

DOI: 10.20271/j.cnki.1673-9833.2026.2009

# 碳排放权交易试点对区域工业低碳化转型的影响

尹方正<sup>1</sup>, 薛雅伟<sup>1,2,3</sup>

(1. 青岛理工大学 管理工程学院, 山东 青岛 266520; 2. 智慧城市建设管理研究中心(新型智库), 山东 青岛 266520;  
3. 青岛理工大学 滨海人居环境学术创新中心, 山东 青岛 266033)

**摘要:** 基于2005—2021年中国30个省(区、市)的面板数据, 系统测算了中国工业二氧化碳边际减排成本, 并以此为被解释变量, 运用多时点双重差分模型探讨了碳排放权交易政策对中国工业低碳转型的影响及机制。研究表明: 碳排放权交易试点政策对中国工业部门低碳转型具有显著促进作用; 碳强度、产业结构、地区研发水平、企业数量对工业二氧化碳边际减排成本呈负向影响; 开放程度、经济集聚、产业结构对于工业二氧化碳边际减排成本呈正向影响。

**关键词:** 工业经济; 碳排放权交易; 工业低碳化转型; 二氧化碳边际减排成本

**中图分类号:** F427; X321 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2026)02-0072-09

**引文格式:** 尹方正, 薛雅伟. 碳排放权交易试点对区域工业低碳化转型的影响[J]. 湖南工业大学学报, 2026, 40(2): 72-80.

## Research on the Effects of the Carbon Emission Trading Pilot on Regional Industrial Low-Carbon Transformation

YIN Fangzheng<sup>1</sup>, XUE Yawei<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Management Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao Shandong 266520, China;  
2. Research Center of Smart City Construction and Management, Qingdao Shandong 266520, China;  
3. ISMART, Qingdao University of Technology, Qingdao Shandong 266033, China)

**Abstract:** Based on panel data from 30 provinces and cities in China from 2005 to 2021, a systematical calculation has been made of the marginal cost of carbon dioxide reduction in China's industry, which is used as the dependent variable to explore the impact direction and influencing factors of carbon emission trading policies on China's industrial low-carbon transformation by adopting a multi-time point double difference model. The research results indicate that the pilot policies of carbon emission trading rights exert a significant positive impact on the low-carbon transformation of China's industrial sector. In addition, carbon intensity, industrial structure, regional R&D level, and the number of industrial enterprises have a negative impact on the marginal cost of industrial carbon dioxide reduction.

**Keywords:** industrial economy; carbon emission trading policy; industrial low-carbon transformation; carbon dioxide abatement marginal cost

收稿日期: 2024-10-18

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(72074238); 教育部青年基金资助项目(20YJC790158)

作者简介: 尹方正, 女, 青岛理工大学硕士生, 主要研究方向为绿色经济与可持续发展, E-mail: yinfz939@163.com

通信作者: 薛雅伟, 男, 青岛理工大学副教授, 硕士生导师, 博士, 主要研究方向为绿色经济与可持续发展,

E-mail: xyw8558@126.com

气候问题已成为全球关注的焦点议题。习近平总书记在第七十五届联合国大会上提出的“3060”双碳目标,为我国新发展方向指明了道路。自2015年起,工信部多次提出要深入推进“绿色制造推进工程”,旨在显著提升绿色制造业的绿色与低碳化水平,工业低碳化转型已成为不可逆转的趋势。据统计,2022年我国工业领域碳排放量高达53亿t,占全国碳排放总量的46%,数据显示工业碳排放量居高不下的状况,也表明其具有较大的减排潜力和责任。然而,承担减排重任需确保工业行业作为国民经济支柱的地位不动摇,因此,在推进碳减排过程中,需兼顾经济性。

在此背景下,国家发展改革委自2013年启动碳排放权交易试点。碳排放权交易政策作为市场化手段,被广泛认为是减缓气候变化的有效途径,为实现“3060”目标所做出的重要尝试,也是我国碳政策制定的“探路者”。那么,碳排放权交易实施对中国工业低碳转型产生了哪些影响?其影响又是通过哪些因素传导的呢?

针对上述问题,本文选取中国30个省(区、市)的工业二氧化碳边际减排成本作为衡量我国工业低碳转型的指标。在确定合理价格的基础上,本文基于方向性距离函数构建了碳排放权交易对工业二氧化碳边际减排成本的理论分析框架,分析了其影响机制,并设计了多时点双重差分模型进行实证检验。实证结果表明,碳排放权交易试点政策对工业部门低碳化转型具有显著促进作用,为控制工业二氧化碳边际减排成本提供依据。

本文的贡献主要体现在以下两方面:一是通过参数化方法,更全面、准确地计算工业二氧化碳边际减排成本,为工业碳市场的初始定价提供了有益补充;二是从工业二氧化碳边际减排成本的角度出发,分析了碳排放权交易政策的实施效果。

## 1 文献综述

### 1.1 测量指标选取

大部分学者以碳强度和碳排放量作为衡量低碳化转型的指标,但仅通过碳排放量和碳强度对工业低碳化转型的表征能力有限,本研究采用工业二氧化碳边际减排成本指代工业低碳转型。二氧化碳边际减排成本能够衡量每减少单位碳排放量所需的经济成本,可以直观地反映出各经济体的减排潜力和减排成本,可用于反映工业低碳转型的进程。已有研究表明,二氧化碳边际减排成本主要应用于以下方面:利用二氧化碳边际减排成本辅助政府排污定价<sup>[1]</sup>、制定区域碳减排额度<sup>[2]</sup>、预测行业碳达峰时间<sup>[3]</sup>等。因此,二氧

