



硕士学位论文

我国碳排放权交易机制的企业减排效应评估——基于函数型赋权与因果森林算法的实证分析

An empirical analysis of the emission reduction effect of China's emissions trading scheme on enterprises——based on functional weighting and causal forest algorithm

作 者：潘艳美
导 师：王许副教授

中国矿业大学
二〇二四年六月

中图分类号 F062.9

学校代码 10290

UDC 331.5

密 级 公开

中国矿业大学
硕士学位论文

我国碳排放权交易机制的企业减排效应评估——
基于函数型赋权与因果森林算法的实证分析

An empirical analysis of the emission reduction
effect of China's emissions trading scheme on
enterprises——based on functional weighting and
causal forest algorithm

作 者 潘艳美

导 师 王许

申请学位 经济学硕士学位

培养单位 经济管理学院

学科专业 数量经济学

研究方向 碳排放权交易机制

答辩委员会主席 王新宇

评 阅 人 盲审

二〇二四年六月

摘要

随着工业化的快速发展，全球气候变化问题日益严峻，其中碳排放量的增加已成为导致气候变化的主要原因之一。为了应对这一减排压力、实现可持续发展并履行国际减排承诺，中国提出了力争 2030 年前完成碳达峰，2060 年前实现碳中和的“双碳”目标，同时为力求成本控制，中国引入了碳排放权交易机制。自 2011 年中国开展碳排放权交易试点以来，各试点地区相继建立了碳交易市场。2013 年，深圳、上海、北京、广东和天津正式启动碳交易市场，随后湖北和重庆于 2014 年启动，福建于 2016 年启动。中国于 2021 年 7 月启动了全国碳市场。自碳排放权交易机制实施以来，碳排放权交易机制的减排效应一直受到关注，而企业作为碳减排的主要行动者和承担者，科学有效地量化评估碳排放权交易市场对企业碳排放量的影响，厘清其内在作用机制，明确政策的异质性效应，将有利于我国工业企业低碳转型的路径优化，有利于制定适当的规章制度与法律条例对企业进行监管、激励和引导，进而针对性地设计和完善碳排放权交易制度。

因此，本文采用合理的微观计量方法来评估碳排放权交易机制所覆盖企业的碳减排效果和碳减排效应的作用机理，并在减排效果和减排机理的基础上进行异质性层面的分析。本文首先在现有研究的基础上，通过函数型熵权计算影响企业碳排放的指标权重并结合分地区分行业的碳排放量以较为合理地估算出企业的碳排放量；然后，本文基于 2008-2019 年上市公司面板数据，采用因果森林算法研究碳排放权交易机制对企业碳排放量的基准影响，并通过筛选出各特征变量的重要性以开展碳排放权交易的企业碳减排异质性和调节效应分析；最后，本文运用平均因果中介模型从生产规模、管理费用率、融资约束和全要素生产率四个方面分析碳排放权交易影响企业碳排放的机制分析并进行相应的异质性分析，识别了地区与行业层面实现路径的异质性表现。通过上述研究，本文得出如下主要结论：

首先，碳排放核算所使用的研发投入和营业成本指标在不同地区具有不同的动态权重和变化趋势，并且碳排放权交易机制试点地区高耗能行业覆盖企业的碳排放量在时间和空间维度上具有不同的特征。其次，我国碳排放权交易机制显著降低了覆盖企业的碳排放量，而这一减排效果在不同地区、行业和不同类型企业间存在显著异质性；碳排放权交易机制主要通过提高缓解融资约束和提高全要素生产率的路径有效激励企业完成减排任务，而融资约束的贡献相对较高。鉴于减排目标或减排潜力等方面差异，碳排放权交易机制减排效应的作用路径在地区和行业间有所不同；更需要强调的是，配额分配方式、配额核算方法和碳市场参与主体的活跃度等与碳市场机制设计相关的要素在碳排放权交易政策企业减排

效应上发挥的调节效应有限。

本文结合上述结论对完善和优化我国碳排放权交易市场减排效应提出以下政策和建议。第一，持续优化碳市场机制设计，在建立全国统一碳市场的过程中，可以采用有偿分配的配额分配方式和以基准法为主的配额核算方法。第二，碳市场管理部门降低机构和个人等非履约主体的碳排放权交易市场准入门槛，发挥碳排放权交易市场的激励和约束作用。第三，尝试将更多高耗能行业纳入碳市场机制以提高碳交易市场的活跃度，从而形成对企业减排产生有效市场激励信号。第四，政府加大对企业的创新补贴并积极进行政策引导，激励企业通过技术创新完成减排任务。第五，根据地区、行业自身的发展特点设计有差别的碳排放权交易机制，以充分激发全国碳排放权交易机制的减排潜力。

关键词：碳排放权交易机制；企业碳减排；函数型熵权；因果森林算法；平均因果中介模型

Abstract

With the rapid development of industrialization, the problem of global climate change has become increasingly serious, and the increase of carbon emissions has become one of the main reasons leading to climate change. In order to cope with this pressure to reduce emissions, achieve sustainable development and fulfill international emission reduction commitments, China has put forward the "dual carbon" goal of striving to complete the carbon peak by 2030 and achieve carbon neutrality by 2060. At the same time, in order to strive for cost control, China has introduced a carbon emission trading mechanism. Since China launched carbon emissions trading pilot programs in 2011, various pilot areas have established carbon trading markets. In 2013, Shenzhen, Shanghai, Beijing, Guangdong, and Tianjin officially launched their carbon trading markets, followed by Hubei and Chongqing in 2014, and Fujian in 2016. China launched its national carbon market in July 2021. Since the implementation of the carbon emission trading scheme, the emission reduction effect of the carbon emission trading scheme has been concerned. As the main actors and undertakers of carbon emission reduction, enterprises need to scientifically and effectively quantify and assess the impact of the carbon emissions trading market on their carbon emissions, clarify its internal mechanism, and clarify the heterogeneity effect of the policy. This will be beneficial to the optimization of the low-carbon transformation path of China's industrial enterprises, and conducive to the formulation of appropriate rules, regulations, and laws to supervise, incentive, and guide enterprises, thereby designing and improving the carbon emissions trading system in a targeted manner.

Therefore, this thesis adopts a reasonable micro-measurement method to evaluate the carbon emission reduction effect of enterprises covered by the carbon emission trading scheme and the mechanism of carbon emission reduction effect, and on this basis, analyzes the heterogeneity of emission reduction effect and emission reduction channels. Firstly, based on the existing research, this thesis calculates the weights of the indicators that affect the carbon emissions of enterprises by functional entropy weight and estimates the carbon emissions of enterprises reasonably by combining the carbon emissions of different regions and industries. Then, based on the panel data of listed companies from 2008 to 2019, this thesis adopts the causal forest algorithm to study the baseline impact of carbon emission trading mechanism on corporate carbon emissions, and analyzes the heterogeneity and regulatory effects of carbon emission trading by screening out the importance of each characteristic variable. Finally, this

thesis uses the average causal intermediary model to analyze the mechanism of carbon emission trading affecting corporate carbon emissions from four aspects: production scale, management cost rate, financing constraints and total factor productivity, and conducts the heterogeneity analysis of the mechanism, identifying the heterogeneity of the implementation path at the regional and industry levels. Through the above research, this thesis draws the following main conclusions:

First of all, the indexes of R&D investment and operating cost used in carbon emission accounting have different dynamic weights and changing trends in different regions, and the carbon emissions of enterprises covered by high-energy-consuming industries in pilot regions of carbon emission trading scheme have different characteristics in terms of time and space. Secondly, China's carbon emission trading mechanism significantly reduces the carbon emissions of covered enterprises, and this emission reduction effect is significantly heterogeneous among different regions, industries and different types of enterprises. The carbon emission trading mechanism mainly encourages enterprises to complete the emission reduction task by improving the path of easing financing constraints and improving total factor productivity, while the contribution of financing constraints is relatively high. In view of the differences in emission reduction targets or emission reduction potential, the path of emission reduction effect of carbon trading scheme is different among regions and industries. It should be emphasized that factors related to the design of carbon market mechanism, such as quota allocation method, quota accounting method and the activity of carbon market participants, have limited regulating effects on the emission reduction effect of carbon emission trading policies.

Based on the above conclusions, this thesis puts forward the following policies and suggestions to improve and optimize the emission reduction effect of China's carbon emission trading market. First, continue to optimize the design of carbon market mechanism, in the process of establishing a national unified carbon market, the quota allocation method of paid allocation and the quota accounting method based on the benchmark method can be adopted. Second, the carbon market management department should lower the threshold for non-performing entities such as institutions and individuals to enter the carbon emission trading market, and give play to the role of incentives and constraints of the carbon emission trading market. Third, try to include more energy-intensive industries into the carbon market mechanism to improve the activity of the carbon trading market, so as to form an effective market incentive signal

for enterprises to reduce emissions. Fourth, the government increases innovation subsidies for enterprises and actively provides policy guidance to encourage enterprises to complete emission reduction tasks through technological innovation. Fifth, differentiated carbon emission trading mechanisms should be designed according to the development characteristics of regions and industries, so as to fully stimulate the emission reduction potential of the national carbon emission trading mechanism.

Keywords: Carbon emission trading scheme; Enterprise carbon reduction; Functional entropy weight; Causal forest algorithm; Average causal mediation model

目 录

1 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究意义.....	5
1.3 研究设计.....	6
1.4 论文的创新点.....	9
2 理论基础和文献综述	10
2.1 碳排放权交易机制理论基础	10
2.2 碳排放的核算及其影响因素研究	12
2.3 碳排放权交易机制减排有效性评估的方法研究	15
2.4 环境经济政策评估实证分析方法研究	16
2.5 文献述评	18
3 我国碳排放权交易机制覆盖企业碳排放核算研究	20
3.1 问题提出	20
3.2 我国碳排放权交易机制覆盖企业碳排放量的测算	21
3.3 变量选取与数据来源.....	24
3.4 我国碳排放权交易机制覆盖企业碳排放量的结果分析	25
3.5 本章小结	29
4 我国碳排放权交易机制对企业碳排放量影响的实证研究	30
4.1 问题提出	30
4.2 模型构建、变量选取与数据来源	31
4.3 碳排放权交易机制企业碳减排效果的实证分析	36
4.4 本章小结	47
5 我国碳排放权交易机制减排效应的作用机理分析	48
5.1 问题提出	48
5.2 模型构建、变量选取与数据来源	48
5.3 碳排放权交易机制作用机理的理论分析	50
5.4 碳排放权交易机制作用机理的实证研究	52
5.5 本章小结	57
6 总结与展望.....	58
6.1 研究结论.....	58
6.2 政策建议	59
6.3 研究不足与展望.....	61
参考文献.....	63

图清单

图序号	图名称	页码
图 1-1	2021 年中国工业行业碳排放量占比	1
Figure 1-1	Distribution of energy consumption in China's industrial sectors in 2021	1
图 1-2	工业高耗能行业的碳排放量	2
Figure 1-2	Carbon emissions of industries with high energy consumption	2
图 1-3	中国减排政策的演变	2
Figure 1-3	The evolution of China's emission reduction policy	2
图 1-4	各试点地区碳排放量	4
Figure 1-4	Carbon emissions of each pilot area	4
图 1-5	技术路线图	8
Figure 1-5	Technology roadmap	8
图 3-1	各试点地区指标权重变化	23
Figure 3-1	The index weight changes in each pilot region	23
图 3-2	各试点地区覆盖企业平均碳排放的变化情况	27
Figure 3-2	Changes in the average carbon emissions of enterprises in each pilot area	27
图 3-3	各试点地区覆盖企业平均碳排放增长率的变化情况	27
Figure 3-3	Changes in the average carbon emission growth rate of covered enterprises in each pilot area	27
图 3-4	各行业覆盖企业平均碳排放的变化情况	28
Figure 3-4	Changes in the average carbon emissions of covered enterprises in various industries	28
图 3-5	各行业覆盖企业平均碳排放增长率的变化情况	29
Figure 3-5	Changes in the average carbon emission growth rate of covered enterprises in various industries	29
图 4-1	碳排放权交易对企业碳排放影响的处理效应分布	37
Figure 4-1	Distribution of treatment effects of carbon emission trading on carbon emissions of enterprises	37
图 4-2	变量重要性	38
Figure 4-2	Importance of variable	38
图 4-3	碳排放权交易对企业碳排放的平均因果效应随企业资产变化情况	39
Figure 4-3	The average causal effect of carbon emission trading on corporate carbon emissions varies with corporate assets	39
图 4-4	碳排放权交易对企业碳排放的平均因果效应随企业固定资产支出变化情况	40
Figure 4-4	The average causal effect of carbon emission trading on enterprises' carbon emissions changes with enterprises' fixed asset expenditure	40
图 5-1	碳排放权交易机制对企业碳排放量的作用机理理论分析	52
Figure 5-1	Theoretical analysis of the effect mechanism of carbon emission trading mechanism on carbon emissions of enterprises	52

表清单

表序号	表名称	页码
表 3-1	变量的描述及数据来源	24
Table 3-1	Description of variables and data source	24
表 4-1	控制变量的描述、测度方法和数据来源	33
Table 4-1	Description of control variables、measurement methods and data sources	33
表 4-2	试点地区相关变量的描述性分析	34
Table 4-2	Descriptive analysis of relevant variables in the pilot area	34
表 4-3	非试点地区相关变量的描述性分析	35
Table 4-3	Descriptive analysis of relevant variables in non-pilot areas	35
表 4-4	碳排放权交易对企业碳排放的影响	36
Table 4-4	The impact of carbon emission trading on corporate carbon emissions	36
表 4-5	异质性检验	37
Table 4-5	Heterogeneity test	37
表 4-6	各地区异质性检验	40
Table 4-6	Regional heterogeneity test	40
表 4-7	各行业异质性检验	41
Table 4-7	Industry heterogeneity test	41
表 4-8	试点地区碳市场机制设计	43
Table 4-8	Design of carbon market mechanism in pilot areas	43
表 4-9	试点地区碳市场运行机制变量描述	43
Table 4-9	Description of operating mechanism variables of carbon market in pilot area	43
表 4-10	碳市场运行机制的调节效应结果	44
Table 4-10	The regulatory effect of the operating mechanism of carbon market	44
表 4-11	调节效应结果稳健性检验	44
Table 4-11	Robustness test of moderating effect results	44
表 4-12	稳健性检验结果	46
Table 4-12	Robustness test results	46
表 5-1	碳排放权交易机制对企业碳减排的影响机制检验结果	53
Table 5-1	Test results of the impact mechanism of carbon emission trading mechanism on enterprise carbon emission reduction	53
表 5-2	碳市场机制对不同行业的企业碳减排的影响机制检验结果	54
Table 5-2	Test results of the influence mechanism of carbon market mechanism on carbon emission reduction of enterprises in different industries	54
表 5-3	碳市场对不同地区的企业碳减排的影响机制检验结果	55
Table 5-3	Test results of the mechanism of carbon market influence on carbon emission reduction of enterprises in different regions	55

变量注释表

CE	企业碳排放量（亿吨）
ZZC	企业总资产（亿元）
ZCFZL	资产负债率（%）
ZM	账面市值（%）
TB	托宾 Q 值（%）
GDZB	前十名股东持股比例（%）
CQXZ	产权性质
AGE	企业年龄（年）
XJZC	现金资产比率（%）
ZZCJL	总资产净收益率（%）
ZZCZ	总资产增长率（%）
GJ	固定资产投资（元）
LNGDP	地区人均 GDP 的对数（元）
NYQD	能源强度（吨/万元）
CYJG	地区第三产业占比（%）
LNOOPEN	地区外商投资额（万元）
H2	行业竞争度
P1	配额分配方式
H1	配额核算方式
S1	碳市场参与主体活跃度

1 绪论

1 Introduction

1.1 研究背景 (Research Background)

1.1.1 我国确定“双碳”目标以促进高耗能企业有效控制碳排放

随着工业化的快速发展，全球气候变化问题日益严峻，其中碳排放量的增加已成为导致气候变化的主要原因之一。中国工业增长具有典型的高能耗、高污染特征，如图 1-1 所示，我国 2021 年工业行业的能源消耗分布情况，可以看出工业行业的能源消耗占比大，而在工业行业中，主要有非金属、黑色金属、有色金属、化工、石油加工、电力和造纸行业七大高耗能行业，如图 1-2 所示，七大高耗能行业的碳排放量逐年增加，而其中电力行业、非金属行业和黑色金属行业的碳排放量较大，因此，减少工业部门高耗能行业的碳排放量不可避免地将成为节能减排的首要对象，而企业作为市场主体、碳减排的主要行动者和承担者，减少高耗能企业的碳排放量是实现经济社会绿色转型的关键。

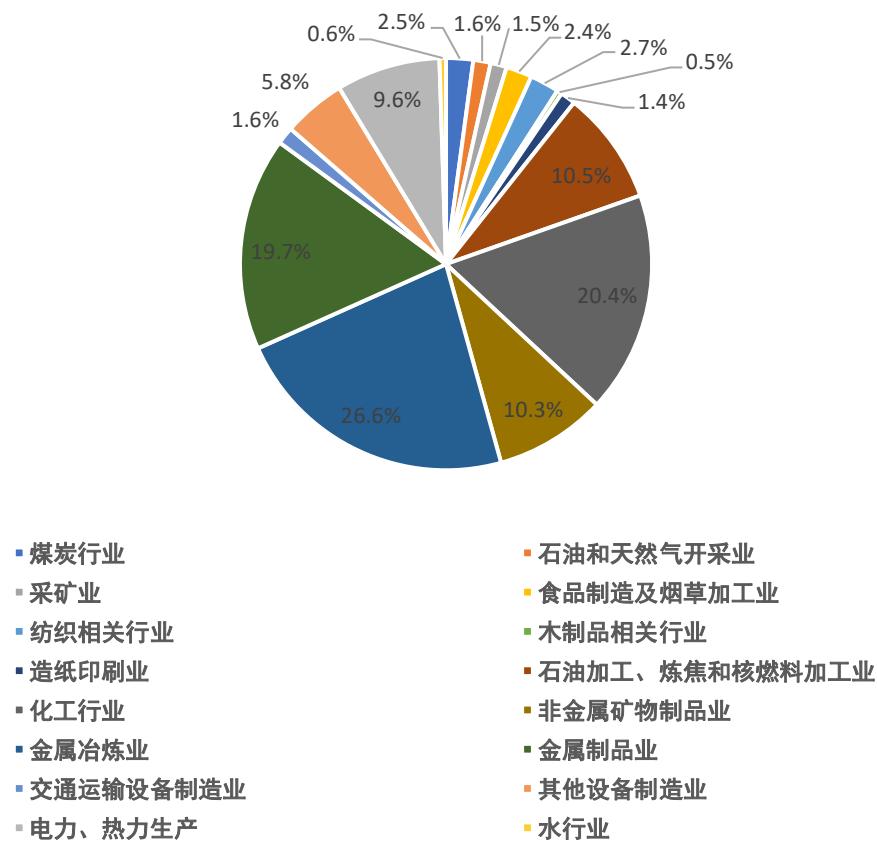


图 1-1 2021 年中国工业行业能源消耗分布情况

Figure 1-1 Distribution of energy consumption in China's industrial sectors in 2021

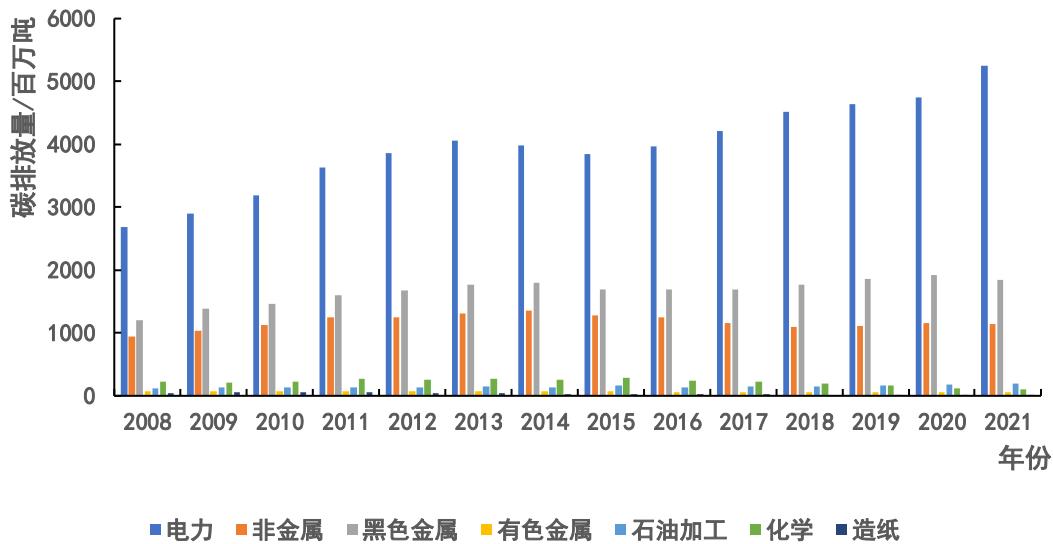


图 1-2 工业高耗能行业的碳排放量

Figure 1-2 Carbon emissions of industries with high energy consumption

为了应对这一减排压力、实现可持续发展并履行国际减排承诺,我国从 1980-2023 年间颁布和实施了一系列的碳减排政策以达到控制碳排放量的目的。如图 1-3 所示,我国碳减排政策的演变主要经历了四个阶段,1980-1994 年间的初始形成阶段、1995-2007 年间的发展变革阶段、2007-2016 年间的深化改革阶段,最后 2016-2023 年间的从“低碳”到“双碳”的目标阶段,经过不断探索我国逐渐找到了适应当前经济发展状况的减排计划。在 2020 年 12 月,我国在联合国气候峰会上正式提出“2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和”的气候目标,以实现高耗能行业及其覆盖企业的碳减排。

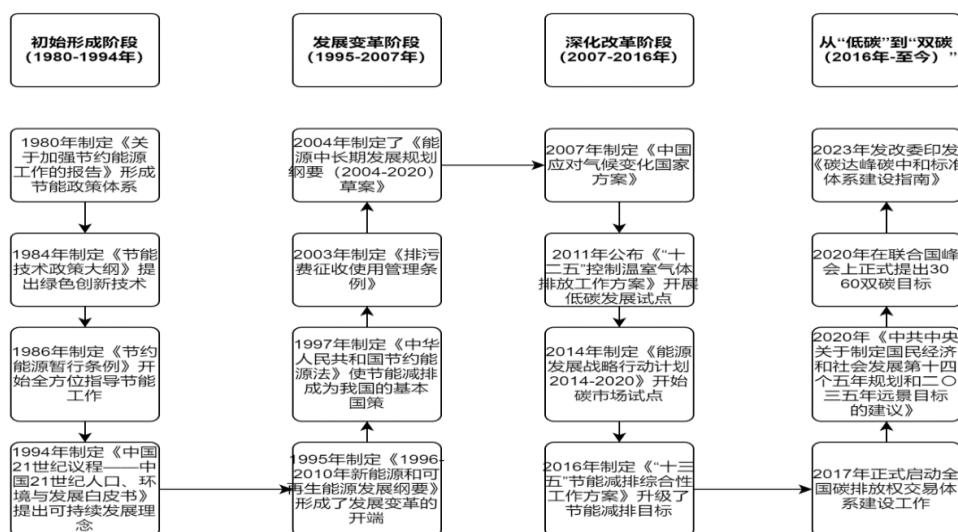


图 1-3 中国减排政策的演变

Figure 1-3 The evolution of China's emission reduction policy

1.1.2 我国构建碳排放权交易政策以有效实现“双碳”目标

在中国提出了力争 2030 年前完成碳达峰，2060 年前实现碳中和的“双碳”目标的背景下，为了更好的应对气候变化、为了实现我国设定的“双碳”目标，同时力求成本控制，中国引入了碳排放权交易机制。碳排放权交易机制是经欧盟、美国、韩国等一些发达经济体实践检验认可的可以有效降低碳排放量的一种市场化工具，也是推动和加快中国实现碳达峰、碳中和战略的重要工具和抓手。自 2011 年中国开展碳排放权交易试点以来，各试点地区相继建立了碳交易市场。2013 年，深圳、上海、北京、广东和天津正式启动碳交易市场，随后湖北和重庆于 2014 年启动，福建于 2016 年启动。中国于 2021 年 7 月启动了全国碳市场，中国电力行业 2000 多家重点排放单位碳排放权交易市场正式启动。经过两年的运行，全国碳排放配额总量近 2.4 亿吨，营业额 110 亿元，全国碳排放权交易机制促进重点控排企业减排的作用初步显现。

与命令和控制型工具相比，碳排放权交易是将二氧化碳排放权赋予商品属性，允许其在市场上交易的行为，通过市场机制达到减少二氧化碳排放的目的，基于市场的碳排放权交易机制能够更好地提供动态激励，通过构建完善的碳排放权交易政策，可以推动企业积极参与碳减排行动，促进绿色低碳发展，实现经济发展与环境保护的双赢。同时，这也有助于提升我国在全球气候治理中的话语权和影响力，更适合我国现阶段的发展模式，综上所述，碳排放权交易制度是实现碳减排的重要机制之一，在“双碳”目标下扮演着重要的角色。因此，构建碳排放权交易政策对于保证“双碳”目标的实现具有重要意义。

但我国各试点省市碳排放量存在差异，如图 1-4 各试点地区的碳排放量可知，广东和湖北的碳排放量远高于上海、北京、福建、重庆、天津的碳排放量，北京的碳排放量最少，由于各试点地区碳排放量不同，所面临的减排压力和减排潜力有所不同，并且各试点地区的发展水平、减排条件、监管力度不同，不同特征的企业在碳排放权交易市场所面临的困境和问题不同，其碳排放权交易政策的减排影响和减排作用路径也会存在异质性。其中，广东、湖北地区的碳排放权交易市场碳配额较多，活跃的碳市场极大地鼓励控排企业的减排行为，减少了碳排放，而重庆、北京、天津碳市场由于配额交易量较低，导致发展相对缓慢，碳市场的减排潜力有待进一步提高。因此，为了完善和优化碳排放权交易市场建设，完成“双碳”目标，中国应深入了解地区、行业、企业层面碳减排效果的异质性效果制定针对性的计划进一步优化全国碳市场的建设。

