Operations Research and Fuzziology 运筹与模糊学, 2023, 13(5), 5165-5176
Published Online October 2023 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/orf
https://doi.org/10.12677/orf.2023.135519

Hans汉斯

低碳试点政策与高耗能行业碳减排：内在机制与经验证据

董婷婷，贾晓霞，方金丹

上海理工大学管理学院，上海

收稿日期：2023年7月27日；录用日期：2023年10月11日；发布日期：2023年10月20日

摘　要

基于30个省份(剔除西藏)高耗能行业为研究对象，通过构建多期双重差分模型聚焦碳排放量与碳排放强度两方面，对低碳试点政策的碳减排效果及影响路径加以评估，并给出相应的政策建议。结果表明，试点省份高耗能行业的碳排量与排放强度相比于非试点地区具有明显程度的降低，这种减排量与强度的降低主要是通过促进产业升级以及提高绿色创新技术实现，进一步的异质性分析表明，相对于中部地区，东西部地区高耗能行业的碳减排效果更明显；人力资本弱的地区因为技术创新空间大，减排效果也更显著。

关键词

低碳试点，碳减排，双重差分模型，碳排放强度

Low-Carbon Pilot Policies and Carbon Emission Reduction in Energy-Intensive Industries: Intrinsic Mechanism and Empirical Evidence

Tingting Dong, Xiaoxia Jia, Jingdan Fang

School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jul. 27th, 2023; accepted: Oct. 11th, 2023; published: Oct. 20th, 2023

Abstract

Based on the energy-intensive industries in 30 provinces (excluding Tibet) as the research object,

文章引用: 董婷婷, 贾晓霞, 方金丹. 低碳试点政策与高耗能行业碳减排: 内在机制与经验证据[J]. 运筹与模糊学, 2023, 13(5): 5165-5176. DOI: 10.12677/orf.2023.135519

the multi-stage dual difference model focuses on the two aspects of carbon emission and carbon emission intensity, the carbon emission reduction effect and impact path of the low-carbon pilot policy are evaluated, and corresponding policy suggestions are given. The results show that the carbon emission and emission intensity of the energy-intensive industries in the pilot provinces are significantly reduced compared with the non-pilot areas, and this reduction and intensity is mainly realized through the optimization of energy consumption structure, industrial upgrading and green technology innovation. Further heterogeneity analysis shows that compared with the central region, the energy-intensive industries in the eastern and western regions are more effective; the areas with weak human capital are more effective with large technological innovation space.

Keywords

Low Carbon Pilot, Carbon Emission Reduction, Double Difference Model, Carbon Emission Intensity

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

根据 BP 资料显示，中国自 2006 年碳排放总量达到 6656 万吨超过美国，成为最大的碳排放国家。面对日益严峻的环境气候问题，各国相继制定了一系列发展战略规划，低碳试点地区先行即是我国应对气候变化的一项重大政策，国家发改委分别于 2010 年、2012 年发布列入低碳试点地区的名单，并且在 2017 年扩大了试点范围。面对国家“3060”战略目标的紧迫挑战，以节能降耗占比过半的高耗能行业入手，评估该项管理政策的效果及其在促进各地减排路径实施过程中的作用，具有极其重要的战略意义，不仅有助于测度绿色发展背景下政策参与者的资源投入和进入程度，而且在一定程度上反映了各试点地区高耗能产业低碳升级动能的激活程度与行动逻辑。

随着低碳试点工作的不断推进，与其相关的研究也逐渐深入，在碳排放驱动因素方面，学者主要研究了行业技术、工业聚集度、人口规模以及经济发展水平[1] [2] [3]等对碳排放的影响。候勃等[4]以上海市为例研究了城市绿地面积对碳排放的影响，原嫄等[5]在研究中发现产业结构调整也是引起的碳排放变动的主要因素，可见，目前碳因素成为研究重点，碳减排驱动因素的分解及演化机理正在被逐渐破解。也有较多学者围绕低碳试点政策，对其执行效果、影响路径进行了广泛深入的研究。通过研究发现低碳试点政策的实施不仅具有一定的减排效应[6] [7]，也具有一定的经济效应，宋弘等[8]利用多期双重差分法评估了低碳试点政策实施对城市空气质量的影响，田淑英等[9]基于企业层面探究了低碳试点政策对企业效绩的显著正相关性影响，进一步促进了城市的规模经济，同时，低碳试点地区的低碳转型将影响社会需求，从而鼓励更多的企业调整生产，并通过改变就业人数来影响企业层面的就业水平[10]。目前，学界对于碳减排路径分析的研究大致可分为两类：技术创新和结构优化[11] [12] [13]，然而鲜少文献以高耗能行业作为研究对象考察低碳试点政策的实施对其产生的影响。

研究发现，高耗能行业多处于产业链上游，其产品作为下游产业的投入要素，对能源消费端的影响具有传导性和交互作用性。也就是说，高耗能行业的碳排放对应于国家治理理念，研究中有必要开展国家应对气候变化的系列政策对其减污降碳效果和路径的跟踪，既利于探索碳排放双控的客观倒逼作用，同时通过主观建构途径的探索，以期为搭建国家生态文明治理体系提供一定的决策支持。通过梳理相关

