引用格式:李惠乔, 颜洪平, 熊凯军. 创新型产业集群政策如何影响区域环境治理——基于多时点双重差分模型的验证[J]. 技术经济, 2026, 45(6): 115-132.

Li Huiqiao, Yan Hongping, Xiong Kaijun. How does the innovative industrial cluster policy affect regional environmental governance? Evidence from a multi-period difference-in-differences model[J]. Journal of Technology Economics, 2026, 45(6): 115-132.

青年探索

创新型产业集群政策如何影响区域环境治理

——基于多时点双重差分模型的验证

李惠乔, 颜洪平, 熊凯军

(海南大学国际商学院, 海口 570228)

摘 要: 统筹经济发展与环境保护是实现高质量发展的核心要义,作为推动产业转型升级的重要举措,创新型产业集群政策的环境治理效应值得深入探讨。基于 2010—2022 年 257 个地级市面板数据,采用多时点双重差分模型,系统评估了创新型产业集群政策对城市环境质量的影响及其作用机制。结果表明:①创新型产业集群政策显著改善了城市环境质量,该结论经过平行趋势检验、安慰剂检验、PSM-DID 等一系列稳健性与内生性检验后依然成立,但受制于地理区位、资源禀赋、环境制度基础以及市场化程度的影响,其政策效应存在显著的异质性。②机制分析揭示,环境优化效应主要通过激励绿色技术创新、引导产业结构升级及发挥数字化绿色传导功能这三条路径得到实现,同时数字化在其中扮演释放环境红利的先决门槛。③进一步分析发现,该政策的环境治理效应具有阶段性特征,政策效果随时间推移呈现出边际效应递减趋势。从空间维度考察发现该政策在提升本地环境质量的同时有效降低了邻近地区的环境污染水平,表现出积极的空间溢出效应。研究结论为新发展格局下实现产业发展与环境优化的协同治理提供了实证依据,也为政策制定者因地制宜推进创新型产业集群布局、释放数字化赋能潜力、提升区域环境协同治理水平提供了有益参考。

关键词: 创新型产业集群; 环境治理; 绿色技术创新; 产业结构升级; 数字化绿色传导; 空间溢出

中图分类号: F323 **文献标志码**: A **文章编号**: 1002-980X(2026)06-0115-18

DOI: 10. 12404/j. issn. 1002-980X. J26021004

一、引言

党的二十届四中全会提出,要加快经济社会发展全面绿色转型,建设美丽中国;加快形成绿色生产生活方式。面对绿色低碳转型的时代要求,统筹生态环境保护与经济发展,既是实现“双碳”目标的内在要求,也是推动经济高质量发展的重要途径。2026 年《政府工作报告》明确指出,要加快推动全面绿色转型,协同推进降碳、减污、扩绿、增长,增强绿色发展动能;强调实施新一轮制造业重点产业链高质量发展行动,强化产业基础再造和重大技术装备攻关。中国经济社会发展已步入以加快绿色化、低碳化为特征的高质量发展阶段,面对这一战略机遇期,亟须深化对产业集群生态环境效应的规律性认识,以高水平保护支撑高质量发展,深入践行“绿水青山就是金山银山”理念。这既是破解资源环境约束、增强绿色发展动能的关键所在,也

收稿日期: 2025-05-09

基金项目: 国家自然科学基金地区项目“数智融合驱动战略性新兴产业互联式创新研究:基于多层复杂网络视角”(72563008);海南省自然科学基金高层次人才项目“双循环格局下产业转移政策效应评估及演化路径研究”(725RC728);海南省高等学校科学研究项目“海南自贸港推动风险投资进入培育壮大高新技术产业集群路径研究”(Hnky2025-8)

作者简介: 李惠乔(2001—),海南大学国际商学院硕士研究生,研究方向:产业经济学;颜洪平(1978—),博士,中国(海南)竞争政策研究中心主任,海南大学国际商学院教授,海南省社会科学院特聘研究员,博士研究生导师, 研究方向:产业经济学、政治经济学、海南自贸港政策与制度、环境经济学;(通信作者)熊凯军(1994—),博士,海南大学国际商学院副教授,博士研究生导师,研究方向:创新创业、国际贸易。

最终服务于人与自然和谐共生的现代化战略全局

为经济高质量发展提供了坚实支撑,并将最终服务于人与自然和谐共生的现代化的战略全局[1]。

与此同时,知识与技术创新日益成为国际竞争的核心领域,以美国、欧盟为代表的发达国家通过“再工业化”战略,重塑全球价值链与分工体系[2]。硅谷半导体集群、波士顿生物医药集群等典型范例,形成了对全球高端人才、资本与技术要素的强劲“虹吸效应”。反观中国,长期以来依赖资源与劳动力优势形成的产业结构,虽然有力支撑了经济高速增长,但也逐渐暴露出自主创新能力不足、价值链地位偏低、核心技术受制于外等结构性矛盾。国家统计局数据显示,中国 16~59 岁劳动年龄人口已从 2012 年的 9.37 亿降至 2025 年的 8.76 亿,表明要素依赖型、低附加值的传统生产模式已难以为继。在此背景下,创新型产业集群政策作为科技部自 2013 年起分批实施的一项国家级产业政策,通过促进知识、技术、人才与资本高度集聚,正在重塑区域产业组织形态[3]。该政策虽以创新驱动为核心导向,但其对城市环境质量的影响具有双重可能:一方面,技术溢出与结构升级效应有助于降低污染排放;另一方面,企业扎堆所引致的污染物集中排放,以及地方政府为争取试点资格可能出现的环境准入门槛竞次行为,亦可能会加剧区域环境压力。因此,深入考察该政策的环境效应及其传导机制,对于协同推进产业升级与绿色发展、加快构建现代化经济体系,具有重要的理论价值与现实意义。

梳理现有文献发现,与本文密切相关的学术探讨主要分为三类:第一类聚焦于创新型产业集群政策的效应分析。作为推动区域创新驱动发展的重要政策工具,创新型产业集群通过集聚创新资源、构建协同网络与强化制度供给,多维度释放经济社会效能,在促进技术创新[3]、增强产业韧性[4]、提升新质生产力[5]及推动高质量发展[6]等方面发挥积极作用。然而,部分研究也揭示了产业集聚潜在的负面效应。例如,胡彬和万道侠[8]提出“创新惰性”概念,指出政府干预下的产业集聚塑造了依赖低成本竞争的生存环境,从而降低了企业选择高端创新模式的概率。陈宏阳等[9]发现,重污染产业集聚显著加重了工业污染物排放,而环境规制在其中并未发挥有效降污减排作用。上述正负效应的并存表明,创新型产业集群政策的环境净效应并非先验确定,而是由地区特征、市场化程度、集聚模式等条件共同决定。第二类研究关注区域环境治理能力的影响因素,现有研究主要从经济增长[10]、数字技术[11]、政府工具与监管机制[12]等方面考察其影响路径。Dong 等[13]指出能源转型监管在优化环境污染方面具有积极作用,通过引导能源结构清洁化与能源效率提升,有效改善了区域环境质量。刘运胜[14]评估贸易政策不确定性对环境污染的影响,发现贸易政策不确定性会通过规模效应、技术效应和结构效应三个渠道降低环境污染。第三类是产业集群的环境效应研究,主要关注通过经济集聚[15]、技术进步[16]与产业结构[1]调整所带来的影响。李潇和李新妍[17]探讨生态资源、产业结构与环境污染之间的相互关系,指出生态资源和产业结构的交互作用有助于减轻环境污染,产业结构调整和生态资源的有效利用是实现环境可持续发展的重要途径。

梳理已有文献发现:第一,既有文献多从经济集聚、环境规制、产业结构等传统视角探讨产业集群的环境效应,但对创新型产业集群政策这一具体制度安排的环境治理效应关注不足。同时,现有关于产业集聚环境效应的研究结论正负并存,尚未将两类机制统一纳入实证框架以准确评估该政策的环境净效应。第二,现有研究多聚焦于能源效率提高、环境规制强化等直接路径,虽已有部分研究关注到技术创新与产业结构迭代所发挥的作用,但未能深入揭示创新型产业集群背景下其影响区域环境治理能力的内在逻辑与动态过程,更未关注到数字化水平在其中所扮演的传导路径与“先决门槛”角色。第三,既有研究多将产业集群的环境效应视为均质化处理,缺乏对其动态演变规律与空间外溢特征的深入考察,难以全面刻画政策在时间演进与空间扩散双重维度下的真实治理效能。

鉴于此,本文运用多时点双重差分模型分析创新型产业集群政策对城市环境治理能力所产生的影响及其影响路径,并进一步从时间与空间维度探讨其政策辐射范围。可能的边际贡献体现在:第一,研究视角上,以往文献多聚焦于传统产业集聚的被动环境外部性,本文聚焦创新型产业集群试点这一主动式制度安排,综合运用集聚经济与环境库兹涅茨曲线理论揭示创新型产业集群影响城市污染排放的机理,为“集聚-污染”悖论提供新视角。第二,研究方法上,本文在验证政策平均处理效应的同时,进一步从时间与空间维度揭示其阶段性特征与环境溢出效应,从双重维度拓展了现有研究对政策效果演变规律的理解。第三,研究机制上,区别于既有研究多关注能源效率提高、环境规制强化等直接路径,本文构建了“绿色创新-产业升级-

数字化赋能”整合性传导框架，系统揭示创新型产业集群影响环境质量的多种作用渠道。特别地，本文识别数字化水平在传导过程中存在的门槛属性，发现其既是加速绿色效应释放的赋能机制，也是决定绿色创新与产业升级能否充分转化为减排效能的基础条件。

二、政策背景与研究假设

（一）政策背景

为适应新发展阶段的形势要求，探索形成新的发展模式，国务院于 2010 年印发的《关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》，明确提出要对发展战略性新兴产业进行统筹规划、系统布局；大力培育产业集群；建成一批产业链完善、创新能力强、特色鲜明的战略性新兴产业集聚区。创新型产业集群政策作为通过政策引导和资源整合推动产业创新发展、提升产业整体竞争力的重要路径[18]，在此背景下应运而生。2011 年，科学技术部火炬高技术产业开发中心印发的《创新型产业集群建设工程实施方案（试行）》，强调要把发展科技型企业与地方经济发展和国家战略导向结合起来，以国家高新区为重点，每年开展一批产业集群建设试点，坚持国家战略与地方目标相结合、重点突出与试点带动相结合、集群发展与科技创新相结合、政府主导与市场推动相结合的原则，为加快转变区域经济发展方式提供强有力的科技支撑。表 1 展示了创新型产业集群建设试点的批准进程。随着我国对外开放水平的持续提升与经济发展方式的逐步优化，创新型产业集群政策正有力推动我国产业向低碳化、绿色化方向转型升级。

