective*

ZHOU Yingheng, YANG Zongzhi**

(School of Economics, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China)

Abstract: Green development is important for China's future food safety, and measuring green productivity is an effective method to explore ways to increase green grains production. Based on the differences in the endowment of cultivated land resources in different regions, this study adopted the ecological services value evaluation method to measure the ecological value of cultivated land during the process of grain production. To incorporate the nutrient pollution and non-nutrient pollution generated in the process of grain pro-

* 国家社会科学基金重大项目 (20ZDA045) 和江西省研究生创新专项资金项目 (YC2020-B110) 资助

** 通信作者: 杨宗之, 主要研究方向为农业生产效率分析。E-mail: 981857793@qq.com

周应恒, 主要研究方向为农业经济。E-mail: njzhouyh@126.com

收稿日期: 2021-02-26 接受日期: 2021-05-28

* The study was supported by the National Social Science Foundation of China (20ZDA045) and the Special Fund of Postgraduate Innovation of Jiangxi Province (YC2020-B110).

** Corresponding author, E-mail: 981857793@qq.com

Received Feb. 26, 2021; accepted May 28, 2021

duction, the global Malmquise Luenberger index and the super efficiency model were used from the static and dynamic perspectives, to calculate China's total factor productivity and input-output redundancy rate from 1997 to 2019. To better understand the temporal and spatial changes in China's green total factor productivity, the spatial development characteristics of the agricultural production factors were investigated in the selected six years (1997, 2001, 2005, 2009, 2013 and 2019) using the equidistant distribution method, and Moran's I index was used to study the spatial heterogeneity and agglomeration of green total factor productivity of grains in China. The results showed that: 1) During the study period, the ecological value of grain production reduced by 0.39%, from 647.157 billion Yuan in 1997 to 644.616 billion Yuan in 2019; a loss of 2.541 billion Yuan. The ecological value in the northeast, central, and southwest regions increased, whereas that in the east and northwest regions decreased. 2) Analysis of the environmental impact of grain production showed that the traditional total factor productivity, which does not consider environmental effects, tended to ignore the positive and negative aspects of grain production and cannot accurately assess the true efficiency of China's grain production. After accounting for environmental factors, such as the ecological value of grain production and agricultural non-point source pollution, this study found that the green total factor productivity of grains increased by 0.60% annually, from 0.9754 in 1997 to 1.0990 in 2019, driven mainly by technological progress (1.0308). The driving effect of technical efficiency (0.9973) was weak. 3) The proportion of provinces (cities) that were relatively effective in the green total factor productivity of grains increased from 9.68% in 1997 to 67.74% in 2019. In terms of time and space, the relatively effective provinces (cities) was mainly in the eastern region and then gradually-developed to the northeast, central, and northwest regions. 4) Due to high pollution emissions and resource consumption, the main reasons for the provinces (cities) that were relatively ineffective in green total factor productivity of grains were the redundancy of employees in the primary industry, the use of agricultural film, and carbon emissions. 5) The green total factor productivity of grains in China had a significant positive spatial correlation dominated by high-high agglomeration, and the green total factor productivity of grains showed spatial characteristics of agglomeration in the central and southwestern high-efficiency areas. The degree of agglomeration was increasing. Based on the above results, this study advocates for a better understanding of the positive and negative effects of grain production activities, strict control of the non-grain and non-agricultural phenomenon of agricultural land, and the promotion of advanced agricultural technologies to promote the green total factor productivity of grains.

Keywords: Ecological value of grain; Green total factor productivity of grain; Non grain cultivated land; Super efficiency model; Exploratory spatial data analysis (ESDA)

粮食安全是国计民生的根本, 作为世界人口第一的大国, 中国以全球 7% 的耕地养活约全球 20% 的人口。在当前人口规模大增、自然资源紧束的条件下, 粮食绿色生产的重要性日益凸显, 而粮食绿色全要素生产率则是农业绿色生产能力的重要体现[1]。这个概念最早由 Schalteger Sturm 提出, 它代表粮食生产活动带来的包含环境影响在内的总产出与总投入的比率[2]。同时, 世界可持续发展商会 (WBCSD) 将绿色生产力定义为: 能在全生命周期内为人类提供高质量的产品, 并最大限度减少资源消耗和环境污染, 最终实现生产与生态和谐发展的生产活动[3]。可以看出, 粮食生产效率水平不仅反映了粮食产出能力, 同时也包含粮食生产活动带来的生态环境影响。虽然我国粮食产量自 2015 年以来持续稳定在 6.5 亿 t 以上, 但在粮食生产的快速发展过程中, 农药化肥等一系列农用化学品催生的粮食增产模式、地膜的不合理处置、固体废弃物的大面积焚烧, 造成了大量的环境污染, 破坏了农地原有的生态循环模式[4]。同时伴随市场对资源配置的作用逐渐显现, 许多地区出现了耕地的"非农非粮化"现象, 这种倾向不仅压减了粮食生产, 还滋生了诸如种树挖塘等破坏耕地的行为, 影响了粮食绿色生产率中粮食种植的生态价值产出 (后文简称"粮种生态价值"), 在一定程度上威胁到了我国的粮食安全。因此, 充分认识粮食生产过程中的正负外部性, 对了解绿色发展背景下我国粮食的实际生产能力及保障粮食安全具有重要意义。

目前, 国内外学者主要采用索洛余值 (Solow residual)、数据包络 (DEA) 和随机前沿 (SFA) 等分析手法对包含粮食在内的农业生产率展开讨论[5-6], 其中 Charnes 等[7] 提出的多投入产出 DEA 评价法应用最为普遍, 在 Caves 等[8] 引入非参数增长测算模块后, 开始被国内外学者广泛应用于农业生产率的研究中[9]。众多学者认为改革开放以来我国农业全要素生产率实现了较快的增长, 技术进步和各投入要素使用方式的转变极大地提升了农业生产效率[10-13]。近年来, 农业生产过程中造成的环境污染问题也逐渐引起了学者们的重视, 诸多学者开始将环境因素纳入农业生产效率的考量范围内[14]。而传统的 DEA 模型, 忽略了投入产出松弛变量这一问题, 造成其对于非期望产出测算的不适用性。鉴于此, Tone[15] 建立了非径向角度的松弛变量测度模型, Chung 等[16] 改进了 Malmquise Luenberger (ML) 指数使多决策单元可以排序, Ramanathan 等[17] 结合农业生产的特点、

投入要素的可测量性, 把生产过程中的污染当成一种未支付的投入纳入到生产函数中, 改进了绿色全要素生产率的测算方法。随后, 学者们逐步将水、土壤氮磷含量、碳排放、水土流失、气候变化等环境影响因素当作非合意产出纳入到农业绿色全要素生产率的估算中[18-20]。党的十九大提出经济的高质量发展需要充分考虑环境代价, 农业作为与自然环境结合最为紧密的产业, 科学地评价农业绿色全要素生产率有助于推动产业的绿色发展和转型升级。粮食生产是农业发展的重要内容, 其绿色生产效率评价一直是学界的研究热点, 诸多学者认为农业污染 (碳排放[21]、面源污染[22] 等) 和耕地质量下降[23] 是阻碍我国粮食绿色全要素生产率提升的主要因素。鉴于我国幅员辽阔, 不同地区的自然经济条件、农业发展方式差异较大, 学者们从地理差异视角, 运用空间计量方法研究了不同驱动因素对不同地区粮食生产效率的影响, 发现气候变化[24]、新型城镇化[25]、农业补贴[26]、人口老龄化[27] 等因素均对粮食绿色全要素生产率影响显著。

综上所述, 多数研究集中于探讨大范围的传统农业生产率, 专门针对粮食绿色全要素生产率测算的文献相对较少, 且已有研究仅将粮食产量作为绿色全要素生产率测算的唯一期望产出, 这种单一的价值核算标准, 远远低估了耕地在粮食生产活动中所产生的生态价值。同时, 现有文献的非期望产出多数只考虑化肥投入带来的营养物污染, 忽略了农药、农膜和农业固体废弃物的影响。鉴于此, 本文从以下几个方面深入: 第一, 在粮食生产活动中, 耕地在废物处理、保持土壤、气候调节等方面提供了大量的生态价值[28], 基于不同区域耕地资源禀赋的差异, 采用生态价值评价法 (ESV) 测算耕地在粮种过程中产生的生态价值; 第二, 充分考虑粮种过程中产生的营养物污染和非营养物污染, 利用农业固体废弃物产污系数和《全国第一次污染源普查》中化肥、农药和农膜污染分册中各省 (市) 的流存系数, 根据要素的实际使用量进行折算, 最终得到非期望产出的综合数据; 第三, GML (global Malmquise Luenberger) 指数法和超效率 SBM (super efficiency model) 模型能够准确测算包含非期望产出的绿色生产率, 本文将农业面源污染、碳排放等非期望产出纳入测算模型中, 评价我国 1997—2019 年粮食绿色全要素生产率; 第四, 通过超效率 SBM 模型投入产出的冗余率指标找寻生产效率低下地区的主要限制因素, 针对性地提出相应的提升策略; 第五, 为了把握我国粮食绿色全要素生产率变化的时空规律, 基于农业生产要素的流动成本、条件及空间发展特征, 采用等距离分配法选取 6 个时间节点, 通过 Moran's *I* 指数研究不同地区粮食绿色全要素生产率的空间集聚态势。本研究旨在为各地转变适宜的农业发展模式、实现绿色生产、保障粮食生产的生态价值提供参考。

