

考虑数字经济的城市能源回弹效应研究： 经验测算与形成机制

朱于珂，宋依纯

摘要：将数字经济纳入能源回弹效应的测算框架，对于精准测算数字经济与实体经济深度融合宏观环境下的中国城市能源回弹效应具有重要的理论与现实意义。本文在全面选取传统能源消费影响因素的基础上，创新性地纳入数字经济这一宏观经济要素，利用 2013—2021 年中国 277 个城市的数据，通过改进的能源需求随机前沿模型测算数字经济下的城市能源回弹效应，分析其时空演变趋势，并进一步探究数字经济诱发城市能源回弹效应的形成机制。研究发现，将数字经济纳入能源回弹效应的测算框架后，中国城市能源回弹效应居于 37%~98.4% 之间，均值为 56.2%，表明数字经济下城市的实际能源节约量仅为预期的 40% 左右。同时，中国城市能源回弹效应呈周期性波动与“内陆向沿海递减”的空间分布格局。更值得注意的是，数字经济对城市能源回弹效应存在显著的促增作用。数字经济将促进技术进步与创新，提升能源效率，并推动经济增长，通过“替代效应”“收入效应”与“产出效应”增加能源消费需求，进而诱发并扩大城市能源回弹效应，同时政府研发支出与自然资源禀赋亦显著扩大了数字经济对城市能源回弹效应的正向作用。本文为精确测度数字经济发展情景下的城市能源回弹效应提供了方法借鉴，并为优化数字经济发展进而有效抑制中国城市能源回弹效应提供了理论依据与经验参考。

关键词：能源回弹效应；数字经济；随机前沿模型；时空演变；形成机制

中图分类号：F426.2 **文献标识码：**A **文章编号：**1671-0169(2025)02-0090-15

DOI:10.16493/j.cnki.42-1627/c.20250214.002

一、引言

控制温室气体排放，应对全球气候变暖，是世界各国的共同责任。中国是全球最大的温室气体排放国，2021 年的碳排放量高达 119 亿吨，占全球总量的 33%^①。随着低碳技术的进步，煤炭、石油等传统化石能源占能源消费总量的比重在持续降低^[1]，但截至 2021 年，传统化石能源消费比重仍旧超过了 70%^②，致使碳排放总量居高难下。目前，中国既是全球能源消耗和碳排放的焦点，也是全球数字经济发展的中心区域。据《全球数字经济白皮书（2022 年）》显示，中美欧当前已形成全球数字经济发展的三极格局。2022 年，中国数字经济规模达 50.2 万亿元，总量稳居世界第

基金项目：湖南省社会科学基金青年项目“数字经济赋能湖南产业链低碳转型的机制与对策研究”（21YBQ079）

作者简介：朱于珂，湖南工商大学经济与贸易学院（湖南长沙 410205）；宋依纯（通讯作者），中南财经政法大学经济学院，songyc1998@163.com（湖北武汉 430073）

① 数据来源：《BP 世界能源统计年鉴 2022》。

② 数据来源：《中国统计年鉴 2022》。

二,占GDP比重提升至41.5%^①。数字经济发展迅速,俨然成为经济增长中的关键一环,是当前中国宏观经济的重要组成部分。数字经济能有效引导、实现资源的快速优化配置,优化能源消费结构,降低能源消费强度^[2]。党的二十大报告明确指出,必须加快发展数字经济发展步伐,推动数字经济与实体经济深度融合,这为推动经济增长与化石能源消费“脱钩”,降低碳排放总量指明了新的方向。数字经济水平的提升虽然推动了能源消费强度的下降,但中国能源消费总量与人均能源消费却并未随能源消费强度同步走低,总体反而维持上升趋势^②。

现有学者认为能源回弹效应导致能效改善所产生的预期能源节约被能源消费回升部分或完全折抵,是造成能源效率与能源消费总量“相伴而行”的根本原因^[3]。能源效率的提高意味着能源要素成本下降,这使得能源可以作为替代品来替代其他生产要素的投入。同时能源价格下降,消费者实际收入相对增加,将进一步增加能源消费需求。此外,能源效率的改进会推动技术创新、经济增长以及新市场的开发,导致更多的资本投资^[4],扩大经济社会生产规模,增加能源消费需求^[5]。在当前以煤炭、石油等传统化石能源为消费主体的能源消费结构下,能源回弹效应将导致煤炭等化石能源实际节约量低于预期,化石能源消费难以与经济增长“脱钩”^[1]。

