

# 排污权交易如何提升企业能源效率: 微观机理与模式差异\*



宋德勇<sup>1,2</sup> 陈 梁<sup>1</sup> 陈 姚<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学经济学院,湖北 武汉 430074;

2. 华中科技大学张培刚发展研究院,湖北 武汉 430074)

**内容提要:**提升能源利用效率是推动绿色低碳转型,实现碳达峰碳中和目标的关键路径。本文基于中国工业企业与企业污染排放的匹配数据,运用双重差分法研究二氧化硫排污权交易制度对企业能源效率的影响及作用机制,并探讨不同市场发展模式选择的影响差异。研究结果表明,排污权交易制度能够显著提升企业能源效率。机制检验发现,排污权交易主要通过优化能源消费结构和阻碍污染企业进入有效促进企业能源效率提升,但没有观察到排污权交易产生偏向型技术进步与中性技术进步激励。基于不同的排污权交易市场发展模式发现,与“一级市场先行”模式相比,“二级市场先行”模式下排污权交易的能源效率提升效应更强;除了能源结构优化,“二级市场先行”模式下的能源效率提升效应还来自排污权交易产生的偏向型技术进步激励和污染企业进入壁垒。本文有助于揭示利用市场机制提升能源效率的微观机理,为通过排污权交易机制设计与模式创新,推动能源高效利用与双碳目标实现提供政策启示。

**关键词:** 排污权交易 企业能源效率 企业进入 技术进步 市场发展模式

**中图分类号:**F272 **文献标志码:**A **文章编号:**1002—5766(2023)10—0168—20

## 一、引言

党的二十大报告强调,“加快发展方式绿色转型”,“深入推进能源革命,加强煤炭清洁高效利用”。作为一种环境权益交易制度,排污权交易既对企业污染减排形成激励约束,也会通过能源投入决策与行为影响企业能源效率。2007年开始实施的二氧化硫排污权交易制度,其市场发展模式主要包括“一级市场先行”与“二级市场先行”。在不同市场发展模式下,企业内部投入和外部环境存在较大的差异,使得企业能源效率变化呈现不同的特征。立足“富煤贫油少气”的基本国情,提高能源效率成为新发展阶段实现绿色低碳转型与碳达峰碳中和战略目标的必然选择。那么,二氧化硫排污权交易制度能否提升企业能源效率?其背后来源于企业内部能源结构优化与技术进步激励,还是外部进入压力?在不同市场发展模式下,排污权交易制度对企业能源效率的影响效应及其传导机制有何差异?回答上述问题,不仅为通过排污权交易制度设计与模式创新提升能源效率提

收稿日期:2022-12-08

\* 基金项目:国家社会科学基金重大项目“环境保护与经济高质量发展融合的机制、路径和政策体系研究”(18ZDA050);中央高校基本科研业务费资助项目“‘双碳’目标下减污降碳协同效应的路径与对策研究”(HUST:2022JYCXJJ064)。

作者简介:宋德勇,男,教授,博士生导师,经济学博士,研究领域为人口资源与环境、碳中和与区域经济学,电子邮箱:sdy5198@126.com;陈梁,男,博士研究生,研究领域为环境经济与数字经济,电子邮箱:liangchen2021@163.com;陈姚,女,博士研究生,研究领域为环境经济与区域经济,电子邮箱:644818838@qq.com。通讯作者:陈梁。

供理论依据与经验证据,对于探索具有中国式现代化的绿色发展道路和双碳目标实现路径也具有重要的现实意义。

部分文献从理论层面探讨了排污权交易市场的机制设计。排污权交易的一级市场是为了确保排污配额指标的公平分配,二级市场旨在提高排污权的配置效率(王金南等,2014)<sup>[1]</sup>。与分散交易制度相比,双向拍卖制度下的排污权交易市场效率更高(卜国琴,2010)<sup>[2]</sup>。与此同时,排污权交易价格会影响企业生产决策。与一级市场价格相比,排污权二级市场价格提高会增加企业生产与治污成本(金帅等,2021)<sup>[3]</sup>。这类文献大多直接阐述排污权交易市场的要素特征与机制设计,忽视了市场发展模式的差异化效果,鲜有研究考虑排污权交易市场发展模式的异质性影响。此外,不少学者考察了排污权交易制度的政策效果。从成本收益来看,二氧化硫交易许可证制度的经济效益超过了二氧化碳交易(Färe等,2014)<sup>[4]</sup>。二氧化硫排污权交易在2002年的初步试点可以优化排污权配置效率,但并未诱发波特效应(涂正革和谌仁俊,2015)<sup>[5]</sup>。随着试点的逐渐推进,排污权交易制度产生绿色创新激励,有效提升企业全要素生产率(齐绍洲等,2018<sup>[6]</sup>;任胜钢等,2019<sup>[7]</sup>)。

以往研究大多聚焦于传统的环境规制工具对能源效率的影响,包括“正向效应”(Hancevic,2016<sup>[8]</sup>;林伯强等,2021<sup>[9]</sup>)、“负向效应”(尤济红和高志刚,2013)<sup>[10]</sup>和“非线性关系”(陶长琪等,2018)<sup>[11]</sup>三种主流观点。部分文献采用综合指数法构建的环境规制指标普遍存在内生性问题,使得因果关系的识别受到一定影响。而且,这类文献大多探讨环境规制对地区与工业能源效率的影响,鲜有研究涉及微观企业层面。在节能目标约束下,大规模企业会利用企业集团内部网络转移生产活动,而非提高能源效率(Chen等,2021)<sup>[12]</sup>。对于排污权交易能否提升能源效率,相关研究并未得出一致结论。既有文献大多利用城市或省域层面的宏观数据(史丹和李少林,2020<sup>[13]</sup>;林寿富和董小卿,2021<sup>[14]</sup>),忽略了企业间能源效率的异质性(陈钊和陈乔伊,2019)<sup>[15]</sup>。尽管有研究利用微观数据测算了工业企业能源效率,但尚未考虑排污权交易的作用。总体而言,在微观企业层面探讨排污权交易与能源效率之间的关系的研究尚不多,同时内部和外部因素对企业能源效率的影响机制也尚未厘清。

基于此,本文以中国企业污染排放数据库与中国工业企业数据库匹配后的数据为研究样本,建立双重差分模型考察二氧化硫排污权交易制度对企业能源效率的影响及作用机制。与既有研究相比,本文的边际贡献主要体现在:第一,本文采用中国企业污染排放数据库与中国工业企业数据库匹配后的数据样本,评估排污权交易制度对企业能源效率的影响,不仅弥补了大多既有研究使用宏观数据的不足,也丰富了排污权交易理论和能源效率的研究。第二,从能源结构和技术进步视角,以及企业进入层面,进一步揭示了排污权交易制度影响企业能源效率的微观机理,为利用市场机制提升能源效率提供了新的微观证据。第三,本文基于“一级市场先行”和“二级市场先行”发展模式选择的比较,首次探讨在不同的排污权交易市场发展模式下,排污权交易制度对企业能源效率的异质性影响效应与传导机制,有助于深入理解排污权交易制度在不同市场发展模式选择下的差异化效果,同时为排污权交易市场发展模式的完善与优化提供有益参考。

## 二、政策演进与模式选择

### 1. 排污权交易政策演进

从排污权交易制度的实施背景来看,原环境保护部最早开始推行“4+3+1”的二氧化硫排污权交易试点政策,将部分城市的电力行业纳入排污权交易的试点范围,试点地区并未建立排污权交易市场。在此基础上,财政部和原环境保护部于2007年先后批复了江苏、天津、浙江、河北、山西、重庆、湖北、陕西、内蒙古、湖南、河南11个省份区域内部分地区开展二氧化硫排污权交易制度试

点,涵盖水泥、玻璃、钢铁、化工、采矿等行业。2007年11月10日,浙江省嘉兴市建立了国内首家排污权交易中心。2014年国务院办公厅印发《关于进一步推进排污权有偿使用和交易试点工作的指导意见》指出,二氧化硫排污权交易试点将于2017年在全国范围实施。截至2012年,11个试点地均建立了排污权交易中心,同时出台了排污权交易管理办法。随着排污权交易制度在试点地区的逐渐完善,排污权市场的交易规模也不断扩大,截至2013年底,试点地区的排污权有偿使用和交易总金额达到40多亿元。本文参考齐绍洲等(2018)<sup>[6]</sup>、任胜钢等(2019)<sup>[7]</sup>的做法,将2007年作为试点地区开始实施排污权交易制度的时间。

## 2. 排污权交易市场发展模式选择

在排污权交易市场设计中,排污权的一级市场交易主要涉及初始排污配额指标的分配。排污配额的流通与交易是排污权交易的二级市场,部分高污染企业可以通过排污权交易的二级市场购买额外的排污权,其旨在改善污染减排效果,降低污染造成的社会成本。一级市场是政府和企业间的排污权初始分配、政府回购等,而二级市场是企业间的排污配额交易。在排污权交易制度试点实践过程中,排污权交易市场发展模式主要包括“一级市场先行”以及“二级市场先行”两类(王金南等,2014)<sup>[1]</sup>。基于王金南等(2014)<sup>[1]</sup>对排污权交易市场发展模式的分类,并从北大法宝法律数据库搜集试点地区的相关政府文件,得到试点地区排污权交易市场模式选择情况。从表1可以看到,中国排污权交易一级市场比较活跃,江苏、天津等省市选择“一级市场先行”的发展模式,而重庆、浙江嘉兴、河北(不包括唐山)等部分地区采用“二级市场先行”的排污权交易市场发展模式。