化碳边际减排成本是政府及有关部门制定政策和方案的有效决策依据。工业二氧化碳边际减排成本对尚未完善的碳市场具有参考价值,有助于政府部门制定环境政策、完善碳市场机制。因此,对其准确估计至关重要<sup>[4]</sup>。

### 1.2 二氧化碳边际减排成本估算

R. W. Shepherd最早提出了投入-产出距离函数,许多学者基于此进行了研究<sup>[5-7]</sup>。然而,传统Shepherd函数假定期望产出与非期望产出同比例同方向变化,导致其变动趋势不明确,无法适应环境技术的变化。为克服这一局限,R. Färe等<sup>[8]</sup>构建了效率模型并采用对偶函数计算边际减排成本,随后提出了方向性距离函数(DDF),成为当前研究的主流方法之一。

方向性距离函数包括参数化和非参数化两种方法。非参数化方法基于数据包络分析(DEA),通过产出函数构造生产前沿面,计算二氧化碳的影子价格<sup>[9-11]</sup>。G. A. Boyd等<sup>[12]</sup>最早采用DEA估计DDF,之后相关研究逐渐增多。然而,非参数化方法通过分段函数构造前沿面,存在不唯一性问题,参数化方法因此更受欢迎。参数化方法需要选择函数构造前沿面,主要使用超越对数函数<sup>[13]</sup>和二次型函数<sup>[14-15]</sup>。二次型函数与DDF匹配度较高,能够施加约束条件,降低模型随机性,因此本研究选择二次型函数求解工业二氧化碳边际减排成本。

目前针对二氧化碳边际减排成本的测算一般聚焦于行业 and 地区两大类。地区层面以省域<sup>[16]</sup>、城市<sup>[17]</sup>为主;行业包括全行业<sup>[18]</sup>以及工业<sup>[3,19]</sup>、建筑业<sup>[15]</sup>、农业<sup>[2,20]</sup>、燃煤电厂<sup>[21]</sup>等细分产业的测算。

综上所述,传统的Shepherd函数难以满足现代研究需求,非参数化方法虽有所改进,但仍存在局限性,因此参数化方法更具可靠性。政策制定应根据各地区的实际情况,结合行业与地区的视角,从省际层面研究2005—2021年工业二氧化碳边际减排成本,更具针对性。

### 1.3 碳排放权交易政策

Coase理论是碳排放权交易的基础。1960年,R. H. Coase<sup>[22]</sup>提出通过界定产权和市场自由交易实现帕累托最优。1968年,J. H. Dales<sup>[23]</sup>结合这一理论提出排污权交易制度,允许企业申请排污许可证合法排污并进行交易,政府利用市场手段控制总排污量。已有的成功实践案例促使排污权交易演变为碳排放权交易。欧美国家的成功经验促使中国于2013年启动实施碳排放权交易试点,随后学者们对其影响机理进行了广泛研究。Zhang C.等<sup>[24]</sup>利用随机前沿分析法、双重

差分法(DID)、非线性规划方法,通过省级面板数据进行实证分析,研究表明该政策能减轻19%~24%的碳排放强度;吴茵茵等<sup>[25]</sup>利用双重差分法从市场机制与行政干预协同作用的角度分析减排效果;宋涛等<sup>[26]</sup>通过双重差分模型从空间角度研究了该政策对碳排放效率的影响;王文举等<sup>[27]</sup>利用DID法分析了该政策对中国工业低碳转型的影响;余谦等<sup>[28]</sup>通过PSM-DID和SDID模型检验了政策对绿色发展的推动作用及产业结构升级和技术创新的中介效应。

大多数研究结果表明,中国碳市场具有减排效果,但也有不同意见。Wen Y.等<sup>[29]</sup>运用双重差分法研究发现碳交易政策对于工业二氧化碳排放、GDP、能源排放强度贡献不显著。柳亚琴等<sup>[30]</sup>采用双重差分、三重差分方法的研究结果表明,碳交易政策未在全国范围内普遍推动低碳转型,在中西部地区效果不明显。

综上,目前关于中国碳排放权交易政策的研究存在如下不足:第一,现有文献多集中于碳排放权交易政策对碳排放总量、强度和效率的影响,较少从工业二氧化碳边际减排成本的角度探讨其低碳转型及政策效果。第二,研究多从地区全行业或细分行业层面分析,较少关注地区工业碳交易政策的实施效果。由于不同省份的工业行业结构分布不均,且政策制定依赖于省份,因此有必要研究碳排放权交易政策对各省工业二氧化碳边际减排成本的影响。

## 2 工业二氧化碳边际减排成本测度

### 2.1 测度模型构建

研究工业二氧化碳边际减排成本应用范围最广的方法是基于生产理论的方向性距离函数,此类方法又分为参数化方法和非参数化方法。本文借鉴陈德湖等<sup>[14]</sup>使用参数化方法估算工业二氧化碳边际减排成本,将二氧化碳排放作为非期望产出引入传统投入-产出生产函数的方法,构建二次型方向性距离函数模型,通过线性规划求解模型参数并进行显著性检验。结合收益函数估算我国工业二氧化碳边际减排成本。

