

城市创新能否助力低碳经济发展

——创新型城市试点政策对碳强度的影响评估及机制分析

王雅莉 侯林岐 朱金鹤¹

(石河子大学 经济与管理学院, 新疆 石河子 832003)

【摘要】: 创新是城市发展的力量之源, 低碳是城市发展的必由之路。将创新型城市试点作为一项准自然实验, 利用 2005—2018 年全国 275 个城市面板数据, 采用多期双重差分方法, 评估创新型城市试点对降低碳强度的政策效应及作用机制。研究发现: 第一, 创新型城市试点政策能够在降低碳强度的基础上推动低碳经济发展, 各类试点政策的推动效果依次为碳排放权交易政策>创新型城市政策>智慧城市政策>低碳城市政策>环境保护重点监控政策; 第二, 创新型城市试点政策可以通过规模经济效应、技术进步效应与结构转型效应 3 条路径助力低碳经济发展; 第三, 城市特质会影响创新型城市试点政策效应发挥, 创新型城市试点政策对碳强度的抑制效果呈现由东到西递增的地理空间差序格局、由高到低递减的城市等级差序格局, 在人口规模与抑制效果之间呈现倒 U 型作用, 并且资源型城市的抑制效果显著大于非资源型城市。

【关键词】: 创新型城市试点 低碳经济发展 碳强度 双重差分模型

【中图分类号】: F290 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1001-7348(2022)18-0039-11

0 引言

发展低碳经济是中国承担全球环境责任的重要体现, 也是实现中华民族伟大复兴的战略之举。当下, 日益增长的温室气体排放已经成为人类社会可持续发展的重大威胁。中国长期以来致力于通过降低碳排放强度(以下称碳强度), 推动低碳经济发展。2020 年 12 月, 习近平总书记在“气候雄心峰会”上宣布, 到 2030 年将实现单位 GDP 二氧化碳排放较 2005 年下降 65%以上, 且力争 2030 年前二氧化碳排放达到峰值, 2060 年前实现碳中和。上述愿景实现有赖于全社会在生活方式、生产技术、能源结构、经济体系上的绿色转型。

城市作为创新活动的空间载体和创新要素的集聚高地, 是低碳经济发展中不可或缺的责任主体和行动单元^[1,2]。为加快创新型城市建设, 2016 年科技部联合发改委制定《建设创新型城市工作指引》, 旨在把“创新驱动发展作为城市经济社会发展的核心战略”, 并营造“优良的人居环境和城市生态”。事实上, 中国早在 2008 年就设立深圳为首个国家创新型城市, 2010 年又审批通过大连、青岛等 41 个城市, 2011 年确立长春、连云港等在内的 6 个城市, 2012 年增加 3 个城市, 2013 年、2018 年又分别新

¹**作者简介:** 王雅莉(1994-), 女, 河南安阳人, 石河子大学经济与管理学院博士研究生, 研究方向为区域经济学与环境经济学; 侯林岐(1994-), 男, 河南商丘人, 石河子大学经济与管理学院博士研究生, 研究方向为产业经济学; 朱金鹤(1979-), 女, 新疆昌吉人, 博士, 石河子大学经济与管理学院教授, 博士生导师, 研究方向为区域经济学、环境经济学与制度经济学。

基金项目: 国家社会科学基金项目(14BJY204); 教育部社科基金项目(21YJA790086); 兵团社科基金项目(19YB13)

增 10 个与 17 个城市；截至 2018 年末，已有 76 个地级以上城市和 2 个县级市成为国家创新型城市试点。

那么，城市创新政策能否助力低碳经济发展？这是本文将研究的问题。当下，学界关于创新与低碳经济关系的探索尚有局限，主要表现为：第一，学界多聚焦于低碳政策对技术创新的倒逼作用。如有研究证明，低碳城市试点政策能够促进上市公司绿色专利申请数增加、提升城市创新指数和创业指数^[1,3]，且碳排放权交易试点政策有助于激发企业低碳技术创新^[4,5]，但是鲜有研究关注创新政策对低碳经济发展的推动作用。第二，现有低碳经济研究多从研发投入、专利数量视角切入，少有探究政府参与下创新政策的低碳经济效应。如 Xu & Lin^[6]、Yu & Xu^[7]指出，增加研发投入能从工业层面降低能源强度、减少二氧化碳排放；李巍和郝永勤^[8]、Churchill 等^[9]证明，R & D 投入、专利数、财政科技支出有助于促进低碳发展。第三，关于创新政策促进低碳经济发展的路径研究较匮乏。如聂飞和刘海云^[10]证明，创新型城市政策对 FDI 质量具有正向影响，而 FDI 质量提升有利于遏制国内污染；张华和丰超^[2]证明，创新型城市政策能够通过促进科技创新、优化产业结构和转变发展方式等提升碳排放绩效。

为准确评估城市创新对低碳经济发展的影响，本文将创新型城市政策视作一项准自然实验，采用多期双重差分方法评估创新型城市试点对降低碳强度的政策效应及作用机制。相比于以往文献，本文的边际贡献包括：第一，在研究视角上，王少剑和黄永源^[11]指出，对于发展中国家来说，用碳强度量化减排目标比碳排放总量或人均碳排放量指标更有现实意义。因此，本文以碳强度为切入点，探究城市创新对低碳经济发展的推动作用，从而扩充政府参与下创新政策对碳强度影响的研究视角。第二，在作用机制上，在参考 Grossman & Krueger^[12]、Brock & Taylor^[13]研究的基础上，从规模经济效应、技术进步效应和结构转型效应 3 个角度考察经济集聚、全要素生产率和产业结构在城市创新助力低碳经济发展中的中介作用，厘清创新政策影响低碳经济发展的路径。第三，在研究深度上，不仅考察创新型城市政策对低碳经济发展的推动作用，而且对比分析低碳城市、文明城市、智慧城市、碳排放权交易试点与环境重点监控等系列政策冲击对低碳经济发展的影响效果，并围绕地理位置、人口规模、行政等级和资源禀赋进行异质性探讨。

