



腾云,孙铭遥,孙雨薇,徐卉,黄润,闫甜磊,芦梓健.东北三省黑土地碳排放时序特征及减排空间分析[J].中国农业大学学报,2025,30(03):232-244.
TENG Yun,SUN Mingyao,SUN Yuwei,XU Hui,HUANG Run,YAN Tianlei,LU Zijian. Temporal characterization of carbon emissions and spatial analysis of
emission reduction of black soil in Northeast China[J]. *Journal of China Agricultural University*,2025,30(03):232-244.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.03.21

东北三省黑土地碳排放时序特征及减排空间分析

腾云¹ 孙铭遥¹ 孙雨薇¹ 徐卉^{2*} 黄润¹ 闫甜磊¹ 芦梓健¹

(1. 东北农业大学 工程学院,哈尔滨 150030;

2. 西三一大学 管理学院,加拿大 兰利 V2Y 1Y1)

摘要 为测算东北三省黑土地碳排放量及预测减量空间,选择化肥、农药、农膜、翻耕、灌溉及农用柴油6个主要碳源,结合2000—2021年面板数据,运用碳排放系数法测算2000—2021年碳排放量,并采用BP神经网络模型预测2022—2030年碳排放量,并设定基准情景和低碳情景进行定量分析。结果表明:1)2000—2021年碳排放总量变化呈现“波动上升-下降”趋势。其中,第1阶段为2000—2015年波动上升阶段;第2阶段为2016—2021年下降阶段。2)2022—2030年农业碳排放量显示其呈“先上升后下降”趋势,2030年黑土地碳排放预测结果为1 605.00万t,低碳情景下预测结果697.12万t,减量空间最大为907.88万t,10年累计减排量可达4 267.41万t,累计碳排放强度潜力空间为1.49 t/hm²。3)在2000—2021年东北黑土地碳排放组成中,化肥是主要排放源,占排放总量的73.78%;翻耕和灌溉所占比例较小,但两者碳排放量持续增加。综上,东北三省黑土地碳排放量已达峰值,未来仍存在较大减量空间,政府应持续加大降碳减排力度,加速推进本地区的碳中和目标。

关键词 东北黑土地;碳排放;碳减排;“双碳”目标;BP神经网络模型

中图分类号 G353.11;S-9

文章编号 1007-4333(2025)03-0232-13

文献标志码 A

Temporal characterization of carbon emissions and spatial analysis of emission reduction of black soil in Northeast China

TENG Yun¹, SUN Mingyao¹, SUN Yuwei¹, XU Hui^{2*}, HUANG Run¹, YAN Tianlei¹, LU Zijian¹

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2. Trinity Western University, School of Management, Langley V2Y 1Y1, Canada)

Abstract To measure the carbon emissions of black soil in the three northeastern provinces and predict the space for its reduction, six major carbon sources, fertilizers, pesticides, agricultural films, tillage, irrigation and agricultural diesel, were selected. Combined with the panel data of 2000-2021, the carbon emission coefficient method was applied to measure the carbon emission. The BP neural network model was used to predict the carbon emission from 2022-2030, and the baseline scenario and low carbon scenarios were set for quantitative analysis. The baseline scenario and low carbon scenario were set for quantitative analysis. The results show that: 1) The total carbon emissions from 2000 to 2021 show a “fluctuating upward-declining” trend, of which the first stage is the fluctuating upward stage from 2000 to 2015, and the second stage is the declining stage from 2016 to 2021. 2) The agricultural carbon emissions from 2022 to 2030 show a “first upward and then declining” trend. 3) The agricultural carbon emissions from 2022 to 2030 display “first increased and then decreased” trend. The predicted carbon emission from black soil in 2030

收稿日期: 2024-06-13

基金项目: 黑龙江省哲学社会科学规划项目资助(23JYA045)

第一作者: 腾云(ORCID:0000-0002-2964-0461),教授,主要从事农业绿色生产研究,E-mail:dingding212139@163.com

通讯作者: 徐卉(ORCID:0009-0001-8447-2042),讲师,主要从事农业绿色发展研究,E-mail:xuhui313131@163.com

is 16.05 million tons, and the predicted carbon emission under the low-carbon scenario is 6.9712 million tons. The largest reduction space is of 9.0788 million tons, the cumulative emission reduction in 10 years is 42.6741 million tons, and the cumulative carbon emission intensity potential space is 1.49 t/hm². 4) Among the six major carbon emission sources of black soil in Northeast China from 2000 to 2021, fertilizer is the main emission source, accounting for 73.78% of the total emission, and the carbon emission from tillage and irrigation, though small, has kept increasing. Overall, the carbon emissions from black soil in the three northeastern provinces have reached their peak, and there is still large reduction space in the future. The government should continue to reduce carbon emissions and accelerate the goal of carbon neutrality.

Keywords northeastern black soil; carbon emission; carbon reduction; double carbon target; BP neural network modeling

减少农业碳排放是实现双碳目标的重要措施之一。近年来,全球气候变暖日益严重,碳排放是加剧温室效应、造成全球气候变暖的重要原因之一^[1-2]。农业碳排放占全球碳排放总量的18.4%,仅次于工业产业碳排放量^[3],降低农业碳排放量是减少全球碳排放的重要途径。自2016年签署了应对全球气候变化的《巴黎协定》^[4]后,中国出台了多部碳减排政策。2020年,习近平总书记在第75届联合国大会上提出:“中国力争2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和,把“双碳”目标作为2035年远景目标”^[5]。同年,在中央农村工作会议中,习近平总书记强调实现碳达峰和碳中和,农业农村的固碳减排是一项重要的措施,同时也具有很大的潜力,我国要做好科学测算、制定可行计划、采取有力措施固碳减排^[6]。

耕地是实现农业碳中和的重要主体之一。耕地作为农业碳循环重要组成部分,既是碳汇也是碳源。碳汇体现在农作物光合作用固碳和耕地有机碳库储碳。随着农资投入和翻耕规模不断增加,耕地有机碳储量急剧降低,大量二氧化碳排入大气,成为碳源。目前,国内外对土壤有机碳的输入和输出等影响土壤有机碳动态变化方面展开了大量研究。Campbell等^[7]分析萨斯喀彻温30年作物轮作发现,耕地变化导致地下土壤的理化性质改变,增加土壤内部的碳排放。张忠学等^[8]研究发现制定科学的种植方案,可以有效提升黑土区稻田的碳汇能力。Jiang等^[9]研究发现采用DNDC模型测算在不同的施肥水平下,耕地的温室气体排放量不同。郭金瑞等^[10]研究发现长期施用化肥的玉米集约种植导致土壤有机碳大量减少,采用合理的耕作措施,可以降低土壤有机碳的分解,减少碳排放。传统翻耕大量消耗化石燃料、引起土壤退化、水污染,和土

壤流失问题,不利于生态环境和农业的可持续发展^[11-12]。耕地碳排放的预测研究主要有:范德成等^[13]建立PSO-BP神经网络模型,对2030年中国30个省市的碳排放总量及强度进行预测;潘思羽等^[14]利用BP神经网络模型,预测了2021—2030年甘肃省CO₂排放量。以上研究一致证实,BP神经网络技术在预测碳排放方面具有一定的适用性和准确性。虽然目前已有诸多研究探讨了如何促进耕地减排固碳,但仍缺乏客观且精确的数据对其进行定量研究,在一定程度限制了我国耕地碳减排技术的创新和政策的制订。