宏观经济是影响能源回弹效应的重要要素^{[4][6]}。数字经济已全面渗透至经济社会的各个环节,在改变传统经济发展模式、促进经济增长的同时,势必会对能源回弹效应的产生与扩大造成重要影响。在当前数字经济与实体经济深度融合的宏观经济环境下,将数字经济作为能源消费影响因素纳入城市能源回弹效应的测度框架,更符合当前特定的现实宏观经济环境,测度结果更加精准可靠。深入考察数字经济对城市能源回弹效应的影响作用及传导机制,对于促进数字经济高效发展以抑制城市能源回弹效应,提升城市实际能源节约量,推动经济增长与化石能源消费“脱钩”具有重要的理论价值和实践意义。因此,本文在全面选取传统能源消费影响因素的基础上,进一步将数字经济这一宏观经济要素纳入能源回弹效应的测算框架,利用2013—2021年中国城市层面数据,通过改进的能源需求随机前沿模型测算数字经济下的城市能源回弹效应,分析其时空演变趋势,并进一步探究数字经济诱发城市能源回弹效应的形成机制。

与已有研究相比,本研究的边际贡献在于以下方面。(1)将数字经济作为能源消费影响因素纳入能源回弹效应的测算框架。基于数字经济对能源消费的影响作用,在全面总结能源消费影响因素的基础上,将数字经济这一宏观经济要素纳入考量,对传统能源消费影响因素理论体系进行扩展,明确了数字经济是精确测度能源回弹效应的重要宏观经济因素。(2)通过改进的能源需求随机前沿模型,对考虑了数字经济要素的城市能源回弹效应进行测算与分析。在传统能源需求SFA模型中嵌入能源回弹效应调整因子,对数字经济下的城市能源回弹效应进行全面测算,并系统揭示其时空格局与动态演进特征,丰富了能源回弹效应的测算方法体系。(3)探讨了数字经济对城市能源回弹效应的影响作用,并进一步考察了数字经济诱发城市能源回弹效应的形成机制。本文验证了数字经济对城市能源回弹效应存在的促增作用,并进一步揭示了数字经济提升能源效率,推动经济增长,通过“替代效应”“收入效应”与“产出效应”诱发并扩大城市能源回弹效应的作用机制。

二、文献综述

数字经济是当前社会经济发展的重要形态,是经济增长的主要引擎^[7]。然而高耗能、低效率

① 数据来源:中国信息通信研究院发布的《中国数字经济发展报告(2023)》。

② 数据来源:《中国统计年鉴2022》。

的生产方式导致了化石燃料的大量消耗^[8]。数字经济对能源消费与碳排放的影响引起了众多学者的关注。起初有学者研究发现信息与通信技术 (ICT) 将对经济系统和能源结构产生动态影响, 首次开启了数字经济对能源消费与碳排放的影响机制研究^[9]。随后, 互联网对能耗与碳排放的影响成为另一个新的研究切入点^[10]。一方面, 有学者发现数字技术与社会经济活动的深度融合可以直接降低能源消耗^[11]。其中, 数字经济主要通过提升能源效率^[12]、优化能源消费结构^[13]、促进可再生能源与清洁能源发展^[14], 进而实现能源节约。同时, 数字经济集聚亦有利于能源节约^[15]。另一方面, 国内外学者认为, 数字经济发展将促进经济增长并扩大经济体量, 进而提升能源消费总量^[16]与能源消费强度^[2]。其中, 互联网刺激了电力消费增长^[10]与能源消费总量上升^[16]; ICT 的发展也需要大量电力和能源密集型材料作为投入, 显著提高了能源强度^[17]。随着研究的深入, 学界逐渐意识到数字经济与能源消费之间的关系存在显著的非线性特征。数字化在导致电力消费上升的同时, 也会推动燃料消费与能源消费总量下降, 但是 ICT 会增加能源消费强度^[18]; 数字经济与能源消费强度之间呈现出“先促进、后抑制”的倒“U”型关系^[19]; 对电力消费的影响亦呈显著的倒“U”型变化趋势^[20]。数字经济对能源消费的影响具有双面性, 既可作为一种显著的能源消费驱动要素, 亦可为推进能源节约提供有效动能。尽管数字经济促进技术进步提升能源效率^[21], 但同时也将造成能源价格下降与经济体量扩大, 进而产生新的能源消费需求, 致使预期的能源节约被新增的能源消费量部分或完全折抵, 即产生回弹效应^[5]。回弹效应的存在, 为数字经济的节能效应增加了诸多不确定性, 是导致数字经济与能源消费非线性关系的重要因素之一。因此, 数字经济是能源消费的重要影响要素, 其在回弹效应的形成机制中的作用是不可被忽视的。