生产技术可行集 $P(x)$ 表示为

$$P(x)=\{(y, x):x \text{ can produce}(y, b)\}, \quad (1)$$

式中: $y$ 为期望产出; $b$ 为非期望产出; $x$ 为投入要素,包括劳动力、资本存量、能源投入。

各变量选取指标如下。

1) 投入变量。资本投入:选取各省(区、市)工业资本存量数据,采用永续盘存法,参照单豪杰<sup>[31]</sup>的做法计算得出。其中,固定资本形成总额用工业固定资产原值替代。劳动投入:选取各省(区、市)分行业城镇非私营单位就业人员总数计算。能源投入:

选取各省(区、市)工业能源消费总量数据。包括原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气和电力,并根据能源转换系数统一折算成万t标准煤。

2) 产出变量。期望产出:工业增加值。选取平减后的工业增加值作为期望产出。非期望产出:二氧化碳排放量。选取各省(区、市)工业二氧化碳排放量作为非期望产出,由各省(区、市)能源消费量乘以二氧化碳排放系数计算得到。

方向性距离函数具体公式如下:

$$D(y, b, x; g) = \sup\{\beta : (y, b) + \beta g \in P(x)\}, \quad (2)$$

式中: $g$ 为方向向量; $\beta$ 为方向性距离函数值; $P(x)$ 为产出集合,观测值必须满足 $(y, b) \in P(x)$ ,即 $D(y, b, x; g) \geq 0$ 。

在此基础上,结合收益函数构造拉格朗日函数,求导可得:

$$q = -p \times \frac{\partial D(y, b, x; g) / \partial y}{\partial D(y, b, x; g) / \partial b}. \quad (3)$$

式中: $p$ 为工业增加值,价格可标准化为1; $q$ 为工业二氧化碳影子价格,即工业二氧化碳边际减排成本。

假设方向向量 $g = (1, -1)$ ,即期望产出 $y$ 与非期望产出 $b$ 同方向变化,具体二次型函数表示为

$$D(y, b, x; (1, -1)) = \alpha_0 + \sum_{n=1}^3 \alpha_n x_n + \beta_1 y + \gamma_1 b + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^3 \sum_{m=1}^3 \alpha_{nm} x_n x_m + \frac{1}{2} \beta_2 y^2 + \frac{1}{2} \gamma_2 b^2 + \sum_{n=1}^3 \delta_n x_n y + \sum_{n=1}^3 \eta_n x_n b + \mu y b. \quad (4)$$

根据式(3)推导出二氧化碳边际减排成本的表达式为

$$q = - \frac{\gamma_1 + \gamma_2 b + \sum_{n=1}^3 \eta_n x_n + \mu y}{\beta_1 + \beta_2 b + \sum_{n=1}^3 \delta_n x_n + \mu b}. \quad (5)$$

对于二次型函数的求解,本文采用线性规划法求解。根据R. Färe等<sup>[8]</sup>对目标函数设定限制条件,使用GAMS软件求解式(4)中的参数,并代入式(5)求解二氧化碳边际减排成本。

### 2.2 测度结果及分析

本文根据线性规划法求解2005—2021年各省(区、市)的工业二氧化碳边际减排成本平均值,如表1所示。由表1可知,广东、山东、江苏、浙江、福建等省边际减排成本较高,这些省份大多位于东部沿海地区,经济较发达,控制单位碳排放量所付出的经济成本较高,河南、山西、河北等中部省边际减排成本较高,归因于其以工业为支柱产业的发展结构;而青海、海南、宁夏、甘肃、新疆等省边际减排

成本较低,这可能是由于此类省份的重工业所占比例较低,经济发展水平相对较低,基础设施和产业升级空间较大,通过发展绿色经济可降低边际成本,北京、

吉林、天津等省市边际减排成本较低,原因在于拥有大量人才储备、新兴技术、前沿设备资源,并进行了产业结构优化,能较好地控制减排成本。

表1 2005—2021年中国30省(区、市)工业二氧化碳边际减排成本平均值

Table 1 Average marginal abatement cost of industrial carbon dioxide in 30 provinces and municipalities in China from 2005 to 2021

地区	估计值/(元·t <sup>-1</sup> )	排名	地区	估计值/(元·t <sup>-1</sup> )	排名
广东	20 568.4	1	上海	4 585.7	16
山东	8 990.6	2	黑龙江	4 552.1	17
江苏	8 816.0	3	内蒙古	4 530.7	18
浙江	7 340.8	4	重庆	4 453.9	19
河南	7 302.7	5	云南	4 327.9	20
福建	6 581.8	6	广西	4 319.3	21
山西	5 852.9	7	贵州	4 282.1	22
河北	5 572.6	8	天津	4 220.3	23
辽宁	5 289.8	9	吉林	4 114.8	24
四川	5 271.9	10	北京	4 102.5	25
湖北	5 225.7	11	新疆	4 092.2	26
湖南	5 158.8	12	甘肃	4 018.8	27
安徽	5 088.6	13	宁夏	3 824.0	28
陕西	4 907.7	14	海南	3 652.1	29
江西	4 820.9	15	青海	3 561.9	30

### 3 研究设计

#### 3.1 研究假说

V. Costantini 等<sup>[32]</sup>基于波特假说发现环境规制政策会吸引资本、劳动力等生产要素集聚,从而提升地区的资源配置效率。而碳排放权交易政策作为环境规制的一种,可能通过碳配额对企业施压,进而提升经济发展水平,降低工业部门的碳排放,优化资源结构,减少地区二氧化碳排放。政策可能会通过碳交易价格影响碳排放量,相应的工业二氧化碳边际减排成本也可能受到政策影响产生变动。从全国工业二氧化碳边际减排成本看,年均值于2013年达峰值,正是碳排放权交易试点政策实施首年,此后全国工业二氧化碳边际减排成本呈下降趋势。据此,提出:

**假说1** 碳排放权交易试点政策的实施,对工业低碳转型具有影响。

减排成本会对减排效果产生显著影响,减排成本的变动会影响减排主体的积极性,碳减排成本影响着工业产品的生产成本,企业若要控制生产成本,或通过技术创新提升能源利用率,或改用清洁能源减少碳排放。技术创新是企业发展的持续动力,掌握先进技术的研发可以增强行业竞争力,特别是在低碳技术领域的发展,不仅能获得政策支持,降低碳排放量、节约减排成本,还能抢占先机开拓新市场,开辟新领域。产业结构的升级能够带动整个供应链使用更多清

洁能源、可再生能源,促进低碳产业的发展,有利于清洁能源部门的进步。因此,研发水平、产业结构和工业产业结构在一定程度上代表了企业的减排方向与减排目标。产业结构和工业企业数量在一定程度上可表示地区工业化程度,对判断地区工业低碳化转型方向具有重要意义。对外开放程度和经济集聚程度在一定程度上能表示地区经济发展潜力及发展现状,碳强度表示单位GDP产生的二氧化碳排放量,这些因素与经济密切相关,可能会对二氧化碳边际减排成本产生影响。据此,提出:

**假说2** 碳排放权交易试点政策可以通过调控产业结构、地区研发水平、工业企业数量、对外开放程度、经济集聚程度、碳强度、工业产业结构影响工业低碳转型。

#### 3.2 模型构建

由于政策分批推进,各试点地区政策施行时间也不尽相同,同时考虑到DID模型能较好地将政策实施前后、是否与试点地区交互,有效判断政策实施效果,因此,本文采用DID法研究碳排放权交易政策的实施效果,其公式为

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 DID_{it} + \beta_2 control_{it} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

式中: $Y_{it}$ 为被解释变量,表示工业二氧化碳边际减排成本; $i$ 为省份; $t$ 为年份; $DID_{it}$ 为核心解释变量, $DID_{it} = treat_i \times post_{it}$ ,  $treat_i$ 表示是否为处理组,  $post_{it}$

表示政策是否实施； $control_{it}$ 为影响工业二氧化碳边际减排成本的控制变量，且随时间和个体变动； $\mu_i$ 为地区固定效应，控制影响工业二氧化碳边际减排成本，但不随时间变动的个体因素； $\gamma_t$ 为时间固定效应，控制影响工业二氧化碳边际减排成本，但不随个体变动的的时间因素； $\varepsilon_{it}$ 为误差项； $\beta_0$ 为截距项； $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 为相关系数。

当  $treat=1$  时，表示地区为北京、天津、上海、重庆、广东、湖北或福建， $treat=0$  时为其余地区。当  $post=1$  时，代表碳排放权交易政策开始在试点地区实施， $post=0$  时，非试点地区以及政策开始实施前的地区。

### 3.3 数据来源与处理

本文选取中国 30 个省（区、市）（鉴于数据的可获得性，未涉及西藏和港澳台地区）2005—2021 年间，共 17 a 的数据进行分析，相关变量分为被解释变量、核心解释变量和控制变量，其中被解释变量由投入变量和产出变量计算得到。

1) 被解释变量与核心解释变量。将工业二氧化碳边际减排成本作为本文的被解释变量，对上文计算出的工业二氧化碳边际减排成本取对数（ $\ln mac$ ），

核心解释变量为多时点双重差分（DID），为处理组与对照组的乘积。

2) 控制变量。由于碳交易政策和工业二氧化碳边际减排成本均与经济相关，因此本文根据已有文献总结出以下变量作为控制变量：产业结构（INS），利用平减后的工业增加值占地区生产总值比例表示；地区研发水平（TMT），利用技术市场成交额占地区生产总值比例表示；工业企业数量（ $\ln qys$ ），取按地区分组规模以上工业企业数量的对数；对外开放程度（FDI），利用货物进出口金额占地区生产总值比例表示；经济集聚程度（ $\ln pop$ ），利用各省份年末人口总数与省份面积之比计算出人口密度，并取对数；碳强度（ $\ln CII$ ），用碳排放总量与地区生产总值的比值的对数；工业产业结构（ $H\_energy$ ），利用六大高耗能产业占全工业行业比例表示。

3) 数据说明。本文利用全国 30 个省（区、市）2005—2021 年的面板数据分析碳交易政策对工业二氧化碳边际减排成本的影响。对于个别年份的缺失数据采用线性插值法补全。其中数据来源于《中国工业统计年鉴》《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国劳动统计年鉴》《中国经济普查年鉴》。

表 2 变量名称及说明

Table 2 Variable names and descriptions

变量类别	符号	度量指标	单位	预期符号
被解释变量	$\ln mac$	工业二氧化碳边际减排成本的对数	元/t	+
核心解释变量	$DID$	多时点双重差分	-	-
	$INS$	平减后的工业增加值占地区生产总值之比	-	+
	$TMT$	技术市场成交额占地区生产总值之比	-	+
	$\ln qys$	按地区分组规模以上工业企业数量的对数	个	-
控制变量	$FDI$	货物进出口金额占地区生产总值之比	-	+
	$\ln pop$	各省份年末人口总数与省份面积之比的对数	-	+
	$\ln CII$	碳排放总量与地区生产总值之比的对数	-	+
	$H\_energy$	六大高耗能产业占全工业行业之比	-	+

