

分类号 F83
U D C 650

密级 公开
编号 10741



硕士学位论文

论文题目 我国碳期权产品设计与定价研究

研究生姓名: 郭莉

指导教师姓名、职称: 杨世峰、教授

学科、专业名称: 应用经济学、金融工程

研究方向: 金融资产定价

提交日期: 2024年6月3日

独创性声明

本人声明所提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： 郭莉 签字日期： 2024.6.3

导师签名： 杨军 签字日期： 2024.6.3

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內容。

学位论文作者签名： 郭莉 签字日期： 2024.6.3

导师签名： 杨军 签字日期： 2024.6.3

Research on the Design and Pricing of Carbon Options in China

Candidate : Guo Li

Supervisor: Yang Shifeng

摘 要

在全球气候变暖背景下，气候变化不断带来严峻的风险挑战。自我国 2020 年 9 月明确提出双碳目标以来，绿色金融体系构建的步伐不断加快，我国从 2013 年便逐步开启了碳市场试点，2021 年全国碳排放权市场交易开市，同年 4 月 19 日，计划开发碳排放权衍生交易品种的广州期货交易所挂牌成立，标志着我国开始着手场内碳衍生交易市场的建设。而碳期权作为碳衍生交易市场的重要组成部分，对于补充完善碳金融体系和推动经济可持续发展具有重要作用，因此，本文结合国内外碳市场现状分析了推出碳期权的可行性，并进行了产品设计。

首先，本文深入地分析了我国碳期权产品的开发需求，通过研究国内外碳交易市场的发展现状，阐述了我国开发碳期权的需求背景和优势。其次，本文借鉴国外 EUA 碳期权，以碳排放配额为标的资产，设计了我国的碳期权产品合约。再次，对设计的碳期权产品进行定价研究，本文以 2021 年 7 月 16 日至 2023 年 4 月 10 日期间全国碳排放权交易市场的碳配额收盘价为样本，通过 GARCH 模型结合分形布朗运动期权定价模型研究并计算了碳期权的理论价格，同时结合广东、湖北，上海和福建四个不同碳市场的状况对定价结果进行了简要分析。最后，本文针对研究过程中发现的问题提出了相关建议，并对碳期权推出后的推广前景和具体应用前景进行了展望，以期加快我国碳期权市场的建设进程。

关键词：碳期权 合约设计 分形布朗运动 GARCH 模型

Abstract

In the context of global climate change and the associated risks it poses, the challenges of climate change have become increasingly severe. Since China's clear announcement of its dual carbon goals in September 2020, the pace of constructing a green financial system has accelerated. China has gradually initiated carbon market pilots since 2013, and in 2021, the nationwide carbon emission trading market commenced operations. On April 19 of the same year, the Guangzhou Futures Exchange, with plans to develop carbon emission rights derivatives, was established, marking China's initiation of establishing an on-exchange carbon derivatives trading market. Carbon options, as a vital component of the carbon derivatives trading market, play a significant role in complementing and improving the carbon financial system, thereby promoting sustainable economic development. Therefore, this paper combines an analysis of the current status of domestic and international carbon markets to assess the feasibility of introducing carbon options and subsequently undertakes product design.

Firstly, the paper deeply analyzes the development demand of China's carbon option products, and expounds the demand background and advantages of China's carbon option development by studying the development status of carbon trading markets at home and abroad. Secondly, drawing inspiration from foreign EUA carbon options, the paper designs carbon option product contracts with carbon emission quotas as the underlying asset. Thirdly, the paper conducts a pricing study on the designed carbon option products. It selects the closing prices of carbon quotas in the national carbon emission trading market between July 16, 2021, and April 10, 2023, as the research sample and calculates the theoretical prices of options using the GARCH model combined with a

fractal Brownian motion option pricing model. A brief analysis of the pricing results is also provided, considering the conditions in four different carbon markets in Guangdong, Hubei, Shanghai, and Fujian. Finally, the paper proposes relevant suggestions based on issues identified during the research process and provides a prospective outlook on the promotion and specific application prospects of carbon options, aiming to expedite the development of China's carbon options market.

Keywords: Carbon Options; Contract Design; Fractal Brownian Motion; GARCH Model

目 录

1 绪 论	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 国内外文献综述.....	3
1.2.1 关于碳金融市场的研究.....	3
1.2.2 关于期权定价模型的研究.....	4
1.2.3 关于碳期权设计与定价的研究.....	5
1.2.4 文献评述.....	7
1.3 研究内容、研究方法与技术路线.....	8
1.3.1 研究内容.....	8
1.3.2 研究方法.....	9
1.3.3 技术路线.....	10
1.4 可能的创新与不足.....	11
1.4.1 可能的创新.....	11
1.4.2 不足之处.....	11
2 概念界定与理论基础	12
2.1 概念界定.....	12
2.1.1 碳排放权.....	12
2.1.2 碳排放配额.....	12
2.1.3 碳金融.....	13
2.1.4 碳期权.....	14
2.2 理论基础.....	15
2.2.1 外部性理论.....	15
2.2.2 现代产权理论.....	16
2.2.3 分形市场假说.....	17

2.2.4 期权定价理论.....	17
3 我国碳期权产品开发需求分析.....	19
3.1 需求背景分析.....	19
3.1.1 国际碳市场发展现状.....	19
3.1.2 国内碳市场发展现状.....	21
3.1.3 国内外碳市场发展对比.....	24
3.2 开发优势分析.....	26
3.2.1 政策支持分析.....	26
3.2.2 技术经验分析.....	27
4 碳期权产品设计与定价.....	30
4.1 碳期权产品合约设计.....	30
4.1.1 产品简介与定位.....	30
4.1.2 碳期权产品标的选择.....	30
4.1.3 碳期权产品合约要素设计.....	32
4.2 碳期权产品定价设计.....	35
4.2.1 碳期权合约价格影响因素分析.....	35
4.2.2 GARCH—分形布朗运动期权定价模型.....	36
5 实证分析.....	38
5.1 数据选取及分析.....	38
5.1.1 序列平稳性检验.....	39
5.1.2 一般描述性统计分析.....	39
5.1.3 我国碳交易市场的分形特征分析.....	40
5.2 波动率参数估计.....	41
5.2.1 自相关检验.....	42
5.2.2 均值模型构建.....	42
5.2.3 ARCH 效应检验.....	43
5.2.4 GARCH 模型估计波动率.....	44

5.2.5 波动率预测.....	45
5.3 碳期权模拟定价.....	46
5.4 结果分析.....	47
5.4.1 CEA 期权实证结果分析.....	47
5.4.2 不同试点实证结果比较.....	50
6 结论与建议	52
6.1 研究结论.....	52
6.2 建议措施.....	53
6.2.1 进一步完善我国碳市场制度体系.....	53
6.2.2 拓宽参与主体，丰富产品形态.....	53
6.2.3 健全法律法规，保障可持续发展.....	54
6.2.4 加强平台培育建设，推进国际化进程.....	54
6.3 前景展望.....	54
6.3.1 推广前景.....	54
6.3.2 应用前景.....	55
参考文献	57
后 记	62

1 绪 论

1.1 研究背景和意义

1.1.1 研究背景

2020年9月22日，中国国家主席习近平在第75届联合国大会上宣布了“30·60目标”，即在2030年前碳排放量达到峰值，2060年前实现碳中和。近年来，国际形势发生了重大变化，俄乌军事冲突导致全球能源和粮食价格急剧波动，许多欧盟国家因为俄罗斯天然气供应减少推迟了煤炭退出计划或重新启动燃煤发电，大大减缓了全球碳中和的步伐。在此情况下，党的二十大报告仍然强调要积极稳妥地推进碳达峰和碳中和，表明了中国在应对气候变化问题上的坚定立场，彰显了作为大国的担当。2022年12月，中央经济工作会议指出，在实现双碳目标的过程中，要锻造新的产业竞争优势，建立配套的激励机制，大力发展绿色金融，加快健全全国碳排放权交易市场，形成“科技-产业-金融”良性循环。2024年1月5日，我国出台了首部应对气候变化领域的专门法规《碳排放权交易管理暂行条例》，为碳排放权市场交易制度提供了法律指导，对于双碳目标的实现具有重要意义。

金融是国民经济的血脉，在促进实体经济转型升级中起到了重要作用，其中，碳排放权交易已经被检验是最有效的市场减排制度。我国从2013年便逐步开启了碳市场试点，2021年全国碳排放权市场交易开市，全国统一碳市场建立的同时一跃成为全球最大的碳交易市场。同年11月，在联合国气候变化框架公约缔约方大会第二十六次会议（COP26）上，《巴黎协定》第6条获得了初步通过。为了应对气候挑战，第6条促进国际之间进行合作，并为发展中国家提供资金支持，该条款允许各国利用多种工具来实现减排目标，即国家自主贡献（NDCs）；条款6.2允许各国通过双边或多边协议相互交易国际转让减缓成果（ITMOs）；条款6.4为可持续发展机制（SDM），提出建立一个由联合国专门机构监管的国际碳减排信用交易市场；条款6.8为各国提供合作机会，以在不依赖碳市场的情

况下实现其 NDC。而一旦第 6.4 条中的全球碳市场建立，碳资产有望取代石油全球最大的大宗商品交易的地位，在 2023 年年底最新召开的 COP28 会议上，各国首次达成了“转型脱离化石燃料”的共识，更是加强了这一看法。随着全球碳市场建设方兴未艾，健全自身的碳交易体系无异于可以帮助我国在国际碳市场上掌握更大的话语权。在欧盟碳排放交易体系中，碳市场交易的 95%以上来自于碳金融衍生品，可见其扮演的重要角色，然而目前我国碳市场仍以碳配额现货交易为主，未能充分发挥其潜力。

2021 年 11 月 5 日，工信部等四部门联合发布指导意见，支持广州期货交易所建设碳期货交易市场，着手我国碳衍生交易体系的建设。碳期权作为碳衍生交易工具的重要组成部分，相较于碳期货等其他衍生品，是一种非对称合约，其多头具有在未来某一特定时间以约定价格购买（看涨期权）或出售（看跌期权）一定数量的碳标的资产的“选择权”，可以在锁定亏损风险的同时保有资产价格波动带来的收益。这种灵活性使得碳期权可以为投资者提供更加丰富的组合方案，进行套期保值和风险管理，具有广阔的应用前景，同时碳期权的推出也有助于活跃市场交易，强化价格发现功能，因此本文选择碳期权作为研究对象。考虑到目前广州期货交易所尚未推出碳期货和碳期权产品，在深入研究我国碳市场的发展状况后，本文借鉴国际 EUA 期权并参考前人研究经验，设计了基于我国实情的碳期权产品并进行了定价研究，为我国碳期权的推行进一步探索了方向。

1.1.2 研究意义

1. 理论意义

本文以碳期权为研究对象，通过对比国内外碳市场的发展现状，分析了我国碳期权产品的开发需求以及所具备的开发优势。由于我国尚未推行碳期货产品，本文选择以碳配额作为碳期权的标的资产，并分析了其可行性，进而借鉴 EUA 期权设计了我国的碳期权产品合约。同时，鉴于我国碳市场普遍具有分形特征，适用于分形布朗运动期权定价模型，故结合 GARCH 模型估计波动率进行实证研究，并与 B-S 模型以及具备不同分形特征的碳试点市场予以对比分析，为我国碳期权的现实开发进一步提供了理论支持和策略参考，以期促进我国碳衍生交易市

场的建设和发展。

2. 实际意义

碳期权作为一种关键的碳衍生交易工具，其产品推出具有重要意义，主要体现在如下：

首先，提供风险管理工具。碳期权的推出可以为投资者提供灵活的碳资产风险管理工具，使控排企业可以更好地控制排放成本，优化管理决策，同时有助于平抑现货价格波动，降低市场风险。

其次，吸引市场参与主体。碳期权的推出丰富了投资者的交易策略和投资选择，有利于吸引更多的市场参与主体，同时，保证金的杠杆效应可以降低资金的占用成本，标准化交易也有助于进一步提高市场流动性，从而提升碳市场的运行效率。

再次，促进碳市场的建设发展。碳期权的推出可以进一步活化石交易市场，提升我国碳市场的深度和广度，且具有较强的价格发现功能，可以更好地发挥市场调节机制，健全我国的多层次碳金融市场体系，推动绿色低碳发展，早日达成双碳目标。

最后，提升我国碳市场的国际影响力。碳期权的推出可以进一步接轨国际碳市场，从而有助于推动广州期货交易所发展成为新兴的国际碳市场定价中心之一，缓解信息不对称，提高我国在国际碳市场上的定价自主权。

1.2 国内外文献综述

1.2.1 关于碳金融市场的研究

在全球变暖日益严峻的背景下，碳排放交易作为应对气候变化的重要手段，备受关注。唐跃军等（2010）认为，发展碳金融可以通过明晰碳排放权，将传统经济增长模式所带来的负面影响内生化，更好地衡量环境资本，从而促进经济可持续发展，雷鹏飞等（2019）也提出了类似观点。

在碳排放权交易对经济的影响方面，宋晓玲等（2018）的研究表明，碳交易可以显著促进产业结构变动，优化地区经济结构。卢治达（2020）同样得出，碳

市场的发展可以显著促进资源型产业的低碳化转型。齐绍洲等(2019)研究发现,碳交易在完成减排目标的同时也发挥着融资功能,促进了可再生能源的技术创新。

而碳衍生市场的发展也对于促进减排具有重要意义。王军锋等(2014)研究表明随着市场的完善,碳期货已经初步具备了价格发现的功能。Yi-rong YING 等(2017)指出,碳期权可以有效控制碳价波动的风险。Valerie M. Thomas 等(2016)的研究表明,碳期权可以更加灵便地进行风险管理,更多地通过平抑现货价格水平及其波动性来促进减排。朱丽(2021)发现,碳期货可以从提供风险管理工具、价格发现、优化资源配置、拓宽市场广度和深度等多个方面促进减排。Liu Yue 等(2022)认为碳期权的估值可以用于进行碳资产管理。张晨等(2017)研究了 EUA 现货、期货和期权三个碳市场的溢出效应,发现三市场的价格之间呈高度正相关,并且期权市场是主要的信息溢出方,其碳价波动更快地反映了市场信息变化,在信息流动与风险传递的过程中起主导作用。

关于我国碳金融市场的发展方面,陈星星(2022)研究表示经过十多年的发展,我国碳排放权交易试点在推进碳排放总量和强度双降、社会低碳转型、产业结构调整等方面均取得了显著成效。然而,与国际相比,我国碳交易市场体系仍亟待完善。王超等(2021)的研究表明,相比欧盟碳排放交易体系,我国碳交易市场联动性和稳定性均存在短板。吕靖焯等(2019)对湖北碳排放权交易市场的研究发现其尚未达到弱式有效市场的条件。而林汝星(2022)根据广东碳排放试点数据,设计了碳期权合约,并计算了期权的波动率,发现碳期权的价格信号可以有效预测碳价。

因此,加强碳金融市场的监管和建设,优化碳排放权定价机制,加快碳衍生市场的建设,将有助于推动我国碳金融市场的健康发展。

1.2.2 关于期权定价模型的研究

碳期权的定价研究建立在期权定价理论的发展基础上。期权定价的研究起源于 Bachelier L (1900),他假设股票价格变动服从无漂移项的标准布朗运动,且方差不变,首次使用布朗运动来描述资产价格的变动,并列出了到期日看涨期权预期价格的表达式。在有效市场假说的基础上,Black 和 Scholes (1973)假设金

融资产价格服从几何布朗运动,利用无套利原理和伊藤引理推导出了期权定价模型,并得到了著名的 B-S 公式,为期权定价模型的研究奠定了理论基础,此后几乎所有的期权定价模型都是在此之上进行拓展。

由于 B-S 模型的许多假设与现实情况不符,不断有学者对其扩展改进。Peters (1989)提出了分形市场理论,相比有效市场假说更能解释金融市场的实际情况。随后,学者们开始尝试在研究期权定价的过程中,采用具有分形特征的随机过程来描述金融资产价格的变化。Hu 和 Øksendal (2003)将分形布朗运动应用于金融期权定价研究,提出了分形布朗运动期权定价法。进一步地,Neuila (2008)运用风险中性测度下的鞅方法,研究表明分形布朗运动模型产生的套利机会可以用 Wick-Itô 积分有效消除。此后,各种分形布朗运动模型被广泛应用于期权的定价研究。例如秦学志等 (2019)便在分形 B-S 模型的基础上结合模糊集理论和随机分析,构建了不确定条件下具有长记忆市场特征的欧式期权定价模型。

同时,学者们采用了各种随机模型对金融资产价格的波动率进行建模,从而准确刻画其时变动态性。随机波动率模型可以主要归纳为以下三种:隐含波动率 (IV) 模型、已实现波动率 (RV) 模型和历史波动率 (HV) 模型。Heston 和 Nandi (2000)首次利用 GARCH 模型来刻画金融资产价格的方差,获得了类似 B-S 模型的闭式解,此后,各种 GARCH 族模型被广泛用于金融衍生产品定价研究。张波等 (2017)的研究结果显示,研究选用高频交易数据时,RV 模型对波动率的建模效果更佳;而选用日收盘价格数据,并且数据跨度较大时,HV 模型的波动率建模效果更为优秀。

1.2.3 关于碳期权设计与定价的研究

国外碳期权市场发展的起步较早。Chevallier 等 (2009)研究了欧盟碳排放交易体系自 2006 年发布碳排放指标后欧洲气候交易所中碳期货和期权市场的发展动态。我国目前还没有碳期权产品,因此部分学者结合国外碳期权经验,就我国的碳期权进行了合约和定价的设计研究。王婧等 (2010)分析了低碳经济范式下可行的金融创新,对碳排放交易期权模式进行了论述。赵静等 (2019)以中碳指数为标的资产,设计了我国的碳指数期权合约。林汝星 (2022)根据广东碳试

点的数 据，设计 了基于配 额的碳期 权合约， 并通过结 合历史波 动率的 B-S 期权定 价模型对 碳期权价 格进行了 研究。李 竹薇等 (2022) 同样也选 取广东碳 排放配额 作为标的 资产进行 了碳期权 合约设计， 并通过结 合 GARCH 模型的 B-S 期权定 价模型计 算了碳期 权的理论 价格。王 春霞等 (2023) 以湖北碳 市场的碳 配额为标 的资产， 使用了结 合 GARCH 模型的分 形布朗运 动期权定 价模型进 行定价研 究，完成 了我国碳 期权产品 的设计。

相较于碳期权的产品设计，研究碳期权产品定价的学者更多，包括理论研究和实证研究。其中，在实证研究中，使用 B-S 模型进行研究的学者最多，分形布朗运动期权定价模型其次。