1 数据与方法

1.1 研究方法

1.1.1 生态价值评价法 (ESV)

耕地除了可以保障食物和原材料生产, 在生态链支持和气体调节服务中也起着重要作用, 耕地生态系统中的生物和植被可以化解多余养分及化合物, 达到滞留灰尘的作用; 同时, 生物的有机质积累可以起到保持土壤的作用, 保证其沉积物养分的积累和营养循环, 并且为野生动植物提供授粉、栖息地等生物资源, 保障其基因的来源和进化, 维护耕地生态系统平衡具有重要的生态意义。为探讨粮食生产框架下耕地产生的生态价值, 根据 Costanza 等[29] 提出的当量因子法, 结合谢高地等[30] 修正的中国内陆耕地生态价值评价系数 (其中气体调节为 0.50、气候调节为 0.89、水文调节为 0.60、废物处理为 1.64、保持土壤为 1.46、维持生物多样性为 0.71、提供美学景观为 0.01) 和提出的我国不同省份农田生态系统生物量因子修正系数 (表 1), 计算各区域耕地在粮食生产过程中所产生的生态价值, 详见公式 1。

$$\mathrm{ESV}=\sum_{i=1}^{7}A_t\times P\times \mathrm{CF}\times \mathrm{EC} \tag{1}$$

式中: ESV 为粮食生产过程中产生的总生态价值, t 为研究年份, i 为废物处理、保持土壤、气候调节、维持生物多样性、水文调节、气体调节、提供美学景观 7 类生态功能价值, A 为各地区的粮食播种面积, P 为基期粮食单产可比价格, CF 为地区修正系数, EC 为各项生态系统服务价值当量因子。

1.1.2 GML 指数法

GML 指数法能够测度静态面板下的粮食绿色全要素生产率, 进一步分解可得到技术效率 (GEC) 和相邻期内最佳实践距离下 (BPG) 的技术进步情况 (GTC)。公式 (2) 为判别效率值增减情况的 GML 指数, 即粮食绿色综合效率是评价粮食生产活动对资源利用、配置的综合评价指标, 若 GML 值>1, 则说明当前粮食生产活动处于生产前沿面, 即效率有所提升。GEC 和 GTC 分别表示粮食绿色生产的技术效率和技术进步 (即规模效率), 即 GEC 反映的是粮

表 1　我国不同省份耕地生态系统生物量因子

Table 1　Biomass factors of cultivated land ecosystems in different provinces of China

省(市、自治区) Province (city, autonomous region)	生物量因子 Biomass factor	省(市、自治区) Province (city, autonomous region)	生物量因子 Biomass factor	省(市、自治区) Province (city, autonomous region)	生物量因子 Biomass factor
北京市 Beijing City	1.04	安徽省 Anhui Province	1.17	四川省 Sichuan Province	1.35
天津市 Tianjin City	0.85	福建省 Fujian Province	1.56	贵州省 Guizhou Province	0.63
河北省 Hebei Province	1.02	江西省 Jiangxi Province	1.51	云南省 Yunnan Province	0.64
山西省 Shanxi Province	0.46	山东省 Shandong Province	1.38	西藏自治区 Tibet Autonomous Region	0.75
内蒙古自治区 Inner Mongolia Autonomous Region	0.44	河南省 Henan Province	1.39	陕西省 Shaanxi Province	0.51
辽宁省 Liaoning Province	0.90	湖北省 Hubei Province	1.27	甘肃省 Gansu Province	0.42
吉林省 Jilin Province	0.96	湖南省 Hunan Province	1.95	青海省 Qinghai Province	0.04
黑龙江 Heilongjiang Province	0.66	广东省 Guangdong Province	1.40	宁夏回族自治区 Ningxia Hui Autonomous Region	0.64
上海市 Shanghai City	1.44	广西壮族自治区 Guangxi Zhuang Autonomous Region	0.98	新疆维吾尔自治区 Xinjiang Uygur Autonomous Region	0.58
江苏省 Jiangsu Province	1.74	海南省 Hainan Province	0.72		
浙江省 Zhejiang Province	1.76	重庆市 Chongqing City	1.21	全国 Nationwide	1.00

由于统计口径差异和数据获取问题, 本文研究区域不含中国港澳台地区。Due to the difference of statistical caliber and the problem of data acquisition, the study area does not include Hong Kong, Macao and Taiwan of China.

食生产中先进技术的应用和推广程度, 当 GEC>1 时则表示当前技术水平的单元规模效应处于最优状态, 技术推广效果较好。GTC 反映当前的技术条件较前期是否有所更新, 以及粮食生产活动的投入要素是否得到有效利用, 若 GTC>1 则表示单元技术水平和投入要素利用程度的增加, 反之亦然。

$$\begin{aligned}
&\mathrm{GML}^{t,t+1}(x^t,y^t,b^t,x^{t+1},y^{t+1},b^{t+1}) = \\
&\frac{1+D^G(x^t,y^t,b^t)}{1+D^G(x^{t+1},y^{t+1},b^{t+1})} = \frac{1+D^G(x^t,y^t,b^t)}{1+D_t(x^t,y^t,b^t)}\times \\
&\frac{1+D_{t+1}(x^{t+1},y^{t+1},b^{t+1})}{1+D^G(x^{t+1},y^{t+1},b^{t+1})}\times\frac{1+D_t(x^t,y^t,b^t)}{1+D_{t+1}(x^{t+1},y^{t+1},b^{t+1})} = \\
&\frac{1+D_t(x^t,y^t,b^t)}{1+D_{t+1}(x^{t+1},y^{t+1},b^{t+1})}\times\left[\frac{\dfrac{1+D^G(x^t,y^t,b^t)}{1+D_t(x^t,y^t,b^t)}}{\dfrac{1+D_t^G(x^{t+1},y^{t+1},b^{t+1})}{1+D_{t+1}(x^{t+1},y^{t+1},b^{t+1})}}\right] = \\
&\frac{\mathrm{TE}^{t+1}}{\mathrm{TE}^t}\times\frac{\mathrm{BPG}_{t+1}^{t,t+1}}{\mathrm{BPG}_t^{t,t+1}} = \mathrm{GEC}^{t,t+1}\times\mathrm{GTC}^{t,t+1}
\end{aligned} \tag{2}$$

式中: t 为研究年份, x 为投入要素, y 为期望产出, b 为非期望产出, TE 为综合技术效率, BPG 为全局技术参照集与有效生产前沿面的距离。其中 $D^G(x^t, y^t, b^t)$ 为参照集的方向向量, 指投入因素 x 和生产结构 $P(x)$ 沿着距离函数指定产出向量 $g=(g_y, g_b)$ 方向, 可增减生产最大 λ 倍数的产出。

1.1.3　超效率 SBM 生产率测算法

超效率 SBM 模型对于每一个评价单元 DMU 均有投入、期望产出、非期望产出 3 个向量, 以此构建含 3 个向量在内的超效率 SMB 模型 (公式 3)。

$$\min\rho = \frac{1+\dfrac{1}{m}\displaystyle\sum_{i=1}^{m} s_i^-/x_{ik}}{1-\dfrac{1}{s_1+s_2}\left(\displaystyle\sum_{r=1}^{s_1} s_r^g/y_{rk}^g + \sum_{l=1}^{s_2} s_l^b/y_{lk}^b\right)}$$

$$s.t.\begin{cases}
\displaystyle\sum_{j=1,j\neq k}^{n} x_{ij}\lambda_j - s_i^- \leqslant x_{ik} \\
\displaystyle\sum_{j=1,j\neq k}^{n} y_{rj}^g\lambda_j - s_i^g \geqslant y_r^g \\
\displaystyle\sum_{j=1,j\neq k}^{n} y_{lj}^b - s_l^b \leqslant y_l^b \\
\displaystyle\sum_{i=1}^{n}\lambda_i = 1 \\
\lambda, s^-, s^g, s^b \geqslant 0 \\
i=1,2,\cdots,m, r=1,2\cdots,s, j=1,2,\cdots,n\ (j\neq k)
\end{cases} \tag{3}$$