表1 试点地区的排污权交易市场发展模式选择

排污权交易市场发展模式	试点地
一级市场先行	江苏、天津、山西、湖北、陕西、内蒙古、湖南、河南、浙江绍兴
二级市场先行	重庆、浙江嘉兴、河北(不包括唐山)

资料来源:作者整理

## 三、理论分析与假设提出

### 1. 排污权交易制度对企业能源效率的影响

排污权交易制度作为一项重大的、基础性的污染排放管理制度,其本质是试点地区设定最高污染排放量,将排污权分配给每个排污单位,排污单位可以通过有偿使用或排污权市场交易获得排污权。该制度充分利用市场机制分配有限的排污权,建立污染减排激励机制,有效控制污染物总量和改善试点地区环境质量,促进节能减排机制长效化。市场价格信号在排污权交易制度实施过程中发挥核心作用,能够使企业承担最低污染成本实现污染减排,同时为企业提供更多的减排灵活性(Montgomery, 1972)<sup>[16]</sup>。在环境规制约束下,利润最大化的经营目标驱动企业提高自身生产效率,以降低或抵消环境合规成本带来的生产成本上升(Albrizio等,2017)<sup>[17]</sup>。排污权交易制度旨在充分利用市场配置环境容量资源的优势,提高排污权配额的配置效率,激励企业通过调整要素投入结构和生产经营方式改善能源效率。一方面,在生产规模一定的条件下,排污权交易制度的实施使企业减少高污染、低热值的传统化石能源消费,这种能源投入的下降将会提高能源效率;另一方面,在排污权交易机制下,污染排放量较少的企业可在排污权交易市场上公开出售富余的排污权并获得相应的经济收益,进一步通过创新激励来推动企业能源效率提升(史丹和李少林,2020)<sup>[13]</sup>。

因此,本文提出如下研究假设:

H<sub>1</sub>: 排污权交易制度可以有效提升企业能源效率。

### 2. 排污权交易制度影响企业能源效率的作用机制

一方面,二氧化硫排污权交易制度激励企业减少化石能源消费总量,降低化石能源消费比例。

传统化石能源具有低热值高污染的特征,在消耗过程中能源效率不高,同时会产生大量污染。排污权交易制度将污染外部性内部化,激励企业从污染源头减少煤炭、石油等传统能源投入,不仅从源头上减少了污染物的产生,也优化了传统化石能源消耗占主导的能源结构(魏巍贤和马喜立,2015)<sup>[18]</sup>。此外,能源结构优化也体现在能源消费替代方面,企业基于经济效益的考虑,排污权交易制度的实施将影响企业的能源投入替代,激励企业减少化石能源消费比例,以更清洁、更高效的其他能源投入来替代传统化石能源。另一方面,通过优化能源消费结构可以提高能源效率。降低化石能源消费比例,发展高效清洁的非化石能源,可以大幅提高能源效率(魏楚和沈满洪,2008)<sup>[19]</sup>。与此同时,在推动能源消费结构改革的前提下,环境规制才能更有效地改善能源效率(陶长琪等,2018)<sup>[11]</sup>。作为市场化规制工具,排污权交易制度在调整能源消费结构的同时实现企业能源效率提升。因此,本文提出如下研究假设:

H<sub>2a</sub>: 排污权交易制度通过优化能源消费结构提高企业能源效率。

市场激励型规制工具主要通过政府补贴、排污权交易等途径来减少或抵消污染的负外部性(Bergquist等,2013)<sup>[20]</sup>,技术创新激励给企业带来能源效率提升的效益。最早的“波特假说”强调,合理的环境规制强度会对企业产生创新激励。排污权交易将会提高行业进入门槛,通过市场选择作用阻碍低生产率企业进入,促进企业生产率整体提升和中性技术进步。理论上来说,排污权交易制度在一定程度上对低能源效率企业产生较大的治污成本压力,倒逼企业加大对先进生产工艺与技术的研发投入,进而通过改进生产技术实现能源效率改善(张兵兵等,2021)<sup>[21]</sup>。然而,对大多数企业来说,中性技术进步的过程相对缓慢,短期内排污权交易制度可能无法激励企业通过改进生产技术来抵消环境规制成本(韩超等,2020)<sup>[22]</sup>。由于新技术的研发活动周期长、投入大且存在失败的风险,若仅考虑短期利益,企业可能会优先选择合规“遵循成本”。短期内,企业通过中性技术进步实现能源效率提高的意愿和动机会被进一步削弱。此外,技术进步通常并非是一种独立状态,需要依赖于劳动、资本、能源及其他生产要素。技术进步会影响要素投入产出份额的变化,并偏向于特定要素的技术变革,从而导致要素偏向型技术进步(Hicks,1932)<sup>[23]</sup>。在排污权交易机制的激励下,企业有动机加大清洁生产设备投入与污染减排领域的技术投资,这将有助于推动企业实现以污染减排为导向的技术进步,产生偏向型技术进步效应(Tang等,2021)<sup>[24]</sup>。基于此,排污权交易制度可能会通过偏向型技术进步实现能源效率提升。综上所述,排污权交易制度是否能够激励企业中性技术进步以及促进企业偏向型技术进步,还需进一步的检验。因此,本文提出如下研究假设:

H<sub>2b</sub>: 排污权交易制度通过技术进步路径对企业能源效率的影响并不确定。

作为合法性压力,与在位企业相比,排污权交易制度使得新进入企业往往面临更多的进入壁垒。排污权交易制度的本质是在污染物总量控制的原则下,利用排污权市场的价格信号,增加污染企业的环境成本(齐绍洲等,2018)<sup>[6]</sup>。在环境目标约束下,地方政府层层分配污染减排目标,污染企业也面临排污权交易制度带来的环境成本压力,需要通过采取污染防治措施来降低环境成本(余泳泽等,2020)<sup>[25]</sup>。在排污权交易制度作用下,治污成本相对较高或能源效率较低的企业面临更大的生存压力(史丹和李少林,2020)<sup>[13]</sup>。与治理成本较高的新进入污染企业相比,污染治理成本较低的在位企业更容易从市场交易中获得排污权(任胜钢等,2019)<sup>[7]</sup>。在外部压力下,排污权交易制度对新进入企业的生产工艺与污染处理能力提出了更高要求,尤其是对那些生产方式落后、污染排放超标和能源利用效率较低的污染企业。排污权交易制度对污染行业内企业产生了进入壁垒,减少了污染行业内新企业的进入。此外,大多高排放、高耗能的污染企业的能源效率较低,通过提高行业进入壁垒可以有效倒逼企业能源效率提升。因此,本文提出如下研究假设:

H<sub>2c</sub>: 排污权交易制度通过阻碍污染企业进入倒逼企业提升能源效率。

基于上述理论分析,一方面,排污权交易制度通过能源结构优化与技术进步等内部激励行为影

响企业能源效率;另一方面,排污权交易制度给高污染企业带来环境成本上升的外部压力,从而影响行业内企业能源效率。因此,本文认为,排污权交易制度影响企业能源效率的潜在机制主要体现在能源消费结构、技术进步及污染企业进入三个方面,具体分析框架如图1所示。

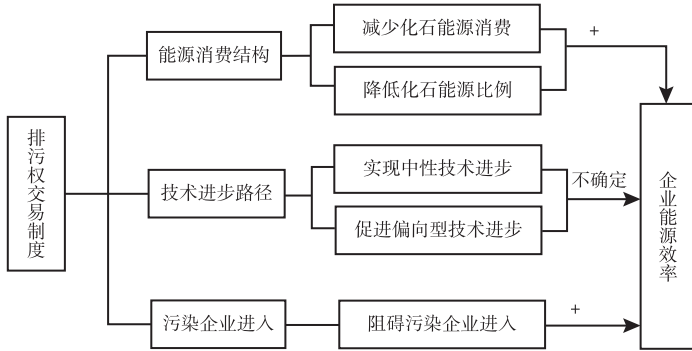


图1 理论分析框架

### 3. 不同排污权交易市场发展模式对企业能源效率的影响

排污权有偿使用和交易是排污权交易制度的核心内容,排污权交易制度是否能够实现理论上的预期效果,关键在于排污权交易市场的设计与运行。排污交易的一级市场主要是在落实污染物排放总量控制的条件下,合理设定“增量”,政府将排污配额指标出让给排污单位,在一定程度上确保初始排污权分配的公平性。排污配额的交易与再分配主要在二级市场中进行,其目的在于提高排污权的配置效率。在排污权交易市场的发展过程中,大多试点地区优先建立并完善一级市场,并采用“一级市场先行”的排污权交易市场发展模式,没有完全建立企业间排污配额交易的二级市场。少数试点地区的排污权交易从二级市场开始,采用“二级市场先行”的排污权交易市场发展模式,试点地区内初始排污权有偿分配的一级市场并不活跃,排污配额的交易主要发生在排污权交易的二级市场。

