

基于因素分解与ARIMA混合模型的广州碳排放权交易价格预测

王星皓

成都理工大学数学科学学院, 四川 成都

收稿日期: 2026年9月19日; 录用日期: 2026年10月9日; 发布日期: 2026年10月22日

摘 要

在“双碳”目标背景下, 碳排放权交易对企业资产配置及风险管理具有重要意义, 在国家层面的宏观调控以及履约期限的影响下, 碳价序列往往表现出非平稳性和异方差等问题, 准确预测碳价有利于企业管理和控制碳资产, 也有助于政府进一步改进碳价形成机制。基于此本文选取广州碳排放权交易市场2018年7月6日至2026年1月20日的日度数据作为研究对象, 首先进行对数差分和平稳性检验后, 应用赤池信息准则建立自回归移动平均模型提取其线性部分, 然后由于该模型对于极端值无法给出较好的估计, 所以在基础模型之上运用时间序列加法分解剔除其长期趋势、季节效应以及随机扰动项得到一个新的预测值, 并将其与基础模型预测结果相结合形成混合预测的方法。结果表明广州碳价存在长记忆性以及履约期内季节性变化的特点; 而且相比起基础模型而言, 采用混合方法后可以使得预测均方根误差降低约9.58%, 说明其在减小较大预测误差方面具有一定优势。本文也为碳金融市场上的资产价格预测提供了一种思路, 在企业融资约束以及税务处理方面也给政府带来一定的启示。

关键词

碳排放权交易, 价格预测, 因素分解模型, 自回归移动平均模型

Price Forecasting of Guangzhou Carbon Emission Trading Based on a Hybrid Factor Decomposition and ARIMA Model

Xinghao Wang

School of Mathematical Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

Received: September 19, 2026; accepted: October 9, 2026; published: October 22, 2026

Abstract

Under the background of the “Dual Carbon” goals, carbon emission trading is of great significance to corporate asset allocation and risk management. Influenced by national macro-control and compliance periods, carbon price time series often exhibit non-stationarity and heteroscedasticity. Accurately forecasting carbon prices not only benefits enterprises in managing and controlling their carbon assets but also assists the government in further improving the carbon price formation mechanism. Accordingly, this paper selects the daily trading data of the Guangzhou Carbon Emission Trading Market from 6 July 2018 to 20 January 2026 as the research object. First, after performing logarithmic differencing and stationarity tests, an autoregressive moving average model is established using the Akaike Information Criterion (AIC) to extract the linear components of the series. Subsequently, considering that the base model struggles to accurately estimate extreme values, a time series additive decomposition method is employed to strip out the long-term trend, seasonal effects, and random disturbances. These extracted components are then combined with the prediction results of the base model to formulate a hybrid forecasting approach. The empirical results demonstrate that the Guangzhou carbon price possesses characteristics of long memory and seasonal variations during the compliance period. Furthermore, compared to the single base model, the proposed hybrid approach reduces the forecasting Root Mean Square Error (RMSE) by approximately 9.58% indicating an advantage in reducing larger forecasting errors. This paper offers a novel perspective for asset price forecasting in carbon financial markets and provides insights for policymakers regarding corporate financing constraints and taxation treatments.

Keywords

Carbon Emission Trading, Price Forecasting, Factor Decomposition Model, Autoregressive Moving Average Model

Copyright © 2026 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

气候变化是二十一世纪人类面临的重大问题，在全球绿色低碳发展的大背景下，积极稳妥地推进碳达峰、碳中和，是我国对世界所做的郑重承诺，也是促进我国经济社会发展全面绿色转型、实现高质量发展的内生动力[1]。2021年，国务院发布《2030年前碳达峰行动方案》，明确了我国到2030年前实现碳达峰的时间表和路线图[2][3]，要求各地根据自身的实际情况合理规划、稳步实施减排行动，避免一哄而上式的“运动式”减碳以及“高碳锁定”。

由于是全国经济总量最大并且制造业非常发达的一个省份，所以在双碳方面，广东是走在前列的省份。而广东省政府以及广州市委市政府都制定了一系列具体措施来推进双碳工作。广州市提出，到2025年，经济社会绿色低碳循环发展取得显著成效[4][5]，全市能源资源利用效率达到全国先进水平，单位GDP能耗和二氧化碳排放须完成省政府下达的目标任务，森林覆盖率达到41.65%，同时构建多类型清洁能源供应保障能力。从长远看，广州计划到2030年前实现碳达峰之后稳定下降，在本世纪中叶建成国际一流美丽宜居生态城市，实现碳中和。

为使短期内更有效果，广东又发布一个短期措施《广东省2024—2025年节能降碳行动方案》¹。这

¹https://www.gd.gov.cn/zwgk/wjk/qbwj/yf/content/post_4637336.html

个文件提出了一些量化的、有力度的要求：2024 年广东省单位 GDP 能耗下降 2.5% 左右，碳排放下降 3.9% 左右；2025 年非化石能源占一次能源消费比重提升至 32% 左右；在各个行业中大力推动节能减排工作，比如到 2025 年底，广东省所有水泥企业都必须完成超低排放改造任务，建材行业要具备减排二氧化碳约 260 万吨的能力；此外，在公共机构方面也采取非常严格的管控措施，规定到 2025 年底，广东省所有公共机构禁止使用煤炭，并尽快淘汰一批老旧柴油公务车辆。