黑土地是东北耕地碳排放主要来源^[15]。中国科学院发布的《东北黑土地白皮书(2020)》^[16]指出,典型东北黑土耕地总面积约1 853.33万hm²,占东北耕地总面积的36.6%。随着水土流失和黑土开垦年限的增加,黑土层变薄,有机质含量减少。黑土地有机质含量从50年代开垦前的80~100 g/kg下降到现在的25~30 g/kg,下降了约69%^[17]。土壤有机质中约58%是碳,有机质中的碳被释放到大气中,导致二氧化碳排放量升高。1980—2011年,东北地区耕层土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)平均含量下降0.41 mg/hm²,成为全国唯一土壤碳密度下降的农业区^[18]。黑土农用地具有碳源碳汇双重作用,是我国实现“双碳”目标重点关注的减排固碳端口^[19]。黑土地依托得天独厚的资源优势,拥有强大的碳收支功能和固碳减排潜力,成为“双碳”目标导向下的重要切入点。把握好耕地既是碳源又是碳汇的特质,充分发挥黑土利用的载体功能,将从减排与增汇双重方向助力我国“双碳”目标的实现^[20]。科学客观开展东北黑土地碳排放量测算及减量空间预测,可为我国农业碳达峰碳中和提供参考。

黑土地碳排放预测方面在具体量化和预测技术方面研究尚少。因此,本研究拟选择黑龙江省、吉林省和辽宁省的黑土区为研究区域,选取化肥、农药、农膜、翻耕、灌溉、农用柴油6种碳源,依据碳排放系数法估算2001—2020年东北黑土地的碳排放量时序特征与组成特征,进一步利用BP神经网络预测2021—2030年东北黑土地碳排放量,测算2022—2023年的碳排放减量空间,以期为制定更有效的农业碳减排策略和实现区域碳中和目标提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

黑龙江省、吉林省、辽宁省的黑土地是中国重要

的商品粮基地。《东北黑土地白皮书(2020)》^[16]显示,黑土地总面积109万km²,其中典型黑土地耕地面积1 853.33万hm²。按照《IPCC国家温室气体清单指南》^[21],结合东北地区农业发展现状,其中化肥、农药、农膜和农用柴油等农资投入、灌溉时使用的电能和翻耕造成的有机碳损失均可导致大气中二氧化碳含量增加^[22],如图1所示。因此,本研究选取化肥、农药、农膜、农用柴油、灌溉和翻耕6种碳源,数据资料主要来源于2000—2021年《中国农村统计年鉴》^[23]《中国统计年鉴》^[24]《黑龙江统计年鉴》^[25]《吉林统计年鉴》^[26]《辽宁统计年鉴》^[27]及其他相关统计报表文献。其中,化肥、农药、农膜和柴油数据均为当年东北地区的实际使用量;翻耕数据是东北地区的实际作物播种面积;农业灌溉为当年东北地区实际灌溉面积。

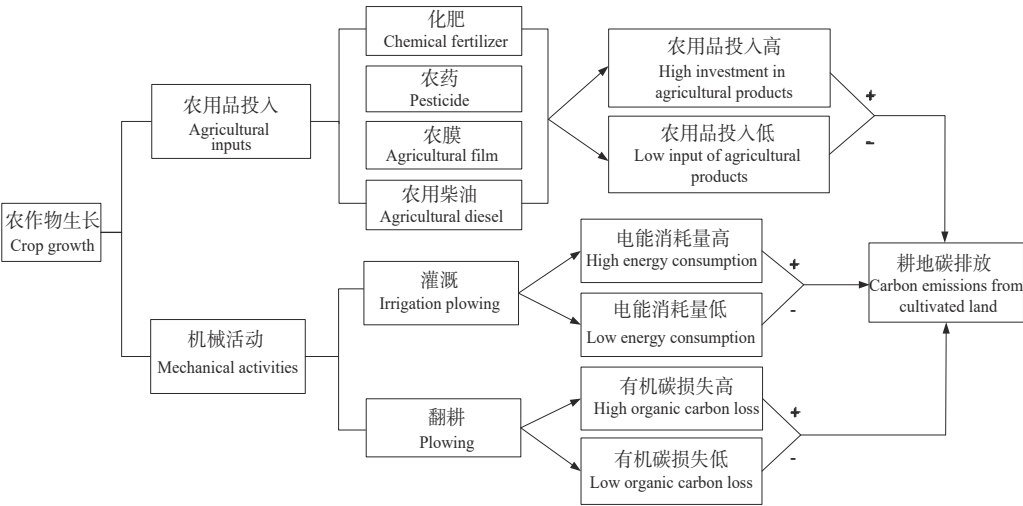


图1 碳源与碳排放关系图

Fig. 1 Relationships between carbon sources and emission

1.2 研究方法

1.2.1 排放系数法

关于碳排放测算,目前主要使用碳排放系数法^[18]、实测值法、物料衡算法和模型法^[19]。其中,实测值法数据获取较为困难^[20-22],物料衡算法多用于工业生产中的碳排放预测^[28],模型法的计算过程严密但数据获取较为困难、应用范围较窄^[29-30],排放系数法计算公式成熟,相比较其他3种方法的数据更容易获取。本研究运用排放系数法,该方法通过将特定活动的能源消耗量乘以相应的碳排放系数来计算碳排放量,具体计算公式如下:

$$C_i = \sum A_i \times F_i \tag{1}$$

式中: C_i 为黑土地碳排放量,t; A_i 为第*i*类碳源的活动水平; F_i 为*i*类碳源的碳排放系数。碳排放系数如表1所示。

碳排放强度计算公式为:

$$Q_i = \frac{C_i}{S} \tag{2}$$

式中: Q_i 为耕地碳排放强度,t/hm²; C_i 为黑土地碳排放量,t; S 为耕地面积,hm²。

1.2.2 BP神经网络法

BP神经网络具有良好的自学习能力和强大的非线性映射能力,采用基于梯度下降的BP算法,具有良好的非线性映射能力、泛化能力和容错能力,

表1 耕地碳排放系数及转换系数

Table 1 Carbon Emission Coefficient and Conversion Coefficient of Farmland

碳源因子 Carbon source factor	温室气体类型 Greenhouse gas type	碳排放系数 Carbon emission coefficient	文献来源 Reference source
化肥 Fertilizer	CO ₂	0.895 6 kg/kg	[31]
农药 Agrochemical	CO ₂	4.934 1 kg/kg	[32]
农膜 Agricultural film	CO ₂	5.180 0 kg/kg	[33]
翻耕 Plow	CO ₂	312.60 kg/kg ²	[34]
灌溉 Irrigation	CO ₂	25.00 kg/km ²	[35]
农用柴油 Agricultural diesel	CO ₂	0.592 7 kg/kg	[36]

已在测算碳排放领域得到广泛应用^[37]。本研究利用BP神经网络对东北耕地碳排放总量样本进行分析,认为前 n 组数据影响 $y(t)$ 数据的值,从而建立模型:

$$y(t)=f(y(t-1),y(t-2),\dots,y(t-n)) \quad (3)$$

使用单个隐含层的BP神经网络测算东北黑土区2021—2030年的碳排放量,基本操作步骤:

第一步,对数据进行归一化处理,归一化处理既可以保留数据的特征又可以减轻因数据大小差距过大带来的误差,选取max-min归一法进行数据的归一化处理,计算公式如下:

$$x_i'=\frac{x_i-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}} \quad (4)$$

第二步,选择输入层和输出层数量。选择 $t-1$, $t-2$, $t-3$ 年的3个碳排放总量数据作为输入数据,输入层数量为3; t 年的碳排放总量数据作为输出数据,输入层数量为1。输入层与输出层使用的影响因子均是经过数据归一化处理之后的值。

第三步,确定隐含层节点数。隐含层节点数 p 通常由下面的公式判定:

$$p=\sqrt{n+m}+a \quad (5)$$

式中: n 为输入层数量,个; m 为输出层数量,个; a 为1~10的常数。通过公式确定 $p=5$ 。

第四步,选择训练函数。输入层与隐含层间的传输函数选择双曲正切传递函数,隐含层与输出层间的传输函数选择线性函数,采用梯度下降法训练。

第五步,设置其他参数。训练次数设置为1 000次,学习速率设置为0.01,训练目标最小误差设置为0.000 01。

第六步,确定评价方法。使用均方根误差

(RMSE)、平均绝对误差(MAE)、均方误差(MSE)和决定系数(R^2)来衡量此预测模型的误差和精度。均方根误差是模型预测的值(样本或总体值)与观察值之间差异的常用度量。决定系数越接近1说明预测效果越好。

$$\text{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n(y_i-\hat{y}_i)^2} \quad (6)$$

$$\text{MAE}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n|y_i-\hat{y}_i| \quad (7)$$

$$\text{MSE}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n(y_i-\hat{y}_i)^2 \quad (8)$$

$$R^2=1-\frac{\sum_{i=1}^n(\hat{y}_i-\bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n(\hat{y}_i-y_i)^2} \quad (9)$$

