

“宽带中国”战略和低碳城市双试点政策的 减污降碳协同效应研究

文传浩¹ 李汶豫²

(1. 云南大学 经济学院, 云南 昆明 650500; 2. 南昌大学 经济管理学院, 江西 南昌 330031)

摘 要: 研究“宽带中国”战略与低碳城市试点政策叠加的减污降碳协同效应对实现“双碳”目标至关重要。基于2006—2021年我国284个地级及以上城市的面板数据,运用多期双重差分法和空间双重差分法等实证研究“宽带中国”和低碳城市双试点政策对减污降碳协同效应的影响,研究发现:(1)双试点政策能显著提升减污降碳协同效应,且提升作用强于单试点政策;(2)双试点政策能通过促进发明型和改进型绿色技术创新提升减污降碳协同效应;(3)双试点政策在提升本地区减污降碳协同效应的同时,也能赋能邻近城市减污降碳;(4)高行政等级城市、资源型城市、高经济发展城市和非老工业城市的减污降碳协同效应受双试点政策的影响更强;(5)先成为低碳城市再成为“宽带中国”示范城市对减污降碳协同效应的影响更大。研究表明,应重视政策叠加释放的巨大效能,发挥绿色技术创新赋能城市绿色发展的潜能,在因地制宜开展减污降碳工作的同时充分发挥城市间的合力。

关键词: 双试点政策;“宽带中国”战略;低碳城市;减污降碳协同效应;多期双重差分模型

中图分类号: F12

文献标识码: A

文章编号: 1673-0429(2025)04-0079-14

DOI: 10.19742/j.cnki.50-1164/C.250408

一、引言

随着经济社会的发展,气候变化和空气质量问题日益严峻,协同控制大气污染物和碳排放已逐渐成为我国全面绿色转型的必然选择^[1]。“十四五”时期,我国生态文明建设进入了以降碳为重点战略方向、推动减污降碳协同增效,实现生态环境质量改善由量变到质变的关键时期。党的二十大报告指出,要协同推进降碳、减污、扩绿、增长,推进生态优先、绿色低碳发展。国际能源署(IEA)发布的《2023年二氧化碳排放报告》显示,2023年我国与能源相关的碳排放量约占全球总量的33.69%,占比较大,基于污染物和碳排放同根同源的性质^[2],协同推进降碳和减污工作迫在眉睫。

收稿日期: 2025-03-04

作者简介: 文传浩,男,生态学博士,云南大学经济学院教授,博士生导师,主要研究方向:流域可持续发展;李汶豫,女,南昌大学经济管理学院博士研究生,主要研究方向:资源与环境经济。

基金项目: 国家社会科学基金重大项目“长江上游生态大保护政策可持续性与其机制构建研究”(20&ZD095);江苏省研究生科研与实践创新计划项目“数实融合驱动工业减污降碳协同增效的机理与路径研究”(KYCX24_0335)。

国内外学者关于“宽带中国”战略的研究主要集中于经济、社会和环境三个方面,具体包括对经济高质量发展^[3]、就业^[4]、绿色全要素生产率^[5]、能源强度^[6]和碳排放^[7]等因素的探究。由于“宽带中国”战略是数字基础设施的一项早期尝试,部分学者又依托“宽带中国”战略研究分析了数字基础设施产生的一系列影响,例如:程广斌等研究分析认为,数字基础设施建设能显著提升城市经济韧性^[8];Sun 等研究分析认为,数字基础设施建设能有效减轻城市“资源诅咒”^[9]。关于低碳城市试点政策的研究主要围绕碳排放展开,选取的指标包括碳排放量^[10]、碳排放强度^[11]以及碳生产率^[12],这些学者均认为低碳城市试点政策对碳排放呈显著负向影响;此外,也有学者发现低碳城市试点政策能显著提高城市绿色全要素生产率^[13]、提升城市生态效率水平^[14]、改善大气环境质量^[15]。

减污降碳协同效应的概念源于伴生效益、次生效益和协同效益,意指在减少温室气体排放措施的实施过程中产生了其他环境效益^[16]。目前,关于减污降碳协同效应的研究普遍围绕驱动因素分析和单一政策展开。驱动因素方面,人均 GDP、人口密度、产业结构升级、降水量等均能对减污降碳协同效应产生影响^[17-18];单一政策方面,研究发现,碳排放权交易制度^[19]、低碳城市试点政策^[20]以及用能权交易制度^[21]均能显著提升减污降碳协同效应,也能通过技术进步、能源结构清洁化和产业结构优化升级等间接影响减污降碳协同效应^[22]。此外,还有少部分学者从创新型城市与低碳城市试点、排污权与碳排放权交易政策叠加的视角进行研究^[23-24],但关于“宽带中国”战略与低碳城市试点政策叠加对减污降碳协同效应的影响机理仍不明晰。

综上所述,现有研究对“宽带中国”战略和低碳城市两个试点政策的效应均进行了较为全面的分析,但在数字化、绿色化协同发展背景下,尚未有学者将这两种政策叠加分析,以考察其对减污降碳协同效应的影响。基于此,拟通过多期双重差分模型和空间双重差分模型等探究我国 2006—2021 年间 284 个地级及以上城市“宽带中国”战略和低碳城市双试点政策对减污降碳协同效应的影响。由此,本文可能的边际贡献为:(1)分析试点政策叠加对减污降碳协同效应的影响,拓展了现有文献基于单一政策研究的视角;(2)基于发明型和改进型绿色技术创新,探究双试点政策对减污降碳协同效应影响的作用路径,丰富了绿色技术创新这一指标进行研究分析的类别;(3)基于空间溢出效应分析,为进一步扩大双试点城市范围、推进区域一体化建设提供了有益借鉴。

二、政策背景与理论机制

(一)政策背景

为完善宽带基础设施建设、推动宽带基础设施快速发展,2013 年,国务院印发了《“宽带中国”战略及实施方案》,“宽带中国”战略从局部发展上升至国家层面。随后,工业和信息化部、国家发展和改革委员会于 2014 年、2015 年和 2016 年分三批每年确定了 39 个“宽带中国”战略试点城市。“宽带中国”战略的实施不仅致力于提升数字化发展成果的应用水平,还对绿色技术创新等产生了影响,使得其与绿色发展相契合^[25]。

