
互联网基础设施建设加速了能源低碳化转型吗？

——来自“宽带中国”战略的经验证据

黄 鑫*

摘要：伴随着数字化、智能化逐渐成为经济转型升级的新引擎，以互联网为载体驱动能源市场结构性变革已成为“双碳”目标下推动能源清洁低碳、安全高效利用的主要方向。本文选取2006—2019年全国275个地级市的面板数据围绕互联网基础设施建设对能源低碳化转型的整体效果、作用机制和有效边界展开分析，研究发现：“宽带中国”示范城市试点显著提高了城市综合能源碳排放效率和净能源碳排放效率，即互联网基础设施建设能够加速能源低碳化转型；“宽带中国”示范城市试点通过释放绿色创新驱动效应、产业结构优化效应、金融科技赋能效应推动能源低碳化转型，但能源市场整合效应效果发挥受制于能源行业行政垄断和地方保护主义的盛行；“宽带中国”示范城市试点对能源低碳化转型的促进作用主要集中于中西部地区和经济发展大规模城市，并且互联网基础设施建设的红利效应一定程度依赖于完善的传统交通基础设施建设。本文研究为实现“数字-能源”耦合协调发展提供政策启示，以期加速能源低碳化转型提供科学依据。

关键词：能源；低碳转型；互联网基础设施；“宽带中国”战略；“双碳”目标

一、引言

自改革开放以来，中国已建立起较为完备的能源工业体系，伴随着能源体系进入发展模式升级、能源结构调整、增长动力转换的高质量发展阶段，中国必须深入践行能源革命，通过优化能源结构、提高能源利用效率、促进能源转型升级，以实现经济、社会 and 环境的可持续发展。由于能源生产和消费相关活动是重要的二氧化碳排放源，加速能源低碳化转型、提高能源利用效率是“双碳”目标下实现经济稳定增长与气候环境改善协调发展的主要途径。对此，国家发展改革委、国家能源局于2022年印发《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施

*黄鑫，浙江财经大学经济学院，邮政编码：310018，电子信箱：943637334@qq.com。

本文是国家自然科学基金专项项目“科学基金基础研究多元投入路径与经费管理模式研究”(K1924001)的阶段性成果。感谢匿名审稿人提出的宝贵意见。文责自负。

施的意见》，提出2030年基本建成完整的能源绿色低碳发展基本制度和政策体系，形成非化石能源既能基本满足能源需求增量，又能规模化替代化石能源存量，能源安全保障能力得到全面增强的能源生产消费格局。2012年至2021年间，煤炭消费占比由68.5%降至56.0%；石油占比由17.0%升至18.5%，天然气占比由4.8%上升到8.9%；一次电力及其他清洁能源占比由9.7%升至16.6%。虽然中国能源消费结构逐渐趋于低碳化，但作为世界上最大的能源消费国和碳排放国，中国现有能源体系转型在化石能源依存度高、能源供需不匹配、煤炭消费占比过高、石油天然气严重依赖进口、新能源技术限制等方面所面临的瓶颈严重制约着中国经济高质量发展的步伐。“双碳”目标下中国能源低碳化转型进程中面临的主要困境在于：一是将可再生能源、储能技术和能源需求进行智能化管理和协调的智能电网建设在电力通信技术、数据管理和分析等方面面临复杂的技术挑战；二是能源系统优化与控制过程中的负荷预测、能源需求响应和能源调度涉及到多个因素和变量，需要解决复杂的数学模型、算法开发和实时决策等问题；三是新能源普及与消纳环节面临着清洁能源消纳的技术和经济挑战，包括电网稳定性、储能技术和配电网升级等方面的问题。但在新一轮产业变革和信息技术推动下，先进数字技术（如大数据、云计算、物联网、人工智能、区块链）与能源生产、传输、存储、消费等领域的深度交叉融合，催生了具有设备智能、多能协同、信息对称、供需分散、系统扁平、交易开放等特征的智慧能源新技术、新模式和新业态，数字化赋能能源绿色低碳转型新方向。

为推进我国互联网基础设施建设，工业和信息化部、国家发展改革委印发了《创建“宽带中国”示范城市（城市群）工作管理办法》，并于2014年、2015年和2016年分三期批复119个城市作为“宽带中国”示范城市，旨在提升城市宽带接入能力、互联网普及率、宽带用户渗透率等指标，以顺应经济社会数字化发展的新需求，进一步增强网络供给和服务能力，为用户提供更高速、更高质、更可靠、更广泛、更智能的信息连接。国家能源局、科学技术部于2022年印发《“十四五”能源领域科技创新规划》，指出互联网基础设施既是建设网络强国、数字中国的先决条件，也是数字技术释放节能减排效应的重要技术支撑。互联网基础设施建设能够优化能源供应链和能源利用方式，如建立智能电网和智能电表以实现了对能源消耗的精确监测和控制；但考虑到我国呈现市场资源配置与行政资源配置方式并存，政府过度的互联网基础设施投资可能导致同一区域多个数据中心或通信基站使用效率低下，互联网基础设施建设能否加速能源低碳化转型仍值得进一步研究。鉴于此，本文以“宽带中国”政策试点作为准自然实验，探究互联网基础设施建设对能源低碳化转型的整体效果、作用机制以及有效边界。

在全球气候变化和能源供保安全的双重压力下，如何推进能源清洁低碳、安全高效利用成为国内外学者研究的热点。从概念界定层面，能源低碳化既要实现太阳能、风能、氢能、潮

汐能、核聚变能等低碳排放或零碳排放的可再生能源充分利用,也要大力推进煤炭清洁高效利用,煤电碳捕集及封存、碳移除等领域减排技术(张希良等,2022)。因此,能源低碳化转型可以从结构维度和效率维度划分为能源消费结构低碳化和能源利用效率低碳化。能源消费结构低碳化聚焦于剖析各类存在互补和替代关系的细分能源如何通过结构性优化不断调整绿色低碳能源与化石能源的使用比例(李荣杰等,2020;柳亚琴等,2022;刘自敏等,2023);而能源利用效率低碳化则侧重于要素投入、合意产出和非合意产出的综合效率评价,能源利用效率低碳化最优水平应达到既定要素投入下经济稳定增长和碳排放量持续降低相兼容的理想状态(赵楠等,2015;Su & Xu,2022)。基于互联网基础设施建设的低碳治理效应,范英和衣博文(2021)结合世界各国实践经验,指出创新作为全球能源转型的最主要驱动力,不仅涵盖能源关键技术创新,还包括与之配套的商业模式和系统运行模式创新,以数字技术与可再生能源相融合的分布式智能能源体系取代以化石能源为基础的集中化能源体系,是实现能源绿色低碳发展的重要途径(王俊豪、周晟佳,2021)。对此,不少学者以数字经济发展水平为切入点展开分析,研究发现“数字-能源”耦合协调发展在优化能源消费结构(Shahbaz et al.,2022;Shi et al.,2022)、降低碳排放强度(王香艳、李金叶,2022)、减少环境污染(陈晓红等,2022)中具有不可或缺的作用。但数字经济的节能减排效应也存在分歧,其主要争议点在于能源效率提高会产生“能源回弹效应”,数字信息产业快速发展会引致电力消耗大幅增长,造成能源效率不断提高与能源消费持续攀升并存的“悖论”现象,使得节能减排效果未能达到预期(Sadorsky,2012;Freire-González & Puig-Ventosa,2015)。互联网基础设施建设作为数字经济发展的关键技术支撑,有学者将地区间数字鸿沟归因于互联网基础设施建设水平差异(韩先锋等,2019),郭鹏飞等(2022)通过比较中国网络基础设施建设资本回报率的区域差异,指出政府在统筹推进全国网络基础设施建设时应加大对西部落后地区的扶持力度。也有学者利用“宽带中国”示范城市构造准自然实验验证了互联网基础设施建设在产业结构优化(徐伟呈等,2022)、环境治理(Yi et al.,2022)、全要素生产率(刘传明和马青山,2020)以及绿色技术创新(王锋正等,2022)等方面发挥的重要作用。

