

# 黄河流域九省区农业碳排放的驱动因素及预测

白桦锐<sup>1,2</sup>, 裴健宇<sup>3</sup>, 王琪<sup>4</sup>, 李素雅<sup>1,2</sup>, 潘嘉培<sup>1,2</sup>, 张建国<sup>1,2</sup>

(1. 黄河水利委员会 黄河上中游管理局, 陕西 西安 710021;

2. 水利部 黄土高原水土保持野外科学观测研究站, 陕西 西安 710000;

3. 新疆大学 商学院, 新疆 乌鲁木齐 830012; 4. 中陕高标准农田建设集团有限公司, 陕西 西安 710000)

**摘要:** [目的] 科学评估黄河流域农业碳排放的时空变化规律及其主要影响因素, 预测未来排放趋势, 为制定农业碳减排政策和区域协同治理方案提供数据支持和决策参考。[方法] 选取黄河流域九省区 2001—2021 年农业碳排放作为研究对象, 运用 STIRPAT 扩展模型(可拓展的随机性环境影响评估模型)分析其驱动因素, 并采用 GM(1,1) 模型进行预测。[结果] ① 黄河流域各省域之间的农业碳排放存在显著差异, 粮食主产区农业碳排放明显高于其他省域。② 黄河流域农业碳排放随着时间的推移先上升后下降, 整体呈“倒 U 型”, 前期环比增速呈现波动上升, 在 2012 年之后开始缓慢下降, 直至 2017 年出现负增长, 这表明政策干预在农业碳减排中发挥了重要作用。③ 黄河流域农业碳排放的驱动因素中, 农业生产效率、经济发展水平、城镇化水平、农地经营规模、农业机械化水平是导致黄河流域农业碳排放增加的主要因素, 农业机械能源强度对碳排放具有抑制作用, 技术进步可能因为“回弹效应”抵消部分碳减排效果。④ 2022—2035 年黄河流域农业碳排放可能呈下降趋势, 但仍保持较高水平, 农业碳减排压力仍然较大。[结论] 黄河流域农业碳减排潜力尚未充分释放, 应通过加速新能源技术应用, 普及绿色低碳生产技术, 构建农业废弃物全链条管理体系, 推进农业结构优化与种养耦合模式创新, 因地制宜构建生态农业与有机农业协同发展体系等方式, 进一步实现农业碳减排。同时, 需建立经济增长与减排目标的动态平衡机制, 规避因粗放型发展导致的碳排放反弹风险。

**关键词:** 农业碳排放; 驱动因素; 黄河流域; STIRPAT 模型; GM(1,1) 模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)04-0244-12

中图分类号: F327, X322

**文献参数:** 白桦锐, 裴健宇, 王琪, 等. 黄河流域九省区农业碳排放的驱动因素及预测[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 244-255. Bai Huarui, Pei Jianyu, Wang Qi, et al. Driving factors and prediction of agricultural carbon emissions in nine provinces of Yellow River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 244-255. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.007; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.04.007.

## Driving factors and prediction of agricultural carbon emissions in nine provinces of Yellow River basin

Bai Huarui<sup>1,2</sup>, Pei Jianyu<sup>3</sup>, Wang Qi<sup>4</sup>, Li Suyu<sup>1,2</sup>, Pan Jiapei<sup>1,2</sup>, Zhang Jianguo<sup>1,2</sup>

(1. Upper and Middle Yellow River Bureau, Yellow River Conservancy Commission, Xi'an, Shaanxi

710021, China; 2. Soil and Water Conservation Field Scientific Observation and Research Station on Loess Plateau,

Ministry of Water Resources, Xi'an, Shaanxi 710000, China; 3. School of Business, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang

830012, China; 4. China Shaanxi Well-facilitated Farmland Construction Group Co., Ltd, Xi'an, Shaanxi 710000, China)

**Abstract:** [Objective] The spatiotemporal variation of agricultural carbon emissions and its main influencing factors in the Yellow River basin were scientifically evaluated to predict the future emission trend, and provide data support and decision-making reference for formulating agricultural carbon emission reduction policies and regional collaborative governance plans. [Methods] The agricultural carbon emissions from 2001 to 2021 were selected from nine provinces of the Yellow River basin, the STIRPAT extended model (stochastic impacts by regression on population, affluence and technology) was used to analyze the driving factors, and the GM (1,1) model was used for forecasting. [Results] ① Significant differences were observed in agricultural carbon emissions

收稿日期: 2024-12-19

修回日期: 2025-03-24

采用日期: 2025-03-24

资助项目: 国家自然科学基金委黄河水科学研究联合资助项目“黄土高原水土保持措施潜力及其对河流水沙的调控机制”(U2243211)

第一作者: 白桦锐(1996—), 女(汉族), 陕西省榆林市人, 硕士, 工程师, 研究方向为气候变化与碳减排。Email: 514428732@qq.com。

among provinces and regions in the Yellow River basin, and the agricultural carbon emissions in major grain-producing areas were significantly higher than those in other provinces. ② Agricultural carbon emissions in the Yellow River basin first increased and then decreased over time, showing an overall ‘inverted U-shape’. The quarter-on-quarter growth rate showed a fluctuating rise in the early stage and then began to decline slowly after 2012 until a negative growth in 2017, indicating that policy intervention played an important role in agricultural carbon emission reduction. ③ Among the driving factors of agricultural carbon emissions in the Yellow River basin, agricultural production efficiency, economic development level, urbanization level, agricultural land management scale and agricultural mechanization level were the main factors leading to the increase of agricultural carbon emissions. The energy intensity of agricultural machinery had a restraining effect on carbon emissions, and the technological progress may offset part of the carbon emission reduction effect due to the ‘rebound effect’. ④ From 2022 to 2035, agricultural carbon emissions in the Yellow River basin may exhibit a downward trend, while maintaining a high level, and agricultural carbon emission reduction pressure would remain large. [Conclusion] The potential of agricultural carbon emission reduction in the Yellow River basin has not been fully realized, and agricultural carbon emission reduction should be further achieved by accelerating the application of new energy technologies, popularizing green and low-carbon production technologies, building a whole-chain management system of agricultural waste, promoting the optimization of agricultural structure and the innovation of the coupling model of planting and breeding, and building a collaborative development system of ecological and organic agriculture based on local conditions. At the same time, it is necessary to establish a dynamic balance mechanism between economic growth and emission reduction targets to avoid the risk of carbon emissions rebound caused by extensive development.

