

城市发展因智慧而绿色吗？

郭庆宾¹, 汪涌²

(1. 海南大学经济学院, 海南 海口 570228; 2. 华中科技大学经济学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:智慧城市试点对能源效率的影响分析是兼得城市智慧与绿色发展的关键,亦是实现生产生活方式绿色转型需要关注的重大议题。将中国智慧城市试点政策视为一项准自然试验,利用渐进双重差分法系统评估了城市数字化、智能化发展对能源效率的提升效果,并结合倾向得分匹配法与工具变量法进一步进行验证。研究结论表明:智慧城市建设平均每年提升试点城市约 8.41 个百分点的能源效率,而创新驱动是其作用机制之一;智慧城市建设对能源效率的提升效果存在时滞且在后期持续衰减,未对其周边城市的能效产生带动作用;非东部区域与人口规模较大城市的能源效率在智慧城市建设中得到了更为明显的增长;在提高能源效率的同时,智慧城市建设并未进一步增强城市的能源回弹效应。

关键词:智慧城市;能源效率;渐进双重差分;全要素能源效率

中图分类号:F124

文献标识码:A

文章编号:1005-0566(2022)09-0172-12

Smarter the city develops, the greener the city develops?

GUO Qingbin¹, WANG Yong²

(1. School of Economics, Hainan University, Haikou 570228, China;

2. School of Economics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The analysis of the impact of smart city pilots on energy efficiency is the key to achieving both urban smart and green development, and it is also a major issue that needs attention to realize the green transformation of production and lifestyle. This paper regards China's smart city pilot policy as a quasi-natural experiment. It uses the progressive difference in differences method to systematically evaluate the effect of urban digitalization and intelligent development on the improvement of energy efficiency, and combines the propensity score matching method and the instrumental variable method to further proceed verification. The paper conclusions show that: Smart city construction improves the energy efficiency of pilot cities by about 8.41% per year, and innovation is one of its mechanisms; There is a time lag in the energy efficiency improvement effect of the construction of a smart city, and it continues to decay in the later period, which does not have a positive radiation effect on the energy efficiency of its surrounding cities; The energy efficiency of non-eastern region and cities with larger populations has increased significantly in the construction of smart city; While improving energy efficiency, the construction of smart city has not further enhanced the city energy rebound effect.

Key words: smart city; energy efficiency; progressive difference in differences; all-factor energy efficiency

收稿日期:2021-11-22 修回日期:2022-07-15

基金项目:国家社会科学基金项目“长江中游城市群绿色创新效率的时空演化机理与变革路径研究”(18BJL056);海南大学科研启动基金项目(kyqdsk201903)。

作者简介:郭庆宾(1984—),男,山东日照人,海南大学经济学院博士生导师、教授,研究方向为区域经济学、资源环境经济学。通信作者:汪涌。

随着中国经济迈向高质量发展阶段以及碳中和目标的提出,实现节能减排与绿色发展已成为目前急需解决的重大问题。“十四五”规划也明确提出“推进能源革命,构建清洁低碳、安全高效的能源体系”与“生产生活方式绿色转型成效显著,能源资源配置更加合理、利用效率大幅提高”的社会发展目标。这说明当前实现节能减排的两大渠道莫过于优化能源结构与提高能源效率。但根据《中国能源统计年鉴》(2020)的统计数据显示,中国化石能源的生产与消费目前仍然占据主体地位,并且其“富煤、缺油、少气”的禀赋特点,为改变能源结构以实现减排与绿色发展带来了巨大压力。因此,在能源供给结构约束、环境规制日益严格的当下,提高能源效率已成为建设现代能源体系并实现节能减排的关键抓手。

传统的城市化进程与工业往往交织进行,由此引发巨大的能源消耗^[1-2],并造成了严重的环境污染^[3]。为了破解能源过度消耗与环境污染等“城市病”困局,智慧城市方案应运而生。智慧城市的内涵在于利用新一代信息技术将城市系统和服务打通并集成,以提升资源、能源效率,帮助城市实现绿色发展^[4],中国住房和城乡建设部的国家智慧城市试点政策正是一次这样的实践。因此,本文旨在以国家智慧城市试点政策为切入点,考察智慧城市对能源效率的影响及其作用机理,为智慧城市助力于绿色发展提供经验依据。

虽然现有关于智慧城市的文献相当丰富,但大多是对智慧城市运行模式、发展因素及其可能产生的社会影响的思考与理论分析^[5-6],涉及对智慧城市建设成效的经验分析文献仍显得相对不足。本文致力于实证考察智慧城市对能源效率的影响及其作用机理,因此梳理了有关智慧城市的经验研究,并大体将其分为如下3类:经济效应、创新效应以及环境效应。

从经济效应来看,王敏等^[7]认为中国的智慧城市推动了产业结构升级,而产业结构升级正是智慧城市提升全要素生产率的有效渠道^[8]。周小敏等^[9]的研究发现,智慧城市建设还能通过

优化资源配置等渠道进一步推动经济发展,提高人均产出。除了经济产出从智慧城市建设中受益外,智慧城市建设对就业的创造效应也备受学界关注。Kim等^[10]在识别韩国智慧城市相关产业对国民经济的作用时也发现了智慧城市的就业创造效应,并指出政府对智慧城市建设投资的正外部性。

从创新效应来看,袁航等^[11]、何凌云等^[12]均利用《中国城市和产业创新力报告》提供的城市创新指数来衡量城市创新水平,并使用准自然实验的方法发现智慧城市建设能够显著加速城市创新。而Caragliu等^[13]则利用欧洲专利数据得到了类似的结论,并且认为智慧城市建设对创新的促进效果在高科技专利领域更为明显。从环境效应来看,石大千等^[14]基于熊彼特的创新理论研究发现,智慧城市建设通过创新渠道显著降低了环境污染,Chu等^[15]通过研究进一步支持了该结论。Yao等^[16]也发现智慧城市建设能够提高生态效率,并且认为这种提升效果在经济发展水平较低的城市中更为明显。也有学者对智慧城市建设能改善环境质量的观点持反对意见,如黄建等^[17]认为绿色低碳发展虽然是智慧城市建设的目标之一,但智慧城市建设并未对其产生显著的促进作用。由此看来,针对智慧城市社会效应的经验研究正在日益丰富。然而,目前还罕见学者关注智慧城市建设对能源效率的影响机理。事实上,二者的因果关系正是兼得城市智慧与绿色发展的关键。