综上所述,一方面,现有文献已从结构维度和效率维度对能源低碳化转型的概念界定和测定方式展开研究,但利用数据包络法测算能源利用效率低碳化水平往往是基于二氧化硫、粉尘、污水排放量等非期望产出的绿色全要素生产率计算,抑或是以地区总二氧化碳排放量为非期望产出进行测算,鲜有研究针对不同类型能源消费量反演地区能源碳排放量进而构建能源低碳化指数;另一方面,现有关于互联网基础设施建设的研究多是以地区节能减排减污或全要素生产率提高为目标展开分析,鲜有文献以能源低碳化转型为锚点针对互联网基础设施建设进行研究。因此,“双碳”目标下如何通过政策驱动释放互联网基础设施建设的节能减排效应,以实现能源低碳化转型是未来研究的主要方向。本文可能的边际贡

献在于:首先,立足于“双碳”目标下中国能源革命的现实背景,利用非径向方向距离函数(NDDF)并按照不同要素权重测度综合能源碳排放效率和净能源碳排放效率,以探究中国能源低碳化的转型路径。其次,考虑到数字经济背景下中国能源低碳化转型的驱动模式,以“宽带中国”示范城市试点构建准自然实验分析互联网基础设施建设对能源低碳化转型的整体效果,并深入探究绿色创新驱动、产业结构优化、金融科技赋能和能源市场整合等多重作用机制。最后,聚焦于互联网基础设施建设对能源低碳化转型的有效边界,厘清其作用效果在区位差异、交通基础设施建设水平、城市规模方面的异质性,以期为加速能源低碳化转型提供科学依据。

二、理论基础与研究假设

(一)“宽带中国”示范城市与能源低碳化转型

互联网基础设施建设有别于传统交通基础设施建设,传统交通设施基础建设旨在提高交通运输的效率和安全性,促进要素、商品和劳动力流动;而互联网基础设施建设是聚焦于5G、通信网络、数据中心、云计算、人工智能、物联网等核心技术突破,从而提高数字网络的普及率和覆盖范围,以数字技术提高生产力和经济效益(沈坤荣等,2023)。“宽带中国”示范城市以互联网基础设施建设为引擎,深化数字技术的城市普及率和渗透率,推动能源生产、供给、使用环节的数字化转型以加速能源低碳化转型(陈晓红等,2021),具体而言,“宽带中国”示范城市对能源低碳化转型的政策效果主要体现在推进“互联网+”的智能电网和智能交通建设,加速企业能源管理数字化转型,赋能政府能源监管模式创新。

首先,电力系统加快向适应大规模、高比例的新能源方向转变是实现能源低碳化转型的关键一环,智能电网通过实时监测和控制电力供需以提高能源利用效率,互联网基础设施建设为智能电网提供高速的数据传输和通信支持,并且为能源低碳化转型提供智能化管理的基础;此外,互联网基础设施建设赋能智能交通建设,通过智能化的交通信号控制、交通流量优化模拟预测道路拥堵情况,降低车辆行驶过程中的碳排放。其次,互联网基础设施促进企业能源管理数字化转型,一方面,宽带网络通过打破前沿技术的信息壁垒,降低企业获取环保和绿色技术资源和信息的搜寻成本,从生产端助力企业实现绿色技术和产品创新,提高能源利用效率;另一方面,企业通过数字技术实现对能源消耗的实时监测和管理,以调整和优化工业基期的生产运行参数,从而优化能源结构并提高生产效率。最后,互联网基础设施建设赋能政府能源监管模式创新(郭劲光、王虹力,2022),政府可以建立数字化能源监管平台,集成能源消耗和碳排放数据来源,从而加强在确权、执行和审查阶段对碳排放权和用能权交易的政府激励性监管。同时,政府可以向社会公开监测数据,提高公众对环境治理的参与度和透明度,进一步健全碳排放权和用能权交易体系。基于此,本文提出假设1:

假说1：“宽带中国”示范城市试点能够加速能源低碳化转型。

(二)“宽带中国”示范城市对能源低碳化转型的作用机制分析

一是绿色创新驱动效应。为实现经济稳定增长与气候环境改善协调发展,非常规油气、储能、光伏能、水能、氢能、智慧能源等新型能源利用以及碳捕集利用与封存技术(CCUS)等绿色技术创新已成为“双碳”目标下中国实现能源低碳化转型的根本途径(林伯强,2022)。互联网技术兼具智能化和数字化的特点,能够降低绿色创新要素的储存和流动成本并促进前沿技术的跨领域知识交流、溢出和应用普及,具体而言,一是以数字技术助力企业对能源消耗量和碳排放量数据进行监测和管理,从而为绿色技术创新提供更加准确的数据和需求;二是通过互联网平台实现绿色技术扩散,促进研发主体间的技术交流和合作;三是通过在线平台和社交媒体等渠道,向公众普及绿色技术的特点和优势,提高社会对绿色产品的消费需求。“宽带中国”示范城市政策旨在完善互联网基础设施,提高绿色技术的研发效率和成果转化率,降低研发成本和技术风险,通过推动绿色技术的创新和应用,以实现能源低碳化转型。

二是产业结构优化效应。深化供给侧结构改革以推动产业结构优化既是中国实现高质量发展的关键环节,也是“双碳”目标下能源低碳化转型的重要支撑(孙鹏博等,2023)。产业结构优化包括主导产业高级化和内部结构合理化,是推动节能减排和经济增长的重要因素。互联网基础设施建设不仅催生了新兴数字产业(如5G技术、云计算、人工智能等)的快速发展,还通过产业数字化和数字产业化实现了传统产业与数字产业的深度交叉融合。新兴产业发展实现了人力、资本、能源等资源要素的合理配置和产业间的协同分工,从而降低高能耗产业比重(徐伟呈等,2022)。同时,以互联网为基础的工业数字化转型能够提高生产效率和能源利用效率,加速推动传统行业向绿色低碳方向转型。例如,智能电网的建设和运营通过对电力输送、消费和储存的全方位监测、管理和数据分析,实现能源的智能化调度,从而推动能源低碳化转型。

三是金融科技赋能效应。传统金融业与数据息息相关,无论是从营销获客到用户画像,还是从业务流转到金融服务,数据采集、存储、传输、展现、分析与生命周期优化都是金融业运行的关键一环。金融科技是一种数字技术驱动的金融创新,随着互联网基础设施的不断完善,使得大数据、云计算、人工智能等新型数字技术与传统金融业深度融合,并衍生出新的金融产品、服务和模式,提高金融服务的效率和质量,提升获客营销、智能风控、运营管理能力。“双碳”目标下金融科技主要通过数字技术赋能能源数据分析与风险管理以加速能源低碳化转型(武汉大学国家发展战略研究院课题组,2022)。具体而言,金融科技利用大数据分析技术,对能源消耗和排放等相关数据进行深入分析,通过对历史数据的挖掘和模式识别,金融科技可以帮助能源企业和政府机构识别出高能耗和高排放的环节,并制定相应的改善措施。

此外,金融科技还可以通过实时数据监测和分析,帮助能源企业实现对能源消耗的实时掌控,及时发现和解决能源浪费和损耗的问题,并利用智能算法和优化模型,为能源低碳化转型提供精确的优化方案。通过对能源系统的建模和仿真,金融科技可以帮助能源企业和政府机构优化能源资源配置和供应链管理,降低能源消耗和排放,进而推动能源低碳化转型。智能算法还可以针对不同的能源项目提供最优的运营策略,例如风电场的风速预测和发电量优化,太阳能光伏系统的布局和发电效率优化等。

