

分类号 0212/30

密级 _____

U D C _____

编号 10741



硕士学位论文

论文题目：“双碳”目标下碳交易价格影响因素及预测分析

研究生姓名：刘文井

指导教师姓名、职称：傅德印 教授

学科、专业名称：统计学 数理统计学

研究方向：应用数理统计

提交日期：2023年5月30日

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 刘文井 签字日期： 2023.5.30

导师签名： 傅伟印 签字日期： 2023.5.30

关于论文使用授权的说明

本人完全了解学校关于保留、使用学位论文的各项规定， 同意（选择“同意” / “不同意”）以下事项：

1. 学校有权保留本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文；
2. 学校有权将本人的学位论文提交至清华大学“中国学术期刊（光盘版）电子杂志社”用于出版和编入 CNKI《中国知识资源总库》或其他同类数据库，传播本学位论文的全部或部分内容。

学位论文作者签名： 刘文井 签字日期： 2023.5.30

导师签名： 傅伟印 签字日期： 2023.5.30

Influencing factors and prediction analysis of carbon trading price under the ' double carbon ' target

Candidate: Liu Wenjing

Supervisor: Fu Deyin

摘要

习近平总书记从提出绿水青山就是金山银山在到要在 2060 年实现“双碳”目标，彰显大国担当。作为世界上能源最大的能源消费和生产国，我国碳市场已经取得了跨越式进展，2010 年到 2021 年，从首次提出建设碳市场到全国碳市场开市交易，意味着我国低碳发展已经取得阶段性胜利，为实现新能源转型取得了更为广阔的市场，基于此，深入挖掘研究碳排放权交易价格(以下简称碳交易价格)的影响因素以及内在机理对预测碳交易价格帮助建立稳定有效的碳定价机制具有战略意义和实践价值。

首先，通过梳理碳交易价格影响因素及碳价预测等相关文献，深入挖掘碳排放权及碳交易价格的理论特征及属性。同时从经济形势、金融市场、国际碳市场、能源价格、气候环境、互联网大数据等 6 个方面构建影响碳交易价格的指标体系，运用线性插值将数据补全，最后进行描述性统计分析。

其次，立足于 2021 年 7 月 16 日-2022 年 9 月 1 日的 23 个变量的时间序列数据，以正则稀疏化模型为基准点，分析 6 个一级指标对碳交易价格的影响。通过实证分析验证了宏观经济因素与金融市场对碳交易价格的影响较为显著，互联网大数据对碳交易价格的影响较小但有影响，其中化石能源价格对碳交易价格的影响较为显著，天然气价格与碳交易价格呈负相关关系，煤炭价格与碳交易价格呈负相关关系。国际碳市场以及大气环境对碳交易价格的影响并不显著。

最后，在以下 2 个方面进行碳交易价格的预测，一、直接将被解释变量用 LSTM 模型进行单因子预测，然后再将所有被解释变量以及解释变量纳入 LSTM 模型进行多因子预测。二、在 SVR 和 LSTM 模型的基础上引入 Lasso，弹性网、弹性 MCP 等 8 个正则化模型进行变量选择，通过构建变量组合模型对碳交易价

格进行预测分析。研究发现，对预测结果精度进行对比分析，得出组合模型的预测效果更好，评估指标更低，并且预测得出碳交易价格在 2022 年 9 月 1 日至 9 月 5 日这 5 天呈平稳上升发展趋势。本文通过实证结果得出弹性 MCP-LSTM 组合模型可以更有效预测碳交易价格。

基于以上研究分析，本文从推进扩大全国碳交易市场的参与规模、优化排放核算标准及配额分配方案、发展碳金融衍生产品等方面提出建议，为全国碳交易市场的稳步发展以及减少温室气体的排放作出贡献。

关键词：碳排放 碳交易 影响因素 弹性 MCP-LSTM 模型 预测

Abstract

General Secretary Xi Jinping has proposed that green mountains are golden mountains and silver mountains to achieve the goal of " double carbon " by 2060, highlighting the responsibility of a big country. As the world 's largest energy consumer and producer, China 's carbon market has made great strides. From 2010 to 2021, from the first proposal to build a carbon market to the opening of a national carbon market, it means that China 's low-carbon development has achieved a phased victory. In order to achieve a broader market for new energy transformation, based on this, it is of strategic significance and practical value to deeply explore the influencing factors and internal mechanisms of carbon emission trading prices (hereinafter referred to as carbon trading prices) to predict carbon trading prices and help establish a stable and effective carbon pricing mechanism.

Firstly, by combing the relevant literature on the influencing factors of carbon trading price and carbon price prediction, the theoretical characteristics and attributes of carbon emission rights and carbon trading price are deeply explored. At the same time, the index system affecting carbon trading price is constructed from six aspects : economic situation, financial market, international carbon market, energy price, climate environment and Internet big data. Linear interpolation is used to incomplete the data, and finally descriptive statistical analysis is carried out.

Secondly, based on the time series data of 23 variables from July 16,2021 to September 1,2022, the influence of six first-level indicators on carbon trading prices is analyzed with the regularized sparse model as the reference point. Through empirical analysis, it is verified that macroeconomic factors and financial markets have a significant impact on carbon trading prices, while the international carbon market and atmospheric environment have no significant impact on carbon trading prices. Internet big data has a small but influential impact on carbon trading prices. Among them, fossil energy prices have a significant impact on carbon trading prices. Natural gas prices are negatively correlated with carbon trading prices, and coal prices are negatively correlated with carbon trading prices.

Finally, the prediction of carbon trading price is carried out in the following two aspects. First, the explanatory variables are directly predicted by the LSTM model for single factor prediction, and then all the explanatory variables and explanatory variables are included in the LSTM model for multi-factor prediction. Based on the SVR and LSTM models, eight regularization models such as Lasso, elastic net and elastic MCP are introduced to select variables, and the carbon trading price is predicted and analyzed by constructing a variable combination model. The study found that by comparing and analyzing the accuracy of the prediction results, it is concluded that the combined model has better prediction effect and lower evaluation index, and it is predicted that the carbon trading price will rise steadily from September 1 to September 5, 2022. Through empirical results, this paper concludes that the flexible MCP-LSTM combination model can predict carbon trading prices more effectively.

Based on the above research and analysis, this paper puts forward suggestions from the aspects of promoting the expansion of the participation scale of the national carbon trading market, optimizing the emission accounting standards and quota allocation schemes, and developing carbon financial derivatives, so as to contribute to the steady development of the national carbon trading market and reduce greenhouse gas emissions.

Keywords : Carbon emissions; Carbon trading; Influencing factors; Elastic MCP-LSTM model; Prediction

目 录

摘 要	4
1 引 言	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	2
1.2 文献综述	2
1.2.1 碳交易价格影响因素研究现状	3
1.2.2 碳排放权交易价格预测研究	5
1.2.3 国内外研究评述	6
1.3 研究内容和研究方法	7
1.3.1 研究内容	7
1.3.2 研究方法	7
1.4 论文组织结构	8
1.5 创新点	9
2 我国碳交易价格机理分析	10
2.1 我国碳排放权市场基本概念	10
2.1.1 碳排放权	10
2.1.2 碳排放权交易	10
2.1.3 碳排放权交易价格	10
2.2 碳排放权属性及理论基础	10
2.2.1 碳排放权属性	10
2.2.2 碳排放权价格相关理论基础	12
2.3 我国碳交易市场发展现状	13
2.4 碳交易价格传导机制分析	15
3 我国碳交易价格影响因素实证分析	19
3.1 模型选择	19
3.1.1 Lasso	19
3.1.2 自适应 LASSO	19
3.1.3 SCAD 模型	19
3.1.4 MCP 模型	20
3.1.5 弹性网络回归	20
3.1.6 自适应弹性网	20
3.1.7 弹性 SCAD	21
3.1.8 弹性 MCP	21
3.2 数据选取	21
3.3 数据预处理及描述性分析	22
3.4 实证结果分析	24
4 我国碳交易价格预测分析	30
4.1 问题的提出	30
4.2 预测模型	30
4.2.1 SVR 模型	30
4.2.2 LSTM 模型	32

4.3 变量选取及数据预处理	33
4.4 模型评估指标	34
4.5 预测结果分析	34
5 结论与建议	38
5.1 研究结论	38
5.2 政策建议	39
参考文献	40
致 谢	43

1 引言

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

近年来，全球气候形势严峻，国际上新一轮能源革命热潮正在兴起，作为全球最大的能源消费与生产国，中国的能源消费结构仍达不到发达国家的现代化以及绿色化水平，能源清洁化度和低碳程度仍较低。电力以及能源的过度浪费，已经严重威胁到我国生态安全与可持续发展，减排低碳绿色发展已经势在必行且意义深远。在 2020 年 9 月举办的第七十五届联合国大会上，习近平总书记彰显大国担当，提出分两步走实现“碳达峰”和“碳中和”的“双碳”愿景，力争 2030 年前实现碳达峰，2060 年前实现碳中和。“双碳”目标是符合国际趋势，顺应时代潮流的关键一招；是立足于能源产业发展国情，积极应对全球气候变暖的必然选择；是调整能源结构、提高产业国际竞争力的重要抓手；也是建设生态文明、和谐美丽中国的重要途径。

为了实现“双碳”目标，加速我国经济社会全面绿色转型，持续推进碳交易市场的持续健康发展迫在眉睫。1997 年，《京都议定书》通过 CDM 机制，强调多个国家共同参与减排项目，尤其是发展中国家。2004 年我国颁布《CDM 项目运行管理办法》，从 CDM 渠道开始参与国际碳交易。“十四五”规划强调，全面实行排污许可制，推进排污权、碳排放权市场化交易。《中共中央国务院关于加快建设全国统一大市场的意见》中提出，要培育发展全国统一的生态环境市场。基于公共资源交易平台，构建全国统一的碳排放权交易市场，施行规范统一的行业准则、交易监管机制。

中国一直以来都在推动落实国际公约，利用政策以及市场经济来减少碳排放。但是由于受到发达国家的限制，中国在 CDM 项目市场议价能力较低。以此，我国也自主构建碳排放体系，先后在多个省市开展碳权交易试点。中国在 2010 年首次提出要建立碳市场，2010 年 9 月，国务院首次提出要建立和完善碳排放权交易制度，2011 年 10 月，国家发改委批准七省市于 2013 年开展碳排放权交易试点，从 2013 年开始，北京等七个地方试点碳市场先后陆续启动，2016 年，中国参与签署《巴黎气候协定》并提交应对气候变化国家自主贡献文件等，年底，

福建碳市场正式启动。2020年9月，习近平总书记在第七十五届联合国大会上首次向世界宣布我国二氧化碳排放力争于2030年前实现碳达峰，2060年前实现碳中和的“双碳”目标。2021年7月，全国碳市场正式开始运行，首批纳入全国2162家火电厂，以覆盖45Gt CO₂e的规模成为全球覆盖排放量最大的碳市场。7月16日，全国碳市场正式开市交易，中国碳市场从试点城市走向全国。因此，牢牢把握“双碳”目标的机遇，深入挖掘碳权交易的影响因素以及内在机理、提升我国能源的竞争优势，是中国发展现阶段亟待攻克的难题。

1.1.2 研究意义

全国碳市场是我国规模最大，交易量最多的碳市场，是我国建设全国统一碳市场最重要的一环。本文从理论角度和实践角度展开，紧密结合我国碳市场的发展情况，从理论方面探寻影响碳排放权交易价格的影响因素，预测未来碳交易价格，对推动碳市场相关政策制定，完善绿色金融体系建设、提高碳市场风险防范能力、促进全国碳市场的完善等具有重要的理论意义及现实意义。

(1) 理论意义

目前我国全国统一碳市场的建设还有待完善，全国碳市场正面临着全面建设发展的机会，而全国碳市场碳交易价格波动较大，为了更好的合理配置全国碳市场碳配额份额，研究全国碳市场碳交易价格的影响因素是非常有必要的，因为其可以影响我国控排问题，本文基于经济学、金融学、生态学等分析碳排放权的相关理论基础，从经济形势、金融市场、国际碳市场、化石能源价格、大气环境以及互联网大数据分析碳交易价格影响因素及传导机制，从而帮助完善全国碳市场。

(2) 现实意义

碳交易价格是碳市场的核心组成部位，其价格涨跌影响整个碳市场的变动。很多学者研究发现，我国试点碳市场与我国经济发展形势、能源价格、利率汇率以及政策等因素有着相关影响。全国碳排放市场成立之后，其价格经历了剧烈的波动与变化，这对全国碳市场的完善存在不利影响，也不利于政府监管和企业投资。为了更好指导碳市场参与者的决策，对全国碳排放权交易价格走势开展深入研究，发现碳排放权的价格决定机制，提高全国碳市场风险防范能力。

1.2 文献综述

相比欧盟碳交易市场来说，我国碳交易市场起步发展比较晚，相对发展不成

熟。目前国内外学者针对碳交易价格的研究主要集中在影响碳价的因素、价格波动的原因、交易价格的预测等几个方面。本章主要对碳交易价格影响因素和碳交易价格预测的研究进行系统梳理以及述评。

1.2.1 碳交易价格影响因素研究现状

(1) 经济形势对碳排放权交易价格的影响

经济发展与碳交易价格之间存在密切联系。Christiansen 等（2005）指出经济发展趋势会作用于企业的生产活动以此来影响碳交易价格^[1]。邹亚生等（2013）认为当经济生产不利时会导致碳交易价格持续走低^[2]。Koch 等（2014）发现股票指数对碳交易价格具有较大影响^[3]。周建国等（2016）通过 VAR 模型发现碳交易价格受国内经济形势影响最大^[10]。汪中华（2018）研究发现市场外部经济环境决定碳交易价格的波动方向^[4]。杜子平（2018）采用 GA-BP 神经网络模型发现宏观经济发展对我国碳价有正向影响^[5]。Zhu 等（2019）通过多尺度分析模型发现电力、股票指数在短期期推动欧盟碳交易价格^[6]。吕靖焯等（2021）基于 Sobol 方法发现经济发展水平对我国碳交易价格影响较大^[7]。夏睿瞳（2022）采用 Engle-Granger 协整检验发现宏观经济因素变量对我国碳交易价格有显著影响^[8]。