Daskalakis 等 (2009) 以欧盟 ETS 中的三个碳交易市场为对象，研究了碳期权期内和跨期的定价。Carmona 等 (2011) 使用备抵期货价格的简化风险中性模型来研究碳期货期权的定价。Brauneis 等 (2013) 以完全竞争市场为前提，通过实物期权模型，发现碳期权价格可以显著促进低碳技术的投资。Svetlana 等 (2014) 的研究表明，碳期权的隐含波动率在用于预测时是有偏的。Fang Mingyu 等 (2024) 以欧盟的碳配额期货期权为研究对象，发现在公开交易阶段，即配额可以延期储存的情况下，碳期权价格呈现出与股票市场相似的波动率微笑。何婧钰 (2023) 比较了不同实物期权定价模型并探讨了在碳期权实际定价中的适用程度。余一卿等 (2017) 通过影子价格法改进了二叉树模型，并以电力行业为例，计算了碳排放权期权的理论价值。刘悦等 (2019) 使用马氏链来模拟外部机制，通过机制转换模型来研究碳排放权期权的定价。于倩雯等 (2020) 引入了 Choquet 期望积分以及 λ -可加模糊测度来刻画投资人行为选择的不确定性，提出基于市场不确定性条件下的碳期权定价方法。钱谊 (2023) 使用跳-扩散过程来模拟碳排放量过程，间接分析了碳排放量与碳配额价格过程的关系，并利用风险中性理论计算了以碳期货为标的碳期权定价公式。Liu Hanjie 等 (2024) 使用 Caputo - Hadamard 不确定分数阶微分方程来刻画碳价的变化过程，基于二叉树方法给出了欧式的碳期权的定价公式，并说明了美式碳期权的计算方法，同时通过矩估计方法确定了方程中的参数并模拟了中国碳市场碳价的观测数据，从而应用定价模型计算碳期权的价格。Zhai Dongsheng 等 (2024) 将实物期权理论、量子计算、蒙特卡罗模

拟和随机波动率模型相结合,设计了风险不确定下碳排放权期权定价的量子蒙特卡罗模拟方法,相较于传统定价方法,该算法无需确定参数,降低了结果的主观性,并通过北京绿色交易所的数据进行了实证分析,研究发现其中有两种量子算法的模拟效果较好,并将其运用于企业的碳资产管理。

在实证研究中,运用最广泛的为 B-S 期权定价模型。Chevallier 等(2009)通过对欧盟碳市场进行实证检验,发现引入期权能够有效降低现货市场的波动水平。何梦舒(2011)研究了符合我国国情的碳排放配额分配方案,并用 B-S 模型表示了碳期权的理论价格公式。朱跃钊等(2013)对比了不同碳期权定价模型,最后选择 B-S 定价模型对碳期权进行定价。赵小攀等(2016)考虑到了交易成本,对 B-S 模型加以改进得出含交易成本的欧式碳期权公式。为了克服 B-S 模型中固定波动率的局限,一些学者通过代入 GARCH 模型估算出的波动率来进行研究。徐静等(2015)使用了结合 GARCH 模型的 B-S 期权定价方法来研究 EUA 期权,Liu Zhibin 等(2019)也使用了相同的方法,预测了未来 20 天 EUA 期权的价格,模型精度较高。祝叶等(2024)则以湖北碳市场的碳配额为样本,使用了结合 GARCH 模型的 B-S 期权定价模型对碳期权进行了估值研究。

然而许多学者通过实证研究,发现使用分形布朗运动期权定价模型进行预测的结果与碳期权的实际价格更吻合。张晨等(2015)采用结合 GARCH 模型的分形布朗运动定价法,通过蒙特卡罗模拟计算了 EUA 期货期权的价格,实证结果表明该方法相比于 B-S 模型,具有更高的预测精度。Liu Zhibin 等(2021)用同一方法对欧洲能源交易所的 EUA 期权日收盘价进行了研究,其结果表明,预测价格与实际价格波动完美拟合。这些研究进一步支持了分形布朗运动期权定价方法在碳市场中的应用前景。

1.2.4 文献评述

综合国内外相关文献,可以看到学者们在碳期权的相关领域已经进行了大量研究,可供本文进行参考借鉴。总体而言,国内外对于碳期权的研究相对较少,大多文献更侧重于研究碳排放权现货交易市场,而对碳金融衍生品的研究主要集中在碳期货方面,研究我国碳期权产品设计的学者有限,定价研究也大多基于国

外成熟的 EUA 期货期权产品。考虑到我国正积极推进碳衍生市场的建设，同时为方便进行实证研究，本文参考已有文献，选用碳配额作为标的资产进行我国的碳期权设计。在碳期权的定价研究方面，本文考虑到我国碳市场具有分形特征，故采用 GARCH 模型修正的分形布朗运动期权定价模型来进行研究，计算我国碳期权的初始合理价格，是对现有文献的补充与完善。

1.3 研究内容、研究方法与技术路线

1.3.1 研究内容

第一章，绪论。本章主要介绍了研究的背景和意义，同时，对国内外相关文献的研究进行了梳理和综述，明确了本文的研究内容、研究方法和技术路线，并对创新点和不足之处进行了说明。

第二章，概念界定与理论基础。本章界定了相关的基础概念，包括碳排放权、碳排放配额、碳金融和碳期权，并简要介绍了外部性理论、现代产权理论、分形市场理论和期权定价理论等理论基础，为后续研究提供理论支持。

第三章，我国碳期权产品开发需求分析。首先本文对比了国内外碳交易市场的发展现状，从而阐述了我国碳期权产品开发的需求背景。其次从政策支持和技术经验两个方面分析了我国开发碳期权的优势。

第四章，碳期权产品设计与定价。在产品的设计方面，涵盖了碳期权产品的合约设计，包括产品简介与定位、标的物选择和合约要素设计。在定价设计方面，介绍了影响碳期权合约定价的因素，并提出了 GARCH-分形布朗运动期权定价模型。

第五章，实证分析。本文选取了 2021.7.16-2023.4.10 日的数据对我国碳市场进行了初步分析，通过序列平稳性检验、均值模型构建、ARCH 效应检验和 GARCH 模型估计波动率等步骤，最终对碳期权合约的初始价格进行了计算，并通过比较不同模型和不同试点的碳期权价格进行了结果分析。

第六章，结论与建议。本章梳理总结了前文研究的主要结论，并结合实际情况给出相关的建议措施。同时，展望了碳期权未来的推广前景和应用前景。

1.3.2 研究方法

1. 文献研究法

本文梳理了国内外关于碳期权设计和定价的相关文献。通过对相关文献进行总结归纳，本文选取了更加符合我国碳市场的分形布朗运动期权定价模型，为后续指标构建与实证分析奠定基础。

2. 实证分析法

在进行碳期权的定价研究时，本文选取了全国碳排放权交易市场及其他四个碳试点的碳配额价格日度数据，通过构建 GARCH 模型，得出了碳配额价格波动率参数，从而代入分形布朗运动期权定价模型，计算得出碳期权的初始价格。

3. 比较分析法

第三，比较分析法。本文深入地比较分析了国内外碳市场的发展差距，提出了要加快推出碳期权产品。并通过不同期权定价模型和不同碳试点的对比，进行了碳期权的定价研究。

1.3.3 技术路线

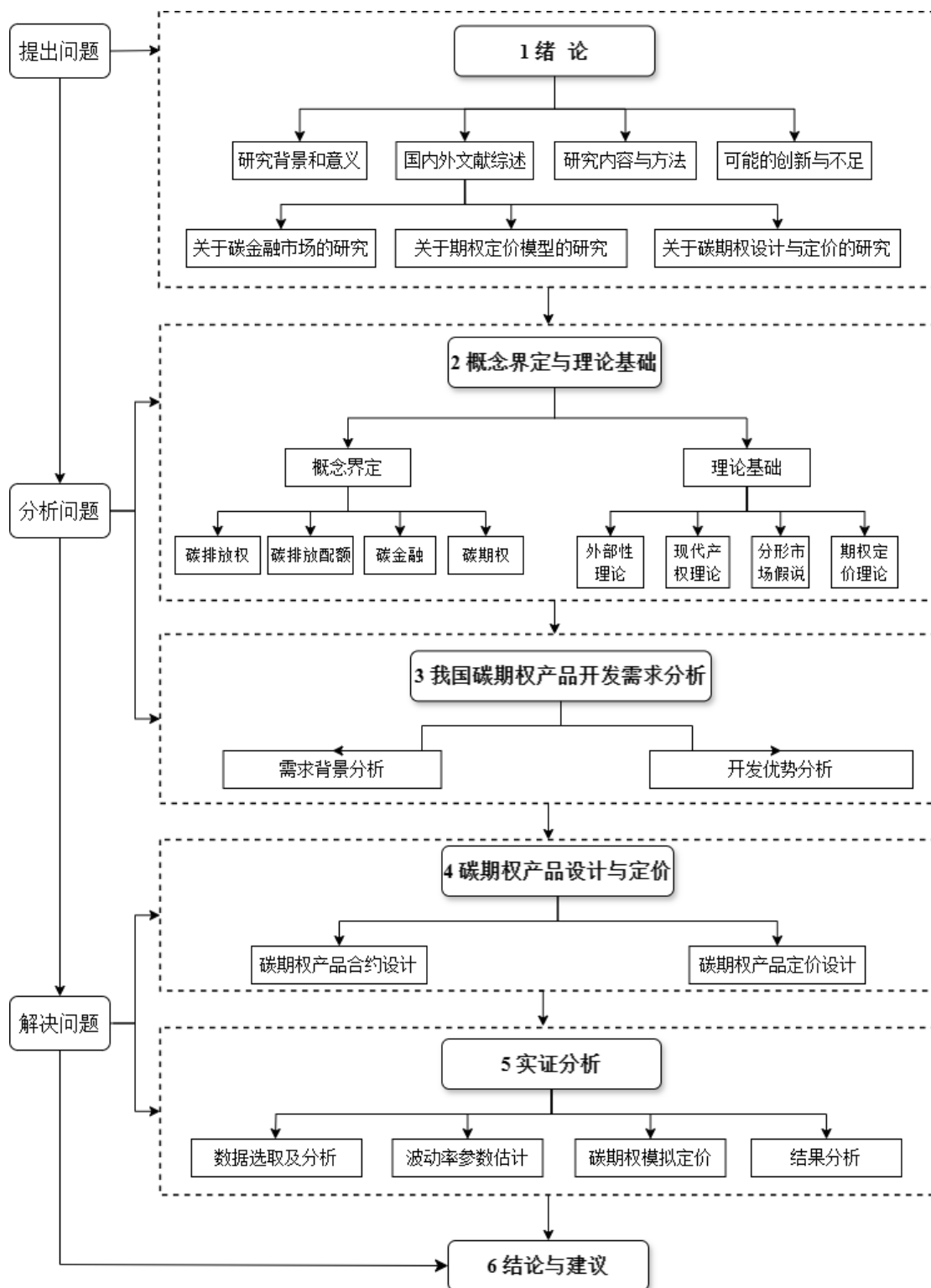


图 1.1 技术路线图

1.4 可能的创新与不足

1.4.1 可能的创新

第一，研究视角创新。当前学界对于碳金融的研究焦点为碳排放权交易市场，而关于我国碳期权产品设计与定价的研究相对匮乏，本文在此基础上进一步拓宽了研究视角。在既有文献中，学者们大多仅以单个碳市场为研究对象，而本文考虑到我国各碳市场间发展差距较大且均具有分形特征，拓展了定价实证的研究范围，加入了广东、湖北、上海、福建几个较为活跃的碳试点市场作为横向对比，更加直观地探讨具有不同分形特征的碳期权市场中不同定价模型的表现差距，进一步丰富了相关文献。

第二，研究方法创新。在我国碳期权的定价研究中，现有文献大多以 B-S 期权定价模型为主。考虑到我国碳金融市场发展尚处于起步阶段，本文进行了 Hurst 检验，发现我国的碳市场普遍具有较为突出的分形特征，市场有效程度不足，与 B-S 模型的假设条件相悖。结合针对欧盟 EUA 期权市场的文献研究，本文尝试引入分形布朗运动期权定价模型，从而更加符合我国碳市场的现实状况，是对现有文献的补充与完善。

1.4.2 不足之处

截至目前，全国碳排放权交易市场刚刚进入第二个履约周期，我国碳市场短时间内仍将以现货市场为主，同时逐步纳入更多的控排企业，这在一定程度上会影响碳衍生市场的建设与发展，碳期权产品的具体设计与落地仍需综合考量多方面的因素，与国家政策相契合。

同时，虽然文中计算出的碳期权理论价格走势与现货市场拟合良好，但由于我国碳期权尚未上市推行，没有经过碳期权市场的实际验证，无法检验期权定价模型的精度。此外，现实中无风险利率并非恒定，用国债利率等代替时存在一定误差，并且现实中碳期权市场存在交易费用，碳配额价格波动率的测算方法也具有改进空间。后续研究可以适当考虑加入上述因素，使定价模型更加精确。

2 概念界定与理论基础

2.1 概念界定

2.1.1 碳排放权

碳排放权的概念起源于“排污权”，在国际通行的定义中，主要指企业依法获得的向大气排放温室气体的权利。为应对气候挑战，1997年《京都议定书》提出了以三种补充性的市场机制来帮助实现减排目标，使得温室气体排放许可权成为一种可以交易的无形商品，而由于温室气体的主要成分为二氧化碳，这种权利也被统一称作碳排放权。碳排放权通过增加企业排放温室气体的成本，从而促使企业减少碳排放量，倒逼企业进行绿色转型。

在我国碳交易市场上，碳排放权目前主要有两种存在形式：一是碳排放配额（CEA），即政府以免费或有偿分配的方式授予企业的碳排放额度。二是国家核证自愿减排量（CCER），是指根据我国国家发改委的规定进行注册备案的温室气体自愿减排量。CCER与CEA的换算比例为1:1，根据《碳排放权交易管理办法（试行）》的相关规定，CCER可以用于抵消不超过5%应清缴的碳排放配额。

2.1.2 碳排放配额

碳排放配额，简称碳配额，是指为实现可持续发展，政府或国际组织授予企业的在一定时间内（通常为一年）可以获得的碳排放权额度，其单位为吨二氧化碳当量（CO₂e）。政府可以通过控制碳排放配额的总量来实现对温室气体排放的管理和控制，达成国家减排目标，企业则可以根据自身需求在碳排放权交易市场上灵活买卖碳排放配额。

我国的碳配额总量按照“先核定后分配”的方式进行设定，首先各省级生态环境主管部门将按照国家相应政策文件核算汇总本地企业预分配配额量，同时报送至全国碳排放权注册登记系统管理机构及生态环境部，随后由其进行核定并依

据核查排放量的一定比例确定全国和各省碳排放配额总量，最终由各省级生态环境主管部门将碳排放配额下发至纳入碳排放权交易的企业单位。

碳排放配额主要通过政府免费发放或有偿出售的方式进行分配，常见分配方案及对比如表 2.1 所示。我国目前主要仍以免费分配为主，有偿分配占比较低。

表 2.1 碳排放配额分配方式及方案对比

类型	方法	简介
免费分配 优点：政策过渡效果更好，对经济负面影响较小，企业接受意愿更高，更容易推行。 缺点：容易产生寻租问题。	基准线法	又称标杆法，根据整个行业的碳排放强度作为基准进行配额分配。将行业内生产相同产品的所产生的碳排放量进行排序，根据产量、行业、减排系数、产业政策等综合因素，选取排放量较少的前 x% 企业单位产量的碳排放量作为行业基准线计算配额数量。 优点：为行业树立了统一标准，相对公平，激励减排企业。 缺点：计算方法复杂，对数据要求较高，审核成本大，适用于产品类别较少的行业。
	历史总量法	也称祖父法，不考虑产品产量，仅以企业过去 3-5 年内的年平均碳排放量数据为基准分配其下一年度可获得的配额数量。 优点：计算方法简单，对数据要求较低。 缺点：较不公平，并未考虑企业的减排行为，变相奖励了历史排放量较高的企业，同时未考虑到新公司无历史数据的情形。
	历史强度法	同样以企业历史碳排放量数据为基础，通过乘以调整系数来进行配额分配。进一步考虑了企业产品产量，企业减排行为、行业增长趋势等多项因素，碳配额额度逐年降低。 优点：公平程度介于历史总量法与行业基准法之间，计算方法相对简单，适用于产品类型丰富的行业。 缺点：对新公司的考虑不足。
有偿分配 优点：避免寻租行为，提高分配效率，促进企业减排，提高政府收入。缺点：不容易被企业接受。	拍卖法	政府通过公开或密封竞价的方式组织碳配额拍卖，价高者得。
	固定价格法	政府通过考虑综合因素制定配额价格，企业以固定价格进行购买。

2.1.3 碳金融

碳金融是指与碳排放和减排相关的金融活动与制度安排，旨在应对气候变化

和减少温室气体排放，同时为投资者提供投资机会。碳金融的定义分为广义和狭义。广义上的碳金融主要形式可以分为：碳排放权及其衍生金融产品的交易与投资、碳金融相关的咨询与服务、低碳技术和项目开发的投融资以及发行有关减排项目或基于碳市场的碳基金和碳证券等，随着对碳减排的需求不断增加，碳金融领域也在不断发展壮大。而狭义上的碳金融主要指有关碳金融产品的交易活动。

在国际碳金融市场上，碳金融产品主要有三种类别，包括交易工具、融资工具和支持工具，具体如表 2.2 所示。

表 2.2 国际碳金融主要产品汇总

产品种类	产品名称	产品介绍
现货交易工具	碳配额	政府或国际组织授予企业的碳排放额度
	航空碳配额	专为航空业发放的碳配额，如欧盟航空碳配额 EUAA
	CER	清洁发展机制（CDM）下的核证减排量
	ERU	联合实施机制（JI）下的减排量
衍生交易工具	碳远期	以碳现货产品为标的的远期合约
	碳期货	以碳现货产品为标的的期货合约
	碳期权	以碳相关资产为标的的期权合约
	碳掉期	又称碳互换，主要指根据事先约定的价格和数量，在未来的某一时间互相交换碳配额与核证减排量。
融资工具	碳基金	政府、金融机构、企业或个人为投资减排项目或碳交易市场而设立的基金
	碳债券	政府或企业为筹集低碳项目资金向投资者发行的，承诺到期偿还本金并支付利息的信用凭证
	碳质押/抵押	以碳配额或项目减排量等碳资产作为担保进行融资
	碳回购	指为实现短期融资，配额持有者卖出碳配额的同时约定在一定期限内以某一价格重新回购其所售配额
	碳信托	指为实现保值增值，将碳配额等碳资产委托给信托公司或专业碳资产管理机构进行投机交易管理
支持工具	碳指数	金融机构开发的可以反映碳市场价格和交易信息的指数工具，同时也可作为标的物开发碳指数交易产品
	碳保险	为规避减排项目开发过程中的风险，为项目减排量的买卖双方提供的保险服务