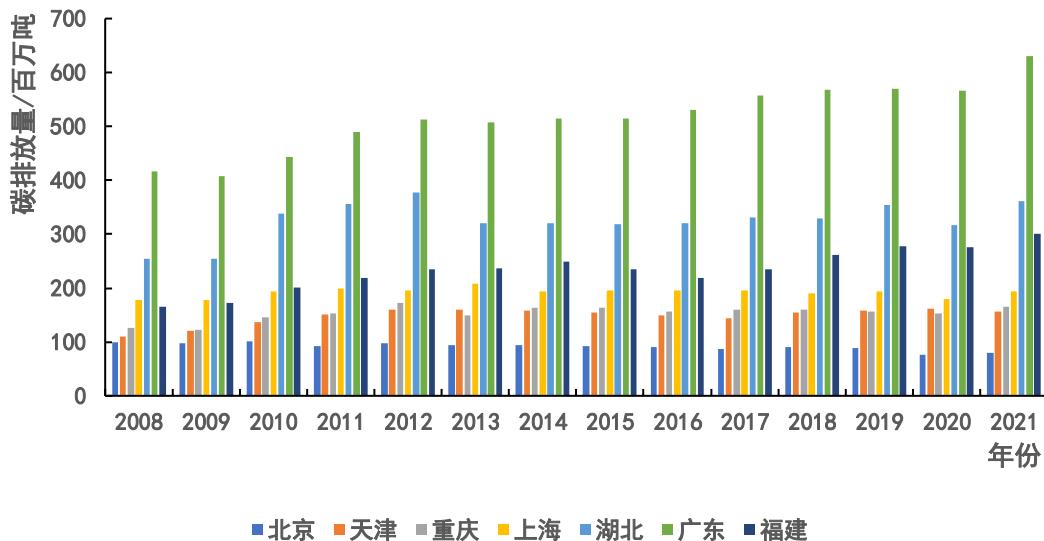


图 1-4 各试点地区碳排放量
Figure 1-4 Carbon emissions of each pilot area

1.1.3 排放权交易政策的碳减排有效性评估已成为环境经济学的研究热点

通过设立碳排放交易市场，企业之间可以通过买卖碳排放权证书的方式实现减排，既能够实现排放指标的分配与配置，又能够为排放量较低的企业提供经济激励，推动其加强节能减排措施。目前学者针对碳排放权交易机制已开展了多视角、深层次的研究，且主要聚焦于碳排放权交易机制的企业减排有效性、减排效果异质性和减排作用机理分析。

在研究碳排放权交易机制的企业减排有效性评估时，在企业碳排放量测算上，大多文献采用的是指标替代法、实测法和根据地区、行业层面的碳排放量来计算企业碳排放量；在研究方法上，碳排放权交易机制的减排有效性测算主要采取计量经济模型、双重差分、合成控制法和一般均衡模型（CGE）三种方法。大部分国内外研究碳排放权交易政策的有效性结果显示，碳排放权交易机制可以显著地降低碳排放量，证明了碳排放权交易机制的碳减排有效性；在减排效果异质性方面，大多从企业规模、性质分类进行异质性分析并对异质性效果得到不一致的结论。

在碳排放权交易机制减排效应的减排作用机理研究时，大多文献都从单一的减少经济效益或单一的增加减排技术投资路径进行减排作用机理的探讨，此外，相关文献对碳排放交易机制的整体减排路径进行了深入研究，但尚未针对中国各试点地区以及高耗能行业在碳排放权交易机制下碳减排效应的作用路径异质性展开详细讨论。由于我国碳排放权交易市场各试点地区和高耗能行业在碳减排目标、减排潜力和监管力度上存在明显的差异，常常会选取不同的作用路径来实现

碳减排。所以，需要对不同试点地区、行业的减排效果和作用机理的异质性进行探究以便更有针对性地完善和优化碳市场建设。而目前比较缺乏碳排放权交易机制的政策效果异质性和减排作用机理异质性上的研究。

基于上述研究，本文运用函数型熵权得到的企业碳排放量为研究对象，运用更能体现因果性效应、排除随机性的因果森林模型对碳排放权交易政策的企业碳减排效应进行评估，量化出企业特征的重要程度并基于此进行减排效果异质性分析和碳市场运行机制的调节作用分析，并从四个方面更全面地对碳排放权交易机制的企业减排路径进行探讨，进一步重点关注试点地区覆盖行业的减排情况和实现路径。

1.2 研究意义 (Significance)

1.2.1 理论意义

本文首先拓展了企业碳排放的计算方法，以碳排放的影响因素为指标并运用函数型熵权方法来动态地测量企业的碳排放量，并对企业碳排放的时空特征进行分析，得到更加精确的企业碳排放及变动趋势。其次，鉴于各地区、行业经济发展水平、减排目标和潜力的不同，每个地区和行业的企业在面对碳排放权交易政策时会做出不同的决策。而因果森林算法具有解决非参数模型和异质性分析优势，本文运用因果森林算法实证探究碳排放权交易政策的有效性并识别出企业自身特征在碳排放权交易政策的碳减排效应的重要程度，并对企业特征、地区、行业进行异质性分析并研究碳市场运行机制的调节作用，为减排政策的确立指引方向。最后，通过梳理碳排放权交易政策的作用机理，从生产规模、管理费用率、融资约束和全要素生产率四个方面运用平均因果中介模型研究了碳排放权交易机制在促进碳减排方面的具体作用路径，并对试点地区、行业减排渠道的异质性进行分析，拓宽了碳排放权交易机制的研究思路，丰富了碳排放权交易政策与企业碳排放量方面的理论，对已有研究做出了很好的补充。

1.2.2 实践意义

本文评估出碳排放权交易政策对覆盖企业碳排放量具有明显的抑制效果，证明了碳排放权交易政策减排的有效性，同时发现企业自身特征在碳排放权交易政策的碳减排效应中起到重要作用，并对其企业特征、地区、行业特征减排效应进行异质性分析；此外，研究发现碳排放权交易政策主要通过提高全要素生产率和缓解融资约束来达到碳减排的目的且减排机制在不同地区与行业实现路径有差异性；揭示了碳排放权交易政策减排效果和减排机制的异质性，为根据各地区、行业和企业实际情况制定更符合自身特征的碳排放权交易机制，激发更大的减排效果。

1.3 研究设计 (Research Design)

1.3.1 研究目标

本文首先进行企业碳排放量的计算，并运用政策评估方法探究碳排放权交易机制对企业碳减排效应并进行异质性分析，然后从生产规模、管理费用率、融资约束和全要素生产率方面研究碳排放权交易机制在促进碳减排方面的具体作用路径，以及这种机制在不同地区和行业中所展现出的作用机理的异质性分。具体目标为：

第一，从微观企业层面完善碳排放权交易机制减排效果评估的分析框架。首先，本文梳理出影响碳排量的驱动因素，用函数型熵权方法测算出因素权重，并结合分地区分行业的碳排放量得出企业的碳排放量，其次，以企业碳排放量为目标变量，采用因果森林算法实证研究碳排放权交易政策的企业碳减排效应；最后，从多个方面进行碳排放权交易政策的企业碳减排效果整体实现路径的实证分析。揭示了减排的作用路径，并基于结论提出政策建议。

第二，基于企业异质性视角探讨碳排放权交易机制影响企业碳排放的减排路径。本文首先基于因果森林算法识别出企业特征、碳市场运行机制在减排效应中所占比重，基于特征变量重要程度，绘制出碳排放权交易政策的减排效应随着变量变动的变化情况，评估出不同碳市场运行机制设计的调节作用并对地区、行业的异质性效应进行分析。其次，根据地区、行业减排效果的异质性分析从多个方面进行地区、行业减排渠道的异质性分析，发现不同地区和高耗能行业选取不同减排路径，并依据相关结论为完善和优化全国碳市场的建设提供针对性的建议，以激发全国碳排放权交易机制的减排潜力。

1.3.2 研究内容

(1) 基于函数型赋权的我国碳排放权交易机制覆盖企业碳排放核算研究

本文首先根据相关文献梳理出影响碳排放量的因素，选取研发投入和生产规模两个指标作为企业碳排放量的影响因素，运用函数型熵权模型刻画两指标权重随时间变化更新的特征，根据研发投入和生产规模所占各省份的比重再乘以分地区分行业的碳排放量可求得碳排放权交易机制覆盖企业的碳排放量，并从时间空间双维度上观察企业碳排放量的变化特征。

(2) 基于因果森林算法的我国碳排放权交易机制对企业碳排放量影响的研究

本文在完成企业碳排放量的计算基础上，采用因果森林算法实证研究碳排放权交易机制对覆盖企业碳排放量的影响并进行更换计量方法和消除其它政策影响的稳健性分析，运用因果森林算法识别出特征变量在碳排放权交易机制的企业碳减排效应中的重要程度，并基于此进行企业自身特征、不同地区、行业的减排

异质性分析。

(3) 基于平均因果中介模型的我国碳排放权交易机制减排效应作用机理分析

本文通过构建平均因果中介模型从生产规模、管理费用率、全要素生产率和融资约束方面研究碳排放权交易机制在促进碳减排方面的具体作用路径,以及这种机制在不同地区和行业中所展现出的作用机理的异质性,从上述四个方面进行地区、行业的减排渠道的异质性分析,揭示了不同地区、行业减排路径的差异性,为优化碳市场,激发减排潜力提供了实证依据。

1.3.3 研究方法

(1) 函数型熵权方法

函数型熵权方法主要是先运用双参数广义交叉验证对指标进行函数化重构,根据观测值的波动特征自适应确定函数化参数,从而灵活精确地重构其指标函数,其次对传统熵权法进行函数化拓展以构建具有自适应迭代更新赋权特征的函数型熵权,从而确定指标的动态权重;本文主要运用此方法将企业生产规模与技术投资指标的离散数据函数化后,将熵权法加以函数型拓展以求得各省份内企业规模指标和技术投资指标在企业碳排放中贡献的动态权重,并结合相关数据进行企业碳排放的计算。

(2) 因果森林算法

因果森林算法是一种因果推断与随机森林结合的因果森林算法,能够通过估计倾向得分和使用稳健的聚类方法有效地改进随机对照试验处理组个体选择偏差及聚类偏误问题,且给出了估计量的渐进分布以及构造置信区间,有助于确定因果效应并提高政策评估的可信度;并且,因果森林以数据驱动的、非线性的方式组合多个解释变量,这为我们提供了一个更有效的,在统计上更强大的工具来估计异质性治疗效果,本文主要使用因果森林算法来评估碳排放权交易政策的企业碳减排有效性并识别出每个企业特征在构建森林的重要性,进一步探析影响因素的异质性特征。

(3) 平均因果中介方法

平均因果中介方法在一系列仿真的基础上进行参数估计进而识别出所关注的平均因果中介效应,并且可以给出有关中介效应估计结果不违背关键识别假设的敏感性分析,平均因果中介效应是从因果推理的正式框架中衍生出来的,主要是计算有多少治疗变量是从中介变量传递的,具有因果性;本文主要采用该模型识别碳排放权交易机制影响企业碳排放的平均因果中介效应以明确其影响机理,并探讨不同地区、行业的碳减排路径的异质性。

1.3.4 技术路线

本文主要基于企业碳排放量，研究碳排放权交易政策的企业减排效应及减排机理作用，针对不同企业特征和碳市场运行机制进行了异质性和调节作用分析，并探讨了碳排放权交易机制在促进碳减排方面的具体作用路径，以及这种机制在不同地区和行业中所展现出的作用机理的异质性。具体的技术路线图如图 1-5 所示。

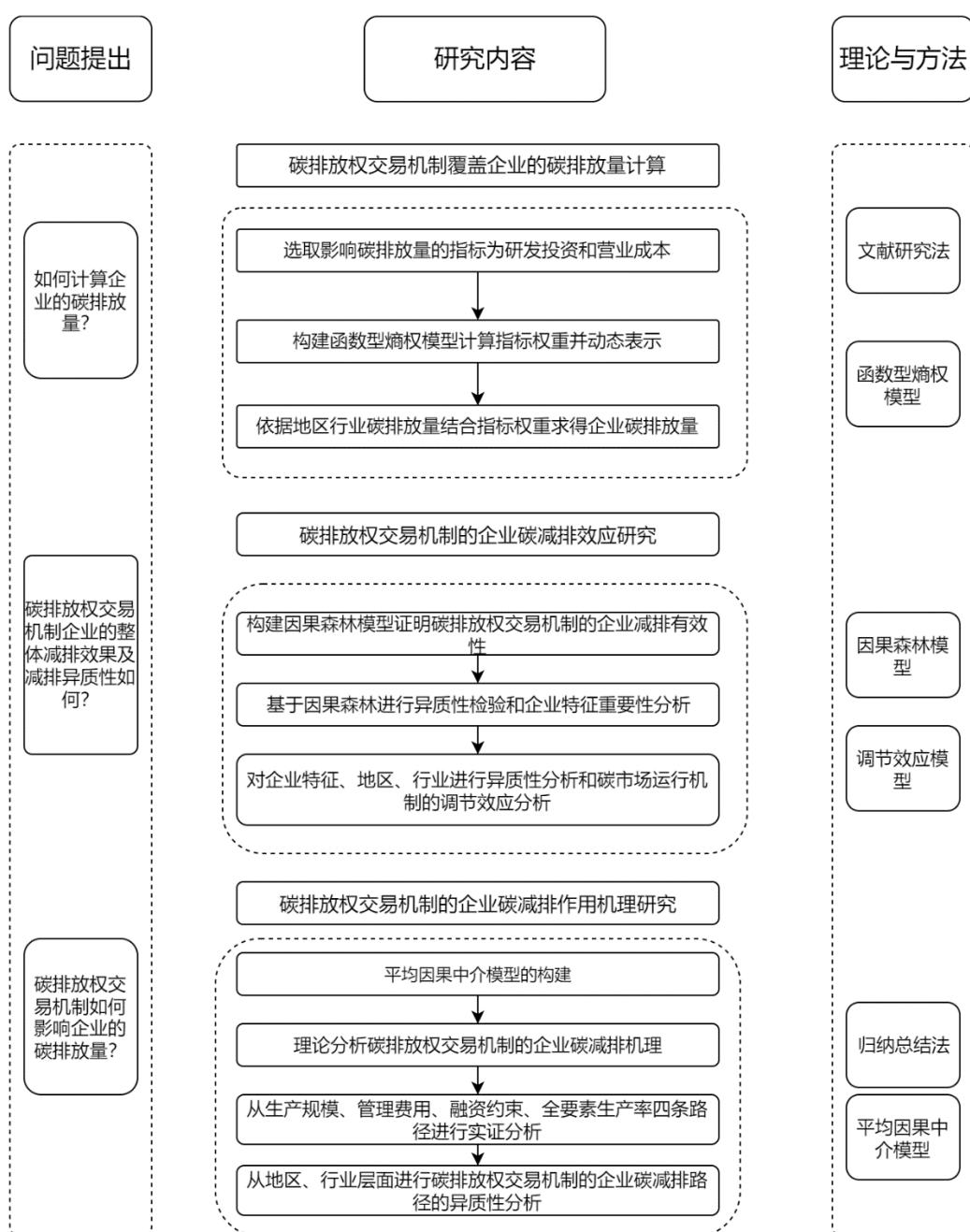


图 1-5 技术路线图
Figure 1-5 Technology roadmap

1.4 论文的创新点（Innovations of the Thesis）

（1）基于函数型熵权计算碳排放权交易政策覆盖企业的碳排放量

相关研究在测算微观企业的碳排放量时，多使用实测法、指标替代法，但实测法仅适用于小样本企业且指标替代法不准确，因此现在研究多使用企业营业成本占行业的比重再乘以行业碳排放量来求得企业的碳排放量，但指标单一，无法准确衡量企业碳排放量的影响驱动；因此，本文从营业成本和研发投入两方面所占比重来计算企业碳排放量，而传统的熵权法没有考虑各指标权重随时间变化更新的特征，从而无法刻画企业生产规模和技术投资的指标函数在时空双重维度上的相对重要性，进而影响企业碳排放量核算的合理性。因此，本文将企业生产规模与技术投资指标的离散数据函数化后，将熵权法加以函数型拓展以得到这两个指标对企业碳排放贡献的动态权重，并结合相关数据进行企业碳排放的计算。

（2）基于因果森林算法研究碳排放权交易机制的企业碳减排效应及异质性分析

相关研究在进行碳排放权交易机制的政策有效性研究时一般采用双重差分、合成控制和一般均衡模型等计量方法进行评估，而该方法可能存在随机性、样本选择偏误等问题；在异质性分析也多基于企业规模、性质、地区、行业进行分类研究，没有探究企业特征在碳排放权交易政策影响碳减排的重要程度；而因果森林模型具有解决非参数模型能力、异质性分析优势，克服协变量数量规模制约等特点，可改善样本随机性和选择偏误问题，也可基于协变量的重要程度赋予不同的权重，合理选取控制变量，并进行异质性分析，可提高政策评估的可信度。因此，本文将机器学习与因果识别结合起来，主要使用因果森林方法进行因果推断，选取企业碳排放作为目标表征指标，评估碳排放权交易政策颁布实施的效果，识别碳交易对碳减排的处理效应，并根据企业本身、地区、行业特点，通过测量这些特征变量并量化它们的相对重要性进一步探析影响因素的异质性特征。

（3）基于平均因果中介方法的碳排放权交易的企业碳减排机制路径分析

相关研究在检验中介效应时常用的方法是逐步检验回归系数，主要依赖于结构方程建模的一种形式，并不是从因果推理的正式框架中衍生出来的，也不允许对关键识别假设进行敏感性分析，并且相关文献在进行碳减排机制路径分析时只对整体减排渠道进行研究而缺乏减排渠道异质性的讨论；因此，本文采用 Hicks 和 Tingley (2011)^[1] 所提出的平均因果中介模型，该模型可在一系列仿真的基础上进行参数估计进而识别出所关注的平均因果中介效应，并且可以给出有关中介效应估计结果不违背关键识别假设的敏感性分析。因此，本文采用该模型识别碳排放权交易机制对企业碳减排效应的影响路径的平均因果中介效应以明确其影响机理，并进一步从不同地区、行业方面探究碳减排渠道的异质性，揭示了不同地区、行业减排路径的差异性。

2 理论基础和文献综述

2 Theoretical basis and literature review

2.1 碳排放权交易机制理论基础（Theoretical basis of carbon emission trading mechanism）

2.1.1 碳排放权交易机制

碳排放权交易的概念源于排放权交易，是一种以市场为基础的碳减排模式。企业在控制碳排放总量的前提下，通过排污许可的方式购买和出售多余的二氧化碳排放额度，提高碳配额的流动效率，鼓励企业加大研发投入进行碳减排技术创新。在进行碳排放配额交易时，首先对各地区碳排放量进行评估，依据最大的碳排放量确定碳排放配额；然后在一级市场进行碳配额的转让，我国主要采用招标、拍卖的方式；最后，企业在二级市场上购买或出售剩余的碳排放配额。

自 2011 年中国开展碳排放权交易试点以来，各试点地区相继建立了碳交易市场。2013 年，深圳、上海、北京、广东和天津正式启动碳交易市场，随后湖北和重庆于 2014 年启动，福建于 2016 年启动。中国于 2021 年 7 月启动了全国碳市场。全国首次碳交易价格为 52.78 元/吨，交易规模为 1.6×10^5 吨，交易金额为 7.9×10^6 元。评估碳排放权交易对碳减排的影响，有助于更好地发现碳市场运行中存在的问题，为全国碳市场的高效运行提供参考。

中国的碳交易涉及的行业包括钢铁、石化、电力、建材、造纸、化工以及有色金属等工业行业，这些行业都会产生大量的二氧化碳排放。控制这些行业的二氧化碳排放对碳减排和经济高质量发展具有重要意义。配额总量的确定有采用设定排放总量的绝对值和基于排放强度确定两种方法，配额分配方式有免费分配和通过出售的方式出售配额方法，免费分配有祖父法、基于历史产出的基准法和基于实际产出的基准法，而目前各试点地区多采用免费分配为主、拍卖分配为辅的分配方式，该方法缺乏激励约束，故在全国碳市场的建设过程中，多采用有偿分配的碳配额分配方式和以基准法为主的配额核算方式，激发碳排放权交易市场减排潜力。

2.1.2 科斯定理

科斯定理（Coase Theorem）是以罗纳德（Ronald H. Coase）命名的一个经济学定理，他在 1959 年提出了这个观点。其核心思想是描述在存在外部性的情况下，一个经济系统的内部资源配置和产出对经济效率可能产生的影响。科斯定理关注产权和交易成本，指出在一定条件下，经济外部性或低效率可以通过各方协

商得到纠正。这意味着在产权明晰、交易成本低的情况下，市场可以自动调整资源配置，达到最优状态。

科斯定理为碳排放权交易机制提供了理论基础。碳排放权交易机制是一种总量控制机制，在明确减排目标的前提下，排污权交易机制可以赋予制造商在减排决策上的灵活性。企业之间可以通过买卖碳排放权证书的方式实现减排，既能够实现排放指标的分配与配置，又能够为排放量较低的企业提供经济激励，推动其加强节能减排措施。这种机制通过明确碳排放权的财产权，以及设定合理的交易成本，企业可以在市场上自由买卖碳排放权，纠正温室气体排放的负外部性，从而达到资源的最优配置，实现社会效益最大化。同时，这也鼓励了企业积极采取减排措施，因为通过减排，企业的碳排放量减少就会有剩余的碳排放权配额，进而可以在市场上出售碳配额获得经济收益。碳排放权交易机制这种市场化的环境规制工具有效控制了碳排放，促进了经济的可持续发展。

2.1.3 碳排放权交易机制的减排效应分析

碳排放权交易机制是一种市场化的环境规制手段，通过在碳市场上买卖碳配额促进了碳市场的流动性，降低了减排成本，达到了资源的最优配置，是促进经济绿色转型和实现“双碳”目标的重要制度创新。自2011年中国开展碳排放权交易试点以来，各试点地区相继建立了碳交易市场。2013年，深圳、上海、北京、广东和天津正式启动碳交易市场，随后湖北和重庆于2014年启动，福建于2016年启动，中国并于2021年7月启动了全国碳市场。自碳排放权交易机制实施以来，碳排放权交易机制的减排效应一直受到关注，但由于碳排放权交易机制的构建较为复杂，且其政策效果也会受到所在地区或覆盖行业经济发展、减排潜力等多因素的制约，目前对碳排放权交易机制的减排效应理论观点不一。

一方面，新古典经济学理论所持有的“成本假说”认为，环境规制将排放的负外部性内部化而增加企业成本负担，使企业为保证盈利能力而不愿投资周期长、成本高的绿色技术，从而阻碍企业的碳减排；另一方面，波特假设(Porter, 1991)认为，适当的、科学的环境法规会对企业产生积极的外部性效应。环境法规通过迫使企业以牺牲资源为代价转变传统的粗放型商业模式，改善了生产技术和流程。而技术创新带来的生产率和生产效率的提高，可以抵消环境法规带来的额外成本，增加公司的额外净收入，从而实现社会经济的发展。

而碳排放权的本质是一种法定的排放权，碳排放权交易是通过市场交易将碳排放权商业化。碳排放交易机制是利用环境规制来弥补外部性造成的市场失灵。它的最终目标仍然是减少温室气体排放。中国根据国情制定了碳排放总量目标。根据这一目标，中国在每个试点城市确定自己的关键碳排放管理公司配额。每家公司根据配额的大小来安排碳排放。如果超过配额，必须从市场上其他有剩余配

额的公司购买，以弥补自己配额的不足。如果配额过剩，公司可以在二级市场上出售给其他配额不足的公司，以获得收益。对于企业来说，在不可避免的外部政策压力下，必须想方设法提高碳排放绩效，降低碳排放强度，才能获得新生。而在企业创新的基础上，对低碳技术进行升级，降低生产过程中可能产生的污染物排放，从而减少了碳配额的购买，也可以在碳市场上出售剩余的碳配额获得收益，减少了企业的生产成本，从而使企业的产品的价格更具竞争力。因此，在中国的碳排放权交易机制下，企业有动力增加创新投资，提高创新能力。此外，研究证实，技术创新是影响碳排放的关键因素之一。中国的碳排放权交易机制可以显著促进技术创新。并且，排放权交易机制需要控排企业提供有关能源消费、排放核算等重要数据，并且市场监管者也会及时披露配额市场交易、控排厂商履约等重要信息，而信息披露机制的完善有利于缓解融资约束而加大研发投入进而促进企业碳减排。因此，本文认为中国的碳排放权交易机制可以有效促进企业的碳减排。

2.2 碳排放的核算及其影响因素研究（Study on accounting of carbon emission and its influencing factors）

2.2.1 碳排放量的核算方法研究

碳排放量的测算是评估碳排放权交易机制减排效应的重要环节。联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）在其《2006 年国家温室气体清单》中提出了三种评估产品碳排放量的计算方法。首先是排放系数法，该方法涉及将产品生产过程中各类能源的消耗量与相应能源的碳排放因子相乘，进而汇总得出产品的总碳排放量。其次，全生命周期法是一种跟踪产品整个生产过程并计算其碳排放量的方法，旨在确保对碳排放量的全面和准确评估。最后，投入产出法则基于产品生产过程中消耗的燃料总量和单位产品的平均碳含量系数进行计算，以得出相对精确的产品总碳排放量。在碳排放量核算方法的研究领域，学者们针对行业、地区和企业等不同层面进行了广泛而深入的探索，以寻求更为精确和有效的碳排放量测算方法。

（1）行业层面碳排放量的核算方法研究

在行业层面，主要对工业、农业和居民生活行业的碳排放量进行了测度。在农业行业，主要以排放系数法为主要方法来测算碳排放量，在使用排放系数法时，不同的能源对应不同的碳排放因子且不同的国家具有不同的排放因子，因此，我们需要进行碳源的识别和修正碳排放系数。李俊杰等（2012）^[2]基于农地利用过程中的六类主要碳源并结合 IPCC 和美国橡树岭国家实验室等的数据而修正的碳排放系数测算了民族地区农地利用的碳排放量，李国志、李宗植（2010）^[3]基于《中国能源统计年鉴》将中国农业能源消费种类划分为九类，再乘以各自的排放