(2) 金融市场对碳排放权交易价格的影响

金融市场与碳市场间的联系日趋紧密。利率可以通过作用于企业的减排成本、机会成本影响企业的生产经营活动，进而影响企业的碳排放需求。郭文军（2015）认为欧元汇率对我国碳价影响最大^[9]，其汇率通过作用于企业的贸易进出口从而影响企业的生产决策，进而影响它的碳排放配额需求。周建国等（2016）基于 VAR 模型发现欧元汇率相比美元汇率对我国碳价格的影响更加显著^[10]。王倩和路京京（2017）基于 EGARCH-Copula 模型的实证结果表明人民币汇率以及短期利率对我国碳价格的有明显显著影响^[11]，原因是汇率通过影响能源价格和进出口贸易来影响碳价格，利率则会通过影响企业的减排成本、投资者的机会成本来作用于碳交易价格。王小燕等（2022）发现由于利率与政府操作相关^[7]，所以利率会显著影响碳交易价格。

(3) 国际碳市场对碳排放权交易价格的影响

欧盟碳市场是全球最具影响力的碳市场，发展已经成熟，欧盟碳市场体系对我国碳市场的发展存在借鉴效果，同时也存在信息溢出。周建国（2016）认为由

于近年来我国碳市场成熟度不高，会受到欧盟碳市场相关碳资产价格的冲击^[12]。邹绍辉（2018）通过用脉冲响应函数及方差分解法得出国际碳市场与国内碳价之间存在长期稳定的单向关系^[12]。李可隆（2020）实证发现湖北和欧盟碳市场间存在非线性的复杂的互相关性^[13]。魏宇（2022）发现国际碳市场对我国碳市场有间接影响^[14]，且存在风险传染。王小燕（2022）通过图结构自适应 lasso 方法发现欧盟碳价对广东碳价有明显的正相关影响^[15]，原因是因为广碳所和欧盟碳市场联系密切且频繁合作。

（4）能源价格对碳排放权交易价格的影响

化石能源的消耗是碳排放的主要来源之一，能源价格波动是碳交易价格波动的重要影响因素。张跃军等（2010）基于状态空间模型、VAR 模型实证分析了化石能源价格与碳交易价格之间存在显著的协整关系^[16]，且油价对碳价影响关系最大。赵选民等（2019）通过构建广义最小二乘法对我国碳交易价格进行参数估计^[17]，发现传统能源价格显著负向影响我国碳交易价格。Zhu 等（2019）通过多尺度分析模型发现煤炭、石油和天然气的价格在中长期推动欧盟碳价格^[6]。Han（2019）等通过构建全面的要素体系发现煤炭对深圳碳交易市场碳价格影响更敏感^[18]。李谊（2020）提出天然气价格、原油价格单向正向的影响我国碳交易价格^[19]，而煤炭价格单向负向的影响我国碳交易价格的观点。吕靖焯（2021）发现我国碳市场对煤炭价格灵敏度较高^[7]，而对石油价格的灵敏度较低，原因是因为我国对煤炭需求依赖程度高。魏宇、张佳豪（2022）实证发现由于非化石清洁能源在我国能源消耗结构中的占比持续走高^[14]，且能源消耗程度对我国工业经济增长是下降趋势，从而导致化石能源价格对我国碳价的影响力在逐步下降。刘志洋、马欣頔（2022）研究发现能源市场对碳市场具有正向影响^[20]，而碳市场对能源市场存在负向影响。

（5）气候环境对碳排放权交易价格的影响

空气质量指数（AQI）是定量刻画空气质量状况的无量纲指数。AQI 数值越高就表明空气污染程度越严重。汪中华（2018）运用 FGLS 分析得出气温和降水量对碳交易价格均有正向影响^[4]，但湿度对碳价格有负向影响。夏睿瞳（2022）发现极端天气通过影响能源需求间接影响碳价格^[8]。杜子平等（2018）采用 GA-BP-MIV 模型分析得出气温对碳价几乎没有影响^[5]。Wang 等（2019）通过灰色关

联度分析发现空气质量指数与我国碳交易价格最相关^[21]。Han (2019) 等通过构建全面的要素体系发现温度和空气质量指数 (AQI) 对深圳碳交易市场碳价格影响更敏感^[18]。Zhou 和 Li (2019) 运用 VAR-VEC 模型发现空气质量指数与湖北碳交易价格之间存在长期均衡关系^[22]。李谊 (2020) 认为空气质量与我国碳交易价格互相负向影响^[19], 而异常天气对我国碳交易定价没有直接影响关系。周天芸和许锐翔 (2020) 发现空气污染程度越严重, 碳交易价格越高^[23]。宋雅贤 (2022) 使用时空地理加权回归模型发现气温对碳交易价格未呈现出显著的时空异质性特征^[24]。

(6) 其他因素对碳排放权交易价格的影响

还有很多其他的因子影响碳交易价格, 许多学者也做了很多试验, 比如, 刘涛雄、徐晓飞 (2015) 通过实证研究认为互联网搜索行为可以影响宏观经济^[25]。王娜 (2016) 的研究指出, 国际碳期货价格、汇率以及百度搜索指数和媒体关注度指数可以帮助提升对我国碳价的预测精度^[26]。贾君君, 许金华等 (2017) 国家配额分配计划公告对碳价收益产生了显著的正向影响^[27], 且表现出较长的事前影响。Zhao (2021) 等发现欧洲斯托克 50 指数对影响碳价有负相关^[28], 碳市场受到不同市场间交叉溢出的显著影响, 其中, 标准普尔清洁能源指数、欧洲斯托克 50 指数、布伦特原油价格作为解释变量有助于提升对碳交易价格的预测能。王娜 (2023) 将互联网大数据、经济政策不确定指数、环境意识以及人均 GDP 纳入对碳价的研究^[26], 取得较好的效果。

1.2.2 碳排放权交易价格预测研究

当前, 预测碳价的研究方法主要有两种: 一是时间序列模型; 二是的人工智能算法。

在时间序列分析方面, 申笑颜 (2010) 采用灰色系统理论中的灰预测方法对我国碳排放的可能量做出了相应预测^[29]。Chevallier (2011) 运用非参数模型预测了 BlueNext 现货价格和 ECX 的碳期货价格^[1], 结果表明相比自回归模型, 非参数模型的预测精度更高。Sanin 等 (2015) 引入时变跳跃概率从而提高 ARMAX-GARCH 模型的性能^[30], 取得了比较好的预测效果。Li 和 Lu (2015) 提出 EMD-GARCH 模型^[31], 预测了深圳等碳市场的碳交易价格。王娜 (2017) 为了解决模型选择困难问题以及避免极大似然估计带来的麻烦, 提出 Boosting-ARMA 预测

算法^[32]，该算法更加快捷精确。彭武元（2020）采用马尔科夫转换多重分形模型对碳价格进行预测^[33]，得出了准确度较高的结果。

在人工智能算法方面，高杨和李健（2014）建立了 EMD-PSO-SVM 误差校正预测模型^[34]，实证研究得出可以解决误差序列随机性强、预测结果滞后性、预测精度等问题。王娜（2016）提出网络结构 ADL 模型，发现相比其他模型^[26]，它更适合基于大数据的预测。Sun（2018）提出通过基于多分辨率奇异值分解的自适应鲸鱼优化算法优化的极限学习机进行预测^[35]，经过实证研究发现，该模型优于其他基准方法。崔焕影，窦祥胜（2018）构建了基于经验模态分解算法（EMD）-遗传算法（GA）-BP 神经网络模型以及 EMD-PSO-LSSVM 模型预测碳交易价格^[36]，发现长期预测中，EMD-PSO-LSSVM 模型预测效果比 EMD-GA-BP 更好，短期预测则相反。魏宇，张佳豪（2022）运用动态模型选择（DMS）和动态模型平均（DMA）方法对我国碳价进行预测^[14]，发现与传统模型相比，DMS 可以提供更好的精度。赵峰，徐丹华（2022）通过建立多策略改进哈里斯鹰优化极限学习机算法碳交易组合预测算法^[37]，发现组合预测效果更好。

1.2.3 国内外研究评述

基于以上的相关文献分析可以看到，国内外的学者对影响碳交易价格因素以及预测的研究已经取得了非常重要的成果，近年来，由于我国对环境问题越来越重视，国内碳市场的发展也越来越成熟，有很多学者对我国碳交易市场的研究也越来越多。从开始的单一研究到后面的组合研究，由于我国碳交易试点的建设完善，学者也从单一研究对象转变为以多个试点城市为研究对象。伴随着全国统一碳交易市场的上线交易及平稳运行，对全国碳排放市场进行全面分析及综合研究是非常有必要。

对碳交易价格的影响因素的研究，综合国内外学者的分析发现，大多数学者主要研究宏观经济因素、金融市场因素、能源价格因素、气候状况以及政策因素等。其中能源价格因素以煤炭、石油、天然气价格等为主。随着研究的深入，对国内碳市场的研究也开始重视气候状况，甚至开始纳入互联网大数据对碳交易价格的影响，将空气质量和搜索指数等纳入研究。

基于以上文献梳理可以看出，国内外的预测模型越来越丰富，但是很多都是数据驱动模型，所以虽然预测模型越来越好，但是无法说明背后的原理及意义。

1.3 研究内容和研究方法

1.3.1 研究内容

本文的研究内容主要包括三部分，分别是：

(1) 基于文献研究法的碳交易价格传导机制分析。

该部分主要从理论上研究经济形势、金融市场、国际碳市场、化石能源价格、气候环境以及互联网大数据对碳交易价格的影响，从这 6 个一级指标中选取 23 个二级指标进行参数估计。

(2) 基于正则稀疏化的碳交易价格影响因素分析。

该部分主要从 Lasso、弹性网络、弹性 MCP 等正则稀疏化模型实证分析 6 个一级指标 23 个二级指标对碳交易价格的影响，研究解释变量及被解释变量的相关性，首先对变量进行描述性分析以及处理，其次对数据进行参数估计，最后对参数估计结果进行分析从而选取变量。

(3) 基于 SVR 及 LSTM 的碳交易价格预测分析。

该部分主要将正则稀疏化模型中选取的变量通过构建 SVR 及 LSTM 模型对碳交易价格进行预测分析，确定预测模型的参数，并且对变量选择方法进行对比分析，确定模型评估指标，最后预测未来的碳交易价格并与真实值对比。

1.3.2 研究方法

本文的研究分为以下几种：

定性分析法。本文在研究碳价影响因素的过程当中，从理论基础、传导机制、数据结构等方面定性分析了影响碳交易价格的可能因素。

正则化稀疏模型。正则化稀疏模型是通过在回归过程中将先验信息加入惩罚函数，或者把多种的惩罚函数进行整合而得到的。正则化模型是解决高维数据降维以及用来解决变量选择的高效方法。本文运用 Lasso、弹性网、弹性 MCP 等模型分析了这些因素对碳价的影响程度，筛选出影响程度高的指标。

神经网络模型。SVR 以及 LSTM 神经网络模型是适合用于处理与时间序列高度相关的问题，尤其适用于非线性序列的预测和处理。本文以全国碳市场碳交易价格为研究对象，通过 SVR 模型以及 LSTM 模型来预测碳交易价格，并寻求其应用价值。

本文技术路线图如图 1.1 所示

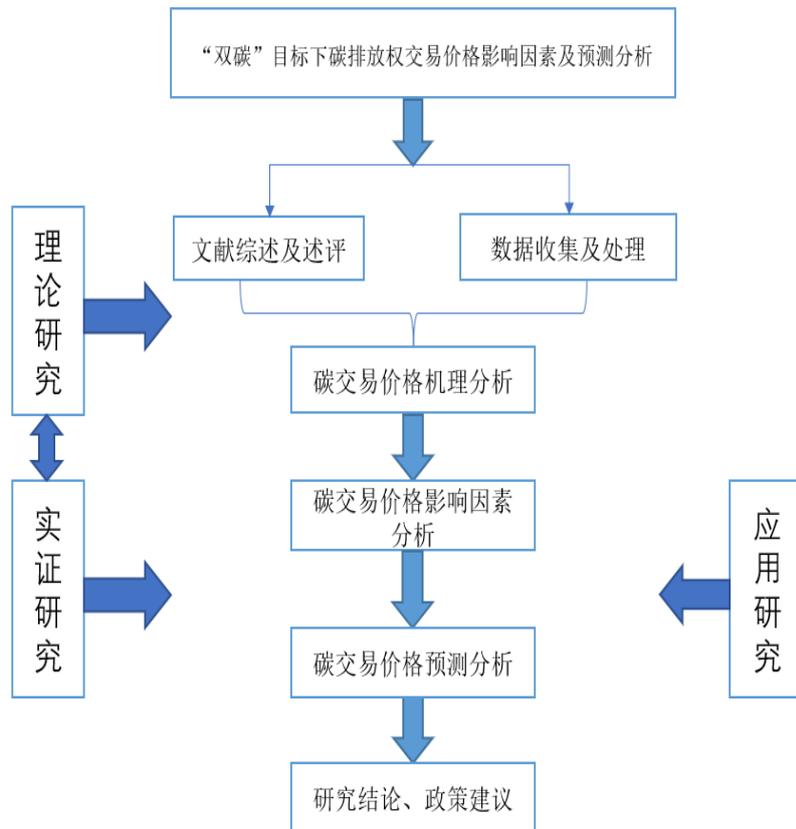


图 1.1 技术路线图

1.4 论文组织结构

本文立足于“双碳”背景，以全国碳市场碳排放配额价格为研究对象，阐述了经济形势、金融市场、国际碳市场、能源价格、气候环境、搜索指数这 6 大方面对碳交易价格的影响。旨在寻求最优模型来抉择出预测变量，用最优变量来对我国碳交易价格进行科学合理的预测。以下是本文的研究内容。

第一部分为引言。首先从“双碳”这个背景下，阐述研究找到影响碳交易价格的因素以及碳价预测的必要性及意义，分析其国内外发展现状，选择正则化稀疏模型进行参数估计的学术价值，为确定研究对象和目标找到方向。通过系统的梳理现有的参数估计及预测方法，分析其优缺点。

第二部分为我国碳交易价格机理分析。本部分通过介绍碳排放权、碳排放权交易的基本概念，了解碳排放权的属性、理论基础。最后通过碳交易传导机制选择解释变量。

第三部分为我国碳交易价格影响因素实证分析。本部分通过正则化稀疏模型来研究解释变量与被解释变量的相关性，解释变量。本章清楚地明确了所选取的模型和数据，然后对其运用 Lasso、弹性网、弹性 MCP 来展开对于其影响因素的分析，并针对其实证研究结果做出了描述和分析。

第四部分为我国碳交易价格预测实证分析。本章将碳交易影响因素纳入 SVR 模型以及 LSTM 模型进行碳价预测实证分析，并且对变量选择方法进行对比，发现弹性-MCP-LSTM 模型的精准度最高，最后预测的碳交易价格与真实值趋势相同，误差不大。