除了密集行政命令以及严格的规定以外，碳排放权交易市场的存在是使用市场手段来治理气候变化问题最重要的一种经济手段，在发现价格方面起着重要作用。而广州碳排放权交易中心是我国最大的区域性的碳市场之一，其发展水平在全国也是领先的。目前，广州碳市场已完成碳排放配额交易量约 2.25 亿吨。更重要的是市场规模在迅速扩大，除了原来的钢铁、石化、水泥、造纸、航空五大高耗能高排放行业之外，2024 年广东省碳市场将 195 家来自数据中心、陶瓷、港口等新的行业加入到配额管理之中^[6]。特别是随着人工智能以及数字经济的发展，未来将成为耗电大户的数据中心被纳入碳市场后对区域内的碳排放配额需求端带来了巨大的增量以及不确定性。同时，广州碳交中心也在进行碳金融产品创新，例如编制并发布了《碳配额抵质押融资实施指南》²以及建立碳普惠平台，帮助粤东西北地区林业碳汇项目与控排企业之间的履约需求进行匹配，在实现碳达峰目标的同时创造数千万的收入。这既是对碳排放配额供给侧又是需求侧的影响，也让广州碳金融市场上的竞争变得异常激烈。

2. 文献综述及理论假说

2.1. 文献综述

准确预测碳交易市场的价格走势，是监管部门科学设定与分配配额总量、平抑市场异常波动，以及控排企业制定最优履约采购策略与开展碳资产套期保值的前提。然而，受宏观经济波动、突发性政策微调、极端天气变化以及非理性投机情绪的多重交织影响，碳价时间序列天然具有极强的非线性、高噪声与突变集聚特征。

回顾现有文献，早期的预测研究大多依赖于经典的线性计量经济学模型，其中以自回归积分滑动平均模型最为典型。ARIMA 模型能够较好地提取金融时间序列中的线性自相关规律与趋势特征，但其在面对碳市场因履约期效应或突发政策引发的极端脉冲波动时，往往显得无能为力。近年来，随着深度学习技术的跨越式发展，学术界大量引入人工智能算法来捕捉碳价的非线性特征。例如，有学者利用上海碳市场的日度交易数据构建了 ARIMA-LSTM 组合模型^[7]，将 ARIMA 对线性趋势预测的残差输入至 LSTM 网络中进行二次非线性学习，显著降低了预测误差。更进一步，部分研究针对煤炭与碳排放的联动价格，开发了涵盖卷积神经网络提取局部特征、双向 LSTM 捕捉时序相依性、结合 ARIMA 进行融合预测的复杂网络模型。

尽管上述深度学习与人工智能模型在各类误差评价指标上屡创佳绩，但它们在金融与政策经济学领域面临着一个致命的缺陷：“黑箱”属性。深度神经网络的参数极度庞杂，无法像传统计量经济学模型那样直观地解释各个变量背后的经济学含义。对于政府监管层而言，他们不仅需要知道明天的碳价是多少，更迫切需要厘清这个价格究竟是由长期政策收紧驱动的，还是由短期履约季节性恐慌造成的。缺乏经济解释力的纯技术流预测，难以转化为切实可行的碳市场调控政策。

2.2. 理论假说

单一 ARIMA 模型主要提取线性动态，难以反映履约期集中采购等重复出现的结构性波动。本文据

²https://gdee.gd.gov.cn/gkmlpt/content/4/4457/impost_4457504.html

此将广州碳价分解为长期趋势项、季节项和随机扰动项：长期趋势项反映配额供需、产业景气和政策预期等因素的综合影响，季节项反映年度履约窗口前后的重复性采购行为，随机项吸收其余短期冲击。

本文使用 2018 年 7 月 6 日至 2026 年 1 月 20 日的 1829 个交易日数据，通过中心移动平均和周期平均分离长期趋势与季节效应，再对季节调整后的序列建立 ARIMA 模型。模型效果通过 RMSE、MAE 和 MAPE 进行比较，履约效应则通过 6~7 月与其他月份以及具体履约日期前后的量价变化进行检验。

3. 研究设计

3.1. 数据来源与变量筛选

本文数据源于八爪鱼数据采集器抓取的全国公开碳市场交易信息。在对原始数据进行格式统一、清洗和去重后，本文筛选出广州碳排放权交易市场 2018 年 7 月 6 日至 2026 年 1 月 20 日的 1829 个交易日行情数据作为研究样本。

经过以上过程得到一份“广州碳排放交易日线数据表”，此数据表包括交易日期、交易机构、交易品种、开盘价、最高价、最低价、成交均价、收盘价、成交量、成交金额等重要字段，在此数据表中每一条记录就是广州碳排放权交易中心在某一天对于某种交易产品所发生的所有交易情况。

在选择核心因变量进行时间序列分析中，虽然日内最高价、最低价可以反映行情波动程度，但是容易受到个别机构出现打错单、对敲或是突发大额订单的影响；成交量及成交金额在不同交易日内变化巨大，在有突发事件发生情况下会出现突然大幅上涨，具有很强非线性特征变化，直接用线性时间序列模型很容易造成拟合失败。而收盘价是每天最后一个交易时间内所有买卖力量经过一天充分博弈以及各种信息充分吸收之后形成的最后平衡价格，因此确定收盘价为唯一的因变量来建立模型。

3.2. 数据预处理

在格式统一以及数据转换中，把非结构化“交易日期”一栏内容统一解析成标准“YYYY-MM-DD”形式的时间戳并且按时间轴从小到大排序，在此基础上，把所有价格相关指标以及成交量、成交金额等字段全部强制转换成双精度浮点型数值以便后续更高层次的矩阵操作以及取对数操作，对于各种各样的异常符号均准确地检测出来并替换成统计软件可以使用的缺失值标记。

对于如何填补缺失值，在这里我们使用前向填充的方法来处理缺失值问题。也就是说如果程序遍历到时间线上某一天缺少完整交易信息，则程序会往前寻找最近一交易日有记录的信息来代替它[8]。这种方法从数学的角度保证了时间序列样本的一致性和完整性，同时也符合经济上对金融市场认知的看法，在没有新边际订单入场以及市场价格未受到外部突发事件影响情况下，碳资产价格应当合理地保持上个交易日最后一个成交价。

