史新杰,谭雪勤,周 茹,等.基于机器学习的河南省农业碳排放驱动因素分析和情景预测 [J]. 中国环境科学, 2025,45(10):5885-5893.
Shi X J, Tan X Q, Zhou R, et al. Driving factors analysis and scenario prediction of agricultural carbon emissions in Henan Province based on machine learning [J]. China Environmental Science, 2025,45(10):5885-5893.

基于机器学习的河南省农业碳排放驱动因素分析和情景预测

史新杰[1,2,3],谭雪勤[1],周 茹[1],熊晋冉[4],李 玲[1,2],李栋浩[1,2*] (1.河南农业大学资源与环境学院,河南 郑州 450046；2.河南省土地整治与生态重建工程技术研究中心,河南 郑州 450046；3.河南农业大学作物学博士后科研流动站 河南 郑州 450046；4.中国科学技术大学环境科学与工程系,安徽 合肥 230022)

摘要：选取土地管理、粮食种植、畜牧养殖 3 类指标对 2000~2021 年河南省各地市农业碳排放进行了测算,结合局部莫兰指数分析了各地市农业碳排放的时空演变趋势和格局,最后采用随机森林模型识别了主要驱动因素并预测了基准、低碳、高碳情景下的河南省农业碳排放量.结果表明:2000~2021 年,河南省农业碳排放先上升后下降,在 2006 年达到峰值 5849.52 万 t,2021 年较 2006 年下降 40.60%;各地市农业碳排放分布不均,整体呈现“东南高、西北低”的特征.土地翻耕面积、农村人口数量、行政区面积以及农业机械总动力是影响河南省农业碳排放最主要的正向驱动因素,城镇化率为负向驱动因素.河南省农业碳排放已于 2006 年达峰值,在 3 种情景下,2022~2030 年河南省农业碳排放均持续下降,与达峰状态相比下降范围分别为 2241.55~2470.73 万 t,2245.67~2482.22 万 t,2240.10~2459.74 万 t.研究结果可以为河南省各地市未来农业碳减排路径提供依据,确保“双碳”目标达成.

关键词：农业碳排放；随机森林；机器学习；河南省
中图分类号：X24 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)10-5885-09

Driving factors analysis and scenario prediction of agricultural carbon emissions in Henan Province based on machine learning. SHI Xin-jie[1,2,3], TAN Xue-qin[1], ZHOU Ru[1], XIONG Jin-ran[4], LI Ling[1,2], LI Dong-hao[1,2*] (1.College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China；2.Henan Engineering Research Center of Land Consolidation and Ecological Restoration, Zhengzhou 450046, China；3.Postdoctoral station of Crop Science of Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China；4.Department of Environmental Sciences and Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230022, China). *China Environmental Science*, 2025,45(10)：5885~5893

Abstract：This study analyzed agricultural carbon emissions in different cities of Henan Province from 2000 to 2021 by focusing on three indicator categories: land management, grain cultivation, and livestock farming. The analysis of the spatiotemporal evolution trends and patterns of agricultural carbon emissions was conducted using the local Moran *I* index. Additionally, a random forest model was utilized to determine the primary influencing factors and forecast agricultural carbon emissions in Henan Province across baseline, low-carbon, and high-carbon scenarios. The study findings indicated the following key points: agricultural carbon emissions in Henan Province exhibited a fluctuating trend from 2000 to 2021, reaching a peak of 58.4952million tons in 2006 before declining. By 2021, emissions had decreased by 40.60% compared to the peak year. The spatial distribution of agricultural carbon emissions across cities in the province followed a distinct pattern of being higher in the southeast and lower in the northwest. The primary driving factors positively influencing agricultural carbon emissions in Henan Province were the land plowing area, rural population, administrative area, and total agricultural machinery power. Conversely, the urbanization rate had a negative impact on emissions. Agricultural carbon emissions in Henan Province peaked in 2006 and are projected to continue decreasing from 2022 to 2030 under three scenarios. The anticipated reductions range from 22.4155~24.7073 million tons, 22.4567~24.8222 million tons, and 22.401~24.5974 million tons, respectively, compared to the peak level. These findings offer valuable insights for developing future strategies for reducing agricultural carbon emissions in different cities within Henan Province, thereby contributing to the attainment of the "dual carbon" objectives.

Key words：agricultural carbon emissions；random forest；machine learning；Henan province

农业碳排放是温室气体的重要来源之一,占我国温室气体排放总量的 24%[1],农业生产中主要排放的温室气体包括二氧化碳(CO_2)及甲烷(CH_4)、氧化亚氮(N_2O)等非二氧化碳气体.为解决资源环境约

收稿日期：2025-03-10
基金项目：国家重点研发计划项目(2021YFD1700900);河南省科技开发联合基金资助项目(重点项目)(225200810045)
* 责任作者, 讲师, lidonghao@henau.edu.cn

束的突出问题,实现可持续发展,构建人类命运共同体,我国在 2016 年签署了《巴黎协定》,同时向国际社会承诺我国的二氧化碳排放量将在 2030 年前实现碳达峰,2060 年前实现碳中和.因此,在当前全球变暖,极端天气频发的背景下,深入研究农业碳排放的驱动因素并预测,对实现农业温室气体的减排,实现“碳中和”、“碳达峰”目标具有重要意义.

当前国内外针对农业碳排放研究较为多样.大多数研究选取土地管理、粮食种植、畜牧养殖、秸秆焚烧、能源消耗等多方面的碳源进行测算[2-5],而后基于全国[6]、省级[7]或县域尺度[8],选取人口规模、城镇化、第一产业 GDP、农业产业结构[9-12]等影响因素,采用地理加权回归(GWR)模型[13]、STIRPAT 模型[14]等方法分析农业碳排放的时空演变趋势和驱动机制.考虑到特定地区的实际状况,近年来,越来越多的学者转向省级层面进行深入研究,如蒋添诚等[15]、彭文甫等[16]、常青等[17]在省级层面,分析了农业碳排放与经济增长的关系,碳排放与碳足迹效应以及对农业碳排放的趋势进行预测.