**Keywords: agricultural carbon emissions; driving factors; Yellow River basin; STIRPAT model; GM(1, 1) model**

全球变暖已经成为人们关注的热点问题之一,以二氧化碳(CO<sub>2</sub>)为主的温室气体排放是全球变暖的重要原因<sup>[1]</sup>。为了有效抑制全球变暖,世界各国都在积极制定减排目标并履行相应的减排义务。中国首次提出要以农业生态低碳发展作为持续动力,建设农业强国。

农业是实现国民经济高质量发展的基础,同时,农业也是全球温室气体排放的第二大来源,中国农业温室气体排放量占全国总量的17%,高于全球14%的平均水平<sup>[2]</sup>。农业温室气体排放破坏了农业碳平衡,对生态环境造成了很大破坏,也在一定程度上阻碍了农业高质量发展。当前,黄河流域的生态保护与高质量发展已被提升至国家重大战略高度<sup>[3]</sup>。

作为中国典型农耕区域,黄河流域的传统种植业和畜牧业发展较为成熟。然而,在农业生产过程中,不合理的种植方式和养殖模式往往会造成农业碳排放的增加,黄河流域九省区的农业碳排放量约占全国的34.7%,远超国内平均水平<sup>[4]</sup>。因此厘清黄河流域九省区农业碳排放时空演化特征及其驱动因素,合理预测黄河流域农业碳排放量变化,对制定黄河流域九省区农业碳减排措施和政策具有重要指导意义。已有学者对农业碳排放做了大量研究,主要从以下几点展开。

(1) 农业碳排放测算和现状方面,学者已采用排放系数法、生命周期评价法、质量平衡法、实地测量法和模型模拟法进行测量和估计<sup>[5]</sup>。目前农业碳排放测算方法以排放系数法为主,对农业碳排放的测度主要集中在种植业和畜牧业,包括化肥投入、机械耕种、农作物根部腐烂、牲畜肠道发酵以及家禽牲畜粪便分解产生的CO<sub>2</sub>、甲烷(CH<sub>4</sub>)、氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)等温室气体<sup>[6-7]</sup>。此外,还有部分学者基于国家、省、市、县及主体功能区等不同尺度对农业碳排放量和碳排放强度时空特征进行对比分析<sup>[7-8]</sup>。

(2) 农业碳排放的驱动因素方面,已有学者采用Kaya恒等式的LMDI分解法<sup>[9]</sup>、C-D生产函数<sup>[10]</sup>、空间溢出效应等<sup>[11]</sup>方法对农业碳排放驱动因素展开研究。李波等<sup>[12]</sup>发现经济增长、农业机械化水平、农业经营规模、城镇化水平等均会促进农业碳排放增长。李宽等<sup>[13]</sup>发现农业科技进步可在一定程度抑制农业碳排放增长,而农业产业集聚、产业结构、农业生产效率、环境规制等因素在不同程度上对农业碳排放也产生了一定的影响<sup>[14]</sup>。受指标及区域不同的影响,各种驱动因素的影响结果会有一定的差异。

(3) 农业碳排放预测及碳减排方面,已有学者采用ARIMA模型<sup>[15]</sup>、GM(1, 1)模型<sup>[16]</sup>、情景模拟法<sup>[17]</sup>对农业碳排放进行预测,通过对农业碳排放峰值和

趋势的预测把握未来农业碳减排的方向。此外,还有部分学者从碳减排潜力<sup>[18]</sup>、碳减排路径<sup>[19-20]</sup>、碳减排补偿机制等<sup>[21]</sup>方面对农业碳减排展开分析,进一步对农业碳减排实施主体和治理主体进行研究,探究政府、市场、社会组织等治理主体的农业碳减排策略。

综合来看,国内关于农业碳排放的研究已较为丰富,但仍存在以下不足。①现有研究多停留在静态时空描述层面,缺乏对长时序动态演变及政策交互机制的解析。②多数研究仅聚焦于农业碳排放的单维度驱动因素,忽视了社会、经济与技术等多重因素交互作用对碳排放的非线性影响机制,且在多维度驱动因素基础上的碳排放预测研究相对不足。③黄河流域作为农牧复合系统的典型区域,其粮食主产区与畜牧业优势区的异质性驱动路径尚未明确,省际差异化驱动逻辑与政策适配需求也未得到系统揭示。针对上述问题,本研究综合农地利用、作物种植、畜禽养殖、秸秆焚烧 4 个方面,构建黄河流域农业碳排放多尺度指标体系,解析九省区农业碳排放的时空分异特征,运用 STIRPAT 拓展模型分析驱动因素,并对农业碳排放进行预测,进而提出分区治理策略,为黄河流域农业碳减排政策的制定提供科学依据。

## 1 研究区概况

黄河流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东 9 个省(区),全长 5 464 km,流域面积  $7.95 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,区域内农业较为发达,不仅有 4 个粮食主产区,内蒙古、宁夏、四川等省区的畜牧业也较为发达。黄河流域内,黄淮海平原、汾渭平原、河套灌区等地的粮食和肉类产量占全国 1/3 左右,是中国重要的农产品生产区。研究区域如图 1 所示。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

本文选取 2001—2021 年黄河流域 9 个省的农业相关数据为研究对象,其中,水稻、小麦、玉米、大豆、棉花、油菜籽、蔬菜、花生、薯类的种植面积及产量,牛、羊、驴、骡等牲畜的出栏、存栏量,以及化肥、农药、农膜、有效灌溉面积等数据主要来源于《中国农村统计年鉴》;农用柴油、机械动力数据主要来源于《中国能源统计年鉴》;第一产业从业人员、乡村人口、省人口、GDP、农业 GDP 等数据主要来源于黄河流域各省区统计年鉴及《中国人口和就业统计年鉴》,部分缺失的数据使用插值法来补齐。为消除价格变动带来的影响,本文以 2021 年为基年,对黄河流

域各个省区 2001—2021 年的生产总值和农业增加值进行平减调整。



注:本文中国地图来源于中国自然资源部官网(<http://bzdt.chnnr.gov.cn/>),审图号GS(2016)2923号。底图无修改。

图 1 黄河流域九省位置图

Fig.1 Location map of nine provinces in Yellow River basin

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 农业碳排放测算方法

先前学者对碳排放的研究依据不同,对农业碳排放指标的选取和方法也存在差异。因此,本文参考已有学者对农业碳排放的有关研究<sup>[6-7,22]</sup>,从农地利用活动、农作物种植、畜禽养殖、秸秆焚烧 4 个方面完成对黄河流域农业碳排放量的有效测度。此外,根据 IPCC 第四次评估报告,将农业活动中排放的  $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CH}_4$  两大类温室气体按照  $1 \text{ t CH}_4 = 6.818 \text{ t C}$  和  $1 \text{ t N}_2\text{O} = 81.273 \text{ t C}$  的折算比例进行计算,以此构建黄河流域农业碳排放因子测算体系。农业碳排放测算公式如下:

$$C = \sum C_i = \sum T_i \times \delta_i \quad (1)$$

式中: $C$ 表示农业碳排放总量( $10^4 \text{ t}$ ); $i$ 表示碳源类别; $C_i$ 表示各碳源类别碳排放总量( $10^4 \text{ t}$ ); $T_i$ 表示各碳源因子实际物质投入量 [ $10^4 \text{ t}/(\text{hm}^2 \times \text{头})$ ]; $\delta_i$ 表示各碳源因子对应的碳排放系数。其中,牲畜养殖碳排放测算中,出栏率大于 1 的猪和鸡、鸭、鹅等家禽的年均饲养量按照(平均生命周期  $\times$  年末出栏量)/365 计算,其中猪、兔、家禽的平均生命周期分别为 200, 105, 55 d;出栏率小于 1 的牛、马、驴、骡、羊的年均饲养量按照(上年年末存栏数 + 本年年末存栏数)/2 计算<sup>[8]</sup>。

秸秆焚烧的碳排放量参考各茎秆的草谷比、燃烧效率及各省秸秆露天焚烧比例进行测算<sup>[22]</sup>,秸秆焚烧碳排放核算公式如下:

$$C_k = \sum_{i=1}^i (P_{k,i} \times E_i \times R_i \times F_i \times D_i) \quad (2)$$

式中: $k$ 为不同省区; $i$ 为不同农作物类别; $C_k$ 为 $k$ 省区秸秆焚烧的碳排放量; $P_{k,i}$ 为 $k$ 省区 $i$ 农作物的产量; $E_i$ 为农作物 $i$ 的草谷比; $R_i$ 为农作物 $i$ 秸秆露天

