葛晓华,朱宇恩,张铭昊,等.山西省农业领域碳排放影响因素及碳达峰预测研究[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(2):128-140.
Ge X H, Zhu Y E, Zhang M H,et al.Study on influencing factors and carbon peak prediction of agricultural carbon emissions in Shanxi Province[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(2):128-140.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202410009

山西省农业领域碳排放影响因素及碳达峰预测研究

葛晓华[1],朱宇恩[2],张铭昊[3],李华[2*],马建超[4],张淑玲[1],张西珠[1]

(1.太原工业学院 环境与安全工程系,山西 太原 030008;2.山西大学 环境与资源学院,山西 太原 030031;
3.太原工业学院 电子工程系,山西 太原 030008;4.太原理工大学 矿业工程学院,山西 太原0300024)

摘　要:[目的]农业是重要的温室气体排放源之一,本文探究山西省农业领域温室气体排放特征、预测碳达峰时间和峰值,并综合分析碳减排潜力,提出碳减排策略。[方法]首先按照《2006年IPCC国家温室气体清单指南》和《省级温室气体清单编制指南》核算山西省2005-2022年农业领域温室气体排放量,运用对数平均迪氏指数法(LMDI模型)对山西省农业领域碳排放进行影响因素分解,选择农业生产效率、农业经济水平、农业人口、农业化肥施用量和肉类总产量5个指标,构建基准、经济发展、低碳和低速4种碳排放情景,并采用STIRPA模型对2023-2040年农业领域温室气体排放量进行预测。[结果]山西省2005-2022年农业领域碳排放总体呈波动变化趋势,其中2020-2022年碳排放增长较快,2022年碳排放达到1 087.49万吨当量;碳生产效率效应是主要的碳减排影响因素,与2005年相比,累计减少碳排放1 450.40万吨当量,减排贡献率达到1 037.75%;农业经济水平效应是主要的促增效应,与2005年相比,累计增加碳排放1 728.59万吨当量,减排贡献率为-1 236.80%。低碳发展情景是各指标最优的达峰情景,达峰时间在2030年左右,达峰碳排放量为1 261.73万吨当量。[结论]山西农业领域未来碳排放仍有较大不确定性,低碳发展是实现碳减排的最优路径,建议在优先发展低碳技术、优化化肥施用结构、提升农民低碳意识等方面制定相关政策措施,推进山西农业低碳绿色稳定发展。

关键词:农业; 碳达峰; LMDI模型; STIRPAT模型
中图分类号:S-01;X24;X321;　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)02-0128-13

Study on influencing factors and carbon peak prediction of agricultural carbon emissions in Shanxi Province

Ge Xiaohua[1], Zhu Yuen[2], Zhang Minghao[3], Li Hua[2*], Ma Jianchao[4], Zhang Shuling[1], Zhang Xizhu[1]

(*1.Department of Environmental and Safety Engineering, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China; 2.School of Environmental & Resource Sciences, Shanxi University, Taiyuan 030031, China; 3.Department of Electronic Engineering, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China; 4.College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China*)

Abstract:[Objective]Agriculture is a significant source of greenhouse gas emissions. This study aimed to understand the characteristics of agricultural greenhouse gas emissions in Shanxi Province, predict the carbon emission peak time and peak value, and comprehensively analyze carbon emission reduction potential, and propose carbon reduction strategies.[Methods]Based on *the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* and *the Provincial Greenhouse Gas Inventory Compilation Guidelines*, the agricultural greenhouse gas emissions in Shanxi Province from 2005 to 2022 were calculated. The logarithmic

收稿日期:2024-10-08　　**修回日期**:2024-12-17
基金项目:山西省回国留学人员科研资助项目(2023-173);山西省留学人员科研资助项目(20230041);山西省基础研究计划资助项目(202303021221057;202103021224016)
作者简介:葛晓华(ORCID:0000-0001-7400-2154),副教授,研究方向:碳排放核算与减排路径
*通信作者:李华(ORCID:0000-0002-5711-1612),教授,博士生导师,E-mail:lihua@sxu.edn.cn

mean Divisia index (LMDI) model was employed to decompose the influencing factors of agricultural carbon emissions in Shanxi Province. Five indicators were selected: agricultural production efficiency, agricultural economic level, agricultural population, agricultural fertilizer application amount, and total meat production. Four carbon emission scenarios: baseline, economic development, low carbon, and low speed, were constructed, and the STIRPA model was used to forecast the agricultural greenhouse gas emissions from 2023 to 2040. [Results]From 2005 to 2022, agricultural carbon emissions in Shanxi Province showed a fluctuating trend, with rapid growth from 2020 to 2022, reaching 10 874 900 tons of CO_2 equivalent in 2022. Carbon production efficiency was the primary factor in carbon emission reduction, cumulatively reducing emissions by 14 504 million tons of CO_2 equivalent compared to 2005, with a reduction contribution rate of 1 037.75%. The agricultural economic level was the main driving factor for emission increases, cumulatively increasing emissions by 172 859 million tons of CO_2 equivalent compared to 2005, with a contribution rate of -1 236.80%. The low carbon development scenario was the optimal peaking scenario, with the carbon peak expected around 2030 and a peak carbon emission of 12 617 300 tons of CO_2 equivalent. [Conclusion]Future agricultural carbon emissions in Shanxi Province remain highly uncertain. Low-carbon development is the optimal path for achieving carbon emission reduction. It is recommended to formulate relevant policies and measures, such as prioritizing low-carbon technologies, optimizing fertilizer application structures, and enhancing farmers' low-carbon awareness, to promote low-carbon, green, and stable agricultural development in Shanxi Province.

Keywords: Agriculture, Carbon peaks, LMDI model, STIRPAT model

气候变暖已经成为全球主要的环境问题之一[1-3]。为积极应对气候变化,中国提出了"碳达峰、碳中和"目标[4-6]。农业领域是温室气体主要的排放源之一[7],约占全球温室气体排放量的13.5%[8]。山西省是中国特色农业大省[9],随着农业现代化进程的不断加快,导致大量的温室气体排放,进而引发了绿色低碳农业与经济增长之间的矛盾[10]。因此,推动农业领域碳达峰是山西省开展碳减排工作的重要举措。