但由于驱动因素与农业碳排放往往呈复杂的非线性关系[18],而传统模型计算过于复杂,处理非线性农业碳排放问题时缺乏学习和测试过程,容易产生非线性关系模糊、泛化能力不足以及过拟合等问题.近年来,支持向量机[19]、随机森林[20]和 XGBoost[21]等机器学习算法被广泛应用于碳排放的驱动因素识别,解决了传统模型的弊端,在处理非线性问题时较为优异.

目前,采用机器学习算法预测农业碳排放量的研究较少,情景较为单一,对未来农业碳排放趋势分析较为模糊.基于此,本研究通过收集河南省各地市的数据测算农业碳排放量,并利用 ArcGIS 分析其时空演变趋势特征,然后采用 Pearson 相关性分析和随机森林模型探究河南省农业碳排放的关键驱动因素,最后设置高碳、基准、低碳 3 种情景对 2022~2030 年河南省农业碳排放趋势进行预测.与前人研究相比,本研究通过 Pearson 相关性分析进行特征筛选,保留相关性较高的驱动因素,降低了后续机器学习模型的过拟合风险,进而提高了其预测准确率,以期为预测农业碳排放趋势提供参考.

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

河南省位于中国中东部地区,属北亚热带向暖温带过渡的大陆性季风气候,适宜多种农作物生长.全省包括 17 个地级市,以及 1 个省辖县级行政单位.根据国家统计局河南调查总队资料显示,截至 2021 年年底,河南省耕地面积为 733.33 万 hm^2 以上,居中国第 3 位,粮食播种面积为 1066.67 万 hm^2 以上,居中国第 2 位,农业机械化率高达 86.3%,在粮食生产中起着举足轻重的地位.同时,河南省是全国主要的畜产品生产加工基地,畜禽种业产值位居全国第一.因此,在保证粮食安全稳定、农业持续发展的基础上,减少生产中的碳排放是当前急需解决的环境问题.

1.2 数据来源

表 1 农业碳源碳排放系数

Table 1 Carbon emissions coefficient of agricultural carbon source

碳排放源			排放气体	排放系数	数据来源
土地管理	化肥生产、运输和使用	氮肥	CO_2	1.53t/t	CLCD
		磷肥	CO_2	1.63t/t	CLCD
		钾肥	CO_2	0.65t/t	CLCD
		复合肥	CO_2	1.77t/t	CLCD
	农药		CO_2	18.0917t/t	ORNL
	农膜		CO_2	18.993t/t	IREEA
	翻耕		CO_2	0.003126t/hm^2	[22]
	灌溉面积		CO_2	0.26648t/hm^2	[23]
	农业机械		CO_2	0.00018t/kw	[24]
粮食种植	玉米(N_2O)		N_2O	0.00253t/hm^2	[25]
	冬小麦(N_2O)		N_2O	0.00175t/hm^2	[25]
畜牧养殖	肠道发酵	牛	CH_4	0.0478t/(head·a)	[26]
		羊	CH_4	0.005t/(head·a)	[26]
		猪	CH_4	0.001t/(head·a)	[26]
	粪便(CH_4,N_2O)	牛	CH_4	0.001t/(head·a)	[26]
			N_2O	0.00139t/(head·a)	[26]
		羊	CH_4	0.00016t/(head·a)	[26]
			N_2O	0.00033t/(head·a)	[26]
		猪	CH_4	0.0035t/(head·a)	[26]
			N_2O	0.00053t/(head·a)	[26]

本研究选取农用化肥使用折纯量、农药使用量、农膜使用量、翻耕面积和灌溉用电量等 11 个

与农业密切相关的碳排放源指标,将其划分为土地管理、粮食种植和畜牧养殖 3 个类别,构建河南省地市级农业碳核算框架(表 1),行政区面积来源于河南省民政厅,其余数据均来自于 2000~2021 年《河南省统计年鉴》,其中粮食种植类碳排放是指土壤本底 N_2O 排放.碳排放系数从中国生命周期基础数据库(CLCD)、美国橡树岭国家实验室(ORNL)、南京农业大学农业资源与生态环境研究所(IREEA)及有关文献中收集,计算公式如下:

$$E_i = \sum C_{i,n} \cdot R_{i,n} \tag{1}$$

$$E = \sum E_i \cdot \mathrm{GWP}_i \tag{2}$$

式中:E_i 表示第 i 类温室气体的碳排放量;$C_{i,n}$ 表示第 i 类温室气体第 n 种碳源的投入量;$R_{i,n}$ 表示第 i 类温室气体第 n 种碳源的碳排放源系数;E 表示总碳排放量;GWP_i 表示第 i 类温室气体的全球变暖潜能值.以 IPCC 第六次评估报告中 CO_2 的 100a 全球变暖潜力值(GWP)为基准,1tCH_4 的温室效应相当于排放 29.8tCO_2,1tN_2O 的温室效应相当于排放 273tCO_2,碳排放量单位为吨二氧化碳当量(tCO_2−eq).

1.3　全局莫兰指数

全局莫兰指数(Global Moran's I)可以用于判断区域是否存在空间自相关[27].公式如下:

$$\text{Glocal Moran's } I = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} W_{ij}(x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})}{S^2\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} W_{ij}} \tag{3}$$

式中:n 表示地市总数;x_i 表示要素 i 的农业碳排放量;x_j 表示要素 j 的农业碳排放量;W_{ij} 表示空间权重,本文中该指标基于反距离法创建;$\bar{x}$ 表示均值,S^2 表示方差.由于全局莫兰指数无法表示各地市间的空间相关性,本文在全局莫兰指数的基础上计算局部莫兰指数.

1.4　局部莫兰指数

局部莫兰指数(Local Moran's I)可以用于表示特定位置的碳排放水平与临近位置的关联程度[28],本研究用其识别河南省各地市碳排放的空间集聚模式.若 Local Moran's I 为正值,表示该地市与周边区域形成高高聚集或低低聚集的空间集群;若 Local Moran's I 为负值,则表示碳排放与周边区域存在高异常值(高低聚集)或低异常值(低高聚集).公式如下:

$$\text{Local Moran's } I = \frac{(x_i-\bar{x})\sum_{j=1}^{n} W_{ij}(x_j-\bar{x})}{S^2} \tag{4}$$

式中:n 表示地市总数;x_i 表示要素 i 的农业碳排放量;x_j 表示要素 j 的农业碳排放量;W_{ij} 表示空间权重;$\bar{x}$ 和 S^2 分别表示均值和方差.

