

# 新冠疫情下碳排放权期权定价及实证研究

刘青, 张金良, 赵可景

河南科技大学数学与统计学院, 河南 洛阳

收稿日期: 2022年4月18日; 录用日期: 2022年5月13日; 发布日期: 2022年5月20日

## 摘要

随着低碳经济时代的到来, 不论是理论研究还是实际应用方面, 碳排放权的定价问题越来越受到大家的关注, 尤其是研究新冠疫情下碳排放权期权定价问题。本文借助于决策树梯度提升算法(LGBM)、自适应噪声的完全经验模态分解(CEEMDAN)及AE近似熵重构算法, 集机制转换的跳-扩散模型(RSJM)、径向基神经网络模型(RBF)的优点, 建立了一种不同特征维度下RSJM-RBF碳排放权期权定价模型; 并利用新冠疫情下欧盟EUA碳排放权期权数据进行了实证分析。实证结果表明: 与基于GARCH的分数布朗运动模型(FBM)相比, 本文提出的RSJM-RBF碳排放权期权定价模型具有较高的预测精度; 以皮尔逊相关系数为指标, 对两种模型进行了鲁棒性分析, 结果显示本文所建模型的稳健性更强。

## 关键词

碳排放权期权, CEEMDAN, LGBM, RSJM, RBF, 鲁棒性

# The Carbon Emission Right Option Pricing and Empirical Analysis under COVID-19

Qing Liu, Jinliang Zhang, Kejing Zhao

School of Mathematics and Statistics, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan

Received: Apr. 18<sup>th</sup>, 2022; accepted: May 13<sup>th</sup>, 2022; published: May 20<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

With the advent of the era of low-carbon economy, the pricing of carbon emission rights has attracted more and more attention from both theoretical research and practical application, especially the pricing of carbon emission rights options under the COVID-19. In this paper, with the

help of the gradient lifting algorithm of decision tree (LGBM), complete empirical mode decomposition with adaptive noise (CEEMDAN) and the approximate entropy reconstruction (AE) algorithm, and the advantages of the jump-diffusion model of mechanism conversion (RSJM) and the radial basis function neural network model (RBF), a RSJM-RBF carbon emission option pricing model with different feature dimensions is established. The empirical analysis is made by using the data of EU-EUA carbon emission option under the COVID-19. The empirical results show that compared with the fractional Brownian motion model (FBM) based on GARCH, the RSJM-RBF carbon emission option pricing model proposed in this paper has higher prediction accuracy. Taking Pearson correlation coefficient as the index, the robustness analysis of the two models shows that the model established in this paper is more robust.

## Keywords

Carbon Emission Right Option, CEEMDAN, LGBM, RSJM, RBF, Robustness

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

2019年, 新冠疫情的突然爆发对全球经济造成了巨大冲击, 碳交易市场产生了剧烈的震荡。在全球疫情爆发之初, 碳交易市场严重受挫[1]。欧盟碳排放交易市场作为国际上发展最为成熟的碳交易市场之一, 其碳排放权期权价格在2020年3月中旬低至15欧元, 虽然在以欧盟为代表的国家推出的绿色发展疫情复苏计划的刺激下[2] [3] [4], 碳排放权期权价格有所回升, 但此前造成的影响也不容忽视。因此, 研究碳排放权期权定价机制及演化规律十分必要。

碳排放权期权是一种实物期权, 实物期权是在金融期权的基础上发展而来的, 与金融期权有一定的相似之处。因此, 现有的碳排放权期权定价大多是借用金融期权定价方法[5] [6] [7]。Black-Scholes (B-S) 期权定价模型最先被应用于碳排放权期权研究中[8], 然而此模型是在众多假设条件下导出的, 不能很好地反应真实市场现状[9]-[14]。之后, 众多学者对该公式做出了许多改进, 例如针对资产价格的长期记忆性和波动率的随机性, 提出了分形布朗运动期权定价法[15] [16], 并与GARCH [17]模型结合, 以此在碳排放权期权定价方面取得了良好的进展[18] [19]。为了应对突发事件的影响, 刘悦等[20]提出了机制转换的期权定价模型。但以上这些模型仍存在不足之处, 如长期预测不稳定、突发事件导致价格发生剧烈波动时预测不准确等问题。

已有研究表明[21], 碳排放权期权的实物属性与金融期权也存在着不同之处, 如收益的不确定性, 碳排放权期权未来收益容易受到政策、经济发展以及投资者心理等因素的影响; 不可交易性, 碳排放权期权的标的资产可在市场上进行交易, 其本身不可交易; 投资的不可逆性, 碳排放权期权投资者一旦投资, 不可随意撤资; 先后关联性, 碳排放权期权的价值不仅仅取决于自身特征, 还与市场上其他期权存在着十分密切的联系。因此, 碳排放权期权的定价法应充分考虑收益的不确定性、投资的不可逆性以及先后关联性, 以期提升决策者评估的有效性和客观性。但已有的碳排放权期权定价模型并未将其充分考虑在内, 存在一定的不足, 因此, 为了能够为投资者和决策者提供更为合理的投资策略, 需要建立一个适用于实物期权特性的定价模型。李响楚涵[22]针对实物期权特有的性质, 将RBF神经网络模型应用于实物期权定价中, 得到的RBF神经网络模型预测准确性远远高于B-S期权定价模型, 稳定性相对较好, 没有