2.1.4 碳期权

碳期权是一种基于碳资产的金融衍生品，碳期权买方可以通过向卖方支付期权费来获得在未来某一时间内以特定价格购买或出售一定数量的碳标的的资产的

权利，一旦买方决定行权，卖方具有向买方履行出售或购买标的资产的义务。碳期权可以根据买方标的资产的买卖方向划分为看涨期权和看跌期权。看涨期权的买方预期碳标的资产的价格未来将上涨，因此提前锁定购买价格；而看跌期权恰恰相反，买方预计未来价格下跌，提前锁定出售价格。从而对冲碳价波动风险或获取投机收益。根据行权时间不同，碳期权还可划分为欧式期权和美式期权。欧式期权仅能在碳期权到期日的当天行使权力，而美式期权可以在到期日或之前的任一交易日进行行权，具有更大的灵活度。

碳期权的主要功能为风险管理与价格发现。类似于其他金融期权，碳期权的交易具有灵活性和杠杆效应，投资者可以自由选择组合方案进行套期保值、规避风险以及投机获利，极大地丰富了碳市场参与者的投资策略。

2.2 理论基础

2.2.1 外部性理论

外部性是经济学中的一个重要概念，又称外部效应，最早由新古典主义经济学的马歇尔提出，指的是经济主体的经济行为对他人或社会产生了有利或负面影响，但却没有为此得到补偿或支付代价，根据作用的方向不同，可以将其分为正外部性和负外部性，也可以用外部经济和外部不经济来进行表述。外部性的存在导致市场价格不能完全反映产品或服务的真实社会成本或价值，从而导致资源配置不够有效。

在全球气候变暖的背景下，企业减少温室气体排放的行为具有正外部性，一旦有企业采取了减排措施，除了企业自身之外，整个社会也会因此受益；而企业排放温室气体的行为具有负外部性，其经济效益只隶属于企业自身，却增加了社会治理温室效应的成本。在现实社会中，大多数减排技术的实施成本较为高昂，通常情况下，企业进行减排项目的私人收益小于私人成本小于社会收益，而企业维持较高排放方案的社会成本大于私人收益大于私人成本。那么“理性人”将无法避免地产生“搭便车”心理，即自身不进行技术改造，维持现有高排放量，而寄希望于免费享受他人的减排成果，从而导致市场失灵，高碳排放企业泛滥而减

排项目开发无人问津。

为了纠正外部性引发的市场失灵，往往需要政府通过管制和补贴等方式进行干预，此外还可以通过企业合并、明晰产权和征税使得外部效应内部化，从而提高市场效率。对应到现实中的碳排放管理，即为明晰碳排放权、征收碳税、管制高排放企业和补贴低碳企业等，其中明晰碳排放权为目前最有效、应用最广的市场手段。

2.2.2 现代产权理论

对于上述由于外部性的存在导致市场失灵的问题，现代产权理论奠基人科斯在 1960 年所发表的《社会成本问题》中展开了论述，他系统地分析了产权的功能作用，并提出了著名的科斯定理，即在没有交易成本或交易成本很小的前提下，只要产权是明确的，那么无论产权的初始分配如何，都能使市场达到最优配置。然而现实经济活动中，往往都存在交易费用，现代产权理论认为通过产权制度安排，可以降低交易成本，内生化外部效应，提高资源的配置效率。

产权的界定是现代产权理论的核心。德姆塞茨认为，产权指自己或他人受益或受损的权利。根据《新帕尔格雷夫经济学大辞典》中的定义，产权是指“通过社会强制实现的对某种经济物品的多种用途进行选择的权利”。《京都议定书》通过对温室气体排放予以限制，对碳排放权进行了界定，使其成为可交易的产权，在实现碳排放量减排目标的同时，由碳排放权交易市场自发调节，从而达成资源的有效配置。现以同一行业内生产相同产品的 A、B 两家企业为例，受于规模、技术等因素的限制，其中 A 企业的减排成本较低，而 B 企业的减排成本较高。

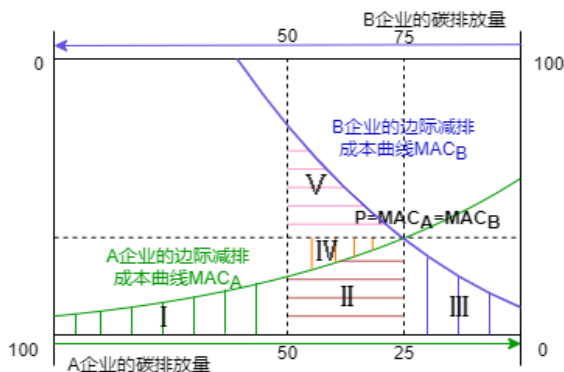


图 2.1 科斯定理应用例子

在未明晰产权的情况下，A、B 两家企业都不会选择减排，假设其正常排放量均为 100 单位。现政府对碳排放权进行了限制，仅赋予每家企业各 50 单位的碳配额，此时，A 企业的减排成本为 I，B 企业的减排成本为 II+III+IV+V，整体履约成本较高。在市场机制的作用下，由于自身减排成本较低，A 企业可以选择继续减少碳排放，将多余的碳配额出售给 B 企业，直到两者边际减排成本相同，达成均衡价格 P。此时，A 企业的实际减排成本为 I-IV，B 企业的实际减排成本为 II+III+IV，从而节约了 IV+V 的履约成本，实现了更高效的资源配置。

2.2.3 分形市场假说

分形市场假说（FMH）建立在有效市场假说（EMH）的基础之上。有效市场假说认为市场价格充分反映了所有可用信息的市场为有效市场，其主要假设条件为：市场为无摩擦市场，信息完全且已被充分披露，每个投资者都是“理性人”及风险厌恶者，能够根据市场信息做出独立有效的投资决策。EMH 描绘的是一种理想市场，与现实金融市场具有较大的差距。1973 年曼德尔布罗提出了分形几何理论，用以研究那些不规则、复杂的，具有自相似结构的几何形态。1994 年，彼得斯引用分形思想对市场进行了重新阐释，系统地提出了分形市场假说。

分形市场假说的基本假设更符合现实金融市场的特征，FMH 认为市场中存在着许多投资者，而不同投资者的投资时间尺度和信息接受程度具有差异，对其投资决策具有重要影响。短期投资者的交易频率更高，侧重于技术分析；长期投资者的交易频率较低，倾向于基本面分析。不同的投资者投资起点和交易频率不同，而足量的投资者也让市场具有充分的市场流动性，形成稳定的具备分形结构的金融市场。分形市场假说可以很好地描绘金融市场的非线性特征，同时，越来越多的学者开始使用分形布朗运动来刻画资产价格变动，从而突破了有效市场假说在实践中的局限性。

2.2.4 期权定价理论

期权作为重要的衍生金融工具，其定价问题一直是学界的研究热点。研究期权定价理论可以为做市商提供理论参考，使投资者能够更好地把握市场状况，提

高其投资效率，降低市场价格波动，同时可以用于其他金融工具以及公司股东权益、债务和项目的估值，辅助企业进行投资决策。

期权定价理论公认的鼻祖是巴舍利耶，他明确了股价、波动率和时间等期权定价模型中最重要的几个因素，使用了公平赌博的思想，即无套利条件的前身，并率先使用具有随机性的布朗运动来刻画股票价格变动。在此之后，斯普里克尔意识到是股票收益率而非股价服从正态分布，加上了正向漂移项，并考虑了利率和风险厌恶，克服了巴舍利耶模型期权价格可能为负的缺陷。博内斯在其基础上进行了贴现，考虑了货币的时间价值，同时认为投资者是风险中性的。萨缪尔森考虑到了期权本身与股票具有不同的风险水平，进一步地改进了模型。1973年，布莱克和斯科尔斯发表了《期权和公司债务的定价》，其最突出的贡献在于利用伊藤引理和无套利原理得到了完美的解析解，消除了模型中的随机变量，最终推导出 Black-Scholes 期权定价微分方程，并给出了期权定价公式。同年，莫顿通过不同路径也独立研究出了同一模型，并对此进行了改进和完善，三人的研究成果也被统称为 B-S-M 模型。B-S-M 模型为资产估值研究提供了一个科学的范式，至此，关于期权定价的研究开始“爆炸”式增长，同时也极大地促进了现实期权交易市场的发展。

近年来，学者们对期权定价理论的研究不断深化，其主要的研究动态如下：一是结合行为经济学的期权定价研究，如考虑投资者情绪等；二是强化数学计量工具的应用，如蒙特卡罗模拟方法、鞅方法等；三是拓宽 B-S 模型的假设条件，研究不完备市场条件下的期权定价，如引入交易费用、随机利率模型、跳扩散随机过程，波动率估计模型等；四是探讨新的解析方法，如分形布朗运动期权定价模型等。由于分形市场假说可以较好地解释现实金融市场状况，使用分形布朗运动期权定价模型也可以得到解析解，越来越多的学者开始以资产价格服从分形布朗运动为基础进行期权定价研究。

3 我国碳期权产品开发需求分析

3.1 需求背景分析

3.1.1 国际碳市场发展现状

随着科技进步和工业发展，人类对化石能源的需求不断增加，导致大量的温室气体排放到大气中，形成温室效应，使得地球表面的平均气温不断上升，极端天气频发，对生态系统造成了重大影响。根据全球气象组织（WMO）的数据，2020 年全球平均气温已经比工业化前上升了 1.2℃。为了应对气候挑战，1992 年，150 多个国家共同制定了《联合国气候变化框架公约》，确立了减排目标，以实现可持续发展。1997 年，在其第三次缔约方大会（COP3）上，149 个国家和地区通过了历史上首个以法律形式限制碳排放的《京都议定书》，规定 2008 年-2012 年为第一个承诺期，2005 年起，发达国家开始承担减排义务，2012 年起，发展中国家也要开始承担减排义务，同时确立了三大灵活合作机制，为碳市场的发展奠定了基础。

表 3.1 《京都议定书》合作减排机制

分类	名称	简称	内容
基于项目的交易机制	联合履约机制	JI	发达国家相互间进行项目合作，项目产生的减排单位可以转让给另一方，减排单位为 ERUs
	清洁发展机制	CDM	发达国家与发展中国家进行项目合作，产生的减排量可用于发达国家的减排承诺，减排单位为核证减排量 CERs
基于配额的交易机制	国际排放权交易	IET	已完成减排目标的发达国家可以将其多余的排放配额出售给另一个未完成减排目标的发达国家

为了达成减排目标，许多国家和地区开始自发建设碳排放权交易体系（ETS），囊括制度设计和管理、碳排放总量设定、碳排放配额分配、排放权交易，监测、报告和验证（MRV）等关键要素。2002 年欧洲能源交易所（EEX）成立，2003 年，芝加哥气候交易所（CCX）成立，并于 2004 年成立了分支机构欧洲气候交

易所^① (ECX)，这些交易所为碳排放权提供了交易平台。2005 年，全球首个碳市场——欧盟碳排放交易体系 (EU ETS) 启动；2007 年，加拿大 ETS 启动；2008 年瑞士和新西兰 ETS 启动……根据国际碳行动伙伴组织 (ICAP) 的统计，截至目前，全球共有 29 个投入运行的碳排放交易体系，此外还有 11 个正在建设的碳市场以及 9 个正在考虑的碳市场，覆盖的温室气体排放量达到了 90 亿吨，占全球总量的 17%。

图 3.1 展示了 2022 年国际主要的碳排放权交易市场的碳配额价格。

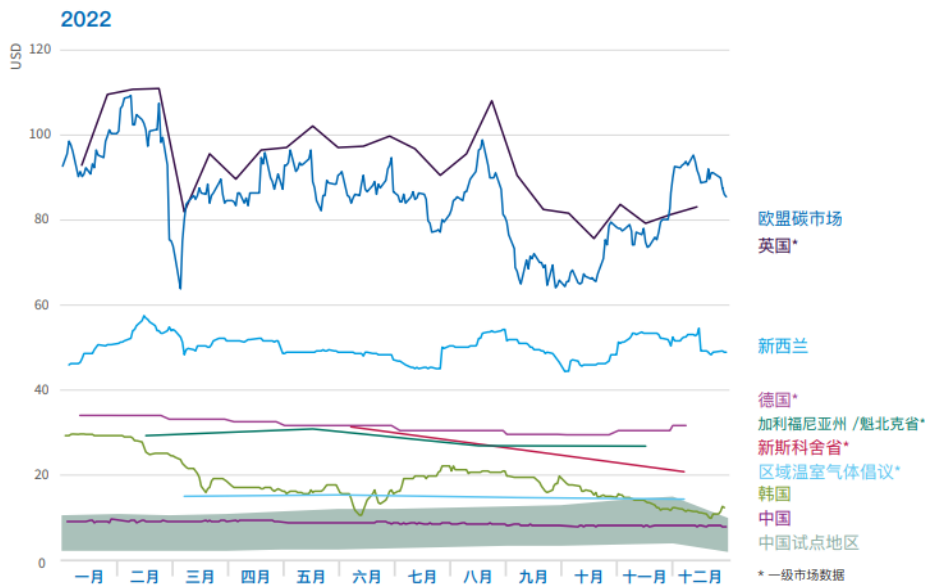


图 3.1 2022 年全球碳市场配额价格动态

数据来源：2023 年 ICAP 年度报告

可以看到，能源危机对全球碳排放权交易体系造成了重大冲击，碳配额价格整体波动较大。2022 年全球碳市场共交易了 125 亿吨碳配额，交易总量较 2021 年减少了 21%，但因为碳价的上涨，全球碳市场的交易总额仍呈增长态势，规模达到了 8650 亿欧元（折合为 6.3 万亿元人民币），增长了 14%。同时，欧盟 ETS 和英国 ETS 的碳配额价格遥遥领先，中国碳配额价格较低，与韩国碳市场和区域温室气体协议 (RGGI) 碳价相近。

欧盟碳排放权交易体系起步最早，发展也最为成熟，2022 年 EU ETS 的交易量占全球碳市场的 74%，交易额占全球碳市场的 87%，具有重要地位，其体系建

^① CCX 和 CEX 于 2010 年被美国洲际交易所 (ICE) 收购。

设为我们提供了宝贵的学习经验。图 3.2 展示了 EU ETS 的四个发展阶段，总体来看是逐步缩减配额总量，扩大控排范围，提高拍卖比例，加强惩处措施。除此以外，在碳现货市场启动的六个月后，欧盟便推出了 EUA 期货和 EUA 期权，吸引了更多的参与主体，极大地提高了市场的流动性和市场效率。



图 3.2 EU ETS 的四个发展阶段

3.1.2 国内碳市场发展现状

我国碳市场的建设大体上经历了三个阶段。

1. 2005 年到 2012 年，主要参与 CDM 项目，在国际市场上进行碳交易。这一阶段，我国未负担减排义务，可以通过发展风电、水电等绿色项目出售核证减排量来获取收益，为 CDM 项目 CERs 的最大供应方。2013 年后，欧盟严格限制 CERs 的抵消条件，市场需求减少，CERs 的价格逐渐降低。

2. 2013 年到 2020 年，我国开始推行区域碳试点和自愿减排交易市场的建设。2012 年我国建设了自身的全国温室气体自愿减排交易市场，进行 CCER 交易。同时，从 2013 年开始，陆续启动了深圳、上海、北京、广东、天津、湖北、重庆七个碳排放权交易试点，2016 年 12 月，福建也启动了碳排放权交易试点。各试点自行确定控排企业范围，制定碳配额总量及分配方式，按年履约清缴，具体如表 3.2 所示。八个碳排放权交易试点总体运行良好，但 CCER 市场由于不够成熟，2017 年项目备案被叫停。

表 3.2 我国碳试点行业范围及配额分配方案

试点地区	行业覆盖范围	配额发放方式
深圳	电力、建筑、供水、制造业、公共交通等 34 个行业	免费分配和小比例拍卖； 历史总量、基准线法
上海	钢铁、石化、电力等 10 个工业行业和航空、港口金融等 8 个非工业行业	免费分配为主、适时拍卖； 历史强度、历史总量和基准线法
北京	火电、热力、水泥、石化、航空及交通运输、服务业和其他工业	免费分配为主、适时拍卖； 历史总量、基准线法
广东	电力、钢铁、水泥、石化、造纸、纺织、民航、数据中心等	免费分配和小比例拍卖； 历史强度、历史总量和基准线法
天津	钢铁、电力热力、化工、石化、油气开采、建材、造纸、航空	免费分配为主、有偿分配为辅； 历史强度、历史总量和基准线法
湖北	电力、热力、钢铁、化工、汽车等 15 个工业行业	免费分配为主、适时拍卖； 历史总量、基准线法
重庆	电力、钢铁、化工、水泥、电解铝、冶金等行业	免费分配； 历史总量、基准线法
福建	电力、石化、有色、化工、建材、钢铁、陶瓷等 9 个行业	免费分配为主、适时拍卖； 历史强度、历史总量和基准线法

资料来源：各碳交易市场官网和报告整理

3. 2021 年至今，全国碳排放权交易市场启动后，实行双轨制，地方碳试点与全国碳市场并行运行，纳入全国碳市场的控排企业不再参与地方交易。2021 年 7 月 16 日，全国碳排放权交易市场正式上线交易，共纳入了 2162 家发电行业的控排企业，覆盖排放量达 45 亿吨CO₂，一跃成为全球规模最大的现货交易市场。2023 年 7 月 16 日，上海环境能源交易所主办了首届全国碳市场模拟交易大赛，取消了行业限制，纳入非履约主体，为进一步完善全国碳市场交易机制积累了参考经验。2024 年 1 月 22 日，全国温室气体自愿减排交易市场正式重新启动。2024 年 2 月 4 日，国务院针对全国碳排放权交易市场发布了我国第一部专门应对气候变化领域的法规《碳排放权交易管理暂行条例》，首次就法律法规层面明确了碳排放权市场交易制度，对市场主体、交易机制、配额制度，违法惩处等方面作出了明确的规定，具有重要的指导意义。同时指出不再建立新的地方试点市场，要尽早逐步将高排放行业纳入全国碳排放权交易市场，建立真正统一的全国碳市场。

经过十余年的发展，我国碳市场的建设取得了长足进步。2023 年全国碳市场的交易量为 2.12 亿吨，交易额达 144.44 亿元，年末收盘价为 79.42 元/吨，与