目前,农业碳排放受到各领域学者的高度关注,研究主要集中在碳排放测算、碳排放影响因素和碳排放预测等方面,研究尺度涉及全国、省域、市域、县域等。黄和平等[11]核算了江西省种植业和畜禽养殖业2个领域碳排放(IPCC核算模型),进行农业碳排放影响因素分析(LMDI模型),预测了江西省农业碳排放(XGBoost模型)。邓维忠等[12]核算了湖南省种植业和畜禽养殖业碳排放(IPCC法),分析了主要影响因素(LMDI模型),采用灰色预测模型(GM(1,1))预测了碳排放。白义鑫等[13]采用碳排放系数法核算了贵阳市农业碳排放量,分析区域农业碳排放量与农业GDP的脱钩关系(Tapio脱钩模型),预测了碳排放量(GM(1.1)模型)。张毅瑜[14]采用碳排放系数法核算了福建省种植业碳排放,采用向量自回归模型与脉冲响应函数考察了种植业碳排放与产出之间的长期关系和动态关系。Qi等[15]提出了一种结合主成分分析(PCA)、网格搜索(GS)和k近邻(KNN)的预测农业碳排放的预测方法。赵宇等[16]采用农业碳排放估算法核算了江苏省种植业碳排放,运用多元回归模型分解碳排放的影响因素,利用灰色预测模型预测了碳排放。通过对农业领域碳排放文献梳理,发现目前针对农业领域碳排放相关研究已取得丰硕的成果,但由于农业生产的多样性导致农业碳排放源亦具有复杂性[17],不同学者在确定研究范围、核算方法等方面差异较大,导致最终研究结果差异较大。核算范围既有种植业、畜牧业,也有两者同时核算,且核算范围亦不相同。

山西省是重要的粮食生产基地之一,合理估算其农业碳排放对制定有效的农业碳减排政策具有重要意义。目前针对山西农业领域碳排放研究相对较少,主要集中在农业领域碳排放核算、影响因素分析和碳排放预测等方面。张建杰等[10]采用生命周期评价方法(LCA)核算了山西省农牧业温室气体排放并分析了影响因素;王树芬等[18]核算了山西省种植业和畜牧业碳排放,并对未来碳排放进行了预测;由于二者核算范围和核算方法的不同,导致碳排放量、碳排放趋势等研究结论有较大差异。从农业碳达峰研究来看,目前关于山西农业领域碳达峰的研究相对较少。因此,为使研究成果更加符合政府政策制定需求,本研究采用了各级政府使用的《省级温室气体清单编制指南(试行)》(以下简称《指南(试行)》)中的核算方法,核算了山西省农业领域碳排,运用LMDI分解法分析其影响因素,并采用STIRPAT模型预测不同

情景下山西农业领域碳排放,旨在为山西省农业领域绿色低碳发展政策制定提供理论依据。

1 方法和数据

1.1 方法

1.1.1 农业碳排放测算方法

本文主要采用《指南(试行)》的农业温室气体清单编制方法计算山西省农业碳排放,核算范围包括稻田甲烷排放、农用地氧化亚氮排放、动物肠道发酵甲烷排放、动物粪便管理甲烷和氧化亚氮排放4部分。

(1)稻田甲烷排放

根据《指南(试行)》核算方法,稻田甲烷排放量由不同类型稻田面积乘以相应稻田甲烷排放因子,公式如下:

$$E_{CH_i}=EF_i\times AD_i \tag{1}$$

式中,E_{CH_i}为稻田甲烷排放总量(t);EF_i为稻田类甲烷排放因子(kg/hm^2);AD_i为对应于该排放因子的水稻播种面积(10^3 hm^2);下标i表示稻田类型,分别指单季水稻、双季早稻和晚稻。山西省属于华北地区,稻田类型只有单季稻,排放因子采用《指南(试行)》推荐值234.0 kg/hm^2。

(2)农用地氧化亚氮排放

农用地氧化亚氮排放等于各排放过程的氮输入量乘以其相应的氧化亚氮排放因子:

$$E_{N_2O}=\sum(N_{input}\times EF) \tag{2}$$

式中,E_{N_2O}为农用地氧化亚氮排放总量(包括直接排放、间接排放);N_{input}为各排放过程氮输入量;EF为对应的氧化亚氮排放因子(kgN_2O-N/(kgN_{input}))。其中,复合肥氮利用折纯率按省农业专家推荐值42.5%计算,其它的排放因子来源于《指南(试行)》和《IPCC》推荐值,具体见表1、表2。

表1 粪肥氮排放因子

Table 1 Nitrogen emission factor of manure

类型 Types	奶牛 Dairy cattle	非奶牛 Non-cow	绵羊 Sheep	山羊 Goat	猪 Pig	家禽 Poultry	马 Horse	驴 Donkey	骡 Mule	乡村人口 Rural population
年排泄系数/(kgN/(pcs•a)) Annual excretion factor	60	40	12	12	16	0.6	40	40	40	5.4
年粪便管理氧化亚氮排放因子/(kgN_2O/(pcs•a)) Fecal management N_2O emission factor	1.846	0.794	0.093	0.093	0.227	0.007	0.33	0.188	0.188	
淋溶径流损失率/% Leaching runoff loss rate	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
挥发损失率/% Volatility loss rate	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

(3)动物肠道发酵甲烷排放

各种动物肠道发酵甲烷排放等于动物的存栏数量乘以适当的排放因子,然后将各种动物的排放量求和得到总排放量。某子群动物的肠道发酵甲烷排放量,估算如式3所示,畜禽总排放量用式4计算:

$$E_{CH_4enteric,i}=EF_{CH_4enteric,i}\times AP_i\times 10^{-7} \tag{3}$$

式中$E_{CH_4,enteric,i}$为第i种动物甲烷排放量,10^4 t/a;$EF_{CH_4,enteric,i}$为第i种动物的甲烷排放因子,kg/(pcs·a);AP_i为第i种动物的数量,pcs。根据山西畜牧业特点和《指南(试行)》规定,本文核算的活动水平范围包括牛、羊的规模化饲养、农户饲养和放牧饲养存栏量以及猪、马、驴、骡存栏量。排放因子采用《指南(试行)》推荐值,具体见表3。

$$E_{CH_i}=\sum EF_{CH_4,enteric,i} \tag{4}$$

式中,E_{CH_i}为动物肠道发酵甲烷总排放量,10^4 t/a;$E_{CH_4,enteric,i}$为第i种动物甲烷排放量,10^4 t/a。

(4)动物粪便管理甲烷和氧化亚氮排放

动物粪便管理甲烷排放量是由不同动物粪便管理方式下的动物数量乘以相应的甲烷排放因子,然后汇总得到总排放量。某一动物粪便管理甲烷排放量计算公式如下:

