

陈操操,于凤菊,张悦,等.碳交易试点政策减排效应实证评估及机制分析[J].中国环境科学,2025,45(3):1674-1685.

Chen C C, Yu F J, Zhang Y, et al. Empirical evaluation and mechanism analysis of domestic carbon trading pilot policies on emission reduction [J]. China Environmental Science, 2025,45(3):1674-1685.

碳交易试点政策减排效应实证评估及机制分析

陈操操^{1*},于凤菊¹,张悦¹,刘耕源²,王新爽¹,郑恺昀¹,胡婧¹,王立波¹,宋丹¹,胡永锋¹,孙粉¹,孙大利¹,马宁¹ (1.北京市应对气候变化管理事务中心,北京 100086; 2.北京师范大学环境学院,环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100875)

摘要: 基于2000-2021年中国30个省级地区的面板数据,将碳交易政策视为准自然实验,利用多期双重差分方法系统评估了其碳排放的影响。结果表明:引入碳交易政策后,试点地区碳总量下降13.2%,碳强度和人均碳排放分别下降21.3%和17.2%。受碳交易政策影响,试点地区碳强度显著降低,然而碳总量和人均排放影响不显著。碳交易减排主要依赖于产业结构改善,碳交易价格、市场活跃度和低碳技术的中介效应较弱。不同政策间可能存在互补和协同效应,尽管碳交易在推动碳减排发挥积极作用,但对SO₂、NO_x和PM_{2.5}的协同效果仍需提升。这些结果为理解碳交易政策提供了重要的实证支持,为完善碳交易制度,以及指导未来碳市场政策的调整和优化提供科学依据。

关键词: 碳排放权交易; 多期差分模型; 环境效应; 碳中和

中图分类号: X196 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)03-1674-12

Empirical evaluation and mechanism analysis of domestic carbon trading pilot policies on emission reduction. CHEN Cao-cao^{1*}, YU Feng-ju¹, ZHANG Yue¹, LIU Geng-yuan², WANG Xin-shuang¹, ZHENG Kai-yun¹, HU Jing¹, WANG Li-bo¹, SONG Dan¹, HU Yong-feng¹, SUN Fen¹, SUN Da-li¹, MA Ning¹ (1.Beijing Climate Change Management Centre, Beijing 100086, China; 2.State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China). *China Environmental Science*, 2025,45(3): 1674-1685

Abstract: This study utilizes panel data from 30 Chinese provinces from 2000 to 2021. We treat the carbon trading policy as a quasi-natural experiment, and apply a multi-period difference-in-differences method to systematically evaluate its impact on carbon emissions. The results indicate that: after the introduction of the carbon trading policy, the total carbon emissions in the pilot regions decrease by 13.2%, while carbon intensity and per capita carbon emissions fall by 21.3% and 17.2%, respectively. The carbon trading policy significantly reduces carbon intensity in the pilot regions; however, the impacts on total carbon emissions and per capita emissions are not significant. Carbon reduction through trading primarily relies on improvements in industrial structure, with weaker mediation effects from carbon trading prices, market activity, and low-carbon technology. There may be complementary and synergistic effects among different policies. Although carbon trading plays a positive role in promoting carbon reduction, its synergistic effects on SO₂, NO_x and PM_{2.5} still need to be enhanced. These results provide important empirical support for understanding carbon trading policies and offer a scientific basis for refining the carbon trading system as well as guiding future adjustments and optimizations of carbon market policies.

Key words: carbon emission trading; multi-period difference-in-differences model; environmental impact; carbon neutral

自京都议定书首次提出碳交易以来,这一市场化手段已被广泛用于降低碳排放和促进清洁能源发展,目前实施的碳交易体系涵盖了全球18%的温室气体排放^[1]。我国积极探索运用市场机制控制和减少温室气体排放,碳市场已成为实现国内碳达峰、碳中和目标的关键市场化减排手段^[2]。《碳排放权交易管理暂行条例》(国务院令 第775号)2024年1月5日通过,5月1日施行。《中共中央国务院关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》强调完善绿色

转型价格政策、健全市场化机制。实际上早在2013年,中国在深圳、北京等7省市陆续开展了碳排放权交易政策试点。多年碳交易试点工作不断持续深化,取得了积极成效,推动了地方碳强度的降低。在“十三五”期间北京市碳强度下降幅度超过23%,成为全

收稿日期: 2024-07-16

基金项目: 北京市科技计划课题资助项目(Z221100005222027);国家自然科学基金资助项目(41001380,72073017)

* 责任作者, 研究员, ecoduron@163.com

国碳强度最低的省级地区^[3]。深圳同一时期碳强度的降幅累计为 26.8%,2020 年其碳强度仅有全国水平的五分之一^[4]。2021 年中国碳排放权交易市场正式启动,但全国碳排放权交易市场目前仅纳入发电行业,建材、有色、钢铁、石化、化工、造纸、航空等高排放行业将在下一步陆续纳入。在相当长的一段时间内,国内地方碳试点与全国碳市场将并存,共同发挥市场机制减排的作用。作为“政策实验田”,试点地区相较全国碳市场开展碳交易时间更长,覆盖行业更广,累积的经验更多。由于经济发展水平、制度设计等方面的差异,各试点碳市场规模、效率等存在较大差异,各具特色。试点省市中,广东省和湖北省重工业企业体量大,整体排放规模占优势。重庆和天津成交量和成交额较少,交易几乎限于停滞。北京和深圳虽然覆盖行业范围广,甚至包含了服务业,但是整体规模较低,限制了减排作用的充分发挥。评估试点碳交易政策在推进过程中环境效应,对于理顺碳交易政策机制,实现减排目标及促进经济可持续发展具有至关重要的意义。

关于碳排放交易减排机制相关实证文章,国外文献主要对经济绩效、环境绩效和企业层面政策选择等进行分析。一般认为设计得当的碳排放权交易体系(Emissions Trading Systems,简称 ETS)可以按照控排目标降低减排成本,并长期促进技术进步,令减排成本持续降低^[5-6]。研究显示,EU ETS 对企业的经济绩效指标(如就业和生产率)有影响,且中小型企业受影响更大^[7],参与 ETS 企业在温室气体减排和经济绩效之间存在因果关系^[8-9]。同时,部分学者指出,EU ETS 的政策有效性可能存在挑战或争议,因部分地区和行业的排放已出现早期下降,宏观经济波动也会影响政策效果^[10]。

国内减排机制研究相当多聚焦于区域和行业的减排。例如,有研究者通过情景分析,发现碳交易促进了中国工业产出并减少排放^[11],对提高省级地区绿色生产力产生积极影响^[12]。类似的正向有效减排观点研究还包括,中国试点碳市场整体效率较低,但随着时间推移有所改善^[13],碳交易政策在达成碳中和的潜力评估及关键作用实证研究^[14]。通过碳配额和碳交易价格的影响,碳交易政策不仅降低了区域碳排放,还抑制了人均二氧化碳排放^[15]。基于大规模企业问卷调查,评估了试点规则实施效果、合规压力

