

DOI: 10.20103/j.stxb.202504040784

于超月,赵翔宇,张正峰.气候适应型城市试点政策对城市可持续性的影响——基于双重差分模型的实证分析.生态学报,2025,45(20): - - .
Yu C Y, Zhao X Y, Zhang Z F. The effect of pilot climate-adapted city policy on urban sustainability: an empirical analysis based on difference-in-differences model. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(20): - - .

气候适应型城市试点政策对城市可持续性的影响 ——基于双重差分模型的实证分析

于超月,赵翔宇,张正峰*

中国人民大学公共管理学院,北京 100872

摘要:建设气候适应型城市是保障城市安全运行、推动可持续发展的重要举措。聚焦气候适应型城市建设试点对城市可持续性的多维影响及其作用机理,以 2011—2020 年中国 269 个地级市的面板数据为研究样本,基于双重差分模型进行实证分析。结果表明:(1)气候适应型城市试点政策显著提升了城市可持续性(系数 = 1.057, $P < 0.001$),且政策效果存在 2 年的时滞效应。(2)政策在低和中降水量城市中显著提升了可持续性,但在高降水量城市中无显著作用;同时,政策效果在经济发展水平较高的城市更为突出。(3)人力资本培养和科学技术创新是气候适应型城市建设试点政策提升城市可持续性的重要渠道。本研究通过实证分析验证了气候适应型城市试点政策对城市可持续性的积极作用,并提出了优化政策实施的建议。

关键词:试点政策;气候适应型城市;可持续发展目标;准自然实验

The effect of pilot climate-adapted city policy on urban sustainability: an empirical analysis based on difference-in-differences model

YU Chaoyue, ZHAO Xiangyu, ZHANG Zhengfeng*

School of Public Administration and Policy, Renmin University of China, Beijing 100872, China

Abstract: Building climate-adapted cities is vital for urban security and sustainable development. Using 269 prefecture-level cities in China from 2011 to 2020 as research samples, this study investigated the effect of pilot climate-adapted city policy on urban sustainability and the underlying mechanisms through differential-in-difference modeling. The findings revealed that: (1) The pilot policy significantly boosted urban sustainability (coefficient = 1.057, $P < 0.001$) with a two-year policy effectiveness lag. (2) The policy had a significant positive effect in cities with low and moderate precipitation but no significant impact in high-precipitation cities; meanwhile, the policy effect was more pronounced in cities with higher economic development levels. (3) Human capital development and technological innovation were key pathways through which the pilot policy improved urban sustainability. This study confirms the pilot climate-adapted city policy's positive role in promoting urban sustainability and offers suggestions for better policy implementation.

Key Words: pilot policy; climate-adapted cities; sustainable development goals; quasi-natural experiments

全球气候系统正经历深刻变化,极端天气事件的频次与强度显著增加^[1],对自然生态系统和社会经济均构成重大威胁^[2]。研究表明,极端气候对发展中国家的 GDP 增长具有显著负向影响^[3-4]。中国作为受气候变化影响最显著的国家之一^[5],自然灾害造成的经济社会损失尤为突出。根据应急管理部数据,2023 年全国

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42077433);中国人民大学 2024 年度拔尖创新人才培养资助计划成果

收稿日期:2025-04-04; 网络出版日期:2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangzhengfeng@ruc.edu.cn

因自然灾害导致的直接经济损失达 3454.5 亿元,受灾人口超过 9544.4 万人次^[6]。值得注意的是,灾害的间接影响通常超过直接损失^[7]。极端天气不仅会破坏基础设施^[8],扰乱正常生产秩序,还会导致各产业部门生产能力下降^[9-11]。此外,受灾群体的灾后心理创伤、教育资源中断等问题可能产生代际影响,既威胁基本生存条件,也可能加剧社会焦虑情绪,甚至影响社会稳定^[12]。鉴于这些挑战,如何在复杂系统中提升气候适应能力已成为亟待解决的关键问题。

城市地区聚集了世界三分之二以上的人口,贡献了全球四分之三以上的 GDP^[13-14],是适应气候变化的关键组成部分^[15-17]。作为气候风险的“放大器”与治理行动的“响应器”,其重要性在可持续发展议程中日益凸显。联合国《2030 年可持续发展议程》将“建设包容、安全、有韧性的可持续城市和人类住区”列入重要目标之一,如何提升城市的气候适应能力以实现城市可持续发展已经成为各国政府关注的重点议题^[18]。作为全球可持续发展的重要推动者,中国自 2017 年起实施的气候适应型城市建设试点政策,探索了一条独特的“政策实验-知识积累-全国推广”路径:首批 28 个试点城市旨在通过制度创新、基建升级和公众参与等举措,减少气候变化引发的灾害风险,保障人民生命财产安全,增强城市防灾预警能力,提升城市宜居性和可持续发展水平。2023 年,中国生态环境部、财政部、自然资源部等八部门联合发布了《关于深化气候适应型城市建设试点的通知》,对进一步完善城市治理体系提出了更高要求。要实现上述目标,亟需评估已有试点政策的实施效果,进而为政策优化与未来实践提供科学依据与实证支持。

在对《关于印发气候适应型城市建设试点工作的通知》的政策有效性评估中,现有研究主要关注其能否提升城市韧性^[19-20]。然而,根据可持续发展理论的目标层级理论,韧性建设本质上是实现城市可持续性的工具性路径而非最终目的^[21]。因此,本研究从试点工作的最终目的出发,拟探究气候适应型城市建设试点对城市可持续性的影响,为城市治理提供科学参考。为了实现上述目标,本文将从以下三方面推进研究:(1)构建城市可持续性评价指标体系;(2)运用准实验设计构建反事实框架,识别试点政策对城市可持续性的净效应,结合事件分析法检验时滞周期;(3)通过中介效应模型分析气候适应型城市试点政策对城市可持续性的作用机制。研究发现将为气候适应性政策的精准实施提供新的经验证据,助力我国“韧性城市”向“可持续城市”的战略跃升。

1 政策背景、理论分析与研究假设

1.1 政策演进:从国家战略到城市实践

气候适应型城市建设是中国深度参与全球气候治理的制度创新,其政策框架呈现出显著的阶段性演进特征(图 1)。我国气候适应型城市政策的演进可分为以下三个阶段:(1)理念萌芽期(1994—2006 年):在国家可持续发展战略框架下,1994 年《中国 21 世纪议程》首次将“适应气候变化”确立为制度性概念,体现了中国对联合国《21 世纪议程》中适应气候变化倡议的积极响应。此阶段通过概念引入完成了政策认知的范式转换。(2)战略深化期(2007—2015 年):以 2007 年《中国应对气候变化国家方案》的出台为标志,政策重心转