3.3. 模型设计

为揭示碳价的动态演进规律，本文引入了单位根检验、自回归移动平均建模以及加法因素分解的数理统计综合框架。所有的参数估计均在设定的显著性水平下进行论证。

1) 序列平稳性检验与对数差分

在构建经典的 ARIMA 模型前，首要前提是确保输入的时间序列满足协方差平稳性假定。本文采用增广迪基-富勒检验来检测序列中是否存在单位根。若原序列 P_t 被证实为非平稳过程，则需要运用差分算子进行降阶处理。

然而，碳价在长期攀升过程中，往往伴随着波动幅度的指数级扩大。为了同时解决趋势非平稳与方差发散的双重问题，本文引入对数一阶差分变换，即计算市场的每日对数收益率 R_t 。该公式可表示为：

$$R_t = \ln(P_t) - \ln(P_{t-1}) \quad (1)$$

这种非线性对数变换可以很好地解决指数型递增波动的数据特点，使其成为近似线性的叠加。而且它还可以使序列在零点附近的振幅具有更好的均等性以及提高模型参数估计效果，因此在接下来的部分我们将使用 Ljung-Box (LB) 来进行差分之后的序列是否具有随机性的判断。如果 LB 的结果显示一个很小的 p 值，那么就意味着原来的收益序列中仍然存在一些潜在的线性关系的信息，这对接下来的工作是非常有利的一个铺垫。

2) ARIMA 模型构建算法

由于前序步骤已通过取对数一阶差分($d=1$)实现了序列的平稳化，本文实际进入了 $ARMA(p, q)$ 的建模阶段。其一般形式数学方程如下：

$$Y_t = c + \sum_{i=1}^p \phi_i Y_{t-i} + \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j} + \varepsilon_t \quad (2)$$

其中， Y_t 代表平稳化后的对数收益率； c 为常数截距项； p 为自回归项的滞后阶数， ϕ_i 衡量了历史收益率对当期收益率的直接线性冲击传递； q 为移动平均项的阶数， θ_j 捕捉了前期未预期到的随机外部冲击对当期价格的修正作用。模型的最优滞后阶数(p, q)组合将通过计算并在全局域内 AIC 准则与 BIC 准则来自自动确定。

3) 因素分解框架与季节性重构

传统 ARIMA 模型依赖历史线性关系的延续，难以直接反映履约期集中采购。广东碳市场的配额清缴通常集中于年中，本文将 6~7 月设为履约窗口，并以 2021 年 7 月 20 日和 2024 年 7 月 31 日两个明确履约日期为分界，比较截止日前后各 10 个交易日的平均收盘价和成交量。该比较用于识别时间对应关系，不作单一政策的因果解释。

为了剥离并量化这一结构性特征，本文采用了加法因素分解模型。考虑到碳价波幅在历史区间内相对恒定，并未随绝对价格基数的攀升呈现指数级无限发散，加法模型是最优选择。其构成框架如下：

$$P_t = T_t + S_t + R_t \quad (3)$$

P_t 表示重构还原后的真实原始价格。 T_t 表示长期趋势项，本文使用 252 阶中心移动平均法进行提取。该时间窗口约覆盖一个完整交易年度，用于滤除高频噪音并识别价格中枢的阶段变化。长期趋势项反映配额供需、产业景气、能源成本和政策预期等因素的综合影响，不预设其随政策变化而单向上升。 S_t 表示季节效应项，利用周期平均法按年度交易日历进行同位对齐叠加与平均运算，剥离出履约期前后固定重复的价格溢价模式。 R_t 为剔除上述两者后的随机残差序列。混合预测模型的最终实现路径为：对剔除季节周期的平滑序列利用最优 ARIMA 进行基准趋势前推，随后将确定的季节周期特征在其对应的时间节点上进行同频外加重组，从而还原出未来真实的碳排放权绝对价格轨迹。

4. 数据特征与平稳性分析

4.1. 描述性统计分析

表 1 为广州碳排放权交易核心变量描述性统计量，广州碳市场成交量呈极端右偏分布，均值远超中位数，表明市场日常流动性枯竭，仅在履约期临近或政策冲击时才会爆发脉冲式的集中交易。同时，成交均价极易受异常大额报价扭曲，波动剧烈；相比之下，收盘价分布更为集中且稳定。

4.2. 平稳性检验

通过绘制并仔细研读原始收盘价序列的自相关函数与偏自相关函数图谱，可以直观捕捉其内在的时

间相关结构。

Table 1. Descriptive statistics of core variables of Guangzhou carbon emission rights trading

表 1. 广州碳排放权交易核心变量描述性统计量

变量名称	样本量	最小值	中位数	均值	最大值	标准差
开盘价	1829	3	39.22	45.4	95.26	21.54
最高价	1829	12	40.5	46.72	97.98	22.4
最低价	1829	11.8	38.5	44.33	89.99	21.37
成交均价	1829	1.27	38.91	46.54	968.75	40.31
收盘价	1829	5.11	39.26	45.44	95.26	21.55
成交量	1829	1	11252	79847.28	2351982	175937
成交金额	1829	13	487240.98	2749671.45	85565381.08	5748924.66

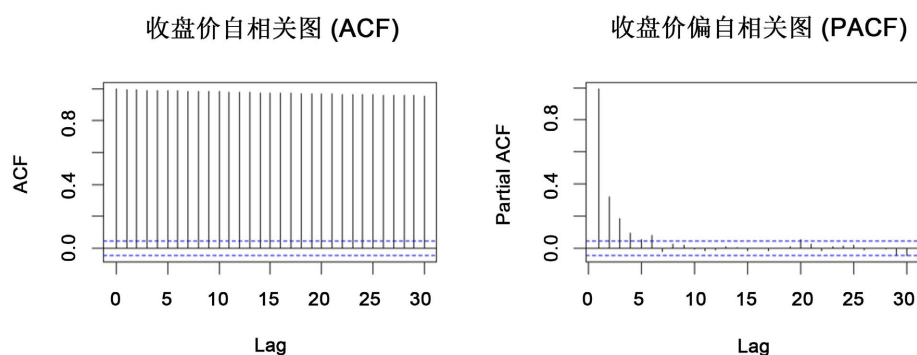


Figure 1. Original sequence autocorrelation plot and partial autocorrelation plot

