

黄淮海5省粮食生产碳排放效率空间分异及动态演变

苗青¹, 翟一杰², 胡路路¹

(1. 山东师范大学 地理与环境学院, 山东 济南 250358; 2. 山东省宏观经济研究院, 山东 济南 250014)

摘要: [目的] 探究“双碳”目标背景下黄淮海5省74市粮食生产碳排放效率并量化其空间分异及动态演变, 旨在分析黄淮海5省粮食生产碳排放效率现状, 促进黄淮海5省粮食绿色低碳生产。[方法] 采用碳排放系数法和三阶段超效率SBM模型分别测算2011—2020年黄淮海5省74市粮食生产碳排放及碳排放效率, 借助泰尔指数和核密度估计探究粮食生产碳排放效率的空间分异及动态演变。[结果] ①研究期内, 黄淮海5省市域粮食生产碳排放呈“M”型波动下降趋势, 但下降缓慢; 其中, 化肥使用是导致粮食碳排放的主要原因。②黄淮海5省市域粮食生产碳排放效率呈先降后升的演变趋势, 第一阶段效率均值为0.59, 剔除环境变量和随机误差对效率值的影响, 第三阶段效率均值为0.48, 较第一阶段效率值下降18.6%; 其中, 滁州、驻马店、德州等地效率值较高, 而黄山、威海等地效率值较低。③粮食生产碳排放效率空间差异呈上升趋势, 区域内差异是影响总体差异的主要因素, 其中河南省各市差异最为显著。④样本考察期内, 核密度曲线由“单峰状”向“双峰状”转变, 主峰呈波动上升且轻微右移趋势, 侧峰隆起幅度较小, 表明黄淮海5省粮食生产碳排放效率整体水平提高, 地区差异增大, 并呈多极化趋势发展。[结论] 黄淮海5省粮食生产碳排放效率整体水平较低, 有明显的空间分异特征, 未来各地区应减少化肥等物资投入, 并采用“对口帮扶”策略, 促进各地区粮食生产技术良性互动, 以缩小区域间粮食生产碳排放效率地区差异。

关键词: 粮食生产碳排放效率; 三阶段超效率SBM模型; 空间分异; 动态演变; 黄淮海地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)01-0389-10

中图分类号: X322, F323

文献参数: 苗青, 翟一杰, 胡路路. 黄淮海5省粮食生产碳排放效率空间分异及动态演变[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 389-398. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20240019.002; Miao Qing, Zhai Yijie, Hu Lulu. Spatial differentiation and dynamic evolution of carbon emission efficiency of grain production in five provinces of Huang-Huai-Hai region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 389-398.

Spatial Differentiation and Dynamic Evolution of Carbon Emission Efficiency of Grain Production in Five Provinces of Huang-Huai-Hai Region

Miao Qing¹, Zhai Yijie², Hu Lulu¹

(1. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250358, China; 2. Shandong Academy of Macroeconomic Research, Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract: [Objective] The carbon emission efficiency of grain production was determined for 74 cities in the five provinces of Huang-Huai-Hai region, and spatial differentiation and dynamic evolution were quantified in light of the “double carbon” goals development strategy and goals. The current situation of carbon emission efficiency of grain production in the five provinces of Huang-Huai-Hai region was analyzed in order to promote green and low-carbon grain production in the region. [Methods] The carbon emission coefficient method and the three-stage super-efficiency SBM model were used to measure carbon emissions and carbon emission efficiencies of grain production for 74 cities in the five provinces of Huang-Huai-Hai region from 2011 to 2020. The spatial differentiation and dynamic evolution of carbon emission efficiency of grain production were then determined by means of the Theil index and kernel density estimation. [Results]

① Carbon emissions of grain production in the five provinces and cities of Huang-Huai-Hai region during the

收稿日期: 2023-05-18

修回日期: 2023-08-09

资助项目: 山东省高等学校“青创团队计划”基金资助项目“‘双碳’目标下山东省重点行业减污降碳协同增效优化路径研究”(2022RW063)

第一作者: 苗青(1996—), 女(汉族), 山东省潍坊市人, 硕士研究生, 主要研究方向为经济地理与区域可持续发展。Email: 1028186578@qq.com.

通信作者: 翟一杰(1996—), 女(汉族), 山东省济南市人, 博士, 助理研究员, 主要从事宏观经济与资源环境的研究。Email: zhaiyijiehy@126.com.

study period showed a fluctuating downward trend with an “M” shape, but the decline was slow. The use of chemical fertilizers was the main cause of grain carbon emissions. ② The carbon emission efficiency of grain production in the five provinces and cities of Huang-Huai-Hai region initially decreased and then increased. The average efficiency of the first stage was 0.59. Excluding the influence of environmental variables and random errors on the efficiency value, the average efficiency of the third stage was 0.48, which was 18.6% lower than the efficiency value of the first stage. Chuzhou, Zhumadian, Dezhou, and other cities had higher efficiency values, while Huangshan, Weihai, and other cities had lower efficiency values. ③ The spatial differences of the carbon emission efficiency of grain production was on the rise, and the differences within the region were the main factor affecting the overall difference, among which the difference between cities in Henan Province was the most significant. ④ During the sample investigation period, the core density curve changed from a “single-peak shape” to a “double-peak shape” where the main peak showed a fluctuating rise and a slight shift to the right, and the secondary peak maximum was smaller, indicating that the overall level of carbon emission efficiency of grain production in the five provinces of Huang-Huai-Hai region had increased, regional differences had increased, and the region showed a multi-polar trend. [Conclusion] The overall level of carbon emission efficiency of grain production in the five provinces of Huang-Huai-Hai region was low, and there were obvious spatial differentiation characteristics. In the future, all regions should reduce the input of materials such as chemical fertilizers, and adopt the strategy of “counterpart assistance” to promote the positive interaction of grain production technology in various regions so as to narrow regional differences in the carbon emission efficiency of grain production among regions.

Keywords: carbon emission efficiency of grain production; three-stage super-efficiency SBM model; spatial differentiation; dynamic evolution; Huang-Huai-Hai region

“务农重本,国之大纲”,农业是国民经济发展的基础产业^[1],但其生产过程导致的碳排放也不容忽视。IPCC 第五次评估报告指出,农业已成为全球温室气体第二大排放源^[2]。粮食生产作为农业生产的核心部分,对于农业低碳发展具有重要意义。研究发现,粮食系统温室气体排放占全球人为温室气体排放总量的三分之一,其中,粮食种植过程所导致的碳排放高达 70%以上^[3]。黄淮海 5 省作为中国重要的粮食生产基地,为保障国家粮食安全做出了重大贡献,但黄淮海 5 省粮食生产对化肥、农药等农用物资的依赖程度较高,面临较大的碳减排压力。基于“双碳”目标背景下,准确测度黄淮海 5 省粮食生产碳排放效率,并量化其空间差异及动态演变,有助于缓解黄淮海 5 省粮食增产与减排的矛盾,为促进黄淮海 5 省粮食低碳生产提供数据支撑与理论依据。

目前,学术界围绕粮食生产碳排放效率的研究主要侧重于粮食碳排放效率评价、空间分异、动态演变等方面。粮食碳排放效率评价方面,鲁庆晓等^[4]、Wu Haoyue 等^[5]、李雪等^[6]从国家、区域、省域不同尺度展开研究,发现中国各地粮食生产碳排放效率水平呈增长态势,但整体水平较低,各要素投入冗余较高。另外,效率测度方法主要有随机前沿分析^[7]、超效率 SBM(super slack-based measure)模型^[8]、Malmquist 指数模型^[9]、三阶段超效率 SBM 模型^[10]等。其中,

