数字经济对城市能源消费结构转型的影响*

——基于能源禀赋异质性与空间溢出效应检验

毛丰付　　侯玉巧　　高雨晨

提要：城市能源消费结构转型是应对气候变化、构建清洁低碳的现代城市能源体系的关键，数字经济则为结构转型提供了动力。本文基于中国城市面板数据，系统考察了数字经济对城市能源消费结构转型的影响及作用机制，探究了不同能源禀赋城市的异质性及空间溢出效应。结果表明，数字经济促进了城市能源消费结构转型，并且在低化石能源禀赋城市中促进作用会更加明显；数字经济不仅能够显著促进本地区城市能源消费结构转型，且对周边城市产生正向溢出效应。机制分析结果显示，产业转型升级、公众行为驱动是数字经济促进城市能源消费结构转型的主要路径，而绿色金融深化机制路径尚待畅通。

关键词：数字经济；城市能源消费结构转型；能源禀赋；溢出效应

DOI:10.16235/j.cnki.33-1005/c.2024.06.014

引　言

国家“十四五”规划强调，“要积极稳妥推进碳达峰碳中和，推动能源革命，控制化石能源总量，建设清洁低碳安全高效的能源体系”。能源消费结构转型既是能源高质量发展的内在要求，也是实现中国经济绿色增长的关键路径。城市是国家经济增长的引擎和能源消耗的重心，其能源转型进程对实现绿色发展尤为重要。① 随着城市化进程的加速，能源需求持续攀升，但我国煤炭消费至今仍占绝对主导地位，能源消费结构呈现出煤、油、气和非化石能源“一大三小”的格局。② 据统计，2023 年中国能源消费总量达到 57.2 亿吨标准煤，其中，化石能源占比高达 73.6%，而清洁能源比例仅为 26.4%。高比例的化石能源依赖无疑为实现碳中和目标带来了严峻的挑战。因此，如何促使当前的能源消费模式向清洁、低碳的新型

* 本文系国家社会科学基金重大项目“中国城镇化阶段性特征测度及驱动效应评估研究”(20&ZD133)，浙江省自然科学基金重点项目“数字化转型视角下城市经济韧性研究：浙江经验”(LZ24G030001)、浙江省社科规划专项课题“浙江打造数字产业集群的优化机制与推进路径研究”(23YJZX20YB)、浙江工商大学“数字＋”学科建设项目“中国数字基础设施现代化研究”(SJZ2022C002)阶段性成果。

① 赵晓丽、张钰琛、杨曦：《中国城市能源转型的特征及影响因素分析——基于中国 131 个城市的经验证据》，《技术经济》2022 年第 4 期。

② 邹才能、陈艳鹏、熊波、刘翰林：《碳中和目标下中国新能源使命》，《中国科学院院刊》2023 年第 1 期。

中国知网　https://www.cnki.net

能源转变成为迫切需要解决的现实问题。

政策驱动被视为促进能源结构优化的关键策略之一，用能权政策和市场激励型环境规制被证实能够加速能源消费结构转型进程。[①] 但单纯依赖政策调控在某些情境下难以达到预期效果，尤其对于高度依赖煤炭资源的地区，环境目标约束反而可能导致“绿色悖论”，阻碍能源消费低碳转型的步伐。[②] 在此背景下，数字经济的兴起为能源消费结构转型提供了机遇。它正深度融入社会生产和生活的方方面面，为重塑能源消费格局开辟了新路径。回顾已有文献，早期研究着重于探索数字经济对能源消费强度、效率和规模的影响。[③] 随着应对气候变化的紧迫性日益凸显，近几年，学术界开始重点关注数字经济影响能源消费结构转型。例如，Shahbaz等将全球72个国家作为研究样本，指出数字经济能通过提升政府治理能力促进能源消费结构转型。[④] Xue等基于2011－2018年中国30个省域的面板数据，发现数字经济发展优化了能源消费结构。[⑤] 张宝凤和蔡林美则发现数字经济对中国能源消费结构转型的积极作用存在异质性，认为东部地区、低碳试点地区更容易从数字经济中获益。[⑥]

尽管现有研究揭示了数字经济的积极作用，但大多聚焦于国家或省级层面，忽略了在城市尺度上的差异化特征，这可能造成政策设计的偏差，导致资源错配。城市作为能源消费的核心主体，其能源禀赋、产业结构和技术创新能力存在明显的地域性差异。特别是化石能源较为丰沛的城市往往创新效率较低，技术锁定效应更为明显，更容易形成对能源的“路径依赖”。[⑦] 这意味着，不同城市在能源消费结构转型路径的选择及配套政策的设计上应有所区别。因此，有必要从城市层面重新审视数字经济对能源消费结构转型的影响，为不同类型城市的政策实施提供有力的决策依据。

为此，本文聚焦能源禀赋的空间差异特征，从城市层面实证检验数字经济对能源消费结构转型的影响及作用机制，考察不同类型城市的异质性效果及空间溢出效应。本文的边际贡献主要体现在以下几个方面：一是将研究尺度从国家或者省域层面拓展到市级层面；二是采用空间计量模型实证检验数字经济对城市能源消费结构转型的空间溢出效应；三是在政策建议方面，针对不同能源禀赋类型城市提出差异化发展路径。

一、理论与假说

（一）数字经济对城市能源消费结构转型的直接影响

数字经济作为新兴的经济发展形态，对城市能源消费结构转型产生了深刻影响，主要体现在信息化和智能化的推广、智能电网技术的应用、共享经济和数字商业模式的兴起等方面。首先，信息化与智能化引领清洁能源需求增长。在交通领域，新能源汽车与智能交通系统的推广极大减少了对化石燃料的依赖，加速了电力消费的扩张。[⑧] 在工业生产方面，自动化与机器人技术的采用削减了传统高能耗设备的