四是能源市场整合效应。市场分割作为掣肘区域间商品贸易和要素流动的体制扭曲产物,根源于由“统收统支”到“分税制”改革阶段中,地方政府在晋升锦标赛激励模式下对辖区企业的政策偏向和对外地企业排斥的地方保护主义,中国能源市场在地理因素、产权性质以及价格方面都存在不同程度的市场分割,尚未形成能源行业的全国统一大市场(方建春等,2020)。互联网基础设施建设可以促进能源产品跨地区交易,降低能源供应商和消费者之间的跨地区交易的成本;此外,数字技术为能源市场提供高效的信息交流和共享平台,通过互联网技术的应用提高市场信息透明度,实现各地区能源信息得以实时传输和共享,同时,互联网基础设施建设也为碳排放权、用能权跨地区交易提供了技术支持,从而有利于能源市场整合。综上所述,互联网基础设施建设以提高市场透明度,降低交易成本,通过能源产品跨地区交易整合能源市场,推动能源低碳化转型。基于此,本文提出以下假说:

假说2:“宽带中国”示范城市试点通过释放绿色创新驱动效应、产业结构优化效应、金融科技赋能效应、能源市场整合效应以促进能源低碳化转型。

三、研究设计

(一)数据来源

由于西藏及香港、澳门和台湾地区能源数据并未披露,本文基于2006—2019年中国275个地级市的非平衡数据展开分析,其中原始数据来源于《中国统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国电力统计年鉴》《中国城乡建设统计年鉴》以及各省市统计年鉴,此外,地级市能源消费量来源于《中国能源统计年鉴》和DMSP/OLS和NPP/VIIRS两套夜间灯光数据。对于部分变量缺失值的地级市采用线性插值法进行补齐,并利用Stata17.0对数据进行分析。

(二)变量设计与描述统计

1. 被解释变量

能源低碳化转型是逐步通过能源结构调整,形成清洁能源替代高耗能、高污染化石能源的能源消费格局,最终实现能源清洁高效利用。由于城市层面尚未披露不同类型能源的消费结构数据,因此难以从结构维度刻画能源低碳化水平;基于效率维度,能源低碳化转型应实现既定生产要素投入下,兼顾经济增长和能源碳排放降低的双重目标,对此,本文利用能源碳排

放效率衡量能源低碳化水平(Su & Xu, 2022; Su et al., 2023)。考虑到单要素能源利用效率难以有效衡量能源、资本和劳动力生产要素间的比例关系,并且忽略了非期望产出的影响。本文参考 Zhang 等(2014)的做法,利用非径向方向距离函数(NDDF)测度能源碳排放效率,其优点在于:一是将合意产出的提高和非合意产出的减少纳入到效率分析框架中,二是通过引入松弛变量区分各类投要素和产出的无效率值。参考 Zhang 和 Choi(2014)的做法,将所有投入和产出纳入目标函数和约束条件,构建以下函数:

$$\begin{aligned} \overline{D}_T = (L, K, E; G; C) = \max & w_L \beta_L + w_K \beta_K + w_E \beta_E + w_G \beta_G + w_C \beta_C & (1) \\ \text{s.t.} & \sum_{n=1}^N z_n L_n \leq L - \beta_L g_L; \sum_{n=1}^N z_n K_n \leq K - \beta_K g_K; \sum_{n=1}^N z_n E_n \leq E - \beta_E g_E \\ & \sum_{n=1}^N z_n G_n \geq G + \beta_G g_G; \sum_{n=1}^N z_n C_n = C - \beta_C g_C \\ & z_n \geq 0, n = 1, 2, \dots, N; \beta_L, \beta_K, \beta_E, \beta_G, \beta_C \geq 0 \end{aligned}$$

其中权重集合 $W^T = (1/9, 1/9, 1/9, 1/3, 1/3)$, 方向集合为 $g = (-L, -K, -E, G, -C)$, L 表示劳动力投入、E 表示能源投入、K 表示资本投入、G 表示 GDP 产出、C 表示碳排放量, 各类投入产出影响个体无效率因素的集合 $\beta^T = (\beta_L, \beta_K, \beta_E, \beta_G, \beta_C)$, 设定规模报酬可变并求解方程得出每种投入和产出的 β 最优系数, 计算综合能源碳排放效率 $CECEE$, 具体计算方法如下:

$$CECEE = 1/4 \left[\frac{(1-\beta_L^*) + (1-\beta_K^*) + (1-\beta_E^*) + (1-\beta_C^*)}{1 + \beta_G^*} \right]$$

此外,考虑到劳动和资本投入要素并不会直接产生碳排放,通过改变劳动和资本在目标函数和约束限制中的条件,进而测算净能源碳排放效率 $NECEE$, 新的权重集合 $W^T = (0, 0, 1/3, 1/3, 1/3)$, 方向集合为 $g' = (0, 0, -E, G, -C)$, 各类投入产出影响个体无效率因素的集合 $\beta^T = (\beta_E, \beta_G, \beta_C)$, 构建以下函数:

$$\begin{aligned} \overline{D}_T = (L, K, E; G; C) = \max & w_E \beta_E + w_G \beta_G + w_C \beta_C & (2) \\ \text{s.t.} & \sum_{n=1}^N z_n L_n \leq L; \sum_{n=1}^N z_n K_n \leq K; \sum_{n=1}^N z_n E_n \leq E - \beta_E g_E \\ & \sum_{n=1}^N z_n G_n \geq G + \beta_G g_G; \sum_{n=1}^N z_n C_n = C - \beta_C g_C \\ & z_n \geq 0, n = 1, 2, \dots, N; \beta_E, \beta_G, \beta_C \geq 0 \end{aligned}$$

通过求解方程得出每种投入和产出的 β' 最优系数, 计算净能源碳排放效率 $NECEE$, 具体计算方法如下:

$$NECEE = 1/2 \left[\frac{(1-\beta_E^*) + (1-\beta_C^*)}{1 + \beta_G^*} \right]$$

能源碳排放效率测算的各类要素投入和产出的定义如下:

(1)劳动力投入:利用年末单位从业人员数(万人)衡量劳动力投入水平。

(2)资本存量:借鉴张军等(2004)方法,以2006年为基准年采用“永续盘存法”,按不变价格计算各地级市的资本存量(亿元),具体计算公式为 $K_{it} = K_{i,t-1}(1-\delta) + I_{it}/P_{it}$,其中 P 为投资价格指数, I 为固定资产投资, δ 为折旧率(此处取9.6%)。

(3)能源消费量:由于统计年鉴尚未披露能地级市能源消费数据,利用DMSP/OLS和NPP/VIIRS两套夜间灯光数据,反演得到2006—2019年275个地级市的能源消费量(万吨标准煤)。具体而言,通过构建不含截距的线性模型拟合省级夜间灯光DN总值与省级能源消费总量,并将省级消费总量按地级市灯光DN总值分解到各地级市(史丹、李少林,2020)。

(4)期望产出GDP:以地区生产总值衡量期望产出,并以2006年为基期进行价格平减。

(5)非期望产出能源碳排放量:由于碳排放约90%来源于能源消耗,参考现有研究方法(吴建新、郭智勇,2016;Guo et al.,2022;Zhang et al.,2022),基于IPCC2006提供的能源碳排放转化因子和中国电网发布的历年各区域电网基准线排放因子,计算各地级市供电、供气、供暖的能源消费碳排放量(万吨),具体测算指标体系见表1。

表1 能源碳排放效率测算指标体系

	准则层	指标层	单位
投入指标	劳动力投入	年末单位从业人员数	万人
	资本投入	固定资产投资额	亿元
	能源投入	能源消费总量	万吨标准煤
产出指标	期望产出	实际GDP	万元
	非期望产出	能源消费碳排放量	万吨

2. 解释变量

“宽带中国”示范城市试点对于能源低碳化转型具有一定的外生冲击性。对此,本文选取“宽带中国”示范城市试点虚拟变量 $Policy_{it}$ 作为解释变量,根据国家发展改革委及工业和信息化部于2014年、2015年和2016年分期批复的示范城市(城市群)名单,对各地级市 $Policy_{it}$ 进行赋值,若地级市在该年入选或已入选示范城市名单,则赋值为1,否则为0。