鉴于此,本文将中国智慧城市试点政策视为一项准自然试验,利用渐进双重差分法系统评估了智慧城市建设对能源效率的提升效果。

一、研究假设

(一)作用机制假设

理论上,智慧城市建设因其数字化、智能化的城市治理内涵可以直接提升能源效率。具体言之:第一,物联网等技术可以收集城市生产生活过程中的数据,用以确定能源消耗因素^[18];第二,人工智能和云计算技术则帮助城市整合信息资源提升能源供给的规划能力^[19];第三,电网基础设施的智能化改造和智能微电网建设可以提高电力系统

互补互济和智能调节能力。通过上述 3 步,城市最终能实现能源供给在各子系统之间的有效分配,解决大量能源被低效利用的难题,释放能源效率的潜在增长。除了上述的直接效应外,结合智慧城市的现有理论文献,本文认为智慧城市建设还可以通过推动创新发展间接地提高能源效率:

一方面,是政府的推动作用。首先,政府作为智慧城市建设的推动者,会加大科技支出进行专项补贴与支持,在此过程中定然会带动相关产业技术的更新迭代。其次,政府作为调节市场的“有形之手”,其财政科技事业支出不仅因其鲜明的导向性,能激发企业数字化、智能化转型的积极性^[20],还能通过直接的资金支持(财政补贴、财政贴息等)帮助转型的企业加强研发创新^[21],消除技术门槛。最终从政府的角度来看,智慧城市建设的目标是营造创新涌现的环境,实现城市的创新驱动发展。

另一方面,是企业的数字化、智能化转型。首先,智慧城市不仅借助知识共享和低碳减排目标来实现社会绿色发展^[22],还能整合数据资源助力于企业技术、工艺与产品的创新活动。其次,从企

业的生产角度出发,为了降低成本并增强市场竞争力,以往直接消耗原材料进行生产的粗放生产模式必然会逐渐被企业摒弃,企业会在数字化、智能化的基础上,改善工艺与生产资源调度以提高能源效率。再次,从企业的销售角度出发,智慧城市的可持续发展观念会促使消费者向环保消费方式转变,消费者将更加青睐市场的资源友好型产品与服务,从而倒逼企业进行创新活动^[23],进而维持产品的市场份额。最后,从企业的融资角度出发,智慧城市建设的技术标准将会令政府、金融机构将企业的创新表现作为决定向其进行财政补贴或融资的条件,因此企业有动力进行技术创新活动以得到地方政府与金融机构的支持^[24]。

无论是政府推动还是企业转型,智慧城市建设必然会向创新驱动发展的方向迈进,而创新又可以通过提高要素的边际生产率与要素替代途径进一步提升能源效率^[25]。

根据上述理论分析,本文提出假说 1:智慧城市对能源效率的影响除了直接效应外,还可以通过迈向创新驱动发展间接地提高城市的能源效率(见图 1)。

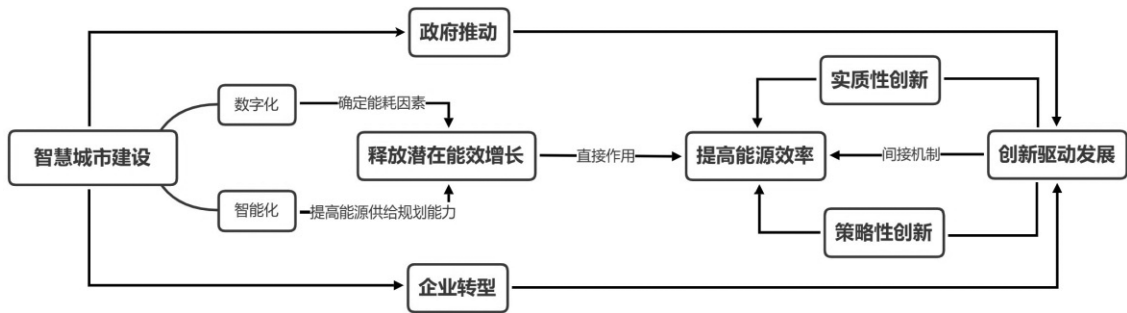


图 1 智慧城市影响能源效率的作用机制

(二)异质性假设

1. 智慧城市对城市能源效率的影响存在时空异质性

首先,智慧城市并非一蹴而就,需要时间经历项目建设、场景试用、问题反馈与机制完善等过程。中国住房和城乡建设部也预计智慧城市试点创建期需 3~5 年,因此政策效果可能存在时滞。其次,中国的智慧城市试点呈现飞速扩散式的演化,3 年间就已遍及 300 多个城市。这样的政

策演进过程会导致智慧城市先行试点的政策吸引力不断下降,而后试点城市也因为周边先行试点城市的要素积累优势无法获得足够建设资源,从而导致智慧城市难以竞全功。最后,许多地方政府追风建设智慧城市,随意设立项目并立即施工,缺乏科学规划和制度保障,这可能导致项目后期难以为继^[26],无法持续提升城市的能源效率。综上所述,智慧城市对能源效率的提升作用可能具备时间异质性。

智慧城市试点政策会集聚周边邻近城市相关产业的资金、技术、人才等建设资源,从而对周边城市产生“虹吸效应”,并且数量巨大、分布广泛的政策试点会进一步通过政策竞争加剧此过程,最终形成资源空间配置的扭曲^[27],抑制周围城市的能源效率^[28]。只有超过特定的距离,智慧城市建设才可能通过信息要素的流转与技术扩散对周边城市的能源效率产生正向溢出效应,所以随着到智慧城市试点距离的增加,智慧城市建设对能源效率的提升效果应该会呈现先变小后变大的波浪形趋势。因此,智慧城市建设对能源效率的提升作用可能具备空间异质性。

2. 智慧城市建设对城市能源效率的影响存在经济区域异质性

中国不同经济地域的初始能源效率不同,东部发达区域的城市目前更偏向于紧凑型的城市化进程,初始能源效率较高,而目前中部、西部的城市化进程可能更偏向于扩张型,初始能源效率可能相对低下。因东部与非东部地区能源效率的可提升空间不同,智慧城市建设的能效增长作用也应存在区域性差异。

3. 智慧城市建设对城市能源效率的影响存在城市规模异质性

一方面,规模较大的城市具有更强的集聚效应^[29],能源效率应当较高;另一方面,规模较大的城市往往因为规划能力相对有限,容易产生拥挤效应^[30],加剧能源消耗与浪费,损失利用效率。而智慧城市建设的目标之一正是解决因人口膨胀产生的“大城市病”。因此,如果基础设施与应用场景完善,智慧城市建设对能源效率提升效果应当随着城市规模的变大而增强。