在“一级市场先行”模式下,排污企业购买的排污配额来自一级市场中政府对初始排污权的有偿分配。在这种情况下,由于企业污染治理的边际成本等于其购买排污配额的边际成本,企业的边际成本或边际收益在参与“一级市场先行”模式的排污权交易前后基本不变。对排污企业来说,仅通过排污权交易的一级市场来获取排污配额指标并不能产生经济收益。与“一级市场先行”模式相比,在“二级市场先行”模式下,一方面,高污染企业需要通过二级市场的交易来获取低污染企业出售的排污权,充分利用市场手段进行排污权交易大幅提高了企业间排污权配额的交易量(王金南等,2014)<sup>[1]</sup>;另一方面,排污权配额需求量较大,进一步激励部分低污染企业出让排污权获取经济收益,从而形成了较为活跃的排污权交易二级市场。因此,本文提出如下研究假设:

H<sub>3</sub>:相比于“一级市场先行”的排污权交易市场发展模式,“二级市场先行”模式下排污权交易制度产生的能源效率提升效应更显著。

## 四、研究设计

### 1. 模型构建

评估排污权交易制度对企业能源效率的影响,将样本期内纳入排污权交易制度试点地区内的企业作为处理组,其余企业列入对照组,设定如下基准估计模型:

$$\ln ece_{fpt} = \beta_0 + \beta_1 etp_{pt} + \varphi X_{fpt} + e_f + k_i + m_p + y_t + \varepsilon_{fpt} \quad (1)$$

其中, $f$ 代表企业, $i$ 表示三位数行业, $p$ 和 $t$ 分别表示省份和年份, $\ln ece$ 表示省份 $p$ 行业 $i$ 内企业 $f$ 在第 $t$ 年的能源效率,并取对数,用企业单位煤炭消耗量的工业总产值来衡量。核心解释变量

$etp$  为虚拟变量,表示省份  $p$  在第  $t$  年是否实施了排污权交易制度。此外, $e_f$  代表企业固定效应, $k_i$  和  $m_p$  分别表示行业、省份固定效应,控制行业与各省份不随时间变化的特征, $y_i$  表示年份固定效应, $X$  代表企业、行业及地区层面的控制变量。本文主要关注核心解释变量  $etp$  的回归系数  $\beta_1$ , 预期估计系数  $\beta_1 > 0$ , 表明排污权交易制度可以有效提高企业能源效率。

## 2. 变量设定

(1)被解释变量:企业能源效率。参考 Lyubich 等(2018)<sup>[26]</sup>、陈钊和陈乔伊(2019)<sup>[15]</sup>的测算方法,以企业单位煤炭消费量的工业总产值水平来衡量企业能源效率( $lnece$ ),即工业总产值/煤炭消耗量。中国作为煤炭消耗大国,煤炭消费占中国能源消费总量的比重达到 70%,且消费的不同能源之间的替代性并不明显(林伯强和杜克锐,2014)<sup>[27]</sup>。因此,煤炭消耗的实物量可以较好反映工业企业的能源消费量。此外,还将煤炭、燃料油折算成标准煤消耗总量,选取工业总产值/标准煤消耗总量作为稳健性检验。

(2)核心解释变量:是否纳入排污权交易试点。当省份  $p$  属于江苏、天津、浙江等 11 个排污权交易制度试点地区,且  $t$  处于 2007 年及之后时, $etp$  取值为 1,否则为 0。

(3)控制变量。企业特征变量如下:企业年龄( $lnage$ ),即企业当年所处的时间减去企业开业年份再加 1,并取自然对数;企业规模( $lnscale$ ),利用企业实际固定资产净值年平均余额取对数来衡量;企业性质( $nature$ ),基于企业实收资本比例来定义企业所有制性质,将国有资本或集体资本占实收资本的比例超过 50% 的企业列入国有企业,其余列入非国有企业;是否出口( $trade$ ),若出口交货值大于 0 时,表示企业存在出口,取为 1。行业层面控制变量包括行业总规模( $lnind\_scale$ ),利用企业层面的实际总产出在三位行业层面上加总取对数来衡量;行业集中度( $hhi$ ),选取赫芬达尔指数来测度,即三位行业内企业销售额的平方和取对数。

此外,还选择部分地区控制变量,经济发展水平( $lnpgdp$ ),用人均实际 GDP 的自然对数来衡量;能源消费结构( $energy$ ),选取煤炭消费量占能源消费总量的比例来度量。表 2 为变量的描述性统计与说明,可以看到,样本区间内企业能源效率均值为 1.3330,标准差为 1.1741,最小值为 0.0328,最大值为 5.2351,说明样本内企业能源效率存在的差异较大。

表 2 主要变量的描述性统计

变量符号	变量名称	样本量	平均值	标准差	最小值	最大值
$lnece$	企业能源效率	168693	1.3330	1.1741	0.0328	5.2351
$etp$	是否实施排污权交易	168693	0.2319	0.4220	0.0000	1.0000
$lnage$	企业年龄	168693	2.3846	0.6943	1.3863	4.6052
$lnscale$	企业规模	168693	9.7350	1.6969	5.6733	14.3668
$nature$	企业性质	168693	0.1149	0.3189	0.0000	1.0000
$trade$	是否出口	168693	0.1871	0.3900	0.0000	1.0000
$lnind\_sca$	行业总规模	168693	15.9422	1.3798	12.2141	19.5274
$hhi$	行业集中度	168693	0.0205	0.0353	0.0000	1.0000
$lnpgdp$	人均实际 GDP	210	9.9151	0.5008	8.8334	10.9725
$energy$	能源消费结构	210	0.6805	0.1616	0.3655	0.9762

## 3. 数据说明

本文选取的数据样本主要涉及三类数据集,包括中国工业企业数据库、中国企业污染排放数据库以及历年中国经济社会统计数据库。其中,企业层面的能源消费数据来自中国污染排放数据库,该数据库包括全国各地污染排放总量占比达 85% 以上的企业,由国家统计局所收集的重

点调查污染企业自主上报和环保部门统计,近年来部分学者开始利用该数据库开展学术研究(陈登科,2020)<sup>[28]</sup>。由于2003年7月开始实施《排污费征收使用条例》,由总量排污费征收方式改为单位污染当量征收,且2012—2013年中国企业污染排放数据库中的煤炭消费、燃料油消费、天然气等能源消费数据大量缺失(林伯强等,2021)<sup>[9]</sup>。受限于煤炭消费量这一核心变量数据的可获得性,为了缓解排污费制度改革和煤炭等能源消费数据缺失带来的样本选择问题,故选择2004—2011年作为本文的研究样本区间。为了得到本文所需要的一系列变量指标,通过将中国企业污染排放数据匹配中国工业企业数据库,得到2004—2011年中国工业企业污染排放数据,匹配后的数据库包括企业的基本信息、生产指标、财务信息以及能源消费数据。选取的地区层面的指标数据主要来源于历年《中国统计年鉴》及《中国能源统计年鉴》。

此外,参考Brandt等(2012)<sup>[29]</sup>和聂辉华等(2012)<sup>[30]</sup>的处理方式,剔除了工业总产值、煤炭消费小于或等于0的样本;剔除总资产、固定资产缺失的样本;剔除企业销售额、工业增加值、固定资产合计、固定资产净值年平均余额等变量小于或等于0的样本;剔除固定资产或流动资产大于总资产、销售额低于500万的样本;剔除从业人数缺失和小于8的企业样本;为了减少异常值干扰,对主要连续变量均进行了1%的缩尾处理。

## 五、实证结果分析

### 1. 基准回归结果

本文首先运用双重差分法对式(1)进行估计,识别排污权交易制度对企业能源效率的影响效应,表3列示了DID的基准估计结果。列(1)和列(2)加入企业、行业 and 地区层面的控制变量,并控制企业、年份和行业固定效应,将标准误分别聚类在企业 and 行业层面,  $etp$  的估计系数均在1%水平下显著为正。列(3)和列(4)进一步将标准误聚类在省份层面,列(4)在列(3)基础上显示了进一步加入省份固定效应的基准回归结果。

表3 排污权交易制度与企业能源效率

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
$etp$	0.0364 *** (0.0083)	0.0364 *** (0.0123)	0.0364 ** (0.0176)	0.0364 ** (0.0176)
$lnage$	-0.0192 ** (0.0079)	-0.0192 ** (0.0097)	-0.0192 * (0.0112)	-0.0193 * (0.0112)
$lnscale$	0.0116 *** (0.0028)	0.0116 *** (0.0044)	0.0116 *** (0.0039)	0.0116 *** (0.0039)
$nature$	0.0008 (0.0150)	0.0008 (0.0162)	0.0008 (0.0203)	0.0008 (0.0203)
$trade$	0.0172 ** (0.0077)	0.0172 (0.0106)	0.0172 ** (0.0081)	0.0172 ** (0.0081)
$lnind\_sca$	0.0386 *** (0.0071)	0.0386 ** (0.0176)	0.0386 *** (0.0116)	0.0386 *** (0.0116)
$hhi$	0.1038 (0.1007)	0.1038 (0.1526)	0.1038 (0.1602)	0.1038 (0.1602)
$lnpgdp$	-0.0393 (0.0608)	-0.0393 (0.0964)	-0.0393 (0.1950)	-0.0397 (0.1973)
$energy$	0.0250 (0.0337)	0.0250 (0.0534)	0.0250 (0.0537)	0.0251 (0.0540)