以及企业应对策略^[16]。持怀疑论的研究者认为国内试点普遍存在规模小、效率低、活跃度不足等特征,成熟度较低^[17],且碳排放的下降或非直接来源于碳市场,而是降低经济活动导致的结果^[18]。

总体上,许多实证研究肯定了碳交易对于二氧化碳减排所产生的作用,但是仅限于整体减排目标,减排效果随研究对象不同评价的异质性较高^[9,11,17]。现有研究不足之处包括:一是受样本数据和方法限制,难以全面、定量地反映碳市场的实际效果^[16];二是对于碳市场效果的异质性分析尚不深入^[19];三是在揭示碳市场效果的具体影响机制与作用渠道方面研究不足^[20]。具体到中国碳排放权交易的实施情况,仍需进一步探讨其实际成效、作用大小和减排规模^[21-23]。此外,目前关于碳排放权交易对碳排放总量和碳排放强度的影响,以及其作用渠道的研究尚不完整^[20]。研究及讨论的深度和范围有待深入,基于科学评估方法对公共政策开展研究显得尤为重要^[24-25]。

近年来,双重差分(DID)模型作为一种准实验性的政策评估方法,在分析公共政策如碳市场减排作用逐渐得到重视,已在省级^[19,21]、市级^[23]及企业级^[22]层面进行了实证研究与尝试。该模型的优势表现在以下几个方面:首先,通过对政策实施前后各时间段结果的变化进行检验,DID 模型较好地解决了遗漏变量和内生性问题;其次,该方法在分析时变混淆因素时具有较强的稳健性;再次,能够进行纵向分析,评估过程相对简单直观,且研究结果易于解释,可靠性较高。

本文将中国国家和地方统计数据、试点碳交易数据以及高校研究中心数据匹配起来尝试回答碳交易环境效应问题,构建了 2000~2021 年中国省级面板数据,建立多期双重差分模型对碳交易试点政策的区域性减排效应及协同作用进行系统性分析,并从价格效应、活跃度、结构效应与技术效应等揭示碳交易的实施对区域碳减排的内在影响机制。

本文的贡献主要在于:①与已有研究将碳交易固定同一政策时点不同,本文拓展为多期差分模型评估碳交易试点的减排效应,丰富了研究方法的宽度;②在模型的控制组选择上,比较了全部纳入和部分纳入两种情况,政策指向性更强;③已有研究时间范围大多仅到 2017 年,本文研究时间范围延伸到

2021 年,开展了对碳排放总量、碳排放强度和人均碳排放量因变量检验,完整的采用平行趋势检验、稳健性检验等方法缓解选择性偏误问题,研究结论更为稳健。

1 模型与方法

1.1 研究方法

双重差分法是一种广泛使用的政策效果评价方法,通常用于评估随机试验或准自然实验效果。由于政策的效果往往需要一段时间才能显现,因此通常需要收集政策实施前后几年的数据,量化评估某项具体政策对政策实施对象的作用大小。碳交易试点被视为独立的“自然实验”,试点省份被认为是处理组(treated group)。对照组(untreated group)为不受试点影响的组。然后将处理组某一个具体指标在政策实施前后的平均改变量与对照组的差距,视为此政策对实验组的真实影响^[26]。试点效果通过过滤结果变量受时间效应和固定效应的干扰,进而获得政策作用的净效应,为研究人员和政策制定者提供了一个严谨的框架,从而评估真实政策的因果影响。

我国自 2013 年开始实施碳排放权交易制度,由于试点启动的时间不同,符合多期双重差分模型评估范畴。国内碳交易试点地区除了受到市场化的碳减排激励机制核心政策影响外,还受到相关的产业政策与标准、绿色金融、财政补贴、法律法规监管等相关措施的影响。相比之下,国内非碳交易试点地区不会受到政策的冲击,这为“对照组”的选取提供了良好的条件。本文参考已有经典研究,构建多期 DID 模型评估碳交易的减排影响^[15]。

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 \text{treat}_i \times \text{period}_t + \alpha X_{it} + \lambda_i + \nu_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中:被解释的因变量方面,本文选择了区域碳排放总量,区域碳排放强度和人均碳排放量 3 个指标, Y_{it} 代表 CO_2 排放总量、排放强度或人均排放, i 表示地区, t 代表时间; treat_i 代表地区虚拟变量, $\text{treat}_i=1$ 表示地区 i 实施了碳交易, $\text{treat}_i=0$ 表示 i 地区未实施碳交易; period_t 代表时间虚拟变量, $\text{period}_t=1$ 表示 t 时期实施了碳交易, $\text{period}_t=0$ 表示 t 时期没有实施碳交易,本文对应各试点开始实施碳交易的时间点分别为 2013、2014 和 2016 年; X 为影响碳排放量的多个控制变量; λ_i 为个体固定效应, ν_t 为时间固定效应, ε_{it} 为

扰动项。 β_1 是关注的估计系数,若 β_1 为负且显著,则表示碳交易政策能够降低二氧化碳排放。

1.2 研究数据

结合文献分析,选取主要控制变量指标如下:①经济发展水平(lnpgdp)。本文选取人均 GDP 衡量地区经济发展水平,为了消除价格因素的干扰,通过构造 GDP 平减指数将名义 GDP 调整为 2000 年不变价格 GDP,与当年人口数的比值得到人均 GDP。②产业结构成熟度(highstr)。产业结构成熟度是影响碳排放的重要因素之一,本文采用第三产业增加值与第二产业增加值之比来刻画产业结构成熟度,比值越高通常表明地区第三产业发展更成熟,经济活动更多元化,进而促进碳减排^[27-29]。③研发投入(RD)。研发投入被认为是推动技术进步、创新能力和经济增长的重要驱动力,对降低二氧化碳排放具有促进作用,本文利用各地区研发经费投入强度来衡量研发投入对碳排放的影响。④劳动力水平(Wman),采用各地区劳动年龄 16~60 岁人口数量。⑤城镇化水平(Urbanr),地区城镇人口占常住人口的比重。

本文使用的是省级地区样本数据,因西藏和港澳台地区历史数据存在缺失,本文将其从样本中剔除。深圳市虽然是碳交易试点,其与广东省存在数据范围交叉,且可获取的市级指标和省级指标并不一致,将深圳市从样本中剔除。首先选取北京市、天津市、上海市、重庆市、广东省与湖北省作为碳交易试点政策的试验组,非试点省市为控制组。

进一步细化讨论控制纳入模型评估地区范围。在以往研究中,学者往往将全国各省均纳入评估范围。然而,考虑到我国西部地区省份与东部、中部地区发展差异。大多数碳交易试点位于我国中部和东部地区,而唯一位于西部地区的碳交易试点重庆市,其经济规模和碳排放特点更接近中部和东部地区。为了提高模型评估的辨识度和指向性,本文首先比较了纳入东、中、西地区全样本作为对照组和纳入东、中部地区样本两种情况,控制组方面除重庆市外其他碳交易试点地区均位于中东部。最终得到 2000~2021 年我国中东部地区和重庆 30 个省份的面板数据作为初始样本。选择面板数据可以有效地控制样本个体的异质性,变量之间不容易产生多重共线性问题,更容易获得较高的自由度,进而提高信息发掘的效率^[30]。

本文二氧化碳排放量的数据来源于公开发布的中国碳排放数据库(CEADs),碳交易市场成交量和成交额的数据来源于 Wind 数据库,能源消费总量以及各类能源消费量的数据来源于《中国能源统计

年鉴》,各地区研发投入强度数据来源于历年《全国科技经费投入统计公报》.为了保证数据的平稳性,避免异方差影响,参考经典文献做法^[19],本文对所有非虚拟变量数据采用对数处理.

