

摘要

应对二氧化碳等温室气体造成的全球气候变暖问题已成为人类共同命题，碳排放权交易作为减排的“市场化”手段被纳入环境经济政策，为实现“碳达峰”和“碳中和”目标企业科技创新和产业结构变革刻不容缓。在碳市场的有关研究中，绝大部分中文和英文文献都是围绕较为成熟的欧盟碳排放交易体系展开，近几年英文文献研究对象存在向中国试点碳市场偏移的趋势，但是基本都离不开绿色低碳和可持续发展这一话题。一些研究结果表明：碳排放量和经济发展水平息息相关，提高能源利用效率与限制碳排放量齐头并进才是实现碳排放目标的有效策略；碳排放权配额分配首先要考虑公平原则，不同的分配规则将导致差异性的减排利润和产品价格；碳价格受到定价机制、经济和环境等多方面因素影响，研究的最多的是碳市场和能源市场之间的联系。回顾过往文献，针对二氧化碳排放总量的碳核算和针对碳排放权分配的碳配额已有不少研究成果，探讨影响碳价格波动的因素及其作用机理仍较有前景和研究空间。

本文以广州碳排放权交易所交易的广东碳配额为研究对象，首先通过可视化手段分析中国碳排放权交易现状以及广东碳配额在碳市场上的地位，运用 ARIMA-GARCH 模型分析广东碳配额价格的波动性。本文从碳市场的需求和供给角度对碳排放权价格的影响机制进行理论分析，接着利用 2016 年 9 月 1 日至 2021 年 9 月 1 日的数据，通过时变量参数-向量自回归 (TVP-VAR) 模型分析能源价格、传统金融和其他碳市场等三重动机对广东碳排放权价格的时变影响，最后利用高斯过程回归 (GPR) 分析广东碳排放权价格对不同驱动因素的灵敏度。本文的实证研究得出以下结论：在 8 个影响因子中，广东碳价与深圳碳价和利率存在双向影响关系，但同时这两个影响因素的灵敏度指数最小；紧缩性的利率政策对广东碳价的调控在滞后 3 个月时效果更好，汇率政策在滞后 2 个月时效果更好；brent 原油、nymex 天然气和煤炭在广东企业生产所需燃料中的比重依次下降。最后，本文提出碳排放权价格变动有关的投资建议，并针对广州碳排放权交易所和国家节能减排进程提出合理化建议。

关键词：碳排放权价格；ARIMA-GARCH；TVP-VAR；GPR；sobol 方法

Abstract

Dealing with global warming caused by greenhouse gases such as carbon dioxide has become a common proposition of mankind. Carbon emission trading, as a "market-oriented" means of emission reduction, has been incorporated into environmental and economic policies. In order to achieve the goals of "carbon peak" and "carbon neutrality", scientific and technological innovation of enterprises and industrial structure reform are urgent. In the relevant research of carbon market, most Chinese and English literature focus on the relatively mature EU carbon emission trading system. In recent years, the research objects of English literatures have a trend of shifting to China's pilot carbon market, but they are basically inseparable from the topic of green, low-carbon and sustainable development. Some research results show that: carbon emissions are closely related to the level of economic development, improving energy efficiency and limiting carbon emissions are effective strategies to achieve carbon emissions goals; The allocation of carbon emission quotas should first consider the principle of fairness. Different allocation rules will lead to different emission reduction profits and product prices; Carbon price is affected by many factors, such as pricing mechanism, economy and environment. The most studied is the relationship between carbon market and energy market. Reviewing the previous literature, there have been many research results on the carbon accounting of total carbon dioxide emissions and the carbon quota for the allocation of carbon emission rights. It is still promising and research space to explore the factors affecting carbon price fluctuations and their mechanisms.

This paper takes Guangdong carbon quota traded in Guangzhou Carbon Emission Rights Exchange as the research object. First, it analyzes the current situation of China's carbon emission rights trading and the position of Guangdong's carbon quota in the carbon market through visual means, and uses ARIMA-GARCH model to analyze the volatility of Guangdong's carbon quota price. This paper makes a theoretical analysis of the impact mechanism of carbon emission rights price from the perspective of demand and supply of the carbon market, and then uses the data from September 1, 2016 to September 1, 2021 to analyze the time-varying impact of energy prices, traditional finance and other carbon markets on the price of carbon emission rights in Guangdong through the time variable parameter vector autoregression (TVP-VAR) model, Finally, Gaussian process regression (GPR) is used to analyze the

sensitivity of Guangdong's carbon emission price to different driving factors. The empirical study of this paper draws the following conclusions: Among the eight influencing factors, Guangdong carbon price has a two-way relationship with Shenzhen carbon price and interest rate, but the sensitivity index of these two influencing factors is the smallest; The tightening interest rate policy has a better effect on regulating the carbon price of Guangdong when it lags behind 3 months, and the exchange rate policy has a better effect when it lags behind 2 months; The proportion of brent crude oil, nymex natural gas and coal in the fuel required for production by Guangdong enterprises decreased in turn. Finally, this article proposes investment suggestions related to the price changes of carbon emission rights, and proposes rationalization suggestions for the Guangzhou Carbon Emission Rights Exchange and the national energy-saving and emission reduction process.

Key words: Carbon emission right price; ARIMA-GARCH; TVP-VAR; GPR; Sobol method

目录

摘 要	I
Abstract	II
第一章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 研究目标和研究内容	2
1.3 论文框架	3
1.4 创新与不足	4
1.4.1 创新点	4
1.4.2 不足	4
第二章 文献综述	5
2.1 碳排放权价格在碳市场研究中的前景	5
2.1.1 碳核算	5
2.1.2 碳配额	6
2.1.3 碳定价	7
2.2 文献评述	9
第三章 碳排放权交易	11
3.1 中国碳市场整体概况	11
3.1.1 中国碳排放权交易发展及碳排放来源	11
3.1.2 广东试点在国内和国际碳市场中的地位	16
3.2 广东试点碳市场概况	18
3.2.1 三种不同交易产品	18
3.2.2 广东碳配额成交价和成交额的变动趋势	19
3.2.3 广东碳配额的交易主体	21
第四章 广东碳排放权价格的实证分析	23
4.1 碳价格波动的内在规律	23
4.1.1 ARIMA-GARCH 模型理论基础	23
4.1.2 拟合分析	24
4.2 碳价格波动的三重动机	29
4.2.1 影响机制理论分析	29
4.2.2 TVP-VAR 模型理论基础	31
4.2.3 数据来源和描述性统计	33
4.2.4 TVP-VAR 结果分析	34
4.2.5 高斯过程回归和灵敏度分析	42
4.3 本章小结	46

第五章 结论和建议	47
5.1 结论	47
5.2 建议	47
参考文献	49
攻读博士/硕士学位期间取得的研究成果	52
致谢	53

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

全球气候变暖是关乎人类共同命运的环境问题，联合国政府间气候变化专门委员会报告指出，在全球经济增长和人口增长的驱动下，以发达国家工业化为主的温室气体排放将使 2100 年地球的平均表面温度比工业化前高出 $3.7^{\circ}\text{C}\sim 4.8^{\circ}\text{C}$ 。人类生产生活活动产生的二氧化碳等温室气体若不加以控制，届时排放量超过一定限度后气温的上升将打破原本的地球生态平衡，造成海平面上升、极端天气、珍稀物种消亡、冰川融化远古病毒暴露和热带流行传染病范围扩散等一系列不可逆转的严重后果。为此，工业二氧化碳排放量的测度和限制受到重视。

自 1992 年《联合国气候变化框架公约》达成后，环境经济政策纳入碳排放权交易，通过促使温室气体减排信用或排放配额的买卖，排放主体获得发展减排技术和控制排放的经济激励，从而以“市场化”的方式达到强制性控制温室气体排放的目的。一个区域的二氧化碳排放量达到某个至高点（峰值）后便开始平稳下降，此之谓“碳达峰”；“碳中和”则是社会产生的二氧化碳被可再生能源替代传统能源、植树造林和沼气回收等方式抵消，使净排放量为零。发生工业革命以后全社会产生的以二氧化碳为代表的温室气体总量一直在不断攀升，“碳达峰”和“碳中和”目标为碳配额的合理设置提供了依据。许多发达国家都已经历“碳达峰”并且规划 2050 年前达成“碳中和”目标，中国作为控排大国，积极履行应对气候变化这一全球命题的国际责任，习近平主席于 2020 年 9 月 22 日的联合国大会上承诺分别在 2030 年前和 2060 年前实现碳达峰和碳中和，在现有的发展水平下将比发达国家面临更紧迫的变革压力。

除了体现大国风范以身作则，为对应对气候变化这一人类命题贡献一份力量，中国亟需实现碳达峰和碳中和目标，还有内部和外部两个原因。对内，“碳中和”意在促进能源保障和产业转型，是中国经济的内在需求。对外，面对一些发达国家向未实施碳减排限额的国家（含中国）征收碳关税的意图，即便目前仍因为种种原因尚未实施，中国减少碳排放量也是在当今大国博弈和贸易摩擦不断的国际局势下保障自身利益的必行之路。自 2005 年欧盟碳排放交易体系（EU ETS）启动后，包括中国在内的不少国家都开始进行相关布局，据统计目前全球超过 40 个国