式中:RMSE为均方根误差; y_i 为第 i 年的真实值; $\hat{y}_i$ 为第 i 年的预测值; $\bar{y}$ 为第 i 年的平均值; n 为输入层数量,个;MAE为平均绝对误差;MSE为均方误差; R^2 为决定系数。

2 结果与分析

2.1 黑土地碳排放量时序特征分析

根据式(1)和(2),定量测算出东北黑土区2000—2021年耕地碳排放总量及碳排放强度,结果见图2。可见:2021年东北黑土区耕地碳排放总量为1 575.94万t,较2000年的1 061.73万t增加了32.63%,总体呈现“波动上升-下降”的趋势。其碳排放总量具体分为2个阶段:第1阶段为2000—2015年波动上升阶段,2000—2002年碳排放总量从1 061.73万t上升到1 103.51万t后,2003年下降到1 095.77万t,2004—2015年碳排放量又从1 178.16万t上升到1 793.61万t,2015年碳排放量

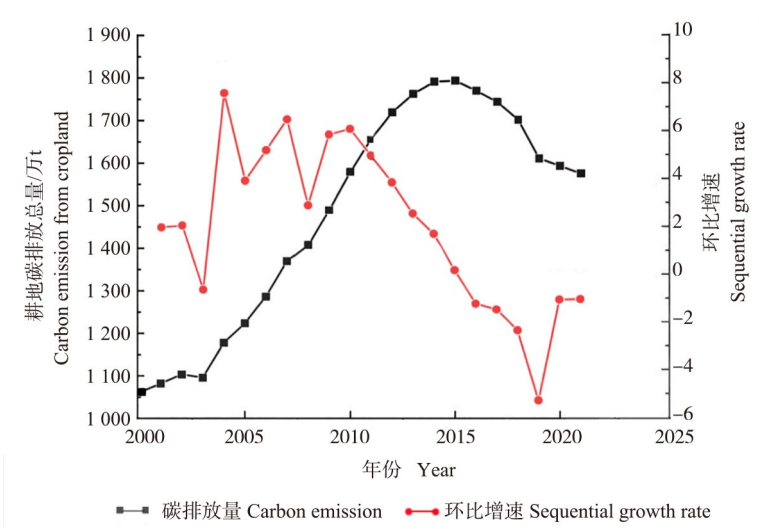


图2 2000—2021年耕地碳排放量及其环比增速情况

Fig. 2 Carbon emissions from farmland and their sequential growth rates from 2000 to 2021

达到峰值,尽管短暂下降,但整体而言,这15年间的数据呈现出稳定的上升趋势;第2阶段为2016—2021年下降阶段,从1 770.61万t下降到1 575.94万t,下降了10.99%。

与总碳排放量相比,农业碳排放强度能够更准确地反映地区农业碳排放^[38]。东北黑土区耕地碳排放强度的变化趋势结果见图3。可见自2013年以来,碳排放强度持续下降及环比增速持续为负,反映出东三省地区在减少农业碳排放方面采取了有效措施,实现了碳排放强度的降低。这一变化趋势可能与农业技术改进、管理措施优化、气候条件变动及政策调整等多种因素相关,显示了提高农业生

产效率与减少碳排放潜力的并存。东北黑土区耕地碳排放强度变化总体呈现3段“先上升后下降”的周期性趋势。其中:第1段2000—2003年从0.68 t/hm²上升到0.70 t/hm²再下降至0.68 t/hm²;第2段2003年—2005年从0.68 t/hm²上升到0.70 t/hm²再下降至0.66 t/hm²,2005年环比增速存在最小值-6.48%;第3段2005年—2021年从0.66 t/hm²先上升至0.76 t/hm²再下降至0.63 t/hm²,2010年环比增速存在最大值2.94%,2012年耕地碳排放强度最大,为0.76 t/hm²,2021年耕地碳排放强度最小,为0.63 t/hm²,从2013年开始,耕地碳排放强度的环比增速处于负值。

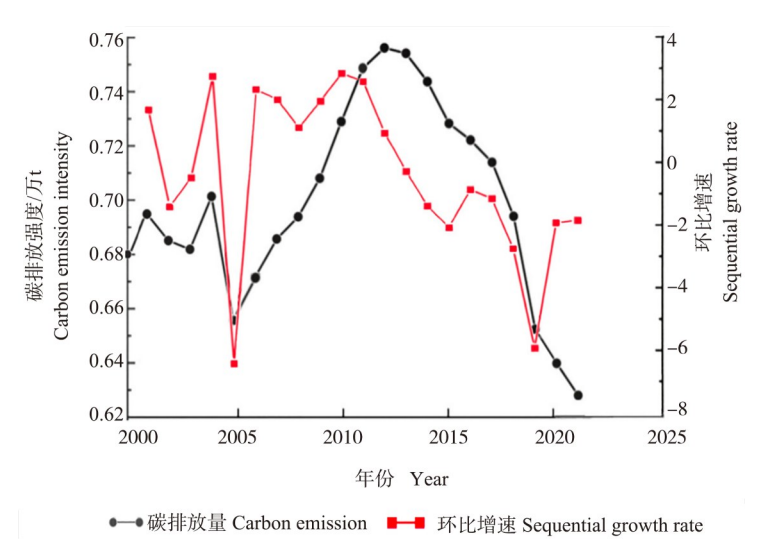


图3 2000—2021年耕地碳排放强度及其环比增速情况

Fig. 3 Carbon emission intensities from farmland and their sequential growth rates from 2000 to 2021

2.2 黑土地碳排放组成特征分析

从碳源排放占比上看,化肥、农药、地膜、柴油、翻耕和灌溉分别为73.78%、5.22%、11.05%、9.49%、0.45%和0.01%。其中化肥碳排放量占比最大,其次为地膜(占

比11.05%>柴油9.49%),灌溉占比最小。从图4中可以看到化肥碳排放量居高不下,从807.37万t增加到1182.31万t,增加了46.44%。翻耕和灌溉虽然占比最小,分别为0.45%和0.01%,但二者一直处于增长状态。

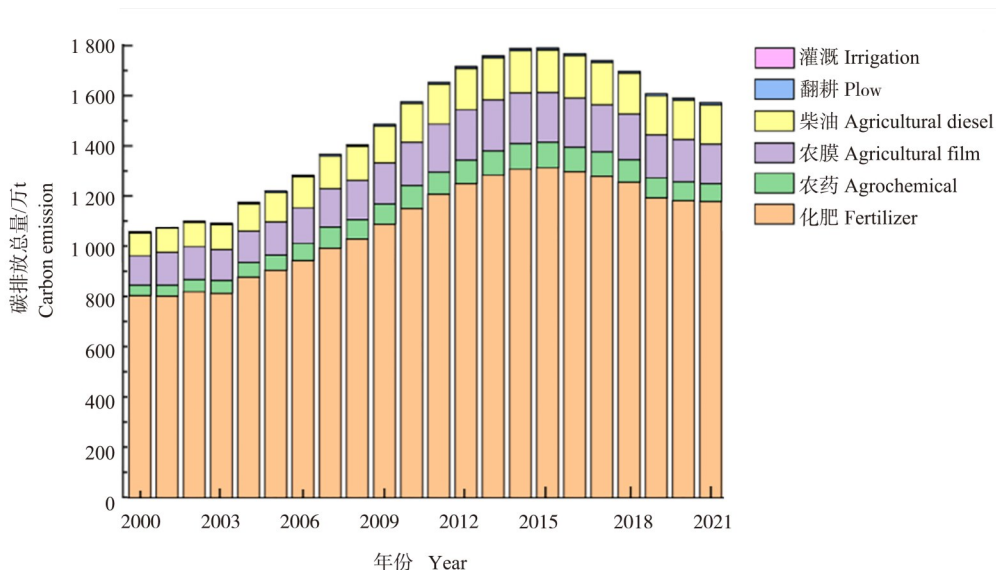


图4 2000—2021年东北黑土区耕地碳排放组成

Fig. 4 Carbon emission composition of cultivated land in the black soil area of Northeast China from 2000 to 2021