文献发现，虽然现有的研究针对低碳试点相对丰富，但是仍有些领域需要扩展研究：第一，大多数文献基于城市、省份、企业层面进行研究，针对高耗能行业的研究鲜少，高耗能行业作为主要的碳排放行业，低碳试点政策的实施是否会对其产生影响是值得研究的问题。第二，现有的文章多从碳排放量或碳排放强度等单一方面进行政策效应评估，导致评估结果不够全面。本文拟综合两者同时开始探究，根据政策的实施选取了符合条件的全样本数据以期进行更全面的评估，在实践意义上希望为进一步扩大低碳试点区域提供实证证据，助力“双碳”目标早日实现。

2. 理论分析与假设提出

“十四五”时期，我国已进入以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进的新发展格局。构建新发展格局，要牢牢把握扩大内需这个战略基点，推进经济高质量发展，这就要求我国必须加快经济发展方式绿色转型。我国适时提出“双碳”目标并继续开展低碳试点工作，以率先实现碳达峰、碳中和为目标，进一步明确了降碳的重点领域、关键环节以及实现路径，中国在 2010 年开展了首批“五省八市”的低碳试点工作，随后又开展了第二批第三批试点工作。Song *et al.* [14]研究发现，通过开展低碳政策，试点城市单位 GDP 碳排放减排率普遍优于非试点地区。中国低碳城市试点政策有效实现了公平性碳减排，主要通过提高绿色创新水平和工业用能效率的途径实现减排[15]，而实现碳减排是否存在别的路径本文进行了进一步探索。

低碳试点政策是以地方政府为主导，采取市场化机制，鼓励企业和机构积极参与的低碳发展策略。其主要目的是探索绿色发展模式，推广低碳技术，制定绿色标准，减少碳排放。因此随着低碳政策实施，政府对环境进行规制，在碳减排的刚性约束和试点城市日益增长的绿色生活需求下，传统的产业竞争模式不会被市场或政府所接受。绿色产品的市场空缺将吸引更多与清洁技术相关的外国投资，并刺激当地企业进行低碳技术创新和清洁生产，从而促进区域绿色经济的发展[16]。Song H [17]指出政府通过提高碳排放成本，倒逼高碳排放企业发展低碳技术，主动变革，提高能源利用率，降低碳排放，加快实现绿色经济增长。因此，本文提出以下假设：

假设 1：低碳试点政策有助于减少碳排放量、降低碳排放强度。

低碳试点政策的实施与产业结构升级密切相关。产业结构升级是基于区域资源禀赋特征，产业结构内部资源配置持续合理、产业效率持续提高的动态过程[18]。通过实施低碳政策能够优化地区产业结构，促进产业升级，推动产业间协调发展，从而降低地区整体的碳排放。从各省份的产业结构来看，不同产业的碳排放量占比中第一产业碳排放量占比最低，第二产业碳排放量占比较高且高于世界的平均水平，而第二产业中工业占比较大，主要以高耗能高排放量行业为主。由此可见，产业结构是影响各省份高耗能行业碳排放量的主要因素，产业结构的长期合理化有利于碳排放量的减少。通过实施低碳试点政策，生产要素的流动将发生变化，可以有效改善资源的引导方式，从低生产率企业到高生产率企业，从而提高资源使用效率[19]。

同时低碳试点政策具有刺激工业发展和技术进步的外部性，能够促进新兴产业和服务业的集聚，升级高耗能产业，实现低碳经济发展。在该政策下，宏观方面相关的试点地区会加强宏观调控，进行地区产业优化，使不同产业协调发展。微观方面各企业会主动适应政策的变化，加强企业结构调整，进行产业升级或者低碳转型，提高技术与装备水平，增加经济效益，全面提升市场竞争力[20]。由于高耗能行业的特殊性，其成本管理较高，低碳政策的实施导致其利润减少，有些企业可能会选择迁出试点地区或者进行技术升级从而促进地区产业结构向清洁能源的转变，达到城市整体产业结构优化目的，最终，源源不断的进化型企业实现了整个城市的产业结构升级[9]。因此，本文提出以下假设：

假设 2：低碳试点政策通过优化产业结构、促进产业升级实现碳减排。

绿色技术创新是中国现代化建设的核心，也是实现经济效益与环境保护平衡的关键点。R. Florida [21]指出低碳试点城市建设的关键任务之一是加快试点城市绿色低碳技术创新和应用，以期实现“碳达峰、碳中和”的战略目标。目前，针对低碳试点政策的实施是否促进了绿色技术创新存在着两种不同的观点。与其他城市政策相比，低碳城市政策更关注企业的绿色技术创新，试点地区政府也将充分发挥综合治理效应，加强城市环境监管，在控制碳排放以外的各种资源环境领域，对城市绿色发展提出更高的要求，促使企业生产更清洁、低碳、环保的产品[22]。遵循成本假说认为政府通过环境规制将增加企业减排治污成本从而削减研发投入抑制企业进行技术创新。而波特假说则认为适当的环境规制将促进企业创新，提高企业的竞争力，减少碳排放，目前大多数学者也证明了此观点。

