

# 基于“水-土-能-碳”关联的中部地区农业碳排放 时空特征及驱动因素研究

肖丽群<sup>1,2</sup>, 刘建生<sup>1,2</sup>, 毛燕玲<sup>1</sup>, 姜睿清<sup>1</sup>

(1.南昌大学 公共政策与管理学院, 江西 南昌 330031; 2.南昌大学 中国乡村振兴研究院, 江西 南昌 330031)

**摘要:** [目的] 研究中地区农业水土资源开发利用过程中能源消耗碳排放的时空格局演变规律, 揭示其主要驱动因素, 为助推中地区农业低碳化绿色转型发展和实现“双碳”目标提供理论和数据参考。[方法] 基于 2010—2022 年中地区 6 省的社会经济数据, 考察农业水土资源利用中能源消耗的碳排放, 采用 IPCC 碳排放系数法测算 2010—2022 年中地区农业碳排放量, 借助 Kaya 恒等式和完全分解方法 LMDI(logarithmic mean divisia index)加法形式, 探讨农业碳排放的驱动因素及其贡献值, 运用 ArcGIS 可视化深入剖析中地区各省农业碳排放时空维度上的演变趋势, 并探析水土资源匹配度与农业碳排放之间的关系。[结果] ①2010—2022 年中地区农业碳排放总量呈现先快速上升后波动下降的趋势。农业碳排放的环比增长率经历了阶段性下降演变过程。②农业碳排放强度是促使中地区农业碳减排的最主要因素, 农业水资源经济产出则是导致农业碳排放增长的第一大要素。2010—2022 年研究区累计农业碳排放贡献值达  $562.28 \times 10^4$  t。农业水资源经济产出因素和单位播种面积的农业用水量因素对中地区农业碳排放的贡献存在正负两个方向的变动。③提高农业水土资源匹配度有助于抑制农业碳排放, 但对各省的农业碳排放影响程度存在差异。[结论] 未来应关注水土资源时空匹配问题及其生态环境效应, 因地制宜采取差别化的耕作模式, 优化配置和改善农业水土资源开发利用方式, 促进农业低碳化转型。

**关键词:** 农业碳排放; 水-土-能-碳; 时空特征; 驱动因素; 中地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)04-0256-11

中图分类号: F301.2, X32

**文献参数:** 肖丽群, 刘建生, 毛燕玲, 等. 基于“水-土-能-碳”关联的中地区农业碳排放时空特征及驱动因素研究 [J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 256-266. Xiao Liqun, Liu Jiansheng, Mao Yanling, et al. Spatiotemporal characteristics and driving factors of agricultural carbon emissions in central China considering ‘water-land-energy-carbon’ nexus [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 256-266. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.038; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.04.038.

## Spatiotemporal characteristics and driving factors of agricultural carbon emissions in central China considering ‘water-land-energy-carbon’ nexus

Xiao Liqun<sup>1,2</sup>, Liu Jiansheng<sup>1,2</sup>, Mao Yanling<sup>1</sup>, Jiang Ruiqing<sup>1</sup>

(1.School of Public Policy and Management, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China;

2.Institute of China’s Rural Revitalization Research, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China)

**Abstract:** [Objective] The spatiotemporal evolution dynamics of carbon emissions from energy consumption in the development and utilization of agricultural water and land resources in central China were studied to identify the key driving factors and provide theoretical and data reference for promoting low-carbon green transformation and agriculture development in central China, and to achieve the ‘dual carbon’ goal. [Methods] Carbon emissions from energy consumption during utilization of agricultural water and land resources were investigated based on social and economic data from six provinces in central China from 2010 to 2022. The IPCC carbon emission coefficient method was used to measure agricultural carbon emissions in central China from 2010 to 2022. The drivers and contributions of agricultural carbon emissions were discussed based on the Kaya identity and

收稿日期: 2025-04-18

修回日期: 2025-05-23

采用日期: 2025-05-23

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“共同富裕视角下乡村产业振兴的长效机制研究”(72274089); 江西省社会科学基金项目“江西省‘3 类县’农村宅基地制度改革成效与推进路径”(23GL10); 南昌大学 2024 年科研训练项目“农村宅基地功能转型下农户生计韧性变化响应研究”

第一作者: 肖丽群(1980—), 女(汉族), 江西省吉安市人, 博士, 副教授, 主要从事土地经济利用与管理研究。Email: sunflowerxlq@163.com。

logarithmic mean division index. ArcGIS visualization was used to analyze the evolutionary trend of agricultural carbon emissions in central China in the spatiotemporal dimensions, and the relationship between matching degree of water and land resources and agricultural carbon emissions was explored. [Results] ① During 2010—2022, the total agricultural carbon emissions in central China increased rapidly and then fluctuated downward. The growth rate of agricultural carbon emissions experienced a gradual decline during the evolutionary process. ② Agricultural carbon emission intensity was the key factor promoting agricultural carbon emission reduction in central China, and the economic output of agricultural water resources was the primary factor driving growth of agricultural carbon emissions. The cumulative contribution of agricultural carbon emissions during 2010—2022 reached  $5.62 \times 10^6$  t. The contributions of economic output factors of agricultural water resources and water consumption per unit sown area to agricultural carbon emissions in central China varied in both positive and negative directions. ③ Improving the matching degree of agricultural water and land resources could facilitate curbing of agricultural carbon emissions; however, the impacts on agricultural carbon emissions in different provinces varied. [Conclusion] In future, attention should be paid to spatiotemporal matching of water and land resources and their eco-environmental effects, adopting different farming modes according to local conditions, optimizing allocation, which would enhance sustainable development and utilization of agricultural water and land resources and promote low-carbon transformation in agriculture.

**Keywords: agricultural carbon emissions; water-land-energy-carbon nexus; spatial-temporal characteristics; driving factors; central China**

在气候变化形势严峻、极端天气事件频发的背景下,减少温室气体排放的重要性和迫切性日益显著。农业活动产生的温室气体是全球温室气体排放的重要组成部分,每年全球人为温室气体排放量中约有20%来自农业部门<sup>[1]</sup>。中国是农业大国,农业在国民经济中一直占据基础性地位。从传统农业到现代农业,中国农业部门面临着生产资料高投入和温室气体高排放的双重压力<sup>[2]</sup>。近年来,中国一方面加强国际合作,先后加入《联合国气候变化框架公约》《巴黎协定》等气候协议;另一方面,根据国内实际,提出碳达峰、碳中和的“双碳”目标,实施《2030年前碳达峰行动方案》等系列方案,为碳减排进行了一系列探索并作出了重要贡献。但是,农业温室气体仍占中国温室气体排放总量的24%<sup>[3]</sup>。因此,深入探讨农业碳排放驱动因素,提出减少农业碳排放的策略,对于推进中国碳达峰碳中和、加快农业低碳化发展具有重要意义。