系数测算了 1981-2007 年中国农业的碳排放量。

在工业行业，主要对一些高耗能、高排放行业的碳排放量进行了测度，Onat 等（2014）^[4]采用投入产出混合生命周期评估方法计算了美国 2002 年建筑物在建设、使用和处置阶段的碳排放量，叶瑞克等（2017）^[5]在基于确定建筑行业的石化燃料燃烧、城市绿地碳汇、电力消耗和废弃物处理的四类碳源并结合 IPCC 所提供的相关排放系数构建了现阶段建筑群碳排放量的测算模型，王丽萍、刘明浩（2018）^[6]基于直接能耗法和投入产出法对 1997-2014 年的中国物流业的碳排放量进行了测算。

在居民生活行业，碳排放量是直接用能和间接用能所产生的碳排放量的加总，周平、王黎明（2011）^[7]以价值型投入产出表为基础，结合能源消耗数据编制出了混合单位的能源投入产出表，在此基础上，居民生活各部门的能源投入量用实物单位表示，非能源投入量用价值单位表示测算了 1992-2007 年中国居民生活行业所产生的直接和间接的碳排放量，付京燕、李存龙（2015）^[8]采用环境投入产出分析和消费品生命周期分析方法，测算了 1996-2011 年中国居民间接消费所产生的碳排放量。

（2）地区层面碳排放量的核算方法研究

在地区层面，杨骞等（2012）^[9]基于煤炭、焦炭、天然气、汽油、燃料油、煤油和柴油七种能源消耗数据并利用 IPCC 提供的能源排放因子求得 1995-2009 年中国各省份的碳排放量数据，王安静等（2017）^[10]借助投入产出表和能源平衡表构建了多区域投入产出模型由此计算了各省份的碳排放量，黄和平等（2021）^[11]通过投入产出分析法研究了长江经济带城市间贸易隐含的碳排放问题，Meng 等（2017）^[12]应用区域间投入产出模型来测算 2002 年和 2007 年中国区域间二氧化碳排放量，Zhan 等（2018）^[13]采用混合生命周期模型来量化能耗和中国广州市城市住宅建筑的碳排放，为决策者提供了城市住宅建筑能源消耗和环境影响的综合数据。

（3）企业层面碳排放量的核算方法研究

在企业层面，主要有指标替代、计量方法计算和借助行业地区层面碳排放来求得企业碳排放量三个测算方法，如胡珺等（2023）^[14]、黄艳希等（2023）^[15]和 Wang 等（2023）^[16]使用每年被征收的排污费来代表企业的碳排放量，闫华红等（2019）^[18]、沈洪涛等（2019）^[19]参考《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》借助企业营业成本占行业营业成本的比重，使用行业碳排放量估算企业的碳排放量，Qi 等（2018）^[20]采用生命周期评估方法分析了钢铁企业的碳足迹，Yu 等（2015）^[21]通过 SFA 方法和碳会计方法计算了某大型企业集团的碳排放量，Shen 等（2020）^[22]基于 Chapple 等（2013）^[23]、Chong 等（2019）^[24]的分解，将企业

规模和研发投入结合起来并根据行业的碳排放量来计算企业的碳排放量,方兰等(2022)^[17]采用发布的上市公司社会责任报告构建五类考察维度得出环境责任分值来衡量企业的碳排放,得分越高,说明企业的碳减排效果越好。目前,上市公司社会责任报告的披露制度还在进一步完善中,从各公司披露的报告中可以看出,数据缺失严重,报告的连续性不强。虽然有些企业继续披露社会责任报告,但这只是一种形式,并没有真正用数据说话。可见,企业温室气体排放核算能力有待进一步提高。

2.2.2 碳排放量的影响因素研究

(1) 国外学者对碳排放量的影响因素研究

目前国内外有大量学者对二氧化碳排放影响因素进行了研究。在研究碳排放影响因素的过程中,国外学者采用了一种比较成熟的研究方法——指标分解法。在指标分解分析的数十种分解方法中,大多数学者认为分指标因子分解(LMDI)方法是最好的方法。如 Alajmi 等(2021)^[25]通过迪氏指数因素分解(LMDI)方法揭示了 1990-2016 年影响沙特阿拉伯九个部门温室气体排放的因素,分析表明,能源效应、活动效应和人口效应影响是增加温室气体排放的因素,Suyi 等(2017)^[26]采用 LMDI 方法对韩国农业能源消费的影响因素进行了分解,发现活动效应对能源消耗的增加起主要作用,结构效应能耗的降低贡献大于强度效应,Holladay 等(2021)^[27]对美国制造业机构的污染排放进行了分解。除了因素分解方法的应用外,国外学者也通过 STIRPAT 模型进行碳排放的影响因素分析。如 Poumanyvong 等(2010)^[28]采用了涵盖 1975 年至 2005 年间 99 个国家的随机效应回归模型(STIRPAT 模型)以及平衡面板数据集,深入探讨了城市化对能源使用和二氧化碳排放的影响。他们的研究发现,随着不同发展阶段的演变,城市化对能源使用和排放的影响呈现出显著的差异。这一发现为我们理解城市化进程对能源和环境的影响提供了重要的视角。Martínez-Zarzoso 等(2011)^[29]基于 STIRPAT 模型分析了 1975-2003 年发展中国家城市化对二氧化碳排放的影响,结果显示城市化与二氧化碳排放之间存在倒 U 形关系。

(2) 国内学者对碳排放量的影响因素研究

国内学者主要从全国层面区域层面和行业层面进行碳排放影响因素的研究,在全国层面,研究方法也主要以 Divisia 和 Laspeyser 分解法为主,薛勇等(2011)^[30]利用投入产出结构分解技术对因素进行分解,计算了 1997-2004 年中国应对亚洲金融危机期间二氧化碳排放量的变化。结果表明,经济增长是二氧化碳排放量增加的主要动力,节能减排是二氧化碳排放量减少的主要动力。经济结构变化的影响相对较小。李艳梅等(2010)^[31]选取 1980 年至 2007 年作为研究样本期,构建因子分解分析模型,发现经济总量的持续增长和产业结构的不断调整是导致碳

排放量增加的主要原因。相反，碳排放强度的降低则是推动碳减排效果的重要因素。这一研究为我们理解碳减排的复杂因素提供了有益的视角，并有助于制定更有效的碳减排策略。

在区域层面，Zhang 等（2012）^[32]利用 STIRPAT 模型和中国 1995 - 2010 年的省级面板数据，在国家和区域层面分析了城市化对能源消费和 CO₂ 排放的影响。结果表明：城市化增加了中国的能源消耗和二氧化碳排放，城市化对能源消耗的影响因地区而异，从西部地区到中东部地区不断下降，Zhang 等（2014）^[33]利用 1995-2010 年中国的面板数据，研究了收入及其不平等对国家和地区二氧化碳排放的影响。实证结果表明，收入增长增加了中国的二氧化碳排放，且收入增长对二氧化碳排放的影响因地区而异，收入不平等对东部地区二氧化碳排放的影响大于西部地区。许海平等（2012）^[34]采用较为先进的空间测量方法，对 2000-2008 年中国 29 个省区人均碳排放的影响因素进行了研究，研究结果表明，城镇化水平、就业人口比例和技术进步是导致中国人均碳排放增长的重要因素，对外贸易程度在一定程度上降低了人均碳排放量。

在行业层面，Zhao 等（2010）^[35]采用 LMDI 对 1996-2007 年上海工业行业碳排放的主要影响因素进行了识别和定量分析，研究发现，工业产出是行业碳排放影响因素的主要驱动力，能源强度降低和能源产业结构调整是行业减排的主要决定因素，Guo 等（2014）^[36]采用 LMDI 方法来量化我国 30 个省份交通运输业二氧化碳的相关驱动力，结果表明，影响因素主要有活动效应、人口效应和能源强度，但各地区效应有所不同，陈诗一等(2011)^[37]对中国自改革开放以来两位数工业部门的碳排放强度变化的主要原因进行了深入剖析。他们发现，能源强度的降低或能源生产率的提升是碳排放强度波动性下降的直接决定因素。能源结构和产业结构的优化调整也对降低碳排放强度起到了积极的作用。这一研究揭示了碳排放强度变化背后的多重因素，为制定有效的碳减排政策提供了重要参考。

2.3 碳排放权交易机制减排有效性评估的方法研究（Research on the assessment method of emission reduction effectiveness of carbon emission trading scheme）

2.3.1 碳排放权交易机制减排有效性的事前评估方法研究

国内外对碳排放权交易政策的碳减排效应的方法进行了大量的研究，碳排放权交易机制的减排有效性测算主要有事前预评估和事后评估两种方法。事前预评估主要通过预测未来的碳排放量并以此为依据来评估碳交易机制的减排贡献，常用的方法包括计量经济模型和一般均衡模型。如 Zhang 等（2021）^[38]基于历史温室气体排放数据，采用计量经济模型对不同情景假设下的未来温室气体排放进行

预测，并在此基础上对碳排放权交易政策的减排效果进行评价。Cheng 等(2015)^[39]采用一般均衡模型(CGE)设置了不同的碳排放总量管理情景。通过对广东省碳交易政策效果的预测，发现碳交易机制不仅可以减少碳排放，还可以减少二氧化硫等其他有害气体的排放。孙睿等（2014）^[40]借助 CGE 模型深入研究了碳交易对我国宏观经济、能源消费以及碳减排效果的影响。研究结果显示，碳交易显著降低了我国低排放行业的二氧化碳排放量，然而对于高排放行业而言，其二氧化碳排放量的下降效果并不明显。这一发现为我们理解碳交易政策在不同行业间的差异性影响提供了重要依据，也为进一步优化碳交易政策提供了有益参考。刘宇等（2013）^[41]利用多区域一般均衡模型对广东、湖北两省个体减排影响进行了模拟，发现碳交易可以有效降低整个区域的碳减排成本。

2.3.2 碳排放权交易机制减排有效性事后评估方法研究

事后评估方法主要基于已有的数据通过比较碳交易政策前后的企业碳排放量变化，判断碳交易机制是否具有减排有效性，最常用的方法有双重差分、合成控制法等模型。如王勇和赵晗（2019）^[42]采用三阶双重差分模型，对我国区域内碳交易制度的实施效果进行了实证分析。研究结果显示，该制度的实施对碳减排效率具有积极的促进作用，但与我国平均水平相比，仍有较大的提升空间。董直庆和王辉（2021）^[43]也运用双重差分模型对市场导向型环境政策的效果进行了实证分析。他们发现，这种政策不仅能够显著降低当地的碳排放量，而且还能够有效推动周边区域的碳减排工作。这些研究为我们深入理解不同政策工具在碳减排方面的作用提供了重要参考。张彩江（2021）^[44]用合成控制法检验了 2000-2008 年的省际面板数据，发现碳交易试点政策明显抑制了试点区域的碳排放量增长。李广明等（2017）^[45]采用 DID 和 DDD 对中国省级工业数据进行了分析，研究发现碳排放权交易体系通过技术创新和产业结构调整实现了碳减排，Yang 等(2023)^[46]运用 DID 从微观视角考察了碳交易的影响，研究发现通过提升生态友好型技术和创新能力显著降低了企业污染，刘传明等人（2019）^[47]借助合成控制方法，深入探究了碳交易的减排效应。他们的研究发现，由于各城市在经济和工业状况上存在差异，试点区域的减排效应表现出显著的异质性。这一发现揭示了碳交易政策在不同城市背景下可能产生的不同效果，为政策制定者提供了有益的参考，以便更好地根据地方实际情况调整和优化碳交易政策。

2.4 环境经济政策评估实证分析方法研究（Research on empirical analysis methods of environmental economic policy assessment）

2.4.1 政策评估方法的应用研究

目前文献在对环境经济政策实证评估时主要从政策效果、异质性分析和机制

分析三方面进行探讨，而相关文献所采用的研究方法有所不同。在政策评估方法上，主要运用面板效应模型方法。如 Du 等（2020）^[48]运用面板固定效应模型，评估环境规制对污染减排和协同减排的影响，结果表明，这些法规可以减少中国工业企业的污染排放，验证环境政策的有效性，李婧等（2010）^[49]基于静态与动态空间面板模型考察 1998-2007 年中国大陆 30 个省级区域创新的空间相关与集聚，研究发现创新投入产出之间存在显著的正向空间相关，温素彬等（2008）^[50]基于 2003-2007 年 46 家上市公司的数据，采用面板数据模型研究了企业社会责任与财务绩效之间的关系，发现企业履行社会责任对财务绩效有正向影响。然而上述方法存在随机性和选择偏误问题，Athey 等（2018）^[51]提出了一种因果推断与随机森林结合的因果森林算法，该算法能有效地改进随机对照试验处理组个体选择偏差与随机性问题，并结合经济学研究习惯，给出了估计量的渐进分布以及构造置信区间的方法，有助于确定因果效应并提高政策评估的可信度。刘生龙等（2021）^[52]利用广义随机森林模型估计了互联网使用对农村居民收入增加的因果关系，回归结果表明，互联网使用可以显著提高农村居民收入。Mao 等（2023）^[53]采用因果森林的机器学习方法来解决内生问题，对 2008-2018 年中国 272 个地级市的观测样本进行实证分析，得到平均治理效果的渐近正态估计，结果表明中国绿色创新对绿色全要素生产率的影响呈现短期负向、长期正向的趋势。因此，本文主要使用因果森林模型进行碳排放权交易政策的减排有效性评估。

2.4.2 中介效应检验方法的应用研究

在机制分析方法上，检验中介效应最初的方法是逐步检验回归系数法，如 Yu 等（2023）^[54]、刘传明等（2019）^[47]利用逐步回归法评估了中国试点的碳减排效果的相关机制，研究结果显示，碳排放交易体系试点地区企业主要通过提高企业研发意愿和投入来降低碳排放和强度；随着统计理论的发展和分析软件的进步，在简单中介模型的基础上衍生了包括类别变量的中介模型、多重中介模型、多水平中介模型与有调节的中介模型等。如李子广等（2016）^[55]利用多中介模型从两个方面分析比较了中小银行发展对中小企业贷款融资的中介作用，发现主要通过提高金融发展水平来改善中小企业的贷款融资状况。韩晨等（2020）^[56]利用有调节的中介效应模型检验了战略导向与企业绩效之间的作用机制，结果表明，创业导向与员工导向之间的交互作用通过促进探索性创新显著提高了企业创新绩效；但上述传统的方法缺乏因果性，Hicks 和 Tingley（2011）^[1]提出了平均因果中介模型，该模型可在一系列仿真的基础上进行参数估计进而识别出所关注的平均因果中介效应，并且可以给出有关中介效应估计结果不违背关键识别假设的敏感性分析。Fu 等（2021）^[57]运用平均因果中介模型发现环境规制对企业创新的因果效应受到贿赂支出的中介作用。因此，本文采用该模型识别碳排放权交易机制影

响控排企业碳减排的平均因果中介效应以明确其影响机理，并进一步从不同地区、行业方面探究碳减排渠道的异质性，揭示不同地区、行业减排路径的差异性。

2.4.3 异质性分析方法的应用研究

在异质性分析方法上，相关研究主要采用分组回归和引入调节变量的方法进行探讨。比如，Chen 等（2020）^[58]将地区按东、中、西部进行分组，研究碳排放权交易政策的减排异质性，发现西部地区省份减排效果最强，中部减排效果次之，而东部最弱，Zhang 等（2019）^[59]和 Yan 等（2023）^[60]根据行业因素的强度将样本分为劳动力驱动型、资本驱动型和技术驱动型行业，基于基准模型进行回归发现资本驱动型和技术驱动型产业的技术创新效应具有提高电力效率、抑制排放的内在特征，而劳动力驱动型产业的效应不显著，Zhang 等（2023）^[61]和张晴、于津平（2023）^[62]按行业排放强度分为高污染行业和低污染行业，将变量引入到模型中回归，研究发现排放强度较高的行业比排放强度较低的行业更能减少排放，包彤等（2022）^[63]基于 2000-2010 年中国工业企业面板数据，将全样本分为国有企业和非国有企业子样本，引入模型进行回归，研究发现环境规制对国有企业的污染减排效应大于非国有企业。综上，在异质性分析方面主要基于人为分组，没有先量化特征的重要性，而因果森林可以以数据驱动的、非线性的、有纪律的方式组合多个解释变量，为我们提供了一个更有效的，在统计上更强大的工具来估计异质性治疗效果，该算法还告诉我们每个企业特征在构建森林的重要性，这使得我们能够衡量这些特征作为碳排放权交易机制和企业碳排放之间因果关系的调节因素的相对重要性，因此，本文基于因果森林方法筛选出各特征变量的重要性，并基于此进行碳排放权交易的企业碳减排异质性和调节效应分析。

2.5 文献述评（Problems to be further studied）

综上所述，过去的文献对碳排放量的研究集中在碳排放量的测度、影响因素研究及碳排放权交易机制对碳排放量的影响方法研究，对环境经济政策的效应评估、机制检验及异质性实证分析方法研究，但由于企业层面温室气体排放的基础数据相对薄弱，且政策实施效果的评价方法有限，难以对中国碳排放权交易试点政策在企业层面的效果进行评价，这很容易误导我们客观、全面地评价中国碳排放权交易政策的效果，从而阻碍了碳排放权交易机制的优化和完善。基于此，本文从以下几个方面进一步进行研究，主要表现在：

第一，需要全面梳理影响碳排放量的影响因素以扩大指标的选取并采用合适的方法测算企业碳排放量。关于碳排放权交易机制的碳减排效应评估已经较为丰富，但大多数研究集中在地区、行业等宏观层面，而碳排放权交易机制的市场主体是企业，企业是碳排放的主要承担者和执行者，因此评估企业层面的碳排放权

交易市场的减排效果更有必要。现有研究对微观企业虽有涉及，但相关企业的碳排放量的计算方法不够精确。因此，本文在现有研究的基础上，选取研发投资和营业成本两个指标，通过函数型熵权计算影响企业碳排放的指标权重并结合分地区分行业的碳排放量计算出合理精准的企业碳排放量。

第二，需要构建能排除选择偏误和具有因果性的实证模型探讨碳排放权交易机制的碳减排效应，并对协变量在减排效果中的重要程度进行刻画。在评估碳排放权交易政策对碳排放量的影响研究上，多数使用双重差分法、合成控制法和一般均衡模型进行评估，缺乏因果性的结果，并在进行碳排放权交易政策的减排效应异质性探讨时，主要是人为的基于特征分类进行研究，没有体现特征的重要性。因此本文采用因果森林算法，基于 2008-2019 年上市公司面板数据，研究碳排放权交易机制对企业碳排放量的基准影响，进而基于因果森林方法筛选出各特征变量的重要性，并基于此进行碳排放权交易的企业碳减排异质性和调节效应分析。

第三，需要构建具有因果性的中介模型研究碳排放权交易机制的碳减排效果的作用机理并进行减排渠道的异质性分析。以往的文献往往采用传统的中介检验方法研究碳排放权交易政策的整体影响及整体路径分析，鲜有剖析碳排放权交易具体运行机制的异质性分析，且方法缺乏因果性，因此，本文运用平均因果中介模型从生产规模、管理费用率、融资约束和全要素生产率四个方面分析碳排放权交易影响企业碳排放的机制分析并进行机制的异质性分析，识别了地区与行业层面实现路径的异质性表现，以进一步得到更加精确的机制分析，为后面的政策建议提供确切的实践基础。

3 我国碳排放权交易机制覆盖企业碳排放核算研究

3 Research on carbon emission accounting of enterprises covered by China's carbon emission trading mechanism

近年来，碳减排问题得到越来越多关注，碳排放主要由直接碳排放和间接碳排放两部分组成。具体来说，直接碳排放是指在生产活动中所使用的能源所产生的温室气体排放；而间接碳排放则主要来源于电力和热力消耗过程中产生的温室气体，以及那些不易被精确计量的零散碳排放。由于零散碳排放的数据通常难以获取，因此在实际测量中，我们通常会从直接碳排放以及电力和热力消耗所产生的碳排放这两个主要方面来评估总体的碳排放量。纵观对碳减排的相关研究，主要聚焦于地区、行业宏观层面碳排放的量化估算，而企业作为减排主体，其对企业碳排放量的测算尤为重要，因此本文根据相关文献梳理出影响碳排放量的因素，选取研发投入和生产规模两个指标作为企业碳排放量的影响因素，运用函数型熵权模型刻画两指标权重随时间变化更新的特征，根据研发投入和生产规模所占各省份的比重再乘以分地区分行业的碳排放量可求得碳排放权交易机制覆盖企业的碳排放量，并从时间空间双维度上观察企业碳排放量的变化特征。

3.1 问题提出（Question raising）

碳排放量的测算是评估碳排放权交易机制减排效应的重要环节，为碳排放权交易机制的运行和制定具体、有针对性的减排策略提供基础数据，直接决定碳排放权交易政策的有效性、合理性、公平性和研究分析的可靠性。传统的碳排放核算方法主要有排放系数法、投入产出法、全生命周期法和指标替代法，其中，排放系数法和投入产出法适用于地区和行业宏观层面碳排放的测算，而针对企业碳排放问题，主要有指标替代、生命周期法，而指标替代法缺乏精准、真实和客观性，生命周期法适用于小样本企业；目前对企业碳排放的较为成熟的计算方法是借助行业地区层面碳排放并结合影响碳排放量的企业指标占比来求得企业碳排放量，但也存在指标选取片面，权重测算不准确等问题。

本文主要基于这种思路，进一步扩展了影响碳排放的指标数，从生产规模和技术投资两个指标层面来精确企业的碳排放量，鉴于企业生产规模和技术投资两项指标均为离散的年度数据而传统的熵权法没有考虑各指标权重随时间变化更新的特征，从而无法刻画企业生产规模和技术投资的指标函数在时空双重维度上的相对重要性，进而影响企业碳排放量核算的合理性。因此，本文将企业生产规

模与技术投资指标的离散数据函数化后，将熵权法加以函数型拓展以得到这两个指标对企业碳排放贡献的动态权重，并结合相关数据进行企业碳排放的计算。

3.2 我国碳排放权交易机制覆盖企业碳排放量的测算（China's carbon emission trading system covers the measurement of enterprise carbon emissions）

本文主要借鉴 Shen 等（2020）^[22]的论文通过计算分地区分行业的能源消耗与碳排放量，并结合影响碳排放量的企业指标占地区比重来求得企业碳排放量。具体的计算过程如下：

第一步计算分地区分行业的碳排放量。在计算宏观层面碳排放量时大多利用 IPCC 提供的清单法，即能源消费量乘以相应能源的碳排放系数，根据中国国家统计局提供的“能源平衡表”及“分地区分行业工业能源消费量”数据核算出各年份分地区分行业的碳排放。

第二步计算各地区内上市企业的碳排放总量。为了精确和防止夸大各地区内样本企业的碳排放量，首先根据各地区中的企业所属行业把所属行业碳排放量加总得到各地区内所有企业的碳排放量；其次，根据各地区内所包含的样本企业的资产占所属地区的总资产的占比计算各地区内上市企业的碳排放总量，排除了非上市公司和其它企业的碳排放量的影响。

第三步根据地区层面的碳排放数据计算各企业的碳排放量。

首先，要确定影响碳排放量的指标选取，Ang（2001）^[64]以 Kaya 恒等式为基础的指数分解模型从区域或行业层面将影响碳排放的因素分解为经济规模、产业结构、能源结构和能源强度等方面，郭朝先，2010^[65]、徐国泉，2006^[66]；邵帅，2017^[67]等相关研究表明，经济规模效应对地区或行业碳排放带来最大的正向贡献，能源强度效应则对碳排放带来最大的负向贡献，而其他两个指标的贡献率相对较小；并且，正如 Shen et al.（2020）^[22]所指出的，企业的生产规模越大，则其能源消耗越大，进而碳排放越高；同时，企业的技术创新水平越高，其减排效果越明显。因此，本文选取企业主营成本与绿色 R&D 研发投入作为其生产规模与技术投资的衡量指标；

其次，构建模型以确定指标权重，鉴于企业生产规模和技术投资两项指标均为离散的年度数据而传统的熵权法没有考虑各指标权重随时间变化更新的特征，从而无法刻画企业生产规模和技术投资的指标函数在时空双重维度上的相对重要性，进而影响企业碳排放量核算的合理性。因此，本文将企业生产规模与技术投资指标的离散数据函数化后，将熵权法加以函数型拓展以得到这两个指标对企业碳排放贡献的动态权重，具体模型如下：

(1) 基于双参数广义交叉验证的函数化重构

本文运用双参数广义交叉验证法对企业生产规模与技术投资指标进行函数化重构，在对企业生产规模与技术投资指标进行函数化建模时，首先要将二者的离散观测数据重构为在 Hilbert 空间上的连续本征函数（Ramsay and Silverman, 1991^[68]; Ferraty and Vieu, 2006^[69]）。以从属于地区 j 的企业生产规模指标为例，其实际样本观测值 $CA_{i,1}^j, \dots, CA_{i,T}^j$ 通常是连续本征函数 $\{CA_i^j(t), i = 1, \dots, n^j; t \in T\}$ 在有限观测时点带有白噪声序列 $\partial_i^j(t)$ 的离散实现，即 $CA_i^j(t) = CA_{i,t}^j + \partial_i^j(t)$ 。这里 n^j 为该地区中的样本企业个数， $t = 1, \dots, T$ ，其中 T 为终止年份。

而本文运用基函数开展对数据进行平滑处理以消除噪音的干扰，进而将企业生产规模指标的离散数据重构为相应的连续本征函数。为此，本文选取一组由 K^j 个最优基函数构成基函数系统 $\Phi_{CA}^j(t) = \{\varphi_{1,CA}^j(t), \dots, \varphi_{K,CA}^j(t)\}'$ ，并用其线性组合 $\sum_{k=1}^K \delta_{k,CA}^j \cdot \varphi_{k,CA}^j(t)$ 表征先验未知函数 $CA_i^j(t)$ ，其中 $\delta_{k,CA}^j$ 为相应基函数的系数。进而，本文运用 Ramsay et al. (2009)^[70] 所提出的基于粗糙惩罚的函数化方法以使该基函数线性逼近待估函数 $CA_i^j(t)$ 。为此，本文将该函数二阶导数平方的积分表示该指标函数曲线整体的粗糙度，并将其作为惩罚项引入残差平方和作为调和数据拟合度与估计结果光滑度两个目标的准则，进而构建粗糙惩罚平滑的拟合残差平方和

$$PENSSE(\lambda^j) = \sum_{t=1}^T [CA_{i,t}^j - \sum_{k=1}^K \delta_{k,CA}^j \cdot \varphi_{k,CA}^j(t)]^2 + \lambda^j \cdot \int [CA_i^{j''}(t)]^2 dt \quad (4-1)$$

