

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2025.12.046

李玉波, 徐迟, 高标, 等. “双碳”目标下吉林省农业碳排放影响因素及情景预测——基于 STIRPAT 模型和支持向量回归模型[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(12): 355–362

Li Yubo, Xu Chi, Gao Biao, et al. Influencing factors and scenario prediction of agricultural carbon emissions in Jilin Province under the “dual carbon” goal: Based on the STIRPAT model and the support vector regression model [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(12): 355–362

## “双碳”目标下吉林省农业碳排放影响因素及情景预测\*

——基于 STIRPAT 模型和支持向量回归模型

李玉波, 徐迟, 高标, 杨淑杰

(白城师范学院旅游与地理科学学院, 吉林白城, 137000)

**摘要:** 农业碳减排是中国实现“双碳”目标的主要举措之一。为此, 以农业生产物资投入、水稻种植、畜牧养殖温室气体排放源为数据样本, 基于 IPCC 碳排放系数法测算吉林省 2000—2022 年的农业碳排放量; 利用 STIRPAT 扩展模型, 分析影响吉林省农业碳排放的各种因素; 建立支持向量回归(SVR)模型, 预测 2023—2030 年吉林省不同情景下农业碳排放量及变化趋势。研究结果表明: 2000—2022 年吉林农业碳排放量呈“升降交替”的变化趋势, 2008 年达到峰值, 为 38 212.2 kt, 碳排放强度呈下降趋势, 年平均下降率为 5.52%。农村人口、农业人均 GDP、农用机械总动力、城镇化率、农民人均纯收入、农村投资额、农业产值比率每发生 1% 的变动, 将分别引起吉林省农业碳排放量 0.232%、0.212%、0.125%、-0.094%、0.105%、0.807%、-0.087% 的变动。在基准情景、低碳情景和强低碳情景下, 2023—2030 年吉林省农业碳排放量均呈持续下降的变化趋势, 到 2030 年预测值分别为 33 840.5 kt、33 289.9 kt 和 33 002.9 kt。综上, 吉林省近年来的绿色低碳农业发展取得一定进展, 已基本实现农业领域碳达峰, 但今后还应根据实际情况采取相应的措施继续推动绿色农业发展, 以加速全省“双碳”目标的实现。

**关键词:** 农业碳排放; 扩展 STIRPAT 模型; 支持向量回归; 情景模拟; 吉林省

**中图分类号:** F323.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-5553 (2025) 12-0355-08

### Influencing factors and scenario prediction of agricultural carbon emissions in Jilin Province under the “dual carbon” goal: Based on the STIRPAT model and the support vector regression model

Li Yubo, Xu Chi, Gao Biao, Yang Shujie

(College of Tourism and Geographical Sciences, Baicheng Normal University, Baicheng, 137000, China)

**Abstract:** Agricultural carbon emission reduction is one of the main measures to achieve China's “dual carbon” goal. In this paper, the agricultural carbon emissions of Jilin Province from 2000 to 2022 were calculated based on the IPCC carbon emission coefficient method, taking the greenhouse gas emission sources of agricultural production inputs, rice planting, and animal husbandry as data samples. Using the STIRPAT extended model, various factors affecting agricultural carbon emissions in Jilin Province were analyzed. A support vector machine regression (SVR) model was established to predict the agricultural carbon emissions and their change trends under different scenarios in Jilin Province from 2023 to 2030. The results showed that: from 2001 to 2022, Jilin's agricultural carbon emissions generally showed an upward and downward trend, reaching a peak of 38 212.2 kt in 2008, and the carbon emission intensity showed a downward trend, with an average annual decline rate of 5.52%. Every 1% change in rural population, per capita agricultural GDP, agricultural mechanization level, urbanization rate, per capita net income of farmers, rural investment, and agricultural output value

收稿日期: 2024 年 12 月 10 日 修回日期: 2025 年 2 月 14 日

\* 基金项目: 吉林省教育厅科技项目(JJKH20230027SK); 吉林省高等教育教学改革研究课题(20224BR01C500HE)

第一作者: 李玉波, 女, 1972 年生, 吉林大安人, 硕士, 教授; 研究方向为盐碱地治理与生态修复。E-mail: lyb\_bc008@163.com

通讯作者: 杨淑杰, 女, 1968 年生, 吉林镇赉人, 硕士, 副教授; 研究方向为区域经济发展。E-mail: yangshujie@126.com

ratio will cause changes of 0.232%, 0.212%, 0.125%, -0.094%, 0.105%, 0.807% and -0.087% of agricultural carbon emissions in Jilin Province, respectively. Under the baseline, low-carbon and strong low-carbon scenarios, the agricultural carbon emissions in Jilin Province from 2023 to 2030 will continue to decline, and the predicted values by 2030 will be 33 840.5 kt, 33 289.9 kt and 33 002.9 kt, respectively. The results show that Jilin Province has made some progress in green and low-carbon agriculture in recent years, and has basically achieved the peak of carbon emissions in the agricultural sector, but in the future, corresponding measures should be taken to promote the development of green agriculture according to the actual situation to accelerate the realization of the province's "double carbon" goal.