三阶段超效率 SBM 模型能够排除环境变量和随机误差对效率值的影响,提高粮食碳排放效率测度结果的精确度。空间分异方面,艾主河^[11]、李倩娜等^[12]基于泰尔指数、基尼系数方法探究粮食碳排放效率的空间分异,研究发现,各地区粮食生产碳排放效率存在明显的地区差异。动态演变方面,张源^[13]采用核密度估计法对粮食生产碳排放效率的动态演变展开研究,发现各地区粮食生产碳排放效率的核密度曲线波峰上升并呈右移的趋势。

纵观现有研究,针对粮食生产碳排放效率研究较为丰富,但仍存在一定局限性,如研究尺度多从国家、省域等宏观层面开展,在效率测度方面较少考虑环境因素对效率值的影响等。因此,本文首先运用三阶段超效率 SBM 模型剔除环境变量和随机误差对效率值的影响,对黄淮海地区 5 省市域粮食生产碳排放效率进行测度,并基于测度结果,利用泰尔指数、核密度估计方法对其地区差异及动态演变方面展开探究,以期黄淮海 5 省粮食绿色低碳生产提供科学依据。

1 研究区概况

黄淮海地区位于中国大陆中东部,秦岭—淮河以北,地处 36°—42°N, 114°—121°E,主要包含河北、山东、河南、安徽、江苏、北京、天津 7 个省、直辖市(见图 1),是中国重要的“粮仓”。

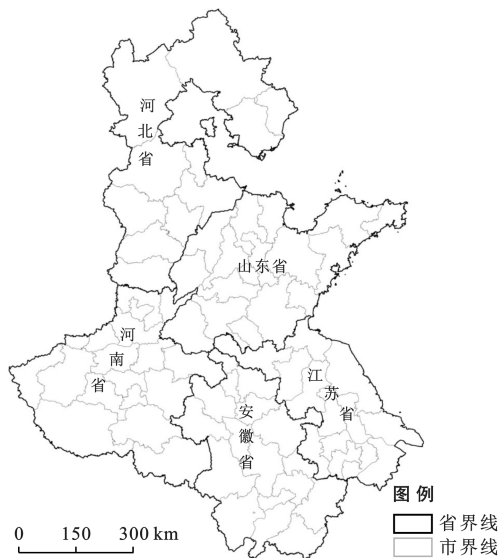


图 1 黄淮海 5 省区位图

Fig.1 Map of five provinces of Huang-Huai-Hai region

由于数据获取原因,本文选择河北、山东、河南、安徽、江苏 5 省作为研究区,未将北京、天津纳入研究范围,因此,本文将研究区域定位于黄淮海 5 省(河北、

山东、河南、安徽、江苏)。黄淮海 5 省地势平坦,降水充沛,2020 年黄淮海 5 省年均降水量 1 018.64 mm,年均气温 15.18 ℃,适宜的气候、地形及优渥的自然资源为粮食生产提供了有利条件,使得黄淮海 5 省成为我国主要的粮食生产基地。2020 年,黄淮海 5 省粮食播种面积达 $3.81 \times 10^7 \text{ hm}^2$,占全国粮食播种面积的 32.6%,粮食产量达 $2.38 \times 10^8 \text{ t}$,占全国粮食产量的 35.6%。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 粮食碳排放核算方法 关于粮食生产碳排放的测算,参考李波等^[14]、田云等^[15]的相关研究,选取化肥、农药、农膜、农用柴油、土地翻耕、农业灌溉这 6 个指标作为粮食生产碳排放来源。根据中外实验室发布的农业生产要素碳排放系数,基于 IPCC 碳排放系数法测度黄淮海 5 省各市农业生产碳排放,各要素碳排放系数及来源见表 1。随后按照粮食播种面积与农作物播种面积占比,测算各市粮食生产过程中的碳排放总量,相关计算过程见式(1)。

表 1 农业碳排放源、系数及来源

Table 1 Sources, coefficients and sources of agricultural carbon emissions

碳源	碳源投入说明	碳排放系数	碳排放系数来源
化肥	化肥折纯量/ 10^4 t	0.895 6 kg/kg	West T. O. ^[16] ,美国橡树岭国家实验室 ^[17]
农药	农药施用量/ 10^4 t	4.934 1 kg/kg	美国橡树岭国家实验室 ^[17]
农膜	农膜使用量/ 10^4 t	5.18 kg/kg	南京农业大学农业资源与生态环境研究所 ^[18]
柴油	柴油使用量/ 10^4 t	0.592 7 kg/kg	IPCC 联合国气候变化政府间专家委员会 ^[19]
翻耕	农作物播种面积/ 10^3 hm^2	312.6 kg/ km^2	中国农业大学生物与技术学院 ^[20]
农业灌溉	有效灌溉面积/ 10^3 hm^2	20.476 kg/ hm^2	Dubey A.等 ^[21]

粮食生产碳排放估算公式为:

$$E_t = \frac{G_t}{N_t} \sum E_i = \frac{G_t}{N_t} \sum T_i \times \delta_i \quad (1)$$

式中: E_t 为 t 市粮食生产碳排放总量(10^4 t); G_t 为 t 市粮食种植面积(10^3 hm^2); N_t 为 t 市农作物播种面积(10^3 hm^2); E_i 为 i 种碳源的碳排放量(10^4 t); T_i 为 i 种碳源消耗量(各碳源消耗量单位见表 1); δ_i 为 i 种碳源碳排放系数。

2.1.2 三阶段超效率 SBM 模型 本文基于三阶段超效率 SBM 模型对黄淮海 5 省的粮食生产碳排放效率进行测度。SBM 模型弥补了传统 DEA 模型在松弛性投入和产出方面的不足,解决了非期望产出状态下效率的评价问题,可以有效地剔除环境变量和随机误差对效率值的影响^[22]。利用三阶段超效率 SBM 模型进行测度的具体步骤如下:

(1) 超效率 SBM 模型。

传统 DEA 模型无法测度非期望产出对效率的影响,且忽视了对多个有效决策单元 DMUs 的对比^[23]。因此,Tone 对 DEA 模型进行改进,提出了考虑非期望产出的非径向、非角度的 DEA 方法,即超效率 SBM 模型^[24],具体如下:

设 n, m, r_1, r_2 分别为粮食生产过程中的决策单元 DMUs、投入指标、期望产出指标、非期望产出指标的个数(个), x, y^d, y^u 分别为投入、期望产出和非期望产出要素。其中, $x \in R^m, y^d \in R^{r_1}, y^u \in R^{r_2}$ 。其中 $x = [x_1 \cdots x_n] \in R^{m \times n}; y^d = [y_1^d \cdots y_n^d] \in R^{r_1 \times n}; y^u = [y_1^u \cdots y_n^u] \in R^{r_2 \times n}$;超效率 SBM 模型公式^[25]为:

$$\min \rho = \frac{(1/m) \sum_{i=1}^m \bar{x}/x_{ik}}{[1/(r_1+r_2)] (\sum_{s=1}^{r_1} \bar{y}^d/y_{sk}^d + \sum_{q=1}^{r_2} \bar{y}^u/y_{qk}^u)} \quad (2)$$

$$s.t. \begin{cases} \bar{x} \geq \sum_{j=1, \neq k}^n x_{ij} \lambda_j; \\ \bar{y}^d \leq \sum_{j=1, \neq k}^n y_{sj}^d \lambda_j; \\ \bar{y}^u \geq \sum_{j=1}^n y_{qj}^u \lambda_j; \\ \bar{x} \geq x_k; \bar{y}^d \leq y_k^d; \bar{y}^u \geq y_k^u; \\ \lambda_j > 0, i=1, 2 \dots m; j=1, 2 \dots n; \\ j \neq 0, s=1, 2 \dots r_1; q=1, 2 \dots r_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: ρ 为决策单元的粮食生产碳排放效率值; \bar{x} , \bar{y}^d , \bar{y}^u 分别为投入、期望产出、非期望产出冗余量; λ_j 为权重向量。