低碳城市试点政策是一项综合性环境政策,旨在通过激励绿色技术创新、完善低碳产业体系等,促进绿色技术进步、实现节能减排和碳排放峰值目标。立足不同地区资源禀赋、发展阶段和产业结构等特征,国家发展和改革委员会于 2010 年、2012 年和 2017 年分三批次确立了广东、辽宁及湖北等试点地区,持续推进碳减排进程和绿色发展。

(二)理论机制

在推进减污降碳过程中,“宽带中国”战略和低碳城市试点政策虽各有侧重,但能相互配合发挥出

较大合力,进而实现“1+1>2”的政策叠加效果^[26]。“宽带中国”战略使得大数据、物联网等技术不断融入日常生活,促使居民消费模式由线下向线上转变,减轻居民因出行消费产生的环境污染问题;同时,随着宽带网络的发展,具有低碳优势的新业态不断涌现,减少了传统商业模式生产和消费过程中的碳足迹,提升了碳排放效率^[27-28];低碳城市则可以通过推出环境规制政策、设定碳排放目标等措施,有效降低雾霾污染和空气污染指数,也可以通过倡导低碳生活理念提高公众绿色消费需求,助推绿色产业发展,降低城市污染^[10,13]。两个试点政策相辅相成,均能降低城市污染物和碳排放。一方面,“宽带中国”战略能进一步提升低碳城市减污和降碳水平,为低碳城市建设提供技术支持,能够不断完善数字基础设施建设、促进数字技术发展,降低企业间的技术壁垒,打破信息流动的时空限制,促进企业开发、共享污染减排技术,加强城市污染治理。同时,数字基础设施具有的强渗透性和高技术能放大传统生产要素带来的产业协同效应,通过优化产业布局,有效减少生产过程中的污染物排放,助力绿色发展^[29]。另一方面,低碳城市试点政策也能进一步提升“宽带中国”示范城市的减污和降碳水平,在低碳城市试点政策实施下,企业可以获得税收优惠、财政补贴、绿色创新低碳发展基金等支持,为数字技术创新与应用提供支撑,同时,低碳城市试点政策也能激发城市绿色制度创新的潜力,为城市数字基础设施建设提供绿色低碳新思路,助推城市绿色低碳发展^[30]。由此,本文提出研究假设 H1。

H1:“宽带中国”战略和低碳城市双试点政策能够提升减污降碳协同效应。

除直接影响外,双试点政策也能通过绿色技术创新间接影响城市减污降碳协同效应。“宽带中国”战略的实施有助于提高城市数字基础设施和网络基础设施建设水平。一方面,数字基础设施建设可以赋能城市数字经济发展,使城市更好地吸收和整合知识、技术、信息,提高绿色技术创新水平;另一方面,网络基础设施在建设过程中可以强化创新知识溢出、提升城市创新能力水平,但与此同时也会产生大量资源消耗问题,为此政府会加大财政科技投入力度,积极推动地区绿色技术创新,缓解创新主体投入成本约束,解决基础设施建设带来的环境问题^[7,31]。低碳城市试点政策可以通过成本效应和创新补偿提升城市绿色技术创新水平,在成本效应方面,通过对试点城市企业过度排放进行制裁和惩罚,增加企业环境成本,倒逼企业进行绿色技术创新;在创新补偿方面,地方政府通过资金支持、投资补助等方式激励企业加大绿色低碳技术研发投入,提升城市绿色技术创新水平^[32]。

绿色技术创新包括发明型和改进型绿色技术创新,是绿色低碳发展的核心动力和城市绿色转型的关键助推器。发明型绿色技术创新是改进型绿色技术创新的基础,其可以通过提出具有实质性特点的技术方案实现技术进步,进而提升碳排放效率、强化污染治理能力;改进型绿色技术创新则更加突出技术的实用性,其可以通过对现有绿色技术的整合利用,实现技术效率提升,减少碳排放;此外,绿色技术创新也可以通过推广绿色消费、构建绿色消费数字平台等方式减少污染物和碳排放^[26]。由此,本文提出研究假设 H2 和 H3。

H2:“宽带中国”战略和低碳城市双试点政策能够通过促进发明型绿色技术创新提升减污降碳协同效应;

H3:“宽带中国”战略和低碳城市双试点政策能够通过促进改进型绿色技术创新提升减污降碳协同效应。

双试点政策不仅可以影响本地区减污降碳协同效应,还可能对邻近城市减污降碳协同效应产生影响。在数字经济迅猛发展浪潮下,大数据等现代信息技术的广泛应用促进了双试点城市与邻近城市的合作交流。在双试点政策实施过程中,邻近城市通过合作、模仿等方式不断改善生态环境质量、促进绿色发展;与此同时,试点城市与邻近城市存在的环境标准差异可能使高污染企业转移至环境标准宽松的邻近城市,导致市场竞争加剧,促使邻近城市企业通过技术升级等方式间接提升绿色创新效率,缓解生

态环境压力,减少污染物和碳排放^[33-34]。由此,本文提出研究假设 H4。

H4:“宽带中国”战略和低碳城市双试点政策能够提升邻近城市减污降碳协同效应。

三、研究设计

(一)模型设定

由于两种试点政策分别开展于不同时期,致使传统双重差分模型难以适用,于是本文基于多期双重差分模型分析双试点政策对减污降碳协同效应的影响,公式如下:

$$pfc_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 did_{it} + \alpha_2 controls_{it} + \mu_i + v_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中,下标 i 和 t 表征城市和年份; pfc 表征减污降碳协同效应; did 表征双试点政策的虚拟变量(某个城市同时成为“宽带中国”示范城市以及低碳试点城市的当年及以后年份取值为 1,其余取值为 0); $controls$ 表征控制变量; α_1 表征多期双重差分变量的估计系数; μ_i 和 v_t 表征城市和年份固定效应; ε_{it} 表征随机误差项。

(二)变量选取

1. 被解释变量。减污降碳协同效应(pfc):PM2.5 是我国各城市主要的大气污染物,参考袁晓玲等的研究,选择 PM2.5 表征“减污”^[35],CO₂ 表征“降碳”,CO₂ 参考李红霞等的算法^[36]。由于二氧化碳和大气污染物具有“同根同源性”,为更好地反映两者之间的协同关系,参考 Chen 等的方法,引入修正后的耦合协调度模型测度减污降碳协同效应^[37],公式如下:

$$C = \sqrt{\left[1 - \sqrt{(U_2 - U_1)^2}\right] \times \frac{U_1}{U_2}} = \sqrt{[1 - (U_2 - U_1)] \times \frac{U_1}{U_2}},$$