根据上述的理论分析,本文提出假说2:智慧城市建设对能源效率的提升效果存在时空异质性、经济区域异质性、以及城市规模异质性。

二、研究设计

(一) 样本选择

本文选取了2009—2018年84个城市作为研究样本。样本选择原则如下:①为了估计结果的稳健性,剔除非完全试点的城市。这是因为如果

将非完全试点城市纳入处理组,会低估智慧城市建设对能源效率的影响。②为了保证处理组与控制组的可比性,本文的研究样本是来自于中国的京津冀、长三角区域、粤港澳大湾区、长江中游、成渝这五个较为发达地区的城市。这是因为智慧城市建设依赖于雄厚的技术基础以解决“大城市病”,并不是所有城市都有技术条件且有动力建设智慧城市。而上述大部分城市不但拥有足够的创新资源与技术优势来支撑智慧城市建设,而且亟需解决因人口数量膨胀而产生的一系列“大城市病”。③为了避免2008年金融危机对研究结果的干扰,样本时期设定为2009—2018年。最后由于数据可得性限制,本文得到了2009—2018年共计10个年度84个城市的面板数据。

(二) 模型设定

由于国家智慧城市试点是分批次设立的,参考Beck等^[31]以及Wang^[32],本文采用渐进双重差分方法,设定如下计量回归模型:

$$tf_{it} = \beta_0 + \beta_1 did_{it} + \lambda control_{it} + v_t + \mu_i + province_j \times year_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式(1)中, i 为城市, t 为年份。 tf_{it} 为被解释变量, did_{it} 为本文解释变量,即国家智慧城市试点的虚拟变量。 $control_{it}$ 为一系列控制变量, v_t 为年份固定效应, μ_i 为城市固定效应, $province_j \times year_t$ 为省份与年份交互的固定效应, ε_{it} 为随机误差项。

(三) 变量定义与数据说明

1. 被解释变量

本文的被解释变量是能源效率,以包含非合意产出的全要素能源效率(tf_{it})代表。采用超效率SBM-Malmquist-Luenberger指数法测算各城市2009—2018年的全要素能源效率,其投入产出指标说明如下。

(1)能源投入。限于中国目前并无针对城市级别的官方能源消费统计,已有文献主要采取两种做法获得城市能源消费总量:一是将城市电力消费量或将电力、天然气以及液化石油气消费量折合为统一单位后加总作为城市能源消费总量,然而这种方法无法全面反映城市所有种类的能源消费;二是将省级能源消费总量按照校正后的地

级市夜间灯光数据分解到各城市^[33-34],从而模拟测度各城市的能源消费。这种度量方法虽然较第一种方法更全面,但受限于 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 两份夜间灯光数据的差异,无法适用于长时间序列的分析。因此,本文利用 Chen 等^[35]采用深度学习技术进行校准的扩展时间序列夜间灯光数据,并参考吴健生等^[34]的研究,通过官方统计的省级能源消费总量模拟得到城市级别的能源消费量,其单位为万吨标准煤。模拟测度得到的城市级别能源消费与官方统计的省级能源消费的均值趋势对比见图 2。由图 2 可知,二者趋势接近一致,且拟合优度均在 0.79 以上,满足精度要求。此外,本文将在之后使用各城市电力消费量代替能源投入重新计算全要素能源效率作为稳健性检验。

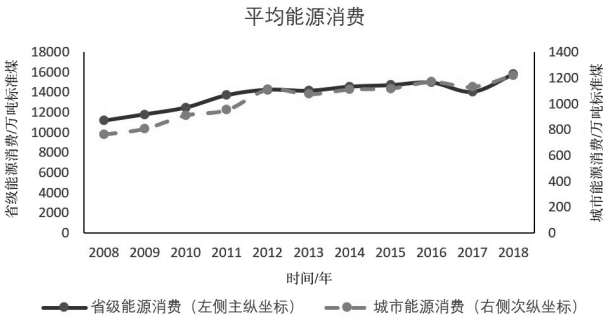


图2 省级、城市级能源消费均值趋势对比

(2)其他投入。劳动投入以城市从业人员数量表示;资本投入以城市的固定资产存量表示,计算方法参考崔书会等^[36]的研究,折旧率为9.6%。

(3)产出。以各城市的 GDP 指数结合名义 GDP 计算出 2008 年不变价 GDP 作为合意产出,单位万元;以工业烟(粉)尘排放量、工业废水排放量、工业二氧化硫排放量为非合意产出,单位万吨。

2. 解释变量

本文的解释变量是表示国家智慧城市试点的虚拟变量 (*did*)。在中国住房城乡建设部相继公布的第三批国家智慧城市试点名单(分别对应 2012 年、2013 年、2014 年 3 个年度)中的城市被视为“处理组”。试点城市当年及以后年度, *did* 取值为 1,否则为 0;当年不在第三批国家智慧城市试点名单中的城市被视为“控制组”, *did* 取值为 0。

3. 控制变量

经济发展水平、人口密度以及产业结构都能对能源效率产生影响。因此,本文对如下变量加以控制:①经济发展水平 (*eco*),以实际的人均 GDP 以反映城市的经济发展水平,单位元。②人口密度 (*popden*),使用城市年末人口数量与城市行政区域面积的比值表示人口密度,单位人/km²。③产业结构 (*struc*),按照公式 $struc = \sum_{i=1}^3 S_i \times i$ 计算产业结构系数,其中 S_i 为第 i 产业产值占地区生产总值比重,以百分位表示。

省级能源消费总量数据来源于《中国能源统计年鉴》,扩展时间序列夜间灯光数据来源于哈佛大学的数据公开网站 Harvard Dataverse,其他数据均来源于《中国城市统计年鉴》。缺失年份数据通过查阅各省市统计年鉴与统计公报或以线性插补法补充。

三、实证结果与分析

(一)基准模型回归结果

表 1 报告了式(1)的估计结果,其中第(1)列仅控制了智慧城市试点政策的虚拟变量 *did* 以及城市与年份固定效应,而第(2)列则报告了加入控制变量的估计结果,第(3)列则是进一步控制省份与年份交互固定效应的完整结果。表 1 的 *did* 系数均正向显著,其数值亦相当可观。若以第(3)列作为完整回归结果解释,则表明智慧城市建设会导致所在城市的能源效率每年平均提高约 8.41 个百分点。因此,假说 1 在统计与经济显著性上得到初步验证。