2.3 减量空间预测分析

根据当前东北地区农业发展态势,设置两种情景,一种为延续当前情况的基准情景模式,另一种为“双碳”目标下的低碳情景模式。基准情景下,利用MATLAB进行仿真训练,将采集到的数据分成3个部分,选出70%的数据组成训练集,15%的数据组成验证集,15%的数据组成测试集。将仿真输出值对真实值进行回归,相关系数 R 越接近于1,均方误差(MSE)越小,说明拟合的效果越好。

预测值与实际值误差自相关系数分析结果见图5。可见:训练集预测值与实际值误差自相关性分析结果,训练集 $R=1$ 、验证集 $R=0.978\ 31$ 、测试集 $R=0.964\ 5$ 、总样本集 $R=0.989\ 17$,均 >0.97 ;隐含层节点数为5时,平均绝对误差MAE为0.045 803,均方误差MSE为0.035 262,均方根误差RMSE为0.059 382,训练集预测值与实际值在0阶时具有最高相关性,随着时间间隔的增加,相关性显著下降并趋于零,表明预测误差在不同时间点间相互独立,无明显自相关性,验证了模型的稳定性和预测能力。

预测值与实际值对比趋势结果见图6。可见:

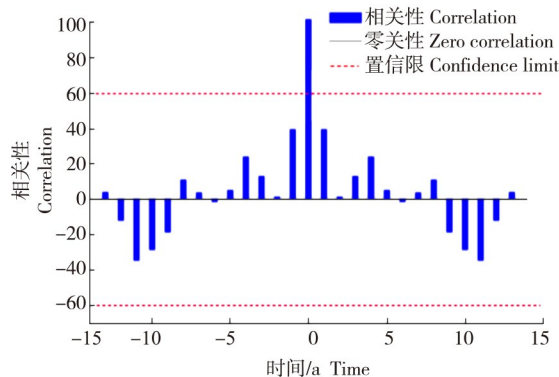


图5 预测值与实际值误差自相关系数分析图

Fig. 5 Analysis of autocorrelation coefficient between predicted and actual values

随着时间的推移,预测值与实际值均呈现逐年增加的趋势,这一趋势与东北地区农业发展态势相吻合,反映了模型对当前农业发展态势的准确捕捉。预测值与实际值对比结果显示二者非常接近,这种一致性说明,模型不仅能够捕捉到数据的短期波动,而且能够预测长期的发展趋势,能够较为准确的预测东北黑土区的农业碳排放趋势,为未来的农业发展和碳排放控制提供科学依据,进一步证明了

模型的有效性和可靠性。

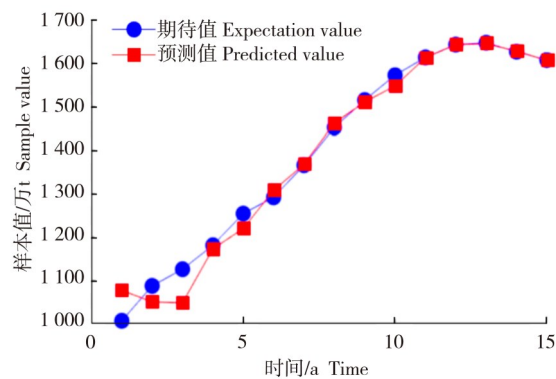


图6 预测值与实际值对比趋势图

Fig. 6 Trend chart comparing predicted and actual values

训练、验证和测试集的均方误差变化结果见图7。可见:随着训练周期的增加,训练集显著下降并趋于稳定,逐渐逼近最佳拟合线,逐渐收敛到较低的误差水平,表明模型在训练数据上学习效果显著;验证集和测试集也呈现下降趋势,尽管下降幅度略小于训练集,但仍然显示出模型良好的泛化能力。模型在训练集、验证集和测试集上均显示出了良好的学习效果,模型能将在训练集中学到的模式有效应用到新的数据上,进一步证实模型的稳定性和有效性。

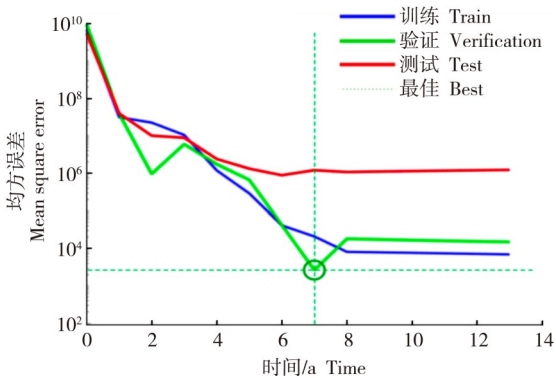


图7 训练、验证和测试集的均方误差变化曲线图

Fig. 7 Mean square error variation curves of training, validation, and testing sets

耕地碳排放量预测结果见图8。可见:耕地碳排放量预测图专注于2023—2030年的变化趋势,从2000年开始,耕地碳排放量呈现上升趋势,到2015年达到峰值,随后预测值逐渐下降并趋于稳定,这一趋势预示着未来十年内碳排放量将极大可能经

历快速增长后趋于稳定的状态。同时,2015年后的下降趋势表明目前采取的碳减排措施已经初见成效,通过有效的政策干预和技术创新,碳排放量可以得到有效控制,也强调了制定长期减排目标和策略的重要性,及实现碳达峰的紧迫性。

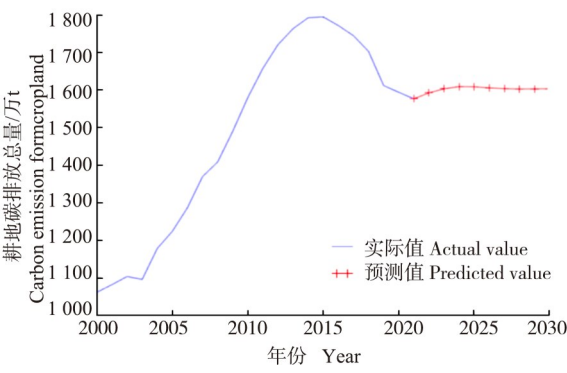


图8 耕地碳排放量预测值

Fig. 8 Predicted value of carbon emission from cultivated land

训练集预测值与实际值的BP神经网络模型回归分析结果见图9。可见:训练集预测值与实际值高度吻合,数据点均落在了拟合度 $Y=T$ 的直线上,表明模型能够准确捕捉数据的趋势,并且在训练集上表现出色。相关系数 R 为1,表示预测值与实际值完全一致,高度一致性证明了BP神经网络通过反向传播算法有效学习了数据的复杂关系;图中数据点分布均匀,没有明显的离群点,进一步验证了模型的稳定性和可靠性。

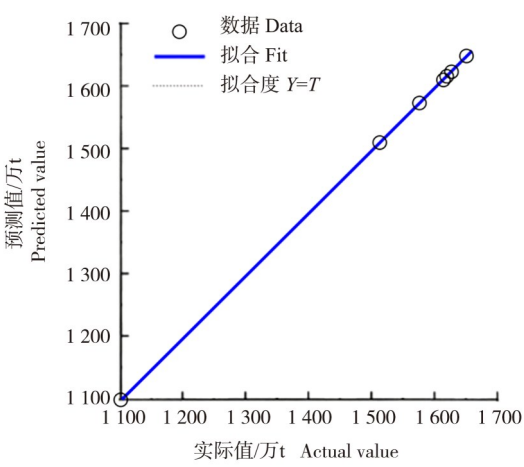


图9 训练集预测值与实际值的BP神经网络模型回归分析

Fig. 9 Regression analysis of BP neural network model between predicted and actual values in the training set