表2　秸秆还田氮排放因子

Table 2　Nitrogen emission factor of straw returning to field

类型 Types	水稻 Rice	小麦 Wheat	玉米 Corn	高粱 Sorghum	谷子 Millet	大豆 Soybean	棉花 Cotton	甜菜 Beet	麻类 Bast fibre	薯类 Potato	蔬菜类 Vegetable	烟叶 Tobacco
籽粒含氮量/% Nitrogen content of grain	0.855	0.87	0.86	0.87	0.83	0.86	0.83	0.4	0.83	0.45	0.15	0.83
秸秆或根的含氮量/% Nitrogen content of straw or roots	0.01	0.014	0.017	0.017	0.007	0.06	0.005 48	0.004	0.013 1	0.004	0.008	0.041
经济系数 Economic coefficient	0.007 53	0.005 16	0.005 8	0.0073	0.008 5	0.018 1	0.005 48	0.005 07	0.013 1	0.011	0.008	0.014 4
根冠比/% Root shoot ratio	0.489	0.434	0.438	0.393	0.385	0.425	0.383	0.667	0.83	0.667	0.83	0.83
秸秆还田率/% Straw return rate		71.56	40.99									
地上秸秆还田氮量/tN Nitrogen amount of straw returning to field		10 856.02	24 608.37									

$$E_{CH_4,manure,i}=EF_{CH_4,manure,i}\times AP_i\times10^{-7} \quad (5)$$

式中,$E_{CH_4,manure,i}$为第i种动物粪便管理甲烷排放量,10^4 t/a;$EF_{CH_4,manure,i}$为第i种动物粪便管理甲烷排放因子,kg/(pcs·a);AP_i为第i种动物的数量,pcs。

动物粪便管理N_2O排放与甲烷类似,某一动物粪便管理的氧化亚氮排放量计算公式如下:

$$E_{N_2O,manure,i}=EF_{N_2O,manure,i}\times AP_i\times10^{-7} \quad (6)$$

式中,$E_{N_2O,manure,i}$为第i种动物粪便管理氧化亚氮排放量,10^4 t/a;$EF_{N_2O,manure,i}$为特定种群粪便管理氧化亚氮排放因子,kg/(pcs·a);AP_i为第i种动物的数量,pcs。动物粪便管理甲烷排放因子采用《指南(试行)》推荐值,其中兔子的排放因子是采用的IPCC推荐值,具体见表4。

1.1.2　农业碳排放影响因素分析方法

农用化肥的投入、动物养殖数量以及作物的种植面积等都与宏观政策和经济发展密切相关。本文拟从宏观指标入手构建碳排放影响因素分析模型,进而研究包括社会经济、技术因素在内的宏观驱动因素对山西农业领域碳排放的影响。Kaya恒等式和LMDI分解方法是目前碳排放影响因素的主流分析方法,在农业碳排放影响因素分析中得到广泛应用[8,11-12,19]。本研究参照彭宸等[19]在拓展kaya恒等式基础上,使用LMDI因素分解的加法分解模型,对山西省农业领域碳排放进行分解分析。具体分解公式如下:

$$C=C/GDP_a\times GDP_a/GDP_A\times GDP_A/P_t$$

$$=BI\times AI\times SI\times P_t \quad (7)$$

式中:C表示山西省农业领域碳排放总量;GDP_a表示山西农牧业生产总值;GDP_A表示山西省农林牧渔生产总值;P_r表示山西农业人口数量。BI为碳排放与农牧业生产总值之比,表示山西农业生产效率,即技术效应;AI为农牧业生产总值与农林牧渔业生产总值之比,表示山西农业生产结构;SI为农林牧渔业生产总值与农业人口之比,表示地区农业经济水平。

本文重点研究农业生产效率、农业生产结构、地区农业经济水平和农村人口数量对碳排放的影响。

1.1.3　农业碳排放预测方法

本文采用STIRPAT模型预测山西农业领域

表3 动物肠道发酵CH_4排放因子

Table 3 CH_4 emission factor in animal intestinal fermentation **kg/(pcs·a)**

类型 Types	奶牛 Dairy cattle	非奶牛 Non-cow	绵羊 Sheep	山羊 Goat	猪 Pig	马 Horse	驴/骡 Donkey/mule
排放因子 Emission factor	88.7	60.4	8.45	9.15	1	18	10

表4 动物粪便管理CH_4和N_2O排放因子

Table 4 CH_4 and N_2O emission factors of animal manure management **kg/(pcs·a)**

类型 Types	奶牛 Dairy cattle	非奶牛 Non-cow	绵羊 Sheep	山羊 Goat	猪 Pig	家禽 Poultry	马 Horse	驴 Donkey	骡 Mule	兔子 Rabbit
CH_4	7.46	2.82	0.15	0.17	3.12	0.01	1.09	0.6	0.6	0.08
N_2O	1.846	0.794	0.093	0.093	0.227	0.007	0.33	0.188	0.188	

碳排放,STIRPAT模型可以根据影响因素的不同而进行修订,具有灵活性、易于操作等优点,是目前主流的预测碳排放的模型之一,具体公式为:

$$I=aP^bA^cT^de \tag{8}$$

式中,I表示环境因素,P、A、T分别表示社会、经济和技术因素,a、b、c、d分别表示对应模型的变量系数,e为误差项。

本文在基本模型基础上,结合山西农业特色、数据可获得性和影响因素分析情况,对公式8进行扩展,具体如下:

$$\mathrm{Ln}I=\ln a+b\times\ln BI+c\times\ln SI+d\times\ln P_r$$
$$+f\ln H+g\ln L+\ln e \tag{9}$$

式中,a表示模型系数;b、c、d、f和g分别表示各影响因素的回归系数;BI表示农业生产效率,体现了低碳减排的技术效应;SI表示农业经济水平,体现了农业经济效应;P_r表示农业人口;H表述农用化肥施用量;L表示肉类产量。

1.2 数据来源

本文所涉及数据主要有清单核算的活动水平数据、碳排放影响分析所需数据和碳排放预测所需数据。

清单核算活动水平数据主要有稻田种植类型和种植面积、农用地化肥施用量、牛羊马等牲畜和家禽年度出栏量、小麦、玉米等粮食蔬菜产量等数据,以上数据全部来源于《2006-2023年山西省统计年鉴》。

碳排放影响分析所需数据包括碳排放、农林牧渔业产值、农牧业产值、地区生产总值、农业人口、总人口等,其中碳排放为本文核算数据,其它数据来源于《2006-2023年山西省统计年鉴》。

碳排放预测数据主要有农业人口、农村人口可支配收入、农林牧渔业产值、农业机械总动力等数据,其中现状数据来源于《2006-2023年山西省统计年鉴》,情景分析数据来源于《2006-2023年山西省统计年鉴》《山西省"十四五"推进农业农村现代化发展规划》。