表 1 基准模型回归结果

变量	(1)	(2)	(3)
<i>did</i>	0.064 7 *	0.060 7 *	0.084 1 ***
	(0.024 9)	(0.027 7)	(0.011 2)
控制变量	—	是	是
城市固定效应	是	是	是
年份固定效应	是	是	是
省份 × 年份固定效应	—	—	是
样本量	840	840	840
拟合优度 R^2	0.230 9	0.233 2	0.458 0

注:括号内是地区层面的聚类稳健标准误,***、* 分别表示在 $p < 0.01$ 与 $p < 0.1$ 时有统计学意义。

(二)稳健性检验

1. 平行趋势检验

使用双重差分法的前提是处理组与控制组满

足平行趋势假定。考虑到智慧城市试点政策分批次进行的特点,本文以事件研究法进行平行趋势检验。具体模型设定见时间异质性检验,结果见图3。根据图3可知,智慧城市试点在施行之前,处理组与控制组城市的能源效率并无显著差异,满足平行趋势假定。

2. 倾向得分匹配的双重差分法(PSM + DID)

为了进一步克服处理组与控制组变动趋势的相对差异和样本选择性偏误,本文利用PSM方法,分别按照邻近匹配、核匹配以及半径匹配方法,进行逐年匹配,并再次进行基准回归。根据表2可知,三种匹配的估计结果均与基准回归保持一致,验证了基准回归结果的稳健性。

表2 PSM + DID 检验结果

变量	(1) 邻近匹配	(2) 核匹配	(3) 半径匹配
<i>did</i>	0.065 0 ** (0.022 6)	0.074 2 *** (0.010 1)	0.064 3 ** (0.022 0)
控制变量	是	是	是
城市固定效应	是	是	是
年份固定效应	是	是	是
省份 × 年份固定效应	是	是	是
样本量	792	813	789
拟合优度 R^2	0.473 8	0.461 0	0.474 5

注:括号内是地区层面的聚类稳健标准误,***、**分别表示在 $p < 0.01$ 、 $p < 0.05$ 时有统计学意义。

3. 安慰剂检验

为了避免遗漏解释变量带来的估计偏差,本文参考Chetty等^[37]与Li等^[38]的研究,采用随机抽样的方法进行安慰剂检验。具体而言,通过随机抽样生成一份虚拟的智慧城市试点名单再进行回归,重复该过程1000次以达成间接的安慰剂检验。图3报告了估计系数的概率密度分布图。根据图3可知,虚拟的智慧城市名单估计系数分布在0附近,且基准回归结果(0.084 1)位于整个分布之外,说明随机生成的虚拟智慧城市试点名单并未对能源效率产生影响,故现实中的智慧城市建设对能源效率的提升作用是真实存在的。

4. 其他稳健性检验

(1)替换被解释变量。利用官方统计的城市电力消费量作为能源投入,重新计算全要素能源效率,并按照式(1)再次进行基准回归。结果见表3第(1)列,可知*did*系数在1%的统计水平上显著

为正,进一步验证了假说1。

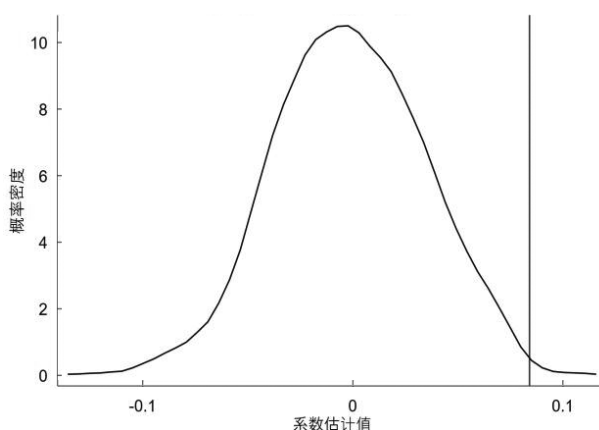


图3 安慰剂检验

(2)反事实检验。借鉴Hung等^[39]的研究,将样本研究时期设定在2009—2012年,以2011年为智慧城市试点年份,再次进行基准回归。结果见表3第(2)列,可知*did*系数不再显著,验证了能源效率的提升确实由智慧城市建设带来的。

(3)排除其他政策干扰。考虑到广东省、湖北省在样本研究期间施行了碳排放权交易试点政策,可能会干扰估计结果。虽然省份与年份的固定效应足以消除该影响,但稳健起见,仍设置碳排放权交易试点的虚拟变量(*did_CO2*)并加入基准回归。结果见表3第(3)列,*did_CO2*系数显著,与预期一致;*did*系数依然与基准回归保持一致,再次验证了基准回归结果的稳健性。

表3 其他稳健性检验结果

变量	(1)	(2)	(3)
<i>did</i>	0.080 2 *** (0.013 9)	0.069 9 (0.125 7)	0.084 1 *** (0.011 7)
<i>did_CO2</i>	—	—	0.356 9 *** (0.008 2)
控制变量	是	是	是
城市固定效应	是	是	是
年份固定效应	是	是	是
省份 × 年份固定效应	是	是	是
样本量	840	336	840
拟合优度 R^2	0.294 1	0.465 8	0.186 5

注:括号内是地区层面的聚类稳健标准误,***表示在 $p < 0.01$ 时有统计学意义。

(三)克服内生性问题:工具变量法

为了尽可能避免样本城市非随机选择的内生性问题,本文尝试使用工具变量法加以克服。本文以1984年的历史财政预算支出水平作为智慧城

市试点政策的工具变量,具体而言:①与内生变量相关。根据中华人民共和国住房和城乡建设部办公厅 2012 年 11 月 22 日正式印发的《国家智慧城市试点暂行管理办法》,地方政府申报智慧城市试点的一项重要条件就是“已有明确的智慧城市建设资金筹措方案和保障渠道,如已列入政府财政预算”。城市的财政预算支出水平越高意味着城市提供公共物品与服务的意愿越强,越有可能申报智慧城市试点,而现今城市提供公共物品服务的意愿又可能因公众的需求习惯、制度延续等因素受历史财政预算支出水平的影响,因此该工具变量满足相关性假定。②与误差项不相关。在控制其他变量后,1984 年的历史财政预算支出水平不太可能直接影响现今城市的能源效率,满足外生性原则。