国内外学者围绕农业碳排放的源头、测算方法、影响因素等展开了大量研究。从农业碳排放的源头来看,农业碳排放来源主要是在农业生产过程中农用物质的投入和农地利用活动所产生的碳排放<sup>[4]</sup>。因此,众多学者从投入产出角度或生产过程角度,以农业生产要素利用、农用物资投入、水稻生长、畜禽肠道发酵和粪便管理等产生的碳排放作为碳源对碳排放进行测度<sup>[5-8]</sup>。在农业碳排放测算方法上,有学者采用IPCC排放系数法、DNDC模型测算农业碳排放,并在国家、区域、城市等不同尺度范围内进行时

空特征分析<sup>[9-12]</sup>。在农业碳排放影响因素上,利用STIRPAT模型、LMDI模型、空间杜宾模型、地理探测器、NCA与fsQCA组态分析法探讨农业碳排放的驱动因素<sup>[13-16]</sup>。目前,对农业碳排放的研究取得了丰硕成果,农业碳排放的研究视角、研究方法在逐步拓展,但是还存在如下两方面不足。

(1) 大多研究是从农业生产过程入手开展农业碳排放研究<sup>[17-18]</sup>,较少从农业水土资源开发利用的角度评估其能源消耗对农业碳排放的影响。水和土地是农业生产过程中两种最宝贵的资源,水和土地资源开发利用中的能源消耗是农业碳排放重要的直接来源<sup>[19]</sup>。就农业水资源开发利用来看,在打井、沟渠开挖、抽水、供水、输送和灌溉等环节中使用农用水泵、喷灌设备等机械设备,需要使用柴油、汽油等化石燃料或电机动力,这些将会产生碳排放<sup>[20]</sup>。就农业土地资源开发利用来看,在土地开垦、平整、耕作、除草、收获等环节中使用相应农机也需要燃烧柴油、汽油等化石燃料,因而产生相应的碳排放<sup>[21]</sup>。水土资源的开发强度、开发方式、综合利用模式等对农业碳排放都会产生重大影响<sup>[22]</sup>。因此,参考相关研究<sup>[23]</sup>,本文聚焦于农业生产过程中水土资源利用能源消耗产生的碳排放,不考虑化肥、农药、农膜使用产生的碳排放。

(2) 关于水、土、能源等单一资源要素与碳排放的关系研究较多,而把水、土、能、碳各资源要素看作一个系统进行综合研究的相对较少。目前,有学者关于土地资源利用与碳排放关系研究<sup>[24-25]</sup>、水资源利

用与碳排放关系研究<sup>[26]</sup>、能源利用与碳排放关系研究<sup>[27]</sup>取得了丰硕成果,而且也有学者关注水-土-能系统在粮食生产、气候变化等领域的影响<sup>[28-29]</sup>,但对于区域层面水-土-能-碳多要素耦合关系研究成果比较少,尤其是水土资源综合利用过程中能源消耗产生的农业碳排放研究则更少。因此,加强农业水-土-能-碳排放系统的研究,不仅有助于深化对水、土、能、碳相互作用机制的理解,从资源耦合的视角优化农业水土资源开发的碳排放效应评估理论与方法,而且对于提升农业水土资源利用效率、推动区域农业多资源开发碳效应的综合研究具有重要意义。

中部地区承南启北、贯通东西,地理区位独特,区域内各省的农业资源禀赋、土地利用模式、农作物种植管理模式等存在异质性,每年因农业活动产生的碳排放量较多,在“中部崛起”统一战略指导下,探索一条适合中部地区农业碳减排的路径具有重要作用。本文基于“水-土-能-碳”关联的视角,以农业水土资源开发利用过程能源消耗测算中部地区 6 省 2010—2022 年农业碳排放,分析中部地区农业碳排放的时空演变特征,运用 LMDI 模型识别农业碳排放的主要驱动因素,探析中部 6 省农业水土资源匹配度与碳排放之间的关系,以期为中心地区农业低碳化绿色转型发展、实现“双碳”目标提供理论和数据参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

中部地区地处中国内陆腹地,位于 24°29′—38°37′N,108°21′—119°31′E 之间,包括湖南、湖北、河南、安徽、江西和山西 6 省。中部 6 省是中国传统农业大省,其农业产出约占 GDP 总量的 50%。中部地区自古以来就是中国重要粮食生产基地,全国 13 个粮食主产区,中部占 5 个。河南被誉为“中原大粮仓”,安徽被称为“江淮粮仓”,江西是“江南粮仓”,湖南、湖北水稻面积与产量常年位居全国前列,中部地区唯一的粮食产销平衡区山西省,也是全国重要的小杂粮生产基地。2023 年底,中部 6 省耕地面积  $2.82 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ,粮食总产量为  $2.03 \times 10^8 \text{ t}$ ,分别占全国的 21.91% 和 29.19%,对保障国家粮食安全发挥着重要作用。近年来,中部地区深入实施“藏粮于地、藏粮于技”战略,加快推进农业产业化、规模化和机械化发展,粮食生产效率提高的同时也带来农业碳排放问题。在低碳经济发展的大背景下,研究中地区农业水土资源开发的能源消耗碳排放,对于推进中部地区农业低碳和高质量发展,巩固提升国家“战略粮仓”地位,具有十分重要的意义。

### 1.2 研究方法 与数据来源

#### 1.2.1 研究方法

(1) 农业碳排放计算方法。农业生产活动实质上就是开发利用农业水资源和土地资源的过程<sup>[21]</sup>。在农业水土资源开发利用过程中,能源消耗是主要的农业碳排放源<sup>[30]</sup>。国际气候变化专门委员会(IPCC)研究结果显示,95% 以上的 CO<sub>2</sub> 排放是由传统化石燃料燃烧引起。本文根据 IPCC 国家温室气体清单指南提出的碳排放测算方法,采用农业水土资源开发利用活动中化石燃料使用产生的碳排放测算农业碳排放,具体包括农业水资源开发利用过程中沟渠开挖、打井、抽水、灌溉和农业土地资源开发利用过程中土地翻耕、平整、播种、收获等农业机械消耗化石能源所产生的碳排放。借鉴其他文献的研究<sup>[23,31]</sup>,根据《综合能耗计算通则(GB/T 2589—2020)》和《中国能源统计年鉴》,本文选取的能源包括煤炭、汽油、柴油、煤油、燃料油、天然气和电力。农业碳排放计算公式为

$$C_i = \sum_{j=1}^7 E_{ij} \times f_j \times c_j \quad (j=1, 2 \dots 7) \quad (1)$$

式中:  $C_i$  表示第  $i$  省的农业碳排放量( $10^4 \text{ t}$ );  $E_{ij}$  表示第  $i$  省在某个时期第  $j$  种能源消费量( $10^4 \text{ t}, 10^8 \text{ m}^3$ );  $j$  表示能源类型;  $f_j$  为第  $j$  种能源标准煤折算系数( $\text{kg}/\text{kg}; \text{kg}/\text{m}^3$ )(以标准煤计);  $c_j$  为第  $j$  种能源的碳排放系数( $\text{t}/\text{t}$ )(以标准煤计)。

本文的各类能源标准煤折算系数参考《中国能源统计年鉴》,碳排放系数参考《IPCC 国家温室气体清单指南》(表 1)。

表 1 各类能源标准煤折算系数和碳排放系数  
Table 1 Conversion coefficient and carbon emission coefficient of various energy standard coals