2 结果与分析

2.1 农业碳排放结果与特征分析

山西省2005-2022年农业领域碳排放如图1所示,2022年山西省农业领域碳排放为1 087.49万吨当量,较2005年下降11.3%。2005-2022年碳排放总体呈波动变化趋势,大致可分为3个阶段:第1阶段为2005-2006,该阶段碳排放总体较高,分别达到1 227.25万吨当量和1 184.12万吨当量,是2005年以来碳排放量最高的2个年份。第2阶段为2007-2019年,该阶段碳排放总体偏低,变化相对平缓,总体上呈"倒Z型"的先下降再上升再下降趋势,年度变化率在-5%~-3%波动,其中2007年碳排放较2006年断崖式下降,排放量降到816.90万吨当量,年度下降率达到30.17%;随后2008年和2009年持续小幅下降,然后又缓慢增长,到2015年达到最高排放量为916万吨当量;随后又缓慢下降,到2019年降到

近年来最低为857.35万吨当量。第3阶段为2020-2022年,该阶段碳排放快速上升,2021年碳排放为1 051.66万吨当量,较上年增长11.96%,碳排放又一次恢复到千万吨级,2022年碳排放持续增长。

山西省农业碳排放源包括稻田甲烷排放,农用地氧化亚氮排放、动物肠道发酵甲烷排放和动物粪便管理的甲烷和氧化亚氮排放。其中,稻田甲烷排放主要是由于稻田中龟裂氧化层以下的泥土缺氧,微生物分解有机质时生成甲烷,山西境内稻田数量较少,稻田甲烷排放相对较少,2022年排放量为1.06万吨当量,约占农业领域排放总量的0.10%,2005-2022年排放量变化平稳,2005年排放量最高为1.32万吨当量,2015年和2016年排放量最低为0.34万吨当量。农用地氧化亚氮排放主要是来源于化肥氮、粪肥氮和秸秆还田氮等,是山西农业领域主要的碳排放源之一,2022年排放量为386.15万吨当量,约占排放总量的35.51%,2005-2022年期间变化趋势总体呈平缓下降趋势,2005年排放量最高为413.27万吨当量,2019年排放量最低为354.73万吨当量。动物肠道发酵甲烷、动物粪便管理甲烷和氧化亚氮排放是农业领域主要排放源,2022年排放量分别为444.48万吨当量和255.79万吨当量,分别占排放总量的40.87%和23.52%,年度变化趋势与农业领域总体碳排放变化趋势一致。

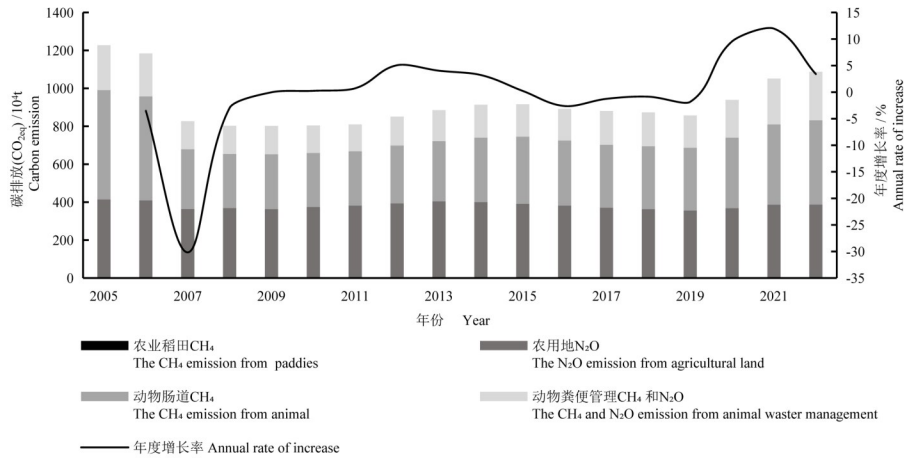

图1　2005-2022年山西省农业领域碳排放量和年度增长率

Fig.1　Carbon emissions and annual increase rate of agricultural sector in Shanxi Province from 2005 to 2022

2.2　农业碳排放影响因素分析

本文通过Kaya恒等式和LMDI因素分解模型,对山西省2005-2022年农业领域碳排放数据进行分解,分别得到了生产效率、农业产业结构、农业经济水平、农村人口4项影响因素的效应值。总体上,与2005年相比,2006-2022年4个因素共产生-139.76万吨当量碳排放量。其中,农业经济水平效应是主要增排因素,共增加碳排放1 738.59万吨当量。而农业生产效率效应、农业产业结构效应、农业人口效应是3个主要减排因素,共减少碳排放1 868.35万吨当量。各影响因素年度减排效应和累计减排效应分别见表5和图2。

具体来看,农业生产效率效应是最大的碳减排影响因素。与2005年相比,累计减少碳排放1 450.40万吨当量,减排贡献率达到1 037.75%。由累计贡献效应可知,2006-2022年总体呈下降趋势,其中2005-2011年下降趋势快,碳减排贡献效应显著,2012年后下降趋势逐渐减缓并趋于平稳。由此说明,山西省农业生产效率逐步提升,农业生产投入的人力、物力、技术等一方面提升了农作物产值,另一方面也有效降低了碳排放,因此提升农业生产效率是减少山西农业领域碳排放的主要途径之一。

农业产业结构效应与其它减排因素相比贡献偏小,不同年份的减排效应在0上下波动,但总体呈减排效应,与2005年相比,累计减少碳排放26.54万吨当量,减排贡献率为18.99%,农牧业在农业生产中的结构变化对山西农业领域碳排放影响较小。这主要由于山西农业发展以农牧业为主,2022年农牧业产值占到农林牧渔业产值比重

高达86%以上,而结合山西农业资源特色,适度的将农牧业规模转移到林业、渔业等其它农业领域,不仅可以优化农业产业结构,亦可降低碳排放。

农业经济水平效应是农业领域碳排放增加的主要影响因素,与2005年相比,累计增加碳排放1 728.59万吨当量,减排贡献率为-1 236.80%。农业经济水平越高,增速越快,对碳排放的贡献就越大,2006-2014年增排效应显著,2015-2018年增排效应逐渐放缓,2019年后增排效应又逐渐提升。农业经济水平的高低与农业政策密切相关,2006-2017年期间国家对农业农村政策遵循"少取、多予、放活"原则,加大农村基础设施和公共设施投入,开展农村综合改革试点,在此背景下山西省也制定了具体的惠农政策,农业基础设施、科技水平和机械化水平均得到大幅提升,特别是在政策前期,政策红利显著,农村经济水平快速提升,导致2006-2014年期间碳增排效应显著,而政策后期政策红利效应逐渐减弱,因此在2015-2018年期间碳增排效应也逐渐放缓。2018年后国家提出乡村振兴战略,要求坚持农业农业优先发展,在一系列惠农政策下,农业经济水平快速提升,碳增排效应亦逐渐显著[20]。