一方面，创新理论表明外部融资是制约企业技术创新的关键因素，低碳试点城市政府能够利用市场化政策工具降低绿色技术创新成本，通过开展财政补贴、绿色信贷等绿色金融政策的相关部署，为企业绿色转型提供外部金融支持[23]。绿色金融政策对于创新方面可能面临融资约束的企业，为其提供了融资的便利性，缓解了技术改造过程中的资金压力，进而提高了企业的绿色技术创新能力。另一方面，在低碳治理下，随着企业绿色技术的提升，地方政府逐渐要求高耗能行业减少不可再生能源的使用，企业将实施清洁生产模式，提高能源效率降低能源强度，从而改变地区的能源消费结构，具体而言，高耗能行业属于高能耗行业，其能源利用率低，单位产品能耗较高，节能减排潜力大。从长期经济效率的角度来看，低碳试点政策改善了企业的要素配置，减少了对低效部门的要素投入，增加了对高效部门的要素投入，并增加了每单位能源的产出[24]，从而在源头上实现碳减排。因此，本文提出以下假设：

假设 3：低碳试点政策通过提高绿色技术创新水平促进能源消费结构的改善从而实现碳减排。

图 1 为低碳试点政策对碳排放影响的作用机制图。

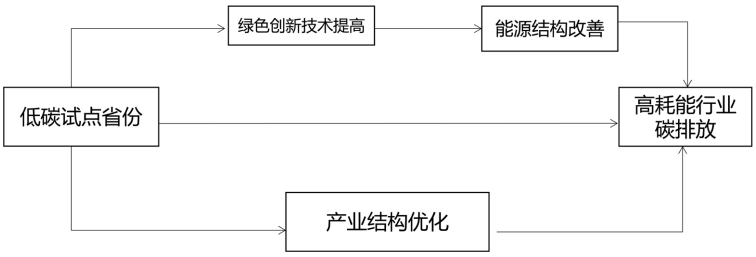

Figure 1. Mechanism of action in Fig
图 1. 作用机制图

3. 研究设计

3.1. 模型构建

本文采取多期 DID 的方法评估低碳试点政策对碳排放情况的影响，该方法可以在一定程度上减少外部因素和不同样本选择带来的偏差。依据省份是否实施低碳试点政策划分处理组和对照组，实施低碳试点政策的省份高耗能行业作为处理组，则未实施的为对照组。DID 通过比较政策实施前后处理组和对照组的变化情况得到“干净的政策效应”。在借鉴 Beck 等[25]的做法构建模型如下：

$$\ln Y_{it} = \beta + \beta_1 \mathrm{did}_{it} + \beta_{it} \mathrm{contronl}_{it} + \delta_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中，下标 i 表示省份，t 表示年份；$\ln Y_{it}$ 为因变量，本文对因变量取对数处理，以关注试点政策对于因变量变化量的影响；did_{it} 为核心解释变量，即双重差分变量；$\mathrm{contronl}_{it}$ 表示一组控制变量；δ_i 表示个体固定效应，控制不同省份高耗能行业个体之间的差异，γ_t 表示时间固定效应，控制不同年份之间的差异；ε_{it} 为随机误差项。β_1 为核心系数，表示低碳试点政策对高耗能行业影响程度。如果 $\beta_1 < 0$ 且显著，

则意味着与非试点省份相比，试点省份的高耗能行业碳排放水平降低，凸显出试点政策碳减排的有效性。

3.2. 数据来源及变量说明

3.2.1. 数据来源

鉴于数据的可获取性，本文在样本选择上选取了除西藏以外的 30 个省份 2008~2019 年的数据作为研究样本。低碳试点政策分别在 2010 年、2012 年、2017 年实施了三批试点，样本范围内的低碳试点省共有 10 个。本文的碳排放数据来源于中国碳排放核算数据库[26]，其他数据来源于历年的《中国工业统计年鉴》《中国统计年鉴》等。

3.2.2. 变量选取

1) 被解释变量与核心解释变量：本文的被解释变量为高耗能行业的碳排放量并对其进行取对数的处理($\ln CO_2$)；另一个被解释变量为碳强度(CI)，它反映了行业的排放水平，定义为每单位的碳排放量取对数。核心解释变量为是否为低碳试点省份高耗能行业(did)，定义为高耗能行业当年是否实施低碳省份试点政策，是取值为 1，否取值为 0。低碳试点政策的实施时间分别为 2010 年、2012 年和 2017 年，由于前两批政策发布的时间都在当年 10 月份之后，参考邓翔[27]做法将其政策实施时间确定为 2011 年和 2013 年，并且 2017 年多以城市为试点对象，不符合本文的研究对象选取，故选用前两批试点省份的高耗能行业为对象。

2) 控制变量：参考以往研究[28] [29]对控制变量的控制，本文选取了以下变量进行控制。经济波动程度(lngdp)，以地区生产总值的对数表示；行业人口规模(P)，由于有些省份细分行业从业人数未公布，高耗能行业下属于工业所以采用工业每年平均从业人数代替；社会消费结构(Consume)，定义为城市消费总额与 GDP 的比值，社会消费水平的高低体现出对产业升级中新产品新技术的需求程度；环境规制强度(ERI)，定义为各省份对于工业污染治理投资占 GDP 的比重。

