

DOI: 10.20103/j.stxb.202306251347

赵玉, 陈霖波, 张玉, 吴志明. 中国粮食种植业碳效应时空演化及碳排放公平性. 生态学报, 2024, 44(12): 5059-5069.

Zhao Y., Chen L.B., Zhang Y., Wu Z.M. Spatial and temporal evolution of carbon effect and carbon equity of grain planting industry in China. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(12): 5059-5069.

中国粮食种植业碳效应时空演化及碳排放公平性

赵 玉^{1,2}, 陈霖波¹, 张 玉^{1,*}, 吴志明¹

1 东华理工大学经济与管理学院, 南昌 330013

2 东华理工大学资源与环境经济研究中心, 南昌 330013

摘要: 农业低碳转型背景下, 准确把握粮食种植业碳效应时空演化及碳排放公平性特征对实现地区生态正义具有重要意义。基于 2000—2021 年省域面板数据, 采用碳排放因子法测算中国 30 个省区的粮食种植业碳效应, 利用核密度估计方法探析时空演化, 运用 Dagum 基尼系数法刻画并解构全国粮食种植业碳排放公平性。研究表明: (1) 从时空特征看, 粮食种植业碳效应呈现波动上升的净碳汇特征, 具体表现为“东强西弱, 北高南低”的空间格局, 且伴随明显的“马太效应”。在碳效应结构上, 秸秆燃烧与玉米种植分别是粮食种植业最主要的碳源与碳汇。(2) 从演化趋势来看, 全国粮食种植业碳效应的非均衡性呈扩大趋势; 在三大主粮中, 水稻碳效应非均衡性有所减弱, 小麦与玉米碳效应非均衡性均持续上升。(3) 从碳排放公平性来看, 区域间碳排放差异已成为影响公平性的最主要因素, 基尼系数呈“快速上升-波动震荡-缓慢回落”特征, 全国粮食种植业碳排放始终处于较公平区间, 整体公平性呈改善态势; 在三大主粮中, 水稻碳排放公平性最低, 玉米碳排放公平性最高。最后, 提出了采取差异化固碳减排策略、构建低碳发展跨区协作机制、完善碳排放责任分摊机制、探索粮食碳汇交易试点等建议, 以期推动我国粮食种植业实现低碳转型发展。

关键词: 粮食种植业; 净碳汇; 碳排放公平性; 时空演化; Dagum 基尼系数

Spatial and temporal evolution of carbon effect and carbon equity of grain planting industry in China

ZHAO Yu^{1,2}, CHEN Linbo¹, ZHANG Yu^{1,*}, WU Zhiming¹

1 School of Economics and Management, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

2 Research Center for Resource and Environmental Economics, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

Abstract: In the context of low-carbon transformation in agriculture, accurately understanding the spatio-temporal evolution of carbon effects and the characteristics of carbon equity in grain cultivation is crucial for achieving regional ecological justice. Based on provincial panel data from 2000 to 2021, the carbon emission factor method was used to measure and analyze the spatial and temporal characteristics of carbon effects in food cultivation across 30 provinces, municipalities, and regions in China. At the same time, the kernel density estimation method was applied to explore the dynamic evolution of carbon effects. Furthermore, this paper employed the Dagum Gini coefficient method to characterize and deconstruct the equity of net carbon sinks in nationwide food cultivation based on the net carbon sink intensity index. The following key findings are revealed: (1) From the perspective of spatial and temporal characteristics, the total net carbon sink of the grain farming industry fluctuated and rose during the investigation period. Notably, it exhibited a spatial pattern of “low in the west and high in the east, low in the south and high in the north”, accompanied by the obvious “Matthew effect”.

基金项目: 国家社会科学基金项目(22BJL017); 国家自然科学基金项目(72063001); 江西省高校人文社科项目(GL20138)

收稿日期: 2023-06-25; **网络出版日期:** 2024-04-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyzyonly@126.com

限于数据的可获取性, 本研究尚未含中国港澳台和西藏地区统计数据。

Additionally, straw burning and corn gradually emerged as the primary carbon source and carbon sink. (2) From the perspective of the evolution trend, the spatial non-equilibrium of the carbon effect of the national grain cultivation industry had been expanding. Among them, the non-equilibrium in carbon effects of main rice-producing areas was decreasing, while wheat and maize exhibited a continuous increase in non-equilibrium. (3) From the perspective of carbon emission equity, inter-regional difference had become the primary factor affecting equity, with the contribution rate of 35.250% in 2021. In addition, Gini coefficient was characterized by “rapid growth-fluctuation shock-slow decrease”, and the carbon emission of the national grain farming industry remained within a relatively equitable range during the examination period, with the overall equity improving. Among the main production areas of the three major staple grains, the main maize producing area demonstrated the highest degree of fairness, while the main rice producing area showed the least fairness. Finally, suggestions such as adopting differentiated carbon sequestration and emission reduction strategies for the grain farming industry, building a cross-regional collaboration mechanism for low-carbon development of the grain farming industry, perfecting the carbon emission responsibility-sharing mechanism, and exploring grain carbon sink trading pilots were proposed with a view to boosting China’s grain farming industry to realize low-carbon transformation.