表5 山西省农业领域碳排放影响因素分析结果

Table 5 Analysis results of influencing factors of carbon emission in agricultural sector in Shanxi Province **10^4 tCO_{2eq}**

年份 Year	农业生产效率效应 Production effect	农业产业结构效应 Agricultural industrial structure effect	农业经济水平 Agricultural economic level	农村人口效应 Rural population effect	总效应 Total effect
2006	−108.68	−3.69	81.24	−12.00	−43.13
2007	−517.02	23.18	149.30	−12.67	−357.22
2008	−200.40	−10.84	198.22	−11.57	−24.59
2009	−138.22	−9.92	156.90	−8.96	−0.20
2010	−98.31	−7.32	105.29	2.34	2.00
2011	−105.18	2.02	139.21	−30.20	5.85
2012	−29.31	0.20	99.16	−29.00	41.05
2013	−32.83	−2.64	101.34	−31.52	34.35
2014	−11.13	−4.22	73.06	−29.18	28.53
2015	14.54	−2.44	24.57	−34.56	2.11
2016	−24.27	−2.84	33.34	−30.20	−23.97
2017	2.67	−6.93	21.87	−28.83	−11.21
2018	−32.84	−0.41	54.82	−29.10	−7.53
2019	−118.95	10.10	125.90	−32.99	−15.93
2020	−73.13	−1.17	187.15	−30.87	81.97
2021	19.15	−3.74	123.68	−26.76	112.34
2022	3.51	−5.87	53.54	−15.36	35.83
合计 Total	−1 450.40	−26.54	1 728.59	−391.42	−139.76
贡献率 Contribution rate	1 037.75	18.99	−1 236.80	280.06	100.00

农村人口效应主要呈碳减排效应,但影响相对较小,与2005年相比,累计减少碳排放391.42万吨当量,减排贡献率为280.16%。农村人口效应与农村人口的变化密切相关,2005-2022年期间,山西省农村人口由最初的2 490.72万人减少为1 254.85万人,农村人口的减少与我国推行城镇化、工业化等基本政策密切相关,部分农村人口,特别是青年劳动力大多选择离开农村,去城市工作生活。

2.3 农业碳排放预测

2.3.1 预测模型检验

根据STIRPAT模型要求,首先对数据进行对数处理,然后采用普通最小二乘回归验证模型是否存在共线性问题,通过统计软件计算验证,各指

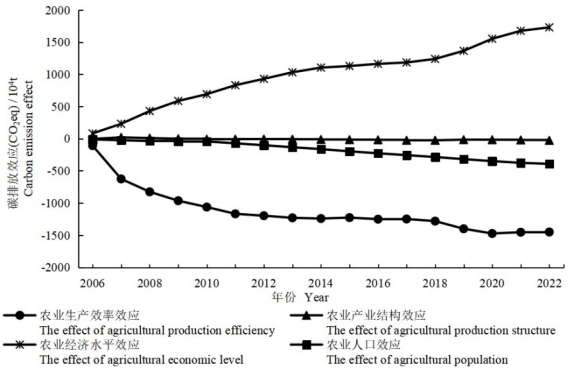

图2　2006-2022年各影响因素碳排放累计效应

Fig.2　Cumulative effects of various influencing factors of carbon emissions from 2006 to 2022

标间存在多重共线性,说明各指标之间具有高度相关性。为避免多种共线性回归误差,本文采用岭回归方法对STIRPAT模型的相关系数进行回归分析。岭系数根据方差扩大因子法确定K=0.05时模型平稳,此时模型通过F检验(F=64.753,P=0.000<0.05),R^2为0.964>0.9,说明回归结果显著,能够符合研究需求(表6)。

根据岭回归结果,对2005-2022年农业碳排放进行了拟合,具体见图3。模拟结果显示,该模型具有很好的拟合度,除2005年和2010年略有偏差外,其它年份拟合度均很好,误差基本控制在3%以内。而2005年和2010年误差较大,可能与统计数据与现在间隔时间较长,后期统计部门对整年份数据进行微调有关。

2.3.2　预测指标构建与情景设计

(1)指标构建

农业生产效率变化率根据历史发展情况设定。自2005年起,农业生产效率总体上呈逐渐下降趋势,2022年比2005年下降79.97%,年均下降9.03%。其中,2005-2015年下降趋势较快,平均年度降低率达到12.63%,2015年后下降幅度逐渐变缓,近5年平均下降率为4.79%,近3年平均下降率为1.13。因此,本文以2.00%年度增长率为起始,中速、慢速、快速发展后续每5年的发展变化率分别为-1.00%,0%和-2.00%。

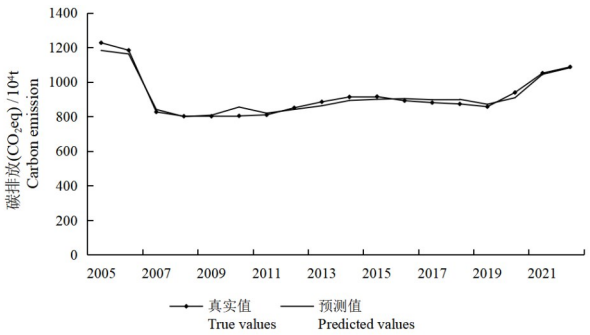

图3　模型预测误差

Fig.3　Model prediction errors

农业经济水平变化率根据历史发展情况和《山西省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》共同确定。自2005年起,农业经济水平总体呈逐渐增长趋势,2022年比2005年增加607.60%,年均增长12.20%,年度最大增速为27.55%,年度最小增速为2.50%。其中近5年年均增长率为14.12%,近3年年均增长率为9.11%,2022年较2021年增长5.13%。因此,本文以年均增长5%为起始,中速、慢速、快速发展后续每5年的发展变化率分别为2%,0%和4%。

农业人口变化率根据历史发展情况和《山西省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》共同确定。自2005年起,农业人口变化率总体上呈逐渐下降趋势,2022年比2005年下降35.40%,年均下降2.54%,最高下降率

表6　检验系数表

Table 6　Test coefficient table

因素 Factors	非标准化系数B Nonnormalized coefficient B	标准误差 Standard error	标准化系数β Normalized coefficient β	t	Sig	R^2	Adjust R^2	F
常数Constant	11.622	1.622	0.000	7.167	0.000			
LNBI	0.196	0.021	0.732	9.660	0.020			
LNSI	−0.021	0.008	−0.096	−2.694	0.025	0.964	0.949	64.753
LNPt	−0.096	0.080	−0.112	−1.195	0.005			
LNH	−0.428	0.125	−0.229	−3.426	0.000			
LNL	0.463	0.037	0.919	12.353	0.000			