验证集预测值与实际值的BP神经网络模型回归分析结果见图10。可见:验证集预测值与实际值高度吻合,数据点紧密地围绕拟合线分布,表明模型能够有效捕捉数据的趋势和模式。相关系数 R 为0.978 31,预测值与实际值高度相关,模型在验证集上的表现出色,这种高度的相关性验证了模型的泛化能力,即模型不仅在训练集上拟合良好,而且在未见过的数据上也能保持较高的预测准确性,表明模型在实际应用中具有很好的预测性能。尽管数据噪声或模型局限可能导致轻微偏离,但大多数数据点都紧密地围绕拟合线,模型仍保持高预测准确性和稳定性。

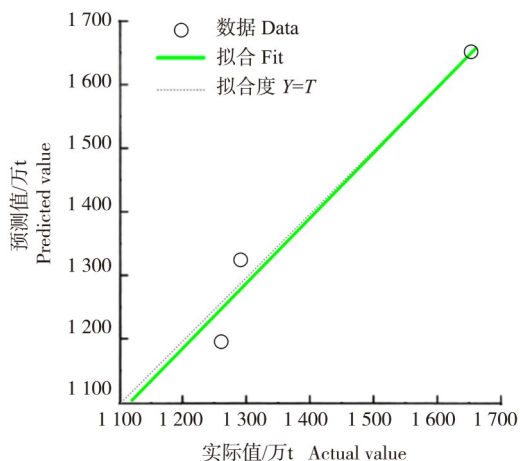


图10 验证集预测值与实际值的BP神经网络模型回归分析

Fig. 10 Regression analysis of BP neural network model between predicted and actual values in the validation set

测试集预测值与实际值的BP神经网络模型回归分析结果见图11。可见:测试集预测值与实际值高度吻合,数据点紧密地围绕拟合线分布,表明模型能够很好地捕捉数据的趋势和模式。相关系数 R 为0.964 5,表明预测值与实际值之间具有强相关性,模型在测试集上的表现非常出色,为模型的实际应用提供了可靠的依据;尽管存在少数数据点稍微偏离,但不会对整体的预测结果产生重大影响,模型仍具有高预测准确性和稳定性。

总样本集预测值与实际值的BP神经网络模型回归分析结果见图12。可见:总样本集预测值与实际值高度吻合,几乎所有的数据点都落在了拟合度 $Y=T$ 的直线附近,表明模型能够全面捕捉数据的

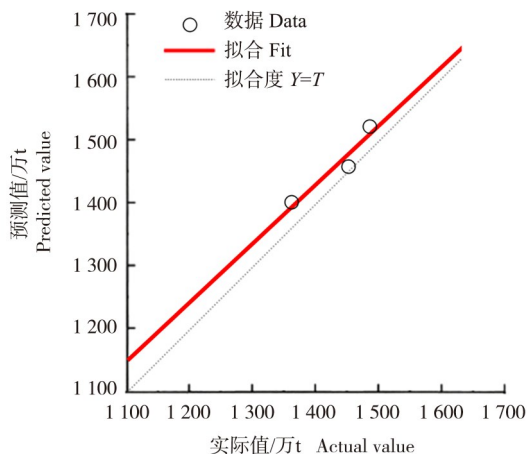


图11 测试集预测值与实际值的BP神经网络模型回归分析

Fig. 11 Regression analysis of BP neural network model between predicted and actual values in the test set

趋势。相关系数 R 为0.989 17,预测值与实际值具有极高的相关性,模型的数据点均匀分布,不存在显著的离群点,表明模型在处理总样本集时保持了一致的性能,进一步验证了模型在所有数据集上的整体优异拟合效果,为模型的预测结果提供了较高的可信度。

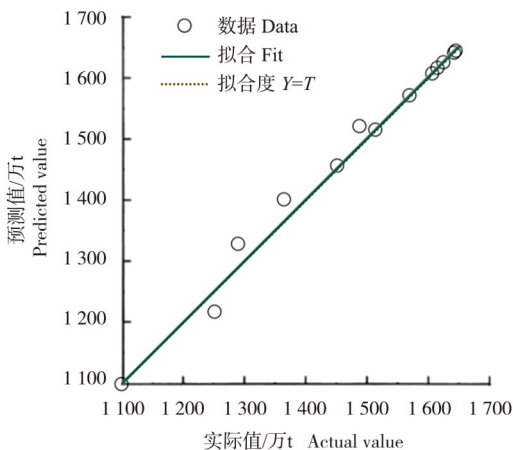


图12 总样本集预测值与实际值的BP神经网络模型回归分析

Fig. 12 Regression analysis of BP neural network model between predicted and actual values of the total sample set

基于BP神经网络模型的2022—2030年东北黑土区耕地碳排放预测结果见表2。可见2022—2030年东北黑土区耕地碳排放量呈现先上升后下降并趋于稳定的趋势。其中:2022—2026年为上升阶

段,从1 590.00万t上升到1 615.00万t;2027—2030年为下降阶段,从1 612.00万t上升到1 605.00万t。虽然碳排放量在波动,但基本稳定在1 600万t左右,与2000—2021年相比,数据大幅度下降。而我国要在2030年实现碳达峰,在未来几年的土地利用中,要减缓土地利用碳排放增长趋势,使其在2030年达到峰值,在2030年后呈下降趋势。为控制土地利用碳排放增长速度,改变其呈线性增长趋势,实现碳中和,东北黑土区应加强对土地利用的合理规划,改变土地利用方式向碳汇转变。

表2 基于BP神经网络模型的2022—2030年东北黑土区耕地碳排放预测

Table 2 Carbon emission prediction from farmland in the black soil area of northeast china from 2022 to 2030 based on BP neural network model

碳排放指标 Carbon emission indicator	2022年	2023年	2024年	2025年	2026年	2027年	2028年	2029年	2030年
碳排放预测值/10 ⁴ t Predicted carbon emission	1 590.00	1 596.00	1 608.00	1 612.00	1 615.00	1 612.00	1 609.00	1 606.00	1 605.00
碳排放强度/(t/hm ²) Carbon intensity	0.61	0.60	0.59	0.58	0.58	0.57	0.55	0.54	0.54

低碳情景模式是在基准情景模式上提出碳减排目标,并根据此目标推动低碳发展。本研究依据中国《2015年〈强化应对气候变化行动-中国国家自主贡献〉》^[1],制定了更高的减排目标:至2030年,农田碳排放量将比2005年降低65%^[39];2005年的耕地碳排放强度为0.66 t/hm²,故2030年耕地碳排放强度低碳目标为0.23 t/hm²,2022—2030年降幅平均值为0.044 t/hm²。在2020年碳排放强度的基础上进行累减即可得到低碳情境下2021—2030年的碳排放强度。再利用式(2)结合农作物总播种面积计算出低碳情景下东北黑土区的耕地碳排放量,低碳情景下的2022—2030年东北黑土区耕地碳排放预测结果

见表3。可见:在低碳情景下,2022—2030年东北黑土区耕地碳排放量和碳排放强度展现逐年降低的变化趋势,碳排放预测值从2022年的1 526.86万t逐年下降到2030年的697.12万t,这表明在低碳情景下,通过采取有效的减排措施,东北三省黑土区的耕地碳排放量显著减少;碳排放强度从2022年的0.58 t/hm²逐年下降到2030年的0.23 t/hm²,表明在低碳情景下,单位耕地面积的碳排放强度显著降低,反映了农业生产的碳效率提高。在低碳情景下,通过实施有效的减排措施,东北黑土区的耕地碳排放量和碳排放强度都显著降低,这不仅有助于实现碳减排目标,还表明农业生产的碳效率得到了显著提高。

表3 低碳情景下的2022—2030年东北黑土区耕地碳排放预测

Table 3 Carbon emission prediction of farmland in northeast black soil region from 2022 to 2030 under low carbon scenario