上一年相比大幅增加。图 3.3 显示了 2023 年我国所有碳市场的碳配额成交均价走势，可以看到各个碳市场间配额价格和市场活跃程度差距较大。

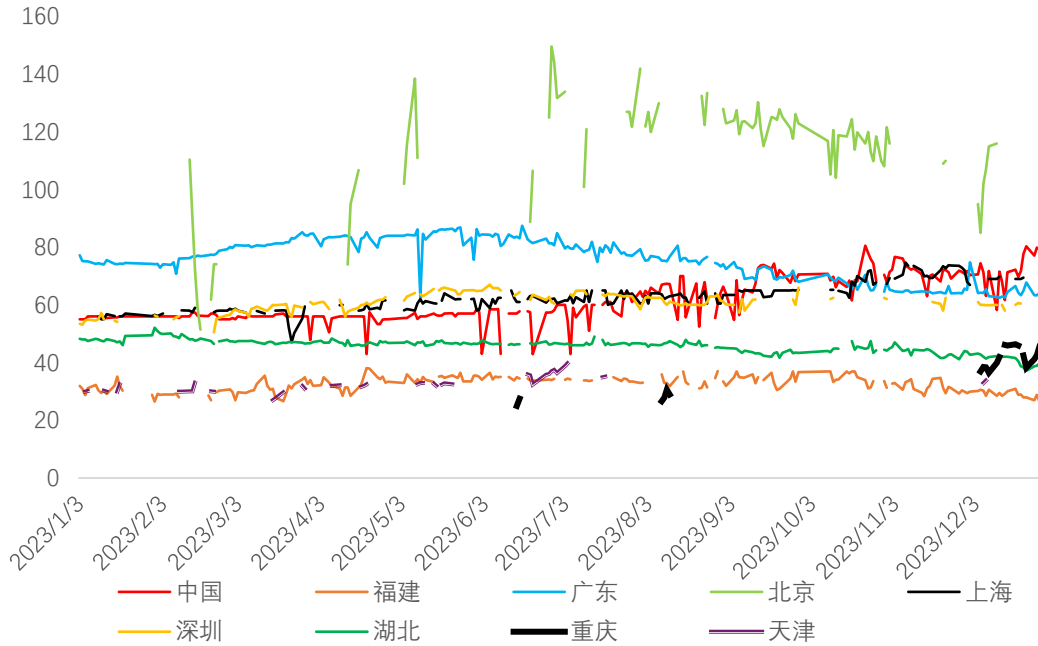


图 3.3 2023 年我国各碳市场每日成交均价

数据来源：国泰安数据库、各碳交易市场官网，由作者整理绘制

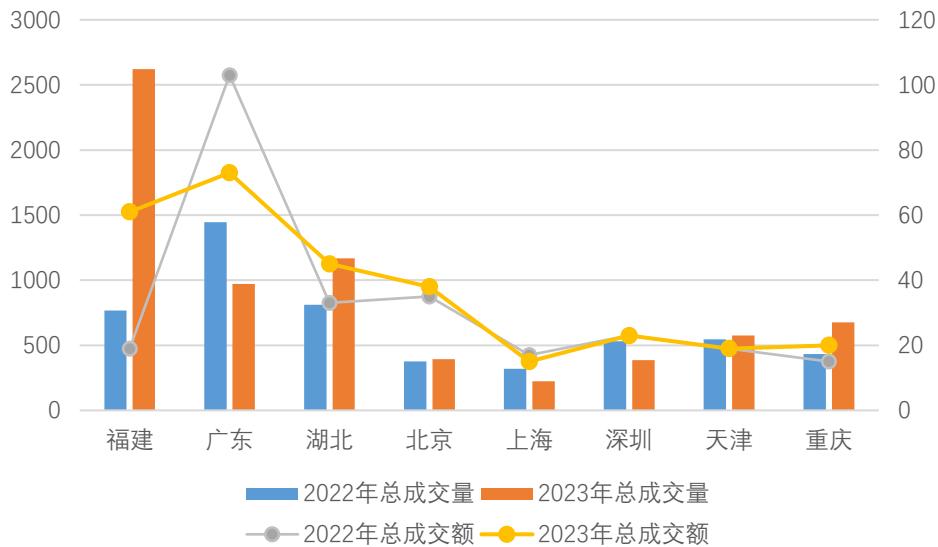


图 3.4 2023 年我国各地方碳市场总成交量与成交额

数据来源：国泰安数据库、各碳交易市场官网，由作者整理绘制

地方碳市场的总成交量和总成交额整体呈上涨态势，但成交价格 and 成交量存在分化现象，整体结构变化较大。2023 年 4 月，福建碳市场将交易手续费比例由 4% 下调至 1.5%；2023 年 5 月，湖北碳市场减免会员 50% 协商议价的交易手

续费；2023年6月，重庆碳试点重新调整了控排企业的纳入标准，控排企业增加到了308家，这些政策都极大地提高了试点市场的交易活跃度。

3.1.3 国内外碳市场发展对比

经过十余年的发展，我国碳金融市场的建设取得了长足进步，在碳现货市场的规模上，中国已经跃居全球第一，但整体来看，仍与国际碳市场具有较大差距。根据路孚特2022年碳市场年度回顾报告中的数据显示，2022年欧洲EUA和航空EUA的总计交易量为9277百万吨，交易额达751459百万欧元，占全球碳排放交易体系总额的87%；北美洲（包括西部气候倡议WCI和RGGI）的交易量为2505百万吨，交易额为62677百万欧元，占全球份额的7%（以上统计的交易量和价值包括现货、拍卖和期货。不包括期权头寸）。而根据我国发布的2022年碳市场报告显示，2022年我国各个碳市场的总交易量为93.46百万吨，总交易额为50.23亿元，可换算作676.69百万欧元^①，占全球比重不足1‰。

市场供求决定着市场价格，市场份额占比小，意味着我国难以在国际合作间乃至巴黎协定6.4全球碳信用市场中拿到定价话语权。针对上述问题，本文结合国际碳市场以及我国碳市场现状，从三个方面展开了分析。

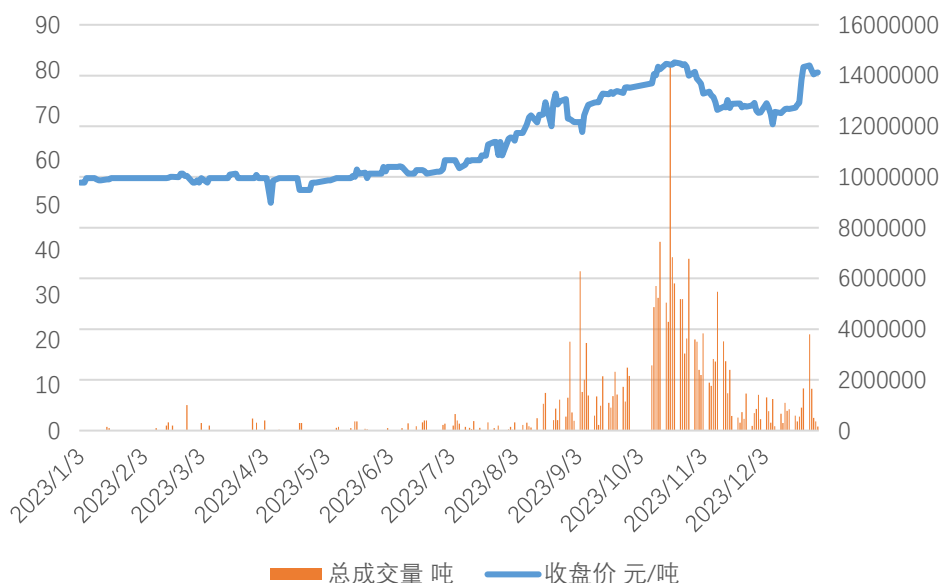
首先，我国碳市场的碳价相对较低，且各市场间价格差距较大。根据国际货币基金组织（IMF）估算，为实现巴黎协定全球变暖不超过2℃的目标，到2030年全球平均碳价应达到75美元/吨。然而目前仅有欧盟和英国碳排放交易体系的碳价能达到这一要求，如欧盟2022年平均碳价便上涨至86.53美元/吨，而其他各国碳市场的碳价则处于低位，我国碳市场的碳价更是普遍较低，2023年全国碳排放权交易市场的成交均价仅为9.62美元/吨^②。尽管单就从提高碳价这一个维度来促进减排容易引发市场问题，但这也侧面体现出我国的碳市场价格还有很大的上升空间。此外，我国各个碳交易市场的碳价相对割裂。2023年，北京碳市场的碳价全国最高，最高碳价达到了149.64元/吨，年成交均价为113.3元/吨，福建碳市场的碳价最低，年成交均价仅为31.4元/吨，价格差距显著。我国目前的

^① 按中国人民银行2022年12月30日发布的汇率计算，1欧元：7.4229人民币

^② 按中国人民银行2023年12月29日发布的汇率计算，1美元：7.0827人民币

碳交易虽然实行的是双轨制,但也有逐步将其他高排放重点行业纳入全国碳排放权交易市场的规划,这种割裂的地方碳价毫无疑问不利于统一,需要进一步完善相关制度。

其次,我国碳市场交易主要靠履约驱动,市场主体积极性不足。我国碳市场发展起步较晚,现阶段市场参与主体只有被纳入排控范围的企业,大都以排放任务为目标,缺乏交易积极性,市场效率较低,流动性不足。特别是天津碳市场和重庆碳市场,纳入的控排企业较少,乃至多个月份都未发生交易,市场活跃度低迷。其他碳市场的交易也主要集中于履约月份,拿全国碳排放权交易市场为例,从图 3.5 中可以看到交易大多集中在 9-12 月份,履约周期结束后,市场交易量一直维持低位。同时,各个碳市场之间交易量差异明显,除全国碳市场之外,2023 年福建碳市场成交量最多,达 2620 万吨,而上海碳市场成交量最低,仅为 223 万吨。此外,交易不活跃的原因还和配额分配方式有关,我国碳市场目前仍以免费分配为主,企业获得的免费配额较多,市场需求较小。



数据来源: 国泰君安数据库

图 3.5 2023 年全国碳市场成交量及成交价格

最后,我国碳市场产品种类相对有限,缺乏碳期权、碳期货等衍生产品。表 3.3 列举了目前我国碳市场上主要的交易产品,主要以两类碳现货产品交易为主,碳金融衍生产品匮乏。据统计,欧盟碳排放交易体系中碳金融衍生产品的交易量

可占 95%以上,已经初步体现出了价格发现功能。而我国的碳交易产品种类单一,一方面无法满足市场的多元化需求,另一方面也没有有效的风险管理工具,进一步影响了市场活跃程度。

表 3.3 我国碳市场交易产品概况

现货产品	衍生产品	融资工具	支持工具
碳排放配额、 国家核证自愿减排量	碳远期、碳掉期	低碳发展基金、碳中和指数基金、碳债券、碳信用证、 CCER 质押贷款等	碳指数

通过以上分析,可以发现我国碳市场的主要问题在于市场价格、交易量和交易产品,而开展碳期权交易对于这三个方面都有所裨益。首先,碳期权作为衍生产品,为控排企业提供了风险管理工具,丰富了碳市场的交易品种;其次,有助于吸引更多机构和个人投资者参与碳交易,提高市场的流动性和交易活跃度;最后,碳期权一方面可以帮助企业锁定碳价,控制风险,平抑现货价格波动幅度,另一方面,大量交易有助于形成市场预期,强化价格发现功能,提升我国碳市场的竞争力。

事实上,我国的全国碳排放权交易市场已为全球规模最大的碳现货交易市场,其覆盖的年排放体量为 5100 百万吨 CO_2 ,远远大于欧盟 ETS (加上航空 EUA) 的覆盖体量 1557 百万吨 CO_2 和北美 ETS 的覆盖体量 434.9 百万吨 CO_2 。我国的国际碳市场份额差距主要源自碳金融衍生品的缺失。根据国家发改委的初步测算,如果将八大重点行业全部纳入控排范围并开展期货交易,每年的碳交易金额有望翻五六十倍,而碳现货和碳期货都可作为碳期权的标的资产,可见我国碳期权市场的巨大发展潜力。

3.2 开发优势分析

3.2.1 政策支持分析

针对上述情况,我国政府也加大了对于碳产品开发的支持力度。2016 年,在《关于构建绿色金融体系的指导意见》中,中国人民银行、财政部等七部委明确指出,要“构建全国统一的碳排放权交易市场,同时有序发展碳远期、碳掉期、

碳期权、碳基金、碳租赁和碳资产证券化等碳金融产品，探索碳期货交易”。2021年7月，全国碳排放权交易市场已经启动，碳衍生交易市场的建设成为我国下一阶段的工作重点。

2019年2月，国务院发布《粤港澳大湾区发展规划纲要》，表示支持广州建设绿色金融改革创新试验区，计划成立以碳排放作为首个交易品种的创新型期货交易所；2020年5月，《关于金融支持粤港澳大湾区建设的意见》进一步指出，要设立广州期货交易所，以科技、绿色、环保、金融等新兴产业为主；2021年4月，广州期货交易所揭牌成立；2021年11月，在《关于加强产融合作推动工业绿色发展的指导意见》中，四部门表示支持其建设碳期货市场；2023年，广东省人民政府发布了《广东省碳达峰实施方案》，将支持碳排放权期货品种的开发列入发展规划。而广州期货交易所目前推出的工业硅和碳酸锂产品，期货品种和期权品种都是一同上市，可以预见我国的碳期货和碳期权应当同步推出。

这一系列加快我国碳衍生交易市场建设、完善碳金融市场体系的政策文件充分彰显了我国利用市场机制实现“双碳”目标、推进社会绿色低碳转型的坚定决心，为碳期权的研发提供了强有力的支持。

3.2.2 技术经验分析

国际上已经存在较为成熟的碳期权，其合约、定价及市场机制设计可以为我国提供丰富的经验。目前，洲际交易所（ICE）为全球碳排放权交易品种最多、交易规模最大、交易最为活跃的交易所，其2020年的成交额占到了全球总量的88%，上线的碳期权品种包括EUA期货期权、CCA期货期权、RGGI期货期权，合约内容如表3.4所示。根据欧盟的金融工具市场法规，以风险管理为主的碳期权交易净持仓量不受限制，而以投机为主的碳期权净持仓量受到限额管控，在一定程度上可以有效控制市场风险。

表 3.4 ICE 交易所主要的碳期权合约

合约要素	EUA 期货期权	CCA 期货期权	RGGI 期货期权
合约标的物	EUA 期货合约	CCA 期货合约	RGGI 期货合约
合约类型	看涨期权、看跌期权		

续表 3.4

合约要素	EUA 期货期权	CCA 期货期权	RGGI 期货期权
交易单位	一手对应的标的期货合约（相当于 1000tCO ₂ e）		
报价单位	欧元/吨	美元/吨	
最小变动价位	0.005 欧元/吨	0.01 美元	
涨跌停板幅度	无限制		
合约月份	3、6、9、12 月	1-12 各月	
最后交易日	合约到期前的三个交易日	合约到期当月的第 15 个工作日	
到期日	同最后交易日		
行权方式	欧式		
发行主体	欧盟排放交易体系	加州碳排放权交易市场	区域温室气体倡议

资料来源：ICE 交易所

与此同时，国内虽然还没有上市标准化碳期权产品，但大量控排企业具有规避风险的需求。2016 年 6 月 16 日，我国首个场外碳期权合约签署于北京环境交易所，交易双方分别为深圳招银国金投资有限公司和北京京能创碳资产管理有限公司，碳期权的标的为 2 万吨碳排放配额，由北京环境交易所监督并执行。2022 年，国泰君安以上海碳配额为标的进行了场外期权交易，为证券机构首次利用碳期权帮助客户进行碳资产管理。这些场外期权的交易也为场内碳期权产品的推出提供了参考经验。

从场内期权的开发技术来看，我国已有多只期权的开发经验。我国期权市场发展起步较晚，2015 年 2 月 9 日，上海证券交易所推出了我国的首个 ETF 期权，2017 年 3 月 31 日，大连商品交易所推出了我国首个商品期权，在此后的几年内，期权数量开始飞速增加，国内六家期货交易所先后上市了 43 个期权品种，两家证券交易所先后上市了 9 个 ETF 期权品种，具体如下表所示。其中，广州期货交易所上市的工业硅和碳酸锂期权也为碳期权积累了开发经验和运营经验。

表 3.5 我国现有的场内期权品种

时间	大商所	郑商所	上期所	中金所	上期能源	广期所	上交所	深交所
2015							上证 50ETF	

续表 3.5

时间	大商所	郑商所	上期所	中金所	上期能源	广期所	上交所	深交所
2017	豆粕	白糖						
2018			铜					
2019	玉米、铁矿石	棉花、甲醇、PTA	天然橡胶、黄金	沪深 300 股指			沪深 300ETF	沪深 300ETF
2020	LPG、PVC、PP、LDPE	菜籽粕、动力煤	铝、锌					
2021	棕榈油				原油			
2022	豆一、豆二、豆油	菜籽油、花生	白银、螺纹钢	中证 1000 股指、上证 50 股指		工业硅	中证 500ETF	中证 500ETF、创业板 ETF、深证 100ETF
2023	苯乙烯、乙二醇	烧碱、PX、纯碱、短纤、尿素、锰硅、硅铁、苹果	合成橡胶			碳酸锂	华夏科创 50ETF、易方达科创 50ETF	

资料来源：各大期货和证券交易所官网

综上所述，无论是国内外碳期权的设计经验，还是国内其他期权开发技术经验，都可以为我国碳期权的开发设计提供参考，具有较大开发优势。

4 碳期权产品设计与定价

4.1 碳期权产品合约设计

4.1.1 产品简介与定位

本文设计的碳期权是以全国碳排放权交易市场的碳排放配额作为标的资产的期权合约，简称 CEA 期权，行权方式为欧式。其市场主体主要包括：控排企业、金融机构、投资基金以及其他非控排企业和个人投资者，主要功能为套期保值和投机套利。

作为一种新推出的碳衍生产品，其市场定位在于：（1）提供风险管理工具，投资者可以根据市场预期，使用碳期权进行套期保值，降低经营风险；（2）丰富投资策略，碳期权的杠杆倍数较高，具有丰富经验的投资者可以利用碳期权进行套利或者通过低买高卖获取投机收益；（3）进行资产配置，投资者可以将碳期权与其他资产进行自由组合，提高收益、分散风险；（4）吸引多元市场主体，从而提高碳市场的流动性和交易的活跃程度，平抑价格波动，提升市场的定价效率。

4.1.2 碳期权产品标的选择

为保证现实市场更好地运转，在选取期权的标的资产时，往往会考虑一定的条件。国际上现有的碳期权普遍以碳期货作为标的资产，而我国的碳市场上目前仅有碳现货产品，因此本文在设计我国的碳期权产品时，考虑以碳现货，即碳排放配额作为标的资产，具体论述如下。

1. 标的资产的性质具有稳定性。为保证到期时的正常交割，期权的标的资产应该具有较长的稳定性。对于商品期权来说，这一条件至关重要，像棉花、玉米以及合成橡胶等都可以储藏较长时间；而对于金融期权来说，则无需考虑这一问题。碳排放配额作为一种特殊的商品现货，并不具备实物特征，其本质是一种产权，与金融期权类似，没有保质期的顾虑，符合作为标的资产的先决条件。