具体计量操作如下:首先,以 1984 年的城市财政预算支出与财政预算收入比值表示历史财政预算支出水平;其次,参考 Nunn 等^[40]的设定方法,将历史财政预算支出水平与上一年同省份其他智慧城市试点城市数量占该省地级市数量比重相乘作为智慧城市试点的工具变量(*iv_did*)。要指出的是:上一年同省份其他智慧城市试点城市数量占该省地级市数量的比重不会直接影响本城市的能源效率,满足外生性原则,而同一省份的其他城市被列为试点,会引导未进入试点的该省份城市产生模仿动机进而争取进入智慧城市试点名单^[41],满足相关性条件。根据表 4 第(1)列可知,工具变量 *iv_did* 与智慧城市虚拟变量显著正相关,并且 Kleibergen-Paaprk Wald F 统计量为 1 092.07,远大于 10,表明不存在弱工具变量问题;根据表 4 第(2)列可知,第二阶段回归中 *did* 系数显著为正,说明克服内生性问题后,基准回归结果依然稳健。

(四)作用机制检验:创新驱动发展

根据研究假设所述,创新驱动发展是本文的作用机制。为了验证此机制的有效性,本文参考黎文靖等^[42]的研究,将创新驱动分为创新数量(策略性创新)与创新质量(实质性创新)两类,并使用专利申请总数代表创新数量(*innovation*),使用发明专利申请数量与非发明专利申请的比值代

表 4 工具变量估计结果

变量	(1)	(2)
	第一阶段	第二阶段
	<i>did</i>	<i>tfee</i>
<i>iv_did</i>	0.001 7 *** (0.000 1)	—
<i>did</i>	—	0.189 5 *** (0.028 0)
控制变量	是	是
城市固定效应	是	是
年份固定效应	是	是
省份 × 年份固定效应	是	是
样本量	670	670

注:(1)括号内是地区层面的聚类稳健标准误,***表示在 $p < 0.01$ 时有统计学意义。(2)由于数据可得性限制,共获得研究样本中 67 个城市的历史财政数据。

表创新质量(*innquality*)。数据来源于中国研究数据服务平台(CNRDS),单位为万件。然后采用中介效应模型进行逐步检验,具体的计量模型如下:

$$tfee_{it} = \beta_0 + \beta_1 did_{it} + \lambda control_{it} + v_t + \mu_i + province_j \times year_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

$$media_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 did_{it} + \lambda control_{it} + v_t + \mu_i + province_j \times year_t + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

$$tfee_{it} = \varphi_0 + \varphi_1 did_{it} + \varphi_2 media_{it} + \lambda control_{it} + v_t + \mu_i + province_j \times year_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

式中,*media*为中介变量,表示创新数量(*innovation*)与创新质量(*innquality*);智慧城市建设的总效应为 β_1 ,直接效应为 φ_1 ,变量*media*中介效应为 $\alpha_1\varphi_2$ 。中介效应模型的逐步检验结果见表 5。

表 5 第(1)列为基准回归;第(2)列结果显示 *did* 均显著为正,说明智慧城市建设促进了城市创新数量的增长;第(3)列结果显示 *did* 依然显著为正且较基准回归有所减小,且中介变量创新数量(*innovation*)显著为正,证实了创新数量是智慧城市建设间接提高能源效率的作用机制。同理,第(4)列与第(5)列结果虽然表明创新质量渠道具备经济意义,但其并未通过显著性检验。换言之,智慧城市建设增强了以寻求政策优惠等其他利益为目标的“策略性”创新活动,并未显著推动以技术进步与获取竞争优势为目标的“实质性”创新活动。至此,假说 1 得到基本验证。

表5 作用机制有效性检验结果

变量	(1) <i>tfee</i>	(2) <i>innovation</i>	(3) <i>tfee</i>	(4) <i>innquality</i>	(5) <i>tfee</i>
<i>did</i>	0.084 1 *** (0.011 2)	0.058 7 * (0.021 7)	0.081 8 *** (0.011 8)	0.015 1 (0.061 7)	0.083 2 *** (0.012 6)
<i>innovation</i>	—	—	0.038 7 ** (0.012 9)	—	—
<i>innquality</i>	—	—	—	—	0.058 6 (0.028 5)
控制变量	是	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是
省份 × 年份 固定效应	是	是	是	是	是
样本量	840	840	840	840	840
拟合优度 <i>R</i> ²	0.458 0	0.645 2	0.121 1	0.597 8	0.147 2

注：括号内是地区层面的聚类稳健标准误，***、**、* 分别表示在 $p < 0.01$ 、 $p < 0.05$ 与 $p < 0.1$ 时有统计学意义。

四、异质性检验与分析

(一) 时空异质性

1. 时间异质性

为了检验智慧城市建设影响能源效率的时间异质性，设定如下计量模型进行检验：

$$tfee_{it} = \alpha_0 + \sum_{k \geq -5, k \neq -1}^6 \alpha_k D_{it}^k + \lambda control_{it} + v_i + \mu_i + province_j \times year_t + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

式中， D_{it}^k 代表城市被列为智慧城市试点的虚拟变量。假定城市 i 成为智慧城市试点的年份为 y_i ，令 $k = t - y_i$ ；当 $k \leq -5$ 时， $D_{it}^{-5} = 1$ ，否则为 0；依次类推，当 $k = -4, -3, -2, \dots, 5, 6$ 时，相应的 $D_{it}^k = 1$ ，否则取 0；当 $k \geq 6$ 时， $D_{it}^6 = 1$ 否则为 0。具体回归分析中以 $k = -1$ 基准期，不包括 D_{it}^{-1} 。通过比较式(5)中 α_k 的经济与统计显著性可以检验智慧城市试点政策效应的时间动态效应，置信区间为 90%，结果见图 4。

根据图 4 可知，智慧城市试点的政策效果存在明显时滞，到试点设立后第 4 期，智慧城市建设才对能源效率产生明显的提升效果。这与中国住房城乡建设部对于智慧城市预计的 3~5 年创建期基本一致。但是自第 4 期开始，智慧城市建设对能源效率的提升作用逐渐减小，到第 6 期在统计意义上不再显著。可能的原因在于地方政府盲目跟风建设智慧城市，许多智慧城市建设项目因缺乏科学规划、制度与资源保障而无法持续进行，最终导致后期智慧城市建设难以为继，无法有效提高城市的能源效率。