碳排放指标 Carbon emission indicator	2022年	2023年	2024年	2025年	2026年	2027年	2028年	2029年	2030年
碳排放预测值/10 ⁴ t Predicted carbon emission	1 526.86	1 437.95	1 344.81	1 247.43	1 145.83	1 040.00	929.94	815.65	697.12
碳排放强度/(t/hm ²) Carbon emission intensity	0.58	0.54	0.50	0.45	0.41	0.36	0.32	0.28	0.23

2022—2030年东北黑土区耕地碳排放潜力空间预测结果^[40]见表4。可见:东北黑土地碳排放减量空间巨大,从2022年开始,每年碳排放减量空间均不断增大:2022年碳排放减量空间为63.14万t;2023年碳排放减量空间为158.05万t;2024年碳排放减量空间

为263.19万t;到2030年碳排放减量空间为907.88万t,共可累计减排4 267.41万t,排放量呈现出明显的递减趋势,累计碳排放强度潜力空间为1.49 t/hm²。东三省黑土区在低碳情景下展现出巨大的碳排放减量空间,且这一空间随着时间的推移而增大,

表明通过实施有效的低碳策略,该区域有潜力实现显著的碳减排;低碳情景下的碳排放强度显著低于基准情景,且随着时间的推移,碳排放强度的降低趋势更为明显,这进一步证实了低碳策略的有效性。

表 4 碳排放潜力空间
Table 4 Carbon emission potential space

年份 Year	碳排放预测值/ 10^4 t Carbon emission prediction value		碳排放潜力空间 Carbon emission potential space	碳排放强度/(t/hm^2) Carbon emission intensity		碳排放强度潜力空间 Potential space for carbon emission intensity
	基准情况 Benchmark situation	低碳情况 Low carbon situation		基准情况 Benchmark situation	低碳情况 Low carbon situation	
2022 年	1 590.00	1 526.86	63.14	0.61	0.58	0.02
2023 年	1 596.00	1 437.95	158.05	0.60	0.54	0.06
2024 年	1 608.00	1 344.81	263.19	0.59	0.50	0.10
2025 年	1 612.00	1 247.43	364.57	0.58	0.45	0.13
2026 年	1 615.00	1 145.83	469.17	0.58	0.41	0.17
2027 年	1 612.00	1 040.00	572.00	0.57	0.36	0.20
2028 年	1 609.00	929.94	679.06	0.55	0.32	0.23
2029 年	1 606.00	815.65	790.35	0.54	0.28	0.27
2030 年	1 605.00	697.12	907.88	0.54	0.23	0.30

3 讨 论

本研究表明 2000—2021 年东北三省黑土地碳排放总量呈现“波动上升后下降”的趋势,郑琳^[41]认为近 30 年黑龙江省海伦市农田土壤有机碳含量呈现先降低后缓慢增加的趋势,该结论以小见大,与本研究结果相似。东北三省黑土地 2000—2021 年耕地碳排放强度呈现 3 段“先上升后下降”趋势,这与刘学荣等^[42]得出 2000—2014 年东北地区的地均碳排放强度呈现先增后减的趋势的研究结果一致。

孙雷^[43]与钱凤魁等^[44]在东北三省黑土地 2000—2021 年碳排放组成特征分析中,化肥施用是主要碳源。但移明昊等^[1]认为吉林省碳排放量由高到低分别是化肥、翻耕、灌溉、农用柴油、农膜和农药,与本研究的碳排放组成所占比例略有不同,究其原因可能是吉林省与东北其他省份在经济发展水平、产业结构、能源消费结构、农业活动及土地利用变化等方面存在差异;同时,东北三省又以辽宁省碳排放量最多,吉林省碳排放量最少,这些因素的共同作用可能导致二者在碳排放组成特征上存在差异。

本研究发现 2022—2030 年耕地碳排放量呈现“先上升后下降并趋于稳定”的趋势,与 2000—2021 年相比,数据大幅度下降。杨新宇^[45]认为东北黑土

区具有丰富的固碳能力和广阔的开发前景,与本研究结论相似。同时,本研究在此基础上对预测结果进行进一步验证,通过设置基准情景与低碳情景 2 种模式,更清晰地展示采取减排措施的必要性和潜在效果;又通过相关系数、均方误差、平均绝对误差等指标对 MATLAB 仿真结果进行评估,验证了模型的拟合效果和稳定性,证明本研究的预测结果具有一定的准确性。

作为实现碳减排目标的关键区域,东北黑土区应结合自然地理条件和经济实际等因素,对 6 种主要碳源制定并实施具有针对性的碳减排政策。本研究具体建议如下:在化肥方面,推广精准施肥技术和有机肥料使用,鼓励农民使用有机肥和生物肥料,推动化肥产业向绿色低碳发展转型^[46]。在农药方面;政府应加强监管,推广生物农药和低毒农药,推动农药生产向清洁化、低碳化、循环化发展;在农膜方面,政府应推广可降解农膜^[47],减少非降解农膜对土壤的污染,并建立农膜回收和再利用体系,鼓励农民回收使用过的农膜;在农用柴油方面,推广绿色高效、智能化农机设备,减少柴油消耗^[44],通过补贴、税收优惠等鼓励农户使用清洁能源驱动的农业设备;在灌溉方面,推广节水灌溉技术,如滴灌和喷灌,优化灌溉系统,减少水资源浪费;在翻耕方

面,推广保护性耕作技术,如免耕和少耕,减少土壤扰动,提高土壤有机质含量,实现作物稳产高产与生态环境保护双赢^[48]。

4 结 论

本研究综合应用碳排放系数法和BP神经网络模型,探究东北三省黑土地2000—2021年碳排放的时序特征及减排空间分析。主要结论如下:1)2000—2021年东北三省黑土地碳排放总量经历了先升后降的过程,碳排放强度呈现3次先上升后下降的周期性变化,尽管碳排放量和强度经历了波动,但近年来呈现下降趋势,显示出减排措施的初步成效。2)化肥作为主要碳排放源,其使用量的控制是减排的关键;翻耕和灌溉占比虽小,但二者碳排放量在持续增加,仍需敲起警钟。3)预测结果表明,通过实施有效的农业管理策略和技术创新,未来十年东北黑土地的碳排放量有望进一步降低。4)政府应持续优化农业政策,加强碳排放监测,推广低碳技术,以实现农业可持续发展和碳减排目标。

