

DOI: 10.20103/j.stxb.202403250622

薛中伟, 秦会艳. 黄河流域农田生态系统碳足迹时空演化、区域差异及收敛性. 生态学报, 2025, 45(8): 3645-3658.

Xue Z W, Qin H Y. Spatio-temporal evolution, regional differences and convergence of carbon footprints of farmland ecosystems in the Yellow River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(8): 3645-3658.

# 黄河流域农田生态系统碳足迹时空演化、区域差异及收敛性

薛中伟, 秦会艳\*

东北林业大学经济管理学院, 哈尔滨 150040

**摘要:** 农田生态系统具有碳源和碳汇的双重作用, 探究农田生态系统碳足迹对农业高质量发展具有重要意义。研究采用碳源碳汇法构建区域农田生态系统碳足迹模型, 分析黄河流域农田生态系统的时空演化特征, 并采用 Dagum 基尼系数法和  $\sigma$  检验揭示黄河上中下游的区域差异及收敛性特征。研究发现: 1) 黄河流域农田碳排放总体呈现先增后减的趋势, 年均增长率为 0.94%; 而碳汇稳步上升, 年均增长率为 2.41%。碳足迹总体呈现出波动式下降的变化特征, 降幅达 17.80%, 空间上呈现出东北部高, 中西部低的分布格局。2) 上中下游的区域间差异和区域内差异对总体差异的平均贡献率分别为 26.86%、59.84%; 3) 黄河流域下游地区存在显著的  $\sigma$  收敛特征, 而其余区域则不明显。黄河流域碳足迹存在明显的空间差异, 因此需要推动黄河流域农田生态系统向协同低碳发展的方式转变。

**关键词:** 黄河流域; 农田生态系统; 碳足迹; 空间差异; 收敛性

## Spatio-temporal evolution, regional differences and convergence of carbon footprints of farmland ecosystems in the Yellow River Basin

XUE Zhongwei, QIN Huiyan\*

School of Economics and Management, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

**Abstract:** Farmland ecosystem serves dual roles as a carbon source and carbon sink, underscoring the importance of examining its carbon footprint for the advancement of high-quality agriculture. We developed a carbon footprint model incorporating the carbon source & sink approach to assess spatiotemporal evolution traits and investigated regional disparities and convergence tendencies using the Dagum Gini coefficient and  $\sigma$  tests. The results showed that: 1) Carbon emissions from farmland in the Yellow River Basin generally exhibit an initial increasing trend followed by a decrease, averaging an annual growth rate of 0.94%, whereas the carbon sink has shown a consistent upward trajectory, averaging an annual growth rate of 2.41%. The carbon footprint generally showed a fluctuating decline, dropping by 17.80%, and displayed a spatial distribution characterized by higher values in the northeast and lower values in the central and western regions. 2) The average contribution rates of inter-regional and intra-regional disparities to the overall differences were 26.86% and 59.84%, respectively. 3) Significant  $\sigma$  convergence characteristics are observed in the lower reaches, while no clear convergence is evident in other regions. Given the significant spatial variability, a shift towards a coordinated low-carbon development strategy for the Yellow River Basin's farmland ecosystems is recommended.

**基金项目:** 国家社会科学基金青年项目(22CGL064); 黑龙江哲学社会科学研究规划项目青年项目(21JYC242); 黑龙江省自然科学基金优秀青年项目(YQ2023G001)

收稿日期: 2024-03-25; 网络出版日期: 2025-01-20

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huiyanqin@hotmail.com

**Key Words:** Yellow River Basin; farmland ecosystem; carbon footprint; spatial variation; convergence

人类活动释放的大量温室气体使得地球表面温度上升约 0.89℃,全球变暖给人类的生存带来了极大的威胁<sup>[1]</sup>。作为应对气候变化的坚定践行者,我国已将“碳达峰”和“碳中和”(双碳)纳入经济社会发展的目标之一。农业是全球重要温室气体来源之一,我国农业碳排放量已占全国碳排放总量的 17%<sup>[2]</sup>,农田生态系统作为农业碳减排和农业高质量发展的重要载体和单元在应对气候变化实现双碳目标中发挥着重要的作用。

近年来针对农田生态系统碳源、碳汇的问题进行了诸多探讨,国内外学者大多从农业投入<sup>[3-4]</sup>、土地利用<sup>[5-6]</sup>和作物种植变化<sup>[7]</sup>出发,建立不同碳测算模型对碳源、碳汇进行研究,基于省市视角估算出农业碳排放量、碳吸收量,进一步利用莫兰指数<sup>[8]</sup>探究碳排放在空间聚集上的表现,也有利用气候变化特征探究农田碳排放通量变化规律<sup>[9]</sup>,但碳排放计算仅关注农田种植的碳消耗,未全面体现对自然生态系统的压力与资源占用。因此碳足迹作为一种能够兼顾“碳汇”和“碳源”的新研究方法,逐渐成为农田生态系统领域的研究热点<sup>[10]</sup>,碳足迹目前主流测算方法主要有碳源碳汇法<sup>[11]</sup>、生命周期法<sup>[12]</sup>和投入产出法<sup>[13]</sup>。生命周期法允许在原始数据无法获取时采用次级数据,但这种替代可能会降低碳足迹分析的可信度,而投入产出法基于货币价值和物质单元之间的联系建立的,但相同价值量的产品在生产过程中所隐含的碳排放量可能存在显著差异<sup>[14]</sup>,由于农田生态系统具有碳源和碳汇的双重属性,因此更加适用于碳源碳汇法。目前农田生态系统碳足迹在时间与空间研究上仍然处于起步阶段,主要集中于利用 Tapio 脱钩模型<sup>[15]</sup>对农田碳足迹与粮食产量之间的脱钩效应进行分析,或利用 LMDI 因素分解模型<sup>[16-17]</sup>,考察生产效率、生产结构、经济水平、劳动力规模对碳排放的影响,然而现有研究对农田碳足迹的考察焦点集中于脱钩效应和影响因素,缺乏在空间层次上区域差异的源头及差异的收敛性研究;且多从省市角度出发,鲜有从带状区域角度出发,忽略了对于区域农田碳足迹的时空变化分析。

黄河流域作为我国农耕文明的发源地和重要的农业生产区,自 1990 年以来,其粮食产量占全国粮食总产量平均为 33.6%<sup>[18]</sup>,为保障我国粮食安全发挥了巨大作用。目前关于黄河流域碳足迹的研究不足,现有的研究主要从种植业碳足迹出发,利用标准差椭圆和时空地理加权回归模型,揭示其空间格局及分布动态<sup>[19]</sup>,也有从时空维度对其动态演化展开分析,引入供需平衡指数与长江经济带种植业碳足迹进行对比研究<sup>[20]</sup>。由于流域内不同地区的农业生产条件、种植结构、耕作方式等存在较大差异,导致农田碳足迹呈现出明显的区域特征。因此以黄河流域农田生态系统作为研究对象,从碳源、碳汇和碳足迹出发来探讨黄河流域低碳农业水平和空间差异性,积极探索黄河流域农田绿色低碳发展的路径,推动农业高质量发展,实现经济效益、生态效益和社会效益的协调统一。鉴于此,本研究对 2001—2021 年黄河流域九省农田生态系统碳足迹进行定量测度,利用 ArcGIS 从省域尺度进行时空演变趋势分析的基础上,进一步采用 Dagum 基尼系数与  $\sigma$  收敛从上中下游探讨空间差异的源头与收敛性,以期为黄河流域农田生态系统区域协同增汇减源,为实现双碳目标贡献力量。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

黄河流域位于 96°—119°E、32°—42°N 之间,东西长约 1900 km,南北宽约 1100 km,流域面积 79.5 万 km<sup>2</sup>。发源于青海省巴颜喀拉山脉,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东 9 个省区,直至山东省东营市流入渤海,从西到东横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和黄淮海平原四个地貌单元。冬季受来自内陆的干冷气流的影响,天气寒冷,干燥少雨;夏季受来自海洋的暖湿气流的影响,高温潮湿多雨。高温期与多雨期一致,水热搭配好,对农作物的生长十分有利。2021 年黄河流域 9 省(区)农作物总播种面积为 5793.19 万 hm<sup>2</sup>,占全国的 34.34%,粮食产量占全国的 34.95%。农业总产值为 25847.85 亿元,占全国的 32.99%。近年来《中华人民共和国黄河保护法》的生效强调山水林田湖草沙一体化保护与修复,对于巩固黄