Key Words: grain planting industry; net carbon sink; carbon emissions equity; spatial and temporal evolution; Dagum Gini coefficient

21 世纪以来,温室气体排放骤增导致全球气候变化问题日趋突出。2022 年全球平均温度较工业化前(1850 至 1900 年)升高约 1.15℃,这已严重威胁全球生态环境与人类生存空间。农业活动作为重要来源,在世界总体温室气体排放中的贡献率已高达 30%^[1]。在我国,农业发展取得了瞩目成就,尤其是粮食种植业的综合生产能力稳步提升,但粗放式的农业生产模式亦造成了如资源过度消耗、碳排放持续攀升等问题^[2]。另有研究表明粮食种植业具有碳源与碳汇的双重属性^[3],因而将两者同时纳入分析框架是必要的。为应对气候变暖问题,我国于 2020 年提出碳达峰与碳中和的国家自主贡献目标,这对粮食种植业绿色转型提出了更高要求。囿于地理结构、资源禀赋的差异,各地区粮食种植业碳生态贡献参差不齐,在碳生态补偿缺位的情况下,这可能导致地区减排增汇动力匮乏。因此,厘清碳效应时空演化特征,洞察各地区粮食种植业碳排放公平性,有助于减排固碳政策的精准实施,对农业可持续发展具有现实意义。

学术界对农业碳效应的核算方法做了大量有益探索。其中,排放系数法的讨论与应用最为广泛^[4-5]。李波等从化肥、农药、农膜、农用机械、农业灌溉与耕地翻耕等六个方面构建了农业碳排放的测度体系^[6]。夏四友等基于此估算了中国省域农业碳排放率并考察了其时空关联特征^[7]。后续有研究认为,翻耕并不适用于所有农作物,应将其他五种来源归为导致碳排放的五大生产要素^[8]。此外,种植业显著区别于其他产业部门的碳汇作用得到了一致认可^[9-11]。田云和张俊彪提出了较为完善的作物碳汇测算方法,为相关研究奠定了深厚基础^[3]。测算方法的日趋完善推动了关于农业碳效应时空规律及公平性的研究。时空规律的研究中,李强等发现中国耕地利用净碳汇呈波动上升,粮食主产区的净碳汇能力优于其他产区^[12]。杜江等的研究则更细致地揭示了 1991—2016 年间粮食主产区净碳汇的倒“U”增长规律^[13]。范紫月等提出中国农业系统温室气体排放的时空规律与不同地区的农业生产方式相关^[14]。公平性研究中,有研究发现不同经济体间温室气体排放的影响因素及其经济效率存在差异,发展中国家的排放经济效率普遍低于发达国家^[15]。另有学者以碳生态承载系数衡量中国省域碳排放公平性,并检验了其影响因素^[16]。在细分产业领域,学者们论述了畜牧业^[17]、农业领域^[18]以及兼顾两者^[19]的碳排放公平性。此外,研究表明经济发展水平^[20]、环境分权^[21]和技术创新^[16]等是影响碳排放公平性的主要因素。

综上所述,现有文献为本研究提供了丰富的理论和实证参考,但仍可从以下几个方面做出边际贡献:从碳效应测度来看,现有研究主要关注农业生产要素产生的碳排放,较少关注秸秆燃烧产生的碳排放,且大多忽略了种植业的碳汇功能^[4,22];从研究内容来看,学者多聚焦于农业碳效应的测度及效率^[2,23],对公平性方面的研

究则较为匮乏,兼顾碳排与碳汇以刻画粮食种植业碳公平的研究更为鲜见;从研究方法来看,已有研究多采用基尼系数衡量种植业碳排放的公平性,但相比 Dagum 基尼系数,传统基尼系数缺乏对公平性内部结构的考虑^[18]。有鉴于此,在科学构建碳效应测算体系的基础上,使用核密度估计法分析粮食种植业碳效应时空演化特征,采用 Dagum 基尼系数测度 2000—2021 年中国各地区粮食种植业碳排放的公平性。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 种植业碳效应测算体系

种植业碳效应是碳汇量与碳排放量的差额^[24],碳排放核算来源可归为三类:农资投入、作物生长与秸秆燃烧;碳汇的核算来源主要为农作物碳吸收^[8,25]。本文采用碳排放因子法测算碳效应,并基于碳转换系数,将主要温室气体(CO₂、N₂O 与 CH₄)折算为碳当量^[26]。

1.1.1 碳源

一是农资投入碳排放,主要包括农药、农用化肥、农用柴油、农用薄膜、农业灌溉五类。计算公式如下:

$$A_j(t) = \sum_{k=1}^5 (T_{kt} \times \text{EFI}_k) \quad (1)$$

式中, $A_j(t)$ 表示第 t 年地区 j 的农资投入碳排放量; T_{kt} 表示第 t 年 k 类农用物资的投入量; EFI_k 表示第 k 类农用物资的碳排放因子。因子来源于郑玉雨等^[26]的文献。

二是作物生长碳排放,目标作物小麦、玉米与水稻主要产生 N₂O、CH₄两类温室气体。测算公式如下:

$$B_j(t) = \sum_{k=1}^3 (S_{kt} \times \text{EFG}_k) \quad (2)$$

式中, $B_j(t)$ 表示第 t 年地区 j 的作物生长碳排放量; S_{kt} 表示第 t 年第 k 类作物的播种面积; EFG_k 表示第 k 类作物的气体排放系数。作物生长碳排放因子参照王雅楠等^[8]的研究。

三是秸秆燃烧碳排放,农作物秸秆燃烧会产生大量 CO₂与 CH₄等温室气体,其测算公式如下:

$$C_j(t) = \sum_{k=1}^3 Q_{jk} \times G_{jk} \times L_{jk} \times F_k \times \text{EFB}_k \quad (3)$$

式中, $C_j(t)$ 表示第 t 年地区 j 秸秆燃烧碳排放量; Q_{jk} 表示地区 j 第 k 类作物的产量; G_{jk} 表示地区 j 第 k 类作物的谷草比; L_{jk} 为地区 j 第 k 类作物秸秆的露天燃烧比; F_k 为第 k 类作物秸秆的燃烧效率; EFB_k 表示第 k 类作物秸秆燃烧的碳排放因子。其中,各地区作物谷草比与秸秆露天焚烧比例来源于程琳琳^[27]的文献,秸秆燃烧效率与碳排放因子均参照彭立群等^[28]的研究。

1.1.2 碳汇

借鉴于卓卉与毛世平^[29]的研究,由生物产量与干重比来推算作物碳汇:

$$E_j(t) = \sum_{k=1}^k E_{jk}(t) = \sum_{k=1}^k CA_k \times Q_{jk} \times (1 - r_k) / EC_k \quad (4)$$

式中, $E_j(t)$ 表示第 t 年的作物碳汇量, $E_{jk}(t)$ 表示第 t 年地区 j 第 k 类作物的碳汇量, CA_k 指第 k 类作物的碳吸收率(kg C/kg), r_k 表示第 k 类作物含水量, EC_k 表示第 k 类作物的经济系数。其中,碳吸收率参照王修兰^[30]的文献。