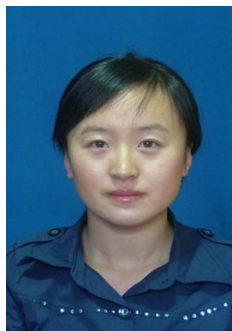
参考文献 References

- [1] 移明昊, 闫庆武, 张定祥, 陈宇涵, 李亚南. 吉林省耕地利用碳排放测度及其与粮食生产脱钩分析[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(4): 45-56
Yi M H, Yan Q W, Zhang D X, Chen Y H, Li Y N. Measurement of carbon emission from cultivated land use and analysis of its decoupling from grain production in Jilin Province [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(4): 45-56 (in Chinese)
- [2] 张梦璇, 王迎春, 李建政, 王立刚. 关于我国农业碳达峰, 助力碳中和若干问题的思考[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(3): 1-7
Zhang M X, Wang Y C, Li J Z, Wang L G. Thoughts on several problems of agricultural carbon peak and carbon neutrality in China [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(3): 1-7 (in Chinese)
- [3] Stuiver M. Atmospheric carbon dioxide and carbon reservoir changes [J]. *Science*, 1978, 199(4326): 253-258
- [4] 邹才能, 薛华庆, 熊波, 张国生, 潘松圻, 贾成业, 王影, 马锋, 孙倩, 关春晓, 林敏捷. “碳中和”的内涵、创新与愿景[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 46-57
Zou C N, Xue H Q, Xiong B, Zhang G X, Pan S Q, Jia C Y, Wang Y, Ma F, Sun Q, Guan C X, Lin M J. Connotation, innovation and vision of “Carbon Neutral” [J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(8): 46-57 (in Chinese)
- [5] 蔡博峰, 曹丽斌, 雷宇, 王灿, 张立, 朱建华, 李明煜, 杜梦冰, 吕晨, 蒋含颖, 宁森, 王金南. 中国碳中和目标下的二氧化碳排放路径[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(1): 7-14
Cai B F, Cao L B, Lei Y, Wang C, Zhang L, Zhu J H, Li M Y, Du M B, Lv C, Jiang H Y, Ning M, Wang J N. China's carbon emission pathway under the carbon neutrality target [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(1): 7-14 (in Chinese)
- [6] 张炎. “双碳”背景下我国粮食安全与农业固碳减排协同发展研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2024
Zhang Y. Study on the synergistic development between food security and agricultural carbon sequestration and emission reduction under the ‘Dual Carbon’ framework in China [D]. Nanchang: Nanchang University, 2024 (in Chinese)
- [7] Campbell C A, Zentner R P, Liang B C, Roloff G, Gregorich E C, Blomert B. Organic C accumulation in soil over 30 years in semiarid southwestern Saskatchewan - Effect of crop rotations and fertilizers [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2000, 80(1): 179-192
- [8] 张忠学, 李铁成, 齐智娟, 陈鹏, 聂堂哲. 水氮耦合对黑土稻田土壤呼吸与碳平衡的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 301-308
Zhang Z X, Li T C, Qi Z J, Chen P, Nie T Z. Effects of water and nitrogen coupling on soil respiration and carbon balance in black soil paddy field [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(6): 301-308 (in Chinese)
- [9] Jiang Z D, Yin S, Zhang X X, Li C S, Shen G R, Zhou P, Liu C J. Research and development of a DNDC online model for farmland carbon sequestration and GHG emissions mitigation in China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, 14(12): 1493
- [10] 郭金瑞, 宋振伟, 彭宪现, 朱平, 高洪军, 彭畅, 张卫建. 东北黑土区长期不同种植模式下土壤碳氮特征评价[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 178-185
Guo J R, Song Z W, Peng X X, Zhu P, Gao H J, Peng C, Zhang W J. Evaluation in soil carbon and nitrogen characteristics under long-term cropping regimes in black soil region of Northeast China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(6): 178-185 (in Chinese)
- [11] 崔宁波, 王婷, 董晋. “双碳”目标下东北黑土区耕地利用生态效率时空格局与演变趋势[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 335-344
Cui N B, Wang T, Dong J. Temporal-spatial pattern and evolutionary trend of ecological efficiency of cultivated land use in northeast black soil areas under the ‘Carbon Peak Neutrality’ target [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(1): 335-344 (in Chinese)
- [12] 魏丹, 匡恩俊, 迟凤琴, 张久明, 郭文义. 东北黑土资源现状与保护策略[J]. 黑龙江农业科学, 2016(1): 158-161
Wei D, Kuang E J, Chi F Q, Zhang J M, Guo W Y. Status and protection strategy of black soil resources in northeast of China [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2016(1): 158-161 (in Chinese)
- [13] 范德成, 张修凡. 基于PSO-BP神经网络模型的中国碳排放情景预测及低碳发展路径研究[J]. 中外能源, 2021, 26(8): 11-19
Fan D C, Zhang X F. Scenario prediction of China's carbon emissions based on PSO-BP neural network model and research on low carbon development path [J]. *Sino-Global Energy*, 2021, 26(8): 11-19 (in Chinese)
- [14] 潘思羽, 张美玲. 基于BP神经网络的甘肃省二氧化碳排放预测及影响因素研究[J]. 环境工程, 2023, 41(7): 61-68, 85
Pan S Y, Zhang M L. Prediction of carbon dioxide emission in Gansu Province based on bp neural network and its influencing factors [J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41(7): 61-68, 85 (in Chinese)
- [15] 卢志强, 温思佳, 李雨泽, 李国瑞, 温晓霞. 免耕对玉米生产力的影响: 基于全球荟萃分析[J]. 西北农业学报, 2024, 33(3): 452-468
Lu Z Q, Wen S J, Li Y Z, Li G R, Li G R, Wen X X. Effect of No-tillage on maize productivity: A global meta-analysis [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2024, 33(3): 452-468 (in Chinese)

- Chinese)
- [16] 沈春蕾. 中科院发布国内首部东北黑土地白皮书[N]. 中国科学报, 2021-07-12(1)
- Shen C L. Chinese Academy of Sciences releases the first domestic white paper on black soil in Northeast China[N]. Science Bulletin, 2021-07-12 (1) (in Chinese)
- [17] 严圣吉, 邓艾兴, 尚子吟, 唐志伟, 陈长青, 张俊, 张卫建. 我国作物生产碳排放特征及助力碳中和的减排固碳途径[J]. 作物学报, 2022, 48(4): 930-941
- Yan S J, Deng A X, Shang Z Y, Tang Z W, Chen C Q, Zhang J, Zhang W J. Characteristics of carbon emission and approaches of carbon mitigation and sequestration for carbon neutrality in China's crop production [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48 (4): 930-941 (in Chinese)
- [18] 张帆, 宣鑫, 金贵, 吴锋. 农业源非二氧化碳温室气体排放及情景模拟[J]. 地理学报, 2023, 78(1): 35-53
- Zhang F, Xuan X, Jin G, Wu F. Agricultural non-CO₂ greenhouse gases emissions and scenario simulation analysis[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(1): 35-53 (in Chinese)
- [19] 时亚坤, 曾奕, 郭金金, 方怒放. 黄土高原新一轮退耕还林草工程对粮食生产的影响[J]. 水土保持研究, 2022, 29(3): 419-425
- Shi Y K, Zeng Y, Guo J J, Fang N F. Effect of the new phase of the grain for green program on grain output on the Loess Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29 (3): 419-425 (in Chinese)
- [20] 王想, 王春雨, 吕飞南, 陈水灵, 宇振荣. 基于PLUS-InVEST模型的区县碳储量时空格局变化与碳汇提升策略: 以延庆区为例[J]. 应用生态学报, 2023, 34(12): 3373-3384
- Wang X, Wang C Y, Lyu F N, Chen S L, Yu Z R. Temporal and spatial variations of carbon storage and carbon sink improvement strategy at the district and county level based on PLUS-InVEST model: Taking Yanqing district as an example[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(12): 3373-3384 (in Chinese)
- [21] 李雨晨, 秦宇, 杨柳, 李哲, 鲁伦慧. 长江上游大中型水库碳排放量估算与分析: 以IPCC国家温室气体清单指南为基础[J]. 湖泊科学, 2023, 35 (1): 131-145
- Li Y C, Qin Y, Yang L, Li Z, Lu L H. Estimation and analysis of carbon emissions from the large- and medium-sized reservoirs in the upper reaches of Changjiang River: On the basis of the IPCC National Greenhouse Gas Inventory[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(1): 131-145 (in Chinese)
- [22] Tian Y, Zhang J B, He Y Y. Research on spatial-temporal characteristics and driving factor of agricultural carbon emissions in China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(6): 1393-1403
- [23] 张炎. “双碳”背景下我国粮食安全与农业固碳减排协同发展研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2024
- Zhang Y. Study on the synergistic development between food security and agricultural carbon sequestration and emission reduction under the 'dual carbon' framework in China [D]. Nanchang: Nanchang University, 2024 (in Chinese)
- [24] 方钦. 农业高质量发展的评价研究[D]. 南昌: 江西财经大学, 2023
- Fang Q. Evaluation of high quality agricultural development [D]. Nanchang: Jiangxi University of Finance and Economics, 2023 (in Chinese)
- [25] 付庆武. 如何阅读使用《黑龙江统计年鉴》[J]. 统计与咨询, 2015, (5): 43-44
- Fu Q W. How to read and use the *Heilongjiang Statistical Yearbook*[J]. *Statistics and Consultation*, 2015, (5): 43-44 (in Chinese)
- [26] 姜熙丁. 中国东北地区科学发展水平的动态变化分析[J]. 人口学刊, 2015, 37(3): 63-70
- Jiang X D. Dynamic analysis on the level of science development changes in Northeast China [J]. *Population Journal*, 2015, 37 (3): 63-70 (in Chinese)
- [27] 蒋彦艺. 基于SEEA-CF的环境资产价值核算体系优化与应用研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2023
- Jiang Y Y. Optimization and application of environmental asset value accounting system based on SEEA-CF: A case study of three provinces in Northeast China[D]. Shenyang: Liaoning University, 2023 (in Chinese)
- [28] 刘明达, 蒙吉军, 刘碧寒. 国内外碳排放核算方法研究进展[J]. 热带地理, 2014, 34(2): 248-258
- Liu M D, Meng J J, Liu B H. Progress in the studies of carbon emission estimation[J]. *Tropical Geography*, 2014, 34(2): 248-258 (in Chinese)
- [29] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* [M]. Paris: Organization for Economic Co-Operation and Development, 1997
- [30] Paustian K, Ravindranath N H, Amstel A V. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [M]. *International Panel on Climate Change*, 2006
- [31] 刘学之, 孙鑫, 朱乾坤, 尚玥佟. 中国二氧化碳排放量相关计量方法研究综述[J]. 生态经济, 2017, 33(11): 21-27
- Liu X Z, Sun X, Zhu Q K, Shang Y T. Review on the measurement methods of carbon dioxide emissions in China[J]. *Ecological Economy*, 2017, 33(11): 21-27 (in Chinese)
- [32] 田云, 张俊飏, 李波. 中国农业碳排放研究: 测算、时空比较及脱钩效应[J]. 资源科学, 2012, 34(11): 2097-2105
- Tian Y, Zhang J B, Li B. Agricultural carbon emissions in China: Calculation, spatial-temporal comparison and decoupling effects [J]. *Resources Science*, 2012, 34(11): 2097-2105 (in Chinese)
- [33] 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 & Environment*, 2002, 91(1-3): 217-232
- [34] 伍芬琳, 李琳, 张海林, 陈阜. 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, 26(12): 2035-2039
- Wu F L, Li L, Zhang H L, Chen F. Effects of conservation tillage on net carbon flux from farmland ecosystems[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12): 2035-2039 (in Chinese)
- [35] 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
- [36] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014
- [37] 思雨. 黑龙江: 出台意见加快推进农业“三减”[J]. 中国食品, 2016 (23): 35
- Si Y. Heilongjiang: Putting forward opinions to accelerate the “three reductions” in agriculture[J]. *China Food*, 2016(23): 35 (in Chinese)
- [38] 刘议聪, 朱泓光, 宋永强. 一种改进粒子群算法优化BP神经网络实现核素识别方法[J]. 兵工自动化, 2016, 35(4): 88-92
- Liu Y C, Zhu H G, Song Y Q. Optimize BP neural network by an improved particle swarm optimization to implement nuclide identification [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2016, 35(4): 88-92 (in Chinese)
- [39] 朱茂然, 钱泽森. 长江经济带农业碳排放时空特征及其驱动因素分析[J].