① 鲁贺玉、吴宗法：《用能权政策与能源消费结构低碳化转型的关系》，《资源科学》2023年第6期。许文立、孙磊：《市场激励型环境规制与能源消费结构转型——来自中国碳排放权交易试点的经验证据》，《数量经济技术经济研究》2023年第7期。

② 方文君、邓峰、张战仁、朱雪丽：《环境目标约束对能源结构低碳转型的影响》，《中国人口·资源与环境》2024年第1期。

③ 张三峰、魏下海：《信息与通信技术是否降低了企业能源消耗——来自中国制造业企业调查数据的证据》，《中国工业经济》2019年第2期；方冬莉：《数字经济对中国城市能源利用效率的影响——基于技术赋能和技术外溢视角》，《资源科学》2023年第2期；王香艳、李金叶：《数字经济是否有效促进了节能和碳减排?》，《中国人口·资源与环境》2022年第11期。

④ M. Shahbaz, J. Wang, K. Dong, J. Zhao, “The Impact of Digital Economy on Energy Transition across the Globe: The Mediating Role of Government Governance,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 166, 2022, No. 112620.

⑤ Y. Xue, C. Tang, H. Wu, Y. Hao, “The Emerging Driving Force of Energy Consumption in China: Does Digital Economy Development Matter?” *Energy Policy*, Vol. 165, 2022, No. 112997.

⑥ 张宝凤、蔡林美：《数字经济是否影响能源结构转型?》，《中国矿业大学学报》（社会科学版）2024年第1期。

⑦ 李虹、邹庆：《环境规制、资源禀赋与城市产业转型研究——基于资源型城市与非资源型城市的对比分析》，《经济研究》2018年第11期。

⑧ 顾佰和、于东晖、王琛、王毅：《进一步深化碳达峰、碳中和战略转型路径的若干思考》，《中国科学院院刊》2024年第4期。

中国知网 https://www.cnki.net

使用，转向更清洁、高效的电力解决方案，[①]3D打印等新兴数字技术则优化了生产工艺，助力低碳制造的实现。其次，智能电网与分布式能源系统重塑能源格局。数字技术的创新应用催生了可再生能源与智能电网、分布式能源系统的快速发展，提高了可再生能源在城市能源消费中的比重。通过实时监控与数据分析，智能电网能够更好地整合分布式的可再生能源系统，使风能、太阳能等更好地融入城市能源网络，城市中电力的应用得到保障。[②] 例如，光伏板与风力发电机产生的电力可以通过智能网络被即时调配，满足用户需求，同时过剩的电力可以被储存或售回给电网。最后，共享经济与数字化商业模式推动能源消费方式变革。共享经济方面，借助互联网平台优化资源配置，尤其在出行领域，通过拼车、顺风车、共享单车及共享电动车等服务，有力推动了城市交通向更高效、环保的数字出行模式转变。数字化商业模式方面，线上教育和远程办公的发展减少了人们实体出行的需求，降低了城市居民对私家车和公共交通的依赖，从而减少了汽油和柴油的消耗。同时，物联网技术的广泛应用极大提升了物流和配送服务的效率，减少了运输行业对化石燃料的依赖。综上所述，本文提出研究假设：

H1：数字经济有助于促进城市能源消费结构转型。

（二）数字经济对城市能源消费结构转型的影响机制

能源消费结构转型需要多方着力，结合现有理论和研究，本文认为数字经济可能从产业转型升级、公众行为驱动和绿色金融深化三条路径推动城市能源消费结构转型。

产业结构决定产业能源消费结构，产业转型升级与能源消费结构优化相互依存，共同驱动社会经济各领域的碳排放效率提升。[③] 产业转型升级是传统产业逐渐被新兴产业带动和取代的过程，意味着产业逐渐向清洁、高效方向发展[④]，从而降低了能源密集型产业的比重，推动能源消费向清洁能源方向转型。数字经济促进了信息技术的普及和应用，有助于产业结构的优化和高级化。[⑤] 一方面，数字技术促使能源密集型产业向技术密集型产业转变，从而减少了对传统能源的依赖；数字经济引入了人工智能、物联网、大数据等技术，促使传统产业向高附加值、低能耗的方向转型升级，从而减少化石能源的消耗。[⑥] 另一方面，数字经济推动新兴产业崛起，为城市能源消费结构的多元化提供了新的可能性。共享经济、电子商务、在线教育等新兴服务业的发展减少了传统行业中实体设施和交通运输的能耗。例如，数字经济使远程工作和虚拟会议成为可能，减少了通勤和商务旅行的需求，从而减少了交通运输中的化石燃料使用。综上，本文提出假设：

H2a：数字经济通过推动产业转型升级促进城市能源消费结构转型。

公众环保意识增强能够驱动消费行为的自我调整，增加对生态友好型产品的消费。[⑦] 数字技术的普及和应用成为推动公众积极参与环保活动、促进绿色消费行为的重要力量。数字经济通过公众行为驱动能源消费结构转型，主要体现在以下三个方面：一是推动绿色消费选择。数字平台（包括社交媒体、在线课程和新闻网站等）使公众更容易加深对气候变化、资源节约和环境保护重要性的理解，从而自觉选择高效、环保、低碳的产品和服务。例如，通过互联网平台，公众选择共享交通（顺风车等），电动汽车的数量越来越多。二是加强公众参与和监督。数字技术使公众能够更好地监督企业和政府的环保行为。[⑧] 社交媒体、在线投票和签名活动让公众有机会直接参与环境议题的讨论，对污染企业施加舆论压力，促使其改

① F. F. Mao, Y. Q. Hou, R. Wang, Z. S. Wang, "Can Industrial Intelligence Break the Carbon Curse of Natural Resources in the Context of Post-Covid-19 Period? Fresh Evidence from China," *Resources Policy*, Vol. 86, 2023, pp. 104225.