当前国内外主要围绕回弹效应的理论机制与经验测算展开研究。回弹效应测算的常用方法主要分为间接测算法^[22]和经济核算法^[2]两类。间接测算法是对能源效率提高引起的能源消费增加进行估算, 实现能源回弹效应的间接测算^[22]。间接测算法在对能源回弹效应的定义和理论机制方面尚缺乏深入的探讨, 因此在其测算思路仍然存在一些不足之处^[23]。据此, Lin 等^[5]借鉴经济核算法的思路, 通过探讨技术进步、经济增长、能源消费强度以及能源消费之间的内在逻辑关系, 利用技术进步对经济增长的影响来评估能源回弹效应。能源回弹效应本应源于能源效率的“狭义”改进, 即能源要素本身的“狭义”利用效率的提升^[24], 但是经济核算法将由劳动、资本等各类技术进步引致的能源效率的“广义”改进视为能源回弹效应的诱因, 其对各类技术进步没有进行严格区分, 从而导致测算结果存在偏差。因此, 一些学者严格按照回弹效应的理论内涵, 采用基于“两步法”策略的回弹效应测算模型来进行研究。具体而言, 首先利用能源需求随时间变化的随机前沿分析来测算“狭义”能源效率^[25], 然后通过估算能源需求的能效弹性来衡量回弹效应^[26]。而 Orea 等^[27]创新性地将能源回弹效应直接嵌入到能源需求的 SFA 模型中, 进而提出了一种基于“一步法”策略的能源回弹效应测算方法, 为本文测算城市能源回弹效应提供了理论和实践依据。

总之, 尽管现有文献围绕数字经济对能源消费的影响, 以及能源回弹效应的理论机制和经验测算进行了充分的研究, 但仍然存在以下不足。(1) 现有研究尚未将数字经济作为能源消费影响因素纳入能源回弹效应的测算框架。已有研究已经证实了数字经济对能源消费存在显著影响, 然而现有对能源回弹效应的测算研究并未将数字经济作为能源消费影响因素纳入考量, 在当前数字经济与实体经济深度融合的宏观经济环境下, 这种传统的测算方式存在一定局限性。(2) 当前对能源回弹效应的测算方法尚存在一定局限。现有研究基于不同理论模型、不同测算方法测算得出的回弹效应结果存在较大差异。经济核算法没有对能源效率改进赋予“狭义”的定义, 基于传统 SFA 模型的“两步法”则将能源效率与弹性系数分开估算, 将“狭义”的能源效率与弹性系数有机结合是准确测算能源回弹效应的题中之义、关键之举。(3) 当前尚未有研究系统考察数字经济与城市能源回弹效应之间的关联关系。现有研究主要围绕能源回弹效应的定义与量化评估进行探

讨, 尚未系统考察数字经济对城市能源回弹效应的影响作用与传导机制, 无法全方位、深层次地优化数字经济发展路径, 助推城市实际能源节约量提升。

三、理论模型构建

(一) 能源回弹效应的定义

本文从能源回弹效应的内涵出发, 对能源回弹效应的定义进行梳理。在宏观经济层面, 将能源回弹效应定义为:

$$R = 1 + \eta_{\tau}^E = 1 + \frac{d \ln E}{d \ln \tau} = 1 + \frac{dE}{E} \frac{\tau}{d\tau} \quad (1)$$