1.2 核密度估计方法

核密度估计法用于描述随机变量概率密度的非参数方法,可以在一定程度上避免分布预设带来的估计误差。假定随机变量概率密度函数为 $f(x)$,则表达式为:

$$f(y) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{y_i - y}{h}\right) \quad (5)$$

式中, n 表示地区数量。 $K(\cdot)$ 表示核函数,其描述了 y 邻域内所有样本点 y_i 的权重, h 则表示带宽。本文采用 Gauss 核函数分析中国粮食种植业净碳汇的动态演化过程。

1.3 公平性测度

1.3.1 净碳强度

净碳强度能更全面地反映地区粮食种植业的低碳生产效率。综合 Han 等^[31]与吴昊玥等^[32]关于净碳强度的核算方法,得到式(6):

$$CSI = (C_{\text{排}} - E_{\text{吸}}) / S_{\text{耕}} \quad (6)$$

式中,CSI 表示粮食种植业净碳强度, $C_{\text{排}}$ 表示总碳排放, $E_{\text{吸}}$ 表示总碳吸收, $S_{\text{耕}}$ 表示作物耕种面积。为方便计算 Dagum 基尼系数,采用相反数将净碳强度转化为正向指标衡量净碳排放状况。

1.3.2 Dagum 基尼系数

相较于传统基尼系数、泰尔指数等方法,Dagum 基尼系数(见式(7))有效识别了地区差距的来源。

$$G = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{h=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |y_{ji} - y_{hr}|}{2n^2 \bar{Y}} \quad (7)$$

式中, G 为 Dagum 基尼系数,区域数量记作 k , $y_{ji}(y_{hr})$ 为第 $j(h)$ 个区域内第 $i(r)$ 省份的净碳强度, n 为样本省份总量, $n_j(n_h)$ 表示第 $j(h)$ 个区域内的省份总数, \bar{Y} 表示样本省份净碳强度的平均值。

将 Dagum 基尼系数分解为地区内差异贡献、地区间差异贡献与超变密度贡献三部分。其中,式(8)和(9)分别为地区内基尼系数与地区内差异贡献;式(10)和(11)分别为地区间基尼系数和地区间差异贡献;式(12)为超变密度贡献。其中, $p_j = n_j/n$, $s_j = n_j \bar{Y}_j/n\bar{Y}$ 。

$$G_{jj} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |y_{ji} - y_{jr}|}{2n^2 \bar{Y}_j} \quad (8)$$

$$G_w = \sum_{j=1}^k G_{jj} p_j s_j \quad (9)$$

$$G_{jh} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |y_{ji} - y_{hr}|}{n_j n_h (\bar{Y}_j + \bar{Y}_h)} \quad (10)$$

$$G_{nb} = \sum_{j=1}^k \sum_{h \neq j} G_{jh} p_j s_h D_{jh} \quad (11)$$

$$G_t = \sum_{j=1}^k \sum_{h \neq j} H_{jh} p_j s_h (1 - D_{jh}) \quad (12)$$

式(13)为地区间净碳强度的相对影响;式(14)为地区间净碳强度差值,表示地区 j 和 h 中所有 $y_{ji} - y_{hr} > 0$ 样本值的加权平均数;式(15)为超变一阶矩,表示组 j 和 h 中所有 $y_{hr} - y_{ji} > 0$ 样本值的加权平均数。 $F_j(\cdot)$ 与 $F_h(\cdot)$ 分别表示 j 与 h 区域净碳强度的累计分布函数。

$$D_{jh} = \frac{d_{jh} - p_{jh}}{d_{jh} + p_{jh}} \quad (13)$$

$$d_{jh} = \int_0^{\infty} dF_j(y) \int_0^y (y-x) dF_h(x) \quad (14)$$

$$p_{jh} = \int_0^{\infty} dF_h(y) \int_0^y (y-x) dF_j(x) \quad (15)$$

Dagum 基尼系数取值范围为 $[0, 1]$,越接近 1 表示公平性越低。根据联合国开发计划署基尼系数标准,将基尼系数划分为低于 0.20,0.20—0.30,0.30—0.40,0.40—0.60,高于 0.60 等 5 个区间,分别表示高度公平、较为公平、相对合理、较为不公平、高度不公平。

1.4 数据来源

选取 2000—2021 年中国 30 个省(市、区)的面板数据作为研究样本。数据来自国家统计局官网、《中国农村统计年鉴》与《中国农业机械工业年鉴》。研究对象为水稻、小麦和玉米三大主粮作物。采用作物种植面积占比估算三大主粮作物的碳排放量。

2 结果与分析

2.1 粮食种植业碳效应时空演化分析

2.1.1 粮食种植业碳效应时序特征

表 1 报告了 2000—2021 年间粮食种植业碳源、碳汇及碳效应变化情况。我国粮食种植业碳效应呈现波动上升的净碳汇特征,总量由 2000 年的 $1.91 \times 10^8 \text{t}$ 增长至 2021 年的 $3.58 \times 10^8 \text{t}$, 年均增长 3.02%。其中,净碳汇总量变化可以划分为“缓慢下降-快速上升-平稳增长”三个阶段。2000—2003 年缓慢下降阶段:粮食种植面积以及产量连续下降,粮食作物碳汇较碳排放的下降更加显著,导致了粮食净碳汇总量的降低,净碳汇总量由 2000 年的 $1.91 \times 10^8 \text{t}$ 减少至 2003 年的 $1.78 \times 10^8 \text{t}$, 年均下降 2.34%。2004—2015 年快速上升阶段:得益于粮食作物碳汇量的连年增长,净碳汇总量从 2004 年的 $1.99 \times 10^8 \text{t}$ 快速上升至 2015 年的 $3.36 \times 10^8 \text{t}$, 年均增长 4.85%。2016—2021 年平稳增长阶段:净碳汇总量从 2016 年的 $3.35 \times 10^8 \text{t}$ 平稳增长至 2021 年的 $3.58 \times 10^8 \text{t}$, 年均增长 1.31%。自 2016 年起,各省区主动调整粮食种植结构,粮食主销区、产销平衡区的三大主粮作物播种面积与产量均有所下滑,导致粮食净碳汇增速放缓。