② 史丹、王蕾：《能源革命及其对经济发展的作用》，《产业经济研究》2015年第1期。

③ 张伟、朱启贵、高辉：《产业结构升级、能源结构优化与产业体系低碳化发展》，《经济研究》2016年第12期。

④ 陆铭、冯皓：《集聚与减排：城市规模差距影响工业污染强度的经验研究》，《世界经济》2014年第7期。

⑤ 许宪春、任雪、常子豪：《大数据与绿色发展》，《中国工业经济》2019年第4期。

⑥ 樊轶侠、王正早：《数字技术赋能低碳消费：理论机制与推进方略》，《改革》2024年第3期。

⑦ 刘兴华、袁琦璟：《公众环境关注度促进了绿色金融发展吗？——来自中国284个城市的经验证据》，《审计与经济研究》2024年第1期。

⑧ 唐啸、周绍杰、赵鑫蕊、王宇飞：《回应性外溢与央地关系：基于中国民众环境满意度的实证研究》，《管理世界》2020年第6期。

中国知网 https://www.cnki.net

变生产方式并加强环境保护。三是促进政策制定和实施。通过在线平台收集民意，政府可以确保政策更符合实际需求和公众的意愿，提高政策制定和实施的效率。总之，数字经济通过驱动公众低碳行为驱动能源消费结构的转型。综上，本文提出假设：

H2b：数字经济通过驱动公众低碳行为促进城市能源消费结构转型。

绿色金融的核心目标在于优化资本配置结构，限制污染性产业扩张，推动环境更为友好的经济增长。[①] 绿色金融在金融业和环保产业之间发挥着“桥梁”作用，为新兴产业、节能产业以及清洁能源产业的发展提供了多样化的融资途径，有助于清洁能源增长。数字经济的崛起，为绿色金融的深化注入了新的动力。[②] 数字技术的应用使绿色金融产品和服务的创新成为可能，通过提供更多透明度和数据支持，提高了金融服务的可及性和效率。例如，借助区块链、大数据和人工智能等技术，绿色金融产品如碳信用质押贷款、碳排放权交易等变得更加高效和透明，[③]从而吸引更多的资本投向绿色和低碳项目。不仅如此，数字经济强化了绿色金融的监管和评估机制。利用大数据分析，可以更准确地评价绿色投资项目的环境效益和经济回报，为投资者和决策者提供科学的决策依据。同时，人工智能技术在监测和报告项目执行过程中的环境影响方面，提供了高效的工具，确保了绿色金融项目的透明性和可靠性。[④] 综上，本文提出假设：

H2c：数字经济通过促进绿色金融深化助力城市能源消费结构转型。

二、研究设计

（一）模型设定

1. 基准回归模型

为避免个体不随时间变化的特征变量遗漏以及时间趋势对因变量产生影响，本文尝试建立双向固定效应模型。同时，Hausman检验、F检验结果也表明应采用双向固定效应方法进行回归。模型结构如下所示：

$$ecst_{i,t}=\alpha_0+\alpha_1 digi_{i,t}+\alpha_2 X_{i,t}+\mu_i+\nu_t+\varepsilon_{i,t} \tag{1}$$

其中，$ecst_{i,t}$表示i城市在t时期的城市能源消费结构转型，$digi_{i,t}$表示i城市在t时期的数字经济水平，其系数反映数字经济对城市能源消费结构转型的影响效应。$X_{i,t}$代表一系列控制变量，μ_i和ν_t分别代表城市和时间固定效应，$\varepsilon_{i,t}$代表随机扰动项。

2. 空间计量模型

考虑到各城市的数字经济与城市能源消费结构转型都可能存在空间相关特征，故本文进一步引入空间计量方法。在现实情境下，能源消费结构转型不仅由本地因素决定，更受到周边城市的影响。因此，本文选用空间杜宾模型（SDM）进行分析，构建如下空间计量模型：

$$ecst_{i,t}=\beta_0+\rho W ecst_{i,t}+\beta_1 digi_{i,t}+\beta_2 W digi_{i,t}+\beta_3 W X_{i,t}+\mu_i+\nu_t+\varepsilon_{i,t} \tag{2}$$

式（2）中，ρ表示空间自回归系数，W表示空间权重矩阵，其他变量含义同式（1）。

（二）变量选取

1. 被解释变量

① 刘金科、刘霁萱、晁颖：《绿色信贷与低碳转型：资本整合还是技术创新？——来自准自然实验的证据》，《数量经济技术经济研究》2024年第1期。

② 毛丰付、郑好青、王海：《数字基础设施与企业技术创新——来自地方政府政策文本的新证据》，《浙江学刊》2022年第6期。

③ 王修华、刘锦华、赵亚雄：《绿色金融改革创新试验区的成效测度》，《数量经济技术经济研究》2021年第10期。

④ 崔惠玉、王宝珠、徐颖：《绿色金融创新、金融资源配置与企业污染减排》，《中国工业经济》2023年第10期。

中国知网　https://www.cnki.net

城市能源消费结构转型(*ecst*)。目前学者们多从省级层面测度能源消费结构转型,从已有研究来看,一般有以下几种思路:一是采用清洁能源占能源消费总量或化石能源消费量比重来表征能源消费结构转型。[①] 二是构建能源消费结构指数,如构建能源消费结构双重替代指数,即油气替代煤炭和非化石能源替代指数。三是构建能源消费结构综合指标体系,如构建低碳经济范式下的能源消费结构优化程度指标体系,或选取社会经济效益、能源规划效益和环境效益三个准则层,构建能源结构低碳评价指标体系。