焚烧比例; $F_i$ 为农作物 $i$ 的秸秆燃烧效率; $D_i$ 为农作物 $i$ 秸秆露天燃烧的碳排放因子。各农作物、牲畜、秸秆、农用物资的碳排放系数及农作物草谷比、燃烧效率如表 1 所示,各省水稻碳排放系数如表 2 所示,各省秸秆焚烧率如表 3 所示。

表 1 农业碳排放源及其系数

Table 1 Sources of agricultural carbon emissions and their coefficients

作物种植		牲畜养殖			秸秆焚烧			农地利用			
碳源	碳排放系数/ ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	碳源	碳排放系数/( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )			碳源	草谷比	燃烧效率	碳排放系数/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	碳源	碳排放系数/ ( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
			肠道发酵产生 $\text{CH}_4$	粪便产生 $\text{CH}_4$	粪便产生 $\text{N}_2\text{O}$						
小麦	1.75	奶牛	68.00	16.00	1.00	稻草	0.90	0.93	1 460	氮肥	3.39
玉米	2.53	肉牛	47.80	1.00	1.39	麦秸	1.10	0.93	1 460	磷肥	0.64
大豆	2.29	马	18.00	1.64	1.39	玉米	1.20	0.92	1 350	钾肥	0.18
棉花	0.95	驴	10.00	0.90	1.39	大豆	1.60	0.68	1 445	复合肥	0.38
花生	0.95	骡	10.00	0.90	1.39	薯类	0.50	0.68	1 445	农膜	5.18
油菜籽	0.95	猪	1.00	3.50	0.53	油菜籽	1.50	0.20	1 445	柴油	0.59
蔬菜	4.94	羊	5.00	0.16	0.33	棉花	3.40	0.80	1 445	农药	4.93
薯类	0.95	家禽		0.02	0.02	花生	0.80	0.80	1 445	有效灌溉面积	266.48

表 2 稻谷种植不同地区碳排放系数

Table 1 Regional carbon emission coefficient of rice cultivation

省份	山西	内蒙古	山东	河南	四川	陕西省	甘肃	青海	宁夏
碳排放系数/( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	6.62	8.93	21.00	17.85	25.73	12.51	6.83	—	7.35

表 3 各省区秸秆露天焚烧比例

Table 3 Open burning proportion of straw in different provinces and regions

单位: %

省份	秸秆露天焚烧比例								
	稻草	麦秸	玉米	大豆	薯类	花生	油菜籽	棉花	平均值
山西	8.4	36.0	25.3	24.3	24.3	24.3	24.3	27.5	24.3
山东	9.7	19.7	23.4	17.8	17.8	17.8	17.8	18.4	17.8
河南	19.7	34.8	19.3	20.8	15.3	20.5	20.5	14.9	20.8
四川	25.6	16.2	28.8	20.8	13.4	20.8	20.8	20.2	20.8
陕西	6.2	13.4	22.0	14.4	14.4	14.4	14.4	15.8	14.4
甘肃	8.5	6.7	15.1	9.2	7.5	9.2	9.2	8.1	9.2
青海	0	8.1	6.5	0	4.1	4.1	4.1	0	4.5
宁夏	19.7	20.3	18.2	19.4	19.4	19.4	19.4	0	19.4

2.2.2 农业碳排放的驱动因子 STIRPAT 模型

IPAT 模型最早是由 Ehrlich P. R. 等<sup>[23]</sup>于 1971 年提出,是研究人口( $P$ )、富裕程度( $A$ )和技术水平( $T$ )对环境压力( $I$ )的理论模型,其一般表达式为

$$I = P \times A \times T \quad (3)$$

式中: $I$ 代表环境效应,通常用碳排放量或者环境污染来表示; $P$ 代表人口规模,通常用人口数量来表示; $A$ 代表富裕程度,通常用人均产值来表示; $T$ 代表技术水平,通常用能源强度来表示。模型的提出在一定程度上解释了环境与人口、经济、技术之间的关系,

但很难通过数值来建立三者之间的联系<sup>[24]</sup>。

STIRPAT 模型是 Dietz T. 等<sup>[25]</sup>为了修正 IPAT 恒等式不能分析变量之间的交互作用和非线性关系这一不足而建立的随机性环境影响评估模型,聚焦了人口、经济、技术水平这 3 个因素变动时独立对环境产生的影响,具有较好的灵活性和拓展性,是目前用作碳排放驱动因素分析较常见的模型。STIRPAT 模型通过引入弹性系数,允许不同驱动因素对环境影响的作用呈非线性关系,更贴合现实中的复杂动态。而且 STIRPAT 模型的参数(如弹性系

数)具有明确的经济和环境意义,便于解释各驱动因素对环境影响的贡献。

同时 STIRPAT 模型的非线性模式能够更好地拟合小样本数据中的复杂关系,能够通过回归分析捕捉变量间的关系。例如当前较为热门的机器学习模型,需要依靠大量的数据来进行训练和验证,小样本数据容易导致过拟合或欠拟合,STIRPAT 模型通过理论框架和统计检验限制变量关系,减少了在小样本数据中过拟合的风险。STIRPAT 模型通常可以表示为

$$C = b \times P_t^\alpha \times A_t^\beta \times T_t^\chi \times \varepsilon \quad (4)$$

式中: $C$ 为碳排放量; $b$ 为常数项; $t$ 为年份; $\alpha, \beta, \chi$ 为需要估计的指数项; $\varepsilon$ 为误差。

本文参考卢奕亨等<sup>[8]</sup>模型的构建方法,从社会、经济、技术 3 个方面出发,对 STIRPAT 模型进行拓

展,该过程只需满足乘法形式,而不需要严格满足 Kaya 恒等式。拓展的 STIRPAT 模型为

$$C = b \times CI_t^\alpha \times SI_t^\beta \times GI_t^\chi \times PL_t^\delta \times GA_t^\varphi \times AE_t^\phi \times \varepsilon \quad (5)$$

式中: $b$ 为常数项; $\varepsilon$ 为误差项; $t$ 为年份; $C$ 代表农业碳排放量; $CI$ 为单位农业机械动力所排放的碳,代表农业机械能源强度; $SI$ 为单位第一产业从业人口带来的农业产值,代表单位农业生产效率; $GI$ 为当年生产总值与总人口之比,代表经济发展水平; $PL$ 为当年城镇人口占总人口比重,代表城镇化水平; $GA$ 为单位第一产业从业人口所经营的耕地面积,代表农地经营规模; $AE$ 为单位耕地面积所消耗的农业机械动力,代表农业机械化水平, $\alpha, \beta, \chi, \delta, \varphi, \phi$ 为统计回归系数,即变量每变化 1% 引起碳排放量变动的百分比。各变量的定义及描述性统计见表 4。

表 4 农业碳排放各个变量的定义及描述性统计

Table 4 Definition and descriptive statistics of various variables of agricultural carbon emissions