其中， $\delta_{k,CA}^j$ 为待估的拟合系数，二阶导函数 $CA_i^{j''}(t)$ 用以体现该指标函数的波动状况，平滑参数 λ^j 用以权衡模型拟合优度与函数曲线平滑程度之间的比例关系； λ^j 越大意味着对曲线粗糙度施加的惩罚越大，函数曲线越平滑，波动程度越小。上式 4-1 即将本征函数 $CA_i^j(t)$ 在最小化惩罚残差平方和标准下由基函数线性逼近。

本文可以依据 Ramsay and Silverman (1991)^[68] 给出的经验法则确定最优基函数个数，并通过最小化广义交叉验证 $GCV(\lambda_i^j)$ 标准确定平滑参数 λ^j 的最优值，即

$$GCV(\lambda_{i,opt}^j) = \left(\frac{N^j}{T-df(\lambda^j)} \right) \cdot \left(\frac{PENSSE(\lambda^j)}{T-df(\lambda^j)} \right) \quad (4-2)$$

其中， N^j 为样本总量， $df(\lambda^j)$ 为投影矩阵 $H^j(\lambda^j) = \Phi^j (\Phi^{j'} \cdot \Phi^j + \lambda^j \cdot \mathbf{R})^{-1} \cdot \Phi^{j'}$ 的迹（自由度），即 $df(\lambda^j) = \text{trace}[H^j(\lambda^j)]$ ，其中 $\mathbf{R} = \int \Phi^j(t) \cdot \Phi^{j'}(t) dt$ 为基函数二阶导数外积积分构成的矩阵。由此，最小化式 4-2 得到最优解 $\hat{\delta}_{CA}^j = (\Phi^{j'} \cdot \Phi^j + \lambda^j \cdot \mathbf{R})^{-1} \cdot \Phi^{j'} \cdot CA_i^j$ ，其中 $CA_i^j = (CA_{i,1}^j, \dots, CA_{i,T}^j)'$ 。

鉴于 Ramsay et al. (2009)^[70] 所给出的基函数个数选取的经验法则过于主观而光滑参数 λ_i^j 的上述取值方法建立以选取最优基函数个数为前提，本文依据王德青等 (2021)^[71] 给出的基于双参数广义交叉验证的方法以解决函数重构过程中最

优基函数数目和惩罚平滑值的同时选取问题，由此 (λ^j, K^j) 的最优值由最大化广义交叉验证标准 $GCV(\lambda^j, K^j)$ 确定，即

$$(\lambda^j, K^j)_{opt} = \operatorname{argmin}_{(\lambda^j, K^j)} \left(\frac{N^j}{T - df(\lambda^j, K^j)} \right) \cdot \left(\frac{PENSSE(\lambda^j, K^j)}{n^j - df(\lambda^j, K^j)} \right) \quad (4-3)$$

由此，厂商的生产规模指标独立依据其观测值的波动特征自适应确定函数化参数，从而更灵活精确地重构其指标函数。本文即运用上述方法得到各地区中企业规模指标和技术投资指标的拟合曲线。

（2）基于函数型熵权的动态权重测度

本文在将厂商的生产规模与技术投资指标的离散数据函数化后，对传统熵权法进行函数化拓展以构建具有自适应迭代更新赋权特征的函数型熵权，从而确定各省份内企业规模指标和技术投资指标在企业碳排放中贡献的动态权重。

第一，为消除原始指标的量纲和属性差异所造成的影响，将地区 j 的各企业生产规模指标和技术投资指标分别进行正向和负向标准化处理，即

$$CA_{-s_i^j}(t) = \frac{[CA_i^j(t) - \min_{i \in [1, n^j]}(CA_i^j(t))]}{[\max_{i \in [1, n^j]}(CA_i^j(t)) - \min_{i \in [1, n^j]}(CA_i^j(t))]} \quad (4-4)$$

$$RD_{-s_i^j}(t) = \frac{[\max_{i \in [1, n^j]}(RD_i^j(t)) - RD_i^j(t)]}{[\max_{i \in [1, n^j]}(RD_i^j(t)) - \min_{i \in [1, n^j]}(RD_i^j(t))]} \quad (4-5)$$

其中， $CA_{-s_i^j}(t)$ 、 $RD_{-s_i^j}(t)$ 分别表示该厂商正向标准化后的生产规模指标和负向标准化后的技术投资指标数据， $CA_i^j(t)$ 、 $RD_i^j(t)$ 则分别为这两个指标函数化后的指标函数； $\max(CA_i^j(t))$ 、 $\max(RD_i^j(t))$ 和 $\min(CA_i^j(t))$ 、 $\min(RD_i^j(t))$ 分别为这两个指标函数在时间域 T 内的最大值和最小值。

第二，基于上述两个指标函数的波动信息计算相应的熵值函数，即对于标准化后的厂商生产规模和技术投资指标函数 $CA_{-s_i^j}(t)$ 与 $RD_{-s_i^j}(t)$ ，计算其在 T 中子区间 $[t_0, t_*]$ 相应的密度函数：

$$f_{i,CA}^j(t|t_*) = \frac{CA_{-s_i^j}(t)}{\int_{t_0}^{t_*} CA_{-s_i^j}(t) dt}, t_0 \leq t \leq t_* \leq T \quad (4-6)$$

$$f_{i,RD}^j(t|t_*) = \frac{RD_{-s_i^j}(t)}{\int_{t_0}^{t_*} RD_{-s_i^j}(t) dt}, t_0 \leq t \leq t_* \leq T \quad (4-7)$$

其中， t_0 为研究区间 T 的起始点， T 为 T 的终止点， t_* 为 T 内的动态变点。

第三，计算上述两个指标函数的信息熵，即标准化的厂商规模指标函数 $CA_{-s_i^j}(t)$ 和标准化的厂商技术投资指标函数 $RD_{-s_i^j}(t)$ 的信息熵值分别为：

$$e_{-CA}^j(t) = (\ln(t_* - t_0))^{-1} \cdot \int_{t_0}^{t_*} f_{i,CA}^j(t|t_*) \cdot \ln(f_{i,CA}^j(t|t_*)) dt \quad (4-8)$$

$$e_{-RD}^j(t) = (\ln(t_* - t_0))^{-1} \cdot \int_{t_0}^{t_*} f_{i,RD}^j(t|t_*) \cdot \ln(f_{i,RD}^j(t|t_*)) dt \quad (4-9)$$

需要说明的是，如果 $f_i^j(t|t_*) = 0$ ，则定义 $f_i^j(t|t_*) \cdot \ln(f_i^j(t|t_*)) = 0$ 。

第四，根据厂商规模指标函数和技术投资指标函数的信息熵值计算各自的动态权重，即

$$w_{CA,t}^j = \frac{1 - e_{CA}^j(t)}{2 - \sum_{j=1}^2 e_{CA}^j(t)} \quad (4-10)$$

$$w_{RD,t}^j = \frac{1 - e_{RD}^j(t)}{2 - \sum_{j=1}^2 e_{RD}^j(t)} \quad (4-11)$$

本文即按照上述方法计算得到不同地区在样本期内各企业标准化后的生产规模与技术投资指标及各自的动态权重。鉴于函数型信息熵的赋权方式含有信息自适应迭代更新机制，依据 4-10、4-11 计算得到的两个指标的动态权重能够客观、及时地体现二者在碳排放量贡献上相对重要性的动态变化。

最后，基于上述求得的地区碳排放量和指标权重按式 4-12 求得企业碳排放量。如对于来自地区 j 的某企业 i ，它在第 t 年标准化后的生产规模指标和技术投资指标分别定义为 $CA_{i,t}^j$ 和 $RD_{i,t}^j$ ，而这两个指标在该地区中的占比分别定义为 $CA_ratio_{i,t}^j$ 和 $RD_ratio_{i,t}^j$ ，已知该地区当年的碳排放量为 E_t^j ，则企业的碳排放 $E_{i,t}^j$ 可测度为

$$E_{i,t}^j = [w_{CA,t}^j \cdot CA_ratio_{i,t}^j + w_{RD,t}^j \cdot RD_ratio_{i,t}^j] * E_t^j \quad (4-12)$$

其中， $w_{CA,t}^j$ 表示在该年地区 j 的生产规模对其排放量的贡献比重， $w_{RD,t}^j$ 表示该地区技术投资对其排放量的贡献比重。

3.3 变量选取与数据来源 (Variable selection and data source)

本文选择我国 2008—2019 年在 A 股市场上市的主要工业企业作为研究样本。虽然我国各试点地区碳市场的行业覆盖范围存在差异，但钢铁、电力、化工、建材、石化、有色、造纸这 7 大能源密集型行业被绝大多数试点地区所考虑，且是全国碳市场建设所重点关注的控排行业。而考虑到企业数据的可获得性，本文仅将相应的上市公司作为研究样本。因此，本文主要计算所属 7 大行业的上市公司的碳排放量，而计算企业碳排放量所需的变量主要包括分地区分行业碳排放量、分地区分行业资产、企业研发投入、企业主营成本、企业总资产；其中，分地区分行业碳排放量与资产相关数据来自各年份各省份统计年鉴，企业研发数据来自万德数据库，企业主营成本、总资产数据来自国泰安数据库。本文所选择的变量的定义说明与数据见表 3-1 所示。

表 3-1 变量的描述及数据来源

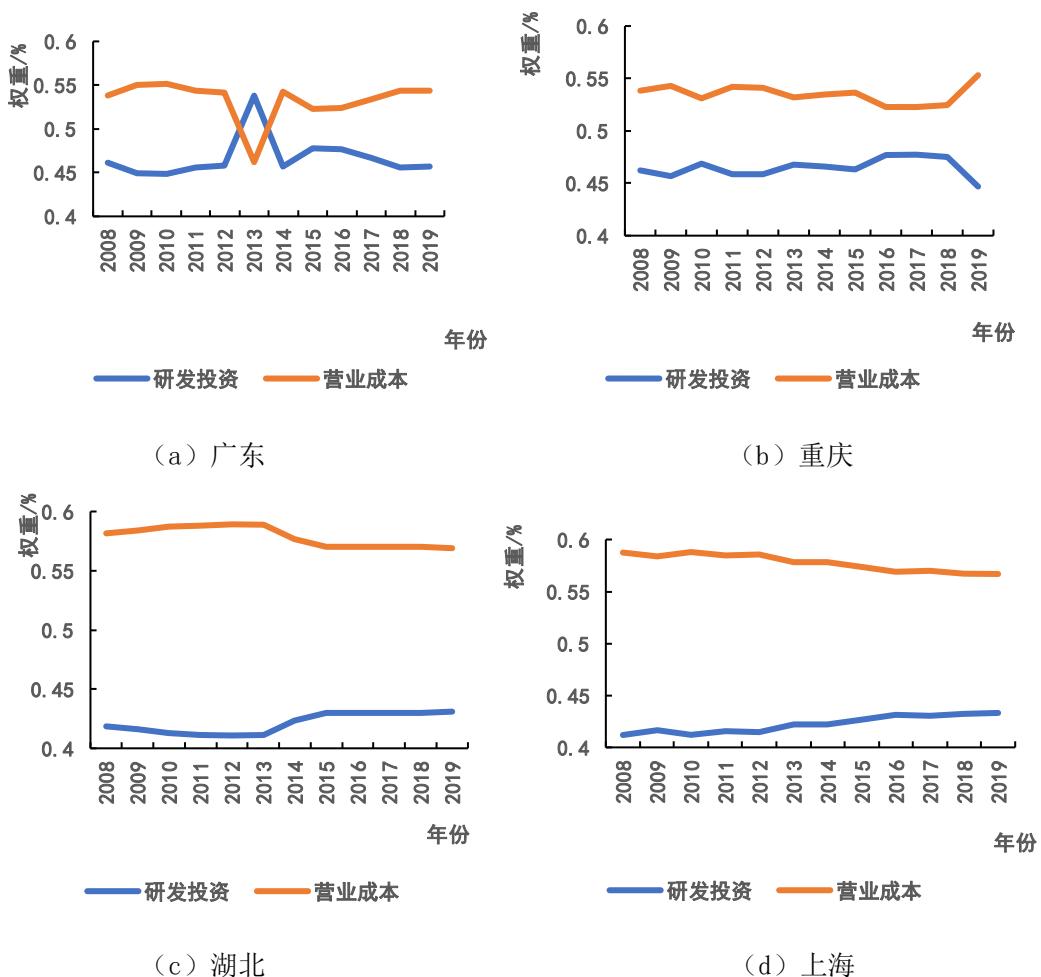
Table 3-1 Description of variables and data source

层面	变量	数据来源
分地区分行业	碳排放量	《中国能源统计年鉴》
分地区分行业	总资产	《中国统计年鉴》
企业层面	研发投入	万德数据库
企业层面	营业成本	国泰安数据库
企业层面	总资产	国泰安数据库

3.4 我国碳排放权交易机制覆盖企业碳排放量的结果分析 (Analysis of the results of China's carbon emission trading mechanism covering the carbon emissions of enterprises)

3.4.1 指标权重结果分析

本文在上一节主要根据相关文献梳理选取研发投入和生产规模两个指标作为企业碳排放量的影响因素,运用函数型熵权模型刻画两指标权重随时间变化更新的特征,如图 3-3 为各试点地区研发投入和营业成本两指标的动态权重变化,从图中可以看出,不同地区研发投入和营业成本两指标所占权重不同且变化趋势有差异,具体来说,广东和北京的研发投入和营业成本交替变化,上海和湖北的营业成本所占比重大于其它试点地区,但总的来说,营业成本对碳排放量的影响大于研发投入的影响。因此,各地区研发投入和营业成本使用不同的权重来测算企业的碳排放量是合理且必要的。



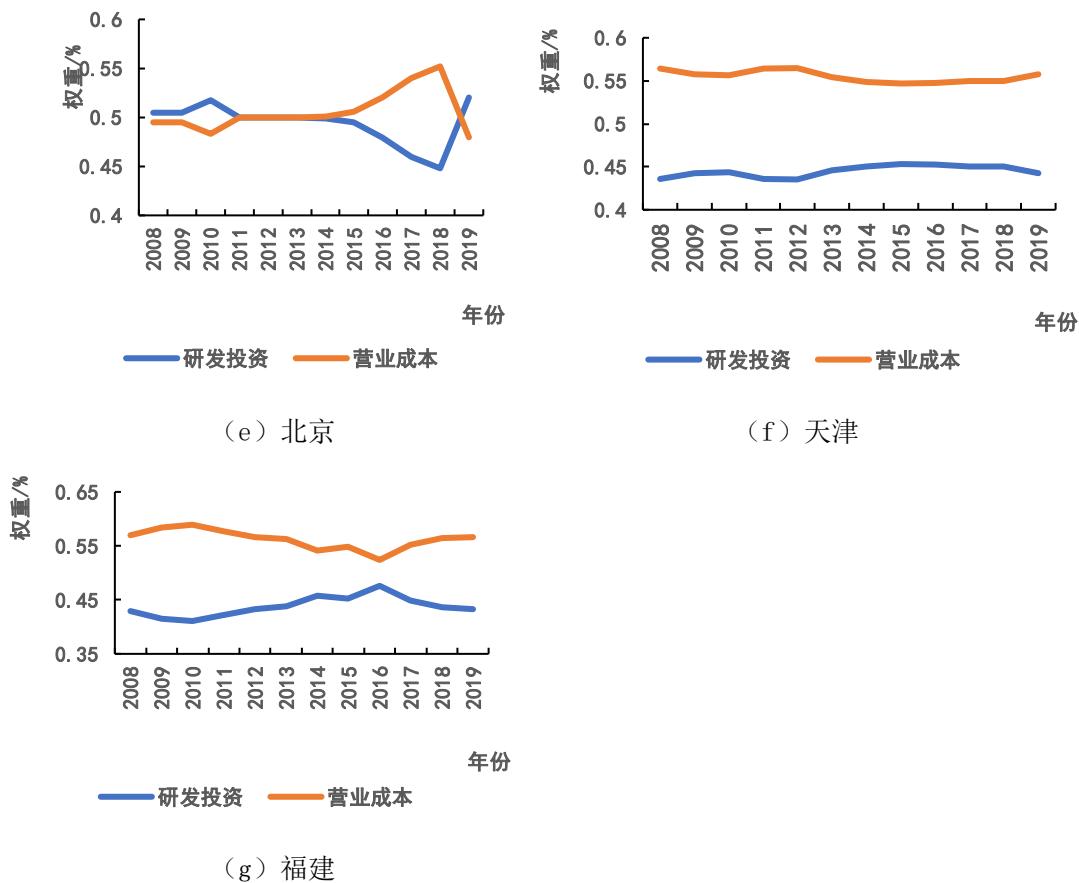


图 3-1 各试点地区指标权重变化

Figure 3-1 The index weight changes in each pilot region

3.4.2 试点地区覆盖企业碳排放量结果分析

本节主要基于企业的碳排放量和各试点地区所包含的厂商数对 2008-2019 年各试点地区的平均碳排放量的变化进行时间维度和空间维度两个层面的分析。

(1) 时间趋势

由图 3-2 各试点地区覆盖企业平均碳排放量的变化情况可知，在 2008-2019 年间，我国试点地区覆盖企业的平均碳排放量呈现不同的时间趋势。其中，天津、北京覆盖企业的平均碳排放量在 2013 以后呈明显的下降趋势，广东、福建、上海、湖北、重庆覆盖企业的平均碳排放量虽然在 2013 年后整体呈上升趋势，但上升缓慢，并结合图 3-3 各试点地区覆盖企业平均碳排放增长率的变化情况得出，虽然在 2008-2019 年间碳排放增长率没有明显的趋势变化，但在 2019 年我国试点地区覆盖企业的平均碳排放增长率呈下降趋势，说明我国 2013 年所实施的碳排放权交易机制整体上显著促进了试点地区所覆盖企业的碳减排，但碳排放权交易政策的减排效果和持续时间不同。

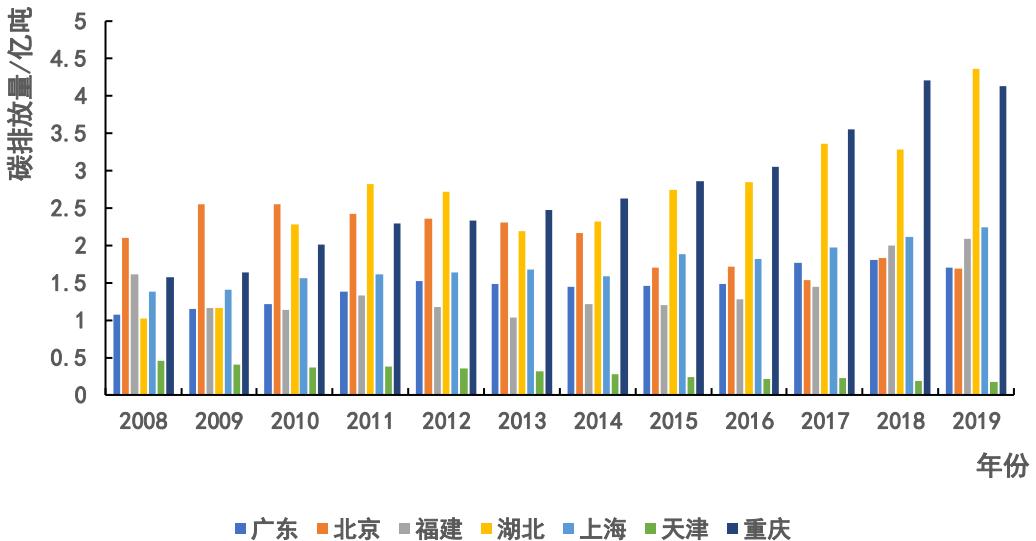


图 3-2 各试点地区覆盖企业平均碳排放的变化情况

Figure 3-2 Changes in the average carbon emissions of enterprises in each pilot area

(2) 空间趋势

由图 3-2 各试点地区覆盖企业平均碳排放的变化情况可知，在 2013 年，各试点地区覆盖企业平均碳排放量的排序为重庆、北京、湖北、上海、广东、福建、天津，在 2019 年，各试点地区覆盖企业平均碳排放量的排序为重庆、湖北、上海、福建、广东、北京、天津，说明不同试点地区覆盖企业的平均碳排放量存在显著差异；并由图 3-3 各试点地区覆盖企业平均碳排放增长率的变化情况得知，在 2019 年各试点地区覆盖企业平均碳排放增长率的排序为湖北、福建、广东、重庆、上海、北京、天津，各试点地区覆盖企业平均碳排放量的排序和平均碳排放增长率顺序大多相符，但各试点地区覆盖企业平均碳排放增长率呈下降趋势，进一步说明了碳排放权交易政策对覆盖企业的减排作用。

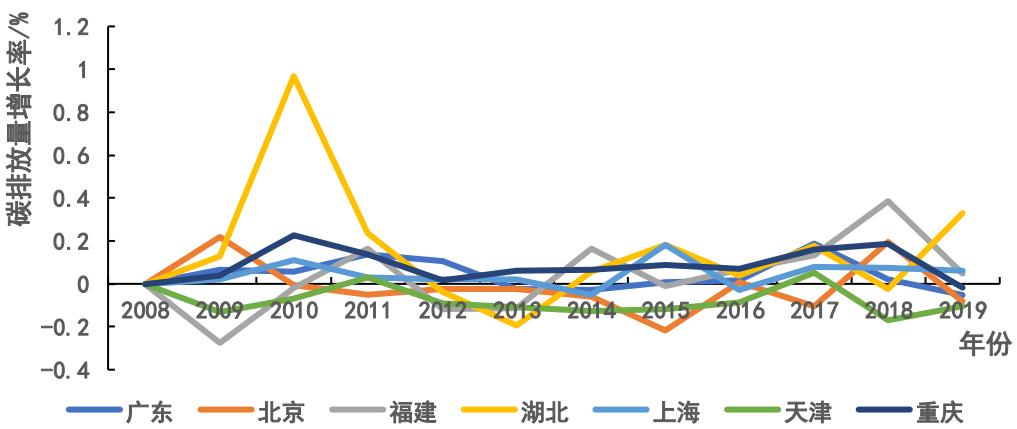


图 3-3 各试点地区覆盖企业平均碳排放增长率的变化情况

Figure 3-3 Changes in the average carbon emission growth rate of covered enterprises in each pilot area

3.4.3 各行业覆盖企业碳排放量结果分析

本节主要基于企业的碳排放量和各高耗能行业所包含的厂商数对 2008-2019 年各高耗能行业的平均碳排放量的变化进行时间维度和空间维度两个层面的分析。

(1) 时间趋势

由图 3-4 各高耗能行业覆盖企业平均碳排放的变化情况可知，在 2008-2019 年间，我国高耗能行业覆盖企业的平均碳排放量呈现不同的时间趋势。其中，黑色金属、石油加工行业覆盖企业的平均碳排放量在 2013-2015 年间呈明显的下降趋势，2015-2019 呈上升趋势，造纸、有色金属、非金属、电力、化工行业覆盖企业的平均碳排放量在 2008-2019 年整体呈现不同程度的上升趋势，但上升缓慢，并结合图 3-5 各高耗能行业覆盖企业平均碳排放增长率的变化情况得出，虽然在 2008-2019 年间碳排放增长率没有明显的趋势变化，但在 2019 年我国试点地区覆盖企业的平均碳排放增长率呈下降趋势，说明我国 2013 年所实施的碳排放权交易机制整体上显著促进了高耗能行业所覆盖企业的碳减排，但碳排放权交易政策的减排效果和持续时间不同。

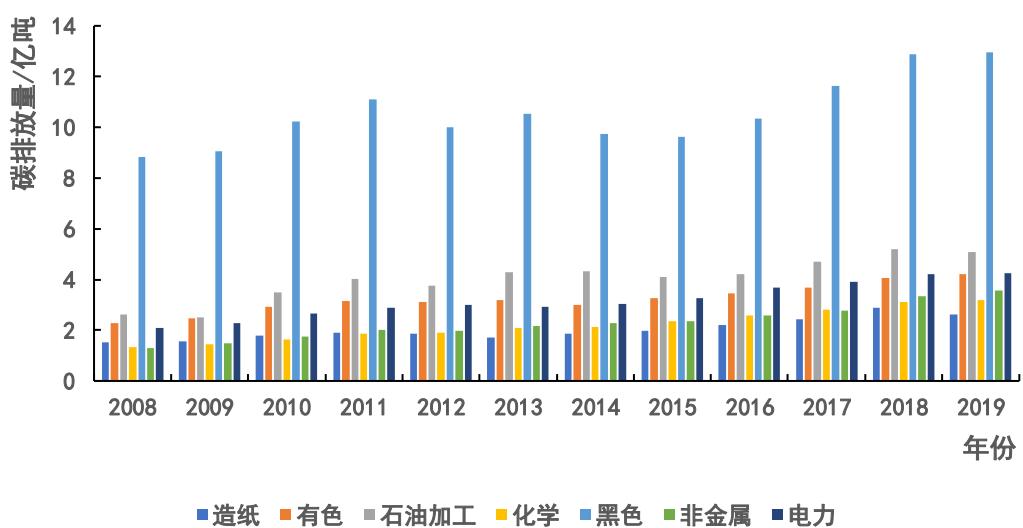


图 3-4 各行业覆盖企业平均碳排放的变化情况

Figure 3-4 Changes in the average carbon emissions of covered enterprises in various industries

(2) 空间趋势

由图 3-4 各高耗能行业覆盖企业平均碳排放的变化情况可知，在 2013 年，各高耗能行业覆盖企业平均碳排放量的排序为黑色金属、石油化工、有色、电力、非金属、化学、造纸，在 2019 年，各高耗能行业覆盖企业平均碳排放量的排序和 2013 年的排序相似，说明不同试点地区覆盖企业的平均碳排放量存在显著差异；并由图 3-3 各试点地区覆盖企业平均碳排放增长率的变化情况得知，在 2019 年各高耗能行业覆盖企业平均碳排放增长率的排序为非金属、有色金属、化学、

黑色金属、电力、石油加工、造纸，各高耗能行业覆盖企业平均碳排放增长率也有所不同，但各高耗能行业覆盖企业平均碳排放增长率都呈下降趋势，进一步说明了碳排放权交易政策对覆盖企业的减排作用。