3. 机制变量

基于上述理论分析,互联网基础设施建设对能源低碳化转型存在多重作用机制,对此本文选取4个机制变量。一是绿色技术创新(Patent),《国际专利分类表》(IPC分类)将绿色专利领域划分为废弃物管理类、核电类、交通运输类、能源节约类、农林类、替代能源生产类、行政监管与设计类,本文从国家知识产权局中国专利公布公告网进行检索,并以万件绿色发明专利申请量测度绿色技术创新(韩先锋等,2022)。二是产业结构升级(Industry),利用第三产业产值增加值与第二产业产值增加值的比例衡量。三是金融科技发展(Fintech),参考李春涛等(2020)提出的方法,在百度新闻高级检索中整理地级市与金融科技相关关

键^①的新闻页面搜索数量,将所有关键词的搜索数量加总并进行对数变换。四是能源市场分割(Separate),基于冰山成本理论并利用相对价格法(毛其淋、盛斌,2013)测度能源市场分割程度。选取各省市每年燃料类零售价格指数和燃料动力类工业生产者购进价格指数,计算不同省市组合相对价格的绝对值,并对相对价格方差按省市进行合并,该指数越大,则表明能源市场分割程度越高,地区能源市场整合程度较低,尚未形成全国统一的能源大市场。

4. 控制变量

为控制其他影响能源低碳化转型因素的干扰,准确估计互联网基础设施建设的有效性,本文参考既有文献选取经济发展水平(LnGDP)、地区资源禀赋(Resource)、人口增长率(Growth)、电信业务量(Internet)作为控制变量。其中经济发展水平以2006年为基期的实际GDP(万元)的自然对数衡量,地区资源禀赋以采掘业从业人员数(万人)的自然对数衡量,人口增长率以自然增长率(%)衡量,互联网发展水平以电信业务总量(万元)的自然对数衡量。变量描述性统计如表2所示。

表2 变量描述性统计

变量名称	变量符号	样本量	平均值	标准差	最小值	最大值
综合能源碳排放效率	CECEE	3586	0.536	0.160	0.188	1.000
净能源碳排放效率	NECEE	3586	0.378	0.185	0.108	1.000
“宽带中国”政策	Policy	3586	0.132	0.339	0.000	1.000
绿色技术创新	Patent	3503	0.511	1.482	0.001	27.127
产业结构升级	Industry	3586	0.908	0.493	0.094	5.169
金融科技发展	Fintech	3236	2.345	1.465	0.000	6.811
能源市场分割	Separate	3586	0.00198	0.00258	0.00016	0.03577
经济发展水平	LnGDP	3586	16.036	0.920	13.528	19.234
地区资源禀赋	Resource	3586	-0.858	2.060	-6.908	3.194
人口增长率	Growth	3586	5.755	5.317	-16.640	39.180
电信业务量	Internet	3586	6.482	0.783	3.252	10.320

(三)实证模型

本文以“宽带中国”示范城市试点作为外生冲击构建准自然实验,研究互联网基础设施建设与能源低碳化转型的因果关系。考虑到“宽带中国”政策试点呈现分期批复的特征,传统双重差分法(DID)难以有效评估渐进式推行政策的实施效果。对此,采用渐进双重差分模型重点考察政策处理组虚拟变量与试点时间虚拟变量交互项的系数和显著性水平,模型如公式(3)所示。

$$Lowcarbon_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Policy_{it} + \gamma X_{it} + D_i + D_t + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

其中 α_1 为本文关注的主要系数,下角标 i, t 表示城市和年份, X_{it} 表示一系列控制变量, D_i 和

^①本文是国家自然科学基金专项项目“科学基金基础研究多元投入路径与经费管理模式研究”(K1924001)的阶段性成果。感谢匿名审稿人提出的宝贵意见。文责自负。

D_i 分别代表城市固定效应和时间固定效应, ε_{it} 为随机扰动项。

四、实证结果与分析

(一) 平行趋势检验

实验组和对照组之间满足平行趋势是双重差分法利用的前提条件,即剔除“宽带中国”政策影响时,试点地区和非试点地区的能源低碳化水平变化趋势应是平行的。对此,本文以2006年为基期进行“宽带中国”政策试点的动态效应检验,如式(4)所示,

$$Lowcarbon_{it} = \alpha_0 + \alpha_k \sum_{k=-8}^{k=5} D_{it}^k + \gamma X_{it} + D_i + D_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

其中 D_{it}^k 表示城市 i 成为“宽带中国”试点地区的第 k 年,时间跨度覆盖政策实施前 8 年与政策实施后 5 年, α_k 表示试点城市建设前后政策因素对城市能源低碳化水平的影响,政策动态经济效应检验结果如图 1(a)(b)所示,分别估计综合能源碳排放效率和净能源碳排放效率两类方程中参数的回归系数,结果表明“宽带中国”政策实施前年份虚拟变量与处理组虚拟变量交互项的估计系数基本未通过 1% 水平的显著性检验,政策实施后该系数基本在 1% 水平上显著为正,从而验证了互联网基础设施建设对能源低碳化转型的促进作用。

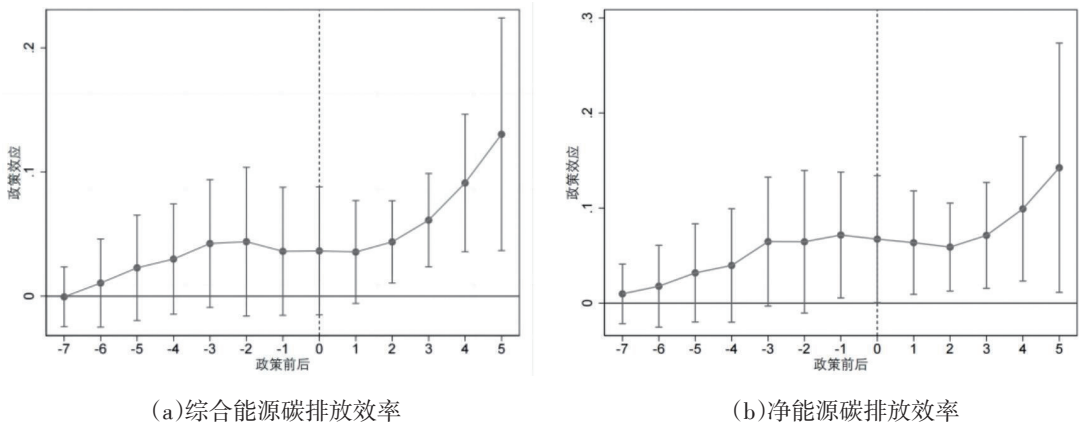


图1 “宽带中国”示范城市试点的政策动态经济效应

(二) 基准回归

首先针对多重共线性进行检验,相关性系数矩阵和方差膨胀因子 VIF 表明变量间自相关系数绝对值均小于 0.4 并且 VIF 均小于 1.5,表明回归结果不存在明显的多重共线性(因篇幅原因未报告检验结果)。本文利用多期双重差分法研究“宽带中国”示范城市试点对能源低碳化转型的政策效果,并使用聚类到城市层面的稳健标准误进行估计,基准回归结果如表 3 所示。第(1)和(3)列分别以综合能源碳排放效率和净能源碳排放效率为被解释变量,引入城市固定效应和年份固定效应后的回归结果,第(2)和(4)列是在此基础上加

入控制变量后的回归结果,结果表明“宽带中国”示范城市试点 Policy 的估计系数显著为正且均通过 5% 的显著性水平检验,即相较于非试点城市,“宽带中国”政策显著提高了地区综合能源碳排放效率和净能源碳排放效率,并且其对净能源碳排放效率的促进效果更为明显。因此,“宽带中国”示范城市试点以互联网基础设施建设为引擎,深化数字技术的城市普及率和渗透率,推动能源生产、供给、使用环节的数字化转型以加速能源低碳化转型,假说 1 得到验证。