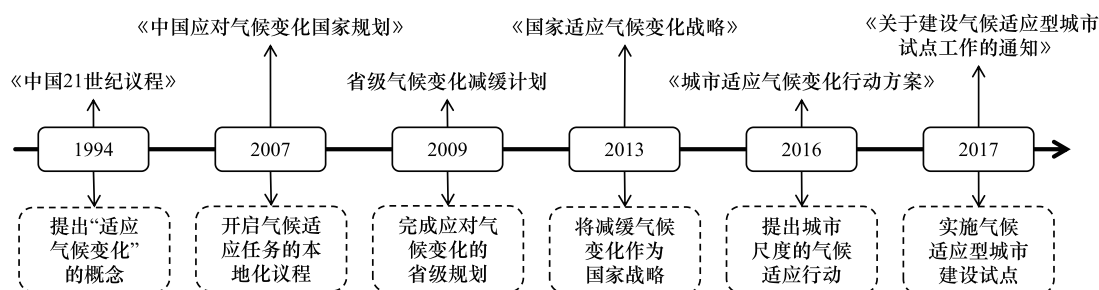


图 1 中国气候适应政策的演进过程

Fig.1 Evolution of climate-adapted policies in China

向适应型治理体系的层级建构。《中国应对气候变化国家方案》要求地方政府编制区域气候行动方案,到2009年实现省级全覆盖,体现了政策主体由中央政府向地方政府的初步让渡。2013年《国家适应气候变化战略》的出台更将适应能力建设提升至国家安全战略层面。(3)城市实践期(2016年至今):随着新型城镇化战略推进,政策焦点转向城市尺度的适应性创新。2016年四部委联合颁布《城市适应气候变化行动计划》,在制度层面构建了“评估-规划-建设-管理”全周期工作框架。2017年《关于印发气候适应型城市建设试点工作的通知》出台标志着政策进入实验治理阶段,首批28个试点城市应用“诊断-设计-验证”方法论,通过差异化政策试验场建设,系统推进韧性城市发展。

1.2 气候适应型城市试点的政策逻辑与可持续性假说

气候变化通过影响生态系统功能^[22-23]、经济系统运行^[24]及社会稳定性^[25]等途径对城市可持续发展产生影响。因其具有高度的复杂性与关联性特征^[26],提升城市抵御气候变化干扰的能力是实现可持续发展的关键^[27]。从试点政策的目的来看,《关于印发气候适应型城市建设试点工作的通知》中明确指出,建设气候适应型城市,就是在城市规划建设管理中充分考虑气候变化因素,采取趋利避害的有效适应行动,实现城市的安全运行与可持续发展。这一政策导向与联合国《2030年可持续发展议程》中“建设包容、安全、有韧性的可持续城市和人类住区”的核心目标形成战略呼应。因此,本研究从试点政策的目的出发,提出如下研究假说。

假说 H1:气候适应型城市建设试点政策的实施有助于提升城市可持续性。

从复杂适应系统理论视角来看,城市气候适应本质上是系统重构实现可持续发展稳态跃迁的过程。根据系统韧性理论^[28-29],传统城市系统在气候压力下可能陷入“刚性陷阱”——即过度依赖现有基础设施和管理模式,导致系统脆弱性累积。而气候适应型城市建设实质是触发“创造性破坏”过程,推动系统从保守阶段向重组阶段演进。《城市适应气候变化行动方案》中强调,通过“完善应急指挥系统”与“强化专业救援队伍”建设提升灾害响应效能,借助“深化适应性基础研究”与“推广气候适应关键技术”增强科技支撑能力。这些具体措施凸显了人力资本投入与科技创新在建设气候适应型城市中的重要地位,有助于提升城市系统的吸收与转化能力。可持续发展奠基于经济、社会和环境三大支柱架构^[27],当城市打破制度和技术锁定效应时,其经济、社会、环境子系统将重新建立更具韧性的耦合关系。因此,本文将从人力资本投入与科技水平提升对经济、社会、环境子系统的影响切入,探究气候适应型城市试点政策对城市可持续性的传导路径(图2)。