(2) 随机前沿模型 SFA。

构建类似随机前沿模型(SFA)剔除环境因素和随机噪声对效率值的影响。本文运用 SFA 模型对第一阶段粮食生产碳排放效率测度的投入松弛量 and 环境变量进行拟合。首先对变量进行回归剥离,公式为:

$$s_{ik} = f^i(z_p; \beta_q) + \nu_{ik} + \mu_{ik} \quad (4)$$

式中: s_{ik} 是第 i 项第 k 个决策单元投入的松弛变量; z_p 为环境变量; β_q 为环境变量系数; $\nu_{ik} + \mu_{ik}$ 为混合误差项; ν_{ik} 为随机误差项。

然后,选定有效决策单元,规避外部环境对数据造成的干扰。按照下式对投入指标数值进行调整:

$$x'_{ik} = x_{ik} + [\max f^i(z_p; \beta_q)] + [\max(\nu_{ik}) - \nu_{ik}] \quad (5)$$

式中: x'_{ik} 为剔除环境和随机因素的投入要素值; x_i 表示调整前的投入量, $[\max f^i(z_p; \beta_q)]$ 是调整的外部环境因素; $[\max(\nu_{ik}) - \nu_{ik}]$ 用来优化随机因素。经过上述处理后,各地市粮食生产都将处于同一环境水平,有助于真实反应各地市粮食低碳生产现状,便于比较除去环境因素对效率值影响后各地市粮食生产碳排放效率的实际差异。

(3) 将调整后的数据代替原始数据,再次运用超效率 SBM 模型进行效率估计。

研究从投入要素、期望产出、非期望产出、环境 4 个方面选取指标,以劳动力、土地、化肥、农药、农膜、农业机械动力、灌溉为投入指标,以粮食产量为期望产出指标,粮食生产碳排放量为非期望产出指标,以农村经济发展水平、地方财政支农支出、技术支撑作为环境变量,构建粮食生产碳排放效率指标体系(见表 2)。为了消除通货膨胀对资本数据的影响,各资本投入指标根据 2011 年农村居民消费价格指数进行换算。

2.1.3 泰尔指数 本文参考罗海平等^[26]的研究,用泰尔指数(Theil index)从区域内差异和区域间差异两个方面来量化黄淮海 5 省粮食生产碳排放效率的地区差异(x_0),并对差异来源以及差异结构进行有效

分析。具体分解方法如下所示:

$$T_0 = T_b + T_w \quad (6)$$

$$T_b = \sum_{k=1}^5 \frac{S_k}{S_a} \ln \left(\frac{S_k / S_a}{N_k / N} \right) \quad (7)$$

$$T_w = \sum_{k=1}^5 \frac{S_k}{S_a} \sum_{c \in g_k} \frac{S_c}{S_k} \ln \frac{S_c / S_k}{1 / N_k} \quad (8)$$

式中: T_0, T_b, T_w 分别为黄淮海 5 省各市粮食生产碳排放效率的总体差异、区域间及区域内差异; S_k, S_c, S_a 分别表示 k 省份, c 市和黄淮海 5 省总体粮食生产碳排放效率值; N_k, N 分别代表 k 省份和黄淮海 5 省的地市数量(个), g_k 为第 k 省份的地级市个数。

表 2 碳排放效率评价指标体系

Table 2 Carbon emission efficiency evaluation index system

类别	指标	变量及说明	单位
投入变量	劳动力投入	第一产业从业人员	10 ⁴ 人
	土地投入	农作物播种面积	10 ³ hm ²
	化肥投入	化肥施用量	10 ⁴ t
	农药投入	农药使用量	10 ⁴ t
	农膜投入	农膜使用量	10 ⁴ t
	农业机械动力投入	农业机械总动力	10 ⁴ kW
	灌溉投入	有效灌溉面积	10 ³ hm ²
期望产出变量	粮食产量	粮食作物总产量	10 ⁴ t
非期望产出变量	碳排放量	粮食生产碳排放量	10 ⁴ t
	农村经济发展水平	农村人均可支配收入	元
环境变量	地方财政支农支出	地方财政支农支出	10 ⁴ 元
	技术支撑	科技支出	10 ⁴ 元

2.1.4 核密度估计 本文借鉴陈丹玲等^[27]的研究,采用核密度估计法来量化黄淮海 5 省粮食生产碳排放效率的动态演变规律。假设随机变量 x 的核密度函数为 $f(x)$,在点 x 的概率密度可以由式(9)来进行估计,具体计算公式如下:

$$f(x) = \frac{1}{Nh_{i=1}^n} \sum_{i=1}^n k \left(\frac{x_i - \bar{x}}{h} \right) \quad (9)$$

式中: N 代表黄淮海 5 省地市数(个); h 为带宽; K 为核函数; x_i 代表 i 市粮食生产碳排放效率值; \bar{x} 为黄淮海 5 省 74 地市粮食生产碳排放效率均值。

2.2 数据来源

以 2011—2020 年为研究年限,以河北、山东、河南、安徽、江苏 5 省 74 市为研究区域。本文计算粮食生产碳排放及碳排放效率所选用的化肥施用量折纯量、农药施用量、农膜使用量、柴油使用量、粮食播种面积、有效灌溉面积、农作物播种面积均来自 2012—2021 年《河北省统计年鉴》《河北农村统计年鉴》《山东省统计年鉴》《江苏省统计年鉴》《安徽省统计年鉴》《河南省统计年鉴》。另外,计算粮食生产碳排放效率所选用的第一产业从业人员、农业机械总动力、农村

人均可支配收入也来自上述各省统计年鉴,农林水事务支出和科技支出来源于 2012—2021 年《中国城市统计年鉴》。2020 年黄淮海 5 省降水量、温度数据来源于 2021 年 5 省统计年鉴;农村居民消费价格指数来源于中国国家统计局年度数据库。以上数据均为当年实际数值,所缺个别数据采用插值法补充。

3 结果与分析

3.1 黄淮海 5 省粮食生产碳排放基本特征

本文利用碳排放系数法,测度黄淮海 5 省粮食生产碳排放。由图 2 可知,研究期内,黄淮海 5 省粮食生产碳排放总体呈“M”型波动下降趋势。2011—2015 年,粮食生产碳排放量呈小幅上升趋势,2015 年粮食生产碳排放达 2.24×10^7 t,较 2011 年上升 3.6%。其中,各投入要素除农药使用小幅下降外,其余要素所导致的碳排放均呈上升趋势。原因可能是 2015 年之前,随着玉米、小麦、稻谷等优势产业的发展,各地区粮食产量逐渐增加,粮食生产各投入要素使用量随之增加,导致其碳排放呈上升趋势。2015 年以后,粮食各投入要素呈现下降趋势,粮食生产碳排放量也出现下降。2020 年粮食生产碳排放量达最低值 2.05×10^7 t,较 2015 年下降了 9.72%。导致这一现象的原因可能是,随着 2015 年国家提出农业转型发展的战略,国家正式启动“减肥减药”行动,大力推进化肥减量提效、农药减量控害,加之 2020 年“双碳”目标的提出,粮食各投入要素使用减少,一定程度上降低了碳排放源的投入,粮食低碳生产取得一定进展。