河流域农田碳汇能力的提升、推动绿色低碳农业的发展、助力双碳目标的实现具有重要意义。

## 1.2 数据来源

2001—2021 年黄河流域的耕地面积、农作物播种面积、农药施用量、农业机械总动力、有效灌溉面积等数据来源于各省的统计年鉴以及《中国农村统计年鉴》。对于缺失的数据利用 Stata 进行线性插值法补齐。

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 农田生态系统碳足迹模型

#### (1) 农田生态系统碳排放估算

在整个农田生态系统的生产过程中,碳排放主要来源于农业生产投入,本研究选取农业生产投入中的化肥、农药、农膜、机械、灌溉、土地翻耕和柴油 7 个碳排放类型测算农田生态系统碳排放量<sup>[21]</sup>,计算模型如下:

$$E = E_f + E_p + E_m + E_e + E_i + E_g + E_s \quad (1)$$

$$E_f = G_f \times A \quad (2)$$

$$E_p = G_p \times B \quad (3)$$

$$E_m = G_m \times C \quad (4)$$

$$E_e = (A_e \times D) + (W_e \times F) \quad (5)$$

$$E_i = G_i \times G \quad (6)$$

$$E_g = G_g \times I \quad (7)$$

$$E_s = G_s \times K \quad (8)$$

式中: $E$  为农田生产过程中总碳排放量(kg); $E_f$  为农田生产过程中农用化肥碳排放量(kg); $E_p$  为农田生产过程中农药碳排放量(kg); $E_m$  为农田生产过程中农用塑料薄膜碳排放量(kg); $E_e$  为农田生产过程中农业机械碳排放量(kg); $E_i$  为农田生产过程中农业灌溉碳排放量(kg); $E_g$  为农田生产过程中土地翻耕碳排放量(kg); $E_s$  为农田生产过程中农用柴油碳排放量(kg); $G_f$  为农用化肥施用量(kg); $G_p$  为农药使用量(kg); $G_m$  为农用塑料薄膜使用量(kg); $A_e$  为农作物总播种面积( $\text{hm}^2$ ); $W_e$  为农业机械总动力(kW); $G_i$  为有效灌溉面积( $\text{hm}^2$ ); $G_g$  为土地翻耕面积( $\text{hm}^2$ ); $G_s$  为农用柴油使用量(kg); $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $F$ 、 $G$ 、 $I$ 、 $K$  分别为对应的碳排放系数,具体见表 1。

表 1 农田生态系统碳排放系数及参考来源

Table 1 Carbon emission coefficient of farmland ecosystem and its reference sources

指标 Index	碳排放系数 Carbon emission factor	参考来源 Reference source
氮肥 Nitrogen fertilizer	2.116/(kg CO <sub>2</sub> /kg)	陈舜等 <sup>[22]</sup>
磷肥 Phosphate fertilizer	0.636/(kg CO <sub>2</sub> /kg)	陈舜等 <sup>[22]</sup>
钾肥 Potash fertilizer	0.180/(kg CO <sub>2</sub> /kg)	陈舜等 <sup>[22]</sup>
复合肥 Compound fertilizer	1.770/(kg CO <sub>2</sub> /kg)	CLCD <sup>[23]</sup>
农药 Pesticide	4.930/(kg CO <sub>2</sub> /kg)	ORNL <sup>[24]</sup>
农膜 Agricultural plastic film	5.180/(kg CO <sub>2</sub> /kg)	IREEA <sup>[24]</sup>
农田耕作 Field husbandry	16.470/(kg CO <sub>2</sub> /hm <sup>2</sup> )	李明琦等 <sup>[25]</sup>
农业机械总动力 Farm machinery	0.180/(kg CO <sub>2</sub> /kW)	West 等 <sup>[26]</sup>
农田灌溉 Irrigation of agricultural land	266.480/(kg CO <sub>2</sub> /hm <sup>2</sup> )	段华平等 <sup>[27]</sup>
土地翻耕 Ploughing soil	312.600/(kg CO <sub>2</sub> /hm <sup>2</sup> )	中国农业大学生物与技术学院 <sup>[24]</sup>
农用柴油 Agricultural diesel fuel	0.593/(kg CO <sub>2</sub> /kg)	IPCC <sup>[24]</sup>

CLCD:中国生命周期基础数据库 China life cycle database;ORNL:美国橡树岭国家实验室 Oak ridge national laboratory;IREEA:南京农业大学农业资源与生态环境研究所 Institute of Resources & Ecological Environment of Agricultural;IPCC:联合国政府间气候变化专门委员会 Intergovernmental Panel on Climate Change

#### (2) 农田生态系统碳汇估算

农田生态系统中农作物碳汇量受到农作物产量、固碳率、根冠比、水分系数等影响<sup>[28]</sup>,计算模型如下:

$$C = \sum_i C_i = \sum_i Z_i G_i (1 + V_i) (1 - Y_i) / H_i \quad (9)$$

式中:  $C$  是为农田农作物总碳汇量(t);  $i$  为农作物的种类;  $C_i$  为  $i$  类农作物碳汇量(t);  $Z_i$  为  $i$  类农作物的产量(t);  $G_i$  为  $i$  类农作物的固碳率;  $V_i$  为  $i$  类农作物的根冠比率;  $Y_i$  为  $i$  类农作物的水分系数;  $H_i$  为  $i$  类农作物的经济系数, 具体见表 2<sup>[25, 29—31]</sup>。

表 2 黄河流域农田生态系统主要农作物碳汇测算参考系数

Table 2 Reference coefficients of carbon sink calculation of main crops in farmland ecosystem of the Yellow River Basin

作物种类 Category of crops	含碳量 Carbon content	水分系数 Water coefficient	经济系数 Economic coefficient	根冠比 Root top ratio
水稻 Rice	0.417	0.120	0.490	0.600
小麦 Wheat	0.485	0.117	0.400	0.400
玉米 Corn	0.471	0.130	0.400	0.160
谷子 Millet	0.450	0.130	0.400	0.200
高粱 Sorghum	0.450	0.130	0.350	0.270
大麦 Barley	0.485	0.120	0.400	0.400
豆类 Beans	0.450	0.130	0.350	0.130
薯类 Potatoes	0.423	0.700	0.700	0.180
棉花 Cotton	0.450	0.115	0.280	0.120
油料 Oil crops	0.450	0.130	0.100	0.040
麻类 Bast fiber crops	0.450	0.130	0.100	0.400
甘蔗 Cane	0.450	0.680	0.750	0.260
甜菜 Beet	0.450	0.700	0.600	0.720
烟叶 Tobacco	0.450	0.150	0.430	0.320
水果 Fruit	0.450	0.900	0.700	0.250
蔬菜 Vegetable	0.450	0.850	0.830	0.250

### (3) 农田生态系统碳足迹估算

农田生态系统碳足迹表征为吸纳碳排放所需要的生产性土地面积, 碳足迹(CEF)的计算公式为<sup>[27]</sup>:

$$CEF = E / NEP \quad (10)$$

$$NEP = C / S \quad (11)$$

式中: CEF 为农田生态系统碳足迹( $\text{hm}^2$ );  $E$  为农田生态系统的碳排放总量(kg); NEP 为农田生态系统单位面积碳汇量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ );  $C$  为农田农作物总碳汇量(kg);  $S$  为耕地面积( $\text{hm}^2$ )。

将农田生态系统碳足迹与农田生态承载力作比较, 当农田生态系统碳足迹在生态承载力承受范围之内就会出现生态盈余; 反之其超出了农田生态承载力承受范围就会出现生态赤字, 具体的表达式为:

$$CER = S - CEF \quad (CEF \leq S) \quad (12)$$

$$CED = CEF - S \quad (CEF \geq S) \quad (13)$$

式中: CER 为生态盈余; CED 为生态赤字。

### 1.3.2 Dagum 基尼系数

Dagum 基尼系数与传统的基尼系数、泰尔指数相比, 可以有效地解决地区差距的来源以及各样本间的交叉重叠的问题<sup>[32]</sup>, 研究拟使用 Dagum 基尼系数来研究黄河流域农田生态系统碳足迹的地区差异, 总体基尼系数的计算公式如下:

$$G = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{h=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |\rho_{ji} - \rho_{hr}|}{2n^2y} \quad (14)$$

式中:  $n$  为省份总数;  $k$  为子群个数, 指上游、中游和下游;  $n_j$  ( $n_h$ ) 表示  $j$  ( $h$ ) 子群内的省份数量;  $j$  和  $h$  表示为子