1 理论分析与研究假设

1.1 创新型城市政策对低碳经济发展的推动作用

创新是低碳经济发展的根本保证，国家创新型城市建设的考核指标、主要任务、驱动模式均与低碳经济发展有着深刻的内在关联。具体表现为：第一，绿色低碳理念蕴含在创新型城市建设考核指标中。《建设创新型城市指标体系》阐明了创新型城市的具体考核指标，其中包括万元 GDP 综合能耗、单位 GDP 二氧化碳排放等突出绿色低碳的基础指标与特色指标。这些指标要求试点城市将绿色低碳技术研发作为技术创新的重要维度，从而推动低碳经济发展^[2]。第二，创新型城市建设以实现社会可持续发展为主要任务，而低碳是经济社会可持续发展的重要内容。一方面，低碳经济发展源于可持续发展，如二氧化碳减排措施是推动可持续发展的重要举措^[2]；另一方面，由科技部印发的《关于进一步推进创新型城市政策工作的指导意见》指出，创新型城市的主要任务包含“加快经济发展方式转变、促进经济社会协调可持续发展……”等具体项目^[10]。由此可见，创新型城市建设也是推进低碳经济发展的过程。第三，创新驱动模式符合低碳经济发展要求。创新型城市建设要求城市驱动力由传统的资源、资本转向科技、知识、人才等创新要素。这种驱动模式有助于生活理念转向低碳消费、低碳出行^[14]，有助于生产模式由资源、劳动密集型向知识、技术密集型过渡，有助于传统行业发展融合“互联网+”、数字经济等新技术优势^[15]，有助于城市发展由高投入、高消耗的粗放型转向绿色低碳的集约式。基于上述分析，本文提出研究假设：

H₁: 创新型城市政策能够有效降低碳强度。

1.2 创新型城市政策对低碳经济的推动路径

环境问题的根源在于规模、技术与结构变化^[16]，碳排放作为环境问题的一种，与污染物排放具有同根同源的典型特征。碳排放与污染物排放均包含煤、石油、天然气等化石能源的燃烧^[17]，企业污染能源的利用效率、清洁生产技术水平均是造成碳排放与

污染物排放的直接影响因素^[18],并且碳排放与污染物排在治理方式上具有共同点,如政府环保政策、排污许可、税收管制均有助于提高污染企业进入壁垒与环境成本,进而减少碳排放与污染物排放^[5,19]。同时,碳排放与污染物排在产生根源、治理方式上的共同特征决定了低碳经济与绿色经济的推动路径也具有相似性。Grossman & Krueger^[12]、Brock & Taylor^[13]指出,经济活动对环境的影响会通过规模变化效应、技术进步效应和结构转型效应3个途径产生。其中,经济规模总量增长会加大排放量,即规模变化效应对碳排放的预期通常为负^[16],但规模经济效应对碳排放的影响却不甚相同。集聚经济理论认为,集聚会产生规模经济效应与拥挤效应^[20],当经济聚集处于一定阈值范围内时,信息、知识和技术的溢出效应更显著、污染治理更集中、资源利用效率更高,即规模经济效应有利于节能减排^[21,22]。基于此,本文从规模经济效应、技术进步效应和结构转型效应3个方面探讨创新型城市政策的低碳推进路径,其理论机制如图1所示。

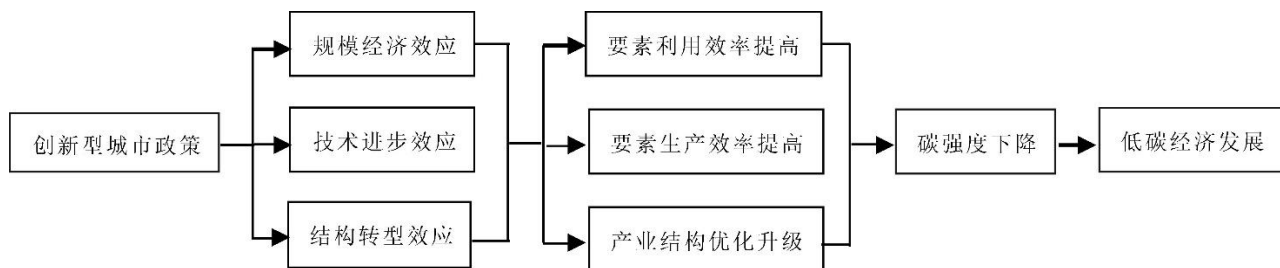


图1 创新型城市政策对低碳经济的推进路径

1.2.1 规模经济效应

创新型城市政策能够吸引不同生产要素在城市空间内聚集,伴随聚集形成的规模经济效应可降低碳强度。一方面,经济聚集是规模经济效应发挥的基础,而创新型城市政策能够带来生产要素的空间集聚。《建设创新型城市工作指引》指出,创新型城市建设应以创新要素集聚为重点任务^[212],该任务导向会推动试点城市创新服务聚焦、创新资源集聚、创新主体集聚与新兴产业聚变。理论上,税收优惠、财政补贴、金融支持等创新服务聚集无疑会加快对国内外资金、技术、人才与信息创新资源的吸纳^{[23,24,25]23-25},在创新资金、创新人才、创新信息和创新技术等生产要素的共同作用下,加快新兴产业聚变与创新型产业聚集,进而形成以创新型城市试点为中心的吸附效应、聚合效应和规模效应^[212]。另一方面,经济聚集具有两面性,关于聚集能否助力节能减排一直是学界争论的焦点。理论上,工业污染排放量主要取决于生产技术、治污努力程度以及公众与政府的监督成本,上述机制都具备规模经济性^{[26]26},而紧凑的生产模式和环境治理模式有助于提高人力、物力等要素利用率。事实上,聚集通过规模经济效应产生的节能减排效应也得到一些证实。如陆铭和冯皓^{[26]26}证明,经济活动的空间集聚有利于降低单位工业污染排放强度;任晓松^{[27]27}指出,现阶段城市经济集聚水平提高有利于降低碳强度。综上所述,本文提出研究假设:

H₂:创新型城市政策能够通过规模经济效应降低碳强度。

1.2.2 技术进步效应

创新型城市政策的直接目的是提高城市技术水平,而技术进步是解决环境问题的重要手段^[212]。一方面,创新型城市旨在建设以科技创新为核心驱动力的城市,并以加强科学技术基础能力建设、突破产业关键核心技术为任务导向。在《建设创新型城市指标体系》中,明确要求地方研发投入占生产总值的2.5%以上、科技进步贡献率达60%以上。曾婧婧和周丹萍^{[28]28}、徐换歌和蒋硕亮^{[25]25}指出,创新型城市试点具有强烈的政策引导作用和标杆示范作用,不仅能够激发本城市在全要素生产率、R & D支出和专利价值等方面提升创新能力,而且有利于促进相邻城市创新能力提升。另一方面,技术进步对二氧化碳排放的遏制作用也得到学界的普遍认同。从排放规模看,能源偏向型技术进步有助于降低能源消耗强度,清洁生产技术进步有助于在生产过程或末端治理中减少二氧化碳量排放^{[29]29}。从产出规模看,技术进步有助于提高要素边际生产率,带动企业扩大产出、弥补成本增加。由于

要素边际生产率提高，总产出增大，全局碳强度得以降低。综上所述，本文提出研究假设：

H₃:创新型城市政策能够通过技术进步效应降低碳强度。

1.2.3 结构转型效应

创新型城市政策能够倒逼城市产业结构转型，而产业结构转型升级是缓解经济活动对环境影响的重要途径。一方面，《建设创新型城市指标体系》中包含高新技术企业数占规模以上工业企业数比重、知识密集型服务业增加值占地区 GDP 比重等与产业结构高级化相关的指标^[23]，这意味着通过验收评估的城市在一定程度上实现了产业结构升级。胡兆廉等^[24]指出，创新型城市建设通过构建相应创新指标体系，能够促进创新要素聚集和创新环境改善，进而推动产业结构转型。另一方面，产业结构是影响环境的关键因素。从产业结构高级化的低碳经济效应来讲，工业是能源消耗的主要领域，产业结构由资源密集型转向知识、技术密集型有助于降低经济增长对能源资源的依赖，进而降低碳排放强度^[30]。从产业结构合理化角度而言，产业分工细化、专业化合作频繁、要素从低生产效率部门向高生产效率部门转移有助于提高资源利用效率、降低碳排放强度^[22]。当下，针对产业结构高级化的低碳经济效应研究很多，但是关于产业结构合理化的低碳经济效应尚未达成一致结论。如李巍和郝永勤^[8]指出，高技术产业耗能更少、碳排放更低，碳强度仅为全行业的 5.3%；程中华等^[31]指出，产业结构高级化的减排效应较显著，而产业结构合理化的减排效应较弱。综上所述，本文提出研究假设：

H₄:创新型城市政策能够通过结构转型效应降低碳强度。

2 实证设计与数据说明

2.1 模型构建

本文将创新型城市试点作为一项准自然实验，利用多期双重差分方法，考察城市创新政策能否助力低碳经济发展。在研究对象上，考虑到数据有效性，剔除数据缺失严重的城市，保留 275 个地级以上城市作为研究对象。在研究批次上，考虑到数据可得性，将研究时间定为 2005—2018 年，以 2008 年、2010 年、2011 年、2012 年、2013 和 2018 年通过的 76 个创新型城市作为实验组，其它未获批城市作为对照组。在研究方法上，参考胡兆廉等、曾婧婧和周丹萍^[24, 28]的研究，构建多期双重差分模型以识别创新型城市低碳经济效应。基准回归模型设定如下：

$$Y_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 DID_{it} + \sum \alpha_2 control_{it} + \sum city + \sum year + \epsilon_{it} \quad (1)$$

其中，i 和 t 分别表示城市与时间；Y_{it} 表示被解释变量，即碳强度；DID_{it} 为本文核心解释变量，代表城市是否入选创新型城市试点；control_{it} 为一系列城市层面的控制变量；city 和 year 为城市与年份虚拟变量；ε 为不可观测的随机误差项。

2.2 数据说明

(1) 被解释变量：碳强度(CI)。

城市碳强度由每单位 GDP 的二氧化碳排放量取对数表示。借鉴任晓松、张般若和李自杰^[27, 30]的核算方法，采用天然气、液化石油气、全社会用电量三类能源消费测算。其中，我国城市发电仍然以煤炭为主力，因此以燃煤发电测度二氧化碳排放。测算公式如式(2)–式(3)所示。

$$CO_2 = C_n + C_p + C_e = kE_n + vE_p + \varphi(\eta \times E_e) \quad (2)$$

$$CI = CO_2 / GDP_{real} \quad (3)$$

式中, CO_2 表示二氧化碳排放总量, CI 表示二氧化碳强度, GDP_{real} 表示城市实际生产总值; C_n 、 C_p 和 C_e 分别代表天然气、液化石油气和全社会用电量产生的二氧化碳排放量; E_n 为天然气消费量、 E_p 为液化石油气消费量、 E_e 为全社会用电量; k 为天然气排放系数, v 为液化石油气排放系数, ϕ 为煤电燃料链温室气体排放系数, η 为总发电量中煤电比重。其中, 二氧化碳排放系数参考任晓松 (2020) ^{[27][27]} 的研究与《省级温室气体清单编制指南》, 将天然气、液化石油气和煤电燃料链温室气体的排放系数分别设定为 $2.1622\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $3.1013\text{kg}/\text{kg}$ 、 $1.3023\text{kg}/\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