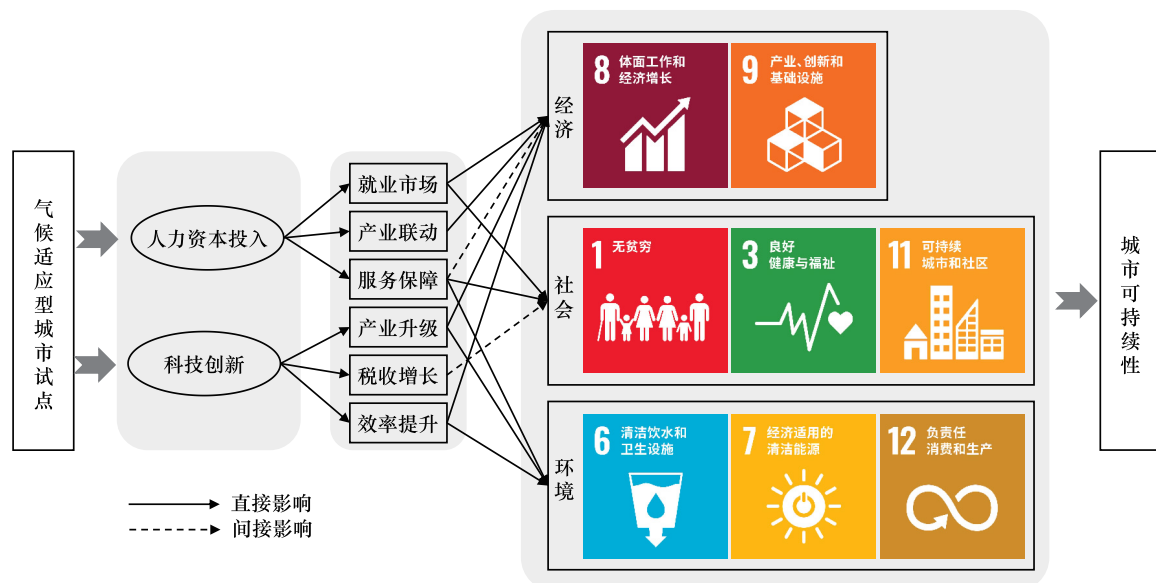


图2 气候适应型城市试点对城市可持续性的作用路径

Fig.2 Pathways of climate-adapted city pilots to urban sustainability

在经济维度上,人力资本投入与科技创新均对可持续发展目标(Sustainable Development Goals, SDGs)产生正向影响。面向气候适应领域的专项人力资本投入通过三种方式作用于区域经济系统。首先,水利、环境和公共设施管理等公共部门岗位的持续性扩张直接创造就业岗位,为城市中低收入群体提供了具有社会保障的稳定就业机会,有助于提振就业和刺激消费(SDG 8)^[30]。其次,气候适应型基础设施投资通过上下游产业关联激活建材制造、工程服务等领域的市场需求,其产生的经济乘数效应为区域消费与生产规模扩张提供持久动力,促进 SDG 8 中经济增长目标的实现。除了直接影响外,人力资本投入将促进城市基础设施维护能力提升,通过降低极端气候事件对制造业的物理性破坏和运营中断频率,间接保障供应链连续性,支撑 SDG 9(产业、创新和基础设施)的实现。科技创新通过产业结构升级与生产效率变革驱动经济转型。人工智能等新一代信息技术的发展将促进国民经济各领域各部门高质量增长^[31],契合 SDG 8 要求的“可持续经济增长”要求。同时,随着工业互联网、绿色制造专利技术的嵌入,传统工业将逐步实现数字化、智能化生产^[32],有助于 SDG 9 的提升。

从社会维度来看,人力资本投入首先通过就业市场促进 SDG 1(无贫穷)提升。具体而言,市政部门在水利、环境和公共设施管理等领域的持续投入,创造了大量具备社会保障属性的基础技术岗位。这些就业机会在促进就业的同时,还带动了基本养老保险、失业保险、医疗保险覆盖率的提升,增强了弱势群体的风险应对能力,有效支持了联合国 SDG 1 中“建立健全社会保障体系”和 SDG 3(良好健康与福祉)中“全面医疗保险”的实现。同时,劳动力的结构性调整加速了城市绿化改造与防灾基础设施建设进程,推动城市韧性系统升级,契合 SDG 11(可持续城市和社区)“建设包容、安全的韧性城市”的核心理念。此外,科技创新产生的溢出效应将进一步强化政策协同影响。技术密集型产业发展将带来新的经济增长点^[31,33],将为地方政府扩大社会保障投入提供资金支持,间接带来 SDG 1 和 SDG 3 的改善。

在环境治理中,人力资本投入和技术创新将强化城市环境基础设施的服务效能。聚焦水资源管理领域,专业人才的持续投入与智能监测技术的应用将显著提升水处理、水净化、水利设施维护等工作的效率和可靠性,有效保障清洁饮水的可及性和水资源可持续管理(SDG 6)。相似地,能源基础设施运维团队的专业化转型及智能电网技术的应用将促进燃气输送损耗率下降与供电系统能效提升,为城市清洁能源消费占比的实质性增长提供支撑(SDG 7)。此外,技术驱动下的产业结构绿色转型也将产生环境红利,促使工业生产逐渐脱离“高投入-高排放”的传统模式^[34-35],从而系统推进可持续消费与生产目标(SDG 12)的实现。根据上述分析,本研究提出假说 H2a 和假说 H2b。

假说 H2a:气候适应型城市建设试点政策通过增加人力资本投入提升城市可持续性;

假说 H2b:气候适应型城市建设试点政策通过提升科技水平提升城市可持续性。

2 研究设计

2.1 模型设定

作为一种准自然实验方法,双重差分(Difference in Differences, DID)模型能够有效控制潜在混杂因素,通过对比处理组与对照组的时间序列变化捕捉政策净效应,被广泛应用于政策效应评估^[36-37]。气候适应型城市试点政策采用“省级推荐+中央审评”的实施机制,有效缓解了自选择偏误,可被视为准自然实验,满足 DID 模型的建模条件。因此,本文采用 DID 模型识别某一城市被划入试点城市这一外生变量是否会提升城市可持续性。模型设定如下:

$$SDGI_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 policy_{it} + \alpha_2 X_{it} + \mu_i + \eta_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中, $SDGI_{it}$ 为城市 i 在 t 年的可持续发展目标指数; $policy_{it}$ 为处理变量,即气候适应型城市建设试点政策,当城市 i 在 t 年属于政策试点城市则取值 1,反之则为 0,其系数 α_1 反映了气候适应型城市建设试点政策对城市可持续性的影响效应; X_{it} 为控制变量, α_2 为控制变量系数。 α_0 为常数项, μ_i 为城市个体固定效应, η_t 为时间固定效应, ε_{it} 为随机误差项。

为了探索气候适应型城市建设试点政策对城市可持续性的作用机制,本文进一步构建了中介效应模型,以验证人力资本投入和科技创新的作用:

med_{it}=β₀+β₁policy_{it}+β₂X_{it}+μ_i+η_t+ε_{it} (2)

SDGI_{it}=γ₀+γ₁policy_{it}+γ₂med_{it}+γ₃X_{it}+μ_i+η_t+ε_{it} (3)

式中,med_{it}为中介变量,即人力资本投入或科技创新;系数β₁反映了气候适应型城市建设试点对中介变量的影响;γ₂反映控制了气候适应型城市建设试点影响后,中介变量对城市可持续性的影响效应;γ₁表示控制了中介变量影响后,气候适应型城市建设试点对城市可持续性的影响效应。β₀和γ₀为常数项,β₂和γ₃为控制变量系数。

2.2 变量选取

(1)被解释变量:城市可持续性,以可持续发展目标指数(Sustainable Development Goal Index,SDGI)表征。联合国2030年议程提出了17项SDGs,其中《可持续发展目标指数和指示板》提出了一套国家层面的测量标准,指导评价指标的选取、指标阈值设定等内容。已有研究提出了关于选择指标和实际使用的批判性思考,认为不同城市的不同行为者应针对具体情况对目标进行筛选和使用,即“本土化”^[38—39]。为适应城市尺度的研究,本文参照以下原则进行目标选取:首先,遵循联合国环境规划署《可持续城市基础设施指南》(2021)提出的“城市系统基础三角”框架,将SDG 11、SDG 6和SDG 7确立为核心关联目标;其次,对标中国《国民经济和社会发展第十四个五年规划》:一方面,SDG 7和SDG 9被列为约束性指标;另一方面,SDG 3和SDG 12分别与“健康中国2030”和《“十四五”循环经济发展规划》相呼应。最后,基于数据可获性验证,排除了教育、公平、合作等指标完整度不足或难以量化的目标。通过上述筛选,本文选取了21项代理指标评估8项与城市可持续发展密切相关的目标(表1)。本文采用“五步决策法”设定指标上限,以全体样本中表现排名后2.5%的数据点对应的数值作为指标下限^[40],以最大限度地减少极端值对数据分布两端的潜在影响。这些指标被标准化至0—100之间,等权重叠加后获得各年度各城市的SDGI。