图 1. 原始序列自相关图与偏自相关图

观察图 1 可知，广州碳价的自相关系数随滞后阶数的增加呈现出缓慢衰减的拖尾特征，且持续处于 95% 的置信区间之外；而偏自相关系数则表现出显著的一阶截断特征。上述统计特征是包含单位根的非平稳随机序列的典型表现。

为进一步验证上述图形观测的结论，本文采用 ADF 检验对序列的平稳性进行严格的统计检验。ADF 检验的原假设为时间序列存在单位根。检验结果显示，在滞后阶数为 12 阶的设定下，ADF 统计量为 -0.59733，对应的 p 值为 0.9774，显著大于 0.05 的显著性水平。因此，无法拒绝存在单位根的原假设，这表明广州碳排放权交易的原始收盘价序列确为非平稳时间序列。此外，为检验该序列是否具有统计建模的意义，本文进一步采用 Ljung-Box 检验对其进行白噪声检验。该检验的原假设为时间序列为纯随机序列。检验结果表明，在滞后阶数为 6 阶时，卡方统计量高达 10786，对应的 p 值接近于 0 ($<2.2e-16$)。该结果在 1% 的显著性水平下强烈拒绝了白噪声原假设，证实广州碳价原始序列具有显著的自相关性与内在动力学特征，蕴含着有效的市场信息，具备进一步进行时间序列建模与深度分析的价值。

4.3. 一阶差分

鉴于原始序列的非平稳性，为消除长周期趋势并提取平稳成分，本文对其进行了一阶差分处理[9]。观察图 2 可知，原序列的长期单边趋势已被有效剔除，差分序列呈现出围绕零值上下震荡的均值回归特征。

进一步的 ADF 检验结果显示，ADF 统计量降至-13.677，对应的 p 值为 0.01。因此，在 1%的显著性水平下拒绝存在单位根的原假设，证实一阶差分序列已满足平稳性要求。

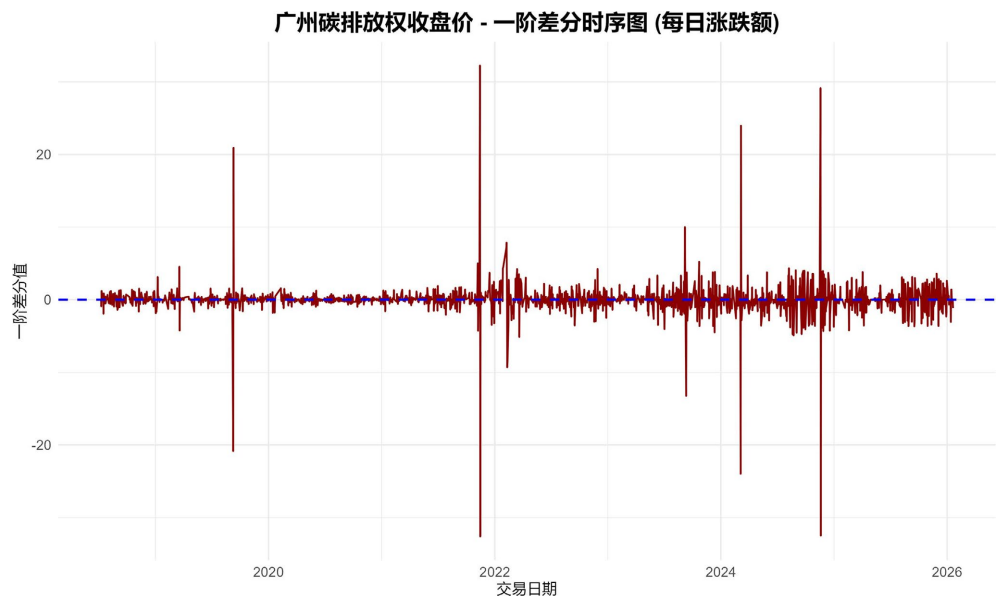


Figure 2. First-Order difference time series diagram
图 2. 一阶差分时序图

然而，对一阶差分序列的进一步审视表明，该序列在不同时间区间的方差存在显著的非均匀性。特别是在 2022 年之后，受全国统一碳市场落地预期及宏观政策环境变化的影响，序列的绝对波动幅度明显放大，呈现出金融时间序列中典型的波动聚集特征。这表明，尽管一阶差分序列在均值层面实现了平稳，但在方差层面仍表现出强烈的条件异方差性。若忽视异方差特征直接进行线性建模，将导致模型参数估计的有效性降低及预测置信区间的失效，进而影响相关风险对冲决策的科学性。

4.4. 对数收益率转换

为解决这一异方差问题，本文采用金融时间序列分析中常用的对数差分方法对数据进行处理。具体而言，对原始收盘价序列取自然对数以压缩绝对数值的波动尺度后，对该对数序列进行一阶差分。离散时间条件下的计算公式如下：