式中: ρ 为评价单元 DMU 的综合效率值, λ 为权重, k 为研究对象省 (市) 的个数, i、l、r、j 为各部分决策单元的表征, y^g 和 y^b 分别代表期望和非期望产出, m 表示投入要素个数, s_1 为期望产出个数, s_2 为非期望产出个数, s^-为投入松弛变量, s^g 和 s^b 是期望和非期望产出的松弛变量。

若评价单元效率存在损失, 超效率 SBM 模型可以基于投入、非期望产出过剩量和期望产出不足量, 比较指定决策单元与最佳决策单元间的产出不足率和投入冗余率, 为各地区提升粮食绿色全要素生产率提供改善方向。当评价单元为效率损失状态时, 基于公式 (3) 中的松弛变量, 粮食绿色全要素生产率损失原因可分为以下几类: 1) 投入存在冗余, 即要素可缩减率 (公式 4); 2) 非期望产出存在冗余, 即非期

望产出可缩减率 (公式 5); 3) 期望产出存在不足, 即期望产出可扩展率 (公式 6)。

$$\mathrm{IE}_x = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} S_n^x / x_{n0} \tag{4}$$

$$\mathrm{IE}_u = \frac{1}{M+I}\sum_{i=1}^{I} S_i^u / u_{i0} \tag{5}$$

$$\mathrm{IE}_y = \frac{1}{M+I}\sum_{m=1}^{M} S_m^y / y_{m0} \tag{6}$$

式中: N 为投入因素种类, M 为期望产出种类, I 为非期望产出种类, S_n^x和 S_i^u分别表示投入和非期望产出的冗余量, 而S_m^y代表期望产出不足量。

1.1.4 探索性空间数据分析法 (ESDA)

由于较为相似的社会、经济、生态属性特征, 临近地理单元会表现出一定的空间关联性, 为了进一步把握空间单元间的空间关联、交互特征, 本文运用探索性空间数据分析法研究粮食绿色全要素生产率的空间相关性及异质性。首先建立 Queen 一阶权重矩阵 (W_{ij}), 相临单元若存在共同边界则判定为存在空间依赖关系, 具体公式如公式 (7):

$$W_{ij} = \begin{cases} 1, \text{当区域}i\text{和区域}j\text{相邻} \\ 0, \text{当区域}i\text{和区域}j\text{不相邻} \end{cases} \tag{7}$$

其中公式 (8) 为反映整体空间集聚趋势的全局莫兰指数, 公式 (9) 为反映地区空间异质和集聚性的局部莫兰指数。

$$\text{Moran's } I_i = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} W_{ij}(X_i-\overline{X})(X_j-\overline{X})}{S^2\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} W_{ij}} \tag{8}$$

$$\text{Moran's } I_i = \frac{(X_I-\overline{X})\sum_{j=1}^{n} W_{ij}(X_j-\overline{X})}{S^2} \tag{9}$$

$$S^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(X_i-\overline{X})^2 \tag{10}$$

$$\overline{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i \tag{11}$$

式中: X_i 为第 i 个评价单元的值, n 为评价单元个数, W_{ij} 为空间权重矩阵。

1.2 指标体系构建和数据处理

土地和劳动力是粮食生产活动中的必要投入要素, 而化肥和农药是实现现代粮食增产的关键要素。并且, 随着粮食生产技术的不断改进, 机耕机收等粮食生产方式的普及, 使得农业机械总动力对于提升粮食生产效率起到了至关重要的作用。因此, 参照前人文献[31-32], 本文投入指标选择劳动力、土地和相关资源投入等。土地投入指标选择粮食作物播种面积, 资源投入指标分别采用农业机械总动力、农药使用量、化肥折纯量表征农业生产过程中的农业机械、农药和化肥投入。产出指标分为期望产出和非期望产出, 期望产出指标选取粮种生态价值和粮食产量; 非期望产出方面, 从粮种面源污染的源头来看, 主要包括非营养物和营养物污染[33]。其中, 非营养物污染是指残留在土地或者农作物上的污染物, 主要为农药、农膜两大类; 营养物污染是指通过水介质而呈现的水体富营养化污染, 其污染物主要包括来源于农田化肥和粮种固体废弃物的总氮、总磷和化学需氧量。同时, 耕地碳排放主要指粮食作物生产过程中由于化肥、农药、能源使用, 以及土地翻耕和灌溉过程中所直接或间接导致的温室气体的排放[34]。基于以上分析, 本文的非期望产出选取粮食生产过程中造成的农业面源污染和碳排放。具体投入-产出指标详见表 2。

1.3 数据来源及处理

本研究秉承数据连续性、完整性、可获得性和可比性的原则, 对涉及的相关基础数据进行了收集与整理。其中, 1997—2019 年第一产业从业人员、

表 2 粮食绿色全要素生产率投入-产出指标体系

Table 2 Input and output indexes system of grain green total factor productivity

指标类别 Index category	分项指标 Subindicator	具体指标 Specific indicator
投入指标 Input	劳动力投入 Labor input	第一产业从业人员 Employees in the primary industry
	土地投入 Land investment	粮食作物播种面积 Sown area of grain crops
	机械动力投入 Mechanical power input	农业机械总动力 Total power of agricultural machinery
	农药化肥投入 Input of pesticide and fertilizer	农药使用量、化肥折纯量 Pesticide usage and chemical fertilizer conversion
产出指标 Output	期望产出 Expected output	粮食产量 Grain yield
		粮种生态价值 Ecological value of grain
	非期望产出 Unexpected output	农业面源污染 Agricultural non-point source pollution
		碳排放量 Carbon emissions

粮食播种面积、农业机械总动力、农药使用量、化肥折纯量和粮食产量 (包含水稻、小麦、玉米、豆类、薯类)、农膜使用量、农机燃料量、灌溉面积数据来源于《中国农村统计年鉴》《中国农业年鉴》和《中国统计年鉴》。由于 2012 年后农林牧渔从业人员数据缺失, 为了保证数据的连续性, 缺失数据优先按省 (市) 级统计年鉴进行补充, 并通过相关统计局、农业农村厅 (局) 等相关政府机构的信息公开数据进行多次核对, 最大程度保证数据统计口径一致。数据处理方面, 因本文所研究的是粮食生产过程中的各项投入, 根据田旭等[35] 的研究方法, 依照拆分系数计算粮食生产要素的劳动力和农药化肥投入。即粮种劳动力系数=(农业产值/农林牧渔业总值)×(粮食播种面积/农作物播种面积); 农药化肥投入系数=粮食播种面积/农作物播种面积。粮种生态价值方面, 根据 Costanza 等 [29] 提出的当量因子法, 结合谢高地等[30] 修正的中国内陆耕地生态价值评价系数, 以粮食播种面积计算各省 (市) 粮种生态价值。农业面源污染方面, 综合采用王雪蕾等[24] 的清单分析法核算粮种固体废弃物污染, 并根据《全国第一次污染源普查》的农药化肥流失、农膜留存系数分册折算各区域的要素使用量, 核算包括化肥投入所产生和流失的总磷总氮、农药流失残留量和农用薄膜残留量。碳排放量方面, 通过张利国等[36] 的碳排放系数和核算方法, 计算粮种过程中化肥、农药、农膜、柴油、翻耕和灌溉产生的碳排放量。同时, 针对各省 (市) 同一指标的单位差异问题, 通过单位量级换算, 进行数据的标准化处理。最终构建了包含全国 31 个省 (市)1997—2019 年的粮食绿色全要素生产率投入产出面板数据。

2　实证分析

为科学反映我国不同区域粮食绿色全要素生产率的变化状况, 在全国整体和省域对比分析基础之上, 依照《国务院发布关于西部大开发若干政策措施的实施意见》和《中共中央、国务院关于促进中部地区崛起的若干意见》, 将研究样本区域划分为东部地区 (北京、天津、河北、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东和海南)、中部地区 (山西、安徽、江西、河南、湖北和湖南)、西部地区 (内蒙古、广西、重庆、四川、贵州、云南、西藏、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆)、东北地区 (辽宁、吉林和黑龙江) 进行区域间的分析比较。同时, 由于统计口径差异和数据获取问题, 故本文研究区域不含中国港澳台地区。

2.1　粮种生态价值变化测算分析

本文将耕地在粮食生产活动过程中产生的生态价值作为粮食绿色全要素生产率的期望产出之一, 结合各区域耕地资源条件和粮食生产种植情况, 借助生态价值评价法得出各地区的粮食生产生态价值 (图 1)。

如图 1 所示, 生态价值排序为中部地区>东部地区>西部地区>东北地区; 从时序上看, 东北和中部地区的粮种生态价值有所增加, 分别提升 254.10 亿元和 268.08 亿元, 而东部、西部地区的粮种生态价值较研究初期有所降低, 分别减少 452.44 亿元和 95.15 亿元。同时, 粮种生态价值有所提升的省份主要集中在我国中部、东北及西南地区。其中由于黑龙江、吉林和辽宁地属黑土带, 土壤较为肥沃, 得益于得天