表 1 主要变量的描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of key variables

变量	变量	单位	指标说明	样本数	均值	标准差
碳排放总量	TC	万 t	各省直辖市碳排放量	658	10.096	0.852
碳排放强度	Eint	t/万元	各省直辖市不变价碳排放强度	658	0.986	0.697
人均碳排放	PC	t/人	各省直辖市人均碳排放量	658	1.924	0.663
虚拟变量	Treated	/	试点地区为 1,非试点地区为 0	658	0.234	0.423
虚拟变量	T	/	开始碳交易政策起始年及以后年份为 1,否则为 0	658	0.088	0.284
经济发展	lnpgdp	亿元	各省市人均地区生产总值(调整为 2000 年不变价)	658	9.185	0.522
劳动力水平	Wman	万人	劳动年龄 16-60 岁人口数量	658	2.016	0.111
人口密度	Pinten	万人/km ²	常住人口/地区面积	658	5.434	1.271
城镇化水平	Urbanr	%	城镇人口/总人口	658	3.895	0.327
产业结构成熟度	highstr	%	第三产业和第二产业比率	658	4.576	0.390
研发强度	R&D	%	研发 R&D 投入占 GDP 总产值比值	658	2.401	0.694

2 结果与分析

2.1 碳交易政策对碳减排影响有效性检验

本文首先检验碳排放交易政策对碳减排的影响,被解释变量分 3 类:碳排放总量、单位 GDP 碳排放强度和人均碳排放.在不同政策执行年份下构造

核心解释变量(交互项 $Treat \times T$),评估政策前后的交互项来获得处理效应的变化,若预期系数为负且显著,则表示碳交易市场规模的扩大能够降低二氧化碳排放量.表 2 和表 3 分别给出了包含东、中、西地区全样本的回归结果和仅包含东部和中部地区的回归结果.

表 2 试点碳交易政策对碳排放的影响(包含东、中、西部地区全样本)

Table 2 Impact of pilot carbon trading policies on carbon emissions (including full sample from eastern, central, and western regions)

指标	碳排放总量		碳排放强度		人均碳排放	
	(1) TC	(2) TC	(3) Eint	(4) Eint	(5) PC	(6) PC
$Treat \times T$	-0.2602** (0.1085)	-0.2674*** (0.0854)	-0.2948*** (0.0946)	-0.3265*** (0.0883)	-0.3892*** (0.1299)	-0.3264*** (0.0904)
Instr		-0.4139*** (0.1290)		-0.2017 (0.1328)		-0.4767*** (0.1429)
Gper		0.2811 (0.2426)		-0.5283* (0.2837)		0.2717 (0.2399)
Wman		2.3696 (1.5760)		2.2104 (2.0284)		-0.6641 (1.8265)
Urbanr		-0.0478 (0.1075)		-0.0988 (0.1143)		-0.0942 (0.1116)
Erule		0.0483** (0.0234)		0.0573** (0.0234)		0.0521* (0.0256)
Rd		0.1954* (0.1135)		0.1406 (0.1135)		0.1846 (0.1165)
_cons	9.4385*** (0.0586)	3.8379 (4.6707)	1.7353*** (0.0526)	2.8989 (5.5990)	1.2724*** (0.0574)	2.2663 (5.0967)
N	658	658	658	658	658	658
控制变量	无	有	无	有	无	有
地区固定效应	有	有	有	有	有	有
时间固定效应	有	有	有	有	有	有
R ²	0.9470	0.9586	0.9270	0.9368	0.9075	0.9285

注:括号内代表稳健标准误差;* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$ 显著性水平 5%、1%和 1%。

表 3 试点碳交易政策对碳排放的影响(包含东部、中部地区样本)

Table 3 Impact of pilot carbon trading policies on carbon emissions (including sample from eastern and central regions)

指标	碳排放总量		碳排放强度		人均碳排放	
	(1) TC	(2) TC	(3) Eint	(4) Eint	(5) PC	(6) PC
Treat×T	-0.1644 (0.1048)	-0.1415* (0.0802)	-0.2736*** (0.0922)	-0.2396** (0.1000)	-0.2961** (0.1263)	-0.1892* (0.0910)
Instr		-0.3235** (0.1232)		-0.1505 (0.1371)		-0.3963*** (0.1354)
Gper		0.0504 (0.1646)		-0.8250*** (0.1927)		0.0231 (0.1799)
Wman		0.3825 (1.9876)		0.5244 (2.6988)		-3.0820 (2.3350)
Urbanr		-0.0124 (0.1287)		-0.0619 (0.1481)		-0.0793 (0.1235)
Erule		0.0214 (0.0190)		0.0298 (0.0210)		0.0280 (0.0206)
Rd		0.3844*** (0.1054)		0.3104** (0.1130)		0.3554** (0.1287)
_cons	9.5320*** (0.0680)	9.1387** (4.3022)	1.7719*** (0.0730)	8.3744 (5.4817)	1.3705*** (0.0684)	8.7257 (5.2057)
N	439	439	439	439	439	439
控制变量	无	有	无	有	无	有
地区固定效应	有	有	有	有	有	有
时间固定效应	有	有	有	有	有	有
R ²	0.9616	0.9735	0.9415	0.9548	0.9036	0.9388

注:括号内代表稳健标准误差;* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$ 显著性水平5%、1%和1%。

基于模型(1)得到回归结果见表 2 和表 3,列 1~6 为碳排放总量、碳排放强度和人均碳排放量模型回归结果.通过对比可以直观发现,如将对照组覆盖到国内的东、中、西部地区得到的模型系数和显著水平,都要远远高于只考虑东部和中部地区,西部和东中部地区在区域和发展上存在较大差异.可见,西部地区纳入差分模型容易夸大碳交易政策的评估效果.

考虑到国内中东部和西部的巨大区域差异,以及低碳政策的落地实施效果,为使结果更贴近实际,将分析范围缩小在国内东部和中部地区,如后续分析未特殊说明,均为基于东部和中部筛选范围的分析结果.由表 3 可见,经过 Hausman 检验,在双向固定条件下,未加入控制变量时,DID 系数表现为负值,试点碳交易制度降低了地区的碳排放,排序影响从大到小依次为碳排放强度、人均碳排放量和碳排放总量,其中碳排放强度通过 1%显著性检验,碳排放强度通过 1%显著性检验,而碳排放总量没有通过检验.