**Keywords:** agricultural carbon emissions; extending the STIRPAT model; support vector regression; scenario simulation; Jilin Province

## 0 引言

人类生产活动使 CO<sub>2</sub> 等温室气体排放量增加,进而导致全球气候变暖。为减少温室气体排放,世界各国已通过全球协议达成碳减排的共识,中国也参与其中,提出 2030 年实现碳达峰、2060 年实现碳中和的目标。为此,各行各业均在积极落实减碳目标,发力绿色践行。农业作为国民经济发展的部门,既是碳排放源,又是碳汇吸收系统。农业是重要的温室气体排放源,我国作为农业大国,农业碳排放量仅次于工业。经测算,农业农村温室气体排放约占我国碳排放总量的 17%<sup>[1]</sup>。因此,如何加快推进农业碳减排,确保农业 2030 年前实现碳达峰,2060 年前实现碳中和,成为当前推进我国农业高质量发展的重要目标之一<sup>[2]</sup>。

近年来,农业碳排放问题受到许多学者的关注,现有成果主要是从宏观和微观层面上进行碳排放量测算、时空演变、影响因素、排放效率及排放预测等方面的研究。曾贤刚等<sup>[3]</sup>以种植业、畜牧业和农村居民生活为碳源测算中国 2001—2019 年的碳排放量,并按地区的特殊情况分析碳排放的主要影响因素;田云等<sup>[4]</sup>测度了中国省域农业碳排放效率,得出中国省域农业碳排放效率与经济增长的耦合协调发展水平在一定程度上呈现出“弱者恒弱”的空间集聚局面的结论;高晨曦等<sup>[5]</sup>测算了河南省农业碳排放量,并利用扩展的 STIRPAT 模型定性与定量分析了河南省农业碳排放的影响因素;张再杰等<sup>[6]</sup>对 2011—2020 年湖北省农业碳排放进行测度,并利用 K—means 聚类算法,对湖北省 73 个县域单元进行“排放—效率”类型划分。目前,关于农业碳排放的预测多采用灰色模型 GM(1,1)和 STIRPAT 模型等传统预测方法。何丽博等<sup>[7]</sup>利用灰色模型 GM(1,1)对甘肃省农业碳排放量进行预测,结果表明甘肃省的农业碳排放量在 2025 年之后仍在增长,但增长速度明显变慢;王树芬等<sup>[8]</sup>基于 STIRPAT 模型预测不同情境下 2021—2030 年山西省的农业碳排放量,结果显示其呈下降趋势。传统的灰色模型 GM(1,1)和

STIRPAT 模型不但计算过程复杂,并且容易出现过拟合现象,对复杂的非线性农业碳排放系统而言,由于缺乏学习和测试过程,存在非线性关系模糊、泛化能力不足等弊端<sup>[5]</sup>。支持向量回归(SVR)模型是建立在统计学习的基础上,它是用非线性映射将数据映射到高维数据特征空间中,在高维数据特征空间中实现样本由非线性到线性的转变,然后进行线性拟合。相比常规的回归模型,在解决小样本、非线性和高维模式识别等问题上具有优势<sup>[9]</sup>。已有关于农业碳排放的预测模型,较少考虑模型在机器学习算法方面的研究,因此,本文采用机器学习方法进行农业碳排放的预测,提高模型的预测精度和泛化能力。

吉林省地处世界三大黑土带的核心区,拥有丰富的农业资源和良好的农业基础。作为农业大省,吉林省减排固碳持续面临新的更高要求,既要增产增收,又要减量减排,农业发展如何平衡好二者的关系,做到协同推进是目前急需解决的问题。关于吉林省农业碳排放量的测算问题,高标等<sup>[10]</sup>估算了施用化肥、农药、农膜、农用柴油以及农村用电量产生的碳排放量;李菲菲等<sup>[11]</sup>在前者基础上增加了畜禽养殖中动物肠道发酵、粪便管理和秸秆焚烧产生的碳排放,但基于不同情景下吉林省农业碳排放预测的研究鲜有报道。基于此,本文在上述研究的基础上,利用有关统计数据核算 2000—2022 年吉林省农业的碳排放总量及碳排放强度,构建扩展的 STIRPAT 模型,对农业碳排放的各种影响因素进行分析,建立基于支持向量回归(SVR)的农业碳排放预测模型,分情景预测 2023—2030 年吉林省农业碳排放量及变化趋势,补充和完善吉林省农业碳排放的研究,为吉林省制定农业发展政策和实现碳达峰、碳中和目标提供参考。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 研究方法

#### 1.1.1 农业碳排放测算

基于 IPCC 碳排放系数法,参考已有研究成果<sup>[12]</sup>,

结合吉林省种植业和畜牧业发展实际,选取农业生产物资投入、水稻种植、畜牧养殖 3 类温室气体排放源建立农业碳排放测算因子体系(表 1),利用式(1)对吉林省农业碳排放进行测算。

$$E = \sum E_i = \sum C_i \times F_i \times GWP_i \quad (1)$$

式中:  $E$ ——农业碳排放总量,以  $\text{CO}_2$  进行表征;

$E_i$ ——第  $i$  类温室气体排放源的  $\text{CO}_2$  排放量;

$C_i$ ——第  $i$  类温室气体排放源的使用量;

$F_i$ ——第  $i$  类温室气体排放源的碳排放系数;

$GWP_i$ ——第  $i$  类温室气体转换为  $\text{CO}_2$  的系数,  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的转换系数分别为 25 和 298。