家和地区开展了碳排放权交易，中国碳排放权交易试点的建立借由 2010 年发布的《关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》拉开了帷幕。继 2011 年《碳排放权交易试点工作通知》圈定深圳、广东、上海、重庆、湖北、天津和北京七个试点碳排放交易省市后，福建也于 2016 年加入试点行列，在对碳排放权交易的不断探索和经验借鉴中将 2014 年印发的《碳排放权交易管理暂行办法》确定为纲领性和原则性文件，明确了交易环节和参与方所需履行的法律责任。中国碳排放权交易在短短几年内发展迅猛，2013 年至 2021 年碳成交额一直呈上升趋势，近几年生态环境部更是为规范全国碳市场中登记、交易和结算过程发布不少文件征求意见。生态环境部印发的《纳入 2019-2020 年全国碳排放权交易配额管理的重点排放单位名单》确定详细的管制企业范围，2021 年 5 月《碳排放权登记管理规则（试行）》、《碳排放权交易管理规则（试行）》和《碳排放权结算管理规则（试行）》三大“规则”的发布意味着我国碳交易市场的建设达到一个新高度，为 2021 年 7 月全国统一碳排放权交易市场的正式启用奠定制度基础。

近几年来，在中美贸易摩擦和新冠肺炎疫情等的影响下，国际局势愈发波诡云涌变化无常，政治、经济和生态环境中黑天鹅频现。随着 2022 年 2 月俄乌军事冲突的爆发，石油天然气等大宗商品价格大幅上涨，与能源市场联系紧密的碳排放权交易是否将受到较大影响？中国又能否通过货币政策等手段对碳市场进行间接干预？对碳排放权交易市场的价格进行研究，一方面能够合理解释我国碳市场的碳价波动，为碳定价提供依据，推动绿色金融发展并为投资者提供投资建议；另一方面合理的碳价有助于完善碳交易体系，对绿色低碳经济提供激励，优化能源消费结构，进而促进科技创新和产业结构变革，使我国稳步实现“碳达峰”和“碳中和”目标。

1.2 研究目标和研究内容

从十几年来国内外的实践经验来看，碳排放权交易被证明了其在减少温室气体排放上的有效性，相较于传统的为提高企业减排意愿采用的行政指令和经济手段，碳排放权交易是最具备成本效益的减排工具。于国家，开展碳排放权交易在达到减排目的的同时不仅可以弥补行政指令带来的边际减排效用递减的不足，还可以减少由于经济补贴造成的巨额财政负担；于企业，碳排放权交易一方面会为他们无节制和低效能的生产和排放带来额外的成本压力，另一方面会给投入使用

的新技术和清洁能源带来利润增加值，压力与驱动力并行。而碳排放权交易除了政策上对配额的设定，调整和分配以外，最值得关注的就是碳排放权价格的变化，为此本文的研究目标：

- （1）分析碳价格波动的内在规律和外部动机。
- （2）探讨不同市场之间的关联以及碳价格对不同驱动因素的灵敏度。
- （3）针对广东碳排放权价格波动提出投资和政策建议。

研究内容：本文首先梳理了文献综述，从历年对碳市场的研究中总结出最有前景的研究方向，通过与国内其他试点的对比，分析广东碳排放权交易的现状及研究价值，利用 ARIMA-GARCH 模型探讨广东碳排放权价格波动的内在规律，并针对三重动机对碳排放权价格的驱动机制进行理论分析。其次，采用 Granger 因果检验分析广东碳排放权价格和影响因子之间的影响关系，从 TVP-VAR 模型的脉冲响应函数中探讨不同时间间隔和时点三重动机造成的影响，再通过 GPR 和 sobol 方法进一步分析碳价对各影响因子的灵敏度。最后，通过实证部分的结论为投资者提供投资建议，完善碳交易体系。

1.3 论文框架

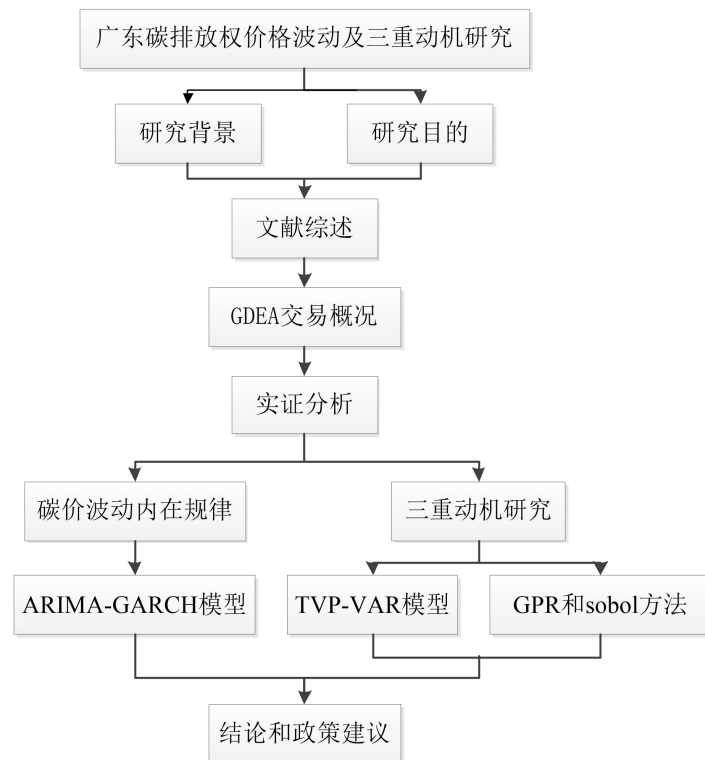


图 1-1 论文框架

1.4 创新与不足

1.4.1 创新点

第一，研究对象上，目前已有不少关于碳核算和碳配额的研究成果，但是对碳定价的探讨起步不久，针对不同因素对碳价的影响机理仍有较大研究空间。影响机理方面，过往研究对欧盟碳期货 EUA 和 CER 研究较多，中国试点较少，本文将多个价格影响因素分类，针对广东碳排放权交易进行相关探讨。

第二，在价格驱动因素的研究中，文献大多只将中国几个试点的碳价作为因变量研究，不少文献证明了中国碳市场和国际碳期货市场存在动态关系，但本文将其他市场的碳价格划分为一类广东碳排放权价格波动的动机指标，探讨广东市场与国内其他碳市场和欧盟碳期货市场间的动态关系是否与市场的距离有关，并比较参考定价与投资套利在此关系中发挥的作用差别。

第三，研究方法上，本文多采用组合模型，利用 ARIMA-GARCH 模型分析广东碳价波动的内在规律，分别通过 TVP-VAR 模型和 GPR+sobol 方法探讨外部动机的时变作用和影响力强弱，从两条路线完成对广东碳价的分析。

1.4.2 不足

本文不足之处在于使用的数据时间跨度较长，在不同空间距离碳市场对广东碳市场的影响研究中，北京、上海、福建和重庆市场的交易数据由于缺失较多，连续性远无法与广东和深圳等试点相比，无法纳入考虑。因此，本文在相关探讨中只纳入了欧盟碳排放交易市场、广东试点、湖北试点和深圳试点四个碳市场，剔除了国内其他交易试点。

第二章 文献综述

2.1 碳排放权价格在碳市场研究中的前景

在碳市场的有关研究中，发表时间较早的中文和英文文献大部分都涉及“碳排放”，为迎合绿色低碳的时代主题不少中文文献探讨了为发展“低碳经济”的“碳减排”方式，英文文献从“可再生能源”的角度应对全球变暖问题，在“碳排放”之后较多的是对碳配额分配方式和碳价格影响机制的分析。早期文献多以欧盟碳排放交易体系的欧盟排放配额（EUA）和核证减排量（CER）为研究对象，而近几年来英文文献中“中国”这一关键词出现的频率却不断上升，说明中国碳市场越来越受到学者的青睐（王文举和赵艳，2019）。

回顾过往文献，对碳市场的研究范围首先从碳排放总量的测定出发，探讨减少排放量的方法，其次是从管理者的角度研究如何转移碳排放权和分配排放配额，最后是碳市场实际交易涉及的碳价格和碳价机制问题，简而言之即为碳核算、碳配额和碳定价三大方向。

2.1.1 碳核算

碳核算主要从总量和减量两个方向进行研究，包括碳排放强度、总量及影响因素和碳泄漏等问题。碳排放交易体系的运作和经济息息相关，经济增长同样作用于碳排放，如，Lin 和 Jia（2019）指出国家排放交易系统对经济产出造成一定的抑制作用，但可以提高电价和减少碳排放量^[1]。Dong 等（2019）发现短期内碳排放交易计划无法对碳交易试点的 GDP 造成影响，但有利于碳减排；长期则能带动经济发展，存在波特效应^[2]。Wen 等（2019）利用双重差分法对深圳企业进行研究，发现企业参与碳排放交易能在一定程度上增加超额收益，抬高股票收益中的碳溢价^[3]。Jimenez-Rodriguez（2019）指出股票市场的欣欣向荣意味着实体经济的高能源需求，能源消耗提高碳排放量，进而使欧盟配额（EUA）价格上升^[4]。