加入控制变量后,模型增加了产业结构成熟度、

劳动力水平、研发投入等变量,模型关注 Treat×T 系数依然为负值,并未改变政策效应的方向,虽然系数绝对值相比未加入控制变量有所下降,但是通过 5%的显著水平检验,模型的解释效果更强.这表明双重差分模型回归结果具有一定的稳健性.由于模型对数转换后,系数的解释变为弹性(elasticity),即因变量的百分比变化.由双重差分模型估计可得到,引入碳交易政策后相对对照地区,试点地区碳总量下降了 13.2%,碳强度下降了 21.3%,人均碳排放下降了 17.2%.此部分减碳效果还需进一步结合后续平行趋势检验和稳健性检验结果.

2.2 平行趋势检验

平行趋势检验是构建 DID 模型最为重要的一步,即在没有政策干预的情况下,结果变量在处理组和对照组的发展趋势一致.常见的包括时间趋势图法和回归法两种.时间趋势图法简单直观,但是仅能通过定性判断处理组和控制组是否存在显著差异,不能在统计意义上准确地判断处理组和控制组是否存在显著差异.而回归法允许包含多期数据,结果更加准确,本文选择了回归法做平行趋势检验.具

体做法是生成年份虚拟变量 $year$ 与处理组虚拟变量 $treat$ 的交互项,加入模型中进行回归,(M、N)分别表示政策前和政策后的期数,那么交互项 $treat_i \times year_j$ 的系数 δ_j 衡量的就是第 j 期处理组和控制组之间的差异.参考 Jacobson 的时间研究法对试点碳交易政策的动态效应进行实证,本文分别对碳排放总量、碳排放强度和人均碳排放量进行评估.

$$Y_{it} = \beta_0 + \sum_{j=-M}^N \delta_j treat_i \cdot year_{it} + \lambda_i + \nu_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

如式(2)所示分别生成年份与处理组虚拟变量 $treat$ 的交互项,交互项的系数衡量的是特定年份处理组和控制组之间的差异.具体来说,为了图形简洁便于理解,当超过政策时点的前后 4 期,全部纳入到该期值平行检验图形. $current$ 为政策当期的效果, $\delta(-4)\sim\delta(-1)$ 为政策之前 1~4 期的效果, $\delta(1)\sim\delta(4)$ 为政策之后 1~4 期的效果.参考经典文献做法,为避免完全共线性问题,选择的是政策之前的第 1 期作为模型的基准组^[32].

从检验结果看,仅碳强度通过了平行趋势检验,碳交易政策对碳强度降低产生显著影响.碳强度的 $\delta(-4)\sim\delta(-2)$ 基本在 0 左右,在 95%的置信区间内包含了 0 值,表明碳交易试点政策之前第 2~4 期处理组和控制组之间不存在异质性时间趋势,平行趋势假设成立.在实施碳交易试点政策后,由 $\delta(1)\sim\delta(4)$ 的图形趋势可见,政策对强度的影响逐渐增加和放大,表明了碳交易试点对碳强度影响具有延迟效应,影响显著.而碳总量和人均碳排放量 $\delta(-4)\sim\delta(-2)$ 的 95%置信性区间在零值左右,随着时间的推移,真实政策效果不明显,系数置信区间依然在零值附近,没有通过平行趋势假设,即碳交易试点政策并没有碳排放总量和人均碳排放减少产生显著影响.

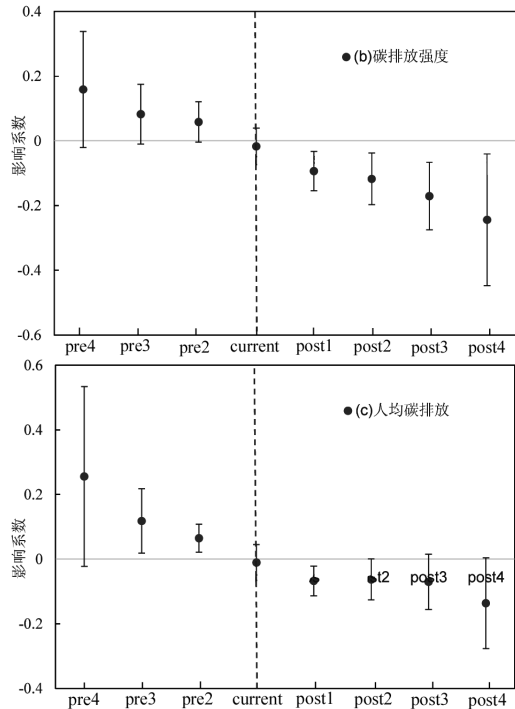
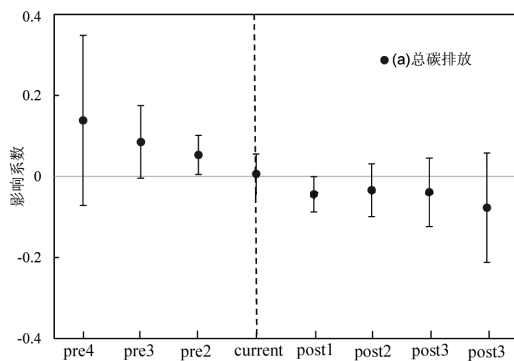


图 1 碳排放总量、碳强度和人均碳排放平行趋势检验(中部、东部地区)

Fig.1 Total carbon emissions, carbon intensity, and per capita carbon emissions parallel trend test(central and eastern regions)

图中误差线代表 95%的 CI 置信区间

2.3 稳健性检验

在通过平行趋势检验后,DID 模型还需要继续进行稳健性检验,确保“政策效应”更加的准确、切合实际.碳交易政策的实施确实产生了碳强度下降效应,且政策实施前实验组和控制组不存在显著性差异,但是通过 DID 估计出的政策效应是否受其他政策或因素的影响是未知的,因此需要进行安慰剂检验.

安慰剂检验较常使用个体安慰剂检验,通过绘制核密度图进行观测,一般来说,点越集中在横轴零点附近,说明通过了安慰剂检验,DID 模型的“政策效应”就越可靠.在随机化实验组的方法中,一般是随机选取个体作为处理组,选择重复 500 次,评估“伪政策虚拟变量”的系数是否显著.

图 2 展示了 500 个“伪政策虚拟变量”估计系数的分布及相应的 P 值,其中 X 轴表示“伪政策虚拟变量”估计系数的大小, Y 轴表示密度值和 P 值大小,曲线是估计系数的核密度分布,散点是估计系数对应的 P 值.从图 2 可以看出,回归系数值大部分都在 0 附近,大多数估计值的 P 值都大于 0.1,意味着在 10%

的水平上不显著.回顾前面差分模型中的计算结果,随机化的实验组相比原实验组,降低了 2 个数量级,政策效果不再显著.这表明估计结果不太可能是偶然得到的,因此没有受到其他政策或者随机性因素的影响.安慰剂检验可以说明原政策效果的稳健性.安慰剂测试消除样本偏差以及一系列稳健性检验,结果仍然有效.