(2) 解释变量: 创新型城市虚拟变量 (DID)。

本文核心解释变量的设定以城市是否出现在国家科技部网站公布的试点名单上为依据。该变量界定如下: 对于城市 i 来讲, $t \in [\text{未获称号}, \text{获得称号}]$, $DID_{it}=0$; $t \in [\text{获得称号}, \text{保持称号}]$, $DID_{it}=1$ 。

(3) 中介变量: 经济集聚程度 (Gather)、全要素生产率 (TFP) 和产业结构高级化 (Structure)。

第一, 由于经济聚集是规模经济效应发挥的基础 ^{[22][22]}, 因此采用经济集聚反映规模经济效应, 而经济聚集通常以非农产业增加值/城市行政土地面积表征。第二, 技术进步是技术创新或技术引进的结果, 表现为全要素生产率提升 ^{[32][32]}, 因此采用全要素生产率反映技术进步效应。借鉴孙晓华和郭玉娇 ^{[33][33]} 的研究, 利用公式 $TFP = \ln(Y/L) - \theta \ln(K/L)$ 计算得到。其中, Y 为产出, 以国内生产总值衡量; K 为固定资产投资总额, 是利用永续盘存法计算得到的资本存量; L 为劳动力, 以从业总人数衡量, θ 为资本产出弹性, 取 $1/3$ 。第三, 程中华等 ^{[31][31]} 指出, 产业结构高级化的低碳经济效应相较于产业结构合理化的低碳经济效应更显著, 因此采用产业结构高级化反映结构转型效应, 产业结构高级化通常以第三产业产值/第二产业产值表征。

(4) 控制变量: 人口总量 (Population)、财政科教偏向 (Finance)、绿化水平 (Green)、公共交通 (Bus)、人口素质 (Student) 和对外开放 (Open)。

其中, 人口总量和财政科教偏向参考张般若与李自杰 ^{[30][30]} 的研究, 分别采用年末常住人口数、财政科教支出/财政总支出衡量; 绿化水平和公共交通参考逯进 ^{[34][34]} 的研究, 分别采用绿地面积、百万人拥有公共汽电车辆表征; 人口素质和对外开放参考卞元超等 ^{[16][16]} 的研究, 分别采用百万人拥有大学生数、外商直接投资占 GDP 比重衡量。

以上数据中, 创新型城市名单来自国家科技部网站, 城市科技水平数据来源于中国研究数据服务平台 (CNRDS), 发电量中煤电比重由《中国电力统计年鉴》获取, 其它数据来自 2006—2019 年的《中能源统计年鉴》、《城市统计年鉴》。相关变量描述性统计如表 1 所示。

3 实证结果分析

3.1 基础回归结果

为了控制不同批次试点之间的禀赋差异, 以证明创新型城市试点政策效果具有普适性, 参考朱金鹤等 ^{[35][35]} 的研究方法, 作如下设计: 一方面, 采用未控制时间效应的单差分模型和双向固定效应下的双重差分模型, 对比评估全样本下创新型城市政策对低碳经济发展的推动作用, 回归结果如第 (1)–(2) 列所示; 另一方面, 利用双向固定效应下的双重差分模型分批次估计创新型城市

政策对碳强度的影响，回归结果如第(3)–(7)列所示。考虑到数据滞后性，难以获得政策实施后 2018 年确立的第六批试点样本数据，因此参考陈晨和张广胜^{[23][23]}的研究，将第六批试点仅作为对照组，检验前五个批次的政策效应。

表 1 变量描述性统计结果

符号	变量名称	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
CI	碳强度	3850	6.875	0.911	0.332	19.158
DID	创新型城市试点	3850	0.130	0.336	0	1
Gather	经济集聚	3850	0.223	0.566	0.002	13.018
TFP	全要素生产率	3850	1.439	0.328	0.240	2.949
Structure	产业结构高级化	3850	0.887	0.497	0.094	9.482
Population	人口总量	3850	0.045	0.031	0.002	0.340
Finance	财政科教偏向	3850	0.014	0.015	0	0.212
Green	绿化水平	3850	0.580	1.141	0.001	14.705
Bus	公共交通	3850	0.067	0.253	0.001	8.115
Student	人口素质	3850	1.708	2.284	0	13.112
Open	对外开放	3850	0.018	0.019	0	0.196

回归结果初步证明创新型城市政策对低碳经济发展具有推动作用，且各批次的效果存在差异。一方面，在全样本下无论是采用单差分模型估计还是双重差分模型估计，创新型城市试点对碳强度的政策效应均显著为负，说明创新型城市政策在整体上能够有效降低碳强度；而单差分模型下的估计系数明显高于双重差分模型下的估计系数，说明单差分模型会在一定程度上造成政策效应的高估。另一方面，2010 年、2011 年与 2013 年 3 个批次的政策效应分别在 1%、5%和 10%的水平下显著负相关，而 2008 年与 2012 年批次的政策效应并不显著。原因可能是，2010 年仅有深圳 1 个城市成为试点，2012 年有 3 个城市成为试点，实验组样本量较少，因此难以呈现政策效果；2010 年有 39 个地级及以上城市成为试点，占试点总数的 54.17%，因此 2010 年批次的政策效应系数估计值最大且最显著。这在一定程度上证明了假设 H₁。

