

低碳城市建设对区域绿色发展效率的 异质性影响研究

兰梓睿¹

【摘要】：基于 2005–2018 年中国 285 个地级市面板数据，采用全要素非径向方向距离函数和 SBM-DEA 模型测算地区绿色发展效率，从考虑低碳试点政策的经济增长效应和减排效应入手，利用双重差分模型评估低碳试点政策实施对地区绿色发展的影响，并运用双重差分倾向得分匹配法进行了进一步验证；对低碳试点政策作用于地区绿色发展效率的影响机制进行检验。结果表明：低碳试点政策的实施能够显著提高地区绿色发展效率水平；进一步的机制检验发现，低碳试点政策在激发地区绿色发展潜力的过程中，能驱动产生技术创新、要素积累、结构升级和资源配置效应，进而通过这四大效应促进经济增长和碳减排目标实现；异质性的分析体现了不同地区和城市规模的差异下，政策的作用效果也存在差异。

【关键词】：低碳城市 绿色发展效率 双重差分模型 准自然实验

【中图分类号】：F205 **【文献标识码】**：A **【文章编号】**：1009-2382(2021)06-0101-10

一、引言

中国经过改革开放 40 多年的发展，加速了工业化进程推动过程中产生的显著城市化效应，化石燃料消耗和碳排放量的急剧增加，造成地区生态环境的严重破坏，给生态系统建设和经济的可持续发展带来较大的压力。而城市作为经济活动的中心，其减排目标的实现直接关系到中国能否完成国际减排的承诺以及实现碳中和的发展目标。2019 年，中国的城镇人口约占总人口的 60.6%，推进城镇化进程中涉及到基础设施建设、工业、交通和居民生活等需要消耗大量的能源，城市碳排放量也逐渐增加，占到全国总排放的 70% 左右（Cai 等，2019），由此引起的极端天气、海平面上升等气候灾害对城市的可持续发展也产生重要影响。为此，中国政府制定和实施了一系列环境规制的手段来减少地区温室气体的排放，进而实现区域绿色、可持续发展。其中，启动低碳试点城市建设是一项十分重要的举措。国家发改委先后于 2010 年、2012 年和 2017 年分三批启动共设立了 81 个低碳试点城市，逐步实现由局部实施向全面推广的转变，掀起了低碳城市建设的热潮（陆贤伟，2017）。参与建设的低碳城市通过设定具体的行业减排目标、加大低碳技术的投入和使用、倒逼高碳产业低碳转型等方式来推动城市的全面低碳化发展。那么，低碳试点政策的实施能否充分发挥对试点城市的经济增长效应和减排效应，进而促进地区绿色发展效率的提升关系着试点政策实施的好坏以及市场化改革是否成功的关键，因此，从考察低碳试点政策的经济增长效应和减排效应入手，分析低碳城市建设对试点地区绿色发展效率的影响以及作用途径，对于厘清不同城市的低碳发展潜力和差异性，实现整体的绿色发展有重要的推动作用和现实意义。

二、文献综述

纵观国内外的相关研究文献，对于低碳城市建设和绿色发展效率的研究主要集中在以下几方面。

¹**作者简介**：兰梓睿，天津社会科学院资源环境与生态研究所助理研究员（天津 300191）。

基金项目：国家社会科学基金项目重点项目“优化开发区域率先实现碳排放峰值目标路径研究”（编号：16AGL002）；教育部哲学社会科学研究重大课题攻关项目“可持续发展中的绿色设计研究”（编号：16JZD014）

一是低碳试点政策实施效果的评估。低碳技术的应用对于地区经济变革有重要的推动作用，构建低碳城市建设也成为众多国家提升城市和国家竞争力的一种重要手段。对于这方面的研究，主要集中在考察低碳试点政策对促进地区减排的潜力（Wolff, 2014; Gehrsitz, 2017），如张华（2020）基于中国地级市的面板数据，采用双重差分方法来量化分析低碳城市建设对碳排放的影响大小，发现试点城市比非试点城市的碳排放量减少约 1.05%；陈楠和庄贵阳（2018）通过建立低碳城市建设评价指标体系来对中国低碳城市的发展成效进行评估，指出低碳城市建设中存在局部不平衡、低碳效果未能发挥等问题。也有学者从影响空气污染治理的角度出发，如宋弘等（2019）通过分析低碳城市建设对空气污染治理的影响，证实了低碳试点政策实施有助于减少空气污染；Cheng 等（2015）指出低碳试点政策的实施不仅会影响地区碳排放，同时会对经济增长产生一定负面影响；熊广勤等（2020）、钟昌标等（2020）则从企业层面的角度入手，分析低碳试点政策实施对企业绿色创新水平提升的影响，结果表明低碳试点政策实施显著提高了试点地区内企业的绿色创新水平，从而有效验证了“波特假说”的正确性。