第五部分为结论与建议。本部分在前文的基础上，总结本文的结论，发现经济形势、金融市场、能源价格、互联网大数据对碳交易价格的影响并提出进一步扩大全国碳市场的规模，完善全国碳市场碳配额分配制度，加强风险管理能力，创新发展碳金融产品等建议。

1.5 创新点

本文主要有以下两个创新点。

(1) 通过碳价格传导机制分析潜在影响因素，然后采用 Lasso、MCP、弹性网等正则稀疏化模型对全国碳市场碳交易价格的影响因素进行分析，研究不同影响因素对全国碳市场碳交易价格的影响程度，发现经济形势、金融市场、化石能源价格、大气环境以及互联网大数据对全国碳市场碳交易价格产生显著影响。

(2) 在正则稀疏化模型的基础上加入 SVR 以及 LSTM 神经网络模型，将显著影响因素纳入 SVR 模型以及 LSTM 神经网络模型从而对全国碳市场碳交易价格进行预测，实证结果显示，弹性 MCP-LSTM 组合模型的预测精度更高。

2 我国碳交易价格机理分析

2.1 我国碳排放权市场基本概念

2.1.1 碳排放权

碳排放是指人类生产经营活动过程中向外界排放温室气体（如二氧化碳、甲烷、氧化亚氮、氢氟碳化物、全氟碳化物和六氟化硫等）的过程，也是被认为导致全球气候变暖的主要原因之一。

碳排放权指的是核证减排量（Certified Emission Reduction, CER），是碳交易市场的标的。这个配额总量由政府根据国际公约上承诺的减排目标而制定，而且会随着时间推移而逐渐降低。配额来自政府免费发放或拍卖，以及在碳市场向其他企业或投资机构购买。

2.1.2 碳排放权交易

碳排放权交易是指政府分配的减排指标被企业拿到市场上去出售得利的行为。政府通过相关政策制定减排目标，发放碳排放配额，通过市场对碳排放权定价进行买卖使得排放权交易得以实施。当企业碳排放超出自身分配的碳排放额度时，可以通过碳交易市场向其它企业购买其剩余的碳排放权。这样政府就达到了利用市场控制企业来实现减排目标的目的。

2.1.3 碳排放权交易价格

碳排放权的成本不仅包括巨额交易成本而且还包括风险成本。一些专家认为，未来碳排放权或有希望成为全球交易量最多的商品，其价格将会受到政府碳排放总量预算、周边气候以及各种相关政策的影响。

2.2 碳排放权属性及理论基础

2.2.1 碳排放权属性

属性就是指一个事物的性质。在京都协议书正式生效后，已经成立了碳交易市场，碳排放权除具有商品属性外，还具有以下几种特殊的属性：

（1）政府创设性

因为碳市场是由政府组织的一个大型绿色金融市场，而且碳排放权碳配额是由政府创设。所以其具有政府创设性。与各种传统商品市场不同，碳市场的供

求是由政府创造的。对于碳市场来说，相关政策的制订对市场机制和功能的发挥影响巨大。

（2）商品属性

当物品具备价值与使用价值，那么它就是商品。碳排放权可以通过企业减排得到，凝结了无差别劳动，体现了其价值属性；同时，碳排放权有低碳减排、保护气候环境的效果，因此，碳排放权属于商品，具有商品属性。

（3）资产属性

根据企业会计准则，资产是指由企业过去的交易或事项所形成的，能够给企业带来经济利益，是企业拥有或控制的资源。一般来说，企业将碳排放权做为交易型资产或者无形资产来处理，交易型资产是企业短期为了投机获利持有资产。而无形资产是公司拥有或控制的无实物形态的资产。因此在碳交易市场，碳排放权不具备实物形态且可以供企业之间进行交易，为企业带来利润，符合无形资产的条件。而以碳排放权为标的资产的金融产品的出现，它使得投资者在短期内持有并获益，这说明它具备交易型资产的特点。

（4）金融属性

金融属性是指某些具有金融性质的商品，主要体现在商品作为资产性质上，也是不同的商品作为某种资产时具有的共性和差异性的具体体现。一方面碳排放权可以为企业提供保值、增值和资金流转等功能。另一方面，由于碳排放权的稀缺性非常高，当碳金融衍生品的出现，说明碳排放权的金融属性较强。

（5）准物权属性

准物权指以物以外的其他财产为客体的具有支配性、绝对性和排他性的民事财产权，比如占有。排污权也通常被认为是准物权之一。碳排放权是权利人通过国家分配计划从而得到的权利，也拥有准物权特性。权利人能在规定范围自主处置其碳排放权，且能够将碳排放权交易给其他权利人，这也是碳排放权作为一种准物权最重要的特征。

（6）发展权属性

发展权是指个人、民族和国家积极、自由和有意义地参与政治、经济、社会和文化的发展并公平享有发展所带来的利益的权利。碳排放权是通过政府规定排放标准严格按配额进行分配且能在碳交易市场交易的权利，它满足发展权。

2.2.2 碳排放权价格相关理论基础

（1）外部性理论

外部性理论指一个主体的行为活动影响到另外的主体，而且这个影响会使得其他主体受益或者受害，所以外部性也被分为正外部性和负外部性。

过多的化石能源的消耗导致碳排放不断增加，从而使得全球气候变暖，威胁生态安全，这就是典型的负外部性问题。而碳交易就是被政府用来缓解温室效应、减少碳排放的手段。碳排放权价格的上涨使企业成本上升，从而减少碳排放，以此来克服碳排放带来的负外部性。

（2）产权理论

产权理论是科斯提出来，认为私有企业的产权人享有剩余利润的占有权，从而使产权人有较强的动机去提高企业的效益。高效的产权包括明确性，专有性，可转让性以及可操作性。通过国家对碳排放权的统筹规划、宏观调配下，市场经济需要完善碳排放权，建立碳排放权交易市场，提高政府资源配置的效率。

（3）排污权交易理论

排污权交易是指在一定区域内，在不超过政府允许的污染物排放量下，内部各污染源之间通过货币交换的方式控制相互的污染物排放量，从而达到减排、保护环境的作用。它是碳排放交易机制的基础。碳排放权通过政府授权总额度，通过市场进行流动从而形成资源有效配置。企业可以通过减排从而出售剩余碳排放权获得经济回报，这是政府给企业环保行为的补偿机制，用来可以提高企业的治污积极性。

（4）绿色金融理论

绿色金融是指为支持环境改善、应对气候变化和资源节约高效利用的经济活动。它被用来提供对环保、节能、清洁能源等领域的投融资、运营、风险管理的金融服务。绿色金融的目的是为了促进低碳发展、绿色发展、保护环境。

碳金融市场是绿色金融理论的创新发展，通过证券市场引入社会资本进行投资碳金融产品，发展碳金融产品，优化资源配置，支持绿色转型，达到减排目的。

（5）可持续发展理论

可持续发展就是指经济、社会、资源和环境保护的协调发展，也就是说它既要发展经济，又要保护好自然资源和环境。政府可以通过控制人口数量、提升人

民素质、保护自然环境、控制资源使用来进行经济和社会的可持续发展。

自然环境不是取之不竭的，自然环境也是有容量的，超过了环境容量就意味着环境被破坏，从而使得气候变异、生态平衡失调等，威胁可持续发展。政府控制碳配额发放总量调节环境容量，通过相关政策以及碳市场的市场经济来调节碳配额价格，高碳排放企业因为碳排放成本问题而被迫减少碳排放或者研发减排技术，低碳排放企业则会获得利润奖励且会更加增进碳排放技术的研发。碳排放权交易就是可持续发展理论的创新应用，可以很好的解决气候环境问题，达到实现碳中和的目的。

2.3 我国碳交易市场发展现状

我国目前的全国碳市场及试点碳市场(除重庆)碳配额交易只针对二氧化碳，重庆碳市场包含六类温室气体，但由于全国市场与试点区域均接受 CCER，而 CCER 项目覆盖全部 6 类温室气体，因此，实际上各类温室气体减排项目均可参与中国碳市场交易。试点碳市场主要涵盖电力、钢铁、水泥、石化、化工、有色、造纸以及航空、交通运输等行业，全国碳市场目前仅限发电行业，全国碳市场覆盖区域方面，全国市场为全国范围，试点区域碳配额交易为所在区域范围，CCER 交易则为全国范围。纳入标准方面，全国市场设定控排企业年二氧化碳排放量 2.6 万吨以上，与湖北、福建（1 万吨标准煤，约 2.6 万吨碳）基本相同，而上海、广东、天津、重庆纳入标准均为 2 万吨以上，北京和深圳纳入标准仅分别为 5 千吨和 3 千吨。覆盖区域方面，全国市场为全国范围，试点区域碳配额交易为所在区域范围，CCER 交易则为全国范围。

从我国各大试点碳市场运行情况来看，碳价存在很大差异，以 2022 年 10 月各试点市场的价格为例，目前碳交易价格最贵的是北京，平均价格达到了 110.04 元/吨，碳交易价格最低的是福建，平均价格只有 30.18 元/吨，广东、湖北、上海、深圳、天津、重庆的碳交易平均价格分别为 76.55、50.01、55.38、54.73、36.84、32.00 元/吨。

目前在试点碳市场中，广东碳市场配额量全国第一，其交易总量及交易总额也位居全国碳试点市场首位。根据 Wind 数据显示，截止 2022 年 10 月，各试点碳市场交易成交量如图 2.1 所示，其中，广东碳排放权累计交易量已达到 1.9 亿

吨，也是国内最大的碳排放权试点交易市场。排第二和第三的是湖北和深圳碳排放权交易市场，分别是 0.84 亿吨和 0.49 亿吨。

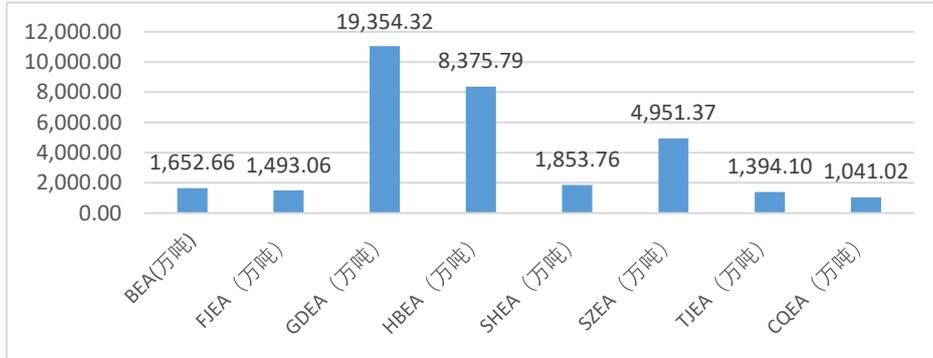


图 2.1 全国各试点碳市场交易总量

截至 2022 年 10 月，全国各大试点碳市场交易总额已经突破 100 亿，其中广东碳交易总额突破 46 亿，占总交易额的 45.89%，北京、上海、湖北的碳交易总额也达到了 10 亿元，这是由于地方试点碳市场过于割裂从而导致区域之间的碳交易平均价格、成交量、成交总额差异巨大，所以迫切需要建设和完善全国碳市场才能避免全国各地碳价的剧烈差异，也是推进“双碳”目标的重要抓手，并在最终实现碳中和的进程中发挥重要作用。

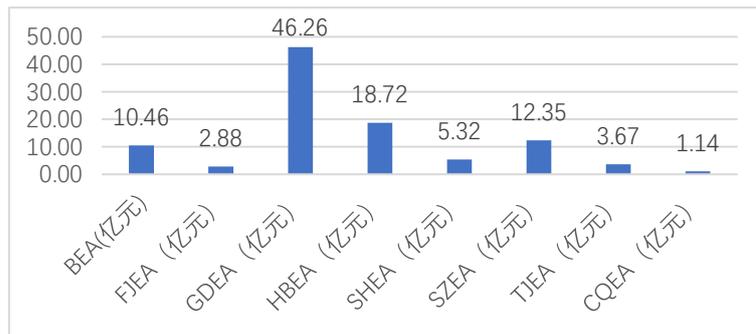


图 2.2 全国各试点碳市场交易总额

全国碳市场自 2021 年 7 月 16 日开市交易以来，截止到 2022 年 9 月 30 日，其达到了 1.95 亿吨的累计成交量和 85.59 亿元的累计成交额，碳交易价格最小值 41.46 元，最大值 61.38，均值 53.45，而欧盟 EUA 同期成交量为 100.82 亿吨，成交额近 8000 亿欧元。而我国碳配额交易量同比仅为欧盟配额交易量的 1.93%，

交易额的 1%，说明我国碳配额交易量及交易额提升空间非常大，也表明了我国碳市场发展任重而道远，全国碳市场碳交易价格走势如图 2.3 所示。

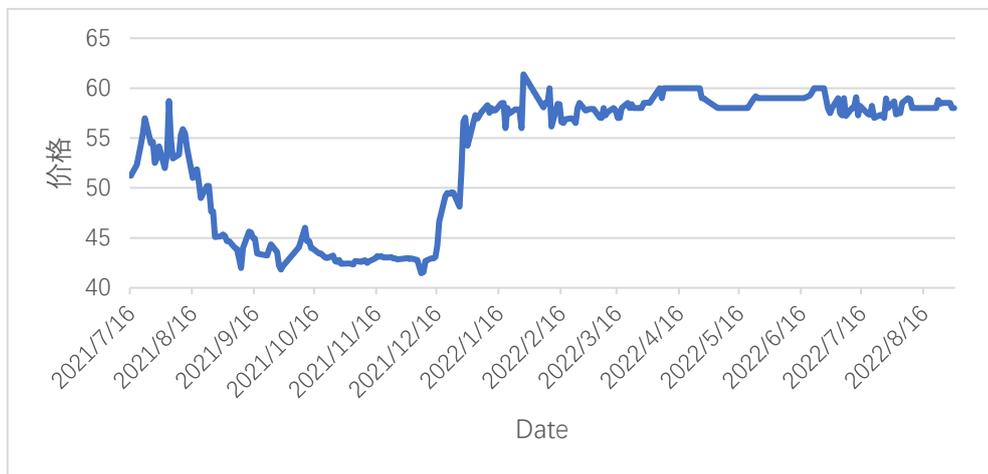


图 2.3 全国碳交易价格走势

全国碳市场开市交易一年以来，制度体系建设有序完善，配额分配基本合理，实现科学有效的履约机制，基本达到预期目标，能实现减排效果，为保护环境做出杰出贡献。

2.4 碳交易价格传导机制分析

(1) 假设 1：经济形势对碳交易价格有显著影响。

经济形势的波动会造成社会需求和供给的变动，碳排放权交易市场是全球经济发展中的一个重要市场，也是我国实现碳中和、碳达峰的一个重要手段，碳排放权交易价格也与经济形势联系密切^[38]，经济形势通过影响企业的投资决策和生产活动作用于企业的碳排放需求，从而影响碳交易价格，当全球经济形势发展繁荣时，企业的各种产品生产以及商品交易、贸易都十分活跃，生产活动和经营活动等规模不断扩大，企业则会排放更多的二氧化碳，从而导致碳排放权交易量的急剧增加^[39]，当全球经济发展下滑的时候，消费也随之降级，企业则会缩减生产及交易规模，企业的各种产品生产以及商品交易、贸易则会跟着下滑，从而对碳排放量的需求也会跟着减少，导致碳排放权交易量以及价格下降。