表 1　国家创新型产业集群试点建设批准相关城市

年份	试点类型	试点认定城市与试点（培育）产业集群认定城市
2013 年	先行先试型	试点产业集群所在城市：北京市、保定市、本溪市、无锡市、温州市、潍坊市、武汉市、株洲市、深圳市、惠州市； 试点（培育）产业集群所在城市：北京市、天津市、石家庄市、太原市、晋中市、鞍山市、通化市、齐齐哈尔市、上海市、无锡市、苏州市、杭州市、合肥市、蚌埠市、宁德市、景德镇市、济南市、烟台市、济宁市、郑州市、南阳市、十堰市、长沙市、广州市、珠海市、绵阳市、南宁市、西宁市
2014 年	初创成长型	试点产业集群所在城市：石家庄市、邯郸市、鞍山市、长春市、通化市、南京市、无锡市、苏州市、杭州市、合肥市、芜湖市、泉州市、景德镇市、济南市、烟台市、济宁市、十堰市、湘潭市、中山市、成都市、海西蒙古族藏族自治州
2017 年	扩张跟进型	试点产业集群所在城市：扬州市、泰州市、长沙市、大连市、菏泽市、襄阳市、常州市、清远市、佛山市、东莞市、苏州市、柳州市、珠海市、荆门市、西宁市、临沂市、西安市、重庆市、德州市、抚州市、新余市、韶关市、南阳市、咸宁市、德阳市、沈阳市、江门市； 试点（培育）产业集群所在城市：天津市、上海市、贵阳市、厦门市、中山市、常州市、青岛市、无锡市、济南市、滨州市、珠海市、潍坊市、七台河市、邯郸市、遂宁市、天门市
2021 年	培育观察型	试点（培育）产业集群所在城市：天津市、廊坊市、太原市、长治市、营口市、吉林市、上海市、徐州市、苏州市、盐城市、宁波市、阜阳市、福州市、吉安市、鹰潭市、威海市、枣庄市、济南市、淄博市、许昌市、新乡市、随州市、仙桃市、黄石市、孝感市、岳阳市、常德市、湘潭市、娄底市、佛山市、肇庆市、河源市、汕头市、重庆市、成都市、绵阳市、安顺市、玉溪市、楚雄彝族自治州、榆林市、渭南市、安康市、石河子市
2022 年	规模扩张型	试点产业集群所在城市：天津市、石家庄市、保定市、承德市、锦州市、大连市、长春市、哈尔滨市、南京市、苏州市、无锡市、宿迁市、杭州市、宁波市、滁州市、马鞍山市、芜湖市、南昌市、赣州市、青岛市、安阳市、焦作市、平顶山市、武汉市、黄石市、荆州市、咸宁市、襄阳市、孝感市、长沙市、郴州市、衡阳市、广州市、惠州市、深圳市、攀枝花市、重庆市、宝鸡市、咸阳市、兰州市、昌吉回族自治州

（二）理论分析及研究假说

产业集群是指在特定地理区域内，集聚着一批具有竞争与合作关系的企业及相关机构，不仅体现为空间上的集中，更强调企业之间通过紧密互动形成相互依赖、协同演进的生态系统，是产业集聚发展的高级形式[19]。在产业集群与生态关系的理论研究中，马歇尔外部性理论与环境库兹涅茨曲线（environmental kuznets curve，EKC）分别从产业组织动态与经济发展阶段两个维度揭示了经济活动空间集聚的环境效益，阐述其所呈现出的阶段性演变动态特征。马歇尔外部性理论揭示了产业空间集聚所产生的三类正向效应：知识溢出与技术创新扩散、专业化劳动力市场形成、中间投入品共享与产业链协同[20]。然而，产业集群的发展也可能引致一定的负面效应，主要表现为污染物集中排放加剧环境压力、企业高密度集聚带来的交通拥堵、要素拥挤与同质竞争等问题。环境库兹涅茨曲线假说则从经济发展水平与环境质量的长周期关系出

发,刻画不同经济发展时期环境污染随收入增长先升后降的倒U型轨迹,强调经济结构转型、技术进步与环境规制强化等是拐点形成的关键驱动因素。经济视察能够对环境拐点的形成产生阻碍作用,但环境视察能够促使拐点出现时间提前[22]。当公众的环保诉求较高时,地方政府出于对民众需求的责任感而加大环保力度,这将加速EKC拐点的到来,对EKC的形状和拐点产生显著影响[23]。

结合上述理论可以看出,创新型产业集群的环境效应本质上是规模扩张效应与创新驱动效应动态博弈的结果。在集群形成初期,地理集中带来的规模经济效应虽有助于降低企业协同研发成本与配套交易成本,但创新型产业集群作为一项选择性产业政策,可能因政府干预失当而引致资源配置扭曲,产生不容忽视的负向环境冲击。具体而言,在试点申报阶段,部分地方政府为争取政策资源与政绩考核,可能降低集群申报的环保准入门槛,默许甚至引导部分高污染、高耗能企业进入集群范围,形成"逆向选择"问题。在政策实施阶段,地方政府为完成招商引资、产值增长等考核目标,可能过度干预产业布局,压低企业入驻标准,盲目追求集群规模扩张。这种由行政力量推动的"过度集聚"不仅使污染物排放在有限空间内高度叠加,超出环境承载能力,还会因"拥挤效应"推高企业治污单位成本,进一步加剧环境压力[24]。有限的政策资源若大量流向缺乏环境自律能力的企业,将挤占本可用于支持绿色技术研发与环保基础设施的公共资源,延缓集群整体的绿色转型进程[25]。随着产业集群逐步成熟,集聚经济带来的知识溢出与技术扩散逐渐显现,企业间的技术交流、人才流动与协同研发,加速了清洁生产技术的扩散与应用,推动生产技术体系向资源节约、环境友好的方向转型,可能推动拐点提前到来[26],这一演化规律与EKC假说的阶段性特征高度契合。在此过程中,政府通常会基于区域环境承载力与可持续发展目标,加强环境规制。然而,产业集群的特殊性在于,集聚经济的正外部性增强了企业对环境规制的响应能力与适应弹性,其所带来的持续竞争优势使企业在区位上的"黏性"显著增强。由于集群内已形成较为完善的配套体系、稳定的供应链网络与高度专业化的劳动力市场,此时外迁将带给企业较高的机会成本与转型风险,促使企业更倾向于通过技术创新而非简单转移来应对环境规制压力,将环境规制转化为绿色创新驱动力[4]。

同时,在对产业集群的环境效应进行分析时,应当对创新型产业集群与传统产业集群的作用机制差异进行区分,这种差异主要体现在马歇尔外部性的表现形式及其对环境规制响应的调节作用上。传统产业集群的竞争优势主要源于地理邻近所带来的运输成本节约、投入品共享与劳动力集中,依赖低成本竞争和规模经济效应[27]。在这种模式下,规模扩张可能会加剧环境污染,产业链整合则能提高资源利用效率,但受制于传统产业集群自身较弱的创新能力,其实现环境改善的路径主要依赖于末端治理和被动响应环境规制。因此,传统产业集群对EKC拐点的影响主要表现为通过规模扩张推迟拐点到来,借助规制响应带动拐点提前[28],两种效应相互抵消导致整体效应具有不确定性。创新型产业集群则凭借自身知识溢出、协同创新与高端要素集聚等核心特征,在地理邻近带来交易成本节约的同时,从知识创造与技术创新角度获得持续性竞争优势,其在环境效应方面的独特优势体现在以下维度:一是知识溢出效应直接促进清洁技术的研发、扩散与应用,降低企业绿色创新成本与风险,驱动绿色技术创新;二是高端要素的集中吸引环保技术人才、绿色服务企业与专业中介机构集聚,形成涵盖人才供给、技术服务和资金支持的全链条绿色创新生态系统;三是集群内部形成的协同创新网络推动企业整合互补性创新资源,突破单个企业的创新能力局限,加速重大绿色技术的突破与应用推广,从而更有效地推动EKC拐点提前到来[29]。此外,创新型产业集群通常具有更强的区位黏性和更完善的技术服务体系,使得企业在面临环境规制时更倾向于采用技术创新策略,进一步强化了环境规制对绿色创新的激励效应。

基于此,本文提出假设:

创新型产业集群政策能够发挥减排功效,释放环境优化效应(H1a);

创新型产业集群政策的减排效应可能因处于发展初期尚未充分显现(H1b)。

现有研究对创新型产业集群政策赋能环境优化的作用机制尚缺乏系统阐释,该政策虽并未直接规制企业排污行为,但通过对产业链组织方式、创新要素配置与基础设施配套的系统性重塑,间接产生了显著的环境治理效应。为深入揭示这一过程的内在逻辑,此处分别从绿色技术创新效应、产业集聚增效效应与数字化绿色传导效应三个维度出发,系统剖析创新型产业集群所产生环境优化效应的内在机理与传导

路径。

在新经济地理学理论框架下，产业集聚所引致的同类企业在特定地理空间的集中分布，能够催生规模经济、技术溢出与劳动力市场共享等多重正向效应。创新型产业集群政策的核心制度安排在于，试点城市将围绕特定产业链构建产学研协同网络与共性技术研发平台[3]。在此制度框架下，研发设施、高端人才库、技术数据平台及市场信息等关键要素得以跨越组织边界实现共享与高效配置，逐步形成知识共创、风险共担、收益共享的协同创新格局[18]。这种制度安排的直接影响在于其不仅加速了绿色技术在产业链内的传播、吸收与再创新进程，也有效分摊了绿色技术从研发到商业化应用所面临的高昂成本，降低了市场推广与技术应用的不确定性[30]。与此同时，创新型产业集群政策并非替代环境规制，而是与之形成互补，地方政府在试点建设中往往将排放标准、征收环境税等约束性政策与绿色补贴、税收优惠等激励性工具嵌入产业集群准入与评价体系，倒逼企业淘汰落后产能、转向清洁生产模式[31]。由此，政策从“约束+激励”双向机制共同推动企业实现从末端治理向全过程绿色管理的转型，促进循环经济关键技术的突破与产业化应用，在提升资源利用效率的同时也从系统层面增强产业集群的低碳竞争力与可持续发展韧性。这种效应的发挥，在微观层面依赖于企业间知识溢出的空间邻近性，在宏观层面则取决于产业在空间上的有效集聚程度，这也是下一机制需要进一步阐述的内容。