二是对绿色发展效率的测度以及影响因素的研究。自绿色发展的概念提出以来，相关学者也对此概念进行了阐释和说明。如胡鞍钢和周绍杰（2014）、黄茂兴和林寿富（2013）对绿色发展的定义、战略意义以及发展机制等进行阐述；袁润松等（2016）和何爱平等（2019）采用方向性距离函数和 SBM 模型来测度区域绿色发展效率，并分析了技术创新水平、环境规制等因素对区域绿色发展效率的影响，发现不同因素的作用效果存在明显差异；杜宇等（2020）从空间视角出发，对长江经济带的绿色发展效率进行测算，并采用面板 SDM 模型分析了政府竞争、市场分割和绿色发展效率之间的动态联系，这些成果对于完善绿色发展效率的研究有重要的意义。对于低碳试点政策有效性的评估实质是政府型的正式环境规制影响地区碳排放的相关议题，如学者 Zhang 等（2017）、Wang 和 Wei（2020）均对这方面展开了相关研究。综合分析和对比现有的文献资料，对于低碳试点政策和绿色发展效率的研究成果较为丰富，为本文提供了较好的理论依据和参考，但是对低碳试点政策这一十分重要的环境规制对地区绿色发展效率影响的研究并不多，低碳试点政策能否发挥波特效应，在促进地区绿色技术创新水平提高的同时，激发整体区域的绿色发展潜力对于实现中国净零排放和碳中和的发展目标有重要的推动作用。基于此，本文以低碳试点政策实施为准自然实验，基于中国 2005—2018 年 285 个地级市的面板数据，构造双重差分模型来研究低碳试点城市建设对区域绿色发展效率的影响。同时，由于 2017 年才正式发布第三批低碳试点城市，政策实施的年份有限，故本文以 2010、2012 年开展的试点城市为研究对象，并开展一系列稳健性检验和异质性分析。

本文可能的边际贡献如下：在研究方法上，从城市层面的面板数据入手，采用全要素非径向方向距离函数和 SBM-DEA 模型来测算各城市的绿色发展效率，重点考虑了地区和城市规模差异性对指标的影响；在研究视角上，重点从考虑低碳试点政策的经济增长效应和减排效应入手，分析不同地区绿色发展效率的变化趋势；细化研究低碳试点政策实施作用于地区绿色发展效率的中介传导机制，分析低碳试点政策实施过程中产生的技术创新效应、要素积累效应、结构升级效应和资源配置效应作用于地区绿色发展效率的差异性，从而为更好地实现地区绿色发展潜力提供一定借鉴。

三、理论分析与假说提出

城市发展的过程中需要消耗大量的能源，并伴随着温室气体的产生。为此，中国采取了一系列节能减排的相关措施，并将低碳发展道路作为中国经济发展的重大战略。其中低碳城市试点政策是为有效实现中国提出的气候行动发展目标而提出的城市层面的环境规制政策，具有行业针对性、政策组合性等特点。而深入研究和分析低碳城市试点政策的实施是否能够完全发挥促进城市经济增长和减排目标实现的作用，具有重要的现实意义。为此，本文作出如下的理论分析。

（1）低碳城市可能通过提高技术创新水平来提升地区绿色发展效率。波特假说中提到了环境规制对技术创新的促进作用，通过合理的环境规制强度来提高企业的生产力和竞争力，进而促进生产技术的进步和低碳环保技术的革新，降低碳排放量（Porter 和 VanderLinde, 1995）。也有相关文献证实了低碳试点政策的实施能够充分发挥“波特假说”效应，进而促进低碳技术的发展（Cheng 等，2019）。在低碳城市的建设过程中，不少地方政府十分重视知识产权保护带来的良好技术创新环境，并通过设立低碳专项资金配套、补贴奖励等方式来提高企业低碳技术研发支出。一方面，通过加强低碳试点城市的环境约束，使得企业加快在生产、节能和环保等方面创新水平的提升，另一方面低碳试点政策的实施带来的技术创新效应有助于地区环境污染