预测误差过高的情况出现,为实物期权定价模型提供了新的思路。由于本文主要讨论新冠疫情下实物期权定价问题,因此寻找能够快速捕捉到新冠肺炎对碳排放权期权数据影响的定价模型显得尤为重要。针对突发事件对碳排放权期权数据的影响,Li等[23]提出了机制转换的跳-扩散模型,与BSM和JDM相比,RSJM在碳排放市场上具有较高的解释力,但参数模型会受到假设条件的限制,从而影响预测准确性。因此本文考虑将RSJM参数模型与RBF神经网络非参数模型结合,提出一种针对突发事件影响下的欧盟EUA碳排放权期权定价模型。

除了单一的定价模型外,数据预处理在期权定价预测中必不可少,其中特征提取最为重要,特征提取大体上可分为价格序列分解和外部影响因素筛选。根据数据的多频率特性,Chevallier[24]将经验模态分解算法(EMD)应用于欧盟碳排放权期权价格中,将碳排放权期权价格分为8个IMFs分量和1个趋势项,提出了对于碳排放权期权价格预测的相关策略,但后来发现EMD算法存在模态混叠问题;为了解决此问题,TORRES等[25]提出了一种改进算法CEEMDAN,该方法通过多次试验抵消分解过程中噪声的影响,从而得到相对纯净的分解序列。现有研究表明[26][27],将经CEEMDAN算法分解子序列纳入输出结果的预测模型中,由于没有考虑到它们之间相似的复杂性和相关性,从而降低了效率和准确性,因此对分解后相关性较强的序列进行重构十分必要。另外,实物期权具有高度复杂性[28],需要考虑不同期权之间的相互作用,又考虑到实物期权收益的不确定性,即受到宏观经济变量的影响,到目前为止,文献鲜见将外部影响因素引入到碳排放权期权定价模型中,因此本文的研究目的之一是验证其合理性。

基于以上所述,本文主要讨论新冠肺炎疫情下的碳排放权期权定价;针对碳排放权期权与金融期权的不同之处,提出基于LGBM[29]和AE[30]序列重构的特征提取方法,充分考虑到了碳排放权期权收益的不确定性和先后关联性,有效地筛选出影响碳排放权期权的重要特征;为了解决单一模型的片面性[31][32][33]和突发事件的影响,本文提出将RS-跳扩散参数模型与RBF神经网络非参数模型相结合,与GARCH-FBM模型相比具有较高预测精度和较强稳健性。

## 2. 模型的建立

利用LGBM特征筛选、CEEMDAN价格分解以及AE序列重构算法得到碳排放权期权价格的重要影响因素,构建不同维度下的RSJM-RBF组合预测模型。基本预测框架如图1所示:

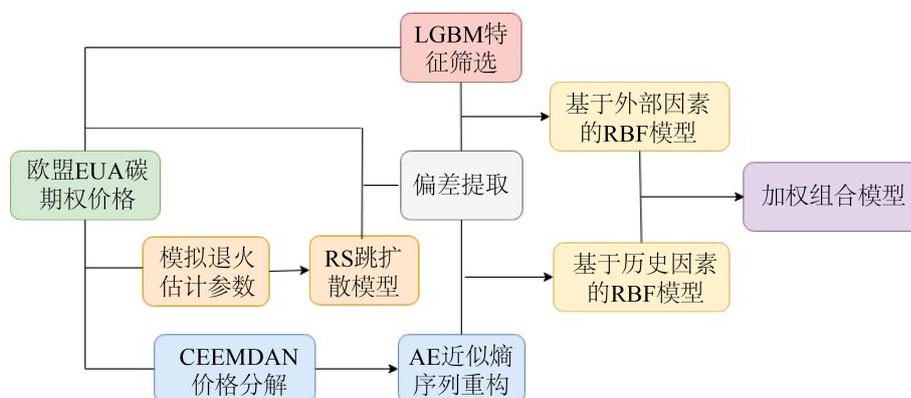


Figure 1. Flow chart of model

图 1. 模型流程图

### 2.1. LGBM 特征工程

针对欧盟碳排放权期权的先后关联性和收益的不确定性,综合已有文献研究[34][35],本文选取了如

表 1 所示的指标来对碳排放期权价格进行预测。为了得到最优影响因素，使用 LGBM 对待选因素进行特征重要性排序。

上述特征只考虑到外部因素的影响，忽略了价格序列本身的特征，故本文利用 CEEMDAN 和 AE 对碳排放期权价格进行分解和重构，将其直接作为影响碳排放期权价格的内在影响因素，以期提高预测精度。