续表 3

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
常数项	0.9627 (0.6106)	0.9627 (1.0346)	0.9627 (1.9628)	0.9664 (1.9845)
企业固定效应	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
行业固定效应	是	是	是	是
省份固定效应	否	否	否	是
样本量	142562	142562	142562	142562
调整后的 R <sup>2</sup>	0.7958	0.7958	0.7958	0.7957

注：\*\*\*、\*\*和\*分别表示在1%、5%及10%的水平上显著；列(4)括号内为聚类在省份层面的稳健标准误，下同

从表3列(4)可以看到,核心解释变量 *etp* 的基准估计系数为 0.0364,通过了 5% 的显著性检验。从估计结果的平均效应来看,排污权交易制度实施之后,企业能源利用效率提升了约 3.71% ( $\exp(0.0364) - 1 = 0.0371$ ),且相对于样本期内企业能源效率的均值 1.3330 而言提高了 2.78% 左右 ( $0.0371/1.3330 \times 100\%$ )。上述估计结果表明,与未受排污权交易制度影响的对照组企业相比,排污权交易制度显著促进了处理组企业能源效率提升,验证了前文理论分析部分提出的假设 H<sub>1</sub>,与史丹和李少林(2020)<sup>[13]</sup>的结论一致。在样本期内,由于排污权交易试点于 2007 年开始正式实施,因此 *etp* 的估计系数捕捉了 4 年的平均处理效应。通过进一步估算可知,排污权交易制度的实施使得企业能源效率每年提升约 0.93%。表3控制变量的估计系数表明,在排污权交易制度实施的条件下,大规模企业的能源效率提升效应越显著,具有出口贸易的外向型企业能源效率高于内向型企业。

## 2. 有效性检验

(1) 平行趋势检验。以实施前 1 年作为基准期,图 2 列示了实施前后 3 年的动态效应变化<sup>①</sup>。前 3 年内估计系数  $d_t$  的变化趋势比较平缓,且基本没有通过 5% 水平下的显著性检验,说明在排污权交易制度试点实施之前,处理组与对照组企业的能源效率并没有明显差别,满足平行趋势假设条件。在实施当年及后 1 年,处理组企业能源效率显著提升。

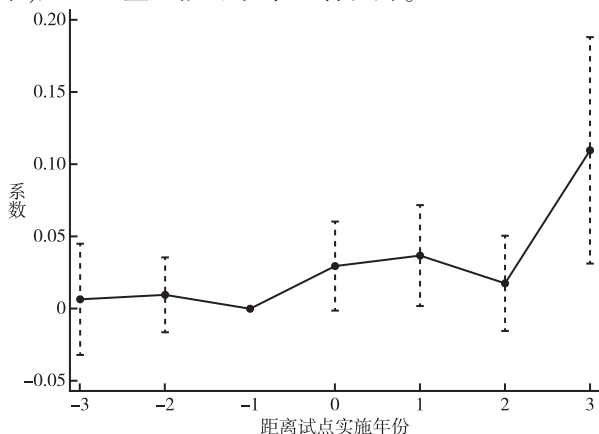


图 2 平行趋势检验

① 由于本文的研究样本不包括 2010 年,因此观察排污权交易制度正式实施后 3 年的动态效应变化仅包括 2008 年、2009 年和 2011 年。



(2)三重差分估计。双重差分法通过比较排污权交易制度实施前后的变化对试点与非试点地区的影响差异,主要剔除了不随时间变化且未观测到的因素。因此,通过比较排污权交易对SO<sub>2</sub>污染行业与非SO<sub>2</sub>污染行业能源效率的影响,可以在双重差分法的基础上进一步剔除不随时间变化的、不可观察到的以及政策之外的因素,如影响行业能源效率的因素。鉴于此,本文进一步利用三重差分(DDD)法进行估计以减少行业层面不可观测因素的干扰,从而更好地识别排污权交易制度对企业能源效率的净效应。具体地,三重差分模型设定如下:

$$\ln ce_{f_{ipt}} = \alpha_0 + \alpha_1 pilot_p \times time_t \times sop_i + \alpha_2 pilot_p \times time_t + \alpha_3 pilot_p \times sop_i + \alpha_4 time_t \times sop_i + \rho X_{f_{ipt}} + e_f + y_i + k_i + m_p + \varepsilon_{f_{ipt}} \quad (2)$$

其中,交互项  $pilot \times time$  类似于式(1)中的  $etp$ ,在此基础上,加入行业类型的虚拟变量  $sop$ ,若企业所属行业为SO<sub>2</sub>污染重点监测行业,即定义为SO<sub>2</sub>污染行业, $sop$ 取值为1;否则将该行业定义为非SO<sub>2</sub>污染行业,取值为0<sup>①</sup>。在式(1)的基础上,本文进一步比较排污权交易对试点与非试点地区、SO<sub>2</sub>污染与非SO<sub>2</sub>污染行业之间企业能源效率的影响,从而剔除了不随时间变化的省份和行业层面不可观测的混淆因素,主要关注三重差分项  $pilot \times time \times sop$  的估计系数  $\alpha_1$ 。其他变量同式(1)。

表4 三重差分估计结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
$pilot \times time \times sop$	0.0433 ** (0.0215)	0.0440 ** (0.0214)	0.0443 ** (0.0215)	0.0443 ** (0.0215)
$pilot \times time$	0.0181 (0.0123)	0.0188 (0.0125)	0.0193 (0.0125)	0.0193 (0.0125)
$pilot \times sop$	-0.0040 (0.0383)	-0.0044 (0.0383)	0.0592 (0.0496)	0.0592 (0.0496)
$time \times sop$	-0.0277 ** (0.0114)	-0.0280 ** (0.0113)	-0.0252 ** (0.0117)	-0.0252 ** (0.0117)
企业/行业控制变量	控制	控制	控制	控制
地区控制变量	未控制	控制	控制	控制
企业/年份固定效应	是	是	是	是
行业固定效应	否	否	是	是
省份固定效应	否	否	否	是
样本量	142564	142564	142493	142493
调整后的R <sup>2</sup>	0.7955	0.7955	0.7958	0.7958

三重差分法的估计结果如表4所示,列(1)仅控制企业和年份固定效应,加入企业和行业控制变量,在列(2)逐步加入地区控制变量,列(3)和列(4)进一步控制行业固定效应、省份固定效应。列(1)~列(4)的估计结果显示, $pilot \times time \times sop$ 的估计系数为正,均在5%水平上显著,说明排污权交易制度有效提升了试点地区SO<sub>2</sub>污染行业内企业的能源效率,行业层面不可观测的因素并未影响本文的研究结论。

① 根据原环境保护部于2008年发布的《国家酸雨和二氧化硫污染防治“十一五”规划》(环发[2008]1号),将电力、化工、石化、钢铁、有色、医药、造纸、冶金、水泥、玻璃等行业列为SO<sub>2</sub>污染重点监测行业。

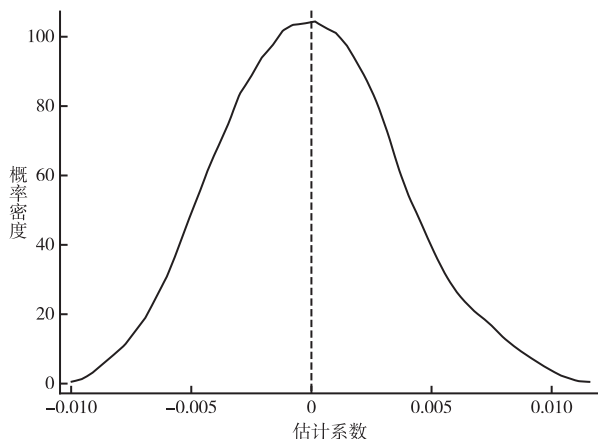


图 3 安慰剂检验

(3) 安慰剂检验。通过随机抽取并分配排污权交易制度的试点地区进行安慰剂检验, 并对该随机过程重复 500 次。图 3 列示了 *etp* 的估计系数变化及其概率密度分布图, *etp* 的安慰剂估计系数大多集中分布在零值附近, 说明不可观测的其他事件或随机因素对企业能源效率不存在显著影响, 企业能源效率提升效应确实来自于排污权交易制度。

### 3. 排除干扰性因素

(1) 排除其他相关冲击。第一, 两控区和排污费征收标准改革的  $SO_2$  污染治理政策。1998 年开始划分酸雨控制区和  $SO_2$  污染控制区, 2007—2013 年江苏、安徽、河北等 12 个省份陆续实施了排污费征收标准改革, 分别控制了是否为两控区、排污费征收标准改革地区与时间趋势的交叉项。第二, 千家企业节能行动计划和碳排放权交易试点的节能降碳政策。“十一五”规划(2006—2010 年) 提出在钢铁、有色、煤炭、电力、石油石化、化工、建材、纺织、造纸等 9 个重点耗能行业开展千家企业节能行动, 加入企业是否属于重点耗能行业与 2006 年虚拟变量的交互项。2011 年批准北京、天津等 7 省市开展碳排放权交易试点, 进一步控制碳排放权交易试点地区与时间趋势的交叉项。第三, 金融危机冲击。考虑到 2008 年国际金融危机会对企业要素投入与生产方式造成冲击, 从而可能间接影响企业的能源效率, 剔除 2008 年和 2009 年的企业样本。表 5 列(1)至(5)汇报了排除其他相关冲击后的估计结果, *etp* 的估计系数至少在 10% 的水平下显著为正, 表明相关冲击后估计结果依旧稳健。