治理水平的提升，从而激发整个地区的绿色发展潜力。

(2) 低碳城市可能通过增加要素投入水平来提升地区绿色发展效率。实现不同生产要素间的正常流动，是促进地区经济增长的重要原因。一方面，低碳城市的建立确保地方企业在发展的过程中拥有良好、竞争充分的市场体系，使得要素资源不断向高技术、低能耗等企业流动，最终实现各个行业内要素资源的合理配置；另一方面，低碳城市建设可以加快地方城市实现经济绿色转型，淘汰高耗能、污染密集型产业，并促进产业结构的相应调整，满足地方城市对高知识、高技能的劳动需求，引导建立和完善人才使用机制，推动科技人才队伍建设和劳动力质量提升，从而为地区绿色发展水平的提升提供智力支持。

(3) 低碳城市可能通过优化产业结构水平来提升地区绿色发展效率。实现低碳城市建设的总体目标，其中极为重要的一步是产业结构的转型和升级。在低碳试点政策的约束下，传统的生产型企业需要转换经济发展模式，实现工业、农业和服务业的新型化发展。一方面，低碳试点政策的实施增加了传统的“三高”企业的生产成本，不利于企业的长远发展（Cheng 等，2019），需要考虑将这类企业迁出试点区或进行低碳转型；另一方面，不同低碳试点地区按照相关文件和政策要求，在产业、财政以及技术推广等方面采取相应的优惠政策，发展相应的低碳产业，如天津、青岛和深圳等地打造的低碳园区，上海支持资源利用技术的优先发展等，通过优化资本结构，促使产业低碳、转型发展。

(4) 低碳城市可能通过提高资源配置效率来提升地区绿色发展效率。低碳城市建设过程中能够减少规模效应的发生，即地区经济发展会带来更大规模的经济活动以及能源消费（徐现祥和李书娟，2015），但对环境污染的负向影响较小。对于产能落后、污染严重以及生产效率较低的产业，地方政府要避免在要素资源配置的过程中，出现要素市场扭曲，进而导致出现资源配置不合理的现象；同时，低碳城市建设能够刺激企业优化能源结构，实现企业资本、劳动力和能源等生产资源的合理配置，提高企业的资源利用率，避免造成污染和浪费。

综上，本文提出以下假设：

假设 1：中国低碳试点政策的实施能够显著提高地区绿色发展效率水平。

假设 2：中国低碳试点政策的实施可能通过发挥技术创新、要素积累、结构升级和资源配置效应来推进地区绿色发展水平提升。

四、研究设计

1. 模型建立

本文以低碳试点政策实施为准自然实验，采用双重差分模型来评估低碳城市试点政策的实施对区域绿色发展效率的影响，考虑到第三批试点城市的作用效果并未完全凸显，故本文以 2012 年为实施的时间节点，将前两批被纳入低碳试点的省市和城市作为处理组，其他城市作为对照组，通过比较试点实施前后试点地区和非试点地区绿色发展效率的变化情况，来对政策实施的有效性进行评估。双重差分方法常用来对政策实施的效果进行评估，并在一定程度上可以减少内生性问题，剔除模型中随时间变化以及不可观测的其他影响因素，因而得到广泛使用。本文借鉴前人（宋弘等，2019；陈林和伍海军，2015）的研究方法，设定如下基本模型：

$$GDE_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 C_i + \alpha_2 Y_t + \alpha_3 (C_i \times Y_t) + \alpha_4 Z_{it} + \lambda_i + \gamma_t + \mu_{it} \quad (1)$$

其中， GDE_{it} 表示地区绿色发展效率的大小， i 表示地区， t 表示时间， C_i 代表城市虚拟变量，如果第 i 个城市是低碳试点地区，则 $C_i=1$ ，代表实验组，否则为 0，代表控制组； Y_t 表示年份虚拟变量。同时，选取 2012 年作为政策实施的时间节点，当 $t \geq 2012$ 时， $Y_t=1$ ，否则为 0。交乘项 $C_i \times Y_t$ 的系数估计值 α_3 就是双重差分估计量，代表低碳试点政策的净影响。 λ_i 表示城市个体固定效应， γ_t 表示时间固定效应， μ_{it} 表示随机干扰项。 Z_{it} 表示的是一组控制变量，包括经济发展水平、对外开放程度、政府干预水平、环境规制强度和基础设施水平这 5 个影响因素。