## 4 实证结果与稳健性检验

### 4.1 基准回归分析

本文提出碳排放权交易政策对工业低碳化转型的影响主要体现在工业二氧化碳边际减排成本方面，因此，采用多时点双重差分模型检验政策实施的效果。基准回归结果见表 3，回归中控制年份和地区的固定效应。第（1）列未添加控制变量，而第（2）~（8）列逐步加入了控制变量，标准误差聚类到省份层面。从表 3 可以看出，未添加控制变量时，DID 估计系数在 1% 的显著性水平上为正。随着控制变量的逐步添加，系数值先增后减，但仍然在 1% 的显著性水平上为正，表明碳排放权交易政策对工业二氧化碳的边际减排成

本产生了正向直接影响，证实假说 1 成立。

在加入控制变量经济集聚程度后，碳强度变为不显著，再加入工业产业结构后，碳强度变为在 5% 的水平上显著，针对这种变化考虑是否有高度共线性，结果显示通过了多重共线性检验，具有可靠性。碳强度、产业结构、地区研发水平、工业企业数量对于工业二氧化碳边际减排成本具有负向影响，加入被解释变量后系数值增大，可能这些变量与政策措施共同影响减排成本，而控制后揭示了更强的政策影响，在控制这些变量后，政策的真实影响被凸显出来，说明政策本身对减排成本的影响比之前估计的更大；对外开放程度、经济集聚程度、工业产

业结构对于工业二氧化碳边际减排成本具有正向影响, 加入被解释变量后系数值减小, 可能是这些变量促进先进减排技术的引进和应用, 提高减排效率, 从而对整体减排成本起正向作用。最终系数较未添加控制变量时略有减小, 但仍显著为正, 说明控制

变量的添加进一步保证了结果的严谨性。对外开放程度、经济集聚程度、工业产业结构对于工业二氧化碳边际减排成本具有正向影响, 碳强度、产业结构、地区研发水平、工业企业数量不具有正向影响, 假说 2 部分得证。

表 3 基准回归分析结果  
Table 3 Baseline regression analysis

变量	工业二氧化碳边际减排成本的对数值 (ln mac)							
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
<i>DID</i>	0.147*** (0.025 9)	0.169*** (0.026 8)	0.170*** (0.026 4)	0.197*** (0.026 6)	0.212*** (0.026 6)	0.143*** (0.0275)	0.118*** (0.028 4)	0.110*** (0.028 7)
ln <i>CII</i>		0.133*** (0.047 6)	0.134*** (0.046 9)	0.097 9** (0.046 7)	0.090 6* (0.046 1)	0.092 8** (0.044 1)	0.068 4 (0.044 4)	0.129** (0.055 1)
<i>INS</i>			0.759*** (0.198)	0.764*** (0.194)	0.563*** (0.199)	0.608*** (0.191)	0.607*** (0.189)	0.613*** (0.189)
<i>TMT</i>				-3.096*** (0.693)	-2.603*** (0.698)	-3.465*** (0.681)	-3.444*** (0.675)	-3.501*** (0.673)
ln <i>qys</i>					0.098 8*** (0.027 7)	0.156*** (0.027 9)	0.153*** (0.027 7)	0.126*** (0.031 3)
<i>FDI</i>						-0.361*** (0.054 6)	-0.287*** (0.059 1)	-0.294*** (0.059 1)
ln <i>pop</i>							0.436*** (0.141)	0.472*** (0.142)
<i>H_energy</i>								-0.301* (0.164)
控制变量	否	是	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
地区固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
样本数	510	510	510	510	510	510	510	510
<i>R</i> <sup>2</sup>	0.890	0.891	0.895	0.899	0.902	0.910	0.912	0.913

注: 括号内数值为省份聚类标准误, \*\*\*, \*\*, \* 分别表示  $p < 0.01$ ,  $p < 0.05$ ,  $p < 0.1$ , 下同。

### 4.2 平行趋势检验

本文借鉴吴茵茵等<sup>[25]</sup>的研究, 构建政策开始前 4 a 至政策开始后 4 a, 共 9 a 跨度的年份虚拟变量与政策虚拟变量的交互项, 其中,  $D_{pre_t}$ 、 $D_{post_t}$ 、 $D_c$  分别表示政策开始前  $t$  年、政策开始后  $t$  年、启动当年,  $\beta_{pre_t}$ 、 $\beta_{post_t}$ 、 $\beta_c$  分别为其系数, 具体模型如下:

$$Y_{it} = \beta_0 + \sum_{t=1}^4 \beta_{pre_t} D_{pre_t} + \sum_{t=1}^4 \beta_{post_t} D_{post_t} + \beta_c D_c + \beta_2 control_{it} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (7)$$

本文将 2013 年设定为政策起始年份, 图 1 中交互项的系数反映了政策实施前后减排成本之间的差异。除福建外的试点地区均于 2013、2014 年施行政策, 政策实施前 4 a 均未通过显著性检验, 表明处理组与控制组之间没有显著差异; 政策实施当年, 系数显著为正, 一直延续到政策实施后 4 a, 系数均在 5%

的显著水平上明显大于 0, 表明处理组与控制组开始有实质区别, 政策对处理产生影响, 发生了工业低碳转型, 满足平行趋势检验, 可以通过 DID 检验政策实施效果。