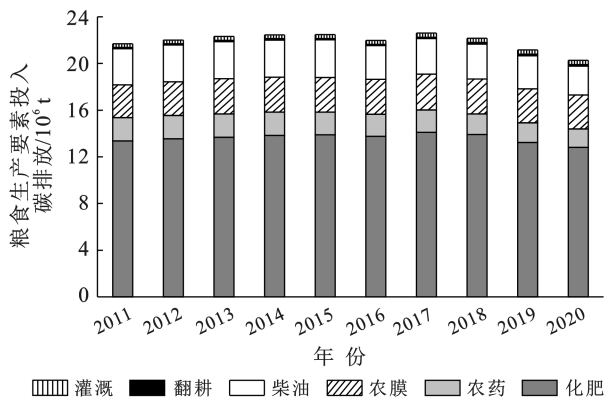


图 2 黄淮海 5 省粮食生产碳排放

Fig.2 Carbon emissions of grain production in five provinces of Huang-Huai-Hai region

3.2 黄淮海地区粮食生产碳排放效率

(1) 第一阶段超效率 SBM 测度结果。由图 3 可知,2011—2020 年,在未剔除环境变量和随机误差对效率值的影响时,黄淮海 5 省粮食生产碳排放效率中

位数均小于 0.62,总体水平较低。结合中位数的变化情况可知,研究期内,黄淮海 5 省粮食生产碳排放效率呈先降后升的演变趋势。2011—2014 年,粮食生产碳排放效率缓慢下降,在 2014 年达到最低值 0.51;2014—2020 年粮食生产碳排放效率总体呈波动上升趋势,2020 年粮食生产碳排放效率中位数为 0.61。

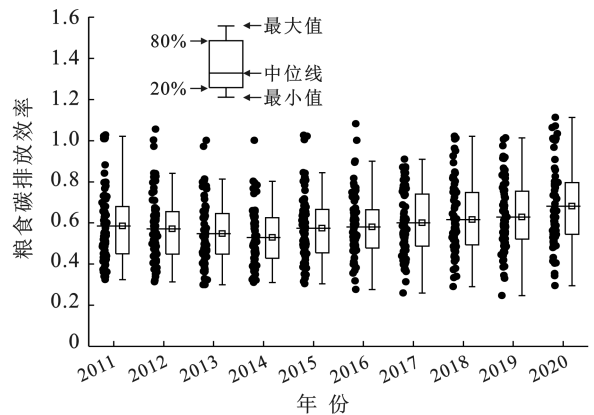


图 3 黄淮海 5 省粮食生产第一阶段碳排放效率

Fig.3 Carbon emission efficiency of first stage of grain production in five provinces of Huang-Huai-Hai region

(2) 第二阶段 SFA 回归结果。该阶段以第一阶段测度的粮食生产碳排放效率的各投入指标的松弛变量为被解释变量,将农村经济发展水平、地方财政支农支出、技术支撑 3 个环境变量作为解释变量。在使用 Frontier 4.1 进行 SFA 分析后,结果如表 3 所示(其中,每一环境变量对应的两行数据中,第一行数据为系数值,第二行数据为 t 检验值)。LR 值都达到 1% 的显著水平,表明模型存在无效率项,可以采用 SFA 模型进行参数估计。 γ 值在 1% 的显著水平接近于 1,表明管理无效率对松弛变量有显著影响。此外,农村经济发展水平对土地、化肥、农药、有效灌溉面积等投入变量的松弛量的影响均呈 1% 的显著正相关,说明农村经济发展水平的提高会增加粮食生产投入冗余,可能的原因是农村经济发展水平提高,导致黄淮海 5 省各地各项农资投入过度使用,使得各项农资投入的冗余增加;政府对产业发展的财政支持与化肥、农药、农膜和农业机械总动力等投入变量的松弛量的影响均呈 1% 水平显著负相关,可能的原因是随着政府对农业生产的监管力度不断加强,地方财政支农支出增加,农业生产的管理水平得到提升,一定程度上使得各项农资投入的冗余减少;科技支出对各项投入变量松弛量的影响均为 1% 水平显著负相关,说明政府在科技支出方面的支持增加,会有效降低粮食生产投入冗余,可能的原因是科技创新有助于提高粮食生产技术,改善粮食生产模式,粮食生产效率得到

提高,以较低的投入带来更大的社会收益。

(3) 第三阶段超效率 SBM 测度分析。经 SFA 模型进行数据调整后,再次利用超效率 SBM 模型进行测算,得到剔除环境变量和随机误差后的粮食生产碳排放效率值,结果如表 4 所示。研究期内,黄淮海 5 省各市粮食碳排放效率相较于较第一阶段效率值发生较大变化,第三阶段效率均值由第一阶段效率均

值的 0.59 下降到 0.48。其中,基于省级尺度,江苏和安徽效率值降幅最大,两阶段差距均为 0.29;其次为河南,两阶段差距为 0.22;山东和河北降幅较小,分别为 0.15 和 0.14。基于市级尺度,有无锡、常州、泰州等 17 个地市两阶段效率值差距在 0.30 以上,表明黄淮海地区各地市粮食生产方式受经济和技术发展等外部环境的影响较大。

表 3 黄淮海 5 省粮食生产碳排放第二阶段 SFA 回归结果

Table 3 Second stage regression results of carbon emission of gram production in five provinces of Huang-Huai-Hai region

项目	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
常数项	14.60**	-99.40***	-975.00***	0.10	-0.07	-185.00***	115.00**
	2.05	-99.40	-975.00	1.25	-0.54	-185.00	2.19
农村经济发展水平	0.01**	0.01***	0.04***	0.00***	-0.00***	0.00	-0.01**
	2.46	10.60	3.49	3.90	-4.60	1.58	-3.34
地方财政支农支出	0.00	0.00	-0.00***	-0.00***	-0.00***	0.00***	-0.00***
	0.40	0.08	-2.86	-6.71	-4.08	9.91	-2.83
技术支撑	-0.00***	-0.00***	-0.00***	-0.00***	-0.00***	-0.00***	-0.00***
	-47.50	-3.61	-3.40	-20.20	-14.60	-3.13	-4.38
σ^2	37 700.00***	90 800.00***	6 660 000.00***	12.50***	21.00***	17 400.00***	304 000.00***
	29.80	90 800.00	6 660 000.00	7.40	6.10	17 400.00	302 000.00
γ	0.98***	0.98***	0.97***	1.00***	1.00***	1.00***	0.72***
	671.00	52.70	3.11	1 040.00	736.00	33.10	45.80
Log 值	-4 334.04	-4 383.71	-7 299.88	-359.57	-626.11	-5 143.64	-5 750.00
LR 检验	931.49	1 821.50	8.33	1 563.84	2 059.08	982.00	420.00