表 5 排除其他相关冲击的影响

变量	两控区政策	排污费标准改革	千家企业节能计划	碳排放权交易	金融危机
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
<i>etp</i>	0.0363 ** (0.0177)	0.0352 * (0.0180)	0.0366 ** (0.0176)	0.0348 ** (0.0168)	0.0466 ** (0.0206)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制
企业/年份固定效应	是	是	是	是	是
行业/省份固定效应	是	是	是	是	是
样本量	142562	142562	142562	142562	88369
调整后的 R <sup>2</sup>	0.7957	0.7957	0.7957	0.7958	0.7948

(2)内生性处理:工具变量法。借鉴 Chen 等(2022)<sup>[31]</sup>的做法,采用逆温现象的频率(年度累计次数)与试点时间的交互项构造工具变量<sup>①</sup>。原因在于:逆温会阻碍空气的垂直对流运动,不利于大气污染物的扩散。在污染排放总量不变的前提下,若地区逆温现象发生的频率越高,该地区可监测到的污染物浓度越高,当地政府需要采取更多政策措施来完成中央政府分配的污染减排指标,则该地区纳入排污权交易制度试点的概率越大,故逆温现象发生的频率满足工具变量的相关性。在排他性方面,当地方政府为了更好地实现污染物控制目标,将会实施排污权交易制度以此激励企业节能减排,最终提升企业能源效率。因此,在控制了其他变量后,逆温现象的频率在一定程度上满足排他性约束要求。此外,逆温通常仅受到气候因素和地理位置条件的影响,该工具变量对企业能源效率的影响较弱,满足外生性假设。

基于地面层与第二大气层、第三大气层之间的逆温现象发生频率(年度累计次数)对数与试点时间的交互项,分别构造工具变量  $iv1$  和  $iv2$ 。利用两阶段最小二乘法进行检验,表 6 第(1)和(2)列显示,工具变量与是否实施排污权交易制度高度相关,第一阶段 F 统计量均远大于 10,逆温现象频率并非弱工具变量。由列(3)和列(4)的第二阶段回归结果可知, $etp$  的估计系数仍然显著为正,表明基准的双重差分估计结果并未受到潜在内生性问题的影响。

表 6 工具变量法估计结果

变量	第一阶段		第二阶段	
	(1)	(2)	(3)	(4)
$etp$			0.0964 *** (0.0285)	0.0759 ** (0.0337)
$iv1$	0.3375 *** (0.0239)			
$iv2$		0.3697 *** (0.0309)		
控制变量	控制	控制	控制	控制
企业/年份固定效应	是	是	是	是
行业/省份固定效应	是	是	是	是
样本量	142562	142562	142562	142562
$R^2$	—	—	0.3514	0.3514
KP Wald F 统计量	198.72	143.51	—	—

#### 4. 稳健性检验

(1)替换被解释变量。首先选取单位标准煤消耗的工业总产值指标作为被解释变量进行稳健性检验。根据《综合能耗计算通则》(GB/T2589-2008),原煤的折标准煤系数为 0.7143,将企业实际煤炭消耗量转换为企业标准煤消耗量,即标准煤消耗量 = 煤炭消耗量  $\times$  0.7143。除了煤炭消耗之外,部分工业企业需要消耗燃料油,其折标准煤系数为 1.4286,企业能源消耗总量 = 煤炭消耗量  $\times$

<sup>①</sup> 逆温数据来源于 NASA 的 MERRA-2 卫星图片产品,每天记录 4 次不同高空大气层中的气温,日度指标基于每 6 小时记录一次的气温数据进行计算。

0.7143 + 燃料油消耗量 × 1.4286, 利用企业工业总产值/能源消耗总量衡量企业能源效率。估计结果分别见表 7 列(1)和列(2), *etp* 的估计系数显著为正, 说明企业能源效率指标的选取不会影响本文的估计结果。

(2) 反事实检验。假设排污权交易制度实施的时间提前至 2006 年, 进行反事实检验。从表 7 中列(3)可知, 双重差分项的回归系数为 0.0208, 但并不显著, 表明 2006 年的排污权交易制度试点并没有促进企业能源效率提升, 排污权交易制度的正式实施才能驱动企业能源效率提升。

表 7 稳健性检验结果

变量	替换被解释变量		反事实检验	缓解溢出效应	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
<i>etp</i>	0.0387* (0.0193)	0.1085*** (0.0344)	0.0208 (0.0198)	0.0362** (0.0145)	0.0164 (0.0284)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制
企业/年份固定效应	是	是	是	是	是
行业/省份固定效应	是	是	是	是	是
样本量	142562	63905	142562	137082	71465
调整后的 R <sup>2</sup>	0.7940	0.8000	0.7957	0.7935	0.8027

(3) 缓解溢出效应。双重差分法的一个核心识别假设是个体处置稳定性假设(SUTVA), 即政策干预不存在溢出效应。其溢出效应主要表现在: 当排污权交易制度实施使得试点地区内企业的决策发生变化时, 部分能源效率较低的企业为了规避环境管制约束, 可能会将企业自身的污染转移至集团内部其他企业。此外, 试点地区内的工业企业可能会将企业迁移至邻近的非试点地区, 产生区域内溢出效应。因此, 本文首先仅保留 1 个产业活动单位的企业来减少企业集团内部之间的直接联系, 缓解企业集团内部可能存在的溢出效应。表 7 第(4)列中 *etp* 的估计系数依然显著为正。进一步地, 将试点地区的邻近地区内企业作为处理组, 其余非试点地区内企业列入对照组来检验是否存在区域内溢出效应。表 7 列(5)的检验结果显示, 排污权交易试点并未显著提升邻近非试点地区内企业的能源效率, 即并不存在区域内溢出效应。

(4) 其他稳健性检验。第一, PSM-DID。本文在采用倾向得分匹配的基础上进行双重差分估计, 选择企业年龄、企业规模、地区人均实际 GDP 和能源消费结构作为特征变量进行匹配。首先采用 k 近邻匹配法进行倾向得分匹配, 选取距离最近的 5 个观测值作为对照组。再运用 PSM 配比中的核匹配方法减少处理组和对照组特征变量在匹配前后的标准化偏差, 以此缓解企业样本间的特征差异。表 8 列(1)和(2)显示, 在采用 k 近邻匹配和核匹配法的 PSM-DID 估计中, 核心解释变量的回归系数均显著为正, 说明样本内企业特征差异对估计结果的影响较小, 经过样本匹配后排污权交易制度产生的能源效率提升效应依旧存在。

第二, 排除能源替代。除了煤炭消耗之外, 少数企业还存在燃料油消耗。因此, 为了排除企业使用燃料油替代煤炭消耗对能源效率的影响, 进一步剔除存在燃料油消耗的全部企业样本, 从而更好排除由于能源替代带来的能源效率提升。如表 8 列(3)所示, 排除燃料油替代之后, 核心解释变量 *etp* 仍然显著为正。

第三, 控制不同固定效应。通过控制三位数行业与年份联合固定效应, 以控制企业所属行业随时间变化的不可观测因素对估计结果的影响。表 8 列(4)在进一步控制行业与年份联合固定效应后, 排污权交易制度显著提升企业能源效率这一结论依然稳健。

表 8 其他稳健性检验结果

变量	k 近邻匹配	核匹配	排除能源替代	控制不同固定效应
	(1)	(2)	(3)	(4)
<i>etp</i>	0.0526 <sup>***</sup> (0.0162)	0.0350 <sup>*</sup> (0.0173)	0.0393 <sup>**</sup> (0.0179)	0.0335 <sup>*</sup> (0.0171)
控制变量	控制	控制	控制	控制
企业固定效应	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	否
行业固定效应	是	是	是	否
省份固定效应	是	是	是	是
行业-年份固定效应	否	否	否	是
样本量	113589	101507	133523	142493
调整后的 R <sup>2</sup>	0.7911	0.8082	0.7924	0.7988

### 5. 影响机制检验

(1)能源消费结构。对于微观企业能源消费而言,能源效率的提升主要通过改善能源消费结构。为了检验企业是否通过优化能源消费结构实现能源效率提升,最直接的方式是考察企业的煤炭消费情况。限于相关微观数据的可获得性,本文利用企业燃料煤消费量的对数值衡量企业的煤炭消费。直接将核心解释变量 *etp* 对机制变量进行回归,表 9 列(1)显示排污权交易机制激励下企业的煤炭消费变化。核心解释变量 *etp* 的回归系数为 0.2918,且通过 10% 的显著性检验,即排污权交易制度降低了企业的煤炭消费。

此外,还选取燃料煤消费量占能源消费总量的比例来衡量企业能源消费结构,以各类能源的标准煤消耗进行加总得到能源消费总量。具体估计结果如表 9 列(2)所示。结果显示,*etp* 对燃料煤消费占比的估计系数显著为负。说明排污权交易制度显著减少燃料煤消费总量和占比,企业利用能源替代来优化调整能源消费结构,从根本上提升整体能源利用效率,与既有研究的结论一致(魏楚和沈满洪,2008)<sup>[19]</sup>。因此,上述基于能源结构的机制分析结果表明,在排污权交易机制的内部激励下,企业会通过减少燃料煤投入,降低燃料煤消费比例来优化能源消费结构,即排污权交易制度通过激励企业优化能源消费结构显著提高了企业能源效率,验证了研究假设 H<sub>2a</sub>。