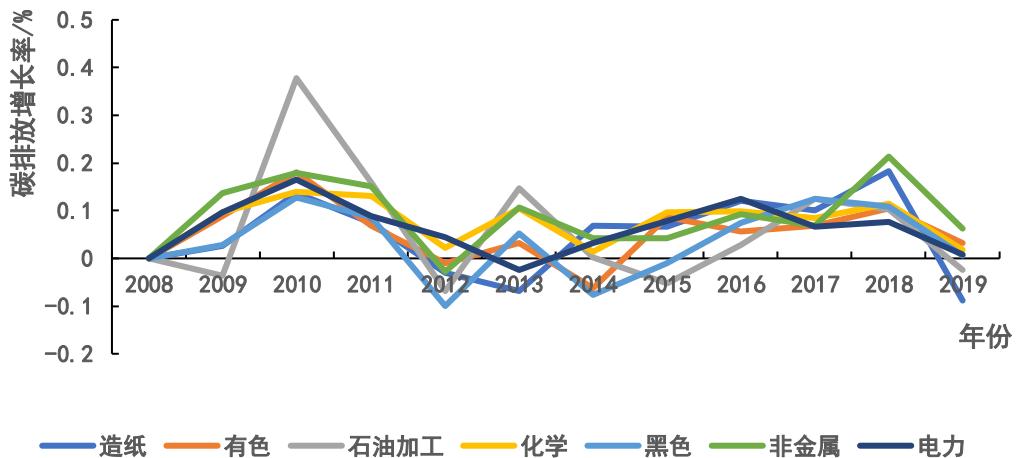


图 3-5 各行业覆盖企业平均碳排放增长率的变化情况

Figure 3-5 Changes in the average carbon emission growth rate of covered enterprises in various industries

3.5 本章小结 (Summary of this chapter)

本章的主要内容是分析了影响碳排放的因素并据此构建了企业碳排放营业成本与研发投入两个指标，建立了函数型熵权计算营业成本与研发投入指标的动态权重，并根据统计年鉴和能源平衡表收集了2008-2019年分地区分行业碳排放相关数据，包括能源消耗以及碳排放因子，计算出了各地区内上市企业的碳排放总量各阶段的碳排放量，再结合指标权重与企业所占地区生产规模与技术投资比重最终计算出各企业的碳排放。汇总出了基于时间和空间序列的企业碳排放量，并进行了相关分析。该内容对于深入了解企业碳排放情况具有重要的理论和实践意义。同时，为后面碳排放权交易机制对企业碳排放的影响研究提供了依据。

4 我国碳排放权交易机制对企业碳排放量影响的实证研究

4 An empirical study on the impact of China's carbon emission trading scheme on corporate carbon emissions

在明确减排目标的前提下，排污权交易机制可以赋予制造商在减排决策上的灵活性。如果控排企业的实际碳排放量超过规定的碳排放配额值，则需要在碳排放权交易市场上购买多余的碳配额，否则该控排企业将会受到严厉的处罚，这无疑增加了控排企业的生产成本。而那些在节能减排方面表现较好的控排企业，实际碳排放量会低于规定的碳排放配额值，就可以在碳排放权交易市场上出售剩余的碳排放配额，并从中获得收益。因此，碳排放权交易政策可以内部化控排企业碳排放的外部成本，通过成本压力和效益激励，鼓励控排企业主动进行节能减排，成为中国应对气候变化、实现“2030 年前实现碳峰值、2060 年前实现碳中和”目标的重要市场化政策工具（王许等，2021）^[72]。因此，需要准确评估碳排放权交易机制的减排有效性以进一步完善与优化市场机制的设计，从而保证“双碳”目标的顺利实现。而在选择评估方法时大多使用双重差分、合成控制等计量方法，可能存在选择偏误和聚类偏误等问题，因此，本文主要运用一种因果推断与随机森林结合的因果森林算法，通过估计倾向得分和使用稳健的聚类方法解决此问题，更加准确地评估碳排放权交易政策的碳减排效应并识别出企业特征在碳减排效应中的重要程度，进一步进行碳减排效应的异质性分析。

4.1 问题提出（Question raising）

在过去十年间，各试点地区相继建立了碳交易市场。2013 年，深圳、上海、北京、广东和天津正式启动碳交易市场，随后湖北和重庆于 2014 年启动，福建于 2016 年启动。中国于 2021 年 7 月以电力行业为突破口启动了全国碳排放权交易市场。排放权交易机制的构建较为复杂，其政策效果会受到所在地区或覆盖行业经济发展、减排潜力等多因素的制约。而企业作为组织生产与研发技术的重要市场主体，其在排放权交易机制下的减排决策将直接决定市场机制最终的减排效果（郭丰等，2021）^[73]。

已有的研究对于碳排放权交易机制的碳减排效应展开了相关的实证研究，并在基准研究的基础上进一步对碳减排的异质性进行研究，但研究对象多集中于地

区、行业宏观层面，缺乏对微观企业层面碳减排的研究，研究方法多使用双重、三重差分模型评估政策的处理效应，该方法存在随机性、样本选择偏误等问题，使对模型结果得出的因果性产生质疑；在异质性分析也多基于企业规模、性质、地区、行业进行分类研究，没有探究企业特征在碳排放权交易政策影响碳减排的重要程度，难以有效发现异质性来源。

而大数据及其相关的机器学习算法作为新兴的研究方法，具有强大的泛化能力和对现实经济的解释能力，并且因果森林可以以数据驱动的、非线性的、有纪律的方式组合多个解释变量，为我们提供了一个更有效的，在统计上更强大的工具来估计异质性治疗效果，此外，该算法还告诉我们每个企业特征在构建森林的重要性，这使得我们能够衡量这些特征作为碳排放权交易机制和企业碳排放之间因果关系的调节因素的相对重要性。因此，为了合理选取控制变量，研究碳排放权交易机制的企业碳减排因果效应及个体效应异质性分析，本章将机器学习与因果识别结合起来，主要使用因果森林方法进行因果推断，选取企业碳排放作为目标表征指标，评估碳排放权交易政策颁布实施的效果，识别碳交易对碳减排的处理效应，并根据企业本身、地区、行业的特点，通过测量这些特征变量并量化它们的相对重要性进一步探析影响因素的异质性特征。

4.2 模型构建、变量选取与数据来源 (Model construction, variable selection and data source)

4.2.1 模型构建

Athey 等 (2018)^[51]提出了一种因果推断与随机森林结合的因果森林算法，该算法能有效地改进随机对照试验处理组个体选择偏差并对异质性处理效应进行有效估计；同时，因果森林也结合经济学研究习惯，给出了估计量的渐进分布以及构造置信区间的方法，有助于确定因果效应并提高政策评估的可信度(Athey and Imbens,2016^[74];Knittel and Stolper,2019^[75])。本文主要使用因果森林模型进行碳排放权交易政策的减排有效性评估及异质性效应分析，具体步骤如下：

首先，排除样本随机性和选择偏误问题。利用随机森林模型依据企业的协变量估计企业纳入碳市场的倾向得分 $\hat{e}^{(-i)}(X_i)$ 及碳排放的预测值 $\hat{m}^{(-i)}(X_i)$ ，从碳市场中剔除协变量的影响。

其次，计算个体平均处理效应。基于剔除碳市场的倾向得分和碳市场的预测值的碳排放权交易政策和企业碳排放量，通过式 5-1 的估计函数估计每一个个体的平均处理效应，通过该函数可使得每一个训练样本在给定企业特征 X_i 时均能得到对应的条件平均处理效应 $\hat{\tau}(X_i)$ ，并进而能够在传统随机森林模型的框架下进行划分；其中 $\gamma_n(\tau(\cdot))$ 表示正则化项，用以控制得到的 $\hat{\tau}(\cdot)$ 函数的复杂度。

$$\hat{\tau}(\cdot) = \operatorname{argmin}_{\delta} \left\{ \sum_{i=1}^n ((ce_{it} - \hat{m}^{(-i)}(X_i)) - \tau(X_i)(treat_i * time_{i,t}) - \hat{e}^{(-i)}(X_i))^2 + \right.$$

$$\gamma_n(\tau(.))\} \quad (5-1)$$

最后，基于个体处理效应计算平均处理效应。

(1) 构建基决策树。为了控制潜在的混淆因素，并提高决策树的预测准确性，本文主要选择与目标变量相关的协变量将其纳入基决策树的构建中。基于相关文献梳理本文选取企业的资产负债率、账面价值、托宾 q 值、总资产、股东占比、产权性质、现金水平、企业业绩、增长水平及年龄、地区层面的人均 GDP、能源强度、外商投资、产业结构和行业间的竞争水平共 15 个变量用于广义随机森林识别；在构建这些基决策树的过程中，我们旨在实现最大化的组间差异和最小化的组内差异并注重将结果精细地聚类到个体层面，从而有效地控制那些不易观测的具体差异。而由于协变量选取的高维性，为了控制模型复杂程度和减少过拟合风险，在划分过程中，我们特别采用了 Wager 和 Athey(2018)^[51]提出的 Honest 方法。这一方法的核心思想是将样本一分为二：一部分用于构建随机森林，而另一部分则用于估计平均处理效果，使得用于估计因果效应的样本从未参与过模型的构建，通过独立地选择特征和估计因果效应，Honest 方法减少了模型对特定样本的依赖性，提高了所得结果的可靠性和准确性。

(2) 计算样本权重。完成基决策树的构建后，我们利用式 5-2 的自适应核函数 $\alpha_i(x)$ 来精确测量给定训练样本与企业协变量在随机森林中落在同一叶节点上的概率。其中 B 表示构建的随机森林模型由 B 棵树构成； $L_b(x)$ 表示特征变量为 x 的样本在第 b 棵树中所对应的叶节点， S_b 表示用于构建第 b 棵树的子样本集合。这一步骤的目的是为了获取不同训练样本在估算协变量条件平均处理效果时的权重。通过这种方式，我们能够得到类似于最近邻匹配的效果，进而形成条件平均处理效果的估计结果。这种方法确保了我们的估计结果既准确又可靠，能够充分考虑到不同样本间的差异性。

$$\alpha_i(x) = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B \frac{|\{x_i \in L_b(x), i \in S_b\}|}{|L_b(x)|} \quad (5-2)$$

(3) 计算平均处理效应。基于样本权重和剔除碳市场的倾向得分和碳排放的预测值的估计依据式 5-3 可对每一个给定特征变量计算出其对应的平均处理效应，在得到平均处理效应的一致估计后，其相应的标准差也可得到，从而在因果识别过程中构造平均处理效果的置信区间。

$$\hat{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i(x) [ce_{it} - \hat{m}^{(-i)}(X_i)] [treat_i * time_{i,t} - \hat{e}^{(-i)}(X_i)]}{\sum_{i=1}^n \alpha_i(x) [treat_i * time_{i,t} - \hat{e}^{(-i)}(X_i)]^2} \quad (5-3)$$

式 5-3 中， $\alpha_i(x)$ 是由机器学习驱动形成的核（kernel）， ce_{it} 为企业 i 在 t 年的碳排放量， $treat_i$ 为政策虚拟变量，参与碳交易的企业取值为 1，未纳入碳交易市场的企业取值为 0； $time_{i,t}$ 为考虑到各地区碳市场启动年份不同而设置的时间虚拟变量，当企业已参与碳市场时，该值取 1，而当企业还未参与碳交易时，

该值取 0。 $e(x)=P[treat_i * time_{it} | X_i=x]$ 表示当控制了企业特征变量时企业被纳入碳市场的倾向值得分，倾向值得分 $e(x)$ 满足 0-1 均匀分布， $m(x)=P[ce_{it} | X_i=x]$ 表示当控制了企业特征变量时，企业的政策处理效应期望值，并在计算 $\hat{m}(.)$ 和 $\hat{e}(.)$ 的倾向得分和处理效应期望值时采用“袋外”预测。

4.2.2 变量选取与数据来源

本文选择我国 2008—2019 年在 A 股市场上市的主要工业企业作为研究样本。虽然我国各试点地区碳市场的行业覆盖范围存在差异，但钢铁、电力、航空、化工、建材、石化、有色、造纸这 8 大能源密集型行业被绝大多数试点地区所考虑，且是全国碳市场建设所重点关注的控排行业。而考虑到企业数据的可获得性，本文仅将相应的上市公司作为研究样本。因此，本文将各试点地区归属于这些行业的上市公司列表并与这些地区发展改革或生态环境部门公布的碳市场纳入企业列表进行交叉对比得到本文实证分析部分归属于处理组的样本企业，而其他地区归属于这些行业的上市公司则作为控制组。

考虑企业自身经济特征、地区经济发展禀赋、投融资状况以及行业集聚对碳排放的影响，本文参考唐国平（2013）^[76]、王兵（2017）^[77]、Liu（2021）^[78]等加入了资产负债率、账面价值、托宾 q 值、总资产、股东占比、产权性质、现金水平、企业业绩、增长水平及年龄、地区层面的人均 GDP、能源强度、外商投资、产业结构、行业间的竞争水平、配额分配方式、配额核算方式和市场主体参与程度、固定资产支出共 19 个控制变量。而为获得相对平衡的面板数据，在本文中，我们针对所收集的数据进行了以下处理步骤：首先，剔除了那些在样本期间内被特别处理（ST/*ST/PT）的上市企业，以确保数据的准确性和可靠性；其次，我们排除了那些关键变量数据缺失的企业，以避免数据不完整对分析结果的影响；此外，我们还排除了 2013 年以后上市的企业，以保证研究样本的一致性和可比性。本文的控制变量数据均来源于国泰安数据服务中心（CSMAR）。最后，为了消除极端值对实证结果的潜在干扰，我们对所有连续变量在 1% 和 99% 的分位上进行了缩尾处理，以确保数据的稳健性。本文所选择的控制变量的符号表示与定义说明见表 4-1 所示。

表 4-1 控制变量的描述、测度方法和数据来源

Table 4-1 Description of control variables、measurement methods and data sources

变量	符号	测度方法	数据来源
企业规模	zzc	总资产	国泰安数据库
资产负债率	zcfzl	总负债/总资产	国泰安数据库
账面市值	zm	总资产/市值	国泰安数据库
投资机会	tb	托宾 q 值	国泰安数据库

续表 4-1

变量	符号	测度方法	数据来源
股权集中度	gdzb	前十名股东持股比例	国泰安数据库
企业性质	cqxz	国有企业=1, 非国有 企业=0	国泰安数据库
企业成熟度	age	企业年龄的自然对数	国泰安数据库
企业现金水平	xjzc	现金资产比率	国泰安数据库
企业业绩	zzcj1	总资产净收益率	国泰安数据库
企业增长率	zzcz	总资产增长率	国泰安数据库
投资水平	gj	固定资产投资	国泰安数据库
地区经济发展水平	lndgdp	地区人均 gdp 的对数	《中国统计年鉴》
能源强度	nyqd	地区能源消耗量	《中国能源统计年鉴》
产业结构	cyjg	地区第三产业占比	《中国统计年鉴》
外商直接投资水平	lnopen	地区外商投资额	《中国统计年鉴》
行业竞争力	H2	行业 HHI	《中国统计年鉴》

本文实证分析的处理组与控制组相关变量的主要描述性统计结果如表 4-2、表 4-3 所示。通过对比发现，试点地区参与碳排放权交易的工业企业与非试点地区工业企业 在 碳 排 放 量 和 控 制 变 量 数 值 上 均 有 较 大 差 异：一 方 面，试 点 地 区 控 排 企 业 的 碳 排 放 量 均 值 为 1.82，而 非 试 点 地 区 覆 盖 企 业 的 碳 排 放 量 均 值 为 3.76，试 点 地 区 的 企 业 碳 排 放 量 显 著 低 于 非 试 点 地 区 企 业 碳 排 放 量，说 明 碳 排 放 权 交 易 机 制 可 能 在 一 定 程 度 上 促 进 了 控 排 企 业 的 碳 减 排；另 一 方 面，试 点 地 区 与 非 试 点 地 区 的 其 他 控 制 变 量 在 数 值 上 存 在 偏 差，从 而 需 要 结 合 倾 向 匹 配 得 分 等 方 法 以 提 高 政 策 评 估 的 准 确 度。

表 4-2 试点地区相关变量的描述性分析

Table 4-2 Descriptive analysis of relevant variables in the pilot area

变量	符号	样本数	均值	标准差	最小值	最大值
企业碳排放量	ce5	1236	1.82	1.656	0.082	15.33
总资产	zzc2	1236	3.96	1.60	-1.77	8.33
股东占比	gdzb1	1236	3.95	0.43	0.28	4.61
资产负债率	zcfzl	1236	0.50	0.21	0.007	1.87
现金资产比率	xjzc	1236	0.13	0.12	0.0008	0.8
总资产净收益率	zzcj1	1236	0.006	0.86	-29.6	4.84
总资产增长率	zzcz	1236	0.28	2.22	-0.96	72.52

续表 4-2

变量	符号	样本数	均值	标准差	最小值	最大值
托宾 q 值	tb1	1236	2.07	2.67	0.79	56.66
账面价值	zm1	1236	0.66	0.26	0.011	1.26
企业年龄	age1	123	2.43	0.81	0	3.33
产权性质	cqxz	1236	0.56	0.49	0	1
外商投资水平	lnopen	1236	4.69	4.52	1.35	22.01
人均产出	lngdp	1236	10.85	0.39	9.72	11.63
能源强度	nyqd	1236	-1.01	0.33	-1.46	0.13
产业结构	cyjg	1236	3.68	0.31	2.79	4.10
行业竞争水平	H2	1236	0.08	0.06	0.02	0.49
固定资产支出	gj	1236	13.65	36.97	0	332.5

表 4-3 非试点地区相关变量的描述性分析

Table 4-3 Descriptive analysis of relevant variables in non-pilot areas

变量	符号	样本数	均值	标准差	最小值	最大值
企业碳排放量	ce5	3276	3.76	5.41	0.0004	53.49
总资产	zzc2	3276	3.93	1.38	-0.41	8.20
股东占比	gdzb1	3276	3.95	0.39	0.02	4.61
资产负债率	zcfzl	3276	0.54	0.26	0.01	3.67
现金资产比率	xjzc	3276	0.11	0.11	-0.003	0.81
总资产净收益率	zzcj1	3276	-0.004	1.02	-48.3	7.45
总资产增长率	zzcz	3276	0.31	4.60	-0.97	251.1
托宾 q 值	tb1	3276	1.82	1.31	0.27	16.49
账面价值	zm1	3276	0.69	0.26	0.008	1.44
企业年龄	age1	3276	2.38	0.73	0	3.30
产权性质	cqxz	3276	0.60	0.49	0	1
外商投资水平	lnopen	3276	5.74	5.94	0.77	64.31
人均产出	lngdp	3276	10.41	0.43	9.01	11.35
能源强度	nyqd	3276	-0.57	0.63	-1.62	0.89
产业结构	cyjg	3276	3.85	0.14	3.03	4.12
行业竞争水平	H2	3276	0.09	0.07	0.02	0.49
固定资产支出	gj	3276	7.89	20.48	-7.12	274.5

4.3 碳排放权交易机制企业碳减排效果的实证分析（Empirical analysis of carbon emission reduction effect of carbon emission trading scheme）

4.3.1 基准实证结果分析

在随机森林模型中当基本决策树的数量过少可能存在过拟合问题（刘敏等，2015）^[79]，导致结果有误差。本文首先计算了不同基决策树数量下碳排放权交易对企业碳排放的平均处理效应结果，并将所得到的结果进一步聚类到企业层面，以此更精准地控制那些难以观察的个体差异。观察表中的第(1)-(3)列数据，我们可以清晰地看到，随着基决策树数量的增加，碳排放权交易机制对企业碳排放量的平均处理效应稳定在大约-1.9 的水平，并且标准差的变化幅度很小。这充分表明，我们所选取的基决策树数量已经达到所需的准确度要求。另外，为了更全面地控制不同群体之间的差异，我们还采用了 Athey 和 Wager(2019)^[80]提出的广义森林模型下的聚类方法，从而确保研究结果的可靠性和有效性。表中的第(4)列表示了在控制个体差异后的估计结果仍然显著，说明碳排放权交易机制能够显著降低企业的碳排放量。

表 4-4 碳排放权交易对企业碳排放的影响

Table 4-4 The impact of carbon emission trading on corporate carbon emissions

	(1)	(2)	(3)	(4)
变量	ce	ce	ce	ce
treatment	-1.837*** (0.166)	-1.935*** (0.182)	-1.945*** (0.176)	-2.526*** (0.662)
聚类	No	No	No	Yes
树的数量	2000	3000	4000	4000
模型	Causal Forest	Causal Forest	Causal Forest	Causal Forest
观测值	4512	4512	4512	4512

注：表中*、**、***分别表示在 10%、5%和 1%的水平上显著，括号中数值为标准误。

4.3.2 异质性结果分析

（1）基于广义随机模型的异质性检验

在传统的线性模型中，通常假设平均处理效果为常数，并在方程中估计处理变量的系数，而随机森林则对每个个体的平均处理效果进行估计，然后聚类，得到整个样本的平均处理效果估计。碳排放权交易对企业碳排放处理效果的估计分布如图 4-1 所示。从中可以看出，大多数样本的平均处理效果集中在-1.9 附近，但整个样本的估计处理效果的取值范围为(-4,1)，说明对于不同企业而言，碳排放交易机制对企业碳排放的影响仍然存在较大差异。

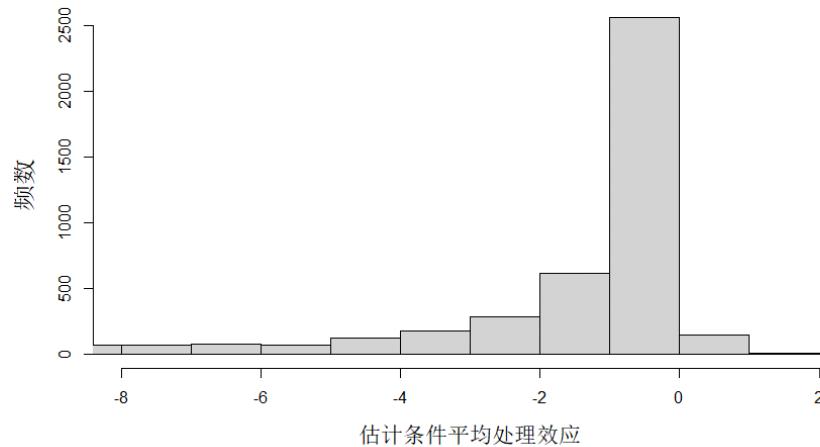


图 4-1 碳排放权交易对企业碳排放影响的处理效应分布

Figure 4-1 Distribution of treatment effects of carbon emission trading on carbon emissions of enterprises

为了验证碳排放权交易机制对企业碳排放量影响的异质性,本文进一步运用 Chernozhukov 等(2018)^[81]提出的“最优线性预测法”来进行碳排放权交易机制的平均处理效应的异质性检验,该方法将平均处理效应样本的估计值拆分成两部分,用来检验平均处理效应异质性。从表 4-5 中的异质性检验可以看出,无论是否聚类以控制个体差异,系数均显著为正,说明碳排放权交易机制对于企业碳排放量的影响存在明显的异质性,因此本文将对企业的特征重要性进行分析并在此基础上探讨不同企业特征碳排放权交易机制的企业碳减排效应的异质性。

表 4-5 异质性检验

Table 4-5 Heterogeneity test

变量	(1)	(2)
	ce	ce
均值	2.4329*** (0.4664)	1.6773*** (0.4669)
Differential	4.0105*** (0.8123)	3.1556*** (0.8862)
聚类	No	Yes
模型	GRF	GRF
观测值	4512	4512

(2) 个体特征差异的异质性分析

本文基于因果森林算法,在异质性方面分别从企业本身经济特征、地区、行业特征方面展开分析,得出各个特征对预测结果的 SHAP 值 (Shapley Additive Explanations) 来量化每个特征对模型预测结果的贡献程度,具体探索不同群体碳排放权交易对碳排放量的影响差异。如图 4-2 所示,企业的总资产的重要性在

0.29，地区外商投资水平的重要性在0.21，固定资产支出的重要性在0.17，由此得出，企业的规模大小、固定资产支出不同会对碳排放权交易机制的碳减排效应产生较大影响，因而本文主要研究随着企业总资产和固定资产支出变化对碳排放权交易机制的碳减排效应的影响。虽然碳市场配额核算方法、分配方式及市场参与主体的活跃度对碳排放权交易机制的减排效应的重要性较低，但为了进一步了解和完善碳市场的运行机制，本文对碳配额核算方法、配额分配方式和市场主体活跃度的调节作用进行相关探讨。

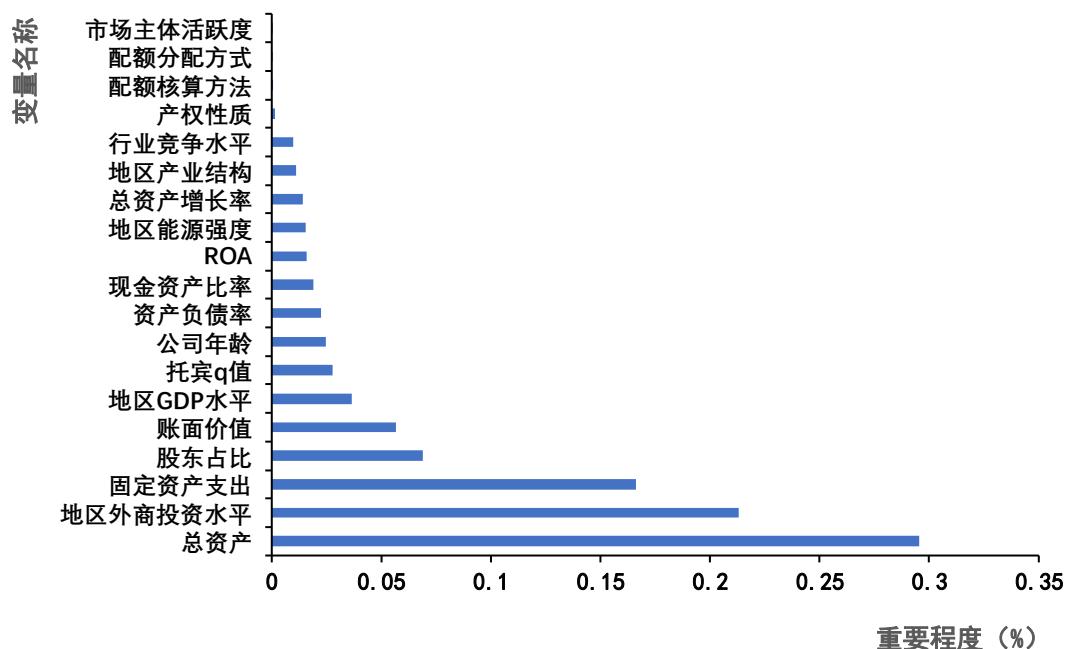


图 4-2 变量重要性
Figure 4-2 Importance of variable

1、规模异质性分析

由于规模的差异在很大程度上反映了企业在面对碳排放权交易机制时做法的差异，规模越大的企业，环境监管成本较高，同时，由于规模经济，他们的创新成本相对较低。因此，在内部利益-成本权衡的驱动下，大规模企业的绿色创新会增加更多，碳排放减少更多。本文图4-3中为用因果森林算法画出的对于碳排放权交易对企业碳排放的影响随着企业规模不断变化时的平均效应变化的特征曲线，结果显示随着规模的上升，碳排放权交易对企业碳减排的影响也存在明显的增加，其中规模在 $\ln 5$ 以下的企业的碳排放权交易对碳减排的影响较小，而当企业规模大于 $\ln 5$ 时，这个规模的企业可能具有较大的减排压力和更多的资金用于研发投入，因此，碳排放权交易对企业碳减排的影响逐渐变大，由此论证了碳排放权交易政策对规模不同的企业的碳减排效果具有明显的个体异质性。