表 1 农业温室气体排放源与碳排放系数

Tab. 1 Agricultural greenhouse gas emission sources and carbon emission coefficients

| 温室气体排放源  | 温室气体类型 | 碳排放系数                | 转换系数                                       |     |
|----------|--------|----------------------|--|-----|
| 农业生产物资投入 | 化肥     | 3.284 0 kg/kg        | 1  |     |
|          | 农药     | 18.091 7 kg/kg       | 1  |     |
|          | 农膜     | 18.993 3 kg/kg       | 1  |     |
|          | 农用柴油   | 2.173 2 kg/kg        | 1  |     |
|          | 农村火电   | 0.997 3 kg/(kW·h)    | 1  |     |
| 水稻种植     | 中稻     | $\text{CH}_4$        | 0.421 5 t/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ) | 25  |
|          |        | $\text{N}_2\text{O}$ | 2.98 kg/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ )   | 298 |
| 畜牧养殖     | 牛      | $\text{CH}_4$        | 56.39 kg/(head·a)                          | 25  |
|          |        | $\text{N}_2\text{O}$ | 1.28 kg/(head·a)                           | 298 |
|          | 猪      | $\text{CH}_4$        | 5 kg/(head·a)                              | 25  |
|          |        | $\text{N}_2\text{O}$ | 0.53 kg/(head·a)                           | 298 |
|          | 羊      | $\text{CH}_4$        | 5.17 kg/(head·a)                           | 25  |
|          |        | $\text{N}_2\text{O}$ | 0.33 kg/(head·a)                           | 298 |

注:畜牧养殖  $\text{CH}_4$  排放系数为胃肠发酵与粪便排放之和,  $\text{N}_2\text{O}$  排放由粪便排放过程产生。head 表示头或只, a 表示年。

### 1.1.2 STIRPAT 农业碳排放影响因素扩展模型

STIRPAT 环境评估影响因素扩展模型起源于 IPAT 模型,其优势是能将影响环境的多种人文驱动因素综合考虑,根据不同的衡量指标将模型进行扩展,以构建一个更符合实际的 STIRPAT 模型,近些年也在碳排放研究领域中得到广泛运用<sup>[13]</sup>。为能更有效地分析吉林省农业碳排放的影响因素,借鉴已有文献的研究成果,并考虑吉林省的实际情况,最终选取农村人口、农业人均 GDP、农用机械总动力、城镇化率、农民人均纯收入、农村投资额和农业产值比率作为影响农业碳排放的主要因素<sup>[12]</sup>,以此构建农业碳排放与各影响因素之间的 STIRPAT 扩展模型,如式(2)所示。

$$E = kP^a A^b T^c U^d R^e C^f V^g \quad (2)$$

式(2)两边同时取对数,可将非线性模型转换为线性模型。对数变换后模型如式(3)所示。

$$\ln E = \ln k + a \ln P + b \ln A + c \ln T + d \ln U + e \ln R + f \ln C + g \ln V \quad (3)$$

式中:  $E$ ——吉林省农业碳排放总量,kt;

$k$ ——常数;

$P$ ——农村人口,万人;

$A$ ——农业人均 GDP,万元/人,表征富裕程度;

$T$ ——农用机械总动力,  $\times 10^4$  kW,表征农业技术水平;

$U$ ——城镇化率,%,表征城市化状况;

$R$ ——农民人均纯收入,元,表征社会关注因素;

$C$ ——农村投资额,亿元,表征资本因素;

$V$ ——农业产值比率,%,表征产业结构状况;

$a, b, c, d, e, f, g$ ——弹性系数,表示影响因素  $P, A, T, U, R, C, V$  每发生 1% 的变化,将引起  $E$  的  $a\%, b\%, c\%, d\%, e\%, f\%, g\%$  的变化。

### 1.1.3 SVR 农业碳排放预测模型

支持向量回归(SVR)算法是一种基于统计学习理论的机器学习方法,包括径向基(Rbf)核函数、线性(Linear)核函数、多项式(Poly)核函数和 S 型(Sigmoid)核函数。其中,径向基(Rbf)核函数因具有处理非线性数据效果好、设置的参数少等优点,得到广泛应用<sup>[14]</sup>。因此,参考文献[15]中的 SVR 运行机理,构建基于径向基(Rbf)核函数的 SVR 农业碳排放预测模型,并设置错误项惩罚因子  $C$  为 4.0。

1) 采用 Min—Max 方法对样本数据进行归一化处理,以消除不同指标因量纲对模型产生的影响。归一化处理方程如式(4)所示。

$$\begin{cases} x_i' = \frac{x_i - \min x_i}{\max x_i - \min x_i} & i = 1, 2, \dots, n \\ y_i' = \frac{y_i - \min y_i}{\max y_i - \min y_i} & i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $x_i$ ——原始输入值;

$y_i$ ——原始输出值;

$x_i'$ ——归一化后的输入值;

$y_i'$ ——归一化后的输出值。

2) 从农业碳排放样本空间中随机选取  $m$  个样本组作为训练集,剩下  $n-m$  个样本组作为测试集来验证模型的准确性,选用径向基核函数作为预测模型。

3) 先由训练集数据学习到模型的最优解和回归函数  $f(x)$ ,再将测试集样本数据输入到回归函数  $f(x)$  中,输出拟合值,最后将拟合值与实测值进行线性回归,根据相关系数  $R^2$  和均方误差  $MSE$  判断模型的拟

合度和学习推广能力。

4) 将归一化处理后的预测年限的农业碳排放影响因素  $x_i'$  值, 输入学习到的最优回归函数  $f(x)$  中, 输出结果, 再依照式(5)进行反归一化, 即得到预测年限的农业碳排放量  $y_i$ 。

$$y_i = f(x_i')(\max y_i - \min y_i) + \min y_i \quad i=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