表1 城市可持续性评估指标
Table 1 Assessment indicators for urban sustainability

SDGs	指标 Indicator
SDG 1:无贫穷	城镇登记失业率/%
SDG 1: no poverty	城镇职工失业保险参保人数占总人口比重/% 城镇职工基本养老保险参保人数占总人口比重/%
SDG 3:良好健康与福祉	城镇职工基本医疗保险参保人数占总人口比重/%
SDG 3: good health and well-being	每万人拥有医生数/(人)
SDG 6:清洁饮水和卫生设施	居民家庭人均用水量/(t/人)
SDG 6: clean water and sanitation	污水处理厂集中处理率/%
SDG 7:经济适用的清洁能源	人均用电量/(kW h 人 ⁻¹)
SDG 7: affordable and clean energy	人均供气量/(m ³ /人)
SDG 8:体面工作和经济增长	人均GDP/(元/人)
SDG 8: decent work and economic growth	职工平均工资/(元/人) 人均社会消费品零售总额/(元/人)
SDG 9:工业、创新和基础设施	人均第二产业增加值/(元/人)
SDG 9: industry, innovation and infrastructure	万人国际互联网用户数/(户) 公路货运量(万t)
SDG 11:可持续城市和社区	建成区绿化覆盖率/%
SDG 11: sustainable cities and communities	人均道路面积/(m ² /人)
SDG 12:负责任的生产和消费	单位GDP工业废水排放量/(t/万元)
SDG 12: responsible consumption and production	单位GDP工业二氧化硫排放量/(t/万元) 单位GDP工业烟尘排放量/(t/万元) 一般工业固体废物综合利用率/%

SDGs;可持续发展目标 Sustainable development goals

(2)解释变量:气候适应型城市建设试点政策(policy)。该变量为城市与年份交互的一组虚拟变量,反映城市是否被纳入试点范围以及试点政策是否实施。试点城市获批的当年(2017年)及之后年份均赋值为1,否则赋值为0。

(3)控制变量:为了控制其他因素对城市可持续性的影响,本文在借鉴相关文献的基础上^[20,41],引入了如下控制变量:①人口密度(pop),采用常住人口数量与行政区域土地面积的比值衡量;②对外开放程度(open),以实际使用外资总额与GDP的比值表示;③政府干预强度(gov),采用财政支出(剔除科技支出和教育支出)与GDP的比值衡量;④第二产业占比(ind2),即第二产业增加值占GDP的比重;⑤第三产业占比(ind3),即第三产业增加值占GDP的比重。

(4)中介变量:根据前文分析,气候适应型城市建设试点政策可能通过增加与城市建设与服务相关的人力资本投入和促进科技创新两条路径提升城市可持续性,因此选取了人力资本(labor)与科技创新(tech)两个中介变量。人力资本指标通过水利、环境和公共设施管理业从业人员占在岗职工的比例衡量,科技创新采用人均专利授权数测度。

2.3 数据来源

基于数据的可获得性,本文选取2011—2020年中国269个地级市作为研究样本,指标数据来源于《中国城市统计年鉴》和《中国城市建设统计年鉴》。对于缺失数据,部分采用各市《国民经济与社会发展统计公报》中的数据补齐,其他采用线性插值法补齐。降水数据来源于国家青藏高原科学数据中心,时间范围为2000—2020年。本文通过ArcGIS 10.3计算获得年平均降水数据,并将该值提取至各城市。由于行政级别不属于地级市或数据缺失严重,本研究剔除了重庆市璧山区、重庆市潼南区、贵州省毕节市(赫章县)、陕西省西咸新区、新疆维吾尔自治区库尔勒市、新疆维吾尔自治区阿克苏市(拜城县)、新疆生产建设兵团石河子市7个试点地区,保留21个试点地区用于后续分析。数据的描述性统计见表2。

表2 变量的描述性统计
Table 2 Descriptive statistics of variables

变量类型 Variable type	变量名称 Variable name	观测值 Observation	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	最大值 Maximum	最小值 Minimum
被解释变量 Explained variable	SDGI	2690	29.178	6.805	66.984	7.869
控制变量 Control variable	人口密度	2690	480.809	609.706	8830.145	5.732
	对外开放程度	2690	26.102	27.503	346.865	0.002
	政府干预强度	2690	0.160	0.078	0.883	0.035
	第二产业占比	2690	46.411	10.486	89.340	10.680
	第三产业占比	2690	41.546	9.682	80.490	10.150
中介变量 Mediator variable	人力资本	2690	0.020	0.013	0.190	0.000
	科技创新	2690	9.482	14.546	163.692	0.009

SDGI:可持续发展目标指数 Sustainable development goal index

3 结果

3.1 基准回归

表3展示了气候适应型城市建设试点政策对城市可持续性影响的基准回归结果。其中,第(1)和第(2)列为未纳入固定效应的估计结果;第(3)和第(4)列为纳入个体固定效应的估计结果;第(5)和第(6)列为纳入双向固定效应的估计结果。结果表明,无论是否控制其他变量,气候适应型城市建设试点政策均在1%的显著性水平上对城市可持续性产生显著正向影响。在加入控制变量,并且控制个体固定效应和时间固定效应后,试点政策对城市可持续性的影响系数为1.057,验证了假说H1,即气候适应型城市建设试点政策的实施有助于提升城市可持续性。

表 3 气候适应型城市建设试点对城市可持续影响的基准回归结果
Table 3 Results of the baseline regression on the effect of climate-adapted city pilots on urban sustainability