注:① $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7$ 分别代表劳动力、土地、化肥、农药、农膜、有效灌溉面积、农业机械总动力。② *, **, *** 表示 10%, 5%, 1% 水平上差异显著;且 LR 均达到 1% 的显著水平。③ 环境变量对应的两行数据,第一行数据为系数值,第二行数据为 t 检验值。

表 4 2011—2020 年黄淮海 5 省各市第一、三阶段粮食碳排放效率均值

Table 4 Average carbon emission efficiency of grain in first and third stages of each city in five provinces of Huang-Huai-Hai region from 2011 to 2020

省市	F	T	省市	F	T	省市	F	T	省市	F	T
河北全省	0.48	0.34	淮南市	0.78	0.58	六安市	0.66	0.51	河南全省	0.63	0.41
石家庄市	0.54	0.43	盐城市	0.82	0.71	池州市	0.63	0.18	开封市	0.50	0.39
唐山市	0.43	0.32	扬州市	0.98	0.54	宣城市	0.50	0.25	洛阳市	0.51	0.31
秦皇岛市	0.36	0.19	镇江市	0.75	0.34	山东全省	0.51	0.35	平顶山市	0.47	0.25
邯郸市	0.57	0.45	泰州市	0.92	0.49	济南市	0.52	0.35	安阳市	0.59	0.44
邢台市	0.52	0.40	宿迁市	0.67	0.48	青岛市	0.47	0.33	鹤壁市	0.85	0.45
保定市	0.60	0.44	安徽全省	0.61	0.32	淄博市	0.53	0.31	新乡市	0.77	0.55
张家口市	0.46	0.25	合肥市	0.59	0.40	枣庄市	0.50	0.30	焦作市	0.83	0.44
承德市	0.47	0.25	芜湖市	0.61	0.28	东营市	0.43	0.23	濮阳市	0.69	0.41
沧州市	0.47	0.37	蚌埠市	0.50	0.34	烟台市	0.33	0.24	许昌市	0.84	0.43
廊坊市	0.41	0.27	淮南市	0.84	0.39	潍坊市	0.41	0.33	漯河市	0.72	0.36
衡水市	0.49	0.38	马鞍山市	0.60	0.27	济宁市	0.53	0.41	三门峡市	0.39	0.16
江苏全省	0.71	0.42	淮北市	0.69	0.29	泰安市	0.58	0.39	南阳市	0.49	0.42
南京市	0.52	0.32	铜陵市	0.56	0.16	威海市	0.29	0.17	商丘市	0.69	0.60
无锡市	0.61	0.24	安庆市	0.55	0.28	日照市	0.37	0.20	信阳市	0.79	0.53
徐州市	0.55	0.38	黄山市	0.37	0.11	临沂市	0.48	0.35	周口市	0.76	0.60
常州市	0.65	0.26	亳州市	0.71	0.52	德州市	0.80	0.66	驻马店市	0.69	0.65
苏州市	0.62	0.29	滁州市	0.80	0.41	聊城市	0.55	0.44	济源市	0.42	0.14
南通市	0.62	0.42	阜阳市	0.68	0.34	滨州市	0.70	0.43	郑州市	0.39	0.26
连云港市	0.72	0.44	宿州市	0.45	0.40	菏泽市	0.60	0.50	黄淮海	0.59	0.48

注:① F 代表 2011—2020 年黄淮海 5 省 74 市第一阶段粮食生产碳排放效率均值, T 代表 2011—2020 年黄淮海 5 省 74 市第三阶段粮食生产碳排放效率均值。② 黑体字部分表示各省总体粮食生产碳排放效率值。

3.3 黄淮海 5 省粮食生产碳排放效率空间演变分析

研究以 2011, 2014, 2017, 2020 年为例, 使用 ArcGIS10.2 软件绘制了 2011—2020 年粮食碳排放效率时空演变图, 将第三段测算的碳排放效率值可视

化, 并参考张展等^[28]的分类方法, 按照手动断点法, 将黄淮海 5 省 74 市划分为高效率区($E > 0.6$)、中效率区($0.4 \leq E \leq 0.6$)、低效率区($E < 0.4$), 其中 E 设定为粮食生产碳排放效率(见图 4)。

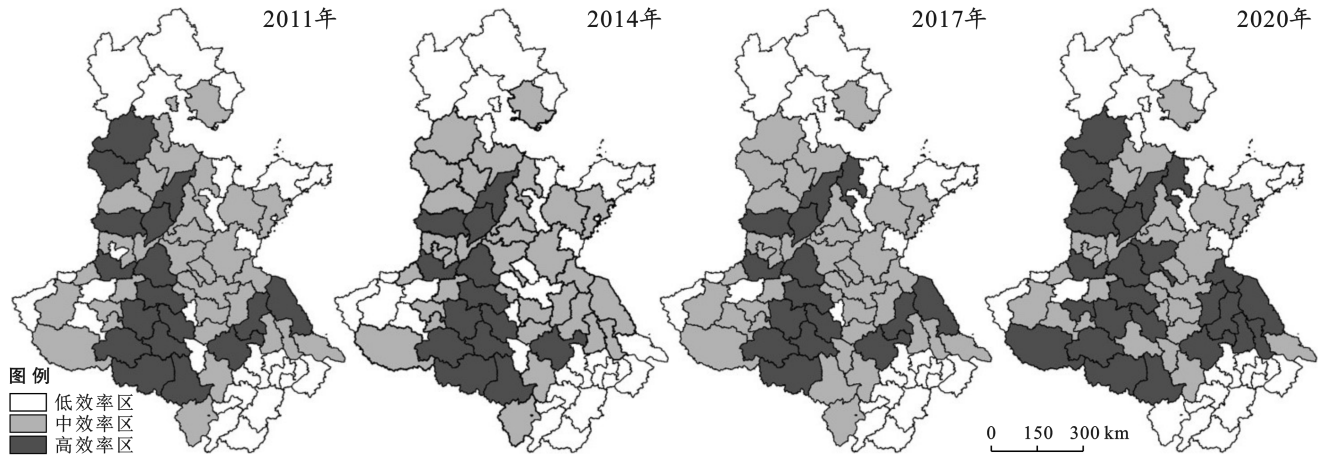


图 4 黄淮海 5 省粮食生产碳排放效率时空演变

Fig.4 Spatial-temporal evolution of carbon emission efficiency of grain production in five provinces of Huang-Huai-Hai region

由图 4 可知, 2011—2020 年, 黄淮海 5 省粮食生产碳排放效率呈明显的增长态势, 且空间差异明显, 呈“中部效率高, 南北部效率低”的空间格局。从各省来看, 河北省南部各市效率值较高, 北区地区效率值较低, 山东省高效率区主要集中在鲁中、鲁西南地区, 江苏省高效率区主要集中在中北部地区, 河南省高值区主要集中在东北部地区, 安徽省高效率区集中在南部。从时间变化角度分析, 2011—2014 年, 粮食生产碳排放效率总体呈现下降趋势, 河北省高效率区由 3 个市降低为 1 个市, 低效率区由 3 个市增长为 4 个市; 江苏省高效率区由 2 个降低为 0 个, 低效率区由 5 个市增长为 7 个市, 安徽省高效率区和低效率区分别为 4 个市和 8 个市, 两年间未发生变化; 山东省高效率区有 3 个市, 未发生变化, 低效率区由 5 个市增加为 6 个市; 河南省高效率区和低效率区均为 5 个市, 未发生变化。2014—2017 年, 黄淮海 5 省粮食生产碳排放效率总体呈升高趋势, 河北省高效率区和低效率区分别为 1 个市和 4 个市, 未发生变化; 江苏省效率水平略有提高, 高效率区增长为 2 个市, 低效率区降低为 4 个市; 安徽省高效率区由 4 个市降低为 3 个市, 低效率区降低为 7 个市; 山东省效率水平有所升高, 高效率区由 3 个市增长为 4 个市, 低效率区由 6 个市降低为 5 个市; 河南省效率水平有所升高, 高效率区依然为 5 个市, 低效率区由 5 个市降低为 3 个市。2017 年—2020 年, 黄淮海 5 省粮食生产效率总体呈继续升高的趋势, 河北省高效率区由 1 个市增加为 4 个市, 低效率区依然为 4 个市; 江苏省高效率区