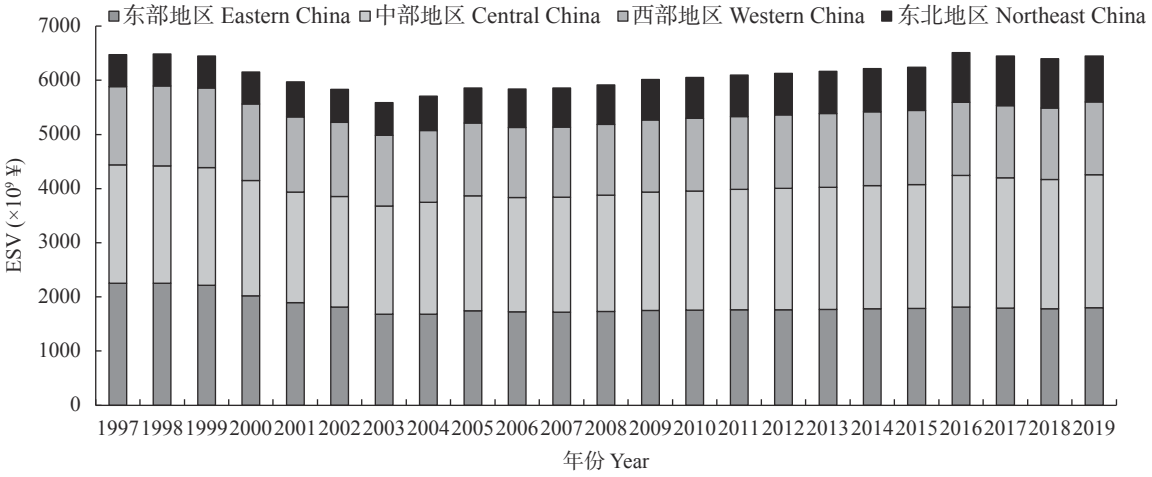

图 1　1997—2019 年中国及不同区域粮种生态价值 (ESV) 演变情况

Fig. 1　Evolution of ecological value (ESV) of grain production in different regions and whole county of China from 1997 to 2019

由于统计口径差异和数据获取问题, 本文研究区域不含中国港澳台地区。Due to the difference of statistical caliber and the problem of data acquisition, the study area does not include Hong Kong, Macao and Taiwan of China.

独厚的自然资源, 东北地区在我国粮食生产中的地位显得尤为重要。作为我国粮食生产的主产区, 随着第一产业规模的不断加深以及耕地管控政策的导向, 东北地区拥有较高的耕地保有量, 粮种生态价值较为稳定, 并在研究期内得到提升。而中部地区由于耕地水热条件良好, 地势平坦适宜作物种植, 农业生产配套技术的日趋完善, 集约化种植的不断推进保证了粮种生态价值的稳步提升。粮种生态价值有所下降的省份主要分布在我国东部和西部地区, 其中由于西部地区降水量少、地形地貌导致的耕地资源量不足等自然条件限制, 加上生态退耕的需要, 使得粮种生态价值有一定的下降。而东部地区省份经济相较发达, 在城镇化快速发展过程中可能会占用较多的耕地, 伴随居民生活质量的提高、饮食结构的改变, 和新型农业的崛起, 市场对资源配置的作用逐渐显现。2017 年河北省、江苏省和山东省等东部地区省份的非粮化率超过了 20%, 而北京市、天津市、上海市、浙江省、福建省、广东省和海南省 2017 年的非粮化率更是超过了 40%[37]。尤其是福建省、广西省和海南省等以丘陵、山地地形为主的省份, 其自然条件不利于粮食作物的耕种, 这些省份的农业发展模式多以热带水果等经济作物为主, 地方性特色农产品的价格优势导致粮种面积的萎缩; 而北京市、天津市、上海市和广东省等发达区域的发展定位, 决定了这些省份的农业在三产中的比例较低, 并且在城镇化过程中面临较强的用地约束, 城市扩张占用了大量的耕地。耕地的“非粮化”倾向不仅压减了粮食生产, 还滋生了诸如种树挖塘等破坏耕地的行为。同时近年来东部地区频发的农地“非粮化” “非农化”现象不仅影响了粮食绿色生产率中的粮种生态价值产出, 还在一定程度上威胁到了我国的粮食安全。总体而言, 在研究期内, 我国粮种生态价值呈下降趋势, 由 1997 年的 6471.57 亿元下降到 2003 年的 5585.28 亿元, 2004 年到 2019 年呈现波动上升态势, 2019 年达 6446.16 亿元, 研究期内粮种生态价值降低 0.39%, 共计减少 25.41 亿元。

2.2 粮食绿色全要素生产率测算分解

通过粮种生态价值的计算, 发现不考虑环境因素的传统全要素生产率往往会忽略粮食生产活动的正外部性, 无法准确评估我国粮食生产的真实效率水平。基于此, 本文在充分考虑粮种生态价值和农业污染的环境代价后, 为了研究我国粮食绿色全要素生产率的动态变化情况, 以及技术效率和技术进步的影响程度, 通过 GML 生产率指数法从动态角度得出我国 1997—2019 年各时期粮食绿色全要素生产率 (GTFP, 后文简称“综合效率”)、技术效率 (GEC) 和技术进步 (GTC) 情况。

如表 3 所示, 分阶段来看, 在 1997 年亚洲金融通

表 3 1997—2017 年中国各时期粮食绿色全要素生产率

Table 3 Grain green total factor productivities of China in different periods from 1997 to 2017

时期 Period	技术效率 Green technology efficiency	技术进步 Green technology change	综合效率 Green total factor productivity	时期 Period	技术效率 Green technology efficiency	技术进步 Green technology change	综合效率 Green total factor productivity
1997—1998	0.9088	1.1059	0.9754	2011—2012	0.9645	1.0472	1.0009
1998—1999	0.8772	1.0681	0.8998	2012—2013	0.981	1.0353	1.0157
1999—2000	0.9972	0.9637	0.9533	2013—2014	0.9915	1.0159	1.007
2000—2001	1.0093	0.9398	0.9396	2014—2015	1.0104	1.0169	1.0289
2001—2002	1.0031	0.9953	0.9975	2015—2016	1.1173	0.9866	1.0984
2002—2003	1.0715	0.9695	1.0275	2016—2017	1.0106	1.0683	1.0807
2003—2004	0.9989	1.0202	1.0091	2017—2018	1.0112	1.0944	1.1076
2004—2005	0.9427	1.0029	0.9358	2018—2019	1.0219	1.0757	1.0990
2005—2006	1.0268	1.0080	1.0267	T1	0.9481	1.0194	0.9420
2006—2007	1.0274	1.0343	1.0543	T2	1.0086	0.9992	0.9993
2007—2008	0.9475	1.0831	1.0195	T3	0.9992	1.0530	1.0434
2008—2009	0.9656	1.1353	1.0708	T4	1.0129	1.0204	1.0302
2009—2010	1.0209	0.9712	0.9944	T5	1.0146	1.0794	1.0958
2010—2011	1.0345	1.0411	1.0782	总体均值 Mean value	0.9973	1.0308	1.0191

表中各项指数所示为年份间对应效率的动态变化值; T1为“九五”时期(1997—2000年)、T2为“十五”时期(2001—2005年)、T3为“十一五”时期(2006—2010年)、T4为“十二五”时期(2011—2015年)、T5为“十三五”时期(2016—2019年); 同时由于统计口径差异和数据获取问题, 本文研究区域不含中国港澳台地区。The indexes in the table show the dynamic changes of corresponding efficiency in different years; T1 is the Ninth Five-Year Plan period (1997−2000), T2 is the Tenth Five-Year Plan period (2001−2005), T3 is the 11th Five Year-Plan period (2006−2010), T4 is the 12th Five-Year Plan period (2011−2015), T5 is the 13th Five Year-Plan period (2016−2019). Due to the difference of statistical caliber and the problem of data acquisition, the study area does not include Hong Kong, Macao and Taiwan of China.