2. 标的资产本身易于划分和质量检测。场内期权为了标准化交易的需要，会

规定每份合约的标的资产数量和质量标准。为了节约成本提高效率，商品期权往往以同样是标准化合约的商品期货作为标的资产；而金融期权则既有以现货作为标的资产的股票期权、指数期权等，又有以期货作为标的资产的指数期货期权、利率期货期权等。碳排放配额本就以“CO₂e”为单位，每份碳配额所代表的含义相同，因此像金融期权一样，现货和期货都可作为标的资产。

3. 标的资产具有良好的市场流动性。期权的买方具有选择权，一旦期权到期后，买方向卖方行使权力，对于看跌期权的卖方，仅需按约定价格买入标的资产，而对于看涨期权的卖方，则需要按约定价格出售标的资产。如果标的资产的市场流动性欠缺，而看涨期权的卖方也未事先持有足量的标的资产，将会导致履约困难，甚至进一步推动现货价格上涨，引起市场失衡。流动性较强的市场交易频率较高、交易量较大，具有一定的市场深度，到期履约交割相对容易，不易引起价格大幅波动。由于保证金制度和标准化合约的存在，一般商品期货的流动性要高于商品现货，而股票、外汇等金融产品的现货市场就有众多的参与者，且交易场所比较集中，因而具有良好的流动性。目前我国的碳金融产品中，碳配额市场的交易量最大，流动性最好，同时作为一种政策性商品，碳配额市场很难出现挤兑现象，总体上符合标的资产的要求。

4. 标的资产具有较强的波动性。期权作为一种衍生金融工具，其原始功能即为风险管理，资产的波动率越高，投资者规避风险的需求和投机获利的空间也就越大。期权的价值与波动率呈正相关，对于价格几乎不发生变动的资产，开发期权的意义不大。碳配额的价格受政策、能源和技术的影响较大，2023年全国碳排放权交易市场的碳配额收盘价每日波动率均值为1.05%，最大涨幅为9.66%，最大跌幅为9.79%，整体而言波动率较大。

综上所述，碳配额符合期权标的资产的条件。而在我国的几个碳市场中，全国碳排放权交易市场的市场主体最多、价格连续性最好、交易覆盖量最大，未来也将持续纳入更多的高排放重点行业，构建统一的碳市场，因此本文选择全国碳市场的碳配额（CEA）作为我国碳期权的标的资产。

4.1.3 碳期权产品合约要素设计

碳期权产品的合约要素较为固定，本文主要参考 ICE 交易所的 EUA 期权（见表 3.4），结合我国碳市场的实际情况，来设计产品设计。

1. 基本要素设计

（1）交易场所

目前国内衍生品交易所主要有上海期货交易所、大连商品交易所、郑州商品交易所、中国金融期货交易所、上海国际能源交易中心和广州期货交易所。其中广州期货交易所的定位为绿色、创新型的交易所，碳排放权期货、期权的品种开发计划已获得证监会批准。因此，本文以广州期货交易所作为碳期权的交易场所。

（2）交易代码

交易代码是标识一份期权合约的唯一符号，其通常格式表示如下：品种代码+合约到期年月+看涨/看跌方向+执行价格。因此，本文将看涨期权的交易代码设置为 CEA-合约月份-C-执行价格，看跌期权的交易代码设置为 CEA-合约月份-P-执行价格。

（3）交易单位与报价单位

交易单位即投资者进行交易的最小单位，其设定直接影响到一份期权合约涵盖的资金规模，进而影响到期权的流动性以及市场主体结构。从国际市场的经验来看，EUA 期权、CCA 期权和 RGGI 期权的交易单位均为 1000 吨二氧化碳当量/手，总体合约价值规模较高，市场参与者则以金融机构、履约企业、除履约企业以外的商业企业和投资基金为主，交易规模较大、资金实力较为雄厚。考虑到目前我国碳市场的参与主体也主要是控排企业和投资机构，交易的规模和体量较大，同时也便于接轨国际碳市场，故将交易单位设置为 1000 全国碳配额/手，即 1000 吨二氧化碳当量/手，与国际保持一致。报价单位设定为：元/吨。

（4）最小变动单位

最小变动单位即碳期权每次报价时价格的最小变动单位，影响碳期权合约的流动性以及交易效率。较小的最小变动价位可以提升报价精度，提高市场流动性。欧盟碳市场上 EUA 期权的最小变动单位为 0.005 欧元/吨，按现行汇率折合 0.0391 人民币；而美国碳市场上的碳期权最小变动单位为 0.01 美元/吨，折合为 0.0721

人民币。由于我国碳市场的建设仍处于初级阶段，碳配额的价格较低，因此本文考虑以 0.03 元/吨作为我国碳期权的最小变动单位，即碳期权合约每次报价最少变动 30 元。

2. 风险控制要素设计

(1) 涨跌停板幅度

涨跌停板幅度指一个交易日内，期权价格允许涨跌的最大幅度，超出后则暂停交易，可以较好地避免极端情况下市场价格剧烈波动，控制市场风险。欧美等发达国家的金融市场比较成熟，因此对涨跌停板幅度不做限制。而我国的金融市场发展时间尚短，设置涨跌停板幅度十分必要。本文采用百分比制度，以 2021 年 7 月 16 日到 2022 年 12 月 31 日间的全国碳排放权交易市场配额的日收盘价为样本，计算了每日碳价的波动幅度。

表 4.1 CEA 每日价格波动率绝对值统计

绝对值	[0,1%]	(1%,2%]	(2%,3%]	(3%,4%]	(4%,5%]	(5%,6%]	(6%,7%]	(7%,8%]	>8%
占比	48.31%	13.20%	9.55%	7.87%	6.18%	4.21%	1.69%	2.25%	6.74%

数据来源：国泰安数据库，经作者整理

参考我国其他期权产品的经验，涨跌停板幅度一般在 3%-5%。而从表 4.1 中可以发现，5%的幅度能够涵盖 85.11%的样本数据，满足风险控制需求的同时对交易影响较小。因此，本文将设置的涨跌停板幅度为 5%。

(2) 保证金制度

保证金制度是指投资者在进行期权交易时需要向交易所存入一定比例的资金作为保证金，又分为开仓保证金和维持保证金，旨在覆盖投资者可能面临的亏损风险，同时确保其能够履行合约义务。保证金制度有助于降低交易的信用风险，并提供了杠杆效应，使得投资者可以通过少量的资金参与更大规模的交易。在碳期权交易中，买方具有选择是否行权的权利，因此无需缴纳保证金。而卖方具有履行合约的义务，需要缴纳保证金。本文参照 ETF 期权，将碳期权的保证金计算方式设定如下：看涨期权保证金=[前一日 CEA 结算价+Max(12%×前一日 CEA 收盘价-看涨期权虚值，7%×前一日 CEA 收盘价)]×合约单位；看跌期权保证金=Min[前一日 CEA 结算价+Max(12%×前一日 CEA 收盘价-看跌期权虚值，

$7\% \times \text{行权价格}$), 行权价格] \times 合约单位。

3. 交割要素设计

(1) 合约月份

合约月份是指期权合约中规定的合约到期月份。一个碳期权合约可能有多个到期月份可选, 包括近月、次近月、季度合约等。不同到期月份的合约具有不同的价格、波动性和风险特征, 合约月份越多, 投资者的策略选择也就越多, 市场流动性更好。国际碳期权中, EUA 期权的合约月份为 3、6、9、12 月, CCA 和 RGGI 期权合约月份为 1-12 月各月; 国内期权中, 广州期货交易所新推出的工业硅和碳酸锂的合约月份均为 1-12 月各月。考虑到丰富的策略选择可以吸引更多的投资者, 本文将我国碳期权的合约月份设定为 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12 月。

(2) 最后交易日、交割日和到期日

按时间先后顺序, 分别为: 最后交易日、交割日和到期日。最后交易日指期权合约在合约到期之前最后一天可以进行交易的日期, 这一天后不再允许新的交易或持仓, 通常是为了在合约到期前进行结算和交割准备, 一般商品期权的最后交易日比金融期权的截止日期更早; 交割日指行权日, 即买卖双方可以进行交割的日期; 到期日指期权买方实际可以执行期权的最后日期, 即为行权日。由于碳配额可在系统内进行交割, 较为便捷, 因此本文参照金融期权的方式, 将碳期权的最后交易日、交割日和到期日统一设置为期权到期月份的第四个星期三, 并遇法定节假日顺延。

(3) 行权方式

期权根据投资者能否在到期日前随时行权分为欧式期权和美式期权。虽然美式期权更为灵活, 其对买方赋予的权利更大, 导致期权费用较高, 合约交割更加复杂, 同时也增加了期权卖方的风险。考虑到我国碳市场的发展程度较低, 且碳期权的主要目的是进行风险管理, 因此本文将行权方式设定为欧式期权, 与国际现有碳期权一致。

综上所述, 我国碳期权产品的合约设计最终如下:

表 4.2 我国碳配额期权产品合约

合约要素	内容
合约标的物	全国碳配额 CEA
合约类型	看涨期权、看跌期权
交易单位	1000 吨全国碳配额
报价单位	元/吨
最小变动价位	0.03 元/吨
涨跌停板幅度	上一交易日结算价±5%
合约月份	1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12 月
交易时间	每周一至周五 9:00~11:30, 13:30~15:00, 以及交易所规定的其他时间
最后交易日	到期月份的第四个星期三(遇法定节假日顺延)
到期日	同最后交易日
行权方式	欧式
交易代码	看涨期权:CEA-合约月份-C-执行价格 看跌期权:CEA-合约月份-P-执行价格
上市交易所	广州期货交易所

4.2 碳期权产品定价设计

4.2.1 碳期权合约价格影响因素分析

作为经典的期权定价模型，B-S 模型被广泛应用于欧式期权定价，其假设条件要求较为严格，包括：（1）市场为无摩擦市场，允许卖空且不存在无风险套利机会；（2）证券完全可分，交易和价格变动连续；（3）证券价格服从几何布朗运动，收益率服从对数正态分布；（4）期权有效期内，无风险利率为常数；（5）证券在期权有效期内无红利支付。在此基础上，得到了 B-S 期权定价公式：

$$C = SN(d_1) - Ke^{-r(T-t)}N(d_2) \quad (4.1)$$

$$P = Ke^{-r(T-t)}N(-d_2) - SN(-d_1) \quad (4.2)$$

$$d_1 = \frac{\ln(S/K) + (r + \frac{\sigma^2}{2})(T-t)}{\sigma\sqrt{T-t}}, \quad d_2 = d_1 - \sigma\sqrt{T-t} \quad (4.3)$$

其中， C 、 P 分别为看涨期权和看跌期权的理论价格； S 为标的资产价格； K 为期权的执行价格； T 为期权有效期； σ 为标的资产的波动率； $N(d)$ 为标准正态

分布累积函数； r 为年无风险复利利率。

根据上述公式，可以得到碳期权价格的主要影响因素，在其他条件不变的情况下，碳期权价格变动如表 4.3 所示。

表 4.3 碳期权价格的影响因素

影响因素	标的资产价格 越高	执行价格 越高	距期权到期时间 越远	标的资产波动率 越高	无风险利率 越高
看涨期权	越高	越高	越高	越高	越高
看跌期权	越低	越低	越高	越高	越低

除此以外，现实中还有很多影响期权合约价格的因素，如是否支付红利和交易费用等等。而支付红利会使看涨期权的价格下降。而交易成本的存在，一方面意味着交易调整的频次受限；另一方面，也直接导致合理的期权价格不再是单个数值，而是落于一定区间。

4.2.2 GARCH—分形布朗运动期权定价模型

1. 分形布朗运动期权定价模型

大量市场研究表明，碳配额价格波动率存在自相关性，具备尖峰厚尾的特征，与 B-S 期权定价模型中标的资产价格服从几何布朗运动以及价格独立的假设条件存在较大冲突。

Hu 和 Øksendal (2003) 提出了分形布朗运动期权定价法，对 B-S 模型进行了拓展，通过使用分形布朗运动描绘资产价格序列，可以不受市场有效性与价格分布的限制，从而很好地刻画标的资产价格的自相关性、厚尾性、长记忆性，更符合金融期权价格的实际特征。分形布朗运动模型的公式表示如下：

$$dS(t) = \mu(t)S(t)dt + \sigma(t)S(t)dB_H(t) \quad (4.4)$$

其中， $S(t)$ 代表标的资产价格， $0 \leq t \leq T$ ； $\mu(t)$ 代表资产期望收益率； $\sigma(t)$ 代表资产收益率的年化波动率； $B_H(t)$ 代表具有 H 指数的分形布朗运动，其中 $0 < H < 1$ 。当 $H > 0.5$ 时， $B_H(t)$ 具有长记忆性，现在的增量与过去正相关；当 $H = 0.5$ 时， $B_H(t)$ 为几何布朗运动，增量独立、随机游走；当 $0 < H < 0.5$ 时， $B_H(t)$ 具有反持续性，现在的增量与过去负相关。

根据分形布朗运动期权定价模型，我国碳排放配额期权的看涨和看跌期权定

价模型可以分别表示为:

$$C_{CEA,t} = CEA_t N(d_1) - Ke^{-r(T-t)} N(d_2) \quad (4.5)$$

$$P_{CEA,t} = CEA_t [N(d_1) - 1] + Ke^{-r(T-t)} [1 - N(d_2)] \quad (4.6)$$

$$d_1 = \frac{\ln\left(\frac{CEA_t}{K}\right) + r(T-t) + \frac{\sigma_t^2}{2}(T^{2H} - t^{2H})}{\sigma_t \sqrt{T^{2H} - t^{2H}}}, d_2 = d_1 - \sigma_t \sqrt{T^{2H} - t^{2H}} \quad (4.7)$$

其中, $C_{CEA,t}$ 为看涨期权理论价格; $P_{CEA,t}$ 为看跌期权理论价格; CEA_t 为碳配额的市场价格; K 为碳期权的执行价格; T 为期权有效期; σ_t 为碳配额收益率的波动率; $N(d)$ 为标准正态分布的累积密度函数; r 为年无风险复利率; H 为碳市场的 Hurst 指数。

2. GARCH 模型构建

金融资产的价格时间序列波动通常具有随机性, 并常常呈现尖峰厚尾的特征, 可以用 GARCH 模型来进行刻画。相比于传统的 B-S 期权定价模型, GARCH 模型考虑了波动的聚集性, 能够有效克服 B-S 模型方差固定的假设。

GARCH 模型的公式可以表示如下:

$$\sigma_t^2 = \omega + \sum_{i=1}^p \alpha_i u_{t-i}^2 + \sum_{j=1}^q \beta_j \sigma_{t-j}^2 \quad (4.8)$$

应用 GARCH 模型需要满足两个条件。(1) 模型参数非负, 即 $\omega > 0$, $\alpha_i > 0$, $\beta_j \geq 0$; (2) 所有参数的和介于 0 和 1 之间, 即 $0 \leq (\sum_{i=1}^p \alpha_i + \sum_{j=1}^q \beta_j) \leq 1$ 。

本文通过构建 GARCH 模型, 估计了碳配额对数收益率的波动率, 并代入到分形布朗运动期权定价模型, 进行碳期权定价的计算。

5 实证分析

5.1 数据选取及分析

根据前文分析,可以看出我国各个碳市场间的发展存在着较大差距,因此本文考虑以上述设计的 CEA 期权产品为基础,在本章节中对碳期权的标的资产予以拓展,分别以我国其他各个碳市场的碳配额为标的设立对应的碳期权进行实证研究,从而探讨分析不同分形特征的碳市场内碳期权的价格表现。本文选取 2021 年 7 月 16 日至 2023 年 4 月 10 日期间我国各个碳市场中的碳配额价格作为研究样本,通过结合 GARCH 模型的分形布朗运动期权定价方法来进行定价研究,详情如表 5.1 所示。

表 5.1 样本量统计表

碳市场	全国	广东	湖北	深圳	上海	北京	福建	重庆	天津
	收盘价	收盘价	收盘价	均价	均价	均价	均价	均价	均价
样本量	420	424	420	289	340	200	317	147	103
合计	2660								

数据来源: wind 数据库、国泰安数据库以及各碳市场官网数据整理

其中,主要以全国碳排放权交易市场的 CEA 期权为研究主体。同时鉴于碳期权的标的资产应该具有较好的价格连续性,根据表 5.2 所列的我国 2022 年碳市场的运行数据,本文选取交易天数达到 200 天以上的广东、湖北,上海和福建四个碳市场来进行辅助分析。

表 5.2 我国 2022 年碳市场交易情况

碳市场	代码	样本量	年度成交量 (万吨)	年度成交额 (亿元)	累计成交量 (亿吨)	累计成交额 (亿元)
全国	CEA	242	5088.95	28.14	2.30	104.75
广东	GDEA	244	1460.91	10.30	2.14	56.39
湖北	HBEA	242	573.35	2.69	0.8544	21.35
深圳	SZEA	182	508.07	2.25	0.5545	14.22
上海	SHEA	215	152.31	0.8593	0.1945	6.38
北京	BEA	123	175.28	1.92	0.1817	12.28
福建	FJEA	214	766.14	1.90	0.2124	4.54
重庆	CQEA	68	75.91	0.2977	0.1057	0.9907
天津	TJEA	60	545.24	1.87	0.2412	5.97

数据来源：wind 数据库

5.1.1 序列平稳性检验

为进行后续研究，需要对样本序列进行预处理，根据观察各市场的碳配额价格序列，发现其具有明显的波动集聚性。故进行对数及一阶差分处理，单位根检验结果如表 5.3 所示，各碳试点的对数收益率均通过了序列平稳的显著性检验。

表 5.3 单位根检验结果

变量	ADF 统计量	P 值	结论
$dln(CEA_t)$	-24.21445***	0.0000	平稳
$dln(GDEA_t)$	-18.85930***	0.0000	平稳
$dln(HBEA_t)$	-17.09114***	0.0000	平稳
$dln(SHEA_t)$	-23.83927***	0.0000	平稳
$dln(FJEA_t)$	-12.50800***	0.0000	平稳

注：“***、**、*”分别表示统计量在 1%、5%和 10%的显著性水平下显著，下同。

5.1.2 一般描述性统计分析

各试点对数收益率的一般描述性统计结果如表 5.4 和图 5.1 所示。除了福建碳试点之外，其他四个碳市场都呈现出尖峰厚尾的特征，其中湖北碳试点和全国碳市场是右偏，广东和上海是左偏，以上五个试点均显著不服从正态分布。本文重点分析全国碳市场的数据，其对数收益率 $dln(CEA_t)$ 的偏度为 0.4934，峰度为 11.70，需要均值方程和 GARCH 模型来进行修正调整。

表 5.4 一般描述性统计结果

序列	平均数	中位数	最大值	最小值	标准差	偏度	峰度	JB 值
$dln(CEA_t)$	0.0002	0.0000	0.0938	-0.1030	0.0187	0.49	11.70	1338.48 ***
$dln(GDEA_t)$	0.0015	0.0003	0.0887	-0.1053	0.0203	-0.24	8.54	543.09 ***
$dln(HBEA_t)$	0.0008	0.0000	0.0953	-0.1054	0.0233	0.03	10.39	952.84 ***
$dln(SHEA_t)$	0.0012	0.0000	0.0954	-0.1054	0.0270	-0.18	7.32	265.69 ***
$dln(FJEA_t)$	0.0039	0.0024	0.1078	-0.1634	0.0680	-0.14	1.89	17.08 ***