变量属性	变量类型	变量名称	变量定义	平均值	标准差
被解释变量	环境压力	农业碳排放( $C$ )	当年农业产生的碳排放量/ $10^5$ t	1 472.365	85.889
	技术	农业机械能源强度( $CI$ )	当年单位农业机械动力所排放的碳/ $(10^4$ t·kW <sup>-1</sup> )	0.534	0.116
解释变量	经济	农业生产效率( $SI$ )	当年单位第一产业从业人口带来的农业产值/ $(10^4$ 元·人 <sup>-1</sup> )	3.744	1.862
		经济发展水平( $GI$ )	当年生产总值与总人口之比/ $(10^4$ 元·人 <sup>-1</sup> )	6.082	0.892
	社会	城镇化水平( $PL$ )	当年城镇人口占总人口比重/%	39.912	11.960
		农地经营规模( $GA$ )	当年单位第一产业从业人口所经营的耕地面积/ $(\text{km}^2 \cdot 10^4$ 人 <sup>-1</sup> )	4.556	1.491
		农业机械化水平( $AE$ )	当年单位耕地面积所消耗的农业机械动力/ $(10^4$ W·hm <sup>-2</sup> )	0.694	0.121

为消除异方差所带来的误差,在不改变时间序列的前提下对扩展 STIRPAT 模型两边取对数,得到 STIRPAT 模型的求和形式:

$$\ln C = \ln b + \alpha \ln CI_t + \beta \ln SI_t + \chi \ln GI_t + \delta \ln PL_t + \varphi \ln GA_t + \phi \ln AE_t + \ln \varepsilon \quad (6)$$

### 2.2.3 GM(1,1)灰色模型

灰色模型(grey model)是揭示系统内部事物连续发展变化过程的预测模型,简称 GM(1,1)模型<sup>[26]</sup>。该模型适合对样本较小且平稳的数列进行预测,建立灰色微分预测模型,对事物发展规律作出模糊性的长期描述。GM(1,1)模型不需要大量样本,适用于数据量较少的情况,通常只需 4 个以上数据点即可建模,计算工作量小,在短期预测中表现良好,适合趋势性较强的数据,易于实现和操作。GM(1,1)模型的基本形式为

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b \quad (7)$$

式中: $a$ 为发展系数; $b$ 为灰作用量,经过演变可得到白化方程:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b \quad (8)$$

GM(1,1)模型的精度等级如表 5 所示。

表 5 GM(1,1)模型精度等级

Table 5 Accuracy level of GM(1,1) model

精度等级	后验差比值( $C$ )	误差概率( $P$ )
1级(好)	<0.35	>0.95
2级(合格)	<0.50	>0.80
3级(勉强)	<0.65	>0.70
4级(不合格)	≥0.65	≤0.70

## 3 结果与分析

### 3.1 黄河流域农业碳排放空间分布特征

通过公式(1)和公式(2)具体测算中国黄河流域 9 个省份 2001—2021 年农业碳排放的数据,运用 ArcGIS 10.2 分别对 2001, 2006, 2011, 2017, 2019, 2021 年 6 个时期各省区农业碳排放量空间分布进行分析,结果如图 2 所示。其中,2006 年为黄河流域农

业碳排放增速最快的一年,2017年为农业碳排放量最高的一年。此外,四川、山东、河南3个粮食主产区均为每年农业碳排放量最高的3个省份,这与李梦冉等<sup>[27]</sup>的研究结果基本一致。

四川、山东、河南的碳排放总量分别占黄河流域9个省份的18.98%,21.78%,27.99%,这3个省份不

仅是中国粮食主产区之一,畜牧业也较为发达,饲养的家禽、猪、羊等种类繁多。除此之外,畜牧业较为发达且同为中国粮食主产区之一的内蒙古农业碳排放量排第四。部分耕地面积较小且畜牧业欠发达的省份农业碳排放量相对较小,如山西、青海、宁夏等。

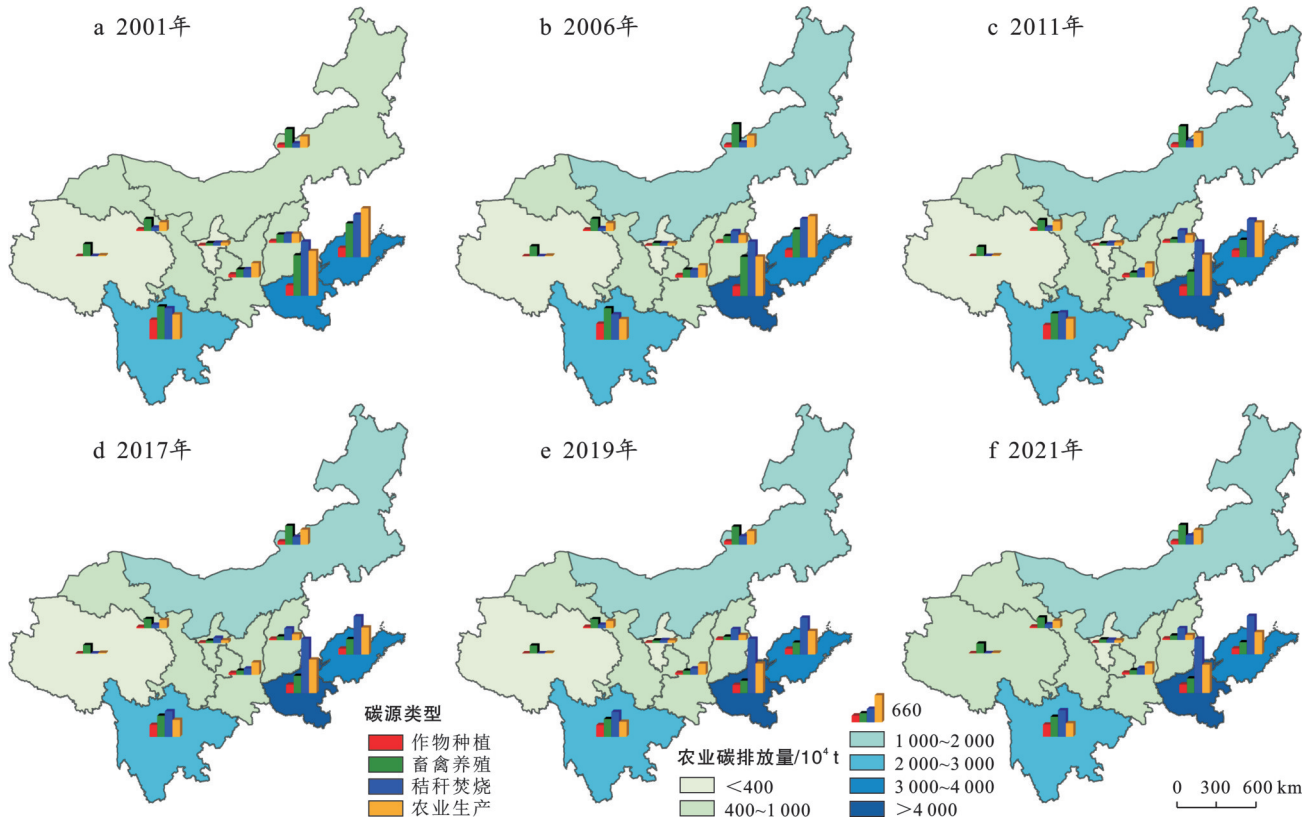


图2 2001—2021年黄河流域农业碳排放量分布

Fig.2 Distribution of agricultural carbon emissions in Yellow River basin from 2001 to 2021