货紧缩的大背景下, “九五”时期 (1997—2000 年) 粮食价格持续下跌, 农民种粮积极性受到影响, 耕种投入减少导致生产率大幅下降, 综合效率和技术效率每年分别减少 3.67% 和 15.02%; 从 2004 年起, 财政补贴等三农政策的提出很大程度上促进了技术效率的提升, “十五”时期 (2001—2005 年) 开始表现出一定的增长态势; 在严重自然灾害、农产品价格异常波动和农业生产资料价格快速上涨的不利形势下, “十一五”时期 (2006—2010 年) 得益于粮食直补、保护价收购等一系列政策, 国家对于粮食生产加大了财政支持力度, 这降低了耕地闲置抛荒、局部粮食产量下降的现象, 刺激了农民种粮及转让闲置耕地的积极性, 耕地转让和规模化种植提升了粮食的生产效率, 因此该阶段玉米和稻谷等农作物比例普遍提高, 综合效率和技术效率每年保持 2.93% 和 1.28% 的增长率; “十二五”时期 (2011—2015 年) 综合效率和技术进步增长速率放缓, 技术效率较“十一五”时期有一定的增长; 在农业技术条件的不断改善下, 2015 年我国粮食生产实现“十二连增”, “十三五”时期 (2016—2019 年) 的综合效率年增长率达 5.38%, 其中技术效率、技术进步分别提升到 1.12% 和 0.69% 的年增长水平。从总体情况来看, 研究期内我国综合效率 (1.0191) 的提升主要得益于技术进步 (1.0308), 两者均呈现出较大增幅, 年均增长分别为 0.60%、0.59%, 虽然近年来技术效率提升显著, 但在整个研究期内对于综合效率的带动作用较弱, 年均增长率为−0.13%, 今后要进一步促进高效技术的推广应用, 提高农业科研转化率。

2.3　粮食绿色全要素生产率的进一步分析

为了明确我国省域粮食绿色全要素生产率的分布特征, 按照超效率 SBM 测算结果分为相对有效区和相对无效区, 从而分析相对有效省 (市) 的空间演变态势。同时, 为了进一步探究相对无效区效率低下的原因, 根据 DEA 模型原理, 当各区域评价效率均值相对无效时, 以各项投入产出的松弛量与指标值比值来计算其冗余率或产出不足率, 以反映各要素的损失原因, 从而针对性地提出各地区相应的提升策略。

如表 4 所示, 相对有效区“九五”时期 (1997—2000 年) 仅有辽宁、广东和云南 3 省, “十五”时期 (2001—2005 年) 开始集中分布在东部沿海发达地区及东北地区等 11 省市, “十一五”时期 (2006—2010 年) 和“十二五”时期 (2011—2015 年) 开始向中西部地区转移, “十三五”时期 (2016—2019 年) 东部、东北和西北大部分省份均处于相对有效区, 相对有效省 (市) 从 1997 年的 9.68% 提升至 2019 年的 67.74%。从空间演变趋势可以看出, 综合效率在时空上呈现以东部沿海发达地区为主, 并逐期向东北-中部-西北发展的变化格局。从各区域相对有效省 (市) 的变化情况来看, 东部沿海发达地区由于拥有较高的农业生产要素, 近年来其生产率提升空间十分有限, 随着农业技术向内陆欠发达地区的推广, 西北地区综合效率的提升非常显著, 但是仍有部分省 (市) 受限于土地的自然禀赋, 农业种植开发难度较大, 综合效率未显现出增加趋势。

从表 5 可以看出, 相对无效区非期望产出和投入方面都存在不同程度的冗余, 说明环境污染排放量大、资源过度消耗是其综合效率低下的主要原因。从总体情况来看, 造成综合效率损失的主要因素集中在第一产业从业人员、农膜使用量和碳排放量。其中第一产业从业人员冗余率最高, 除安徽、天津、浙江、内蒙古外, 劳动力过剩成为大部分地区综合效率的提升障碍, 尤其是东北和西部地区, 由于较高的农业从业率和较低的转移速率, 劳动力过剩现象较为凸显; 其次农膜的大量使用, 造成西部干旱地区农膜污染问题较为突出, 农膜用量过大导致土壤性

表 4　1997—2019 年中国各省市综合效率相对有效情况

Table 4　Relative efficiencies of provinces and cities of China from 1997 to 2019

时期 Period	相对有效区 Relative effective area
1997—2000 (T1)	广东、辽宁、云南 Guangdong, Liaoning, Yunnan
2001—2005 (T2)	浙江、辽宁、新疆、山西、山东、北京、安徽、黑龙江、江苏、江西、吉林 Zhejiang, Liaoning, Xinjiang, Shanxi, Shandong, Beijing, Anhui, Heilongjiang, Jiangsu, Jiangxi, Jilin
2006—2010 (T3)	浙江、新疆、山东、辽宁、吉林、北京、天津、重庆、江苏、河北、江西、内蒙古、黑龙江 Zhejiang, Xinjiang, Shandong, Liaoning, Jilin, Beijing, Tianjin, Chongqing, Jiangsu, Hebei, Jiangxi, Inner Mongolia, Heilongjiang
2011—2015 (T4)	贵州、天津、湖北、山东、安徽、江苏、江西、河北、宁夏、四川、重庆、河南 Guizhou, Tianjin, Hubei, Shandong, Anhui, Jiangsu, Jiangxi, Hebei, Ningxia, Sichuan, Chongqing, Henan
2016—2019 (T5)	天津、福建、浙江、辽宁、上海、安徽、山西、山东、贵州、青海、河北、新疆、甘肃、湖北、内蒙古、黑龙江、吉林、河南、江西、江苏、宁夏 Tianjin, Fujian, Zhejiang, Liaoning, Shanghai, Anhui, Shanxi, Shandong, Guizhou, Qinghai, Hebei, Xinjiang, Gansu, Hubei, Inner Mongolia, Heilongjiang, Jilin, Henan, Jiangxi, Jiangsu, Ningxia

由于统计口径差异和数据获取问题, 本文研究区域不含中国港澳台地区。Due to the difference of statistical caliber and the problem of data acquisition, the study area does not include Hong Kong, Macao and Taiwan of China.

表 5 中国粮食绿色全要素生产率投入产出冗余表

Table 5 Input and output redundancy of grain green total factor productivity in China

地区 Region	效率值 Efficiency value	投入冗余率 Input redundancy rate (%)					产出冗余率 Output redundancy rate (%)				
		第一产业从业人员 Employees in the primary industry	粮食播种面积 Grain sown area	农业机械总动力 Total power of agricultural machinery	农药使用量 Pesticides usage	化肥折纯量 Chemical fertilizer application	农膜使用量 Agricultural film usage	碳排放量 Carbon emissions	农业面源污染 Agriculture non-point source pollution	粮食产量 Grain yield	生态价值 Ecological value
安徽 Anhui	0.8139	−11.87	−1.97	−35.01	0.00	−30.69	−4.77	−22.42	0.00	0.00	0.00
天津 Tianjin	0.7453	−9.88	0.00	−45.66	0.00	−7.07	−45.78	−24.94	−14.83	0.00	0.00
山东 Shandong	0.6407	−49.39	0.00	−37.90	−33.37	−14.68	−53.15	−24.11	−4.06	0.00	0.00
湖北 Hubei	0.6069	−41.69	0.00	−36.94	−19.71	−50.97	−12.09	−42.04	−39.74	0.00	0.00
内蒙古 Inner Mongolia	0.5791	−32.93	−8.19	−21.50	0.00	−46.13	−56.08	−38.76	−24.82	0.00	0.00
辽宁 Liaoning	0.5704	−69.21	0.00	−15.69	−42.16	−18.69	−73.52	−38.23	−6.72	0.00	0.00
河北 Hebei	0.5677	−59.46	0.00	−49.33	−27.69	−36.41	−44.14	−42.57	−7.16	0.00	0.00
山西 Shanxi	0.4176	−79.61	−18.63	−22.75	−47.22	−58.99	−70.82	−53.93	−11.38	0.00	0.00
浙江 Zhejiang	0.3992	−65.13	0.00	−55.83	−70.04	−35.60	−70.54	−69.82	−26.45	0.00	0.00
广东 Guangdong	0.3757	−70.95	−6.03	−48.46	−59.04	−71.68	−37.70	−68.27	−74.99	0.00	0.00
陕西 Shaanxi	0.3720	−81.20	−24.49	−55.69	0.00	−80.47	−65.54	−75.87	−48.47	0.00	0.00
广西 Guangxi	0.3685	−76.53	−14.12	−64.94	−47.05	−74.10	−46.34	−67.66	−33.35	0.00	0.00
新疆 Xinjiang	0.3488	−76.77	−2.05	−55.62	−31.18	−71.09	−92.12	−76.16	0.00	0.00	0.00
福建 Fujian	0.3140	−74.41	0.00	−54.45	−66.44	−71.45	−79.19	−76.18	−60.48	0.00	0.00
云南 Yunnan	0.3127	−85.80	−17.78	−54.93	−60.26	−67.73	−79.17	−67.05	−32.51	0.00	0.00
甘肃 Gansu	0.3052	−81.06	−21.83	−54.37	−64.73	−48.98	−91.47	−68.80	0.00	0.00	0.00
北京 Beijing	0.2346	−89.99	−14.31	−70.27	−76.57	−69.03	−90.96	−75.84	−60.83	0.00	0.00
海南 Hainan	0.1610	−93.26	−32.08	−79.94	−92.81	−84.85	−91.99	−87.68	−30.27	0.00	0.00
青海 Qinghai	0.1083	−47.39	35.71	−52.69	0.00	−25.08	−62.94	−41.98	0.00	0.00	0.00
总体 Nationwide	0.4338	−62.98	−10.38	−48.00	−38.86	−50.72	−61.49	−55.91	−25.06	0.00	0.00
东北地区 Northeast China	0.5704	−69.21	0.00	−15.69	−42.16	−18.69	−73.52	−38.23	−6.72	0.00	0.00
东部地区 Eastern China	0.4234	−65.96	−8.55	−55.28	−47.33	−52.36	−64.33	−60.59	−36.39	0.00	0.00
中部地区 Central China	0.6128	−44.39	−6.87	−31.57	−22.31	−46.88	−29.23	−39.46	−17.04	0.00	0.00
西部地区 Western China	0.3421	−68.81	−17.74	−51.39	−29.03	−59.08	−70.52	−62.33	−19.88	0.00	0.00