增长为 6 个市, 低效率区增加为 5 个市; 安徽省高效率区和低效率区未发生变化, 依然为 3 个市和 7 个市; 山东省高效率区增长为 5 个市, 低效率区依然为 5 个市; 河南省高效率区增长为 7 个市, 低效率区依然为 3 个市。从市域角度分析, 综合来看, 研究期内, 德州、滁州、驻马店等地粮食生产碳排放效率值较高, 4 a 均为高效率区, 可能的原因是该类区域为传统农业大市, 土地资源丰富, 农业生产技术成熟, 政府监管力度较强, 农业生产模式规范。而黄山、威海等地粮食生产碳排放效率值较低, 均为低效率区, 可能的原因是该类区域自然资源禀赋条件较差, 农业发展水平较低, 农业投入要素冗余等。

3.4 黄淮海 5 省粮食生产碳排放效率地区差异

本文基于泰尔指数方法, 以河北、山东、河南、安徽、江苏 5 省为基础划分为 5 个群组, 进一步考察了黄淮海 5 省整体以及各省之间和各省份内各市之间粮食生产碳排放效率的差异情况, 结果如表 5 所示。

基于区域尺度, 研究期内, 黄淮海 5 省整体粮食生产碳排放效率总体差异呈波动上升趋势, 从 2011 年的 0.079 上升至 2020 年的 0.093, 表明地区差异逐渐扩大, 区域内以及区域间差异均呈波动上升趋势。其中, 区域内差异均值为 0.075, 明显高于区域间差异的 0.003, 表明区域内差异是影响总体差异的主要方面。基于省域尺度, 河南粮食生产碳排放效率内部差异最显著, 较其他省份位列第一位, 研究期内呈波动上升的趋势, 平均泰尔指数为 0.084; 其次为山东, 研究期内平均泰尔指数为 0.082, 各市差异总体呈

波动上升趋势,泰尔指数从 2011 年的 0.072 波动上升到 2020 年的 0.162;安徽各市之间的差异位居第三位,研究期内平均泰尔指数为 0.080,总体呈现先下降后上升的趋势;江苏和河北各市之间的地区差异相对较小。总体而言,黄淮海 5 省粮食生产碳排放效率地区差异呈不断上升趋势,不利于地区之间粮食生产碳

排放效率的均衡发展。因此,可采用“对口帮扶”策略,促进江苏、河北与河南、山东、安徽的联动发展,加强江苏、河北各地粮食生产方式的传播以及粮食生产技术的良性互动,鼓励各城市根据自身实际情况制定差异化发展战略,以期逐步缩小粮食生产碳排放效率的区域差异,促进区域粮食低碳生产的协同均衡发展。

表 5 黄淮海 5 省粮食生产碳排放效率泰尔指数分解结果

Table 5 Decomposition results of Theil index of carbon emission efficiency of grain production in five provinces of Huang-Huai-Hai region

年份	碳排放效率泰尔指数							
	总体差异	组内差异	组间差异	河北省	山东省	河南省	安徽省	江苏省
2011	0.079	0.078	0.001	0.053	0.072	0.083	0.130	0.034
2012	0.076	0.073	0.003	0.059	0.059	0.077	0.105	0.062
2013	0.071	0.068	0.003	0.053	0.060	0.080	0.100	0.037
2014	0.079	0.074	0.005	0.052	0.062	0.086	0.100	0.054
2015	0.070	0.066	0.004	0.053	0.065	0.083	0.076	0.040
2016	0.067	0.065	0.002	0.048	0.070	0.077	0.071	0.047
2017	0.081	0.078	0.002	0.054	0.092	0.087	0.074	0.073
2018	0.079	0.076	0.003	0.053	0.083	0.081	0.092	0.057
2019	0.084	0.080	0.004	0.056	0.093	0.094	0.078	0.062
2020	0.093	0.088	0.005	0.053	0.162	0.095	0.076	0.100
平均值	0.078	0.075	0.003	0.053	0.082	0.084	0.080	0.057

3.5 黄淮海地区粮食生产碳排放效率动态演变

本文运用核密度估计方法对黄淮海 5 省粮食生产碳排放效率的总体演变趋势进行分析(见图 5)。从分布位置来看,核密度曲线随年份增长中心呈轻微右移且波峰高度呈波动上升趋势,表明在研究期内碳排放效率水平整体提高。近年来,各地农业绿色低碳政策的实施以及政府支持力度的提升,劳动力低碳生产理念逐步提升,粮食生产碳排放效率得到改善。从分布延展性来看,分布曲线逐渐出现右拖尾现象,各市粮食生产排放效率出现改善;从极化趋势看,核密度函数由“单峰状”向“双峰状”转变,主峰呈波动上升且轻微右移趋势,侧峰隆起幅度较小,黄淮海地区各市粮食生产碳排放效率主要集中于 0.4~0.6 之间,表明各市之间粮食碳排放效率呈多极化趋势,地区差异显著,且低值集聚特征明显。

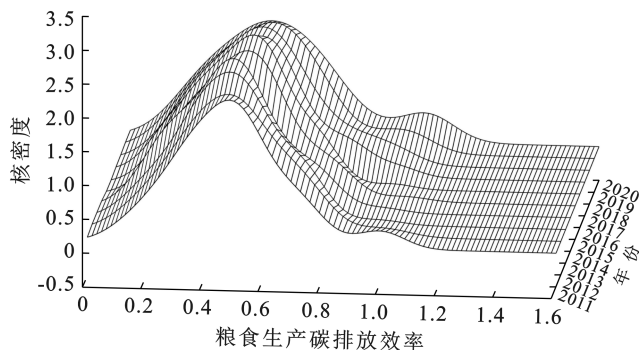


图 5 黄淮海 5 省粮食生产碳排放效率核密度估计结果
Fig.5 Kernel density estimation results of carbon emission efficiency of grain production in five provinces of Huang-Huai-Hai region

4 讨论

2011—2020 年,黄淮海 5 省粮食生产碳排放效率呈先下降后上升趋势,2011—2014 年,效率值由 0.50 降低至 0.44,2017 年的增长至 0.48,到 2020 年效率值增长到 0.52,有 7 市效率值达到有效状态。这与张源^[13]的研究结论基本一致。可能的原因是随着“双碳”目标的提出以及《全国农业现代化规划(2016—2020 年)》的实施,国家对农业生产的监管力度加强,农业生产技术生产模式得到规范加强,各种投入冗余减少,从而使得粮食生产效率出现明显提高^[29]。因此,未来应调整黄淮海 5 省各市粮食生产投入结构,减少投入冗余,促进黄淮海 5 省粮食生产碳排放效率的提高。