### 3.2 黄河流域农业碳排放时序演进特征

2001—2021年黄河流域农业碳排放量情况见图3。2001年黄河流域农业碳排放总量为 $1.32 \times 10^8$  t, 2021年为 $1.52 \times 10^8$  t, 年均增长率为0.73%, 环比增速呈“波动上升-平稳上升-波动下降”变化趋势, 这与张军涛等<sup>[28]</sup>研究结果基本一致。农作物、秸秆焚烧、农地利用碳排放量均有不同程度的增长, 年均增速分别为0.64%, 2.68%, 0.01%, 畜牧业养殖碳排放量则呈现负增长, 其年均增速为-0.34%。黄河流域农业碳排放量变动大致可以分为以下4个阶段。

2001—2006年呈现波动上升趋势, 其中2003年农业碳排放增速最低。受当年“非典”影响, 国内包括农业在内的各个产业均受到重创, 农民耕作及饲养牲畜均受到一定的影响, 因此当年农业碳排放水平也较低。此外, 2006年黄河流域农业碳排放增速是年度区间中最快的年份, 增速达到6.58%。此外, 这一年也是畜禽饲养碳排放量最高的年份, 为 $4.89 \times 10^7$  t, 随

后畜禽饲养碳排放逐渐下降, 这可能与数据统计方法改变有关。2006年之前的畜禽存出栏量数据以第二次全国农业普查结果为准, 而2006年之后的数据则依据第三次全国农业普查结果修订得来, 两次普查统计的基年不同, 客观上导致了2006年之前农业碳排放统计量的偏差。

2007—2011年农业碳排放呈现平稳上升趋势, 畜禽养殖、农地利用、秸秆焚烧、作物生长的碳排放量均有小幅度增高, 其中农地利用和秸秆焚烧碳排放量提高最为明显。这主要是由于在21世纪之后, 黄河流域农业经济处于快速发展的早期, 农业经济飞速增长, 大量农用物资投入农业生产中, 如农膜等新技术被农民广泛使用, 从而带来了增产、增收、增效等直接经济效益, 但随之而来的还有环境承载压力的提高。与此同时, 国内缺乏有关污染治理、环保、节能减排等相关政策及经验的推广, 农民也缺乏环保理念, 因此在农用物资投入方面存在高耗能、高

污染、多浪费等情况,造成农业碳排放的增高。

2012—2016年农业碳排放量增速逐渐放缓,但总量依旧很高,农地利用、畜禽养殖的农业碳排放量均有小幅下降,农业碳排放环比增速整体下降。其中,2013年农地利用碳排放量最高,碳排放达 $4.99 \times 10^7$  t,随后其碳排放贡献占比下降,但整体仍保持较高水平。这主要是由于随着中国“可持续发展”理念的提出,《畜禽规模养殖污染防治条例》(2014)、《到2020年化肥使用量零增长行动方案》(2015)、《全国农业可持续发展规划(2015—2030年)》(2015)等一系列节能减排防污治污政策的颁布,绿色发展、循环经济、低碳经济的概念逐步被农民接受,农民环保意识有所提升,农药化肥的使用减少,从而降低了农业碳排放和由化肥农药导致的面源污染。

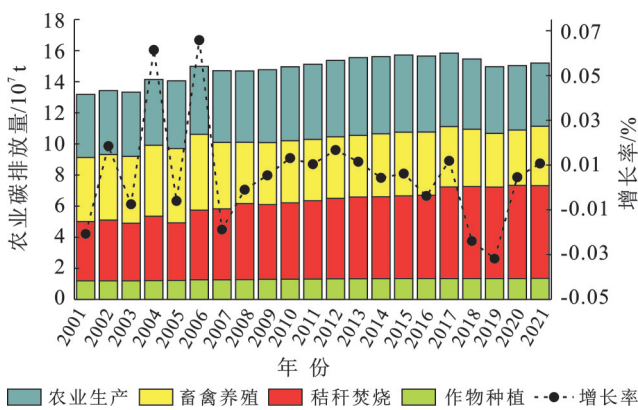


图3 2001—2021年黄河流域农业各碳排放源的碳排放量与总碳排放量增长率

Fig.3 Growth rate of carbon emissions from various agricultural carbon emission sources and total carbon emissions in Yellow River basin from 2001 to 2021

2017—2021年呈现波动递减,农地利用、畜禽养殖的农业碳排放量均大幅下降。其中,秸秆焚烧碳排放量最高的是2020年,为 $5.98 \times 10^7$  t,随后缓慢下降,但其碳排放量目前仍居高不下。这再次说明随着中国“一控两减三基本”政策的深入推进,农业节水、化肥农药零增长、农业废弃物综合利用等减排固碳措施从试点城市向周边城市慢慢扩散的政策取得了较好的成效。国家随后又相继颁布了《农业绿色发展技术导则(2018—2030年)》《关于创新体制机制推进农业绿色发展的意见》(2017)、《开展果菜茶有机肥替代化肥行动方案》(2017)等一系列环保政策,可以看出国内农业发展逐渐从节能减排向绿色低碳循环靠拢。

### 3.3 STIRPAT模型回归分析

运用Stata 16软件,并结合公式(6)及2001—2021年黄河流域碳排放的相关数据进行OLS回归分

析,为避免伪回归,对模型进行共线性分析,发现每个变量的方差膨胀因子(VIF)远大于10(如表6所示)。

表6 农业碳排放STIRPAT模型的方差膨胀因子  
Table 6 Variance inflation factor for each variable of STIRPAT model of agricultural carbon emissions

变量	平均值	标准偏差	VIF
ln C	9.596	0.060	
ln CI	-0.649	0.215	44.184
ln SI	1.190	0.536	106.503
ln GI	1.794	0.156	8.040
ln PL	-0.963	0.309	41.015
ln GA	1.466	0.324	47.495
ln AE	-0.381	0.185	23.504

这表明数据没有通过共线性检验,各个变量之间存在高度的多重共线性。为消除共线性对统计回归结果的影响,本文运用stata软件,采用岭回归法对黄河流域农业碳排放的时间序列数据进行统计回归分析,结果如表7所示。当 $k=0.38$ 时,各变量开始趋于稳定。此时,选取的6个变量均通过了5%假设检验, $R^2$ 为0.860,拟合优度较好,得到模型为

$$\ln C = -0.034 \ln CI + 0.012 \ln SI + 0.124 \ln GI + 0.019 \ln PL + 0.022 \ln GA + 0.04 \ln AE + 9.338 \quad (9)$$

进一步变形可得:

$$C = 9.338 \times CI^{-0.034} \times SI^{0.012} \times GI^{0.124} \times PL^{0.019} \times GA^{0.022} \times AE^{0.040} \quad (10)$$

表7 农业碳排放与各变量的岭回归拟合结果  
Table 7 Ridge regression fitting results of agricultural carbon emissions and variables

项目	系数	标准误差	标准化系数	t统计值	sig.
常数项	9.338	0.044	0.000	212.221	0.000
ln CI	-0.034	0.010	-0.128	-3.272	0.005
ln SI	0.012	0.003	0.106	3.561	0.003
ln GI	0.124	0.024	0.326	5.193	0.000
ln PL	0.019	0.008	0.098	2.374	0.030
ln GA	0.022	0.009	0.120	2.383	0.030
ln AE	0.040	0.019	0.124	2.130	0.049

注: $R^2=0.860$ ;F统计量=16.328;sig.F=0.000。

由公式(10)可以看出,机械能源强度、农业生产效率、经济发展水平、城镇化水平、农地经营规模、农业机械化水平对碳排放的影响指数分别为-0.034, 0.040, 0.021, 0.012, 0.124, 0.019,其现实意义为农业机械能源强度每减少1%,农业碳排放量增加