表 1 2000—2021 年中国粮食种植业碳效应情况($\times 10^4 \text{t}$)

Table 1 Carbon effect of grain farming in China during 2000—2021

年份 Year	碳源 Carbon emissions				碳汇 Carbon sinks				净碳汇 Net carbon sink
	农资投入 Agricultural inputs	作物种植 Crop cultivation	秸秆燃烧 Straw burning	总量 Total amount	农资投入 Agricultural inputs	作物种植 Crop cultivation	秸秆燃烧 Straw burning	总量 Total amount	
2000	3784.75	5926.50	4829.32	14540.57	13999.29	9768.07	9915.47	33682.83	19142.26
2003	3745.46	5288.10	4420.11	13453.67	11968.92	8478.59	10836.06	31283.57	17829.90
2006	4738.51	5801.36	5391.49	15931.37	13538.13	10640.56	14181.60	38360.28	22428.92
2009	5295.87	6042.79	5897.00	17235.67	14616.88	11363.34	16206.78	42187.00	24951.34
2012	5961.99	6280.50	6683.41	18925.90	15386.90	12020.12	21473.89	48880.91	29955.01
2015	6349.91	6448.19	7255.58	20053.68	15804.89	13012.62	24790.50	53608.01	33554.34
2018	5855.80	6271.07	7189.74	19316.61	15803.87	12906.85	24056.71	52767.43	33450.82
2021	5379.94	6241.21	7410.58	19031.74	15857.01	13447.35	25495.66	54800.02	35768.28

仅列出各省(市)部分年份的测算结果

图 1 报告了 2000—2021 年粮食种植业碳源结构的演化特征。作物种植与秸秆燃烧在总碳源中的占比趋势分化明显,并在 2010—2011 年发生了交叉,表明我国粮食种植业最大碳源已由 2000 年的作物种植转变为秸秆燃烧。此外,农资投入的碳源占比最低,其碳排放量与占比均呈现出较为平缓的倒“U”型趋势:2000—2015 年,过度使用化肥导致了粮食种植业碳排放量日益增加;2015 年之后,随着《全国农业可持续发展规划(2015—2030 年)》等纲领性文件陆续颁布,农业生产要素利用效率逐步提升,农资投入的碳排放量得到了有效控制^[33]。

图 2 报告了 2000—2021 年粮食种植业碳汇结构的时序演化特征。三大主粮作物碳汇量均持续增加,但增速不同。其中,玉米碳汇量增速最高,年均增速达到了 4.60%,2005 年之后玉米成为了粮食碳汇最主要的来源;小麦的年均增速为 0.15%,其碳汇量由 2000 年的 $0.98 \times 10^8 \text{t}$ 增加到了 2021 年的 $1.34 \times 10^8 \text{t}$;水稻碳汇量增速最低,年均增速仅为 0.60%。

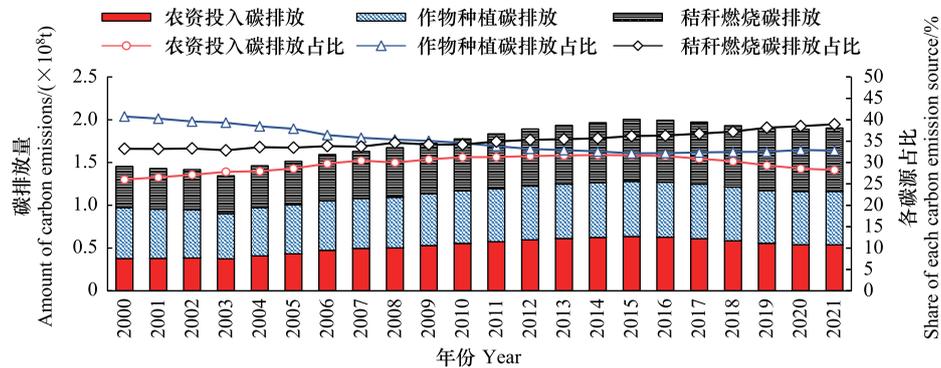


图1 2000—2021年中国粮食种植业碳源演化特征

Fig.1 Characteristics of carbon emission evolution in China's grain planting industry during 2000—2021

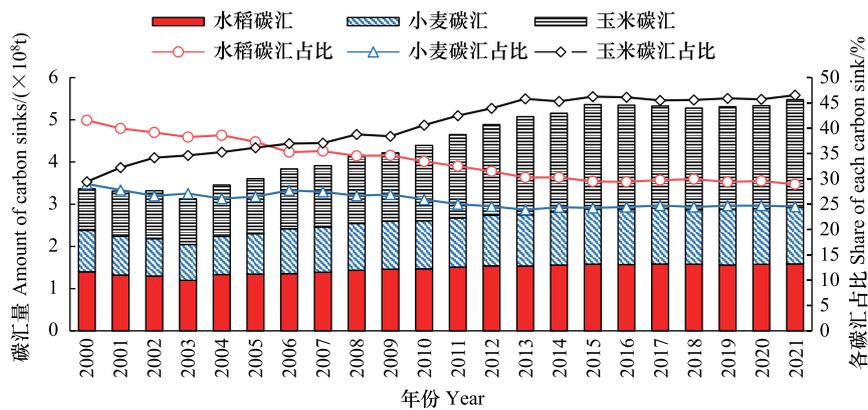


图2 2000—2021年中国粮食种植业碳汇演化特征

Fig.2 Evolutionary characteristics of carbon sinks in China's grain planting industry during 2000—2021