本文选择沪深 300 和上证综合指数作为目前评价我国经济发展形势的指标，欧洲斯托克 50 指数可以反映欧盟的经济发展情况，美国道琼斯工业平均指数代

表着美国大工业以及经济发展水平,本文选取这4种指标代表国内外经济发展情况代理变量。

(2) 假设2: 金融市场对碳交易价格有显著影响。

碳排放权交易市场具有商品属性以及金融属性,属于金融市场的一部分,当前金融市场出现越来越多的碳金融衍生产品^[40],说明它们之间的关系日益密切,所以金融市场中的利率以及汇率会对碳交易价格造成影响。

利率对于控制企业成本的高低起着主要作用,也是企业投资和筹资的关键因素。利率的变化影响着市场收益率,利率上行,导致贷款成本提高,从而增加企业的生产以及投资成本,抑制企业投资,减少产品产出。利率的上涨同时也会抑制人民的消费欲望,降低居民消费,促进居民存储,促使物价下降,从而对碳价格造成影响。

汇率的变动对一国进出口贸易有着直接调节作用,汇率主要通过影响进出口来对企业的生产和贸易产生影响,汇率上涨,促使本国货币升值,外币贬值,有利于进口而抑制出口,从而使进口原材料为主的国内企业的产品生产成本下降,将扩大生产从而排放更多的二氧化碳。但是由于汇率的上涨,不利于出口,会对出口型企业的发展带来一定的负面影响,出口受限制,则会减少生产从而减少二氧化碳的排放。这说明,汇率对碳排放带来的影响是相互的。

Shibor:隔夜是指上海银行间同业拆放利率,可以作为我国的基准利率,能够反映金融市场的基本情况,也反映了银行间的借款成本。本文选取上海银行间同业拆放利率代表我国市场利率的代理变量。我国进出口贸易使用最多的外汇就是美元和欧元,而国际碳交所主要为欧美市场,因此本文选取美元兑人民币中间价以及欧元兑人民币中间价作为汇率代理变量。

(3) 假设3: 国际碳市场对碳交易价格有显著影响。

欧盟碳排放权交易市场作为全球建立最早、规模最大、覆盖最广的碳市场,也是全球发展最成熟、最具影响力的碳市场^[41],我国在制度设计参考了欧盟碳排放市场,虽然我国碳市场发展迅速,但由于我们的市场还不够成熟,会受到来自欧盟碳市场的溢出效应,不可避免的会对我国碳市场迎来冲击。当欧盟碳价下降时,产品成本下降,企业则会扩大生产并且扩大出口,从而我国企业的竞争压力增大,减少生产,碳排放降低,碳价下降。研究表明,欧盟碳交易与我国碳交易

价格存在正相关关系。本文选取欧盟 EUA 碳交易期货价格作为国际碳市场的代理变量。

(4) 假设 4: 化石能源价格对碳交易价格有显著影响。

煤、石油、天然气是世界是上最重要的三种能源,化石燃料能源的开发利用是世界上温室气体的主要来源。据《BP 世界能源统计年鉴》报告,煤炭、石油、天然气占全球化石能源一次消费 81.9%,其中煤炭消费占比 26.9%,石油消费占比 30.95%,天然气消费占比 24.42%。《中国矿产资源报告 2022》显示,我国的能源消费结构不断完善。2021 年我国煤炭消费占一次能源消费总量比重的 56%,石油占比 18.5%,天然气占比 8.9%,清洁能源水电、核电、风电等非化石能源占比 16.6%。

国际能源价格可以从两个方面来影响中国碳价。一方面,国际能源市场能够影响国外碳市场进而影响国外碳价,而由于经济全球化,国内碳市场会跟随者国外碳市场的变动趋势走;另一方面,国际能源价格通过影响国内同类能源价格进一步影响国内碳排放权价格。企业会因成本问题权衡利弊选择更适合自己的能源,从而会影响碳排放进而影响碳交易价格。另外,企业还可以通过升级产业结构及能源结构等方面来降低碳排放量。

国内能源市场对碳排放的影响来自于煤炭、石油和天然气价格^[42],相比于石油和天然气,煤炭属于高碳能源、非清洁能源。因我国受地理环境资源的影响,煤炭是我国资源最多的能源,也是使用做多的能源。煤炭在我国资源使用中占据主导地位,我国发电也主要依靠火力发电,需要消耗大量的动力煤,以之前的数据来看,我国的煤炭能源使用占比 56%以上。由于资源结构问题,短期内我国还需要继续依赖煤炭资源,作为刚需能源,煤炭的波动会使碳市场也发生剧烈波动,因为煤炭的碳排放量巨大,需要消耗更多的碳排放配额。

综上,根据供求关系,能源消耗增加使得碳排放也随之增加从而对碳排放权的需求也增加,当市场上碳排放配额供给保持不变时,则会推动碳排放权价格上涨。本文选取布伦特原油作为国际石油市场指标,选取鹿特丹煤炭为国际煤炭市场指标、选取 NYMEX 天然气作为国际天然气市场指标。选取焦炭、动力煤收盘价作为国内煤炭市场指标,大庆原油现货价作为国内石油市场指标,LNG 液化天然气市场价作为国内天然气市场指标。

(5) 假设 5: 气候环境对碳交易价格有显著影响。

碳排放影响生态环境, 环境因素也反作用于碳排放配额及价格^[43]。本文从以下两个方面来权衡气候环境对碳排放价格的影响作用。

一方面, 极端天气通常伴随着大量电力的消耗, 从而导致碳排放量的上涨, 但之前的研究关于温度是否对碳价有影响存在不同结论。部分学者研究发现气候因素是碳交易价格变动的主要原因, 而另一部分学者则认为气候因素的影响程度较小。有研究表明, 极端天气会极大增加电力的使用, 人们大都通过使用电力来应对极端天气, 同时企业也需要消耗更多的电力来维持正常的生产活动, 电力使用的增加使得更多的能源消耗, 进而产生更多的碳排放。

另一方面, 空气质量指数 (AQI) 是定量刻画空气质量状况的无量纲指数。AQI 数值越大, 说明空气污染程度越严重。AQI 指数上升, 说明当地的空气质量下降, 当空气质量很低的时候, 政府环保部门等会加强出台环境保护措施, 通过调控降低碳排放量达到提升空气质量的效果, 从而影响碳排放权交易价格。

本文将平均气温(取全国各省(除港澳台)省会城市及直辖市气温的平均值)以及空气质量指数作为气候环境变量。

(6) 假设 6: 互联网大数据对碳交易价格有显著影响。

在这个互联网大数据时代, 人们通过各式各样的 app 制造了各种各样的网络搜索数据, 有学者发现这些搜索数据能够为各种景点旅游、股票市场、房地产价格及销售、商场人流、汽车销售等数据提供更高精度的预测^[44,45], 也可以用来丰富预测数据, 为数据预测发挥显著作用, 目前, 也有学者通过研究发现网络搜索指数可以影响碳交易价格, 将其纳入了预测碳交易价格模型, 实证了其确实可以提升预测精度。本文将通过参数估计分析百度搜索指数是否影响碳交易价格, 为碳交易价格预测提供更全面的解释变量。

百度搜索指数是以网民在百度的搜索量为数据基础, 以关键词为统计对象, 计算出的每个关键词在百度网页搜索中搜索频次的加权和。当搜索量上涨时, 代表企业和网民对碳排放权价格的关注度及搜索行为上涨, 从而对碳价产生影响。本文通过百度搜索指数对碳排放权价格需求图谱的需求分析及关键词分类, 选取关系紧密、相关性强的关键词作为搜索指数变量, 获取了 6 个相关性强的搜索指数, 分别为低碳、碳交易、碳排放、碳排放交易、碳达峰、碳中和。

3 我国碳交易价格影响因素实证分析

3.1 模型选择

本章主要研究各个解释变量对于全国碳市场的碳交易价格影响作用机制，各个解释变量为研究提供了更多的信息，但并不是每个解释变量都与被解释变量有相关性，而这些不相关的解释变量会干扰模型增加模型的复杂度，而正则化模型通过控制惩罚项来进行参数估计，如 Lasso、弹性网、弹性 MCP 等等，它可以更好的处理变量间的共线性问题，并且让解释变量对被解释变量有了更好的诠释，所以通过正则化稀疏模型对变量进行参数估计是可行的、有必要的。

3.1.1 Lasso

Lasso回归是线性模型，其在损失函数中增加一个正则项 L_1 范数，即向量中各元素的绝对值之和作为正则化项^[46]，Lasso参数估计如下：

$$\hat{\beta} = \underset{\beta \in \mathbb{R}^p}{\operatorname{argmin}} \frac{1}{2} \|y - X_i \beta\|_2^2 + \gamma \|\beta\|_1 \quad (3.1)$$

其中 $\gamma \geq 0$ 为调参参数。 y 为因变量， X_i 为自变量， β 为系数， $\|\cdot\|_2$ 表示 L_2 范数， $\|\beta\|_1 = \sum_{i=1}^p |\beta_p|$ 为 L_1 范数罚，影响因子越大的解释变量系数也越大，影响因子越小的变量系数就接近于0。

3.1.2 自适应 LASSO

自适应 Lasso 的提出是为了克服 Lasso 估计有偏的缺点^[47]。通过调参让 Lasso 中的惩罚项具有自适应性性质，自适应 Lasso 的参数估计为：

$$\hat{\beta} = \underset{\beta \in \mathbb{R}^p}{\operatorname{argmin}} \frac{1}{2} \|y - X_i \beta\|_2^2 + \lambda \sum_{p=1}^p \hat{w}_p |\beta_p| \quad (3.2)$$

其中 $\lambda > 0$ 为调参参数，控制模型的惩罚程度。 y 为因变量， X_i 为自变量， β 为系数， \hat{w}_p 为权重系数， $\hat{w}_p = \frac{1}{|\tilde{\beta}_p|}$ ， $\tilde{\beta}_p$ 为第 p 个回归参数的最小二乘估计，其参数估计的系数越大代表那个解释变量对被解释变量的影响程度越深。

3.1.3 SCAD 模型

SCAD 模型具有“oracle”性质，是一种近似无偏稀疏模型^[48]。故 SCAD 模型克服 Lasso 有偏估计的缺点，改善了其参数估计一致性和变量选择一致性。SCAD 参数估计具有如下的形式：

$$\hat{\beta} = \underset{\beta \in \mathbb{R}^p}{\operatorname{argmin}} \cdot \frac{1}{2} \|y - X_i \beta_i\|_2^2 + \sum_{p=1}^p \varphi_{\lambda, \gamma}(\beta_p) \quad (3.3)$$

其中 $p \in \{1, \dots, P\}$, $\varphi_{\lambda, \gamma}(\cdot)$ 为 SCAD 罚,

$$\varphi_{\lambda, \gamma}(\theta) = \begin{cases} \lambda|\theta|, & 0 \leq |\theta| \leq \lambda \\ -\frac{(|\theta|^2 - 2\gamma\lambda|\theta| + \lambda^2)}{2(\gamma-1)}, & \lambda \leq |\theta| \leq \gamma\lambda \\ \frac{(\gamma+1)\lambda^2}{2}, & |\theta| \gg \gamma\lambda \end{cases} \quad (3.4)$$

其中 $\gamma > 2$, $\lambda \geq 0$ 。 y 为因变量, X_i 为自变量, β 为系数, 系数越大则代表解释变量对被解释变量的影响程度越深。

3.1.4 MCP 模型

MCP 模型也是一种类似 SCAD 的近似无偏稀疏模型^[49], 也具有“oracle”性质, MCP 参数估计形式如下:

$$\hat{\beta} = \underset{\beta \in \mathbb{R}^p}{\operatorname{argmin}} \cdot \frac{1}{2} \|y - X_i \beta_i\|_2^2 + \sum_{p=1}^p \varphi_{\lambda, \gamma}(\beta_p) \quad (3.5)$$

其中 $p \in \{1, \dots, P\}$, $\varphi_{\lambda, \gamma}(\cdot)$ 为 MCP 罚,

$$\varphi_{\lambda, \gamma}(\theta) = \begin{cases} \lambda|\theta| - \frac{|\theta|^2}{2\gamma}, & |\theta| \ll \gamma\lambda \\ \frac{1}{2}\gamma\lambda^2, & |\theta| > \gamma\lambda \end{cases} \quad (3.6)$$

其中 $\gamma > 1$, $\lambda \geq 0$ 。 y 为因变量, X_i 为自变量, β 为系数, 系数越大则代表解释变量对被解释变量的影响程度越深。

3.1.5 弹性网络回归

弹性网络回归综合了 Lasso 和岭回归两种算法^[50], 同时使用 L_1 和 L_2 正则化, 其参数估计函数可以表示为:

$$\hat{\beta} = \underset{\beta \in \mathbb{R}^p}{\operatorname{argmin}} \cdot \frac{1}{2} \|y - X\beta\|_2^2 + \lambda_1 \|\beta\|_1 + \lambda_2 \|\beta\|_2^2 \quad (3.7)$$

其中 y 为因变量, X_i 为自变量, β 为系数, 罚函数 $\lambda_1 \|\beta\|_1 + \lambda_2 \|\beta\|_2^2$ 由 L_1 范数罚 $\|\beta\|_1$ 和岭回归罚 $\|\beta\|_2^2$ 组成, 系数越高代表相关性越强, 系数为 0 则代表没有相关性。

3.1.6 自适应弹性网

自适应弹性网是结合了弹性网与自适应 Lasso, 它满足在某种特定条件下具有“oracle”性质, 故其在解决高维、共线性问题时较其他非“oracle”性质方法具有

显著优势^[51]，参数估计表达式如下：

$$\hat{\beta} = \underset{\beta \in R^p}{\operatorname{argmin}} \cdot \frac{1}{2} \|y - X_i \beta_i\|_2^2 + \lambda \sum_{p=1}^p \omega_p |\beta_p| + \lambda_2 \|\beta\|_2^2 \quad (3.8)$$