变量 Variable	SDGI					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
policy	5.515 *** (1.105)	2.832 ** (0.909)	7.201 *** (0.372)	2.443 *** (0.371)	1.043 *** (0.265)	1.057 *** (0.265)
pop		0.001 *** (0.000)		0.001 (0.001)		-0.003 *** (0.001)
open		0.009 ** (0.004)		-0.011 ** (0.004)		0.008 ** (0.002)
gov		-11.841 *** (1.463)		8.020 *** (1.810)		-5.184 *** (1.111)
ind2		0.286 *** (0.022)		0.443 *** (0.039)		0.122 *** (0.025)
ind3		0.560 *** (0.018)		0.886 *** (0.037)		0.101 *** (0.028)
常数项 Constant	29.006 *** (0.129)	-6.325 *** (1.713)	28.954 *** (0.079)	-29.726 (3.349)	29.146 *** (0.036)	21.485 *** (2.367)
个体固定效应 Individual fixed effect	否	否	是	是	是	是
时间固定效应 Time fixed effect	否	否	否	否	是	是
观测值 Observation	2690	2690	2690	2690	2690	2690
R ²	0.020	0.474	0.687	0.879	0.937	0.941

policy:气候适应型城市建设试点政策 pilot climate-adapted city policy;pop:人口密度 population density;open:对外开放程度 degree of openness to the outside world;gov:政府干预强度 government intervention intensity;ind2:第二产业占比 proportion of the secondary industry;ind3:第三产业占比 proportion of the tertiary industry;***、**、* 分别表示 0.1%、1%和 5%的统计显著性水平

3.2 稳健性检验

为确保政策效应估计结果的准确性,本文采用三种方法进行稳健性检验:平行趋势检验、倾向得分匹配-双重差分(Propensity Score Matching-Difference in Differences,PSM-DID)检验和安慰剂检验。

(1)平行趋势检验即检验在气候适应型城市试点政策实施之前,处理组与对照组的目标变量的变化趋势是否有显著差异。如果没有显著差异,则满足平行趋势检验,对应模型的估计结果是稳健的。结果表明,在试点政策实施前,处理组与对照组在 5%水平上无显著差异,满足平行趋势检验。政策在实施两年后(即 2019 年)才开始产生显著正向效应,这表明政策效果存在时滞特征(图 3)。

(2)PSM-DID 检验。为了排除气候适应型城市试点政策实施中可能存在的非随机性问题对估计结果的影响,本文进一步采用 PSM 方法匹配处理组和对照组,在此基础上重新运行回归模型。前文分析表明,5 个控制变量均对城市可持续性产生显著影响,故基于上述 5 个控制变量,采用最近邻匹配法进行 PSM。匹配后协变量平衡性显著改善,对照组的分布与处理组高度重合(图 4)。

在进行平衡性检验后,删除了不满足共同支撑域假定的观测值,并基于匹配后的样本再次估计。结果表明,政策处理变量仍对城市可持续性具有显著正向影响,说明样本选择过程中遗漏变量造成的估计偏误并不

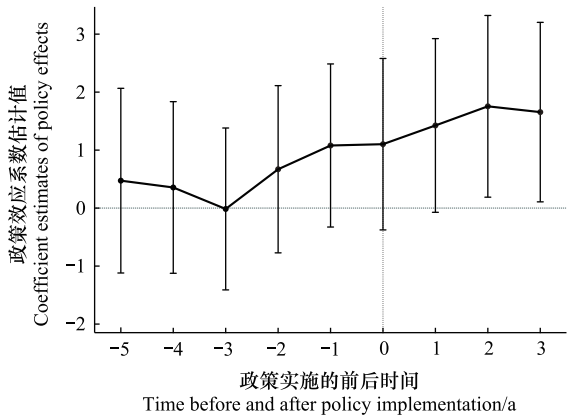


图 3 气候适应型城市建设试点对城市可持续性影响的平行趋势检验结果
Fig.3 Results of the parallel trend test for the effect of climate-adapted city pilots on urban sustainability

成立,估计结果具有稳健性(表 4)。

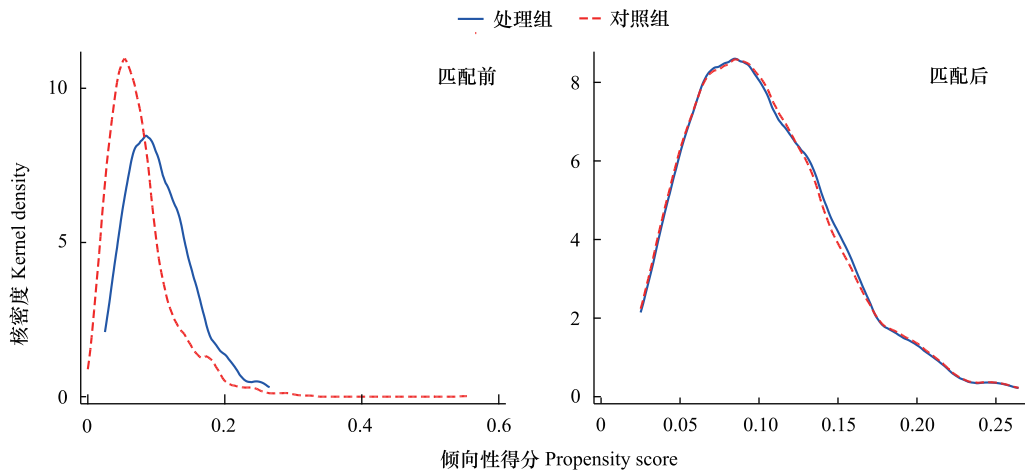


图 4 PSM 前后处理组与对照组的分布情况
Fig.4 Distribution of treatment and control groups before and after PSM
PSM:倾向性得分匹配 Propensity score matching

表 4 气候适应型城市建设试点对城市可持续影响的 PSM-DID 回归结果

Table 4 Results of the PSM-DID regression on the effect of climate-adapted city pilots on urban sustainability				
变量 Variable	SDGI			
	(1)	(2)	(3)	(4)
policy	5.232 *** (1.105)	2.829 ** (0.904)	2.236 *** (0.390)	0.993 *** (0.268)
控制变量 Control variable	否	是	是	是
常数项 Constant	29.289 *** (0.132)	-11.520 *** (2.245)	-40.787 *** (3.857)	18.801 *** (3.033)
个体固定效应 Individual fixed effect	否	否	是	是
时间固定效应 Time fixed effect	否	否	否	是
观测值 Observation	2448	2448	2448	2448
R ²	0.021	0.441	0.877	0.940

***、**、* 分别表示 0.1%、1%和 5%的统计显著性水平

(3)安慰剂检验。为排除不可观测因素和时变因素的干扰,本文参照既有研究进行安慰剂检验^[42—43]。具体操作中,假设随机选择政策实施年份并随机生成试点城市,进而构建处理组虚拟变量,重复 500 次基准回归。结果表明,基于随机样本估计获得的政策影响系数分布中,绝大部分与基准回归系数 1.057 差距明显,故通过安慰剂检验(图 5)。

