

基于 LSTM 神经网络的碳价波动率预测研究——以上海市为例

王家威

长春理工大学经济管理学院，吉林长春，130000；

摘要：碳排放权交易价格波动率的预测对于我国碳交易市场具有重要意义，能够帮助我国监管机构采取相应的措施来稳定碳交易市场。基于 LSTM 神经网络的优越预测性能，本文使用 LSTM 神经网络来对上海市碳价波动率进行预测。首先，根据理论分析选取了影响上海市碳价的关键因素，并将其作为 LSTM 神经网络的输入特征；接着，构建 LSTM 神经网络，对上海市碳价波动率进行训练，检验其模型拟合性能；最后，运用 LSTM 神经网络对上海市未来十个交易日的碳价波动率进行了预测。预测结果表明，LSTM 神经网络在训练集上的表现良好，MAE 和 MSE 误差分别为 0.0411 和 0.0026。基于本研究结果，提出在当前我国碳排放权交易体系基础上加快完善碳交易定价机制，更新和优化碳价波动率预测模型，促进我国碳交易市场的稳定运行。

关键词：碳排放权；波动率；LSTM 神经网络

DOI：10.69979/3029-2700.24.12.038

前言

近年来，随着巴黎协定的签署，国际碳市场迎来前所未有的发展机遇，各国纷纷建立或完善本国的碳交易体系。中国，作为全球最大的碳排放国，亦积极响应，推出全国碳市场，力图构建低碳经济的新篇章。在此背景下，深入探究碳价波动率的预测，不仅是学术研究的热点，也是实践操作的迫切需求。它关乎着企业如何制定战略规划，金融机构如何管理风险，政府又该如何调控市场，以达到减排与经济增长的和谐共生。

然而，碳价波动率的预测绝非易事。一方面，碳市场受到多重因素交织影响，从宏观经济、政策法规到天气变化乃至社会情绪，每一个细微的变化都可能引发波澜。另一方面，碳价的内生动力机制复杂，既有商品属性，又有金融属性，加之信息不对称、投机行为等因素，增加了预测难度。因此，开发高效、精确的预测模型，成为了应对碳价波动、把握市场脉搏的关键所在。

1 相关研究文献综述

目前，国内对此的研究可主要从碳价影响因素和预测模型两方面展开来说。

对于碳价影响因素的研究。易兰等人（2017）通过引入 MIV-BP 神经网络模型模拟了煤炭价格、原油价格等十一个影响因素对 EUA 期货价格的影响程度，得出了各个影响因素的影响程度大小。孟栖（2022）从宏观经

济、能源价格、气候环境和外部溢出等因素方面分析了对北京碳排放权交易价格的影响效果，发现煤炭价格是影响北京碳价的主要因素。马云哲（2023）测算了沪深 300 指数、上证工业指数、煤、石油、天然气价格、空气质量指数和气温等因素对北京、上海、广州、深圳和武汉五个城市碳价的影响情况。冯浩博和余杨（2024）通过对上海碳市场的碳价波动和影响因素进行研究，发现能源价格和气温会推动碳排放权交易价格上升，而经济因素与碳价呈现出了负相关。王一宁（2024）通过 VAR 模型定量对比分析发现全国碳价波动的主要影响因素包括宏观经济、金融市场、天气状况等。

对于预测模型的研究。鞠可一等人（2019）通过 C-V-SVM 预测时序回归模型分别对欧盟碳价和我国碳价的波动情况进行预测分析，结果反映了我国碳交易市场较之欧盟碳市场目前还不够成熟。刘洋（2020）通过实证分析发现 BP 神经网络比 SVM 支持向量机更适用于对复杂非线性特征的数据进行预测。施露凡和刘鹏兰（2023）应用 GARCH 模型来对我国碳排放权交易市场的波动特征进行评估，发现 GARCH 模型能够较好地对我国碳金融市场价格波动特征进行较好拟合。刘石璇（2023）应用 CNN-GRU 模型并结合各个碳价影响因素对我国碳市场的碳价进行预测，结果显示该模型具有较高的预测精度。段钧陶和杨晓忠（2024）通过构建 CEEMDAN 和 LSTM 神经网络预测模型对北京碳价波动率进行预测，结果

显示该模型在碳价波动率预测方面具有较高的准确性和稳定性。

分析可得,目前我国在碳价影响因素方面研究成果较显著,但对于通过预测模型来对碳价波动率预测方面还有点相对不足,故本文使用 LSTM 神经网络对上海碳市场碳价波动率进行预测,使碳价波动率的预测结果能够达到更高的拟水准。