通常局部莫兰指数的聚类结果共分为 5 类:高高聚集、高低聚集、低高聚集、低低聚集和不显著.高高聚集和低低聚集是农业碳排放两种主要的聚类形式,代表该市与相邻市均具有较高或较低水平的农业碳排放强度;高低聚集为高异常值,代表该市农业碳排放显著高于相邻市,低高聚集为低异常值,代表该市农业碳排放显著低于相邻市.

1.5　随机森林

随机森林(RF)是由 Breiman[29]提出的一种集成学习方法,它通过对训练数据和解释变量随机抽样,而后生成多棵决策树,对每棵决策树的预测结果取平均值或众数得到最终预测值,最后利用最小均方误差(MSE)或最小平均误差(MAE)或决定系数(R^2)来评价预测结果.随机森林能够避免模型的过度拟合,具有容易实现和可解释性高的特点[30],且能够评估解释变量对预测变量的重要性,有较强的预测功能.本文使用 Python 3.13 来构建河南省各地市农业碳排放的随机森林模型,将数据集分为 70%的训练集和 30%验证集,并采用五折交叉验证(FFCV)评估该模型的性能,从而探究农业碳排放的关键驱动因素的重要性,并对未来农业碳排放趋势进行预测.

随机森林模型参数设置如下:

n_estimators=500,max_samples=1.0,max_features=2,min_samples_leaf=5,max_depth=5,生成的模型 R^2 为 0.89,拟合效果较好.

1.6　情景设置

本研究参考《河南省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》(以下简称河南省“十四五规划”)和前人研究结果,共设置基准、低碳、高碳 3 种情景模式,对筛选后河南省各地市 2022~2030 年的农业碳排放各驱动因素进行预测,将预测后的驱动因素作为输入变量,用随机森林模型预测河南省各地市的农业碳排放,最后相加得到河南省全省 2022~2030 年在 3 种情景模式下的农业碳排放趋势.

驱动因素增长率设置如表 2 所示,其中,第一产业 GDP 基于河南省“十四五”规划地区生产总值

年均增长率设置为 6.0%,低碳与高碳情景分别上下调动 1%[31];河南省“十四五”规划预期 2025 年城镇化率达到 60%,2020 年河南省城镇化率为 55.43%,则城镇化年均增长率约为 2.5%,低碳与高碳情景分别上下调动 0.2%[32];农村人口与城镇化率有相反的增长率;翻耕面积根据前人研究[33]设置年均增长率为 0.64%;根据《河南省“十四五”农业机械化发展规划》,河南省预期 2025 年农业机械总动力稳定在 10500 万 kW 左右,2020 年河南省农业机械总动力为 10464 万 kW,则农业机械总动力年增长率设置为 0.07%,低碳和高碳情景上下调动 0.01%.由于行政区面积是随政策进行的不规律调整,故本文在预测时并未考虑该因素.

表 2 河南省农业碳排放各驱动因素增长率设置

Table 2 Growth rate setting of driving factors of agricultural carbon emissions in Henan Province

驱动因素	增长率设置		
	低碳情景(%)	基准情景(%)	高碳情景(%)
农村人口数量	−2.7	−2.5	−2.3
城镇化水平	2.7	2.5	2.3
第一产业 GDP	5.0	6.0	7.0
翻耕面积	0.64	0.64	0.64
农业机械总动力	0.06	0.07	0.08

2 结果与分析

2.1 河南省农业碳排放时间演变趋势

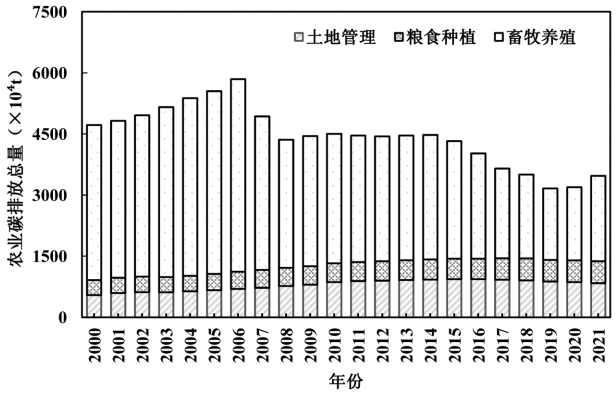


图 1 2000~2021 年河南省农业碳排放总量与结构比较

Fig.1 Comparison of total agricultural carbon emissions and structure in Henan Province from 2000 to 2021

如图 1 所示, 2000~2021 年河南省农业碳排放整体呈先上升后下降的趋势,在 2006 年达到最高值,2021 年河南省碳排放总量为 3474.77 万 t,较 2006 年峰值减少了 2374.75 万 t,共下降 40.60%.2000~2021 年畜牧养殖导致的碳排放的占比最大,累计占总量的 71.87%,其次是土地管理和粮食种植,分别为 17.83%和 10.30%.随着时间变化,畜牧养殖类碳排放趋势与整体排放一致,而土地管理类和粮食种植类的碳排放整体呈现出逐渐增加的趋势,2021 年较 2000 年分别增加 293.97 万 t 和 169.82 万 t.

2.2 河南省农业碳排放空间演变趋势

用 ArcGIS 对河南省各地市农业碳排放进行划分,选取 2000 年、2006 年、2010 年、2016 年以及 2021 年的数据,绘制出河南省各地市农业碳排放空间分布图(图 2(a)~(e)).使用自然断点法对河南省 2021 年与 2000 年的农业碳排放差值进行分类(图 2 中(f)),小于 0 分别分为高速减少型、中速减少型和缓慢减少型,大于 0 则为缓慢增长型.其中高速减少型的范围为−300.53~−183.09 万 t,中速减少型的范围为−183.10~−60.78 万 t,缓慢减少型的范围为−60.78~0.00 万 t,缓慢增长型为 0.01~13.52 万 t.从空间上看,河南省农业碳排放分布并不均衡,整体呈现“东南高、西北低”的特征.农业碳排放高值区主要分布在南阳市、驻马店市、周口市和商丘市,四市的农业碳排放总量占全省农业碳排放总量的 49.27%;低值区主要分布在鹤壁市和济源市,农业碳排放总量分别只占全省的 1.18%和 0.57%.从时间上来看,从 2000~2021 年期间,大部分地市的农业碳排放呈现减少趋势,其中,南阳市、周口市和商丘市下降最为迅速,均超过 180 万 t;安阳市、鹤壁市、新乡市和开封市农业碳排放有小幅度的增长.