3.7%,最低下降率0.9%。近5年年均下降率为2.80%,近3年年均下降率为2.04%。因此,本文以年均下降2%为起始,中速、慢速、快速发展后续每5年的发展变化率分别为0%,-0.2%和0.2%。

农用化肥施用量变化率根据历史发展情况和《山西省"十四五"推进农业农村现代化规划》共同确定。自2005年起,农用化肥施用量呈先增后减趋势,2005-2013年化肥施用量为增加趋势,年均增长2.98%;2014-2022年呈下降趋势,年均下降率为1.80%。近5年年均下降率为1.43%,近3年年均下降率为1.85%。因此,本文以年均下降1.85%为起始,后续每5年的中速、慢速、快速发展变化率分别为0%,0.5%和-0.5%。

肉类产量变化率根据历史发展情况和《山西省"十四五"推进农业农村现代化规划》共同确定。自2005年以来,肉类产量变化率除个别年份下降外,整体呈增长趋势,2022年比2005年增长76.81%,年均增长3.41%。其中,近5年平均每年增长11.37%,近3年平均每年增长18.11%。根据《山西省"十四五"推进农业农村现代化规划》,规划肉类总产量到由2020年的101.6万吨增加为2025年的150万吨,年均增长8.1%,而2022年肉类总产量已达143.2万吨,其中2021年较2020年增长31.86%,2022年较2021年增加5.78%。综合考虑到肉类消费量已进入稳定期,后期随着人口下降,肉类需求量也逐年降低,因此,本研究以年均增加5.0%为起始,中速、慢速、快速后续每5年的发展变化率分别为-1%,-2%和1%。

各指标发展速率设定情况见表7。

表7 山西省2023—2040年各指标变化率预测

Table 7 Prediction of the change rate of each index in Shanxi Province from 2023 to 2040 **%**

发展速度 Speed of development	年份 Year	农业生产效率 Agricultural production efficiency	农业经济水平 Agricultural economic level	农业人口 Agricultural population	农用化肥施用量 Agricultural chemical fertilizer applied	肉类产量 Production of meat
中速 Medium speed	2023—2025	—2.00	5.00	—2.00	—1.85	5.00
	2026—2030	—3.00	7.00	—2.00	—1.85	4.00
	2030—2035	—4.00	9.00	—2.00	—1.85	3.00
	2036—2040	—5.00	11.00	—2.00	—1.85	2.00
慢速 Low speed	2023—2025	—2.00	5.00	—2.00	—1.85	5.00
	2026—2030	—2.00	5.00	—1.80	—1.35	3.00
	2030—2035	—2.00	5.00	—1.60	—0.85	1.00
	2036—2040	—2.00	5.00	—1.40	—0.35	—1.00
快速 Fast speed	2023—2025	—2.00	5.00	—2.00	—1.85	5.00
	2026—2030	—4.00	9.00	—2.20	—2.35	6.00
	2030—2035	—6.00	13.00	—2.40	—2.85	7.00
	2036—2040	—8.00	17.00	—2.60	—3.35	8.00

(2)情景设计

根据各指标的发展实际和研究比较需要,本文构建了4种预测情景,包括基准情景、低碳发展情景、经济发展情景和低速发展情景,具体见表8。

基准情景代表山西省农业产业按照现有经济、社会、技术等发展规律设置的情景,该情景中各指标发展速率全部为中速。

低碳发展情景代表山西农业产业按照优先低碳发展的原则设置的情景,主要探究山西农业产业在提高低碳技术发展和减少肉类生产的情况下,对未来碳排放的影响。该情景中农业生产效率和肉类产量分别设置为快速和慢速,其余指标为中速。

经济发展情景代表山西农业产业按照优先经济发展的原则设置的情景,主要探究山西农业经济快速发展的情况下,对未来碳排放的影响。在此情景下农业经济快速发展,农村人口回流,降幅减缓;农民使用优质的农家肥、复合肥等代替化肥;畜牧业快速发展,肉类产量快速增长。该情景中农业生产效率设置为中速,农业经济水平、农用

化肥施用量和肉类产量设置为快速,农业人口设置为慢速。

低速发展情景代表山西农业产业在低速发展的情景,主要探究受全球经济低迷影响,山西农业产业全部低速发展时对未来碳排放的影响。该情景中农业生产效率、农业经济水平、农用化肥施用量、肉类产量全部设置为低速,受农业低速发展影响,农业人口快速转移,农业人口设置为高速。

表8　预测情景设计

Table 8　Forecast scenario construction

情景构建 Scenario design	农业生产效率 Agricultural production efficiency	农业经济水平 Agricultural economic level	农业人口 Agricultural population	农用化肥施用量 Agricultural chemical fertilizer applied	肉类产量 Production of meat
基准情景 Baseline scenario	中速	中速	中速	中速	中速
低碳发展情景 Low carbon development scenario	快速	中速	中速	中速	慢速
经济发展情景 Economic development scenario	中速	快速	慢速	快速	快速
低速发展情景 Low－speed development scenario	慢速	慢速	快速	慢速	慢速

2.3.3　预测结果分析

根据4种预测情景,采用STIRPAT预测模型对山西农业领域2023-2040年的碳排放量进行预测(图4)。达峰情景下各指标的预测值见表9。

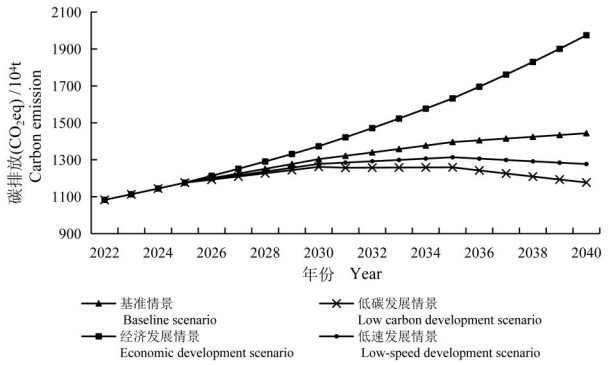

图4　碳排放预测图

Fig.4　Forecast of carbon emission

在基准情景下,2023-2040年山西农业领域碳排放持续增长,未达峰值,到2040年碳排放量为 1 443.66万吨当量,比2022年增长33.32%。从增长趋势看2023-2035年增长相对迅速,年均增长1.91%,2035年后增速逐渐放缓,年均增长0.67%。