综合指标体系虽然可以全面反映能源消费结构转型,但也有冗余信息过多的缺点,指标选取的主观性较强,难以精确表达能源消费结构。由于天然气和电力被认为是清洁能源的代表,提高天然气和电力的比例被认为是能源消费结构转型的正确方向。因此,本文参考王许亮和王恕立的做法,利用天然气与电力消费量之和占能源消费总量的比值作为城市能源消费结构转型的代理变量。[②] 由于我国各地级市并未公布其能源消费总量,考虑到数据可得性,本文借鉴史丹和李少林的做法,[③]利用夜间灯光数据将省级能源消费总量数据分配到各地级市。首先,从《中国能源统计年鉴》中得到省级能源消费量数据,为方便计算,利用标准煤折算系数将各种类型能源消费量的单位统一换算为吨标准煤;其次,采用夜间灯光数据将各省的能源消耗量分解到各地级市,这样做的原因在于,城市夜间灯光的亮度越高,意味着经济发展水平越高,相应的能源消费量也越多。另外,地级市天然气消费量直接从《中国城市建设统计年鉴》获取,电力消费量采用地级市全社会用电量统计数据衡量,来源于《中国城市统计年鉴》、地级市统计年鉴及统计公报。

2.核心解释变量

数字经济发展指数(*digi*)。有关数字经济水平测度的文献比较丰富,但由于不同研究者和机构对数字经济的基本概念理解不一,评估指标和方法存在较大差异。本文在借鉴现有成果的基础上,结合数据的可得性、科学性与真实性,最终从数字基础设施、数字产业化、产业数字化及数字发展环境四个维度构建城市数字经济水平指标体系(见表1)。测算方法主要借鉴岳利萍和杨欣怡的做法,[④]将准则层指标进行标准化处理后采用主成分分析法进行降维处理,最终得到数字经济发展指数。

表1　城市数字经济发展指标体系

准则层	指标层	指标说明
数字基础设施	移动互联网基础	移动电话年末用户数/万户
	宽带互联网基础	每百人互联网宽带用户/户
数字产业化	电信产业产出	电信业务总量/万元
	信息产业基础	信息传输、计算机服务和软件业从业人员数/万人
	数字融合发展	电子商务专利授权数/件
产业数字化	覆盖广度	数字普惠金融覆盖广度指数
	使用深度	数字普惠金融使用深度指数
	数字化程度	数字普惠金融数字化程度指数
	数字高新技术渗透	上市公司高新技术认定次数/次
数字发展环境	政策环境	政策文件中数字经济政策相关词语出现频数
	研发环境	科学支出/万元

① S. Hou, K. Yu, R. Fei, "How Does Environmental Regulation Affect Carbon Productivity? The Role of Green Technology Progress and Pollution Transfer," *Journal of Environmental Management*, Vol. 345, 2023, No. 118587. G. Fang, G. Chen, K. Yang, W. Yin, L. Tian, "Can Green Tax Policy Promote China's Energy Transformation? ——A Nonlinear Analysis from Production and Consumption Perspectives," *Energy*, Vol. 269, 2023, No. 126818.

② 王许亮、王恕立:《服务业能源生产率变迁及收敛性分析——基于全球40个经济体细分行业数据的经验研究》,《数量经济技术经济研究》2018年第1期。

③ 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》,《中国工业经济》2020年第9期。

④ 岳利萍、杨欣怡:《双重环境目标约束下的产业转型升级:"减污降碳"何以"协同增效"》,《中国人口·资源与环境》2024年第1期。

中国知网 https://www.cnki.net

3.控制变量

本文选取的控制变量主要包含影响城市能源消费结构转型的因素，主要包括：(1)经济发展水平(*grpc*)，在经济初期阶段，可能更依赖于传统能源，如煤炭，但随着经济发展，能源消费结构往往会从单一能源向多能源体系转变，用人均地区生产总值衡量；(2)工业结构(*siva*)，重工业和制造业通常消耗大量的传统能源，如煤炭和石油，用工业产值占比表征工业结构特征；(3)城镇化水平(*urra*)，城市和农村地区居民能耗种类和数量存在巨大的异质性，采用城镇人口占地区总人口比重，即城镇化水平，控制居民能耗差异性；(4)政府环保干预(*ewfs*)，政府环保干预体现了地方环境战略实施的积极性，能够推动能源消费从依赖化石燃料向更多使用可再生能源转变，一般情况下，如果地方政府的环保注意力越强，政府工作报告中环境词频越高，本文采用地方政府工作报告中与“环保”一词相关词汇出现的词频作为政府环保干预的代理变量。(5)对外贸易，由于技术溢出效应、规模经济和管理经验的传播，对外开放会影响能源需求结构，本文使用地级市外商直接投资额作为对外贸易的代理变量。