### 2.2. 机制转换的跳 - 扩散模型(RSJM)

RSJM 下的碳排放期权价格公式为[36]:

$$V = \int_0^T V_0(S_0, K, T, \Gamma) f_{T_0}(t | s(0) = 0) dt \tag{1}$$

$f_{T_0}(t | s(0) = 0)$  为正常经济状态下累积逗留时间的条件概率密度。

$$V_0(S_0, K, T, \Gamma) = \sum_{n_0=0}^{\infty} \sum_{n_1=0}^{\infty} \frac{e^{-(k+1)[\lambda_0 t + \lambda_1(T-t)]} (\lambda_0 t)^{n_0} (\lambda_1(T-t))^{n_1} (k+1)^n}{n_0! n_1!} V(S_0, K, T, r_n^*, \sigma_n^*) \tag{2}$$

$$V(S_0, K, T, r_n^*, \sigma_n^*) = S_0 \phi(d_{n1}^*) - Ke^{-rT} \phi(d_{n2}^*) \tag{3}$$

其中， $V(S_0, K, T, r_n^*, \sigma_n^*)$  是到期时间为  $T$ ，敲定价格为  $K$ ，波动率为  $\sigma_n^*$ ，利率为  $r_n^*$  的标准 BS 期权定价公式。

$$(\sigma_n^*)^2 = \sigma_0^2 t + \sigma_1^2 (T-t) + \frac{n}{T} \delta^2 \tag{4}$$

$$r_n^* = r_0 t + r_1 (T-t) - \lambda_0 k t - \lambda_1 k (T-t) + \frac{n}{T} \ln(1+k) \tag{5}$$

$t$  和  $T-t$  为正常经济状态( $l=0$ )和重大事件发生时经济状态( $l=1$ )的累积逗留时间， $n_0$  和  $n_1$  分别为两种状态下跳跃次数，总跳跃次数为  $n = n_0 + n_1$ 。

Table 1. List of features to be selected

表 1. 待选特征列表

	具体指标		具体指标
同类替代产品	欧盟 CER 结算价	宏观经济	德国 DAX30 指数
	欧盟 CER 成交量		泛欧斯托克 600 指数
电力价格	法国电力指数		富时欧洲指数
	纽卡斯尔动力煤现货价		MSCI 欧洲发达市场指数
一次能源	YMEX 天然气收盘价		标的资产价格 $s_0$
	0EBQ 天然气收盘价		无风险利率 $r$
	SRGI 天然气收盘价		执行价 $K$
	英国石油收盘价	B-S 特征	到期日 $T$
	WTI 原油现货价		波动率 $\text{Sigma}$
	Brent 原油现货价		
	ETFS 原油收盘价		

### 2.3. RBF 神经网络模型

基于 RBF 神经网络模型在实物期权定价中的良好表现, 即训练速度快, 不容易陷入局部最优值等优点, 本文将其纳入研究中。另外, 目前关于期权定价的研究方法主要从以下两个角度来考虑: 基于历史数据本身的期权定价和基于外部影响因素的期权定价; 由于单一模型的预测往往具有片面性, 综合利用基于两种角度的 RBF 神经网络模型的输出信息, 赋予不同权重, 即误差小的权重高, 误差大的权重低, 再将两种输出结果进行融合, 不但能提高预测精度还能获得稳定输出。

最优权重可通过构建以下方程组求得[37]:

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^n \left( Y_i - \sum_{i=1}^n \omega_i Z_{it} \right)^2 = 11.5 \\ \sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $Y_i (i=1,2,\dots,n)$  是实际碳排放权期权价格,  $Z_{it} (i=1,2,\dots,n)$  是各模型的预测价格,  $\omega_i$  是加权系数, 最终预测值为:

$$Z_i = \sum_{i=1}^n \omega_i Z_{it} \quad (7)$$

## 3. 实证分析

### 3.1. 数据来源

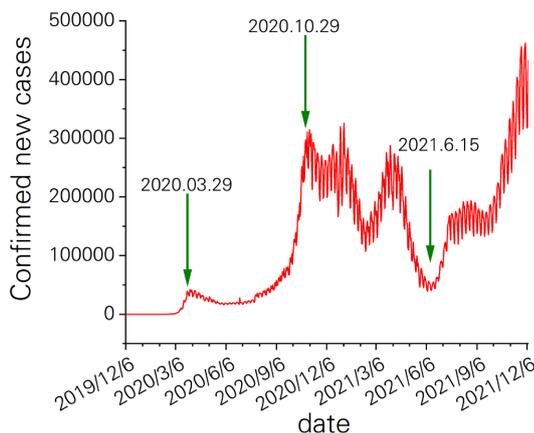
为评价所提混合模型在碳排放权期权定价研究中的有效性和实用性, 本文以 2019 年 12 月~2021 年 12 月欧盟碳排放配额 EUA 期货期权合约日收盘价作为研究对象, 到期日为 2021 年 12 月 21 日, 部分实验数据如表 2 所示。

**Table 2.** Partial experimental data

**表 2.** 部分实验数据

date	CER 收盘价	法国电力指数	纽卡斯尔动力煤现货价	EUA 开盘价
2019/12/6	25.34	9.40	67.33	24.94
2019/12/9	25.53	9.37	66.59	25.13
2019/12/10	25.34	9.37	66.26	24.94
2019/12/11	24.86	9.41	66.12	24.48
2019/12/12	25.46	9.54	66.28	25.07
2019/12/13	24.38	9.68	66.31	24.02
2019/12/16	25.20	9.65	66.11	24.86