能源类型	折算标准煤系数/ ( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}; \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	碳排放系数/ ( $\text{t} \cdot \text{t}^{-1}$ )
原煤	0.714 3	0.747 6
汽油	1.471 4	0.553 8
煤油	1.471 4	0.571 4
柴油	1.457 1	0.592 1
燃料油	1.428 6	0.618 5
天然气	1.214 3	0.448 3
电力	0.122 9	0.733 0

注: 各类能源标准煤折算系数和碳排放系数皆以标准煤计。

(2) 农业碳排放影响因素及分解模型。Kaya 恒等式是学界分析碳排放驱动因素的常用分析方法,它将碳排放量与人口、经济、能源等因素联系在一起。基于学者对于碳排放影响因素的研究经验<sup>[32-33]</sup>,

本文在Kaya恒等式中加入水、土因素,探讨水土资源因素的农业碳排放效应,并且借助完全分解方法LMDI加法形式分析农业碳排放各影响因素的贡献值情况。

农业碳排放影响因素模型为

$$C = \frac{C}{G} \times \frac{G}{W} \times \frac{W}{L} \times \frac{L}{P} \times P \quad (2)$$

式中: $C$ 为农业碳排放总量; $G$ 为区域农业增加值; $W$ 为区域农业用水总量; $L$ 为区域农作物播种面积; $P$ 为区域乡村人口。

令  $i=C/G$ ,  $g=G/W$ ,  $w=W/L$ ,  $l=L/P$ ,  $i$  表示农业碳排放强度,  $g$  表示农业水资源的经济产出,  $w$  表示单位播种面积的农业用水量,  $l$  表示人均播种面积,因此农业碳排放可表示为

$$C = i \times g \times w \times l \times p \quad (3)$$

参考Ang B.W.的LMDI指数分解方法<sup>[34]</sup>,对上式两边取对数,则有:

$$\ln C = \ln i + \ln g + \ln w + \ln l + \ln p \quad (4)$$

对上式采用加和分解,将差分分解为

$$\Delta C = C^T - C^0 = \Delta C_i + \Delta C_g + \Delta C_w + \Delta C_l + \Delta C_p + \Delta C_{rsd} \quad (5)$$

则各分解因素贡献值的表达式如下:

$$\Delta C_i = \frac{C^T - C^0}{\ln C^T - \ln C^0} (\ln i^T - \ln i^0) \quad (6)$$

$$\Delta C_g = \frac{C^T - C^0}{\ln C^T - \ln C^0} (\ln g^T - \ln g^0) \quad (7)$$

$$\Delta C_w = \frac{C^T - C^0}{\ln C^T - \ln C^0} (\ln w^T - \ln w^0) \quad (8)$$

$$\Delta C_l = \frac{C^T - C^0}{\ln C^T - \ln C^0} (\ln l^T - \ln l^0) \quad (9)$$

$$\Delta C_p = \frac{C^T - C^0}{\ln C^T - \ln C^0} (\ln p^T - \ln p^0) \quad (10)$$

$$\Delta C_{rsd} = 0 \quad (11)$$

式中: $T$ 为报告年, $0$ 为基准年。

(3) 农业水土资源匹配度模型。农业水土资源是人类进行农业生产的重要基础资源。农业水土资源匹配度反映了一定区域尺度农业生产可供的水资源和土地资源在时间和空间上的均衡状况与丰缺程度,是农业生产条件优劣的基本体现。本研究农业水土资源匹配度采用单位面积耕地所拥有的水资源量来测算,将农业水土资源的时空匹配特征进行了量化。

省域水土资源匹配度测算模型为

$$R_i^{wl} = W_i \alpha_i / L_i \quad (i = 1, 2, 3 \dots 6) \quad (12)$$

式中: $R_i^{wl}$ 为中部地区 $i$ 省水土资源匹配度; $W_i$ 为 $i$ 省水资源可利用总量( $10^6 \text{ m}^3$ ),由农业用水、工业用水、生活用水和人工生态环境用水构成, $\alpha_i$ 为 $i$ 省农业用

水占总用水量的比例; $L_i$ 为 $i$ 省耕地面积( $\text{km}^2$ )。 $R_i^{wl}$ 值越大,说明区域内单位面积耕地拥有的农业水资源量也越多,水资源与耕地资源分布的一致性与量比水平越高,农业生产的基础条件就越优越。

中部地区水土资源匹配度,反映了中部地区各省水土资源匹配度的均值水平,测算模型为

$$R = \sum_{i=1}^n R_i^{wl} / n \quad (i = 1, 2, 3 \dots 6) \quad (13)$$

式中: $R$ 为中部地区水土资源匹配度; $R_i^{wl}$ 为中部地区 $i$ 省水土资源匹配度; $n$ 为中部地区省域数量。

### 1.2.2 数据来源

本文选取中部地区(包括湖南、湖北、河南、安徽、江西和山西6省)作为研究区域,以2010—2022年作为研究时间段。中部地区各省行政边界来源于中国科学院资源环境科学数据中心。在计算农业碳排放过程中采用的各省能源消费结构数据、各种类型能源消耗量和各种能源标准煤折算系数来源于《中国能源统计年鉴》,碳排放系数参考IPCC出版的国家温室气体清单指南。对中部地区农业碳排放影响因素分解时采用的农业增加值、乡村人口、播种面积和测算中部地区农业水土资源匹配度时采用的农业用水量、工业用水量、生活用水量和人工生态环境用水、耕地面积等社会经济数据均来源于《中国统计年鉴》、各省统计年鉴。

## 2 结果与分析

### 2.1 农业碳排放的时空特征

#### 2.1.1 农业碳排放时序特征

根据上述建立的碳排放计算公式,基于2010—2022年期间农业水土开发利用过程中能源消费总量及其构成,测算出该时段中部地区产生的农业碳排放量。图1表明,2010—2022年期间,中部地区农业碳排放总量整体呈现先快速上升后波动下降的趋势。2010年农业碳排放总量为 $8.61 \times 10^6 \text{ t}$ ,处于相对较低的水平值,2015年农业碳排放总量为最高值 $1.00 \times 10^7 \text{ t}$ ,随后几年农业碳排放总量处于波动下降的过程。从环比增长率情况来看,农业碳排放总量的环比增长率波动较大,总体呈现阶段性下降态势。2011年环比增长率高达10.52%,2012年开始快速下跌,2013年环比增长率跌至负3.22%,随后小幅波动,2017年环比增长率最低,为-3.75%。主要原因是2011年8月国务院办公厅印发了《“十二五”节能减排综合性工作方案》,各地政府按照节能减排总体要求和主要目标,加强农业节能减排管理,推广农用节能机械设备,降低能源消耗强度,大幅度提高能源

利用效率,使得中部地区农业碳排在 2012 年和 2013 年连续下跌。2015 年中国又颁布“一控两减三基本”政策,提出控制农业用水总量,2017 年和 2019 年提出大力推进水肥一体化技术,大规模实施农业节水工程,这些政策促使中部地区农业碳排在波动中逐渐下降。由此可见,农业节能、节水等政策的实施对农业碳排放降低具有一定的引导作用。