群划分个数,  $i$  和  $r$  表示为子群内省份个数;  $\rho_{ji}(\rho_{hr})$  表示为  $j(h)$  子群中任意省份的碳足迹;  $y$  表示黄河流域农田生态系统所有省份的碳足迹均值。  $G$  值越大, 就表示省份之间的低碳农业发展水平越不平衡; 为了方便计算需要先对子群内碳足迹均值进行排序, 如公式 (14) 所示:

$$y_h \leq y_j \leq \dots \leq y_k \quad (15)$$

构建子群  $j$  的基尼系数以及  $j$  和  $h$  地区间的基尼系数, 公式如下

$$G_{jj} = \frac{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_j} |\rho_{ji} - \rho_{jr}|}{n_j^2} \quad (16)$$

$$G_{jh} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |\rho_{ji} - \rho_{hr}|}{n_j n_h (y_j + y_h)} \quad (17)$$

式中:  $y_j(y_h)$  表示  $j(h)$  子群的碳足迹均值; 此外, 为了构建 Dagum 基尼系数子群分解函数, 进一步定义如下变量:

$$D_{jh} = \frac{d_{jh} - p_{jh}}{d_{jh} + p_{jh}} \quad (18)$$

$$d_{jh} = \int_0^{\infty} d F_j(\rho) \int_0^{\rho} (\rho - x) d F_h(x) \quad (19)$$

$$p_{jh} = \int_0^{\infty} d F_h(\rho) \int_0^{\rho} (\rho - x) d F_j(x) \quad (20)$$

式中:  $p_j = n_j/n$ ,  $s_j = n_j \times y_j / ny$ ,  $j = 1, 2, 3, \dots, k$ ;  $D_{jh}$  为  $j$  子群和  $h$  子群之间碳足迹的相对影响;  $d_{jh}$  为  $j$  子群和  $h$  子群之间的碳足迹差值, 可以理解为  $j$  子群和  $h$  子群中  $\rho_{ji} > \rho_{hr}$  的样本值之和的数学期望;  $p_{jh}$  为超变矩阵, 可以理解为  $j$  子群和  $h$  子群中  $\rho_{ji} < \rho_{hr}$  的样本值之和的数学期望;  $F_j(h)$  为  $j(h)$  分区的累积密度分布函数。

根据 Dagum 所提出的基尼系数分解法<sup>[33]</sup>, Dagum 基尼系数  $G$  主要由子群内差异  $G_w$ 、子群间差异  $G_{nb}$  以及超变密度  $G_t$  三个部分构成, 同时满足  $G = G_w + G_{nb} + G_t$ 。具体公式为:

$$G_w = \sum_{j=1}^k G_{jj} p_j s_j \quad (21)$$

$$G_{nb} = \sum_{j=2}^k \sum_{h=1}^{j-1} G_{jh} (p_j s_h + p_h s_j) D_{jh} \quad (22)$$

$$G_t = \sum_{j=2}^k \sum_{h=1}^{j-1} G_{jh} (p_j s_h + p_h s_j) (1 - D_{jh}) \quad (23)$$

### 1.3.3 收敛性检验

收敛理论起源于新古典经济增长理论中的资本边际报酬递减原理, 在经济学中用来解释不同地区之间经济增长率趋势动态变化。收敛理论主要分为两种收敛机制, 即  $\sigma$  收敛和  $\beta$  收敛。  $\sigma$  收敛是指不同地区碳足迹的离散程度随时间推移而不断下降额度情况。  $\beta$  收敛又分为绝对  $\beta$  收敛和条件  $\beta$  收敛, 绝对  $\beta$  收敛主要关注落后地区是否能够随着时间推移追赶上发达地区。而条件  $\beta$  收敛则着眼于各地区是否向着其特定的稳态水平趋同<sup>[34]</sup>。由于研究的对象数量和区域范围有限, 本研究采用  $\sigma$  收敛进行检验, 通常用地区水平指标的变异系数来衡量<sup>[35]</sup>, 具体公式如下:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_j} (\text{CEF}_{ij} - \overline{\text{CEF}_{ij}})^2 / N_j}}{\overline{\text{CEF}_{ij}}} \quad (24)$$

式中:  $j$  为各个子群区域, 即上游、中游和下游;  $i$  为各子群区域中的省份;  $N_j$  表示各子群区域中省份的数量;

$CEF_{ij}$ 表示  $j$  区域农田碳足迹;  $\overline{CEF_{ij}}$ 表示  $j$  区域农田碳足迹的平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 黄河流域农田生态系统碳足迹时空特征

#### 2.1.1 黄河流域农田生态系统碳排放时空特征

基于碳源碳汇法测算出黄河流域九省农田生态系统碳排放量结果,如图 1 所示。从黄河流域整体来看,2001—2021 年黄河流域农田碳排放量呈现出先增后降的变化趋势。其中 2001—2016 年黄河流域农田生态系统碳排放量呈逐步上升的趋势,从 5347 万 t 达到峰值 7005.21 万 t,增长了 1658.21 万 t,年平均增长率为 1.82%,2021 年农田投入碳排放量较 2016 年下降了 564.63 万 t,年平均减幅为 1.67%。从省际尺度来看,甘肃省、陕西省、河南省、山西省、四川省和山东省六省农田生态系统碳排放量都是呈现先增后减的变化趋势,宁夏和青海省的碳排放量在研究期间内基本保持一致。从增长速度来看,增幅最快的是内蒙古为 101.59%,年均增长为 680.55 万 t,并且在 2021 年有一个明显的上升趋势,甘肃省、陕西省和河南省增幅都是在 30%—45%之间,分别为 34.00%、30.48%与 30.32%,增幅较低的省份为山西省和四川省,增幅分别为 18.69%和 3.66%,只有山东省出现了负增长,降幅为 8.78%,主要与山东省积极探索碳减排措施,调整农业生产结构有关。

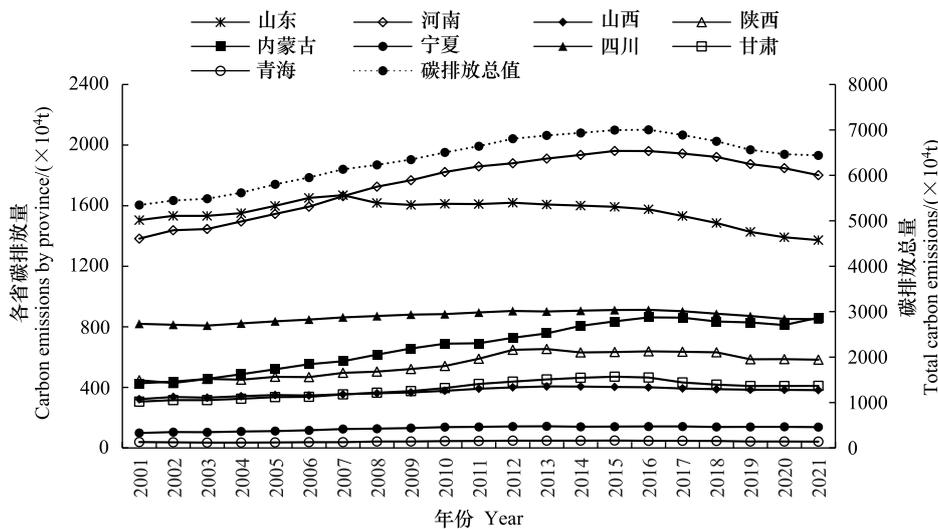


图 1 2001—2021 年黄河流域农田生态系统碳排放量时序变化

Fig.1 Temporal changes of carbon emissions from farmland ecosystems in the Yellow River Basin from 2001 to 2021

在空间分布方面,本研究选取 2001、2006、2011、2016、2021 年数据,借助 ArcGIS 进行可视化分析(以下的碳汇及碳排放均选取相同年份数据),结合图 1 和图 2 分析可得:黄河流域农田生态系统碳排在空间层面上呈现出东南部高、中西部低的格局,并且存在明显的差异。不同省份之间的碳排放量的差异较大,其中河南省与山东省一直处于黄河流域碳排放总量的前列,年平均碳排放量分别为 1751.17 万 t 和 1556.67 万 t,两个省份碳排放量几乎占了黄河流域农田生态系统碳排放量的一半,为 49.29%,这主要是因为河南省与山东省的耕地面积大,导致土地翻耕与灌溉造成的碳排放量要多于其他省份,同时化肥的施用量也始终居高不下;其次是内蒙古和四川省,分别占比 13.60%和 13.20%;碳排放量最少的省是青海省,年平均排放量为 42.79 万 t,占比为 0.65%。区域间的总量差异明显,下游地区几乎是上中游地区碳排放量的 2 倍。