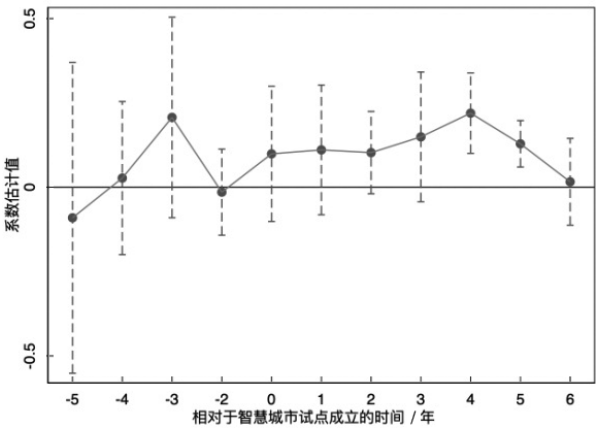


图4 国家智慧城市试点的时间异质性

2. 空间异质性

参考曹清峰^[43]的研究，设定如下模型来检验智慧城市试点政策的空间异质性：

$$tfee_{it} = \beta_0 + \beta_1 did_{it} + \sum_{s=50}^{300} \delta_s N_{it}^s + \lambda control_{it} + v_i + \mu_i + province_j \times year_t + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

式中，参数 s 表示城市间的地理距离（单位是 km， $s \geq 50$ ），如果 t 年距离城市 i ($s - 50, s$] 的空间范围内存在智慧城市试点，那么 $N_{it}^s = 1$ ，否则取 0。因此，变量 N_{it}^s 的系数 δ_s 衡量了智慧城市试点设立后对周边城市能源效率的影响，在具体回归分析中，本文以 50 km 的单位，报告了 $s = 50, 100, \dots, 250, 300$ 时的估计结果，通过比较系数 δ_s 的经济与统计显著性来检验智慧城市试点政策的空间异质性，置信区间为 90%，结果见图 5。

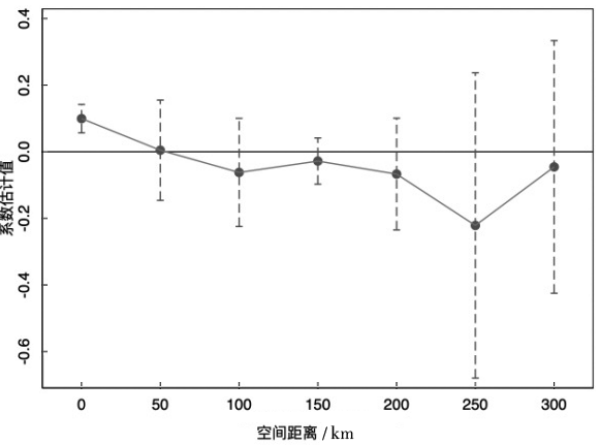


图5 国家智慧城市试点的空间异质性

根据图 5 可知，随着到智慧城市试点距离的增加，智慧城市试点对周边城市的能源效率的提升

作用会出现先变小后变大的波浪型发展趋势。具体而言,智慧城市试点对其邻近城市的能源效率产生了经济意义上的“虹吸效应”,并且在更远的距离范围内,并未产生明显的正向溢出效应。可能的原因在于,智慧城市建设存在要素竞争剧烈的特点,试点城市会加剧吸收周边附近城市的资源,故产生经济意义上的“虹吸效应”。同时,智慧城市建设还存在孤立的、封闭的缺点,数据资源无法在城市之间流转整合,呈现出“信息孤岛”的局面,无法产生有效的正向溢出效应。

(二)经济区域异质性

为了检验智慧城市建设影响能源效率的经济区域异质性,本文将样本城市分为东部区域、非东部区域(中部和西部),并进行分组回归。结果分别见表 6 第(1)~(2)列。由表 6 可知,东部城市的智慧城市试点政策对城市能源效率的提升作用并不显著,而非东部区域的城市的能源效率却增长明显。可能的原因在于东部地区本就是紧凑型的城市化模式,能源效率的可提升空间不大,而中部、西部区域的能源效率则有较大的提升空间。

表 6 异质性检验结果

变量	(1)	(2)	(3)
<i>did</i>	0.074 3 (0.043 2)	0.081 3 *** (0.003 2)	—
<i>did</i> × <i>pop</i>	—	—	1.143 8 * (0.465 6)
控制变量	是	是	是
城市固定效应	是	是	是
年份固定效应	是	是	是
省份 × 年份固定效应	是	是	是
样本量	370	470	840
拟合优度 R^2	0.369 0	0.196 9	0.153 8

注:括号内是地区层面的聚类稳健标准误,***、* 分别表示在 $p < 0.01$ 与 $p < 0.1$ 时有统计学意义。

(三)城市规模异质性

为了检验智慧城市建设提升能源效率的城市规模异质性,以城市年末人口数量(*pop*)衡量城市规模,并将其与 *did* 相乘得到新的交互项,再进行基准回归。城市年末人口数量(*pop*)的数据来源于《中国城市统计年鉴》,单位亿人。根据理论分析,城市规模越大,智慧城市建设对能源效率的提升效果应当越明显,交互项的系数应当显著为正,估计结果见表 6 第(3)列。根据表 6 第(3)列可知,交互项的系数显著为正,证实了智慧城市建设对能源效

率的提升效果确实会伴随城市规模的增大而变强。

五、进一步讨论:基于能源回弹效应的视角

理论上,提高能源效率可以节约能源消费,但能源效率的提高可能导致能源价格降低与经济增长,引起能源需求增加,进而产生更多的能源消费。当增加的能源消费比提高能效节约的部分还多,就会导致最终能源消费量的增加,能源回弹效应由此而来。那么,智慧城市建设在提升能源效率的同时,是否增强了试点城市的能源回弹效应?对于该问题的解答不仅能帮助重新审视智慧城市建设通过提升能源效率促进城市绿色转型的结论,还有利于优化当前的智慧城市试点政策。

参考郭庆宾等^[44]以及李凯杰等^[45]的研究,测算中国城市层面的能源回弹效应,并将测算得到的能源回弹效应作为被解释变量进行式(1)回归。此外,为了保证结果在不同区域的稳健性,按东部、中部、西部地区分别生成相应的虚拟变量 *east*、*middle*、*west*,并将其与 *did* 相乘再进行回归。