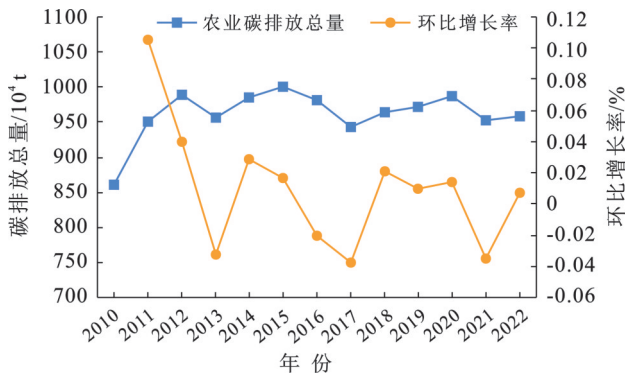


图 1 2010—2022 年中部地区农业碳排放变化趋势

Fig.1 Trends of total agricultural carbon emissions in central China from 2010 to 2022

### 2.1.2 农业碳排放的空间格局

为显化中部地区各省农业碳排放的空间差异,利用 ArcGIS 软件绘制中部地区各省农业碳排放量的分布图(图 2)。由此可见,中部地区农业碳排放量区域差异明显。

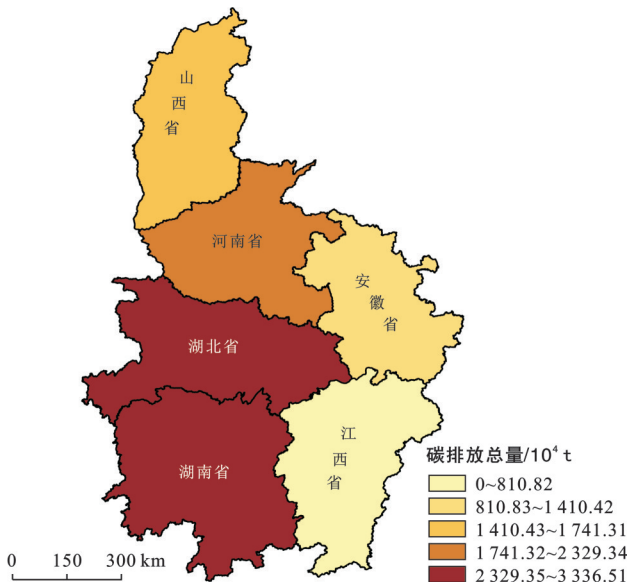


图 2 2010—2022 年中部地区农业碳排放总量空间分布

Fig.2 Spatial distribution of total agricultural carbon emissions in central China from 2010 to 2022

2010—2022 年,中部地区农业碳排放总量由大到小依次为湖南、湖北、河南、山西、安徽和江西省。湖南、湖北省农业碳排放量较多,分别占整个中部地

区农业碳排放量的 26.69% 和 22.98%;江西省农业碳排放量占整个中部地区的比重最小,仅为 6.49%。主要原因是湖南、湖北省作为中部较发达省份,其农业规模化程度和机械化普及率相对较高,农业规模化经营的同时又加速机械化替代,大量农机使用过程中柴油和电力消耗导致的碳排放也更高<sup>[13]</sup>。此外,湖南省油菜、柑橘等经济作物种植可能依赖更多能源密集型投入(如温室设施、灌溉系统),进一步提高了碳排放。河南省虽为农业大省,但以小麦、玉米等旱作作物为主,水稻种植面积较小,其旱作农业(如小麦-玉米轮作)碳排放强度相对较低。江西省水稻种植规模较小,且劳动密集型的生产方式(如人工除草)降低对化石能源的依赖,进一步降低碳排放总量。

从中部地区各省农业碳排放变化趋势来看(图 3),湖南、河南省农业碳排放上升趋势明显;湖北、山西省农业碳排放呈现波动下降趋势;江西、安徽省农业碳排放变化不大,整体比较平稳。

## 2.2 农业碳排放的影响因素分析

### 2.2.1 中部地区整体农业碳排放影响因素分析

为深度探索区域农业碳排放的影响因素,基于上述农业水土利用碳排放测算结果,根据碳排放影响因素分解模型,得出中部地区农业碳排放影响因素分解结果(表 2)。总体上看,农业碳排放强度因素和人口因素一定程度上抑制了农业碳排放,而农业水资源经济产出因素、单位播种面积的农业用水量因素和人均播种面积因素对农业碳排放具有促进作用。2010—2022 年,各因素对农业碳排放增长的贡献程度由大到小排序依次为:农业水资源经济产出 > 人均播种面积 > 单位播种面积的农业用水量 > 人口数量 > 农业碳排放强度。

(1) 农业碳排放强度是促使农业碳减排的最主要因素。2010—2022 年期间累计抑制中部地区农业碳排放  $6.18 \times 10^6$  t。农业碳排放强度代表着农业生产效率,近年来中部地区大力推广农业技术,实施机械化、规模化生产,农业生产效率得到大大提高。同时,大规模实施农业节水工程,应用农用节能机械设备和水肥一体化技术,使亿元农业产值的碳排放量由 2010 年的 800 t 下降到 2020 年的 400 t。

(2) 农业水资源经济产出是导致农业碳排放增长的第一大要素。2010—2022 年期间农业水资源经济产出因素累计为中部地区农业碳排放贡献了  $5.62 \times 10^6$  t。农业水资源经济产出是指单位农业用水带来的经济效益,反映了农业经济活动对碳排放的影响,农业经济活动是碳排放增长的主要驱动力。农业水资源经济产出因素受到农作物结构和农业用水效率的影响。