经济增长会提高碳排放量，但另一方面，产业升级、技术变革和能源革命等能降低碳排放强度。如，Fang 等（2021）为确定不同的市场份额在讨价还价过程中采用的最佳技术，摒弃了“一个全球决策主体”的理想假设，提出一种基于异构代理的技术进行研究，证明了实施碳排放交易机制能够有效提高卖方对技术的

采用和减少碳排放^[5]。Ren 等（2021）分析了在碳价格难以确定的情况下中国聚乙烯管材料制造业原材料采购对整条供应链的影响，结果表明，碳市场的不确定性改变了碳链的总成本和二氧化碳排放量，其作用力从碳密集生产部门延伸至下游制造部门^[6]。

在碳泄露方面，Boutabba & Lardic（2017）用碳限制产品在不同国家之间的贸易量作为碳泄露指标，采用滚动协整法探讨碳泄露对钢铁和水泥行业的影响，结果表明两个行业的净进口与碳价格正向相关但钢铁行业的敏感度更高，碳泄漏基本无法对行业造成影响^[7]。此外，从我国 30 个省份的碳排放分配的达标数据来看，即便一些地区超额完成指标，但情况仍不理想，为实现碳排放目标应采取提高效率与减排并济的策略^[8]。杨秀汪等（2021）为证明中国碳交易试点政策能够有效推动碳减排，利用合成控制法（SCM）对试点和非试点地区的二氧化碳排放情况进行研究^[9]。由于过往研究在评估碳排放绩效时往往会忽略二氧化碳排放总量的固定限制，Li 等（2021）提出了 Malmquist-DEA 估计方法，即在传统 DEA 方法中，纳入固定和不良产出的衡量指标，并结合 Malmquist 生产率指数（MPI），能够更精确地估计碳排放绩效^[10]。

2.1.2 碳配额

国家在设定了碳排放权交易总量后，便要确定配额的分配问题。目前碳排放配额分配方法主要有拍卖、祖父（历史排放）法分配、固定的行业基准法分配，和基于产出和排放强度（历史强度下降法）的分配四种，其中除了拍卖，另外三种都属于无偿免费分配，因此配合方法又可归纳为有偿和免费两大类。国家制定配额分配方法后，各省份和自治区依据方法分配配额，在配合方法的指导下，当地企业获得配额。各地企业的配额，经过总量汇总成为地方配额，在最终汇总成国家配额。更具体地，省级生态环境厅在一级市场以免费或有偿竞拍、销售的方式向管辖地重点排放单位分配碳配额（CEA），重点排放单位再在二级市场交易核证自愿减排量（CCER）。

为达到国家碳减排目标，合理且公平地分配各省的碳排放配额至关重要，在碳市场建立初期政府一般以大量免费和少量有偿的形式进行分配，但随着市场制度的完善将会彻底转变为有偿分配以使资源得到有效配置。为实现初始二氧化碳配额的合理分配，Jiang 等（2018）利用全国和省际二氧化碳边际减排成本（MAC）

建立成本最小化模型，发现中国二氧化碳边际减排成本由东至西下降，到 2030 年河北和山东省分别拥有最大的减排和排放配额^[11]。针对碳排放配额分配的公平问题，Dong 等（2018）认为在中国区域发展条件下，支付能力、历史和人口、平等主义三大公平原则中，支付能力和平等主义更适合作为固定成本分配模型中的约束条件，研究发现东部比西部地区拥有更高的投入产出效率，也理应获得更多的配额^[12]。Song 等（2018）指出上海环境与能源交易所发布的碳政策以上海排放配额供求基本面为媒介传导对配额价格的影响，且该影响具有滞后效应^[13]。Zhang 等（2021）采用博弈论和夏普利价值分析中国碳排放交易试点的不同分配规则对相关企业产品价格和碳减排利润的影响，研究认为，产品价格不一定与低碳意识正相关，碳配额自由分配促进碳减排的能力优于拍卖，但只有拍卖规则能使零售价格与碳价格的涨跌方向一致，碳减排贡献的提高在大部分情况下比碳减排成本更能提高企业的碳减排利润^[14]。

2.1.3 碳定价

政府为实现碳排放目标逐渐将碳定价作为减排策略，即从税收、总量管制和交易机制调控市场行为。历年文献主要从两个角度对碳定价进行研究：定价机制和碳价影响因素。相比于碳排放权交易这种可以控制排放水平的定量制度，碳税是直接对企业使用化石燃料后产生的温室气体排放量征的税收，是只能直接作用于碳价的定价制度。碳市场和碳税虽同为基本的碳定价机制，但适用的行业、实施阻力、减排效果和公平与效率的侧重点皆存在不同，碳市场更适用于电力和钢铁行业，实施阻力小，减排效果更好且注重效率^[15]。

目前碳价格主要受制度、经济、社会和环境四大因素影响，其中对经济因素的研究较多，价格和影响因素之间存在一定的双向作用，相关分析逐渐从欧盟碳交易体系向中国碳交易试点转移。经济因素包括汇率、利率等金融变量和能源价格，如，Hao 和 Tian（2020）指出碳价会受到汇率的影响^[16]。Dutta 和 Anupam（2017）利用 EGARCH 模型证明了原油价格对碳市场排放价格的高影响力^[17]。Zhu 等（2017）根据欧盟排放交易计划将 2005 年至 2016 年的数据分成三个阶段，利用因果关系检验探讨碳和电力市场的相互作用，发现两个市场之间的因果关系逐渐由双向线性转变为单向关系，电力市场对碳价格的敏感度降低^[18]。Tan 和 Wang（2017）分别研究了能源价格和宏观经济风险因素对欧盟配额（EUA）的作用机制，发现在

欧盟排放交易计划三个阶段中，煤和气的价格影响均服从生产约束效应，到总需求效应，再到替代效应的演化路径，石油价格的影响则是替代效应到生产约束效应；在金融风险影响之前，相较于商品价格指数和国库券利率，能源价格对碳市场风险影响更大^[19]。Fan 和 Todorova（2017）将湖北、北京、深圳和广东四个交易试点的碳价与宏观变量回归分析，认为我国碳市场发展仍旧不均衡不完善，湖北的碳价格几乎不受国际天然气价格的影响，北京的补贴价格也不能显著提高公用事业、工业、能源和材料行业指数^[20]。Qiang 等（2018）在对碳市场和能源市场的信息流动研究中发现，碳价格和市场风险对原油价格敏感度较大，其他能源市场也会接收到来自碳市场的信息反馈，其中电价的接收力度最大。相较于收益率系统，波动率具有更高的连通性水平^[21]。Benedetti 等（2019）探讨了碳价格和化石燃料存量之间的关系，并为投资者设计智能碳投资组合以降低事后风险^[22]。白强等（2022）兼顾了金融变量和能源价格两方面的影响研究，通过变截距固定效应模型，证明了我国碳排放权交易价格受到南方原油指标和欧洲对人民币汇率的显著影响^[23]，但能源指标中的动力煤指数却对碳排放权交易价格没有显著作用。

在碳价格受市场机制、外部环境和季节三要素影响的假设条件下，Tang 等（2017）利用集成经验模型分解和方差比研究碳价格波动，发现环境对碳价格作用的持续时间比市场机制更长且频率更低，而欧盟排放交易系统的碳价格比清洁发展机制对市场机制和异质性环境的敏感度更高^[24]。Han 等（2019）利用 MIDAS-BP 模型证明了天气温度和空气质量指数与碳价的紧密联系^[25]。但白强等（2022）却从实证结果中指出，对同属于气候环境指标的日平均气温和空气质量指数，我国碳排放权交易价格对日平均气温敏感，对空气质量指数不敏感^[23]。

重大事件会成为改变参与者心态的社会因素，Zhu 等（2018）为研究全球金融危机和欧洲债务危机与碳价格波动的联系，提出一种基于集成经验模式分解（EEMD）的多尺度事件分析方法，从低频模式和残差上分析经济危机带来的影响^[26]。类似地，用传统 VAR 评估碳市场风险通常会由于多时间尺度和极端事件使结果出现误差，为此 Zhu 等（2019）提出多尺度 VAR-EMD 估计方法，在基于经验模式分解出的不同时间尺度上使用 ARMA-EGARCH 模型进行研究^[27]。

制度因素方面，研究普遍认为会影响碳排放权交易价格的制度主要有欧盟排放配额制度、核证减排量制度，以及政府出台的政策法规等。吕靖烨（2021）用高斯回归过程探讨了湖北等五个碳排放权市场的影响对欧盟排放配额和核证减排

量的灵敏度,得出碳市场对欧盟排放配额的灵敏度高于核证减排量的结论^[28]。Song 等(2019)利用中国七个碳排放交易试点的数据进行 Logit 回归,发现政策在发布出来的短期内会对碳期货市场造成即刻影响^[29]。Yin 等(2021)研究指出同时期中国试点碳价格和煤炭价格指数变动相似,碳市场通过政策传导其对煤炭市场运行的影响^[30]。