0.034%,农业生产效率、经济发展水平、城镇化水平、农地经营规模、机械化水平每增加1%,其农业碳排放量相应地增加0.040%,0.021%,0.012%,0.124%,0.019%。其中,农业生产效率、经济发展水平、城镇化水平、农地经营规模、农业机械化水平对农业碳排放的增长起到一定的促进作用,与先前学者的研究基本一致<sup>[12]</sup>。作为传统农耕区,黄河流域经济发展水平的提高为农业机械化提供了必要的物质基础和技术支持,而农业机械化显著提高了农业生产效率,减少了劳动力投入,降低了生产成本,又反过来提高了农业产值,使农业增收的同时也伴随着化石能源消耗的增加,从而带来了更高的能源消耗和碳排放。城镇化水平提高导致农村劳动力流失,农业生产更加依赖机械化和能源投入,而农地经营规模的扩大促进了农业机械化和集约化生产,这进一步增加了碳排放。农业机械能源强度的降低会导致农业碳排放的增加,这可能是回弹效应导致。当一项技术革新之后,往往因效率提高且使用便捷而被推广,从而导致

机器售价降低,农户使用率增加,结果不仅不会减少能耗,反而会增加能耗。由此可见,在推广高效节能农业机械的同时,需要加强对农业机械使用的管理和引导,避免因过度使用而抵消节能效果。

### 3.4 农业碳排放的预测

#### 3.4.1 GM(1,1)预测

根据前文可知,黄河流域农业碳排放整体趋势为先升高再降低,呈现倒U型,在2017年黄河流域农业碳排放达到峰值随后开始下降。为对农业碳排放走向进行更好的预测,避免过早年份的碳排放数据对预测产生干扰,本文以2017年为中位值,前后各取5a,即2012—2021年(共10a)碳排放量数据为基准,运用Matlab软件,采用GM(1,1)灰色预测模型对2022—2035年黄河流域农业碳排放进行预测和说明。通过计算可知,模型的后验差检验为小概率误差 $p=1$ ,方差比 $c=0.138718$ ,预测精度为1级,预测的平均相对误差为 $\varphi=1.02\%$ ,说明预测结果较好且有效,预测方程的 $a, u$ 值见表8,预测结果见表9和表10。

表8 预测方程及 $a, u$ 值

Table 8 Prediction equation and values of  $a$  and  $u$

项目	GM(1,1)模型	预测方程	$a$ 值	$u$ 值
农业碳排放量	$\hat{x}^{(1)}(t+1) = \left[ x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-at} + \frac{u}{a}$	$\hat{x}^{(1)}(t+1) = -17842.421e^{-0.000541882t} + 17852.061$	0.0005	9.6737

表9 2012—2021年黄河流域农业碳排放GM(1,1)模型估计值与预测值

Table 9 Estimation and prediction of agricultural carbon emissions by GM(1,1) model in Yellow River basin from 2012 to 2021

年份	碳排放估计值/ ( $10^4$ t)	预测值/ ( $10^4$ t)	误差 (绝对值)/%
2012	15370.055	15370.065	0.00
2013	15546.840	15770.171	1.44
2014	15613.948	15687.809	0.47
2015	15711.499	15605.921	0.67
2016	15651.042	15524.505	0.81
2017	15836.977	15443.567	2.48
2018	15458.344	15363.074	0.62
2019	14967.188	15283.055	2.11
2020	15035.445	15203.495	1.12
2021	15196.944	15124.392	0.48

#### 3.4.2 预测结果与分析

结合表8中预测值和农业碳排放估算值可得,从2017年起,黄河流域农业碳排放开始下降,符合先前学者对黄河流域部分省份农业碳排放趋势的研

究<sup>[29-31]</sup>。根据《国家人口发展规划(2016—2030年)》,2020年中国城镇化率为63.9%,2030年将大大减缓城镇化进程,城镇化率封顶为70%。根据本文研究所得,当前黄河流域城镇化率为57.09%,低于国家平均水平,可以预见黄河流域城镇化率依然在很长一段时间内低于国家平均水平,而城镇化速度放缓有利于实现农业碳减排,这与前文中STIRPAT模型所得的结果一致。不仅如此,在《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》和《“十四五”推进农业农村现代化规划》中反复提到要全面推进乡村振兴,放缓城镇化速度,农村居民人均可支配收入增长与国内生产总值基本同步增长,缩小城乡居民收入差距,保证 $1.20 \times 10^8$  hm<sup>2</sup>基本农田。这意味着农地经营规模基本维持不变,农业生产效率提高,同时可能会导致农业碳排放的增加。除此之外,根据《“十四五”全国农业机械化发展规划》中规定,2020年农作物机械化率基准值为71%,2025年的目标值为75%,并大力扶持绿色能源发展,农作物机械化率覆盖面的提升,意味着农业机械化水平的提高,但也会导致农业碳排放量的进一

步增加。整体来看,黄河流域在 2017 年之后农业低碳发展取得了一定成效。随着农业减排等政府补贴补贴政策优化,农民受教育水平提高,预计未来农民对农业减排表现更为积极,对化肥、农膜、柴油等农用物资的利用将会更加合理,绿色循环经济的概念进一步深化。例如,采取秸秆还田等方式能够改善农田生态系统功能,有效减少碳排放,从而降低农业领域的整体碳排放量。

表 10 2022—2035 年黄河流域农业碳排放 GM(1,1)模型预测值

Table 10 Prediction of agricultural carbon emissions by GM (1,1) model in Yellow River basin from 2022 to 2035

年份	预测值/(10 <sup>4</sup> t)	年份	预测值/(10 <sup>4</sup> t)
2022	15 045.743	2029	14 507.681
2023	14 967.556	2030	14 432.564
2024	14 889.797	2031	14 357.887
2025	14 812.493	2032	14 283.627
2026	14 735.633	2033	14 209.781
2027	14 659.212	2034	14 136.376
2028	14 583.239	2035	14 063.379

## 4 讨论

本文研究了黄河流域农业碳排放的时空演变特征及其影响因素。从空间分布来看,黄河流域农业碳排放总量仍处于较高水平,尤其是在四川、山东、河南等农业大省,碳排放量显著高于其他地区,这与李梦冉等<sup>[27]</sup>研究结果基本一致。这主要与这些地区种植业与畜牧业并重的农业生产结构以及人口基数大导致较高的农业生产强度有关。因此,未来黄河流域的碳减排工作仍需重点关注这些高排放区域。例如,在农业碳高排放区实施技术优化,生态敏感的低排放区实施低碳补偿等分区治理策略。从时序演变来看,2001—2021 年黄河流域农业碳排放整体呈“倒 U 型”,随着时间的推移先上升后下降,前期环比增速呈现波动上升,在 2012 年之后开始缓慢下降,直至 2017 年出现负增长,这一结果与张军涛等<sup>[28]</sup>研究结果基本一致。农业碳排放下降主要体现在农地利用和畜禽养殖上。2012 年之前,农业碳排放的快速增加主要归因于国内粗放式的农业增长模式。然而,中国自 2014 年开始逐步重视农业低碳发展,随着《畜禽规模养殖污染防治条例》《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》等一系列农业减排政策的实施,农业碳排放增速逐渐放缓,并在 2017 年后出现负增长。这表明,政策干预在农业碳减排中发挥了重要作用。