3.2 平行趋势假设检验

平行趋势假设是双重差分模型结果无偏的重要前提。借鉴徐佳和崔静波^[1]的研究方法，对各城市面临政策冲击的年份以及该年份之前的碳强度进行检验，若回归结果显示伴随碳强度变化处理组与对照组不存在显著差异，则样本满足平行趋势假设。本文采用图示方法报告平行趋势检验结果，图 2 是在 95%置信区间下创新型城市政策对碳强度的回归系数。

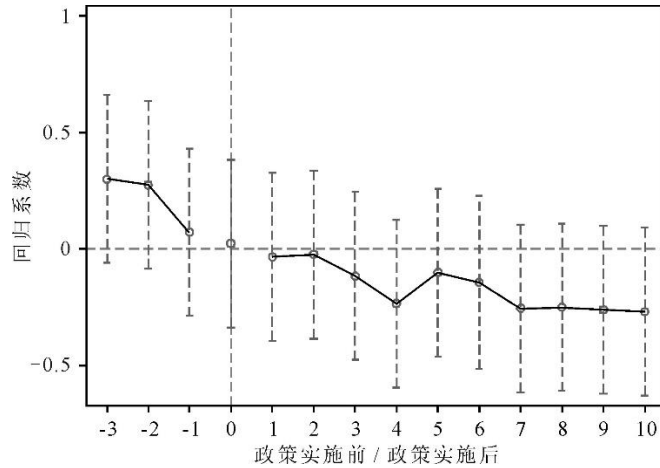


图 2 平行趋势假设检验结果

结果表明，创新型城市政策对城市碳强度的回归系数在政策实施前为正且没有通过显著性检验，说明实施前伴随城市碳强度变化处理组与对照组不存在显著差异，样本结构满足平行趋势假设。当城市入选为全国创新型城市试点后，城市创新政策对碳强度的回归系数开始显著为负，且在政策实施后的 4 年内其绝对值呈上升趋势，表明创新型城市建设对碳强度的抑制作用逐渐提升；在政策实施后的 7~10 年内该作用增速放缓，这可能是因为在试点政策推行初期，创新驱动下的城市转型空间较大，能充分释放政策红利，进而降低碳强度，但到后期依靠单个政策难以持续维持抑制效果。

3.3 稳定性分析

(1) 基于倾向得分匹配的双重差分。

为避免创新型城市试点获批并非是完全随机选择的结果，也为规避由其它不可观测、不随时间变化因素导致城市低碳经济发展能力存在差异，本文采用倾向匹配的双重差分方法对回归结果进行稳健性检验。参考朱金鹤等^[36]的研究，以控制变量作为匹配变量，利用 Logit 模型和 K 近邻匹配法进行假设检验，最终得到匹配后的样本 3649 个。经过匹配处理后，各变量处理组与控制组检验结果均接受无系统差异的原假设。在此基础上，依据上述匹配结果对模型进行估计，结果如第 (1) 列所示。可以发现，创新型城市试点政策对碳强度的影响依然在 5% 水平下显著为负，说明基准回归结果具有一定稳健性。

(2) 替代变量法。

本文采用能源消费强度作为碳强度的代理变量，重新进行回归。回归结果如第 (2)–(3) 列所示，可以发现，创新型城市试点政策对能源消费强度的政策效应在 5% 与 10% 水平下显著为负，较之基准回归系数估计值有所上升。这一方面表明创新型城市具有的节能减排效果并不因为替换核心解释变量而受到显著影响；另一方面表明相比碳强度，创新型城市试点政策对能源消费强度的抑制作用更显著。

(3) 子样本检验。

由于创新型城市试点选择存在“挑选赢家”的行为动机，可能引发政策效应评估偏误。基于此，本文剔除处理组中的北京、上海、广州、深圳等一线与新一线城市子样本，重新估计创新型城市试点的低碳经济效应。可以发现，一方面，在剔除一线与新一线城市后，回归结果依然在 10% 水平下显著为负，佐证了基准回归结果的稳健性；另一方面，子样本政策效应的估计系数相较于全样本结果有所上升，说明创新型城市试点对普通城市碳强度的抑制作用强于一线与新一线城市。

(4) 排除其它政策影响。

由于在设定创新型城市试点政策虚拟变量时无法排除同期内其它政策对碳强度的影响，即无法回答处理组与控制组的碳强度变化是由创新型城市试点政策带来的，还是同时期其它政策带来。因此，本文依次将智慧城市(ZH)、低碳城市(DT)、文明城市(WM)、碳排放权交易试点城市(TJ)与环境保护重点监测城市(JK)5种政策设置为虚拟变量纳入回归，以评估创新型城市试点政策对碳强度的净效应，变量界定方法与创新型城市试点政策的虚拟变量(DID)一致。具体计算公式如下：

$$Y_{it} = \lambda_0 + \lambda_1 DID_{it} + \lambda_2 ZH_{it} + \lambda_3 DT_{it} + \lambda_4 WM_{it} + \lambda_5 TJ_{it} + \lambda_6 JK_{it} + \sum \lambda_7 control_{it} + \sum city + \sum year + \epsilon_{it} \quad (4)$$