在低碳发展情景下,碳排放在2023-2030年前持续增长,并在2030年达到峰值,峰值碳排放量为1 261.73万吨当量,比2022年增长16.52%,与同年基准情景相比减少41.87万吨当量碳排放。随后5年碳排放进入平台期,每年排放量保持在1260万吨当量左右。2036年后,碳排放量快速下降,到2040年碳排放量为1 177.08万吨当量,与2022年相比,增加94.19万吨当量,与同年基准情景相比减少266.58万吨当量碳排放。由此可见,低碳发展模式明显降低了农业领域碳排放。

在经济发展情景下,2023-2040年山西农业领域碳排放持续增长,未达到峰值,到2040年碳排放量为1 974.64万吨当量,比2022年增长82.35%,与同期基准情景相比增加530万吨当量,由此说明只注重农业经济发展,不关注碳减排的情况下会造成碳排放的快速增长。

在低速发展情景下,碳排放在2023-2035年前持续增长,并在2035年达到峰值,峰值碳排放量为1 313.65万吨当量,比2022年增长21.31%,与同年基准情景相比减少82.34万吨当量碳排放,但与同期低碳发展情景相比增加54.54万吨当量。2036年后,碳排放量开始下降,到2040年碳排放量为1 276.99万吨当量,与2022年相比,增加194.10万吨当量,与同年基准情景相比减少166.68万吨当量碳排放,但与同期低碳发展情景相比增加99.91万吨当量。由此说明在农业产业低速发展情况下,碳排放量亦会显著降低,但与低碳发展情景相比,碳排放量均显著高于其同期水平。

根据采用STIRPAT模型预测的山西省农业

表9 低碳和低速情景达峰时的不同指标预测值

Table 9 Predicted values of different indicators in low carbon and low speed scenarios

情景构建 Scenario design	农业生产效率/(tCO_2eq/万元) Agricultural production efficiency	农业经济水平/(元/人) Agricultural economic level	农业人口/万人 Agricultural population	农用化肥施用量/吨 Agricultural chemical fertilizer applied	肉类产量/万吨 Production of meat	碳达峰峰值/(10^4 tCO_2eq) Carbon peak value	达峰时间 Carbon peak time
低碳发展情景 Low carbon development scenario	0.44	28 615.37	1 067.58	891 154.14	192.18	1 261.73	2030
低速发展情景 Low carbon development scenario	0.44	33 233.30	935.86	875 891.58	201.98	1 313.65	2035

领域碳排放情况,基本能反应山西农业领域碳排放实际情况,但由于在现实社会中,农业领域碳排放受社会各方面影响,是一个复杂的体系,而STIRPAT模型预测时仅关注关键影响因素,因此,预测结果可能会存在一定的不确定性。

3 讨论

山西农业领域碳排现状测算数据表明,2005-2022年农业领域碳排放趋势分为3个阶段,总体呈正"U"的先下降再平缓再上升趋势,说明山西农业领域未来碳排仍有较大的变数和不确定性。碳排放主要集中在农用地氧化亚氮排放、动物肠道发酵甲烷排放、动物粪便管理甲烷和氧化亚氮排放。其中,动物肠道甲烷排放是最大的排放源,动物粪便管理的甲烷和氧化亚氮亦是主要排放源,2022年二者占山西农业领域总排放量的64%,这与山西的地理特色和农业政策密切相关,一方面山西地处畜牧养殖黄金地带,牧坡资源丰富,另一方面山西出台了雁门关生态畜牧经济区建设和畜牧产业振兴计划等一系列鼓励畜牧业发展的政策,使得畜禽养殖规模快速扩张,这些因素均导致了畜牧业碳排放量的增加。农用地氧化亚氮排放是第二大排放源,总体呈下降趋势,这主要与农业化肥施用量结构发生较大变化有关,氮肥比例由2005年的42.89%降至2022年的17.83%。

碳排放影响因素识别结果表明,农业生产效率是主要的促减因素,而农业经济水平是主要的促增因素。目前随着农业经济的发展,单纯的依靠减少化肥等农用地物质投入和降低畜禽养殖量来减少碳排放已经进入"瓶颈期",为实现农业低碳绿色可持续发展,提升农业生产效率,促进农业低碳技术的开发利用是农业碳减排的关键。

碳排放预测结果表明,基准情景和经济发展情景到2040年碳排放持续增长,未到达峰值,特别是经济发展情景,同期碳排放量远高于其它情景,说明不论是基于现行模式发展还是优先发展经济都不能实现碳达峰,需要制定新的低碳政策促进碳减排。低碳发展情景和低速发展情景均达到峰值,与低速发展情景相比,低碳情景在达峰年份和同期碳排放方面均优于低速发展情景,由此说明提升农业低碳水平,发展低碳农业经济才是未来山西农业领域碳减排的主要方向。

综上所述,为促进山西农业低碳绿色稳定发展,提出如下建议:一是加快农业低碳技术的研发与应用,积极推进低碳种植、低碳养殖等低碳农业技术的发展,面向未来农业现代化建设,提前布局具有前瞻性、创新性的低碳农业技术攻关项目,建设低碳农业重点实验室和创新平台,积极推进农业低碳技术的开发与应用;二是继续优化农业化肥施用结构,在保障粮食安全的前提下,继续优化农业化肥使用结构,研究推广新型化肥,优化种植和施肥技术,降低化肥施用量,提升化肥利用率;三是提升农民低碳意识,通过网络媒体、培训等方式,积极宣传低碳农业,开展低碳的生产学习和技能培训,提升农民的低碳意识和低碳技能。

4 结论

本文在核算山西省农业领域2005-2022年碳排放基础上,分析了其碳排放影响因素,并对碳达峰情况进行预测,得出如下结论:

(1)山西省2005-2022年农业领域碳排放趋势分为3个阶段,总体呈正"U"的先下降再平缓再上

升趋势,其中2020-2022年碳排放增长较快,2021年碳排放为1 051.66万吨当量,较上年增长11.96%,碳排放与2006年相比又一次恢复到千万吨级,2022年碳排放持续增长,碳排放达到1 087.49万吨当量,说明山西农业领域未来碳排放仍有较大不确定性。

(2)山西农业领域碳排放主要影响因素为碳生产效率效应和农业经济水平效应,其中碳生产效率效应是主要的碳减排影响因素,与2005年相比,累计减少碳排放1 450.40万吨当量,减排贡献率达到1 037.75%;农业经济水平效应是主要的促增效应,与2005年相比,累计增加碳排放1 728.59万吨当量,减排贡献率为-1 236.80%。

(3)低碳发展情景是各指标最优的达峰情景,达峰时间为2030年左右,达峰碳排放量为1 261.73万吨当量,结合其它研究结果,建议在优先发展低碳技术、优化化肥施用结构、提升农民低碳意识等方面制定相关政策措施,推进山西农业低碳绿色稳定发展。

参　考　文　献

[1]朱宇恩,李丽芬,贺思思,等. 基于IPAT模型和情景分析法的山西省碳排放峰值年预测[J]. 资源科学,2016,38(12):2316-2325.
Zhu Y E,Li L F,He S S,et al. Peak year prediction of Shanxi Province's carbon emissions based on IPAT modeling and scenario analysis[J]. Resources Science,2016,38(12):2316-2325.