其中, R 、 E 分别表示能源回弹效应与能源消费量; τ 表示能源效率; η_{τ}^E 代表了能源消费量对能源效率的弹性, 决定了能源效率改进时能源消费会发生的变化量。能源回弹效应实质上是指能源消费对能源效率变化的敏感程度。学界将能源回弹效应分为回火效应、完全回弹、部分回弹、零回弹和超级节能等五种情况: (1) 回火效应: $\eta_{\tau}^E > 0$, $R > 1$, 能源回弹效应大于 100%, 能源效率的提升没有促使能源节约, 反而使得能源消费增加; (2) 完全回弹: $\eta_{\tau}^E = 1$, $R = 1$, 能源回弹效应等于 100%, 能源效率提升没有产生实质性的节能效果; (3) 部分回弹: $-1 < \eta_{\tau}^E < 0$, $0 < R < 1$, 能源回弹效应介于 0%~100% 之间, 能源效率的提高能带来一定的节能效果; (4) 零回弹: $\eta_{\tau}^E = -1$, $R = 0$, 能源回弹效应等于 0, 实际能源节约量等于预期能源节约量; (5) 超级节能: $\eta_{\tau}^E < -1$, $R < 0$, 能源回弹效应小于 0%, 能源效率改进产生的节能效果优于预期。

(二) 能源回弹效应的测算

现有文献对回弹效应的测算, 多依赖于生产函数规模不变与能源效率外生性的假设。这些假设条件存在缺陷且不符合现实情况。本文参考 Orea 等^[27]的能源需求前沿改进模型思路, 构建能源需求 SFA 模型:

$$\ln E = \ln f(X; \beta) + \nu + \mu \quad (2)$$

其中, E 代表能源消费; $f(X; \beta)$ 为由影响能源消费的相关向量 X 构成的函数, β 是相应的待估系数向量; ν 是常规的随机干扰项, 通常假定其服从正态分布 $\nu \sim N(0, \sigma_{\nu}^2)$; $\mu = -\ln \tau \geq 0$ 为非效率项, τ 是能源效率。由于式 (2) 包含了 ν 和 μ 两个随机项, 为了在实证研究中对二者进行有效识别, 假设 μ 服从半正态分布 $\mu \sim N^+(0, \sigma_{\mu}^2)$, 且 $\sigma_{\mu} = e^{\theta_0}$ 。由式 (1) 可知, 式 (2) 所示的标准能源需求 SFA 模型实际上内含了一个不合理的假设, 即能源回弹效应始终为零, 即 $R = 1 + d \ln E / d \ln \tau = 1 - d \ln E / d \mu = 0$, 这意味着随着能源效率的提升, 能源消费将会按比例减少。

为解决上述问题, 本文借鉴 Orea 等^[27]的思路, 将能源回弹效应表示为一组驱动因素的函数 $R(Z; \lambda)$, 并将其作为调整因子嵌入式 (2), 从而得到如下改进的能源需求 SFA 模型:

$$\ln E = \ln f(X; \beta) + \nu + (1 - R(Z; \lambda))\mu \quad (3)$$

其中, Z 是由一组影响能源回弹效应的变量构成的向量; λ 是待估系数向量。此时, 根据式 (1) 计算得到的能源回弹效应为 $R(Z; \lambda)$, 说明能源消费将不再与能源效率呈现等比例的变化关系, 从而有效克服了标准能源需求 SFA 模型中能源回弹效应恒等于 0 的关键局限。此外, 为采用极大似然法 (MLE) 对式 (3) 进行估计, 参考既有研究^[27]采用了如下的回弹效应函数形式:

$$R(Z; \lambda) = \frac{\exp(\lambda'Z)}{\exp(\lambda'Z) + 1} \quad (4)$$

$$R(Z; \lambda) = \frac{\exp(\lambda'Z) - 1}{\exp(\lambda'Z)} \quad (5)$$

(三) 指标选择

1. 能源消费影响因素。参考Lin等^[25]与Orea等^[27]的研究,结合数据的可得性,以城市为研究对象,本文将城市能源消费的主要影响因素划分为人口因素、经济因素与技术因素。在选取人口密度(*pop*)、经济增长(*gdp*)、技术水平(*tec*)三要素的基础上,进一步将数字经济(*dig*)纳入能源消费的影响因素体系,构建能源消费影响因素对数回归模型:

$$\ln E_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln pop_{it} + \beta_2 \ln gdp_{it} + \beta_3 \ln tec_{it} + \beta_4 \ln dig_{it} + \beta_t Y_t + \beta_r Y_r + \nu_{it} + (1 - R(Z_{it}; \lambda)) \mu_{it} \quad (6)$$