为研究疫情下碳排放权期权价格的波动情况, 本文针对欧盟每日确诊病例数, 将疫情分成了四个时期, 分别为疫情形成期(2019.12.6~2020.3.29)、一次爆发期(2020.3.30~2020.10.29)、疫情波动期(2020.10.30~2021.6.15)和二次爆发期(2021.6.16~2021.12.7), 如图 2 所示。



**Figure 2.** Number of daily confirmed cases in EU  
**图 2.** 欧盟每日确诊病例数

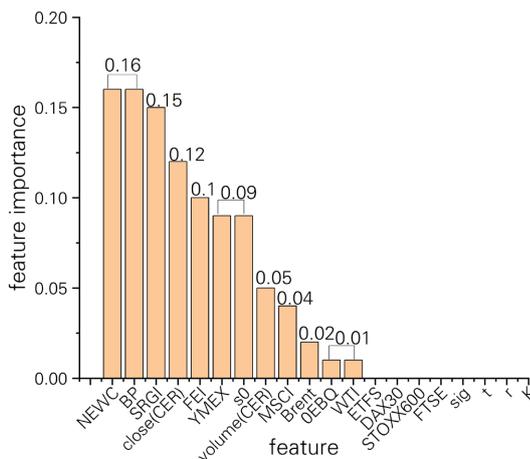
### 3.2. 特征筛选

本文使用 LGBM 回归算法对表 1 所选变量进行特征重要性筛选, 由于不同时期碳排放期权价格具有不同的特性, 因此在利用 LGBM 进行筛选时, 所选参数也不同, 具体参数如表 3 所示:

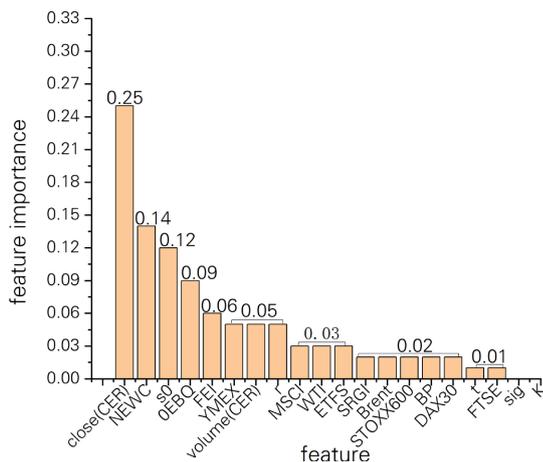
**Table 3.** Parameter settings of LGBM regression algorithm in different periods  
**表 3.** LGBM 回归算法在不同时期的参数设置

	n_estimators	num_leaves	learning_rate
疫情形成期	700	30	0.05
一次爆发期	800	30	0.09
疫情波动期	600	30	0.05
二次爆发期	1000	30	0.05

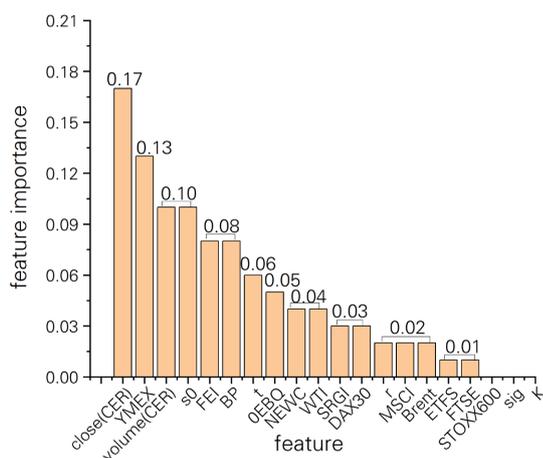
基于以上参数设置, 使用 python 中的 SK-learn 框架下 LGBM 回归算法进行特征重要性筛选, 结果如图 3~6 所示:



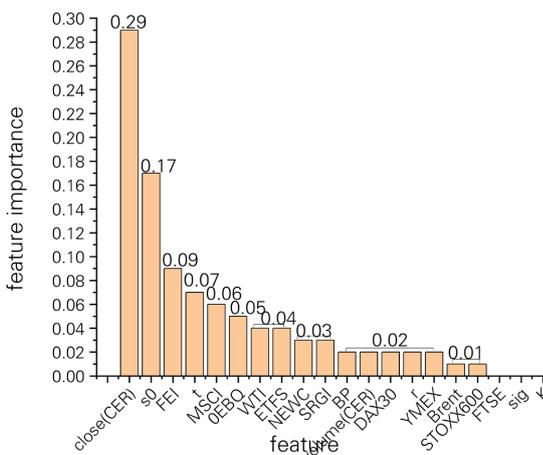
**Figure 3.** Importance of characteristics of epidemic formation period  
**图 3.** 疫情形成期特征重要性