根据表 7 第(1)列可知,智慧城市建设对能源回弹效应的影响系数虽然在全样本中为正,但在统计水平上不显著。因此,可以认为智慧城市试点并未增强城市的能源回弹效应。表 7 后三列的分区回归结果也进一步支持了这一结论。并且在中部、西部研究样本回归中, *did* 系数为负,甚至在中部样本中具备统计显著性。可能是智慧城市建设很大程度上实现了城市化、工业化与信息化

表 7 智慧城市建设对能源回弹效应的检验结果

变量	(1) 全样本	(2) 东部城市	(3) 中部城市	(4) 西部城市
<i>did</i>	21.276 5 (24.299 9)	—	—	—
<i>did</i> × <i>east</i>	—	75.994 4 (53.371 3)	—	—
<i>did</i> × <i>middle</i>	—	—	-13.770 3 *** (1.640 7)	—
<i>did</i> × <i>west</i>	—	—	—	-0.212 2 (0.501 1)
控制变量	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
省份 × 年份固定效应	是	是	是	是
样本量	840	840	840	840
拟合优度 R^2	0.197 9	0.199 4	0.197 5	0.197 4

注:括号内是地区层面的聚类稳健标准误,*** 表示在 $p < 0.01$ 时有统计学意义。

的融合,不仅放大了城市的集聚效应,还可以通过提高规划能力有效削弱因人口集聚而产生的拥挤效应,有利于城市迈向紧凑式发展,进而节约了大量能源消费,抑制了能源回弹效应。

六、结论与建议

(一)主要结论

基准回归结果表明智慧城市建设显著提升了试点所在城市的能源效率,此结论经过倾向得分匹配的双重差分法、安慰剂检验、工具变量法等一系列稳健性检验后依然成立;作用机制检验表明,智慧城市建设可以通过实现创新驱动发展间接地提高地区的能源效率,创新数量渠道有效但创新质量渠道仍待改善;异质性检验表明,智慧城市建设对能源效率的提升作用存在时滞且在后期持续衰减,并且智慧城市建设并未对周边城市的能源效率产生显著正向溢出效应,智慧城市建设对能源效率的提升效果在非东部区域、人口规模大的城市中更为显著;进一步讨论发现,智慧城市建设虽然显著提高了能源效率,但并未增强城市的能源回弹效应。

(二)政策建议

1. 强化智慧城市建设中的“实质性”创新成分。本文建议从政府、市场两个方向进行强化。一方面,政府应当发挥财政科技支出的引导性作用,按照难度对创新活动进行分级细化,激发企业的“实质性”创新动力,弥补智慧城市建设提升能源效率的机制短板。另一方面,充分利用市场的筛选作用,淘汰部分创新无效率的企业,实现创新资源的有效分配;加速市场化进程并完善市场交易机制,进一步消除行业进入壁垒,减少制度性交易成本,营造出有利于“实质性”创新活动开展的市场环境。

2. 持续深入地推进智慧城市建设。一方面,地方政府在申报智慧城市试点后,务必要落实建设的资金、技术以及人力等投入,科学确立项目进度与验收标准以保证后期建设的可持续性。另一方面,智慧城市试点应当深入开展特色应用项目,如智慧交通、智慧能源、智慧政府等以联通城市的各个子系统,深入开发智慧城市的具体应用场景,

进一步发掘能源效率的潜在增长点。久久为功方能充分发挥智慧城市建设对能源效率的提升作用。

3. 推动智慧城市群建设。首先,异质性检验表明:智慧城市建设对能源效率的提升效果随着人口规模增加而增强,故人口承载大的城市群应当是智慧城市建设的良好载体。因此,推动智慧城市群建设可以实现智慧城市建设的规模效应与集聚效应从而有效推进地区的能效增长。其次,考虑到城市群往往是中国经济发展较为成熟的区域,拥有足够的技术储备以支持智慧城市建设,城市群内部的技术扩散效应也可以促进城市间进行技术交流与经验学习^[46],以提升总体能源效率。最后,鉴于智慧城市建设并未对周边城市的能源效率产生提升作用,说明当前的智慧城市建设是孤立的,封闭的,难以辐射周边城市以实现资源整合与配置优化。所以建议推动智慧城市群建设,进而实现不同城市间的数据的流转与整合,破解“信息孤岛”,优化要素配置与替代效应,促进能源效率的全面提升。

4. 加强智慧城市建设与其他能效政策的联动。智慧城市的试点政策虽然提升了能源效率,但其效果相较针对性的能效政策仍然有限,其对能源效率的直接作用也只是对城市进行精细化与智能化管理的副产品之一,经济区域异质性也表明智慧城市对能源效率的提升效果在那些本身就偏向紧凑型发展的城市中并不明显。因此,鉴于智慧城市建设可以在提高能源效率的同时不会增强能源回弹效应的特点,建议加强智慧城市试点政策与其他能效政策的联动使用,如碳排放权交易政策、排污权交易政策等,在不会明显增强能源回弹效应的基础上达到更为可观的能效增长目标,进而实现节能减排与绿色发展的政策效果。

参考文献:

- [1] YU Y, ZHANG N, KIM J D. Impact of urbanization on energy demand: an empirical study of the Yangtze River Economic Belt in China [J]. Energy policy, 2020(139): 111354.
- [2] WANG Q, LIN J, ZHOU K, et al. Does urbanization lead to less residential energy consumption? a comparative study of