2 我国碳交易发展现状及碳价影响因素分析

2.1 发展现状

我国碳交易市场大致经历了从地方试点起步,逐步走向全国统一市场,再到深入融入全球经济体系的过程。为了推动我国经济向低碳经济发展模式的转型,2011 年 10 月批准北京、天津、上海、重庆、广东、湖北、深圳七地开展碳排放交易试点工作,之后又加入了福建碳试点市场,八个试点碳市场不断优化制度体系,发展形成要素不同、各具特色的地方碳市场,为所在区域控制温室气体排放、加速低碳转型发挥了关键作用。这些碳试点市场的行业覆盖范围主要包括发电、钢铁、建材、有色、石化、化工、造纸和航空等重点行业。这些行业是我国二氧化碳排放的主要来源,覆盖了我国约 75% 的二氧化碳排放。2021 年 7 月 16 日,我国正式启动全国碳排放权交易市场,这是我国经济发展方式向绿色低碳转型的关键一步。截至 2024 年,我国碳交易市场已经取得了显著的进展。全国碳排放权交易市场自 2021 年 7 月启动上线交易以来,已经完成了两个履约周期,实现了预期建设目标。全国碳排放权交易市场 2023 年底的碳排放配额累计成交量达 4.43 亿吨,累计成交额 249.19 亿元。其中,第二个履约周期的成交量和成交额分别为 2.63 亿吨和 172.58 亿元,都大幅优于第一个履约周期,交易规模逐步扩大,交易价格稳中有升,交易主体更加积极。由图 2.1 可以看出,自全国碳排放权交易市场启动后,我国碳价整体呈现出了稳步上升的态势,这也显示了我国碳交易市场活力的稳步提高。



图 2.1 碳价走势图

2.2 影响因素

根据前文对碳价影响因素的研究可知,目前关于碳价影响因素认可度较高的主要有宏观经济、能源价格、国外碳价、工业发展、气候因素等。其中,宏观经济与工业发展密切相关,工业又是二氧化碳排放量的主要来源,从而宏观经济对碳价有着重要影响,宏观经济因素的两个个重要指标选取沪深 300 指数和 GDP 增长率。能源价格的变化会直接影响企业的生产成本和碳排放水平,进而影响碳配额价格,而我国目前的能源消费结构还是以煤炭为主,2023 年底煤炭占全国能源消费总量的 55.3%,原油也是目前碳排放的重要产生来源,故能源价格的两个重要指标选取煤炭价格和 WTI 原油期货结算价。欧盟碳市场作为全球最早的碳市场,经历了 20 来年的发展,目前已经发展成为一个多国参与的全球性碳市场,形成了一套成熟稳定的市场机制,其碳排放权价格能够较真实的反映出市场对于碳排放权的供需关系,故国外碳价中的重要指标选取 EUA 期货结算价。工业部门作为排放权的重要来源,能够对碳价产生极大影响,工业发展中的重要指标选取上证工业指数。气候变化会对碳排放权的供需产生深刻影响,从而影响碳价,气候因素中的重要指标选取了空气质量指数。

3 碳价波动率预测模型构建

循环神经网络,又称为 CNN,是一种主要用于时间序列预测的深度学习模型。长短时记忆网络,即 LSTM 神经网络,是 CNN 的一种特殊形态。LSTM 神经网络的核心在于其细胞状态和三个门控结构:输入门、忘记门、输出门,这些结构共同决定了信息如何流入、存储和流出细胞状态。其中,细胞状态主要复杂存储和传递信息,三个门控机制控制了这些信息的流动。

遗忘门决定了该被丢弃的信息,通过 sigmoid 激活函数 f_t 计算:

$$f_t = \sigma(W_f[ht-1, xt] + b_f) \quad (3.1)$$

输入门决定了那些信息该被更新以及新信息的内容,分别通过激活函数 i_t 和 $\tanh$ 函数 $\bar{c}$ 来计算:

$$i_t = \sigma(W_i[ht-1, xt] + b_i) \quad (3.2)$$

$$\bar{c} = \tanh(W_c[ht-1, xt] + b_i) \quad (3.3)$$

输出门决定了该被转移到下一个隐藏状态的信息内容,通过 sigmoid 函数 o_t 计算,并且最终的隐藏状态 ht 由细胞状态和输出门共同决定:

$$o_t = \sigma(W_o[ht-1, xt] + b_o) \quad (3.4)$$

$$H_t = \text{otanh}(c_t) \quad (3.5)$$

细胞状态 c_t 的更新规则包括忘记不需要的信息和加入新的信息两类。

LSTM 神经网络的结构如图 2.2 所示：

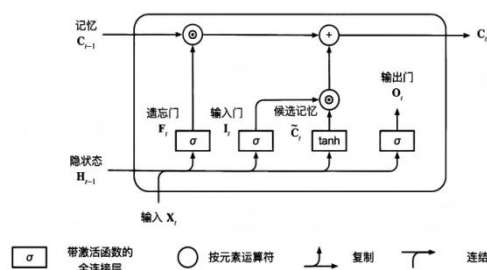


图 2.2 LSTM 神经网络结构示意图

4 碳价波动率预测结果实证分析

4.1 数据预处理

本文选取了 2021 年 8 月 2 日-2024 年 10 月 16 日期间上海市碳价及煤炭价格、WTI 原油期货结算价等各个影响因素的历史数据。考虑到碳价和其影响因素指标的部分日期数据缺少，本文在数据预处理的过程中将空缺数据剔除，使得序列数据更具可靠性。