## 1.2 数据来源

本研究中温室气体排放源的原始数据来自《吉林省统计年鉴》(2001—2023年)和《中国农村统计年鉴》(2001—2023年)。其中, 化肥施用量采用折纯量表示; 农药、农膜、农用柴油和农村用电量数据均以当年实际使用量为准; 种植业以当年水稻的种植面积为准; 动物养殖中猪、牛、羊都以当年末的存栏数量为准。

## 2 结果与分析

### 2.1 农业碳排放量时序特征分析

根据式(1)计算的2000—2022年吉林省农业碳排放量和碳排放强度变化趋势如图1所示。结果表明, 研究期内吉林省农业碳排放总量整体呈现“升降交替”的变化趋势, 并于2008年达到峰值, 为38 212.2 kt。2022年吉林省农业碳排放量为37 687.8 kt, 相比于峰值减少524.4 kt, 年平均递减率为0.09%。从农业碳排放结构来看, 农业生产物资投入碳排放贡献率最大, 平均贡献率为39.33%, 其次是畜牧养殖发酵和水稻种植, 年平均贡献率分别为25.28%、23.92%, 畜牧养殖粪便管理贡献率最低, 为11.47%。

农业生产物资投入和水稻种植产生的碳排放量呈波动增长态势。农业生产物资投入产生的碳排放由2000年的7 712.7 kt增加到2022年的16 188.0 kt, 年平均增长率为3.28%; 水稻种植产生的碳排放由2000年的5 529.7 kt增加到2022年的9 519.7 kt, 年平均增长率为2.39%。其原因是吉林省作为农业大省, 在维护国家粮食安全方面有着举足轻重的战略地位, 并且随着吉林省“百亿斤粮食”“千亿斤粮食”产能工程的推进, 耕地面积逐渐扩大, 农业机械化与现代化水平等逐步提高, 进而导致化肥、农膜、农用柴油等农业生产物资的使用量增加, 从而使其产生的碳排放量也呈现出增长的趋势。

畜牧养殖产生的碳排放与碳排放总量变化趋势基本一致。2000—2008年呈持续上升趋势, 碳排放量由2000年的11 284.5 kt增加到2008年的19 003.0 kt, 年平均增长率为5.96%, 究其原因: 吉林省是全国重要的畜牧业优势产区, 养殖业是农民收入的主要来源之一,

2008年实施了畜牧业优先发展战略, 畜牧业经济增长迅猛, 势头强劲。在此期间, 吉林省的猪、牛、羊等数量均呈显著增加趋势; 2009—2011年呈下降趋势, 碳排放由2009年的12 662.1 kt降至2011年的11 602.1 kt, 年平均下降率为2.96%, 其原因是2009年受金融危机的影响, 农产品市场萎缩, 生猪养殖业大幅波动, 再加上肉牛养殖成本高、周期长、风险高, 越来越多的养殖户选择放弃, 因此, 2009年以后, 吉林省畜牧养殖数量较2008年有较大幅度下降; 2012—2015年缓慢回升, 由2012年的11 886.4 kt回升到2015年的12 324.4 kt, 年平均增长率为0.91%, 主要是由于2012年政府下发了《吉林省人民政府关于实施现代畜牧业四年提升计划的意见》, 意见中明确提出, 继续加大对畜禽良种繁育体系建设的投入, 激发了农民养殖的积极性, 畜牧养殖数量逐渐增长; 2016—2020年呈下降趋势, 由2016年的11 781.9 kt下降至2020年的8 967.1 kt, 年平均下降率为5.61%, 其原因是此期间吉林省的生猪数量减少, 牛、羊的养殖数量虽然有所波动, 但整体变化不大; 2021—2022年碳排放量略有回升, 其原因是2021年吉林省委、省人民政府制定出台了《吉林省“秸秆变肉”工程实施方案》和《吉林省做大做强肉牛产业十条政策措施》两个政策性文件, 促进了牲畜养殖数量的快速增长。总体来看, 畜牧养殖产生的碳排放所占比例逐渐降低, 农业生产物资投入和水稻种植产生的碳排放所占比例逐渐升高。

农业碳排放强度是指单位农业产值所产生的碳排放量, 农业碳排放强度越低, 则农业单位产值产生的碳排放量越少。由图1可知, 2000—2022年吉林省农业碳排放强度大体呈下降趋势, 由2000年的4.02 t/万元下降到2022年的1.17 t/万元, 年平均下降率为5.52%, 说明碳排放减少主要得益于国家强农惠农政策的实施和吉林省现代农业的发展, 使农业生产效率和资源利用率显著提高, 致使碳排放强度降低。

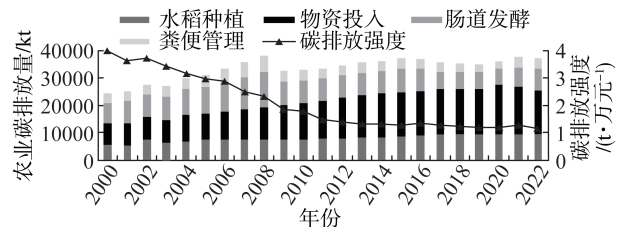


图1 2000—2022年吉林省农业碳排放量与强度变化

Fig. 1 Agricultural carbon emissions and intensity changes in Jilin Province from 2000 to 2022

不同阶段降幅存在差异, 2000—2011年农业碳排放强度下降幅度较大, 由4.02 t/万元降到1.47 t/万元, 下降63.43%; 2012—2022年下降幅度较小, 由