回归结果表明，创新型城市试点政策能够独立于其它政策之外对碳强度产生抑制作用。除文明城市试点政策外的智慧城市、低碳城市、碳排放权交易和环境保护重点监测城市等试点政策均可以在一定程度上推动城市节能减排；在推动效果上，碳排放权交易政策>创新型城市政策>智慧城市政策>低碳城市政策>环境保护重点监控政策。具体来看：第一，在纳入其它政策虚拟变量后的第(1)–(6)列中，创新型城市试点对碳强度的政策效应依然在 1%或 5%水平下显著为负，表明创新型城市试点政策具有降低碳强度的净效应。第二，ZH、DT、TJ 和 JK 政策在第(1)、(2)、(4)、(5)和(6)列中均保持 1%或 5%水平下的负向显著，且除第(3)列外，创新型城市估计系数的绝对值相较于上文回归结果(−0.082)均有上升，表明除文明城市外的其它 4 种城市政策也能够降低碳排放强度，而创新型城市对低碳经济发展的促进作用因为智慧城市、低碳城市和碳排放交易权和环境保护重点监控试点政策的实施而得到增强。第三，从第(6)列中各政策试点的估计系数不难发现，TJ>DID>ZH>DT>JK，表明创新型城市政策与其它试点政策在降碳减排效果上存在差异。①碳排放权交易试点政策效果明显优于低碳城市试点政策，这可能是由于碳排放权交易试点是市场化减排利器，相比于行政命令型的环境规制方式，更能激发企业降碳的内驱力，因此能够取得更好的政策效果；②智慧城市试点政策效果仅次于创新型城市试点政策，这可能是由于智慧城市试点与创新型城市试点在政策目标上具有相似性，均具有推动科技进步、促进创新赋能的试点建设要求，因此在政策效果上较相近；③相比其它政策，环境保护重点监测城市试点政策的降碳减排效果较弱，这可能是由于环境保护重点监测城市试点政策是针对企业污染排放展开，而非碳排放，但污染排放与碳排放具有同根同源、共同治理特征，因此该政策具备降低碳强度的效果但效果一般；④文明城市的政策目标更加偏向城市道德素质建设，而道德素质的提升周期较长且在实践中非正式环境规制的作用弱于正式环境规制，因此不能显著促进城市碳强度下降。

(5) 反向因果检验。

为通过实证进一步排除低碳强度地区更容易获批创新型城市的可能性，参考逯进^[35]的研究方法，将创新型政策试点作为被解释变量，且考虑到环境改善存在一定时滞性，因此将滞后两期的碳强度作为解释变量进行回归。可以预见的是，若回归结果显著则证明碳强度低的城市更容易获批创新型试点，反之则证明创新型试点获批与城市碳强度无关。可以发现，第(1)–(6)列均未通过显著性检验，表明不存在反向因果关系。这是因为创新型城市评选指标涉及创新要素集聚、创新创业环境、创新社会贡献等多个方面，而低碳发展只是创新贡献中的一部分，因此不存在城市碳强度较低更容易获批试点的可能性。

3.4 安慰剂检验

为排除由人为设定或遗漏变量引起的系统性偏误，进一步通过安慰剂检验以确保回归结果的稳健性。①构建虚拟的创新型城市政策时间，以创新型城市试点获批前的 1~3 年作为政策虚拟变量，纳入模型重新回归，结果如第(1)–(3)列所示；②构建虚拟的创新型城市试点，从每批次随机抽取同样样本量的城市作为假设的各批次试点，建立虚拟政策变量并重新回归，(4)–(8)列所示，结果显示，创新型城市政策对碳排放的抑制作用不存在人为设定的可能。(1)–(8)列的政策效应均未通过显著性检验，表明创新型城市政策效应只在国家科技部网站公布的既定时间和既定城市下才显著，基准回归结果不存在系统性偏误，研究假设 H1

得到验证。

4 中介机制检验

理论分析指出,创新型城市试点能够通过规模、技术和结构三种效应助力低碳经济发展。为了进一步检验创新型城市政策对碳强度的影响机制,以经济集聚代表规模经济效应,全要素生产率代表技术进步效应,产业结构升级代表结构转型效应,参考胡兆廉等^[24]、朱金鹤^[35]的研究方法,在模型(1)的基础上构建中介效应计量模型如下:

$$Media_{it} = \beta_0 + \beta_1 DID_{it} + \sum \beta_2 control_{it} + \sum city + \sum year + \epsilon_{it} \quad (5)$$

$$Innovate_{it} = \gamma_0 + \gamma_1 DID_{it} + \gamma_2 Media_{it} + \sum control_{it} + \sum city + \sum year + \epsilon_{it} \quad (6)$$

其中, $Media_{it}$ 为中介变量,其它变量含义与前文一致,模型(5)为创新型城市虚拟变量对中介变量的回归方程,模型(6)为创新型城市虚拟变量与中介变量共同对碳强度的回归方程。可以预见的是,基础回归中,在 α_1 显著的情况下,若 β_1 、 γ_1 与 γ_2 均显著,则说明 $Media_{it}$ 在创新型城市的低碳经济效应中承担部分中介作用。

回归结果表明,创新型城市政策可以通过提升经济集聚程度、提高全要素生产效率、加快产业结构升级三条通路发挥规模经济效应、技术进步效应与结构转型效应,进而助力低碳经济发展。具体来看:第(1)列为基准回归结果,结果显示,创新型城市政策对碳强度的系数估计值为-0.082 且在 5%水平下显著,满足机制检验的前提要求;第(2)–(7)列分别为三大效应机制检验结果。一方面,创新型城市政策对经济集聚、全要素生产率与产业结构升级的影响均在 1%或 5%水平下显著为正,说明创新型城市政策能够诱发三大效应。另一方面,经济集聚、全要素生产率与产业结构升级对碳强度的影响均在 1%、5%和 10%的水平下显著为负,说明三大效应发挥能够有效降低碳强度。同时,加入中介变量的创新型城市政策对碳强度影响系数的绝对值较基准回归有所降低,进一步说明三大效应在创新型城市助力低碳经济发展中承担部分中介作用。至此,假设 H_2 、 H_3 、 H_4 得以证明。