其中,*i*和*t*分别代表城市和年份;*Y_t*和*Y_r*分别代表时间虚拟变量和“八大经济区”的地区虚拟变量,用以控制不可观测的时间和区域异质性。此外,为了保证实证结果的稳健性,本文还根据EKC假说和“污染避难所”假说,在上式中进一步加入了经济增长的二次项,并对数化处理($(\ln gdp)^2$)和(*fdi*)两个变量。具体如下:

$$\ln E_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln pop_{it} + \beta_2 \ln gdp_{it} + \beta_3 \ln tec_{it} + \beta_4 \ln dig_{it} + \beta_5 (\ln gdp_{it})^2 + \beta_6 \ln fdi_{it} + \beta_t Y_t + \beta_r Y_r + \nu_{it} + (1 - R(Z_{it}; \lambda)) \mu_{it} \quad (7)$$

本文参考涂正革等^[28]的方法,通过DMSP/OLS与NPP/VIIRS夜间灯光数据公布的城市夜间灯光亮度将省级能源消费量分解到地级市,得到各地级市的能源消费量。能源消费影响因素的变量选取说明如下:(1)人口密度(*pop*):采用单位面积的人口数量来度量;(2)经济增长(*gdp*):采用人均GDP来度量,并将一次项和二次项同时引入模型;(3)技术水平(*tec*):采用人均专利授权数量度量;(4)数字经济水平(*dig*):选取每百人互联网用户数、计算机服务和软件从业人员占比、人均电信业务总量、人均邮政业务、每百人移动电话用户数和数字普惠金融指数指标,运用熵值法得到数字经济发展水平;(5)对外开放(*fdi*):采用当年实际使用外资金额占GDP百分比度量。

2. 能源回弹效应驱动要素。依据能源回弹效应的形成机制和中国数字经济的实际情况,选择如下变量作为能源回弹效应的驱动要素:(1)数字经济水平(*dig*):与上文数字经济水平变量一致;(2)经济增长(*gdp*):采用人均GDP来度量;(3)产业结构(*ind*):产业结构高级化指数来衡量;(4)人力资本(*hum*):用地区教育支出占地区财政支出百分比来度量;(5)能源结构(*es*):采用煤炭消费占能源消费总量的比重来度量;(6)碳减排政策(*ctp*和*ccp*):本文用低碳城市试点作为政策虚拟变量(*ctp*),此外还构建了一个低碳城市虚拟变量与城市碳排放强度的交乘项(*ccp*)对碳排放强度约束政策进行刻画;(7)时间趋势:由于难以全面考虑和有效控制影响能源回弹效应的诸多因素,将时间趋势等作为能源回弹效应驱动因素引入回归模型,以此形成如下能源回弹效应函数的表达式:

$$R_{it} = \lambda_0 + \lambda_1 \ln dig + \lambda_2 \ln gdp + \lambda_3 \ln ind + \lambda_4 \ln hum + \lambda_5 \ln es + \lambda_6 ctp + \lambda_7 \ln ccp + \lambda_8 tt + F_i + F_t + \epsilon_{it} \quad (8)$$

其中, λ_0 — λ_8 为待估系数;*F_i*与*F_t*分别代表城市与时间固定效应; ϵ_{it} 表示随机误差项。

3. 数据说明。本文选取2013—2021年中国277个地级市的面板数据作为研究样本。所用数据均来自国家知识产权局、《中国统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国能源统计年鉴》等。上述各变量的描述性统计如表1所示。