表 9 机制检验结果

变量	能源结构		技术进步		企业进入
	燃料煤消费	燃料煤消费占比	偏向型技术进步	中性技术进步	污染企业进入率
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
<i>etp</i>	-0.2918 <sup>*</sup> (0.1702)	-0.0265 <sup>*</sup> (0.0150)	0.0286 (0.0287)	0.0140 (0.0256)	-0.0101 <sup>***</sup> (0.0017)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制
企业/年份固定效应	是	是	是	是	是

续表 9

变量	能源结构		技术进步		企业进入
	燃料煤消费	燃料煤消费占比	偏向型技术进步	中性技术进步	污染企业进入率
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
行业/省份固定效应	是	是	是	是	是
样本量	147249	63976	89830	91440	96032
调整后的 R <sup>2</sup>	0.6868	0.8595	0.9011	0.7913	0.8330

(2) 技术进步路径。首先,从偏向型技术进步视角探讨排污权交易制度产生的内部激励对企业技术进步的变化,验证排污权交易制度是否会通过促进偏向型技术进步改善企业能源效率。从要素投入替代视角来看,企业的创新活动可能表现在:通过转向技术密集型产品、更密集地投入清洁生产设备来实现以资本为导向的技术进步,从而提升企业能源效率。本文参考 Tang 等(2021)<sup>[24]</sup>、陈登科(2020)<sup>[28]</sup>的做法,采用资本投入与煤炭消费之比的对数来衡量企业的偏向型技术进步水平,用企业固定资产表示资本投入,并加入以利息支出表示资本价格的控制变量。将煤炭消耗视为企业的一种能源要素投入,且能源要素可以由生产过程中的资本替代或补充,并通过能源与资本之间的投入比率来检验偏向型技术进步。具体做法是直接将核心解释变量 *etp* 对资本投入/煤炭消费进行回归,表 9 第(3)列显示 *etp* 的回归系数为 0.0286,但在统计学意义上并不显著,表明排污权交易制度并未激励企业实现偏向型技术进步。

此外,能源利用效率的改善在一定程度上也意味着企业实现中性技术进步,进一步沿着中性技术进步这条途径来探讨排污权交易制度可能产生的技术进步激励。排污权交易将污染外部成本内部化,企业间能源效率差异导致高能效的企业可以利用剩余的排污权配额换取额外收益,进而驱动以创新为基础的中性技术进步,最终可能促进企业能源效率进一步改善。在一定程度上,全要素生产率体现了企业通过中性技术进步提高能源效率的效应。因此,本文参考陈登科(2020)<sup>[28]</sup>,选取企业全要素生产率来检验中性技术进步,并运用 LP 法测算。由于 2008—2011 年中国工业企业的工业中间投入和工业增加值数据缺失,本文参考苏丹妮和盛斌(2021)<sup>[32]</sup>的做法,通过以下公式进行估算:工业中间投入 = 工业总产值 × 销售成本/销售收入 - 应付工资总额 - 本年折旧,工业增加值 = 工业总产值 - 工业中间投入 + 应交增值税。资本投入采用固定资产净额测度,使用工业企业的年平均从业人数衡量劳动投入,对上述投入产出指标均取对数之后再行估计。直接将 *etp* 对企业全要素生产率的对数值进行回归,表 9 第(4)列显示 *etp* 的估计系数为正值,但在统计学意义上不显著,说明排污权交易制度并未激励企业实现中性技术进步,无法通过产生创新补偿效应提升能源效率。

上述基于技术进步视角的机制检验结果表明,在排污权交易制度的内部激励下,并未触发波特效应,短期内企业能源效率的改善并非来源于偏向型技术进步与中性技术进步,前文提出的研究假设  $H_{2b}$  并不成立。可能对于大多工业企业而言,技术进步是比较缓慢的过程,短期内排污权交易制度无法通过中性技术进步和偏向型技术进步来提升企业能源利用效率,需要长期内不断对生产工艺领域的创新投入(韩超等,2020)<sup>[22]</sup>。

(3) 污染企业进入。本文进一步基于企业进入的动态视角,分析排污权交易制度约束下污染企业进入情况,以论证阻碍污染企业进入是否是排污权交易制度促进企业能源效率提升的重要机制。以污染企业进入率作为机制变量来考察行业进入的动态变化,按照企业是否属于 SO<sub>2</sub> 污染行

业来识别污染企业,污染企业进入率 = 上一年与当年间新进入污染企业数量/上一年污染企业总数。具体来讲,本文直接考察排污权交易对污染企业进入率的影响,表 9 列(5)显示,核心解释变量  $etp$  的估计系数显著为负,排污权交易制度降低了污染企业进入率,提高污染企业进入壁垒。基于企业进入的机制分析表明,排污权交易制度通过阻碍污染企业进入倒逼企业能源效率提升,研究假设  $H_2$  得到验证。

## 六、不同排污权交易市场发展模式的影响效应与机制

为了考察不同的排污权交易市场发展模式是否影响排污权交易制度的政策效应及机制,基于前文表 1,浙江、河北的不同市场发展模式的分类并不是基于省份层面,对于浙江和河北这两个省份处理组的选择,将浙江绍兴、嘉兴市所属企业分别作为采用“一级市场先行”模式和“二级市场先行”模式的处理组,将河北(不包括唐山)所属城市内企业纳入采用“二级市场先行”模式的处理组,其余省份是将采用“一级市场先行”“二级市场先行”市场发展模式的试点地区内企业纳入处理组,而未实施排污权交易制度试点的非试点地区内企业作为对照组。

此外,设定试点地区采用“一级市场先行”和“二级市场先行”模式的时间。由于大多排污权交易试点地区在 2007 年仍处于起步阶段,本文以 2008 年作为试点地区采用“一级市场先行”模式的时间。通过搜集部分试点地区环保部门和排污权交易中心的相关政策文件可知,采用“二级市场先行”模式的试点地区开展二级市场交易的实际时间并不一致,浙江嘉兴、重庆、河北(不包括唐山)开展二级市场交易的时间分别为 2009 年、2010 年和 2011 年。

### 1. 不同市场发展模式选择下排污权交易制度的影响效应分析

本文分别对“一级市场先行”与“二级市场先行”的样本进行回归,表 10 中报告了不同排污权交易市场发展模式的估计结果。可以看到,在“一级市场先行”市场发展模式下,列(1)和列(2)的估计结果并不显著;而列(3)和列(4)显示“二级市场先行”的市场发展模式的估计结果,列(3)只加入企业和年份固定效应,列(4)进一步控制行业和省份固定效应, $etp$  的估计系数至少在 10% 水平下显著为正。上述估计结果说明,排污权交易制度对企业能源效率的提升效应在“二级市场先行”的排污权交易市场发展模式下更显著,而“一级市场先行”模式下并未有效提高企业能源效率,研究假设  $H_3$  得到验证。

表 10 不同排污权交易市场发展模式的效应分析

变量	一级市场先行		二级市场先行	
	(1)	(2)	(3)	(4)
$etp$	0.0300 (0.0197)	0.0314 (0.0200)	0.0976 ** (0.0491)	0.0968 * (0.0494)
控制变量	控制	控制	控制	控制
企业/年份固定效应	是	是	是	是
行业/省份固定效应	否	是	否	是
样本量	118305	118301	82491	82488
调整后的 $R^2$	0.7951	0.7955	0.7974	0.7980

这可能源于企业的要素投入与生产行为在不同的排污权交易市场发展模式下存在差别,最终造成排污权交易制度产生差异化的政策效应。在“一级市场先行”模式下,大多排污权配额的获取来自政府的有偿分配,此时政府干预在排污权指标的分配过程中占主导地位,而市场机

制的配置作用较小。此外,由于企业很少通过二级市场的排污配额交易来获取经济收益,排污权交易制度对企业采取减排措施的激励作用较弱。而“二级市场先行”的模式主要涉及企业与企业之间的排污权交易,不涉及初始排污配额的分配,企业主要通过二级交易市场获得排污权(王金南等,2014)<sup>[1]</sup>。“二级市场先行”模式不仅激励排污单位出让排污权,也大幅提高交易市场的排污权交易量,从而形成较为活跃的二级市场。与此同时,排污权交易制度在“二级市场先行”模式下能够有效调动企业污染减排与治理的积极性,激励企业减少高污染能源的消耗与调整能源消费结构,增加污染治理技术投资,在降低污染排放的同时,也有利于推动企业能源效率的提升。

## 2. “一级市场先行”和“二级市场先行”模式的影响机制分析

(1)“一级市场先行”的排污权交易市场发展模式。究竟是什么原因造成“二级市场先行”模式下排污权交易制度的能源效率提升效应显著优于“一级市场先行”模式?能源结构、技术进步与企业进入在“一级市场先行”和“二级市场先行”模式下产生怎样的影响?本文首先基于“一级市场先行”的发展模式分析其影响机制,具体结果如表11所示。

表 11 “一级市场先行”发展模式的机制分析

变量	能源结构		技术进步		企业进入
	燃料煤消费	燃料煤消费占比	偏向型技术进步	中性技术进步	污染企业进入率
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
<i>etp</i>	-0.1894* (0.1036)	-0.0246*** (0.0077)	-0.0222 (0.0173)	-0.0007 (0.0765)	-0.0111 (0.0067)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制
企业/年份固定效应	是	是	是	是	是
行业/省份固定效应	是	是	是	是	是
样本量	122175	54366	73376	76751	80711
调整后的 R <sup>2</sup>	0.6994	0.8668	0.9040	0.7849	0.8299