5 异质性分析

(1) 地理位置异质性。

本文构建地理位置虚拟变量(D_i),按照地理位置,将样本划分为东部(D_{11})、中部(D_{12})和西部(D_{13})三组,将地理位置虚拟变量与政策变量交互项带入模型,分析地理位置异质性下创新型城市政策对碳强度影响的差异,第(1)–(3)列所示。结果显示,创新型城市政策对碳强度的抑制效果呈现由东到西递增的空间差异格局。其原因可能是,相比于中西部城市,东部城市碳排放强度初始值较低,经济发展并不依赖于高污染高耗能产业,因此创新驱动的边际作用有限;而中部地区是中国重要的制造业集群地,地区工业化尚处于起步上升阶段,依靠创新驱动能够促进经济发展从粗放型转向集约型,因此创新驱动的边际作用较显著。

(2) 人口规模异质性。

本文构建人口规模虚拟变量(D_2),结合《关于调整城市规划标准的通知》,将样本划分为超大特大型城市(D_{21})、I型大城市(D_{22})和II型大城市(D_{23})三组,将人口规模虚拟变量与政策变量交互项带入回归模型,分析人口规模异质性下创新型城市政策对碳强度影响的差异,回归结果如第(4)–(6)列所示。结果显示,人口规模与创新型城市碳强度抑制效果呈现倒U型关系。其原因可能是,一方面,超大与特大类城市如北京、上海、广州等城市的要素利用效率、要素生产效率和产业结构高级化水平均较高,

因此创新型城市政策的边际作用有限；另一方面，人口是城市发展的生产力与消费力，而Ⅱ类大城市人口规模较小，集约式发展所需的内在驱动力和人才聚集力均不足，因此Ⅰ类大城市创新对碳排放的抑制作用最显著。

(3) 行政等级异质性。

本文构建行政等级虚拟变量(D_3)，将样本划分为高行政等级城市(直辖市、副省级和省会城市， D_{31})与普通城市(D_{32})，将行政等级虚拟变量与政策变量交互项带入回归模型，分析行政等级异质性下创新型城市政策对碳强度影响的差异，回归结果如第(7)–(8)列所示。结果显示，创新型城市对副省会、省会城市碳强度的抑制作用强于普通城市。其原因可能是，行政级别高的城市积累了更多要素存量，且相较于要素匮乏的一般地市，高等级城市在创新型城市建设过程中能灵活自主地调配资源，集中力量谋创新优势。

(4) 资源禀赋异质性。

构建资源禀赋虚拟变量(D_4)，按照国务院印发的《全国资源型城市可持续发展规划(2013–2020年)》通知，将城市划分为资源型城市(D_{41})与非资源型城市(D_{42})，将资源禀赋虚拟变量与政策变量交互项带入回归模型以分析资源禀赋异质下创新型城市对碳强度影响的差异，结果如第(9)–(10)列所示。结果显示，资源型城市创新对碳强度的抑制作用强于非资源型城市。其原因可能是，非资源型城市的初始资源依赖度较低，创新水平相对前沿，创新驱动下的转型空间小于资源型城市，而资源型城市的碳排放总量与碳度均处于高值，实施创新驱动的边际效用更显著。

6 结论与政策建议

创新驱动是低碳经济发展的根本保证，而低碳经济是应对气候问题的必然选择。本文将2008年开始实施的创新型城市试点作为一项准自然实验，利用2005—2018年全国275个城市面板数据，采用多期双重差分方法评估创新型城市试点对降低碳强度的政策效应及作用机制。研究得出：①创新型城市试点政策能够在降低碳强度的基础上推动低碳经济发展，且各批次的推动效果具有差异，不同试点政策的推动效果依次为碳排放权交易政策>创新型城市政策>智慧城市政策>低碳城市政策>环境保护重点监控政策；②创新型城市政策可以通过提升经济集聚程度、提高全要素生产效率、加快产业结构升级3条路径发挥规模经济效应、技术进步效应与结构转型效应，进而助力低碳经济发展；③创新型城市试点政策抑制碳强度的边际作用呈现出由东到西递增的地理空间差异格局、由高到低递减的城市等级差异格局，人口规模与碳强度抑制效果呈现倒U型关系，资源型城市的试点效果优于非资源型城市。

本文政策启示为：第一，促进城市创新与低碳经济深度融合，完善创新型城市试点的顶层设计。一方面，应加大创新型城市试点专项资金支持，通过财政补贴、融资优惠和绿色金融等政策，引导企业加大研发投入、加快低碳技术突破；另一方面，应提高创新型城市试点考核中低碳创新指标权重，以绿色低碳为导向对城市创新成果进行评估。第二，以技术进步引领产业结构高级化，以经济集聚带动经济发展集约化。一方面，技术进步是产业结构高级化的重要途径，应以技术进步加快工业化进程、促进落后产能淘汰、推动需求结构改善、带动新兴产业发展。另一方面，促进产业园内部的知识溢出和技术溢出，发挥经济集聚的规模效应，并以城市为依托，形成以城市群和都市圈为基础的要素聚集高地。第三，发挥不同政策工具的协同作用，鼓励城市发展因地制宜。一方面，创新型城市、智慧城市与低碳城市是标杆型激励方式的代表，在标杆型激励获得治理成效的同时，重视并落实碳排放权交易等市场型激励方式，辅之环境重点监控等反激励方式，或在多重嵌套政策下提高环境治理效率。另一方面，创新型城市建设需因地制宜，如技术突破类创新任务应加大向东部与高行政级别城市分配，技术利用与学习类创新任务加大向Ⅱ类大城市与资源型城市倾斜。