除了对碳核算、碳配额和碳定价的探讨,还有不少学者以碳市场为整体对市场成熟度进行研究。白强等(2022)针对北京等八个试点交易市场的价格波动构建 ARMA-GARCH 模型,结果显示八个试点都处于具有较大风险且波动非常不稳定的状态^[23]。Yi L 等(2018)构建了以环境和交易平台服务能力等四个不同属性衡量的碳市场成熟度评价指标体系,利用因子分析和层次分析评判不同试点的成熟度及其优势特征,深圳、北京、湖北和上海分别凭借成熟的市场化机制、多样化的排放控制主体和较强的环境约束、强有力的制度安排,和突出的平台服务能力成熟度位居前列^[31]。Liu 等(2019)设计了一个可用来衡量碳市场成熟度的基于熵的 TOPSIS 模型,选取 2013 至 2017 年七个碳市场试点的数据进行研究,结果显示,2017 年为止碳市场成熟度较高的前几位分别是湖北、广东、深圳和北京,试点总体波动发展成熟度较低^[32]。王文举和赵艳(2019)指出拥有准确的碳核算、碳配额和碳定价的碳市场才称得上是成熟的市场,目前已有不少关于碳核算和碳配额的研究成果,但是对碳定价的探讨起步不久,针对不同因素对碳价的影响机理仍有较大研究空间^[33]。唯有碳价维持稳定和有效性,才能推动碳市场稳固发展,为产业招商引资和技术变革起到经济激励,因此明确碳价的影响因素对“碳中和”目标的推进尤为重要。

2.2 文献评述

对碳市场的探讨主要集中在碳核算、碳配额和碳定价三个研究方向,此外还有对碳市场本身成熟度和风险的研究,研究目的多与环保主题挂钩,研究对象渐渐从欧盟碳排放交易体系向中国碳排放交易试点倾斜。碳核算方面,主流研究结果认为碳排放量虽与经济增长呈正相关,但经济增长带来的技术变革又能降低排放强度;碳配额方面,针对分配方法的合理性、公平性和有效性已有不少研究结果;碳定价方面,通过总结不同学者的研究,碳价格影响因素主要分为:以 EUA、CER 和政策为主的制度因素、以金融市场和能源市场价格波动为主的经济因素、

会改变投资者心态和企业减排意愿的社会因素，以及包括气温和空气质量指数的环境因素。

通过对历年文献进行梳理，发现目前较有前景的研究方向是碳价格的影响机理。过往研究对欧盟碳期货 EUA 和核证减排量 CER 研究较多，中国试点较少，在价格影响因素的研究中，文献多将中国几个试点的碳价都作为因变量，不少文献证明了中国碳市场和国际碳期货市场存在动态关系，但是缺少中国碳市场之间、单一碳市场与国内其他碳市场和欧盟碳期货市场间动态关系的对比分析。广东碳市场的配额交易量和交易额在我国八省市试点碳市场中长期名列前茅，因此，本文以广东碳排放权价格为研究对象。2021 年基于试点多年运行的经验以及对欧盟碳市场的学习在上海启用了全国碳排放权交易市场，统一的市场相比于试点无疑要更加成熟，在能够获得足够多的数据后，未来对碳排放权交易的研究可依此探讨中国碳价格的驱动动机并分析其作用机理，构建完善碳交易体系。

第三章 碳排放权交易

3.1 中国碳市场整体概况

3.1.1 中国碳排放权交易发展及碳排放来源

在中国，碳交易产品由生态环境部确定，如未增加其他产品，“碳排放权交易”买卖的对象主要指的是碳排放配额，以每吨二氧化碳当量价格作为交易计价单位，买卖申报量和申报价格的最小变动计量分别为一吨二氧化碳当量和 0.01 元人民币，重点排放单位和符合规定的机构和个人都能参与碳排放权交易。参与者在交易前需要向注册登记机构递交材料申请开立登记账户，申请材料会在规定工作日内被机构进行审核，审核通过则账户开立成功，此后可通过协议转让、单向竞价或挂牌点选等其他满足规定要求的办法获得碳配额。协议转让则分大宗协议交易和挂牌协议交易两种方式，前者单笔买卖最大申报数量不得超过十万吨二氧化碳当量，以上一个交易日收盘价上下浮动不超过 10% 为标准确定成交价格；后者单笔买卖最小申报数量不能小于十万吨二氧化碳当量，以上一个交易日收盘价上下浮动不超过 30% 为标准确定成交价格。而单向竞价是交易机构在参与者提出碳排放配额卖出申请后发布拍卖公告，有购买意向的受让方若符合条件可参与竞价，在规定时间内按照拍卖规则报价，最后通过交易系统成交。无论哪种交易方式，当日内已买入的碳配额都不得再卖出，但可将卖出所得资金用于当日交易。交易完成后当日，由注册登记机构进行全额清算，将结果反馈给交易机构，经注册登记机构和交易机构确认无误后，注册登记机构完成碳配额和资金的统一交收并将结算数据发送给参与者。

2022 年 3 月 12 日，广州碳排放权交易所发布的《碳中和报告（2021）》本着推动碳中和模式标准化进程的宗旨，首次对全国范围内各类碳中和模式的现状和存在的问题进行汇总分析。报告数据显示，2021 年我国共有 92 个组织、52 个活动、8 个产品与服务获得碳中和认证，举办会议论坛、商贸会展、体育竞技、文化庆典和政府会议等大型活动都要将产生的“碳排放”纳入考量。我国“双碳”目标的提出，使碳排放权交易市场受到前所未有的关注。自成立以来，目前我国仍旧交易活跃的碳市场有北京绿色交易所、天津排放权交易所、上海环境能源交易所、湖北碳排放权交易中心、广州碳排放权交易所、深圳排放权交易所和重庆联合产权交易所，由于第八家碳交易机构四川联合环境交易所无交易数据，因此不

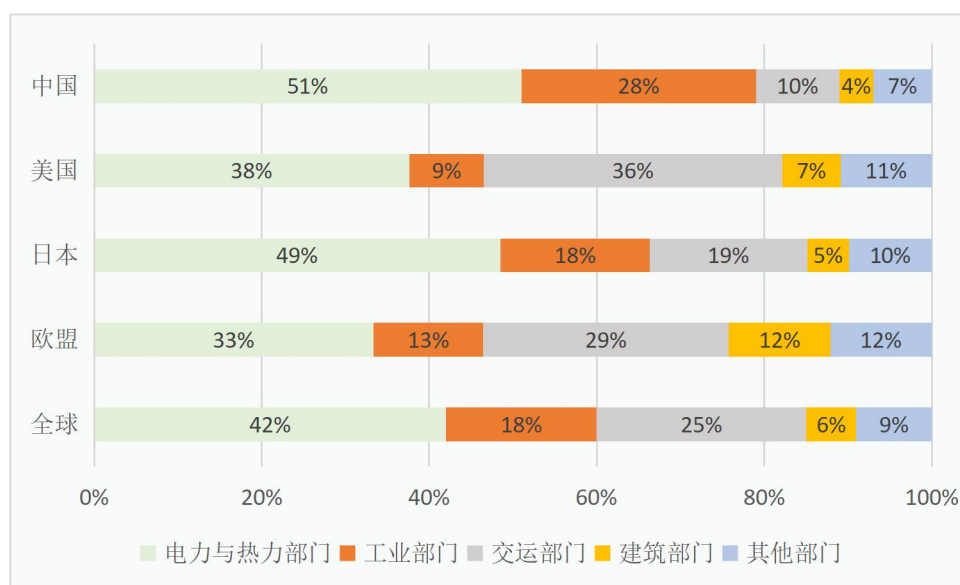
予介绍。各交易试点的成立时间和控排行业见表 3-1。

表 3-1 中国碳交易试点平台介绍

市场	成立时间	控排行业
北京绿色交易所	2013.11.28	工业:电力、热力、水泥、石化、其他工业; 非工业:事业单位、服务业、交通运输业
天津排放权交易所	2013.12.26	电力、热力、钢铁、化工、石化、 油气开采、造纸、航空、建筑材料
上海环境能源交易所	2013.11.26	工业:电力、钢铁、石化、化工、有色、 建材、纺织、造纸、橡胶和化纤; 非工业:航空、机场、水运、港口、商场、 宾馆、商务办公建筑、铁路站点
湖北碳排放权交易中心	2014.4.2	电力、热力、有色金属、钢铁、化工、 水泥、石化、汽车制造、玻璃、陶瓷、 供水、化纤、造纸、医药、食品饮料
广州碳排放权交易所	2013.12.19	电力、水泥、钢铁、石化、造纸、民航
深圳排放权交易所	2013.6.18	工业:电力、天然气、供水、制造; 非工业:大型公共建筑、公共交通
重庆联合产权交易所	2014.6.19	电力、电解铝、铁合金、电石、烧碱、 水泥、钢铁
福建海峡股权交易中心	2016.9.22	电力、石化、化工、建材、钢铁、 有色金属、造纸、航空、陶瓷