2.1.2 粮食种植业碳效应空间特征

图3报告了粮食种植业碳效应的空间分布及变化情况。中国粮食种植业净碳汇总体呈现“东强西弱,北高南低”的空间格局。从空间分布演化来看,粮食种植业净碳汇空间格局发生了变化,主产区与主销区间净碳汇呈两极分化状态,各省份间净碳汇“马太效应”日益显著,前三位与末三位省份平均净碳汇之间的差值从2000年的2027.46万t扩大为2021年的4067.99万t;此外,东北与西北地区如黑龙江、内蒙古等地净碳汇提升明显,分别净增3330.56万t与1824.20万t;在东南沿海地区,弱净碳汇带显现出向南延伸的趋势。实现农业“双碳”目标需考虑粮食产区空间布局与净碳汇演化趋势,因地制宜地调整农业低碳发展政策。

2.1.3 粮食种植业碳效应时空演化特征

选择2000,2005,2010,2015与2021年为观测年,采用基于高斯分布的Kernel函数,绘制全国与各粮食生产功能区的碳效应核密度分布曲线,进一步分析粮食种植业碳效应时空演化趋势。

(1) 粮食种植业碳效应演化特征

图4报告了全国粮食种植业及三大主粮碳效应的演化特征。从全国核密度曲线位移来看,2000—2010年,峰值向左偏移,2011—2021年,峰值呈向右小幅偏移态势。这表明全国粮食种植业净碳汇经历了先减少后小幅增长的过程,并于2021年回到了同2005年相近的净碳汇水平。从全国核密度曲线形态来看,碳效应核密度曲线的波峰始终保持“一主一次”的双峰格局,峰值持续下降,波峰峰度逐年减小,全国粮食种植业碳效应的非均衡性呈扩大趋势。另外,核密度函数尾部存在逐年延长现象,右尾部延长更为明显,表明净碳汇高值区较低值区波动更大。

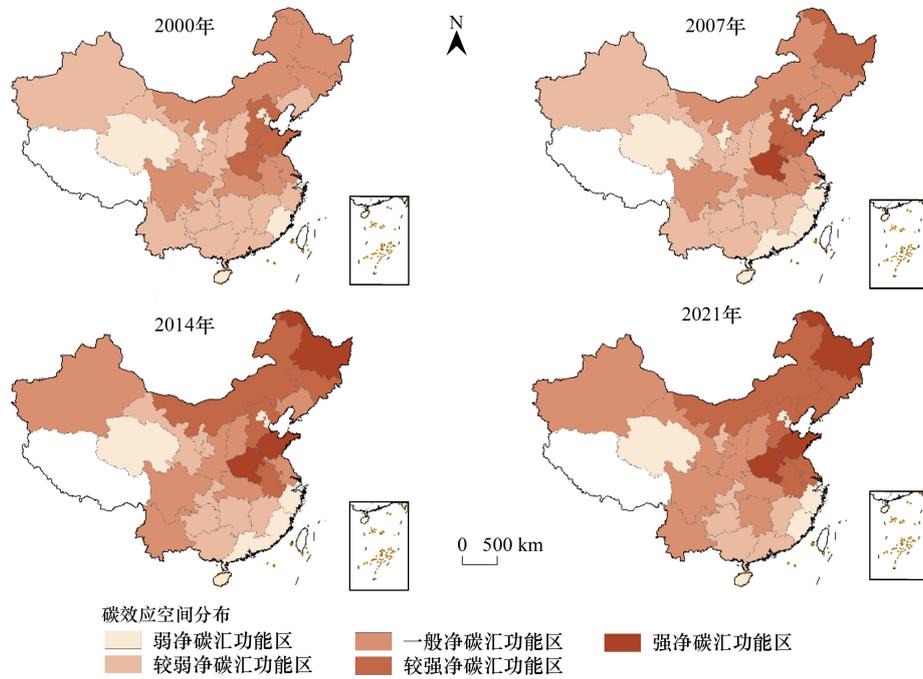


图3 2000—2021年中国粮食种植业碳效应空间分布特征

Fig.3 Spatial distribution characteristics of the carbon effect of grain planting industry in China during 2000—2021

基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2023)2767号的标准地图制作,底图边界无修改

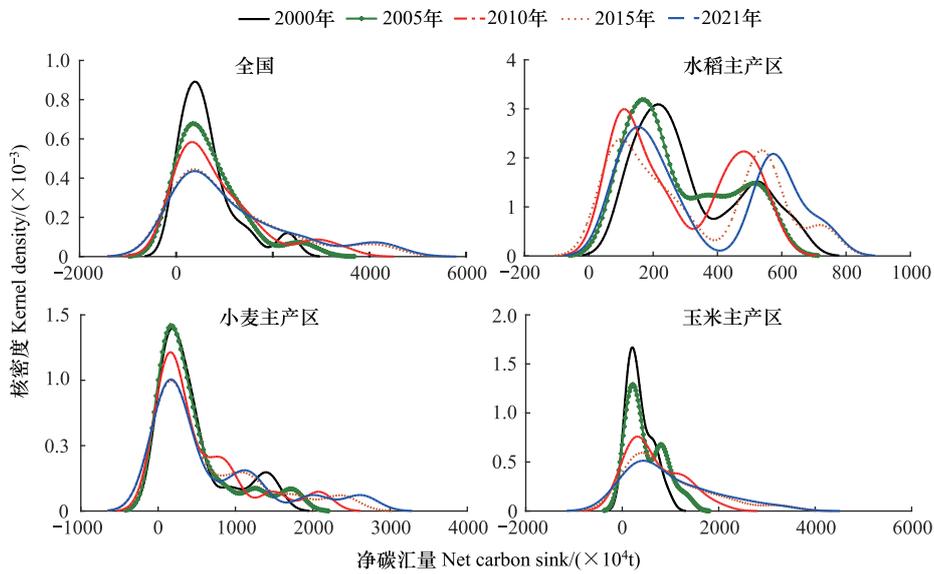


图4 中国粮食种植业碳效应演化趋势图

Fig.4 Trends in the evolution of the carbon effect of grain planting industry in China