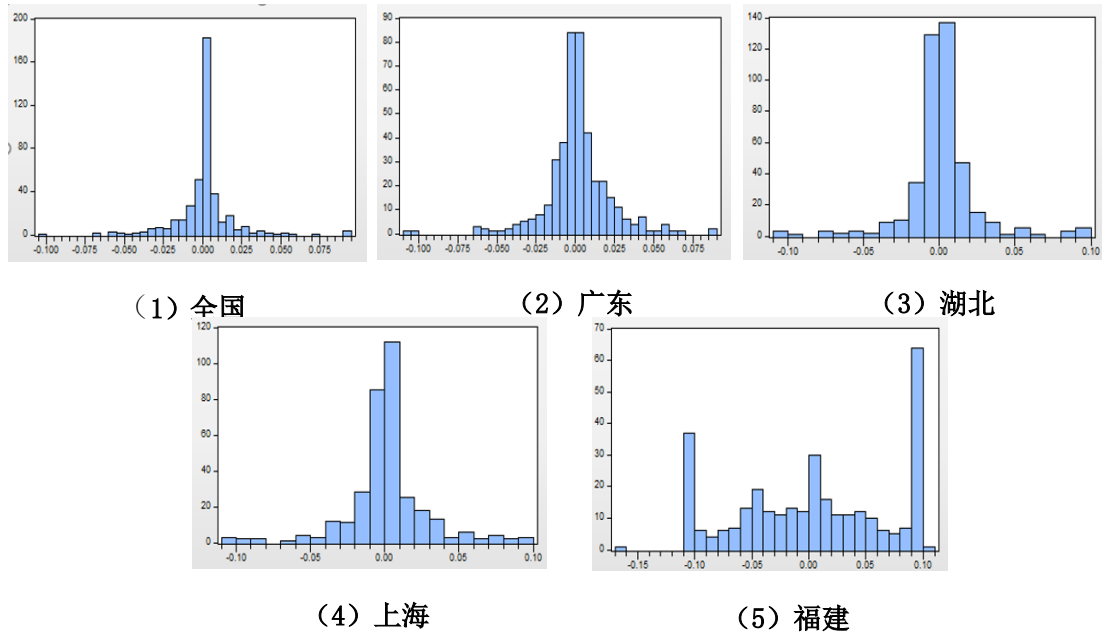


图 5.1 一般描述性统计图

5.1.3 我国碳交易市场的分形特征分析

Hurst 指数是检验市场分形特征的重要指标：当 $H>0.5$ 时，市场表现为长记忆性；当 $H=0.5$ 时，市场呈现独立随机特征；当 $0<H<0.5$ 时，市场表现为反持续性。目前通行的计算方法为重标极差法，又称 R/S 分析法，下面本文将重点介绍其具体步骤。

首先，将市场对数收益率序列 $\{\sigma_i\}$ 均等地分作 m 个长度为 n 的子区间，对于每个子区间 $\{\sigma_{i,k}\}$ ， $k=1,2,3,\dots,m$ ，定义 \bar{X}_k 为该子区间序列的平均值， S_k 为该子区间序列的标准差， $Y_{j,k}$ 为该子区间内第 j 个元素相对于均值 \bar{X}_k 的累积离差， $j=1,2,3,\dots,n$ ， R_k 为累积离差的极差，用公式表示如下：

$$\bar{X}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_{i,k} \quad S_k = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sigma_{i,k} - \bar{X}_k)^2} \quad (5.1)$$

$$Y_{j,k} = \sum_{i=1}^j (\sigma_{i,k} - \bar{X}_k) \quad R_k = \max(Y_{j,k}) - \min(Y_{j,k}) \quad (5.2)$$

在每个子区间内，用标准差 S_k 对波动范围 R_k 进行标准化处理，即为重标极差

R_k/S_k 。计算所有划分的 m 个子区间内的重标极差的平均值，记作区间长度为 n 的重标极差 $(R/S)_n$ ：

$$(R/S)_n = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{R_k}{S_k} \quad (5.3)$$

通过划分不同的区间长度 n ，即可得到不同的 $(R/S)_n$ 。而根据 Hurst 指数的定义， H 服从以下关系式：

$$(R/S)_n = Cn^H \quad (5.4)$$

其中， H 为市场对数收益率序列 $\{\sigma_i\}$ 的 Hurst 指数， C 为常数。对等式两边取对数，可以得到：

$$\ln(R/S)_n = \ln C + H \ln(n) \quad (5.5)$$

通过最小二乘法进行回归，我们可以得到斜率的参数，即为计算得到的 H 值。

为验证我国的各个碳市场是否存在分形特征，本文根据 2021 年 7 月 16 日至 2023 年 4 月 10 日期间的碳排放配额价格的对数收益率计算了 Hurst 值，结果如下表所示：

表 5.5 我国各碳试点 Hurst 指数计算结果

碳市场	全国	广东	湖北	上海	福建
样本数量	397	401	381	326	316
Hurst 指数	0.603343	0.76872	0.60066	0.586235	0.386886

可以看到，全国、广东、湖北，上海四个碳市场的 H 值 >0.5 ，表现为长记忆性；福建碳市场的 H 值 <0.5 ，表现为反持续性，几个碳市场均存在分形特征，不符合随机游走序列，尚未达到有效市场条件，可以使用分形布朗运动来描绘价格运动。

5.2 波动率参数估计

为了节省篇幅，本文仅对全国 CEA 碳期权的定价实证过程展开了分析，其他试点的碳期权定价研究方法同下。

根据表 5.3 的单位根检验结果，我们可以看到 $d\ln(CEA_t)$ 为平稳序列，下面对其进行自相关检验。

5.2.1 自相关检验

表 5.6 $dln(CEA_t)$ 自相关和偏自相关表

滞后阶数	AC 值	PAC 值	Q 统计量	P 值
1 阶	-0.169	-0.169	12.018	0.001
2 阶	-0.105	-0.138	16.707	0.000
3 阶	-0.002	-0.048	16.709	0.001
4 阶	0.072	0.051	18.924	0.001
5 阶	-0.106	-0.092	23.685	0.000

观察表 5.6 自相关和偏自相关系数，可以发现该序列存在自相关现象，需要通过均值方程来予以修正。

5.2.2 均值模型构建

本文建立了 AR(2)模型来构建均值方程，并用 OLS 进行估计，结果如表 5.7 所示：

表 5.7 均值方程回归结果

变量	系数	标准差	t-统计量	P 值
c	0.000142	0.000894	0.158574	0.8741
AR(1)	-0.198193***	0.048674	-4.071873	0.0001
AR(2)	-0.148898***	0.050082	-2.973089	0.0031
可决系数R ²	0.049906	被解释变量均值		0.000119
调整的R ²	0.045316	被解释变量标准差		0.018687
回归标准差	0.018258	AIC 信息准则		-5.161221
残差平方和	0.138014	SC 信息准则		-5.132206
对数似然估计值	1079.115	H-Q 信息准则		-5.149750
F 统计量	10.87312	DW 统计量		2.014077
P 值(F 统计量)	0.000025			

根据回归参数，可以构建均值方程，见公式 (5.6)。

$$dln(CEA_t) = 0.000142 - 0.198193dln(CEA_{t-1}) - 0.148898dln(CEA_{t-2}) \quad (5.6)$$

该模型拟合良好，AR(1)和 AR(2)的系数都在 1%的水平下显著，再次检验后，发现残差序列的自相关性得以消除，方程修正有效。

表 5.8 残差自相关和偏自相关表

滞后阶数	AC 值	PAC 值	Q 统计量	P 值
1 阶	-0.010	-0.010	0.0457	0.831
2 阶	-0.007	-0.008	0.0689	0.966
3 阶	-0.052	-0.052	1.2023	0.752
4 阶	0.068	0.067	3.1723	0.529
5 阶	-0.052	-0.052	4.3391	0.502

5.2.3 ARCH 效应检验

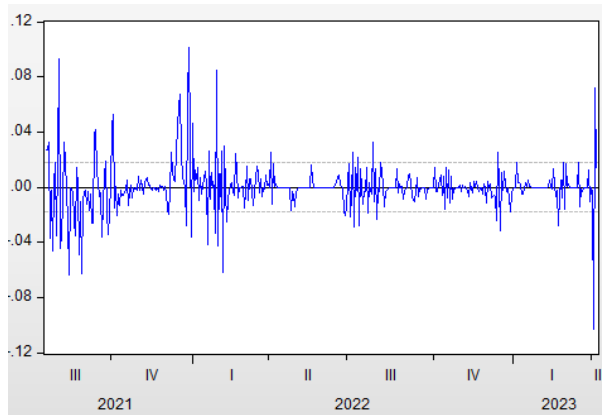


图 5.2 回归残差图

观察回归残差图，可以发现残差波动具有明显的聚集性，表明误差项可能存在有条件异方差。接着查看残差平方项的自相关表，可以看到残差平方项具备一阶自相关和偏自相关。

表 5.9 残差平方项自相关和偏自相关表

滞后阶数	AC 值	PAC 值	Q 统计量	P 值
1 阶	0.347	0.347	50.445	0.000
2 阶	0.094	-0.029	54.178	0.000
3 阶	0.060	0.041	55.686	0.000
4 阶	0.058	0.030	57.086	0.000
5 阶	0.099	0.078	61.251	0.000

接着进行 ARCH-LM 检验，也发现存在显著的 ARCH 效应。可以使用 GARCH 模型进行修正。

表 5.10 ARCH 效应检验结果

Heteroskedasticity Test: ARCH			
F 统计量	56.53665	P 值	0.0000
n* R ²	49.98388	P 值	0.0000

5.2.4 GARCH 模型估计波动率

本文根据上述均值方程建立 GARCH(1,1)模型,发现其中 AR(2)项不显著,更换统计方法依然无法通过显著性检验,故本文在建立 GARCH 模型时只保留了 AR(1)项,根据 AIC、SC 以及 H-Q 准则的结果,AR(1)-GARCH(1,1)模型拟合效果最好。因此本文最终选择建立 AR(1)-GARCH(1,1)模型,回归结果如下:

表 5.11 GARCH 模型回归结果

变量	系数	标准差	z 统计量	P 值
c	7.41E-05	0.000357	0.207439	0.8357
AR(1)	-0.224793***	0.053007	-4.240841	0.0000
方差方程				
c	3.38E-06***	6.85E-07	4.938871	0.0000
RESID(-1)2	0.302206***	0.042137	7.171991	0.0000
GARCH(-1)	0.692886***	0.025424	27.25321	0.0000
可决系数R ²	0.025401	被解释变量均值		0.000164
调整的R ²	0.023058	被解释变量标准差		0.018686
回归标准差	0.018469	AIC 信息准则		-6.135570
残差平方和	0.141904	SC 信息准则		-6.087299
对数似然估计值	1287.334	H-Q 信息准则		-6.116487
DW 统计量	1.947918			

得到 AR(1)-GARCH(1,1)模型方程,见公式 (5.7) 和公式 (5.8)。

$$d\ln(CEA_t) = 7.41 \times 10^{-5} - 0.224793d\ln(CEA_{t-1}) + \varepsilon_t \quad (5.7)$$

$$\sigma_t^2 = 3.38 \times 10^{-6} + 0.302206u_{t-1}^2 + 0.692886\sigma_{t-1}^2 \quad (5.8)$$

根据回归结果,可以发现模型的 AR 项、ARCH 项和 GARCH 项系数均在 1% 置信水平下显著,证明该模型的拟合效果较好。同时,GARCH 模型的系数和 $\alpha_1 + \beta_1 = 0.995$, 0.995 严格小于 1,说明序列平稳且具有可预测性,非常接近于 1,说明条件方差受到持久冲击。此外, $\beta_1 > \alpha_1$,说明相比于当前信息,前期信息对碳价波动的影响程度更大。

再次观察残差序列及其平方项序列的自相关表,发现均不存在自相关,证实该模型有效,且拟合效果较好。

表 5.12 残差自相关和偏自相关表

滞后阶数	AC 值	PAC 值	Q 统计量	P 值
1 阶	-0.004	-0.004	0.0082	0.928
2 阶	-0.044	-0.044	0.8221	0.663
3 阶	-0.021	-0.020	1.0051	0.800
4 阶	-0.068	-0.070	2.9764	0.562
5 阶	-0.037	-0.036	3.5700	0.613

表 5.13 残差平方项自相关和偏自相关表

滞后阶数	AC 值	PAC 值	Q 统计量	P 值
1 阶	-0.006	-0.006	0.0136	0.907
2 阶	-0.016	-0.016	0.1207	0.941
3 阶	-0.002	-0.002	0.1223	0.989
4 阶	0.017	0.017	0.2472	0.993
5 阶	-0.008	-0.008	0.2743	0.998

此外, 经过再次进行条件异方差检验, 发现残差序列的 ARCH 效应已经被消除, 再次证明了模型的有效性。

表 5.14 ARCH 效应检验结果

Heteroskedasticity Test: ARCH			
F 统计量	0.013381	P 值	0.9080
n* R ²	0.013445	P 值	0.9077

5.2.5 波动率预测

本文通过构建 AR(1)-GARCH(1,1)模型, 对碳价的波动率 σ_t 进行了静态模拟, 并生成了 $dln(CEA_t)$ 的条件标准差估计图, 即碳价的预测波动率。对比发现, 图 5.3 走势与 $dln(CEA_t)$ 波动走势相一致, 可代入分形布朗运动期权定价模型进行碳期权产品的价格计算。

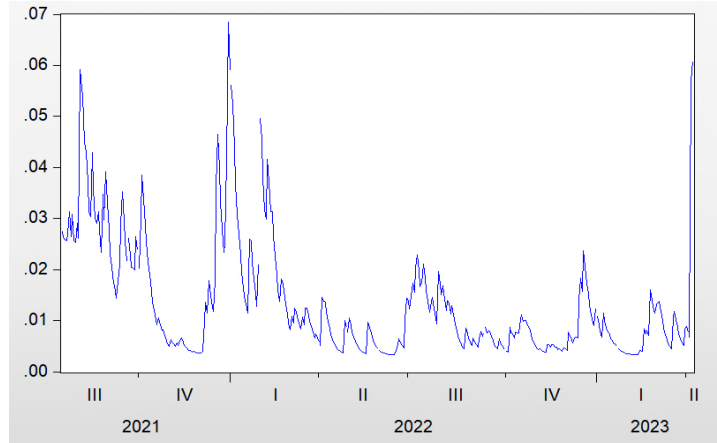


图 5.3 标的资产波动率的估计图

5.3 碳期权模拟定价

对于分形布朗运动期权定价模型中的其他变量，本文进行了如下设定：

1. 期权的有效期 T 是一年，本文选取 2022 年 12 月 28 日作为执行日期。
2. 执行价格 K 为期权有效期内碳价的平均值 58 元。
3. 根据上述模型的计算结果得出标的资产波动率 σ_t ，期权有效期内全国碳

市场的交易日有 244 天，则年波动率可以表示为 $\sigma_t^* = \sqrt{244}\sigma_t$ 。

4. 2022 年我国一年期国债年化利率约为 2%，将其作为年化无风险利率。

然后，将设定的参数代入分形布朗运动期权定价公式，便可以得到我国碳排放配额欧式看涨期权和看跌期权的理论价格。图 5.4 图 5.5 分别展示了 2022 年标的资产价格、欧式看涨期权和看跌期权理论价的走势图。

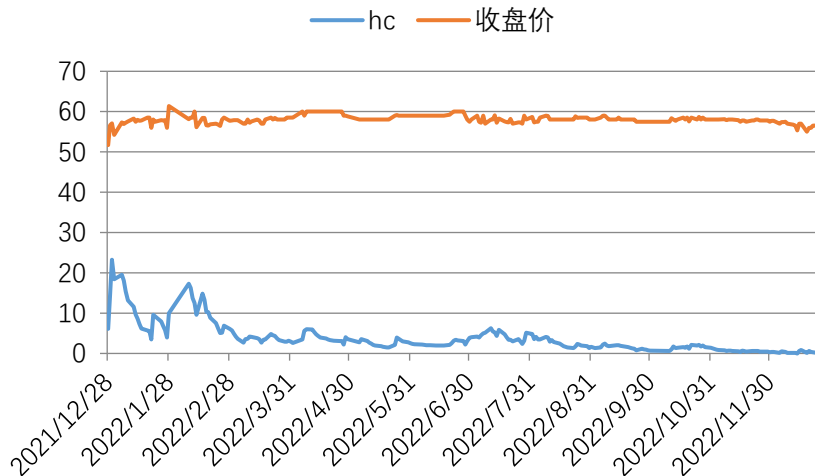


图 5.4 CEA 及其看涨期权价格的走势图

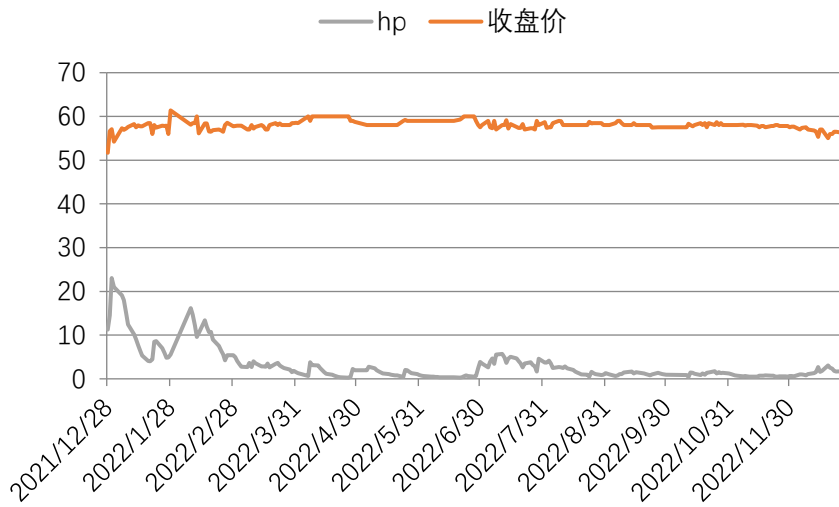


图 5.5 CEA 及其看跌期权价格走势图

如图所示，在较短时间内，看涨期权价格 hc 随标的资产价格 CEA, t 呈同向变动，而看跌期权价格 hp 随标的资产价格 CEA, t 反向变动，并且当 CEA, t 波动较大时，碳期权价格的波动幅度也增加，符合期权的基本属性。随着到期日的临近，期权价格逐渐下降，由于 2022/12/28 日当天的 CEA 价格为 51.69，小于执行价 58，因此 2022/12/27 日看涨期权的价格=0.000256813，趋近于 0；看跌期权的价格=1.697078818，趋近期权内在价值 1.699907，此时期权的时间价值趋近于 0，因而与理论预期相符。