从中国碳交易试点平台介绍表中可明显看出，全国七个碳交易试点的控排行业都包括工业类的电力行业，石化行业和非工业类的航空行业也是控排重点。广州碳排放权交易所（简称广碳所）上线交易时间为 2013 年 12 月 19 日，重点行业电力和石化都在控排涵盖范围，除此之外，控排行业还包括水泥、钢铁和造纸，但非工业类覆盖面较小。

控排行业主要根据温室气体排放来源制定管控范围，从碳排放量大的部门和行业入手，向排放量小的部门和行业推进，碳排放管控依次收紧，逐步实现温室气体排放目标。全球主要国家和经济组织的碳排放来源构成有所差异，但排放量大的部门大体相同，不同部门在全球主要国家碳排放中的占比见图 3-1。



资料来源：IEA

图 3-1 全球主要国家碳排放来源构成

由上图可知，中国、美国、日本、欧盟乃至全球碳排放量最大的部门都是电力与热力部门，中国电力与热力部门产生的碳排放量在总排放量中占比最高，超过一半，在日本总碳排放量中的占比同样高达 49%，超过工业部门、交运部门和建筑部门占比的总和，在美国和欧盟的占比则略低于全球总体水平 42%，而其中又以欧盟最低，仅为 33%。在除中国以外的国家和经济组织，交运部门是第二大碳排放部门，其次是工业部门，第四是建筑部门。中国工业部门的碳排放占比达 28%，远高于交运部门 10% 的占比，建筑部门的碳排放占比在进行比较的国家和经济组织中最低，为 4%；美国交运部门的碳排放占比达 36%，与电力与热力部门 38% 的碳排放占比不相上下，工业部门又与建筑部门的碳排放比值相近；日本交运部门和工业部门的碳排放比值相近，分别为 19% 和 18%，建筑部门占比比中国高一个百分点，又比全球总体水平低一个百分点；欧盟的工业部门和建筑部门与美国情况相似，占比略高于美国，分别为 13% 和 12%，欧盟其他部门的碳排放也占了一定的比重。从中国的角度分析，按由高到低的次序排序，中国碳排放占比前三大部门依次是电力与热力部门、工业部门、交运部门、建筑部门。现阶段中国电力与热力部门和工业部门的碳排放占比不仅高于全球水平，更是远高于碳排放权交易较成熟的欧盟，因此认为中国为减少温室气体排放，应加大对电力与热力部门和工业部门的管控，减少免费碳配额发放，提高配额有偿竞价比例，大力支持电力与热力部门和工业部门进行工艺改造，加快减排技术在这两个部门落地。

从生产部门碳排放占比的差异考察碳排放主要来源和探讨中国碳排放权交易

改革方向尚且不够精细，为此，本文整理了中国不同行业的碳排放占比数据，全国近 90%的碳排放由九大行业贡献，具体见图 3-2。

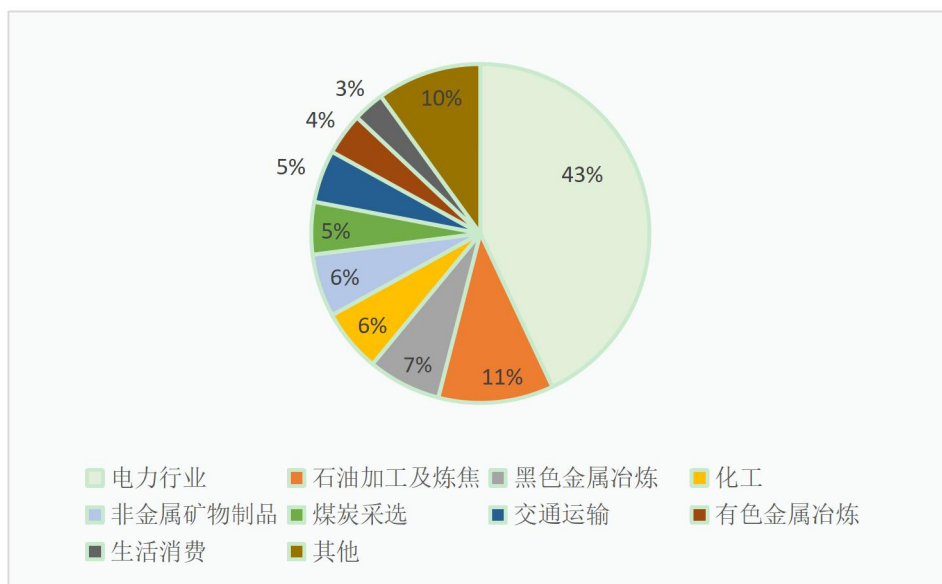
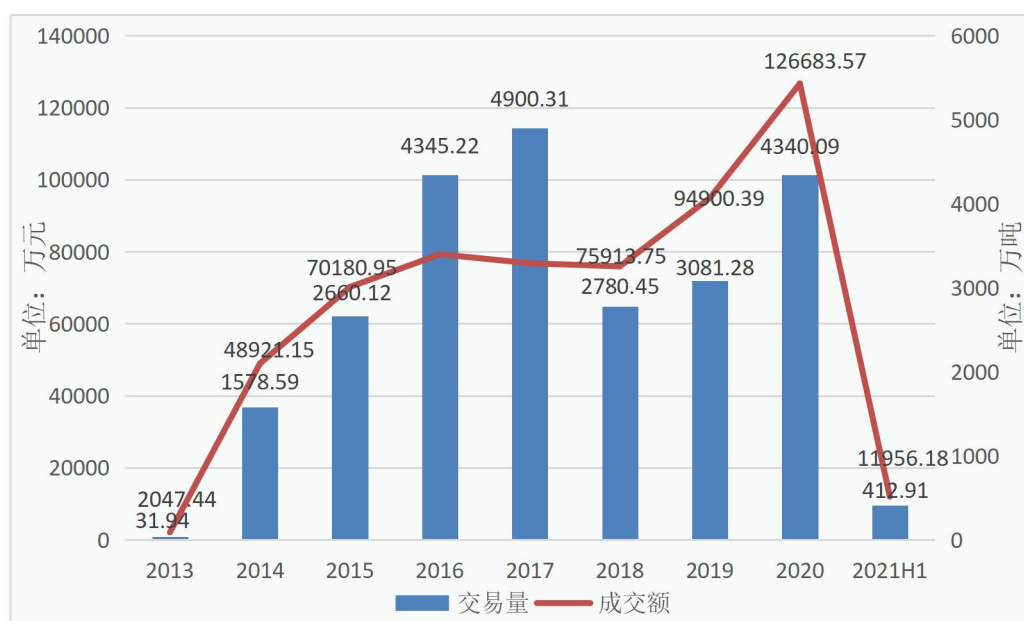


图 3-2 中国碳排放行业占比

由扇形图可知，电力行业的碳排放贡献量最大，占比 43%，与排行第二贡献了 11%碳排放的石油加工及炼焦行业加总，两个行业的合计碳排放贡献量占比超过全国总排放量的一半。碳排放排名第三的是黑色金属冶炼行业，占全国 7%的碳排放，其后化工与非金属矿物制品行业碳排放不相上下，贡献量为 6%。煤炭采选和交通运输行业的碳排放占比都为 5%，略高于分别占 4%和 3%的有色金属冶炼和生活消费行业。而上述碳排放量大的行业是**二级市场上碳排放权的重要买卖方**。

碳排放权交易最主要的考察指标无非是成交价格、成交量和成交额。由于在上海成立的全国碳排放权交易所于 2021 年 7 月上线交易，因此可根据 2013 年至 2021 年上半年中国碳排放权交易量和成交额的数据，绘制中国碳排放权交易试点的交易量柱状图和成交额折线图。其中 2016 和 2017 年交易量分别为 79260.29 和 76759.7 万吨，出于美观方面的考量未在图上进行标记。左侧纵轴数值代表成交额，以万元作单位，右侧纵轴数值代表交易量，以万吨作单位，具体见图 3-3。



数据来源：中国碳交易网

图 3-3 2013—2021 年中国碳排放权交易量和成交额

从图中信息可得知，2021 年上半年以前，中国碳排放权交易量存在两个上升阶段，分别是 2013 年至 2017 年和 2018 年至 2020 年。2013 年中国碳排放权交易试点陆续启动期间交易量较小，仅为 31.94 万吨，但在 2014 年高速上涨至 1578.59 万吨，此后以逐年下降的速率增长，并于 2017 年达到九年以来的最高峰 4900.31 万吨。2018 年的交易量与前两年相比出现断崖式下降，仅比 2015 年高 100 万吨左右，为 2780.45 万吨。此后交易量以逐年上升的速率增长，于 2020 年达到峰值 4340.09 万吨，仍旧不及 2016 和 2017 年的交易量，2021 年上半年的交易量则再次大跌至 412.91 万吨，总体呈“N”字型变动。碳排放权成交额从 2013 年的 2047.44 万元到 2014 年的 48921.15 万元，一年时间上涨幅度超过 20 倍，此后分别以 43.5% 和 12.9% 的速率增长至 2015 年的 70180.95 万元和 2016 年的 79260.29 万元。2016 年到 2018 年成交额开始以极小的幅度缓慢下跌，在 2018 年抵达峰谷后又急速上升，于 2020 年达到九年中成交额的最大值 126683.57 万元，但 2020 年到 2021 年上半年成交额又骤然下跌，总体呈“M”字型变动。成交额在 2013 年至 2016 年期间以逐年下降的速率上涨，在 2018 年至 2020 年期间以逐年上升的速率上涨，与交易量在这两个时间段的上涨趋势相同，但却在交易量达到最大值的 2017 年出现下降趋势，说明 2017 年前后碳排放权的交易价格大跌。