小麦、玉米在种植过程中,特别是施肥和灌溉过程中会产生较高的碳排放。气候变化导致干旱可能增加农业灌溉的需求,而传统的灌溉方式放大了农业生产过程

中的能源消耗和碳排放。中部地区在未来的农业发展中,应该在生态安全和粮食安全双目标的前提下,优化农业种植结构,发展低碳农业。

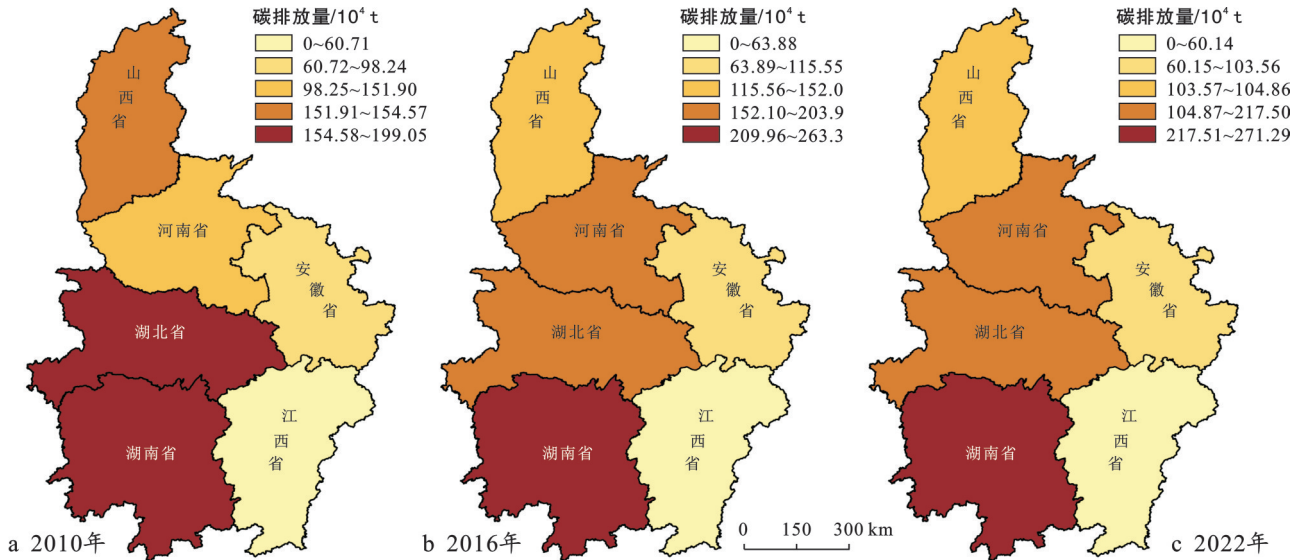


图3 中部地区各省农业碳排放量变化特征

Fig.3 Variation characteristics of agricultural carbon emissions in provinces of central China

表2 中部地区农业碳排放影响因素分解

Table 2 Impact factor decomposition of agricultural carbon emissions in central China

单位:10<sup>4</sup> t

年份	$\Delta C$	$\Delta C_i$	$\Delta C_g$	$\Delta C_w$	$\Delta C_l$	$\Delta C_p$
2010—2011	90.54	-43.62	134.16	-5.79	26.87	-18.19
2011—2012	37.88	-45.15	38.48	39.25	32.28	-26.97
2012—2013	-31.86	-100.30	19.52	44.52	23.58	-19.18
2013—2014	27.56	-24.95	102.90	-54.66	24.47	-20.21
2014—2015	16.25	-19.78	11.42	30.88	16.45	-22.72
2015—2016	-20.74	-77.78	84.48	-12.98	11.51	-25.96
2016—2017	-36.79	29.48	-73.25	10.05	23.81	-26.88
2017—2018	19.82	-6.87	29.49	4.92	14.53	-22.25
2018—2019	9.09	-95.88	104.20	6.15	16.98	-22.36
2019—2020	13.65	-104.44	144.03	-42.11	91.88	-75.71
2020—2021	-34.43	-118.78	41.89	32.73	35.01	-25.28
2021—2022	7.05	-48.88	-52.92	102.02	21.74	-14.92
2010—2022	98.02	-617.76	562.28	136.23	317.18	-299.91

注: $\Delta C$ 为从基准年到报告年的农业碳排放总变化量; $\Delta C_i$ 为农业碳排放强度*i*的贡献值; $\Delta C_g$ 为农业水资源经济产出*g*的贡献值; $\Delta C_w$ 为单位播种面积的农业用水量*w*的贡献值; $\Delta C_l$ 为人均播种面积*l*的贡献值; $\Delta C_p$ 为区域乡村人口*p*的贡献值。下同。

(3) 从各因素在2010—2022年期间的变化情况来看,农业水资源经济产出因素和单位播种面积的农业用水量对中部地区农业碳排放的贡献存在正负两个方向。

农业水资源经济产出因素在2016—2017年和2021—2022年贡献值表现为负,其他时间段贡献值均为正;单位播种面积的农业用水量因素在2010—2011,2013—2014,2015—2016和2019—2020年贡献

值为负,对中部地区农业碳排放发挥抑制效应,其他时间段贡献值为正,对中部地区农业碳排放发挥促进效应。究其原因,可能与农业水土资源的利用情况,特别是水土资源匹配度有关,因为单位播种面积的农业用水量涉及水资源和土地资源两个要素,这也说明在农业低碳化发展过程中必须综合考虑水资源和土地资源的利用问题,特别是水土资源的时空匹配问题。

### 2.2.2 中部地区省际农业碳排放影响因素分析

中部地区不同省份之间各影响因素的贡献值差异显著(表3)。农业碳排放强度因素和人口因素对中部地区各省贡献值均为负,即对各省农业碳排放均起抑制作用,而且对不同省份农业碳排放的抑制程度相差较大。

湖北农业碳排放强度因素和人口因素对碳减排的贡献最大,两者分别抑制碳排放量 $1.71 \times 10^6$  t和 $7.30 \times 10^5$  t。类似的,农业水资源经济产出因素和

人均播种面积因素对中部地区各省贡献值均为正,即对各省农业碳排放均起促进作用,湖南农业水资源经济产出因素和人均播种面积因素的贡献值最大,分别促进碳排放 $1.32 \times 10^6$  t和 $7.94 \times 10^5$  t。单位播种面积农业用水量因素对各省的贡献值也为正,湖北单位播种面积农业用水量因素在整个中部地区单位播种面积农业用水量因素贡献中所占比重最大,对农业碳排放的促进作用最大,促进碳排放 $6.73 \times 10^5$  t。

表3 中部地区各省农业碳排放影响因素分解

Table 3 Impact factor decomposition of agricultural carbon emissions in various provinces of central China

省份	碳排放量/ $10^4$ t		贡献值/ $10^4$ t					
	2010年	2021年	$\Delta C$	$\Delta C_i$	$\Delta C_g$	$\Delta C_w$	$\Delta C_l$	$\Delta C_p$
山西	154.57	104.86	-49.71	-169.77	111.90	13.45	43.03	-48.32
安徽	98.24	103.56	5.32	-72.03	72.05	6.65	32.73	-34.08
江西	60.71	60.14	-0.57	-46.42	30.56	12.35	25.12	-22.17
河南	151.90	201.48	49.59	-62.49	98.76	7.71	58.97	-53.36
湖北	199.05	217.50	18.45	-170.49	116.68	67.26	77.96	-72.96
湖南	196.35	271.29	74.93	-96.57	132.34	28.81	79.37	-69.02

### 2.2.3 中部地区水土资源匹配度与农业碳排放的关系

从上述分析结果可以看出,水土资源的利用对农业碳排放产生一定的影响,而且对中部地区农业碳排放的贡献存在正负两个方向,即对农业碳排放发挥促进效应或者抑制效应。因此在农业低碳化生

产活动过程中,需要关注农业水资源、土地资源的合理利用和时空匹配问题。

为了进一步探讨农业水土资源利用对农业碳排放的影响关系,利用公式(12),(13),测算出2010—2022年期间中部地区各省水土资源匹配度(表4)。

表4 2010—2022年中部地区各省农业水土资源匹配度

Table 4 Matching degree of water and land in various provinces of central China during 2010—2022

单位: $10^6$  m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>

省份	水土资源匹配度													
	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	
山西	1.01	1.00	1.12	1.14	1.10	1.20	1.30	1.27	1.22	1.24	1.16	1.14	1.12	
安徽	1.84	1.85	1.76	1.81	1.60	1.76	1.80	1.81	1.76	1.71	1.64	1.62	1.97	
江西	2.77	2.75	2.82	3.16	3.03	2.76	2.72	2.77	2.89	2.94	2.87	2.95	3.39	
河南	0.88	0.88	0.95	0.99	0.82	0.87	0.84	0.83	0.81	0.83	0.84	0.78	0.92	
湖北	1.73	1.73	1.81	1.97	1.93	1.99	1.73	1.86	1.93	1.99	1.74	2.19	2.39	
湖南	2.26	2.21	2.21	2.26	2.28	2.24	2.34	2.33	2.40	2.36	2.33	2.35	2.56	