$$R_t = \ln(P_t) - \ln(P_{t-1}) \tag{4}$$

R_t 为第 t 期的对数收益率， P_t 为第 t 期的收盘价[10] (表 2)。

Table 2. Test of logarithmic return series
表 2. 对数收益率序列检验

检验方法	统计量	滞后阶数	p-value
ADF 检验	-16.162	12	0.01
Ljung-Box 检验	348.79	6	<2.2e-16

观察图 3 可知，序列的异方差现象得到显著改善。除少数受宏观政策冲击引发的脉冲波动外，序列

在零值附近的波动整体趋于均匀，有效抑制了原一阶差分序列波动率随时间发散的趋势。

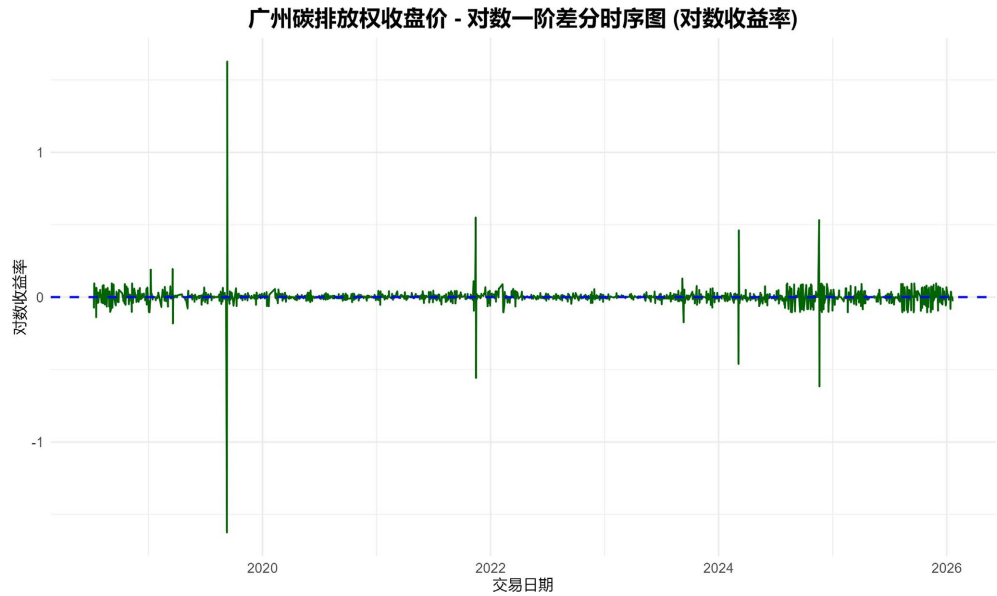


Figure 3. Logarithmic first-order difference time series diagram
图 3. 对数一阶差分时序图

进一步的统计检验结果显示，该对数收益率序列的 ADF 检验 p 值为 0.01，在 1% 的显著性水平下拒绝存在单位根的原假设。同时，LB 检验的 p 值趋近于 0 ($<2.2e-16$)，在 1% 的显著性水平下强烈拒绝纯随机序列原假设[11]。上述检验充分证明，对数收益率序列不仅满足平稳性要求，且保留了显著的自相关结构与市场信息。

5. 基础模型估计与预测

5.1. 模型定阶与参数估计

在确定模型的自回归阶数与移动平均阶数时[12]，若仅依赖传统的图形定阶法，不可避免地会引入较强的研究者主观认知偏差与视觉误差。为确保模型结构选择的客观性与最优化性，本文采用了基于 AIC 准则与 BIC 准则[13]的全局自动寻优算法。

计算结果显示，针对已平稳的对数收益率序列，最优模型结构为 ARIMA (1, 0, 1) (表 3)。

Table 3. Model parameter
表 3. 模型参数

模型参数	估计值	评价指标	对应数值
AR (1)	0.0948	AIC	-5269.21
MA (1)	-0.7653	BIC	-5247.17
Mean	0.0006		

自回归项 AR(1)系数为 0.0948 表明广州碳市场的对数收益率有轻微的一阶自相关性，在前一日的基

础上，当日价格变动对该日收益率有一定的促进作用，即投资者情绪或者市场冲击会在较短时间内产生

一定的惯性延续。

移动平均项 MA (1)系数估计值为-0.7653, 这说明市场中有一个很强的短期反向修正的力量。从时间序列的角度看, 移动平均项是表示之前不可观测的随机扰动对于当前收益率的滞后的影响。而且该系数显著小于零并且其绝对值很大, 这就意味着当市场由于外部因素或者非理性的行为而偏离其合理的价格时, 在紧接着的一天市场自身会有一个相反的变化来抵消大部分之前出现的随机扰动的影响。

5.2. 显著性检验

为验证模型的统计有效性与拟合的充分性, 本文进一步对模型参数进行了显著性检验, 并对残差序列进行了纯随机性检验(表 4)。

Table 4. Significance test of model parameters
表 4. 模型参数的显著性检验

参数项	估计系数	标准误差	Z 统计量	p-value
AR (1)	0.0948	0.0320	2.9584	0.0031
MA (1)	-0.7653	0.0206	37.0847	<2.2e-16
Intercept	0.0006	0.0003	1.714	0.0864

参数显著性检验表明, AR (1)以及 MA (1)系数对应的 p 值为 0.003 以及接近于零, 在 1%的显著性水平上都具有统计学意义, 说明这个模型的参数是合理的。此外, 模型截距项的 p 值为 0.086, 在 5%的显著性水平下未能拒绝原假设, 与金融计量经济学理论以及有效市场假设一致, 在相对有效率的市场中, 金融市场中的日度对数收益率一般围绕着零值波动, 并不存在明显的均值漂移。所以从统计上看, 截距项无统计意义也是合理的, 不影响整个模型的效果。

为检验模型拟合的充分性, 确认数据中的自相关信息已被有效提取, 本文采用 Ljung-Box 统计量, 在多个滞后阶数下对模型拟合所产生的残差序列进行了纯随机性检验。

Table 5. Test for the pure randomness of model residuals
表 5. 模型残差的纯随机性检验

测试滞后阶数	X-squared	p-value
Lag = 6	0.3842	0.9990
Lag = 12	3.3556	0.9925
Lag = 18	5.9375	0.9964

根据表 5 的检验结果, 在滞后 6 阶、12 阶及 18 阶下, 残差序列的 Ljung-Box 检验 p 值均接近于 1, 显著大于 0.05 的常规显著性水平。因此, 无法拒绝残差为纯随机序列的原假设, 证明模型残差已具备白噪声特征。该结果表明, 序列中已不存在显著的线性自相关性, ARMA (1, 1)模型已充分提取并解释了广州碳排放权对数收益率序列中的线性动力学信息。综上所述, 该基准模型的设定与参数估计稳健可靠, 拟合充分, 满足进行时间序列科学预测的前提条件。