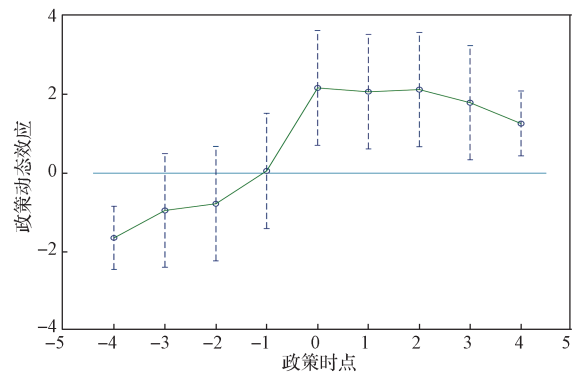


图 1 平行趋势检验结果  
Fig. 1 Parallel trend test results

#### 4.3 安慰剂检验

为了增强模型结果的可信度, 还需进行安慰剂检验, 其结果如图2所示。本文参考吴茵茵等<sup>[25]</sup>的研究, 从所有省份中进行不重复随机抽样, 每次抽取7个省份生成对应随机政策时点作为虚拟处理组, 其余省份作为虚拟控制组, 抽样过程重复500次。如果碳交易政策对试点地区的工业二氧化碳边际减排成本有正向影响, 那么表3(8)列DID系数0.110将位于正态分布尾端, 由图2结果可知, 基准回归结果通过安慰剂检验。

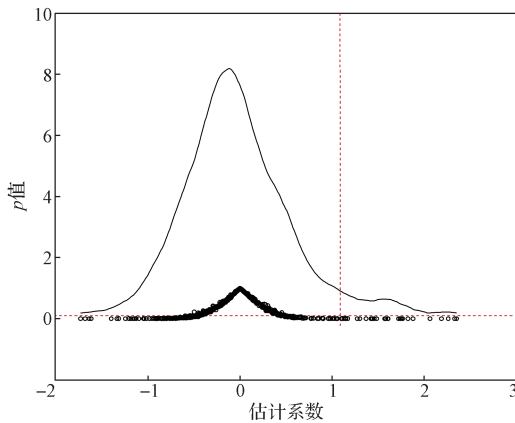


图2 个体安慰剂检验结果

Fig. 2 Individual placebo test results

#### 4.4 稳健性检验

1) 排除同时期政策影响。本文考虑到同时期相关政策也有可能对工业二氧化碳边际减排成本产生影响, 因此, 本文选取了2010年实行的低碳省(区、市)和低碳城市试点政策、2012年实行的重点区域大气污染防治“十二五”规划, 重新利用模型(6)进行估计, 结果如表4列(1)所示。结果表明, 低碳省区和低碳城市试点政策与重点区域大气污染防治“十二五”规划对工业二氧化碳边际减排成本的影响均不显著, 进一步证明了本文结果的可靠性。

2) 排除空间溢出效应。本文考虑到政策可能会由试点地区向周围非试点地区扩散, 于是剔除试点地区周围的省份: 河北、江苏、浙江、江西、湖南、广西、四川。如表4列(2)所示, 系数虽有所降低但仍显著为正, 这表明碳交易政策对于工业二氧化碳边际减排成本的推动作用显著。

3) 排除预期效应。政策颁布施行前, 2011年国家发展改革委出台了《关于开展碳排放权交易试点工作的通知》(以下简称《通知》), 选定的试点地区可能由于《通知》产生预期效应, 而工业二氧化碳边际减排成本可能由于企业调控二氧化碳排放水平而产生波动。因此, 本文剔除试点地区政策实行前2年的数据, 重新利用模型(6)进行估计, 结果如表

4列(3)所示, 可知系数仍显著为正, 再次证明了结果的可靠性。

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

变量	排除政策干扰 (1)	排除空间溢出效应 (2)	排除预期效应 (3)
<i>DID</i>	0.112*** (0.029 3)	0.103*** (0.034 3)	0.124*** (0.032 0)
控制变量	是	是	是
年份固定效应	是	是	是
地区固定效应	是	是	是
区域与年份交互效应	是	是	是
样本数	510	391	450
$R^2$	0.485	0.909	0.915

## 5 结论与建议

本文从碳排放权交易试点政策入手, 利用2005—2021年30个省(区、市)的面板数据构建多时点DID模型, 创新性选取工业二氧化碳边际减排成本作为工业低碳转型的特征指标, 系统评估了中国的碳排放权交易试点政策对于中国工业部门低碳转型的影响。研究表明: 第一, 碳排放权交易试点政策对我国工业部门低碳化转型具有显著正向影响, 经多重检验后结果依然可靠, 表明此政策在推动工业结构调整和促进绿色发展的过程中发挥了重要的引导和激励作用。第二, 研究揭示了影响工业二氧化碳边际减排成本的多重因素。碳强度、产业结构、地区研发水平、工业企业数量对于工业二氧化碳边际减排成本具有负向影响, 对外开放程度、经济集聚程度、工业产业结构对于工业二氧化碳边际减排成本具有正向影响。

在“3060”目标的驱动下, 《碳排放权交易管理办法(试行)》于2021年2月1日正式施行, 《碳排放权交易管理暂行条例》于2024年5月1日起施行, 我国碳市场已全面铺开。本文对于碳市场的进一步发展具有重要意义, 为更好地实现工业低碳转型, 本文给出以下几点建议:

一是政府持续推进碳排放权交易政策, 加快碳市场建设。随着试点政策的实施, 工业二氧化碳边际减排成本得到了较好控制, 呈现平稳下降态势, 碳市场正初步显现成效。在碳市场全面铺开过程中, 政府要做好金融市场秩序维护工作, 合理设定碳配额, 确立碳交易市场的主导地位, 增强市场激励作用和监督作用, 在合理范围内干预、调控市场, 促进企业自

发减碳降碳, 从被动减排、临期交易变为主动降碳、自发交易。

二是政府、企业双管齐下, 加强技术创新, 助推创新型国家战略实施。政府从政策角度鼓励技术创新、绿色创新, 充分发挥其引导作用, 在财政和税收上给予一定优惠, 对采取低碳技术和清洁能源的企业提供补贴政策。企业加大对低碳技术和可再生能源技术的研发投入, 加强与科研机构合作, 拓宽人才储备; 实施循环经济模式, 利用科技手段提升资源利用率, 促进资源的重复利用和废物的再利用; 改善高耗能工业企业能源消费结构, 改进技术、改良机械设备, 加大清洁能源使用比例。

三是各地区按照自身条件, 实行差异化政策。因地制宜, 确立最适合当地的低碳政策, 按照能源结构、产业结构及经济发达程度等多种因素综合确定合理碳配额, 不同省份设定适宜碳达峰、碳中和目标, 保证政策落地, 优质完成“3060”目标。同时各省份不宜“单打独斗”, 需多省分工、共同协作, 更加高效地实现减排目标, 坚定不移地走高质量发展之路。

#### 参考文献:

- [1] 陈诗一. 边际减排成本与中国环境税改革[J]. 中国社会科学, 2011(3): 85-100, 222.  
CHEN Shiyi. Marginal Abatement Cost and Environmental Tax Reform in China[J]. Social Sciences in China, 2011(3): 85-100, 222.
- [2] 田云, 陈池波. 市场与政府结合视角下的中国农业碳减排补偿机制研究[J]. 农业经济问题, 2021, 42(5): 120-136.  
TIAN Yun, CHEN Chibo. Research on the Compensation Mechanism of Agricultural Carbon Emission Reduction in China from the Perspective of Combination of Market and Government[J]. Issues in Agricultural Economy, 2021, 42(5): 120-136.
- [3] 魏丽莉, 侯宇琦. 中国工业二氧化碳边际减排成本测算与行业碳达峰预测[J]. 经济理论与经济管理, 2023, 43(2): 63-77.  
WEI Lili, HOU Yuqi. The Estimate of China's Industrial Marginal Carbon Abatement Cost and Industry Carbon Peak Prediction[J]. Economic Theory and Business Management, 2023, 43(2): 63-77.
- [4] 陈诗一. 工业二氧化碳的影子价格: 参数化和非参数化方法[J]. 世界经济, 2010, 33(8): 93-111.  
CHEN Shiyi. Shadow Price of Industrial Carbon Dioxide: Parametric and Nonparametric Methods[J]. The Journal of World Economy, 2010, 33(8): 93-111.
- [5] SHEPHARD R W. Theory of Cost and Production Functions[M]. Princeton: Princeton University Press, 1970: 15-20.
- [6] COGGINS J S, SWINTON J R. The Price of Pollution: A Dual Approach to Valuing SO<sub>2</sub> Allowances[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 1996, 30(1): 58-72.
- [7] CHAMBERS R G, CHUNG Y, FÄRE R. Profit, Directional Distance Functions, and Nerlovian Efficiency[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 1998, 98(2): 351-364.
- [8] FÄRE R, GROSSKOPF S, WEBER W L. Shadow Prices and Pollution Costs in US Agriculture[J]. Ecological Economics, 2006, 56(1): 89-103.
- [9] WANG S F, CHU C, CHEN G Z, et al. Efficiency and Reduction Cost of Carbon Emissions in China: A Non-Radial Directional Distance Function Method[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 113: 624-634.
- [10] 蒋伟杰, 张少华. 中国工业二氧化碳影子价格的稳健估计与减排政策[J]. 管理世界, 2018, 34(7): 32-49, 183-184.  
JIANG Weijie, ZHANG Shaohua. Robust Estimation and Application of Shadow Price of CO<sub>2</sub>: Evidence from China[J]. Management World, 2018, 34(7): 32-49, 183-184.
- [11] WU L P, CHEN Y, FEYLIZADEH M R. Study on the Estimation, Decomposition and Application of China's Provincial Carbon Marginal Abatement Costs[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 207: 1007-1022.
- [12] BOYD G A, TOLLEY G, PANG J. Plant Level Productivity, Efficiency, and Environmental Performance of the Container Glass Industry[J]. Environmental and Resource Economics, 2002, 23(1): 29-43.
- [13] LEE M, ZHANG N. Technical Efficiency, Shadow Price of Carbon Dioxide Emissions, and Substitutability for Energy in the Chinese Manufacturing Industries[J]. Energy Economics, 2012, 34(5): 1492-1497.
- [14] 陈德湖, 潘英超, 武春友. 中国二氧化碳的边际减排成本与区域差异研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(10): 86-93.  
CHEN Dehu, PAN Yingchao, WU Chunyou. Marginal Abatement Costs of CO<sub>2</sub> Emission in China and Its Regional Differences[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(10): 86-93.
- [15] 曹君丽, 夏澳星, 徐勇戈. 建筑业边际减排成本的时空特征及异质性分析[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(9): 142-152.  
CAO Junli, XIA Aoxing, XU Yongge. Spatial-Temporal Characteristics and Heterogeneity Analysis of Marginal Abatement Costs of Construction Industry[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 45(9): 142-152.