列(1)和列(2)中 *etp* 的估计系数表明,在“一级市场先行”的排污权交易市场发展模式下,排污权交易制度主要通过减少燃料煤消费总量及占比来提升企业能源效率。列(3)和列(4)基于技术进步的机制分析发现,“一级市场先行”模式下排污权交易制度并未显著促进企业偏向型技术进步与中性技术进步,依然没有产生技术进步激励。而列(5)基于企业进入的机制分析结果发现,*etp* 的估计系数为 -0.0111,但不显著,表明在“一级市场先行”的排污权交易市场发展模式下,行业进入壁垒较低,此时排污权交易制度并未对 SO<sub>2</sub> 污染企业进入产生足够的外部压力。

出现上述结果的原因可能在于,在“一级市场先行”模式下,基于 SO<sub>2</sub> 排放总量控制原则,主要由政府通过有偿分配方式将排污权配额分配给排污企业,政府制定的污染排放控制目标直接影响了企业能源消费,倒逼企业通过减少煤炭消耗实现污染减排。此外,由于很少涉及企业间的排污配额交易,此时排污权交易对排污企业产生的技术进步激励不足、进入壁垒较低,无法实现偏向型和中性技术进步,同时并未有效减少污染企业进入市场。

(2)“二级市场先行”的排污权交易市场发展模式。进一步探讨哪些路径造成“二级市场先行”模式下的排污权交易促进企业能源效率提升,来源于能源结构优化和技术进步激励,还是企业进入压力?从表12列(1)和列(2)可以看到,在“二级市场先行”模式下,排污权交易制度



可以通过优化能源消费结构有效改善企业能源效率。列(3)和列(4)结果表明,“二级市场先行”模式下的排污权交易制度显著促进了企业偏向型技术进步,但并未能够实现中性技术进步。可能由于在以排污权交易的二级市场为主导的“二级市场先行”模式下,排污权交易制度主要通过市场机制实现排污权配置,此时会激励企业通过转让排污权配额获取收益。从排污权二级市场交易获取的收益使得企业能够在生产过程中投入更多的资本用于购买先进的污染处理设备以及加大技术投资,提高资本投入与煤炭消费之间的要素比例,进而实现以资本为导向的偏向型技术进步。

列(5)显示,“二级市场先行”模式下的排污权交易制度显著降低污染企业进入率,提高SO<sub>2</sub>污染企业进入壁垒。由于“二级市场先行”模式主要涉及排污权交易的二级市场,对于新进入的SO<sub>2</sub>污染企业来说,大多企业需要通过二级交易市场购买额外的排污配额,其污染减排成本明显高于在位企业,若企业基于利润最大化目标的考虑,潜在进入企业由于面临较高的环境成本而并不会选择进入市场,此时SO<sub>2</sub>污染企业面临的进入壁垒较高,新进入企业的数量明显减少。因此,从企业进入视角来看,排污权交易制度阻碍了采用“二级市场先行”模式的地区内SO<sub>2</sub>污染企业的进入,这种行业进入壁垒倒逼企业提升能源效率。基于上述分析可知,在排污权交易市场的发展过程中,二级排污权交易市场对排污权交易制度的技术进步和企业进入阻碍作用至关重要,“二级市场先行”模式产生偏向型技术进步激励和污染企业进入壁垒,通过促进偏向型技术进步和阻碍污染企业进入推动企业能源效率提升。

表 12 “二级市场先行”发展模式的机制分析

变量	能源结构		技术进步		企业进入
	燃料煤消费	燃料煤消费占比	偏向型技术进步	中性技术进步	污染企业进入率
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
<i>etp</i>	-0.5849 ** (0.2371)	-0.0262 ** (0.0129)	0.1381 *** (0.0461)	0.0788 (0.1491)	-0.0171 *** (0.0056)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制
企业/年份固定效应	是	是	是	是	是
行业/省份固定效应	是	是	是	是	是
样本量	85929	35923	49214	54471	55462
调整后的 R <sup>2</sup>	0.6973	0.8687	0.9029	0.7888	0.8315

在不同市场发展模式选择下,排污权交易制度对能源效率的影响存在显著差异,其主要来源于不同发展模式的作用机制差异。本文关于不同排污权交易市场发展模式选择的影响差异的讨论,也能为未来利用排污权、碳排放权等市场机制提高能源效率提供进一步的认识。一方面,以政府为主导的“一级市场先行”模式仅产生能源结构优化效应,对能源效率的提升作用有限;另一方面,以市场为主导的“二级市场先行”模式不仅优化企业能源消费结构,还产生偏向型技术进步激励与企业进入壁垒,对企业能源效率产生更强的提升效应。当前,中国现有的排污权交易仍然集中在以政府为主导的一级市场,二级市场的流动性较弱,排污权交易的市场机制仍有待完善。因此,未来需充分发挥二级市场的激励约束作用,鼓励排污单位通过二级市场出让或购买排污权,形成活跃的二级交易市场,利用“二级市场先行”模式推动能源高效利用。

## 七、结论与政策启示

本文利用中国实施的二氧化硫排污权交易制度试点作为一项准自然实验,采用双重差分法实

证检验了排污权交易制度对企业能源效率的影响效应、作用机制及模式差异。研究发现:第一,排污权交易制度有效促进企业能源效率提升,该结论在三重差分法、工具变量法以及排除其他相关冲击等稳健性检验中仍然存在。第二,排污权交易制度降低燃料煤消费和减少污染企业进入,但并未促进偏向型和中性技术进步,排污权交易主要通过优化能源消费结构和阻碍污染企业进入来改善企业能源效率。从排污权交易市场发展模式差异来看,相比于“一级市场先行”模式,排污权交易制度有效提高了采用“二级市场先行”模式的地区内企业能源效率。在“一级市场先行”和“二级市场先行”模式下,排污权交易均能促进企业能源结构优化,尤其在“二级市场先行”的排污权交易市场发展模式下,排污权交易制度还通过促进偏向型技术进步和提高污染企业进入壁垒实现能源效率提升。

基于上述研究结论,提出以下政策启示:

第一,充分发挥排污权交易机制的作用,推动能源利用效率大幅提升。本文研究表明,排污权交易制度可以有效提升企业能源利用效率,符合通过能源高效利用推动经济绿色低碳发展的目标。因此,在严格落实污染物总量控制制度的前提下,支持试点地区推动排污权交易制度改革,完善排污权交易市场机制。试点地区需要合理核定排污权,进一步规范排污权出让方式与交易行为,激活排污权交易市场价值,积极支持开展排污权交易的企业通过优化能源消费结构、偏向型技术进步等方式提高能源效率。借助排污权交易市场机制,调节企业的生产投入与市场进入行为,提高市场准入门槛,提升整体能源效率。

第二,引导企业优化能源消费结构,激励企业提升技术进步水平。本文的机制检验发现,内部激励下能源消费结构优化是排污权交易制度提升企业能源效率的重要路径,但未产生创新激励。企业应持续推进以非化石能源消费为主体的能源结构优化,加快推动能源领域供给侧结构性改革,逐步减少传统化石能源投入,增加清洁能源投入比例。提高传统化石能源的集约利用效率,同时加强清洁能源对化石燃料的替代程度。此外,企业需要加大先进生产设备投资与技术改造,通过实现偏向型技术进步与提升全要素生产率有效改善能源效率。为此,政府部门应通过税收减免、创新补贴等政策工具,营造创新环境,为企业技术进步与生产技术改进提供长效激励机制,通过诱发创新补偿效应进一步提升企业能源效率,驱动生产方式绿色低碳转型。

第三,完善排污权交易市场发展模式,提升二级市场交易活跃度。在排污权交易市场的探索与实践过程中,试点地区可首先探索与完善“二级市场先行”的市场发展模式,充分利用市场配置排污权的主体作用来激活排污权交易市场价值,积极支持企业充分利用排污权交易工具提高自身的能源效率,实现节能减排协同增效。在引导企业优化能源消费结构的同时,通过税收优惠、财政补贴等形式支持企业淘汰落后生产设备、引进清洁生产工艺与技术,通过偏向型技术进步激励改善能源效率。排污权交易市场发展模式的探索与实践是中国排污权交易制度取得显著成效的关键,可以为未来完善水权、用能权等环境权益交易市场以及建设碳排放权交易市场提供借鉴与启示。

在未来的研究中,可以进一步讨论如何建立企业间排污配额在二级排污权市场中的交易模式与定价机制,发挥市场机制在排污权资源分配过程中的决定性作用;分析试点地区选择不同排污权交易市场发展模式的原因,进一步阐释不同市场发展模式选择下排污权交易制度的差异化影响;在碳达峰碳中和背景下,深入探讨排污权交易制度的减污降碳协同效应及实现路径。

## 参考文献

- [1]王金南,张炳,吴悦颖,郭默.中国排污权有偿使用和交易:实践与展望[J].北京:环境保护,2014,(14):22-25.
- [2]卜国琴.排污权交易市场机制设计的实验研究[J].北京:中国工业经济,2010,(3):118-128.