其中 y 为因变量， X_i 为自变量， \hat{w}_p 为权重系数， $\hat{w}_p = \frac{1}{|\tilde{\beta}_p|^\gamma}$ ， $\tilde{\beta}_p$ 为第 p 个回归参数的最小二乘估计， β 为系数， $\|\beta\|_2^2$ 是岭回归罚，系数越高代表相关性越强，系数为0则代表没有相关性。

3.1.7 弹性 SCAD

弹性网由于使用了 L_1 范数罚，因此其缺点为有偏估计^[52]，Zeng 等人针对此问题提出了弹性 SCAD，其参数估计形式为：

$$\beta = \underset{\beta \in R^p}{\operatorname{argmin}} \cdot \frac{1}{2} \|y - X\beta\|_2^2 + \lambda_1 \sum_{p=1}^p \varphi_{\lambda, \gamma}(\beta_p) + \lambda_2 \|\beta\|_2^2 \quad (3.9)$$

其中 $\varphi_{\lambda, \gamma}(\cdot)$ 为 SCAD 罚， $\gamma > 2$ ， $\lambda_1 > 0$ ， $\lambda_2 > 0$ 。其中 y 为因变量， X_i 为自变量， β 为系数，弹性 SCAD 克服了弹性网有偏估计的缺点，而且由于使用了岭罚，故其具有自动组效应，系数越高代表相关性越强，系数为 0 则代表没有相关性。

3.1.8 弹性 MCP

弹性 MCP 与 SCAD 一致，都是为了克服弹性网有偏估计的缺点^[53]，且由于 MCP 具有“Oracle”性质，所以弹性 MCP 使用了 MCP 罚，也具有了“Oracle”性质，弹性 MCP 其参数估计形式为：

$$\beta = \underset{\beta \in R^p}{\operatorname{argmin}} \cdot \frac{1}{2} \|y - X\beta\|_2^2 + \lambda_1 \sum_{p=1}^p \varphi_{\lambda, \gamma}(\beta_p) + \lambda_2 \|\beta\|_2^2 \quad (3.10)$$

其中 $\varphi_{\lambda, \gamma}(\cdot)$ 为 MCP 罚， $\gamma > 1$ ， $\lambda_1 > 0$ ， $\lambda_2 > 0$ 。其中 y 为因变量， X_i 为自变量， β 为系数，其中系数越高代表相关性越强，系数为 0 则代表没有相关性。

3.2 数据选取

本文选取全国碳排放权交易所 2021 年 7 月 16 日至 2022 年 9 月 1 日的全国碳市场碳排放配额(CEA)收盘价作为样本数据，本着全面性原则，再参考现有文献研究、相关经济原理以及数据的可获取性原则等因素下，构建 6 个一级指标，下设 23 个二级指标作为模型变量，23 个影响因素数据来源于 Wind 数据库、iFinD 数据库、Choice 数据库和百度指数，所有指标如表 3.1 所示。

表 3.1 碳交易价格指标

	二级指标	一级指标	频率	数据来源
y	全国碳市场碳排放配额价格	全国碳交易价格	日度	Wind 数据库
x1	沪深 300 指数	经济形势	日度	Wind 数据库
x2	上证综合指数	经济形势	日度	Wind 数据库
X3	美国:道琼斯工业平均指数	经济形势	日度	Wind 数据库
x4	欧洲斯托克 50 指数	经济形势	日度	Wind 数据库
X5	Shibor:隔夜	金融市场	日度	Wind 数据库
X6	美元兑人民币中间价	金融市场	日度	Wind 数据库
X7	欧元兑人民币中间价	金融市场	日度	Wind 数据库
X8	欧盟 EUA 收盘价	国际碳市场	日度	Wind 数据库
X9	布伦特原油收盘价	化石能源价格	日度	Wind 数据库
X10	鹿特丹煤炭结算价	化石能源价格	日度	Wind 数据库
x11	NYMEX 天然气收盘价	化石能源价格	日度	Wind 数据库
x12	焦炭收盘价	化石能源价格	日度	Wind 数据库
x13	动力煤收盘价	化石能源价格	日度	Wind 数据库
x14	大庆原油现货价	化石能源价格	日度	Ifind 数据库
X15	LNG 液化天然气市场价	化石能源价格	日度	Wind 数据库
X16	空气质量指数	气候环境	日度	Ifind 数据库
X17	全国平均气温	气候环境	日度	Choice 数据库
X18	低碳搜索指数	互联网大数据	日度	百度搜索指数
X19	碳交易搜索指数	互联网大数据	日度	百度搜索指数
X20	碳排放搜索指数	互联网大数据	日度	百度搜索指数
X21	碳排放交易搜索指数	互联网大数据	日度	百度搜索指数
X22	碳达峰搜索指数	互联网大数据	日度	百度搜索指数
X23	碳中和搜索指数	互联网大数据	日度	百度搜索指数

3.3 数据预处理及描述性分析

本文的样本首先对缺失值进行处理,虽然各个指标始末时间相同,但是由于受到非交易日的影响,所以直接删除非交易日的缺失数据,其次,通过线性插值法对剩下的缺失值进行填补,最后得到每个变量 275 条有效数据。

首先对数据进行描述性分析,描述性统计分析结果如下表 3.2 所示:

从表中可以看出,全国碳排放配额收盘价最小值为 41.46,最大值为 61.38,平均值为 53.45,标准差为 6.57,说明目前全国碳排放配额价格波动较小。国内经济形势中,沪深 300 指数波动率比上证综合指数大,国外经济形势中美国道琼斯平均指数更大并且波动强,英国富时 100 指数波动小一点。金融市场中利率指标 Shibor:隔夜指数平均值 1.73,标准差为 0.37,而汇率方面美元兑人民币中间价想必欧元兑人民币中间价波动更小。国际碳市场中欧盟 EUA 价格波动幅度大,

最小值 0.72，最大值 97.67。能源市场中最高价格是最低价格的 7.49 倍，波动程度较大。气候环境变量中，全国平均空气质量指数为平均值 56.64，处于二级污染，表明全国空气质量良好，最高值为 105.75，为三级轻度空气污染。全国平均气温最高相差 30 度。搜索指数中，碳达峰和碳中和的搜索量最多，碳中和的平均搜索指数达到了 5197，其中最高值为 19411，碳达峰平均搜索指数为 2210.16，最高值为 7384，碳交易搜索指数和碳排放交易搜索指数最高分别达到了 15750，4520。

表 3.2 碳交易价格变量描述性统计分析

变量	样本量	最大值	最小值	平均值	标准差
全国碳排放配额收盘价	275	61.38	41.46	53.45	6.57
沪深 300 指数	275	5151.75	3784.12	4553.65	365.92
上证综合指数	275	3715.37	2886.43	3402.07	183.52
美国道琼斯工业平均指数	275	36799.65	29888.78	34089.90	1637.93
欧洲斯托克 50 指数	275	4401.49	3359.83	3956.59	280.54
Shibor:隔夜	275	2.30	1.01	1.73	0.37
美元兑人民币中间价	275	6.89	6.30	6.51	0.16
欧元兑人民币中间价	275	7.69	6.75	7.20	0.26
欧盟 EUA 收盘价	275	97.67	50.72	75.22	12.22
布伦特原油收盘价	275	129.47	65.00	92.25	16.04
鹿特丹煤炭结算价	275	439.00	111.10	246.30	96.58
天然气收盘价	275	640.36	85.48	227.05	100.06
焦炭收盘价	275	4402.00	2454.00	3211.98	397.79
动力煤收盘价	275	1835.60	671.00	885.02	180.72
大庆原油现货价	275	124.19	59.61	88.26	17.26
LNG 液化天然气市场价	275	8446.00	3866.67	6173.72	986.99
空气质量指数	275	105.75	29.81	56.64	18.73
平均气温	275	29.39	-2.55	16.55	9.43
低碳搜索指数	275	1449.00	321.00	544.81	165.53
碳交易搜索指数	275	15750.00	620.00	1234.29	961.41
碳排放搜索指数	275	2502.00	605.00	1074.04	298.43
碳排放交易搜索指数	275	4520.00	210.00	482.23	304.63
碳达峰搜索指数	275	7384.00	1351.00	2210.16	641.72
碳中和搜索指数	275	19411.00	2352.00	5197.00	2025.80

对上述指标进行对数化处理得到表 3.3，以达到消除异方差和量纲的目的。其中气温数据出现负数，将气温数据整体加上 3 再进行对数化。

表 3.3 对数化变量描述性统计分析

变量	样本量	最大值	最小值	平均值	标准差
全国碳排放配额收盘价	275	4.12	3.72	3.97	0.13
沪深 300 指数	275	8.55	8.24	8.42	0.08
上证综合指数	275	8.22	7.97	8.13	0.06
美国道琼斯工业平均指数	275	10.51	10.31	10.44	0.05
欧洲斯托克 50 指数	275	8.39	8.12	8.28	0.07
Shibor:隔夜	275	0.83	0.01	0.52	0.23
美元兑人民币中间价	275	1.93	1.84	1.87	0.02
欧元兑人民币中间价	275	2.04	1.91	1.97	0.04
欧盟 EUA 收盘价	275	4.58	3.93	4.31	0.17
布伦特原油收盘价	275	4.86	4.17	4.51	0.17
鹿特丹煤炭结算价	275	6.08	4.71	5.42	0.41
NYMEX 天然气收盘价	275	6.46	4.45	5.33	0.41
焦炭收盘价	275	8.39	7.81	8.07	0.12
动力煤收盘价	275	7.52	6.51	6.77	0.17
大庆原油现货价	275	4.82	4.09	4.46	0.20
LNG 液化天然气市场价	275	9.04	8.26	8.71	0.17
空气质量指数	275	4.66	3.39	3.98	0.33
平均气温	275	3.48	-0.80	2.78	0.71
低碳搜索指数	275	7.28	5.77	6.26	0.26
碳交易搜索指数	275	9.66	6.43	7.00	0.32
碳排放搜索指数	275	7.82	6.41	6.94	0.27
碳排放交易搜索指数	275	8.42	5.35	6.06	0.36
碳达峰搜索指数	275	8.91	7.21	7.66	0.25
碳中和搜索指数	275	9.87	7.76	8.49	0.33

3.4 实证结果分析

使用 3.1 模型选择的 Lasso、MCP、弹性网、弹性 MCP 等 8 个正则化模型对对数化后的变量进行参数估计并进行对比。表 3.4 中给出了 8 种模型的参数估计结果。

表 3.4 变量参数估计结果

	Lasso	自适应 Lasso	SCAD	MCP	弹性网 络	自适应 弹性网	弹性 SCAD	弹性 MCP
x1	-0.747	-0.698	-0.836	-0.584	-0.358	-0.501	-0.596	-0.615
x2	0.000	0.127	0.313	0.000	-0.209	-0.180	0.000	0.000
x3	0.000	0.338	0.317	0.261	0.032	0.000	0.287	0.262
x4	-0.155	-0.490	-0.496	-0.459	-0.227	-0.276	-0.462	-0.469
x5	-0.053	-0.045	-0.049	-0.049	-0.029	-0.028	-0.051	-0.046
x6	-0.102	-0.648	-0.793	-0.698	-0.440	-0.702	-0.714	-0.788
x7	0.589	0.862	0.788	0.859	0.402	0.690	0.820	0.842

续表 3.4

	Lasso	自适应 Lasso	SCAD	MCP	弹性网络	自适应 弹性网	弹性 SCAD	弹性 MCP
x8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
x9	0.364	0.246	0.237	0.247	0.207	0.260	0.244	0.260
x10	0.010	0.041	0.053	0.057	0.049	0.015	0.043	0.042
x11	-0.085	-0.033	-0.040	-0.033	-0.035	-0.019	-0.031	-0.030
x12	0.069	0.000	0.000	0.020	0.057	0.038	0.000	0.000
x13	-0.185	-0.174	-0.188	-0.197	-0.187	-0.177	-0.177	-0.181
x14	0.093	0.146	0.133	0.129	0.150	0.144	0.139	0.129
x15	-0.168	-0.191	-0.179	-0.178	-0.179	-0.201	-0.186	-0.184
x16	-0.008	0.000	-0.007	-0.009	-0.009	0.000	0.000	0.000
x17	-0.014	-0.017	-0.021	-0.022	-0.018	-0.007	-0.018	-0.017
x18	-0.032	-0.010	-0.026	-0.025	-0.021	-0.021	-0.007	-0.024
x19	0.011	0.000	0.000	0.000	0.012	0.000	0.000	0.000
x20	-0.053	-0.019	-0.036	-0.029	-0.028	-0.010	-0.028	-0.027
x21	0.091	0.082	0.097	0.088	0.068	0.059	0.081	0.080
x22	-0.102	-0.119	-0.096	-0.100	-0.101	-0.124	-0.113	-0.108
x23	-0.055	-0.067	-0.077	-0.073	-0.069	-0.053	-0.067	-0.067

根据表 3.4 中 Lasso 模型结果显示：欧元兑人民币中间价、布伦特原油结算价、鹿特丹煤炭结算价、焦炭收盘价、大庆原油现货价、碳交易搜索指数、碳排放交易搜索指数等 7 个影响因子对碳排放权交易价格有正向影响，沪深 300 指数、欧洲斯托克 50 指数、Shibor:隔夜、美元兑人民币中间价、NYMEX 天然气收盘价、动力煤收盘价、LNG 液化天然气市场价、空气质量指数、全国平均气温、低碳搜索指数、碳排放搜索指数、碳达峰搜索指数、碳中和搜索指数等 13 个影响因子对碳排放权交易价格有负向影响。上证综合指数、美国:道琼斯工业平均指数、欧盟 EUA 收盘价变量系数被压缩为 0，其中欧盟 EUA 收盘价在模型的参数估计中系数都为 0，表明国际碳交易价格影响因子不显著，而上证综合指数、美国:道琼斯工业平均指数则可能是因为多重共线性被压缩为 0。

根据表 3.4 中自适应 Lasso 模型结果显示：上证综合指数、美国道琼斯工业平均指数、欧元兑人民币中间价、布伦特原油结算价、鹿特丹煤炭结算价、大庆原油现货价、碳排放交易搜索指数等 7 个影响因子对碳排放权交易价格有正相关，沪深 300 指数、欧洲斯托克 50 指数、Shibor:隔夜、美元兑人民币中间价、NYMEX 天然气收盘价、动力煤收盘价、LNG 液化天然气市场价、全国平均气温、低碳搜索指数、碳排放搜索指数、碳达峰搜索指数、碳中和搜索指数等 12 个