2. 变量选取与数据说明

(1) 变量选取。

被解释变量：绿色发展效率（GDE）。绿色发展效率主要侧重反映地区经济增长和环境保护的协调、可持续发展，是资源、生态环境的综合利用效率。本文主要借鉴林伯强和刘泓汛（2015）的研究方法，采用全要素非径向方向距离函数和 SBM-DEA 模型来测算地区绿色发展效率，以资本（ k ）、劳动力（ l ）和能源投入（ e ）为投入要素， y 为期望产出， b 为非期望产出，可以定义一个生产技术为：

$$T = \left\{ (k, l, e, y, b) : \sum_{n=1}^N z_n k_n \leq k, \sum_{n=1}^N z_n l_n \leq l, \sum_{n=1}^N z_n e_n \leq e, \sum_{n=1}^N z_n y_n \geq y, \sum_{n=1}^N z_n b_n = b \right\} \quad (2)$$

其中， z_n 为链接投入和产出向量以构成凸集的强度变量， $z_n \geq 0, n=1, 2, 3, \dots, N$ 。

其定义的非径向方向距离函数如下所示：

$$\bar{D}(k, l, e, y, b; g) = \sup \{ w'a : (y + a_y g_y, b - a_b g_b) \in p(k - a_k g_k, l - a_l g_l, e - a_e g_e) \} \quad (3)$$

其中， $g = (-g_k, -g_l, -g_e, -g_y, -g_b)$ 为方向向量， $w' = (w_k, w_l, w_e, w_y, w_b)$ 为指标权重， $a = (a_k, a_l, a_e, a_y, a_b)$ 为松弛变量，满足 $a \geq 0$ ，则可以构建如下的 DEA 模型：

$$\begin{aligned} \bar{D}(k, l, e, y, b; g) = & \max. w_k a_k + w_l a_l + w_e a_e + \\ & w_y a_y + w_b a_b \\ s. t. & \sum_{n=1}^N z_n k_n \leq k - a_k g_k, \sum_{n=1}^N z_n l_n \leq l - a_l g_l, \\ & \sum_{n=1}^N z_n e_n \leq e - a_e g_e, \sum_{n=1}^N z_n y_n \geq y + a_y g_y, \sum_{n=1}^N z_n b_n = b - a_b g_b \end{aligned} \quad (4)$$

在上述模型公式中，假设要素投入、期望产出和非期望产出这三者同等重要，因此这三者权重各赋值 1/3，再进一步划分，最终得到的指标权重矩阵为 $w' = (\frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})$ ，从而得到绿色发展效率的测算值为：

$$GDE = 1 - D(k, l, e, y, b; g) \quad (5)$$

基于以上模型的设定，借鉴 Zhang 和 Kong (2014) 的研究思路，选择相应的投入和产出指标，来对绿色发展效率进行测度，具体的指标选取情况所示。

核心解释变量： $C_i \times Y_i$ 是核心解释变量，对某个城市来说，当 $Y \geq 2012$ ，且该城市为低碳城市时，该城市对应的虚拟变量 $C_i \times Y_i$ 为 1，其系数表示政策的净效应，即反映低碳试点政策促进地区绿色发展效应的强弱。

控制变量：为了有效控制其他影响因素对被解释变量的影响，本文选取如下 5 个影响地区绿色发展效率的控制变量：经济发展水平 (pgdp)，本文采用城市当年的地区生产总值与年末常住人口的比重来表示；对外开放程度 (fdi)，采用地区外商直接投资占年末生产总值的比重来表征；政府干预水平 (gov)，以地方政府当年的财政支出占总 GDP 的比重来衡量；环境规制强度 (er)，借鉴董直庆和王辉 (2019) 的研究方法，通过采用城市各种污染物排放的综合指数来进行衡量；基础设施水平 (tra)，采用人均城市道路的覆盖面积来表示。

(2) 数据来源。

考虑到部分地级市数据获得难度较大，本文采用平均增长率方法进行补充，选取 2005—2018 年中国 285 个地级市的面板数据为研究的基础，数据来源于《中国统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》《中国区域统计年鉴》与地级市的年鉴以及官方网站等。同时，为消除异方差的影响和量纲问题，对统计数据进行对数化处理，涉及到价格的指数问题，均以 2005 年为基期进行不变价处理。