3) 机制变量：在进行低碳试点政策的减排效应机制分析时分析了产业结构与能源结构、绿色技术创新对碳减排的影响。产业结构(IS)以第三产业与第二产业的比值表示，第二产业多以工业为主，比值越大则说明越偏向服务业，碳排放越少。能源消费结构(FS)用非能源消耗量与总能源消耗量的比值表示，比值越大，能源消耗越少；绿色技术创新(Gtech)用各省份绿色发明的数量取对数表示。

4. 实证结果与分析

4.1. 基准回归结果

4.1.1. 对碳排放量的影响

表 1 列示了低碳试点政策对高耗能行业碳排放量影响的基准回归结果。其中，第(1)列是控制了年份固定效应、个体固定效应，而未加入控制变量的回归结果，第(2)~(4)列分别是加入了控制变量，并且对控制变量进行不滞后、滞后 1 期、滞后 2 期处理的结果。结果表明，当控制了年份与个体固定效应后，不论是否加入控制变量或者对控制变量进行处理，核心解释变量的系数均为负且显著，表明低碳试点政策有助于降低高耗能行业的碳排放量，同时验证了假设 H1 对碳排量的影响。

Table 1. Impact of low-carbon pilot on carbon emissions of energy-intensive industries
表 1. 低碳试点对高耗能行业碳排放量的影响

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	不滞后	不滞后	滞后一期	滞后两期
did	$\ln CO_2$	$\ln CO_2$	$\ln CO_2$	$\ln CO_2$
	-0.147^{***}	-0.146^{***}	-0.146^{***}	-0.139^{***}

Continued

	(−4.09)	(−4.07)	(−4.03)	(−3.90)
控制变量	否	是	是	是
省份固定效应	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
R2	0.970	0.971	0.972	0.971
观测值	360	360	330	300

注：***、**和*分别表示在 1%、5%和 10%水平上显著，下同。

4.1.2. 对碳强度的影响

表 2 展示了低碳试点政策对高耗能行业碳排放强度的影响，对于各个变量的设置与表 1 相同，相较于控制组，低碳试点政策促进了试点地区高耗能行业碳排放强度的下降，且这种促进作用具有一定的滞后性，随着时间的推移这种促进作用逐渐加强。在低碳政策的指导下，传统产业逐步克服了能源依赖，通过技术改造降低工业能耗，实现向新兴产业升级逐渐减少碳排放从而降低碳强度，这也证明了低碳试点政策的有效性。同时验证假设 1 对碳排放强度的影响。

Table 2. Impact of low-carbon pilot on carbon emission intensity in energy-intensive industries
表 2. 低碳试点对高耗能行业碳排放强度的影响

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	不滞后	不滞后	滞后一期	滞后两期
did	CI	CI	CI	CI
	−0.173***	−0.146***	−0.157***	−0.160***
	(−4.77)	(−4.26)	(−4.29)	(−4.38)
控制变量	否	是	是	是
省份固定效应	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
R2	0.958	0.965	0.961	0.971
观测值	360	360	330	300

4.2. 平行趋势检验

使用双重差分法的一个重要前提就是在政策实施之前，处理组与对照组存在相似的发展趋势，这也是模型实施的关键假定即假定在政策实施之前，各省份高耗能行业的碳排放量和碳排放强度具有平行趋势。因此，本研究借鉴 McGavock [30]的研究框架，基于事件分析法对平行趋势进行检验。具体而言，以政策实施年份为基准，构建试点省份政策开始之前 3 年、实施年份、实施之后 5 年的年份虚拟变量与对应政策虚拟变量的交乘项，具体模型如下：

$$\ln CO_2 = \beta_0 + \sum_{S=1}^{3} \beta_{pre_s} D_{pre_s} + \beta_{current} D_{current} + \sum_{S=1}^{5} \beta_{post_s} D_{post_s} + \beta_{it} contronl_{it} + \delta_i + \gamma_{t+} \varepsilon_{it} \quad (2)$$

D_{pre_s}、$D_{current}$、D_{post_s} 分别表示试点政策实施的之前的年份(仅包括前三年)、试点实施年份以及实施之后年份(仅包括后 5 年)的虚拟变量分别与对应政策虚拟变量的交乘项，β_{pre_s}、$\beta_{current}$、β_{post_s} 分别为对应的系数，其余变量含义与上文模型(1)相同。