- [3] 金帅,蒋思琦,张道海. 考虑排污权有偿使用和交易的企业生产优化[J]. 济南: 中国人口·资源与环境,2021,(5): 119-130.
- [4] Färe, R., S. Grosskopf, and C. A. Pasurka Jr. Potential Gains from Trading Bad Outputs: The Case of US Electric Power Plants[J]. *Resource and Energy Economics*,2014,36,(1):99-112.
- [5] 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]. 北京: 经济研究,2015,(7):160-173.
- [6] 齐绍洲,林岫,崔静波. 环境权益交易市场能否诱发绿色创新? ——基于我国上市公司绿色专利数据的证据[J]. 北京: 经济研究,2018,(12):129-143.
- [7] 任胜钢,郑晶晶,刘东华,陈晓红. 排污权交易机制是否提高了企业全要素生产率——来自中国上市公司的证据[J]. 北京: 中国工业经济,2019,(5):5-23.
- [8] Hancevic, P. I. Environmental Regulation and Productivity: The Case of Electricity Generation Under the CAAA-1990 [J]. *Energy Economics*,2016,60,(11):131-143.
- [9] 林伯强,王喜枝,杜之利. 环境规制对中国工业能源效率的影响——基于微观企业数据的实证研究[J]. 厦门大学学报(哲学社会科学版),2021,(4):30-42.
- [10] 尤济红,高志刚. 政府环境规制对能源效率影响的实证研究——以新疆为例[J]. 北京: 资源科学,2013,(6):1211-1219.
- [11] 陶长琪,李翠,王夏欢. 环境规制对全要素能源效率的作用效应与能源消费结构演变的适配关系研究[J]. 济南: 中国人口·资源与环境,2018,(4):98-108.
- [12] Chen, Q., Z. Chen, Z. Liu, J. C. S. Serrato, and D. Xu. Regulating Conglomerates in China: Evidence from an Energy Conservation Program [R]. NBER Working Paper,2021.
- [13] 史丹,李少林. 排污权交易制度与能源利用效率——对地级及以上城市的测度与实证[J]. 北京: 中国工业经济,2020,(9):5-23.
- [14] 林寿富,董小卿. 排污权交易政策能否提高企业能源利用效率? [J]. 南京: 东南学术,2021,(1):170-180.
- [15] 陈钊,陈乔伊. 中国企业能源利用效率: 异质性、影响因素及政策含义[J]. 北京: 中国工业经济,2019,(12):78-95.
- [16] Montgomery, W. D. Markets in Licenses and Efficient Pollution Control Programs[J]. *Journal of Economic Theory*,1972,5,(3): 395-418.
- [17] Albrizio, S., T. Kozluk, and V. Zipperer. Environmental Policies and Productivity Growth: Evidence Across Industries and Firms [J]. *Journal of Environmental Economics and Management*,2017,81:209-226.
- [18] 魏巍贤,马喜立. 能源结构调整与雾霾治理的最优政策选择[J]. 济南: 中国人口·资源与环境,2015,(7):6-14.
- [19] 魏楚,沈满洪. 结构调整能否改善能源效率: 基于中国省级数据的研究[J]. 北京: 世界经济,2008,(11):77-85.
- [20] Bergquist, A. K., K. Söderholm, H. Kinneryd, M. Lindmark, and P. Söderholm. Command-and-control Revisited: Environmental Compliance and Technological Change in Swedish Industry 1970-1990[J]. *Ecological Economics*,2013,85:6-19.
- [21] 张兵兵,周君婷,闫志俊. 低碳城市试点政策与全要素能源效率提升——来自三批次试点政策实施的准自然实验[J]. 武汉: 经济评论,2021,(5):32-49.
- [22] 韩超,陈震,王震. 节能目标约束下企业污染减排效应的机制研究[J]. 北京: 中国工业经济,2020,(10):43-61.
- [23] Hicks, J. R. *The Theory of Wages* [M]. London: Macmillan Press,1932.
- [24] Tang, M., Z. Li, F. Hu, B. Wu, and R. Zhang. Market Failure, Tradable Discharge Permit, and Pollution Reduction: Evidence from Industrial Firms in China [J/OL]. *Ecological Economics*, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107180>,2021.
- [25] 余泳泽,孙鹏博,宣烨. 地方政府环境目标约束是否影响了产业转型升级? [J]. 北京: 经济研究,2020,(8):57-72.
- [26] Lyubich, E., J. Shapiro, and R. Walker. Regulating Mismeasured Pollution: Implications of Firm Heterogeneity for Environmental Policy [J]. *AEA Papers and Proceedings*,2018,108,(5):136-42.
- [27] 林伯强,杜克锐. 理解中国能源强度的变化: 一个综合的分解框架[J]. 北京: 世界经济,2014,(4):69-87.
- [28] 陈登科. 贸易壁垒下降与环境污染改善——来自中国工业企业污染数据的新证据[J]. 北京: 经济研究,2020,(12):98-114.
- [29] Brandt, L., J. Van Biesebroeck, and Y. Zhang. Creative Accounting or Creative Destruction? Firm-level Productivity Growth in Chinese Manufacturing [J]. *Journal of Development Economics*,2012,97,(2):339-351.
- [30] 聂辉华,江艇,杨汝岱. 中国工业企业数据库的使用现状和潜在问题[J]. 北京: 世界经济,2012,(5):142-158.
- [31] Chen, S., P. Oliva, and P. Zhang. The Effect of Air Pollution on Migration: Evidence from China [J/OL]. *Journal of Development Economics*, <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2022.102833>,2022.
- [32] 苏丹妮,盛斌. 服务业外资开放如何影响企业环境绩效——来自中国的经验[J]. 北京: 中国工业经济,2021,(6):61-79.

# How Emissions Trading Improve Enterprise Energy Efficiency : Micro-mechanism and Mode Difference

SONG De-yong<sup>1,2</sup>, CHEN Liang<sup>1</sup>, CHEN Yao<sup>1</sup>

(1. School of Economics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei, 430074, China;

2. Peikang Chang Institute for Development Studies, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei, 430074, China)

**Abstract:** Improving energy efficiency is a key path to promoting green and low-carbon transformation and achieve the goal of carbon peaking and neutrality. Based on the matching data of industrial enterprises and pollution emissions in China, the difference-in-difference method is used to investigate the effect of sulfur dioxide emission trading system on enterprises energy efficiency and its mechanism, and to explore the differences in the impact of different market development modes choices. The study show that emission trading system can significantly improve enterprises energy efficiency. The mechanism analysis reveal that emissions trading mainly promotes the improvement of energy efficiency by optimizing energy consumption structure and hindering polluting enterprises entry, but it hasn't observed that emissions trading generates biased and neutral technological progress incentives. Based on the different development modes of emissions trading market, it is found that the "secondary market priority" mode has a stronger energy efficiency improvement effect of emissions trading compared to the "primary market priority" mode; Besides optimizing energy structure, the energy efficiency improvement effect under the "secondary market priority" mode also comes from the biased technological progress incentives and entry barriers for polluting enterprises generated by emissions trading. This paper helps to reveal the micro mechanism of using market mechanisms to improve energy efficiency, and provides policy implications for promoting energy efficiency improvement and the goal of carbon peaking and neutrality by emissions trading mechanism design and mode innovation.

Based on the basic national conditions of "rich coal, poor oil, and little gas", improving energy efficiency has become an inevitable choice for achieving the strategic goals of green and low-carbon transformation, carbon peak and neutrality in the new development stage. This paper establishes a difference-in-difference model to examine the impact and mechanism of the sulfur dioxide emission trading system on enterprises energy efficiency, which not only provides theoretical basis and empirical evidence for improving energy efficiency by emissions trading system design and mode innovation, but has important practical significance for exploring the green development path to modernization in China and to achieve the dual carbon goals.

The marginal contribution of this paper are as follows: Firstly, this paper uses Chinese industrial enterprise and pollution emission database to evaluate the impact of emission trading system on enterprise energy efficiency, which not only makes up for the lack of macro-data used in most existing studies, but also enriches the research on emission trading theory and energy efficiency. Secondly, it further reveals the micro-mechanism of the emission trading system affecting enterprise energy efficiency, providing new micro evidence for using market mechanism to improve energy efficiency. Thirdly, this paper discusses the heterogeneous impact and transmission mechanism of emissions trading on enterprise energy efficiency under the different development modes of emissions trading market, which is helpful to deeply understand the differential effects of emissions trading system under different market development modes, and it provides useful reference for the improvement and optimization of the emission trading market development mode.

Based on the conclusions of this study, the following policy implications are drawn. Firstly, giving full play to the role of the emission trading mechanism and promote the significant improvement of energy efficiency, the pilot areas need to reasonably verify emission rights, further standardize the transfer methods and emission trading behavior, activate the market value of emissions trading. Secondly, guiding enterprises to optimize energy consumption structure and encourage them to improve technological innovation. Finally, improve the development mode of emissions trading market and enhance the activity of emissions trading market. During the exploration and practice of emissions trading market, pilot areas can first explore and improve the development mode of "secondary market priority".

**Key Words:** emissions trading; enterprise energy efficiency; enterprise entry; technological progress; market development mode

**JEL Classification:** Q43, Q51, Q56

**DOI:**10.19616/j.cnki.bmj.2023.10.009

(责任编辑: 闫梅)