五、实证结果分析

1. 基准回归结果

(1) 平行趋势检验。

双重差分方法应在相同趋势假设成立的前提下进行，即政策没有实施之前，试点城市与非试点城市的绿色发展效率总体走势不存在系统性差异，整体变化趋势具有一致性。现有研究中关于平行趋势检验的方法很多，检验双重差分法适用性的一种常见方法是对实验组和控制组绿色发展效率的平均变化趋势进行绘制，但是由于低碳城市试点政策是通过不同批次实施的，随着实施批次的变化，城市所属组别也可能发生变化，所以利用事件分析法对本文的平行趋势进行检验更加具有准确性和合理性 (石大千等, 2018)。将低碳城市政策实施的 2012 年作为时间节点，分别以 2012 年的前后三年作为试点年份，观测政策变量的显著程度。如果低碳城市试点政策实施前年份的政策系数不显著且不等于 0，而政策实施后的年份政策系数显著且不等于 0，则表明低碳城市试点政策实施之前的两个组别的绿色发展效率不存在明显的差异性。结果显示 2012 年政策实施之前，差分项都不具有显著性，两个组别的绿色发展效率平均变化趋势具有一致性；而 2012 年政策实施之后，差分项系数均具有显著性且不等于 0，低碳试点城市的绿色发展效率明显提升，所以本文采用双重差分方法是合理的。

(2) 低碳试点城市对绿色发展效率的影响。

本文首先采用双重差分模型对低碳试点城市建设促进地区绿色发展的影响进行实证分析，模型 (1) 和 (2)、(3) 和 (4)、(5) 和 (6) 分别为全部城市、排除直辖市、普通地级市 (排除直辖市、省会城市和列入计划单列市) 的回归结果，相应地控制城市固定效应、时间效应，得到的具体结果如下表所示。

碳试点政策实施对地区绿色发展效率的作用结果，可以看出，不论模型中是否包含控制变量，低碳试点政策的实施总体上有利于地区绿色发展效率的提升，这也说明在推进低碳城市建设的过程中能够发挥经济增长效应和减排效应，证实了假设 1 的成立。同时，随着控制变量的加入，低碳试点政策的作用效果明显增强，这表明在提升城市绿色发展水平的过程中，其他影响因素也发挥着重要作用。控制变量中，经济发展水平的提高以及对外开放程度的扩大，更有助于提高城市间资源配置效率和要素的正常流动，进而增强低碳发展水平；政府财政支出所占比重的上升有利于提高企业进行绿色转型发展积极性；环境规制强度的加大在一定程度上会提高企业的环境成本，降低了绿色研发投入的水平，而城镇化推进的过程中，道路设施的建设更多地考虑了其对经济增长的影响，忽略了其对绿色发展的作用。

2. 基于 PSM-DID 的回归检验

前面的研究中若只考虑采用双重差分法来进行评估，需要满足平行趋势假设的要求，导致总体的回归结果可能会有偏差。因此，为保证回归结果的准确性，更进一步利用 PSM-DID 方法进行估计。首先，采用 Logit 回归模型来计算经济发展水平、对外开放水平、政府干预水平、环境规制强度和基础设施水平的倾向得分值；然后采用核匹配法（KernelMatching）对实验组和控制组的样本城市进行样本间的匹配，剔除匹配不成功的样本，对匹配后的数据再次进行回归分析。

采用倾向匹配得分法下 Logit 回归结果以及低碳试点政策的作用回归结果，可以发现，采用 PSM-DID 方法对数据样本进行筛选重新匹配后，模型的作用结果中核心解释变量的相关系数均在至少 5% 的显著性水平上为正，证实了低碳试点政策能够有效促进地区绿色发展水平的提高；而控制变量经过匹配后，大部分变量作用效果明显增强，进一步提高了回归结果的可靠性。

3. 异质性检验分析

由于地方城市在发展的过程中，地理位置、经济发展水平以及政策实施等方面存在较大差异，这可能会导致低碳试点政策实施对不同地区产生不同的反应。因此，本文进一步考察不同地区差异下低碳试点政策实施对地区绿色发展效率的影响，一是按照地理位置将样本分为东部、中部和西部地区这三个子样本，二是考虑到城市规模的不同，根据人口数量的分布情况，将城市分为中等城市、大型城市、II 型大城市、I 型大城市、特大型以及以上的城市等五类（孙林和周科选，2020），并进行相应的回归分析。