(三)样本选择与数据说明

本文选取2011—2021年中国280个地级市的面板数据，并对样本期间行政区划有变动的城市或者数据缺失严重的城市进行筛选排除，包括铜仁市、三沙市、儋州市、毕节市、中卫市、普洱市、海东市、莱芜市、巢湖市、哈密市等。其他少数城市部分缺失值采用插值法补齐。其中，数字经济水平指标中的数字普惠金融指数来自北京大学数字金融研究中心与蚂蚁金服集团合作计算的数字普惠金融指数，[①]电子商务专利授权数来自企研数据库，[②]上市公司高新技术认定次数来源于CNRDS中国研究数据服务平台；夜间灯光数据来源于NOAA网站NGDC数据中心；[③]城市能源消费结构转型指标相关数据主要来自《中国能源统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》。其余数据均来自《中国城市统计年鉴》、地级市统计年鉴以及国民经济与社会统计发展公报。

表2　变量描述性统计

变量名	变量	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
数字经济发展指数	*digi*	3080	-0.01934	1.3492	-2.3992	4.6122
城市能源消费结构转型	*ecst*	3080	0.1448	0.1058	0.0026	0.7562
经济发展水平	*grpc*	3080	5.4811	3.4081	0.6457	46.7749
工业结构	*siva*	3080	0.4536	0.1074	0.1170	0.8205
城镇化水平	*urra*	3080	0.5608	0.1457	0.2512	0.9486
政府环保干预	*ewfs*	3080	44.8068	19.0176	1	139
对外贸易	*tifa*	3080	22.9389	26.3383	0.0488	331.1756

三、结果与讨论

(一)数字经济对城市能源消费结构转型的影响

表3报告了数字经济对城市能源消费结构转型的基准回归结果。其中，列(1)是仅考虑数字经济这一单变量的回归结果，列(3)是增加了控制变量的回归结果，列(2)和列(4)分别在列(1)和列(3)的基础上控制了城市和年度固定效应。可以发现数字经济的回归系数均为正且通过显著性检验，表明数字经济对城市能源消费结构转型具有显著积极影响，即假设1成立。本文对此估计结果给出的解释是：数字技术

① https://idf.pku.edu.cn/yjcg/zsbg/513800.htm。
② https://r.qiyandata.com/data。
③ https://www.ngdc.noaa.gov/eog/download.html。

中国知网　https://www.cnki.net

支持了更广泛的清洁能源整合，使得太阳能、风能等可再生能源可以更有效地融入城市的能源系统中。这不仅提升了这些能源的生成效率，也通过智能电网技术实现了供需的动态平衡，从而减少对传统化石能源的依赖。

表 3　基准回归结果

	(1)	(2)	(3)	(4)
digi	0.0461***	0.0237***	0.0337***	0.0195***
	(0.0015)	(0.0067)	(0.0029)	(0.0075)
常数项	0.1457***	0.1308***	0.0871***	0.0979***
	(0.0040)	(0.0139)	(0.0232)	(0.0331)
控制变量	否	否	是	是
城市固定效应	否	是	否	是
时间固定效应	否	是	否	是
观测值	3080	3080	3080	3080
R^2	0.5271	0.6363	0.5281	0.6383
样本数	280	280	280	280

注：*、** 和*** 分别表示显著性水平为 10%、5%和 1%，下表同。

（二）稳健性检验

1. 控制内生性问题

影响城市能源消费结构转型的因素较多，可能存在遗漏变量问题。遗漏变量的存在会导致模型估计出现偏差，进而影响到研究结论的准确性。为了应对这一内生性问题，本文采取工具变量法作为一种解决方案。具体选取政府工作报告中与数字经济相关的关键词的词频占比作为数字经济发展的工具变量。具体来看，首先下载 2011—2021 年地级市的政府工作报告，将报告文本整理为面板数据；然后参考陶长琪和丁煜(2022)的做法，[①]将数字经济相关词频确定为智能（人工智能、智能制造等）、智慧（智慧城市、智慧医疗等）、大数据、云计算、5G、物联网、区块链、上云、云平台、云服务、数据共享、数据安全、数据服务、数字人民币、数字经济、工业互联网、数字化、机器人、数字技术等；最后借助 Python 程序来解析政府工作报告，通过自动化的词频统计结合人工审查，最终确定数字经济相关词频数量。该指标能够反映政策文件中数字经济的优先级和相关政策导向，与数字经济的发展程度存在相关性。而且其在本质上仅代表政策对数字经济的关注度，无法直接关联城市能源结构转型，因而满足工具变量的排他性要求。

工具变量法检验。首先，弱工具变量结果显示，工具变量与内生解释变量相 Cragg-Donald 检验的 F 值为 124.09，大于 Stock-Yogo 弱工具变量 10%偏误水平下的阈值 16.38，可见工具变量的选取是合适的，不存在弱工具变量问题。其次，进行外生性检验，结果显示 Hansen 统计量的 p 值大于 0.10，这表明工具变量满足外生性的条件。弱工具变量和外生性检验均通过，工具变量是恰当且有效的。由表 4 可知，在考虑了内生性问题后，数字经济对城市能源消费结构转型的影响仍为正向促进作用。

表 4　工具变量法回归结果

	第一阶段回归	第二阶段回归
	digi	*ect*
IV	77.7355***	
	(6.9794)	
digi		0.0234**
		(0.0114)
控制变量	是	是
城市固定效应	是	是
时间固定效应	是	是
观测值	3074	3074
R^2	0.9644	0.6363