本研究利用三阶段超效率 SBM 模型测度粮食生产碳排放效率,在剔除环境变量和随机误差对效率值的影响后,各市效率值出现降低,其中财政支农支出和科技支出对大部分投入冗余有显著负向作用。表明两者对于提高粮食生产碳排放效率具有较好的促进作用。林伟敏等^[30]和刘佳等^[31]的研究也表明科学技术支出和地方财政支农支出有助于促进农业高质量发展,对农业生产技术效率的提高有显著的正向支持作用。因此,加强对低效率区财政支农支出与科技支出的支持力度,加大粮食生产科学技术研发,加快对绿色农药、有机肥的应用和普及将有利于提升黄淮海 5 省粮食生产碳排放效率。

从地区差异角度看,研究期内,黄淮海 5 省各市之间粮食生产碳排放效率空间不均衡性显著,这与李雪等^[6]的研究结论基本保持一致。从市域层面来看,驻马店、德州、新乡、滁州等地的粮食生产碳排放效率较高,而黄山、威海等地的碳排放效率相对较低,低效率区与高效率区差异较大。可能的原因是驻马店、德州、新乡等地是传统农业大市,农业生产所需的自然资源丰富,种植历史悠久,农业经济发展水平较高,而黄山、威海等地地势较为崎岖、适合耕地的资源有限、自然资源条件较差。而从动态演变角度看,核密度曲线由“单峰状”向“双峰状”转变,主峰呈波动上升且轻微右移趋势,侧峰隆起幅度较小,表明黄淮海 5 省粮食生产碳排放效率呈现逐渐增长的态势,但地区差异逐渐增大且低值集聚特征明显。因此,未来应采用“对口帮扶”策略,促进各地区粮食生产技术良性互动,以缩小区域间粮食生产碳排放效率地区差异。

此外,由于数据可得性,本文仅基于统计相关数据展开探究,未能进行实际考察并获取相关数据,未来可采用实际调研、调查问卷等方式获取一手数据以提高研究结果的科学性。

5 结论

本文以黄淮海 5 省 74 市为研究样本,在运用碳排放系数法测度 2011—2020 年黄淮海 5 省粮食生产碳排放效率的基础上,运用三阶段超效率 SBM 模型测算了黄淮海 5 省粮食生产碳排放效率,并利用泰尔指数、核密度估计分析方法分别对碳排放效率地区差异、动态演变展开探究,可为黄淮海 5 省粮食低碳生产提供科学依据。

(1) 2011—2020 年,随着低碳生产理念的传播与深入,黄淮海 5 省粮食生产碳排放效率呈稳步上升趋势,但整体水平偏低,这与各地区粮食生产化肥、农药等投入要素冗余过多密切相关。

(2) 黄淮海 5 省各市粮食生产碳排放效率空间不均衡性显著,呈“南北部效率低,中部效率高”的空间格局;研究期内,其效率值存在显著的空间差异且总体差异呈波动上升趋势,省域内各市之间的差异是总体差异的主要来源,其中,河南、安徽、山东各市差异较大,江苏、河北各市的差异相对较小,省间差异对总体差异的影响较低,可能的原因是黄淮海地区各市传统资源禀赋与粮食生产方式存在较大差异。

(3) 受低碳政策实施及政府对低碳农业支持力度加强的影响,黄淮海 5 省粮食生产碳排放效率整体水平提高,各市之间粮食碳排放效率呈多极化趋势,地区差异显著,且低值集聚特征明显。

[参 考 文 献]

- [1] 马金华,许玮仪,杨宏.“三农”现代化的财政治理之策[J].中央财经大学学报,2023(4):3-16.
Ma Jinhua, Xu Weiyi, Yang Hong. Financial governance of the modernization of “agriculture, rural areas and farmers” [J]. Journal of Central University of Finance & Economics, 2023(4):3-16.
- [2] Maciel V G, Zortea R B, Grillo I B, et al. Greenhouse gases assessment of soybean cultivation steps in Southern Brazil [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 131: 747-753.
- [3] Crippa M, Solazzo E, Guizzardi D, et al. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions[J]. Nature Food, 2021,2(3):1-12.
- [4] 鲁庆尧,王树进,孟祥海.基于 SBM 模型的我国粮食生产生态效率测度与 PS 收敛检验[J].农村经济,2020(12): 24-32.
Lu Qingyao, Wang Shujin, Meng Xianghai. Ecological efficiency measurement and PS convergence test of grain production in China based on SBM model [J]. Rural Economy, 2020(12):24-32.
- [5] Wu Haoyue, Huang Hanjiao, Chen Wenkuan, et al. Estimation and spatiotemporal analysis of the carbon-emission efficiency of crop production in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2022,371:133516.
- [6] 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. Study on evaluation of eco-efficiency of grain production in major grain-producing areas of China [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022,43(2):205-213.
- [7] Robaina-alves M, Moutinho V, Macedo P. A new frontier approach to model the eco-efficiency in European countries [J]. Journal of Cleaner Production, 2015,103:562-573.
- [8] 宋海风,刘应宗.粮食主产区小麦生态效率及降污潜力研究:基于藏粮于田的视角[J].干旱区资源与环境,2017, 31(7):97-101.
Song Haifeng, Liu Yingzong. Wheat ecological efficiency and pollution reducing potential of major grain production areas [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(7): 97-101.
- [9] 田云,王梦晨.湖北省农业碳排放效率时空差异及影响因素[J].中国农业科学,2020,53(24):5063-5072
Tian Yun, Wang Mengchen. Research on spatial and temporal difference of agricultural carbon emission efficiency and its influencing factors in Hubei Province [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(24): 5063-5072.
- [10] 张明斗,席胜杰.资源型城市碳排放效率评价及其政策启示[J].自然资源学报,2023,38(1):220-237.