若将绿色技术创新效应理解为创新型产业集群政策赋能环境治理的动力来源，产业集聚增效则可视为将该动力经由产业组织形态实现空间扩散与规模放大的传导机制。产业集群结构升级的核心在于构建高效运转、高度协同的区域创新网络，作为关键制度供给，创新型产业集群政策通过绘制产业链图谱、制定补链强链目录、搭建公共技术服务平台，引导上下游企业在空间与功能层面形成有序耦合[4]。地方政府在政策实施过程中，既可运用财政补贴、税收优惠等工具直接降低企业创新门槛与运营成本，又能依托人才引进与培育专项政策持续增强区域人才集聚能力，优化创新要素配置。在此过程中，市场信号与政策导向共同驱动资本、技术、劳动力等关键生产要素从高耗能、高污染的传统产业向知识密集型领域有序迁移，加速低效产能淘汰，推动产业链整体向绿色化、智能化方向转型[1]。从城市发展角度来看，创新型产业集群政策通过科技创新外溢、信号传递等效应提升了所在地级市的绿色发展水平[16]，并有效促进了本地高技术产业集聚与发展[33]。依托结构优化与技术扩散效应，产业集群能够强化不同经济组织及产业链上下游的技术、信息与业务联结，逐步打破污染密集型产业对原有高碳发展路径的依赖，最终系统性推动区域污染物排放强度下降与环境质量改善[1]。

前两个机制分别阐释了创新型产业集群政策减排能力的形成路径以及经由产业组织实现空间放大的作用方式，而绿色化数字传导效应则构成二者协同运转的信息基础设施与治理工具基础。从数字化视角来看，创新型产业集群政策的推进促使试点城市加快部署工业互联网平台、产业大数据中心、城市能源与环境监测系统等数字化基础设施。这些城市层面的数字基础设施建设，从以下三个可观测环节对环境产生系统性优化作用：首先是数据采集与检测环节，依托物联网与大数据平台，政府部门能够对能源消耗、资源流动及污染物排放进行实时采集与动态追踪，精准识别异常排放源并及时预警，从而显著降低单位产出的能耗与物耗[34]。其次是信息共享与协同环节，城市数字化平台建设打破了企业之间的信息壁垒，推动产业链上下游排放信息的透明共享与协同治理，为城市层面推动循环经济、推广废水梯级利用等协同减污措施提供了数据基础与决策支撑。最后是反馈优化与源头控制环节，在前两个环节的数据支撑下，企业得以开展工艺优化与过程控制，不仅提升了生产稳定性与资源利用率，更从源头抑制了污染物生成[35]。同时，当城市具备了较为完善的数字化监测和核算能力，绿色信贷、绿色债券等工具能够获得可验证的数据基础，企业的环境绩效与金融支持挂钩，进一步拉动产业结构向高技术、高附加值环节攀升[36]。值得进一步探讨的是，城市数字化发展水平对于绿色创新与产业集聚增效效应的发挥可能呈现出显著的门槛效应。当数字化水平较低时，生产活动的监测能力、产业协同的支撑作用及绿色金融的落地条件均会受到制约，导致绿色创新所释放的技术红利与产业集聚所形成的规模效应难以充分转化为实际的环境绩效[37]。由此可见，创新型产业集群政策所推动的数字基础设施建设，并非抽象的“传导”概念，而是通过实时监测、协同治理、精准激励三个具体可验证的路径将数字技术嵌入城市环境治理体系，为破解环境约束、构建绿色低碳产业体系提供了技

术可行、系统协同的实施路径。

图 1 为创新型产业集群政策影响环境优化的分析框架。

基于此,本文提出假设:

创新型产业集群政策通过绿色技术创新、产业集聚增效与数字化绿色传导效应实现地区环境优化(H2);

地区数字化水平在绿色创新与产业集聚影响环境污染的过程中存在门槛效应(H3)。

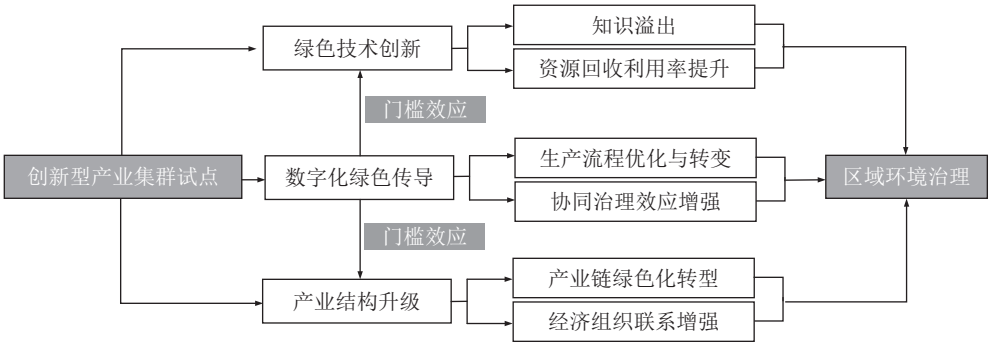

图 1　创新型产业集群政策影响环境优化的分析框架

三、研究设计

(一)模型构建

考虑到创新型产业集群采取分批认定方式,而传统的双重差分模型只对单一时点的变化进行检验,因此,本文构建多时点双重差分模型,将 2013 年、2014 年与 2017 年创新型产业集群作为政策冲击,科学识别其对城市环境水平的影响效应,回归模型如式(1)所示。

$$Pollution_{it} = \alpha + \beta Policy_{it} + \gamma X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \tag{1}$$

其中:$Pollution_{it}$ 为城市环境污染物排放水平;$Policy_{it}$ 为创新型产业集群政策影响;X_{it} 为添加的一系列控制变量;μ_i 和 λ_t 分别为地区与时间层面固定效应;ε_{it} 为随机扰动项;α、β、γ 为待估系数。

(二)变量选取与说明

被解释变量:城市环境污染物排放水平(*Pollution*)。当前城市污染主要通过工业生产过程中产生的主要污染物来衡量,传统的环境污染研究通常采用单一指标衡量污染水平,但仅凭单一指标无法全面反映环境污染的综合程度。本文借鉴刘亦文和邓楠[38]的做法以工业废水、工业二氧化硫和工业烟粉尘排放量三个指标综合衡量城市环境污染物排放水平(*Pollution*),运用熵权法通过信息熵来确定指标权重,降低主观因素干扰,保障所构建被解释变量的客观性和准确性。

解释变量:创新型产业集群政策(*Policy*)。本文将创新型产业集群政策视为准自然实验,政策处理效应用城市类型虚拟变量与政策实施时间虚拟变量之间的交互项(*Treat*×*Time*)表示。具体来说,本文将创新型产业集群试点所在城市 *Treat* 设置为 1,非创新型产业集群试点所在城市作为对照组,设置为 0,根据试点政策实施前后的时间将虚拟变量 *Time* 分别设置为 0 和 1。此处主要选取创新型产业集群试点城市进行分析,由于创新型产业集群是在不同年份分批进行试点的,不同试点城市的时间虚拟变量并非完全一致。

控制变量:考虑到涉及多方面的城市特征因素可能对城市环境污染状况产生影响,会干扰核心解释变量的效果评估,本文选取了影响城市环境的相关变量作为控制变量,具体包括:①经济发展(*pergdp*),地区人均生产总值;②产业结构(*str*),参考赵春明等[39]的做法,以第二产业增加值占 GDP 比重表示;③人口密度(*den*),用每平方千米的人口数表示;④开放水平(*open*),各市的进出口额占地区生产总值的比重;⑤人才资源(res),各市普通高等学校在校学生数占该市年末总人口的比重;⑥政府环保规制力度(*gov*),参考邵帅等[40]的做法,采取各城市政府工作报告中环保词频所在句的字数占比衡量;⑦城市绿地覆盖率(*greenland*),采用建成区绿化覆盖率指标衡量。

(三)数据来源与描述性统计

本文所用数据主要来源于《中国统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国城市统计年鉴》以及各地级市统计年鉴,因数据缺失,未包含港澳台地区。同时,剔除数据严重缺失的个别城市样本,并采用插值法获得部分缺失值。考虑到个别年份认证的创新型产业集群试点较少以及政策发挥作用需要时间,此处主要选取2013年、2014年和2017年认定的创新型产业集群所在城市作为实验组,最终选定2010—2022年257个地级市的样本面板数据。为防止异常值影响,对所有样本进行前后1%的缩尾处理,主要变量描述性统计见表2。

表2　描述性统计

变量名称	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
Pollution	3341	2.1427	2.3382	0.0078	18.3522
Policy	3341	0.1553	0.3623	0	1.0000
pergdp	3341	5.2675	2.9937	1.2145	16.3654
open	3341	0.1865	0.2291	0.0046	1.2089
res	3341	1.7681	2.0018	0.1413	8.5456
den	3341	438.4891	289.9392	62.0000	1044.0000
gov	3341	0.9613	0.3929	0	11.0000
str	3341	45.5176	9.8947	21.3600	68.8100
greenland	3341	40.2767	6.5482	0.4800	70.9200