① 陶长琪、丁煜：《数字经济政策如何影响制造业企业创新——基于适宜性供给的视角》，《当代财经》2022 年第 3 期。

中国知网 https://www.cnki.net

2.替换解释变量

参考赵涛等的做法，[①]本文改变数字经济的衡量方式，从互联网发展和数字普惠金融两方面构建数字经济指标体系，即选取信息产业从业情况（计算机服务和软件业从业人员占城镇单位从业人员比重）、互联网普及率（百人中互联网宽带接入用户数）、移动电话普及率（每百人移动电话用户数）和互联网相关产出情况（人均电信业务总量）来衡量互联网发展；选取中国数字普惠金融指数来衡量数字普惠金融发展。利用主成分分析法得到五个指标的权重并进行加权汇总，进而得到数字经济发展水平。从表5列（1）可以看到，改变数字经济的测度指标后，显著性稍有变化，但核心解释变量系数符号保持一致，说明基准回归结果是稳健的。

3.子样本回归

考虑到地处行政中心的城市在全国范围内具有政治、经济及资源等优势，其数字经济发展水平往往更高，可能在清洁能源使用和消费模式创新等方面具有显著优势，这些因素可能使这些城市在能源消费结构优化上显示出更加显著的成效。例如，高度数字化的城市通常拥有更完善的智能电网、更广泛的电动车辆使用以及更有效的能源管理系统，这些因素都直接影响能源的消费方式。因此，这些城市的数据可能掩盖了数字经济对于其他类型城市能源消费结构转型的真实影响。为此，我们根据城市分类标准，剔除直辖市、副省级市，再对剩余样本进行回归估计，回归结果见表5列（2）。结果显示，各个解释变量的系数，其正负性和显著性与前文的相关估计结果较为统一，从而验证了前文的相关结论具有较好的稳健性。

4.缩短样本时间跨度

为识别数字经济对城市能源消费结构转型的影响是否会随着样本时间长短的变化而变化，本文通过改变回归时间区间进行稳健性检验。2015年，中国政府推出了“互联网＋”行动计划，旨在通过深化互联网与各行业的融合，推动经济结构的转型升级。这一政策标志着数字经济在国家发展战略中的重要地位显著提升，对传统行业，包括能源消费模式，产生了深远的影响。把面板的时间跨度改为2015—2021年重新进行回归，回归结果见表5列（3）。数字经济对城市能源消费结构转型的回归系数在1%的水平上显著为正，说明本文的回归结果具有稳健性。

表5　稳健性检验结果

	替换解释变量	子样本回归	缩短样本时间跨度
	（1）	（2）	（3）
digi	0.5808**	0.0203***	0.0194***
	（0.2837）	（0.0072）	（0.0066）
常数项	-0.3170*	0.0997***	0.1141**
	（0.1874）	（0.0346）	（0.0550）
控制变量	是	是	是
城市固定效应	是	是	是
时间固定效应	是	是	是
观测值	3080	2871	1960
R^2	0.6352	0.6417	0.5621

（三）作用机制分析

如何高效利用数字经济的优势，实现城市能源消费结构转型是当前阶段重点关注的问题。前文揭示了数字经济对城市能源消费结构的影响，理论分析指出数字经济通过促进产业结构升级、绿色金融深化和公众行为驱动三个方面促进城市能源消费结构转型。那么，数字经济对城市能源消费结构转型的影响机制是否成立呢？本文对此展开具体论证，参考江艇提出的机制检验方法，[②]将实证检验的重点放在数字经济是否可以作用于产业结构升级、绿色金融深化和公众行为驱动上。

① 赵涛、张智、梁上坤：《数字经济、创业活跃度与高质量发展——来自中国城市的经验证据》，《管理世界》2020年第10期。
② 江艇：《因果推断经验研究中的中介效应与调节效应》，《中国工业经济》2022年第5期。

中国知网　https://www.cnki.net

1.产业转型升级渠道

产业转型升级减少了高耗能行业的比重，直接推动能源消费结构向更加清洁、高效的方向发展。现有文献也普遍认为产业转型升级会促进城市能源结构转型。[①] 若数字经济有助于促进产业转型升级，也可以侧面说明产业转型升级是数字经济促进城市能源结构转型的重要影响机制。为此，本文参考喻开志等的做法，[②]产业结构升级测度指标选取第三产业产值与第一产业和第二产业产值的总和之比。表6中列(1)展示了数字经济对产业转型升级影响的回归结果，结果显示数字经济对产业转型升级的影响显著为正，说明数字经济能够促进产业转型升级。数字经济通过促进信息技术的创新与融合，加速了产业结构向高端化、低碳化转型。这一转型显著提升了高技术产业和低碳行业的比重，有效降低了传统能源密集型行业的能源需求，从而推动城市能源消费结构向更加清洁、高效的方向演进。数字经济对产业结构的升级效应是促进城市能源消费结构转型的重要成因，本质上仍是信息技术的广泛应用对经济效率和环境可持续性产生的帕累托改进。

2.公众行为驱动渠道

前文理论分析认为，数字经济通过促进绿色消费行为、加大公众参与，驱动公众低碳行为，从而促进城市能源消费结构转型。为了验证公众行为驱动渠道，本文借鉴吴力波等，[③]采用百度雾霾指数刻画公众环境关注度。互联网搜索数据能够及时捕捉市场主体对特定事件的关注度，反映其偏好与行为意图。与“环境污染”等关键词相比，雾霾具有更高的环境感知度，公众可通过空气能见度直接感知雾霾的严重程度，“雾霾”更容易吸引公众的关注。因此，网民对雾霾的关注度在很大程度上代表了公众对整体环境的关注，本文选取PC端和移动端搜索之和的百度指数作为公众行为驱动的代理变量。表6中列(2)展示了数字经济影响公众行为驱动的中介检验结果，digi的系数在5%的水平上显著为正，说明数字经济通过公众行为驱动从而提升了城市能源消费结构转型。数字经济加深了公众对环保问题的认识和关注。随着环保信息的广泛传播，公众环保意识的提升促进了对环境友好型能源消费政策的广泛支持，进而影响了能源消费行为和政策制定，加速了能源消费结构的绿色转型。