影响因子对碳排放权交易价格有负向影响。欧盟 EUA 收盘价、焦炭收盘价、空气质量指数、碳交易搜索指数变量系数被压缩为 0，表明这些影响因子在自适应 Lasso 参数估计结果中不显著。

根据表 3.4 中 SCAD 模型结果显示：上证综合指数、美国道琼斯工业平均指数、欧元兑人民币中间价、布伦特原油结算价、鹿特丹煤炭结算价、大庆原油现货价、碳排放交易搜索指数等 7 个影响因子对碳排放权交易价格有正相关，沪深 300 指数、欧洲斯托克 50 指数、Shibor:隔夜、美元兑人民币中间价、NYMEX 天然气收盘价、动力煤收盘价、LNG 液化天然气市场价、全国平均气温、低碳搜索指数、碳排放搜索指数、碳达峰搜索指数、碳中和搜索指数等 12 个影响因子对碳排放权交易价格有负向影响。欧盟 EUA 收盘价、焦炭收盘价、碳交易搜索指数变量系数被压缩为 0，表明这些影响因子不显著。

根据表 3.4 中 MCP 模型结果显示：美国道琼斯工业平均指数、欧元兑人民币中间价、布伦特原油结算价、鹿特丹煤炭结算价、焦炭收盘价、大庆原油现货价、碳排放交易搜索指数等 7 个影响因子对碳排放权交易价格有正相关关系，沪深 300 指数、欧洲斯托克 50 指数、Shibor:隔夜、美元兑人民币中间价、NYMEX 天然气收盘价、动力煤收盘价、LNG 液化天然气市场价、AQI 平均指数、全国平均气温、低碳搜索指数、碳排放搜索指数、碳达峰搜索指数、碳中和搜索指数等 13 个影响因子对碳排放权交易价格有负向影响。上证综合指数、欧盟 EUA 收盘价、碳交易搜索指数变量系数被压缩为 0，表明这些影响因子不显著。

根据表 3.4 中弹性网络模型结果显示：美国道琼斯工业平均指数、欧元兑人民币中间价、布伦特原油结算价、鹿特丹煤炭结算价、焦炭收盘价、大庆原油现货价、碳交易搜索指数、碳排放交易搜索指数等 8 个影响因子对碳排放权交易价格有正相关关系，沪深 300 指数、上证综合指数、欧洲斯托克 50 指数、Shibor:隔夜、美元兑人民币中间价、NYMEX 天然气收盘价、动力煤收盘价、LNG 液化天然气市场价、AQI 平均指数、全国平均气温、低碳搜索指数、碳排放搜索指数、碳达峰搜索指数、碳中和搜索指数等 14 个影响因子对碳排放权交易价格有负向影响。欧盟 EUA 收盘价系数被压缩为 0，表明国际碳市场影响因子不显著。

根据表 3.4 中自适应弹性网模型结果显示：欧元兑人民币中间价、布伦特原油结算价、鹿特丹煤炭结算价、焦炭收盘价、大庆原油现货价、碳排放交易搜索

指数等 6 个影响因子对碳排放权交易价格有正相关关系，沪深 300 指数、上证综合指数、欧洲斯托克 50 指数、Shibor:隔夜、美元兑人民币中间价、NYMEX 天然气收盘价、动力煤收盘价、LNG 液化天然气市场价、全国平均气温、低碳搜索指数、碳排放搜索指数、碳达峰搜索指数、碳中和搜索指数等 13 个影响因子对碳排放权交易价格有负向影响。美国:道琼斯工业平均指数、欧盟 EUA 收盘价、碳交易搜索指数变量系数被压缩为 0，表明这些影响因子不显著。

根据表 3.4 中弹性 SCAD 模型结果显示：美国:道琼斯工业平均指数、欧元兑人民币中间价、布伦特原油结算价、鹿特丹煤炭结算价、大庆原油现货价、碳排放交易搜索指数等 6 个影响因子对碳排放权交易价格有正向影响，沪深 300 指数、欧洲斯托克 50 指数、Shibor:隔夜、美元兑人民币中间价、NYMEX 天然气收盘价、动力煤收盘价、LNG 液化天然气市场价、气温、低碳搜索指数、碳排放搜索指数、碳达峰搜索指数、碳中和搜索指数等 12 个影响因子对碳排放权交易价格有负向影响。上证综合指数、欧盟 EUA 收盘价、焦炭收盘价、空气质量指数、碳交易搜索指数其他变量系数被压缩为 0，表明这些影响因子不显著。

根据表 3.4 中弹性 MCP 模型结果显示：美国:道琼斯工业平均指数、欧元兑人民币中间价、布伦特原油结算价、鹿特丹煤炭结算价、大庆原油现货价、碳排放交易搜索指数等 6 个影响因子对碳排放权交易价格有正向影响，沪深 300 指数、欧洲斯托克 50 指数、Shibor:隔夜、美元兑人民币中间价、NYMEX 天然气收盘价、动力煤收盘价、LNG 液化天然气市场价、气温、低碳搜索指数、碳排放搜索指数、碳达峰搜索指数、碳中和搜索指数等 12 个影响因子对碳排放权交易价格有负向影响。上证综合指数、欧盟 EUA 收盘价、焦炭收盘价、空气质量指数、碳交易搜索指数其他变量系数被压缩为 0，表明这些影响因子不显著，弹性 MCP 模型结果和弹性 SCAD 模型结果一致，验证了弹性 MCP 模型比较稳健。

在国内外经济形势的四个指标中，沪深 300 指数、欧洲斯托克 50 指数是负相关显著变量，美国道琼斯工业平均指数是正相关显著变量。当国内经济形势越好，企业则会增大投资扩大生产，而居民生活水平越高，会增加消费能力，从而导致消耗更多的能源，引起碳排放权交易价格越高，而经济形势越好的时候，政府会投放更多的排放权配额，当企业手上的碳排放配额增加，则会使碳排放价格下降，所以这是双向作用，最后看哪个作用大则哪个作用更影响价格。欧洲斯托

克 50 指数能代表欧盟经济发展情况，当其价格出现波动，则会对我国经济造成影响。美国道琼斯工业平均指数在美国金融业有着核心地位，当美国道琼斯指数出现趋势波动，也会对其他国家的金融市场造成部分影响。

在金融市场的三个指标中，Shibor:隔夜、美元兑人民币中间价的系数分别是 -0.046、-0.788，为负相关显著变量，欧元兑人民币中间价的系数是 0.842，为正相关显著变量，利率通过影响企业投资、融资以及生产成本来影响碳价，汇率通过进出口贸易来影响碳排放权交易价格，美元和欧元是国际贸易中使用最广泛、最通用的货币，在我国外汇市场也占有主导地位。

在国际碳市场指标中，欧盟 EUA 收盘价不是显著变量，说明欧盟碳市场对全国碳市场没有直接影响，欧盟碳市场是国际上发展最成熟、最具影响力的碳市场，但是我国近些年碳市场发展迅速，特别是全国碳市场建成之后，碳排放市场制度逐渐完善，可能欧盟碳市场给我国碳市场带来一些间接影响。

在化石能源价格的 7 个指标中，布伦特原油结算价、鹿特丹煤炭结算价、大庆原油现货价的系数分别是 0.260、0.042、0.129，为正相关变量，NYMEX 天然气收盘价、动力煤收盘价、LNG 液化天然气市场价的系数分别是 -0.03、-0.181、-0.184，为负相关变量。其中，鹿特丹煤炭和 YMEX 天然气系数太低，说明对全国碳市场影响不显著。

原油、煤炭、天然气是碳价的重要影响因素，当原油价格上涨时，企业则会选择其他能源替代原油使用，相对于煤炭来说，原油生产使用而产生的碳排放量低，替代品会比原油产生更多的碳排放，从而提高企业的碳排放需求，从而导致碳排放价格的上涨。

煤炭不属于清洁能源，煤炭资源的消耗会释放很多二氧化碳，企业的减排成本会随着煤炭价格的升高而上涨，企业此时就会权衡利弊选择使用更加清洁的能源而放弃使用煤炭资源，或者升级产业结构、能源结构来提高企业的煤炭使用效率以及利用率，从而降低煤炭的使用达到降低碳排放的效果，碳排放的降低则会使企业对碳排放配额的需求降低，从而导致碳排放配额价格的下降。

天然气属于不属于传统能源，而是属于清洁能源，因为天然气燃烧所产生的二氧化碳比较少，企业的减排成本会随着天然气价格的上涨从而提高，当然更换传统能源时减排成本也会增加。所以这时候企业就会计算更换成本，当天然气成

本高于减排成本，则会减少天然气的使用转换传统能源的使用，从而增加碳排放配额的需求，进而导致碳交易价格上升。

能源价格的变动会直接影响企业的成本，从而改变企业的碳排放需求，这也说明了我国能源市场与碳市场关系密切，导致全国碳市场的价格变动。

在大气环境指标中，空气质量指数不是显著变量，说明空气质量指数对全国碳市场配额价格没有直接影响。气温的系数是-0.017，说明气温与碳交易价格是负相关关系，但其系数较小，因此也可以认为气温与碳排放价格没有直接关系。

空气质量指数和气温的异常变化不一定会直接体现在碳价格的变化上，一方面，当空气质量严重恶劣时，政府部门会出台相关政策来抑制碳排放以此来缓解气候污染问题，另一方面，极端天气确实会增加电力等资源的需求，导致碳排放增加推动碳价格的上涨。虽然气候环境的异常和空气质量严重污染会导致政府出台相关政策，从而对碳市场产生影响，但是这种影响一般来说它并不是直接的，由于机制复杂而间接作用在碳市场上，因此短期内对碳价格并不会造成严重影响。

互联网大数据指标中，碳排放交易搜索指数系数是 0.08，为正相关变量，低碳搜索指数、碳排放搜索指数、碳达峰搜索指数、碳中和搜索指数系数分别是-0.024、-0.027、-0.108、-0.067，为负相关变量。搜索指数代表人们或者企业日常生活中对碳排放的关注度，当企业对碳排放、碳价格等搜索指数过于关注，则表示其当前非常需要碳排放或者出售碳排放，并且搜索其新闻或者资讯关注其价格，以待购买或者出售。通过实证分析得出，碳排放交易搜索量会使碳交易价格升高。

4 我国碳交易价格预测分析

4.1 问题的提出

碳排放权的交易是一种新型的金融产品，具有不确定性，而全国碳排放市场刚成立不就，其价格经历了剧烈的波动与变化，这对全国碳市场的完善存在不利影响，也不利于政府监管和企业投资。为了减少金融风险，更好指导的碳市场参与者的决策，对全国碳排放权交易价格走势开展深入研究，发现碳排放权的价格决定机制，提高全国碳市场风险防范能力，研究精度高的碳价预测模型是十分有必要的。

4.2 预测模型

4.2.1 SVR 模型

支持向量回归模型也成为 SVR 模型，它做拟合的过程中采用了支持向量的思想对数据进行回归分析^[54]，其算法原理是寻找最优超平面以使得所有样本点与最优超平面之间的偏差和最小值，可以避免局部极小化问题，解决高维问题，还可以用来解决非线性条件下的预测问题。

设一组样本数据集为 $\{(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n\}$ ， $x_i \in R^n$ 为输入量，即为自变量， $y_i \in R$ 为输出量，即为因变量。通过非线性映射关系 $\varphi(x)$ 将样本投射到高维线性空间中，即：

$$y = f(x) = \omega\varphi(x) + b \quad (4.1)$$

x 表示的是影响因子， ω 表示变量系数， b 表示偏置量， y 代表预测值。

为了使模型更加精确，缩小输出值 $f(x)$ 与真实值的偏差，引入最大偏差 ε ，此时 SVR 可表示为：

$$\min \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^m l_{\varepsilon}(f(x_i) - y_i) \quad (4.2)$$

其中 $C \geq 0$ 为罚函数系数， l_{ε} 为损失函数。进一步引入松弛变量 ξ_i 、 $\hat{\xi}_i$ ，则式变为：

$$\min \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^m (\xi_i + \hat{\xi}_i) \quad (4.3)$$

约束条件为：

$$\begin{cases} s. t. f(x_i) - y_i \leq \varepsilon + \xi_i \\ y_i - f(x_i) \leq \varepsilon + \hat{\xi}_i \\ \xi_i \geq 0, \hat{\xi}_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (4.4)$$

接下来引入拉格朗日因子, $u_i \geq 0$, $\hat{u}_i \geq 0$, $\alpha_i \geq 0$, $\hat{\alpha}_i \geq 0$, 定义拉格朗日函数为式 4.5,

$$\begin{aligned} L(\vec{w}, b, \vec{\alpha}, \hat{\alpha}, \vec{\xi}, \hat{\xi}, \vec{\mu}, \hat{\mu}) &= \frac{1}{2} \|\vec{w}\|_2^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \hat{\xi}_i) - \sum_{i=1}^n u_i \xi_i + \\ &\sum_{i=1}^n \alpha_i (f(\vec{x}_i) - y_i - \varepsilon - \xi_i) + \sum_{i=1}^n \hat{\alpha}_i (y_i - f(\vec{x}_i) - \varepsilon - \hat{\xi}_i) \end{aligned} \quad (4.5)$$

由拉格朗日对偶性得到原始问题的对偶问题是极大极小问题,

$$\max_{\alpha_i, \hat{\alpha}} \min_{\vec{w}, b, \vec{\xi}, \hat{\xi}} L(\vec{w}, b, \vec{\alpha}, \hat{\alpha}, \vec{\xi}, \hat{\xi}, \vec{\mu}, \hat{\mu}) \quad (4.6)$$

根据 $L(\vec{w}, b, \vec{\alpha}, \hat{\alpha}, \vec{\xi}, \hat{\xi}, \vec{\mu}, \hat{\mu})$ 对 $\vec{w}, b, \vec{\xi}, \hat{\xi}$ 求偏导数求极小问题可得:

$$\begin{cases} \vec{w} = \sum_{i=1}^n (\hat{\alpha}_i - \alpha_i) \vec{x}_i \\ 0 = \sum_{i=1}^n (\hat{\alpha}_i - \alpha_i) \\ C = \sum_{i=1}^n (\hat{\alpha}_i - \alpha_i) \\ C = \hat{\alpha}_i + \hat{u}_i \end{cases} \quad (4.7)$$