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2, \alpha + \beta = 1,$$

$$D = \sqrt{C \times T}。$$

上式中, C 表征耦合度,取值范围为 0~1; U_1 和 U_2 分别表征某一城市 PM2.5 和碳排放量两系统之间的最小值和最大值,为消除原始数据度量单位差异,对 PM2.5 和碳排放量均进行负向标准化处理; T 表征减污和降碳系统的综合评价指数; α 和 β 表征待定系数,由于污染物治理与碳减排同等重要^[38],于是赋值 α 和 β 均为 0.5; D 表征耦合协调度,反映减污和降碳两系统间的耦合关系与协同发展水平,其值越大,两系统间的耦合协调水平越高,减污降碳协同效应越强。

2. 解释变量。“宽带中国”战略和低碳城市双试点政策虚拟变量(did):城市同时实施两项政策的当年及以后年份赋值 did 为 1,其余年份则为 0。此外,为探究双试点政策是否存在“1+1>2”的政策叠加效果,同时设置单试点政策的虚拟变量,当城市仅实施“宽带中国”战略($kdid$)时,在实施当年及以后年份赋值 $kdid$ 为 1,否则为 0;当城市仅实施低碳城市试点政策时($ddid$),在实施当年及以后年份赋值 $ddid$ 为 1,否则为 0。

3. 中介变量。结合闫华飞等的研究,选取发明型绿色技术创新(fzl)和改进型绿色技术创新(szl)为中介变量进行研究分析^[26]。由于专利授权量较专利申请量更能反映科技创新能力,于是选用绿色发明专利授权量表征发明型绿色技术创新,选用绿色实用新型专利授权量表征改进型绿色技术创新。

4. 控制变量。由于自然环境和经济社会发展均会对污染物和碳排放产生影响,于是结合相关研究,从经济社会和自然环境两方面选取以下变量为控制变量^[39-40]:经济发展水平(ed),选用人均 GDP 的对数值表征;对外开放程度(ow),选用进出口总额占 GDP 的比重表征;金融发展程度(fd),选用各城市存

贷款余额占 GDP 的比重表征;城镇化率(ur),选用城镇人口占常住人口的比重表征;产业结构高级化程度(gjh),选用第三产业增加值与第二产业增加值的比值表征;年均降水量(aap);平均气温(mat);空气流通系数(afc)。

(三) 数据来源

本文选取 2006—2021 年我国 284 个地级及以上城市为研究对象,基于数据的可获得性和可靠性,剔除了毕节市、铜仁市、三沙市等城市,且未涉及西藏自治区和港澳台地区。“宽带中国”示范城市名单来源于工业和信息化部官方网站,低碳城市试点名单来源于国家发展和改革委员会官方网站,PM2.5 数据来源于加拿大达尔豪斯大学大气成分分析组,CO₂ 数据来源于中国碳核算数据库(CEADs),空气流通系数来源于哥白尼气候变化服务(C3S),其他数据来源于《中国城市统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》、各城市统计年鉴、统计公报、中经网数据库以及 EPS 数据库,缺失值采用插值法补齐,各变量的描述性统计如表 1 所示。

表 1 各变量的描述性统计

变量名	观测值	平均值	标准差	最小值	最大值
减污降碳协同效应(pfc)	4 544	0.740 7	0.121 5	0.024 2	0.987 1
双试点政策(did)	4 544	0.072 2	0.258 8	0.000 0	1.000 0
经济发展水平($lned$)	4 544	10.471 4	0.697 1	7.997 8	12.295 8
对外开放程度(ow)	4 544	0.204 1	0.410 6	0.000 0	6.569 4
金融发展程度(fd)	4 544	2.318 6	1.161 5	0.560 0	21.301 8
城镇化率(ur)	4 544	0.525 1	0.165 8	0.115 1	1.000 0
产业结构高级化程度(gjh)	4 544	1.030 7	0.567 9	0.076 0	5.350 0
年均降水量(aap)	4 544	0.003 1	0.001 5	0.000 2	0.007 8
平均气温(mat)	4 544	14.063 6	5.256 6	-1.141 9	25.726 4
空气流通系数(afc)	4 544	1 278.922 1	493.935 1	290.710 4	3 862.434 3

四、实证结果分析

(一) 基准回归

双试点政策对减污降碳协同效应影响的回归结果如表 2 所示,第(1)列和第(2)列为未加入控制变量以及加入控制变量的回归结果,两列均控制了城市和年份效应。结果显示,无论是否加入控制变量,双试点政策均能够显著提升减污降碳协同效应;假设 H1 得到验证。就控制变量而言,金融发展程度对减污降碳协同效应的影响不显著,可能由于各城市金融发展存在较大差异所致;经济发展水平、对外开放程度、城镇化率、产业结构高级化、年均降水量以及空气流通系数均能显著提升减污降碳协同效应;随着经济社会发展,居民环保意识不断增强,企业生产技术不断改进,进出口贸易技术溢出效应逐渐显现,进而减少了污染物和碳排放;平均气温对减污降碳协同效应的影响显著为负,可能原因是气温变化导致部分城市出现逆温现象,使得大气扩散能力减弱、污染物集聚和颗粒物浓度升高^[41]。

表 2 基准回归结果

变量	减污降碳协同效应(<i>pfc</i>)	减污降碳协同效应(<i>pfc</i>)
	(1)	(2)
双试点政策(<i>did</i>)	0.014 4*** (4.559 0)	0.017 6*** (5.515 3)
经济发展水平(<i>lned</i>)		0.028 2*** (5.598 0)
对外开放程度(<i>ow</i>)		0.004 8** (2.078 8)
金融发展程度(<i>fd</i>)		0.002 7 (1.641 5)
城镇化率(<i>ur</i>)		0.059 9*** (3.782 3)
产业结构高级化程度(<i>gjh</i>)		0.016 3*** (4.238 4)
年均降水量(<i>aap</i>)		5.150 7*** (3.529 5)
平均气温(<i>mat</i>)		-0.011 2*** (-4.942 2)
空气流通系数(<i>afc</i>)		0.000 0*** (4.061 2)
cons	0.739 7*** (1 000.532 7)	0.473 6*** (6.920 3)
城市固定效应	YES	YES
年份固定效应	YES	YES
<i>R</i> ²	0.865 1	0.869 1
<i>N</i>	4 544	4 544