#### 2.1.2 黄河流域农田生态系统碳汇时空特征

研究期间黄河流域整体上及省际尺度上农田生态系统农作物碳汇总量在时间序列上呈现出稳步递增的趋势(图 3),2001 年黄河流域农田农作物碳汇总量为 25163.34 万 t,到 2021 年增长至 40520.75 万 t,增加了

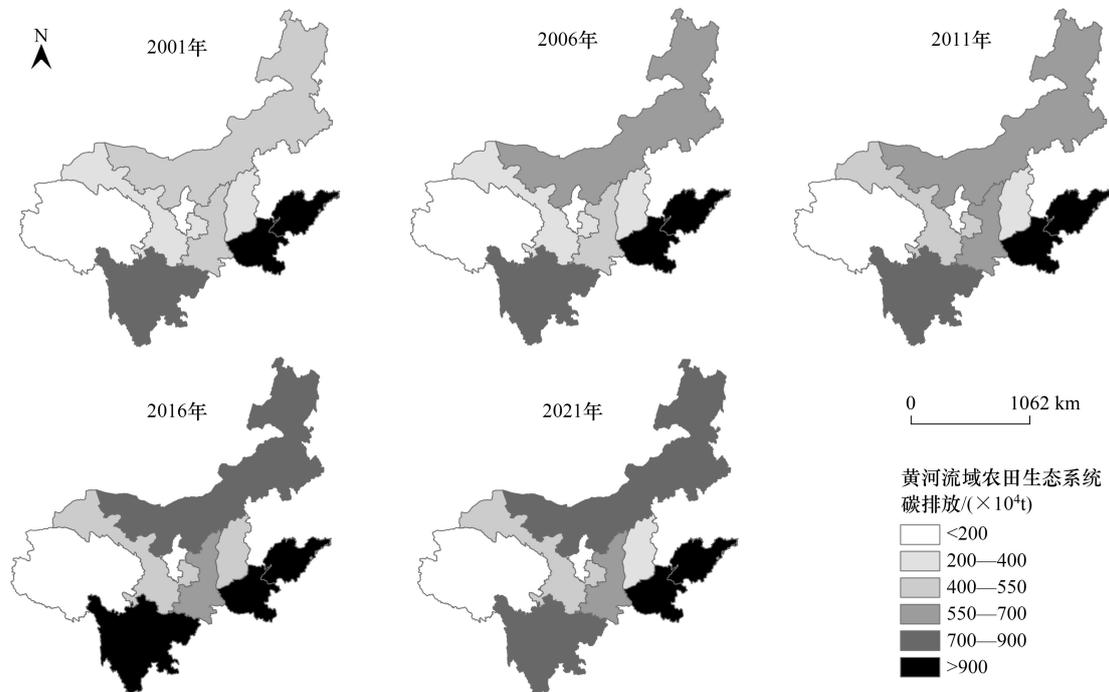


图2 2001—2021年黄河流域农田生态系统碳排放空间变化

Fig.2 Spatial variation of farmland ecosystem carbon emissions in the Yellow River Basin from 2001 to 2021

15357.41 万 t, 年平均增长率为 2.41%。其中增长量最多的省份是河南省, 增长了 4957.98 万 t, 增幅为 65.48%, 但在 2003 年和 2021 年分别有明显急剧下降的变化, 2003 年主要原因在于遭受罕见的洪涝灾害, 使得秋季农作物严重减产所导致的结果, 在 2021 年也是受到“720 洪灾”的影响有明显下降趋势。增幅最大的是内蒙古, 从 2001 年的 1858.8 万 t 增长到 2021 年的 5593.79 万 t, 增幅约为 200.93%, 碳汇增幅超过 50% 的省份有山西省和甘肃省, 增幅分别为 85.77% 和 63.47%, 增幅最小的 3 个省份为青海省、宁夏和山东省, 增幅分别为 34.50%、32.40% 和 31.77%。

在空间层面, 研究期内黄河流域农田生态系统碳汇呈现出由西部向南部和北部逐渐增加的分布格局 (图 4)。碳汇量最大的省份是河南省, 占黄河流域农田碳汇总量的 30.92%, 山东省与四川省农田碳汇总量仅次于河南省, 分别占黄河流域农田碳汇总量的 23.65% 与 15.24%, 可能得益于这些省份降水量和光照充足, 适合多种农作物的生长, 是我国粮食主产区的重要组成部分, 但两省在 2002 年以及 2006 年分别遭遇了罕见旱灾, 导致了农田碳汇量的下降。内蒙古、陕西省、山西省和甘肃省分别占碳汇总量的 13.80%、5.30%、4.74% 以及 4.46%。宁夏和青海省是占黄河流域农田碳汇总量最少的两个省份, 分别占 1.23% 和 0.65%, 两省海拔较高、地势起伏大, 草地和林地面积多于耕地面积, 农业发展相对缓慢。

### 2.1.3 黄河流域农田生态系统碳足迹时空特征

黄河流域农田生态系统碳足迹总量从 2001 年的 945.33 万  $\text{hm}^2$  减少至 2021 年的 776.97 万  $\text{hm}^2$ , 降幅达 17.80% (图 5)。其变化特征主要分为三个阶段, 2001—2006 年趋于平衡, 下降了 57.8506 万  $\text{hm}^2$ ; 2006—2009 年呈波动变化, 同时达到峰值为 1012.3 万  $\text{hm}^2$ ; 2009—2021 年开始持续下降, 年平均降幅为 2.18%。从省际尺度来看 (图 6), 大部分省份农田碳足迹呈现出波动式变化, 青海省和宁夏农田碳足迹则趋于平稳。其中内蒙古从 2001 年到 2021 年农田碳足迹上升了 23.17 万  $\text{hm}^2$ , 增幅为 14.23%, 在 2009 年与 2019 年有急剧上升的趋势, 2009 年主要得益于内蒙古部分地区农业开发、调查标准和技术方法得到改进, 农村税费政策调整等原因使得耕地面积明显增加<sup>[36]</sup>, 而 2019 年则在于调查标准和技术方法的改进对耕地面积的增加起到了重要作用<sup>[37]</sup>。山东省、河南省、山西省、陕西省、宁夏、四川省和青海省在研究期间内农田碳足迹分别下降了 66.36、

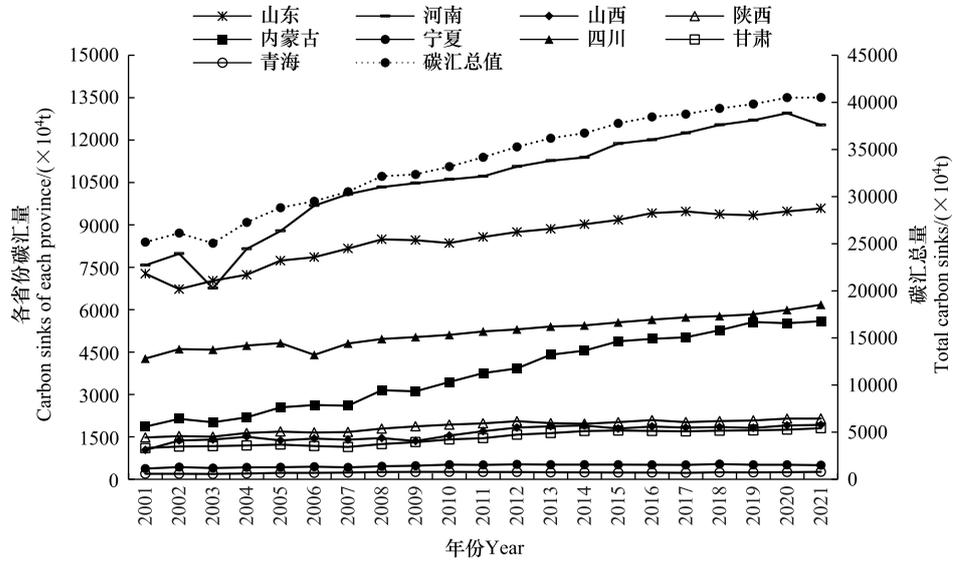


图3 2001—2021年黄河流域农田生态系统碳汇时序变化

Fig.3 Temporal changes of carbon sink in farmland ecosystem in the Yellow River Basin from 2001 to 2021