再求极大问题如式 4.8 以及 4.9 所示:

$$\begin{aligned} \text{Min}_{\alpha_i, \hat{\alpha}} \sum_{i=1}^n [y_i (\hat{\alpha}_i - \alpha_i) - \varepsilon (\hat{\alpha}_i + \alpha_i)] - \\ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\hat{\alpha}_i - \alpha_i) (\hat{\alpha}_j - \alpha_j) \vec{x}_i^T \vec{x}_j \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$\begin{cases} s. t. \sum_{i=1}^n (\hat{\alpha}_i - \alpha_i) = 0 \\ 0 \geq \alpha_i, \alpha_i \geq C \end{cases} \quad (4.9)$$

给定 KKT 条件如式 4.10 所示:

$$\begin{cases} \alpha_i (f(\vec{x}_i) - y_i - \varepsilon - \xi_i) = 0 \\ \hat{\alpha}_i (y_i - f(\vec{x}_i) - \varepsilon - \hat{\xi}_i) = 0 \\ \alpha_i \hat{\alpha}_i = 0 \\ \xi_i \hat{\xi}_i = 0 \\ (C - \alpha_i) \xi_i = 0 \\ (C - \hat{\alpha}_i) \hat{\xi}_i = 0 \end{cases} \quad (4.10)$$

假设最终解为 $\vec{\alpha}^* = (\alpha_1^* + \alpha_2^* + \dots + \alpha_n^*)^T$, 在 $\hat{\alpha} = (\hat{\alpha}_1^* + \hat{\alpha}_2^* + \dots + \hat{\alpha}_n^*)^T$

中, 找到 $\hat{\alpha}^*$ 的某个分量 $C > \alpha_j^* > 0$, 则如式 4.11 和式 4.12:

$$b^* = y_i + \varepsilon - \sum_{i=1}^n (\hat{\alpha}_i^* + \alpha_j^*) \vec{x}_i^T \vec{x}_j \quad (4.11)$$

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (\hat{\alpha}_i^* + \alpha_i^*) \bar{x}_i^T \bar{x}_j + b^* \quad (4.12)$$

给定核函数 $K(\bar{x}_i, \bar{x})$ ，则最终 SVR 的解可以表示为：

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i) K(\bar{x}_i, \bar{x}) + b \quad (4.13)$$

本文选择超参数复杂度较小的径向基函数为核函数，建立 SVR 模型。

4.2.2 LSTM 模型

长短期记忆模型（LSTM）是一种特殊的 RNN 网络^[55]，其能够学习到长序列间的依赖，是为了解决循环神经网络存在的长期依赖问题而专门设计的，适合用于处理与时间序列高度相关的问题，尤其适用于非线性序列的预测和处理，其结构如图 5.1 所示。

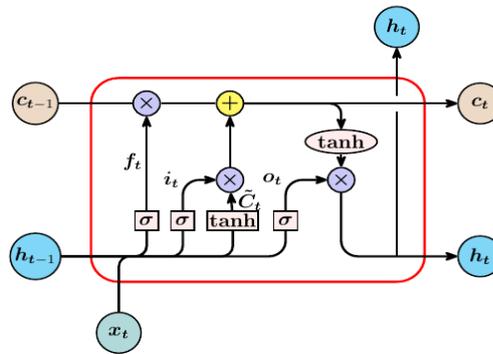


图 4.1 LSTM 模型结构图

首先是遗忘门，对于 c_{t-1} 来说，会首先看上一个阶段的输出 h_{t-1} 和这个阶段的输入 x_t ，并通过 sigmoid 来确定要让 c_{t-1} 来忘记多少，sigmoid=1 表示要保存多一些 c_{t-1} 的比重，等于 0 表示完全忘记之前的 c_{t-1} 。

$$f_t = \sigma(w_f * [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (4.14)$$

其次是输入门：分两步确定要在单元状态中存储哪些新信息。首先会拿上一个阶段的输出 h_{t-1} 和这个阶段的输入 x_t ，通过 sigmoid 来控制现在要加多少进入 C_t ，即第一个公式的含义；然后又创建一个备选的 \tilde{c}_t ，用 tanh 去控制要加入 C_t 的部分是多少。之后通过把两个部分相乘，总共决定了要影响 C_t 的量是多少，加上之前的遗忘门的影响，可以写为：

$$i_t = \sigma(w_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (4.15)$$

$$\tilde{c}_t = \tanh(w_c \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_c) \quad (4.16)$$

$$c_t = f_t * c_{t-1} + i_t * \tilde{c}_t \quad (4.17)$$

最后是输出门：通过 sigmoid 函数，来决定 c_t 的哪一部分需要被输出，即第一个公式的 o_t ；之后，我们把 c_t 放入 \tanh 内，决定最后输出 c_t 的部分，并和 o_t 相乘，得到最后的输出 h_t 。

$$o_t = \sigma(w_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (4.18)$$

$$h_t = o_t * \tanh(c_t) \quad (4.19)$$

其中，sigmoid、tanh 为激活函数， w 是每个门的权重系数矩阵， b 为每个门的偏置项。

4.3 变量选取及数据预处理

本文样本数据为全国碳市场碳排放配额单日收盘价，时间自 2021 年 7 月 16 日至 2022 年 8 月 31 日（剔除非交易日及个别缺失数据），数据来源于上海环境能源交易所。

通过上一章节影响因素分析选取变量，选取变量如表 4.1 所示，每一种变量选择方法选择的变量通过 LSTM 预测模型预测，最后进行对比分析哪一种变量选择方法最适合全国碳市场碳排放配额预测。

表 4.1 变量选取表

模型	变量
Lasso	X1, X4, X5, X6, X7, X9, X10, X11, X12, X13, X14, X15, X16, X17, X18, X19, X20, X21, X22, X23
Alasso	X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X9, X10, X11, X13, X14, X15, X17, X18, X20, X21, X22, X23
SCAD	X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X9, X10, X11, X13, X14, X15, X16, X17, X18, X20, X21, X22, X23
MCP	X1, X3, X4, X5, X6, X7, X9, X10, X11, X12, X13, X14, X15, X16, X17, X18, X20, X21, X22, X23
弹性网络	X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X9, X10, X11, X12, X13, X14, X15, X16, X17, X18, X19, X20, X21, X22, X23
自适应弹性网络	X1, X2, X4, X5, X6, X7, X9, X10, X11, X12, X13, X14, X15, X17, X18, X20, X21, X22, X23
弹性 SCAD	X1, X3, X4, X5, X6, X7, X9, X10, X11, X13, X14, X15, X17, X18, X20, X21, X22, X23
弹性 MCP	X1, X3, X4, X5, X6, X7, X9, X10, X11, X13, X14, X15, X17, X18, X20, X21, X22, X23

本节将 275 个样本数据分为训练集和测试集两部分，前 220 个样本数据作为训练集后 55 个样本数据作为测试集。

4.4 模型评估指标

本文采用典型模型评估指标平均绝对误差 (MAE) 和均方误差 (RMSE) 评估模型预测精准度。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y - y_i| \quad (4.20)$$

其中式里 y 为被解释变量的真实值, y_i 为模型预测的被解释变量值, n 为样本个数。MAE 的评价指标估计值越小就说明模型越好。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y - y_i)^2} \quad (4.21)$$

其中式里 y 为被解释变量的真实值, y_i 为模型预测的被解释变量值, n 为样本个数。RMSE 的评价指标估计值越小就说明模型越好。

4.5 预测结果分析

通过第三章中正则化稀疏模型变量筛选方法, 将筛选出来的特征变量全部作为自变量加入 SVR 碳价格预测模型中来, 将数据划分为训练集和测试集两部分, 并对指标数据进行归一化处理, SVR 模型实证结果如表 4.2。

表 4.2 SVR 预测模型实证结果

模型	模型变量	训练集	训练集	测试集	测试集
		RMSE	MAE	RMSE	MAE
SVR	所有变量	4.18	29.37	4.21	29.88
	Lasso	4.66	32.84	4.69	33.23
	AdLasso	4.55	31.94	4.41	31.21
	SCAD	4.12	29.85	4.11	30.01
	MCP	4.42	30.57	4.15	27.65
	弹性网	4.78	33.02	4.89	33.37
	自适应弹性网	4.05	29.26	4.08	29.51
	弹性 MCP	4.05	28.75	4.01	27.47

通过表 4.2 可以看出, 在 SVR 模型中, 弹性 MCP 的训练集 RMSE 及 MAE 系数最低, 说明弹性 MCP 筛选出来的变量结果在 SVR 模型中表现最好。自适应 Lasso 相比 Lasso 在 SVR 模型中表现更好。自适应弹性网对比弹性网效果在 SVR 模型中拟合效果更优秀。而 MCP 模型对比 SCAD 模型在 SVR 模型中结果表现一般。

通过第三章中正则化稀疏模型变量筛选方法, 将筛选出来的特征变量全部作

为自变量加入 LSTM 碳价格预测模型中来, 其中, LSTM 模型设置为两个隐藏层, 设置步长即时间序列长度为 20, 学习率 lr 设置为 0.01, 损失函数采用 MSE 迭代次数为 200 次, 为了防止模型过拟合, 通过加入参数“dropout”提高神经网络的泛化能力来防止过拟合。训练集和测试集的分割比率为 0.8: 0.2, LSTM 模型实证结果如表 4.3。

表 4.3 LSTM 预测模型实证结果

模型	模型变量	训练集	训练集	测试集	测试集
		RMSE	MAE	RMSE	MAE
LSTM	y	1.23	0.75	0.90	0.77
	所有变量	0.96	0.73	0.98	0.77
	Lasso	0.64	0.47	0.94	0.76
	AdLasso	0.75	0.55	1.29	1.02
	SCAD	0.78	0.55	1.08	0.94
	MCP	0.66	0.48	0.85	0.74
	弹性网	0.71	0.50	0.80	0.67
	自适应弹性网	0.71	0.52	0.80	0.69
	弹性 MCP	0.54	0.38	0.76	0.62

通过表 4.3 可以看出, 在 LSTM 模型中, 弹性 MCP 的 RMSE 及 MAE 系数最低, 训练集 MAE 低至 0.38, 测试集 MAE 为 0.62, 说明弹性 MCP 筛选出来的变量结果变现最好。表中结果显示自适应 Lasso 相比 Lasso 表现要差一些, 自适应弹性网对比弹性网效果则相当, 单个 MCP 模型比 SCAD 模型结果更好。

通过对比表 4.2 及表 4.3 可以发现, 在全国碳市场碳排放配额价格模型中, LSTM 模型对比支持向量回归模型拟合表现更好, 模型更精确, 总体来说, LSTM 模型预测效果较好。

设置滞后阶数 $P = 1$, 即因变量碳交易价格受一阶滞后影响, 表 4.4 为滞后一期 LSTM 模型的实证结果。

表 4.4 滞后一期预测实证结果

模型	模型变量	训练集	训练集	测试集	测试集
		RMSE	MAE	RMSE	MAE
LSTM	y	1.03	0.71	0.79	0.64
	所有变量	0.75	0.58	1.01	0.85
	Lasso	0.80	0.58	0.79	0.63

续表 4.4

模型	模型变量	训练集	训练集	测试集	测试集
		RMSE	MAE	RMSE	MAE
LSTM	AdLasso	0.90	0.68	1.22	1.10
	SCAD	0.83	0.62	1.14	0.95
	MCP	0.70	0.50	0.86	0.72
	弹性网	0.65	0.46	0.84	0.71
	自适应弹性网	0.71	0.52	0.80	0.70
	弹性 MCP	0.48	0.33	0.72	0.57

对比表 4.3 和表 4.4，可以发现滞后一期的实证结果相比无滞后的实证结果表现更好，滞后一期使得模型更加精准，而模型变量的选择方法没有随着滞后发生显著变化，依旧是弹性 MCP-LSTM 模型的结果表现最好。

弹性 MCP-LSTM 模型预测图如图 4.2 所示：

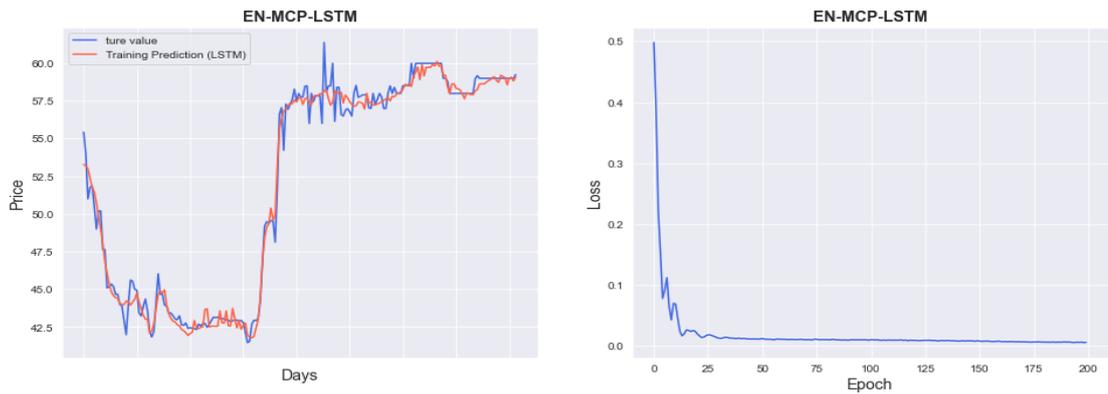


图 4.2 弹性 MCP-LSTM 测试集预测图

通过图 4.2 可以发现预测值的趋势和实际值的走势一样，说明弹性 MCP-LSTM 预测模型比较好。

经弹性 MCP-LSTM 模型预测 2022 年 9 月 1 日至 9 月 5 日这 5 天全国碳市场碳交易价格如下表 4.5 所示：

表 4.5 全国碳市场碳交易价格预测

预测值	实际值
58.25	58.00
58.17	58.00
58.38	58.50
59.13	58.98
59.15	58.99

表 4.5 的结果发现，2022 年 9 月 1 日至 9 月 5 日这 5 天的碳价持上升趋势，而且可以发现预测值与实际值相差不大，走势趋势相同，预测误差较小，预测效果比较好，说明弹性 MCP-LSTM 模型可以很好地预测碳交易价格，也为预测碳交易价格提供了一个新的思路。

5 结论与建议

随着全球碳交易体量的不断扩大，碳交易规模的总价值也不断提升，去年全国碳市场的建立更使得我国成为全球最大的碳排放市场。碳交易价格对于碳市场的发展和气候环境的调控有着重要作用。研究碳交易价格可以有助于推动碳市场健康发展、制定相关政策、企业获利，对实现“双碳”目标有着重要意义。

5.1 研究结论

绿色金融正冉冉升起，为生态文明建设提供了重要的金融支撑，本文以全国碳市场碳排放配额价格作为研究对象，进行碳价格影响因素及预测分析。从全国碳市场发展现状、理论基础、影响因素来全面分析全国碳市场的发展。