本表只包含平均粮食绿色全要素生产率相对无效的19个省市; 东部地区包括北京、天津、河北、浙江、福建、山东、广东和海南; 中部地区包括山西、安徽和湖北; 西部地区包括内蒙古、广西、云南、陕西、甘肃、青海和新疆; 东北地区为辽宁。This table only includes 19 provinces and cities whose average grain green total factor productivity is relatively invalid; the eastern region includes Beijing, Tianjin, Hebei, Zhejiang, Fujian, Shandong, Guangdong and Hainan; the central region includes Shanxi, Anhui and Hubei; and the western region includes Inner Mongolia, Guangxi, Yunnan, Shaanxi, Gansu, Qinghai and Xinjiang; the northeast region is Liaoning.

状发生改变、土壤结构遭到破坏、危害作物生长, 从而造成粮食作物减产; 再者是农业面源污染和碳排放, 冗余率较高的省份主要集中在广东、福建、海南、广西、陕西等东部和西部地区, 尤其是东部沿海发达地区, 随着农业产业集约化程度不断提升, 较高的化肥、农膜使用冗余率造成了碳排放增多, 加上特殊的地理自然条件, 较高的化肥、农膜流失率导致面源污染问题严重。总体而言, 各投入产出

指标对不同地区产生的影响程度存在差异, 东北地区 (第一产业从业人员、农膜使用量和农药使用量)、东部地区 (第一产业从业人员、农膜使用量、碳排放量)、中部地区 (化肥折纯量、第一产业从业人员和碳排放量)、西部地区 (农膜使用量、第一产业从业人员、碳排放量) 应从相应方面改善农业发展模式, 从而因地制宜地提升粮食的绿色生产效率。

2.4　粮食绿色全要素生产率空间关联性分析

为研究我国粮食绿色全要素生产率空间集聚情况, 运用等距离法选取 6 个年份, 借助 GeoDa 软件建立 Queen 一阶权重矩阵, 通过重复随机排列法计算莫兰全局自相关指数 (Moran's *I*) 和其检验值。

从表 6 可知, 综合效率的全局莫兰指数在 1997 年、2001 年不显著, 从 2005—2019 年, 综合效率的莫兰指数通过显著性检验, 处于 0.16~0.25, 说明从 2005 年起我国粮食绿色全要素生产率具有显著的空间正相关性, 表现出较为明显的空间集聚特征, 且空间集聚性在不断增强。

为了表现局部空间集聚特性, 运用综合效率和其滞后向量建立坐标系, 由于 2005 年前全局莫兰指数不显著, 故此处绘制 2005 年、2009 年、2013 年和 2019 年共 4 个年份的 Local Moran's *I* 散点图 (图 2), 以探究各年份局部空间类型。其中, 呈空间正相关

表 6　1997—2019 年中国粮食绿色全要素生产率莫兰全局自相关指数和检验值

Table 6　Moran's *I* global autocorrelation index and test value of grain green total factor productivity in China from 2005 to 2019

年份 Year	莫兰指数 Moran's *I*	*P*	*Z*
1997	−0.01	0.37	0.23
2001	0.11	0.09	1.33
2005	0.16	0.04	1.85
2009	0.19	0.02	2.19
2013	0.19	0.02	2.14
2019	0.25	0.01	2.75

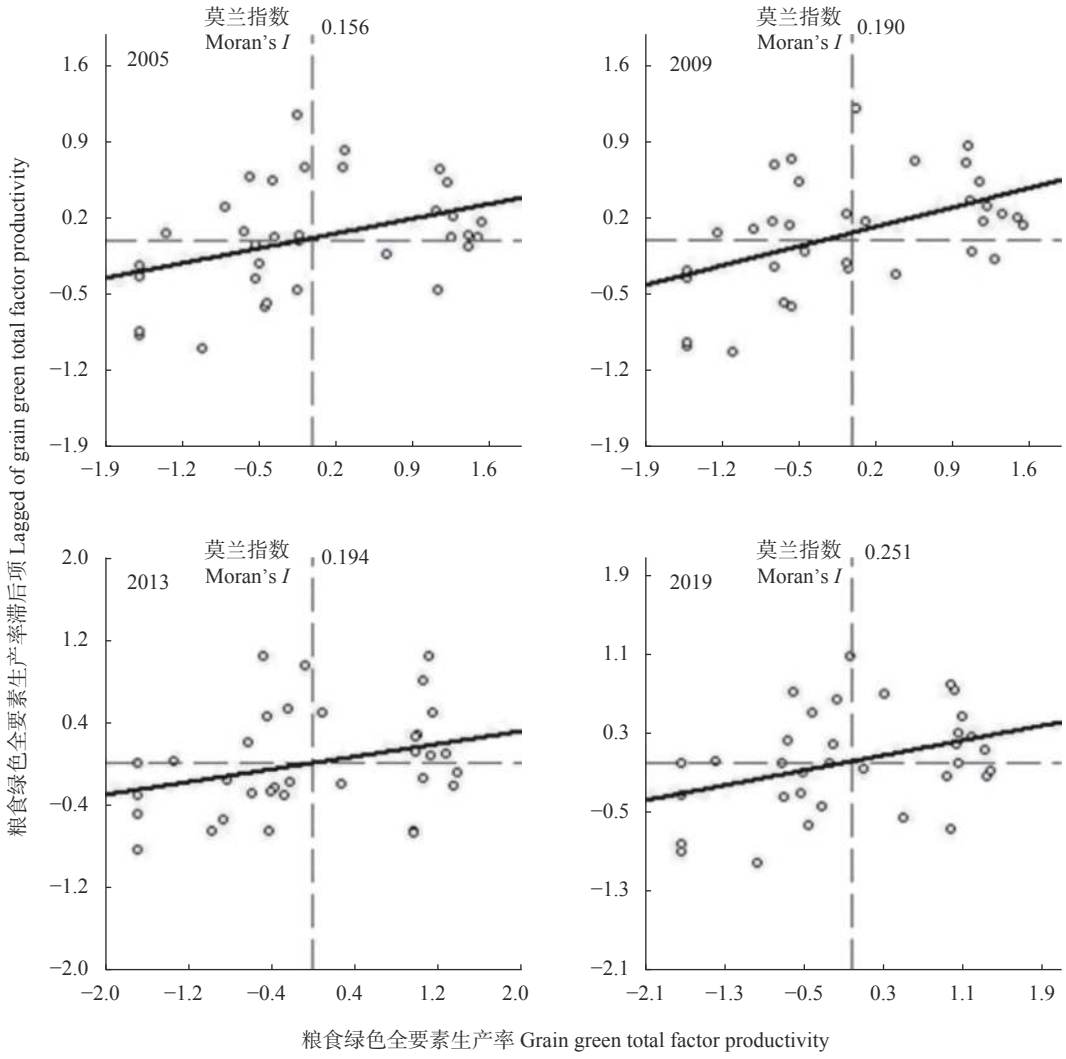

图 2　1997—2019 年中国粮食绿色全要素生产率莫兰散点图

Fig. 2　Moran scatter chart of grain green total factor productivity in China from 2005 to 2019

的一、三象限分别代表高-高、低-低聚类, 而呈空间负相关的二、四象限分别代表低-高和高-低聚类。通过分析可知, 2005 年和 2019 年处于空间正相关的省份占总样本的 64.52% 和 74.19%, 表明我国粮食绿色全要素生产率的局部空间异质性在逐渐减小, 空间集聚程度不断增强。

为了进一步探究局部范围的空间集聚情况, 采用 LISA 集聚分析研究各省市的空间集聚类型。由表 7 可知, 研究期内存在明显空间相关性的省份较少, 同时集聚性较强的省份较为稳定地分布在我国中西部和南部地区。从集聚类型来看, 主要以湖北、重庆、贵州等中部和西南地区的高-高集聚为主, 表明我国粮食绿色生产主要呈现出高效率区域集聚的特征, 这些地区与周边省份的粮食生产活动联系密切, 高聚集中心对区域综合效率发挥着辐射带动作用, 其中重庆、贵州的空间集聚稳定性最高。因此, 同为西南地区的云南在 2005 年呈低-高集聚的特征, 湖北在中间 3 个年份也呈现相同聚类。同时, 由于临近沿海发达地区, 2009 年到 2019 年海南成为唯一的低-低集聚省份。