3.3 异质性分析

气候脆弱性与气候适应能力与自然本底条件和经济要素聚集程度高度相关^[44—46],中国不同城市的自然和经济条件具有显著的空间差异,这使得试点政策效果可能存在异质性。因此,本研究以 2000—2020 年的平均降水量、2020 年的人均 GDP、2020 年的城市化率为分类标准将观测样本(N=269)划分为 3 个梯度组,分别进行基础回归。实证结果表明:在降水强度处于第一分位组与第二分位组的城市中,气候适应型城市建设试点政策对城市可持续性具有显著的正向促进作用,而第三分位组的估计系数未通过显著性检验(表 5)。高降

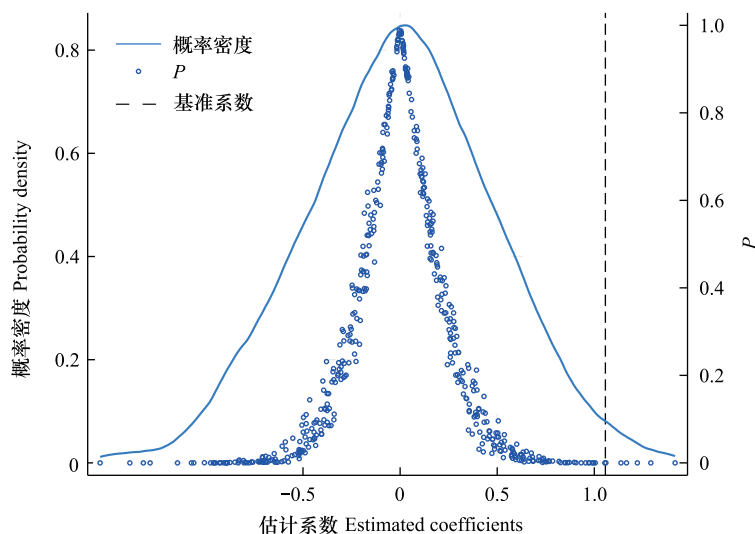


图5 气候适应型城市建设试点对城市可持续性影响的安慰剂检验结果

Fig.5 Results of the placebo test for the effect of climate-adapted city pilots on urban sustainability

水组政策的异质性失效或与该类城市固有的复合型风险特征密切相关。持续性降水过量不仅引发内涝灾害^[47],还会造成区域金融风险形成恶性循环^[11]。因此,这类城市有可能面临着基础设施维护成本刚性增长与资本要素流动性下降的双重压力。为实现可持续发展转型,此类城市需要构建系统性治理框架:通过海绵城市改造优化水循环效能,依托智慧水务平台提升动态风险管理能力,同时嵌入绿色金融等工具完善气候保险等市场化补偿机制。

气候适应型城市建设试点政策对城市可持续性的影响呈现显著的经济梯度特征(表5)。其中,中高经济水平城市组的政策效应通过了显著性检验,而低经济水平城市组的政策效果未达显著标准。在城市化维度上,政策效应呈现与经济水平相似的异质性模式:中等及以上城市化率城市的可持续性受到政策推动呈现统计显著的提升,而低城市化率城市组未观测到具有统计意义的政策响应。这种区域差异折射出欠发达地区的政策执行困境。当前,气候适应型政策试点主要依赖于地方自主筹资,在中央层面尚未形成专项转移支付体系^[48]。发达城市可依托稳健的财政基础,实现基础设施优化、监测预警体系完善与制度创新的协同推进,为可持续性目标实现提供系统性支持;而欠发达地区则因专项资金缺位,可能面临基础设施存量不足、资源要素集聚能力较弱等结构性约束,最终弱化了政策实施成效。鉴于此,建议构建多层次资金保障体系:在中央财政预算框架内设立气候适应型城市专项基金,根据区域经济梯度实施差异化配比机制;省级政府配套建立资金统筹平台,重点向欠发达地市倾斜资源;同步完善市场化融资激励机制,通过绿色债券贴息等政策工具激活社会资本参与。

3.4 影响机制

本文通过中介效应模型分析了气候适应型城市试点政策对城市可持续性的作用机制(表6)。结果表明,气候适应型城市试点政策促进了与城市建设和治理服务相关的人力资本的投入,人力资本投入的增加提升了城市的可持续性。在将人力资本投入纳入控制变量后,气候适应型城市试点政策对城市可持续性的影响系数为1.033,小于基准回归系数1.057,表明气候适应型城市建设试点对城市可持续性的提升部分通过人力资本投入的路径发挥作用。验证了假说H2a。在科技创新方面,气候适应型城市试点政策对科技创新水平有显著正向影响,科技创新增强了城市可持续性。在控制了科技创新对城市可持续性的影响后,气候适应型城市试点政策对城市可持续性的影响系数为0.953,小于基准回归系数1.057,说明科技创新在政策施行过程中发挥了中介渠道的影响效能。验证了假说H2b。

表 5 气候适应型城市建设试点对城市可持续影响的异质性
Table 5 Heterogeneity in the effect of climate-adapted city pilots on urban sustainability

变量 Variable	SDGI								
	降水分组			人均 GDP 分组			城市化率分组		
	低	中	高	低	中	高	低	中	高
policy	1.415 ** (0.437)	1.836 *** (0.479)	-0.488 (0.423)	0.761 (0.467)	1.507 *** (0.388)	0.954 * (0.457)	0.099 (0.427)	1.449 *** (0.377)	1.563 ** (0.543)
控制变量 Control variable	是	是	是	是	是	是	是	是	是
常数项 Constant	17.838 *** (3.686)	32.911 *** (4.031)	3.029 (4.985)	21.149 *** (3.063)	26.815 *** (4.172)	5.463 (6.801)	26.601 *** (3.724)	28.783 *** (4.032)	0.116 (6.394)
个体固定效应 Individual fixed effect	是	是	是	是	是	是	是	是	是
时间固定效应 Time fixed effect	是	是	是	是	是	是	是	是	是
观测值 Observation	900	900	890	900	900	890	900	900	890
R ²	0.933	0.948	0.948	0.862	0.909	0.949	0.888	0.899	0.956

***、**、* 分别表示 0.1%、1% 和 5% 的统计显著性水平

表 6 气候适应型城市试点政策对城市可持续性的作用机制
Table 6 Mechanisms of climate-adapted city pilots on urban sustainability