- [16] DU L M, HANLEY A, WEI C. Estimating the Marginal Abatement Cost Curve of CO<sub>2</sub> Emissions in China: Provincial Panel Data Analysis[J]. *Energy Economics*, 2015, 48: 217-229.
- [17] 魏 楚. 中国城市 CO<sub>2</sub> 边际减排成本及其影响因素 [J]. *世界经济*, 2014, 37(7): 115-141.  
WEI Chu. Marginal Cost of CO<sub>2</sub> Emission Reduction in China and Its Influencing Factors[J]. *The Journal of World Economy*, 2014, 37(7): 115-141.
- [18] 茹 雪, 雷鹏飞, 刘 培. 二氧化碳动态边际减排成本及其影响机制 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(11): 43-57.  
RU Xue, LEI Pengfei, LIU Pei. Dynamic Marginal Abatement Cost of CO<sub>2</sub> Emissions and Its Influence Mechanism[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(11): 43-57.
- [19] 陈 鸣, 王 科. 二氧化碳边际减排成本变化的驱动因素分解与脱钩分析: 来自中国工业行业的实证研究 [J]. *工程管理科技前沿*, 2024, 43(3): 46-54.  
CHEN Ming, WANG Ke. Decomposition and Decoupling of Driving Factors on Marginal Abatement Cost Change of Carbon Emissions: An Empirical Study Based on China's Industrial Sector[J]. *Frontiers of Science and Technology of Engineering Management*, 2024, 43(3): 46-54.
- [20] ZHANG N, ZHANG G L, LI Y. Does Major Agriculture Production Zone Have Higher Carbon Efficiency and Abatement Cost Under Climate Change Mitigation?[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 105: 376-385.
- [21] LEE C Y, WANG K. Nash Marginal Abatement Cost Estimation of Air Pollutant Emissions Using the Stochastic Semi-Nonparametric Frontier[J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 273(1): 390-400.
- [22] COASE R H. The Problem of Social Cost[J]. *The Journal of Law and Economics*, 1960, 3: 1-44.
- [23] DALES J H. *Pollution, Property & Prices: An Essay in Policy-Making and Economics*[M]. Toronto: University of Toronto Press, 1968: VII.
- [24] ZHANG C, WANG Q W, SHI D, et al. Scenario-Based Potential Effects of Carbon Trading in China: An Integrated Approach[J]. *Applied Energy*, 2016, 182: 177-190.
- [25] 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(8): 114-132.  
WU Yinyin, QI Jie, XIAN Qin, et al. The Carbon Emission Reduction Effect of China's Carbon Market: From the Perspective of the Coordination Between Market Mechanism and Administrative Intervention[J]. *China Industrial Economics*, 2021(8): 114-132.
- [26] 宋 涛, 杨伟迪, 刘晓玲. 碳排放权交易对碳排放效率的影响及其空间溢出效应: 基于我国 30 个省份 2006—2019 年面板数据的实证研究 [J]. *财务研究*, 2023(4): 95-104.  
SONG Tao, YANG Weidi, LIU Xiaoling. The Impact of Carbon Emissions Trading on Carbon Emission Efficiency and Its Spatial Spillover Effect: Based on Panel Data of 30 Provinces in China from 2006 to 2019[J]. *Finance Research*, 2023(4): 95-104.
- [27] 王文举, 钱新新. 试点碳排放权交易市场对中国工业低碳转型的作用机制研究 [J]. *经济与管理研究*, 2024, 45(1): 16-34.  
WANG Wenju, QIAN Xinxin. Mechanism of Pilot Carbon Emission Trading Markets on Low-Carbon Transformation in China's Industry[J]. *Research on Economics and Management*, 2024, 45(1): 16-34.
- [28] 余 谦, 吴 婷, 覃一冬, 等. 碳排放权交易对试点地区绿色发展的影响及溢出效应: 基于 PSM-DID 和 SDID 模型的实证分析 [J]. *工业技术经济*, 2024, 43(3): 104-114.  
YU Qian, WU Ting, QIN Yidong, et al. The Impact of Carbon Emissions Trading Pilots on Green Development: Empirical Analysis Based on PSM-DID and SDID Models[J]. *Journal of Industrial Technology and Economy*, 2024, 43(3): 104-114.
- [29] WEN Y, HU P Q, LI J F, et al. Does China's Carbon Emissions Trading Scheme Really Work? A Case Study of the Hubei Pilot[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277: 124151.
- [30] 柳亚琴, 孙 薇, 朱治双. 碳市场对能源结构低碳转型的影响及作用路径 [J]. *中国环境科学*, 2022, 42(9): 4369-4379.  
LIU Yaqin, SUN Wei, ZHU Zhishuang. The Impact of Carbon Market on the Low-Carbon Transition of Energy Mix and Its Action Path[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(9): 4369-4379.
- [31] 单豪杰. 中国资本存量 K 的再估算: 1952—2006 年 [J]. *数量经济技术经济研究*, 2008, 25(10): 17-31.  
SHAN Haojie. Reestimating the Capital Stock of China: 1952—2006[J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2008, 25(10): 17-31.
- [32] COSTANTINI V, MAZZANTI M. On the Green and Innovative Side of Trade Competitiveness? The Impact of Environmental Policies and Innovation on EU Exports[J]. *Research Policy*, 2012, 41(1): 132-153.

(责任编辑: 姜利民)