从影响因素来看,农业生产效率、经济发展水平、城镇化水平、农地经营规模、农业机械化水平是导致黄河流域农业碳排放增加的主要因素,这一结果与先前研究基本一致<sup>[12]</sup>。机械化水平和农地经营规模是推动黄河流域农业碳排放增长的主要因素。农业机械化的普及虽然提高了生产效率,但也增加了化石能源的消耗,从而导致碳排放增加。此外,农地经营规模的扩大促进了集约化生产,进一步加剧了碳排放。经济发展水平和城镇化水平对农业碳排放的影响呈现出双重效应。经济发展为农业现代化提供了物质基础,但也带来了更高的能源需求;城镇化虽然减少了农村劳动力,但也推动了农业机械化的普及,间接增加了碳排放。农业机械能源强度对碳排放具有抑制作用,这表明提高农业机械的能源利用效率是减少碳排放的有效途径。此外,技术进步可能会引发“回弹效应”,即效率提升导致机械使用量增加,从而抵消部分减排效果。因此,在推广高效农业机械的同时,需加强使用管理,避免过度依赖机械化。

从农业碳排放趋势预测结果来看,在未来 2022—2035 年,黄河流域农业碳排放整体可能呈下降趋势,与已有学者对于黄河流域部分省域农业碳排放预测结果基本一致<sup>[29-31]</sup>。这一预测结果与中国“双碳”目标(2030 年碳达峰,2060 年碳中和)以及农业绿色发展战略相契合。然而,碳排放总量的下降并不意味着减排压力的减轻。黄河流域作为中国重要的农业生产区,其农业碳排放在一定时期内仍将保持较高水平,尤其是在粮食主产区和畜牧业发达地区。同时,这是否说明黄河流域农业碳排放已经达到碳达峰仍需探索。

本研究基于年鉴统计数据和模型分析揭示了黄河流域农业碳排放的驱动因素及未来趋势,但仍存在一定提升空间。数据来源主要依赖于统计年鉴和模型估算,可能存在一定误差;此外,模型未考虑气候变化、政策突变等外部因素对碳排放的潜在影响。未来研究可结合实地调查和高精度数据,进一步验证和优化模型结果,同时考虑气候变化、政策突变等外部因素的影响,为农业碳减排提供更全面的科学依据。

## 5 结论

本文研究黄河流域 2001—2021 年农业碳排放,首先对黄河流域农业碳排放进行测算,运用 STIRPAT 拓展模型分析黄河流域农业碳排放驱动因子,结合时间序列分析农业碳排放的省际差异,依

靠GM(1,1)灰色预测模型来对黄河流域农业碳排放的趋势进行预测,对农业碳减排提出相应的对策。

(1)从空间分布来看,黄河流域农业碳排放总量仍处于较高水平,尤其是在四川、山东、河南等农业大省,碳排放量显著高于其他地区。未来黄河流域的碳减排工作仍需重点关注这些高排放区域。从时序特征来看,黄河流域农业碳排放整体呈现“倒U型”趋势,碳排放总量从2001年的 $1.32 \times 10^8$  t增长到2021年的 $1.52 \times 10^8$  t,年均增长率为0.73%。其中,农作物的碳排放年均增速为0.64%,秸秆焚烧年均增速为2.68%,农地利用年均增速为0.01%,畜禽养殖碳排放量则呈现负增长,其年均增速为-0.34%。环比增速呈“波动上升—平稳上升—波动下降”变化趋势,2001—2012年碳排放量逐年上升,2012年后增速放缓,并于2017年达到峰值后开始下降。自2014年国家出台一系列农业减排政策后,农业碳排放的增长速度明显放缓。

(2)黄河流域农业碳排放的驱动因素中,机械化水平、农地经营规模、农业生产效率、经济发展水平、城镇化水平导致农业碳排放量增加,而农业机械能源强度对农业碳排放产生了抑制作用。综合来看,社会因素相比经济因素对农业碳排放增加的贡献程度更大;而经济因素贡献度又大于技术层面。各变量农业碳排放增加的贡献大小为:机械化水平>农地经营规模>城镇化水平>经济发展水平>农业生产效率;农业机械能源强度增加对农业碳排放有一定的抑制作用,因此在推广高效农业机械的同时,需加强使用管理,避免过度依赖机械化。

(3)基于GM(1,1)模型的预测结果,2022—2035年黄河流域农业碳排放将呈现缓慢下降趋势,但仍保持较高水平。这一趋势与中国“双碳”目标及农业绿色发展战略相契合,但减排压力依然存在,尤其是在四川、山东、河南等人口基数较大的粮食主产区。

为更好地实现碳减排,未来可以从以下几个方面做工作。①优化农业机械能源结构:推广以新能源为主的农业机械使用,减少化石能源的使用。②提高农业生产效率:通过科技创新和精细化管理,降低单位产出的碳排放强度。③推动农业废弃物资源化利用:例如,推广秸秆还田、畜禽粪便资源化利用等技术,减少废弃物焚烧和堆放带来的碳排放。④加强政策引导与农民教育:通过政策激励(如碳补贴、绿色金融)和宣传教育,提高农民的环保意识,促进低碳农业技术的普及。

黄河流域各省区的农业碳排放存在显著差异,

四川、山东、河南等地的碳排放量远高于其他地区。因此,碳减排政策应因地制宜,对于高排放区域,重点推广高效节能农业机械,优化种植结构和养殖模式,减少化肥、农药等农用物资的过度使用;对于低排放区域,鼓励发展生态农业和有机农业,进一步提升碳汇能力,同时避免因盲目追求经济增长而增加碳排放。

## 参考文献(References)

- [1] 徐维祥,周建平,刘程军.数字经济发展对城市碳排放影响的空间效应[J].地理研究,2022,41(1):111-129.  
Xu Weixiang, Zhou Jianping, Liu Chengjun. The impact of digital economy on urban carbon emissions: Based on the analysis of spatial effects [J]. Geographical Research, 2022, 41(1): 111-129.
- [2] 师博,何璐,张文明.黄河流域城市经济高质量发展的动态演进及趋势预测[J].经济问题,2021(1):1-8.  
Shi Bo, He Lu, Zhang Wenming. Dynamic evolution and trend prediction of high-quality urban economic development in the Yellow River basin [J]. On Economic Problems, 2021(1): 1-8.
- [3] 郭晗,任保平.黄河流域高质量发展的空间治理:机理阐释与现实策略[J].改革,2020(4):74-85.  
Guo Han, Ren Baoping. Spatial governance of high-quality development in the Yellow River basin: Mechanism interpretation and practical strategies [J]. Reform, 2020(4): 74-85.
- [4] Ren Hourui, Liu Bin, Zhang Zirui, et al. A water-energy-food-carbon nexus optimization model for sustainable agricultural development in the Yellow River basin under uncertainty [J]. Applied Energy, 2022, 326: 120008.
- [5] 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.
- [6] 闵继胜,胡浩.中国农业生产温室气体排放量的测算[J].中国人口·资源与环境,2012,22(7):21-27.  
Min Jisheng, Hu Hao. Calculation of greenhouse gases emission from agricultural production in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(7): 21-27.
- [7] 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 agri-