表 3 基准回归结果

	(1)	(2)	(3)	(4)
	<i>CECEE</i>	<i>CECEE</i>	<i>NECEE</i>	<i>NECEE</i>
<i>Policy</i>	0.0326*** (0.012)	0.0287** (0.012)	0.0373** (0.015)	0.0339** (0.014)
<i>LnGDP</i>		0.1856*** (0.024)		0.1100*** (0.029)
<i>Resource</i>		-0.0086* (0.005)		-0.0041 (0.006)
<i>Growth</i>		0.0004 (0.001)		0.0010 (0.001)
<i>Internet</i>		-0.0162*** (0.006)		-0.0106 (0.007)
常数项	0.5443*** (0.008)	-2.2305*** (0.367)	0.3672*** (0.010)	-1.2742*** (0.448)
城市固定效应	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
样本量	3586	3586	3586	3586
adj. R ²	0.2042	0.2659	0.1670	0.1840

注: *、**和***分别代表 10%、5%和 1%的显著性水平,括号内的值为聚类到地级市的标准误,下表同。

(三)稳健性检验

1. 安慰剂检验

为避免不可观测的遗漏变量对回归结果产生影响,本文通过随机生成“宽带中国”示范城市对基准回归进行安慰剂检验,图 2(a)(b)分别表示以综合能源碳排放效率和净能源碳排放效率为被解释变量,随机生成试点城市的并各自重复进行 500 次回归的 p 值分布和系数估计值核密度分布图,安慰剂检验结果表明基于随机样本的估计系数 p 值分布和核密度分布呈现以 0 为均值的正态分布,并且真实估计系数基本独立于伪政策虚拟变量的估计系数分布,由此证明互联网基础设施对能源低碳化转型的促进作用并未受到其他随机因素的干扰。

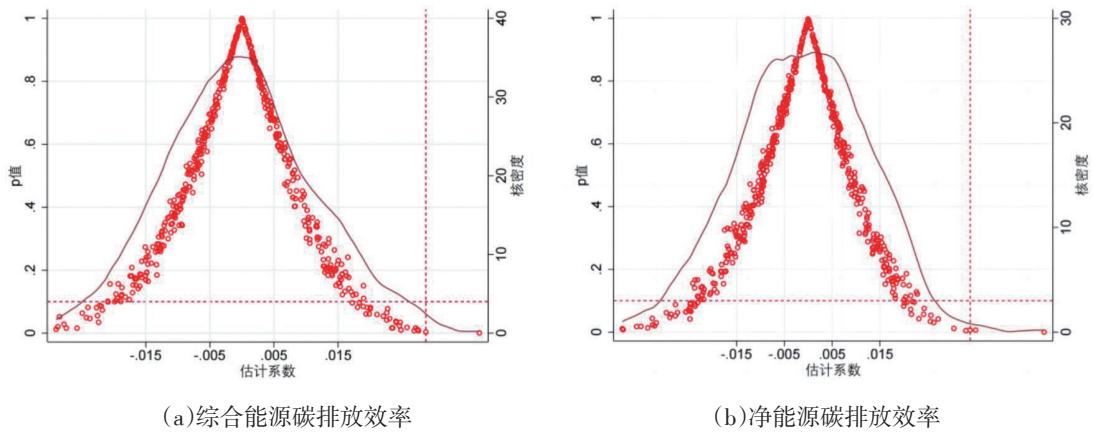


图2 “宽带中国”示范城市试点的安慰剂检验

2. PSM-DID 方法

考虑到经济发展水平、自然资源禀赋以及人口增长率等地区因素可能导致中央政府选取用能权交易试点地区并非完全随机,由此导致的样本选择偏误问题会影响回归结果可靠性。对此,本文采用PSM倾向得分匹配法作稳健性考察,将经济发展水平、自然资源禀赋、人口增长率、电信业务量、产业结构升级、绿色技术创新作为解释变量计算倾向得分值并根据该值匹配实验组和控制组进行双重差分模型回归。1:1匹配方法下T检验结果显示变量的标准化偏差均小于5%,且匹配前后核密度函数图更加贴近,说明PSM配对结果可靠,并进一步在共同检验基础上引入PSM-DID模型,表4列(1)(2)结果表明在剔除样本选择偏误对模型估计结果影响后,“宽带中国”示范城市试点的能源低碳化激励效应仍然显著。

3. 非随机选择影响检验

利用双重差分法进行政策评估时,理想状况时实验组和对照组的选择都是随机的,考虑到“宽带中国”示范城市试点可能存在一定的非随机性,示范城市的选择往往与城市经济发展水平、行政区属性以及区位因素等相关。对此,本文借鉴Li等(2016)的做法,通过引入城市属性因素、控制变量与时间趋势的交互项,以控制城市属性差异随时间变化对能源低碳化转型产生的不同影响,模型如式(5)所示:

$$Lowcarbon_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Policy_{it} + \gamma X_{it} \times Trend_t + Z_{it} \times Trend_t + D_t + D_i + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

其中, $X_{it} \times Trend_t$ 和 $Z_{it} \times Trend_t$ 分别为控制变量与时间趋势的交互项,长江经济带城市、直辖市两类城市属性因素与时间趋势的交互项,其余变量设定与基准回归相同。回归结果如表4列(3)(4)所示,在考虑了“宽带中国”政策试点的非随机选择问题后,示范城市对综合能源碳排放效率和净能源碳排放效率的正向作用依然成立。

4. 控制其他政策干扰

自2000年生态领域实施市场化改革以来,中国相继开展排污权交易、碳排放权交易、用

能权交易等市场激励型低碳政策,该类政策的并行开展可能会对“宽带中国”示范城市的政策评估效果产生干扰。因此,本文进一步控制排污权交易、碳排放权交易、用能权交易三种代表性低碳政策对能源低碳化转型的影响。结果如表4列(5)(6)所示。在同时控制一系列低碳政策影响后,“宽带中国”示范城市试点对能源低碳化转型的提升作用仍然稳健。

5. 内生性检验

考虑到双向因果和遗漏变量问题可能导致的内生性问题,本文进一步采用工具变量法进行稳健性检验。本文参考现有研究做法,选取1984年每百人固定电话数和每百万人邮局数作为工具变量(黄群慧等,2019;Xue et al.,2022),其原因在于互联网技术在其早期发展阶段通常是建立在固定电话网络和邮局通信之上,固定电话和邮局普及率高的地区在互联网的普及方面也具有一定的先发优势。因此,历史人均固定电话数和邮局数与“宽带中国”示范城市试点高度相关,且并未直接影响能源低碳化转型,理论上满足工具变量的相关性及外生性原则。由于不随时间变化的工具变量在固定效应模型中难以应用,对此分别构建1984年每百人固定电话数、每百万人邮局数与上一年互联网宽带接入用户数的交乘项作为“宽带中国”示范城市试点的工具变量并进行2SLS回归^①,回归结果如表4列(7)(8)所示,Kleibergen-Paap

表4 稳健性检验

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	PSM-DID		非随机因素		其他政策干扰		内生性检验	
	CECEE	NECEE	CECEE	NECEE	CECEE	NECEE	CECEE	NECEE
Policy	0.0231** (0.012)	0.0292** (0.014)	0.0297** (0.012)	0.0350** (0.014)	0.0291** (0.012)	0.0346** (0.014)	0.2773** (0.114)	0.2120* (0.114)
常数项	-2.0080*** (0.338)	-0.9451** (0.396)	0.6351 (1.382)	1.5588 (1.572)	-2.2441*** (0.369)	-1.3067*** (0.443)	-1.7102* (0.878)	-0.6705 (1.008)
不可识别检验							8.192** {0.0166}	8.192** {0.0166}
弱识别检验							52.313 [16.38]	28.123 [19.93]
过度识别检验							0.255 <0.6135>	0.565 <0.4522>
控制变量	是	是	是	是	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
样本量	3426	3426	3586	3586	3586	3586	2876	2876
adj. R ²	0.2678	0.1939	0.2817	0.1981	0.2676	0.1894	-	-

注: []括号内为Cragg-Donald Wald F统计量10%显著性水平上的Stock-Yogo临界值; {}括号内为Kleibergen-Paap rk LM statistic统计量对应的p值; <>为Hansen J统计量对应的p值。