2.3 河南省农业碳排放时空演变格局

整体来看,从 2000~2021 年,河南省农业碳排放全局莫兰指数均为正值且在 0.2 上下波动,说明河南省的农业碳排放强度具有空间集聚性.为深入探究河南省各地市农业碳排放的空间格局,本文在 ArcGIS 中计算局部莫兰指数,根据其聚集效应对河南省 18 个地市划分出 5 种空间集聚类型并绘制空间聚类图(图 3).其中高高聚集区域集中在河南省南部地区,主要为驻马店市和信阳市,表明两者及其周围的南阳市、平顶山市、漯河市以及周口市碳排放均较高.值得注意的是,2000~2010 年新乡市表现为

低低聚集,2006 年三门峡市及 2021 年信阳市表现为　　低高聚集区域.其余地市均表现为不显著.

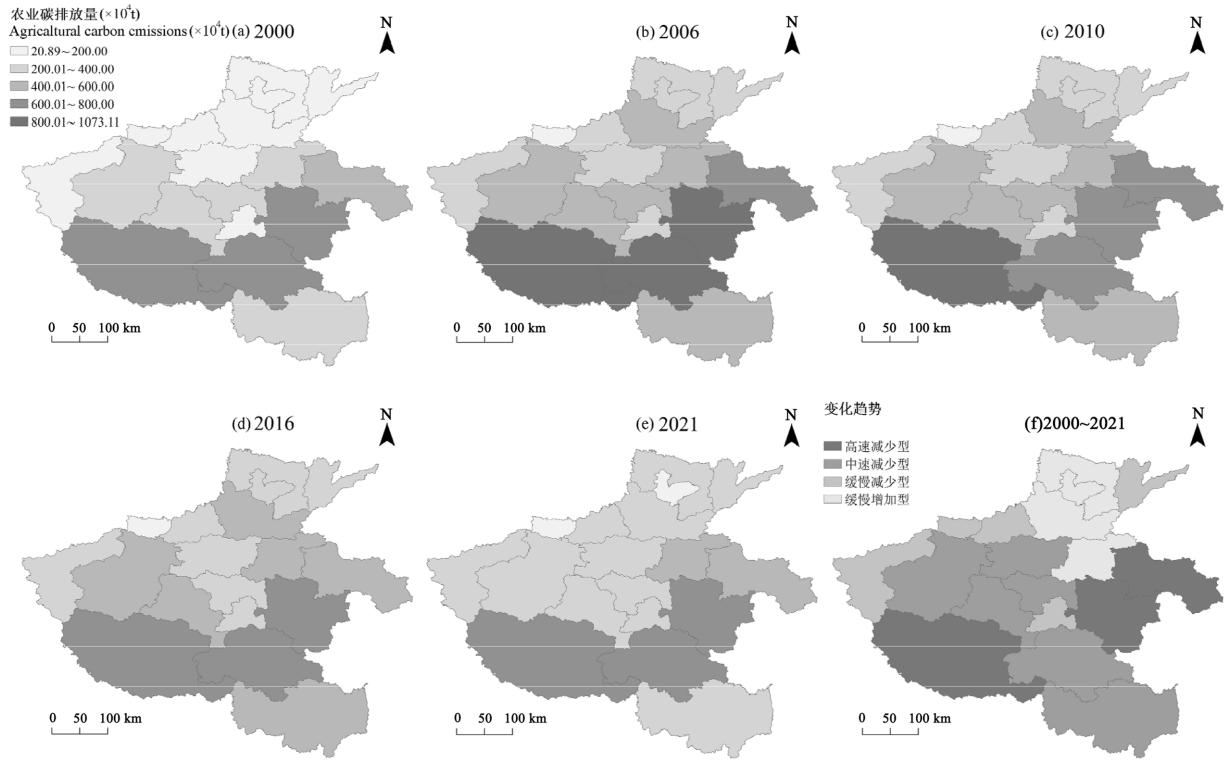


图 2　2000~2021 年河南省各地市农业碳排放空间分布模式和变化趋势

Fig.2　Spatial distribution patterns and trends of agricultural carbon emissions in various cities in Henan Province from 2000 to 2021