最后，本文以 2022 年为例，根据设定的分形布朗运动期权定价模型，得出一年期的碳配额看涨期权的初始价格为 6.094 元/吨，看跌期权价格的初始价格为 11.255 元/吨，即买入一手碳配额看涨期权和看跌期权需要支付的期权费分别为 6094 元和 11255 元。以上便是我国碳期权产品定价的设计过程。

5.4 结果分析

5.4.1 CEA 期权实证结果分析

作为对比，本文同时采用 B-S 模型结合 GARCH 模型对碳期权进行了定价，图 5.6 为全国碳市场碳配额看涨期权和看跌期权的对比图。其中， hc 、 hp 为分形

布朗运动期权定价结果， c 、 p 为 B-S 期权定价结果， c^* 、 p^* 分别为 $MAX\{S_t - Ke^{-r(T-t)}, 0\}$ 和 $MAX\{Ke^{-r(T-t)} - S_t, 0\}$ ，即期权理论上的内在价值，而 hc 、 c 与 c^* 的差值为看涨期权的时间价值，同理， hp 、 p 与 p^* 的差值为看跌期权的时间价值，随着时间的推移，期权价格逐渐趋近于内在价值。可以看到，在图 5.6 中， hc 大于 c ， hp 大于 p ，即分形布朗运动期权定价计算出来的理论价格大于 B-S 期权定价的理论价格。

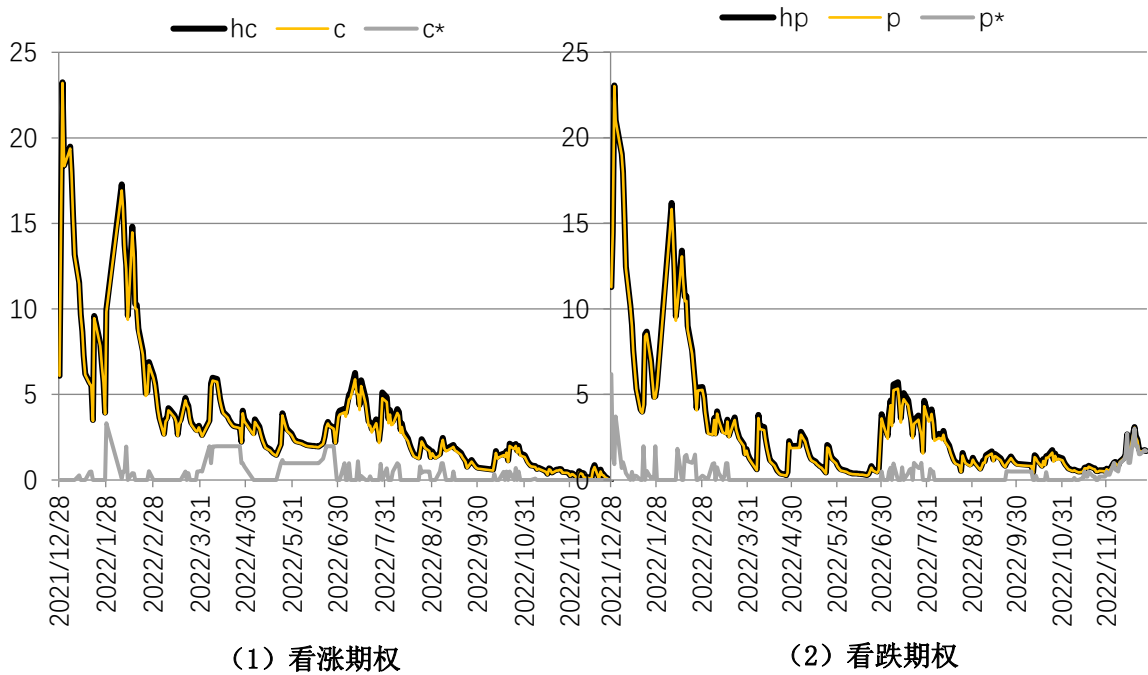


图 5.6 不同定价方法与期权内在价值的对比图

为进一步检验，本文选用了不同期权有效期和具有不同 H 值的碳试点的碳看涨期权价格进行了对比分析。图 5.7 为其他条件不变的情况下，期权有效期分别取 1 年，9 个月，6 个月和 3 个月的全国碳市场碳配额看涨期权价格对比图。可以看到当 $T=1$ 年时，分形布朗运动期权定价计算出来的理论价格更高；而当 $T=3$ 个月时，B-S 期权定价计算出来的理论价格更高；当 T 取 9 个月和 6 个月时，起初 B-S 期权定价计算出来的理论价格更高，随着时间的发展，分形布朗运动期权定价的理论价格会超过 B-S 期权定价。可见，这种关系并不稳定。其他各要素不变的情况下， T 的改变并不影响 B-S 期权定价的理论价格走势，而在 H 指数的影响下，分形布朗运动期权定价的理论价格走势会随着 T 的变动而变动，这也更符合现实期权市场的价格变动情况。

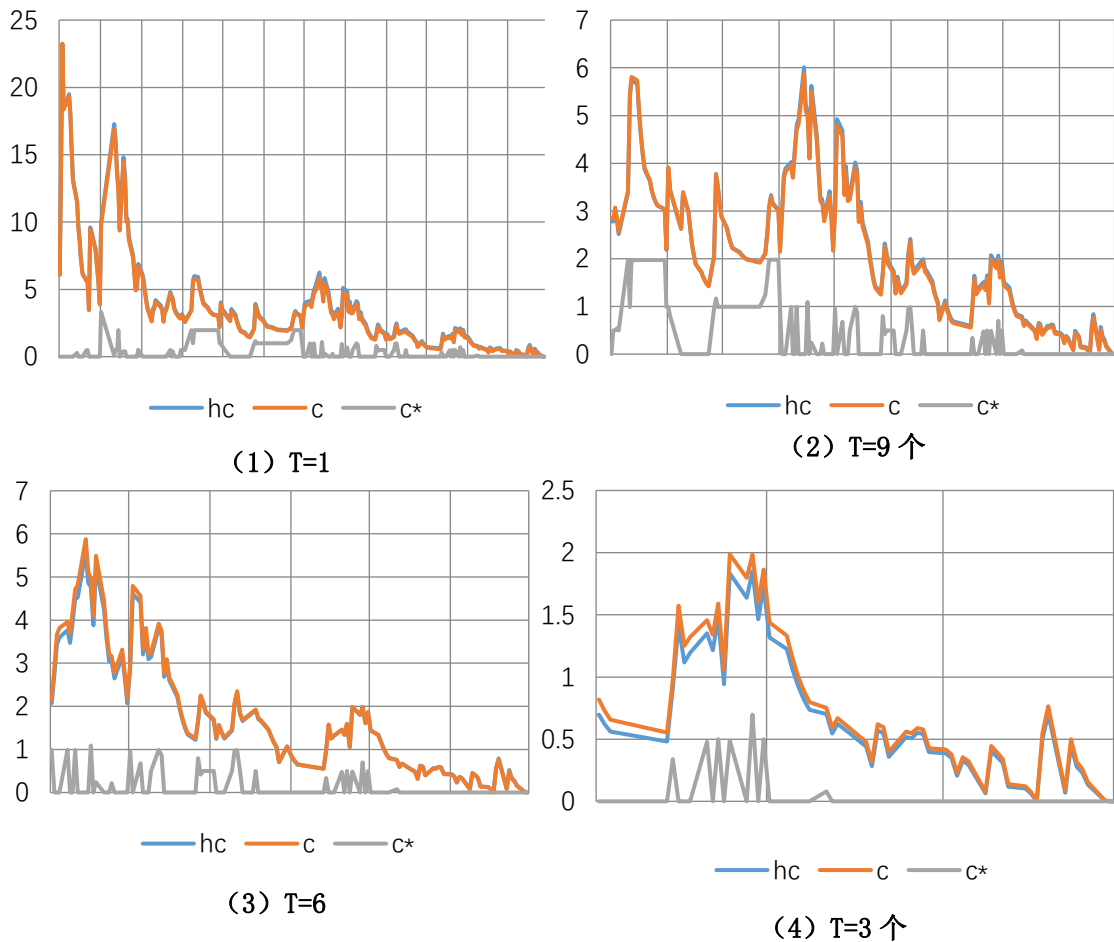


图 5.7 不同期权有效期的期权价值对比图

5.4.2 不同试点实证结果比较

以下按照 5.3 节所示规则设置参数，以看涨期权为例，对其他碳试点市场的碳期权分形定价和 B-S 定价结果进行分析。下图为其他几个试点碳价对数收益率波动率的估计图，可以看到湖北和福建两个试点的波动幅度相对更大。

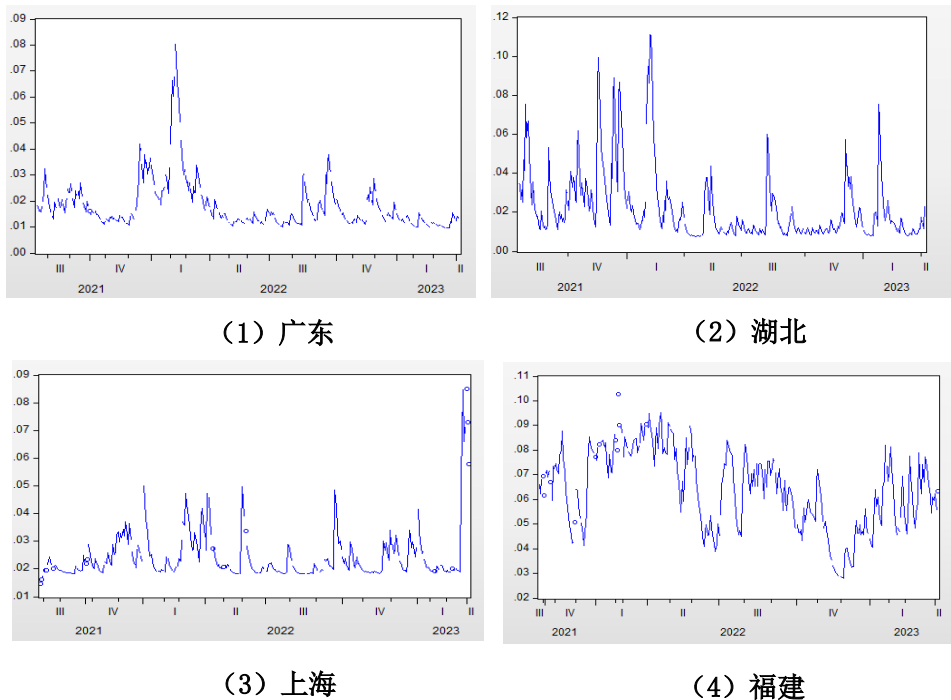
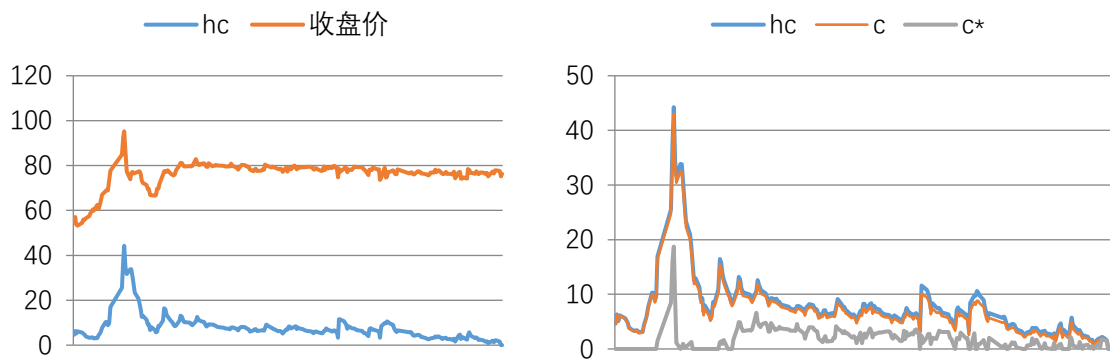


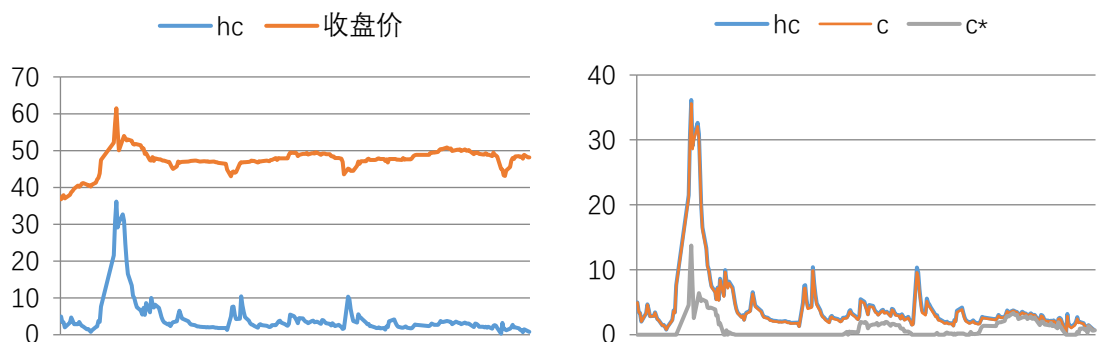
图 5.8 其他试点对数收益率波动率的估计图

根据图 5.9 结果，可以看到 H 值越偏离 0.5，分形定价模型与 B-S 模型的结果差距越大，与现实其他金融市场情形相似。在期权有效期 $T=1$ 的前提下，当 $H > 0.5$ 时，分形布朗运动期权定价计算出来的理论价格更高，如广东、湖北和上海试点；而当 $H < 0.5$ 时，B-S 期权定价计算出来的理论价格更高，如福建试点，这也和上面我们全国碳市场分析的结论一致。同时，碳期权价格与碳配额市场价格成正相关，并最终收敛于期权的内在价值。

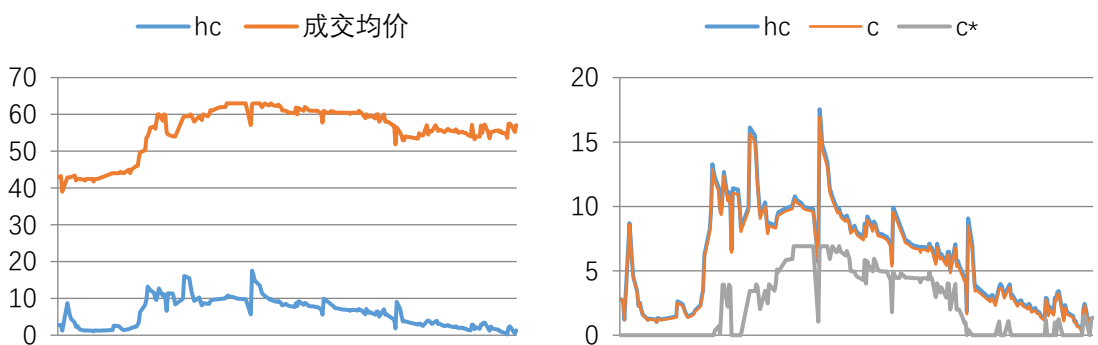
此外，我国 2022 年各碳市场的碳配额价格总体而言都呈上涨趋势，本文以期权有效期内的均价作为碳期权的执行价格，全国、广东、湖北，上海四个市场期权到期时价格都接近 0，而福建碳市场由于下半年配额价格快速上涨，导致到期时看涨期权的价格也跟着上涨。这也提醒我们碳配额作为一种受能源、政策影响较大的资产，合约月份较长的期权风险较高，交易所需审慎制定执行价格，在碳期权市场发展初期，需要合理控制参与的交易主体，以风险管理为主要目的。



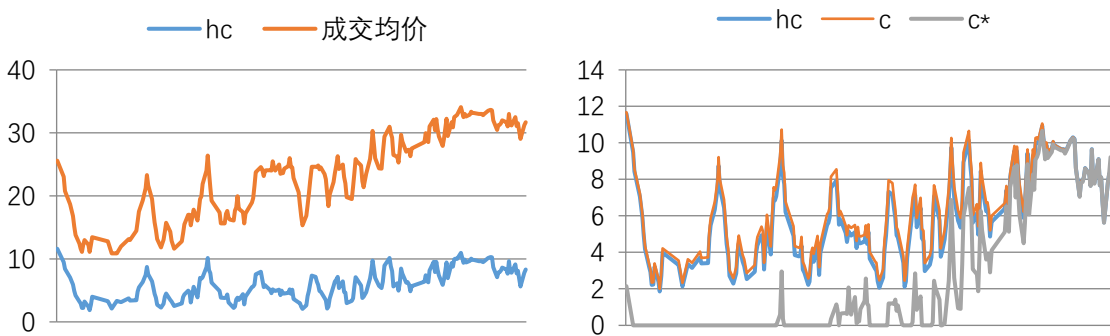
(1) 广东



(2) 湖北



(3) 上海



(4) 福建

图 5.9 其他试点碳看涨期权模拟结果

6 结论与建议

6.1 研究结论

本文通过总结我国碳金融市场发展过程,结合《巴黎协定》第六条,展望了我国碳市场的发展前景。推进碳衍生产品的研发是我国当前碳市场建设的重点工作,本文借鉴了欧盟碳市场,结合我国实际情况设计了基于碳排放配额的期权产品,并通过分形布朗运动期权定价模型结合 GARCH 模型对其进行了实证分析,得出了期权的理论价格,同时结合不同碳市场的状况对定价结果进行了简要分析。进一步补充了我国碳期权设计方面的文献,为产品推行提供了参考。

本文主要研究结论和成果如下:

首先,本文分析了我国碳期权的产品开发需求,结合国内外碳市场的发展现状,阐述了开发碳期权产品的需求背景,然后从政策支持和技术经验两个方面分析了我国开发碳期权的优势。碳期权的推行可以化解我国碳市场现阶段存在的一些问题,并且具有巨大的市场潜力。同时,我国政府也出台了一系列支持碳期权产品开发的政策,特别是明确了广州期货交易所的研发任务。此外还有国外碳期权的实践经验,国内场外碳期权案例,以及国内其他场内期权的研发技术经验可供参考,开发碳期权产品是完全可行的。

其次,本文对碳期权产品进行了简要介绍并明确了产品定位,参考国际上现有的碳期权,并立足我国碳市场的发展现状,从产品的稳定性、划分与检测难度、流动性和波动性四个角度论述了碳排放配额作为标的资产的合理性,进而对碳期权的各个合约要素进行了设计。同时,选用分形布朗运动期权定价模型来进行碳期权的定价研究。