① 参考李春涛等(2020)的研究,定义“大数据、第三方支付、数字货币、云计算人工智能、互联网金融”等48个金融科技关键词。

rk LM统计量和Cragg-Donald Wald F统计量分别拒绝了工具变量不可识别和弱工具变量的原假设,且Hansen J检验表明工具变量不存在过度识别问题,从而验证了本文所选工具变量的可靠性,在利用工具变量减弱内生性问题后,“宽带中国”示范城市对能源低碳化转型的促进效果更强。此外,本文还通过改变聚类层级、剔除异常值、利用面板Tobit模型进行稳健性检验,上述结果依旧稳健(因篇幅原因未报告检验结果)。

6. 渐进双重差分的有效性讨论

传统的双向固定效应双重差分模型(TWEE)有效性是基于同质性处理假设,即假定所有实验组接受政策处理的时间相同,估计值是组别-时间处理效应的加权平均(Goodman-Bacon, 2021)。考虑到“宽带中国”示范城市试点呈三阶段分期批复的特点,样本实验组接受政策处理的时间节点并不一致,导致不同阶段实验组接受处理的持续时间存在差异,由此可能导致部分处理组权重为负,基于TWEE的估计结果可能存在偏误(De Chaisemartin & D’Haultfoeuille, 2020)。因此,本文采用Gardner(2021)提出的两阶段双重差分法进行检验,第一阶段,利用未处理的观测样本估计出剔除个体固定效应与时间固定效应的残差值;第二阶段,利用第一阶段估计的残差值与处理变量进行回归识别平均处理效应。回归结果如表5所示,利用多期双重差分法考虑异质性处理效应时,“宽带中国”示范城市试点对综合能源碳排放效率和净能源碳排放效率的估计系数显著为正,因此结果依旧稳健。

表5 两阶段双重差分模型

	(1)	(2)	(3)	(4)
	CECEE	CECEE	NECEE	NECEE
<i>Policy</i>	0.0327*** (0.012)	0.0313*** (0.012)	0.0373** (0.015)	0.0354** (0.014)
控制变量	否	是	否	是
城市固定效应	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
样本量	3586	3586	3586	3586

(四) 机制探讨

本文进一步分析“宽带中国”示范城市试点对能源低碳化转型的作用机制,上述理论分析表明“宽带中国”示范城市试点通过释放绿色创新驱动效应、产业结构优化效应、金融科技赋能效应、能源市场整合效应促进能源结构低碳化转型,对此选取绿色技术创新、产业结构升级、金融科技发展、能源市场分割作为机制变量并将其纳入中介效应模型进行分析。表6列(1)结果显示“宽带中国”示范城市试点对绿色技术创新的估计系数显著为正,表6列(2)(3)结果显示绿色技术创新的估计系数均显著为正,并且解释变量的估计系数相较于基准回归模型有所下降,说明绿色技术创新在“宽带中国”示范城市与能源低碳化转型之间发挥中介效

应,进一步sobel检验结果表明绿色技术创新在“宽带中国”示范城市影响综合能源碳排放效率和净能源碳排放效率的中介效应比分别为37.78%和26.90%,由此分析,“宽带中国”示范城市通过驱动绿色创新以促进能源低碳化转型。同理分析,表6列(4)—(6)列结果表明产业结构升级在“宽带中国”示范城市影响综合能源碳排放效率和净能源碳排放效率的中介效应比分别为8.27%和8.71%,即“宽带中国”示范城市通过优化产业结构以促进能源低碳化转型;表6列(7)—(9)结果表明金融科技发展水平在“宽带中国”示范城市影响综合能源碳排放效率和净能源碳排放效率的中介效应比分别为6.57%和7.62%,即“宽带中国”示范城市通过发展金融科技以促进能源低碳化转型。表6列(10)—(12)结果表明“宽带中国”示范城市对能源市场分割的影响为负但未能通过显著性检验,宽带中国”示范城市通过削弱能源市场分割以促进能源低碳化转型的作用机制尚未成立,其原因可能在于中国能源统一大市场受制于地方保护主义和行政管理的过度干预,由于能源资源禀赋空间分布不均匀,地方政府出于政绩考量会采取各种手段保护本地的能源企业,如限制外地企业进入本地市场等,从而导致能源市场的地区性分割;此外,能源行业还存在政府价格管制和行业准入等行政垄断,也会导致能源市场的部门性分割(王俊豪等,2021)。因此,能源市场分割是由地方政府或行业主管部门的行政权力和利益驱动所产生的,并非归因于信息交流不畅通。以上结果部分验证了假说2。

表6 作用机制检验

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
	<i>Patent</i>	<i>CECEE</i>	<i>NECEE</i>	<i>Industry</i>	<i>CECEE</i>	<i>NECEE</i>	<i>Fintech</i>	<i>CECEE</i>	<i>NECEE</i>	<i>Separate</i>	<i>CECEE</i>	<i>NECEE</i>
<i>Policy</i>	0.7110*** (0.191)	0.0174 (0.011)	0.0253* (0.013)	0.0467* (0.027)	0.0263** (0.011)	0.0309** (0.014)	0.1763*** (0.047)	0.0239** (0.012)	0.0279* (0.014)	-0.0000 (0.001)	0.0288** (0.012)	0.0340** (0.014)
<i>Patent</i>		0.0148*** (0.005)	0.0131* (0.007)									
<i>Industry</i>					0.0508** (0.025)	0.0633** (0.028)						
<i>Fintech</i>								0.0131*** (0.005)	0.0095** (0.004)			
<i>Separate</i>											1.9180** (0.914)	2.9556** (1.314)
常数项	-9.1179*** (2.660)	-2.1011*** (0.385)	-1.1317** (0.472)	9.1904*** (0.908)	-2.6975*** (0.447)	-1.8556*** (0.548)	-4.9100*** (1.695)	-2.3948*** (0.379)	-1.4529*** (0.475)	-0.0019 (0.002)	-2.2269*** (0.367)	-1.2686*** (0.448)
控制变量	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是
样本量	3503	3503	3503	3586	3586	3586	3236	3236	3236	3586	3586	3586
adj. R2	0.2504	0.2778	0.1923	0.5767	0.2733	0.1969	0.8615	0.2818	0.1994	0.6742	0.2664	0.1852
Sobel Z	-	6.800***	5.374***	-	3.167***	3.188***	-	2.597***	2.784***	-	-0.471	-0.465
中介效应比	-	37.78%	26.90%	-	8.27%	8.71%	-	6.57%	7.62%	-	-	-

(五) 异质性分析

上述分析对互联网基础设施建设对能源低碳化转型的整体效果和作用机制展开分析,本文进一步就互联网基础设施建设对能源低碳化转型的有效边界展开分析,厘清其作用效果在区位差异、交通基础设施建设、城市规模方面的异质性。区位差异按照城市隶属于中西部和东部进行划分,具体地,由于中国煤炭资源主要集中在山西、陕西、内蒙古、新疆等中西部地区,中西部地区相对于东部地区拥有更为丰富的传统能源资源,如煤炭、石油和天然气等。这些传统能源禀赋在中西部地区相对更为集中,使得该地区在过去主要依赖传统能源供应;而东部地区由于资源相对匮乏,更多地依赖进口能源和清洁能源。城市规模差异通过计算城市年度GDP均值的中位数进行划分,交通基础设施建设差异根据城市高速公路密度(公里/万平方米)年度均值的中位数进行划分。基于传统交通基础设施差异,表7列(1)—(4)结果表明“宽带中国”示范城市试点对于能源低碳化转型的促进作用仅在高交通基础设施样本中显著,而在低交通基础设施样本中该促进作用未能通过统计性检验,说明互联网基础设施建设的节能减排效应一定程度依赖于传统交通基础设施建设,交通基础设施是互联网基础设施建设的基石,互联网基础设施建设不仅需要足够的土地和城市规划支持,还会受制于地区物流和运输水平,因此,完善的交通基础设施会加快城市的数字化转型,进而加速地区能源低碳化转型。基于区位因素差异,表7列(5)—(8)结果表明“宽带中国”示范城市试点能够显著提高中西部地区的综合能源碳排放效率和净能源碳排放效率,但对东部城市能源低碳化转型的促进作用未能通过统计性检验,其原因可能在于,中西部地区相较于东部地区拥有煤炭和天然气等丰富的传统能源禀赋和能源生产和消费节点,通过互联网基础设施建设,可以实现能源的智能化管理和优化调度,更能有效推动能源的清洁生产和低碳转型;而东部地区由于经济发展和城市化进程较早,迫使东部地区在“宽带中国”示范城市试点前就已在能源结构和能源消费方面进行调整和转型。基于城市规模差异,表7列(9)—(12)结果表明相较于小规模城市,“宽带中国”示范城市试点的节能减排效应在大规模城市中更为显著,可能原因在于大规模城市中的能源系统更为复杂,包括能源生产、调度、消纳等环节,并且大规模城市中互联网基础设施建设的普及和使用率更高,数字技术应用的集聚效应和网络效应使得互联网基础设施建设的平均成本更低,同时也使得数据的采集、处理和共享更为便捷,互联网技术能更好地发挥其节能减排的正外部性,有效加速能源低碳化转型。