从整体发展趋势来看,中部地区农业水土资源匹配度与农业碳排放变化情况相反,呈现波动上升的发展趋势(图4)。其中,2011年农业水土资源匹配度数值最低,为 $1.65 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>;2022年达到最高,为 $1.93 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>。

从各省农业水土资源匹配度的空间分布来看,江西、湖南的农业水土资源匹配度较高,平均值分别为 $2.91 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>和 $2.32 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>;河南的农业水土资源匹配度最低,平均 $8.60 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>;而山西、

安徽和湖北的农业水土资源匹配度处于中间水平。安徽农业水土资源匹配度在2010—2021年期间一直维持在 $1.60 \times 10^6 \sim 1.85 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>之间,但在2022年突然增加至 $1.97 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>。其主要原因有两个。

①2022年安徽遭遇少雨叠加高温的极端天气,这种极端气候条件导致农业灌溉需求大幅增加,农业用水量增至 $175.7 \times 10^8$  m<sup>3</sup>。②安徽在2022年调整农业结构,大豆、油料等作物的种植面积有所增加,而这些作物通常需要更多的灌溉水量。这种结构调整进一步推

动农业用水量的增长。总体而言,农业水土资源匹配度提高,表明中部地区农业生产自然条件在逐步改善,促使中部地区农业碳排放整体呈现波动下降的发展态势。

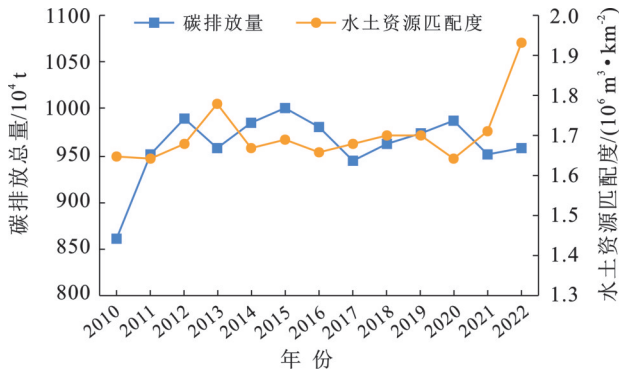


图4 中部地区农业水土资源匹配度与碳排放变化趋势

Fig.4 Trend of matching degree of agricultural water and land and carbon emissions in central China from 2010 to 2022

但是,农业水土资源匹配度的提高对农业碳减排的影响效果不大。从图4可以看出,与农业水土资源匹配度波动上升幅度相比,农业碳排放量并没有显著下降,各年度农业水土资源匹配度变化方向也不是与农业碳排放量变化方向完全相反,不同时间范围内对农业碳排放的影响表现不同。因为各省的自然条件、种植结构、农业用水效率具有异质性,2010—2022年研究期间各省的农业水土资源匹配度与农业碳排放量之间的关系并不十分吻合,而且对农业碳排放的影响方向或强度存在差异。图5表明,江西和湖南的农业水土匹配度都较高,但是这两省的农业碳排放量相差较大,江西农业碳排放量( $8.11 \times 10^6$  t)远低于湖南( $3.34 \times 10^6$  t)。主要原因可能是江西用于农业生产的水资源总量较丰富,在农业生产过程中不需要打井、抽水等活动消耗能源,因此对农业碳排放的抑制效应明显;湖南油菜、柑橘等经济作物种植面积较大,在种植过程中使用机械设备消耗能源较多。山西、河南等相对位于北部的省份其农业水土资源匹配度相对较低,由于气候相对干旱,种植冬小麦等作物,农业灌溉用水需求较高,消耗的能源也随之增加。这些省份水土资源因素对农业碳排放的抑制效果相对较低。

### 3 结论

基于“水-土-能-碳”视角,运用IPCC碳排放测算方法,测度了2010—2022年中部地区农业水土开发利用的碳排放,并刻画出中部地区农业碳排放的时序变化及其空间差异特征,最后采用LMDI模型对中

部地区农业碳排放的主要影响因素加以剖析,得出以下主要结论:

(1) 中部地区在2010—2022年农业碳排放总量呈现先快速上升后波动下降的趋势。2010年农业碳排放量相对较低,2015年农业碳排放量最高。2011年政府印发的《“十二五”节能减排综合性工作方案》、2015年颁布的“一控两减三基本”政策、2017年和2019年大规模实施的节能节水技术发挥了农业碳减排政策效应。农业碳排放环比增长率情况与农业碳排放总量走势不同,农业碳排放的环比增长率经历了阶段性下降演变过程。中部地区农业碳排放区域差异明显。2010—2022年,湖南、湖北农业碳排放量较多,合计约占整个中部地区农业碳排放量的50%;江西农业碳排放量占整个中部地区的比重最小,仅为6.49%。

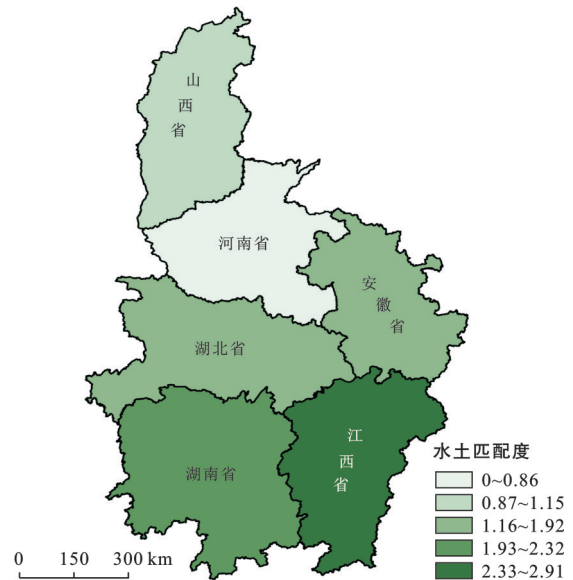


图5 2010—2022年中部地区各省农业水土资源匹配度平均值

Fig.5 Average matching degree of agricultural water and land resources in each province of central China from 2010 to 2022

(2) 农业碳排放受到多个因素的影响,各因素对农业碳排放存在影响程度和方向的差异。农业碳排放强度因素和人口因素对农业碳排放具有抑制效应,而农业水资源经济产出因素、单位播种面积的农业用水量因素和人均播种面积因素对农业碳排放具有促进效应。农业碳排放强度是促使中部地区农业碳减排的最主要因素,农业水资源经济产出则是导致农业碳排放增长的第一大要素。农业水资源经济产出因素和单位播种面积的农业用水量因素对中部地区农业碳排放的贡献存在正负两个方向的变动。