- 贵州农业科学, 2018, 46(8): 135-140
- Zhu M R, Qian Z S. Spatial-temporal characteristics and driving factor analysis of agricultural carbon emission in Yangtze River economic zone [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2018, 46(8): 135-140 (in Chinese)
- [40] 邓娟, 杨家明. 一种改进的BP算法神经网络[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2005, 31(3): 123-126
- Deng J, Yang J M. An improvement of learning algorithm for BP neural network[J]. *Journal of Donghua University, Natural Science*, 2005, 31(3): 123-126 (in Chinese)
- [41] 郑琳. 海伦市近30年农田黑土碳储量及其时空变化[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016
- Zheng L. Spatial-temporal changes in carbon storage of cultivated mollisols in Hailun City[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016 (in Chinese)
- [42] 刘学荣, 杨琳, 王颖, 赵婧宇, 李志学, 王静静, 王乾鑫, 周嘉. 基于土地利用变化的东北地区碳排放效应研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 107-114
- Liu X R, Yang L, Wang Y, Zhao J Y, Li Z X, Wang J J, Wang Q X, Zhou J. Assessment of carbon emissions based on Land Use Change in Northeast China[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(2): 107-114 (in Chinese)
- [43] 孙雷. 吉林省能源领域碳达峰场景参数预测研究[J]. 电力勘测设计, 2024(6): 15-18, 36
- Sun L. Study on scene parameter prediction of carbon dioxide emission peak in energy sector of Jilin Province [J]. *Electric Power Survey & Design*, 2024(6): 15-18, 36 (in Chinese)
- [44] 钱凤魁, 王祥国, 顾汉龙, 王大鹏, 李鹏飞. 东北三省农业碳排放时空分异特征及其关键驱动因素[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(1): 30-40
- Qian F K, Wang X G, Gu H L, Wang D P, Wang D P, Li P F. Spatial-temporal differentiation characteristics and key driving factors of agricultural carbon emissions in the three northeastern provinces of China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32(1): 30-40 (in Chinese)
- [45] 杨新宇. 黑龙江省种植业碳补偿率和碳补偿潜力研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024
- Yang X Y. Study on carbon compensation rate and carbon offset potential of planting industry in Heilongjiang Province [D]. Changchun: Jilin University, 2024 (in Chinese)
- [46] 陈楠楠. 中国政策性农业保险支持粮食安全问题研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023
- Chen N N. Research on policy-based agricultural insurance supporting food security in China [D]. Changchun: Jilin University, 2023 (in Chinese)
- [47] 谷丰, 高畅, 柳思佳, 王若冰. “双碳”目标下我国绿色低碳技术体系构建及创新策略研究[J]. 商业经济, 2024(9): 167-170, 174
- Gu F, Gao C, Liu S J, Wang R B. The construction and innovation strategy of China's green and low-carbon technology system under the dual carbon goals[J]. *Business & Economy*, 2024(9): 167-170, 174 (in Chinese)
- [48] 荆郭霞. 生态环境保护视域下的生态环境与经济耦合协调发展: 以化肥企业为例[J]. 化肥设计, 2024, 62(2): 4-7
- Jing G X. Coordinated development between ecological environment and economic coupling from the perspective of ecological environmental protection: The case of chemical fertilizer enterprises [J]. *Chemical Fertilizer Design*, 2024, 62(2): 4-7 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 腾云, 东北农业大学教授, 管理学博士, 博士后, 博士生导师, 工业工程与物流工程教师联合党支部书记。东北农业大学学术骨干, 黑龙江省高端智库专家, 黑龙江省科技特派员服务绩效评审专家, 黑龙江省区域科技创新能力评审专家, 中国农业工程学会农业系统工程学会秘书长, 黑龙江省管理科学与工程学会理事, 黑龙江省区域科学学会理事。担任农业经济四大刊物之《中国农村经济期刊》《中国农村观察期刊》、*Journal of Occupational Safety and Ergonomics* 审稿专家。主持参与国家级省部级项目20余项, 发表SSCI、SCI、EI及CSSCI高水平学术论文30余篇。授权专利4项, 出版专著1部。获得黑龙江省高校人文社会研究优秀成果一等奖, 撰写研究报告被农业农村部采纳应用, 学术报告和研究结论多次在农业农村部新闻发布会及各类工作会议上被采用, 并被黑龙江日报新闻报道。



通讯作者简介: 徐卉, 讲师, 西三一大学管理专业博士研究生。中国农业工程学会农业系统工程学会理事。发表SCI一区top论文一篇。主要从事农业碳中和、低碳农机的相关利益主体的行为决策特征及变化规律的相关影响与应用等研究, 认为低碳农机能够降低碳排放, 提升农业的碳中和效应, 同时也能减少农业污染, 想要实现农业“碳达峰、碳中和”目标, 未来必须改变农业高能耗、高污染的生产方式, 走绿色化、低碳化生产之路。