(2) 三大主粮碳效应演化特征

从三大主粮碳效应的演化来看,水稻碳效应的核密度曲线呈双峰形态,双峰位均表现为先左偏后右移特征,主峰高度与峰度变化较小,次峰高度不断提升,峰度逐渐增大,表明水稻净碳汇量先减后增,净碳汇非均衡性有所减弱;小麦碳效应核密度曲线双峰形态渐弱,向单主峰形态演化,曲线中心位移不明显,表明小麦净碳汇水平持续提升,净碳汇非均衡性有所增强;玉米碳效应核密度曲线中心逐年向右移动,同时伴随着明显的

左偏态特征,波峰高度持续下降,宽度不断扩大。2000—2005年,核密度曲线双峰特征明显,2006—2021年,核密度曲线双峰逐渐消失,表明玉米净碳汇水平持续提高,净碳汇非均衡性有所增强。

2.2 粮食种植业碳排放公平性测度

2.2.1 粮食功能区的碳排放公平性

表2报告了按照粮食功能区测度的碳排放公平性结果。粮食功能区参考了《国家粮食安全中长期规划纲要(2008—2020年)》的定义。其中,粮食主产区指自然条件适宜,具有资源、技术等优势的重点粮食生产区,包括安徽、河北、河南、黑龙江、湖北、湖南、吉林、江苏、江西、辽宁、内蒙古、山东和四川等13个省(区);粮食平衡区指粮食生产基本实现自给自足的地区,包括甘肃、广西、贵州、宁夏、青海、山西、陕西、新疆、云南和重庆等10个省(区);粮食主销区指粮食产量低,需求缺口大的粮食消费区,包括北京、福建、广东、海南、上海、天津和浙江等7个省(区)。

表2 2000—2021年中国粮食种植业碳排放公平性测度结果

Table 2 Results of carbon emission equity measurement of China's grain farming industry during 2000—2021

年份 Year	整体基尼系数 Gini coefficient	地区内基尼系数 Intra-regional Gini coefficient			地区间基尼系数 Inter-regional Gini coefficient			贡献率 Contribution rate/%		
		主产区 Main producing region	平衡区 Balance region	主销区 Main sales region	主产- 平衡区 Main producing- balance region	主产- 主销区 Main producing- main sales region	平衡- 主销区 Balance- main sales region	地区内 差异 Intra- regional difference	地区间 差异 Inter- regional difference	超变密度 Transariation
2000	0.212	0.161	0.153	0.318	0.177	0.293	0.280	30.069	31.873	38.058
2003	0.240	0.217	0.150	0.344	0.195	0.331	0.307	31.602	29.833	38.565
2006	0.257	0.210	0.185	0.394	0.206	0.361	0.337	31.427	35.625	32.948
2009	0.242	0.176	0.183	0.410	0.188	0.342	0.342	30.520	32.337	37.143
2012	0.246	0.189	0.172	0.399	0.188	0.360	0.348	30.365	36.167	33.469
2015	0.249	0.175	0.179	0.428	0.186	0.378	0.373	29.353	38.629	32.018
2018	0.228	0.173	0.139	0.389	0.169	0.344	0.331	29.472	38.547	31.982
2021	0.225	0.179	0.142	0.355	0.175	0.324	0.311	30.149	35.250	34.601

(1) 整体公平性及其演化趋势

2000—2021年,中国粮食种植业碳排放基尼系数均值为0.241,变化趋势呈“快速上升—波动震荡—缓慢回落”特征;2000—2004年,碳排放基尼系数从0.212增至0.238,年均增长2.93%;2004—2015年,基尼系数持续波动,波动区间为0.242—0.263;2016—2021年,基尼系数缓慢下降,年均下降1.72%,最终降至0.225。以上结果表明中国粮食种植业碳排放始终处于较为公平区间,公平性呈改善趋势。

(2) 地区内公平性及其演化趋势

横向对比发现,主销区碳排放基尼系数偏大,始终高于全国平均水平,表明主销区碳排放公平性相对较低;而主产区、平衡区碳排放基尼系数始终小于全国平均水平,表明主产区和平衡区碳排放公平性相对较高。从纵向趋势看,主产区与主销区碳排放基尼系数均有所增大,主产区碳排放基尼系数从2000年的0.161上升至2021年的0.179,自2018年以来缓慢增长,主销区碳排放基尼系数从2000年的0.318上升至2021年的0.355,表明主产区和主销区粮食种植业碳排放公平性都有所减弱;平衡区碳排放基尼系数有所降低,从2000年的0.153减小至2021年的0.142,表明该区域粮食种植业碳排放公平性有所增强。

(3) 地区间公平性及其演化趋势

2000—2021年,地区间碳排放基尼系数均值由大及小依次为:主产-主销区>平衡-主销区>主产-平衡区。其中,主销区与其他两区碳排放公平性差距较大。从走势来看,三大地区间的基尼系数均呈现出先增后减的趋势。其中,主产-主销区从2000年的0.293上升至2017年的0.384,而后减小至2021年的0.324,年均增长

0.48%;平衡-主销区从2000年的0.280上升至2015年的0.373,而后减小至2021年的0.311,年均增长0.50%;主产-平衡区则从2000年的0.177升高至2013年的0.204,而后减小至2021年的0.175,年均下降0.06%。以上结果表明,尽管主销区同其他两区碳排放公平性差距有所扩大,但近些年呈现出了明显的追赶态势;主产区与平衡区之间碳排放公平性差距呈现缩小趋势。

(4) 公平性地区差异的分解

将碳排放公平性差异分解为地区内差异、地区间差异和超变密度。由表2可知,地区内差异的贡献率整体保持最低且较为稳定,区间为29.111%—31.427%。地区间差异与超变密度的贡献率阶段特征明显:2000—2003年,超变密度是碳排放公平性差异的首要来源,此阶段粮食种植业碳排放存在明显的区域交叠效应;2004—2017年,地区间差异的贡献率基本保持最高并呈波动上升态势,表明地区间差异是这一时期碳排放公平性差异的主要原因;2018—2021年,尽管地区间差异的贡献率仍为最高,但与超变密度贡献率差距逐渐缩小,表明地区间差异减弱,交叠现象愈发强烈。