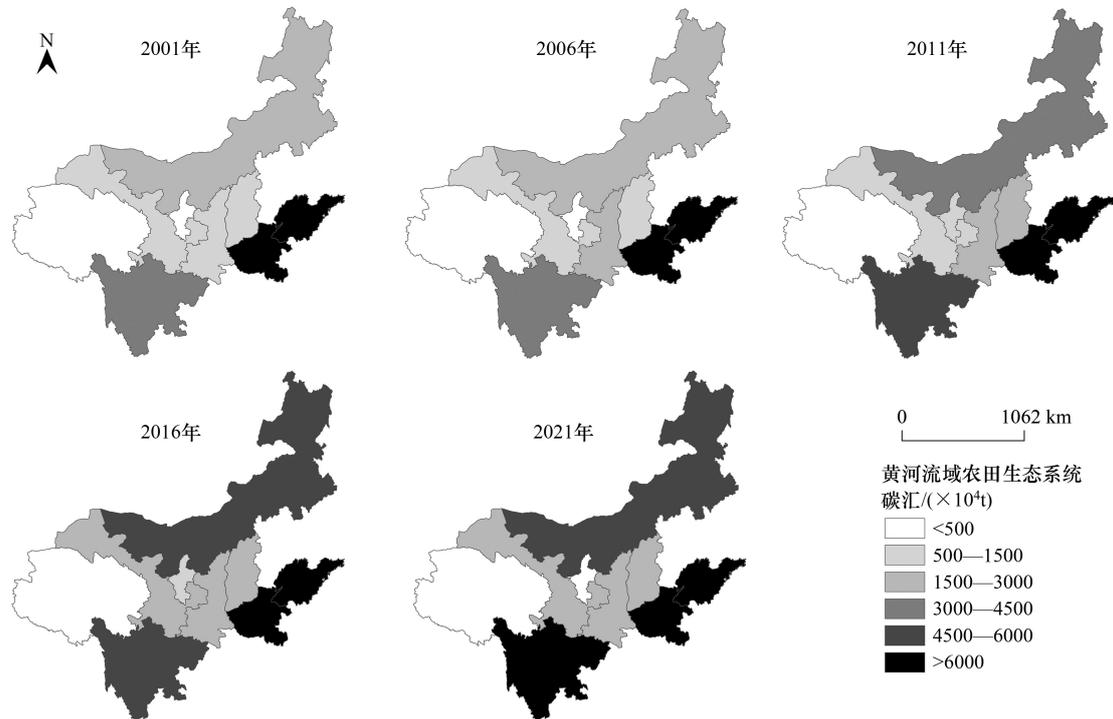


图4 2001—2021年黄河流域农田生态系统碳汇空间变化

Fig.4 Spatial variation of farmland ecosystem carbon sink in the Yellow River Basin from 2001 to 2021

17.06、57.46、65.81、0.97、8.87、4.09 万  $hm^2$ ，其中河南省在 2003 年由于粮食流通体制改革以及洪灾等原因碳足迹上升到 153.71 万  $hm^2$ 。甘肃省农田碳足迹上升了 29.09 万  $hm^2$ ，但是受到《“十三五”控制温室气体排放工作方案》以及《甘肃省“十四五”推进农业农村现代化规划》的影响，碳足迹有下降的趋势。

从黄河流域农田生态系统碳足迹与其生态承载力的比较来看(图 5)，生态承载力均大于碳足迹，表示在过去的二十年里，黄河流域农田生态系统在生态盈余方面呈现出持续存在的态势。同时说明黄河流域农田生

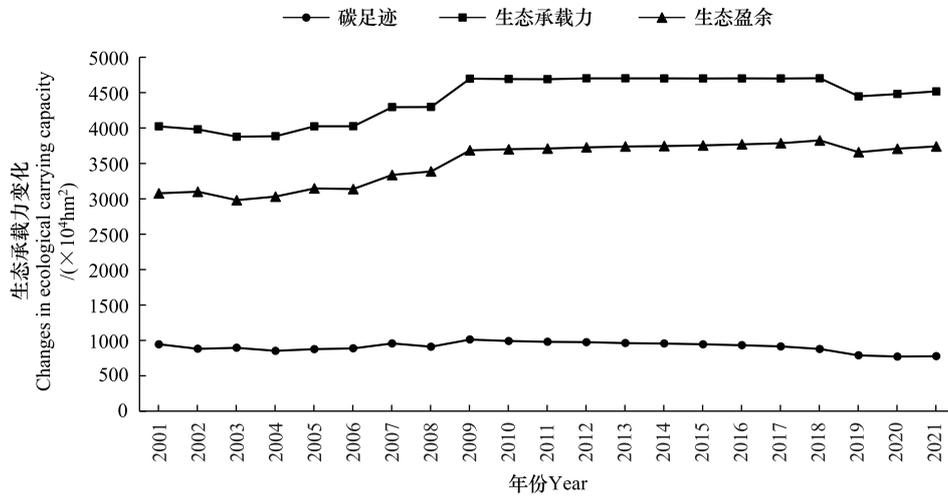


图 5 2001—2021 年黄河流域农田生态系统生态承载力

Fig.5 Ecological carrying capacity of farmland ecosystem in the Yellow River Basin from 2001 to 2021

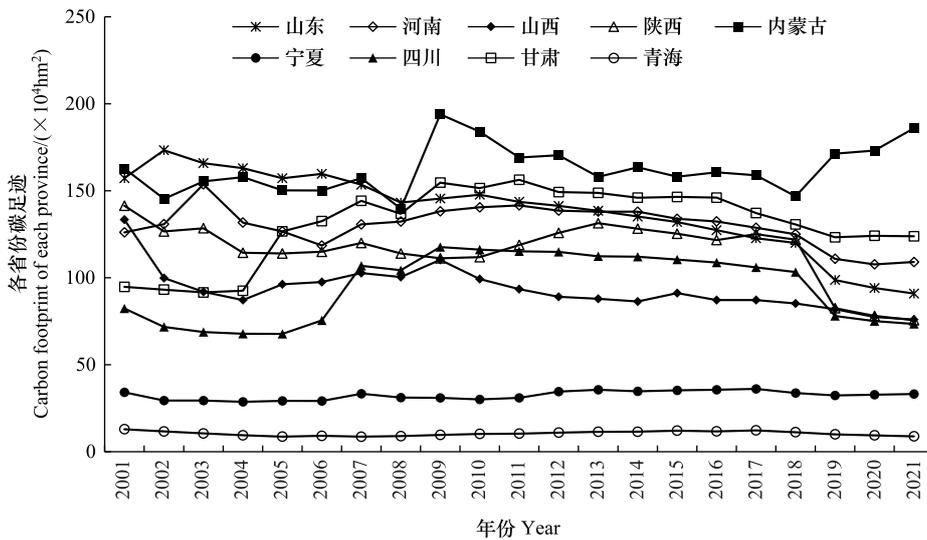


图 6 2001—2021 年黄河流域农田生态系统各省份碳足迹变化

Fig.6 The change of carbon footprint of farmland ecosystem in the Yellow River Basin from 2001 to 2021

态的碳汇功能要强于碳源功能,这有利于恢复黄河流域其他行业碳排放量大于碳汇量而造成的生态赤字。

从空间分布格局来看(图 7),黄河流域农田生态系统碳足迹呈东北部高、中西部低的分布格局。其中,碳足迹量最大的省份是内蒙古和甘肃,分别占碳足迹总量的 23.94%和 15.94%(2021 年),这可能一方面在于内蒙古地区为了提高粮食产量却加大了对化肥、农膜、农药等农用生产投入的使用,另一方面内蒙古干旱和半干旱气候限制了作物的生长,影响了农作物的碳固定能力。其次是甘肃省占碳足迹总量的 15.94%,主要原因在于黄河流域甘肃省覆被稀疏,下垫面脆弱,面临着严峻的土壤侵蚀问题,特别是农田水土流失问题严重,导致土壤有机碳含量的减少<sup>[38]</sup>。接着是河南省占碳足迹总量的 14.04%,河南省作为重要的农业生产基地,化肥和农药使用量较大,这增加了温室气体的排放,使得碳足迹较高。碳足迹量最小青海省,仅占碳足迹总量的 1.14%,青海省地处高原,气候较干燥,降水量有限,原因可能是青海地处高原,气候寒冷干燥,这可能导致农业生产强度较低,从而减少了农业活动中的碳排放。从而减少了因农业生产活动而产生的碳排放。