表6　机制检验结果

	产业结构升级	公众行为驱动	绿色金融深化
	(1)	(2)	(3)
digi	0.0598**	15.0479**	0.0001
	(0.0272)	(7.3357)	(0.0024)
常数项	1.9604	36.4784**	0.2912
	(0.0870)	(17.6626)	(0.0053)
控制变量	是	是	是
城市固定效应	是	是	是
时间固定效应	是	是	是
观测值	3080	3080	3069
R^2	0.8270	0.4077	0.6451

3.绿色金融深化渠道

绿色金融为金融业和环保产业架起“桥梁”，其兴起与发展将撬动社会资本，为新兴产业的成长和环保、节能、清洁能源等产业的扩张提供了低成本和多元化的融资渠道，进而减少传统化石能源依赖，支撑清洁能源发展，为绿色低碳转型发展注入金融活水。本文进一步研究数字经济能否通过促进绿色金融深化有效推动城市能源消费结构转型。考虑到绿色金融深化涉及诸多范畴，测度较为困难，目前缺乏统一的测度指标。参考李素峰等(2024)，本文使用熵值法测度绿色金融深化指数，从绿色信贷、绿色投资、绿色债券、绿色保险、绿色支持、绿色权益、绿色基金七个方面建立综合指标体系。数字经济对绿色金融深

① 许文立、孙磊：《市场激励型环境规制与能源消费结构转型——来自中国碳排放权交易试点的经验证据》，《数量经济技术经济研究》2023年第7期。

② 喻开志、石瑶、冯佳晗：《数字经济对长江经济带产业结构升级的影响》，《财经科学》2024年第2期。

③ 吴力波、杨眉敏、孙可哲：《公众环境关注度对企业和政府环境治理的影响》，《中国人口·资源与环境》2022年第2期。

中国知网 https://www.cnki.net

化影响的回归结果见表6列(3),依据结果可知,数字经济对绿色金融深化的影响尚不显著。这可能是因为数字经济在金融领域的应用尚处于初级阶段,数字经济与绿色金融融合的潜力未能充分释放,不能有效推动绿色金融的发展,因此,数字经济尚未能通过绿色金融深化渠道促进城市能源消费结构转型。

四、拓展性分析

(一)基于不同能源禀赋的城市异质性分析

考虑到各个城市的能源禀赋差异可能会影响数字经济对城市能源消费结构转型的推动效果,本文进一步将城市样本划分为低化石能源禀赋城市和高化石能源禀赋城市。这一分类依据源于国务院印发的《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020年)》。根据该规划,126个地级行政单位被界定为资源型城市,它们的特点是以本地区矿产等自然资源开采、加工为主导产业,因此通常拥有较为充裕的化石能源储备。在本研究的样本中,涵盖了规划内的113个地级市。

表7列(1)展示了低化石能源禀赋城市中,数字经济对城市能源消费结构转型的影响效果,可以看到,数字经济对城市能源消费结构转型的影响系数为0.0202,且通过了5%的显著性检验。列(2)展示了高化石能源禀赋城市中,数字经济对城市能源消费结构转型的影响效果,影响系数为0.0164,且通过了10%的显著性检验。研究结果说明相对于高化石能源禀赋城市,低化石能源禀赋城市中数字经济对城市能源消费结构转型的促进作用更明显。这可能是因为化石能源禀赋低的城市更倾向于采纳数字经济带来的创新技术,以弥补本地资源的不足,在这种情况下,数字经济不仅提供了一种新的经济增长动力,还促进了能源效率的提升和清洁能源的应用,从而加速了这些城市的能源消费结构转型。相比之下,高化石能源禀赋城市或许由于对传统能源的依赖性较强,导致其对数字经济带来的转型动力感知不那么强烈,进而导致其在能源消费结构转型方面的响应速度相对较慢。

表7　基于城市资源禀赋异质性

	低化石能源	高化石能源
	(1)	(2)
digi	0.0202**	0.0164*
	(0.0088)	(0.0094)
常数项	0.1046**	0.0968*
	(0.0469)	(0.0524)
控制变量	是	是
城市固定效应	是	是
时间固定效应	是	是
观测值	1837	1243
R^2	0.6617	0.6023

(二)空间溢出效应检验

在研究数字经济对城市能源消费结构的影响时,忽略城市之间的空间相关性可能造成估计结果偏误。为了弥补这一缺陷,本文引入空间计量模型检验数字经济对本地和邻近地区空间溢出效应的影响,最终确定选择空间杜宾模型(SDM),并同时控制个体和时间固定效应。

表8展示了数字经济对城市能源消费结构转型的空间溢出效应检验结果,为了确保空间计量结果的稳健性,列(1)—(4)分别基于地理反距离矩阵、地理反距离平方矩阵、经济地理嵌套矩阵以及邻接矩阵进行检验。估计结果显示,在四种空间权重矩阵下,空间自相关系数(ρ)均显著为正,这表明城市能源消费结构转型在地理空间中展现出明显的相互依赖与互动特征。*digi*以及$W*digi$的系数均在1%的检验水平下显著为正,表明数字经济不仅能够显著促进本地区能源消费结构转型,且对周边城市同样存在显著的促进作用。这一结果揭示了数字经济在推动城市能源消费结构转型中的双重角色:既是变革的引擎,也是传播的媒介。它不仅加速了单个城市内部的能源消费结构转型进程,还通过空间溢出效应,将变革力量辐射到周边城市,有助于实现区域协同发展。