为进一步揭示创新型产业集群政策对不同批次试点城市环境质量的影响差异,此处依据试点时间与批次将城市进行分组,并绘制样本期内城市环境污染排放(*Pollution*)指标的均值变化折线图(图2),以直观呈现政策实施前后环境绩效的动态演变趋势。值得关注的是,在2014—2018年这一政策集中落地与效应初步释放的关键阶段,不同批次城市的污染水平变化呈现出明显分化。第一批试点城市在政策实施初期污染指标出现小幅上升,可能原因在于政策落地存在一定时滞,部分企业在首批试点名单公布后集中赶工与投产,导致短期排放压力加大。第二批试点城市在政策启动后污染水平显著下降,表明政策效应得到了较快释放。第三批试点城市在政策正式启动前已具备一定减排基础,为后续政策介入奠定了较好的环境基础。整体来看,试点地区污染水平普遍高于非试点地区,说明试点城市的选择并非完全随机,而是兼顾了污染压力较大与经济基础较好的双重逻辑,即在确保地方具备响应治理能力与资源支撑的同时,追求通过试点解决突出环境问题。随着政策分批落地,各批次试点城市在政策启动节点后均出现了明显的污染下降趋势,且下降幅度普遍大于非试点城市,在宏观环境改善趋势之上产生了额外的减排加速效应。

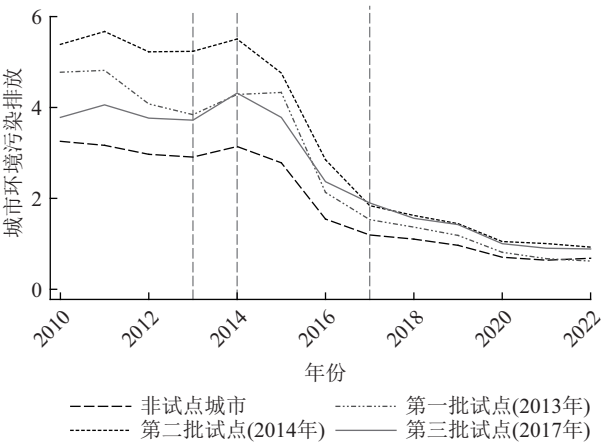

图2　分批次试点与非试点城市的环境指标变化

四、实证估计与结果分析

(一)基准回归

表3展示了创新型产业集群政策对城市环境污染排放影响效应的回归结果。其中,(1)列是在未考虑控制变量与固定效应情况下得到的政策效应评估结果;(2)列是在控制城市、年份固定效应情况下的估计结果;(3)列和(4)列分别表示在是否考虑时间固定效应的不同情况下加入控制变量所得到的估计结果。回归结果表明核心解释变量的系数均显著为负,说明创新型产业集群政策的实施对城市环境污染具有显著的抑制效应。

表 3　基准回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
Policy	−0.3687*** (−3.68)	−0.6962*** (−5.98)	−0.8201*** (−6.88)	−0.6505*** (−5.64)
pergdp			−0.3214*** (−15.47)	−0.1124*** (−4.30)
open			−0.9059** (−2.51)	−1.5282*** (−3.82)
res			−0.0676 (−1.29)	0.0061 (0.13)
den			−0.0104*** (−5.79)	−0.0060*** (−3.65)
gov			−0.1267 (−1.64)	−0.0496 (−0.83)
str			0.0931*** (22.60)	0.0161*** (2.93)
greenland			0.0037 (0.64)	0.0134** (2.36)
Constant	2.1999*** (49.00)	2.2508*** (80.10)	4.5411*** (5.30)	4.5272*** (5.83)
样本量	3341	3341	3341	3341
R^2	0.0832	0.7510	0.7139	0.7555
城市固定效应	No	Yes	Yes	Yes
年份固定效应	No	Yes	No	Yes

注：*、**、*** 分别表示通过 10%、5%、1%的显著性检验；括号内为 t 值。

(二)平行趋势检验

考虑到采用多时点 DID 模型前必须验证政策实施前实验组与对照组是否保持一致的变化趋势，此处进行平行趋势检验，以确保结果的可靠性。由于政策实施时间不完全一致，不可采用简单将某一年份作为政策发生的临界点设置时间虚拟变量的方式，此处设定政策实施的相对时间虚拟变量，构造模型如式(2)所示。

$$Pollution_{it} = \alpha + \sum_{k=-3}^{-1} \beta_k Beforek_{it} + \beta_0 Current_{it} + \sum_{k=1}^{8} \beta_k Afterk_{it} + \gamma X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \tag{2}$$

其中：$\sum_{k=-3}^{-1} \beta_k Beforek_{it}$、$\beta_0 Current_{it}$ 及 $\sum_{k=1}^{8} \beta_k Afterk_{it}$ 分别为各地级市在被确定为试点城市的前 n 期、当期及后 n 期的观测值，对于未实施政策的城市虚拟变量值均取值为 0。

为避免产生完全共线性，本文以政策实施前一年为基期，通过检验所得结果如图 3 所示。检验结果显示，政策实施前，相对时间虚拟变量系数均不显著且数值较小，说明在政策发生前实验组与对照组没有显著差异，符合平行趋势假设。在政策的动态效应方面，本文考察政策实施 8 期的动态效应，结果显示在政策实施当年，政策短暂产生环境祝福效应但尚未达到稳定状态，而在其推行 2 年后，创新型产业集群政策的影响显著且不断提升，这说明创新型产业集群政策对于环境污染存在使其降低的祝福效应，但作用发挥存在一定的滞后性。

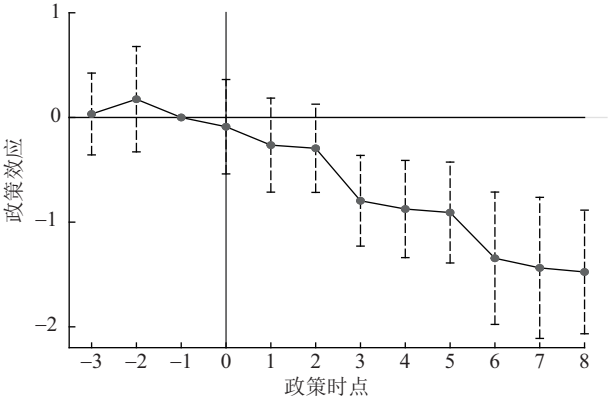

图 3　平行趋势检验结果

(三)稳健性检验

1. 安慰剂检验

为验证创新型产业集群建设对环境产生的积极效应并非偶然或存在其他潜在因素干扰,进行安慰剂检验。参考陈强等[41]的研究,本文分别采用“有约束”和“无约束”的混合安慰剂检验,随机抽取伪处理时间,分别在保持群组结构与不保持群组结构的条件下进行重复500次的双向固定效应估计,由此得到安慰剂检验的分布。安慰剂效应分布结果如图4和图5所示,可以看出处理效应估计值(图中垂直实线)均位于安慰剂效应分布最左侧,为异常极端值,从表4和表5可以看出,两个检验的双边 P 与左边 P 均小于0.01,故拒绝“处理效应为0”的原假设。

表4　无约束混合安慰剂检验结果

变量	处理效应	混合安慰剂检验		
		双边 P 值	左边 P 值	右边 P 值
DID	-0.6505	0.000	0.000	1

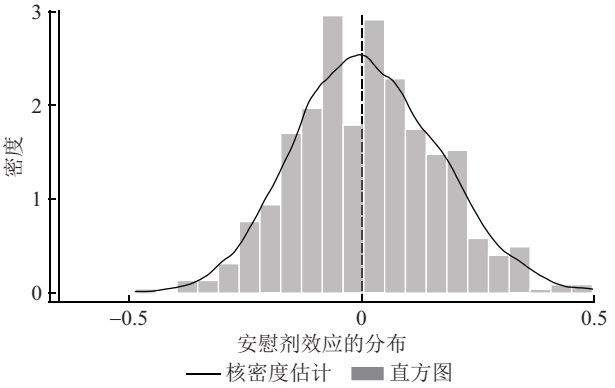

图4　无约束混合安慰剂效应分布

表5　有约束混合安慰剂检验结果

变量	处理效应	混合安慰剂检验		
		双边 P	左边 P	右边 P
DID	-0.6505	0.004	0.002	0.998

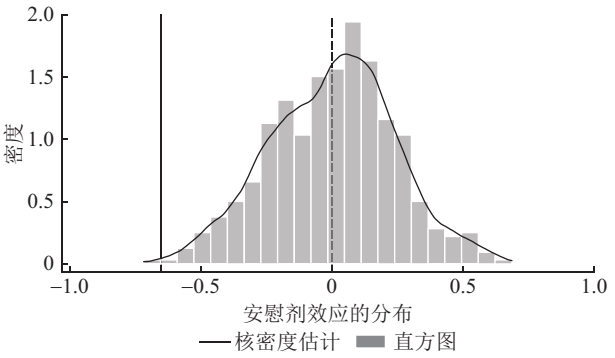

图5　有约束混合安慰剂效应分布

2. 倾向得分匹配-双重差分(PSM-DID)

为克服创新型产业集群政策试点城市可能存在的非随机选择问题,本文在传统DID基础上引入倾向得分匹配(PSM)技术,进一步采用多时点倾向得分匹配-双重差分(PSM-DID)模型进行检验。参考白俊红等[42]的做法,本文以控制变量作为样本的识别特征,对城市样本实施逐年匹配,以增强匹配结果的可靠性,为进一步降低多样本匹配失败所造成的信息损失,本文分别采用1∶1与1∶3两种近邻匹配比例进行匹配,并对匹配数据进行平衡性检验与匹配结果分析。结果显示逐年PSM方法在相当程度上缓解了样本选择性偏误问题。经匹配后的多时点PSM-DID的回归结果见表6的(1)列和(2)列。政策效应系数依然在统计上显著为负,表明基准回归结论通过了PSM-DID的稳健性检验。

3. 增加固定效应

在基准回归基础上,本文进一步引入了省级固定效应和省份-年份交互固定效应,以控制省级层面宏观因素可能带来的影响。中国各省份在环境规制强度、产业转型路径及绿色技术创新能力等方面存在系统性差异。这些差异可能通过以下两种渠道干扰估计结果:一是省级政府主导的环保督察、碳排放配额分配等制度性安排,可能自上而下约束地级市的污染治理行为;二是省内统一的财政补贴与研发支持等政策工具,可能同步推动多个地级市的产业低碳化进程。若忽略此类具有空间关联特征的省级因素,可能导致模型遗漏与核心解释变量相关的混淆变量,进而造成估计偏误。加入上述固定效应后,回归结果见表6的(3)和(4)列所示。其结论与基准回归保持一致,表明估计结果具有较好的稳健性。