3.1.2 广东试点在国内和国际碳市场上的地位

为印证 2017 年前后碳配额价格处于低水平这一结论，考察 2013 年至 2021 年中国各碳排放权交易试点的价格波动。从中国碳交易网给出的碳试点价格变动趋势图可得知，在交易初期深圳试点碳排放权成交价最高，从 30 元左右起步，曾一路飙升至超过 100 元，广东试点碳价位列其后，早期成交价超过 60 元，再后者依次是北京、上海、天津、重庆、湖北试点。从 2014 年下半年开始碳价总体出现下降趋势，广东试点碳价退出前三，与上海和湖北试点一起于 2016 至 2017 年间缓慢跌至谷底，重庆试点碳价在 2017 至 2018 年间达到最低水平，中国碳排放权在 2016 至 2018 年基本都处于较低价格水平，符合从交易量和成交额变动中得出的结论。2018 年后北京试点碳价快速上升，并一直居高不下，上下波动剧烈，常年高于 50 元，远超其他试点的成交价。上海试点碳排放权成交价也以较小的波动幅度维持在高水位。广东试点碳排放权成交价自 2015 年后波动区间就一直处于中间水平，大多数时候略高于天津、重庆和福建试点的碳价，略低于湖北和上海试点的碳价，但相比其他交易试点表现得更加平稳。分析完中国碳交易试点成交价差异，接下来对截止 2021 年 6 月不同试点的累计交易量和交易额进行观察，分别绘制交易量扇形图和交易额柱状图。为了更直观地展现交易量大小，扇形图未用百分比的形式注释，而是直接标注交易量数值，具体见图 3-4。

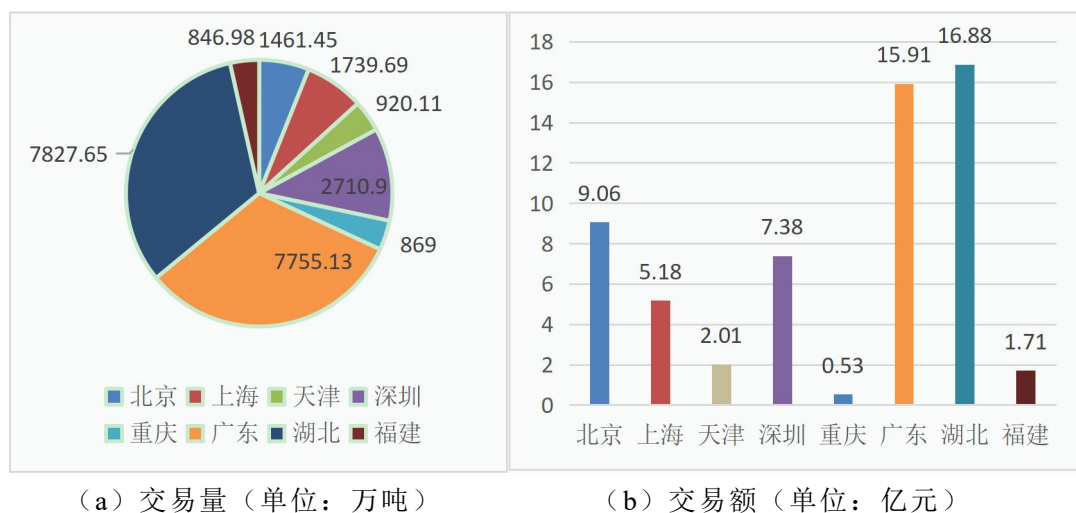


图 3-4 截止 2021 年 6 月中国碳交易试点累计交易量和交易额

交易量扇形图数据显示，截止 2021 年六月湖北试点累计交易量达 7827.65 万吨，位列全国碳交易试点之首。排名第二的是广东试点，累计成交量 7755.13 万吨，略低于湖北试点，两个试点的交易量遥遥领先，与成交量 2730.9 万吨排名第三的

深圳试点拉开巨大差距。深圳之后试点累计交易量由多到少排序依次是上海、北京、天津、重庆、福建试点，重庆和福建试点的累计交易量相近，最少的福建试点仅交易了 846.98 万吨。排名前二的湖北和广东试点累计交易量都逼近全国交易量的 1/3，湖北和广东以外的其他试点交易量总和为 8548.13 万吨，若再除去排在末端的福建试点的交易量则仅为 7701.15 万吨，甚至不及广东试点的交易量。交易额柱状图结果表明，截止 2021 年 6 月碳排放权累计交易额最高的前两名仍旧是湖北和广东试点，与其他试点拉开巨大差距，湖北试点第一，为 16.88 亿元，广东试点第二，为 15.91 亿元。但与交易量情况不同的是，交易额排名第三的不是深圳试点，而是北京试点，为 9.06 亿元，深圳试点则以 7.38 亿元的交易额位列第四。北京试点得以在交易额上反超交易量更多的深圳和上海试点，与其一直处于高位的碳排放权成交价离不开关系。深圳试点之后试点累计交易额由多到少的排列顺序依次是上海、天津、福建、重庆试点。重庆试点以 22 万吨左右的交易额与福建试点略微拉开差距，却在交易额上被福建试点以三倍不止的比率反超，成为唯一一个交易额未破 1 亿元的试点。天津试点 2.01 亿元的交易额与福建 1.71 亿元差距不大，紧随湖北的广东试点的交易额却是深圳试点的 2 倍不止、上海试点的 3 倍不止。综合交易量和交易额的情况来看，中国最主要最有借鉴意义和参考价值的碳排放权交易试点是广东和湖北试点，但由于湖北试点碳配额全部由政府免费发放，定价机制上与国际接轨程度不及广东试点。

对中国碳排放权交易试点进行对比分析后，考察广州碳排放权交易所在全球范围内的地位（图 3-5）。2005 年 1 月启动的欧盟排放交易体系（EU ETS）目前为止仍旧是国际最主要的碳市场，对中国排放交易体系的建设起到极大的借鉴作用，因此考虑欧洲的洲际交易所（ICE）和欧洲能源交易所（EEX）。此外，最有比较价值的是同为亚洲的碳市场，排除仍未建立碳排放权交易市场的发达国家新加坡，考虑同为发达国家的韩国的韩国交易所（KRX）和日本的日本东京都碳排放交易体系（TCTP）。2021 年二级市场配额现货交易量数据显示，成交量最大的仍旧是欧洲的碳市场，为洲际交易所的 61171.5 万吨，遥遥领先于其他碳市场。排名第二的是中国的全国碳交易平台，但考虑到其于 2021 年 7 月才开始正式上线交易，17878.94 万吨的交易量也相当可观。广州碳排放权交易所 2750.58 万吨的交易量位列第三，比欧洲能源交易所的 1515.2 万吨多 81.5% 不止，远超亚洲的另外两个韩国交易所和日本东京都碳排放交易体系。排名最后的日本东京都碳排放交

易体系 2021 年配额现货交易量甚至不足韩国交易所的一半，仅为 131.58 万吨。



数据来源：各交易平台公开数据

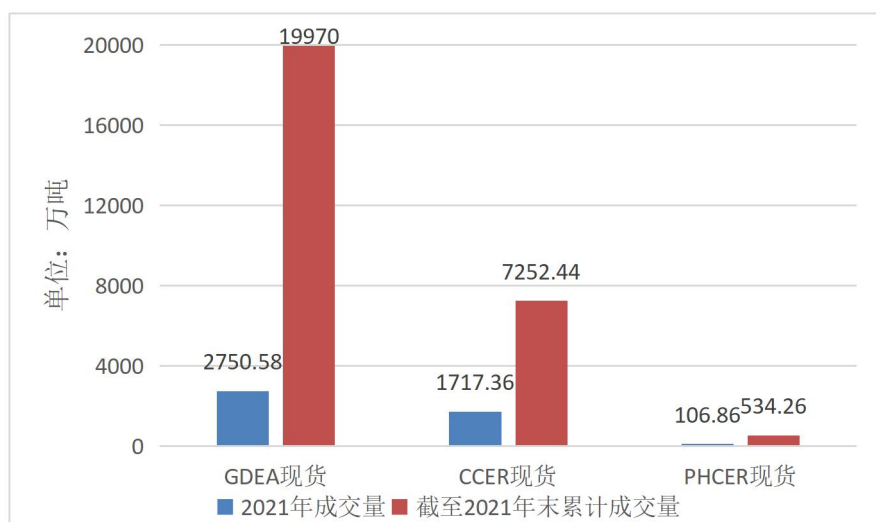
图 3-5 2021 年全球主要碳交易平台二级市场配额现货交易量

此外，全国八个碳交易试点 2021 年碳配额现货交易总量为 7404.78 万吨，广碳所二级市场的 2750.58 万吨在全国交易总量中占比达 37.14%，位列全国首位。结合上图所示，广碳所的交易活跃度与国际上老牌碳市场和发达国家碳市场相比也不遑多让，国内隐有将广碳所上线的碳排放权产品作为碳定价基准的趋势。