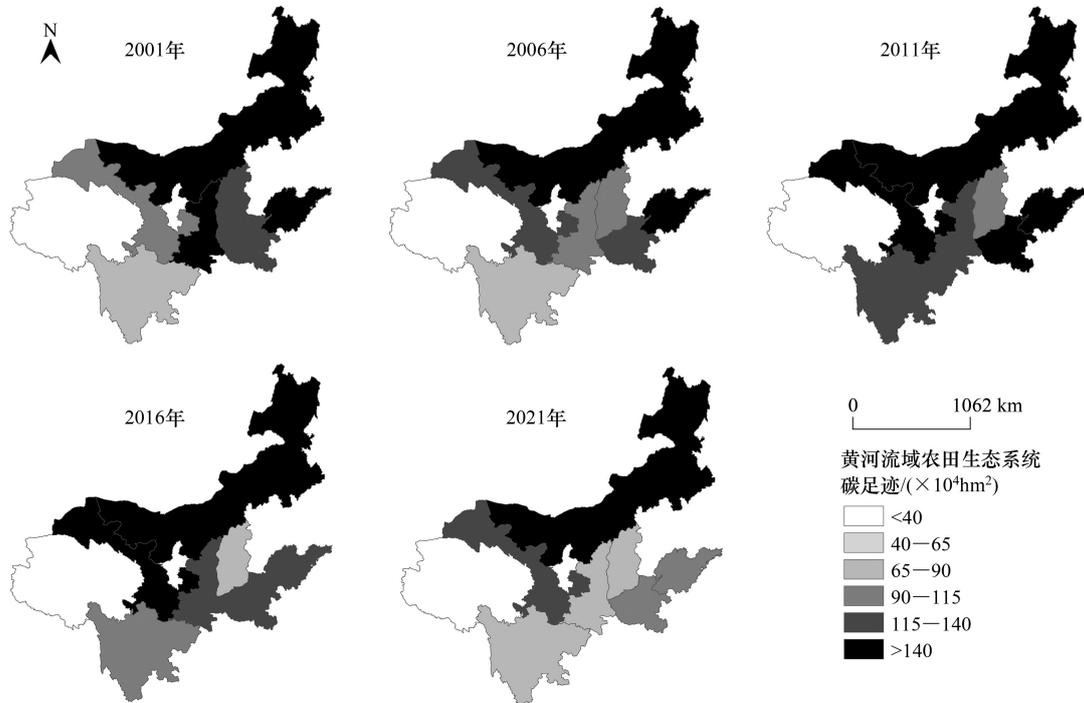


图 7 2001—2021 年黄河流域农田生态系统碳足迹空间变化

Fig.7 Spatial variation of carbon footprint of farmland ecosystem in the Yellow River Basin from 2001 to 2021

### 2.2 农田生态系统碳足迹空间差异分解

进一步从空间角度探索黄河流域农田生态系统碳足迹空间差异来源,借鉴郭安宁<sup>[39]</sup>等对黄河流域的划分:上游(甘肃、四川、青海和宁夏)、中游(内蒙古、陕西、山西)、下游(河南、山东),测算黄河流域农田生态系统碳足迹上中下游的 dagum 基尼系数<sup>[40]</sup>,结果图 8 所示。

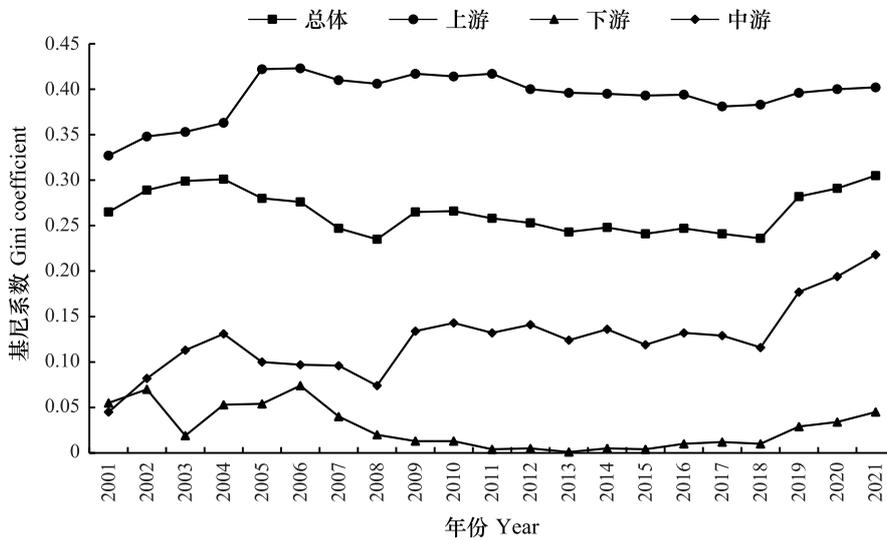


图 8 2001—2021 年黄河流域农田生态系统碳足迹总体与子群内差异情况

Fig.8 Differences in the overall and within subgroups carbon footprint of farmland ecosystems in the Yellow River Basin from 2001 to 2021

在样本所示期间内从总体基尼系数和子群内差异基尼系数来看(图 8),黄河流域农田生态系统碳足迹

dagum 基尼系数从 2001 年到 2021 年整体上呈现出“五升四降”的波动式变化,从 2001 年的 0.265 上升到 2021 年的 0.305,增幅为 15.09%,这一变化趋势说明黄河流域农田生态系统碳足迹存在非均衡性发展同时有着扩大的趋势,尽管我国出台《关于创新体制机制推进农业绿色发展的意见》旨在优化产业结构、促进低碳技术创新以及加强环境污染治理的减排政策,然而由于各省市区域间的发展水平、经济结构及政策执行能力存在差异,导致碳排放量在不同地区之间呈现出显著的差异性<sup>[41]</sup>。由图 8 中可以明显发现上游地区碳足迹内部差异在研究期间内增加了 0.075,增加了 29.62%,原因可能在于上游区域由于经济发展水平和农业生产技术的限制,农业的生产往往依赖于传统的耕作方式和较高的化肥、农药投入,因此造成了碳足迹的较大差异。差异变化最为明显的区域是中游地区,区域内基尼系数变化了 0.173,总体上大致可以划分为五个阶段,三次上升期,两次波动式平稳变化,拐点分别在 2004、2008、2010、2018、2021 年,五年的区域内基尼系数分别为 0.131、0.074、0.143、0.116 和 0.218。下游地区的基尼系数有下降的趋势,下降了 0.01,表示山东省与河南省的农田生态系统碳足迹差异有缩小的趋势,可能是由于河南省颁布《河南省减污降碳协同增效行动方案》与山东省颁布《山东省减污降碳协同增效实施方案》有关,协同推进黄河流域下游地区碳足迹内部差异缩小。

从子群间差异变化来看(图 9),可以清楚地发现上游-中游和下游-上游呈下降趋势,分别从 2001 年的 0.445 和 0.433 下降到 2021 年的 0.399 和 0.326,降幅分别为 10.34% 和 24.71%,表示这两两区域间的碳足迹差异有所降低,可能的原因是几年来加强黄河流域治理使得上中游落后地区农业条件得到明显改善,各省(区)之间碳足迹趋于平衡,但是下游-中游碳足迹基尼系数有明显的上升趋势,从 2001 年的 0.061 上升到 2021 年的 0.211,将近翻了 2.5 倍,可能与中游的内蒙古、陕西省和山西省同处黄土高原,受风蚀和水蚀影响水土流失严重,而下游地区额山东省和河南省均为粮食主产区,农业现代化程度高,能够更好的实现低碳绿色生产有关<sup>[39]</sup>。研究期内子群内差异、子群间差异以及超变密度差异的年平均贡献率分别为 26.86%、59.84% 和 13.31%,其中唯一出现负增长的子群间差异,下降了 0.063,降幅达到 30%,表示黄河流域上中下游之间的碳足迹差异在不断缩小,但子群间差异仍然是地区间差异的主要来源。增长最为明显的是超变密度差异,增加了 0.06,相比原先增长了 6.67 倍,说明不同区域之间交叉重叠问题对碳足迹的影响在不断加强,但在研究期间内超变密度贡献率所占的份额始终较低,对整体差异的影响也就最小。子群内基尼系数贡献率在 17%—31%,总体呈波动式上升趋势,增加了 0.044。说明黄河流域农田生态系统碳足迹总体差异主要来源于子群间差异,其次是子群内差异和超变密度差异。