4.2 模型训练

首先，选择了 WTI 原油价格、煤炭价格、GDP 增长率、EUA 价格、CSI300 指数、上海工业指数及空气质量等七个关键特征，并在被输入到模型之前均经过标准化处理，以确保均值为 0、标准差为 1，消除不同特征尺度之间的影响。在数据集的划分方面，按照 8:2 的比例将数据划分为训练集和测试集。另外，构建了一个包含 100 个隐藏单元的 LSTM 网络，采用 `sequenceInputLayer` 作为输入层，以便处理时间序列数据。之后接入了一个全连接层 `fullyConnectedLayer`，输出模型的预测值，最后通过 `regressionLayer` 用于回归任务，计算损失。在训练选项方面，使用 Adam 优化算法进行模型训练，设定最大训练轮次为 2000。小批量大小被设定为 20，这有助于提高训练过程中的收敛速度与稳定性。此外，初始学习率设置为 0.01，采用分段式学习率调整策略，以动态适应训练进度。在 800 个周期后会下降学习率，以优化后续的训练效果。在训练过程中，通过 `Verbose`，设定为 0 来抑制详细信息输出，使用 `Plots` 和 `training-progress` 选项实时可视化训练过程中的指标变化。

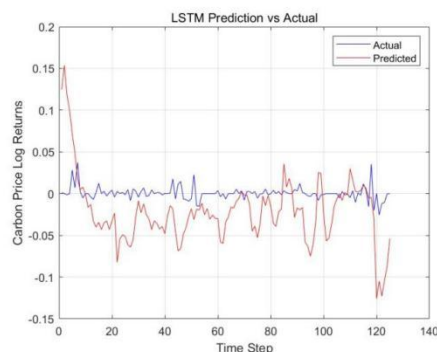


图 4.1 LSTM 神经网络碳价波动率的拟合图

通过 MATLAB 编程进行 LSTM 神经网络的训练，LSTM 神经网络对上海市碳价波动率的拟合结果如图 4.1 所示，可以看出碳价收益率的预测波动率整体上与真实波动率结果差距较小，围绕真实波动率在上下波动率，拟合效果较好。

4.3 模型验证与预测

本文通过 MAR 和 MSE 两个指标对比 LSTM 神经网络的碳价波动率拟合性能进行评估。通过 MATLAB 编程计算出了 LSTM 神经网络的 MAE 和 MSE 指标数值分别为 0.0411 和 0.0026，整体数值相对较小，故可知 LSTM 神经网络对碳价波动率的拟合效果较好。在此基础上，对上海市未来十日碳价的波动率进行预测，预测结果为 0.0200。

5 结论

本文在目前有研究基础，选取了 WTI 原油价格、煤炭价格、GDP 增长率、EUA 价格、CSI300 指数、上海工业指数及空气质量等七项碳价的重要影响因素。通过 LSTM 神经网络，将上海市碳价及其七个影响因素进行训练，其训练结果显示 LSTM 神经网络对上海市碳价波动率的拟合效果较好，从而通过其对上海市未来十日碳价波动率进行了预测。基于本研究的分析和结论，政府需加强对我国碳价定价机制的完善，增强碳市场的价格发现能力和定价效率，更新和优化碳价波动率预测模型，使得 LSTM 神经网络能够更好地服务于我国碳市场的定价需求。促进我国碳交易市场的平稳运行和健康发展。

参考文献

- [1] 易兰, 杨历, 李朝鹏, 等. 欧盟碳价影响因素研究及其对中国的启示[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(6): 42-48.
- [2] 孟栖. 基于 VEC 模型的北京碳排放权交易价格影响

因素研究[D]. 北京:中国石油大学(北京),2022.

[3]马元哲. 中国碳排放权交易市场碳价影响因素研究[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学,2023.

[4]冯浩博,余杨. 上海碳市场价格波动变化分析及影响因素研究[J]. 上海经济,2024(4):27-38.

[5]王一宁. 中国碳交易市场价格波动特征及其影响因素研究[D]. 吉林:吉林大学,2024.

[6]鞠可一,戈荣琛,周德群,等. 中国碳交易市场碳价波动分析[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版),2019,33(1):78-86.

[7]刘洋. 欧盟碳排放权市场波动率预测研究[D]. 黑龙江:哈尔滨工程大学,2020.

[8]施露凡,刘鹏兰. "双碳"目标背景下我国碳排放权交易市场价格波动及风险度量研究[J]. 中国商论,2023(10):96-99.

[9]刘石璇. 基于深度学习模型的我国碳排放权价格预测研究[D]. 华北电力大学,2023.

[10]段钧陶,杨晓忠. 基于CEEMDAN和优化LSTM模型的碳价波动率预测研究[J]. 中国科技论文在线精品论文,2024,17(2):283-293.

作者简介:王家威(1999.11.5—),男,汉族,河南开封人,经济学在读全日制硕士,长春理工大学经济管理学院金融学研究生,研究方向:证券投资与资本市场。