不同地理位置和城市规模下，低碳试点政策实施对不同地区的作用效果差异，对于东部地区，低碳试点政策实施更能够促进地区绿色发展水平的提高，中西部地区的作用效果相对较弱，这也与地区的经济发展水平相关，经济越发达的地区对于政策实施的规范要求越高，能源消费量增加的同时，对碳减排的碳锁定效应更加明显。同时，低碳试点政策实施对规模比较大的城市有更显著的促进作用，但是随着城市规模的逐渐扩大，这种促进作用呈现递减的趋势。

4. 影响机制检验

通过前文的分析可以发现，低碳试点政策的实施对地区绿色发展效率有显著的促进作用，但是仍需深入分析提高地区绿色发展效率的作用机制是什么？正如前文的理论分析中提到的，低碳试点政策的实施一方面通过发挥技术创新效应和要素积累效应来提高地区经济增长水平，另一方面通过发挥结构升级效应和资源配置效应来降低试点地区的碳排放量，进而实现绿色发展水平的提升。因此，本文借鉴 Baron 和 Kenny (1986)、石大千等 (2018) 对影响机制的研究方法来验证低碳试点政策促进地区绿色发展效率过程中，产生的四大效应的存在性，设定的具体模型如下。

一是检验低碳试点政策实施对四大效应的影响：

$$TI_i(FA_i, SU_i, RE_i) = \alpha_0 + \alpha_1 C_i + \alpha_2 Y_i + \alpha_3 (C_i \times Y_i) + \sum \alpha_j X_j + \lambda_i + \gamma_i + \mu_{it} \quad (6)$$

二是检验低碳试点政策实施对绿色发展效率的影响：

$$GDE_i = \beta_0 + \beta_1 C_i + \beta_2 Y_i + \beta_3 (C_i \times Y_i) + \sum \beta_j X_j + \lambda_i + \gamma_i + \mu_{it} \quad (7)$$

三是将倍差项和四大效应同时放入回归方程中，并分别与绿色发展效率进行回归：

$$GDE_{it} = \theta_0 + \theta_1 C_i + \theta_2 Y_i + \theta_3 (C_i \times Y_i) + \theta_4 TI_i(FA_i, SU_i, RE_i) + \sum \theta_j X_j + \lambda_i + \gamma_i + \mu_{it} \quad (8)$$

其中，TI 代表技术创新效应，本文采用各城市的人均授权专利数量来衡量，预期符号为正，表明低碳试点政策实施有助于提高地区技术创新水平，进而形成技术创新效应来促进绿色发展效率；FA 代表要素积累效应，本文重点考虑不同城市劳动和资本要素的影响，采用劳动资本存量来衡量，即资本存量与就业人口的比值，预期符号为正，表明低碳试点政策的实施有利于实现要素资本的流动，进而产生要素积累效应，提高经济实力，进而提高绿色发展效率；SU 代表结构升级效应，用各城市第三产业与第二产业的比值来衡量，预期符号为正；RE 代表资源配置效应，采用各城市的全要素生产率，地区全要素生产率的提高，更有助于提高资源利用效率，产生的资源配置效应降低了地区环境污染，进而增强绿色发展水平。

低碳试点政策实施作用于地区绿色发展效率的影响机制回归结果，从结果中可以看出，首先考虑低碳试点政策实施对产生的四大效应的影响，其中试点政策实施更有助于促进地区技术创新和产业结构水平升级，而对要素积累和资源配置的作用显著性水平并不高；其次是分析低碳试点政策实施对试点城市绿色发展效率的促进作用，可以看出其相关系数均显著为正；将四大效应和倍差项同时放入回归方程中得出的回归结果，发现低碳试点政策运行过程中产生的技术创新效应、要素积累效应、结构升级效应和资源配置效应均能够显著促进地区绿色发展效率水平，且相关系数变大，说明了这几大效应起到明显的中介促进作用。上述结果表明，低碳试点政策的实施存在这四大效应，并且技术创新和结构升级效应较显著，要素积累和资源配置效应仍需进一步提高。