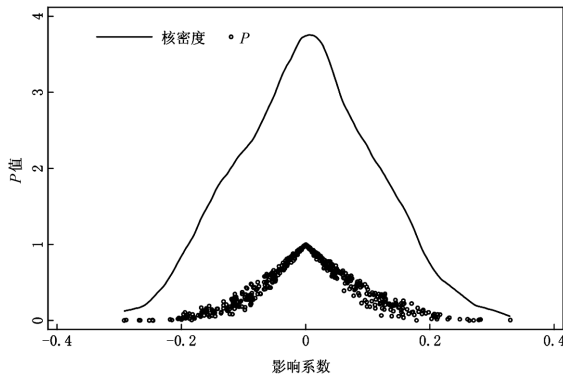


图2 碳强度安慰剂检验(中部、东部地区)

Fig.2 placebo test for carbon intensity (central and eastern regions)

2.4 基于中介效应的机制分析

根据前文结果,碳排放权交易政策能够显著降低试点城市的碳排放强度.为进一步分析政策的实施效应,本文借鉴 Baron 和 Kenny 提出的经典方法验证中介效应的存在性^[31],检验碳排放权交易是否通过碳交易价格提升、碳市场活跃度提升、产业结构改善、低碳技术研发来降低碳排放.Preacher 等^[33]认为只需要满足两个条件便可以说明存在中介效应:①在将中介变量加入到模型中之前,自变量对因变量具有显著的影响效果;②自变量对因变量的影响效果会随着中介变量的加入而减小.本文在结果检验中加以应用.因变量选择前文检验水平显著的碳排放强度和人均碳排放量.对应的在可获得数据水平的基础上,中间变量选择方面分别为,碳交易试点地区年度线上碳排放配额平均价格,碳交易地区配额成交量,产业结构成熟度,研发投入占 GDP 总产值比值.

本文设定的中介效应假设如下.碳交易价格提升:碳价提升主要通过增加排放成本、推动技术创新和传递市场信号来激励减排,假定碳交易政策实施后,碳价的上涨成为企业决策的重要因素,直接影响

其减排行为和投资决策.

碳市场活跃度提升:碳配额成交量的提升增强了市场流动性、强化了价格发现机制,提高了市场参与度.假设在政策实施后,成交量增加提高了市场流动性,使企业更容易买卖碳配额,优化其整体减排策略,并通过买入或者出售配额更有效地管理碳排放.

产业结构改善:假定碳交易政策促使资源从高碳排放产业转向低碳排放产业.高碳产业面临更高的成本压力,迫使其减产或进行技术改造,而低碳产业因成本优势获得更多发展机会,推动经济向低碳转型.

低碳技术研发:碳交易政策激励低碳技术创新,促进减排决策,降低碳排放强度、提高能源利用效率并替代高碳能源,从而推动产业转型升级,实现有效的碳减排目标.

开展基于中介效应的机制分析.首先,第一步将因变量对自变量和所有控制变量进行回归.此时自变量的系数为 β ,它代表了自变量对因变量的总效应(即不包含中介变量进行解释的总效应);其次,第二步将中介变量对自变量和所有控制变量进行回归,此时自变量的系数为 β' ;最后,第三步将因变量对自变量、中介变量和所有控制变量进行回归.此时中介变量的系数为 φ ,自变量的系数为 β'' .当存在中介效应时,自变量对因变量的影响应当小于模型中没有中介变量时的影响.因变量分别为碳排放强度和人均碳排放.

$$Y_{it} = \alpha + \beta \cdot \text{DID} + \delta \cdot X_{it} + \lambda_i + \nu_t + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

$$M_{it} = \alpha + \beta' \cdot \text{DID} + \delta \cdot X_{it} + \lambda_i + \nu_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

$$Y_{it} = \alpha + \beta'' \cdot \text{DID} + \varphi \cdot M_{it} + \delta \cdot X_{it} + \lambda_i + \nu_t + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

以碳排放强度为解释变量,第一步回归结果如表 3 的第(3)列所示,碳排放交易显著降低了区域碳排放强度,推动了低碳发展.第二步回归结果表明,碳排放交易政策与四大效应回归系数均显著为正,表明碳交易政策具备四大效应,可进行第三步检验.第三步回归结果见表 4,分别加入 4 种中介变量后,政策虚拟变量回归系数方向与第一步回归结果同向,仍体现为减排作用,碳价和成交量作为中介变量模型检验不显著,表明国内碳市场的建立使其碳价格发

现功能初步形成,但还没有形成清晰的碳价格信号,促使碳成本内部化,对减排的直接效果仍不明显.产业结构和低碳技术研发中介变量,通过了1%的显著性水平检验,表明碳市场政策对促进产业结构调整,激发低碳技术研发,从而推动碳减排的作用更明显.

表4 试点碳交易政策以碳强度为因变量中介效应分析(东部和中部地区)

Table 4 mediation analysis of pilot carbon trading policies with carbon intensity as the dependent variable (eastern and central regions)

指标	碳排放强度 Eint			
	(1)	(2)	(3)	(4)
Treat×T	-0.4760 (0.3380)	-0.0373 (0.0310)	-0.3743*** (0.0744)	-0.4807*** (0.0780)
Price	-0.0298 (0.1031)			
Amount		-0.0409 (0.4485)		
Instr			-0.4860*** (0.0649)	
RD				0.0096 (0.0656)
_cons	6.7201*** (1.0652)	6.7027*** (1.0573)	10.2518*** (1.0967)	6.5484*** (1.0452)
N	361	361	401	401
控制变量	有	有	有	有
地区固定效应	有	有	有	有
时间固定效应	有	有	有	有
R ²	0.6418	0.6432	0.6590	0.6103

注:括号内代表稳健标准误差,* $P < 0.05$,** $P < 0.01$,*** $P < 0.001$ 显著性水平5%、1%和1%。

以人均碳排放量为解释变量,第一步回归结果如表3的第(5)列所示,碳排放交易显著降低了人均碳排放.第二步回归结果表明,碳排放交易政策同样与四大效应回归系数均显著为正,表明碳交易政策具备四大效应,可进行第三步检验.第三步回归结果见表5,分别加入4种中介变量,仅产业结构加入后自变量对因变量的影响效果减小,意味着中介效应存在,碳交易政策影响产业结构改善,进一步对人均碳排放降低产生影响.其他3个中介变量,加入碳价后模型自变量对因变量影响方向相反,加入低碳技术研发后自变量对因变量影响效果放大,均未检验出中介效应.

由于本文选取的研发投入变量RD为区域研发经费占GDP的比重,该指标主要来自于政府投资,对于单独受碳市场影响的企业研发指代效果不强.综

合以上碳排放强度和人均碳排放中介检验结果,本文认为国内碳交易政策当前阶段主要通过产业结构改善驱动减排,而碳价提升,市场活跃度提升和低碳技术研发的中介效应不明显.