再次,本文以 2021 年 7 月 16 日至 2023 年 4 月 10 日的全国碳排放权交易市场的碳配额价格数据为研究样本,同时选取流动性较好的其他四个碳试点的数据进行横向对比,对碳期权进行了定价研究。经检验,我国碳市场具有显著的分形特征,通过赋值分形布朗运动期权定价模型的参数,并使用 ARMA-GARCH 模型估计碳配额价格的收益波动率,计算出了我国碳配额看涨期权和看跌期权的初始价格。碳期权的价格趋势图符合理论预期,与碳配额价格走势模拟良好,相比

于 B-S 期权定价模型，分形布朗运动期权定价模型计算出的理论价格走势会随着期权有效期的变动而变动。同时，通过观察其他试点的碳期权价格，可以看到 H 值越偏离 0.5，分形期权定价模型与 B-S 模型的结果差距越大。

最后，本文针对目前我国碳市场上存在的一些不足提出了相关建议，从而促进我国碳市场的发展，为碳期权的推行创造更加良好的市场基础。同时对碳期权的推出后的推广方案和控排企业、金融机构对碳期权的应用场景进行了展望。

6.2 建议措施

6.2.1 进一步完善我国碳市场制度体系

通过前文国内外碳市场发展现状的对比，可以看到碳衍生交易市场发挥的重要作用。应加快建设我国的碳衍生市场，健全我国碳市场交易体系，使具有强制性的碳排放权交易市场，自愿性的国家核证自愿减排量（CCER）交易市场和功能性的碳衍生交易市场实现相互配合，更好地发挥碳市场的作用。同时要加快推进粤港澳大湾区碳排放权交易协同机制的建设，为我国建立区域碳排放交易市场积累经验，逐步构建起全国-区域-地方的多层次碳交易市场体系。此外，应划定统一的碳配额标准和交易规则，允许各地方试点根据本地产业结构适当调整，从而统一碳市场的价格体系，改善当前各地方碳价割裂的状态，真正实现碳价信号的引导作用。同时要加强对碳配额的管理，逐步收缩免费配额的发放，提高拍卖的比例，从而更好地发挥碳市场资源配置的功能，提高市场运行效率。

6.2.2 拓宽参与主体，丰富产品形态

要加大金融机构支持力度，进一步拓宽碳市场的行业和企业纳入范围，出台相应的准入机制，允许机构和个人投资者参与碳市场交易，扩大碳市场参与主体的数量，促进碳市场多元化发展。同时，加快推广和创新碳金融产品的力度，发展碳债券、碳期货、碳期权等碳金融产品和衍生工具，丰富碳市场的交易品种，提高市场流动性，提供风险管理工具，并进一步发挥衍生品价格发现作用，平抑碳价波动，形成更有效的市场价格，实现期现联动。

6.2.3 健全法律法规，保障可持续发展

目前我国关于碳排放交易的法律法规较少，随着控排行业范围的扩大和碳衍生交易市场建设的推进，相关部门应当补充完善相应的法律法规，建立行业准入门槛和市场监管机制，规范市场行为，促进市场的透明、公正和有效运行，促进碳市场健康可持续发展。对于即将开发推出的碳期货和碳期权等新型金融产品，更需要加强风险管控，建立健全的风险预警机制和风险管理体系，保障市场的平稳运行和投资者的合法权益。

6.2.4 加强平台培育建设，推进国际化进程

结合数字信息技术，打造一体化全国碳排放权交易信息平台及碳咨询机构，实现碳交易信息的公开透明和规范化管理。同时，应进一步加大对碳市场相关领域的人才培养力度，规范管理，提高市场从业人员的素质和专业水平，为市场化运作提供更加有效的支持。此外，要提高我国碳排放权定价的话语权，必须接轨国际市场，应加快培育本土碳排放第三方核证机构，确保核算准确公正，加强与全球各碳市场之间的合作，借鉴其发展经验，加快我国碳市场国际化进程。

6.3 前景展望

随着碳资产在全球大宗商品交易的地位提升，其市场建设越发重要。碳期权推出后可以进一步增强市场信心，彰显我国发展低碳经济的有力态度；有利于吸引更多的交易主体，活跃市场交易，加快我国碳市场的建设，为争取国际碳排放权的定价话语权提供有力支持；同时为控排主体提供了风险管理工具，减少其控排风险，进一步促进企业的绿色投资，加快产业结构转型升级。下面本文从推广和应用两方面对碳期权的前景进行展望。

6.3.1 推广前景

在碳期权产品正式推出后，广州期货交易所可以通过以下方案来推广碳期权。

1. 官方推广：除自身渠道外，还可以通过国内九个碳排放权交易市场、其他

期货交易所、证券交易所和行业协会来进行宣传推广。

2. 合作推广：通过与期货公司、证券公司等金融机构进行合作，利用其客户资源和市场渠道来推广碳期权。

3. 媒体推广：通过与专业财经媒体合作，发布碳期权的相关报道和分析，提供相应咨询和指导；同时也可以通过微信、微博等社交媒体平台，在网络平台对碳期权进行科普和推广。

4. 市场推广：通过举办座谈会、探讨会等，邀请政府主管部门、行业专家和投资者参与，对碳期权加以宣传和推广。

5. 教育推广：通过举办线上和线下的主题教育培训活动、发布碳期权的相关资料，加强投资者对于碳期权的认识，熟悉碳期权的应用场景和具体操作，增强投资者的专业知识和投资信心。

6.3.2 应用前景

碳期权的应用前景非常广阔，不同的市场主体对于碳期权的应用方向有所不同。其中，不参与控排^①的企业和个人投资者没有对碳资产进行风险管理的需求，参与碳期权市场交易主要以获取资本利得为目的，通过不同碳市场或不同碳产品之间的差价获取套利机会，或是利用期权的波动性和杠杆倍数，以少量资金成本进行低买高卖获取投机收益，这些交易者的存在提升了市场的活跃度和流动性，也有利于促使价格回归正常区间。本文主要针对控排企业和金融机构对碳期权的应用范畴进行重点分析，不再对不参与控排的企业和个人投资者进行深入探讨。

1. 高排放企业

目前，我国发电、建材、化工、石化、钢铁、有色、航空和造纸行业的碳排放量占排放总量的75%左右，发电行业占到了40%，政府在设置控排行业覆盖范围时首先以这些高排放行业为主。这些被纳入碳排放管控的高排放企业具有较大的减排压力，为交易市场上主要的碳配额需求方。我国碳配额的价格整体呈上涨

^① 这里的“不参与控排”指不参与控排项目，既不需要履约，自身又没有碳配额、CCER、碳债券、碳指数等碳资产的企业和个人，即没有碳资产风险管理需求的市场主体。

态势，而且政府计划逐步提高碳配额的拍卖比例，增加企业的碳排放成本，对于高排放企业来说，面临着配额价格上升的风险。同时，我国碳市场交易以履约驱动为主，碳配额的成交量集中在履约月份，临近履约月份时，也具有配额价格上涨的压力。与碳期货相比，碳期权在避险方面更具弹性，通过购买看涨期权合约，高排放企业可以提前锁定碳配额的最大履约成本，规避履约时碳配额价格上涨的风险，同时也能享受到碳配额价格下降的收益，是一种理想的风险管理方式。

2. 低排放企业

清洁能源企业、节能环保企业和碳中和企业等绿色生产企业的碳排放量较低，往往具有大量盈余的碳配额，这些低排放企业为交易市场上主要的碳配额供给方。国际碳市场上，2020年特斯拉通过碳交易获利达10.8亿美元；国内碳市场上，风电、林业碳汇等189个减排项目在全国碳市场的第一个履约周期中，通过碳交易获利9.8亿元。同样，这些企业面临着履约月份碳配额价格下降压力，可以通过买入碳看跌期权来控制风险，保证收益。此外，这些绿色低碳技术的开发往往需要大量资金支持，低排放企业也可以通过出售碳看涨期权，获得流动资金，进一步地投入到减排项目，形成正向循环。

3. 金融机构

金融机构作为碳期权市场上重要的市场主体，承担了做市商角色，提升了市场的流动性和稳定性。此外，金融机构也可以利用碳期权来拓展自身业务，其可能的应用方向如下：（1）咨询指导业务。金融机构可以为客户提供碳期权相关的咨询指导业务，帮助其进行碳期权交易。（2）资产配置业务。金融机构可以利用碳期权来构建投资组合，优化资产配置。例如原投资组合中有一只高排放企业的股票，其未来现金流具有较大的压力，可以通过加入碳看涨期权多头来分散投资风险；同样，若预期碳金融资产未来价格将要上涨，也可以在组合中加入碳看跌期权空头来增加投资收益。（3）风险管理业务。金融机构可以利用碳期权，通过套期保值对冲碳价波动带来的风险，提供风险管理服务。（4）碳金融产品创新。由于风险和收益具有非线性特点，期权能够与任何资产相互组合。金融机构可以利用这一特征，将碳期权与其他金融产品相组合，进行金融产品创新，构建具有不同风险与收益特征的碳金融产品，为投资者提供多样化的策略选择。

参考文献

- [1] Bachelier L, Theorie de la speculation, counter P H. annals de l'ecole normale superieure. English Translation in the Random Character of Stock Market Prices[D].Cambridge: MIT Press,1964.
- [2] Black F, Scholes M. The pricing of options and corporate liabilities[J].Journal of Political Economy,1973,81(3):637-654.
- [3] Brauneis A, Mestel R, Palan S, et al. Inducing low-carbon investment in the electric power industry through a price floor for emissions trading[J].Energy Policy,2013,53(12):190-204.
- [4] Carmona R, Hinz J. Risk-Neutral Models for emission allowance prices and option valuation[J].Management Science,2011,57(8):1453-1468.
- [5] Chevallier J, Lelpe F, Mercier L, et al. Risk aversion and institutional information disclosure on the European carbon market: A case study of the 2006 compliance event[J].Energy Policy,2009,37(1):15-28.
- [6] Daskalakis G, Psychoyios D, Markellos R N, et al. Modeling CO₂ emission allowance prices and derivatives: Evidence from the European trading scheme[J].Journal of Banking & Finance,2009,33(7):1230-1241.
- [7] Fang M, Tan S K, Wirjanto S T. Valuation of carbon emission allowance options under an open trading phase[J]. Energy Economics,2024,131,107351-.
- [8] Heston S L, Nandi S. A closed-form GARCH option valuation model[J].Review of Financial Studies,2000,13(3):585-625.
- [9] Hu Y, Øksendal B. Fractional white noise calculus and applications to finance[J].Infinite Dimensional Analysis, Quantum Probability and Related Topics, 2003,6(1):1-32.
- [10] Li X, Shi J, Valerie M T, et al. Carbon emission permit price volatility reduction through financial options[J].Energy Economics,2016(53):248-260.
- [11] Liu H, Zhu Y. Carbon option pricing based on uncertain fractional differential equation: A binomial tree approach[J].Mathematics and Computers in S

- imulation,2024,225,13-28.
- [12] Liu Z, Huang S. Carbon option price forecasting based on modified fractional Brownian motion optimized by GARCH model in carbon emission trading[J].North American Journal of Economics and Finance,2021,55.
- [13] Liu Z, Huang S. Research on pricing of carbon options based on GARCH and B-S Model[J].Journal of Applied Science and Engineering Innovation, 2019,6(3).
- [14] Necula C. Option pricing in a fractional Brownian motion environment[R]. Bucharest: Bucharest University of Economics, Center for Advanced Research in Finance and Banking,2008.
- [15] Peters E E. Fractal structure in the capital markets[J].Financial Analysts Journal,1989,45(4):32-37.
- [16] Svetlana V, Yulia V, Veld M, et al. The forecasting accuracy of implied volatility from ECX carbon options[J].Energy Economics,2014,45.
- [17] Yan Qin, et al. Carbon Market Year in Review 2022[R].Refinitiv,2023.
- [18] Ying Y, Yue Y. China-style "Acid Rain Plan"—A Pricing Formula for Carbon Option[P].3rd International Conference on Green Materials and Environmental Engineering(GMEE2017),2017.
- [19] Yue L, Lixin T, Huaping S, et al. Option pricing of carbon asset and its application in digital decision-making of carbon asset[J].Applied Energy,2022,310
- [20] Zhai D, Zhang T, Liang G, et al. Quantum carbon finance: Carbon emission rights option pricing and investment decision[J].Energy Economics,2024, 134,107628-.
- [21] Zhibin Chen, Stefano De Clara, Baran Doda, et al. Emissions Trading Worldwide: 2023 ICAP Status Report[R].ICAP.2023.
- [22] 陈星星.中国碳排放权交易市场:成效、现实与策略[J].东南学术,2022(04):167-177.

- [23] 程永伟,穆东.我国试点碳市场运行效率评价研究[J].科技管理研究,2017,37(04):96-100.
- [24] 冯丽凝,安毅.碳排放市场发展与期货合约设计探析[J].中国证券期货,2022,(03):4-11.
- [25] 冯路,何梦舒.碳排放权期货定价模型的构建与比较[J].经济问题,2014(05):21-25.
- [26] 郝野,王玉文.新型碳金融衍生品的设计与低碳风险管理[J].哈尔滨师范大学自然科学学报,2018,34(04):1-5.
- [27] 何婧钰.碳排放权期权定价模型的构建与应用研究[J].投资与合作,2023,(07):4-6.
- [28] 何梦舒.我国碳排放权初始分配研究——基于金融工程视角的分析[J].管理世界,2011(11):172-173.
- [29] 雷鹏飞,孟科学.碳金融市场发展的概念界定与影响因素研究[J].江西社会科学,2019,39(11):37-44+254.
- [30] 李竹薇,卢雪姣,杨倩倩,王晓姗.我国碳期权产品研发设计——以碳排放配额为基础标的[J].投资研究,2022,41(05):53-68.
- [31] 林汝星.碳期权的价格信号在碳市场中的有效性探究[J].全国流通经济,2022(26):107-111.
- [32] 刘悦,杨爱军,林金官.基于机制转换模型的碳排放权期权定价[J].数理统计与管理,2019,38(02):225-234.
- [33] 卢治达.碳金融对资源型产业低碳化的影响研究——基于 CDM 的实证研究[J].金融理论与实践,2020(11):57-62.
- [34] 吕靖焯,曹铭,李朋林.中国碳排放权交易市场有效性的实证分析[J].生态经济,2019,35(07):13-18.
- [35] 马忠玉,翁智雄.中国碳市场的发展现状、问题及对策[J].环境保护,2018,46(08):31-35.
- [36] 齐绍洲,张振源.碳金融对可再生能源技术创新的异质性影响——基于欧盟碳市场的实证研究[J].国际金融研究,2019(05):13-23.

- [37] 钱谊.跳-扩散碳排放市场模型下的碳配额价格与期权定价[J].数学的实践与认识,2023,53(11):94-103.
- [38] 秦学志,林先伟,王文华.基于长记忆性特征的欧式期权模糊定价研究[J].系统工程理论与实践,2019,39(12):3073-3083.
- [39] 宋晓玲,孔垂铭.中国碳交易市场对地区经济结构影响的实证分析[J].宏观经济研究,2018(09):98-108.
- [40] 唐跃军,黎德福.环境资本、负外部性与碳金融创新[J].中国工业经济,2010(06):5-14.
- [41] 王超,杨宝臣.碳市场对商品、金融市场的溢出效应分析[J].南开学报(哲学社会科学版),2021(05):110-122.
- [42] 王春霞,李佳彪.碳排放配额约束下碳期权设计及估值研究[J].价格理论与实践,2023,(07):156-159+211.
- [43] 王婧,王光明.低碳经济路径下的绿色金融创新模式探讨[J].新金融,2010(12):53-59.
- [44] 王军锋,张静雯,刘鑫.碳排放权交易市场碳配额价格关联机制研究——基于计量模型的关联分析[J].中国人口·资源与环境,2014,24(01):64-69.
- [45] 熊灵,齐绍洲,沈波.中国碳交易试点配额分配的机制特征、设计问题与改进对策[J].武汉大学学报(哲学社会科学版),2016,69(03):56-64.
- [46] 徐静,储盼,任庆忠.碳排放权期权定价及实证研究[J].统计与决策,2015(06):162-165.
- [47] 杨锦琦.我国碳交易市场发展现状、问题及其对策[J].企业经济,2018,37(10):29-34.
- [48] 于倩雯,吴凤平,沈俊源,程铁军.碳金融市场中基于模糊测度和 Choquet 积分的碳期权估值[J].北京理工大学学报(社会科学版),2020,22(01):13-20.
- [49] 余湄,程志勇,邓军等.一个新的期权定价方法:基于混合次分数布朗运动的新视角[J].系统工程理论与实践,2021,41(11):2761-2776.
- [50] 余一卿,王泽霞.期权定价模型在我国碳排放权估值中的应用——以广州恒运(000531)碳排放权价值评估为例[J].生产力研究,2017(01):100-105.

- [51] 张波,蒋远营.基于中国股票高频交易数据的随机波动建模与应用[J].统计研究,2017,34(3):107-117.
- [52] 张晨,刘宇佳.基于 DGC-MSV-t 模型的欧盟碳市场信息流动研究[J].软科学,2017,31(02):130-135.
- [53] 张晨,彭婷,刘宇佳.基于 GARCH-分形布朗运动模型的碳期权定价研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2015,38(11):1553-1558.
- [54] 赵静,许向阳.基于中碳市值指数的碳期权合约设计研究[J].中国林业经济,2019(06):79-82.
- [55] 赵小攀,李朝红,任晓鸽.基于 Black-Scholes 期权定价模型的碳排放权定价[J].商业会计,2016(07):28-31.
- [56] 朱丽.关于碳市场和碳排放权期货的思考[J].企业观察家,2021(09):88-89.
- [57] 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(05):27-30.
- [58] 祝叶,袁中华.碳排放期权定价及实证研究——以湖北碳排放交易中心为例[J].中国商论,2024,(01):118-121.

后 记

时光荏苒，三年的硕士研究生生涯即将画上美好的句号。在这充实而难忘的时间里，我深刻地体会到学术路上的艰辛和温暖，借此机会，我也想表达我对所有支持、关心和帮助过我的人们的真挚感激之情。

青青园中葵，朝露待日晞。首先，要感谢母校为我提供的学术资源和研究平台。校园的学术氛围为我提供了广泛的学科视野，为我的研究生学习提供了优秀的师资和环境。

其次，要衷心感谢我的导师。您是我学术道路上的引路人，在您的悉心指导下，我不仅获得了专业知识的磨练，更培养了独立思考和解决问题的能力。您的言传身教是我学术成长的重要支撑。

最后，更要感谢我的父母。是你们一直以来的关爱和支持，让我在追求知识的道路上坚定不移，你们的无私奉献和理解让我能够全身心地投入学习，为此我感到无比幸运。

同时，也要感谢师门和同窗们一路的相伴，愿我们未来的路上繁花似锦，各自纷呈。总之，感谢所有陪伴和帮助我的人们，本人将谨记教诲，在今后学习与工作道路上，不忘初心，砥砺前行。