首先，本文梳理了我国碳市场发展现状，从 2010 年我国建立碳市场至今，建立了 8 大试点碳市场，并且建立全国统一碳市场为先驱，为全国统一大市场的建立提供现实指导。全国碳市场的建立，标志着我国一越成为全球最大的碳排放市场。“双碳”目标的实现必然需要碳市场的助力，这种双向影响就会推动我国的碳市场大力的发展。

其次，本文选择全国碳市场碳排放配额 2021 年 7 月 16 至 2022 年 9 月 1 号的数据作为研究对象，通过理论梳理、文献研究选取了经济形势、金融市场、国际碳市场、化石能源价格、大气环境以及互联网大数据等 6 个一级指标 23 个二级指标作为解释变量，通过实证分析得到：美国:道琼斯工业平均指数、欧元兑人民币中间价、布伦特原特原油结算价、鹿特丹煤炭结算价、大庆原油现货价、碳排放交易搜索指数等 6 个影响因子对碳交易价格有正向影响，沪深 300 指数、欧洲斯托克 50 指数、Shibor:隔夜、美元兑人民币中间价、NYMEX 天然气收盘价、动力煤收盘价、LNG 液化天然气市场价、气温、低碳搜索指数、碳排放搜索指数、碳达峰搜索指数、碳中和搜索指数等 12 个影响因子对碳交易价格有负向影响，剩余的影响因子对碳交易价格没有直接影响，可能通过间接关系来影响碳交易价格。

最后本文通过支持向量回归以及 LSTM 构建碳价格预测模型，通过构建变量选择方法选出相关变量作为解释变量，实证结果发现：弹性 MCP 能更好的筛选出解释变量，LSTM 模型的预测效果更好，且预测 2022 年 9 月 1 日至 9 月 5 日这 5 天的走势呈上升趋势，对于企业来说，明确碳交易价格的走势能够使企业

做出更加明智的经营决策、更好地进行资源配置，还可以提高企业参与碳交易的积极性。对于国家来说，碳市场能通过政策管控更快更好的实现“双碳”目标，为大气环境提供一个更好的平台。

5.2 政策建议

目前，全国碳市场已成为我国交易规模最大的碳市场，国内外经济形势、利率汇率、国内外能源价格等都是我国碳交易价格的影响因素。因此，推动我国碳市场国际化，与国际碳市场相互交流，扩大全国碳市场规模，增加减排企业数量，发展培育我国碳金融产品，可以促进全国碳市场稳定、推动全国碳市场的发展。

第一，需要进一步扩大全国碳市场的规模。目前全国碳市场只纳入了电力行业，需要强制纳入更多的重点碳排放部门、行业（如纺织、建筑、钢铁、材料等等）到全国碳市场来，随着全国碳市场的完善，逐步关停地方试点碳市场，试点碳市场统一并入全国碳市场，这样可以制定统一的相关政策、配额数量、交易方式，提高全国碳市场的效率。还要降低企业进入门槛，这样参与的企业也会越来越多，可以进一步提高全国碳市场的活跃度，促进全国碳市场健康良性发展，推进能源结构转型以及产业结构升级实现“双碳”目标。

第二，需要完善全国碳市场碳配额分配制度。当前我国碳配额分配主要是免费配额，政府免费分配给排控主体企业碳排放配额，而欧盟碳排放体系碳配额分配主要是拍卖，获得的方式手段不同，导致获得碳排放配额的价格也不一样，所以我国应该严控碳排放配额总量，科学制定配额发放机制，统一碳排放配额分配方式，要考虑不同行业不同企业碳排放的不同，根据实际情况发放合适的碳排放配额，有助于提高企业的碳排放积极性。

第三，需要加强风险管理能力，创新发展碳金融产品。金融市场、能源市场都能对我国碳市场产生影响，防控相关市场对我国碳市场的风险传导，由于全国碳市场建立时间太短，相关法律法规以及监管措施尚未出台，目前我国碳金融衍生品创新不足，产品比较单一，所以应该碳金融机构，丰富碳金融衍生品，加强碳市场风险管理能力。

参考文献

- [1] Chevallier J. Nonparametric modeling of carbon prices[J].Energy Economics, 2011,33(6):1267-1282.
- [2] 邹亚生,魏薇.碳排放核证减排量(CER)现货价格影响因素研究[J].金融研究,2013,No.400(10):142-153.
- [3] Koch N, Fuss S, Grosjean G, et al. Causes of the EU ETS price drop: Recession, CDM, renewable policies or a bit of everything?—New evidence[J].Energy Policy,2014,73:676-685.
- [4] 汪中华,胡垚.我国碳排放权交易价格影响因素分析[J].工业技术经济,2018,37(02):128-136.
- [5] 杜子平,刘富存.我国区域碳排放权价格及其影响因素研究——基于GA-BP-M IV模型的实证分析[J].价格理论与实践,2018,No.408(06):42-45.
- [6] Zhu B Z, Ye S X, Han D, et al. A multiscale analysis for carbon price drivers[J].Energy Economics, 2019,78:202-216.
- [7] 吕靖焯,范欣雅,吴浩楠.中国排放权价格影响因素的参数灵敏度分析[J].软科学,2021,35(05):123-130.
- [8] 夏睿瞳.我国碳排放交易价格波动及其影响因素研究——兼析履约日附近价格突变与日常价格波动规律[J].价格理论与实践,2022,No.461(11):129-132+210.
- [9] 郭文军.中国区域碳排放配额价格影响因素的研究——基于自适应 Lasso方法[J].中国人口·资源与环境,2015,25(S1):305-310.
- [10] 周建国,刘宇萍,韩博.我国碳配额价格形成及其影响因素研究——基于VAR模型的实证分析[J].价格理论与实践,2016,No.383(05):85-88.
- [11] 王倩,路京京.人民币汇率冲击中国碳价的非对称效应——基于马尔科夫转换模型的实证研究[J].吉林大学社会科学学报,2017,57(06):95-105+205-206.
- [12] 邹绍辉,张甜.国际碳期货价格与国内碳价动态关系[J].山东大学学报(理学版), 2018,53(05):70-79.
- [13] 李可隆,谢赤.欧盟与湖北碳交易市场的互相关性——基于MF-X-DMA的研究[J].中南财经政法大学学报,2020,No.238(01):114-126.
- [14] 魏宇,张佳豪,陈晓丹.基于DMS和DMA的我国碳排放权交易价格预测方法研究——来自湖北碳市场的经验证据[J].系统工程:2022,40(04)1-16.
- [15] 王小燕,周思敏,徐晓莉等.基于图结构自适应Lasso的碳排放权价格影响因素分析[J].统计与信息论坛,2022,37(04):73-83.
- [16] 张跃军,魏一鸣.化石能源市场对国际碳市场的动态影响实证研究[J].管理评论, 2010,22(06):34-41.
- [17] 赵选民,魏雪.传统能源价格与我国碳交易价格关系研究——基于我国七个碳交易试点省市的面板数据[J].生态经济,2019,35(02):31-34+52.
- [18] Han M, Ding L L, Zhao X, et al. Forecasting carbon prices in the Shenzhen market, China: The role of mixed-frequency factors[J].Energy,2019,171:69-76.
- [19] 李谊.碳排放权交易定价影响因素的实证研究[J].价格理论与实践,2020,No.432(06):146-149.
- [20] 刘志洋,马欣頔,解瑶姝.碳市场、能源市场与金融市场相互影响关系研究——

- 全国碳排放权交易市场推出前后比较视角[J].证券市场导报,2022,No.359(06):36-46.
- [21] Wang L H, Yin K D, Cao Y, et al. A new Grey relational analysis model based on the characteristic of inscribed core (IC-GRA) and its application on seven-pilot carbon trading markets of China[J].International Journal of Environmental Research and Public Health,2019,16(1):99.
- [22] Zhou K, Li Y W. Influencing factors and fluctuation characteristics of China's carbon emission trading price[J].Physica A: Statistical Mechanics and its Applications,2019,524:459-474.
- [23] 周天芸,许锐翔.中国碳排放权交易价格的形成及其波动特征——基于深圳碳排放权交易所的数据[J].金融发展研究,2016,No.409(01):16-25.
- [24] 宋雅贤,顾光同.中国碳市场试点区碳交易价格驱动因素及其时空异质性[J].林业资源管理,2022(05):32-41.
- [25] 刘涛雄,徐晓飞.互联网搜索行为能帮助我们预测宏观经济吗?[J].经济研究,2015,50(12):68-83.
- [26] 王娜.基于大数据的碳价预测[J].统计研究,2016,33(11):56-62.
- [27] 贾君君,许金华,范英.欧盟碳排放权市场重大公告事件对碳价格的影响[J].中国科学院院刊,2017,32(12):1347-1355.
- [28] Zhao L T, Miao J, Qu S, et al. A multi-factor integrated model for carbon price forecasting: market interaction promoting carbon emission reduction[J]. Science of The Total Environment,2021,796:149110.
- [29] 申笑颜.中国碳排放影响因素的分析与预测[J].统计与决策,2010,No.319(19):90-92.
- [30] Sanin M E, Violante F, Mansanet-Bataller M. Understanding volatility dynamics in the EU-ETS market[J].Energy Policy,2015,82:321-331.
- [31] Li W, Lu C. The research on setting a unified interval of carbon price benchmark in the national carbon trading market of China[J].Applied Energy, 2015,155:728-739.
- [32] 王娜.基于Boosting-ARMA的碳价预测[J].统计与信息论坛,2017,32(03):28-34.
- [33] 彭武元,陈思宇.中国碳排放试点市场碳交易价格分析及预测[J].技术经济,2020,39(03):102-110.
- [34] 高杨,李健.基于EMD-PSO-SVM误差校正模型的国际碳金融市场价格预测[J].中国人口·资源与环境,2014,24(06):163-170.
- [35] Sun W, Zhang C C. Analysis and forecasting of the carbon price using multi-resolution singular value decomposition and extreme learning machine optimized by adaptive whale optimization algorithm[J].Applied Energy,2018,231:1354-1371.
- [36] 崔焕影,窦祥胜.基于EMD-GA-BP与EMD-PSO-LSSVM的中国碳市场价格预测[J].运筹与管理,2018,27(07):133-143.
- [37] 赵峰,徐丹华.改进HHO算法的碳交易价格组合预测研究[J].西安理工大学学报,2023,39(01):1-9.
- [38] 张国兴,张振华,刘鹏等.我国碳排放增长率的运行机理及预测[J].中国管理科学,2015,23(12):86-93.
- [39] 原媛,孙欣彤.城市化、产业结构、能源消费、经济增长与碳排放的关联性分析——基于中国省际收入水平异质性的实证研究[J].气候变化研究进展,2020,16

- (06):738-747.
- [40] 陈骁,张明.碳排放权交易市场:国际经验、中国特色与政策建议[J].上海金融,2022,No.506(09):22-33.
- [41] 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(06):42-48.
- [42] 刘建和,梁佳丽,陈霞.我国碳市场与国内焦煤市场、欧盟碳市场的溢出效应研究[J].工业技术经济,2020,39(09):88-95.
- [43] 陈菡,陈文颖,何建坤.实现碳排放达峰和空气质量达标的协同治理路径[J].中国人口·资源与环境,2020,30(10):12-18.
- [44] 董倩,孙娜娜,李伟.基于网络搜索数据的房地产价格预测[J].统计研究,2014,31(10):81-88.
- [45] 王炼,宁一鉴,贾建民.基于网络搜索的销量与市场份额预测:来自中国汽车市场的证据[J].管理工程学报,2015,29(04):56-64.
- [46] 刘建伟,崔立鹏,刘泽宇,罗雄麟.正则化稀疏模型[J].计算机学报,2015,38(07):1307-1325.
- [47] 王国长,梁焯婷,王金枝.改进的自适应Lasso方法在股票市场中的应用[J].数理统计与管理,2019,38(04):750-760.
- [48] 蔡超,许启发,蒋翠侠等.大规模数据的分块SCAD惩罚回归分析[J].数理统计与管理,2018,37(06):1023-1040.
- [49] Zhang C H.Nearly unbiased variable selection under minimax concave penalty[J].The Annals of Statistics, 2010,38(2):894-942.
- [50] 冯明皓,张天伦,王林辉等.改进的弹性网模型在深度神经网络中的应用[J].计算机应用,2019,39(10):2809-2814.
- [51] 徐若南.基于自适应弹性网对强相关数据的群组变量选择的研究[D].合肥工业大学,2017.
- [52] Zeng L M,Xie J.Group variable selection via SCAD-L2[J].Statistics,2014,48(1):49-66
- [53] 舒时克,李路.正则稀疏化的多因子量化选股策略[J].计算机工程与应用,2021,57(01):110-117.
- [54] 林芳逗,赵为华,张日权.贝叶斯支持向量回归及其应用[J].统计与决策,2023,39(03):49-54.
- [55] 欧阳红兵,黄亢,闫洪举.基于LSTM神经网络的金融时间序列预测[J].中国管理科学,2020,28(04):27-35.

致 谢

自 2020 年进入兰财至今已近三载，我也将全新的姿态迈入新的人生，书写新的篇章。在这三年的硕士研究生生活中，经历了许多，也成长了许多，既有刚上研究生时的懵懂，也有现在即将毕业时的成熟。研究生生活也不是一帆风顺的，参加过挑战杯、市场调查，统计建模等比赛充实自己，和朋友一起开论文讨论会、研讨会，也享受了普通的校园生活。也经历过不平凡的疫情生活，锻炼了自己承受能力，使我受益终身。在这个过程中，我离不开同学给我的帮助，离不开老师给我的教导，也离不开家人给我的支持，在此毕业之际，我要向他们表示我最真诚的感谢。

首先，我要感谢的是我的导师傅德印教授。我的导师是一位博学严谨、风趣幽默、开朗通透、认真负责、关爱学生的老师，在我学业、学术、生活上面给与了很大帮助。对我这三年的求学路上对我产生了深远的影响。在此，对恩师表达深深的感谢！

其次，我要感谢兰州财经大学，要感谢每一位为我传授过知识的老师，是他们的辛勤教授指导让我掌握了更多的知识，提高了自己的能力。我也要感谢我的室友，感谢我师门的所有同学，感谢课题小组的朋友还有其他同学，感谢他们在学习和生活中给我提供支持，在我遇到困难中给与我帮助，让我的研究生生活变的温暖快乐。

最后，我要感谢我的父母，感谢父母对我的关心与培养，让我成为了一个独立、自信、活泼、开朗的人，是他们受苦受累给与了我物质和精神上的支持，给与了我安心学习的机会，从来没有抱怨，视我为骄傲！

此去经年，应是前程似锦，一路繁花。