注：***、**和*分别表示在 1%、5%和 10%的显著性水平下显著,括号内为 *t* 值,下同。

(二) 平行趋势检验

满足平行趋势假设是多期双重差分模型有效的前提,基于 Jacobson 等提出的事件研究法进行平行趋势检验^[42],公式如下:

$$pfc_{it} = \alpha_0 + \sum_{t=-6}^6 \lambda_t D_{it} + \alpha_2 controls_{it} + \mu_i + v_t + \varepsilon_{it} \circ$$

上式中, λ_t 表征双试点政策实施前后对减污降碳协同效应的影响; D_{it} 表征一组虚拟变量且取值为 0 或 1,若城市 *i* 在第 *t* 年实施双试点政策则赋值为 1,反之为 0;其余符号含义同式(1),检验结果如图 1 所示。在政策实施前,减污降碳协同效应对应的回归系数均不显著,即双试点城市与非双试点城市的减污降碳协同效应无显著差异,而政策实施后呈现出显著差异,且政策实施后双试点政策对减污降碳协同效应的影响系数为正并呈逐渐上升态势,满足平行趋势假设。

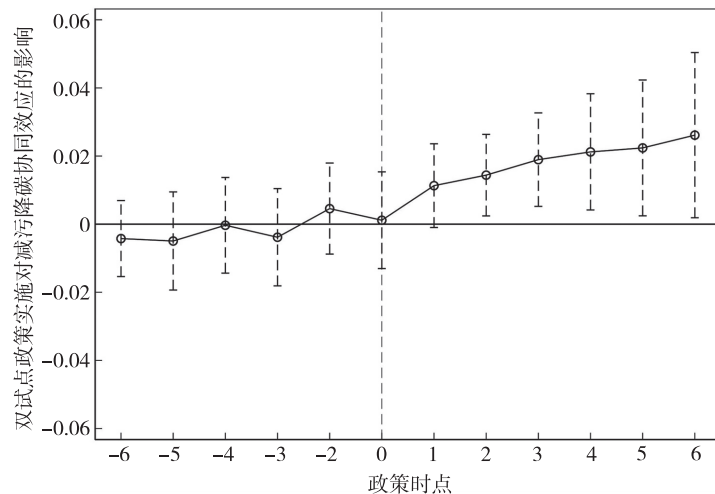


图1 平行趋势检验

(三) 稳健性检验

1. 安慰剂检验。借鉴同华飞等的研究,采用替换处理组个体进行安慰剂检验,以排除随机因素干扰^[26]。为保证研究一致性,首先从样本中随机抽取同实施双试点政策城市个数相同的城市 50 个进行分析,随后根据基准模型重复 500 次回归模拟,得到双试点政策对减污降碳协同效应影响的估计系数,最后根据估计系数绘出系数估计值的概率密度图(图 2)。图 2 显示双试点政策对减污降碳协同效应影响的估计系数值呈正态分布且均落在 0 值附近。此外,模拟得到的政策结果显著偏离实际政策效应的估计值(虚竖线),表明本文研究结果具有稳健性。

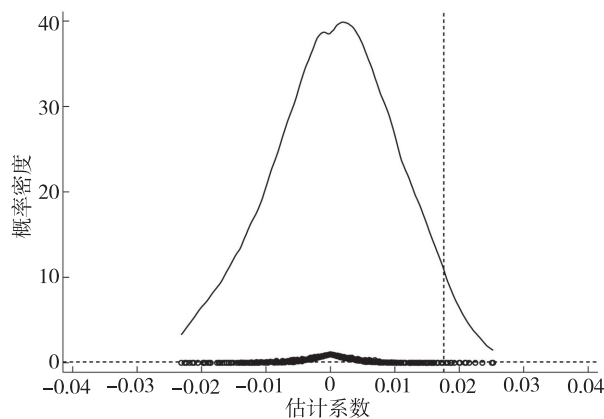


图2 安慰剂检验

2. 其他稳健性检验。本文使用“倾向得分匹配双重差分法”(PSM-DID)、剔除其他政策干扰、排除极端值影响以及剔除直辖市进行其他稳健性检验,结果如表 3 第(1)~(5)列所示。(1)PSM-DID。为控制各城市间资源禀赋和经济社会发展水平等差异导致回归结果出现偏差,使用 PSM-DID 进行检验,结果显示双试点政策能显著提升减污降碳协同效应,表明本文结果的稳健性。(2)剔除其他政策干扰。为排除双试点城市减污降碳协同效应的提升可能源于多个政策共同作用所致,考虑试点同期存在的智慧城市试点政策和碳排放权交易政策,在基准回归中分别加入这两种试点城市的虚拟变量,结果显示自变量系数均显著为正,表明本文结果的稳健性。(3)排除极端值影响。考虑到样本数据极端值可能对回归结果产生影响,基于边志强^[2]的研究,对减污降碳协同效应以及所有控制变量均进行前后 1%的缩尾处理并重新进行回归。结果显示,回归系数显著为正,表明本文结果的稳健性。(4)剔除直辖市。基

于裴尔洁和张治栋^[3]的研究,由于直辖市的特殊地位使得其与地级市在城市规模、政策力度与环境约束等方面存在差异,而在行政级别上同省和自治区相当,为排除直辖市的特殊性对回归结果产生影响,于是剔除直辖市样本进行回归,结果显示回归系数显著为正,表明本文结果的稳健性。

表 3 其他稳健性检验

变量	PSM-DID (1)	智慧城市 (2)	碳排放权交易 (3)	排除极端值影响 (4)	剔除直辖市 (5)
双试点政策(<i>did</i>)	0.008 4 ** (2.282 9)	0.017 6 *** (5.518 3)	0.012 6 *** (4.039 6)	0.019 5 *** (6.445 1)	0.017 0 *** (5.430 7)
控制变量	YES	YES	YES	YES	YES
cons	0.386 5 *** (3.716 0)	0.473 5 *** (6.914 5)	0.465 9 *** (6.839 6)	0.409 9 *** (5.806 1)	0.482 9 *** (7.060 1)
城市固定效应	YES	YES	YES	YES	YES
年份固定效应	YES	YES	YES	YES	YES
<i>R</i> ²	0.872 9	0.869 1	0.870 3	0.877 3	0.870 8
<i>N</i>	2 996	4 544	4 544	4 544	4 480