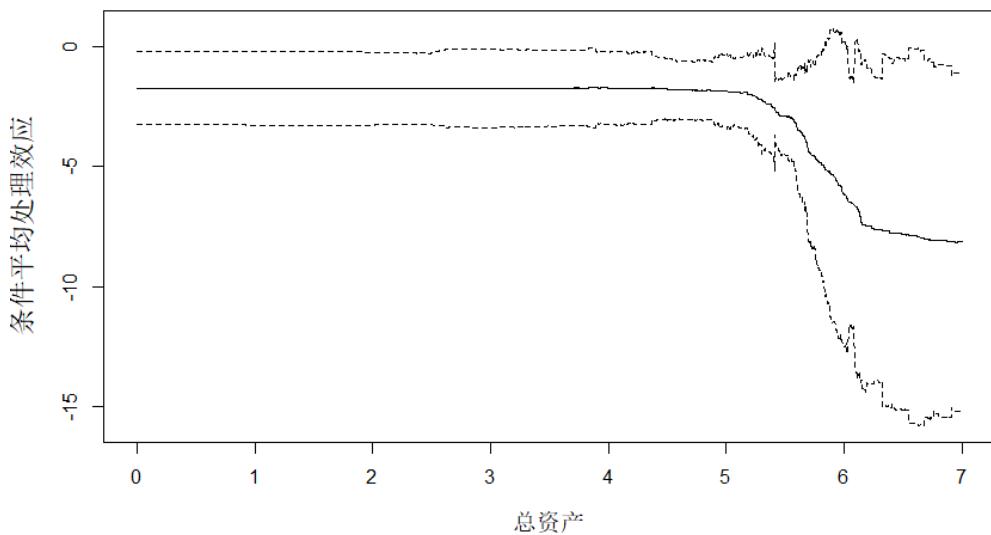


图 4-3 碳排放权交易对企业碳排放的平均因果效应随企业资产变化情况

Figure 4-3 The average causal effect of carbon emission trading on corporate carbon emissions varies with corporate assets

2、固定资产支出异质性分析

固定资产支出的差异在很大程度上反映了企业在面对碳排放权交易机制时所采取的减排措施，吕越等（2023）^[82]认为固定资产投资增加意味着企业增加去污设备采购，通过研究结果可以发现，增加去污设备的购买有利于企业的污染减排，同时也发现，在税收激励下，生产投资越高的企业减排越多。因此，随着固定资产投资的增加，鼓励企业升级设备，完成技术改造升级，从而增强企业的可持续发展能力，碳减排效果更好。本文图 4-4 中为用因果森林算法画出的对于碳排放权交易对企业碳排放的影响随着企业固定资产支出不断变化时的平均效应变化的特征曲线，结果显示随着固定资产支出的上升，碳排放权交易对企业碳减排的影响也存在明显的增加，其中固定资产投资支出在 $\ln 1.4$ 以下的企业的碳排放权交易对碳减排的影响较小，而当固定资产投资支出达到一定规模，即大于 $\ln 1.4$ 时，企业可能实现了规模经济，碳排放权交易对企业碳减排的影响逐渐变大，由此也论证了碳排放权交易政策对固定资产支出不同的企业的碳减排效果具有显著个体异质性。

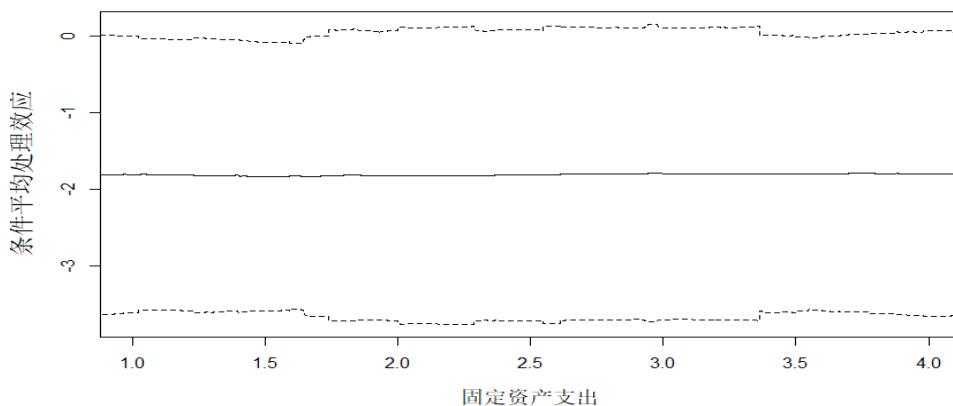


图 4-4 碳排放权交易对企业碳排放的平均因果效应随企业固定资产支出变化情况

Figure 4-4 The average causal effect of carbon emission trading on enterprises' carbon emissions changes with enterprises' fixed asset expenditure

3、地区异质性分析

从区域视角来看，如表 4-6 所示，碳排放权交易机制对 7 个试点地区的企业均促进了碳减排，对北京、广东地区的碳减排效应最大。高度市场化的环境能够为企业创造更加公平、透明的竞争氛围，激发企业的创新活力（孙峥等，2005）^[83]。同时，不同地区碳排放水平的差异，使得企业在面对减排任务时，会根据自身实际情况采取不同的策略，这也间接影响了企业的碳减排行为（佟家栋等，2023）^[84]。因此，本文认为碳排放权交易机制对北京、广东地区的碳减排效应最大可能是因为广东和北京有较高的市场化水平和面临更严格的环境规制，并且依据樊纲、王小鲁（2001）^[85]提供的各省市场化指数中可以得到广东、北京的市场化程度更高进一步佐证了观点。因此，在制定碳减排政策时，需要充分考虑地区市场化水平和碳排放差异对企业行为的影响，以实现更加有效的减排目标。

表 4-6 各地区异质性检验

Table 4-6 Regional heterogeneity test

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
变量	广东	北京	上海	天津	湖北	重庆	福建
Treat*time	-10.5*** (2.47)	-6.659*** (1.15)	-0.648*** (0.42)	-1.296*** (0.39)	-1.749*** (0.47)	-1.412*** (0.41)	-1.186*** (0.39)
聚类	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
树的数量	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
模型	Causal forest	Causal forest	Causal forest	Causal forest	Causal forest	Causal forest	Causal forest
观测值	4512	4512	4512	4512	4512	4512	4512

注：表中*、**、***分别表示在 10%、5% 和 1% 的水平上显著，括号中数值为标准误。

4、行业异质性分析

碳排放权交易划分了包括电力、化工、非金属、黑色、有色金属和造纸等重点行业。如表 4-7 所示，碳排放权交易政策对企业碳排放量的影响在不同行业间表现出显著的异质性。在各行业进行的异质性检验中，我们可以看到（1）-（3）列的系数均显著为负，这表明政策在电力、化学和非金属这三个行业均发挥了积极的抑制作用。具体而言，政策的效应从强到弱依次为电力、非金属和化学行业。这意味着电力行业受到的政策影响最为显著，非金属行业次之，而化学行业则相对较弱。电力行业作为典型的高排放、高耗能行业，自然成为了我国碳排放权交易政策试点首批关注的重点。观察数据，我们发现电力行业的交乘项系数在所有行业中位居首位，这充分表明碳排放权交易政策对电力行业的碳减排效果尤为显著。这背后的原因不难理解，电力行业作为全国碳排放量最高的行业，承受着巨大的减排压力。在这种形势下，电力行业的企业不得不积极采取措施，加大碳减排力度，以应对政策要求和市场挑战。但是，碳排放权交易政策对黑色金属、有色、造纸和石油化工行业的企业碳排放无明显作用，可能是黑色、有色等行业的减排成本高，这些行业的企业通过购买大量的碳排放配额来应对碳排放问题而不是采取措施来降低自身的碳排放量。

表 4-7 各行业异质性检验
Table 4-7 Industry heterogeneity test

变量	(1) 电力	(2) 化学	(3) 非金属	(4) 黑色	(5) 有色	(6) 造纸	(7) 石油化工
Treat*	-2.1*** (0.51)	-0.59*** (0.42)	-0.64*** (0.41)	-1.348 (0.69)	-0.216 (0.24)	-0.004 (0.24)	1.347 (4.38)
聚类	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
树的数量	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
模型	Causal forest	Causal forest	Causal forest	Causal forest	Causal forest	Causal forest	Causal forest
观测值	4512	4512	4512	4512	4512	4512	4512

注：表中*、**、***分别表示在 10%、5% 和 1% 的水平上显著，括号中数值为标准误。

4.3.3 碳市场运行机制的调节效应分析

中国各试点地区的碳排放权交易市场可根据各自地区碳市场的实际情况设计具体的碳排放权交易机制，由于各地区经济发展水平、减排目标和潜力的不同，各地区的碳排放权交易市场运行机制的设计存在差异。本文在上节中对碳市场配额核算方法、分配方式及市场参与主体的活跃度对碳排放权交易机制的减排效应的重要性进行了测度，虽然碳市场配额核算方法、分配方式及市场参与主体的活

跃度对碳排放权交易机制的减排效应的重要性较低，但为了进一步了解和完善碳市场的运行机制，本文采用因果森林算法对碳配额核算方法、配额分配方式和市场主体活跃度的调节作用进行相关探讨。

（1）碳市场配额分配方式分析

碳市场配额分配方式主要有有偿分配和无偿分配，当企业需要花钱购买碳配额时为有偿分配，当企业不需要支付费用时为免费分配。目前，上海、重庆、湖北和福建碳市场完全采用免费分配的方式，广东、深圳、北京、天津的碳排放权交易市场配额分配方式在配额免费分配的基础上补充了部分配额付费分配的机制。而碳排放权交易市场初始碳配额分配方式不同会对企业的减排激励和约束产生不同的影响。和以免费的方式获得初始配额相比，有偿分配更能激发企业进行节能减排。因此，本文认为采取有偿分配时，控排企业碳减排效果的作用更为明显。为了对上述预期进行检验，本文将上海、重庆、湖北和福建试点地区碳排放权交易市场的企业定义为配额免费分配组，将其余4个碳排放权交易市场的企业定义为配额有偿分配组，并对其他非试点省份企业进行比较。

（2）碳市场碳配额核算方法分析

碳市场初始配额核算方法可分为历史法和基准法。在进行碳市场碳配额核算时，历史法主要以企业的以往碳排放量的数据为依据来确定当前企业所需的碳配额，而基准法则以控排企业所属行业的碳排放量为基准确定单位产量的碳排放量，进而确定控排企业的碳排放配额。目前，中国七大碳排放权交易市场的不同行业的碳配额核算方法存在差异。比如，在上海地区碳市场中，基准法适用于电力、航空等行业的碳配额核算，历史法则适用于工业、酒店等行业的碳配额核算。不同配额核算方法会对企业的减排激励程度不同，因此本文基于碳市场碳配额核算方法的差异进行异质性分析。

（3）碳市场参与主体程度分析

碳排放权交易市场的参与主体主要包括有履约义务的控排企业交易主体和没有履约义务的机构和个人投资者这一交易主体。而非履约义务的机构和个人投资者这一交易主体参与碳排放权交易市场主要是为了通过低买高卖的方式获得超额利润，他们的碳市场交易行为在一定程度上加快了碳排放权交易市场的流动性，并且涂正革和谌仁俊(2015)^[86]认为流动性是影响中国的碳排放权交易机制的政策效果的关键因素。因此，本文认为，当碳排放权交易市场中机构和个人等非履约主体参与度越高时，会降低企业节能减排效益的风险性，而且可以减少碳排放权交易市场中企业的交易成本，增加潜在收益，碳排放交易机制对企业的碳减排效应的影响效果就越明显。本文人工收集了碳排放权交易市场年度工作报告和七个试点地区的碳交易所官方所披露的机构和个人等非履约主体的年度交易数

据，从该信息披露的交易数据来看，本文将湖北、广东和北京这三个碳市场划分为非履约主体参与率较高的群体，将其他四个碳市场划分为非履约主体参与率较低的群体。

上述总结分析了碳排放配额分配方式、核算方法及非履约主体的市场参与程度的特点及含义，借鉴胡珺等（2023）^[14]相关研究，中国碳市场试点地区的机制设计如下表 4-8 所示，并基于碳试点地区进行了分类，该变量的数据描述与来源如表 4-9 所示。

表 4-8 试点地区碳市场机制设计

Table 4-8 Design of carbon market mechanism in pilot areas

试点地区	配额分配方式	配额核算方法	碳市场参与主体
上海	无偿分配	基准法	非履约主体活跃度低
重庆	无偿分配	历史法	非履约主体活跃度低
湖北	无偿分配	历史法	非履约主体活跃
福建	无偿分配	历史法	非履约主体活跃度低
广东	有偿分配	基准法	非履约主体活跃
北京	有偿分配	历史法	非履约主体活跃
天津	有偿分配	历史法	非履约主体活跃度低

表 4-9 试点地区碳市场运行机制变量描述

Table 4-9 Description of operating mechanism variables of carbon market in pilot area

变量	含义	数据来源
配额分配方式	试点地区有偿分配=1, 无偿分配=0	手工收集
配额核算方法	试点地区基准法=1, 历史法=0	手工收集
碳市场参与主体	非履约主体活跃度高=1, 活跃度低=0	手工收集

表 4-10 展示了碳排放权交易市场机制的调节效应结果。第（1）列到第（3）列分别表示了有偿分配、基准法和非履约主体市场参与度高的调节效应，结果都是显著为负，说明这些碳排放权交易市场机制的设计都对碳排放权交易政策的企业碳减排效应产生了促进作用，但是该调节效应过小，分别为 -0.58、-0.46、-0.75，这与在运用因果森林对特征变量重要性进行测度时得出的结论相符，表 4-11 为运用调节模型所得到的碳市场运行机制的调节效应，进一步分析，试点地区的碳排放权交易市场机制的作用显得相对有限。这可能是由于我国碳排放权交易仍处于试点阶段，市场机制在功能上存在一定的缺失，交易机制也尚未完善。这些因素都限制了市场机制在推动企业碳减排方面的激励作用，导致其效果有限。

表 4-10 碳市场运行机制的调节效应结果
Table 4-10 The regulatory effect of the operating mechanism of carbon market

变量	(1)	(2)	(3)
	ce	ce	ce
treatment	-0.581*** (0.443)	-0.463* (0.314)	-0.75*** (0.67)
聚类	Yes	Yes	Yes
树的数量	4000	4000	4000
模型	Causal Forest	Causal Forest	Causal Forest
观测值	4512	4512	4512

表 4-11 调节效应结果稳健性检验
Table 4-11 Robustness test of moderating effect results

	(1)	(2)	(3)
	ce5	ce5	ce5
treattime	-0.371*** (-3.11)	-0.600*** (-5.01)	-0.657*** (-5.05)
p2	-0.0015*** (-6.39)		
h2		-0.00014*** (-2.81)	
s3			-0.00013* (-1.52)
zzc2	0.692*** (13.36)	0.692*** (13.28)	0.702*** (13.50)
gdzb1	-0.078 (-0.95)	-0.088 (-1.06)	-0.084 (-1.02)
zcfzl	0.532*** (3.69)	0.499*** (3.44)	0.499*** (3.44)
xjzc	0.258 (0.87)	0.267 (0.90)	0.275 (0.92)
zzcz	0.001 (0.10)	0.001 (0.14)	0.001 (0.11)
tb1	0.078*** (3.77)	0.083*** (3.96)	0.087*** (4.18)
zm1	0.507*** (2.63)	0.579*** (3.00)	0.571*** (2.96)
age1	-0.454*** (-4.64)	-0.526*** (-5.40)	-0.517*** (-5.29)
cqxz	0.249*** (2.82)	0.262*** (2.96)	0.268*** (3.03)
lngdp	-3.662*** (-9.72)	-3.418*** (-9.09)	-3.360*** (-8.94)

续表 4-11

	ce5	ce5	ce5
nyqd	1.057*** (4.78)	1.058*** (4.75)	0.993*** (4.48)
cyjg	3.184*** (5.94)	2.885*** (5.38)	2.996*** (5.53)
lnopen	0.026*** (3.02)	0.019** (2.21)	0.023*** (2.64)
_cons	24,886*** (6.90)	23,752*** (6.56)	22,624*** (6.27)
N	4512	4512	4512
R ²	0.268	0.262	0.261
adj. R ²	0.197	0.190	0.189

注：表中*、**、***分别表示在 10%、5% 和 1% 的水平上显著，括号中为 t 检验统计量。

4.3.4 稳健性检验

上文的基准回归结果显示碳排放权交易政策显著降低了试点地区企业的碳排放量。然而，这种基准结果估计可能受到多种因素的影响，存在潜在的偏差。为了确保结果的准确性和可靠性，我们进行了更换计量方法、消除其它政策影响等方法的稳健性检验。

(1) 更换计量方法

在评估政策有效性的方法中，双重差分和 PSM-DID 模型被广泛使用，它们能有效缓解企业样本分组的非随机性问题，解决内生性问题，降低系统性误差。本文参考了 Zhi 等 (2022)^[87] 的做法，利用企业、地区和行业特征的控制变量进行匹配，并采用 1:1 最近邻匹配方式进行检验。DID 的检测结果如表 4-12 第 (1) - (2) 列所示，PSM-DID 检验结果如表 4-12 第 (3) - (4) 列所示。结果显示，无论是否加入控制变量，DID 和 PSM-DID 的检验结果均保持一致，虽然系数与基准结果相比有所波动，但影响方向并未改变，说明结果稳健。

(2) 消除其它政策影响

在碳排放权交易政策试点期间，2010 年颁布的低碳城市试点和创新型城市试点计划政策可能对企业的碳排放量产生影响，从而干扰我们的估计结果。为了消除这些政策的影响，我们逐一排除了这些政策实施年份的数据，并重新进行了估计。回归结果如表 4-12 第 (5) 列显示，交互项的系数显著为负，说明碳排放权交易政策对企业碳排放量的影响并未受到这些政策的干扰，再次证明了基准结果的稳健性。综上所述，通过更换计量方法和消除其他政策影响等多种方法，我们对基准回归结果进行了全面的稳健性检验。结果表明，碳排放权交易政策对试点地区企业的碳减排具有显著的促进作用，且这一结果稳健可靠。这为我们进一

步完善碳市场建设、发挥减排效应提供了有力的政策依据。

表 4-12 稳健性检验结果
Table 4-12 Robustness test results

变量	DID		PSM-DID		消除其它政策影响
	ce5	ce5	ce5	ce5	
tt	-0.776*** (0.103)	-0.779*** (0.101)	-0.455*** (0.0892)	-0.4 *** (0.089)	-0.781*** (0.109)
zzc2		0.703*** (0.052)		0.611*** (0.045)	0.711*** (0.0567)
gdzb1		-0.0860 (0.083)		-0.0868 (0.069)	-0.0914 (0.0853)
zcfzl		0.494*** (0.145)		0.228* (0.122)	0.402*** (0.153)
xjzc		0.295 (0.297)		-0.0578 (0.254)	0.237 (0.333)
zzcj1		-0.0119 (0.024)		-0.0168 (0.040)	-0.0129 (0.0242)
zzcz		0.00064 (0.006)		-0.0019 (0.015)	0.0016 (0.0058)
tb1		0.0868*** (0.021)		0.0752*** (0.017)	0.0803*** (0.0219)
zm1		0.581*** (0.193)		0.376** (0.164)	0.428*** (0.205)
age1		-0.528*** (0.098)		-0.436*** (0.083)	-0.584*** (0.107)
cqxz		0.271*** (0.089)		0.203*** (0.077)	0.274*** (0.095)
lnopen		0.0218** (0.009)		-0.04*** (0.015)	0.0123 (0.0087)
lngdp		-3.321*** (0.375)		-1.46*** (0.320)	-2.46*** (0.369)
nyqd		0.985*** (0.222)		0.668*** (0.187)	0.751*** (0.229)
cyjg		2.896*** (0.537)		1.224*** (0.464)	-0.0002 (0.0022)
H2		0.758 (0.790)		1.504** (0.656)	0.675 (0.864)
_cons	2.222*** (0.0803)	22.58*** (3.608)	2.098*** (0.0683)	10.78*** (3.056)	25.41*** (3.692)
N	4512	4512	4140	4140	4136
R ²	0.167	0.261	0.181	0.255	0.254
adj. R ²	0.088	0.189	0.099	0.177	0.174

注：表中*、**、***分别表示在 10%、5%和 1%的水平上显著，括号中为 t 检验统计量。

4.4 本章小结（Summary of this chapter）

为探讨碳排放权交易机制对企业碳排放的影响效应，本章基于上市公司的面板数据，借助 stata、R 等软件进行一系列实证分析。首先，构建因果森林算法模型探究碳排放权交易政策对企业碳减排的基准回归结果，研究发现碳排放权交易政策显著的抑制了企业的碳排放量，并采取更换计量方法，排除其它政策的影响方法进行稳健性检验来证实基准结果的可信性；其次，基于广义随机森林模型的异质性检验和最优线性预测法证实了碳排放权交易政策的企业碳减排效应存在异质性，并基于因果森林对特征变量的重要性进行测度，发现企业规模和固定资产支出在碳排放权交易政策的企业碳减排效应占比较大，并描绘了碳排放权交易对企业碳排放的平均因果效应随企业资产变化、固定资产支出变化情况曲线，并从区域、行业异质性视角，深度系统剖析了该政策实施强度的差异性；最后，探索了碳排放权交易市场运行机制对企业碳减排效应的调节作用，发现碳市场配额分配方式、核算方法及非履约主体市场参与度的调节效应较小并在碳排放权交易政策影响企业碳减排中所占比重也较小，说明市场机制存在功能性缺失、交易机制不够完善等问题，为进一步优化和标准化碳市场的运作机制，提供了有价值的参考与借鉴。

5 我国碳排放权交易机制减排效应的作用机理分析

5 Mechanism analysis of emission reduction effect of China's carbon emission trading mechanism

根据前文的基准回归结果,虽然碳排放权交易政策已经显著地推动了企业的碳减排工作,但我们对于这一政策如何降低企业碳排放量的具体机制和渠道仍然缺乏深入的了解。本研究从生产规模、管理费用率、融资约束和全要素生产率四个方面更加全面地对碳排放权交易机制的企业碳减排效应的机制进行了讨论,并相关研究在检验中介效应时常用的方法是逐步检验回归系数,缺乏因果性,此外,相关文献在进行碳减排机制路径分析时只对整体减排渠道进行研究而缺乏减排渠道异质性的讨论;因此,本文采用 Hicks 和 Tingley (2011)^[1]所提出的平均因果中介模型从生产规模、管理费用率、融资约束和全要素生产率四个方面识别碳排放权交易机制影响控排企业碳减排的平均因果中介效应以明确其影响机理,并进一步从不同地区、行业方面探究碳减排渠道的异质性,揭示不同地区、行业减排路径的差异性。

5.1 问题提出 (Question raising)

探究碳排放权交易政策的企业碳减排渠道并进一步分析减排渠道的异质性对于优化碳市场设计,针对性地设计碳减排渠道,充分发挥减排潜力具有重要意义,虽然有不少学者已经评估了碳排放权交易机制的碳减排路径,但仍存在中介效应评估方法不合理、机制路径考虑不全面、相关文献对碳排放交易机制的整体减排路径进行了深入研究,但尚未针对中国各试点地区以及高耗能行业在碳排放权交易机制下碳减排效应的作用路径异质性展开详细讨论。本文采用平均因果中介模型,该模型可在一系列仿真的基础上进行参数估计进而识别出所关注的平均因果中介效应,并且可以给出有关中介效应估计结果不违背关键识别假设的敏感性分析。因此,本文采用平均因果中介模型从四个方面识别碳排放权交易机制影响控排企业碳减排的平均因果中介效应以明确其影响机理,并从不同地区、行业方面进行碳减排渠道的异质性分析。

5.2 模型构建、变量选取与数据来源 (Model construction, variable selection and data source)

5.2.1 模型构建

中介效应分析在许多领域都有广泛应用。中介效应模型为我们提供了一个有力的工具,用以深入剖析自变量对因变量产生影响的具体过程和机制。相较于仅

对自变量和因变量间关系进行简单分析的同类研究，中介分析不仅优化了研究方法，而且通常能够揭示更多、更深入的细节和结果，为我们提供了更为全面和深入的视角。根据查阅以往文献，检验中介效应最常用的方法是逐步检验回归系数（Baron, 1986^[88], Judd, 1981^[89], 温忠麟, 2004）^[90]，即通常说的逐步法。而早期的中介分析方法主要依赖于结构方程建模的一种形式，并非基于因果推理的严谨框架构建而成，因此在应用过程中，它未能提供对关键识别假设进行敏感性分析的机会。这意味着，在使用中介效应模型时，我们可能无法全面评估其假设的稳健性和可靠性，从而在一定程度上限制了模型的应用范围和解释力度。而 Hicks and Tingley (2011)^[1]所提出的平均因果中介模型需要在一系列仿真的基础上进行参数估计进而识别出所关注的平均因果中介效应 (ACME)，并且可以给出有关中介效应估计结果不违背关键识别假设的敏感性分析。因此，本文采用该模型识别碳排放权交易机制影响企业碳排放的平均因果中介效应以明确其影响机理，相应的模型结构如下：

$$M_{(j)i,t} = \alpha + \gamma_1 \cdot (treat_i * time_{i,t}) + \delta_2 \cdot X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{1it} \quad (5-1)$$

$$ce_{it} = \alpha + \rho_1 \cdot (treat_i * time_{i,t}) + \rho_2 \cdot M_{(j)i,t} + \delta_2 \cdot X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{2it} \quad (5-2)$$