参考文献：

-
- [1]徐佳,崔静波.低碳城市和企业绿色技术创新[J].中国工业经济,2020,38(12):178-196.
- [2]张华,丰超.创新低碳之城:创新型城市建设的碳排放绩效评估[J].南方经济,2021,39(3):36-53.
- [3]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.
- [4]CUI J,ZHANG J,YANG Z. Carbon pricing induces innovation:evidence from china's regional carbon market pilots[C]//AEA Papers and Proceedings. 2018,108:453-457.
- [5]王为东,王冬,卢娜.中国碳排放权交易促进低碳技术创新机制的研究[J].中国人口·资源与环境,2020,30(2):41-48.
- [6]XU B,LIN B. Assessing CO₂ emissions in China's iron and steel industry:a dynamic vector autoregression model[J]. Applied Energy, 2016,161:375-386.
- [7]YU Y,XU W. Impact of FDI and R & D on China's industrial CO₂ emissions reduction and trend prediction[J]. Atmospheric Pollution Research, 2019,10(5):1627-1635.
- [8]李巍,郝永勤.创新驱动低碳发展了吗——基础异质和环境规制双重视角下的实证研究[J].科学学与科学技术管理,2017,38(5):14-26.
- [9]CHURCHILL S A, INEKWE J, SMYTH R, et al. R & D intensity and carbon emissions in the G7:1870-2014[J]. Energy Economics, 2019, 80(3):30-37.
- [10]聂飞,刘海云.国家创新型城市建设对我国 FDI 质量的影响[J].经济评论,2019,40(6):67-79.
- [11]王少剑,黄永源.中国城市碳强度的空间溢出效应及驱动因素[J].地理学报,2019,74(6):1131-1148.
- [12]GROSSMAN G M, KRUEGER A B. Environmental impacts of a north American free trade agreement[M]. CEPR Discussion Papers, 1992, 8(2):223-250.
- [13]BROCK W A, TAYLOR M S. Economic growth and the environment:a review of theory and empirics[M]. Handbook of Economic Growth, 2005.
- [14]黄娟. 科技创新与绿色发展的关系——兼论中国特色绿色科技创新之路[J]. 新疆师范大学学报(哲学社会科学版), 2017, 38(2):33-41.
- [15]钟茂初. 以创新为根本动力推动形成新发展格局[J]. 人民论坛·学术前沿, 2020, 9(22):54-57.
- [16]卞元超,吴利华,周敏,等.国内市场分割与雾霾污染——基于空间自滞后模型的实证研究[J].产业经济研究,2020,19(2):45-57.
- [17]沈洪涛,黄楠,刘浪.碳排放权交易的微观效果及机制研究[J].厦门大学学报(哲学社会科学版),2017,92(1):13-22.

-
- [18]鄢哲明,杨志明,杜克锐.低碳技术创新的测算及其对碳强度影响研究[J].财贸经济,2017,38(8):112-128.
- [19]李胜兰,林沛娜.我国碳排放权交易政策完善与促进地区污染减排效应研究——基于省级面板数据的双重差分分析[J].中山大学学报(社会科学版),2020,60(5):182-194.
- [20]周圣强,朱卫平.产业集聚一定能带来经济效率吗:规模效应与拥挤效应[J].产业经济研究,2013,12(3):12-22
- [21]林伯强,谭睿鹏.中国经济集聚与绿色经济效率[J].经济研究,2019,54(2):119-132.
- [22]邵帅,张可,豆建民.经济集聚的节能低碳效应:理论与中国经验[J].管理世界,2019,35(1):36-60,226.
- [23]陈晨,张广胜.国家创新型城市政策、高端生产性服务业集聚与地区经济高质量发展[J].财贸研究,2020,31(4):36-51.
- [24]胡兆廉,石大千,司增绰.创新型城市能否成为产业结构转型的“点睛之笔”——来自国家创新型城市政策建设的证据[J].山西财经大学学报,2020,42(11):70-84.
- [25]徐换歌,蒋硕亮.国家创新型城市政策的效果以及空间溢出[J].科学学研究,2020,38(12):2161-2170.
- [26]陆铭,冯皓.集聚与减排:城市规模差距影响工业污染强度的经验研究[J].世界经济,2014,37(7):86-114.
- [27]任晓松,刘宇佳,赵国浩.经济集聚对碳强度的影响及传导机制[J].中国人口·资源与环境,2020,30(4):95-106.
- [28]曾婧婧,周丹萍.区域特质、产业结构与城市创新绩效——基于创新型城市政策的准自然实验[J].公共管理评论,2019,16(3):66-97.
- [29]LI M,WANG Q .Will technology advances alleviate climate change?dual effects of technology change on aggregate carbon dioxide emissions[J].Energy for Sustainable Development,2017,41:61-68.
- [30]张般若,李自杰.高铁能促进低碳经济吗——高铁开通对城市碳强度的影响及机制研究[J].华中科技大学学报(社会科学版),2021,35(1):131-140.
- [31]程中华,刘军,李廉水.产业结构调整与技术进步对雾霾减排的影响效应研究[J].中国软科学,2019,34(1):146-154.
- [32]唐未兵,傅元海,王展祥.技术创新、技术引进与经济增长方式转变[J].经济研究,2014,49(7):31-43.
- [33]孙晓华,郭玉娇.产业集聚提高了城市生产率吗——城市规模视角下的门限回归分析[J].财经研究,2013,39(2):103-112.
- [34]逯进,赵亚楠,苏妍.“文明城市”评选与环境污染治理:一项准自然实验[J].财经研究,2020,46(4):109-124.
- [35]朱金鹤,王雅莉,侯林岐.文明城市评比何以促进劳动力流入——来自地级市的准自然实验证据[J].产业经济研究,2021,20(3):43-56.