表5 试点碳交易政策以人均碳排放为因变量中介效应分析(东部和中部地区)

Table 5 mediation analysis of pilot carbon trading policies with per capita carbon emissions as the dependent variable (eastern and central regions)

变量	人均碳排放 PC			
	(1)	(2)	(3)	(4)
Treat×T	0.9572*** (0.3626)	-0.0210 (0.0336)	-0.2383*** (0.0753)	-0.3091*** (0.0773)
Price	-0.3657*** (0.1102)			
Amount		0.0879 (0.4903)		
Instr			-0.4169*** (0.0697)	
RD				0.1865*** (0.0694)
_cons	-4.1915*** (1.1555)	-3.7920*** (1.1663)	-0.5248 (1.1741)	-3.6936*** (1.0892)
N	361	361	439	439
控制变量	有	有	有	有
地区固定效应	有	有	有	有
时间固定效应	有	有	有	有
R ²	0.3907	0.3723	0.4126	0.3637

注:括号内代表稳健标准误差,* $P < 0.05$,** $P < 0.01$,*** $P < 0.001$ 显著性水平5%、1%和1%。

2.5 协同减污效果评估

许多学者认为,碳交易作为一种有效的环境经济政策工具,不仅能够促进温室气体的减排,还能带动污染物的协同减排,共同推动减污降碳的目标.其背后的逻辑是,通过建立碳市场形成价格激励,企业为降低成本,会寻求更加先进和清洁的生产方式及能源利用方式,从而改善了能源结构,促进了技术创新,从而减少污染物排放.作为碳达峰碳中和双碳目标“1+N”政策文件之一,2022年国务院发布了《减污降碳协同增效实施方案》,要求基于环境污染物和碳排放高度同根同源的特征,强化源头治理、系统治理、综合治理,切实发挥好降碳行动对生态环境质量改善的源头牵引作用^[34].

鉴于许多大气污染物和温室气体往往同根同源,本文选择了典型的3类大气污染物进行协同检

验,包括细颗粒物(PM_{2.5})、二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x),数据来自清华大学王书肖等(2023)发布中国大气污染物和二氧化碳排放趋势数据集(2005~

2021年)^[34].数据序列要比本文的时间序列短,但是依然覆盖了碳交易政策前后 8a 时间范围,满足模型分析要求.

表 6 试点碳交易政策对协同减污的影响(中部、东部地区)

Table 6 impact of pilot carbon trading policies on synergistic pollution reduction (central and eastern regions)

指标	PM _{2.5}		NO _x		SO ₂	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Treat×T	-0.3684*	-0.1372	-0.0688	0.0481	-0.7006**	-0.2724
	(0.2073)	(0.1931)	(0.1307)	(0.0774)	(0.2953)	(0.2065)
cons	6.6847***	9.3473	6.5033***	7.9733*	6.2708***	6.9193
	(0.0646)	(9.6693)	(0.0497)	(4.5621)	(0.0811)	(10.4986)
N	340	340	340	340	340	340
控制变量	无	有	无	有	无	有
时间固定	是	是	是	是	是	是
地区固定	是	是	是	是	是	是
R ²	0.9512	0.9598	0.9715	0.9835	0.9349	0.9552

注:括号内代表稳健标准误差,* $P < 0.05$,** $P < 0.01$,*** $P < 0.001$ 显著性水平5%、1%和1%。

以 3 类污染物为因变量,控制了时间和区域后双重差分检验结果如表 6 所示,分为有控制变量和无控制变量两种条件检验.在无控制变量下结果见表 6 的 1、3、5 列,碳交易政策能够显著降低试点地区 PM_{2.5} 和 SO₂ 的排放量.其中,对 SO₂ 的协同减排影响最高,碳交易政策的实施促使试点地区的 SO₂ 排放量平均下降 70.1%,达到 1%的显著性水平.对 PM_{2.5} 的协同减排影响次之,碳交易政策的实施促使试点地区的细颗粒物排放量平均下降 36.8%,达到 5%的显著性水平上.对 NO_x 的协同影响最弱,且检验不显著.

而通过控制其他变量,大部分研究者认为可以更有信心地将观察到的变化归因于处理效应,而不是其他未观测因素.增加控制变量后,可提供更准确和更可靠的估计,结果见表 3 的 2、4、6 列,模型系数出现不同程度的下降,且检验均不显著,其中 SO₂ 的变化最为明显,模型系数下降 1.6 倍,由先前的 1%显著性变为不显著.也就是说增加控制变量后碳交易政策的协同降污效果不明显了.这里结果改变很大的原因是过去十几年来,大气污染物改善受到综合施策的影响,包括强化法规和排放标准,加强执法监督和环境监管,完善技术创新和市场机制,优化能源结构和经济结构等.因此,能源结构调整和燃煤设施末端治理促进 SO₂ 减排,尤其是煤炭占能源消费总量比重总体呈现下降趋势,由 1978 年的 70.7%下

降到 2023 年的 55.3%,减少煤炭等高硫化石燃料的使用间接导致 SO₂ 排放的减少.另一方面,NO_x 和 PM_{2.5} 的生成机理和来源相比 SO₂ 更加复杂,碳市场的协同作用同样并不明显.在总体上,碳市场政策促进协同减排效应还不够明显,仍需进一步强化.

3 讨论

作为应对气候变化的政策工具,碳市场最重要的目标应是达成减排效果.碳市场定量减排效果受到多种复杂因素影响,包括地区的经济结构、产业结构、能源结构、政策设计及执行力度、企业参与程度、外部环境因素等.回答碳交易市场减排有效性和作用大小问题存在一定挑战.通过多重差分模型得到的碳交易减排效果的评价是综合的,可以较好的解决上述面临的难题,不仅包括对政策实施效果的定量分析,还包括对其他可能影响因素的控制与分析,以及对结果的稳健性检验.

本文在前人研究基础上建立的多重差分模型考虑因素全面且更为充分,不仅扩充了因变量和区域划分差异,拓宽的研究时段,还考虑了碳价、活跃程度、产业结构等因素中介效应,开展了完整的平行趋势和稳健性检验.本研究并未选择合成控制法(SCM)对试点地区虚构出对照组.这是由于合成控制法的效果很大程度上取决于对照组的选择,虚构对照组更适用于大量微观数据的匹配,而试点地区

样本量较小,无法提供可靠的估计.此外,在构建合成控制组时,还需要选择合适的权重,具有一定的主观性,容易受到研究者偏见的影响.如果对照组的选择不能准确反映出与处理组的相似情况,则会导致估计结果的偏误.

总体上,本研究结论与同类研究能够较好的印证,碳交易政策对于国内试点地区碳总量^[36, 37]和碳强度^[19,24]下降均有较好的积极效果.但是也必须指出,差分模型存在一定的局限性,其利用现有的政策实验设计来进行“有政策”和“无政策”的因果推断,具体对于具体区域双碳目标进程的贡献程度,还要具体结合规划模型、情景分析等综合判断,开展差异性的研究.下一步改进可能包括:首先,由于数据来源的限制,样本选择仍停留在省级区域层面,缺乏更细致的微观层面数据,尤其是企业层面的数据将是下一步深化的重点;其次,尽管碳排放和大气污染物数据分别来自具有较高科研引用度的CEADs 数据库和清华大学数据库,但未能联合使用其他研究方法,如问卷调查和实验调查,限制了研究的深度和广度.这些局限性可能对研究结果的普适性产生一定影响.