(3) 2010—2022年,中部地区农业水土资源匹配

度与农业碳排放总体变化趋势相反,农业水土资源匹配度的提高在一定程度上促使碳排放量减少,但影响效果不大,而且不同时段对农业碳排放的影响表现不同。由于各省的自然条件、种植结构、农业用水效率各不相同,水土资源匹配度对其农业碳排放的影响不同。未来仍然需要关注并深入研究农业“水-土-能-碳”耦合系统的内部作用机制,以推动水土资源的合理利用和环境保护。

## 4 建议

在农业生产过程中,为实现农业低碳化发展,减少农业碳排放,推动中部地区生态优先、绿色发展战略实施,基于以上研究结论,提出如下建议。

(1) 基于水土资源要素对农业碳排放具有正负两个方向影响作用,需要针对不同省份自然条件、种植结构和农业基础设施水平的禀赋差异,采取差别化的耕作模式,减少水资源的浪费和农业生产过程中的能源消耗。江西、湖南等省份水资源比较丰富,需要提高农业水资源的经济产出,减少其对农业碳排放产生的促进效应。山西、河南等水资源相对稀缺的省份,需要加强农田水利工程建设,研发新能源农机,发展节水节能农业技术,发挥单位播种面积农业用水量对农业碳排放产生的抑制效应。例如,山西晋中市榆次区采用半固定式喷灌、微喷、滴灌技术,运城市在经济果林区采用涌泉灌的节水灌溉技术,河南豫西丘陵旱区、黄淮海平原灌区在小麦和玉米生产中实施测墒灌溉技术。这些先进的灌溉技术不仅节约水资源,还减少能源消耗,为其他地区提供了宝贵的经验。

(2) 基于水土资源合理开发利用和水土资源相匹配对于农业生产的重要性,有必要构建一个农业水土资源利用综合评价体系,以“驱动力、压力、状态、影响、响应”为准则层,选用人均耕地面积、人均水资源量、农地开发利用、水土资源匹配度、单位耕地面积农业用水量、水资源承载力、土地资源承载力、农业水资源利用率、农业碳排放强度等指标,研究水土资源要素之间的耦合格局及其生态环境效应,可以为区域合理利用水土资源提供科学依据。这不仅有助于优化水土资源配置方式,改善开发模式,还能有效减少农业生产过程中因水土开发而产生的能源消耗,从而推动农业可持续发展。

## 参考文献(References)

- [1] Zhao Rongqin, Liu Ying, Tian Mengmeng, et al. Impacts of water and land resources exploitation on agricultural carbon emissions: The water-land-energy-carbon nexus [J]. *Land Use Policy*, 2018,72:480-492.
- [2] Li Nian, Wei Caidi, Zhang Hui, et al. Drivers of the national and regional crop production-derived greenhouse gas emissions in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020,257:120503.
- [3] 薛媛,李春华,李静雯,等. 中国农业碳排放时空特征及驱动因素分析[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2024, 32(11):1805-1817.
- Xue Yuan, Li Chunhua, Li Jingwen, et al. Analysis of spatial and temporal characteristics and drivers of agricultural carbon emissions in China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024,32(11):1805-1817.
- [4] 陈龙高,林莹,杨小艳,等. 耕地利用中要素投入与作物产出的碳排放/吸收贡献及其影响因素:以江苏省为例[J]. *中国土地科学*, 2025,39(1):130-140.
- Chen Longgao, Lin Ying, Yang Xiaoyan, et al. Carbon emission/absorption contribution of material input and crop output in cultivated land use and its influencing factors: A case study of Jiangsu Province [J]. *China Land Science*, 2025,39(1):130-140.
- [5] 袁世一,杨淼. 中国农业碳排放强度的时空交互与跃迁机制[J]. *中国农业大学学报*, 2025,30(6):236-247.
- Yuan Shiyi, Yang Miao. Spatiotemporal interaction and transition mechanism of carbon emission intensity in Chinese agriculture [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025,30(6):236-247.
- [6] 田云,尹恣昊. 中国农业碳排放再测算:基本现状、动态演进及空间溢出效应[J]. *中国农村经济*, 2022(3):104-127.
- Tian Yun, Yin Minhao. Re-evaluation of China's agricultural carbon emissions: Basic status, dynamic evolution and spatial spillover effects [J]. *Chinese Rural Economy*, 2022(3):104-127.
- [7] 田成诗,陈雨. 中国省际农业碳排放测算及低碳化水平评价:基于衍生指标与TOPSIS法的运用[J]. *自然资源学报*, 2021,36(2):395-410.
- Tian Chengshi, Chen Yu. China's provincial agricultural carbon emissions measurement and low carbonization level evaluation: Based on the application of derivative indicators and TOPSIS [J]. *Journal of Natural Resources*, 2021,36(2):395-410.
- [8] 姚石,张秋泽,刘俊娟,等. 粮食安全与“双碳”视角下黄河流域农田生态补偿额度[J]. *水土保持通报*, 2024,44(3):399-407.
- Yao Shi, Zhang Qiuzze, Liu Junjuan, et al. Farmland ecological compensation amount in Yellow River basin from food security and “dual carbon” perspectives [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024,44(3):399-407.
- [9] 丁宝根,赵玉,邓俊红. 中国种植业碳排放的测度、脱钩