(四) 机制检验

为分析双试点政策影响减污降碳协同效应的作用机制,选用 Sobel 和 Bootstrap 检验法进行探究,结果如表 4 所示。Sobel 检验结果显示,发明型和改进型绿色技术创新均表现出显著的间接效应。其中,改进型绿色技术创新的中介效应值为 32.77%,高于发明型绿色技术创新的中介效应值 24.73%,表明相较于研发周期长、技术革新大、投入成本高的原始创新,以研发周期短、实用性强为特征的二次创新更能显著提升减污降碳协同效应。Bootstrap 检验结果显示,这两种绿色技术创新在 95%显著性水平下的置信区间均不包含 0。Sobel 和 Bootstrap 检验法均表明,双试点政策能够通过提升发明型和改进型绿色技术创新水平赋能减污降碳协同增效,假设 H2 和 H3 成立。

表 4 中介效应分析

变量	发明型绿色技术创新(<i>fzl</i>)	改进型绿色技术创新(<i>szl</i>)
Sobel	0.003 5 ***	0.004 3 ***
Bootstrap 95% CI	[0.000 3,0.005 9]	[0.000 9,0.008 2]
标准误	0.001 1	0.001 2
<i>P</i> 值	0.001 3	0.000 2
中介效应值	24.73%	32.77%

(五) 异质性分析

1. 行政等级异质性。不同行政级别的城市在发展机遇、资源存量、财政收入等方面存在差异,进而可能影响双试点政策的促进效应。参考王淑贺等的研究,将直辖市与省会城市划分为高行政级别城市,其余城市划分为低行政级别城市^[38],回归结果如表 5 第(1)列和第(2)列所示。结果显示,双试点政策对两种行政级别城市的影响均显著,且对高行政级别城市的影响更大。进一步通过组间系数差异检验表明,两种城市的估计系数间存在显著差异。高行政级别城市通常是区域经济社会发展的中心,拥有丰富的创新资源、完善的产业体系、强大的经济实力,能够在双试点政策实施中提供有力的组织领导和资源支持,进而发挥先行者作用,促进减污降碳协同增效。

2. 资源禀赋异质性。由于我国各城市资源禀赋存在较大差异,而资源禀赋的不同会影响资源利用效率、产业结构等,进而影响污染物和碳排放。因此,根据《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020年)》公布的资源型城市名单,本文将所有城市分为资源型和非资源型城市进行回归分析,结果如表5第(3)列和第(4)列所示。结果显示,双试点政策对资源型城市减污降碳协同效应的影响更显著,且组间系数差异检验显著。资源型城市属于以自然资源开发为主导产业的城市,长期依赖于自身资源禀赋,污染物和碳排放均有较大改善空间;而非资源型城市的发展对高耗能资源的依赖程度相对较小,绿色低碳发展基础较好。因此,双试点政策对资源型城市的影响更大。

3. 经济发展水平异质性。经济发展水平是各城市发展建设的基础,在环境保护、绿色转型等方面起着重要作用。参考戴玮的研究,以各年份所有城市地区生产总值的中位数为划分标准,总值高于中位数的城市为经济发展水平较高城市,其他城市则为经济发展水平较低城市^[43],回归结果如表5第(5)列和第(6)列所示。结果显示,双试点政策对高经济发展水平城市和低经济发展水平城市的影响均显著,且对高经济发展水平城市的影响更大。进一步组间系数差异检验表明,系数间存在显著差异。经济发展水平较高的城市可能会优先保护环境,而经济发展水平较低的城市会优先发展经济。

4. 工业特征异质性。工业作为国民经济的支柱性产业,在生产过程中会产生大量污染物,带来环境污染问题。由此,基于《全国老工业基地调整改造规划(2013—2022年)》,本文将所有城市划分为老工业城市和非老工业城市,回归结果如表5第(7)列和第(8)列所示。结果显示,双试点政策对两类城市减污降碳协同效应的影响均显著,且对非老工业城市的影响更大。进一步通过组间系数差异检验表明,系数间存在显著差异。老工业城市主要呈现高能耗、高污染特征,且存在资源依赖和路径发展依赖,产业结构单一,产业转型阻力较大,进而双试点政策难以在短期内有效改善这类城市的污染治理;而非老工业城市市场化程度较高,对环境质量诉求更多,进而对减污降碳协同效应的提升效果更显著。

表5 异质性分析

变量	高行政等级 城市 (1)	低行政等级 城市 (2)	资源型 城市 (3)	非资源型 城市 (4)	高经济发展 城市 (5)	低经济发展 城市 (6)	老工业 城市 (7)	非老工业 城市 (8)
双试点政策 (<i>did</i>)	0.039 3*** (4.464 1)	0.015 3*** (4.544 7)	0.030 9*** (4.617 1)	0.004 7 (1.327 3)	0.017 8*** (4.600 9)	0.012 5*** (2.763 7)	0.012 2** (2.243 6)	0.017 2*** (4.466 3)
控制变量	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
城市固定效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
年份固定效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
R^2	0.847 6	0.872 5	0.827 5	0.906 7	0.876 8	0.865 2	0.853 4	0.878 5
N	480	4 064	1 840	2 704	2 272	2 272	1 520	3 024
组间系数 差异检验 (经验 P 值)	0.000		0.000		0.075		0.016	

注:经验 P 值由费舍尔组合检验抽样 1 000 次得出。

(六) 空间效应分析

双试点政策的实施不仅对试点地区减污降碳产生影响,对邻近城市减污降碳也可能产生影响,基于葛力铭等的研究,将双重差分模型与空间计量模型相结合,构建基于空间杜宾模型(SDM)的空间双重差分模型,以分析双试点政策的空间溢出效应^[33],公式如下:

$$pfc_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 did_{it} + \alpha_2 controls_{it} + \lambda_1(wpfc_{it}) + \lambda_2(wdid_{it}) + \lambda_3(wcontrols_{it}) + \mu_i + v_t + \varepsilon_{it}。$$