3.2 广东试点碳市场概况

3.2.1 三种不同交易产品

广州碳排放权交易所上线了三种碳排放权交易产品，分别是广东碳配额（GDEA）、中国核证自愿减排量（CCER）、广东碳普惠制核证减排量（PHCER）。2020 自然年度广东碳配额现货成交 3303.04 万吨，中国核证自愿减排量现货成交 1267.39 万吨，广东碳普惠制核证自愿减排量现货成交 189.26 万吨。与 2020 自然年度相比，2021 自然年度三种交易产品成交总量变化不大，但广东碳配额现货成交量下降 17%，中国核证自愿减排量现货成交量上涨 36%，此次变动极大地缩小了 2021 自然年度广东碳配额和中国核证自愿减排量现货成交量差距。这三种交易产品现货 2021 年的成交量和截至 2021 年末的累计成交量如图 3-6 所示。



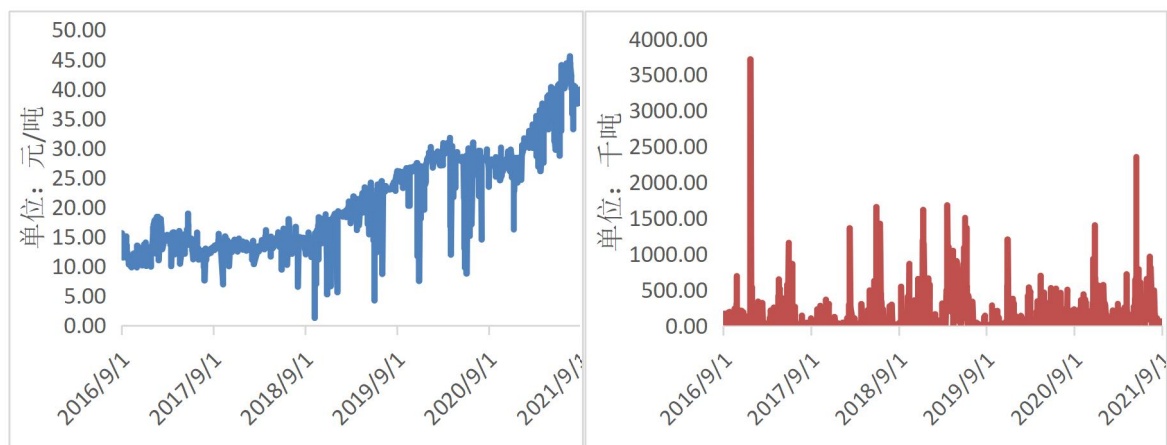
数据来源：2021 年广州碳排放权交易所市场报告

图 3-6 广东碳市场产品篮子成交量

上图左侧是广东碳配额现货数据，其 2021 年成交 2750.58 万吨，截至 2021 年末累计成交量是广东碳配额、中国核证自愿减排量、广东碳普惠制核证减排量三种碳排放权交易产品中最高的，达 19970 万吨，超过 2021 年成交量的 7 倍，远超中国核证自愿减排量和广东碳普惠制核证减排量现货累计成交量之和。中间是中国核证自愿减排量数据，其 2021 年成交量为 1717.36 万吨，接近累计成交量 7252.44 万吨的 1/4，较广东碳配额少 1000 万吨有余，而中国核证自愿减排量累计交易量较广东碳配额累计成交量少 64%。右侧为广东碳普惠制核证减排量数据，其无论是 2021 年成交量还是累计成交量都是三种碳排放权交易产品中最少的，2021 年成交量仅为 106.86 万吨，累计成交量仅为 534.26 万吨，2021 年成交量为累计成交量的 1/5。广东碳配额的累计成交量甚至超过广东碳普惠制核证减排量累计成交量的 37 倍，中国核证自愿减排量的累计成交量超过广东碳普惠制核证减排量累计成交量的 13 倍。即便 2021 年广东碳配额和中国核证自愿减排量成交量相差相对不大，但累计成交量还是有一定差距，为了简化研究，剔除中国核证自愿减排量和广东碳普惠制核证减排量。因此，本文所说的广东碳排放权交易的交易产品只考虑广东碳配额，“碳排放权价格”指的是广东碳配额价格。

3.2.2 广东碳配额成交价和成交额的变动趋势

本文选取 2016 年 9 月 1 日至 2021 年 9 月 1 日五年时间内广东碳配额的成交均价和当日成交量数据，分别绘制走势图，如图 3-7 所示。



(a) GDEA 成交均价

(b) GDEA 当日成交量

图 3-7 广东碳配额成交价格 and 交易量走势

上图结果表明，广东碳配额成交均价总体呈上升趋势。分阶段来看，广东碳配额成交均价在 2019 年以前，主要在 15 元/吨的价格水平上下浮动，最高不超过 20 元/吨，最低不低于 5 元/吨，成交均价波动幅度较小，该时间段相对平稳。2019 年至 2020 年 5 月，广东碳配额成交价格以较小的速率上升，从 15 元/吨左右达到 30 元/吨左右，总体上涨幅度约为 15 元/吨。该时期广东碳配额成交均价波动幅度较大，2019 年初期曾不断跌破至 5 元/吨以下，其后也不断出现比 2019 年以前更低的价格，低价格也以缓慢的速度上涨，整个时期呈严重拖尾现象，但是由于该时间段的整体上升趋势，弱化了上涨的价格带来的影响，因此基本并未出现差异特别明显的高价格水平。2020 年 5 月至 2021 年 2 月，广东碳配额成交价格存在极小的下降趋势，整体在 30 元/吨的价格水平浮动，频繁出现低价，仍旧存在严重的拖尾现象，最低价格低于 10 元/吨。此后，广东碳配额价格从 30 元/吨左右急剧上升，上涨速率较大，曾一度突破 45 元/吨，仍旧拖尾，但价格下跌的不夸张，基本不会跌破 25 元/吨。因而，2021 年 9 月相比于 5 年前的 2016 年 9 月，广东碳配额成交价格总体抬高了近 30 元/吨。广东碳配额当日成交量差异较大，最高突破 3500 千吨，最低不足 0.01 千吨，大多数位于 200 千吨上下。广东碳配额于 2016 年 12 月 23 日，达到五年以来最大成交量 3713 千吨，于 2017 年 5 月 31 日达 1152.60 千吨。此后，在 2018 至 2019 年期间，当日成交量不断突破 1000 千吨，但一直未超过 2000 千吨，直至 2021 年 5 月 18 日成交 2351.98 千吨，成为仅次于 2017 年 5 月 31 日的第二大成交量。

3.2.3 广东碳配额的交易主体

参与广东碳配额交易的可分为两大类，分别是控排企业和投资者，其中，投资者又分为个人投资者和机构投资者。数据显示，2021 年广东碳配额前十大交易主体交易量占比 47.29%，仅有 1 家控排企业，交易量占前十大交易主体 4.31%，排名第四，其余皆为投资机构；排名第一的交易主体交易量占比 11.80%，最后一名占比 2.08%，9 家投资机构总占比为 95.7%。2020 至 2021 年所有参与广东碳配额交易的投资者和控排企业交易量占比如图 3-8 所示。

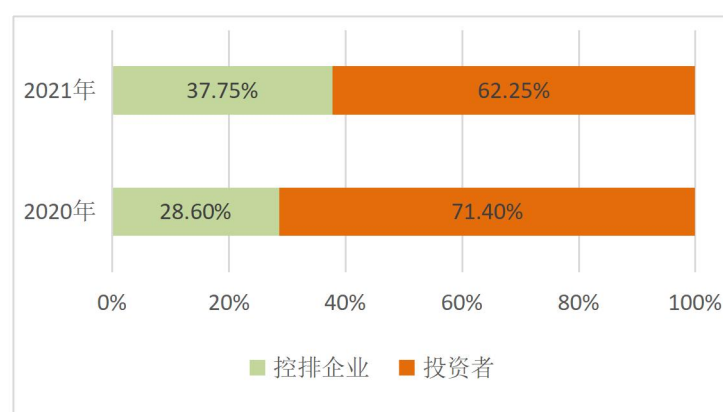


图 3-8 2020-2021 年控排企业和投资者 GDEA 交易量占比

由图可知，2020 年投资者和控排企业交易量占比差异较大，投资者交易占比 71.40%，近控排企业 28.60% 占比的 2.5 倍；2021 年二者间差异缩小，投资者交易占比 62.25%，为控排企业 37.75% 占比的 1.65 倍。2021 年控排企业交易占比上涨 32%，投资者交易占比下跌 13%。即便交易总量占比较高，在交易笔数占比上投资者却要低于控排企业。在参与碳配额交易的投资者中，一般情况下个人投资者的买入和卖出笔数高于机构投资者，交易更加频繁。如 2021 年个人投资者买入笔数占比 40.38%，远高于机构投资者的 3.27%；但个人投资者卖出笔数占比 22.62%，买入比卖出频繁，而机构投资者卖出笔数占比 16.53%，卖出比买入频繁。