[2]赵江燕,朱宇恩,马建超,等. 山西省能源消费碳排放清单和影响因素研究[J]. 太原理工大学学报,2022,53(6):989-996.
Zhao J Y,Zhu Y E,Ma J C,et al. Reach on carbon emission inventory based on energy activities and the driving factors in Shanxi[J]. Journal of Taiyuan University of Technology,2022,53(6):989-996.

[3]韩楠,罗新宇. 多情景视角下京津冀碳排放达峰预测与减排潜力[J]. 自然资源学报,2022,37(5):1277-1288.
Han N,Luo X Y. Carbon emission peak prediction and reduction potential in Beijing-Tianjin-Hebei region from the perspective of multiple scenarios [J]. Journal of Natural Resources,2022,37(5):1277-1288.

[4]薛成杰,方战强. 土壤修复产业碳达峰碳中和路径研究[J]. 环境工程,2022,40(8):231-238.
Xue C J,Fang Z Q. Path of carbon emission peaking and carbon neutrality in soil remediation industry [J]. Environmental Engineering,2022,40(8):231-238.

[5]蒋雪娇,佟岩,张景欣. 基于系统动力学的沈阳市工业碳排放研究[J]. 现代工业经济和信息化,2022,12(7):5-8.
Jiang X J,Tong Y,Zhang J X. A study on industrial carbon emissions in Shenyang City based on system dynamics [J]. Modern Industrial Economy and Informationization,2022,12(7):5-8.

[6]Wen W,Wang Q. Re-examining the realization of provincial carbon dioxide emission intensity reduction targets in China from a consumption-based accounting [J]. Journal of Cleaner Production,2020,244:118488.

[7]谢立勇,杨育蓉,赵洪亮,等."双碳"战略背景下农业与农村减排技术路径分析[J]. 中国生态农业学报(中英文),2022,30(4):527-534.
Xie L Y,Yang Y R,Zhao H L,et al. Technical pathways of mitigating greenhouse gases emission from agriculture and rural areas under double-carbon strategy[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2022,30(4):527-534.

[8]赵洪亮,陈思越,谢立勇. 辽宁省种植业碳排放影响因素及预测分析[J]. 中国生态农业学报(中英文),2024,1-13.
Zhao H L,Chen S Y,Xie L Y. Influence factors and prediction analysis of carbon emissions from the planting industry in Liaoning Province [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2024,1-3.

[9]秦作霞,孟志兴,石莎,等. 临猗县农业现代化评价研究[J]. 山西农业大学学报(社会科学版),2013,12(5):457-461.
Qin Z X,Meng Z X,Shi S,et al. Studies and appraises of agricultural modernization in Linyi County [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Social Science Edition),2013,12(5):457-461.

[10]张建杰,原韶雨,何宁波,等. 山西省农牧生产体系温室气体排放特征与影响因素[J]. 中国生态农业学报(中英文),2024,32(7):1148-1158.
Zhang J J,Yuan S Y,He N B,et al. Greenhouse gas emission characteristics and influencing factors of the crop and livestock production systems,Shanxi Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2024,32(7):1148-1158.

[11]黄和平,李紫霞,黄靛,等."双碳"目标下江西省农业碳排放量测算、影响因素分析与预测研究[J]. 生态与农村环境学报,2024,40(2):179-190.
Huang H P,Li Z X,Huang D,et al. Research on the measurement,analysis and prediction of agricultural carbon emissions in Jiangxi Province under the "dual carbon" goals [J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2024,40(2):179-190.

[12]邓维忠,许中坚. 湖南省农业碳排放特征及碳达峰分析[J]. 中国生态农业学报(中英文),2024,32(2):206－217.
Deng W Z,Xu Z J. Characteristics of agricultural carbon emissions and carbon peak analysis in Hunan Province [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2024,32(2):206－217.

[13]白义鑫,王霖娇,盛茂银. 黔中喀斯特地区农业生产碳排放实证研究[J]. 中国农业资源与区划,2021,42(3):150-157.
Bai Y X,Wang L J,Sheng M Y. Empirical study on carbon emission of agricultural production in Karst region of Guizhou Province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2021,42(3):150-157.

[14]张毅瑜. 福建省种植业碳排放与产出关系研究[J]. 福建农

林大学学报(哲学社会科学版),2015,18(4):70-75.
Zhang Y Y. Relationship between carbon emissions and output in crop farming in Fujian Province[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Philosophy and Social Sciences),2015,18(4):70-75.

[15]Qi Y W, Liu H L, Zhao J B, et al. Prediction model and demonstration of regional agricultural carbon emissions based on PCA-GS-KNN: a case study of Zhejiang Province, China [J]. Environmental Research Communications, 2023, 5(5): 051001.

[16]赵宇. 江苏省农业碳排放动态变化影响因素分析及趋势预测[J]. 中国农业资源与区划,2018,39(5):97-102.
Zhao Y. Influencing factors and trend prediction on dynamic change of agricultural carbon emissions in Jiangsu province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2018,39(5):97-102.

[17]张俊飚,何可."双碳"目标下的农业低碳发展研究:现状、误区与前瞻[J]. 农业经济问题,2022,43(9):35-46.
Zhang J B, He K. Current situation, misunderstandings and prospects of agricultural low-carbon development under the targets of carbon peak and carbon neutrality[J]. Issues in Agricultural Economy,2022,43(9):35-46.

[18]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 S F, Gao G L, Li W, 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.

[19]彭宸,贾俊松,余清项,等. 中国农业碳排放异质性的时空演化及影响因素分析[J]. 环境科学研究,2024,1-19.
Peng C, Jia J S, Yu Q X, et al. Analysis of spatio-temporal evolution and influencing factors of agricultural carbon emission heterogeneity in China[J]. Research of Environmental Sciences,2024,1-19.

[20]高群,陈衡洋,张新亮. 中国农业绿色发展政策的历史演变与焦点特征——基于注意力视角的文本分析[J]. 资源科学,2023,45(12):2433-2448.
Gao Q, Chen H Y, Zhang X L. Evolution and focal features of China's agricultural green development policies: text analysis based on attention perspective[J]. Resources Science, 2023, 45(12):2433-2448.

(编辑:韩志强)