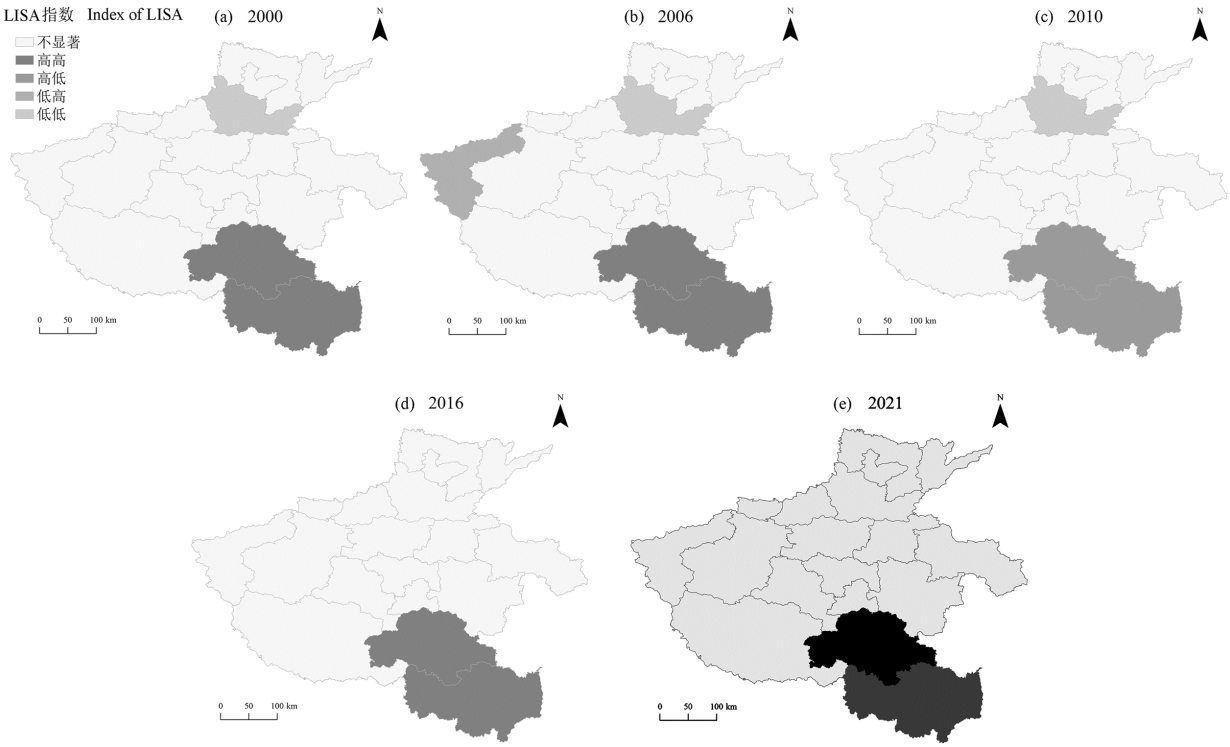


图 3　2000~2021 年河南省各地市农业碳排放空间关联的局部莫兰指数(LISA)图

Fig.3　Local Moran index (LISA) of spatial correlation of agricultural carbon emissions in cities in Henan Province from 2000 to 2021

2.4 河南省农业碳排放驱动因素分析

2.4.1 农业碳排放驱动因素分析与筛选 基于上述对农业碳排放时空演变研究,本文选取了翻耕面积(V2)、农业机械总动力(V3)、第一产业 GDP(V4)、农村人口数量(V5)、人均第一产业 GDP(V6)、单位第一产业 GDP 碳排放量(V7)、行政区划面积(V8)、单位耕地面积碳排放量(V9)、化肥和农药使用强度(V10)、城镇化率(V11)共 10 个驱动因素与各地市碳排放量(V1)进行 Pearson 相关性分析.根据分析后所得相关性热图(图 4)所示,农业碳排放与翻耕面积、农业机械总动力、第一产业 GDP、农村人口数量以及行政区划面积均表现出显著(P<0.01)的正相关性,与城镇化率则表现出显著(P<0.01)的负相关性.单位第一产业 GDP 碳排放量和单位耕地面积碳排放量在 2000 年表现为极显著,之后的显著性并不强.

2.4.2 随机森林重要性分析 整合河南省 2000~2021 年各地市筛选后的农业碳排放驱动因素,利用 Python3.13 构建随机森林模型,最终获得的解释变量重要性排序如图 5 所示.

通过模型生成的结果可以看出,在 2000~2021 年间,翻耕面积(V2)对河南省农业碳排放的影响最大,其次是农村人口数量(V5)、行政区面积(V8)、农业机械总动力(V6),城镇化率(V11)以及第一产业 GDP(V4)也对河南省农业碳排放有一定的影响.

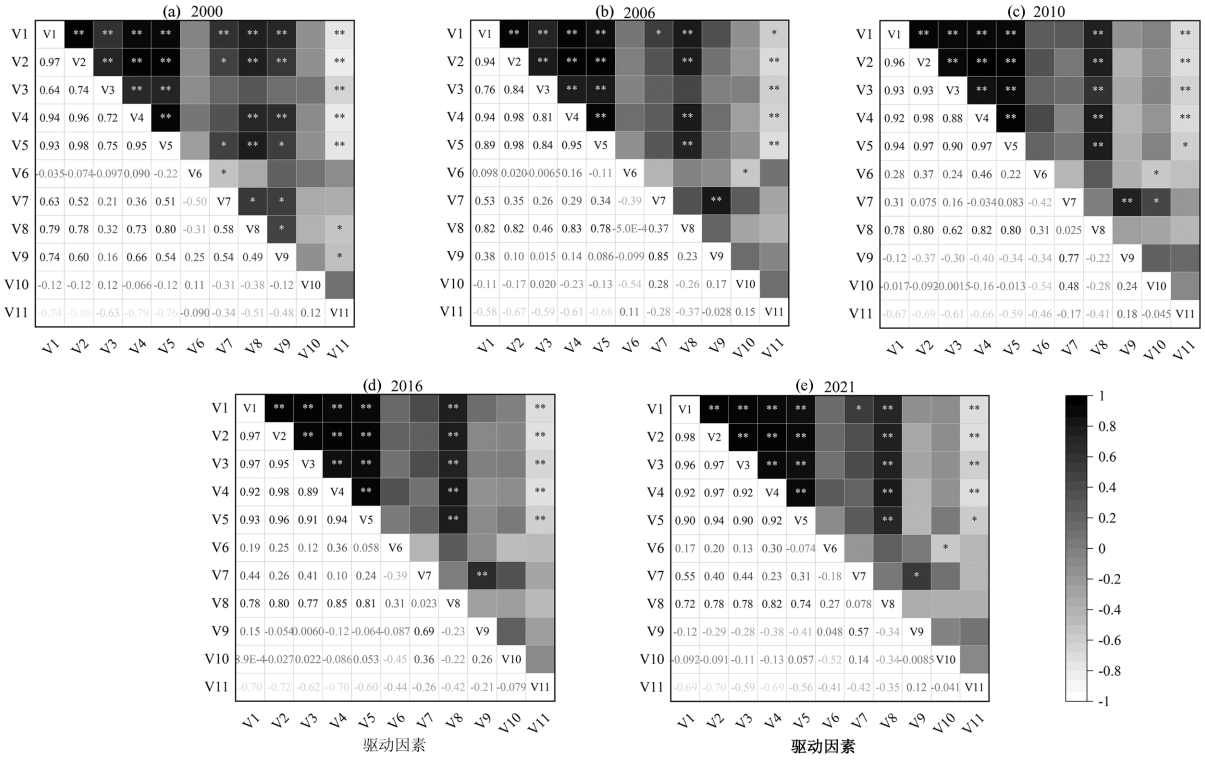


图 4 2000~2021 年河南省各地市碳排放与其影响因素的相关性

Fig.4 Correlation heat map of carbon emissions and their influencing factors in cities in Henan Province from 2000 to 2021