5.3. 短期价格预测

基于上述参数估计结果, 针对对数收益率时间序列的差分方程为:

$$Y_t = 0.0006 + 0.0948Y_{t-1} - 0.7653\varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t \quad (5)$$

得到对数收益率预测后, 利用指数变换反推出广州碳排放权交易市场未来 30 个交易日收盘价预测值, 在此期间第一天预测收盘价是 38.99 元/吨, 然后由于自回归以及移动平均的影响, 价格略有上涨, 到第 30 天上涨到 39.74 元/吨。

这种相对平滑的趋势说明, 在一个大概 30 天以内的短中期预测期内, 由前期收益率所造成的正向动量以及由于之前的价格变化所导致的负向均值回归两者之间的力量达到一种平衡状态, 在此期间的价格变动范围变小, 说明在目前的制度背景以及配额分配情况下, 对于短期内碳价的一个合理的水平已经达成一致的看法, 这也意味着广州碳市场的自我调节能力较强, 其价格发现的功能正在逐渐成熟。

但是需要注意的是, ARIMA 模型是经典的单变量线性时间序列模型, 它的预测基于过去的数据线性外推。而它不能很好地反映由于经济周期的变化、突发事件的发生或者履约期的到来所带来的非线性的跳跃以及结构上的突变。因此为了提高模型对于市场的剧烈变动和非线性动态特性的描述能力和预测效果, 在此基础上进一步的研究可以考虑使用非线性建模的方法或是混合建模的方法来探索。

6. 混合模型拟合

6.1. 因素分解模型

观察广州碳价的历史观测数据可知, 其绝对波动幅度在不同年度间保持相对稳定, 并未随价格中枢的抬升而呈现出显著的指数型发散特征。基于此数据特性, 本文选用加法分解模型作为基础分析框架:

$$Y = T + S + R \quad (6)$$

Y 为原始价格时间序列; T 为长期趋势项; D 为确定性的季节或周期变动项; R 为随机残差项。

6.2. 混合模型预测

首先, 使用时间序列分解去除原始收盘价序列中季节性部分, 得到只含有长期趋势以及随机扰动项去季节化序列; 然后, 对这个去季节化序列利用 AIC 准则找到合适的 ARIMA 模型阶数并估计其参数, 从而得出未来 30 个交易日基准趋势预测值; 之后, 在第一步得到季节变化部分延长到预测期, 在此基础上应用加法模型的思想:

$$Y = \text{ARIMA} + S \quad (7)$$

长期趋势项在 2019~2022 年总体上升, 2023~2025 年出现回落, 表明其变化并非由政策持续收紧单向推动, 而是配额供需、产业景气、能源成本和政策预期共同作用的结果。由于本文未引入外生变量, 上述对应关系属于描述性解释(图 4)。

6.3. 拟合效果与履约效应分析

为评估混合模型相较于单一 ARMA 模型的预测性能, 本文选取均方根误差、平均绝对误差与平均绝对百分比误差作为评价指标。在相同的历史样本区间内, 对两者的样本内拟合精度进行了对比分析(表 6)。

样本内对比结果表明, 混合模型的 RMSE 由 2.0535 降至 1.8568, 改善 9.58%; MAE 和 MAPE 略有上升。因此, 混合模型的优势主要体现为减少较大的预测偏差。

从 6 月到 7 月这个特定履约期有明显的季节性特点, 该履约期的边际效应比其他月份高约 1.052 元/吨, 而且日均成交量比基准值增加近六成。根据不同的履约时间划分时间段来看, 在履约日前后十个交易日内, 成交量以及收盘价格都发生了很大变化: 履约日后成交量减少近九成, 同时收盘价格下降超过

百分之八。这说明履约行为对于市场价格所起到的作用。目前的研究成果只是基于数据进行分析得到的结果，在未来还需要利用理论模型更深入地探讨其中的原因以及进行系统的阐述。

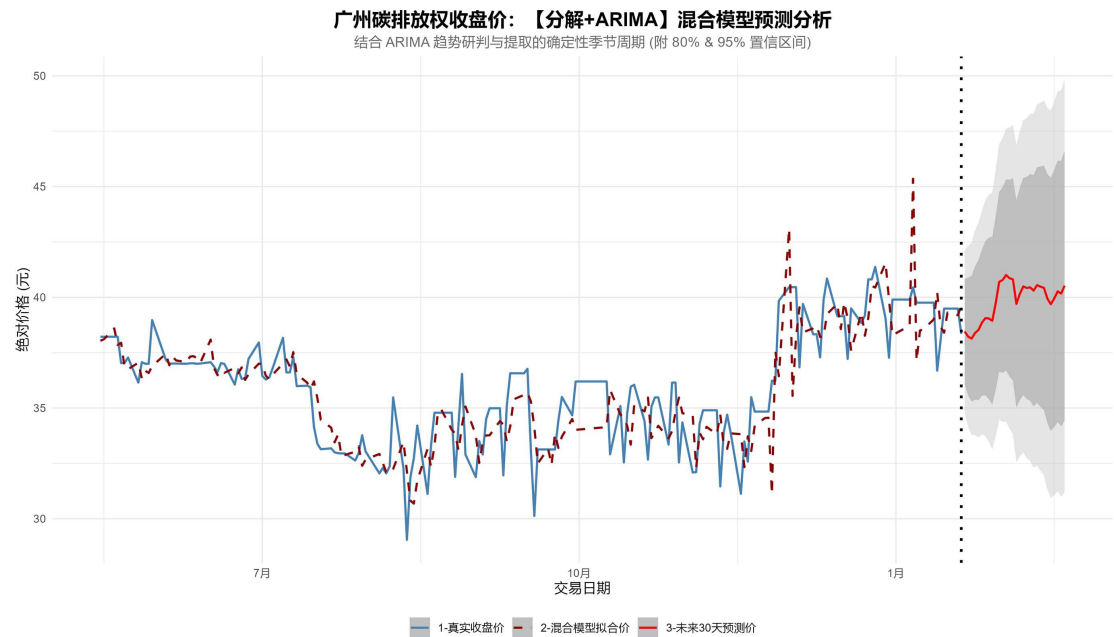


Figure 4. Factor decomposition model prediction chart
图 4. 因素分解模型预测图

Table 6. Model comparison metrics
表 6. 模型对比指标

评价指标	基础 ARMA 模型	因素分解混合模型	误差降低改善率
RMSE	2.0535	1.8568	9.58%
MAE	1.0103	1.0117	-0.14%
MAPE	2.5598%	2.7510%	-7.47%