表1 变量描述性统计

变量名称	符号	单位	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
能源消费	<i>E</i>	万吨	2 493	220.640 2	357.704 3	0.119 2	4067.332 0
数字经济	<i>dig</i>		2 493	0.095 2	0.055 5	0.010 2	0.819 9
人口密度	<i>pop</i>	万人/平方公里	2 493	0.044 1	0.034 8	0.000 5	0.275 9
经济增长	<i>gdp</i>	万元/人	2 493	5.258 8	3.437 6	0.645 7	46.774 9
技术水平	<i>tec</i>	件/万人	2 493	10.930 9	23.986 9	0.058 9	315.789 0
对外开放	<i>fdi</i>	%	2 493	1.847 3	1.925 4	0.000 5	20.926 6
产业结构	<i>ind</i>		2 493	6.515 1	0.347 4	5.517 5	7.836 1
人力资本	<i>hum</i>	%	2 493	3.475 0	1.802 9	0.753 4	14.857 8
能源结构	<i>es</i>	%	2 493	81.399 5	14.308 8	14.653 4	99.675 8

四、考虑数字经济的城市能源回弹效应估计

(一) 能源回弹效应测算结果

表2展示了改进后的能源需求SFA模型的估计结果。其中,模型(1)和模型(2)基于式(2)进行估计,模型(3)和模型(4)基于式(3)进行估计。表2显示,模型(2)和(4)中经济增长的二次项估计系数均在1%的水平上显著。因此,下文将根据模型(2)和模型(4)的结果进行测算和分析。

表2 能源需求SFA模型与能源回弹效应驱动因素回归结果

	变量	模型(1)	模型(2)	模型(3)	模型(4)
lnE	lnpop	0.346*** (0.045 8)	0.372*** (0.046 7)	0.405*** (0.000 014 2)	0.354*** (0.000 521)
	lngdp	0.425*** (0.051 6)	5.712*** (0.645)	0.660*** (0.000 021 4)	0.284*** (0.001 21)
	lntec	0.275*** (0.023 5)	0.229*** (0.024 1)	0.328*** (0.000 017 6)	0.183*** (0.000 496)
	ln dig	0.174*** (0.056 8)	0.187*** (0.056 1)	0.484*** (0.000 051 0)	0.543*** (0.002 33)
	(lngdp) ²		-0.245*** (0.029 8)		0.012 4*** (0.000 107)
	lnfdi		-0.005 70 (0.009 93)		0.130*** (0.000 326)
	cons	6.624*** (2.177)	-21.57*** (3.872)		
	μ_ϵ			-1.687*** (0.040 1)	-1.588*** (0.040 1)
	Log-L	-1 493.6	-1 460.1	-390.2	-513.9
	区域固定效应	YES	YES	YES	YES
时间固定效应	YES	YES	YES	YES	
R	ln dig	—	—	0.161*** (0.025 2)	0.199*** (0.028 2)
	lngdp	—	—	0.167*** (0.028 7)	0.141*** (0.030 9)

续表 2

变量	模型(1)	模型(2)	模型(3)	模型(4)
<i>lnind</i>	—	—	-0.486 (0.379)	-0.488 (0.400)
<i>lnhum</i>	—	—	-0.0165 (0.0302)	-0.0110 (0.0330)
<i>lnes</i>	—	—	-0.243*** (0.0606)	-0.243*** (0.0658)
<i>ctp</i>	—	—	-0.180** (0.0708)	-0.179** (0.0739)
<i>lnccp</i>	—	—	0.0513*** (0.0184)	0.0551*** (0.0189)
<i>tt</i>	—	—	-0.0264*** (0.00455)	-0.0296*** (0.00501)
<i>cons</i>	—	—	0.888 (0.849)	1.071 (0.913)
城市固定效应	—	—	YES	YES
时间固定效应	—	—	YES	YES
Within R^2	—	—	0.1541	0.1419
<i>N</i>	2493	2493	2493	2493