V1 表示碳排放量,V2 表示翻耕面积,V3 表示农业机械总动力,V4 表示第一产业 GDP,V5 表示农村人口数量,V6 表示人均第一产业 GDP,V7 单位第一产业 GDP 碳排放量,V8 表示行政区划面积,V9 表示单位耕地面积碳排放量,V10 表示化肥和农药使用强度,V11 表示城镇化率,下同.2.5 河南省农业碳排放趋势预测

*P≤0.05,**P≤0.01

预测结果如图 6 所示,在基准、低碳、高碳 3 种情景下,河南省农业碳排放均呈现下降趋势,2030 年碳排放量分别为 3378.79 万 t、3367.30 万 t 和 3389.78 万 t.虽然 2022 年农业碳排放略高于 2021 年,但观察 2000~2021 年数据发现,2006 年河南省农业碳排放量为 5849.52 万 t,远高于 2022 年高碳情景下的 3609.42 万 t,说明河南省农业碳排放已于 2006 年达峰值.3 种情景下,2022~2030 年河南省农业碳排放与 2006 年达峰状态相比下降范围分别为 2241.55~2470.73 万 t,2245.67~2482.22 万 t,2240.10~2459.74

万 t.

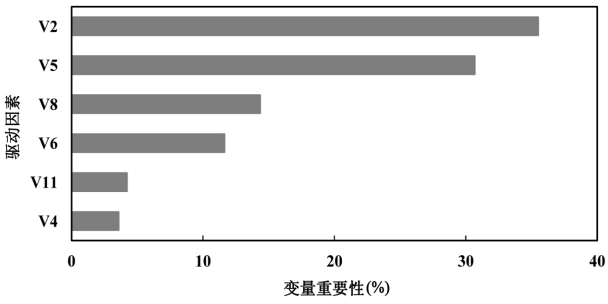


图 5　2000~2021 年河南省农业碳排放驱动因素的重要性

Fig.5　The importance of the driving factors of agricultural carbon emissions in Henan Province from 2000 to 2021

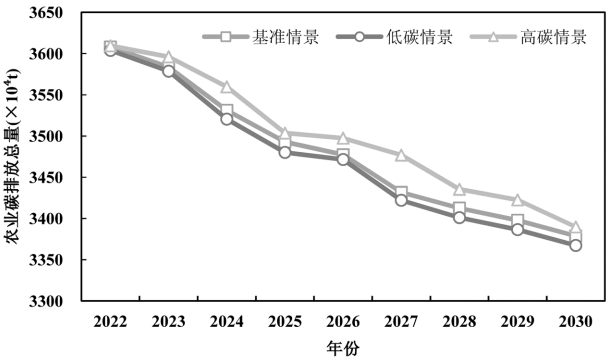


图 6　不同情景下 2022~2030 年河南省农业碳排放趋势预测

Fig.6　Projected trends of agricultural carbon emissions in Henan Province under different scenarios from 2022 to 2030

3　讨论

根据研究结果和同期河南省相关农业政策,可将全省农业碳排放趋势分为四个阶段:(1)第一阶段为 2000~2006 年,为持续上升期,农业碳排放量由 2000 年的 4720.38 万 t 增长到 2006 年的 5849.52 万 t,增幅高达 19.30%,3 类碳源导致的碳排放均在增加且畜牧养殖增加的碳排放量最为明显.这是由于在此阶段河南省出台了一系列惠农政策,激发了农民的生产积极性,例如 2005 年河南省发布了《河南省人民政府关于免征农业税的通知》,率先废除农业税,并进行农机项目补助,各项农业生产活动迅速开展造成农业碳排放量的大幅增长.(2)第二阶段为 2007~2008 年,为快速下滑期,农业碳排放量下降了 25.47%,土地管理和粮食种植类碳排放仍在增长,但畜牧养殖类碳排放却大幅下降,主要原因为自 2004 年起国内粮食价格大幅上涨,国家开始压缩耗粮型畜牧业导致猪、牛、羊的饲养量大幅减少[34],进而引起河南省的农业碳排放量下跌.(3)第三阶段为 2009~2015 年,为稳定波动期,该阶段农业碳排放量比较稳定,变化幅度不大.(4)第四阶段为 2016~2021 年,为缓慢下滑期,土地管理和畜牧养殖类碳排放下降,粮食种植类碳排放小幅度增加,推测可能是由于城市发展迅速,城镇化率提高,导致大量农用地荒废或改为建设用地,耕地面积减少,但随着耕作技术的提高,粮食的总产量并没有减少.此外,近年来农业部发布《到 2000 年化肥、农药零增长行动方案》等一系列文件,并在河南开展废弃农膜回收试点[35],这些措施都对农业碳排放的减排起到积极的促进作用.

由于河南各地市水热条件分布不均匀,经济发展不平衡,导致各地市农业碳排放也存在一定的差异.结合莫兰指数结果发现,农业碳排放高值区主要位于南阳市、驻马店市、周口市和商丘市等豫东南平原地区,地势较为平坦,耕地面积广阔;低值区主要位于鹤壁市、济源市等豫西丘陵地区,地形起伏较大,耕地面积相对较小,这与张志高等[36]的研究结果一致.

基于随机森林模型对河南省农业碳排放驱动因素重要性分析结果,翻耕面积为影响河南省农业碳排放第一驱动因素,农业碳排放与翻耕面积成正比,可能原因为翻耕时农机具能够有效地疏松耕作层,加快土壤呼吸速率和农田生态系统碳循环,进而增加了农业碳排放[37].农村人口数量是第二大关键驱动因素,随着农业生产不断朝机械化、现代化的方向发展,释放了大量的劳动力,提高了农业生产效率,从而降低了农业碳排放量[38].城镇化率与农业碳排放呈负相关关系,章楠楠等[11]的研究中也表明,随着城镇二、三产业占比的提高,会抑制农业的生产.

基于本研究低碳、基准、高碳 3 种情景下预测的结果,发现河南省农业碳排放从 2022 年起均持续降低,这与高晨曦等基于径向基核函数 ε−支持向量机农业碳排放预测模型预测的河南省农业碳排放结果一致[19].此外,张爽爽对河南省农业碳排放测算的结果与本文类似[39],在 2006 年同样达到峰值.但显然与高碳情景相比,低碳情景的碳排放减少更明显,考虑到 2060 年前我国要实现碳中和目标,未来仍需控制农业温室气体的排放.结合河南省农业碳排放时空演变趋势和驱动因素,未来河南省农业碳排放

的减排可以从改善土壤环境,实行保护性耕作,利用免耕、秸秆还田等措施,增强土壤固碳能力,以及发展智能化、低碳化绿色农机,减少机械重复作业造成的农业碳排放等方面着手.