4 政策建议

4.1 加强政策持续评估和反馈改进

应建立碳排放权交易政策的动态评估机制,定期对政策效果进行评估.本研究结果显示,虽然国内碳交易政策对碳强度降低起到显著的作用,但是对于总量减排和协同减排的作用尚不理想.因此,需加强国家和地方碳市场制度协调性,借鉴试点省市的实践经验,建立完善的配套政策和措施.与此同时,建立面向控排重点单位和行业管理部门的反馈机制,及时收集和回应各方意见和建议,针对性调整和优化,确保政策的科学性和可行性.随着更多地区和行业纳入全国统一的碳市场,对不同试点的评估有助于总结经验教训,优化未来的政策实施.

4.2 不断扩大碳交易市场覆盖范围

本文的实证结果表明,碳交易市场能够有效促进碳减排,扩大行业覆盖范围不仅可以提高碳市场的效率和影响力,还可以提高市场的活跃度,增加市场的流动性,进而形成有效的价格信号,引导低碳技术创新和投融资.国家碳市场将逐步纳入石化、化

工、建材、钢铁、有色金属、造纸和国内民用航空等高耗能高排放行业.而试点碳市场逐步在向国家碳市场过渡的同时,同样需要积极探索纳入门槛的降低以及覆盖行业的更新,从而将温室气体控排责任压实到更多符合条件的行业和企业.

4.3 促进市场化减排机制进一步显现

碳市场作为一种全新的环境经济政策工具,其最大创新之处在于通过“市场化”的手段解决环境问题.通过发挥市场在资源配置中的决定性作用,完善的碳市场机制有利于产生技术激励效应和福利效应,在交易过程形成合理碳价并向企业传导,促使其淘汰落后产能或加大研发投入.尽管本文的中介效应结果显示,碳减排效应主要源于产业结构的优化,其他因素如碳市场价格提升、碳市场活跃度提升、低碳技术研发等仍未充分发挥作用.这意味着下一步全国和试点碳交易需要持续完善的碳价机制,催生更多绿色金融产品,带动绿色技术创新和产业投资,支持清洁能源、节能环保和碳减排技术的发展.尤其是在“碳达峰、碳中和”双碳目标的任务要求下,随着碳交易市场的日益成熟,我国碳配额总量及免费碳配额比例将逐年下降,配额收紧令碳价逐渐上涨将成为长期趋势,亟需配合减排目标制定完善的市场化减排机制,推动碳市场的健康发展.

5 结论

5.1 引入碳交易政策后,试点地区碳总量相比对照地区下降了13.2%,碳强度下降了21.3%,人均碳排放下降了17.2%,平行趋势检验显示碳交易政策仅对碳强度降低产生显著影响,对碳排放总量和人均碳排放量的影响并不显著,碳交易政策的实施有效降低了碳强度,且受其他因素影响较小.

5.2 通过中介变量检验碳排放权交易对降低碳排放的影响,假设包括碳交易价格提升、碳市场活跃度提升、产业结构改善、低碳技术研发扩大等,结果显示国内碳交易政策当前阶段主要依赖产业结构改善驱动减排,而碳交易价格提升,市场活跃度提升和低碳技术研发所带来的中介效应不明显.

5.3 政策之间并非相互独立,而是可能存在互补与协同.碳排放权交易在降低碳排放方面取得了积极的成效.然而,碳市场对于SO₂、NO_x和PM_{2.5}三种典型大气污染物的协同效应尚不够明显,政策仍需进

一步强化,分析结果揭示了从机理到结果的具体过程,对于理解碳排放交易政策具有重要意义,并为进一步深化市场机制减排提供了实证支持。

参考文献:

- [1] World Bank. State and Trends of Carbon Pricing 2023 [EB/OL]. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/39796>.
- [2] 国务院办公厅.2024.国务院办公厅关于印发《加快构建碳排放双控制度体系工作方案》的通知[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/content/202408/content_6966079.htm.
General Office of the State Council of the People's Republic of China. 2024. Notice on Issuing the 'Work Plan for Accelerating the Construction of a Dual Control System for Carbon Emissions' [EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/content/202408/content_6966079.htm.
- [3] 中国发展网.2021.北京市发改委:“十三五”期间单位地区生产总值二氧化碳排放量保持全国最好水平[EB/OL]. <http://www.chinadevelopment.com.cn/fgw/2021/01/1712585.shtml>.
China Development Network. 2021. Beijing Municipal Development and Reform Commission: During the "13th Five-Year Plan" period, the carbon dioxide emissions per unit of regional GDP remained at the best level in the country [EB/OL]. <http://www.chinadevelopment.com.cn/fgw/2021/01/1712585.shtml>.
- [4] 深圳市生态环境局 深圳市发展和改革委员会.关于印发《深圳市应对气候变化“十四五”规划》的通知[EB/OL]. https://meeb.sz.gov.cn/gkmlpt/content/10/10189/post_10189731.html#3752.
Shenzhen Municipal Bureau of Ecology and Environment, Shenzhen Municipal Development and Reform Commission. Notice on issuing the "Shenzhen climate change response plan for the 14th Five-Year Plan" [EB/OL]. https://meeb.sz.gov.cn/gkmlpt/content/10/10189/post_10189731.html#3752.
- [5] Olmstead S M, Stavins R. An international policy architecture for the Post-Kyoto Era [J]. *The American Economic Review*, 2006,96:35-38.
- [6] Meckling J, Sterner T, Wagner G. Policy sequencing toward decarbonization [J]. *Nature Energy*, 2017,2:918-22.
- [7] Marin G, Marino M, Pellegri C. The impact of the European emission trading scheme on multiple measures of economic performance [J]. *Environmental and Resource Economics*, 2018, 71(2):551-582.
- [8] Czerny A, Letmathe P. Eco-efficiency: GHG reduction related environmental and economic performance. The case of the companies participating in the EU emissions trading scheme [J]. *Business Strategy and the Environment*, 2017,26(6):791-806.
- [9] Abrell J, Ndoye Faye A, Zachmann G. Assessing the impact of the EU ETS using firm level data [R]. Working Papers of BETA 2011-15, 2011.
- [10] Martin R, Muûls M, Wagner U J. The impact of the EU ETS on regulated firms: What is the evidence after nine years? [J]. *Energy Policy & Economics eJournal*, 2014.10.2139/ssrn.2344376.
- [11] Zhang Y, Liang T, Jin Y, et al. The impact of carbon trading on economic output and carbon emissions reduction in China's industrial sectors [J]. *Applied Energy*, 2020,260:114290.
- [12] Yang L, Li Y, Liu H. Did carbon trade improve green production performance? Evidence from China [J]. *Energy Economics*, 2021,96:105185.
- [13] Zhang S, Jiang K, Wang L, et al. Do the performance and efficiency of China's carbon emission trading market change over time? [J]. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020,27(26):33140-33160.
- [14] Chen X, Lin B. Towards carbon neutrality by implementing carbon emissions trading scheme: Policy evaluation in China [J]. *Energy Policy*, 2021,157:112510.
- [15] Shi B, Li N, Gao Q, et al. Market incentives, carbon quota allocation and carbon emission reduction: Evidence from China's carbon trading pilot policy [J]. *Journal of environmental management*, 2022,319:115650.
- [16] Li D, Duan M, Deng Z, et al. Assessment of the performance of pilot carbon emissions trading systems in China [J]. *Environmental economics and policy studies*, 2021,23(3):593-612.
- [17] Liu X, Zhou X, Zhu B, et al. Measuring the maturity of carbon market in China: An entropy-based TOPSIS approach [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,229:94-103.
- [18] 王雪峰,廖泽芳.市场机制、政府干预与碳市场减排效应研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2022,36(8):9-17.
Wang X F, Liao Z F. Market mechanism, government intervention and emission reduction effect of carbon market in China [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022,36(8):9-17.
- [19] 曾诗鸿,李 璠,翁智雄,等.我国碳交易试点政策的减排效应及地区差异 [J]. *中国环境科学*, 2022,42(4):1922-1933.
Zeng S H, Li B, Weng Z X, et al. Study on the emission reduction effect of China's carbon trading pilot policy and regional differences [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(4):1922-1933.
- [20] Zhou B, Zhang C, Song H, et al. How does emission trading reduce China's carbon intensity? An exploration using a decomposition and difference-in-differences approach [J]. *Science of The Total Environment*, 2019,676:514-523.
- [21] 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.
Zhang C J, Li Z W, Zhou Y. Can carbon emissions trading pilot policy promote regional emissions reductions? [J]. *Soft Science*, 2021,35(10):93-99.
- [22] 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(5):14-29.
Fang L, Tang H Y. The effect of carbon emissions trading on corporate carbon emission reduction -Analysis of quasi-natural experimental methods based on data from Chinese listed companies [J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Philosophy and Social Sciences Edition)*, 2022,51(5):14-29.
- [23] 周 迪,刘奕淳.中国碳交易试点政策对城市碳排放绩效的影响及机制 [J]. *中国环境科学*, 2020,40(1):453-464.
Zhou D, Liu Y C. Impact of China's carbon emission trading policy on the performance of urban carbon emission and its mechanism [J]. *China Environmental Science*, 2020,40(1):453-464.
- [24] 黄向岚,张训常,刘 晔.我国碳交易政策实现环境红利了吗? [J]. *经济评论*, 2018,(6):86-99.