**Figure 4.** Importance of characteristics of an outbreak period  
**图 4.** 一次爆发期特征重要性



**Figure 5.** Importance of epidemic fluctuation period characteristics  
**图 5.** 疫情波动期特征重要性



**Figure 6.** Importance of characteristics of secondary eruption period  
**图 6.** 二次爆发期特征重要性

为了保持模型的精度和稳健性, 本文选取在四种时期重要性均大于等于 0.03 的特征进行后续模型的实验, 即本文最终选取开盘价(S0)、欧盟 CER 收盘价(close)、纽卡斯尔动力煤现货价(NEWC)、法国电力指数(FEI)来对碳排放权期权价格进行预测。

### 3.3. 数据分解与重构

通过 CEEMDAN 对欧盟碳排放权期权价格进行分解, 得到 5 个 IMF 和 1 个趋势项, 结果如图 7 所示, 随后利用 AE 信息熵算法重建了解分解后的子序列, 分解序列和重构序列的相关统计指标如表 4 和表 5 所示。

Table 4. Statistical indicators of each component

表 4. 各分量的统计指标

	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	R
Pearson	0.05	0.032	0.028	0.031	0.13	0.98
Kendall	0.022	0.022	0.017	0.053	0.1	0.81
Spearman	0.035	0.033	0.018	0.053	0.14	0.94

从表 4 可以看出, IMF1-IMF4 与碳排放权期权价格的相关系数都不高, 在肯达尔相关系数、皮尔逊相关系数和斯皮尔曼相关系数的研究中都远小于 IMF5 和趋势项与碳排放权期权的相关性, 为了提高各分量和趋势项的应用价值, 本文考虑将各分量进行重构得到 AE1 (IMF1, IMF4)、AE2 (IMF2, IMF3)和 AE3 (IMF5, R), 重构后的统计指标如表 5 和图 8 所示。

Table 5. Statistical indicators of each reconstructed sequence

表 5. 各重构序列的统计指标

分量	Pearson 相关系数			Kendall 相关系数			Spearman 相关系数		
	AE1	AE2	AE3	AE1	AE2	AE3	AE1	AE2	AE3
统计指标	0.046	0.039	0.99	0.055	0.027	0.88	0.057	0.033	0.98

对比表 4, 可以看出重构后三种相关系数比重构前有了明显提高。从而提高了各分量和趋势项对碳排放权期权价格的影响程度, 对后续准确预测提供了较大帮助。

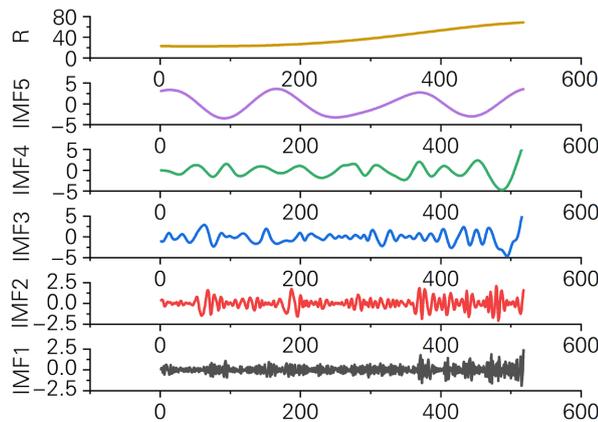
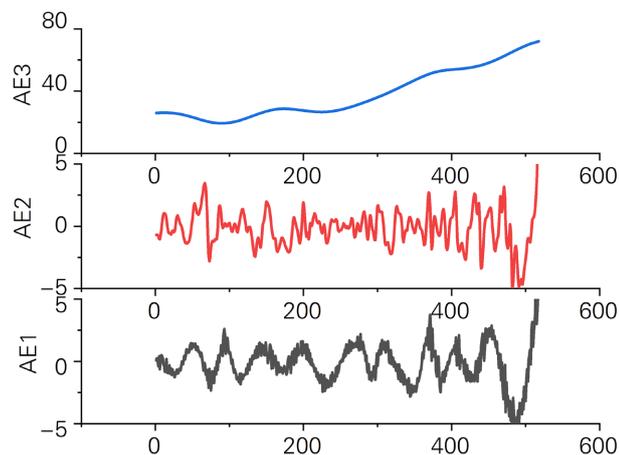


Figure 7. EU EUA price breakdown sequence diagram

图 7. 欧盟 EUA 价格分解序列



**Figure 8.** Approximate entropy reconstruction sequence of each subsequence

**图 8.** 各子序列的近似熵重构序列

### 3.4. 欧盟碳排放期权价格实证分析

不同的时间序列数据有适合的预测模型，可以通过不同的参数值区分。在 RBF 神经网络模型中，内部参数的选择是影响其模型泛化能力的重要因素，因此，本文经过多次反复训练得到不同纬度下 RSJM-RBF 模型的最佳超参数。各维度下模型重要参数如表 6 所示。

**Table 6.** Important parameters of each model

**表 6.** 各模型重要参数

	Indim	numCenters	outdim
AE-RSJM-RBF	5	25	1
LGBM-RSJM-RBF	6	36	1

为了直观地判断每个模型的预测效果，本文选择了三个常用的误差评价指标来衡量模型的性能。较低的平均绝对百分比误差(MAPE)更符合预期，均方根误差(RMSE)用来测量观测值和实际值之间的偏差，如果模型拟合得更好，拟合优度( $R^2$ )将更接近 1。评价指标的计算公式如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100\% \\ R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \\ \text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \end{array} \right. \quad (8)$$