中国知网　https://www.cnki.net

表 8　空间杜宾模型回归结果

	地理反距离矩阵	地理反距离平方矩阵	经济地理嵌套矩阵	邻接矩阵
	(1)	(2)	(3)	(4)
ρ	0.3650***	0.1889***	0.2259*	0.0713***
	(0.1214)	(0.0406)	(0.1264)	(0.0255)
$digi$	0.0115***	0.0115***	0.0128***	0.0161***
	(0.0037)	(0.0037)	(0.0037)	(0.0037)
$W*digi$	0.1674***	0.0562***	0.1380***	0.0069***
	(0.0378)	(0.0105)	(0.0267)	(0.0048)
控制变量	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是
直接效应	0.0123***	0.0126***	0.0132***	0.0163***
	(0.0038)	(0.0038)	(0.0038)	(0.0037)
间接效应	0.2728***	0.0707***	0.1821***	0.0083
	(0.0752)	(0.0130)	(0.0395)	(0.0052)
总效应	0.2852***	0.0833***	0.1954***	0.0246***
	(0.0754)	(0.0136)	(0.0396)	(0.0067)
观测值	3080	3080	3080	3080
R^2	0.5295	0.5379	0.5351	0.5333

结　论

数字经济凭借其数字化与网络化特征，为城市能源消费结构转型注入强大动力，这种转型不仅提高了能源利用效率，还加速了能源消费模式的升级，为城市能源系统的可持续发展奠定了基础。本文从理论与实证层面考察了数字经济对城市能源消费结构转型的影响。主要结论如下：(1)作为推动城市发展的新动能，数字经济有效推进了城市能源消费结构转型。此外，采用工具变量法、替换被解释变量和子样本回归等多种稳健性检验手段，证实了研究结果的稳定性和可靠性。(2)影响机制分析显示，数字经济通过促进产业转型升级，驱动公众行为转变，进而推动城市能源消费结构转型，尚不能通过促进绿色金融深化影响城市能源消费结构。(3)基于不同能源禀赋城市的异质性研究显示，相对于高化石能源禀赋城市，低化石能源禀赋城市中数字经济对城市能源消费结构转型的促进作用更明显。(4)空间溢出效应结果表明，数字经济不仅能够推动本地区能源消费结构转型，且对周边城市同样存在显著的促进作用。基于上述结论，本文提出以下政策建议：

第一，促进数字技术与传统能源融合，推动产业多元化与绿色转型。对于高化石能源禀赋城市，其对传统能源的依赖性较强，需着力构建能源消费结构的转型路径。一方面，促进数字技术与传统能源融合，鼓励采用先进的数字化管理平台，提高化石能源的开采、运输和使用的效率，大幅降低资源浪费；推动智能电网建设，运用大数据与人工智能技术优化能源分配，显著削减碳排放量；加强数字技术在提升能效方面的应用，涵盖建筑节能、工业流程优化等领域，以技术创新驱动节能减排。另一方面，推动产业多元化与绿色转型，利用数字经济推动传统产业向低碳化转型，重点扶持新能源、新材料等绿色产业发展；加强

中国知网　https://www.cnki.net

与成功转型的城市进行交流合作，引进绿色技术和经验，实现优势互补；设立专项基金，激励绿色创新项目，通过税收优惠和财政补贴吸引企业加大绿色经济领域的投资；构建碳交易市场，运用市场机制有效调节能源消费结构，推动减排目标的达成，确保绿色发展与经济效益的双赢。

第二，推动数字赋能可再生能源发展，引导能源消费行为绿色化。对于低化石能源禀赋城市，为满足其能源需求，鼓励大力发展可再生能源，如太阳能、风能、水能等，构建清洁、低碳的能源体系。利用数字技术提升可再生能源的储存与转化效率，解决间歇性和不稳定性问题。充分发挥数字经济的潜力，积极提升数字经济水平，制定有利于数字技术研发和创新的支持政策。此外，还需积极引导公众环保意识，推动能源消费行为绿色化。加强数字平台的环保教育功能，利用数字媒体扩大环保信息传播范围，开展线上环境教育活动，增强公众的环保意识。鼓励公众参与在线环保活动，如碳足迹计算、节能产品推广等，通过政策激励和宣传，提高公众对节能减排的认同感和参与度。

第三，构建区域协同创新体系，释放数字经济空间溢出潜力。数字经济具有要素流动快、共享性强等特征，构建区域协同创新网络是激发数字经济空间溢出效应的关键。具体措施包括：一是搭建跨区域合作平台。组织政府、企业、学术界与非政府组织共建多边合作平台，聚焦于分享数字经济的前沿实践、技术创新与政策智慧，特别是针对能源消费结构转型的策略与案例。二是建立信息与资源共享机制。设立数字信息共享中心，收集和分析有关能源使用、技术进步和市场趋势的数据，并鼓励城市间的技术转移和人才交流，尤其是那些有助于提高能源效率和推广可再生能源的技术。三是推动联合项目与资金整合。发起跨城市合作项目，如联合建设智能电网、分布式能源系统或区域性的碳交易市场，强化基础设施互联互通；成立区域绿色基金，汇聚多元资金来源，专用于投资具有示范效应和区域影响力的能源转型项目，加速绿色经济模式的推广与落地。

〔作者毛丰付，浙江工商大学经济学院教授、博士生导师；侯玉巧（通讯作者），浙江工商大学经济学院博士研究生；高雨晨，浙江工商大学经济学院博士研究生。杭州　310018〕

责任编辑：毛　伟

中国知网　https://www.cnki.net