4. 剔除特殊样本

由于直辖市具有较强的政策偏向性和发展特殊性,兼具“省级行政区划、地级市治理架构”的双重属性,在政策自主权、财政资源配置和产业发展定位等方面与普通地级市存在显著差异。一方面,直辖市直接对接中央政策试点,其创新型产业集群政策往往承载国家战略功能,可能通过专项转移支付、特惠性环保技术补贴等超常规手段强化减排效果;另一方面,直辖市普遍具有更完善的污染监测体系与更严格的环境执法标准,其污染排放数据生成机制可能与非直辖市存在系统性偏差。若不排除此类样本异质性,可能导致政

策效果估计混淆“制度性优势”与“集群治理效能”。为此,本文在总样本中剔除我国四个直辖市,回归结果见表 6 的(5)列。在剔除直辖市后,核心解释变量系数并未发生明显变化,证明基准回归结果的可靠性。

表 6　稳健性检验 Ⅰ 结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	PSM-DID(1:1)	PSM-DID(1:3)	增加省份固定效应	省份-年份交互固定效应	剔除直辖市
Policy	-0.2852*	-0.5377***	-0.6505***	-0.5132***	-0.5113***
	(-1.94)	(-4.18)	(-5.64)	(-5.42)	(-4.69)
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
样本量	1356	2016	3341	3341	3289
R^2	0.7853	0.7635	0.7555	0.8378	0.7493
城市固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
年份固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
省份固定效应	No	No	Yes	No	No
省份-年份交互固定效应	No	No	No	Yes	No

注:*、**、*** 分别表示通过 10%、5%、1%的显著性检验;括号内为 t 值。

5. 替换被解释变量

考虑到前文采用工业废水、二氧化硫、烟粉尘构建的污染排放指数主要反映创新型产业集群对工业源污染的影响,但并未全面反映对城市环境质量的影响,此处进一步引入区域环境质量代表性指标进行稳健性检验。具体包括城市细颗粒物(PM2.5)浓度与生态环境部发布的空气质量指数(*AQI*),以全面分析创新型产业集群所产生的环境优化效益。由表 7 的(1)列和(2)列可知,创新型产业集群政策不仅显著降低了工业源污染物排放强度,也对城市综合环境质量产生了积极且显著的改善效应。这一发现表明,创新型产业集群建设能够有效破解产业发展与环境保护之间的零和博弈困境,在推动产业向高级化、绿色化转型的同时,释放出正向的环境外部性,实现了经济绩效与环境绩效的协同提升。

6. 剔除政策干扰

考虑到样本期内国家可能同时实施了其他环境规制政策,不同政策之间的交互作用可能会对创新型产业集群政策的效果产生干扰。为确保结论稳健性,本文系统梳理了样本期间可能产生交叉影响的环境治理政策:一是国家发展改革委在 2011 年发布的《关于开展碳排放权交易试点工作的通知》,覆盖北京、天津等 7 省市;二是环境保护部等于 2012 年实施的《重点区域大气污染防治“十二五”规划》,针对京津冀、长三角等重点区域实行了差异化管控;三是国务院 2013 年印发的《大气污染防治行动计划》(“大气十条”),此处将其划定的包括京津冀、长三角、珠三角区域在内的重点控制区视为处理组进行分析。上述政策可能通过碳定价机制与污染排放标准升级等途径,与企业绿色技术创新及产业结构调整形成协同或竞争关系,从而对创新

表 7　稳健性检验 Ⅱ 结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	AQI	PM2.5	碳排放权交易试点	“十二五”规划	“大气十条”
Policy	-0.3005***	-0.2661***	-0.6669***	-0.6382***	-0.6417***
	(-3.75)	(-4.86)	(-5.79)	(-5.50)	(-5.60)
$Policy_2$			0.3823**		
			(2.14)		
$Policy_3$				-0.3636	
				(-1.48)	
$Policy_4$					-0.2621*
					(-1.82)
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
样本量	3341	3341	3341	3341	3341
R^2	0.4977	0.8878	0.7559	0.7557	0.7558
城市固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
年份固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

注:*、**、*** 分别表示通过 10%、5%、1%的显著性检验;括号内为 t 值。

型产业集群政策的实施效果产生叠加或抵消作用。为此，本文对上述政策相关城市分别构造相应政策虚拟变量，并在基准回归中予以控制，回归结果见表 7 的(3)列~(5)列。在控制上述政策的潜在影响后，核心解释变量的估计系数依然显著，且方向与基准回归保持一致，从而进一步验证了本文研究结论的稳健性。

7. 内生性检验

考虑到创新型产业集群政策的实施可能存在自选择或双向因果等内生性问题，本文参考戴魁早等[43]的做法，选取 1985 年位于各城市的高等院校数量与时间变量的交互项作为创新型产业集群政策的工具变量(*iv*)，采用两阶段最小二乘法进行估计。高等院校作为高层次人才培养、科学研究和知识创新的重要载体，其在城市中的分布不仅反映了区域长期人力资本积累与知识储备水平，更直接影响了地方政府推动产业升级与技术创新的政策倾向，因而与创新型产业集群试点的选择存在内在逻辑联系，符合相关性条件。而在外生性方面，1985 年各城市的高等院校数量设立时间远早于样本考察期，难以直接影响到当前的城市环境污染状况，满足工具变量的外生性要求。

从表 8 可以看出，第一阶段估计结果表明，所选取的工具变量与核心解释变量之间呈现显著相关关系，Kleibergen-Paap rk LM 统计量和 Kleibergen-Paap rk Wald *F* 统计量表明拒绝工具变量识别不足和弱工具变量假设，共同说明本文选取的工具变量是合理的。第二阶段回归结果显示，在控制可能的内生性偏误后，创新型产业集群政策的估计系数仍在统计上显著为负，表明该政策对城市环境污染具有抑制作用，进一步支持了基准回归结果的稳健性。

表 8　工具变量估计结果

变量	(1)	(2)
	第一阶段	第二阶段
iv	0.0048***	
	(4.43)	
Policy		-0.5398***
		(-5.26)
样本量	3341	3341
城市固定效应	Yes	Yes
年份固定效应	Yes	Yes
Kleibergen-Paap rk Wald *F*	19.597[16.38]	
Kleibergen-Paap rk LM	33.311***	

注：*、**、*** 分别表示通过 10%、5%、1% 的显著性检验；括号内为 *t* 值。[ ]内为 Stock-Yogo 弱工具变量检验在 10% 显著性水平下的临界值。

(四)机制检验

本文的机制分析主要从绿色技术创新、产业集聚增效与数字化绿色传导三个效应展开，探究创新型产业集群政策对环境产生优化作用的路径，借鉴江艇[44]对于机制分析的建议，建立如式(3)所示的模型进行机制检验。

$$M = \alpha_0 + \alpha_1 Policy_{it} + \alpha_2 X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \tag{3}$$

其中：*M* 为机制变量。基于理论分析部分，本文分别从绿色技术创新、产业集聚增效与数字化绿色传导三个维度选取变量，回归结果见表 9。

1. 绿色技术创新效应

在绿色技术创新层面，本文同时从研发投入与产出两个角度出发，采用熵值法基于 R&D 内部经费投入与 R&D 人员数量构建研发强度(*R&D*)指标衡量研发投入。在研发产出方面，参考严若森和张素各[45]的做法，考虑到专利申请数据更能反映企业投入且更具时效性，而专利授权数据更能体现出创新专利的实际价值与社会贡献，同时选取人均绿色专利申请(*perapply*)与人均绿色专利授权(*pergrant*)两个变量作为衡量指标，由表 9 的(1)列~(3)列结果可知，创新型产业集群试点有效推动了地区研发投入与绿色技术创新。创新型产业集群政策通过构建制度化协同创新网络，以绿色技术为传导路径，推动区域经济绿色转型，重塑生产与治理模式。面对外部压力，企业为寻求“创新补偿”，主动将末端治理转向过程控制[46]。通过人才流动、供应链要求、技术联盟等渠道，绿色技术与管理实践在集群内快速扩散，产生显著的示范效应与知识外溢，整个产业生态的绿色化水平整体跃升[47]。

2. 产业集聚增效效应

在产业集聚增效层面，创新型产业集群政策带来的影响可从产业结构与能源效率两个方面进行分析。在产业结构方面，政策通过驱动技术密集型、知识密集型服务业的发展，促使资源要素向高端产业流动，提升了第三产业在整体产业体系中的比重。一般认为产业结构升级与环境之间存在 U 型关系，当科技创新达到一定门槛值时产业结构升级会对生态环境质量有显著影响；而从能源效率角度来看，政策引导下的技术

协同与知识溢出效应,推动了清洁生产技术、能源管理系统等在集群内的有效传播,实现能源配置与利用的优化,有效提升了区域的绿色全要素能源效率。此处选取产业结构升级(*upgrade*)与能源效率(*efficiency*)以较为全面地验证创新型产业集群政策带来的影响。其中,产业结构升级参考景国文[48]的做法,采用第三产业增加值占第一产业和第二产业增加值之和的比重衡量,能源效率参考史丹与李少林[49]的做法,采用 SBM-Malmquist-Luenberger 指数法测算各地级市的绿色全要素能源效率。从表 9 的(4)列和(5)列可以看出,政策实施对产业结构升级与能源效率均产生了显著正向影响。

3. 数字化绿色传导效应

在第四次科技革命浪潮下,创新型产业集群内产业链协同日益紧密,企业对大数据、人工智能等数字技术的应用需求呈现高度集中且迫切的态势,由此催生规模化、高质量的数字基础设施建设需求。政策通过在土地、资金、数据开放等方面提供倾斜支持,有助于打破原有技术壁垒,推动覆盖集群的数字基础设施体系实现统筹规划与系统建设,进而促进数字技术与产业升级的深度融合[37]。产业集群能够通过即时应用反馈,快速验证数字基础设施的实际效能,推动其技术路径与服务模式持续优化,形成“建用互促”的良性循环。而集群内产学研用联系紧密,易于催生针对特定行业的数字解决方案。数字基础设施依托物联网和传感网络,可实现对重点企业及能源消耗的实时、连续、精准监测,通过工业互联网优化生产工艺流程,促进资源共享,借助产品全生命周期碳足迹追踪系统,支撑集群企业应对国际碳壁垒,发展绿色贸易,从减排、增效、保护、循环等多个维度实现环境优化。基于对地级市政府工作报告的文本分析,本文构建了新型数字基础设施相关词频(*TWR*)及其占全部词频比重(*WFD*)的指标,用以度量各城市在数字化基础设施建设方面的政策关注与推进力度。从表 9 的(6)列和(7)列可以看出,创新型产业集群政策显著促进了数字基础设施水平的提升。