其中， $y_i$  表示真实碳排放期权价格， $\hat{y}_i$  表示预测的碳排放期权价格， $\bar{y}_i$  表示碳排放期权价格的均值， $n$  表示样本数量。

为了验证本文所提模型的有效性，选择了 GARCH-FBM、不同特征下的 RSJM-RBF 权重组合模型进

行对比实验。如图 9，给出了两个模型的预测对比结果，如表 7，给出了四个模型的性能比较结果。

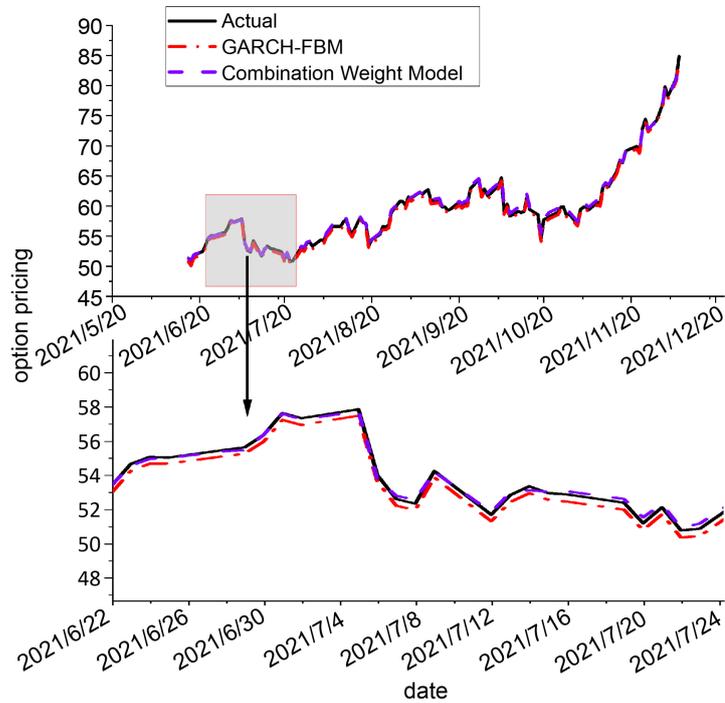


Figure 9. Comparative results of two models

图 9. 两种模型的对比结果

Table 7. Performance comparison of different prediction models of EU carbon option price

表 7. 欧盟碳排放权期权价格不同预测模型的性能对比

	MSE	MAPE	R <sup>2</sup>
FBM-GARCH	0.2146	0.0077	0.9952
AE-RSJM-RBF	0.3141	0.0070	0.9930
LGBM-RSJM-RBF	0.1192	0.0050	0.9973
Weight Combination Model	0.0889	0.0040	0.9980

实验结果表明，本文所提模型的预测精度要优于 GARCH-FBM 模型，其中 MSE 提高了 0.1257，拟合优度达到 0.9980。由图 9 上知，在整个二次爆发时期，只有一个阶段(2021.6.22~2021.7.22)出现较为明显的波动，且波动后碳排放权期权价格整体呈降低趋势，由于碳排放权期权市场具有短暂的滞后效应，观察图 9 下，Weight Combination Model 能够快速响应期权价格波动初期的震荡情况，进而准确预测出波动位置和幅度。而 GARCH-FBM 模型响应相对缓慢，预测也呈低估趋势。

除了通过以上评估指标来对模型的精度进行分析外，模型鲁棒性研究也极为重要，为了评估不同模型在随机扰动下的稳健性，本文通过对不同模型中对碳排放权期权价格影响最大的特征随机添加 100 次相同扰动项，并求出不同模型预测结果与真实期权价格之间的皮尔逊相关系数，具体结果如图 10 和图 11 所示。

在无随机干扰的情况下，本文所提模型和 GARCH-FBM 模型两者的预测结果与真实期权数据之间的相关系数分别为 0.99 和 0.994，由图 10 可看出，本文所提混合模型的预测结果最稳定，相关系数在