1.39 t/万元下降到 1.17 t/万元,下降 15.83%。碳排放强度变化趋势表明,吉林省在农业增收与绿色低碳协同发展方面取得显著成效,农业经济增长正在由传统的高投入、高排放模式向绿色低碳和生态农业转变。

## 2.2 农业碳排放影响因素分析

对原始的影响吉林省农业碳排放因素的数据进行自然对数变换后作为原始变量。基于 SPSS 26.0 统计软件,利用主成分分析法,对原始变量  $\ln P$ 、 $\ln A$ 、 $\ln T$ 、 $\ln U$ 、 $\ln R$ 、 $\ln C$ 、 $\ln V$  进一步做降维处理。根据结果,选取特征值  $>1$  的 2 个主成分  $F_1$ 、 $F_2$ ,具体数据见表 2。结果表明,提取出的 2 个主成分能够解释 96.346% 的原始变量。主成分方程系数如式(6)所示。

$$a_{ij} = r_{ij} / \sqrt{\lambda_i} \quad i = 1, 2, j = 1, \dots, 7 \quad (6)$$

式中:  $r_{ij}$ ——主成分系数;

$\lambda_i$ ——主成分特征值。

主成分方程系数  $a_{ij}$  计算结果见表 3。

表 2 碳排放影响因素主成分分析方差解释

Tab. 2 Explanation of variance of principle component analysis on influencing factors of carbon emission

| 成分 | 初始特征值 |         |         | 提取平方和载入 |         |         |
|----|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
|    | 特征值   | 方差百分比/% | 累积贡献率/% | 特征值     | 方差百分比/% | 累积贡献率/% |
| 1  | 5.602 | 80.024  | 80.024  | 5.602   | 80.024  | 80.024  |
| 2  | 1.143 | 16.322  | 96.346  | 1.143   | 16.322  | 96.346  |
| 3  | 0.144 | 2.055   | 98.401  |         |         |         |
| 4  | 0.084 | 1.201   | 99.602  |         |         |         |
| 5  | 0.024 | 0.343   | 99.945  |         |         |         |
| 6  | 0.003 | 0.037   | 99.982  |         |         |         |
| 7  | 0.001 | 0.018   | 100.000 |         |         |         |

表 3 碳排放影响因素的成分矩阵和主成分方程系数

Tab. 3 Coefficient of component matrix and principal component equation of carbon emission influencing factors

| 原始变量    | 成分矩阵   |        | 主成分方程系数 |        |
|---------|--------|--------|---------|--------|
|         | 成分 1   | 成分 2   | $F_1$   | $F_2$  |
| $\ln P$ | -0.903 | 0.367  | -0.068  | 0.300  |
| $\ln A$ | 0.972  | 0.170  | 0.073   | 0.139  |
| $\ln T$ | 0.993  | 0.060  | 0.075   | 0.050  |
| $\ln U$ | 0.955  | -0.202 | 0.072   | -0.166 |
| $\ln R$ | 0.997  | 0.036  | 0.075   | 0.030  |
| $\ln C$ | 0.226  | 0.965  | 0.017   | 0.790  |
| $\ln V$ | -0.948 | -0.048 | -0.071  | -0.039 |

碳排放影响因素主成分方程  $F_1$  和  $F_2$  如式(7)和式(8)所示。

$$F_1 = -0.068 \ln P + 0.073 \ln A + 0.075 \ln T + 0.072 \ln U + 0.075 \ln R + 0.017 \ln C - 0.071 \ln V \quad (7)$$

$$F_2 = 0.300 \ln P + 0.139 \ln A + 0.050 \ln T - 0.166 \ln U + 0.030 \ln R + 0.790 \ln C - 0.039 \ln V \quad (8)$$

将吉林省农业碳排放量作自然对数变化,以其为因变量,利用样本数据根据式(7)和式(8)计算的  $F_1$  和  $F_2$  的值作为解释变量进行最小二乘回归,可得

$$\ln E = 6.152 + 0.496F_1 + 0.158F_2 \quad (9)$$

模型  $R^2=0.934$ ,调整  $R^2=0.927$ ,表明模型拟合效果较好; $F=410.811$ , $Sig.=0.000<0.001$ ,表明在  $P<0.001$  水平下建立的回归方程线性关系显著,方程回归系数  $t$  显著性水平  $Sig.$  都为 0.000,通过检验。将式(7)和式(8)代入式(9),得到吉林省 2000—2022 年农业碳排放的影响因素模型如式(10)所示。

$$\ln E = 6.152 + 0.232 \ln P + 0.212 \ln A + 0.125 \ln T - 0.094 \ln U + 0.105 \ln R + 0.807 \ln C - 0.087 \ln V \quad (10)$$

将式(10)按照式(2)形式进行转换,得到最终的吉林省农业碳排放影响因素 STIRPAT 扩展模型如式(11)所示。

$$E = 659.656 \times P^{0.232} \times A^{0.212} \times T^{0.125} \times U^{-0.094} \times R^{0.105} \times C^{0.807} \times V^{-0.087} \quad (11)$$