- cultural carbon emissions: Basic status, dynamic evolution and spatial spillover effects [J]. *Chinese Rural Economy*, 2022(3):104-127.
- [8] 卢奕亨,田云,周丽丽.四川省农业碳排放时空演变特征及其影响因素研究[J].*中国农业资源与区划*,2023,44(11):1-14.  
Lu Yiheng, Tian Yun, Zhou Lili. Spatial-temporal evolution and influencing factors of agricultural carbon emissions in Sichuan Province [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(11): 1-14.
- [9] 李姗姗,费翔,董洪光,等.基于LMDI和LEAP模型的山西省碳排放影响因素及预测分析[J].*中国环境科学*,2025,45(7):4052-4063.  
Li Shanshan, Fei Xiang, Dong Hongguang, et al. Analysis of carbon emission influencing factors and forecast in Shanxi Province based on LMDI and LEAP model [J]. *China Environmental Science*, 2025, 45(7):4052-4063.
- [10] 朱嘉晴,秦会艳,张梦春.基于时变参数C-D生产函数的江西省农业碳排放驱动因素及脱钩效应[J].*应用生态学报*,2023,34(11):3085-3094.  
Zhu Jiaqing, Qin Huiyan, Zhang Mengchun. Driving factors and decoupling effects of agricultural carbon emissions in Jiangxi Province based on timevarying parameter C-D production function [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(11):3085-3094.
- [11] 周一凡,李彬,张润清.县域尺度下河北省农业碳排放时空演变与影响因素研究[J].*中国生态农业学报(中英文)*,2022,30(4):570-581.  
Zhou Yifan, Li Bin, Zhang Runqing. Spatiotemporal evolution and influencing factors of agricultural carbon emissions in Hebei Province at the county scale [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(4):570-581.
- [12] 庞丽.我国农业碳排放的区域差异与影响因素分析[J].*干旱区资源与环境*,2014,28(12):1-7.  
Pang Li. Empirical study of regional carbon emissions of agriculture in China [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(12):1-7.
- [13] 李宽,张弘,史磊.农业科技进步对农业碳排放空间溢出效应的实证检验[J].*统计与决策*,2023,39(21):52-57.  
Li Kuan, Zhang Hong, Shi Lei. Empirical test of spatial spillover effect of agricultural scientific and technological progress on agricultural carbon emissions [J]. *Statistics & Decision*, 2023, 39(21):52-57.
- [14] 何艳秋,王鸿春,刘云强.产业集聚视角下农业碳排放的空间效应[J].*资源科学*,2022,44(12):2428-2439.  
He Yanqiu, Wang Hongchun, Liu Yunqiang. Spatial effects of agricultural carbon emissions from the perspective of industrial agglomeration [J]. *Resources Science*, 2022, 44(12):2428-2439.
- [15] 赵琪琛,余敦,王检萍.九江市农地利用碳排放时空演变、影响因素及趋势预测[J].*水土保持研究*,2023,30(6):441-451.  
Zhao Qichen, Yu Dun, Wang Jianping. Spatial and temporal evolution, influencing factors and trend prediction of carbon emissions from agricultural land use in Jiujiang City [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(6):441-451.
- [16] 高标,房骄,卢晓玲,等.区域农业碳排放与经济增长演进关系及其减排潜力研究[J].*干旱区资源与环境*,2017,31(1):13-18.  
Gao Biao, Fang Jiao, Lu Xiaoling, et al. Evolution relationship between agricultural carbon emissions and economic growth and its reduction potential [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(1): 13-18.
- [17] 覃朝晖,潘昱辰,丁志国.长江经济带农业碳排放多情景预测与减排路径模拟[J].*长江流域资源与环境*,2025,34(7):1607-1620.  
Qin Zhaohui, Pan Yuchen, Ding Zhiguo. Multi-scenario prediction and emission reduction path simulation of agricultural carbon emissions in the Yangtze River economic belt [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2025, 34(7):1607-1620.
- [18] 吴贤荣,张俊飏,田云,等.基于公平与效率双重视角的中国农业碳减排潜力分析[J].*自然资源学报*,2015,30(7):1172-1182.  
Wu Xianrong, Zhang Junbiao, Tian Yun, et al. Analysis on China's agricultural carbon abatement capacity from the perspective of both equity and efficiency [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(7):1172-1182.
- [19] 金书秦,林煜,牛坤玉.以低碳带动农业绿色转型:中国农业碳排放特征及其减排路径[J].*改革*,2021(5):29-37.  
Jin Shuqin, Lin Yu, Niu Kunyu. Driving green transformation of agriculture with low carbon: Characteristics of agricultural carbon emissions and its emission reduction path in China [J]. *Reform*, 2021(5):29-37.
- [20] 田云,陈池波.市场与政府结合视角下的中国农业碳减排补偿机制研究[J].*农业经济问题*,2021,42(5):120-136.  
Tian Yun, Chen Chibo. Research on the compensation mechanism of agricultural carbon emission reduction in China from the perspective of combination of market and government [J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2021, 42(5):120-136.
- [21] 赵敏娟,石锐,姚柳杨.中国农业碳中和目标分析与实现路径[J].*农业经济问题*,2022,43(9):24-34.  
Zhao Minjuan, Shi Rui, Yao Liuyang. Analysis on the

- goals and paths of carbon neutral agriculture in China [J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2022, 43(9): 24-34.
- [22] 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[J].*环境科学研究*,2016,29(8): 1109-1118.  
Peng Liqun, Zhang Qiang, He Kebin. Emissions inventory of atmospheric pollutants from open burning of crop residues in China based on a national questionnaire [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(8): 1109-1118.
- [23] Ehrlich P R, Holdren J P. Impact of population growth [J]. *Science*, 1971,171(3977):1212-1217.
- [24] York R, Rosa E A, Dietz T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts [J]. *Ecological Economics*, 2003,46(3):351-365.
- [25] Dietz T, Rosa E A. Rethinking the environmental impacts of population, affluence and technology [J]. *Human Ecology Review*, 1994,1(2):277-300.
- [26] 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.
- [27] 李梦冉,徐小任,王梁,等.黄河流域农业碳排放时空变化特征及影响因素分析[J].*干旱区地理*,2025,48(5): 854-865.  
Li Mengran, Xu Xiaoren, Wang Liang, et al. Spatial-temporal characteristics and influencing factors of agricultural carbon emissions in the Yellow River basin [J]. *Arid Land Geography*, 2025,48(5):854-865.
- [28] 张军涛,韩祁祺.黄河流域农业碳排放时空演变特征及影响因素研究[J].*环境科学研究*,2025,38(4): 754-766.  
Zhang Juntao, Han Qiqi. Spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors of agricultural carbon emissions in the Yellow River basin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2025,38(4):754-766.
- [29] 王树芬,高冠龙,李伟,等.2000—2020年山西省农业碳排放时空特征及趋势预测[J].*农业环境科学学报*, 2023,42(8):1882-1892.  
Wang Shufen, Gao Guanlong, Li Wei, et al. Carbon emissions from agricultural and animal husbandry in Shanxi Province: Temporal and regional aspects, and trend forecast [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023,42(8):1882-1892.
- [30] 常青,蔡为民,谷秀兰,等.河南省农业碳排放时空分异、影响因素及趋势预测[J].*水土保持通报*,2023,43(1):367-377.  
Chang Qing, Cai Weimin, Gu Xiulan, et al. Spatial-temporal variation, influencing factors, and trend prediction of agricultural carbon emissions in Henan Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(1):367-377.
- [31] 陈睿涛,李薇,燕振刚.甘肃省农业碳排放区域差异、时空特征及趋势预测[J].*草业科学*,2023,40(1): 287-302.  
Chen Ruitao, Li Wei, Yan Zhengang. Regional differences in the spatial and temporal characteristics and trend prediction of agricultural carbon emissions in Gansu Province [J]. *Pratacultural Science*, 2023, 40(1):287-302.