5. 进一步的稳健性检验

为检验上述影响机制回归结果是否会随着四大效应的衡量标准变化而有所不同，本文通过改变衡量四大效应的指标进行稳健性检验。技术创新效应改用各城市 R&D 内部投资占 GDP 的比重衡量；要素积累效应改用人力资本积累量即地区就业人口占年末常住人口的比例来衡量；结构升级效应改用第二产业占三产总量的比值来衡量；能源替代效应改用各地区劳动生产率来衡量。

加入控制变量进行稳健性检验的回归结果。其中，第（1）到（4）列是低碳试点政策实施对四大效应的作用结果，（5）列是低碳试点政策对地区绿色发展效率的回归结果。整体来看，低碳试点政策的实施对技术创新效应影响的系数在 1% 的显著性水平上为正，对结构升级效应的影响系数在 5% 的显著性水平上为正，对要素积累和资源配置效应影响的系数在 10% 的显著性水平上为正，而将四大效应对绿色发展效率同时放入模型中，可以发现低碳试点政策的实施对绿色发展效率的影响在 1% 的水平上显著为正。这也与基准回归的结果一致，证实了回归结果的稳健性。同时，进一步证实了四大效应的存在性，即低碳试点政策在运行过程中产生技术创新、要素积累、结构升级和资源配置效应，从而有助于地区的绿色、低碳发展。

六、结论及政策建议

本文基于 2005–2018 年中国内地 285 个地级市面板数据，首先采用全要素非径向方向距离函数和 SBM-DEA 模型来测算地区绿色发展效率，然后利用双重差分模型和 PSM-DID 模型来检验低碳试点政策实施对城市绿色发展效率的影响变化，并对影响绿色发展效率的作用机制进行了分析，结果表明：(1) 不论是否加入控制变量，低碳试点政策的实施与地区绿色发展效率之间均存在显著的正向关系，说明低碳试点政策的运行能够显著促进地区绿色发展水平；(2) 从异质性的角度来看，低碳试点政策的实施对地区绿色发展效率的促进作用具有明显的差异性，具体来看，东部城市的绿色发展效率提升水平最为明显，中西部地区的城市作用效果相对较弱，低碳试点政策实施在大城市的促进作用更加显著，中等城市的作用并不明显，并且随着城市规模的扩大，低碳试点城市的作用效果呈现递减的趋势；(3) 影响机制检验结果表明，低碳试点政策实施过程中，主要通过提高技术创新水平、增加要素流动、加快产业结构升级以及提高资源配置效率来促进地区绿色发展效率水平的提升。

通过上述的研究结论，主要有以下的政策建议：

第一，扩大低碳试点实施的范围，进一步推行低碳试点城市的建设工作，并坚持“市场决定”和“政府调节”相结合的发展策略。研究结果表明，低碳试点政策的实施能够促进地区绿色发展效率，一方面要充分发挥低碳试点政策实施促进地区经济增长的潜力，确保低碳试点城市在运行过程中，逐步实现企业利润的最大化，激发经济发展活力；另一方面要强化低碳试点政策发挥的减排效应，提高企业的绿色技术创新水平，促使试点城市根据自身的实际发展情况制定低碳发展规划，为城市碳排放达峰和国家碳中和目标的实现作出贡献。

第二，继续提高地区技术创新水平，加快产业结构转型升级，同时要注重增加要素投入水平，提高资源配置效率。一方面在推进低碳城市建设中，要坚持科学发展的政策方针，始终贯彻习近平总书记的“绿水青山就是金山银山”的生态理念；另一方面要进一步发挥技术创新效应和产业结构升级效应的促进作用，提高企业的研发投入和科技创新实力，积极打造低碳产业，使得产业优化成为实现地区减排的重要途径；同时，要重视人力资本积累，增加要素流动性，不断提高资源利用效率，确保低碳试点政策的合理推进。

第三，注重不同效应间的协同作用，并充分考虑不同地区的经济发展程度，因地施策。低碳试点政策实施对地区绿色发展效率的提升具有区域异质性和规模异质性，因此，要加强中小城市在推进低碳试点城市建设中起到的重要作用，在实现区域整体发展过程中，更应该重视中西部地区的经济发展实力和资源禀赋情况，确保不同效应间的协调、均衡发展。