由式(11)可知,农村人口( $P$ )、农业人均 GDP( $A$ )、农用机械总动力( $T$ )、城镇化率( $U$ )、农民人均纯收入( $R$ )、农村投资额( $C$ )、农业产值比率( $V$ )的弹性系数分别为 0.232、0.212、0.125、-0.094、0.105、0.807 和 -0.087,其含义是这些因素每发生 1% 的变动,将分别引起吉林省农业碳排放量 0.232%、0.212%、0.125%、-0.094%、0.105%、0.807% 和 -0.087% 的变动;农村人口、农业人均 GDP、农用机械总动力、农民人均纯收入、农村投资额 5 个因素对吉林省农业碳排放产生正向促进作用,其中农村投资额促进作用最大,其次是农村人口、农业人均 GDP,农民人均纯收入促进作用最小。城镇化率和农业产值比率对农业碳排放起抑制作用。

## 2.3 农业碳排放情景预测分析

### 2.3.1 支持向量(SVR)回归结果分析

采用 MATLAB2021 软件进行模型训练,训练集与测试集比例设为 8:2,核函数采用径向基函数,惩罚系数为 4.0,交叉概率为 0.3,SVR 模型预测结果如图 2 所示。图 2(a)和图 2(b)分别是训练集和测试集的预测结果对比,图 2(c)和图 2(d)分别是 SVR 模型农业碳排放预测值与实测值的对比结果。由图 2 可知,训练集预测结果  $R^2$  为 0.952 7, $MSE$  为 0.006,表明模型具有较高的拟合度;测试集预测结果  $R^2$  为 0.971 1, $MSE$  为 0.003,表明设定模型具有较强的泛化能力;SVR 模型大

多数预测点集中在拟合曲线附近,表现出较好的预测性能和稳定性。与 2.2 节中扩展 STIRPAT 模型的  $R^2$  为 0.927,  $MSE$  为 0.035 相比,基于径向基核函数的 SVR 农业碳排放预测模型的测试集和训练集均具有更高的拟合度和更小的均方误差。

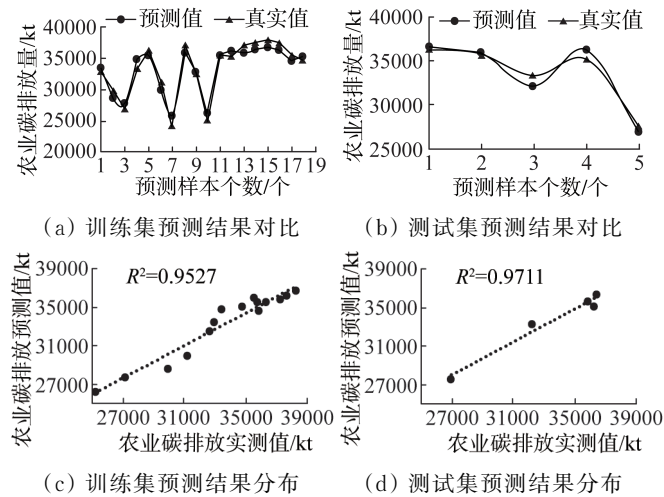


图 2 SVR 模型预测结果

Fig. 2 SVR model prediction results

### 2.3.2 农业碳排放预测情景设置

情景分析法的基本原理是通过选定影响因素并设置不同的发展情景,从而预测研究对象在不同情景下未来可能的发展演变情况<sup>[16]</sup>。根据《吉林省国民经济和社会发展规划第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》(以下简称规划目标),结合吉林省农业发展趋势,将农业发展设置为基准、低碳发展和强低碳发展 3 个情景模式,预测 2023—2030 年吉林省农业碳排放的变化趋势。基准情景是按照吉林省农业的发展现状设定未来发展趋势,低碳发展与强低碳发展情景是基于日益增大的“双碳”目标压力,农业正经历绿色转型升级,因而设置更加严格的碳减排措施。为确保参数设定符合吉林省农业经济社会发展实际,将预测周期划分为 2023—2025 年、2026—2030 年两个阶段。

表 4 不同情景模式下相关参数年均增长率设定

Tab. 4 Setting the annual growth rate of relevant parameters in different scenarios

| 情景模式  | 研究阶段      | 影响因素年平均增长率/% |      |         |      |      |         |       |
|-------|-----------|--------------|------|---------|------|------|---------|-------|
|       |           | $P$          | $A$  | $T$     | $U$  | $R$  | $C$     | $V$   |
| 基准情景  | 2023—2025 | -0.66        | 6.50 |         | 0.66 | 6.50 |         | -3.90 |
|       | 2026—2030 | -0.34        | 5.50 |         | 0.34 | 5.50 |         | -2.90 |
| 低碳情景  | 2023—2025 | -2.66        | 8.50 | ARIMA   | 2.66 | 8.50 | ARIMA   | -5.90 |
|       | 2026—2030 | -2.34        | 7.50 | (0,1,0) | 2.34 | 7.50 | (1,0,0) | -4.90 |
| 强低碳情景 | 2023—2025 | -3.16        | 9.00 |         | 3.16 | 9.00 |         | -6.40 |
|       | 2026—2030 | -2.84        | 8.00 |         | 2.84 | 8.00 |         | -5.40 |