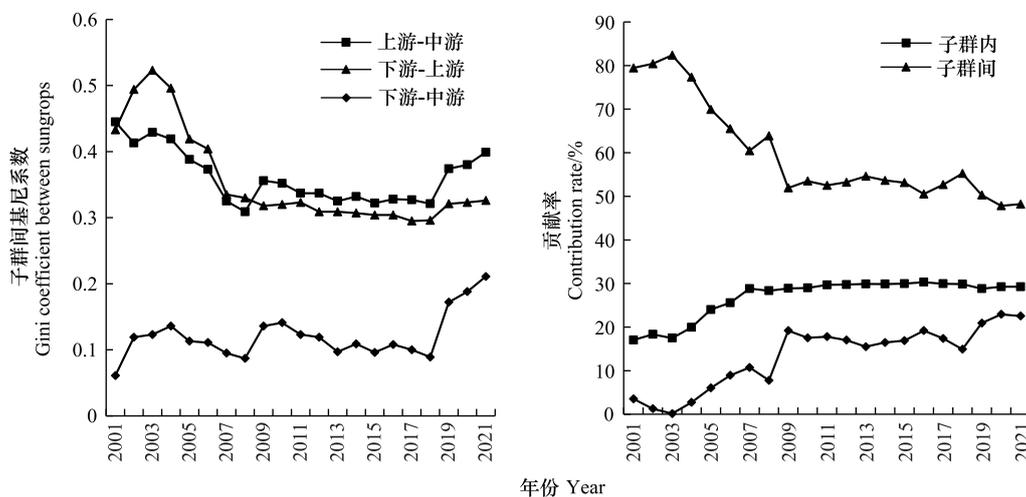


图 9 2001—2021 年黄河流域农田生态系统碳足迹子群间差异及贡献率情况

Fig.9 Differences and contribution rates of carbon footprint subgroups of farmland ecosystems in the Yellow River Basin from 2001 to 2021

### 2.3 黄河流域农田生态系统碳足迹收敛性分析

从图 10 可以发现,2001 年以来黄河流域农田生态系统碳足迹的  $\sigma$  收敛系数呈现出上升趋势,从 2001 年的 0.48 到 2021 年的 0.56,说明其呈现出发散状态。这种波动式变化表明黄河流域农田生态系统碳足迹不存在显著的  $\sigma$  收敛,以及在时间层次上具有不稳定性的特征。从上中下游来看,上游和中游都表现出了时间上层次上的不稳定性,说明其都不存在  $\sigma$  收敛,特别是中游地区的不稳定性更高,从 2001 年的 0.08 到 2021 年的 0.46。只有下游地区在研究期间  $\sigma$  收敛系数呈现下降趋势,下降了 0.02,说明下游地区存在  $\sigma$  收敛,地区之间的碳足迹差异程度将会下降,这与前文分析下游碳足迹区域差异将缩小的结果一致。黄河流域贯穿多种地理景观,因此不同区段遭遇的生态状况和自然灾害类型亦有所差异。流域上游和中游地区主要致力于传统农业耕作方式,而下游地区则更倾向于发展现代农业技术<sup>[42]</sup>。这种农业生产方式的区域差异可能导致流域内不同省份之间农田生态系统的碳足迹表现出显著的区域异质性。

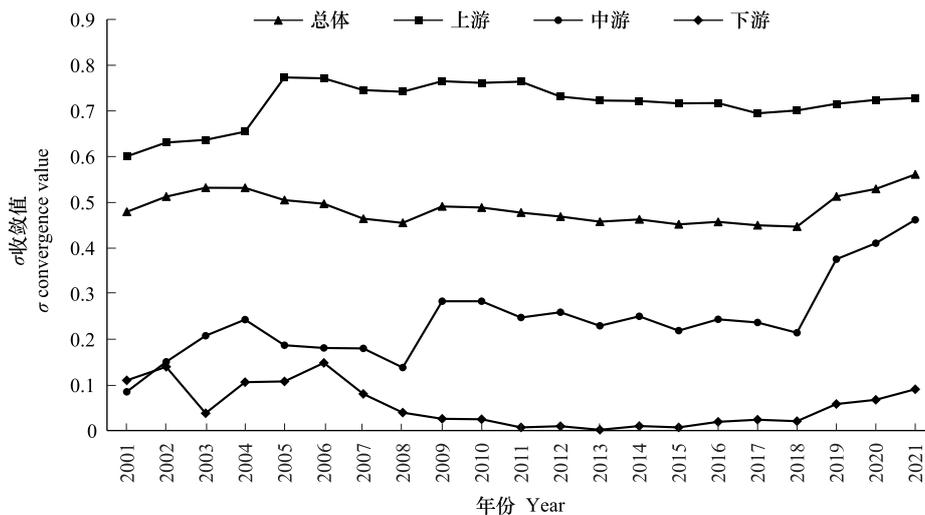


图 10 黄河流域总体及上中下游碳足迹的  $\sigma$  收敛演变趋势

Fig.10 The  $\sigma$  convergence evolution trend of carbon footprint in the Yellow River Basin and its upper, middle and lower reaches

### 3 讨论

农田生态系统兼具碳汇和碳源的双重作用,探究农田生态系统碳足迹能够把碳汇和碳排放融合到一个整体框架内,克服了以往单维度做碳排放或碳汇的局限性。研究结果黄河流域农田生态系统碳足迹小于区域承载力与以往研究结果趋于一致<sup>[29,42]</sup>,与以往研究不同的是,研究进一步从上中下游探讨了空间差异的源头,其中上游、中游、下游的区域间差异是造成区域总体空间差异的主要原因,可能是由于碳足迹受到经济发展、社会结构、气候变化及流域间地形地貌等影响,使得地区间在碳排放问题上呈现出各自独特的挑战和难点,难以通过统一的碳减排政策协调各地区碳排放存在的问题<sup>[43]</sup>,而上游的区域内差异相较于中游和下游较大,一方面可能是因为上游地区地形复杂,区域内水源涵养能力低下、土壤盐碱化和水力侵蚀问题严重,抑制了农作物的生长,也加剧了土壤有机碳的流失,导致土壤中的碳更容易以二氧化碳的形式释放到大气中;另一方面可能是由于上游地区的经济发展水平相对较低,农业生产方式更加传统和粗放,对土地资源的利用和管理不够精细和高效,同时农业政策、管理措施以及技术推广等方面存在着不足,这些因素可能导致农田生态系统的碳吸收和排放能力受到影响,从而使得碳足迹表现出较大的区域差异。上游和中游不存在收敛,可能是因为上游和中游地区相较于下游地区,自然环境条件更为复杂多样。上游地区多山地高原,气候恶劣,而中游地区虽然地形相对平坦,但也可能受到干旱、水土流失等问题的困扰。这种自然环境的多样性使得上游和中游地区的农田生态系统碳吸收和排放能力存在显著差异,难以形成收敛的趋势。研究发现为协同推进黄河流域减碳

增汇提供了理论基础。

然而,本研究基于统计数据计算农田生态系统碳排放、碳吸收和碳足迹,在选取农田生产活动中的碳源和碳汇过程中,仅计算了主要的碳源和碳汇指标,并没有把全部的农业投入和农作物考虑在内,研究结果的精确性有待提高;农田生态系统碳足迹不同区域以及种植结构都会有所差异,本研究参照其他研究的碳排放系数、作物含水率、作物根冠比等,研究结果的精确性会有一定误差;此外土壤类型、人畜力、气候变化等也需要考虑,鉴于以上的不确定因素,需要学者们基于研究区域实际碳排放系数、不同农作物的固碳能力和经济系数、人力和畜力碳排放量等,进行更加深入细致的农田生态系统碳足迹研究。

#### 4 结论

(1)从时空演化来看,研究期间黄河流域农田生态系统碳足迹呈现出波动式下降的变化特征,在空间上黄河流域农田生态系统碳足迹呈现出东北部高、中西部低的分布格局,尽管碳足迹的趋势呈下降的良好态势,但区域碳足迹的不平衡问题亟需改善和解决;(2)从地区差异来源来看,研究期内黄河流域农田生态系统碳足迹差异变化呈现扩大的趋势,各流域内部差异变化比较平稳,其中区域内差异最明显的为上游地区。区域间差异尽管在整体上有下降的趋势,但仍然是导致总体差异变化的主要来源。表明黄河流域上中下游区域之间农田生态系统碳足迹差异明显;(3)从收敛性来看,黄河流域下游地区农田生态系统碳足迹呈现出 $\sigma$ 收敛,表示下游地区农田生态系统低碳发展不平衡的问题得到了一定的改善,区域内的差异将会逐渐缩小,但是整体上还亟需改善。