2.2.2 三大主粮碳排放公平性

图5报告了水稻、小麦和玉米的碳排放公平性。从数值来看,水稻碳排放基尼系数最高,公平性最低,但其取值范围为0.213—0.279,仍处于较为公平区间;除2010与2013年外,小麦与玉米的碳排放基尼系数均低于0.2,处于高度公平区间。从趋势来看,水稻碳排放基尼系数呈“M”型变动,近年来,该系数持续下降,表明水稻碳排放公平性持续上升。玉米碳排放基尼系数呈现倒“U”型变动:2000—2012年,该系数呈上升趋势,年均增长2.2%;2013—2021年,该系数呈下降趋势,年均下降2.5%。

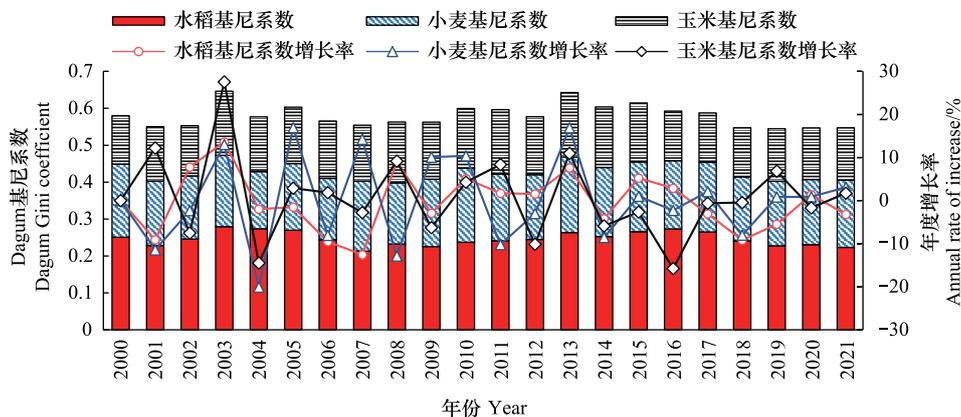


图5 2000—2021年中国三大作物种植净碳强度基尼系数变化特征

Fig.5 Characteristics of changes in Gini coefficients of net carbon intensity of three major crops in China during 2000—2021

3 研究结论与讨论

3.1 研究结论

运用系数法估算了2000—2021年中国30个省(市、区)的粮食种植业碳效应。其次,借助ArcGIS、核密度估计法讨论了粮食种植业碳效应的时空特征及演化趋势。最后,采用Dagum基尼系数探究了粮食种植业碳排放的公平性。主要得到如下结论:第一,我国粮食种植业碳效应呈现波动上升的净碳汇特征,具体表现为“东强西弱,北高南低”的空间格局,且伴随明显的“马太效应”。秸秆燃烧逐步成为粮食种植业第一大碳源,玉米种植则取代水稻种植成为碳汇主要来源。第二,省份间净碳汇演化趋势存在差异,多数省份粮食种植业净碳汇先减后增,少数省份始终保持渐增态势,全国粮食种植业碳效应的非均衡性呈扩大趋势。从三大主粮来看,水稻净碳汇量先减后增,净碳汇非均衡性有所减弱,而小麦和玉米的净碳汇量持续增加,净碳汇非均衡性有所扩大。第三,全国粮食种植业碳排放处于较公平区间,公平性存在改善态势。在碳排放区域差异方面,

产销平衡区粮食种植业碳排放最为公平,主销区粮食种植业碳排放公平性最低。从三大主粮对比来看,水稻碳排放基尼系数最高、公平性最低;玉米碳排放基尼系数最低、公平性最高。

3.2 讨论

精准勾勒粮食种植业碳效应的时空画像、解构碳排放公平性的内在组成是推动粮食种植业低碳化发展的必要前提。相较于前人研究,本文为把握粮食种植业净碳汇动态演进及公平性特征提供了依据,可能的创新点在于:第一,将秸秆燃烧与作物种植的碳排放纳入碳效应的测算框架,更精确地把握了粮食种植业碳效应特征;第二,基于 Dagum 基尼系数方法与净碳强度指标刻画粮食种植业碳排放公平性,拓展了碳效应公平性的研究视域;第三,根据粮食生产功能区与主粮品类细化碳效应研究,所得结果和结论针对性更强。本研究发现中国粮食种植业整体呈净碳汇状态,该判断与采用全生命周期法^[34]和采用实地测量法^[35]得到的核算结论一致,而粮食种植业碳效应存在“马太效应”的发现与田云和尹恣昊^[36]对农业碳效应的测算结果一致。

研究的不足之处及未来完善方向:一是囿于农资投入作物分项数据的不可得性,采用种植面积占比估算了三大主粮作物农资投入引起的碳排放量,这可能导致结果的准确性受到一定影响。实务部门应进一步细化作物种植过程中农资投入的数据颗粒度,以更精细的数据支撑精准化、绿色化的农业生产。二是限于土壤碳效应的核算系数缺乏普适性,未将土壤碳效应纳入到粮食种植业净碳汇核算体系。随着田间试验成果日渐丰富,可通过 Meta 荟萃分析估算土壤碳效应的核算系数。

根据结论提出如下政策建议:一是要采取差异化固碳减排策略。针对粮食净碳汇水平高的省份,应试行粮食“碳汇补偿”激励机制;针对粮食净碳汇水平低的地区,应试行粮食“碳税”政策。此外,要夯实秸秆燃烧管控工作,加快秸秆综合利用进程,将作物碳汇纳入种植结构调整的决策框架,以实现地区间粮食种植业碳排放公平性。二是要构建低碳发展跨区协作机制。应加强粮食主产区各省份之间的农业技术合作,促进低碳化种植方案与技术的有效传播,逐渐缩小国内粮食种植业碳效应的差异程度,促进低净碳汇地区向高净碳汇地区收敛。三是要完善碳排放责任分摊机制。建议将种植业碳效应纳入各省份碳排放约束性目标清单,并作为初始碳配额分配方案的参考依据,协调好碳排放权分配和粮食产业发展的关系。四是探索粮食碳汇交易试点。要有序扩大碳市场交易范围,通过在粮食主产区试行农业碳汇交易机制以挖掘粮食种植业碳汇价值,全面激发粮食主产区发展低碳农业的内生动力。