### 2.3.3 不同情景下农业碳排放预测分析

利用 SVR 测试集模型分别对基准情景、低碳情

景和强低碳情景的吉林省农业碳排放进行预测,得到各情景下农业碳排放量预测值,结果如图 3 所示。

本文情景模拟部分各指标的增速设置均参考目前已有的情景模拟相关文献<sup>[5, 16-18]</sup>,根据各指标的历史发展规律以及吉林省规划目标来设定具体的增速比例。随着吉林省社会经济的发展,城镇化进程加快。城镇化率根据规划目标要在 2025 年达 65% 以上,2022 年吉林省城镇化率为 63.73%。中国社会科学院宏观经济研究中心课题组<sup>[19]</sup>指出,2030 年我国城镇化水平将达到 69.64%,因此,2023—2030 年吉林省城镇化水平依旧保持上升趋势。结合吉林省发展实际状况,设定基准发展情景下各阶段城镇化水平年均增速:2023—2025 年为 0.66%,2026—2030 年为 1.34%,农村人口同城镇化率具有相反的增长率。农业人均 GDP 是基于规划目标中地区生产总值年均增长率 6.5% 设定,2023—2025 年为 6.5%、2026—2030 年农业人均 GDP 的年均增速均较前一周期下调 1.00%,为 5.5%,农民人均纯收入同农业人均 GDP 具有相同的增长率。“十三五”期间,吉林省农业产值比率平均为 10.97,按照吉林省到 2025 年三次产业结构调整为 9:42:49 的目标,设定 2023—2025 年农业产值比率年均增速为 -3.9%,2026—2030 年增速较前一周期下调 1.00%。2022 年农业农村部在《“十四五”全国农业机械化发展规划》中明确指出,到 2025 年全国农机总动力稳定在  $1.1 \times 10^9$  kW 左右,“十三五”期间,吉林省农业机械总动力约占全国的 3.45%,按“十三五”期间发展走向预计 2025 年农业机械总动力可达 37 950 MW,但 2022 年吉林省农业机械总动为 43 579 MW,已超过预期目标,农业投资额没有具体发展目标,因此,这两个因素通过建立自回归移动平均模型 (ARIMA) 预测 2023—2030 年的年均增长率。参考前人研究成果,在基准情景的基础上,低碳情景分别下调或上浮 2%,强低碳情景分别下调或上浮 2.5%。吉林省农业碳排放各影响因素参数设定如表 4 所示。

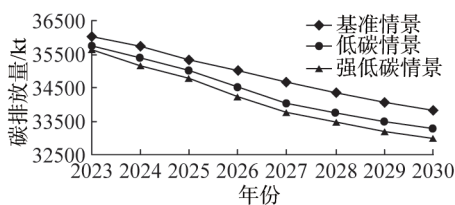


图 3 不同情景下 2023—2030 年吉林省农业碳排放预测结果  
Fig. 3 Forecast results of agricultural carbon emissions in Jilin Province in 2023—2030 under different scenarios

由图 3 可知,3 种发展情景下 2023—2030 年吉林省农业碳排放均呈下降趋势,但不同情景下未来吉林省农业碳排放存在差异。基准发展情景下 2025 年和 2030 年吉林省农业碳排放预期可达 35 353.0 kt 和 33 840.5 kt,与 2022 年 37 689.8 kt 相比,分别下降 6.20% 和 10.21%;低碳发展情景下吉林省农业碳排放到 2025 年和 2030 年预计分别为 35 026.6 kt 和 33 289.9 kt,与 2022 年相比分别下降 7.07% 和 11.67%;强低碳发展情景下 2025 年和 2030 年吉林省农业碳排放预期分别可达 34 799.5 kt 和 33 002.9 kt,与 2022 年相比分别下降 7.68% 和 12.43%。不难发现,随时间推移,不同发展情景下的农业碳排放差值逐渐扩大,原因在于初期参数积累使不同情景下农业经济社会各指标如农业经济、技术水平、城镇化进程等差距日益凸显。综上,2023—2030 年吉林省农业碳排放应在 33 002.9~35 353.0 kt,低碳和强低碳情景下吉林省具有更大的碳减排潜力。因此,吉林省应加大低碳农业和可持续发展等相关政策的实施力度,有序推进农业低碳转型和高质量发展进程。

### 3 结论

以吉林省 2000—2022 年统计数据为基础,运用 IPCC 碳排放系数法对吉林省 23 年来的农业碳排放情况进行测算和分析;构建农业碳排放影响因素 STIRPAT 扩展模型和 SVR 预测模型,结合情景分析法对吉林省 2023—2030 年农业碳排放情况进行预测。

1) 2000—2022 年,吉林省农业碳排放量总体呈现“升降交替”的变化趋势,并于 2008 年达到峰值,为 38 212.2 kt。农业碳排放结构中,农业生产物资投入碳排放贡献率最大,为 39.33%;其次是畜牧养殖发酵和水稻种植,贡献率分别为 25.28%、23.92%;畜牧养殖粪便管理贡献率最低,为 11.47%。研究期内,吉林省农业碳排放强度大体呈现下降趋势,由 2000 年的 4.02 t/万元下降到 2022 年的 1.17 t/万元,年平均下降率为 5.52%。

2) 建立的农业碳排放因素 STIRPAT 扩展模型

表明,农村人口、农业人均 GDP、农用机械总动力、农民人均纯收入以及农村投资额 5 个因素对吉林省农业碳排放起促进作用,城镇化率和农业产值比率起抑制作用。

3) SVR 多情景碳排放预测结果显示,在 3 种情景下 2023—2030 年吉林省农业碳排放均呈下降趋势,随时间推移,不同发展情景下的农业碳排放差值逐渐扩大,与基准情景相比,低碳情景和强低碳情景具有更大的碳减排潜力。