其中， $M_{(j)}$ ($j = 1,2,3$)是本文分析选择的中介变量，即 M1 为以本期收入/上期收入表示的生产规模路径，M2 为以管理费用率表示的减排设备支出，M3 为以融资约束指数表示的融资约束路径；M4 为以全要素生产率表示的技术创新路径。而不同于传统中介效应模型，本文通过拟贝叶斯 Monte Carlo 模拟 (King et al., 2001)^[91]得到中介与结果变量的预测值以计算出因果效应系数 γ_1 及其与中介变量前系数 ρ_2 的乘积以识别得到相应的 ACME 估计值及其标准差与置信区间。

平均因果中介效应主要是计算有多少治疗变量是由中介变量传递的，对于每个处理状态 $t=0,1$ ，我们将每个单位 i 的因果中介效应定义为 $\delta_i(t) = Y_i\{t, M_i(1)\} - Y_i\{t, M_i(0)\}$ 。这个因果量是在保持治疗状态在 t 不变的情况下，当中介从控制条件下将实现的值 $M_i(0)$ 到治疗条件下将观察到的值 $M_i(1)$ 的变化所对应的结果的变化。具体的步骤是先拟合观察结果和中介变量的模型，从它们的采样分布模型模型参数，然后模拟中介的潜在值，通过给定中介的潜在值，模拟潜在的结果，最后计算平均因果中介效应，可表示为 $\delta(t) = E[Y_i\{t, M_i(1)\} - Y_i\{t, M_i(0)\}]$ 。

上述的分析是在序列可忽略性假设进行的。在标准设计中，要求治疗是随机的或可忽略的条件预处理协变量，中介变量或结果变量可以被测量。而在计算平均因果中介效应 (ACME) 时，所需的潜在中介变量和潜在结果从未被观察到，因此还需要一个额外的序列可忽略性假设 (SI)。第一步假设，鉴于观察到的预处理混杂因素，假设治疗分配是可忽略的——在统计上独立于潜在结果和潜在中介因素。这种假设很常见，也被称为非混杂性、外生性或无遗漏变量偏差。在实

验中，这个假设被认为是成立的，因为治疗是随机的。第二步假设——考虑到实际的处理状态和预处理混杂因素——观察到的中介因子是可以忽略的。我们无法用数据检验这一假设；因此，为了确保因果中介估计的准确性，有必要进行敏感性分析，以探讨序列可忽略性假设可能存在的问题。

当中介变量和结果变量采用线性模型进行描述时，敏感性分析的基础就建立在线性结构方程模型之上。具体来说，就是方程 5-1 和方程 5-2 所描述的线性关系。SI 假设的违反会导致 ϵ_{i2} 和 ϵ_{i3} 之间的相关性，我们用 ρ (SI 下的 $\rho = 0$) 表示。Imai 等人(2010)^[92]表明，在这个范围内，对于 ρ 的任何假设值，ACME 都可以得到一致的估计，然后表示为 ρ 的函数。因此，当 ACME 为 0 时，可以进行灵敏度分析来计算 ρ 。换句话说，我们可以检验 ACME 的零假设($\rho = 0$)。当 ρ 不等于 0 时，序列可忽略性假设不能被显著拒绝，当 ρ 的绝对值越大，代表混杂效应越明显，需要极大的混杂效应才能反转中介效应，说明该中介效应越稳健。

5.2.2 变量选取与数据来源

为了探究碳排放权交易政策对企业碳减排的影响机制，本章参考余得生和李星（2021）^[93]、胡珺（2020）^[94]等研究选取管理费用率、生产规模、融资约束和全要素生产率作为机制变量。其中，生产规模变量借鉴崔广慧（2019）^[95]以本期收入/上期收入表示，祝树金等认为在中国工业企业数据库中，企业的环境支付成本主要计入“管理费用”指标，本文借鉴了他们的研究思路，将企业管理费用除以总资产得到的企业管理费用率作为企业购买减排设备的代理变量；借鉴 Yu (2021)^[96]的研究方法，使用 SA 指数来衡量企业的融资约束程度，以全要素生产率表示企业的技术创新水平，而全要素生产率的计算主要选取的投入指标有劳动、资本和中间投入品，产出指标为生产总值，并基于 LP 算法得到每个企业各年份的全要素生产率，以上数据均来自于国泰安（CSMAR）数据库，对于缺少的数据采用插值法进行补齐，控制变量、解释变量和被解释变量的选取与上文一致。

5.3 碳排放权交易机制作用机理的理论分析（Theoretical analysis of the action mechanism of carbon emission trading mechanism）

我国现行的碳排放权交易体系属于总量控制体系，即在限定碳排放总量的前提下，政府划分排放配额，排放主体根据需要进行交易。而企业在面对碳排放权交易所带来的减排压力时，其选择积极参与环境治理还是消极应对，通常是经过成本与收益之间的权衡后所作出的决策。国内外学者也进行了相应的探索，研究结论也存在一定的差异。比如，沈洪涛等(2017)^[97]发现，碳市场在推动企业减排方面，主要是通过企业减少生产规模来实现的；Zhang(2023)^[61]发现试点地区的减

排成果并非源于企业生产效率的提升，而是牺牲了部分经济产量来达成的；吴茵茵等(2021)^[98]也指出，碳市场的减排成果主要依赖于政府的行政干预手段，而以碳配额交易量为代表的市场机制所发挥的作用相对有限；但刘晔和张训常(2017)^[99]、胡珺等(2020)^[94]和 Chen(2021)^[58]均发现碳市场总体上对企业创新具有正向影响。

通过相关文献梳理，碳排放权交易机制为控排企业设定明确的减排任务一方面使其额外承担一定的履约成本。在碳排放权交易机制下，当企业未履约所需承担的惩罚大于减排成本时，企业在短期内会出于个体利益考虑而倾向于通过缩减生产规避回避风险；当试点地区碳价高于企业可接受的范围时，企业会增加对碳减排设备的购买，增加管理费用以达到减排的目标；另一方面碳排放权交易机制为控排企业完成减排目标提供更为灵活的履约手段。排放权交易机制需要控排企业提供有关能源消费、排放核算等重要数据，并且市场监管者也会及时披露配额市场交易、控排厂商履约情况等重要信息，而信息披露机制的完善有利于缓解融资约束而加大研发投入进而减少了碳排放(Yu, 2021)^[54]，此外，排放权交易机制为控排企业提供实现成本有效减排的配额交易平台，而配额交易市场价格为企业开展绿色技术创新提供明确的市场信号。此时，通过技术创新减少碳排放而获得的剩余碳配额可以在市场上出售以获得利润。此外，技术创新可以在实现减排目标的同时，增强企业的市场竞争力，提高企业的经济效益。本文所梳理得到的碳排放权交易机制的企业碳减排的作用机理如图 5-1 所示。

综上所述，本文主要从生产规模、管理费用、融资约束和全要素生产率四个方面来探究企业在面对碳减排目标时的作用机理。在短期内，由于研发投入的私人成本超出其私人收益，企业通常缺乏主动投入环境治理的积极性。然而，为了降低环境监管所带来的成本及潜在风险，企业往往会选择暂停部分可能产生污染的生产活动，通过缩减生产规模或购买减排设备来实现减排目标。但是，从长期经济效益的角度来看，企业可以通过研发和创新手段实现碳排放的减少从而获取额外的碳配额。随后，这些剩余的碳配额可以在市场上出售，进而为企业带来经济利润，而厂商出售配额所获得的市场收益将抵消绿色技术创新的投资成本。此外，技术创新能够提升企业在市场中的竞争优势，进而增加其经济效益，为企业提供了在实现减排目标的同时进行技术创新的经济诱因。此外，碳排放权交易政策在一定程度上减少了企业创新活动的不确定性和风险，增加了技术创新实现经济效益的可靠性，缓解了企业在融资方面的压力，从而激发了企业开展研发创新活动的动力。因此，本文认为碳排放权交易机制主要通过缓解企业融资约束和提高全要素生产率进而减少企业碳排放量。

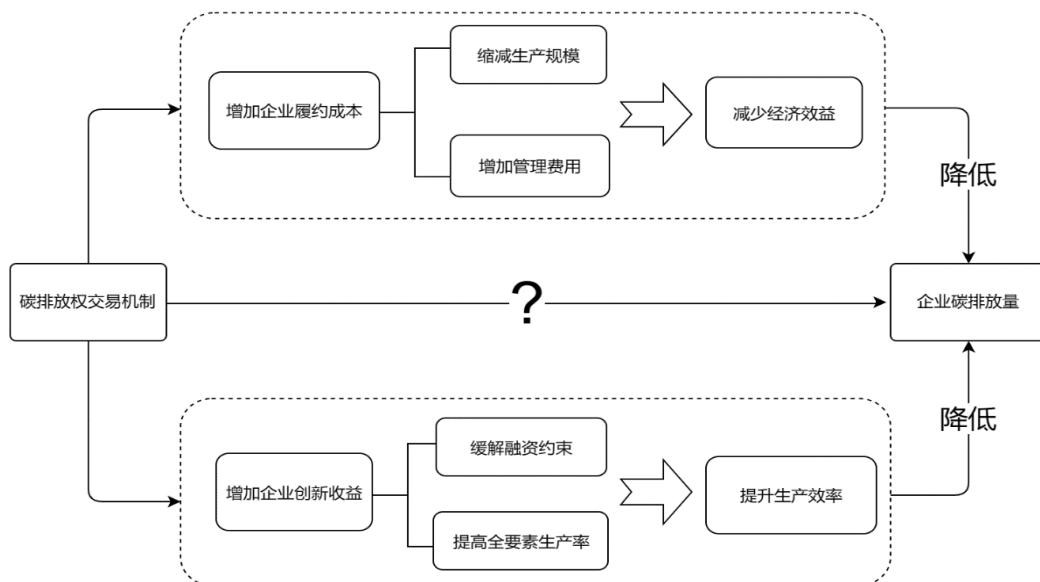


图 5-1 碳排放权交易机制对企业碳排放量的作用机理理论分析

Figure 5-1 Theoretical analysis of the effect mechanism of carbon emission trading mechanism on carbon emissions of enterprises

5.4 碳排放权交易机制作用机理的实证研究 (An empirical study on the mechanism of carbon emission trading)

5.4.1 基准实证结果分析

表 5-1 展示了生产规模、管理费用率、融资约束和全要素生产率四个机制变量在碳排放权交易机制影响企业碳排放量中的平均因果中介效应。从相应的实证结果可以看出，生产规模和管理费用率的平均因果中介效应的置信区间不显著，说明企业并不是通过缩减生产规模和增加管理费用率以购买减排设备以达到减排目标，在表 5-1 中，融资约束的平均因果中介效应为 0.17, ACME 所占的比例为 10.7%，全要素生产率的平均因果中介效应为 0.01, ACME 所占的比例为 0.6%，且均在 5% 的水平上显著，说明企业通过缓解融资约束增加研发投资和提高企业全要素生产率以促进企业碳减排；同时敏感性分析表明，当 $ACME=0$ 时， $|\rho_2| \neq 0$ ，因此，序列可忽略性假设不能显著拒绝。综上所述，碳排放权交易机制能够通过缓解融资约束和提高技术创新而不会通过提高履约成本、压缩生产规模而达到碳减排目标，这与我们上述讨论的结果一致。

表 5-1 碳排放权交易机制对企业碳减排的影响机制检验结果

Figure 5-1 Test results of the impact mechanism of carbon emission trading mechanism on enterprise carbon emission reduction

效应	生产规模		管理费用率	
	均值	置信区间	均值	置信区间
ACME	0.0018	[-0.0025, 0.008]	0.0004	[-0.005, 0.0068]
直接效应	-1.597	[-1.82, -1.39]	-0.803	[-0.975, -0.626]
总效应	-1.595	[-1.81, -1.39]	-0.802	[-0.974, -0.626]
ACME 所占总效 应的值	-0.001	[-0.001, -0.009]	-0.0005	[-0.007, -0.004]
敏感性分析	-0.011		0.114	
效应	融资约束		全要素生产率	
	均值	置信区间	均值	置信区间
ACME	-0.171	[-0.246, -0.109]	-0.01	[-0.022, -0.0005]
直接效应	-1.43	[-1.67, -1.19]	-1.58	[-1.80, -1.38]
总效应	-1.60	[-1.86, -1.35]	-1.59	[-1.81, -1.39]
ACME 所占总 效应的值	0.107	[0.089, 0.123]	0.006	[0.0053, 0.0069]
敏感性分析	0.114		-0.025	

5.4.2 作用机理异质性分析

通过上述研究发现碳排放权交易政策主要通过缓解融资约束和提高全要素生产率促进企业取得了积极的减排效果，然而，从地区和行业的减排路径来看，不同区域和行业内的企业在面对碳减排目标时所选择的减排方式可能存在显著差异。这意味着，不同的企业会根据其所在地区和行业的特定条件，选择适合自己的减排方式。因此，本文基于第四章异质性的研究，对碳排放权交易机制显著取得企业碳减排效果的地区和行业进一步对其影响机制进行研究，以便给出针对性的建议。

1、碳市场对不同行业的企业碳减排的影响机制检验结果

由于在异质性分析中，碳排放权交易政策对造纸、有色金属、黑色金属和石油化工行业的企业碳减排效应并不显著，因此本文着重分析电力、非金属和化学行业的企业碳减排的机制路径，结果如表 5-2 所示，电力行业和非金属行业主要通过缓解企业融资约束来促进企业碳减排，融资约束所起的平均因果中介效应分别为 0.106 和 0.154，在 5% 的水平下显著，化工行业主要是通过缓解融资约束和提高技术效率两个途径来促进企业碳减排，平均因果中介效应为 0.299 和 0.017，系数显著并通过了敏感性分析。由此可以得出，虽然我国碳排放权交易机制的试点主要涵盖了高耗能行业，但由于各行业减排条件、监管力度不同，每个行业在

面对碳减排目标的压力时所选取的减排路径呈现出差异。因此，这些行业中的企业根据自身情况，选择多样化的路径来实现在碳交易政策限制下的减排目标。但虽然三个行业激励措施有细微不同，但都没有通过缩减生产规模和增加管理费用的短期措施来达到减排目标，与碳排放权交易政策影响企业碳减排的总路径一致。

表 5-2 碳市场机制对不同行业的企业碳减排的影响机制检验结果

Table 5-2 Test results of the influence mechanism of carbon market mechanism on carbon emission reduction of enterprises in different industries

(a) 电力行业				
	生产规模	管理费用率	融资约束	全要素生产率
ACME	0.0139	0.0001	-0.106**	-0.0021
直接效应	-3.24***	-3.1***	-3.12***	-3.221***
总效应	-3.22***	-3.1***	-3.22***	-3.222***
ACME 所占	-0.0043***	-0.00003*	0.033***	0.00067***
总效应的值				
敏感性分析	-0.016	0.128	0.124	-0.0288
(b) 非金属行业				
	生产规模	管理费用率	融资约束	全要素生产率
ACME	-0.002	-0.026	-0.154**	-0.018
直接效应	-1.20***	-1.274***	-1.07***	-1.188***
总效应	-1.21***	-1.299***	-1.219***	-1.206***
ACME 所占总	0.0017***	0.02***	0.127***	0.015***
效应的值				
敏感性分析	-0.0084	0.124	0.128	-0.0276
(c) 化学行业				
	生产规模	管理费用率	融资约束	全要素生产率
ACME	0. 00025	-0. 003	-0. 299*	-0. 017**
直接效应	-0. 554***	-0. 609***	-0. 259*	-0. 537***
总效应	-0. 554***	-0. 61***	-0. 558*	-0. 554***
ACME 所占总效	-0. 00046***	0. 005***	0. 536*	0. 031***
应的值				
敏感性分析	-0. 009	0. 008	0. 126	-0. 0281

2、碳市场对不同地区的企业碳减排的影响机制检验结果

本文依次探究了碳市场对七个试点地区的企业碳减排的影响机制，表 5-3 依次为七个试点地区的影响机制的检验结果，从不同地区的企业碳减排机制分析结果可知，七个试点地区的碳减排路径存在差异。其中，北京主要通过全要素生产

率进行减排，湖北通过缓解融资约束路径进行减排，上海和天津通过缓解融资约束和提高全要素生产率两条路径进行减排，且两个机制均起到部分中介的作用，广东、重庆和福建也是通过缓解融资约束和提高全要素生产率两条路径进行减排，但在这两个机制中，融资约束起到完全中介的作用而全要素生产率起到部分中介的作用；由此可以得出，虽然各试点地区都是经济发达的省市，但由于各试点地区碳排放量不同，所面临的减排压力、减排潜力有所不同，其碳排放权交易政策的减排影响和减排作用路径也会存在异质性。但七个试点地区也均没有通过缩减生产规模和增加管理费用购买碳减排设备进行减排，其结果与整体机制分析相同。

表 5-3 碳市场对不同地区的企业碳减排的影响机制检验结果

Table 5-3 Test results of the mechanism of carbon market influence on carbon emission reduction of enterprises in different regions

(a) 北京				
	生产规模	管理费用率	融资约束	全要素生产率
ACME	-0.0016	-0.0012	-0.026	-0.045*
直接效应	-4.02***	-3.21***	-3.81***	-4.00***
总效应	-4.02***	-3.21***	-3.83***	-4.02***
ACME 所占总效 应的值	0.0039***	0.0004***	0.007***	0.0061
敏感性分析	-0.007	0.006	0.157	-0.022
(b) 上海				
	生产规模	管理费用率	融资约束	全要素生产率
ACME	0.0044	-0.023	-0.198***	-0.034*
直接效应	-1.02***	-0.318**	-0.824***	-1.251***
总效应	-1.01***	-0.341**	-1.02***	-1.285***
ACME 所占总效 应的值	-0.0043***	0.064**	0.195***	0.027***
敏感性分析	-0.0096	0.011	0.127	-0.028
(c) 广东				
	生产规模	管理费用率	融资约束	全要素生产率
ACME	0.0024	0.0015	-0.292***	-0.028*
直接效应	-0.444***	-0.43***	-0.166	-0.829***
总效应	-0.442***	-0.429***	-0.458***	-0.857***
ACME 所占总效 应的值	-0.0055***	-0.004***	0.643***	0.0331***
敏感性分析	-0.001	0.03	0.12	-0.02

(d) 重庆

	生产规模	管理费用率	融资约束	全要素生产率
ACME	-0.0007	-0.0012	-0.477**	-0.037*
直接效应	-0.928**	-1.65**	-0.451	-0.892***
总效应	-0.928**	-1.65**	-0.927**	-0.929***
ACME 所占总	-0.0007**	0.0007**	0.511**	0.0398***
效应的值				
敏感性分析	-0.009	0.08	0.128	-0.029

(e) 福建

	生产规模	管理费用率	融资约束	全要素生产率
ACME	-0.006	0.00009	-0.22***	-0.032**
直接效应	-0.502*	-0.845***	-0.29	-0.477***
总效应	-0.508*	-0.845***	-0.508	-0.508***
ACME 所占总	0.0116*	-0.0001***	0.404	0.059
效应的值				
敏感性分析	-0.0086	-0.07	0.129	-0.029

(f) 湖北

	生产规模	管理费用率	融资约束	全要素生产率
ACME	-0.00052	-0.001	-0.293***	-0.006
直接效应	-1.02***	-0.799***	-0.809***	-1.097***
总效应	-1.103***	-0.80***	-1.10***	-1.103***
ACME 所占总	0.00047***	0.0012***	0.267***	0.0057***
效应的值				
敏感性分析	-0.0088	0.054	0.126	-0.0287

(g) 天津

	生产规模	管理费用率	融资约束	全要素生产率
ACME	-0.0057	-0.031	-0.269***	-0.419**
直接效应	-1.023***	-1.581***	-0.76***	-0.607**
总效应	-1.029***	-1.612***	-1.03***	-1.027**
ACME 所占总	0.0055	0.0189***	0.259	0.409
效应的值				
敏感性分析	-0.0088	-0.036	0.129	0.0288

5.5 本章小结（Summary of this chapter）

本章运用了平均因果中介模型，从生产规模、管理费用、融资约束和全要素生产率四个方面探究了碳排放权交易政策对企业碳减排的作用机制，并进一步探究了在不同地区和行业层面碳减排机制的异质性。通过影响机制的研究发现，碳排放权交易政策并未通过缩减企业生产规模和增加管理费用购买碳减排设备以达到减排目的，而是通过缓解融资约束增加研发投入和提高企业全要素生产率以达到长期有利的碳减排目标，从试点地区及电力、化工、非金属行业减排渠道异质性的视角来看，各试点地区和电力、化工、非金属三个行业的经济发展水平在碳排放权交易政策的实施下并未受到抑制影响。它们主要通过缓解融资约束、增加研发投入和提高企业全要素生产率来实现碳减排目标，这与总体机制路径相一致。然而，由于每个试点地区和行业的碳排放量不同，所面临的减排压力和减排潜力有所不同，并且各试点地区和行业的发展水平、减排条件、监管力度不同，其碳排放权交易政策的减排影响和减排作用路径也会存在异质性。因此，需要针对不同地区和行业的企业制定具有针对性的措施，以确保减排目标的有效实现。

6 总结与展望

6 Summary and prospect

6.1 研究结论 (Research conclusion)

工业企业作为能源消费大户，是碳排放的主要来源，且碳排放交易也是对企业行为的约束。因此，检验碳排放权交易下企业的实际减排效果和减排机制就显得尤为重要。本文首先运用函数型熵权法依据影响企业碳排放的因素和分地区分行业的碳排量求得企业各年份的碳排量，其次，以所求企业碳排放量为被解释变量，采用因果森林算法，基于 2008 年至 2019 年碳市场所覆盖七个高耗能行业的 A 股上市公司面板数据，将碳排放权交易政策看作一次准自然实验，探究碳排放权交易政策对企业碳减排的影响及变量特征重要性测度；进一步对碳排放权交易政策的企业碳减排效应的异质性和碳市场运行机制的调节效应研究，最后，本文运用平均因果中介模型从生产规模、管理费用率、融资约束和全要素生产率四个方面分析碳排放权交易影响企业碳排放的机制分析并进行机制的异质性分析，识别了地区与行业层面实现路径的异质性表现，以进一步得到更加精确的机制分析，为后面的政策建议提供确切的实践基础。具体研究结论如下：

第一，基于函数型动态赋权的方法估算企业碳排放量是合理且精确的。本文发现碳排放核算所需的研发投入和营业成本两指标在不同地区具有不同的动态权重和变化趋势，并且碳排放权交易机制试点地区和高耗能行业覆盖企业的碳排放量在时间和空间维度上具有不同的特征。

第二，基于因果森林算法实证研究分析出碳排放权交易政策对企业的碳排放量有显著的抑制效果。政策实施后，碳排放权交易政策试点地区的企业碳减排效应比非试点地区的企业碳减排效应提升了 1.9%，后续进行了更换计量方式、排除其它政策的影响稳健性检验，验证了研究结论的可信性。

第三，碳排放权交易政策对企业碳减排效应存在异质性。从企业层面来看，企业的规模和固定资产支出在碳排放权交易政策的企业碳减排效应中影响较大，从区域层面来看，碳排放权交易政策促进了各试点地区企业的碳减排，其中，北京和广东的碳减排效应最大，可能是具有较高的市场化程度和较强的区域政策；从行业层面来看，碳排放权交易政策主要促进了电力、化工和非金属行业的企业碳减排，对其它行业的企业碳减排影响不显著。

第四，碳排放权交易市场运行机制的调节作用有限。当碳市场配额分配方式为有偿分配、配额核算方法为基准法和非履约主体的市场参与度高时都对碳排放权交易政策的企业碳减排效应产生了调节作用，但是，该调节效应过小，这可能

是因为碳市场机制存在功能性缺失、交易机制不够完善等问题，对企业碳减排的激励作用有限。

第五，碳排放权交易机制主要是通过缓解融资约束和提高全要素生产率来进行企业碳减排，并且在不同地区、行业具有不同的减排渠道。通过对机制变量进行系统剖析及梳理过去相关文献，认为缩减生产规模、增加购买碳减排设备的管理费用、缓解融资约束和提高全要素生产率是提升企业碳减排效应的重要渠道与路径，并对不同试点地区和行业的减排机制进行了研究。机制检验的结果表明碳排放权交易政策实施后，所有企业及不同地区和不同行业的企业的融资约束水平显著下降，全要素生产率得到提升，而生产规模和管理费用并没有显著变化。说明碳排放权交易政策主要通过降低企业融资约束、提高全要素生产率来提升企业碳减排效应，但在不同地区和行业由于不同发展条件以及碳减排压力的差异而导致地区与行业在这两个减排渠道的选择具有异质性。

6.2 政策建议（Policy suggestion）

自 2011 年中国开展碳排放权交易试点以来，各试点地区相继建立了碳交易市场。2013 年，深圳、上海、北京、广东和天津正式启动碳交易市场，随后湖北和重庆于 2014 年启动，福建于 2016 年启动。中国于 2021 年 7 月启动了全国碳市场。这一具有里程碑意义的进展，离不开各试点地区在实践中积累的宝贵经验，为构建和完善全国碳市场打下了坚实基础。通过本文的深入研究，我们发现碳排放权交易政策的实施在微观层面显著促进了企业的碳减排效果。但是各试点地区、不同行业和不同类型企业减排效果存在异质性；在机制路径方面，主要提高缓解融资约束和提高全要素生产率达到碳减排目的，其中，融资约束的中介作用占比较大，并且由于各试点地区和行业的碳排放量不同，所面临的减排压力和减排潜力有所不同，并且各试点地区和行业的发展水平、减排条件、监管力度不同，其碳排放权交易政策的减排影响和减排作用路径也会存在异质性；并且试点地区碳市场运行机制不够完善，在碳排放权交易机制的企业碳减排效应所起的调节作用有限。因此，为了进一步完善我国碳市场建设，本文提出如下政策建议：