表 7 2005—2019 年中国粮食绿色全要素生产率 LISA 集聚类型

Table 7 LIAS agglomeration types of grain green total factor productivity of China from 2005 to 2019

集聚类型 Agglomeration type	2005	2009	2013	2019
高-高集聚 High-high	重庆、贵州 Chongqing, Guizhou	重庆、贵州 Chongqing, Guizhou	贵州 Guizhou	重庆、湖北 Chongqing, Hubei
低-高集聚 Low-high	云南、湖北 Yunnan, Hubei	湖北 Hubei	湖北 Hubei	—
低-低集聚 Low-low	—	海南 Hainan	海南 Hainan	海南 Hainan

3 结论与讨论

3.1 结论建议

本文通过生态价值评价模型分析了我国 1997—2019 年各省 (市) 耕地在粮食生产过程中产生的生态价值情况, 并构建粮食绿色全要素生产率的投入产出指标体系, 运用超效率 SBM 模型和 GML 指数测度我国综合效率、技术效率及技术进步情况, 同时针对效率相对无效区, 结合投入产出松弛量找寻损失原因和提升路径, 最后运用空间相关性分析揭示我国粮食绿色全要素生产率在时空上的演变特征, 得到以下结论: 1) 我国粮种生态价值高值区域集聚于东北和中部地区。粮食生产的生态价值在研究期内降低 0.39%, 损失 25.41 亿元。其中东北和中部地区分别增加 254.10 亿元和 268.08 亿元。受限于自然条件限制, 西部地区的粮种生态价值减少 95.15 亿元; 并且伴随市场需求和经济效益的导向, 东部地区逐渐出现耕地不同程度的“非粮化”和“非农化”现象, 种粮面积的缩减导致粮种生态价值减少 452.44 亿元。2) 通过粮种环境影响分析, 发现不考虑环境因素的传统全要素生产率往往会忽略粮食生产活动的正负外部性, 无法准确评估我国粮食生产的真实效率水平。本文在考虑粮种生态价值、农业面源污染等环境因素后, 除技术效率外, 我国平均综合效率在研究期内均表现出提升态势, 提升原因主要得益于技术进步。并且由于自然资源禀赋、粮食增产模式差异, 东北和东部地区要优于中西部地区; 综合效率的相对有效省 (市) 占比从 1997 年的 9.68% 提升至 2017 年的 67.74%; 在时空上显现出以东部沿海发达地区为主, 并逐期向东北-中部-西北发展的变化格局。3) 由于污染排放高、资源消耗强度大, 我国综合效率相对无效省 (市) 占比平均达 61.29%, 其平均效率值为 0.4338, 在非期望产出和投入方面均存在不同程度的冗余。从总体来看, 我国粮食绿色全要素生产率损失的主要原因为第一产业从业人员 (−69.21%)、农膜使用量 (−61.49%) 和碳排放量 (−55.91%) 存在冗余。4) 我国粮食绿色全要素生产率具有以高-高集聚主导的显著空间正相关性, 并从 2005 年开始表现出逐年增强的特征。同时, 以湖北、重庆、贵州等中部和西南地区主导的高-高集聚区, 其粮食绿色生产效率的扩散效应显著, 对临近地区综合效率的改善具有较强的辐射带动能力。

通过上述分析, 本文认为: 1) 要进一步完善绿色发展背景下粮食生产效率的评价体系, 除经济价值评价外, 还应该重视粮种生态价值的变化。耕地在粮种过程中产生了大量的生态价值, 农地功能的弱化将威胁到资源的可持续利用, 因此要充分认识到粮食生产的正负外部性。城市发展过程中将不可避免会占用到一定的耕地资源, 尤其是东部地区经济较为发达的省份, 伴随市场化过程中经济作物价格的比较优势, 耕地“非农非粮化”程度日益加剧, 如果不严加管控, 将在一定程度上威胁到我国的粮食安全。特别是在新冠疫情背景下, 面对国际农产品市场供应的不确定性, 维持一定的粮种面积是保证谷物绝对自给、口粮绝对安全的前提。必须充分认识到我国耕地总量少、水热资源不均和后备资源不足的现实, 不能单纯地以经济效益导向决定耕地的用

途, 应将有限的耕地资源优先保证粮食生产, 坚决杜绝耕地“非粮化”和“非农化”现象, 增强粮食产品的有效供给。在大力防止农业污染的基础上, 建立完善的耕地保护机制, 重视耕地生态功能价值, 维持一定粮种面积, 进一步加强耕地生态系统的稳定性和完整性。2) 由于技术进步的驱动, 近年来我国粮食绿色全要素生产率得到了一定增长, 但仍要认识到, 还有部分省份的效率值处于相对无效状态, 这意味着技术效率的拉动作用还有待提升。因此, 要加强农业技术普及, 降低粮种成本, 激发农户积极性。粮食绿色全要素生产率在时序上表现出逐渐增强的空间集聚性, 尤其是中西部地区的技术带动作用逐渐显现, 建议进一步发挥以重庆、贵州和湖北为中心的生产效率高值区的辐射带动作用, 打通先进粮种技术的传播通道, 在加大农业基础设施建设和生产机械补贴的同时, 还要依据不同粮食生产功能区的粮产情况, 给予相适应的地方财政补助, 努力降低农业生产成本, 激发农民的种粮积极性。3) 从我国粮食绿色全要素生产率的冗余率情况来看, 限制因素多集中于第一产业从业人员、农膜使用量和碳排放量。因此, 面对我国当前农业经济发展要求和资源环境约束, 应关注提效减排和乡村高级人力资本积累。一方面, 要注重资源利用效率和污染物排放量的控制; 另一方面, 依托城镇化和农业现代化发展, 进一步引导农村剩余劳动力转移就业, 面对农村劳动力老龄化、知识水平低等问题, 依照产业振兴和科技兴农要求, 降低农村受教育门槛, 改善农教农服质量, 加大效率高值区人才向其他地区转移的政策支持力度, 加强高质量农村人力资本的累积, 同时通过农民职业化推动农业产业化、规模化发展, 建立农民增收长效机制。

3.2　讨论

本研究探讨了我国粮食绿色全要素生产率的时空动态特征, 为绿色发展背景下粮食生产效率的提升路径提供了决策依据。与已有的研究相比, 因未考虑粮种生态价值, 田旭等[35] 和张利国等[36] 计算的生产效率值略低于本研究的评价结果, 但变化趋势和驱动因素相类似。同时, 当前粮食绿色全要素生产率测算的指标选取依据尚不统一, 产出指标多以单一的粮食产量为主。随着生态经济理论的发展, 有必要将更多相关的生态指标纳入到核算体系中, 从而增强研究的科学性与精准性。并且本文的研究仍存在一些限制与不足, 有待进一步的讨论: 1) 本文考量了粮种过程中的生态价值及产生的环境负效应, 进一步丰富了粮食绿色全要素生产率的评价体系。但受限于长时段的宏观研究视角, 无法更为细致地测算各地区的生态价值差异, 需要进一步从微观尺度完善加强。2) 本文从静态视角通过超效率 SBM 模型解决了决策单元有效但无法评价的限制, 从动态视角通过 GML 指数拆分了技术效率和技术进步的内部变化情况, 但粮食绿色全要素生产率的变化同时受到多种外在客观因素的共同影响, 对于宏观政策和技术环境的影响机制研究还有待深入。

参考文献　References

[1] 贾娟琪, 孙致陆, 李先德. 粮食价格支持政策提高了我国粮食全要素生产率吗?——以小麦最低收购价政策为例[J]. 农村经济, 2019, (1): 67−72
JIA J Q, SUN Z L, LI X D. Has the grain price support policy increased China's grain total factor productivity? — Take the lowest purchase price policy for wheat as an example[J]. Rural Economy, 2019, (1): 67−72

[2] STEFAN S. Economics of life cycle assessment: inefficiency of the present approach[J]. Business Strategy and the Environment, 1997, 6(1): 1−8

[3] 李金算. 国内外绿色生产力的理论与实践综述[J]. 中国科技论坛, 2005, (5): 109−113
LI J S. Theory and practice of green productivity at home and abroad[J]. China Science and Technology Forum, 2005, (5): 109−113

[4] 李学林, 李隆伟, 董晓波, 等. 云南省粮食全要素生产率分解研究[J]. 农业技术经济, 2019, (10): 102−113
LI X L, LI L W, DONG X B, et al. A study on decomposition of total factor productivity of grain in Yunnan Province[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2019, (10): 102−113