表 9　机制检验结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
	perapply	*pergrant*	*R&D*	*upgrade*	*efficiency*	*TWR*	*WFD*
Policy	0.7716***	0.5405***	0.6749***	0.0336***	0.0351***	1.7869***	0.0003***
	(8.50)	(9.07)	(6.37)	(4.77)	(5.37)	(3.16)	(2.64)
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
样本量	3341	3341	3341	3341	3341	3341	3341
R^2	0.8126	0.7995	0.9261	0.9570	0.6762	0.6445	0.6027
城市固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
年份固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

注:*、**、*** 分别表示通过 10%、5%、1%的显著性检验;括号内为 t 值。

4. 数字化对绿色创新与产业集聚的门槛效应分析

前文分别验证了绿色技术创新、产业集聚增效和数字化绿色传导三条路径在创新型产业集群政策传导作用机制中的有效性,但主要基于独立视角考察各机制变量的影响,未考虑其中可能存在的交互效应。事实上,城市数字化水平在直接贡献于环境绩效改善的同时,也构成了绿色技术创新与产业集聚增效发挥减排效能的“赋能基础”,当城市数字化基础设施达到一定水平时,绿色创新与产业集聚所带来的技术红利与规模效应才能充分释放。基于此,此处进一步以数字化水平为门槛变量,系统考察其对绿色创新与产业集聚环境效益的非线性调节作用。

此处分别基于前文的机制变量,运用熵权法构建绿色创新(*GI*)、产业集聚(*IU*)与数字化传导(*DG*)三个综合指标,表 10 展示了以数字化传导(*DG*)为门槛变量

表 10　数字化对绿色创新与产业集聚的门槛效应

变量	(1)	(2)
	Pollution	*Pollution*
门槛区间	$DG \leqslant 0.9686$	$DG \leqslant 3.3900$
GI(*IU*)作用系数	0.3176***	−1.1367***
	(3.36)	(−3.06)
门槛区间	$0.9686 < DG \leqslant 3.3900$	$DG > 3.3900$
GI(*IU*)作用系数	−0.1055*	−1.8124***
	(−1.77)	(−5.22)
门槛区间	$DG > 3.3900$	
GI 作用系数	−0.3526***	
	(−10.07)	
控制变量	Yes	Yes
样本量	2665	2704
R^2	0.7519	0.7440
城市固定效应	Yes	Yes
年份固定效应	Yes	Yes

注:*、**、*** 分别表示通过 10%、5%、1%的显著性检验;括号内为 t 值。

时，绿色创新（*GI*）与产业集聚（*IU*）对城市环境污染排放（*Pollution*）的非线性影响估计结果。结果显示，产业集聚（*IU*）存在单一门槛效应，绿色创新（*GI*）则表现出双重门槛特征，可以发现数字化水平在绿色创新与产业集聚释放环境效益的过程中扮演着正向调节角色，只有当数字化发展跨越一定门槛，绿色创新才能释放自身的环境“祝福效应”。而就产业集聚而言，数字化进程显著增强了其减排效应，数字化程度越高，产业集聚对环境污染的抑制效果越为明显。

（五）异质性分析

1. 城市地理区位异质性检验

前文分析表明，创新型产业集群政策的实施能够显著降低工业污染物排放，改善城市环境质量。考虑到不同地理区位在经济水平、基础设施及政策执行强度等方面存在系统性差异，可能导致政策实施效果呈现空间异质性[50]，本文进一步将样本城市划分为东、中、西部三大区域进行分析。表 11 的回归结果显示，该政策在东部地区对环境污染具有显著的抑制效应，但对中西部地区环境水平的优化影响并不明显。这一差异可能源于以下机制：一方面，东部沿海地区开放型经济体系较为成熟，创新要素集聚，在推动产业集群发展的过程中更注重环境保护与绿色转型，符合“波特假说”所强调的环境规制通过激励创新促进绿色发展的逻辑；另一方面，东部地区较高的市场化程度与开放水平提升了其对高端要素的吸引力，有利于绿色技术在集群内的外溢与扩散。反观中、西部地区，在承接东部产业转移的过程中，可能因基础设施、资金支持与制度环境等方面的约束，陷入“增长优先、环保滞后”的发展路径[51]，一定程度上印证了“污染避难所”假说的内在机制。

2. 资源禀赋异质性分析

城市的资源丰富度与“资源诅咒”之间存在着复杂联系。一般而言，资源禀赋较高的城市依赖自然资源布局产业、制定发展规划，形成路径依赖，进而加剧产业结构单一化。同时，其充裕的资源供应也可能削弱企业研发和采纳高效生产技术的动力[52]。在此条件下，产业集群发展易陷入锁定效应，难以适应市场变化或技术冲击，从而延缓产业升级进程。相比之下，资源相对匮乏的地区往往具备更强的技术创新内在驱动力，能够更有效地借助政策支持推动绿色发展。基于资源禀赋差异，本文依据国务院发布的《全国资源型城市可持续发展规划（2013—2020 年）的通知》将样本城市划分为资源型与非资源型两类，并进行分组回归。从表 11 可以看出，创新型产业集群政策在非资源型城市中产生了显著的环境改善效应，而在资源型城市中该效应并不明显。考虑其原因，可能是由于资源型城市产业发展技术门槛较低，可持续制度设计与前瞻性规划仍需强化，产业升级动力与能力相对不足，附加值提升有限，从而更易陷入“资源诅咒”困境[53]。

3. 环境制度基础异质性分析

在环境制度基础相对完善的地区，政府更加重视发展与保护的统筹，健全环境创新补偿机制，产生规制倒逼效果[54]。在该背景下建设的创新型产业集群面临更严格的制约条件，这推动企业加大研发投入，使其更加注重绿色创新与可持续发展，追求经济效益与环境效益的双赢。考虑到环境制度基础所带来的不同城市间诸多差异，本文根据 2007 年国务院发布的《国家环境保护“十一五”规划》将研究样本中的地级市划分为环境保护重点城市与非环境保护重点城市并分别进行回归分析。从表 11 可以看出，相对于非环境保护重点城市，环境保护重点城市内创新型产业集群的发展会更注重其对环境产生的影响，对减少环境污染产生显著作用，但在非环境保护重点城市内这一作用并不显著。这可能是由于环境保护重点城市作为国家污染治理的重点关注对象在制度设计和政策执行方面形成了更系统、更有约束力的环境规制体系。而在非重点城市，环境规制可能存在执行力度不足、标准相对宽松或激励措施不配套等情况，从而使产业集群的环境优化效应未能充分显现[55]。

4. 市场化程度异质性分析

前文理论分析表明，创新型产业集群的环境效应是创新驱动与规模扩张两种力量动态博弈的结果，而其中负向机制的显现程度在很大程度上取决于区域市场化水平。在市场化程度较高的地区，要素价格信号灵敏，企业进退机制顺畅，政府干预同时受到法治约束与公众监督，从而有效抑制了负向环境冲击。而在市场化程度较低的地区由于行政力量会对资源配置产生较大影响，地方政府在试点申报与实施阶段更可能出

现降低环保准入门槛、过度干预产业布局等行为,致使污染企业在有限空间内高度集聚。基于此,参考熊凌云等[56]的做法,采用地区生产总值与地方政府预算支出的比值衡量市场化水平,并据此进行分组回归。从表 11 可以看出,在高市场化水平地区,政策具有显著的减污效应,系数在 1%水平上显著为负。相比之下,在低市场化地区,政策系数虽为负但并未通过显著性检验,表明市场化程度不足时行政干预引发的负向机制抵消了部分政策红利,此时创新型产业集群政策并未产生显著减排效果。

表 11　异质性分析结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
	东部	中部	西部	资源型	非资源型	环境保护重点	非环境保护重点	高市场化水平	低市场化水平
Policy	−1.1314*** (−7.18)	−0.0414 (−0.24)	0.0954 (0.32)	−0.4228 (−1.58)	−0.8142*** (−6.50)	−0.5340*** (−3.18)	−0.0983 (−0.89)	−0.5451*** (−4.10)	−0.4143 (−1.63)
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
样本量	1534	897	910	1274	2067	1261	2080	1679	1662
R^2	0.7638	0.7202	0.7861	0.7615	0.7626	0.7919	0.7053	0.8009	0.7618
城市固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
年份固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

注:*、**、*** 分别表示通过 10%、5%、1%的显著性检验;括号内为 t 值。

五、进一步分析

(一)基于政策分批推行的处理效应差异与边际动态分析

前文已验证了创新型产业集群政策整体上具有显著的环境优化效应,然而不同批次试点城市在政策实施时机、基础设施建设水平与政策经验积累等方面存在系统性差异,可能导致政策效果呈现出批次异质性。与此同时,政策效应亦可能随时间推移呈现出动态演化特征。为此,本文采用分组回归与边际效应检验,考察不同批次城市的政策效果及其动态变化规律。

表 12 的(1)列~(3)列的分组回归结果显示,不同批次试点城市的政策效应存在明显差异,与传统的“先发优势”预期有所不同。可能有以下原因:第一,后期试点城市在政策设计与实施过程中充分借鉴了前期试点的实践经验,展现出明显的“学习效应”,在一定程度上避免了早期试点城市所面临的试错成本;第二,随着国家对创新型产业集群建设的重视程度不断加深,后期试点的城市往往会获得更为系统和完善的配套政策支持与发展方向指引;第三,后期批次试点城市可能在经济发展基础、创新资源吸收等方面具有后发优势,与政策形成了更好的适配。然而,上述优势在 2017 年批次中尚未进行充分转化,有待进一步检验。进一步地,表 12 的(4)列引入了政策与时间趋势的交互项(*Policy* × *Period*)。其中,时间趋势变量(*Period*)设定为:若城市属于处理组且处于政策实施后年份,则取值为当年年份与政策实施年份之差加 1。可以发现,交互项系数在 1%水平上显著为负,证实创新型产业集群政策效果存在“先强后弱”的动态特征,其环境优化作用在政策实施初期更为显著。这可能是由于政策实施初期通过快速淘汰落后产能、推广成熟清洁技术等举措快速实现减排效果,但随着时间推移,减排空间逐渐收窄,而深层次的绿色转型需要较长的积累周期,导致政策效果增速放缓。上述发现表明,应构建政策的动态调整机制,在政策实施后期持续注入新的激励措