变量 Variable	人力资本投入 Labor capital inputs		科技创新 Technological innovation	
	labor	SDGI	tech	SDGI
policy	0.002 ** (0.001)	1.033 *** (0.266)	3.874 ** (1.497)	0.953 *** (0.255)
labor		9.968 * (4.513)		
tech				0.027 ** (0.008)
控制变量 Control variable	是	是	是	是
常数项 Constant	0.006 (0.011)	21.429 *** (2.360)	-8.216 (5.389)	21.704 *** (2.370)
个体固定效应 Individual fixed effect	是	是	是	是
时间固定效应 Time fixed effect	是	是	是	是
观测值 Observation	2690	2690	2690	2690
R ²	0.687	0.941	0.879	0.941

labor: 人力资本投入 labor capital inputs; tech: 科技创新 technological innovation; ***、**、* 分别表示 0.1%、1% 和 5% 的统计显著性水平

4 结论与讨论

本研究基于 269 个城市 2011—2020 年的面板数据,采用 DID 模型评估了气候适应型城市建设试点政策对城市可持续性的影响,并通过中介效应模型揭示了作用机制。研究结果显示,试点政策显著提升了城市可持续性(系数=1.057, $P<0.001$),且政策效果存在 2 年的时滞效应。异质性分析发现政策在低和中降水量城市中显著提升了可持续性,但在高降水量城市中无显著作用;同时,政策效果在经济发展水平较高的城市更为突出。机制分析表明,人力资本培养和科学技术创新是气候适应型城市建设试点政策提升城市可持续性的重要渠道。

基于研究结果与 2023 年国家发展改革委《关于深化气候适应型城市建设试点的通知》的政策导向,本研究提出以下建议:首先,构建长周期气候适应政策实施框架。结合实证结果中政策效果的时滞特征,建议建立“规划引领-动态监测-反馈修正”的全周期管理机制,通过立法保障跨届政府政策衔接,并设定分阶段动态优化指标,尤其需针对发展水平较低城市强化预算锁定与中长期技术援助,以缓解其政策响应滞后问题。其次,依据区域气候异质性细化分类响应措施。实证结果显示中低降水量地区政策效果更优,而高降水城市的政策效应不显著,建议强降水城市实施城市水文管理系统重构工程,优先升级防洪排涝体系与地下管网冗余度设

计。此外,参照《通知》中“分区分类试点”要求,在中央财政转移支付中增设差异化气候适应专项,对低发展水平城市实施“基准达标+能力建设”双重扶持。最后,强化人力资本与技术创新的协同作用。研究证实两者是政策生效的核心渠道,建议围绕气候风险评估与韧性规划专业人才培养,建立产学研认证体系,并针对降水异质性导致的技术需求差异,在干旱区域重点攻关节水与生态修复技术,在多雨区域推动智能水文感知网络与城市信息模型的深度融合,形成“风险识别-动态模拟-策略优化”的全链条技术支撑。

本研究揭示了气候适应型城市试点政策对城市可持续性的积极影响,但仍存在一定局限性。(1)数据层面,本文采用线性插值法补齐部分缺失数据,可能导致一定偏差。(2)指标构建方面,城市可持续性的衡量指标尚未涵盖社会公平、区域合作等隐性维度。未来研究可通过整合社会经济普查数据与时空大数据,构建包含社会包容性、区域联动性等维度的综合指标体系,以完善评估框架。(3)机制解析层面,本文聚焦于人力资本积累与技术创新两条传导路径,而对制度协同效应、公众参与机制等潜在路径的探讨有待深化。后续可采用空间杜宾模型等计量方法,结合企业-社区微观调查数据,进一步揭示区域协同治理与多元主体参与的作用机理。

参考文献 (References):

- [1] IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023. 35-115.
- [2] 封珊,徐长乐. 全球气候变化及其对人类社会经济影响研究综述. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(S2): 6-10.
- [3] Noy I. The macroeconomic consequences of disasters. Journal of Development Economics, 2009, 88(2): 221-231.
- [4] Hallegatte S, Vogt-Schilb A C, Bangalore M, Rozenberg J. Unbreakable building the resilience of the poor in the face of natural disasters//. Washington: World Bank, 2016.
- [5] 吴绍洪,赵东升. 中国气候变化影响、风险与适应研究新进展. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(6): 1-9.
- [6] 中华人民共和国应急管理部. 2023 年全国自然灾害基本情况: 国家防灾减灾救灾委员会办公室、应急管理部, 2024.
- [7] 胡爱军,李宁,史培军,郭海峰,赵晗萍,尹新怀. 极端天气事件导致基础设施破坏间接经济损失评估. 经济地理, 2009, 29(4): 529-534.
- [8] 陶希东. 建设韧性城市: 应对极端气候的重要策略. 人民论坛, 2023(15): 62-65.
- [9] 黄渝祥,杨宗跃,邵颖红. 灾害间接经济损失的计量. 灾害学, 1994, 9(3): 7-11.
- [10] Burrus R T Jr, Dumas C F, Farrell C H, Hall W W Jr. Impact of low-intensity hurricanes on regional economic activity. Natural Hazards Review, 2002, 3(3): 118-125.
- [11] 张庆君,赵志尚,孟新新. 极端天气与区域金融风险: 推波助澜还是波澜不惊?. 现代金融研究, 2024, 29(9): 59-69.
- [12] 祝明,孙舟,唐丽霞,于乐荣. 灾害社会影响评估基本框架研究. 自然灾害学报, 2015, 24(4): 7-14.
- [13] Acuto M, Parnell S, Seto K C. Building a global urban science. Nature Sustainability, 2018, 1(1): 2-4.
- [14] UN. 2014 revision of the World Urbanization Prospects; UN, 2015.
- [15] 李惠民,邱萍,张西,王宇飞,赵长江. 气候适应型城市的规划要素及对我国 28 个试点方案的综合评价. 环境保护, 2020, 48(13): 17-24.
- [16] Wen H W, Hu K Y, Nghiem X H, Acheampong A O. Urban climate adaptability and green total-factor productivity: Evidence from double dual machine learning and differences-in-differences techniques. Journal of Environmental Management, 2024, 350: 119588.
- [17] Shtjefni D, Ulpiani G, Vettters N, Koukoulakis G, Bertoldi P. Governing climate neutrality transitions at the urban level: a European perspective. Cities, 2024, 148: 104883.
- [18] Bai X M, Dawson R J, Ürges-Vorsatz D, Delgado G C, Salisu Barau A, Dhakal S, Dodman D, Leonardsen L, Masson-Delmotte V, Roberts D C, Schultz S. Six research priorities for cities and climate change. Nature, 2018, 555(7694): 23-25.
- [19] Wang D, Chen S W. The effect of pilot climate-resilient city policies on urban climate resilience: Evidence from quasi-natural experiments. Cities, 2024, 153: 105316.
- [20] 张卓群,姚鸣奇,郑艳. 气候适应型城市建设试点政策对城市韧性的影响. 中国人口·资源与环境, 2024, 34(4): 1-12.
- [21] Bautista-Puig N, Benayas J, Mañana-Rodríguez J, Suárez M, Sanz-Casado E. The role of urban resilience in research and its contribution to sustainability. Cities, 2022, 126: 103715.
- [22] Forzieri G, Girardello M, Ceccherini G, Spinoni J, Feyen L, Hartmann H, Beck P S A, Camps-Valls G, Chirici G, Mauri A, Cescatti A. Emergent vulnerability to climate-driven disturbances in European forests. Nature Communications, 2021, 12: 1081.