### 参 考 文 献

- [1] 董红敏,李玉娥,陶秀萍,等. 中国农业源温室气体排放与减排技术对策[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 269—273.  
Dong Hongmin, Li Yu'e, Tao Xiuping, et al. China greenhouse gas emissions from agricultural activities and its mitigation strategy [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24 (10) : 269—273.
- [2] 桂河,李静,尚梦媛.“双碳”背景下的宁夏农业碳排放时序特征、驱动机理与脱钩效应研究[J]. 中南林业科技大学学报(社会科学版), 2021, 15(6): 37—44.  
Gui He, Li Jing, Shang Mengyuan. Study on temporal characteristics, driving mechanism and decoupling effect of agricultural carbon emission in Ningxia under the background of “Double Carbon” [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology (Social Sciences), 2021, 15(6): 37—44.
- [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 Xiangang, Yu Chang, Sun Yaqi. Carbon emission structure and carbon peak of agriculture and rural areas in China [J]. China Environmental Science, 2023, 43(4) : 1906—1918.
- [4] 田云,林子娟. 中国省域农业碳排放效率与经济增长的耦合协调[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(4): 13—22.  
Tian Yun, Lin Zijuan. Coupling coordination between agricultural carbon emission efficiency and economic growth at provincial level in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(4): 13—22.
- [5] 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 Chenxi, Lu Qiuping, Ou Nianqing, et al. Research on influencing factors and prediction of agricultural carbon emission in Henan Province under the carbon peaking and carbon neutrality goal [J]. Chinese Journal of

- Eco-Agriculture, 2022, 30(11): 1842—1851.
- [6] 张再杰, 杨伟芳. 湖北省农业碳排放及基于K—means聚类算法的县级碳排放研究[J]. 云南农业大学学报(社会科学), 2023, 17(2): 134—140.
- Zhang Zaijie, Yang Weifang. Agricultural carbon emissions in Hubei Province and county-level carbon emission research based on K—means clustering algorithm [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Social Science), 2023, 17(2): 134—140.
- [7] 何丽博, 任苏灵. 基于灰色预测和脱钩模型的甘肃省农业碳排放预测分析[J]. 北方农业学报, 2024, 52(2): 87—96.
- He Libo, Ren Suling. Analysis of agricultural carbon emission prediction in Gansu Province based on gray prediction and decoupling models [J]. Journal of Northern Agriculture, 2024, 52(2): 87—96.
- [8] 王树芬, 高冠, 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 Guan, 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.
- [9] 时雪, 孙佳佳, 孙嘉玥, 等. 基于支持向量机和灰色BP神经网络的冬小麦晚霜冻害预测[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(3): 178—187.
- [10] 高标, 房骄, 许清涛. 吉林省农业碳排放量动态分析与预测研究[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(1): 310—315.
- Gao Biao, Fang Jiao, Xu Qingtao. Research on dynamic analysis and prediction of agricultural carbon emissions in Jilin Province [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(1): 310—315.
- [11] 李菲菲, 徐绘薇, 王舒泓, 等. 吉林省农业碳排放测度分析及影响因素研究[J]. 综合智慧能源, 2023, 45(8): 36—43.
- Li Feifei, Xu Huiwei, Wang Shuhong, et al. Measurement analysis on carbon emissions from agriculture industry in Jilin Province and the influencing factors [J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(8): 36—43.
- [12] 高标, 房骄, 李玉波. 基于STIRPAT模型的区域农业碳排放影响因素分析[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(10): 190—197.
- Gao Biao, Fang Jiao, Li Yubo. Analysis on influence factors of regional agricultural carbon emissions based on STIRPAT model [J]. Environmental Science and Technology, 2016, 39(10): 190—197.
- [13] 姬新龙, 张清瑞. 基于扩展STIRPAT模型的工业碳排放达峰情景预测[J]. 兰州文理学院学报(社会科学版), 2023, 39(3): 99—107.
- Ji Xinlong, Zhang Qingrui. Scenario Prediction of industrial carbon emission peaking based on extended STIRPAT model [J]. Journal of Lanzhou University of Arts and Science (Social Sciences), 2023, 39(3): 99—107.
- [14] 高宁, 张安琪, 梅鹤波, 等. 基于PSO—SVR算法的土壤含水率预测模型构建[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(5): 227—234.
- Gao Ning, Zhang Anqi, Mei Hebo, et al. Construction of soil moisture content prediction model based on PSO—SVR algorithm [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(5): 227—234.
- [15] 陈霖, 晏欣, 李巨峰, 等. 基于优化机器学习的炼化企业污水场均质池出水水质预测研究[J]. 给水排水, 2024, 50(10): 159—168.
- Chen Lin, Yan Xin, Li Jufeng, et al. Research on the prediction of effluent quality of the homogenization tank in the refinery sewage treatment plant based on optimized machine learning [J]. Water and Wastewater Engineering, 2024, 50(10): 159—168.
- [16] 陈晨. 黄河流域农业碳效应时空演变及情景预测研究[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2023.
- [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] 任伟, 杨嘉宁, 郭晓梦. 基于STIRPAT模型的河北省碳达峰情景预测研究[J]. 华北理工大学学报(社会科学版), 2023, 23(4): 34—41.
- Ren Wei, Yang Jianing, Guo Xiaomeng. Prediction of carbon peaking scenario in Hebei Province based on STIRPAT model [J]. Journal of North China University of Science and Technology (Social Science Edition), 2023, 23(4): 34—41.
- [19] 中国社会科学院宏观经济研究中心课题组. 未来15年中国经济增长潜力与“十四五”时期经济社会发展主要目标及指标研究[J]. 中国工业经济, 2020(4): 5—22.