4 结论

4.1 在时间上,河南省农业碳排放先上升后下降,在2006年达到峰值5849.52万t,其中畜牧养殖导致的碳排放的占比最大,其次是土地管理和粮食种植,2021年河南省碳排放较2006年下降40.60%;在空间上,河南省各地市农业碳排放分布不均,整体呈现“东南高、西北低”的特征,空间格局具有显著的集聚性且集中于豫南平原区.

4.2 土地翻耕面积、农村人口数量、行政区面积以及农业机械总动力是影响河南省农业碳排放最主要的驱动因素,城镇化率是主要的负向驱动因素.

4.3 在基准、低碳、高碳3种情景下,随机森林模型预测出的2022~2030年河南省农业碳排放均呈下降趋势,因此河南省农业碳排放已于2006年达峰值5849.52万t.在3种情景下,2022~2030年河南省农业碳排放与2006年达峰状态相比下降范围分别为2241.55~2470.73万t,2245.67~2482.22万t,2240.10~2459.74万t.

参考文献:

[1] 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 Y, Li C H, Li J W, 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.

[2] Johnson J M F, Franzluebbers A J, Weyers S L. Agricultural opportunities to mitigate greenhouse gas emissions [J]. Environmental Pollution, 2007,150(1):107−124.

[3] 曾贤刚,余 畅,孙雅琪.中国农业农村碳排放结构与碳达峰分析 [J]. 中国环境科学, 2023,43(4):1906−1918.
Zeng X G, Yu C, Sun Y Q. Carbon emissions structure and carbon peak of agriculture and rural areas in China [J]. China Environmental Science, 2023,43(4):1906−1918.

[4] 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 [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2002,91(1−3):217−232.

[5] 谢 婷,张 慧,何家军,等.华中地区畜牧业温室气体排放特征分析与预测 [J]. 中国环境科学, 2020,40(2):564−572.
Xie T, Zhang H, He J J, et al. Characteristics and prediction of greenhouse gas emissions from livestock industry in Central China [J]. China Environmental Science, 2020,40(2):564−572.

[6] 何艳秋,戴小文.中国农业碳排放驱动因素的时空特征研究 [J]. 资源科学, 2016,38(9):1780−1790.
He Y Q, Dai X W. Phase characteristics and regional differences in agriculture carbon emissions in China [J]. Resources Science, 2016,38(9):1780−1790

[7] 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 Y H, Tian Y, Zhou L L. 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.

[8] 郑 瑞,姜 春,谢 臻,等.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 [J]. 水土保持通报, 2024,44(3):430−440,451.
Zheng R, Jiang C, Xie Z, et al. Accounting and analyzing spatial−temporal evolution characteristics of agricultural carbon emissions at county units of Fujian Province during 2001~2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(3):430−440,451.

[9] 刘丽辉,徐 军.基于扩展的STIRPAT模型的广东农业碳排放影响因素分析 [J]. 科技管理研究, 2016,36(6):250−255.
Liu L H, Xu J. Analysis of influencing factors of agricultural carbon emissions in Guangdong Province with the extended STIRPAT Model [J]. Science and Technology Management Research, 2016,36(6):250−255.

[10] 黄晓慧,杨 飞,陆 迁.城镇化、空间溢出效应与农业碳排放——基于2007~2019年省级面板数据的实证分析 [J]. 华东经济管理, 2022,36(4):107−113.
Huang X H, Yang F, Lu Q. Urbanization, spatial spillover effect, and agricultural carbon emissions: Empirical analysis based on the data of Provincial Panel from 2007 to 2019 [J]. East China Economic Management, 2022,36(4):107−113.

[11] 章楠楠,徐皓帆,李志文,等.基于机器学习的广东省县域农业碳排放时空演变及驱动因素研究 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024,32(12):1994−2007.
Zhang N N, Xu H F, Li Z W, et al. Spatiotemporal evolution and driving factors of agricultural carbon emissions at county level in Guangdong Province based on machine learning [J]. Chinese Journal of Eco−Agriculture, 2024,32(12):1994−2007.

[12] 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):940−952,989.
Li M D, Zhou D M, Zhu X Y, 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.

[13] 李 慧,李 玮,姚西龙,.基于GWR模型的农业碳排放影响因素时空分异研究 [J]. 科技管理研究, 2019,39(18):238−245.
Li H, Li W, Yao X L. Study on spatial and temporal variation of impacting factors of agricultural carbon emissions based on the GWR Model [J]. Science and Technology Management Research, 2019, 39(18):238−245.

[14] 杨思存,霍 琳,王成宝,等.基于STIRPAT模型的甘肃省农业碳排放特征分析 [J]. 干旱区地理, 2023,46(9):1493−1502.
Yang S C, Huo L, Wang C B, et al. Characteristics of agricultural carbon emissions in Gansu Province based on STIRPAT model [J]. Arid Land Geography, 2023,46(9):1493−1502.

[15] 蒋添诚,胡 纯,王巧稚,等.湖北省农业碳排放时空特征及脱钩研究 [J]. 环境污染与防治, 2021,43(11):1476−1480.
Jiang T C, Hu C, Wang Q Z, et al. Research on spatial−temporal characteristics and decoupling of agricultural carbon emissions in Hubei [J]. Environmental Pollution & Control, 2021,43(11):1476−1480.

[16] 彭文甫,周介铭,徐新良,等.基于土地利用变化的四川省碳排放与碳足迹效应及时空格局 [J]. 生态学报, 2016,36(22):7244−7259.

Peng W F, Zhou J M, Xu X L, et al. Effect of land use changes on the temporal and spatial patterns of carbon emissions and carbon footprints in the Sichuan Province of Western China, from 1990 to 2010 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(22):7244−7259.

[17] 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 Q, Cai W M, Gu X L, 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.

[18] Xu G Y, Schwarz P, Yang H L. Determining China′s CO_2 emissions peak with a dynamic nonlinear artificial neural network approach and scenario analysis [J]. Energy Policy, 2019,128:752−762.