表 12　政策分批处理效应与边际效应分析

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	2013 年	2014 年	2017 年	边际效应
Policy	−0.9747*** (−3.66)	−1.4423*** (−4.83)	−0.4462*** (−3.74)	
Policy× *Period*				−0.1807*** (−6.46)
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes
样本量	2704	2665	2912	3341
R^2	0.7440	0.7519	0.7617	0.7602
城市固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes
年份固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes

注:*、**、*** 分别表示通过 10%、5%、1%的显著性检验;括号内为 t 值。

施，以有效对冲边际效应递减带来的政策衰减影响。

（二）空间溢出效应分析

创新型产业集群作为地区绿色转型的关键载体，其环境治理效应不仅局限于政策实施地区，也可能通过空间关联对邻近地区产生系统性影响。污染物本身具有空间扩散特征，创新型产业集群政策在提升本地环境治理水平的同时，理论上也基于区域间产业结构、技术能力等方面的互动对周边地区的污染减排产生溢出效应。这一外溢效应主要依托两类机制：一是学习效应，即集群通过绿色技术扩散、管理经验与人才流动等渠道，提升了邻近地区的资源利用效率与环境治理能力；二是示范效应，创新型产业集群试点形成的环境规制政策、产业绿色升级路径及可持续发展模式可为周边地区提供可复制、可借鉴的经验，激励其通过政策模仿与制度学习优化当地环境政策体系，实现自身的环境绩效提升。基于此，本文进一步分析创新型产业集群政策的空间溢出效应，构建空间计量回归模型如式（4）所示。

$$Pollution_{it} = \delta_0 + \delta_1 Policy_{it} + \delta_2 X_{it} + \rho \sum_{j=1}^{n} W_{ij} Pollution_{it} + \rho_2 \sum_{j=1}^{n} W_{ij} Policy_{it} + \rho_3 \sum_{j=1}^{n} W_{ij} X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \tag{4}$$

其中：$W_{ij}Pollution_{it}$ 为被解释变量的空间滞后项；$W_{ij}Policy_{it}$ 为解释变量的空间滞后项；$W_{ij}X_{it}$ 为控制变量的空间滞后项；ρ 为空间自回归系数；W 为空间权重矩阵，此处同时选取经济距离矩阵（W_1）与经济地理距离矩阵（W_2），并分别使用空间杜宾模型（SDM）、空间滞后模型（SAR）和空间误差模型（SEM）进行分析。由表 13 可知，*Policy* 的空间滞后项回归系数均显著为负，这表明创新型产业集群政策不仅有效促进了本地区环境质量改善，还具有显著的正向空间外溢效应，带动周边地区协同推进绿色转型与可持续发展。

表 13　集群试点的空间溢出效应估计结果

变量	SDM		SAR		SEM	
	W_1	W_2	W_1	W_2	W_1	W_2
Policy	−0.467* (0.241)	−0.487** (0.231)	−0.594** (0.233)	−0.565** (0.227)	−0.560*** (0.096)	−0.517*** (0.094)
W×Policy	−0.941* (0.516)	−0.798* (0.422)				
直接效应	−0.492** (0.247)	−0.530** (0.239)	−0.592** (0.241)	−0.569** (0.238)		
间接效应	−1.250* (0.649)	−1.360** (0.630)	−0.200** (0.094)	−0.316** (0.141)		
总效应	−1.742** (0.701)	−1.890*** (0.705)	−0.792** (0.321)	−0.885** (0.369)		
ρ	0.214*** (0.047)	0.338*** (0.043)	0.256*** (0.054)	0.367*** (0.048)		
λ					0.247*** (0.033)	0.367*** (0.029)
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
样本量	3341	3341	3341	3341	3341	3341
城市固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
年份固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

注：*、**、*** 分别表示通过 10%、5%、1%的显著性检验；括号内为其稳健标准误。

六、研究结论及政策建议

本文基于 2010—2022 年中国 257 个地级市面板数据，采用多时点 DID 模型系统考察了创新型产业集群政策对城市环境污染的影响。研究发现，创新型产业集群政策的实施展现了明显的环境友好效应，能够有效降低城市环境污染水平，该结论经过平行趋势检验和一系列稳健性检验证实可靠。机制分析表明，创新型产业集群政策通过推动产业结构转型升级、促进绿色技术创新与实现数字化绿色传导使环境质量得到改

善,其中数字化绿色传导路径同时承担着绿色创新与产业升级减排潜能释放的门槛角色。异质性分析发现,受城市地理区位、资源禀赋、环境制度基础、市场化水平等因素影响,创新型产业集群政策的环境优化效应存在显著差异,在东部地区、非资源型城市、环境重点保护城市与高市场化水平地区的政策效果更为突出。进一步分析显示,该政策在对当地环境产生积极影响的同时,也对邻近地区的环境质量产生了积极的溢出效应。同时,政策效果呈现阶段性特征,随着实施时间推移表现出边际递减趋势。基于以上结论,本文提出相应政策建议:

第一,突出创新产业集群制度性建设,打造新时期创新创业生态。研究发现,创新型产业集群的建设具有重要的环境祝福效应,能够有效推动城市环境污染程度的下降。为此,政府在产业发展政策规划的制定中,应增设核心环境绩效指标,确保产业集群政策能与严格的环境监管同向发力,避免"搭便车"式的污染回弹。嵌入全生命周期的制度设计理念,根据集群初创、成长、成熟等不同阶段的特征,构建差异化的环境治理与创新激励体系。具体来说,对于初创阶段的集群,政策重点应放在基础设施搭建与创新生态孕育上,设立专项创新奖励基金,重点支持基础设施建设与初步技术研发,并提供地区适用的人员激励措施。在中等成熟阶段,政府应当提供设备购置补贴和市场推广支持,促进创新要素的流动与转化。当集群已经达到成熟阶段,政府需要关注到核心技术对于集群可持续发展的必要性,集中资源支持其核心技术开发,优先采购绿色产品与服务,创造稳定的市场需求,包括建立创新型产业集群的动态评估与分级管理制度,收集各方意见,加强效果监督与反馈,坚定"绿水青山就是金山银山"理念,实现发展与保护的最优协调。

第二,发展产业绿色生产力,走可持续发展道路。在全球经济向绿色低碳转型的背景下,实现产业绿色转型是未来经济发展和生态保护统筹前进的必要着力点,在集群内部应推动节能环保技术改造,针对绿色技术从基础研发投入到应用转化的不同阶段所面临的风险与需求差异,设立分阶段补贴机制。充分发挥创新型产业集群在地理邻近与产业链协同方面的优势,建立技术快速扩散机制,利用数字化基础设施将规模效应与知识溢出转化为实实在在的减排效能。同时,政策制定者应充分认识数字化水平是绿色创新与产业升级释放环境优化作用的关键门槛,应加大绿色技术设备购置与数字化改造的补贴力度,建立基于区域数字化发展水平的"分层赋能"机制。对于数字化基础设施建设尚不完善的集群应重点加强数字基础设施的补短板工程,鼓励集群内龙头企业、高校、科研院所共建绿色技术协同创新中心,建立技术快速扩散机制,形成产业集群"工业互联网+绿色制造"发展方案。

第三,注重政策强度调整与细化,实施区域差异化转型。城市地理区位、资源禀赋、环境规制基础、市场化水平会对创新型产业集群政策的实施效力产生差异性影响,因此在创新型产业集群建设过程中应当注重对不同城市的统筹兼顾,采取更加多元化的发展战略,跳出固化思路,避免"一刀切"决策。对不同城市做到因地制宜,从其本身发展情况出发制定和落实政策,例如东部地区的政策重点应转向绿色技术创新与全球价值链攀升,规划建设以绿色产业为主导的协同配套集群,打造"零碳集群"样板;而中西部资源型城市需侧重绿色承接与跨越式升级,避免污染转移,构建转型补偿机制,利用后发优势布局绿色基础设施和数字化管理系统。与此同时,针对政策效果随着时间推移而愈发减弱,政策制定者应当建立政策动态评估与预警机制,对进入成熟期的集群适当调整政策工具组合,逐步从普惠式补贴转向竞争式激励,持续激发集群的内生创新动力。

参考文献

[1] 朱东波, 李红. 中国产业集聚的环境效应及其作用机制[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(12): 62-70.
[2] 潘文卿, 赵颖异. 中国制造业嵌入国家价值链和全球价值链的产业-区域特征[J]. 技术经济, 2019, 38(3): 49-59.
[3] 李广众, 吴昊霖, 孙雨桐. 创新型产业集群政策对企业创新的影响评估及政策优化[J]. 厦门大学学报(哲学社会科学版), 2026, 76(1): 11-25.
[4] 周瑛, 王倩. 协同创新驱动视角下产业链韧性提升的机制与路径——基于创新型产业集群多期 DID 的实证研究[J]. 科技进步与对策, 2026, 43(3): 67-77.
[5] 李晓龙, 魏启帆. 创新型产业集群何以提升新质生产力? ——来自准自然实验的经验证据[J]. 南京财经大学学报, 2025(1): 12-22.
[6] 李博阳, 李紫迎, 沈悦. 国家高新区如何推动城市群高质量发展——来自创新型产业集群政策的经验证据[J]. 技术经济, 2025, 44(9): 80-94.
[7] 刘军, 郭立宏, 张武康. 创新型产业集群对城市全要素生产率的影响研究[J]. 科研管理, 2024, 45(5): 105-113.