基于以上研究结果,对黄河流域农田生态系统低碳发展提出相关建议,从减少碳排放层次来看,灌溉、农药、化肥等农业生产活动都在不同程度上影响着碳排放,应当优化农业生产活动所造成的碳排放,例如采取有机肥代替化肥、清洁能源替代柴油等化石能源、倡导使用可降解农膜等更加低碳的农业生产模式,制定种植结构调整规划,鼓励种植优良品种的农作物;从增加碳汇的层次来看,要加快农业基础设施建设,提高农作物产量,实施农田水土保持工程,减少水土流失,提高土壤固碳量,建立农田碳汇交易市场,鼓励企业、社会组织和个人参与农田碳汇交易,提高社会各界对农田碳汇交易的认识和参与度。从流域间及流域内协调层次来看,制定黄河流域统一的减排目标和农业碳排放标准,确保流域各省份在相同的框架下实施农业碳减排措施,并促进上游、中游和下游在农业技术、信息和资金方面的合作与共享,推广低碳农业管理实践和技术。

#### 参考文献(References):

- [1] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex v, Midgley P M. Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2014.
- [2] 李波,张俊彪,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.
- [3] 张凤太,邵技新,孙德亮. 基于农业投入的贵州农业碳排放研究. 广东农业科学, 2012, 39(16): 221-223.
- [4] 王才军,孙德亮,张凤太. 基于农业投入的重庆农业碳排放时序特征及减排措施研究. 水土保持研究, 2012, 19(5): 206-209.
- [5] 马晓哲,王铮. 土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展. 生态学报, 2015, 35(17): 5898-5907.
- [6] 魏媛,简小玉. 基于碳达峰碳中和的贵州省土地利用碳排放演变及预测研究. 生态经济, 2022, 38(4): 108-114.
- [7] 张扬,李涵,赵正豪. 中国粮食作物种植变化对省际农业碳排放量的影响研究. 中国农业资源与区划, 2023, 44(7): 29-38.
- [8] 郑瑞,姜春,谢臻,邱龙霞,江晓忠,史聪敏. 2001—2020年福建省县域单元农业碳排放核算和时空演变特征分析. 水土保持通报, 2024, 44(3): 430-440, 451.
- [9] 彭记永,张溪荷,王冰,余卫东. 夏玉米农田生态系统碳源汇特征及其气候影响. 生态学杂志, 2024, 43(10): 3121-3131.
- [10] Peters G P. Carbon footprints and embodied carbon at multiple scales. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2010, 2(4): 245-250.
- [11] 尚杰,杨滨键. 区域农业碳足迹动态影响效应研究——以潍坊市种植业为例. 农村经济, 2020(5): 75-82.
- [12] 崔文超,焦雯珊,闵庆文,吴敏芳,孙业红. 基于碳足迹的传统农业系统环境影响评价——以青田稻鱼共生系统为例. 生态学报, 2020, 40(13): 4362-4370.
- [13] 孙锦,刘源,赵荣钦,杨文娟,吴航星,彭超月,郭敏,刘恺. 基于投入产出的中国省际农业水-土-碳足迹流动分析. 生态学报, 2022, 42(23):

9615-9626.

- [14] 王微,林剑艺,崔胜辉,吝涛. 碳足迹分析方法研究综述. 环境科学与技术,2010,33(7): 71-78.
- [15] 白福臣,高鹏,郑沃林. 粮食主产区农田生态系统碳足迹的时空演化与脱钩效应. 生态经济,2023,39(7): 107-116.
- [16] 王诗雨,刘学伟,崔鸿鹏,刘倩,胡畅达,张晶晶. 农田生态系统碳源/汇时空演变因素分析——以黑龙江省为例. 中国国土资源经济,2024,37(5): 4-13,88.
- [17] 宾津佑,唐小兵. 广东省农田生态系统碳源汇效应时空分异及驱动因素. 水土保持通报,2023,43(3): 382-389.
- [18] 彭俊杰. 基于粮食安全的黄河流域农业用水态势分析及应对策略. 农业经济,2022(7): 10-12.
- [19] 张俊,黄煦吻,彭宇琦. “双碳”目标下黄河流域种植业碳足迹的时空异质效应. 河南农业大学学报,2023,57(5): 884-896.
- [20] 王宝英,齐爱云,王子莎. 黄河流域与长江经济带种植业碳足迹供需平衡对比研究. 湖北农业科学,2022,61(3): 53-59.
- [21] 杭晓宁,张健,胡留杰,罗佳,马连杰,廖敦秀. 2006—2015年重庆市农田生态系统碳足迹分析. 湖南农业大学学报:自然科学版,2018,44(5): 524-531.
- [22] 陈舜,逯非,王效科. 中国氮磷钾肥制造温室气体排放系数的估算. 生态学报,2015,35(19): 6371-6383.
- [23] 吴晓华,贺萍. 黑龙江省农田生态系统减排增汇研究. 黑龙江八一农垦大学学报,2021,33(4): 106-112.
- [24] 田云,李波,张俊飏. 我国农地利用碳排放的阶段特征及因素分解研究. 中国地质大学学报:社会科学版,2011,11(1): 59-63.
- [25] 李明琦,刘世梁,武雪,孙永秀,侯笑云,赵爽. 云南省农田生态系统碳足迹时空变化及其影响因素. 生态学报,2018,38(24): 8822-8834.
- [26] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 91: 217-232.
- [27] 段华平,张悦,赵建波,卞新民. 中国农田生态系统的碳足迹分析. 水土保持学报,2011,25(5): 203-208.
- [28] 孙小祥,张华兵,于英鹏. 江苏沿海地区农田生态系统碳源/汇时空变化及公平性研究. 中国农业资源与区划,2021,42(10): 56-64.
- [29] 王梁,赵杰,陈守越. 山东省农田生态系统碳源、碳汇及其碳足迹变化分析. 中国农业大学学报,2016,21(7): 133-141.
- [30] 郝小雨. 基于碳足迹的黑龙江垦区农业生态系统碳源/汇时空变化. 中国农业资源与区划,2022,43(8): 64-73.
- [31] 叶文伟,王城城,赵从举,郑熊. 近20年海南岛热带农田生态系统碳足迹时空格局演变. 中国农业资源与区划,2021,42(10): 114-126.
- [32] 刘华军,杜广杰. 中国经济发展的地区差距与随机收敛检验——基于2000—2013年DMSP/OLS夜间灯光数据. 数量经济技术经济研究,2017,34(10): 43-59.
- [33] Dagum C. A new approach to the decomposition of the Gini income inequality ratio. *Empirical Economics*, 1997, 22(4): 515-531.
- [34] 杨琛. 中国工业生态效率时空差异及收敛性分析. 宏观经济研究,2020(7): 106-113,137.
- [35] 刘兴凯,张诚. 中国服务业全要素生产率增长及其收敛分析. 数量经济技术经济研究,2010,27(3): 55-67,95.
- [36] 谭永忠,何巨,岳文泽,张亮,王庆日. 全国第二次土地调查前后中国耕地面积变化的空间格局. 自然资源学报,2017,32(2): 186-197.
- [37] 娄国胜,王秋林. 第三次全国国土调查和第二次全国土地调查差异化分析. 华北自然资源,2019,(1): 125-127.
- [38] 武磊,高祖桥,谢旭红,王逸飞,申娜,张旭阳,李美静,李常斌. 甘肃省黄河流域土壤侵蚀及其驱动机制. 水土保持通报,2024,44(3): 221-230.
- [39] 郭安宁,陈晓,李觅. 黄河流域碳排放效率与产业结构优化耦合协调分析. 地域研究与开发,2023,42(5): 134-139.
- [40] 马小雯,郭精军. 黄河流域生态安全评价及障碍因素研究. 统计与决策,2023,39(8): 63-68.
- [41] 李魁明,王晓燕,姚罗兰. 黄河流域农业绿色发展水平区域差异及影响因素. 中国沙漠,2022,42(3): 85-94.
- [42] 刘煦,陈垚彤. 黄河流域农业绿色全要素生产率的时空差异及收敛性分析. 科学决策,2024(2): 122-131.
- [43] 张鹏岩,何坚坚,庞博,逯承鹏,秦明周,卢谦成. 农田生态系统碳足迹时空变化——以河南省为例. 应用生态学报,2017,28(9): 3050-3060.