参考文献：

- [1]. Baron, R. M., and D. A. Kenny. The Moderator-Mediator Variable Distinction in Social Psychological Research: Conceptual, Strategic, and Statistical Considerations. *Journal of Personality and Social Psychology*, 1986, 51:1173–1182.
- [2]. Cai, B., C. Cui, D. Zhang, et al. China City-Level Greenhouse Gas Emissions Inventory in 2015 and Uncertainty Analysis. *Applied Energy*, 2019, 253:1–17.
- [3]. Cheng, B., H. Dai, P. Wang, et al. Impacts of Carbon Trading Scheme on Air Pollutant Emissions in Guangdong Province of China. *Energy for Sustainable Development*, 2015, 27:174–185.
- [4]. Cheng, J., J. Yi, S. Dai, et al. Can Low-Carbon City Construction Facilitate Green Growth? Evidence from China's Pilot Low-Carbon City Initiative. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 231:1158–1170.

-
- [5]. Gehrsitz, M. The Effect of Low Emission Zones on Air Pollution and Infant Health. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2017, 83:121-144.
- [6]. Porter, M. E., and C. Van der Linde. Toward a New Conception of the Environment-Competitiveness Relationship. *Journal of Economic Perspectives*, 1995, 9:97-118.
- [7]. Wang, H., and W. Wei. Coordinating Technological Progress and Environmental Regulation in CO₂ Mitigation: The Optimal Levels for OECD Countries & Emerging Economies. *Energy Economics*, 2020, 87:1-11.
- [8]. Wolff, H. Keep Your Clunker in the Suburb: Low Emission Zones and Adoption of Green Vehicles. *Economic Journal*, 2014, 124:481-512.
- [9]. Zhang, K., Z. Y. Zhang, and Q. M. Liang. An Empirical Analysis of the Green Paradox in China: From the Perspective of Fiscal Decentralization. *Energy Policy*, 2017, 103:203-211.
- [10]. Zhang, N. F., and Y. C. Kong. The Effect of Size-Control Policy on Unified Energy and Carbon Efficiency for Chinese Fossil Fuel Power Plants. *Energy policy*, 2014, 70:193-200.
- [11]. 陈林、伍海军：《国内双重差分法的研究现状与潜在问题》，《数量经济技术经济研究》2015年第7期。
- [12]. 陈楠、庄贵阳：《中国低碳试点城市成效评估》，《城市发展研究》2018年第10期。
- [13]. 董直庆、王辉：《环境规制的“本地-邻地”绿色技术进步效应》，《中国工业经济》2019年第1期。
- [14]. 杜宇、吴传清、邓明亮：《政府竞争、市场分割与长江经济带绿色发展效率研究》，《中国软科学》2020年第12期。
- [15]. 何爱平、安梦天：《地方政府竞争、环境规制与绿色发展效率》，《中国人口·资源与环境》2019年第3期。
- [16]. 胡鞍钢、周绍杰：《绿色发展：功能界定、机制分析与发展战略》，《中国人口·资源与环境》2014年第1期。
- [17]. 黄茂兴、林寿富：《污染损害、环境管理与经济可持续增长——基于五部门内生经济增长模型的分析》，《经济研究》2013年第12期。
- [18]. 林伯强、刘泓汛：《对外贸易是否有利于提高能源环境效率——以中国工业行业为例》，《经济研究》2015年第9期。
- [19]. 陆贤伟：《低碳试点政策实施效果研究——基于合成控制法的证据》，《软科学》2017年第11期。
- [20]. 石大千、丁海等：《智慧城市建设能否降低环境污染》，《中国工业经济》2018年第6期。
- [21]. 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》，《管理世界》2019年第6期。
- [22]. 孙林、周科选：《中国低碳试点政策对外商直接投资质量影响研究——来自“低碳城市”建设的准自然实验证据》，《东

南学术》2020 年第 4 期。

[23]. 熊广勤、石大千、李美娜：《低碳城市试点对企业绿色技术创新的影响》，《科研管理》2020 年第 12 期。

[24]. 徐现祥、李书娟：《政治资源与环境污染》，《经济学报》2015 年第 1 期。

[25]. 袁润松、丰超等：《技术创新、技术差距与中国区域绿色发展》，《科学学研究》2016 年第 10 期。

[26]. 张华：《低碳城市试点政策能够降低碳排放吗？——来自准自然实验的证据》，《经济管理》2020 年第 6 期。

[27]. 钟昌标、胡大猛、黄远浙：《低碳试点政策的绿色创新效应评估——来自中国上市公司数据的实证研究》，《科技进步与对策》2020 年第 19 期。