[19] 高晨曦,卢秋萍,欧年青,等.“双碳”目标下河南省农业碳排放影响因素及预测研究 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022,30(11):1842−1851.
Gao C X, Lu Q P, Ou N Q, et al. Research on influencing factors and prediction of agricultural carbon emissions in Henan Province under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality goal [J]. Chinese Journal of Eco−Agriculture, 2022,30(11):1842−1851.

[20] 邓　路,袁圣博,白　萍,等.基于机器学习算法的新疆农业碳排放评估及驱动因素分析 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023,31(2):265−279.
Deng L, Yuan S B, Bai P, et al. Evaluation of agricultural carbon emissions in Xinjiang and analysis of driving factors based on machine learning algorithms [J]. Chinese Journal of Eco−Agriculture, 2023,31(2):265−279.

[21] 刘慧甜,胡大伟.基于机器学习的交通碳排放预测模型构建与分析 [J]. 环境科学, 2024,45(6):3421−3432.
Liu H T, Hu D W. Construction and analysis of machine learning based transportation carbon emissions prediction model [J]. Environmental Science, 2024,45(6):3421−3432.

[22] 伍芬琳,李　琳,张海林,等.保护性耕作对农田生态系统净碳释放量的影响 [J]. 生态学杂志, 2007,(12):2035−2039.
Wu F L, Li L, Zhang H L, et al. Effects of conservation tillage on net carbon flux from land ecosystems [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007,(12):2035−2039.

[23] 段华平,张　悦,赵建波,等.中国农田生态系统的碳足迹分析 [J]. 水土保持学报, 2011,25(5):203−208.
Duan H P, Zhang Y, Zhao J B, et al. Carbon footprint analysis of farmland ecosystem in China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011,25(5):203−208.

[24] Dubey A, Lal R. Carbon footprint and sustainability of agricultural production systems in Punjab, India, and Ohio, USA [J]. Journal of Crop Improvement, 2009,23(4):332−350.

[25] 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 J S, Hu H. Calculation of greenhouse gases emissions from agricultural production in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2012,22(7):21−27.

[26] 胡向东,王济民.中国畜禽温室气体排放量估算 [J]. 农业工程学报, 2010,26(10):247−252.
Hu X D, Wang J M. Estimation of livestock greenhouse gases discharge in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010,26(10):247−252.

[27] Monidipa D K S G. Measuring Moran's I in a cost−efficient manner to describe a land−cover change pattern in large−scale remote sensing imagery [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017,10(6):2631−2639.

[28] Anselin L. Local indicators of spatial association—LISA [J]. Geographical analysis, 1995,27(2):93−115.

[29] Breiman L. Random forests [J]. Machine Learning, 2001,45:5−32.

[30] 王巧玲,李双成.云南省碳排放时空演变特征及影响因素分析 [J]. 中国环境科学, 2025,45(1):528−537.
Wang Q L, Li S C. Dynamics of carbon emissions in Yunnan Province: Spatiotemporal characteristics and influencing factors [J]. China Environmental Science, 2025,45(1):528−537.

[31] 刘自敏,张　娅.中国碳排放的时空跃迁特征、影响因素与达峰路径设计 [J]. 西南大学学报(社会科学版), 2022,48(6):99−112.
Liu Z M, Zhang Y. Temporal and spatial transition characteristics, influencing factor and peak path design of carbon emissions in China [J]. Journal of Southwest University (Social Sciences Edition), 2022,48(6):99−112.

[32] 张雪梅,曹丹丹,王　鑫,等.中国省域能源消费二氧化碳排放状态分析与情景预测 [J]. 生态经济, 2023,39(12):26−32.
Zhang X M, Cao D D, Wang X, et al. Analysis on status and scenario forecast of carbon dioxide emissions in China’s provincial energy consumption [J]. Ecological Economy, 2023,39(12):26−32.

[33] 张志国,杨贵玲.近 30 年河南省农作物播种面积的时序特征及趋势预测 [J]. 贵州农业科学, 2012,40(10):218−221.
Zhang Z G, Yang G L. Sequential characters and trend prediction in sown area of crops from 1978 to 2008 in Henan Province [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2012,40(10):218−221.

[34] 姚成胜,钱双双,毛跃华,等.中国畜牧业碳排放量变化的影响因素分解及空间分异 [J]. 农业工程学报, 2017,33(12):10−19.
Yao C S, Qian S S, Mao Y H, et al. Decomposition of impacting factors of animal husbandry carbon emissions change and its spatial differences in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(12):10−19.

[35] 杨萌萌.河南省农业化学农资减量增效研究 [D]. 郑州:河南财政法大学, 2022.
Yang M M. Research on chemical fertilizer and pesticide reduction and efficiency enhancement in Henan province [D]. Zhengzhou: Henan University of Economics and Law, 2022.

[36] 张志高,袁　征,张翠贞,等.河南省农业碳排放时空特征与脱钩弹性研究 [J]. 江苏农业科学, 2017,45(17):281−285.
Zhang Z G, Yuan Z, Zhang C Z, et al. Spatial−temporal characteristics and decoupling elasticity of agricultural carbon emissions in Henan Province [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017,45(17):281−285.

[37] 安崇霄,张永杰,杜孝敬,等.不同耕作措施对伊犁河谷夏大豆农田土壤碳排放、碳平衡及经济效益的影响 [J]. 生态学杂志, 2020,39(3):812−821.
An C X, Zhang Y J, Du X J, et al. Effect of different tillage measures on soil carbon emissions, carbon balance and economic benefits of summer soybean cropland in lli River valley [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020,39(3):812−821.

[38] 王树芬.山西省农业碳排放时空特征、影响因素及趋势预测 [D]. 太原:山西大学, 2023.
Wang S F. Characteristics, influence factors and prediction of agricultural carbon emissions in Shanxi Province [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2023.

[39] 张爽爽.河南省农业碳排放时空特征及空间效应研究 [D]. 郑州:河南农业大学, 2024.
Zhang S S. Research on the temporal and spatial characteristics and spatial effects of agricultural carbon emissions in Henan Province [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2024.

作者简介：史新杰(1990−),男,河南焦作人,讲师,博士,主要从事农业水土绿色高效研究.发表论文 10 篇.shixinjie@henau.edu.cn.