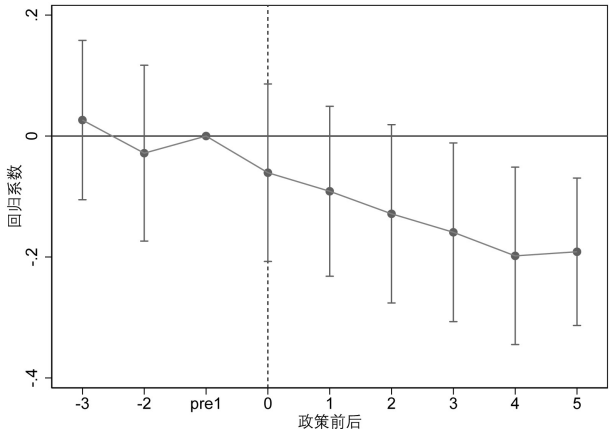

Figure 2. Parallel trend test of carbon emissions
图 2. 碳排放量平行趋势检验

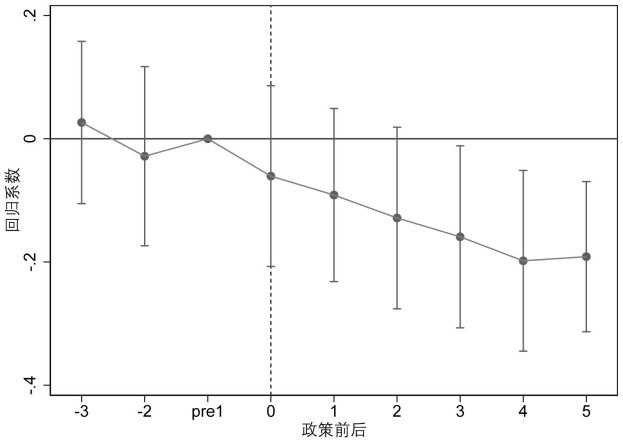

Figure 3. Parallel trend test of carbon intensity
图 3. 碳强度平行趋势检验

从图 2 和图 3 中，我们可以发现高耗能行业的碳排放量和碳排放强度具有相似的平行趋势；政策实施之前的 3 年与实施之后 2 年的回归系数虽然未通过平行趋势检验，但是已经有了下降的趋势，且系数在政策实施第 3 年之后系数均显著为负，说明政策的减排效应具有一定的时滞性，在第 3 年才出现减排效应。综上所述，处理组与对照组在低碳试点政策实施之前不存在显著差异，处理组与对照组是可以进行比较的，满足共同趋势检验。

4.3. 稳健性检验

(一) 安慰剂检验

除了本文所选取控制变量的以外可能还会存在其他的因素对处理组与对照组产生影响，导致对政策效果的评估出现偏差，为了排除此类因素的干扰确保结果的稳健性，参考杨菲[31]的做法，首先对所有省份随机抽取一个年份作为政策的实施年份，再对各个省份进行随机抽样确保所构建虚拟变量对高耗能行业的碳排放没有影响。其次避免小概率事件的干扰，重复 500 次随机抽样，并根据上文模型(1)进行基准回归。检验结果如图 4、5 所示，500 个估计系数呈正态分布，大多数都分布在 0 附近并且多数 p 值大于 0.1。因此，可以认为基准回归的结果没有受到其他不可观察因素的影响，不存在遗漏变量，解决了内生性问题。

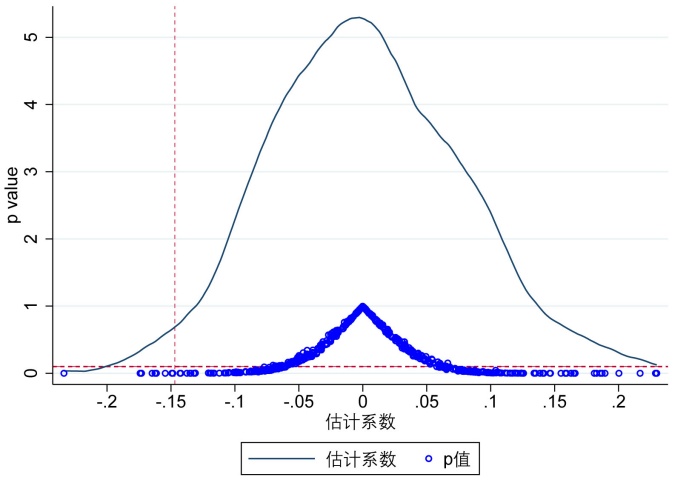

Figure 4. Placebo test of carbon emissions
图 4. 碳排放量安慰剂检验

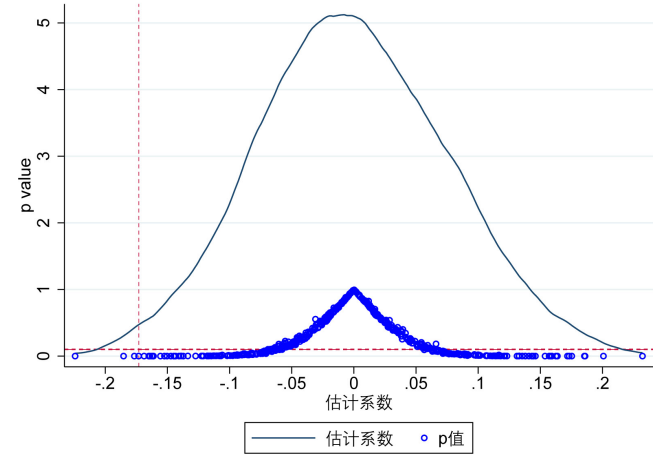

Figure 5. Placebo test of carbon emission intensity
图 5. 碳排放强度安慰剂检验

(二) 改变样本时间区间

依据 CAEDs 数据库获取的碳排放量最新数据，本文的数据选取截止 2019 年，但是在 2017 年我国又实施了第三批低碳试点，虽然在第三批试点中主要以城市为试点对象，没有以省区试点，但也可能会对政策效果的检验产生影响。因此，将本文的样本区间进行调整设置为 2008~2016 年进行检验。结果如表 3 所示。