[5] 魏琦, 张斌, 金书秦. 中国农业绿色发展指数构建及区域比较研究[J]. 农业经济问题, 2018, 39(11): 11−20
WEI Q, ZHANG B, JIN S Q. A study on construction and regional comparison of agricultural green development index in China[J]. Issues in Agricultural Economy, 2018, 39(11): 11−20

[6] 龚斌磊, 张书睿, 王硕, 等. 新中国成立70年农业技术进步研究综述[J]. 农业经济问题, 2020, 41(6): 11−29
GONG B L, ZHANG S R, WANG S, et al. 70 years of technological progress in China's agricultural sector[J]. Issues in Agricultural Economy, 2020, 41(6): 11−29

[7] CHARNES A W, COOPER W W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. North-Holland, 1978, 2(6): 429−444

[8] CAVES D W, CHRISTENSEN L R, DIEWERT W E. Multilateral comparisons of output, input, and productivity using superlative index numbers[J]. Economic Journal, 2002, 92(365): 73−86

[9] NKAMLEU G B. Productivity growth, technical progress and efficiency change in African agriculture[J]. African Development Review, 2004, 16(1): 203−222

[10] 侯琳, 冯继红. 基于超效率DEA和Malmquist指数的中国农业生产效率分析[J]. 河南农业大学学报, 2019, 53(2):

316−324
HOU L, FENG J H. Analysis of Chinese agricultural production efficiency based on super-efficiency DEA and Malmquist index[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2019, 53(2): 316−324

[11] 王璐, 杨汝岱, 吴比. 中国农户农业生产全要素生产率研究[J]. 管理世界, 2020, 36(12): 77−93
WANG L, YANG R D, WU B. Research on total factor productivity of Chinese farmers' agricultural production[J]. Management World, 2020, 36(12): 77−93

[12] 陈鸣, 邓荣荣. 农业R& D投入与农业全要素生产率——一个空间溢出视角的解释与证据[J]. 江西财经大学学报, 2020, (2): 86−97
CHEN M, DENG R R. Agricultural R & D input and agricultural total factor productivity: an explanation and evidence from the perspective of spatial spillover[J]. Journal of Jiangxi University of Finance and Economics, 2020, (2): 86−97

[13] 张红丽, 李洁艳. 农业技术进步、农村劳动力转移与城乡收入差距——基于农业劳动生产率的分组研究[J]. 华东经济管理, 2020, 34(1): 67−75
ZHANG H L, LI J Y. The impact of agricultural technology progress, rural labor transfer and the income gap between urban and rural areas: study and analysis on the grouping of agricultural labor productivity[J]. East China Economic Management, 2020, 34(1): 67−75

[14] HAILU A, VEEMAN T S. Environmentally sensitive productivity analysis of the Canadian pulp and paper industry, 1959–1994: an input distance function approach[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2000, 40(3): 251−274

[15] TONE K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 143(1): 32−41

[16] CHUNG Y, FARE R. Productivity and undesirable outputs: A directional distance function approach[J]. Microeconomics, 1997, 51(3): 229−240

[17] RAMANATHAN R, BLACK A, NATH P, et al. Impact of environmental regulations on innovation and performance in the UK industrial sector[J]. Management Decision, 2010, 48(10): 1493−1513

[18] 李欠男, 李谷成, 尹朝静. 农业绿色全要素生产率增长的分布动态演进[J]. 统计与信息论坛, 2020, 35(10): 119−128
LI Q N, LI G C, YIN C J. Dynamic evolution of agricultural green total factor productivity growth[J]. Statistics & Information Forum, 2020, 35(10): 119−128

[19] 孟祥海, 周海川, 杜丽永, 等. 中国农业环境技术效率与绿色全要素生产率增长变迁——基于种养结合视角的再考察[J]. 农业经济问题, 2019, 40(6): 9−22
MENG X H, ZHOU H C, DU L Y, et al. The change of agricultural environmental technology efficiency and green total factor productivity growth in China: Re-examination based on the perspective of combination of planting and breeding[J]. Issues in Agricultural Economy, 2019, 40(6): 9−22

[20] 熊鹰, 何鹏. 绿色防控技术采纳行为的影响因素和生产绩效研究——基于四川省水稻种植户调查数据的实证分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(1): 136−146
XIONG Y, HE P. Impact factors and production performance of adoption of green control technology: an empirical analysis based on the survey data of rice farmers in Sichuan Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(1): 136−146

[21] 杜江, 罗珺, 王锐, 等. 粮食主产区种植业碳功能测算与时空变化规律研究[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(10): 1242−1251
DU J, LUO J, WANG R, et al. The estimation and analysis of spatio-temporal change patterns of carbon functions in major grain producing area[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(10): 1242−1251

[22] 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 Q P, PU L J. Spatiotemporal variation of fertilizer utilization and its eco-economic rationality in major grain production areas of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(23): 142−150

[23] 谭术魁, 韩思雨, 张路. 粮食安全视角下粮食主产区耕地休耕规模及动态仿真研究[J]. 中国土地科学, 2020, 34(2): 9−17
TAN S K, HAN S Y, ZHANG L. Study on fallow scale and dynamical simulation of major grain producing areas in China from the food security perspective[J]. China Land Science, 2020, 34(2): 9−17

[24] 王雪蕾, 王新新, 朱利, 等. 巢湖流域氮磷面源污染与水华空间分布遥感解析[J]. 中国环境科学, 2015, 35(5): 1511−1519
WANG X L, WANG X X, ZHU L, et al. Remote sensing analysis of nitrogen and phosphorus non-point source pollution and spatial distribution of water bloom in Chaohu Lake Basin[J]. China Environmental Science, 2015, 35(5): 1511−1519

[25] 尚杰, 吉雪强, 陈玺名. 中国城镇化对农业生态效率的影响——基于中国13个粮食主产区2009—2018年面板数据[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(8): 1265−1276
SHANG J, JI X Q, CHEN X M. Study on the impact of China's urbanization on agricultural ecological efficiency: Based on panel data of 13 major grain-producing regions in China from 2009 to 2018[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(8): 1265−1276

[26] 高鸣, 宋洪远, Michael Carter. 补贴减少了粮食生产效率损失吗?——基于动态资产贫困理论的分析[J]. 管理世界, 2017, (9): 85−100
GAO M, SONG H Y, CARTER M. Does subsidies reduce the loss of food production efficiency? — An analysis based on the theory of dynamic asset poverty[J]. Management World, 2017, (9): 85−100

[27] 胡雪枝, 钟甫宁. 农村人口老龄化对粮食生产的影响——基于农村固定观察点数据的分析[J]. 中国农村经济, 2012, (7): 29−39
HU X Z, ZHONG F N. The impact of rural population aging on food production: An analysis based on rural fixed observation point data[J]. Chinese Rural Economy, 2012, (7): 29−39

[28] 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 H P, ZHU Q Q, PAN L X, et al. The dynamic evolution and spatial differentiation of farmland ecosystem service value in main grain producing areas[J]. Statistics & Decision, 2020, 36(4): 49−52

[29] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387(6630): 253−260

[30] 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 G D, ZHANG C X, ZHANG L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1243−1254

[31] 潘丹. 考虑资源环境因素的中国农业生产率研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012
PAN D. Research on China's agricultural productivity considering resource and environmental factors[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012

[32] 谭忠昕, 郭翔宇. 基于超效率DEA模型的中国粮食生产用水效率评价[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 280−288
TAN Z X, GUO X Y. Evaluation of water use efficiency for grain production in China based on super efficiency DEA model[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 280−288

[33] 石华平, 易敏利. 环境规制、非农兼业与农业面源污染——以化肥施用为例[J]. 农村经济, 2020, (7): 127−136
SHI H P, YI M L. Environmental regulation, non-agricultural concurrent operations and agricultural non-point source pollution: Taking chemical fertilizer application as an example[J]. Rural Economy, 2020, (7): 127−136

[34] 陈柔, 何艳秋, 朱思宇, 等. 我国农业碳排放双重性及其与经济发展的协调性研究[J]. 软科学, 2020, 34(1): 132−138
CHEN R, HE Y Q, ZHU S Y, et al. Duality of agricultural carbon emissions and coordination with economic development in China[J]. Soft Science, 2020, 34(1): 132−138

[35] 田旭, 王善高. 中国粮食生产环境效率及其影响因素分析[J]. 资源科学, 2016, 38(11): 2106−2116
TIAN X, WANG S G. Environmental efficiency and its determinants regarding China's grain production[J]. Resources Science, 2016, 38(11): 2106−2116

[36] 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[J]. 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[J]. Economic Geography, 2016, 36(3): 147−152

[37] 望晓东. 广东农地非农化效率测度及其影响因素研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2018
WANG X D. The research on measurement and analysis of influence factors of agricultural land conversion efficiency in Guangdong Province[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2018