7. 预测精度对比分析

7.1. 真实值对比

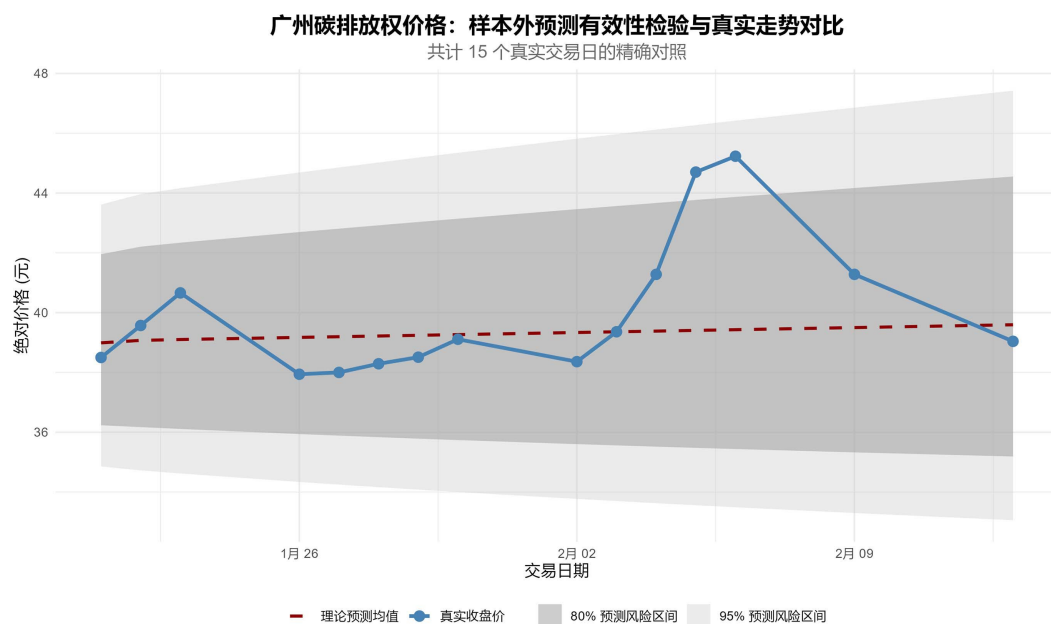
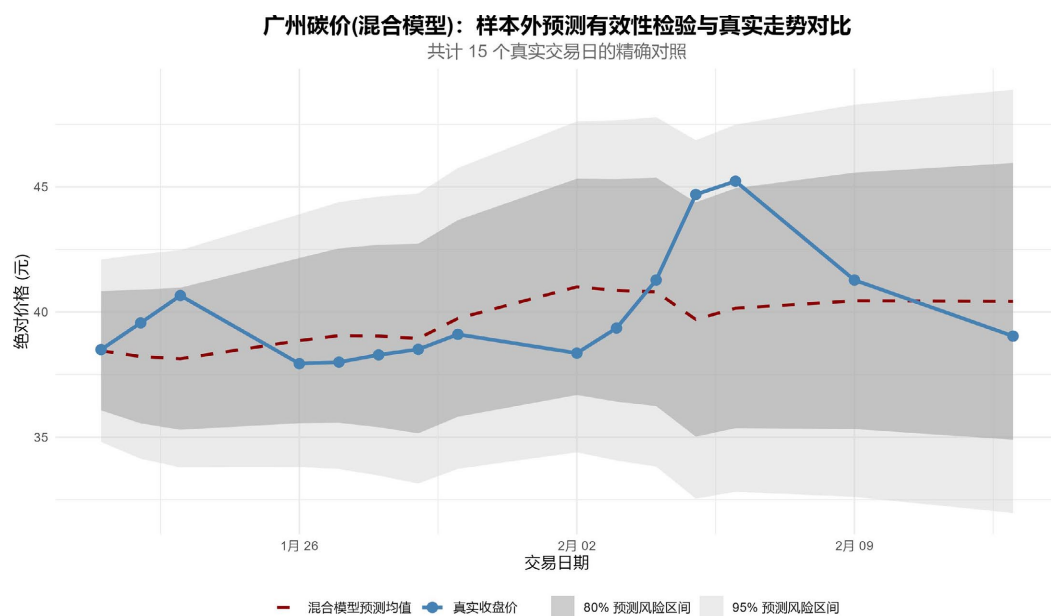
为了检验因素分解以及 ARIMA 结合的方法相较于单一的方法[14]对预测结果提升的效果，同时也为了避免出现过拟合的问题，本研究使用未参与参数估计的真实交易数据来进行测试。

在数据处理方面，本文剔除周末以及法定节假日以外的数据[15]，在此基础上将真实的收盘价与两种方法得到的结果根据交易日的时间顺序进行对应，得到可以用于检验的数据集，然后分别计算它们之间的均方根误差、平均绝对误差以及平均绝对百分比误差[16]来衡量以及比较这两种方法的效果。

从表7可以看出，基模的均方根误差是2.2655，平均绝对误差是1.5394，平均绝对百分比误差是3.67%，而混模的均方根误差降低到2.2234，平均绝对误差与平均绝对百分比误差分别为1.6422及3.97%，总的来说，两种模型的平均绝对百分比误差都小于4%，说明我们选择的时间序列参数对于描述碳市场的价格变动是有较好的预测精度的(图5、图6)。