- 136 countries [J]. *Energy*, 2020(202): 117765.
- [3] 郭庆宾, 汪涌. 空气污染对城市化进程的反馈效应[J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(8): 62-69.
- [4] POLZONETTI A, SAGRATELLA M. Smart city and green development [C] // *Conference on e-Business, e-Services and e-Society*. Cham: Springer, 2018: 191-204.
- [5] CAPDEVILA I, ZARLENGA M I. Smart city or smart citizens? The Barcelona case [J]. *Journal of strategy and management*, 2015, 8(3): 266-282.
- [6] SARMA S, SUNNY S A. Civic entrepreneurial ecosystems: Smart city emergence in Kansas City [J]. *Business horizons*, 2017, 60(6): 843-853.
- [7] 王敏, 李亚非, 马树才. 智慧城市建设是否促进了产业结构升级[J]. *财经科学*, 2020(12): 56-71.
- [8] 张卫东, 丁海, 石大千. 智慧城市建设对全要素生产率的影响——基于准自然实验[J]. *技术经济*, 2018, 37(3): 107-114.
- [9] 周小敏, 李连友. 智慧城市建设能否成为经济增长新动能? [J]. *经济经纬*, 2020, 37(6): 10-17.
- [10] KIM K, JUNG J K, CHOI J Y. Impact of the smart city industry on the Korean national economy: Input-output analysis [J]. *Sustainability*, 2016, 8(7): 649.
- [11] 袁航, 朱承亮. 智慧城市是否加速了城市创新? [J]. *中国软科学*, 2020(12): 75-83.
- [12] 何凌云, 马青山. 智慧城市试点能否提升城市创新水平? ——基于多期 DID 的经验证据[J]. *财贸研究*, 2021, 32(3): 28-40.
- [13] CARAGLIU A, DEL BO C F. Smart innovative cities: the impact of smart city policies on urban innovation [J]. *Technological forecasting and social change*, 2019(142): 373-383.
- [14] 石大千, 丁海, 卫平, 等. 智慧城市建设能否降低环境污染[J]. *中国工业经济*, 2018(6): 117-135.
- [15] CHU Z, CHENG M, YU N N. A smart city is a less polluted city [J]. *Technological forecasting and social change*, 2021(172): 121037.
- [16] YAO T, HUANG Z, ZHAO W. Are smart cities more ecologically efficient? Evidence from China [J]. *Sustainable cities and society*, 2020(60): 102008.
- [17] 黄建, 冯升波, 牛彦涛. 智慧城市对绿色低碳发展的促进作用研究[J]. *经济问题*, 2019(5): 122-129.
- [18] HITTINGER E, JARAMILLO P. Internet of Things: Energy boon or bane? [J]. *Science*, 2019, 364(6438): 326-328.
- [19] CHUI K T, LYTRAS M D, VISVIZI A. Energy sustainability in smart cities: artificial intelligence, smart monitoring, and optimization of energy consumption [J]. *Energies*, 2018, 11(11): 2869.
- [20] 吴非, 常曦, 任晓怡. 政府驱动型创新: 财政科技支出与企业数字化转型[J]. *财政研究*, 2021(1): 102-115.
- [21] 郭庆宾, 刘琪, 张冰倩. 环境规制是否抑制了国际 R&D 溢出效应——以长江经济为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(12): 1807-1814.
- [22] 杜建国, 王玥, 赵爱武. 智慧城市建设对城市绿色发展的影响及作用机制研究[J]. *软科学*, 2020, 34(9): 59-64.
- [23] 汪明月, 李颖明. 政府市场规制、产品消费选择和企业绿色技术创新[J]. *管理工程学报*, 2021, 35(2): 44-54.
- [24] 陆菁, 鄢云, 王韬璇. 绿色信贷政策的微观效应研究——基于技术创新与资源再配置的视角[J]. *中国工业经济*, 2021(1): 174-192.
- [25] WANG H, WANG M. Effects of technological innovation on energy efficiency in China: evidence from dynamic panel of 284 cities [J]. *Science of the total environment*, 2020(709): 136172.
- [26] 辜胜阻, 杨建武, 刘江日. 当前我国智慧城市建设中的问题与对策[J]. *中国软科学*, 2013(1): 6-12.
- [27] 杨继东, 罗路宝. 产业政策、地区竞争与资源空间配置扭曲[J]. *中国工业经济*, 2018(12): 5-22.
- [28] HAN F, XIE R, FANG J. Urban agglomeration economies and industrial energy efficiency [J]. *Energy*, 2018(162): 45-59.
- [29] 郭庆宾, 刘琪. 城市资源集聚能力研究进展述评[J]. *湖北大学学报(哲学社会科学版)*, 2016, 43(4): 122-129.
- [30] 郭庆宾, 骆康, 黎珏铭, 等. 武汉城市圈资源集聚能力的空间关联研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(2): 306-312.
- [31] BECK T, LEVINE R, LEVKOV A. Big bad banks? the winners and losers from bank deregulation in the United States [J]. *The journal of finance*, 2010, 65(5): 1637-1667.
- [32] WANG J. The economic impact of special economic zones: evidence from Chinese municipalities [J]. *Journal of development economics*, 2013(101): 133-147.
- [33] 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.

- [34] 吴健生, 牛妍, 彭建, 等. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的 1995—2009 年中国地级市能源消费动态[J]. 地理研究, 2014, 33(4): 625-634.
- [35] CHEN Z, YU B, YANG C, et al. An extended time series (2000—2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration [J]. Earth system science data, 2021, 13(3): 889-906.
- [36] 崔书会, 李光勤, 豆建民. 产业协同集聚的资源错配效应研究[J]. 统计研究, 2019, 36(2): 76-87.
- [37] CHETTY R, LOONEY A, KROFT K. Salience and taxation: theory and evidence [J]. American economic review, 2009, 99(4): 1145-77.
- [38] LI P, LU Y, WANG J. Does flattening government improve economic performance? evidence from China [J]. Journal of development economics, 2016(123): 18-37.
- [39] HUNG M, SHI J, WANG Y. The effect of mandatory CSR disclosure on information asymmetry: evidence from a quasi-natural experiment in China [C] // Asian finance association (AsFA) 2013 conference. Nanchang, 2013.
- [40] NUNN N, QIAN N. US food aid and civil conflict [J]. American economic review, 2014, 104(6): 1630-66.
- [41] 李智超. 政策试点推广的多重逻辑——基于我国智慧城市试点的分析[J]. 公共管理学报, 2019, 16(3): 145-156, 175.
- [42] 黎文靖, 郑曼妮. 实质性创新还是策略性创新? ——宏观产业政策对微观企业创新的影响[J]. 经济研究, 2016, 51(4): 60-73.
- [43] 曹清峰. 国家级新区对区域经济增长的带动效应——基于 70 大中城市的经验证据[J]. 中国工业经济, 2020(7): 43-60.
- [44] 郭庆宾, 刘琪. 技术进步对湖北能源消费回报效应的估算[J]. 湖北大学学报(哲学社会科学版), 2014, 41(6): 120-124.
- [45] 李凯杰, 董丹丹, 韩亚峰. 绿色创新的环境绩效研究——基于空间溢出和回弹效应的检验[J]. 中国软科学, 2020(7): 112-121.
- [46] 郭庆宾, 骆康. 中国城市群资源集聚能力的协调发展及其驱动机制[J]. 中国软科学, 2020(5): 94-103.

(本文责编: 辛 城)