- Zhang Mingdou, Xi Shengjie. Evaluation of carbon emission efficiency of resource-based cities and its policy enlightenment [J]. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(1): 220-237.
- [11] 艾主河. 中国粮食功能区粮食生产效率时空演变及其影响因素分析[D]. 江西 南昌: 南昌大学, 2021.
- Ai Zhuhe. Spatial-temporal evolution of grain production efficiency and its influencing factors in grain functional areas of China [D]. Nanchang, Jiangxi: Nanchang University, 2021.
- [12] 李倩娜, 姚娟, 唐洪松. 新疆棉花低碳生产率、区域差异与动态演进[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(7): 1-8.
- Li Qianna, Yao Juan, Tang Hongsong, et al. Low carbon productivity, regional differences and dynamic evolution of cotton in Xinjiang [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(7): 1-8.
- [13] 张源. 我国粮食主产区的粮食生产生态效率: 区域差异、动态演进及影响因素[D]. 辽宁 大连: 东北财经大学, 2022.
- Zhang Yuan. Ecological efficiency of grain production in major grain producing areas in China: Regional differences, dynamic evolution and influencing factors [D]. Dalian, Liaoning: Dongbei University of Finance & Economics, 2022.
- [14] 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[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(8): 80-86.
- Li Bo, Zhang Junbiao, Li Haipeng. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(8): 80-86.
- [15] 田云, 张俊飏, 李波. 中国农业碳排放研究: 测算、时空比较及脱钩效应[J]. *资源科学*, 2012, 34(11): 2097-2105.
- Tian Yun, Zhang Junbiao, Li Bo. Agricultural carbon emissions in China: Calculation, spatial-temporal comparison and decoupling effects [J]. *Resources Science*, 2012, 34(11): 2097-2105.
- [16] West T O, Maryland G. A synthesis of carbon sequestration, carbene missions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2002, 91(1-3): 217-232.
- [17] 智静, 高吉喜. 中国城乡居民食品消费碳排放对比分析[J]. *地理科学进展*, 2009, 28(3): 429-434.
- Zhi Jing, Gao Jixi. Analysis of carbon emission caused by food consumption in urban and rural inhabitants in China [J]. *Progress in Geography*, 2009, 28(3): 429-434.
- [18] 李波, 张俊飏. 基于投入视角的我国农业碳排放与经济发展脱钩研究[J]. *经济经纬*, 2012(4): 27-31.
- Li Bo, Zhang Junbiao. Decoupling of China's agriculture carbon emissions and economic development based on the input perspective [J]. *Economic Survey*, 2012 (4): 27-31.
- [19] IPCC. Climate Change 2007: The physical science basis [M]. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [20] 伍芬琳, 李琳, 张海林, 等. 保护性耕作对农田生态系统净碳释放量的影响[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(12): 2035-2039.
- Wu Fenlin, Li Lin, Zhang Hailin, et al. Effects of conservation tillage on net carbon flux from farmland ecosystems [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12): 2035-2039.
- [21] 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.
- [22] 闫星, 罗义, 赵芹, 等. 基于 SBM-DEA 的陕西省制造业高质量发展效率评价及对策研究[J]. *科技管理研究*, 2022(1): 44-50.
- Yan Xing, Luo Yi, Zhao Qin, et al. Evaluation and countermeasures of high quality development efficiency of manufacturing industry in Shaanxi Province based on SBM-DEA [J]. *Science and Technology Management Research*, 2022(1): 44-50.
- [23] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis [J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 130(3): 498-509.
- [24] Tone K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis [J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 143(1): 32-41.
- [25] Li Nan, Jiang Yuqing, Yu Zhixin, et al. Analysis of agriculture total-factor energy efficiency in China based on DEA and malmquist indices [J]. *Energy Procedia*, 2017, 142: 2397-2402.
- [26] 罗海平, 王佳铨, 胡学英, 等. 我国粮食功能区粮食安全水平的时空差异及障碍诊断[J]. *农业经济与管理*, 2023 (2): 23-34.
- Luo Haiping, Wang Jiacheng, Hu Xueying, et al. Spatial and temporal differences and obstacle diagnosis of food security level in grain functional areas in China [J]. *Agricultural Economics and Management*, 2023(2): 23-34.
- [27] 陈丹玲, 卢新海, 匡兵. 长江中游城市群城市土地利用效率的动态演进及空间收敛[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(12): 106-114.
- Chen Danling, Lu Xinhai, Kuang Bing. Dynamic evolution and spatial convergence of urban land use efficiency in the middle reaches of the Yangtze River [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28 (12): 106-114.

- standing the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 85:101569.
- [24] 巩晟萱, 张玉虎, 李宇航. 基于 PLUS-InVEST 模型的京津冀碳储量变化及预测 [J]. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(6):20-28.
- Gong Shengxuan, Zhang Yuhu, Li Yuhang. Spatio-temporal variation and prediction of carbon storage in Beijing-Tianjin-Hebei region: A PLUS-InVEST model approach [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023, 37(6):20-28.
- [25] 伍丹, 朱康文, 张晟, 等. 基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的成渝经济区碳储量演化分析 [J]. *三峡生态环境监测*, 2022, 7(2):85-96.
- Wu Dan, Zhu Kangwen, Zhang Sheng, et al. Evolution analysis of carbon stock in Chengdu-Chongqing economic zone based on PLUS model and InVEST model [J]. *Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges*, 2022, 7(2):85-96.
- [26] 张经度, 梅志雄, 吕佳慧, 等. 纳入空间自相关的 FLUS 模型在土地利用变化多情景模拟中的应用 [J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(3):531-542.
- Zhang Jingdu, Mei Zhixiong, Lv Jiahui, et al. Simulating multiple land use scenarios based on the FLUS model considering spatial autocorrelation [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(3):531-542.
- [27] 王保盛, 廖江福, 祝薇, 等. 基于历史情景的 FLUS 模型邻域权重设置: 以闽三角城市群 2030 年土地利用模拟为例 [J]. *生态学报*, 2019, 39(12):4284-4298.
- Wang Baosheng, Liao Jiangfu, Zhu Wei, et al. The weight of neighborhood setting of the FLUS model based on a historical scenario: A case study of land use simulation of urban agglomeration of the Golden Triangle of Southern Fujian in 2030 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(12):4284-4298.
- [28] 吴佩君, 刘小平, 黎夏, 等. 基于 InVEST 模型和元胞自动机的城市扩张对陆地生态系统碳储量影响评估: 以广东省为例 [J]. *地理与地理信息科学*, 2016, 32(5):22-28.
- Wu Peijun, Liu Xiaoping, Li Xia, et al. Impact of urban expansion on carbon storage in terrestrial ecosystems based on InVEST model and CA: A case study of Guangdong Province, China [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2016, 32(5):22-28.
- [29] 刘萍, 邓鉴峰, 魏安世, 等. 广州市森林生物量及碳储量评估 [J]. *西南林业大学学报*, 2015, 35(4):62-65.
- Liu Ping, Deng Jianfeng, Wei Anshi, et al. Assessment on urban forest biomass and carbon storage in Guangzhou [J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2015, 35(4):62-65.
- [30] 朱志强, 马晓双, 胡洪, 等. 基于耦合 FLUS-InVEST 模型的广州市生态系统碳储量时空演变与预测 [J]. *水土保持通报*, 2021, 41(2):222-229.
- Zhu Zhiqiang, Ma Xiaoshuang, Hu Hong. Spatio-temporal evolution and prediction of ecosystem carbon stocks in Guangzhou city by coupling FLUS-InVEST models [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(2):222-229.
- [30] 林伟敏, 刘成华. 农业科技创新能力与农业高质量发展耦合协调研究 [J]. *北方园艺*, 2023(9):144-152.
- Lin Weimin, Liu Chenghua. Research on the coupling and coordination between agricultural scientific and technological innovation ability and development of high quality agriculture [J]. *Northern Horticulture*, 2023(9):144-152.
- [31] 刘佳, 余国新. 地方财政支农支出对农业技术效率影响分析—基于随机前沿分析方法 [J]. *中国农业资源与区划*, 2014, 35(5):129-134.
- Liu Jia, Yu Guoxin. Provincial variance analysis of effect of local finance for supporting agriculture on the agricultural technical efficiency [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2014, 35(5):129-134.

(上接第 398 页)

- [28] 张展, 廖小平, 李春华, 等. 湖南省县域农业生态效率的时空特征及其影响因素 [J]. *经济地理*, 2022, 42(2):181-189.
- Zhang Zhan, Liao Xiaoping, Li Chunhua, et al. Spatio-temporal characteristics of agricultural eco-efficiency and its determinants in Hunan Province [J]. *Economic Geography*, 2022, 42(2):181-189.
- [29] 田云, 林子娟. 中国省域农业碳排放效率与经济增长的耦合协调 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(4):13-22.
- Tian Yun, Lin Zijuan. Coupling coordination between agricultural carbon emission efficiency and economic growth at provincial level in China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(4):13-22.