Table 7. Comparison of errors between predicted and actual values**表 7.** 预测值与真实值对比误差值

模型名称	真实交易天数	RMSE	MAE	MAE 百分比误差
基础模型	15	2.2655	1.5394	3.67%
混合模型	15	2.2234	1.6422	3.97%

**Figure 5.** Comparison of the trend of predicted values and actual values using the ARIMA model**图 5.** ARIMA 模型预测值与真实值走势对比**Figure 6.** Comparison of the trend between the predicted values and the actual values of the factor decomposition model**图 6.** 因素分解模型预测值与真实值走势对比

7.2. 结果分析

在样本外检验中,混合模型均方根误差从最初的 2.2655 下降到 2.2234,降低大约是 1.86%,同时平均绝对误差、平均百分比误差都略有提高,说明虽然加入季节性成分可以减少异常值带来的影响,但是并没有明显改善每日预测准确性。

根据实证检验的结果,在选择 15 个交易日样本数据中,真实的收盘价都在混合模型得到的 95%置信区间以内。由于样本量较小,本文将此作为判断公司短期履约能力的一个指标。

8. 研究结论与启示

本文利用了广州碳排放权交易中心的日频交易数据进行研究,提出了结合因素分解法以及 ARIMA 混合模型的方法进行未来 30 个交易日收盘价预测的研究方法。研究发现,广州碳价有比较明显的长记忆特性以及较强的履约周期性,在每年 6 月至 7 月的履约高峰期对市场形成一定影响力。相较于单一模型而言,这种混合模型在均方根误差上能带来约 9.58%左右改善,这主要是因为因素分解法对于潜在系统性偏差有效修正所起的作用。根据这个模型进行预测结果显示,在接下来的一个月时间内,碳价水平会在每吨 38.14~41.01 元之间波动,而最有可能达到的价格是每吨 49.84 元。由于碳价受到多种因素影响,如宏观经济发展情况、配额分配制度以及政府相关政策等,所以本文得出的结果可以给有关企业提供一定的短期履约计划以及碳资产管理方面的指导意义。

基于上述研究结论,本文提出以下建议:

第一,建立动态化的碳市场流动性管理工具。由于履约期内企业集中购买配额可能造成市场成交量和价格短期波动,监管部门可以在 6~7 月适当提高市场监测频率,综合观察价格、成交量、配额供给和企业履约进度。当实际价格持续偏离模型预测区间时,应及时判断是否存在异常冲击,并根据市场供求情况合理采取配额储备投放等调节措施。对于首次进入碳市场的数据中心、陶瓷等高耗能行业,也可以结合行业生产和排放特点,合理确定碳排放基准,降低新增履约需求对市场流动性的集中冲击。

第二,加强企业的碳资产管理能力。随着碳市场规模不断扩大,企业需要逐步改变仅在履约期集中购买配额的方式,结合自身配额缺口和模型预测结果制定采购计划。企业可以将预测均值作为采购预算的参考,将 95%预测区间上界作为压力情景下的成本上限;当市场价格低于预测均值时,可以分批购入所需配额,当价格接近预测区间上界时,则可以适当提高预购比例,并在具备合适工具和合规条件的情况下调整套期保值比例,从而降低履约成本大幅上升的风险。同时,企业还可以依法开展碳配额质押融资等业务,提高碳资产的利用效率,拓宽融资渠道。

第三,完善碳交易的财务会计处理和税收征管办法。相关单位应结合碳排放配额的取得、持有、交易和履约情况,及时完善碳资产会计记录和内部管理制度,合理反映碳资产价值及履约成本的变化。监管部门也应进一步明确相关会计核算和税务处理规则,降低企业参与碳交易的制度性成本,为全国统一碳市场的建设和发展提供支持。

参考文献

- [1] 孙雪妍,白雨鑫,王灿. 减污降碳协同增效:政策困境与完善路径[J]. 中国环境管理, 2023, 15(2): 16-23.
- [2] 傅向升. 碳达峰与碳中和之“三性论”[J]. 中国石油和化工, 2021(6): 12-15.
- [3] 傅向升. 石化“双碳”的解题思路[J]. 中国石油石化, 2021(12): 30-31.
- [4] 周亚金. 兰州市绿色低碳循环发展的路径探赜[J]. 城市, 2022(12): 29-37.
- [5] 践行绿色理念,倡导低碳发展——绿色金融助推甘肃绿色低碳发展倡议书[J]. 甘肃金融, 2023(7): 2.
- [6] 罗淳. 中国碳交易市场的框架与发展研究——以广东省为例[J]. 商业经济, 2025(3): 134-137.

-
- [7] 秦灿, 丁胜, 张涵知. 基于 ARIMA-LSTM 的区域碳市场交易价格预测研究[J]. 中国林业经济, 2025(3): 37-48.
 - [8] 汪洁. 基于深度时空图学习的股票投资组合优化研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2025.
 - [9] 张威. ARMA 模型在国内生产总值预测中的应用[J]. 商, 2015(1): 204.
 - [10] 周博远. 多元偏正态分布的光滑检验及其应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2021.
 - [11] 张晓菲. 基于 ARIMA 模型研究梅州市社会消费品零售总额发展状况[J]. 投资与合作, 2025(2): 74-77.
 - [12] 李艺涛. 基于时间序列模型的北碚区肺结核发生率数据统计分析及预测[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2020.
 - [13] 刘磊, 曲越, 秦晓钰, 等. 新兴经济体碳达峰异质性演化机制与碳减排国际协同治理路径研究——基于全球经济发展视角的比较分析[J]. 价格理论与实践, 2025(7): 133-140.
 - [14] 袁磊. 基于 ARIMA-LSSVM 混合模型的股指预测研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
 - [15] 崔潇逸. 投资者关注度对重污染行业股票收益率影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 绵阳: 西南科技大学, 2021.
 - [16] 王文荣, 解永晓. 基于 ARIMA-EGARCH 模型的交通事故问题的研究[J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2020, 35(2): 183-189.