[8] 胡彬，万道侠. 产业集聚如何影响制造业企业的技术创新模式——兼论企业“创新惰性”的形成原因[J]. 财经研究，2017，43(11)：30-43.
[9] 陈宏阳，余建辉，张文忠. 中国重污染产业空间集聚及其环境效应:特征与启示[J]. 中国科学院院刊，2023，38(12)：1939-1949.
[10] 张可，汪东芳. 经济集聚与环境污染的交互影响及空间溢出[J]. 中国工业经济，2014(6)：70-82.
[11] 闫振坤，张昊一，潘凤. “以集群促发展”政策对城市碳排放的影响:绿色协同还是灰色转移?[J]. 南京财经大学学报，2025(5)：12-22.
[12] ZENG M，ZHENG L，HUANG Z，et al. Does vertical supervision promote regional green transformation? Evidence from central environmental protection inspection[J]. Journal of Environmental Management，2023，326：116681.
[13] DONG Y，ZHANG Y，LIU S. The impacts and instruments of energy transition regulations on environmental pollution[J]. Environmental Impact Assessment Review，2024，105：107448.
[14] 刘运胜. 贸易政策不确定背景下地方环境污染变化的影响研究——基于我国 281 个地级市的实证分析[J]. 科学决策，2024(10)：35-54.
[15] HAO Y，GUO Y，LI S，et al. Towards achieving the sustainable development goal of industry：How does industrial agglomeration affect air pollution?[J]. Innovation and Green Development，2022，1(1)：100003.
[16] 贺茜，戴宏伟. 创新型产业集群对绿色发展的影响及机制分析[J]. 宁夏社会科学，2025(1)：62-77.
[17] 李潇，李新妍. 生态资源、产业结构与环境污染的空间关系——基于省级面板数据的检验[J]. 地域研究与开发，2024，43(3)：136-142.
[18] 耿楷文，张欣钰，刘靖萱. 创新型产业集群试点何以激活城市经济增长动能——基于创新要素配置视角[J]. 产经评论，2025，16(6)：67-84.
[19] 刘洋，张艺楠，陈超. 基于“数实深度融合”的数字产业集群创新系统[J/OL]. 科学学研究，1-19[2026-05-24]. https://doi. org/10. 16192/j. cnki. 1003-2053. 20251202. 004.
[20] 赵放，蒋国梁，樊贝婷，等. 数字产业集聚对区域经济高质量发展的影响[J]. 中国软科学，2025(5)：116-129.
[21] YANG R，HU Z，HU S. The failure of collaborative agglomeration：From the perspective of industrial pollution emission[J]. Journal of Cleaner Production，2023，387：135952.
[22] 王芳，曹一鸣，陈硕. 反思环境库兹涅茨曲线假说[J]. 经济学(季刊)，2020，19(1)：81-100.
[23] 郑思齐，万广华，孙伟增，等. 公众诉求与城市环境治理[J]. 管理世界，2013，29(6)：72-84.
[24] YANG R，HU Z，HU S. The failure of collaborative agglomeration：From the perspective of industrial pollution emission[J]. Journal of Cleaner Production，2023，387：135952.
[25] CHENG Z，YU X. Can central environmental protection inspection induce corporate green technology innovation?[J]. Journal of Cleaner Production，2023，387：135902.
[26] 俞国军，贺灿飞. 产业集群演化的理论演进与实证进展[J/OL]. 产业组织评论，1-20[2026-05-24]. https://link. cnki. net/urlid/CN. 20260112. 1746. 006.
[27] LI X，LAI X，ZHANG F. Research on green innovation effect of industrial agglomeration from perspective of environmental regulation：Evidence in China[J]. Journal of Cleaner Production，2021，288：125583.
[28] 周永红，刘开军，蔡艳芳. 产业集群生态化运作模式对企业成长的影响[J]. 科技进步与对策，2017，34(8)：66-71.
[29] 王欢，张玲. 中国创新型产业集群投入产出效率动态演进及区域差异——基于省际面板数据的分析[J]. 科技进步与对策，2022，39(6)：62-71.
[30] ZHU L，LUO J，DONG Q，et al. Green technology innovation efficiency of energy-intensive industries in China from the perspective of shared resources：Dynamic change and improvement path[J]. Technological Forecasting and Social Change，2021，170：120890.
[31] LI X，GUO F，XU Q，et al. Strategic or substantive innovation? The effect of government environmental punishment on enterprise green technology Innovation[J]. Sustainable Development，2023，31(5)：3365-3386.
[32] 石柔刚，徐维祥. 新质生产力视角下数字经济与绿色创新协同发展的时空特征及溢出效应[J]. 环境科学，2026，47(1)：186-196.
[33] 王欢. 创新型产业集群试点政策促进了城市高技术产业发展水平提升吗[J]. 现代经济探讨，2022(4)：94-104.
[34] 李先江，李炎，张紫怡. 数智化转型对企业两类研发即兴的影响研究[J]. 科学学研究，2025，43(6)：1275-1282.
[35] DU J，SHEN Z，SONG M，et al. Nexus between digital transformation and energy technology innovation：An empirical test of A-share listed enterprises[J]. Energy Economics，2023，120：106572.
[36] XIA L，HAN Q，YU S. Industrial intelligence and industrial structure change：Effect and mechanism[J]. International Review of Economics & Finance，2024，93：1494-1506.
[37] 郭跃驰，张祥建. 数字基础设施建设对企业持续绿色创新的影响——基于“宽带中国”战略的实证检验[J]. 统计与决策，2026，42(1)：178-183.
[38] 刘亦文，邓楠. 环境保护税是否有效释放了四重红利效应?[J]. 中国人口·资源与环境，2023，33(10)：35-46.
[39] 赵春明，钟晓欢，班元浩. 全球供应链风险与国内资本流动——基于企业异地投资的新发现[J]. 中国工业经济，2025(3)：154-173.
[40] 邵帅，葛力铭，朱佳玲. 人与自然何以和谐共生:地理要素视角下的环境规制与环境福利绩效[J]. 管理世界，2024，40(8)：119-146.
[41] 陈强，齐霁，颜冠鹏. 双重差分法的安慰剂检验:一个实践的指南[J]. 管理世界，2025，41(2)：181-220.
[42] 白俊红，张艺璇，卞元超. 创新驱动政策是否提升城市创业活跃度——来自国家创新型城市试点政策的经验证据[J]. 中国工业经济，2022(6)：61-78.

[43] 戴魁早，黄姿，王思曼. 创新型城市政策、要素市场一体化与出口技术复杂度[J]. 国际贸易问题，2023(12)：114-131.
[44] 江艇. 因果推断经验研究中的中介效应与调节效应[J]. 中国工业经济，2022(5)：100-120.
[45] 严若森，张素各. 同伴企业环境信息披露质量与家族企业绿色创新——基于二元合法性视角的检验[J]. 南开管理评论，2025，28(12)：130-141.
[46] GUO J，LÜ J，JIAHUI L. Media attention，green technology innovation and industrial enterprises' sustainable development：The moderating effect of environmental regulation[J]. Economic Analysis and Policy，2023，79：873-889.
[47] XU G，WANG Y，WANG L，et al. How do competition and collaboration promote green technology diffusion? Evidence from the global hydropower industry[J]. Journal of Cleaner Production，2024，478：143890.
[48] 景国文. 知识产权示范城市与城市全要素生产率提升[J]. 云南财经大学学报，2022，38(10)：22-39.
[49] 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]. 中国工业经济，2020(9)：5-23.
[50] 王京，霍生平，贺正楚. 区域数智创新生态系统赋能地方特色新质生产力发展的路径研究[J]. 科学管理研究，2025，43(6)：107-118.
[51] WANG H，DU S，ZHONG Y，et al. Unveiling the impact mechanism of urban resilience on carbon dioxide emissions of the Pearl River Delta urban agglomeration in China[J]. Environmental Impact Assessment Review，2024，105：107422.
[52] GAO Y，LI B，SUN W. Resource curse on innovation：A perspective on local mining industry monopolies in resource-based cities in China[J]. China Economic Review，2023，81：102036.
[53] CHEN P. Curse or blessing? The relationship between sustainable development plans for resource cities and corporate sustainability—Evidence from China[J]. Journal of Environmental Management，2023，341：117988.
[54] 郑威，张义治. 绿色财政政策能否提升城市绿色创新效率——创新技术集聚与创新人才集聚双重视角[J]. 科技进步与对策，2026，43(6)：64-76.
[55] 胡逸群，赵莉，郝冰艳. 碳排放权交易对工业企业绿色创新效率的影响研究——来自中国上市公司的证据[J]. 科技进步与对策，2025，42(24)：127-137.
[56] 熊凌云，黄林菲，杨李娟. 全国统一大市场建设与城市创业活力——来自工程建设项目审批制度改革的证据[J]. 中国工业经济，2025(5)：81-99.

How Does the Innovative Industrial Cluster Policy Affect Regional Environmental Governance? Evidence from a Multi-period Difference-in-differences Model

Li Huiqiao，Yan Hongping，Xiong Kaijun
(International Business School，Hainan University，Haikou 570228，China)

Abstract：Balancing economic development with environmental protection is central to achieving high-quality development. As a key measure for promoting industrial transformation and upgrading，the environmental governance effects of the pilot policy for innovative industrial clusters warrant in-depth examination. Based on panel data from 257 prefecture-level cities covering the period from 2010 to 2022，a multi-period difference-in-differences model was applied to systematically evaluate the impact of the innovative industrial cluster policy on urban environmental quality. The results indicate that the innovative industrial cluster policy significantly improves urban environmental quality. This conclusion remains valid after a series of robustness and endogeneity tests，including parallel trends tests，placebo tests，and PSM-DID. However，the policy effects exhibit significant heterogeneity，influenced by factors such as geographic location，resource endowments，the institutional foundation for environmental protection and the degree of marketization. Mechanism analysis reveals that the environmental optimization effects are primarily achieved through three pathways：incentivizing green technological innovation，guiding industrial restructuring，and leveraging the green transmission function of digitalization. Simultaneously，digitalization serves as a prerequisite for unlocking environmental dividends. Further analysis indicates that the environmental governance effects of this policy exhibit phased characteristics，with policy effectiveness showing a trend of diminishing marginal returns over time. From a spatial perspective，the policy pilot not only improved local environmental quality but also effectively reduced environmental pollution levels in neighboring areas，demonstrating positive spatial spillover effects. The conclusions provide empirical evidence for achieving synergistic governance between industrial development and environmental optimization under the new development paradigm，offering valuable insights for policymakers seeking to promote the development of innovative industrial clusters in a manner tailored to local conditions，unlock the potential of digital empowerment，and enhance the level of regional environmental governance.

Keywords：innovative industrial clusters；environmental governance；green technology innovation；industrial structure upgrading；digital green transmission；spatial spillover