参考文献(References):

- [1] 金书秦,马如霞.当前农业碳汇价值实现的主要途径和完善建议.环境保护,2023,51(3):25-29.
- [2] 杨骞,司祥慧,王珏.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.自然资源学报,2022,37(3):600-615.
- [3] 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.
- [4] 吉雪强,刘慧敏,张跃松.中国农地流转对农业碳排放强度的影响及作用机制研究.中国土地科学,2023,37(2):51-61.
- [5] 谢会强,吴晓迪.城乡融合对中国农业碳排放效率的影响及其机制.资源科学,2023,45(1):48-61.
- [6] 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.
- [7] 夏四友,赵媛,许昕,文琦,宋永永,崔盼盼.1997—2016年中国农业碳排放率的时空动态与驱动因素.生态学报,2019,39(21):7854-7865.
- [8] 王雅楠,张琪琳,陈伟.基于碳汇功能的省域农业碳排放及减排潜力研究——以中国三种主要粮食作物为例.重庆社会科学,2022(5):58-75.
- [9] 吴贤荣,张俊飏.中国省域农业碳排放:增长主导效应与减排退耦效应.农业技术经济,2017(5):27-36.
- [10] 张卫建,严圣吉,张俊,江瑜,邓艾兴.国家粮食安全与农业双碳目标的双赢策略.中国农业科学,2021,54(18):3892-3902.
- [11] 罗怀良.国内农业碳源/汇效应研究:视角、进展与改进.生态学报,2022,42(9):3832-3841.
- [12] 李强,高威,魏建飞,姜志法,张杨,吕军骁.中国耕地利用净碳汇时空演进及综合分区.农业工程学报,2022,38(11):239-249.
- [13] 杜江,罗珺,王锐,王新华.粮食主产区种植业碳功能测算与时空变化规律研究.生态与农村环境学报,2019,35(10):1242-1251.
- [14] 范紫月,齐晓波,曾麟岚,吴锋.中国农业系统近40年温室气体排放核算.生态学报,2022,42(23):9470-9482.
- [15] Liu D N, Guo X D, Xiao B W. What causes growth of global greenhouse gas emissions? Evidence from 40 countries. Science of the Total Environment, 2019, 661: 750-766.

- [16] 刘志华, 徐军委. “双碳”目标下中国省域碳排放公平性及其影响因素. 地理科学, 2023, 43(1): 92-100.
- [17] 戴小文, 李金花, 何艳秋, 王芳. 2000—2020年中国畜牧业区域碳排放公平性与排放效率. 资源科学, 2023, 45(1): 62-76.
- [18] 谢永浩, 刘争. 中国省域种植业碳汇量、碳排放量的时空分异及公平性研究. 世界农业, 2022(2): 100-109.
- [19] 田云, 吴海涛. 产业结构视角下的中国粮食主产区农业碳排放公平性研究. 农业技术经济, 2020(1): 45-55.
- [20] Cantore N. Distributional aspects of emissions in climate change integrated assessment models. Energy Policy, 2011, 39(5): 2919-2924.
- [21] 刘贤赵, 杨旭, 张国桥, 王天浩. 碳排放空间依赖视角下环境分权的碳排放效应. 地理科学, 2021, 41(9): 1654-1666.
- [22] 苏培添, 王磊. 数字普惠金融对中国农业碳排放强度影响的空间效应与机制. 资源科学, 2023, 45(3): 593-608.
- [23] 赵敏娟, 石锐, 姚杨柳. 中国农业碳中和目标分析与实现路径. 农业经济问题, 2022, 43(9): 24-34.
- [24] 郭海红, 盖凌云. 中国农业碳效应时空分异及驱动机理研究. 宁夏社会科学, 2021(5): 74-84.
- [25] Chen W D, Peng Y F, Yu G Y. The influencing factors and spillover effects of interprovincial agricultural carbon emissions in China. PLoS One, 2020, 15(11): e0240800.
- [26] 郑玉雨, 葛察忠, 于法稳. 低碳视角下农业集约化、绿色化与资源再生化的实现机制研究. 华中农业大学学报: 社会科学版, 2022(1): 32-44.
- [27] 程琳琳. 中国农业碳生产率时空分异: 机理与实证[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- [28] 彭立群, 张强, 贺克斌. 基于调查的中国秸秆露天焚烧污染物排放清单. 环境科学研究, 2016, 29(8): 1109-1118.
- [29] 于卓卉, 毛世平. 中国农业净碳排放与经济增长的脱钩分析. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(11): 30-42.
- [30] 王修兰. 二氧化碳、气候变化与农业. 北京: 气象出版社, 1996.
- [31] Han J, Meng X, Zhou X, Yi B L, Liu M, Xiang W N. A long-term analysis of urbanization process, landscape change, and carbon sources and sinks: a case study in China's Yangtze River Delta region. Journal of Cleaner Production, 2017, 141: 1040-1050.
- [32] 吴昊玥, 孟越, 黄瀚蛟, 陈文宽. 中国耕地低碳利用绩效测算与时空分异. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1148-1163.
- [33] 陆钰凤. 中国化肥减量政策变迁及其内在逻辑. 农业经济问题, 2022, 43(9): 74-85.
- [34] She W, Wu Y, Huang H, Chen Z D, Cui G X, Zheng H B, Guan C Y, Chen F. Integrative analysis of carbon structure and carbon sink function for major crop production in China's typical agriculture regions. Journal of Cleaner Production, 2017, 162: 702-708.
- [35] Liu F, Zhang Y C, Wang X C, Qi Y Q, Min L L, Yu G R, Hu C S, Shen Y J. Achieving grain security and carbon neutrality: challenges from carbon allocation. Journal of Cleaner Production, 2023, 427: 139214.
- [36] 田云, 尹恣昊. 产业集聚对中国农业净碳效应的影响研究. 华中农业大学学报: 社会科学版, 2021(3): 107-117, 188.