上式中, w 为空间权重矩阵, 由于邻接矩阵广泛应用于空间问题研究, 故选用空间邻接矩阵表征, 并同时选取经济距离矩阵(w_1)与反距离矩阵(w_2)进行稳健性检验; $wpcf$ 表征城市减污降碳协同效应的空间滞后项; $wdid$ 表征双试点政策的空间滞后项; $wcontrols$ 表征控制变量的空间滞后项, 其余符号含义同式(1)。

首先基于空间邻接矩阵进行全局莫兰指数检验, 结果显示城市间减污降碳协同效应的全局莫兰指数均显著大于 0, 存在空间相关性; 随后进行 LM 检验、LR 检验、Hausman 检验以及 Wald 检验, 结果显示应使用双向固定的空间杜宾模型进行回归分析(如表 6 所示)。空间自回归系数 ρ 显著为正, 表明不同城市间减污降碳协同效应存在空间相关性, 进一步将空间效应进行分解, 得到双试点政策对减污降碳协同效应影响的直接效应、间接效应和总效应, 这三种效应均显著为正。在通过替换空间权重矩阵进行稳健性检验后发现, 无论是直接效应还是间接效应, 回归系数均显著为正, 即双试点政策的实施对本地区 and 邻近城市的减污降碳协同效应均具有显著促进作用。一是示范效应使得邻近城市通过学习和模仿双试点城市的管理模式和治理经验, 进而提升减污降碳协同治理水平; 二是竞争效应使得邻近城市因双试点城市在减污降碳协同治理过程中获得良好的生态环境质量和更高的经济社会效益而强化自身竞争力, 进而主动改善生态环境状况, 提升减污降碳协同治理力度; 三是本地区通过合作交流、资源共享及知识溢出, 进而带动邻近城市减污降碳协同治理^[44]。

表 6 减污降碳协同效应的空间溢出效应分析

变量	减污降碳协同效应 $pfc(w)$ (1)	减污降碳协同效应 $pfc(w_1)$ (2)	减污降碳协同效应 $pfc(w_2)$ (3)
直接效应	0.014 4 *** (4.063 7)	0.015 6 *** (4.286 4)	0.017 9 *** (5.232 7)
间接效应	0.543 0 *** (5.663 7)	0.002 8 ** (2.005 4)	0.418 2 *** (3.279 6)
总效应	0.557 5 *** (5.766 1)	0.018 4 *** (4.479 8)	0.436 2 *** (3.367 6)
控制变量	YES	YES	YES
城市固定效应	YES	YES	YES
时间固定效应	YES	YES	YES
Spa- ρ	0.484 1 *** (9.763 5)	0.312 0 *** (10.922 4)	0.930 0 *** (85.156 9)
观测值	4 544	4 544	4 544
R^2	0.433 6	0.397 9	0.468 7

注: 括号内为 z 值。

(七) 进一步分析

为进一步检验双试点政策的协同效应, 首先分析单一政策实施对减污降碳协同效应的影响。剔除实施低碳城市试点政策的城市, 将“宽带中国”战略试点政策作为单试点政策进行回归分析, 选取“宽带中国”示范城市为实验组, 其余城市为对照组, 回归结果如表 7 第(1)列所示。由第(1)列可知, “宽带中国”战略试点政策对减污降碳协同效应的影响显著为正。同理, 将低碳城市试点政策作为单试点政策进行回归分析, 结果如第(2)列所示, 低碳城市试点政策对减污降碳协同效应的影响也显著为正, 表明两项政策的单试点均能显著赋能减污降碳协同增效。

其次, 比较分析实施两种政策和仅实施单一政策对减污降碳协同效应的影响, 即实施双试点政策能

否产生“1+1>2”的效果。剔除未实施政策的城市,选取实施政策的城市为样本,实验组为实施双试点政策的城市,对照组为仅实施单一政策的城市,回归结果如表7第(3)列所示。结果表明,单试点城市进一步成为双试点城市能更显著赋能减污降碳协同增效,即双试点城市比仅是单试点城市对减污降碳协同效应的影响更有效。

最后,分析城市实施这两种政策的先后顺序对减污降碳协同效应的影响。将先实施“宽带中国”战略的双试点城市作为实验组,而两种政策均未实施的城市作为对照组进行回归分析,结果如表7第(4)列所示,结果表明先成为“宽带中国”示范城市的双试点城市的减污降碳协同效应显著为正。同理,由第(5)列可知先成为低碳试点城市的双试点城市的减污降碳协同效应也显著为正,且回归系数大于第(4)列的结果,即先实施低碳城市试点政策的双试点政策对减污降碳协同效应的影响更大。低碳城市的选择可能依托城市经济实力、产业结构和政策环境等因素,选择的城市均有能力开展低碳试点工作;当这些城市具备一定的环境保护基础时,利用数字基础设施建设能进一步赋能低碳试点工作开展,进而提升减污降碳协同效应^[28]。

表7 进一步分析

变量	“宽带中国”战略 (1)	低碳城市试点 (2)	双试点政策 (3)	先宽带后低碳 (4)	先低碳后宽带 (5)
双试点政策(<i>did</i>)	0.006 6** (1.971 3)	0.006 1** (2.229 8)	0.017 5*** (5.382 9)	0.018 0*** (2.886 1)	0.018 4*** (4.215 8)
控制变量	YES	YES	YES	YES	YES
城市固定效应	YES	YES	YES	YES	YES
年份固定效应	YES	YES	YES	YES	YES
<i>R</i> ²	0.867 7	0.868 3	0.871 7	0.865 1	0.869 1
<i>N</i>	3 376	3 632	2 880	1 920	2 208

五、结论与建议

(一) 结论

进入数字化、绿色化时代,完善基础设施建设、促进城市绿色低碳转型是实现减污降碳的重要手段和推进生态文明建设的重要举措。本文基于2006—2021年我国284个地级及以上城市的面板数据,以“宽带中国”战略和低碳城市双试点政策为准自然实验,通过多期双重差分模型和空间双重差分模型等研究分析了政策叠加对减污降碳协同效应的影响。研究发现:(1)双试点政策对减污降碳协同效应具有显著促进作用,经过一系列稳健性检验后结果仍然成立;(2)机制检验结果表明,双试点政策能够通过提升发明型和改进型绿色技术创新水平促进减污降碳协同增效;(3)空间溢出效应结果表明,双试点政策能同时赋能本地区 and 邻近城市减污降碳协同增效;(4)异质性分析结果表明,双试点政策对高行政等级城市、资源型城市、高经济发展城市和非老工业城市减污降碳协同效应的促进作用更强;(5)进一步研究结果表明,任一单试点政策均能显著赋能减污降碳协同增效,但赋能效果均不及双试点政策,此外,先实施低碳城市试点政策的双试点政策对减污降碳协同效应的影响更大。