- 特征及驱动因素研究[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(5):1-11.
- Ding Baogen, Zhao Yu, Deng Junhong. Calculation, decoupling effects and driving factors of carbon emission from planting industry in China [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022, 43(5):1-11.
- [10] 李志英,朱晓珊,杨丽,等. 云南省土地利用碳排放时空演变特征及影响因素[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 297-303.
- Li Zhiying, Zhu Xiaoshan, Yang Li, et al. Spatial-temporal evolution characteristics and influencing factors of carbon emissions in Yunnan Province based on land use changes [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5):297-303.
- [11] 温涛,孙鹏翔,张林. 中国农业碳排放的动态演进与区域格局[J]. 经济地理, 2024, 44(10):165-175.
- Wen Tao, Sun Pengxiang, Zhang Lin. Dynamic evolution and regional pattern of agricultural carbon emissions in China [J]. Economic Geography, 2024, 44(10): 165-175.
- [12] 徐玥,王辉,韩秋风. 徐州市农业碳排放时空特征与脱钩效应[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5):395-403.
- Xu Yue, Wang Hui, Han Qiufeng. Spatial-temporal characteristics and decoupling effects of agricultural carbon emissions at Xuzhou City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5):395-403.
- [13] 黎孔清,陈俭军,马豆豆. 基于STIRPAT和GM(1,1)模型的湖南省农地投入碳排放增长机理及趋势预测[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(2):345-352.
- Li Kongqing, Chen Jianjun, Ma Doudou. Growth mechanism and trend forecast of carbon emission from farmland inputs in Hunan Province based on stirpat and GM (1, 1) model [J]. Resources and Environment in the Yangtze basin, 2018, 27(2):345-352.
- [14] 张梅霞,李芳,郭宸宁. 华北平原三省耕地利用碳排放时空特征、影响因素及脱钩关系[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6):366-376.
- Zhang Meixia, Li Fang, Guo Chenning. Spatial-temporal characteristics, influencing factors, and decoupling relationship of carbon emissions from cultivated land use in three provinces of north China Plain [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6):366-376.
- [15] 魏锋,韦燕飞,童新华. 广西东融发展片区碳排放时空特征及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 381-389.
- Wei Feng, Wei Yanfei, Tong Xinhua. Spatio-temporal evolution characteristics and driving factors of carbon emissions in Dongrong development area of eastern Guangxi Zhuang Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3):381-389.
- [16] 石志恒,王瑞霞. TOE框架下我国省域农业碳排放影响因素组态分析:NCA与fsQCA方法相结合[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(9):1566-1577.
- Shi Zhiheng, Wang Ruixia. Configuration analysis of factors influencing carbon emissions from provincial agriculture in China under the TOE framework: Combining NCA and fsQCA methods [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(9):1566-1577.
- [17] 胡永浩,张昆扬,胡南燕,等. 中国农业碳排放测算研究综述[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(2): 163-176.
- Hu Yonghao, Zhang Kunyang, Hu Nanyan, et al. Review on measurement of agricultural carbon emission in China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(2):163-176.
- [18] 李绵德,周冬梅,朱小燕,等. 河西走廊2000—2020年农业碳排放时空特征及其影响因素[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(4):940-952.
- Li Miande, Zhou Dongmei, Zhu Xiaoyan, et al. Spatial-temporal characteristics of agricultural carbon emissions and influencing factors in the Hexi Corridor from 2000 to 2020 [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023, 40(4):940-952.
- [19] 邓彩云,徐天和,张莉,等. 区域水-土-粮-碳 nexus 聚焦于区域低碳和高质量农业发展的研究[J]. Water, 2024, 16(13):1770.
- Deng Caiyun, Xu Tianhe, Zhang Li, et al. Review of the water-land-food-carbon nexus focused on regional low-carbon and high-quality agricultural development [J]. Water, 2024, 16(13):1770.
- [20] 张宗毅,李玉珠,张萌,等. 基于农田宜机化视角的农用柴油技术效率提升路径[J]. 农业工程学报, 2024, 40(19):62-71.
- Zhang Zongyi, Li Yuzhu, Zhang Meng, et al. Pathways for enhancing the technological efficiency of agricultural diesel from the perspective of the level of farmland suitability for agricultural machinery operations [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(19):62-71.
- [21] 王帅,赵荣钦,苏辉,等. 河南省典型区农业水土资源开发的碳排放效应研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(1):71-78.
- Wang Shuai, Zhao Rongqin, Su Hui, et al. Carbon emission effects of agricultural land and water resources exploitation in typical villages of Henan Province [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2019, 40(1):71-78.
- [22] 邓楚雄,李荣荣,谢炳耿,等. 水-土-能-碳耦合模式下农业温室气体排放的影响因素[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1):71-78.
- Deng Chuxiong, Li Rongrong, Xie Binggeng, et al. Impacts of the integrated pattern of water and land resources use on agricultural greenhouse gas emissions in China during 2006—2017: A water-land-energy-

- emissions nexus analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 308: 127221.
- [23] 李国志, 李宗植. 中国农业能源消费碳排放因素分解实证分析: 基于LMDI模型[J]. *农业技术经济*, 2010(10): 66-72.  
Li Guozhi, Li Zongzhi. An empirical analysis of factorization of carbon emissions from agricultural energy consumption in China: based on LMDI model [J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2010(10): 66-72.
- [24] 吴昊玥, 孟越, 黄瀚蛟, 等. 中国耕地低碳利用绩效测算与时空分异[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(5): 1148-1163.  
Wu Haoyue, Meng Yue, Huang Hanjiao, et al. Estimation and spatio-temporal divergence of the low-carbon performance of cropland use in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(5): 1148-1163.
- [25] 熊子昕, 匡兵, 柯楠. 长江中游城市群耕地利用碳排放“总量—强度”的空间关联特征[J]. *水土保持通报*, 2023, 43(3): 406-413.  
Xiong Zixin, Kuang Bing, Ke Nan. Spatial correlation characteristics of amount and intensity of carbon emissions resulting from cultivated land utilization in an urban agglomeration in middle reaches of Yangtze River [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(3): 406-413.
- [26] 左其亭, 赵晨光, 马军霞, 等. 水资源行为的二氧化碳排放当量分析方法及应用[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(1): 1-12.  
Zuo Qiting, Zhao Chengguang, Ma Junxia, et al. Carbon dioxide emission equivalent analysis method of water resource behaviors and its application [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21(1): 1-12.
- [27] 刘玉珂, 金声甜. 中部六省能源消费碳排放时空演变特征及影响因素[J]. *经济地理*, 2019, 39(1): 182-191.  
Liu Yuke, Jin Shengtian. Temporal and spatial evolution characteristics and influencing factors of energy consumption carbon emissions in six provinces of central China [J]. *Economic Geography*, 2019, 39(1): 182-191.
- [28] Chang Huanyu, Zhang Bing, Han Jingyan, et al. Evaluation of the coupling coordination and sustainable development of water-energy-land-food system on a 40-year scale: A case study of Hebei, China [J]. *Land*, 2024, 13(7): 1089.
- [29] 何理, 王喻宣, 尹方平, 等. 全球气候变化影响下中亚水土资源与农业发展多元匹配特征研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50(9): 1268-1279.  
He Li, Wang Yuxuan, Yin Fangping, et al. The multivariate matching properties among water and soil resources and agricultural development in central Asia under global climate change [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2020, 50(9): 1268-1279.
- [30] 赵荣钦, 李志萍, 韩宇平, 等. 区域“水—土—能—碳”耦合作用机制分析[J]. *地理学报*, 2016, 71(9): 1613-1628.  
Zhao Rongqin, Li Zhiping, Han Yuping, et al. The coupling interaction mechanism of regional water-land-energy-carbon system [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(9): 1613-1628.
- [31] 张玥, 代亚强, 陈媛媛, 等. 土地利用隐性转型与土地利用碳排放空间关联研究[J]. *中国土地科学*, 2022, 36(6): 100-112.  
Zhang Yue, Dai Yaqiang, Chen Yuanyuan, et al. The study on spatial correlation of recessive land use transformation and land use carbon emission [J]. *China Land Science*, 2022, 36(6): 100-112.
- [32] 王若梅, 马海良, 王锦. 基于水—土要素匹配视角的农业碳排放时空分异及影响因素: 以长江经济带为例[J]. *资源科学*, 2019, 41(8): 1450-1461.  
Wang Ruomei, Ma Hailiang, Wang Jin. Spatial and temporal differences of agricultural carbon emissions and impact factors of the Yangtze River economic belt based on a water-land perspective [J]. *Resources Science*, 2019, 41(8): 1450-1461.
- [33] 郭玮, 胡西武, 丁芬菱. 2000—2021年青海省农牧业碳排放驱动因素及脱钩效应[J]. *水土保持通报*, 2024, 44(3): 347-355.  
Guo Wei, Hu Xiwu, Ding Fenling. Driving factors and decoupling effects of carbon emissions from agriculture and animal husbandry in Qinghai Province during 2000—2021 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(3): 347-355.
- [34] Ang B W. The LMDI approach to decomposition analysis: A practical guide [J]. *Energy Policy*, 2005, 33(7): 867-871.