0.99~0.994 之间, 而 GARCH-FBM 在 100 次随机干扰下相关系数有明显降低, 因此本文所提模型的鲁棒性要优于 GARCH-FBM 模型。

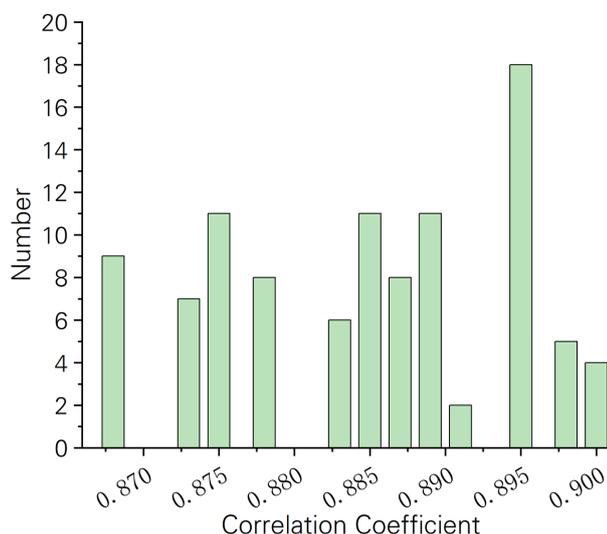


Figure 10. Robustness analysis of GARCH-FBM model

图 10. GARCH-FBM 模型鲁棒性分析

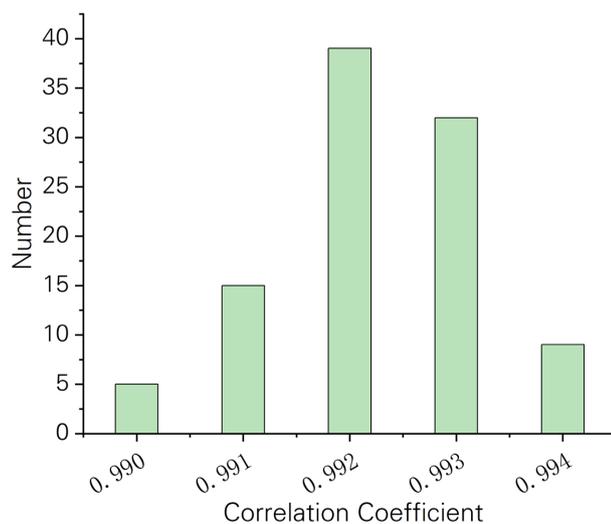


Figure 11. Robustness analysis of weight combination model

图 11. 权重组合模型的鲁棒性分析

## 4. 结论

本文将新冠肺炎疫情与碳排放权期权价格联系起来, 针对疫情下碳排放权期权价格波动较大, 滞后性明显等特点, 将参数模型和非参数模型结合, 充分利用各模型的优点, 提出了不同特征维度下 RSJM-RBF 神经网络模型, 与 GARCH-FBM 模型对比具有较高的预测精度, 且本文所提模型的稳定性要优于参照模型, 本文研究具体表现如下:

(一) 针对疫情下碳排放权期权数据的特性, 借助于 LGBM 特征筛选和 AE 序列重构算法, 建立了不同特征维度下 RSJM-RBF 神经网络模型。

(二) 本文所建模型能够快速响应突发事件下的碳排放期权价格变化情况, 预测精度和鲁棒性均优于参照模型, 且比参照模型更能准确预警到期权价格的波动位置和波动幅度。

(三) 根据 LGBM 特征筛选, 同类替代产品中 CER 结算价和电力价格在不同时期的重要性并未受到较大影响, 且一直处于重要地位。宏观经济在各个时期重要性持续处于较低位置, 一次能源价格在疫情前重要性显著, 疫情爆发之时, 重要性整体有所降低。B-S 特征中的开盘价在疫情前影响不大, 疫情后影响显著。

因此, 后期应着重关注同类替代产品、电力价格和 EUA 收盘价对碳排放期权的影响, 也可将气候因素和投资者情绪等因素考虑在内, 以此建立优化后的碳排放期权定价模型, 给决策者和投资者提供更为合理的指导作用。

## 基金项目

国家自然科学基金(51675161)。

## 参考文献

- [1] 田永, 李瑞强, 刘文静. COVID-19 疫情前后欧盟碳金融市场的配额拍卖价格及启示——基于碳达峰、碳中和背景[J]. 价格月刊, 2021(8): 1-9.
- [2] 杨成玉. 欧盟绿色复苏对中欧经贸关系的影响[J]. 国际贸易, 2020(9): 54-60.
- [3] 王信, 杨婷, 姜晶晶, 等. 疫情冲击对绿色发展和气候相关风险防范的影响[J]. 中国改革, 2020(6): 55-60.
- [4] 杨成玉. 欧盟复苏计划及其潜在效应[J]. 现代国际关系, 2020(8): 25-32.
- [5] 江瑞. 基于蒙特卡罗模拟法的中国核证自愿减排量(CCER)碳排放权价值评估研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆理工大学, 2018.
- [6] Liu, Z.B. and Huang, S. (2019) Research on Pricing of Carbon Options Based on GARCH and B-S Model. *Journal of Applied Science and Engineering Innovation*, **6**, 109-116.
- [7] 韩丹丹. 基于实物期权的企业碳交易决策研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津工业大学, 2019.
- [8] 朱跃钊, 陈红喜, 赵智敏. 基于 B-S 定价模型的碳排放权交易定价研究[J]. 科技进步与对策, 2013, 30(5): 27-30.
- [9] Merton, R.C. (1976) Option Pricing When Underlying Stock Returns Are Discontinuous. *Journal of Financial Economics*, **3**, 125-144. [https://doi.org/10.1016/0304-405X\(76\)90022-2](https://doi.org/10.1016/0304-405X(76)90022-2)
- [10] Kou, S.G. (2002) A Jump-Diffusion Model for Option Pricing. *Management Science*, **48**, 1086-1101. <https://doi.org/10.1287/mnsc.48.8.1086.166>
- [11] Palao, F. and Pardo, A. (2012) Assessing Price Clustering in European Carbon Markets. *Applied Energy*, **92**, 51-56. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.10.022>
- [12] 陈晓红, 王昀昀. 欧洲碳排放权交易价格机制的实证研究[J]. 科技进步与对策, 2010, 27(19): 142-147.
- [13] 王恺, 邹乐乐, 魏一鸣. 欧盟碳市场期货价格分布特征分析[J]. 数学的实践与认识, 2010, 40(12): 59-65.
- [14] 张帅, 梁龙跃. 基于 Heston 模型的上证 50ETF 期权定价及动态对冲研究[J]. 中国物价, 2021(12): 56-58.
- [15] 韦伟, 潘泽瀚. 基于 Garch 模型碳排放期权定价方法研究[J]. 中国外资, 2014(1): 131-132.
- [16] 徐静, 储盼, 任庆忠. 碳排放期权定价及实证研究[J]. 统计与决策, 2015(6): 162-165.
- [17] Hung, J.C., Liu, H.C. and Yang, J.J. (2020) Improving the Realized GARCH's Volatility Forecast for Bitcoin with Jump-Robust Estimators. *The North American Journal of Economics and Finance*, **52**, Article ID: 101165. <https://doi.org/10.1016/j.najef.2020.101165>
- [18] 张晨, 彭婷, 刘宇佳. 基于 GARCH-分形布朗运动模型的碳排放期权定价研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2015(38): 1553-1558.
- [19] Liu, Z. and Huang, S. (2020) Carbon Option Price Forecasting Based on Modified Fractional Brownian Motion Optimized by GARCH Model in Carbon Emission Trading. *The North American Journal of Economics and Finance*, **55**, Article ID: 101307. <https://doi.org/10.1016/j.najef.2020.101307>
- [20] 刘悦, 杨爱军, 林金官. 基于机制转换模型的碳排放期权定价[J]. 数理统计与管理, 2019, 38(2): 225-234.