(二) 建议

基于以上结论,提出如下建议:(1)重视政策叠加产生的巨大效应,扩大双试点政策的实施范围。应设立双试点政策专项基金,鼓励企业推动减污和降碳协同治理,不断总结双试点政策对减污降碳协同

效应的影响经验,持续优化政策实施路径、提高政策实施效率。按城市经济发展水平、资源禀赋等差异分层选取新试点地区,并优先考虑在已实施低碳城市试点政策的地区加强“宽带中国”战略试点政策的落实,实现政策资源精准匹配。同时,利用数字技术搭建智能化碳排放监测平台,为双试点政策制定和企业减排提供数据支撑。(2)完善绿色技术创新各项措施,促进经济社会绿色化、低碳化发展。应不断改进人才引进机制,在住房、教育等方面给予支持;不断完善投资补助和贷款政策,降低企业创新成本。同时,构建资源和信息共享平台,吸引创新型人才主动落户、企业主动投入绿色技术创新,助力经济社会绿色低碳转型,不断改善环境污染状况,减少污染物和碳排放。(3)注重各城市差异,因地制宜开展减污降碳协同治理工作。高行政等级城市应进一步强化和改善现有措施,通过传授可复制和可推广的经验带动低行政等级城市减污降碳协同治理;资源型城市应进一步降低对自然资源的依赖,提高资源利用效率,加强与非资源型城市合作交流;低经济发展水平城市应借鉴高经济发展水平城市的环境治理经验,定期与其开展绿色发展合作交流;老工业城市应突破产业转型阻力,与非老工业城市建立产业合作机制,提升减污降碳协同治理效能。(4)发挥城市合力,协同推进减污降碳工作开展。由于双试点政策对减污降碳协同效应的影响可以辐射周边地区,各城市间应打破信息壁垒,构建环境监测数据共享平台,定期组织研讨会和交流会,加强合作交流、强化合作意识、提高合作能力,避免恶性竞争,协同推进减污降碳工作开展,共同助推生态环境质量改善。

[参 考 文 献]

- [1] 李子豪,赵元,夏子谦. 环保督政与地区减霾降碳协同治理绩效提升:基于环保约谈的准自然实验估计[J]. 中国软科学,2023(12):198-207.
- [2] 边志强. 智慧城市建设对减污降碳协同治理的影响研究[J]. 工业技术经济,2024(1):102-111.
- [3] 裴尔洁,张治栋. 数字基础设施建设对经济高质量发展的影响——基于“宽带中国”战略的准自然实验[J]. 华东经济管理,2024(2):64-74.
- [4] Jin X, Ma B J, Zhang H F. Impact of fast Internet access on employment: Evidence from a broadband expansion in China [J]. China Economic Review, 2023: 102038.
- [5] Wen H W, Liang W T, Lee C C. Urban broadband infrastructure and green total-factor energy efficiency in China[J]. Utilities Policy, 2022: 101414.
- [6] Hong J J, Shi F Y, Zheng Y H. Does network infrastructure construction reduce energy intensity? Based on the “Broadband China” strategy[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2023: 122437.
- [7] 郭丰,任毅,柴泽阳. “双碳”目标下数字基础设施建设与城市碳排放——基于“宽带中国”试点政策的准自然实验[J]. 中国经济问题,2023(5):164-180.
- [8] 程广斌,靳瑶,侯林岐. 数字基础设施建设能否让城市经济更具韧性——来自“宽带中国”试点政策的经验证据[J]. 软科学,2024(8):45-51.
- [9] Sun J J, Zhai C C, Dong X Q, et al. How does digital infrastructure break the resource curse of cities? Evidence from a quasi-natural experiment in China[J]. Resources Policy, 2023: 104302.
- [10] 郭丰,任毅. 低碳城市试点政策能够促进城市低碳发展吗? [J]. 当代经济管理,2024(3):26-37.
- [11] Zeng S B, Jin G, Tan K Y, et al. Can low-carbon city construction reduce carbon intensity? Empirical evidence from low-carbon city pilot policy in China[J]. Journal of Environmental Management, 2023: 117363.
- [12] 肖涵月,孙慧,王慧,等. 从“试点”到“扩散”:低碳城市试点的包容性低碳增长效应分析[J]. 产业经济研究,2022(3):28-40.
- [13] 尚海燕. 低碳城市试点对城市绿色全要素生产率的影响[J]. 商业经济研究,2024(1):188-192.
- [14] 郭炳南,唐利,张浩. 城市低碳治理对生态效率的影响——基于低碳城市试点政策的准自然实验[J]. 华东经济管理,2023(8):82-90.