- Huang X L, Zhang X C, Liu Y. Does China's carbon emissions trading policy fulfill the environmental dividend? [J]. *Economic Review*, 2018,(6):86-99.
- [25] 范子英.如何科学评估经济政策的效应? [J]. *财经智库*, 2018,(3):42-64.
- Fang Z Y. How to scientifically evaluate the effects of economic policies? [J]. *Financial Minds*, 2018,(3):42-64.
- [26] 任亚运,傅京燕.碳交易的减排及绿色发展效应研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2019,29(5):11-20.
- Ren Y Y, Fu J Y. Research on the effect of carbon emissions trading on emission reduction and green development [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2019,29(5):11-20.
- [27] 薛飞,周民良.中国碳交易市场规模的减排效应研究 [J]. *华东经济管理*, 2021,35(6):11-21.
- Xue F, Zhou M L. Research on the emission reduction effect of the scale of China's carbon trading market [J]. *East China Economic Management*, 2021,35(6):11-21.
- [28] 孙金鹏,刘红玉,孙心,等.关于能耗双控转向碳排放双控制度的思考与建议 [J]. *中国工程咨询*, 2024,(3):80-85.
- Sun J P, Liu H Y, Sun X, et al. Thoughts and suggestions on shifting from dual control of energy consumption to dual control system of carbon emissions [J]. *China Engineering Consultants*, 2024,(3):80-85.
- [29] 谷宇辰,张达,张希良.关于完善能源消费“双控”制度的思考与建议—基于“十三五”能源消费变化的研究 [J]. *中国能源*, 2020,42(9):4-9.
- Gu Y C, Zhang D, Zhang X L. Thoughts and suggestions on improving the "dual control" system of energy consumption—based on the study of energy consumption changes in the "13th five-year plan" [J]. *Energy of China*, 2020,42(9):4-9.
- [30] 杜莉,丁志国,李博.产业结构调整升级:碳金融交易机制的助推—基于欧盟数据的实证研究 [J]. *清华大学学报(哲学社会科学版)*, 2012,27(5):143-150.
- Du L, Ding Z G, Li B. Industrial structure adjustment is upgrading: Boost from the mechanism off carbon finance—empirical research based on European data base [J]. *Journal of Tsinghua University (Philosophy and Social Sciences)*, 2012,27(5):143-150.
- [31] Nunn N, Qian N. The potato's contribution to population and urbanization: evidence from a historical experiment [J]. *Q. J. Econ.*, 2011,126(2):593-650.
- [32] Baron RM, Kenny D A. The moderator–mediator variable distinction in social psychological research: conceptual, strategic, and statistical considerations [J]. *J Pers Soc Psychol*, 1986,51(6):1173-1182.
- [33] Preacher K J, Hayes A F. SPSS and SAS procedures for estimating indirect effects in simple mediation models [J]. *Behav Res Methods Instrum Comput*, 2004,36(4):717-731.
- [34] 中华人民共和国中央人民政府.2022.关于印发《减污降碳协同增效实施方案》的通知 [EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-06/17/content_5696364.htm.
- Central People's Government of the People's Republic of China. 2022. Notification on the issuance of the "implementation plan for synergistic pollution reduction and carbon emission reduction and efficiency enhancement." [EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-06/17/content_5696364.htm.
- [35] 王书肖,吴清茹.中国大气污染物和二氧化碳排放趋势数据集(2005–2021年) [R]. 国家冰川冻土沙漠科学数据中心, 2023.
- Wang S X, Wu Q R. China atmospheric pollutant and carbon dioxide emission trends dataset (2005–2021) [R]. National Cryosphere Desert Data Centre, 2023.
- [36] Wu Q. Price and scale effects of China's carbon emission trading system pilots on emission reduction [J]. *Journal of environmental management*, 2022,314:115054.
- [37] 朱晶晶,王宇,宋然平.政策的温室气体减排影响评估:以北京市碳排放权交易试点为例 [R]. 世界资源研究所, 2014.
- Zhu J J, Wang Y, Song R P. Climate policy greenhouse gas impact assessment: a case study of Beijing emission trading scheme [R]. WRI, 2014.

作者简介: 陈操操(1980-),男,广东湛江人,研究员,博士,主要从事碳交易、碳核算研究.发表论文 60 余篇.ecoduron@163.com.