(三) 控制年份与个体的交互项

前文对时间变量和个体变量分别进行了控制，为了验证结果的稳健性，在此进行进一步的控制，即控制随时间与区域变化的时空区域因素检验结果是否稳健。

表 3 列示了改变样本时间区间及控制年份与个体交互项时的稳健性回归结果。第(1)列结果表明，改变样本时间结果低碳试点政策的效果依然显著，说明不论是否存在第三批试点，低碳试点政策的碳减排的效应是存在的；第(2)列结果表明，对变量进行进一步的控制仍然与原回归结果基本保持一致并且在 1%水平上显著，进一步证明了结论的稳健性。

Table 3. Results of the robustness test
表 3. 稳健性检验结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	改变样本区间	控制交互项	改变样本区间	控制交互项
did	$lnCO_2$	$lnCO_2$	CI	CI
	−0.131***	−0.141***	−0.131***	−0.141***
	(−4.43)	−(4.22)	(−4.43)	(−4.22)
控制变量	是	是	是	是
省份固定效应	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
R2	0.984	0.966	0.976	0.971
观测值	270	360	270	360

4.4. 异质性分析

由于政策的实施会受到各省份地理位置、政府干预、经济发展等情况的影响，本文进一步探讨了低碳试点政策对高耗能行业的影响是否存在异质性。

1) 来自省份异质性的检验。由于东部地区经济发展水平较高，拥有大量的良好资源，具备绿色转型的基础，而中西部地区则相对发展缓慢，产业能源消费结构还需改善，在政策的冲击下，东部更存在升级转型的可能，所以碳减排的效果会更好，更显著。由表 4 的结果可知，低碳试点政策对东西部地区产生了比较显著的影响，而中部效果不太明显，可能的原因是以省区为试点的中部地区只有一个省份，大多数中部省份还未形成试点所以对于中部省份来说碳减排的效果较小。西部地区大多地区正处于发展阶段，在产业结构方面可能存在后发优势并拥有较大的发展潜力，故而减排效果更为明显。

2) 来自地区人力资本异质性的检验。低碳试点政策的实施能够促进行业的技术创新及产业转型，而这些成功的关键在于是否拥有优质的人才，故而各省份的人力资本的强弱也可能会导致对政策的反应出现差异。本文采用各省份在校大学生人数来衡量地区的人力资本强弱。如表 4 所示，无论地区的人力资本是否强弱都会降低高耗能行业的碳排放，但是人力资本弱的地区碳减排的效果却更好。其可能的原因是人力资本强的地区主要以经济发展获取经济利益为前提进行技术创新而忽略碳减排，同时人力资本弱的地区急需发展、吸引优质的人才，更注重地区的居民生活环境的建设更关注碳排放。

Table 4. Results of the heterogeneity analysis
表 4. 异质性分析结果

变量	地理位置			人力资本	
	东部	中部	西部	强	弱
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
did	−0.086*	−0.061	−0.298***	−0.119**	−0.155**
	(−1.86)	(−0.58)	(−0.49)	(−2.09)	(−2.26)
控制变量	是	是	是	是	是
省份固定效应	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是
R2	0.986	0.928	0.955	0.98	0.977
观测值	144	108	108	165	195

4.5. 碳减排路径分析

基于前文对高耗能行业的理论分析可知，低碳城市试点政策主要通过以下两条渠道实现碳减排：一

是通过产业结构优化升级来减少碳排放；二是通过促进绿色技术创新改善能源结构减少碳排放。为了进一步检验影响机制，本文参考宋弘等[5]做法，在原模型上进行中介效应模型的构建：

$$M = \alpha + \alpha 1 did_{it} + \alpha_{it} contronl_{it} + \delta_i + \gamma_t + \varepsilon \quad (4)$$

$$lnCO_2 = \gamma_0 + \gamma_1 did_{it} + \gamma_2 M + contronl_{it} + \delta_i + \gamma_t + \varepsilon_{itit} \quad (5)$$

其中，M 为中介变量，其他变量与上文公式(1)相同，模型(4)是虚拟变量对中介变量的回归方程，公式(5)是加入中介变量后，虚拟变量对高耗能行业的碳排放量的模型。若回归方程中 α_1、γ_1、γ_2 均显著，则说明 M 在碳减排

过程中存在中介作用。回归结果如表 5 所示。

Table 5. Pathway test
表 5. 路径检验

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	IS	$lnCO_2$	Gtech	$lnCO_2$	FS	$lnCO_2$
did	0.234***	−0.128***	−0.181***	−0.125***		
	(−4.85)	(−3.43)	(−3.33)	(−3.57)		
IS		−0.812*				
		(−1.95)				
Gtech				0.178***	2.03E − 06**	−8.70E − 06*
				(−4.6)	(2.27)	(−1.77)
FS						−0.091
						(−0.3)
控制变量	是	是	是	是	是	是
省份固定效应	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是
R2	0.929	0.972	0.982	0.973	0.94	0.970
观测值	360	360	360	360	360	360

由表 5 中第(1)列解释变量系数为正，说明低碳试点政策促进了产业升级，并且加入产业升级后核心变量系数显著为负，说明低碳试点政策可以通过产业升级减少碳排放，验证假设 2。为了验证第二条减排机制，本文首先验证了绿色技术创新的中介作用，然后验证能源结构的在绿色创新与碳排放之间是否存在中介作用。第(3)列解释变量系数为负，说明试点政策的实施与绿色技术呈现负相关，其可能的原因在于政府环境规制提高了企业碳排放成本占用企业的研发投入，对绿色技术创新存在抑制作用，第(4)列再加入绿色创新技术之后核心解释变量系数为负，证明了低碳试点政策可以通过绿色创新技术实现减排，也证明了绿色技术创新的中介作用，第(5)列解释变量为正，表明绿色技术创新与能源结构成正相关，绿色技术创新的提升促进了能源结构的改善。第(6)列解释变量为负，证明绿色技术创新通过改善能源结构降低碳排放，因此验证假设 3。