- [15] 于潇,林建鑫. 低碳试点政策对大气环境的影响及空间效应研究[J]. 中国环境管理,2023(6):56-70.
- [16] 毛显强,曾桢,邢有凯,等. 从理念到行动:温室气体与局地污染物减排的协同效益与协同控制研究综述[J]. 气候变化研究进展,2021(3):255-267.
- [17] 原伟鹏,孙慧,王晶,等. 中国城市减污降碳协同的时空演化及驱动力探析[J]. 经济地理,2022(10):72-82.
- [18] 王雅楠,李冰迅,张艺芯,等. 中国减污降碳协同效应时空特征与影响因素[J]. 环境科学,2024(9):4993-5002.
- [19] Zhou B, Zhang C, Song H Y, et al. How does emission trading reduce China's carbon intensity? An exploration using a decomposition and difference-in-differences approach[J]. Science of the Total Environment, 2019: 514-523.
- [20] Wang H, Gu K Y, Dong F, et al. Does the low-carbon city pilot policy achieve the synergistic effect of pollution and carbon reduction? [J]. Energy & Environment, 2024(2): 569-596.
- [21] 吴雪萍,邱文海. 用能权交易制度的减污降碳协同效应分析[J]. 环境科学,2024(8):4627-4635.
- [22] 罗良文,雷朱家华. 中国碳市场政策的减污降碳协同效应[J]. 资源科学,2024(1):53-68.
- [23] 朱思瑜,于冰. “排污权”和“碳排放权”交易的减污降碳协同效应研究——基于污染治理和政策管理的双重视角[J]. 中国环境管理,2023(1):102-109.
- [24] 邢会,孙语泽,霍晓谦. 协同抑或冲突? 创新与环境政策叠加对城市减污降碳协同的影响研究[J/OL]. 软科学,1-13[2025-07-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1268.g3.20250310.1650.002.html>.
- [25] 孟醒,朱平芳. 数字基建驱动绿色创新的效应与机制研究——基于“宽带中国”战略的政策实验[J]. 经济与管理研究,2025(1):90-108.
- [26] 闫华飞,章雷敏,肖静. “宽带中国”和低碳城市双试点政策的碳减排效应——基于283个地级市的准自然实验[J]. 南京财经大学学报,2023(5):69-78.
- [27] 郭劲光,王虹力. 数字赋能下减排战略的创新性选择——基于“宽带中国”试点政策的准自然实验[J]. 产业经济研究,2022(4):101-113+142.
- [28] 陈波,徐换歌,倪晨旭. 新型基础设施建设与城市绿色低碳发展——基于“宽带中国”战略的经验证据[J]. 兰州学刊,2023(4):31-47.
- [29] 向仙虹,张瀚月,杨国歌. 数字基础设施建设对包容性低碳发展的影响——基于“宽带中国”战略的准自然实验[J]. 首都经济贸易大学学报,2024(04):3-20.
- [30] 赵振智,程振,吕德胜. 低碳城市建设能成为企业数字化转型的新动能吗? ——来自低碳城市试点的经验证据[J]. 商业研究,2024(3):80-91.
- [31] 江三良,贾芳芳. 网络基础设施建设对城市绿色创新的影响研究——基于“宽带中国”战略试点的准自然实验[J]. 工业技术经济,2023(5):124-131.
- [32] 陈丽娜,柏杨. 双试点政策对绿色全要素生产率的影响——基于低碳城市和创新型城市双试点政策的准自然实验[J]. 科技管理研究,2023(17):49-58.
- [33] 葛力铭,郑贺允,孙鹏博,等. 低碳赋能增效:低碳城市试点政策对环境福利绩效的影响[J]. 统计研究,2024(2):100-113.
- [34] 张梦,黄颖利. 低碳城市和创新型城市双试点效果评估——基于绿色经济转型视角[J]. 中国环境管理,2024(1):73-81.
- [35] 袁晓玲,郝继宏,钟楚潮,等. 中国城市“减污降碳”协同驱动因素及实现路径研究[J]. 管理学报,2023(4):26-46.
- [36] 李红霞,郑石明,要蓉蓉. 环境与经济目标设置何以影响减污降碳协同管理绩效? [J]. 中国人口·资源与环境,2022(11):109-120.
- [37] Chen S Y, Tan Z X, Mu S Y, et al. Synergy level of pollution and carbon reduction in the Yangtze River Economic Belt: Spatial-temporal evolution characteristics and driving factors[J]. Sustainable Cities and Society, 2023: 104859.
- [38] 王淑贺,刘世哲,李晓敏. 数字经济空间关联网络对减污降碳的影响机制研究[J]. 中国地质大学学报(社会科学版),2025,25(2):105-119.
- [39] 孙晶琪,周奕全,王愿,等. 市场型环境规制交互下减污降碳协同增效的效应分析[J]. 中国环境管理,2023(2):48-57.
- [40] 惠献波. 国家创新型城市建设、产业转型升级与碳排放效应[J]. 统计与决策,2023(21):117-121.
- [41] 王聪聪,张小玲,卢宁生. 2019—2021年四川盆地污染天气客观分型及典型污染个例研究[J]. 中国环境科学,2023(5):2182-2197.

- [42] Jacobson L S, Lalond R J, Sullivan D G. Earnings losses of displaced workers[J]. The American economic review, 1993 (4): 685-709.
- [43] 戴玮. 技术比较优势、技术创新与经济增长[J]. 统计与决策, 2023(9): 131-135.
- [44] 姜浩, 邓峰. 新能源示范城市建设的减污降碳协同治理效应研究[J/OL]. 软科学, 1-17. [2025-05-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1268.G3.20250211.1411.002.html>.

Study on the Synergistic Effect of Pollution and Carbon Reduction of the “Broadband China” Strategy and the Dual-pilot Low-carbon City Policy

Wen Chuanhao¹ Li Wenyu²

(1. School of Economics, Yunnan University, Kunming Yunnan 650091;

2. School of Economics & Management, Nanchang University, Nanchang Jiangxi 330031, China)

Abstract: Studying the synergy effect of pollution reduction and carbon emission reduction when the “Broadband China” strategy is superimposed with the pilot policies of low-carbon cities is of vital importance for achieving the “dual carbon” goals. Based on the panel data of 284 prefecture-level and above cities in China from 2006 to 2021, this paper empirically studies the impact of the “Broadband China” strategy and the dual pilot policy of low-carbon cities on the synergy of pollution reduction and carbon emission reduction by using methods such as the multi-period difference-in-differences method and the spatial difference-in-differences method. The study finds that: 1) The dual-pilot policy can significantly enhance the synergy effect of pollution reduction and carbon reduction, and the enhancement effect is stronger than that of single-pilot policy. 2) The dual-pilot policies can enhance synergies in reducing pollution and carbon emissions by promoting innovative and improved green technology innovations. 3) The dual-pilot policy will not only enhance the synergy effect of pollution and carbon reduction in the region, but also in the neighbouring cities. 4) The synergy effect of pollution reduction and carbon emission reduction in cities with high administrative levels, resource-based cities, cities with high economic development and non-old industrial cities is more strongly influenced by the dual pilot policy. (5) Becoming a low-carbon city before becoming a “Broadband China” demonstration city has a greater impact on the synergistic effects of reducing pollution and carbon emissions. The study suggests that the huge effect released by the superimposition of policies should be emphasized, and the potential of green technological innovation to empower the green development of cities should be brought into play. While carrying out pollution reduction and carbon emission reduction work in accordance with local conditions, the synergy among cities should be fully exerted.

Keywords: dual-pilot policy; “Broadband China” strategy; low carbon city; synergistic effect of reducing pollution and carbon; multi-period double-difference modelling

[责任编辑: 邹柳馨]