- [21] 宋晓迪. 基于实物期权法的碳资产评估研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [22] 李响楚涵. 基于 RBF 神经网络的实物期权定价研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [23] Li, C.Y., Chen, S.N. and Lin, S.K. (2016) Pricing Derivatives with Modeling CO<sub>2</sub> Emission Allowance Using a Regime-Switching Jump Diffusion Model: With Regime-Switching Risk Premium. *European Journal of Finance*, **22**, 887-908. <https://doi.org/10.1080/1351847X.2015.1050526>
- [24] Chevallier, J. (2009) Carbon Futures and Macroeconomic Risk Factors: A View from the EU ETS. *Energy Economics*, **31**, 614-625. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2009.02.008>
- [25] Xu, Y., Luo, M., Tao, L., et al. (2017) ECG Signal De-Noising and Baseline Wander Correction Based on CEEMDAN and Wavelet Threshold. *Sensors*, **17**, 2754. <https://doi.org/10.3390/s17122754>
- [26] Jwa, B., Xin, S.A., Qian, C.A., et al. (2021) An Innovative Random Forest-Based Nonlinear Ensemble Paradigm of Improved Feature Extraction and Deep Learning for Carbon Price Forecasting. *Science of the Total Environment*, **762**, Article ID: 143099. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143099>
- [27] Zhou, J.G. and Chen, D.F. (2021) Carbon Price Forecasting Based on Improved CEEMDAN and Extreme Learning Machine Optimized by Sparrow Search Algorithm. *Sustainability*, **13**, 4896. <https://doi.org/10.3390/su13094896>
- [28] 陈金龙. 实物期权定价理论与方法研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2003.
- [29] Naik, K.S. (2021) Predicting Credit Risk for Unsecured Lending: A Machine Learning Approach.
- [30] Richman, J.S. and Randall, M.J. (2000) Physiological Time-Series Analysis Using Approximate Entropy and Sample Entropy. *American Journal of Physiology Heart & Circulatory Physiology*, **278**, H2039. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.2000.278.6.H2039>
- [31] Zhang, Y., Chen, B., Pan, G., et al. (2019) A Novel Hybrid Model Based on VMD-WT and PCA-BP-RBF Neural Network for Short-Term Wind Speed Forecasting. *Energy Conversion and Management*, **195**, 180-197. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.005>
- [32] Liu, D.Z., Jiang, T., Zhang, Y.C., et al. (2021) Forecast Model of Airport Haze Visibility and Meteorological Factors Based on SVR-RBF Model. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **657**, Article ID: 012029. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/657/1/012029>
- [33] 杨昌辉, 邵臻, 刘辰, 付超. 一种混合建模方法及其在 ETF 期权定价中的应用[J]. 中国管理科学, 2020, 28(12): 44-53.
- [34] 胡贝贝. 基于多因素的国际碳市场价格预测研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [35] 彭紫君. 基于改进果蝇优化算法的欧盟碳价预测[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 中南财经政法大学, 2019.
- [36] 何晓蓉. 基于体制转换与模糊跳扩散过程的欧式期权定价[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- [37] 蔡婉贞, 黄翰. 基于 BP-RBF 神经网络的组合模型预测港口物流需求研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2019, 40(5): 84-90.