广东碳交易试点不断完善和健全市场机制，提高企业碳管理意识。广东目前有 245 家控排企业，即便广州碳排放权交易所纳入管理范围的控排行业在全国 8 个试点中数量不算最多，仅有 6 个，覆盖范围也并不算最全面，无工业和非工业的划分，但 2013 年成立至今，控排企业的违约率均维持在极低水平。截至 2021 年 7 月 20 日，8 个履约期中有 5 个履约率达到 100%，其余都超过 99%。2019 至 2021 年广东碳市场造纸、民航、钢铁等 6 个控排行业的配额交易量占比如表 3-2 所示。

表 3-2 控排行业 GDEA 交易量占比

行业	占 2019 履约年度 交易总量比	占 2020 履约年度 交易总量比	占 2020 自然年度 交易总量比	占 2021 自然年度 交易总量比
发电	11.54%	22.36%	12.41%	23.27%
钢铁	5.44%	4.34%	5.02%	4.75%
水泥	4.79%	3.77%	7.64%	4.32%
造纸	2.19%	2.38%	1.96%	3.79%
民航	0.92%	0.08%	1.07%	0.04%
石化	0.46%	1.64%	0.50%	1.59%
总计	25.34%	34.56%	28.60%	37.75%

从表中信息可知,近三年以来,6 个控排行业碳配额交易量占比总和不断提高,从 2019 履约年度的 25.34%提高到 2021 自然年度的 37.75%。无论以履约年度还是以自然年度统计,广东控排行业中,碳配额交易量占比前三的始终是发电、钢铁和水泥行业。发电行业的碳配额交易量占比常年超过 10%,始终位列第一,与排名第二的行业拉开较大差距,钢铁和水泥行业的交易量占比则差距不大。与 2019 履约年度相比,2020 履约年度发电行业的碳配额交易量占比提高 94%,将近翻了一番,在 6 个行业的总交易量中占比则从 46%提高至 65%。除了发电行业,仅造纸和石化行业 2020 履约年度交易量占比有所提高,其中以石化行业最甚,提高到 3.6 倍。钢铁和水泥行业的占比下降幅度相近,较上一年下降 1 个百分点左右。与 2020 自然年度相比,2021 自然年度发电行业碳配额交易量占比提高 88%,在控排行业总交易量中占比从 43%提高到 62%。此外,仍旧仅有造纸和石化行业提高了交易占比,分别提高了 93%和 218%。即使 GDEA 合计交易量占比逐年提高,但从行业趋势来看,发电、造纸和石化行业的交易量占比处于上升趋势,钢铁、水泥和民航行业则处于下降趋势,上升幅度大于下降幅度,因此总体上升。

第四章 广东碳排放权价格的实证分析

4.1 碳价格波动的内在规律

碳价格波动往往受到内在和外部两个方面的驱动作用，但在常用的研究方法中，EMD 剔除过多非合意的市场干扰因素，GARCH 族模型拟合度较高但无法保证预测精度，而 ARIMA-GARCH 常被用来对金融市场股票或期货价格进行预测。为此，本文参考孙少岩和孙文轩（2019）的研究^[34]，采用 ARIMA-GARCH 模型探讨碳价波动的内在规律。

4.1.1 ARIMA-GARCH 模型理论基础

（1）ARIMA 模型。ARIMA 模型（Autoregressive Integrated Moving Average model），也叫整合滑动平均自回归模型，是将 ARMA 模型应用于差分后平稳的数据，并且只能处理平稳的时间序列。ARIMA(p, d, q) 中，AR 是“自回归”，p 为自回归项数；MA 为“滑动平均”，q 为滑动平均项数；d 为数据成为平稳序列所做的差分阶数。ARIMA 表达式为：

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 y_{t-1} + \cdots + \beta_p y_{t-p} + \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \cdots + \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (4-1)$$

其中， $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$ 是自回归系数， $\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_p$ 是移动平均系数，二者均为模型要估计的参数； $\{\varepsilon_t\}$ 是残差序列，要求为白噪声。ARIMA 模型在 p=0 或 q=0 时存在特殊形式，p=0 时不含自回归项，简化为 MA(q)：

$$y_t = \mu + \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} + \cdots + \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (4-2)$$

q=0 时不含移动平均项，简化为 AR(p)：

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 y_{t-1} + \cdots + \beta_p y_{t-p} + \varepsilon_t \quad (4-3)$$

（2）GARCH 模型。Bollerslev（1986）在 ARCH 模型的基础上加上扰动项条件方差的自回归部分，提出 GARCH（Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity），也叫广义自回归条件异方差模型，表达式为：

$$\sigma_t^2 = \alpha_0 + \alpha_1 \varepsilon_{t-1}^2 + \cdots + \alpha_q \varepsilon_{t-q}^2 + \gamma_1 \sigma_{t-1}^2 + \cdots + \gamma_p \sigma_{t-p}^2 \quad (4-4)$$

其中，p 为 σ_t^2 的自回归阶数，q 为 ε_t^2 的滞后阶数，扰动项 ε_t 的生成过程为：

$$\varepsilon_t = v_t \sqrt{\alpha_0 + \alpha_1 \varepsilon_{t-1}^2 + \cdots + \alpha_q \varepsilon_{t-q}^2 + \gamma_1 \sigma_{t-1}^2 + \cdots + \gamma_p \sigma_{t-p}^2} \quad (4-5)$$

其中, v_t 为白噪声, 且 $\alpha_0 > 0$ 。模型的约束条件为:

$$\sum_{i=1}^r \alpha_i + \sum_{j=1}^s \gamma_j < 1, \alpha_i \geq 0, i=1, 2, \dots, r, \gamma_j \geq 0, j=1, 2, \dots, s \quad (4-6)$$

GARCH 模型的扩展 TGARCH 为非对称的“门限 GARCH”模型, 与 GARCH 区别在于条件方差方程中加入了“TARCH”项 ($\varepsilon_{t-1}^2 \cdot 1(\varepsilon_{t-1} > 0)$):

$$\sigma_t^2 = \alpha_0 + \alpha_1 \varepsilon_{t-1}^2 + \lambda_1 \varepsilon_{t-1}^2 \cdot 1(\varepsilon_{t-1} > 0) + \beta_1 \sigma_{t-1}^2 \quad (4-7)$$

其中, $1(\cdot)$ 为示性函数, $\varepsilon_t > 0$ 时取值为 1, 否则为 0。

(3) ARIMA-GARCH 模型。从 (1) 和 (2) 可以推导出带 ARMA 的 GARCH 模型, 即 ARIMA(p, d, q)-GARCH(s, r) 过程的表达式为:

$$y_t = c + \sum_{i=1}^p \rho_i y_{t-i} + \dots + \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j} + \varepsilon_t \quad (4-9)$$

$$\sigma_t^2 = \alpha_0 + \sum_{i=1}^r \alpha_i a_{t-i}^2 + \sum_{j=1}^s \gamma_j \sigma_{t-j}^2 \quad (4-10)$$

$$a_t = \sigma_t \varepsilon_t \quad (4-11)$$

其中, 扰动项满足正态分布, 即 $\varepsilon_t \sim N(0, 1)$ 。

4.1.2 拟合分析

(1) 碳价波动特征分析。本文选取 2016 年 9 月 1 日至 2021 年 9 月 1 日广东碳配额成交均价数据进行分析, 为观察广东碳市场的市场风险程度, 首先对 GDEA 成交价格进行波动性检验, 依据公式 $r_{i,t} = \frac{P_{i,t} - P_{i,t-1}}{P_{i,t-1}}$ 对原数据进行处理, 绘制算数收益率波动图如图 4-1 所示。

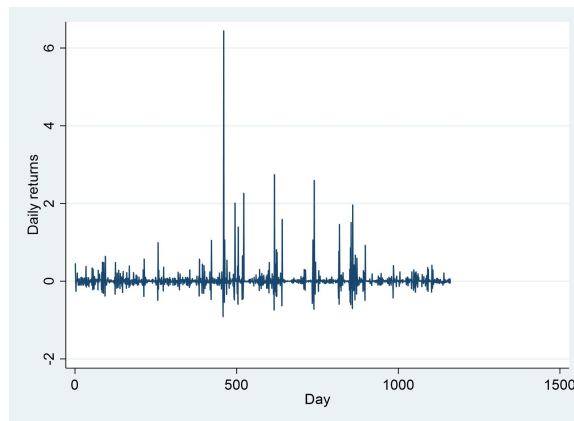


图 4-1 GDEA 收益率波动

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/405101313023012123>