5. 结论与启示

气候环境问题迫使中国采取一系列措施进行应对治理，其中低碳试点政策是中国采取的行动之一。为推动低碳发展，中国分别在 2010 年、2012 年、2017 年开展了三批低碳试点工作，低碳试点政策的效果评估对于“双碳转型”目标的实现具有重要借鉴意义，本文通过采用多期双重差分法基于 30 个省份中低碳试点省份高耗能行业 2008 年~2019 年碳排放量以及碳排放强度的变化来探究低碳试点政策的减排效果及减排路径，并采取平行趋势检验、安慰剂以及改变样本时间区间等方法进行稳健性检验并进行了地

区和人力资本方面的异质性分析检验。

研究结论如下：1) 相对于对照组，低碳试点政策减少了实验组高耗能行业的碳排放量以及降低了碳排放强度，证明了政策实施减排的有效性。2) 碳减排路径分析发现，高耗能行业碳排放量较大，节能降碳潜力巨大，低碳试点政策通过促进产业升级优化能源结构以及提高绿色创新技术的路径实现减排。3) 在地区异质性方面，碳减排效果存在异质性，不同地区减排效果不同，西部的减排效果更显著，而中部的减排效果不显著。4) 在人力资本异质性方面，相对于人力资本强的地区，对人力资本弱的地区碳减排效果更显著。

基于以上的研究结论，本文提出以下四点政策启示：

第一，高耗能行业能耗强度降低是实现“双控”目标的关键。因此，政府应根据各地区的资源禀赋、产业基础及发展水平等实际情况，在严守能源消费总量和强度“双控”目标的前提下，科学规划高耗能行业发展路径，推动高耗能行业绿色低碳转型，同时关注地区发展的异质性。

第二，加强节能降碳技术创新力度，提高企业能效水平。技术创新是促进高耗能行业转型升级的关键因素，在碳排放核算结果的基础上，应进一步加强对高耗能行业节能降碳技术的研发与推广。政府应积极引导企业开展能效水平评估工作，鼓励企业开展绿色设计和绿色制造，大力推广先进适用的节能低碳技术；同时加强对高耗能行业节能降碳新技术、新产品的研发投入力度，提高企业能效水平。

第三，提高能源利用效率，优化产业结构。产业结构调整是实现碳减排的重要途径之一，政府应引导高耗能行业从传统的高碳产业向低碳产业转变，通过市场机制配置资源，减少能源消耗；同时加强对落后产能的淘汰力度，迫使企业主动降碳转型。对于高污染、高能耗行业应积极引导企业转型升级为绿色环保企业，从源头降低能耗和碳排放。

第四，加强与国际的合作交流。碳减排不仅要依靠国内努力和技术创新，还要加强国际交流合作。政府应积极参与国际气候谈判与国际规则制定工作；同时充分利用国内已有的碳排放权交易市场、碳金融市场等相关经验和成果，探索更多适合中国国情的减排模式。

基金项目

国家社会科学基金项目(22BJY199)。

参考文献

[1] 闫俊娜, 赵涛, 张欣. 基于 Ghosh 投入-产出模型的敏感性分析——以中国高耗能行业为例[J]. 管理评论, 2015, 27(3): 39-48, 66.

[2] 翟超颖, 黄若云. 中国对外直接投资的碳排放效应研究——基于空间杜宾模型[J]. 当代金融研究, 2023, 6(1): 30-46.

[3] 戴嵘, 曹建华. 中国首次“低碳试点”政策的减碳效果评价——基于五省八市的 DID 估计[J]. 科技管理研究, 2015, 35(12): 56-61.

[4] 候勃, 岳文泽, 王腾飞. 中国大都市区碳排放时空异质性探测与影响因素——以上海市为例[J]. 经济地理, 2020, 40(9): 82-90.

[5] 原嫄, 席强敏, 孙铁山, 李国平. 产业结构对区域碳排放的影响——基于多国数据的实证分析[J]. 地理研究, 2016, 35(1): 82-94.

[6] 周鑫琦, 孙慧. 低碳试点政策对减污降碳协同治理的政策效应分析——基于多期双重差分检验[J]. 中小企业管理与科技, 2023(7): 47-49.

[7] 逯进, 王晓飞. 低碳试点政策对中国城市技术创新的影响——基于低碳城市试点的准自然实验研究[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2019, 19(6): 128-141.

[8] 宋弘, 孙雅洁, 陈登科. 政府空气污染治理效应评估——来自中国“低碳城市”建设的经验研究[J]. 管理世界, 2019, 35(6): 95-108, 195.