- [23] Ribeiro S, Limoges A, Massé G, Johansen K L, Colgan W, Weckström K, Jackson R, Georgiadis E, Mikkelsen N, Kuijpers A, Olsen J, Olsen S M, Nissen M, Andersen T J, Strunk A, Wetterich S, Syväranta J, Henderson A C G, MacKay H, Taipale S, Jeppesen E, Larsen N K, Crosta X, Giraudeau J, Wengrat S, Nuttall M, Grønnow B, Mosbech A, Davidson T A. Vulnerability of the North Water ecosystem to climate change. *Nature Communications*, 2021, 12: 4475.
- [24] Calel R, Chapman S C, Stainforth D A, Watkins N W. Temperature variability implies greater economic damages from climate change. *Nature Communications*, 2020, 11: 5028.
- [25] Ge Q S, Hao M M, Ding F Y, Jiang D, Scheffran J, Helman D, Ide T. Modelling armed conflict risk under climate change with machine learning and time-series data. *Nature Communications*, 2022, 13: 2839.
- [26] Steffen W, Richardson K, Rockström J, Cornell S E, Fetzer I, Bennett E M, Biggs R, Carpenter S R, de Vries W, de Wit C A, Folke C, Gerten D, Heinke J, Mace G M, Persson L M, Ramanathan V, Reyers B, Sörlin S. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science*, 2015, 347(6223): 1259855.
- [27] Zhao R, Li X, Wang Y, Xu Z C, Xiong M Y, Jia Q, Li F T. Assessing resilience of sustainability to climate change in China's cities. *Science of the Total Environment*, 2023, 898: 165568.
- [28] Gunderson L H, Holling C S. *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*//:Shearwater Books, 2002.
- [29] Holling C S. Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems. *Ecosystems*, 2001, 4(5): 390-405.
- [30] 郭晨, 张卫东. 产业结构升级背景下新型城镇化建设对区域经济发展质量的影响——基于PSM-DID经验证据. *产业经济研究*, 2018(5): 78-88.
- [31] 蔡跃洲, 陈楠. 新技术革命下人工智能与高质量增长、高质量就业. *数量经济技术经济研究*, 2019, 36(5): 3-22.
- [32] 郭晗, 侯雪花. 数字新质生产力推动新型工业化: 内在机理与策略选择. *改革*, 2025(2): 77-87.
- [33] 阎东彬. 科技创新与经济增长关系的实证: 以京津冀城市群为例. *统计与决策*, 2020, 36(2): 114-116.
- [34] 余畅, 马路遥, 曾贤刚, 马冬妍. 工业企业数字化转型的节能减排效应研究. *中国环境科学*, 2023, 43(7): 3755-3765.
- [35] 刘明洋, 万勇. 工业智能化对城市绿色生态效率影响效应研究. *科学管理研究*, 2024, 42(6): 106-115.
- [36] 王斯亮, 陈欣. 农村集体经营性建设用地入市对城市土地利用效率的影响. *中国土地科学*, 2023, 37(8): 113-122.
- [37] 杨俊, 王丹婷, 孔凡斌, 朱臻. “山水林田湖草沙”生态保护修复对农户经济福利的影响——以浙江省钱江源头为例. *生态学报*, 2024, 44(21): 9935-9945.
- [38] Barbier E B, Burgess J C. The Sustainable Development Goals and the systems approach to sustainability. *Economics*, 2017, 11(1): 20170028.
- [39] Klopp J M, Petretta D L. The urban sustainable development goal: Indicators, complexity and the politics of measuring cities. *Cities*, 2017, 63: 92-97.
- [40] Xu Z C, Chau S N, Chen X Z, Zhang J, Li Y J, Dietz T, Wang J Y, Winkler J A, Fan F, Huang B R, Li S X, Wu S H, Herzberger A, Tang Y, Hong D Q, Li Y K, Liu J G. Assessing progress towards sustainable development over space and time. *Nature*, 2020, 577(7788): 74-78.
- [41] 姜旭, 侯娇, 卢新海. 低碳试点政策对城市土地绿色利用的影响——基于双重差分模型的实证研究. *中国土地科学*, 2023, 37(3): 80-89.
- [42] Luan L M, Liu P F, Mei Y D. The impact of pilot carbon market on firms' performance in China. *Energy Economics*, 2025, 142: 108164.
- [43] Liu Y, Huang H Y, Mbanyele W, Li X, Balezantis T. Harnessing supply chain digital innovation for enhanced corporate environmental practices and sustainable growth. *Energy Economics*, 2025, 142: 108161.
- [44] Ayanlade A, Smucker T A, Nyasimi M, Sterly H, Weldemariam L F, Simpson N P. Complex climate change risk and emerging directions for vulnerability research in Africa. *Climate Risk Management*, 2023, 40: 100497.
- [45] Romero Lankao P, Qin H. Conceptualizing urban vulnerability to global climate and environmental change. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2011, 3(3): 142-149.
- [46] 马洁云, 郑艳, 周泽宇. 建设韧性城市: 西咸新区气候适应型城市建设试点案例. *城市*, 2021(1): 72-79.
- [47] 卢兴超, 徐宗学, 施奇妙, 唐清竹. 城市暴雨洪涝灾害链演变特征及减灾途径. *水科学进展*, 2025, 36(1): 97-108.
- [48] 郑艳, 翟建青, 武占云, 李莹, 史巍娜. 基于适应性周期的韧性城市分类评价——以我国海绵城市与气候适应型城市试点为例. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(3): 31-38.