第一，我们必须持续增强碳市场的机制设计。自 2011 年中国开展碳排放权交易试点以来，各试点地区相继建立了碳交易市场。2013 年，深圳、上海、北京、广东和天津正式启动碳交易市场，随后湖北和重庆于 2014 年启动，福建于 2016 年启动。中国于 2021 年 7 月启动了全国碳市场。然而，这些碳市场在初始配额分配和核算方法上存在差异。本文研究发现，当碳排放权交易市场试点地区覆盖企业采用有偿的碳配额分配方式，并采用基准法进行核算时，碳排放权交易机制在推动控排企业减排方面能够发挥调节效应，进而形成更为有效的激励和约束。然而，当前这种调节效应用尚不明显，表明有偿分配和基准法核算方式的作用有限，

碳市场机制有待完善。因此，在未来的发展中，七个试点地区碳市场以及全国统一的碳市场应更多地采用以有偿分配为主导的配额分配方式，同时以基准法作为主要的配额核算方法。此外，可以适当拍卖部分配额，以进一步优化碳市场的运行机制设计，加强碳排放权交易机制的积极影响，从而更有效地激发减排潜力。

第二，降低非履约主体参与碳排放权交易市场的门槛。当前，碳排放权市场的交易主体主要涵盖了需承担履约责任的企业以及以投资为主要目标的机构和个人。虽然中国现有的碳排放权交易市场已逐渐开放交易权限，但当前设定的门槛依然偏高，这在某种程度上限制了机构投资者和个人的市场参与机会。然而，机构和个人等非履约主体的积极参与对于碳排放权交易市场的健康发展至关重要。他们是提升市场流动性的关键力量，能够有效促进市场的活跃度和交易效率。此外，根据本文的研究，非履约主体在碳排放权交易市场中的参与度对控排企业的碳减排效应起着重要的调节作用。然而，目前非履约主体在碳排放权交易市场中的参与度仍然较低，其调节作用尚有限。因此，政府部门应当考虑适当降低机构、个人等非履约主体进入市场的门槛，为他们提供更多的参与机会。这一举措不仅有助于进一步激发碳排放权交易市场的活力，还能更有效地发挥其激励和约束功能，推动控排企业积极减排，共同应对气候变化挑战。

第三，继续推行碳市场的建立，并纳入更多的高耗能行业。尽管全国碳市场已初步建立，但其覆盖范围尚显局限，目前仅局限于电力行业。然而，根据本文在行业分析的结果，碳排放权交易机制在电力、化工以及非金属行业的企业碳减排效应中均有所体现，这显示出化工和非金属行业同样具备显著的减排潜力。为了最大化碳排放权交易政策的效果，我们建议在条件成熟的情况下，逐步将化学行业和非金属行业纳入碳市场，确保这一过程既稳健又有序，从而进一步扩大碳排放权交易市场的行业覆盖范围，提升市场的活跃度。同时，为了保障新加入行业的平稳过渡和积极参与，我们还需探索并发展碳金融衍生品，如碳期货、碳期权等，为低碳环保企业创造更多盈利渠道，激励其积极参与碳市场，共同推动减排目标的实现。这样的举措将有助于构建更加完善、多元化的碳市场体系，为应对气候变化贡献更多力量。

第四，加大创新补贴政策引导，激发企业碳减排活力。由于缺乏资金激励和绿色投资周期长、风险大等问题导致许多企业不敢投资进行低碳技术创新。通过本文对碳排放权交易机制的企业碳减排的中介效应的检验结果，我们得出缓解企业的融资约束，是碳排放权交易机制推动企业实现碳减排的关键一环。因此，政府必须重视并完善低碳技术创新补贴政策，以此激发企业对于低碳技术创新的热情，提升资金配置的效率，并切实减轻企业在融资过程中的压力。对于规模较小的企业，政府可以通过提供知识和技术上的支持，确保创新资金能够发挥最大的

效益，进而促进这些企业持续产出创新成果。在实施补贴政策的同时，政府还应该采取减税等举措，引导企业增加对低碳技术创新的投资，从而增强资本配置的效果。此外，产业补贴政策应更加积极主动，确保能够切实减轻企业在融资过程中所面临的压力。通过这些综合措施，政府不仅能够为参与碳排放权交易的企业提供充足的资金支持，满足其融资需求，更能够推动整个行业向低碳、环保的方向发展，共同为应对气候变化挑战贡献力量。

6.3 研究不足与展望（Research deficiency and prospect）

本文通过函数型熵权计算影响企业碳排放的指标权重并结合分地区分行业的碳排放量以较为合理地估算出企业的碳排放量；然后，本文基于 2008-2019 年上市公司面板数据，采用因果森林算法研究碳排放权交易机制对企业碳排放量的基准影响，并通过筛选出各特征变量的重要性以开展碳排放权交易的企业碳减排异质性和调节效应分析；最后，本文运用平均因果中介模型从生产规模、管理费用率、融资约束和全要素生产率四个方面分析碳排放权交易影响企业碳排放的机制分析并进行机制的异质性分析，识别了地区与行业层面实现路径的异质性表现，丰富了微观领域的理论与研究。但是本文仍存在一定的局限性：

第一，本文主要从生产规模、管理费用、融资约束和全要素生产率四个方面分析碳排放权交易机制影响企业碳排放量的作用机理，并发现碳排放权交易政策主要通过缓解融资约束和提高全要素生产率有效促进企业碳减排，而生产规模和管理费用路径对企业碳减排的影响则不显著。碳排放权交易机制设计复杂，企业碳减排的路径也会各不相同，本研究仅从生产规模、管理费用、融资约束和全要素生产率四个路径研究了碳排放权交易机制影响企业碳减排的作用机理，需要进一步识别其它可能存在的影响路径。未来的研究中，进一步纳入更多影响因素去探究碳市场影响企业碳减排的运作机制。这一举措旨在为我们提供更多关于如何不断完善和优化碳排放权交易市场的制度设计的建议与理论支撑。

第二，本文以 2008-2019 年的七个试点地区覆盖企业为样本，研究我国碳排放权交易机制对企业的碳减排效果和作用机理及异质性效果进行分析探讨。但 2021 年，全国碳市场已经正式投入运行。因此未来的研究可以基于全国碳排放权交易市场的样本并进一步扩大样本时间段，将进一步展开全面评估，深入探讨碳排放权交易机制如何影响企业的碳减排效果，并细致分析这一机制的作用机制和异质性效应。同时，也将致力于提供更多关于碳排放权交易在微观层面上的实际效用和见解，以期为相关政策的制定和实施提供更有力的支持。

第三，本文主要以七大高耗能行业所覆盖的微观上市公司为样本进行研究，没有对非七大高耗能行业的企业和参与碳排放权交易市场的非上市公司的碳排放权交易机制的政策效果进行研究。因此，未来可以扩大样本量，探索碳排放权

交易机制对非高耗能行业覆盖的上市公司和参与碳排放权交易市场的非上市公司的碳减排效应影响，拓宽已有的研究。

参考文献

- [1] Hicks R, Tingley D, 2011. "Causal mediation analysis", [J].*Stata J*, 11 (4), 605-619.
- [2] 李俊杰. 民族地区农地利用碳排放测算及影响因素研究[J].中国人口·资源与环境, 2012, 22(09): 42-47.
- [3] 李国志, 李宗植.中国农业能源消费碳排放因素分解实证分析——基于 LMDI 模型[J].农业技术经济, 2010(10): 66-72.
- [4] Nuri Cihat Onat, Murat Kucukvar, Omer Tatari. Scope-based carbon footprint analysis of U.S. residential and commercial buildings: An input–output hybrid life cycle assessment approach[J]. *Building and Environment*, Volume 72, 2014,53-62.
- [5] 叶瑞克, 李亦唯, 高壮飞等.城市建筑群碳排放核算模型构建与实证研究[J].资源开发与市场, 2017, 33(11): 1295-1299+1408
- [6] 王丽萍, 刘明浩.基于投入产出法的中国物流业碳排放测算及影响因素研究[J].资源科学, 2018, 40(01): 195-206.
- [7] 周平, 王黎明.中国居民最终需求的碳排放测算[J].统计研究, 2011, 28(07): 71-78.
- [8] 傅京燕, 李存龙.中国居民消费的间接用能碳排放测算及驱动因素研究——基于 STIRPAT 模型的面板数据分析[J].消费经济, 2015, 31(02): 92-97.
- [9] 杨骞, 刘华军.中国二氧化碳排放的区域差异分解及影响因素——基于 1995~2009 年省际面板数据的研究[J].数量经济技术经济研究, 2012, 29(05): 36-49+148.
- [10] 王安静, 冯宗宪, 孟渤.中国 30 省份的碳排放测算以及碳转移研究[J].数量经济技术经济研究, 2017,34(08):89-104.
- [11] 黄和平, 易梦婷, 曹俊文, 等.区域贸易隐含碳排放时空变化及影响效应——以长江经济带为例[J].经济地理, 2021, 41(03): 49-57.
- [12] Bo Meng, Jinjun Xue, Kuishuang Feng, Dabo Guan, Xue Fu,China's inter-regional spillover of carbon emissions and domestic supply chains[J],*Energy Policy*,Volume 61,2013, 1305-1321.
- [13] Jinyan Zhan, Wei Liu, Feng Wu, Zhihui Li, Chao Wang. Life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions of urban residential buildings in Guangzhou city[J].*Journal of Cleaner Production*,Volume 194,2018,318-326.
- [14] 胡珺, 方祺, 龙文滨.碳排放规制、企业减排激励与全要素生产率——基于中国碳排放权交易机制的自然实验[J].经济研究, 2023, 58(04): 77-94.
- [15] 黄艳希, 申永霞.自由贸易试验区设立对企业污染排放的影响——基于双重差分法的准自然实验[J].武汉理工大学学报 (社会科学版), 2023, 36(01): 61-71.
- [16] Wang, Z., Huang, W., Li, K., Wei, W., & Liu, Z. High-speed rail and firms' environmental performance: empirical evidence from china[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023,30(19), 55187-55199.

- [17] 方兰, 汤鹤延.碳排放权交易对企业碳减排的效应——基于中国上市公司数据的准自然实验方法分析[J].陕西师范大学学报(哲学社会科学版), 2022, 51(05):14-29.
- [18] 闫华红, 蒋婕, 吴启富.基于产权性质分析的碳绩效对财务绩效的影响研究[J].数理统计与管理, 2019, 38(01): 94-104.
- [19] 沈洪涛, 黄楠.碳排放权交易机制能提高企业价值吗[J].财贸经济, 2019, 40(01):144-161.
- [20] Qi, Z., Gao, C., Na, H., & Ye, Z. Using forest area for carbon footprint analysis of typical steel enterprises in China. Resources[J]. Conservation and Recycling, 2018, 132, 352-360.
- [21] Yu, F., Han, F., & Cui, Z. Reducing carbon emissions through industrial symbiosis: a case study of a large enterprise group in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 103, 811-818.
- [22] Jun Shen, Pengcheng Tang, Hao Zeng, Does China's carbon emission trading reduce carbon emissions? Evidence from listed firms[J]. Energy for Sustainable Development, Volume 59, 2020, 120-129.
- [23] Chapple, L., Clarkson, P. M., & Gold, D. L. The cost of carbon: Capital market effects of the proposed emission trading scheme (ETS)[J]. Abacus, 2013, 49, 1-33.
- [24] Chong, C. H., Tan, W. X., Ting, Z. J., Liu, P., Ma, L., Li, Z., et al. The driving factors of energy-related CO₂ emission growth in Malaysia: The LMDI decomposition method based on energy allocation analysis[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 115.
- [25] Reema Gh Alajmi, Factors that impact greenhouse gas emissions in Saudi Arabia: Decomposition analysis using LMDI[J]. Energy Policy, Volume 156, 2021, 112454.
- [26] Suyi, K. Lmdi decomposition analysis of energy consumption in the korean manufacturing sector[J]. Sustainability, 2017, 9(2), 202.
- [27] Holladay J S , Iii L P .Decomposing Changes in Establishment Level Emissions with Entry and Exit[J].Working Papers, 2020.
- [28] Poumanyvong, P. , & Kaneko, S. . (2010). Does urbanization lead to less energy use and lower co₂ emissions[J]. a cross-country analysis.
- [29] Inmaculada Martínez-Zarzoso, Antonello Maruotti, The impact of urbanization on CO₂ emissions: Evidence from developing countries[J]. Ecological Economics, Volume 70, Issue 7, 2011, 1344-1353.
- [30] 薛勇, 郭菊娥, 孟磊.中国CO₂排放的影响因素分解与预测[J].中国人口·资源与环境, 2011, 21(05): 106-112.
- [31] 李艳梅, 张雷, 程晓凌.中国碳排放变化的因素分解与减排途径分析[J].资源科学, 2010, 32(02): 218-222.
- [32] Chuanguo Zhang, Yan Lin, Panel estimation for urbanization, energy consumption and CO₂ emissions: A regional analysis in China[J]. Energy Policy, Volume 49, 2012, 488-498.

- [33] Chuanguo Zhang, Wei Zhao, Panel estimation for income inequality and CO₂ emissions: A regional analysis in China[J].Applied Energy, Volume 136,2014,382-392.
- [34] 许海平.空间依赖、碳排放与人均收入的空间计量研究[J].中国人口·资源与环境,2012,22(09): 149-157.
- [35] Min Zhao, Lirong Tan, Weiguo Zhang, Minhe Ji, Yuan Liu, Lizhong Yu, Decomposing the influencing factors of industrial carbon emissions in Shanghai using the LMDI method[J].Energy, Volume 35, Issue 6,2010,2505-2510.
- [36] Bin Guo, Yong Geng, Bernd Franke, Han Hao, Yaxuan Liu, Anthony Chiu,Uncovering China's transport CO₂ emission patterns at the regional level[J].Energy Policy, Volume 74,2014,134-146.
- [37] 陈诗一.中国工业分行业统计数据估算:1980-2008[C]//经济学（季刊）第10卷第3期.复旦大学中国社会主义市场经济研究中心;2011:42.
- [38] Yue-Jun Zhang, Yi-Ming Wei, An overview of current research on EU ETS: Evidence from its operating mechanism and economic effect[J].Applied Energy, Volume 87, Issue 6,2010,1804-1814.
- [39] Beibei Cheng, Hancheng Dai, Peng Wang, Daiqing Zhao, Toshihiko Masui,Impacts of carbon trading scheme on air pollutant emissions in Guangdong Province of China[J].Energy for Sustainable Development,Volume 27,2015, 174-185.
- [40] 孙睿,况丹,常冬勤.碳交易的“能源-经济-环境”影响及碳价合理区间测算[J].中国人口·资源与环境, 2014, 24(07): 82-90.
- [41] 刘宇,蔡松锋,王毅,等.分省与区域碳市场的比较分析——基于中国多区域一般均衡模型 TermCo2[J].财贸经济, 2013, (11): 117-127.
- [42] 王勇,赵晗.中国碳交易市场启动对地区碳排放效率的影响[J].中国人口·资源与环境, 2019, 29(01): 50-58.
- [43] 董直庆,王辉.环境规制的“本地—邻地”绿色技术进步效应[J].中国工业经济, 2019, (01): 100-118.
- [44] 张彩江,李章雯,周雨.碳排放权交易试点政策能否实现区域减排?[J].软科学, 2021, 35(10): 93-99.
- [45] 李广明,张维洁.中国碳交易下的工业碳排放与减排机制研究[J].中国人口·资源与环境, 2017,27(10):141-148.
- [46] Shubo Yang, Atif Jahanger, Mohammad Razib Hossain, Does China's low-carbon city pilot intervention limit electricity consumption? An analysis of industrial energy efficiency using time-varying DID model[J].Energy Economics,Volume 121,2023,106636.
- [47] 刘传明,孙喆,张瑾.中国碳排放权交易试点的碳减排政策效应研究[J].中国人口·资源

与环境, 2019, 29(11): 49-58.

- [48] Weijian Du, Mengjie Li, Assessing the impact of environmental regulation on pollution abatement and collaborative emissions reduction: Micro-evidence from Chinese industrial enterprises[J]. Environmental Impact Assessment Review, Volume 82,2020,106382.
- [49] 李婧, 谭清美, 白俊红.中国区域创新生产的空间计量分析——基于静态与动态空间面板模型的实证研究[J].管理世界, 2010(07):43-55+65.
- [50] 温素彬, 方苑.企业社会责任与财务绩效关系的实证研究——利益相关者视角的面板数据[J].中国工业经济, 2008(10):150-160.
- [51] Wager S, Athey S.,2018,"Estimation and Inference of Heterogeneous Treatment Effects using Random Forests"[J].Journal of the American Statistical Association, 113:523,1228-1242.
- [52] 刘生龙, 张晓明, 杨竺松.互联网使用对农村居民收入的影响[J].数量经济技术经济研究, 2021,38(04):103-119.
- [53] Mao, J.,Xie, J. , Hu, Z. , Deng, L. , Wu, H. , & Hao, Y. . (2023). Sustainable development through green innovation and resource allocation in cities: evidence from machine learning[J]. Sustainable Development.
- [54] Jian Yu, Peng Liu, Xunpeng Shi, Xianneng Ai, China's emissions trading scheme, firms' R&D investment and emissions reduction[J].Economic Analysis and Policy, Volume 80,2023, 1021-1037.
- [55] 李广子, 熊德华, 刘力.中小银行发展如何影响中小企业融资?——兼析产生影响的多重中介效应[J].金融研究, 2016(12):78-94.
- [56] 韩晨, 谢言, 高山行.多重战略导向与企业创新绩效: 一个被调节的中介效应模型[J].管理工程学报, 2020,34(06):29-37.
- [57] Tong Fu, Ze Jian, Corruption pays off: How environmental regulations promote corporate innovation in a developing country[J].Ecological Economics, Volume 183,2021,106969.
- [58] Zhongfei Chen, Fanglin Chen, Mengling Zhou, Does social trust affect corporate environmental performance in China?[J]. Energy Economics, Volume 102,2021,105537.
- [59] Haijun Zhang, Maosheng Duan, Zhe Deng, Have China's pilot emissions trading schemes promoted carbon emission reductions?—the evidence from industrial sub-sectors at the provincial level[J].Journal of Cleaner Production, Volume 234,2019,912-924.
- [60] Zheming Yan, Zicheng Zhou, Kerui Du, How does environmental regulatory stringency affect energy consumption? Evidence from Chinese firms[J]. Energy Economics, Volume 118,2023,106503.
- [61] Yue Zhang, Fan Xia, Bing Zhang, Can raising environmental tax reduce industrial water pollution? Firm-level evidence from China[J]. Environmental Impact Assessment Review,

Volume 101,2023,107155.

- [62] 张晴,于津平.投入数字化的减排增效效应——来自中国制造业企业的经验检验[J].科学学研究, 2023,41(08):1422-1432.
- [63] 包彤.环境规制视角下产业协同集聚有助于污染减排吗?——来自中国微观企业的证据[J].产业经济研究, 2022,(05):86-100.
- [64] B.W. Ang, F.Q. Zhang, A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies[J].Energy, Volume 25, Issue 12,2000,1149-1176.
- [65] 郭朝先.中国碳排放因素分解:基于 LMDI 分解技术[J].中国人口·资源与环境, 2010,20(12):4-9.
- [66] 徐国泉,刘则渊,姜照华.中国碳排放的因素分解模型及实证分析:1995-2004[J].中国人·资源与环境,2006,(06):158-161.
- [67] 邵帅,张曦,赵兴荣.中国制造业碳排放的经验分解与达峰路径——广义迪氏指数分解和动态情景分析[J].中国工业经济, 2017,(03):44-63.
- [68] Ramsay J O , Dalzell C J .Some Tools for Functional Data Analysis[J].Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 1991, 53(3).
- [69] Greenwood M .Nonparametric Functional Data Analysis: Theory and Practice[J].Journal of the American Statistical Association, 2007, 102(479):1077-1077.
- [70] Ramsay J O, Hooker G et al. Functional Data Analysis with R and MATLAB[M]. New York: Springer, 2009.
- [71] 王德青,田思华,朱建平,等.中国城乡居民收入与消费的时空差异及其收敛性[J].数理统计与管理, 2021,40(03):475-489.
- [72] 王许,乔清薇,陈霄.碳排放权交易市场与新能源市场的动态相依关系研究:以我国碳市场试点为例[J].中国矿业大学学报(社会科学版), 2021,23(06):89-106.
- [73] 郭丰,杨上广,柴泽阳.创新型城市建设实现了企业创新的“增量提质”吗?——来自中国工业企业的微观证据[J].产业经济研究, 2021,(03):128-142.
- [74] Athey, S., & Imbens, G. (2016). Recursive partitioning for heterogeneous causal effects[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 113(27), 7353-7360.
- [75] Knittel C R, Stolper S. Using machine learning to target treatment: The case of household energy use[R]. NBER Working Paper No.26531, 2019.
- [76] 唐国平,李龙会,吴德军.环境管制、行业属性与企业环保投资[J].会计研究, 2013,(06):83-89+96.
- [77] 王兵,戴敏,武文杰.环保基地政策提高了企业环境绩效吗?——来自东莞市企业微观面板数据的证据[J].金融研究, 2017,(04):143-160.
- [78] Xiaoguang Liu, Qiang Ji, Jian Yu, Sustainable development goals and firm carbon emissions:

Evidence from a quasi-natural experiment in China[J].Energy Economics, Volume 103,2021,105627.

- [79] 刘敏, 郎荣玲, 曹永斌.随机森林中树的数量[J].计算机工程与应用, 2015,51(05):126-131.
- [80] Athey J W S .GENERALIZED RANDOM FORESTS[J].The Annals of Statistics: An Official Journal of the Institute of Mathematical Statistics, 2019, 47(2).
- [81] Chernozhukov V , Demirer M , Duflo E ,et al.Generic Machine Learning Inference on Heterogenous Treatment Effects in Randomized Experiments[J].NBER Working Papers, 2018.
- [82] 吕越, 张昊天, 薛进军, 等.税收激励会促进企业污染减排吗——来自增值税转型改革的经验证据[J].中国工业经济, 2023,(02):112-130.
- [83] 孙铮, 刘凤委, 李增泉.市场化程度、政府干预与企业债务期限结构——来自我国上市公司的经验证据[J].经济研究, 2005,(05):52-63.
- [84] 佟家栋, 赵思佳.服务业开放是否能促进中国制造业企业碳减排[J].南开经济研究, 2023,(06):3-20.
- [85] 樊纲、王小鲁 2001 (2003-2004):《中国市场化指数——各地区市场化相对进程报告 (2001 年)》 经济科学出版社.
- [86] 涂正革, 谌仁俊.排污权交易机制在中国能否实现波特效应?[J].经济研究, 2015,50(07):160-173.
- [87] Hongjuan Zhi, Lingyun Ni, Dandan Zhu,The impact of emission trading system on clean energy consumption of enterprises: Evidence from a quasi-natural experiment in China[J].Journal of Environmental Management[J],Volume 318,2022,115613.
- [88] Baron R M, Kenny D A,1986, “The moderator mediator variable distinction in social psychological research: Conceptual, strategic, and statistical considerations” [J].*Journal of Personality and Social Psychology*,51(6), 1173-1182.
- [89] Judd C M, Kenny D A,1981, “Process analysis: Estimating mediation in treatment evaluations” [J].*Evaluation Review*, 5(5), 602-619
- [90] 温忠麟, 张雷, 侯杰泰, 刘红云. 2004:《中介效应检验程序及其应用》.《心理学报》36(5): 614-620.
- [91] King, A.A., & Lenox,M.J.(2001). Does it really pay to be green? An empirical study of firm environmental and financial performance: an empirical study of firm environmental and financial performance[J]. Journal of Industrial Ecology, 5, 105-116.
- [92] Imai K, Keele L, Yamamoto T, 2010, “Identification, inference and sensitivity analysis for causal mediation effects” [J].*Stat. Sci*, 25, 51-71.
- [93] 余得生, 李星.环境规制、融资约束与企业创新[J].生态经济, 2021,37(04):44-49+79.
- [94] 胡珺, 黄楠, 沈洪涛.市场激励型环境规制可以推动企业技术创新吗?——基于中国碳排

- 放权交易机制的自然实验[J].金融研究, 2020,(01):171-189.
- [95] 崔广慧, 姜英兵.环境规制对企业环境治理行为的影响——基于新《环保法》的准自然实验[J].经济管理, 2019,41(10):54-72.
- [96] Chin-Hsien Yu, Xiuqin Wu, Dayong Zhang, Shi Chen, Jinsong Zhao,Demand for green finance: Resolving financing constraints on green innovation in China[J].Energy Policy,Volume 153,2021,112255.
- [97] 沈洪涛, 黄楠, 刘浪.碳排放权交易的微观效果及机制研究[J].厦门大学学报(哲学社会科学版), 2017,(01):13-22.
- [98] 吴茵茵, 齐杰, 鲜琴, 等.中国碳市场的碳减排效应研究——基于市场机制与行政干预的协同作用视角[J].中国工业经济, 2021,(08):114-132.
- [99] 刘晔, 张训常.碳排放交易制度与企业研发创新——基于三重差分模型的实证研究[J].经济科学, 2017,(03):102-114.

学位论文数据集

关键词*	密级*	中图分类号*	UDC	论文资助
碳排放权交易机制；企业碳排放量；函数型熵权；因果森林；平均因果中介	公开	F062.9	331.5	
学位授予单位名称*		学位授予单位代码*		学位类别*
中国矿业大学		10290		经济学
学位级别*				硕士
论文题名*		并列题名		论文语种*
我国碳排放权交易机制的企业减排效应评估——基于函数型赋权与因果森林算法的实证分析		An empirical analysis of the emission reduction effect of China's emissions trading scheme on enterprises—based on functional weighting and causal forest algorithm		中文
作者姓名*	潘艳美		学号*	TS21070026A31
培养单位名称*	培养单位代码*		培养单位地址	邮编
中国矿业大学	10290		江苏省徐州市	221116
学科专业*	研究方向*		学制*	学位授予年*
数量经济学	碳排放权交易政策减排有效性		3	2024
论文提交日期*		2024 年 6 月		
导师姓名*	王许		职称*	副教授
评阅人		答辩委员会主席*	答辩委员会成员	
盲审		王新宇		
电子版论文提交格式 <input checked="" type="checkbox"/> 文本 <input type="checkbox"/> 图像 <input type="checkbox"/> 视频 <input type="checkbox"/> 音频 <input type="checkbox"/> 多媒体 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>				
推荐格式: application/msword; application/pdf				
电子版论文出版(发布)者	电子版论文出版(发布)地		权限声明	
论文总页数*		72		