[9] Cheng, J., Yi, J., Dai, S. and Xiong, Y. (2019) Can Low-Carbon City Construction Facilitate Green Growth? Evidence from China's Pilot Low-Carbon City Initiative. *Journal of Cleaner Production*, **231**, 1158-1170. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.327

[10] 田淑英, 夏梦丽, 许文立. 低碳经济下的企业绩效及其信贷约束——基于"低碳城市"试点政策的准自然实验分析[J]. 财经论丛(浙江财经学院学报), 2022(10): 49-58.

[11] Dai, S., Zhang, W., Wang, Y.Y. and Wang, G. (2022) Examining the Impact of Regional Development Policy on Industrial Structure Upgrading: Quasi-Experimental Evidence from China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **19**, Article 5042. https://doi.org/10.3390/ijerph19095042

[12] Roberts, S.H., Axon, C.J., Goddard, N.H., Foran, B.D. and Warr, B.S. (2019) Modelling Socio-Economic and Energy Data to Generate Business-as-Usual Scenarios for Carbon Emissions. *Journal of Cleaner Production*, **207**, 980-997. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.029

[13] 曹俊文, 张钰玲. 中国省域碳排放特征与碳减排路径研究[J]. 生态经济, 2022, 38(8): 13-19.

[14] 苏涛永, 郁雨竹, 潘俊汐. 低碳城市和创新型城市双试点的碳减排效应——基于绿色创新与产业升级的协同视角[J]. 科学学与科学技术管理, 2022, 43(1): 21-37.

[15] Song, Q.J., Wang, Y.F. and Qi, Y. (2015) Carbon Emission Status of Low Carbon Pilot Cities in China. *Chinese Journal of Population Resources and Environmental*, **25**, 78-82.

[16] 史修艺, 徐盈之. 低碳城市试点政策的公平性碳减排效果评估——基于工业碳排放视角[J]. 公共管理学报, 2023, 20(1): 84-96, 173.

[17] Duan, L. and Shi, D. (2021) Technological Innovation, Market Proximity, and China's Industrial Green Development. *Chinese Journal of Population Resources and Environmental*, **19**, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.cjpre.2021.12.001

[18] Song, H., Sun, Y.J. and Chen, D.K. (2019) Evaluation of Government Air Pollution Control Effect—An Empirical Study from the Construction of "Low Carbon City" in China. *Management World*, **23**, 95-108.

[19] Chen, M., Gong, Y., Li, Y., Lu, D.D. and Zhang, H. (2016) Population Distribution and Urbanization on Both Sides of the Hu Huanyong Line: Answering the Premier's Question. *Journal of Geographical Sciences*, **26**, 1593-1610. https://doi.org/10.1007/s11442-016-1346-4

[20] Qian, X., Kang, J., Tang, Y.L., *et al*. (2018) Industrial Policy, Efficiency of Capital Allocation and Firm's Total Factor Productivity: Evidence from a Natural Experiment in China. *China Industrial Economics*, **8**, 42-59.

[21] Yang, F., Shi, B., Xu, M. and Feng, C. (2019) Can Reducing Carbon Emissions Improve Economic Performance-Evidence from China. *Economics*, **13**, Article ID: 20190047. https://doi.org/10.5018/economics-ejournal.ja.2019-47

[22] Florida, R., Adler, P. and Mellander, C. (2017) The City as Innovation Machine. *Regional Studies*, **51**, 86-96. https://doi.org/10.1080/00343404.2016.1255324

[23] Shen, N., Liao, H., Deng, R.M. and Wang, Q.W. (2019) Different Types of Environmental Regulations and the Heterogeneous Influence on the Environmental Total Factor Productivity: Empirical Analysis of China's Industry. *Journal of Cleaner Production*, **211**, 171-184. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.170

[24] Tan, X., Yan, Y. and Dong, Y. (2022) Peer Effect in Green Credit Induced Green Innovation: An Empirical Study from China's Green Credit Guidelines. *Resources Policy*, **76**, Article ID: 102619. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102619

[25] Qiu, S., Wang, Z. and Liu, S. (2021) The Policy Outcomes of Low-Carbon City Construction on Urban Green Development: Evidence from a Quasi-Natural Experiment Conducted in China. *Sustainable Cities and Society*, **66**, Article ID: 102699. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102699

[26] Beck, T., Levine, R. and Levkov, A. (2010) Big Bad Banks? The Winners and Losers from Bank Deregulation in the United States. *The Journal of Finance*, **65**, 1637-1667. https://doi.org/10.1111/j.1540-6261.2010.01589.x

[27] Chen, J., Gao, M., Cheng, S., *et al*. (2020) County-Level CO_2 Emissions and Sequestration in China during 1997-2017. *Scientific Data*, **7**, Article No. 391. https://doi.org/10.1038/s41597-020-00736-3

[28] 邓翔, 任伊梦, 玉国华. 低碳城市建设与产业结构优化升级——来自低碳城市试点工作的经验证据[J]. 软科学, 2023, 37(2): 10-19.

[29] 王连芬, 赵园, 王良健. 低碳试点城市的减碳效果及机制研究[J]. 地理研究, 2022, 41(7): 1898-1912.

[30] 张海军, 段茂盛. 中国试点 ETS 的碳减排效果评估——基于分省高耗能工业子行业数据的分析[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(5): 579-589.

[31] McGavock, T. (2021) Here Waits the Bride? The Effect of Ethiopia's Child Marriage Law. *Journal of Development Economics*, **149**, Article ID: 102580. https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2020.102580