表 7

异质性分析

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
	高交通基础设施		低交通基础设施		中西部地区		东部地区		大规模城市		小规模城市	
	CECEE	NECEE	CECEE	NECEE	CECEE	NECEE	CECEE	NECEE	CECEE	NECEE	CECEE	NECEE
Policy	0.0430** (0.018)	0.0567*** (0.022)	0.0079 (0.014)	0.0074 (0.016)	0.0341** (0.014)	0.0400** (0.015)	0.0221 (0.020)	0.0271 (0.029)	0.0430** (0.018)	0.0567*** (0.022)	0.0079 (0.014)	0.0074 (0.016)
常数项	-2.8538*** (0.728)	-2.4767*** (0.909)	-1.9515*** (0.441)	-0.8903 (0.540)	-2.5848*** (0.485)	-1.8979*** (0.586)	-2.4631*** (0.541)	-0.9160*** (0.614)	-2.8538*** (0.728)	-2.4767*** (0.909)	-1.9515*** (0.441)	-0.8903 (0.540)
控制变量	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是
样本量	1780	1780	1806	1806	2317	2317	1296	1296	1780	1780	1806	1806
adj. R2	0.2345	0.1900	0.3062	0.1938	0.2949	0.2363	0.2734	0.1396	0.2345	0.1900	0.3062	0.1938

五、结论与政策建议

“双碳”目标下推动能源清洁低碳、安全高效利用是构建新型能源体系和实现高质量发展的关键环节。伴随着数字化、智能化逐渐成为经济转型升级的新引擎,进一步推进“网络强国、数字中国”建设,以互联网为载体驱动能源市场结构性变革成为加速能源低碳转型的主要方向。本文选取2006—2019年全国275个地级市的非平衡面板数据,以“宽带中国”示范城市政策试点作为外生冲击,利用多期双重差分法围绕互联网基础设施建设对能源低碳化转型的整体效果、作用机制和有效边界展开分析。主要的研究结论如下:

(1)“宽带中国”示范城市试点显著提高了城市综合能源碳排放效率和净能源碳排放效率,即互联网基础设施建设能够加速能源低碳化转型,经过平行趋势检验、安慰剂检验、非随机因素讨论等稳健性检验后结论依然成立。

(2)作用机制分析表明“宽带中国”示范城市试点通过释放绿色创新驱动效应、产业结构优化效应、金融科技赋能效应推动能源低碳化转型,但能源市场整合效应这一作用渠道尚未得到验证,其原因可能在于中国能源统一大市场进程受制于能源行业行政垄断和地方保护主义的盛行。

(3)异质性分析表明“宽带中国”示范城市试点对能源低碳化转型的促进作用主要集中于中西部地区 and 经济发展大规模城市,并且互联网基础设施建设的红利效应一定程度依赖于完善的传统交通基础设施建设。

为充分发挥互联网基础设施建设加速能源低碳化转型的红利效应,本文主要政策建议如下:

(1)贯彻“网络强国、数字中国”发展战略,持续推进传统能源与数字技术深度融合的互联网基础设施建设。加快5G基站、云计算与大数据技术、人工智能、智能电网、智能交通等领域

建设,以传统能源领域数字化、网络化、智能化转型,提升能源生产、储运、配送、消纳等环节的智能化水平,提高能源系统的运行效率和安全性;同时,建设数字化能源交易平台,推广区块链等技术,促进能源市场的开放和规范化。

(2)逐步完善能源低碳转型的政策激励机制,以金融科技、产业优化、绿色技术创新为导向健全清洁低碳能源科技协同创新体系。建立科技创新联盟,加强产学研合作,推广智能能源技术应用等,以税收优惠、财政补贴以及金融扶持政策支持高新技术企业发展,鼓励符合条件的企业发行绿色债券,引导金融机构加大对具有显著碳减排效益项目的支持,统筹推进全国性的碳排放交易、用能权交易市场建设,加强能源行业与互联网、金融科技等领域交叉融合,推动能源市场结构性变革,实现能源清洁低碳、安全高效利用。

(3)深化能源领域“放管服”改革,逐步破除阻碍能源市场一体化的地方保护和市场分割。减少行政审批环节和市场准入壁垒,加快推进能源市场化、多元化、国际化;同时,建立健全能源监管体系,强化对能源生产、储运、配送、消费等环节的监管,创新对综合能源服务、新型储能、智慧能源等新产业新业态监管方式,深入践行能源行业的全国统一大市场。并进一步完善对电网、油气管网等自然垄断环节企业的考核机制,重点考核有关企业履行能源供应保障、科技创新、生态环保等职责情况,特别是在以火力为主要生产方式的电力行业,在科学监管输配电环节同时应对其它竞争性环节放松进入壁垒和价格监管,并逐步建立电力辅助服务市场和电力零售市场打破传统电力行业纵向一体化格局。

(4)合理布局互联网基础设施建设规模,科学推进数字基建的铺设工作。根据不同地区传统基础设施水平、能源需求、地理环境、技术条件差异,因地制宜地权衡传统基础设施建设和互联网基础设施建设的优先程度和适度比例,特别是交通基础设施与能源设施统筹布局规划建设,需充分考虑煤炭、油气、电力等各种能源输送特点;此外,以数字技术促成交通基础设施网与智能电网深度融合,提升能源系统的智能化水平,实现能源信息化、智能化和绿色化。

本文也存在以下不足之处:由于数据可得性原因,基于效率维度测算能源低碳化转型水平,尚未从能源消费结构维度展开分析;能源碳排放效率测算过程中投入产出框架是基于地级市宏观层面,未深入到地级市能源产业层面。未来可以进一步通过数据挖掘深入研究互联网基础设施建设对能源低碳化转型的影响。

参考文献:

- [1] 陈晓红,胡东滨,曹文治等. 数字技术助推我国能源行业碳中和目标实现的路径探析[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(9): 1019-1029.
- [2] 陈晓红,李扬扬,宋丽洁等. 数字经济理论体系与研究展望[J]. 管理世界, 2022, 38(2): 208-224.
- [3] 范英,衣博文. 能源转型的规律、驱动机制与中国路径[J]. 管理世界, 2021, 37(8): 95-105.
- [4] 方建春,张宇燕,吴宛珊. 中国能源市场分割与全要素能源效率研究[J]. 科研管理, 2020, 41(10):

268-277.

[5] 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.

[6] 郭鹏飞,胡歆韵,李敬. 中国网络基础设施资本回报率的区域差异与空间收敛性研究[J]. 数量经济技术经济研究,2022,39(1):73-93.

[7] 韩先锋,宋文飞,李勃昕. 互联网能成为中国区域创新效率提升的新动能吗[J]. 中国工业经济,2019,(7):119-136.

[8] 韩先锋,宋文飞,李勃昕等. 数字金融赋能绿色创新的异质非线性调节效应[J]. 中国人口·资源与环境,2022,32(10):65-76.

[9] 黄群慧,余泳泽,张松林. 互联网发展与制造业生产率提升:内在机制与中国经验[J]. 中国工业经济,2019,(8):5-23.

[10] 李春涛,闫续文,宋敏等. 金融科技与企业创新——新三板上市公司的证据[J]. 中国工业经济,2020,(1):81-98.

[11] 李荣杰,李娜,张静等. 地区能源结构低碳化差异的收敛机制及影响因素——基于加权多维向量夹角指数[J]. 统计与信息论坛,2020,35(10):90-99.

[12] 林伯强. 碳中和进程中的中国经济高质量增长[J]. 经济研究,2022,57(1):56-71.

[13] 柳亚琴,孙薇,朱治双. 碳市场对能源结构低碳转型的影响及作用路径[J]. 中国环境科学,2022,42(9):4369-4379.

[14] 毛其淋,盛斌. 中国制造业企业的进入退出与生产率动态演化[J]. 经济研究,2013,48(4):16-29.

[15] 刘自敏,马靓靓,张娅. 中国清洁与非清洁能源的替代弹性估计及结构优化研究[J]. 环境经济研究,2023,8(01):53-83.

[16] 沈坤荣,林剑威,傅元海. 网络基础设施建设、信息可得性与企业创新边界[J]. 中国工业经济,2023,(1):57-75.

[17] 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.

[18] 孙鹏博,葛力铭,杨晨. 生产性服务业和工业空间协同集聚对中国工业碳排放的影响[J]. 环境经济研究,2023,8(1):1-28.

[19] 王锋正,刘向龙,张蕾,等. 数字化促进了资源型企业绿色技术创新吗?[J]. 科学学研究,2022,40(2):332-344.

[20] 王俊豪,金暄暄,刘相锋. 电网企业纵向一体化、成本效率与主辅分离改革[J]. 中国工业经济,2021,(3):42-60.

[21] 王俊豪,周晟佳. 中国数字产业发展的现状、特征及其溢出效应[J]. 数量经济技术经济研究,2021,38(3):103-119.

[22] 王香艳,李金叶. 数字经济是否有效促进了节能和碳减排?[J]. 中国人口·资源与环境,2022,32(11):83-95.

[23] 吴建新,郭智勇. 基于连续性动态分布方法的中国碳排放收敛分析[J]. 统计研究,2016,33(1):54-60.

[24] 武汉大学国家发展战略研究院课题组. 中国实施绿色低碳转型和实现碳中和目标的路径选择[J]. 中国软科学,2022,(10):1-12.

[25] 徐伟星,周田,郑雪梅. 数字经济如何赋能产业结构优化升级——基于ICT对三大产业全要素生产率贡献的视角[J]. 中国软科学,2022,(9):27-38.

[26] 张军,吴桂英,张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算:1952-2000[J]. 经济研究,2004,(10):35-44.

[27] 张希良,黄晓丹,张达等. 碳中和目标下的能源经济转型路径与政策研究[J]. 管理世界,2022,38(1):

35-66.

- [28] 赵楠,王辛睿,朱文娟. 中国省际能源利用效率收敛性研究[J]. 统计研究, 2015, 32(3): 29-35.
- [29] De Chaisemartin, C, and X. D' Haultfoeuille. Two-Way Fixed Effects Estimators with Heterogeneous Treatment Effects[J]. *American Economic Review*, 2020, 110(9): 2964-2996.
- [30] Freire-González, J. and I. Puig-Ventosa. Energy Efficiency Policies and the Jevons Paradox[J]. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 2015, 5(1): 69-79.
- [31] Gardner, J. Two-Stage Differences in Differences[R]. NBER Working Paper, 2021.
- [32] Goodman-Bacon A. Difference-in-differences with Variation in Treatment Timing[J]. *Journal of Econometrics*, 2021, 225(2): 254-277.
- [33] Guo, Q. B., Y. Wang, and X. B. Dong. Effects of Smart City Construction on Energy Saving and CO2 Emission Reduction: Evidence from China[J]. *Applied Energy*, 2022, 313: 118879.
- [34] Li, P., Y. Lu, and J. Wang. Does Flattening Government Improve Economic Performance? Evidence from China[J]. *Journal of Development Economics*, 2016, 123: 18-37.
- [35] Sadorsky, P. Information Communication Technology and Electricity Consumption in Emerging Economies [J]. *Energy Policy*, 2012, 48: 130-136.
- [36] Shahbaz, M., J. D. Wang, and K. Y. Dong, et al. The Impact of Digital Economy on Energy Transition across the Globe: The Mediating Role of Government Governance[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 166 (14): 112620.
- [37] Shi, J. L., C. Li, and H. J. Li. Energy Consumption in China's ICT Sectors: From the Embodied Energy Perspective[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 160(8): 112313.
- [38] Su, T., Y. F. Chen, and B. Q. Lin. Uncovering the Role of Renewable Energy Innovation in China's Low Carbon Transition: Evidence from Total-Factor Carbon Productivity[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023, 101: 107128.
- [39] Su, Y. F. and G. H. Xu. Low-carbon Transformation of Natural Resource Industry in China: Determinants and Policy Implications to Achieve COP26 Targets[J]. *Resources Policy*, 2022, 79: 103082.
- [40] Xue, Y., C. Tang, H. T. Wu, et al. The Emerging Driving Force of Energy Consumption in China: Does Digital Economy Development Matter?[J]. *Energy Policy*, 2022, 165: 112997.
- [41] Yi, M., Y. F. Liu, and S. M. Selena, et al. Effects of Digital Economy on Carbon Emission Reduction: New Evidence from China[J]. *Energy Policy*, 2022, 171: 113271.
- [42] Zhan, N. and Y. Choi. A Note on the Evolution of Directional Distance Function and Its Development in Energy and Environmental Studies 1997-2013[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 33: 50-59.
- [43] Zhang, N., F. Kong, and Y. Choi, et al. The Effect of Size-Control Policy on Unified Energy and Carbon Efficiency for Chinese Fossil Fuel Power Plants[J]. *Energy Policy*, 2014, 70: 193-200.
- [44] Zhang, W., X. M. Liu, D. Wang, et al. Digital Economy and Carbon Emission Performance: Evidence at China's City Level[J]. *Energy Policy*, 2022, 165: 112927.

Can Internet Infrastructure Construction Accelerate Energy Low-Carbon Transformation? Empirical Evidence from the "Broadband China" Strategy

Huang Xin

(School of Economics, Zhejiang University of Finance & Economics)

Abstract: With digitization and intelligence gradually becoming the new engine of economic transformation and upgrading, using the Internet as a carrier to drive structural changes in the energy market has become the main direction of promoting clean, low-carbon, safe and efficient use of energy under the goal of "double carbon". This paper selects the panel data of 275 prefecture-level cities across the country in 2006—2019 and analyzes around the overall effect, mechanism and effective boundary of Internet infrastructure construction on energy low-carbon transformation. The research found the "Broadband China" demonstration city pilot significantly improved urban comprehensiveness. Energy carbon emission efficiency and net energy carbon emission efficiency are improved, that is, Internet infrastructure construction can accelerate energy low-carbon transformation. "Broadband China" demonstration city pilots release green innovation-driven effects, industrial structure optimization effects, and fintech empowerment effects promote low-carbon energy transformation, but the effect of energy market integration is limited by the prevalence of administrative monopoly in the energy industry and local protectionism. The role of "Broadband China" pilot cities in promoting energy low-carbon transformation is mainly concentrated in the midwest areas and large-scale economic development cities, and the dividend effect of internet infrastructure construction depends to a certain extent on the construction of perfect traditional transportation infrastructure. This study provides policy inspiration for the realization of "digital-energy" coupling and coordinated development, with a view to accelerating energy low-carbonization Transformation provides a scientific basis.

Keywords: Energy; Low-Carbon Transformation; Internet Infrastructure; "Broadband China" Strategy; "Double Carbon" Goal

JEL Classification: Q42, Q48

(责任编辑:朱静静)