注：括号内为聚类稳健标准误；*** $p < 0.01$ ，** $p < 0.05$ ，* $p < 0.1$ ，下表同。

1. 基准回归。表2模型（2）和模型（4）中数字经济对能源消费和能源回弹效应的影响系数均为正，且均通过1%的显著性水平检验。该结果验证了数字经济是能源消费的重要驱动因素之一，进而有效支撑了将数字经济作为能源消费影响因素，纳入能源回弹效应测算框架的科学合理性，基于改进的能源需求SFA模型得出的能源回弹效应测算结果是稳健可靠的，同时也说明数字经济对能源回弹效应存在显著的促增作用。数字经济凭借数字平台加快资源共享和优化要素配置，激发“协同放大效应”和“技术创新效应”，提升能源效率，弱化企业实际面临的环境约束，进而扩大企业生产规模，诱发能源回弹效应，最终引致节能折中效应或相反作用。数字经济推动产业数字化和数字产业化协同发展的同时，必然伴随着数字基础设施建设的扩张、硬件设备随之升级、数字产品更新迭代，增加对能源密集型产品的需求，加之数据存储、处理和备份过程中会增加电力消耗，进一步扩大能源回弹效应。随着数字经济发展规模扩大，数字平台的规模效应凸显，降低企业生产和交易成本，企业为实现规模经济，增加生产要素总投入和能源要素替代，导致能源的再消费与回升。最后，数字经济发展促进经济增长，居民收入水平提高，从而增加对农业、服务业、食品制造、非金属矿物以及机械设备制造等行业产品与服务的消费需求，拉动各行业的投资与生产规模扩大，能源投入要素进一步增加，进而加剧能源回弹效应。

2. 能源回弹效应的驱动因素。人均GDP的系数为正且通过1%的显著性水平检验，说明经济增长通过“产出效应”诱发并扩大城市能源回弹效应。产业结构的系数为负，意味着产业结构优化升级推动能源密集型产业向技术密集型产业变迁，促进生产资源向低能耗产业的流动，从而有效限制能源回弹效应的发生。随着人力资本的提升，居民的节能意识得到了增强。人力资本的负系数表明，绿色出行和绿色消费观念在一定程度上降低了能源回弹效应。但当前中国产业高级化和人力资本整体水平仍处于上升期，对能源回弹效应的抑制较为有限。能源结构的系数为负且通过1%的显著性水平检验，说明煤炭消费占比的增加将对能源回弹效应产生显著的抑制作用。煤炭消费占比越高给企业带来的节能减排压力和环境约束力越大，迫使企业采取相关措施对生态环境

进行保护, 限制能源再消费行为, 在一定程度上抑制了能源回弹效应。

此外, 低碳城市试点政策的系数显著为负, 说明低碳城市试点政策有效抑制了能源回弹效应, 该项政策实现了预期的节能效果。但碳排放强度约束政策的系数显著为正, 意味着数字经济新常态下中国实施的节能与碳减排政策仍存在优化改进空间。时间变量的系数显著为负, 说明随着时间的推移, 数字经济水平不断提升, 其节能效应逐渐凸显, 对城市能源回弹效应逐渐发挥出显著的抑制效应。

(二) 能源回弹效应的空间分布特征

基于表2估计结果对中国城市的能源回弹效应进行测算, 发现这一效应的范围在0.370至0.984之间, 且其平均值为0.562。该结果表明, 中国城市的实际能源节约量仅约为预期的40%左右。

表3显示的是中国“八大经济区”各区域每三年周期的能源回弹效应均值。可以看出, 第一阶段(2013—2015年)至第二阶段(2016—2018年), 东北地区、南部沿海地区、东部沿海地区均出现下降趋势, 但同时期的北部沿海地区、大西南地区、长江中游地区、黄河中游地区和大西北地区均出现上升趋势。第二阶段(2016—2018年)至第三阶段(2019—2021年), 东北地区、南部沿海地区、东部沿海地区、北部沿海地区、长江中游地区均出现上升趋势, 但同时期的大西南地区、黄河中游地区和大西北地区均出现下降趋势。在整个观察期内, 除北部沿海地区与长江中游地区一直维持上升趋势, 其余区域均呈上下波动走势。

表3 分区域能源回弹效应估算结果

区域	2013—2015年	2016—2018年	2019—2021年	均值
东北	0.629	0.554	0.611	0.598
南部沿海	0.555	0.514	0.590	0.553
东部沿海	0.544	0.492	0.551	0.529
北部沿海	0.516	0.518	0.527	0.520
大西南	0.534	0.593	0.588	0.571
长江中游	0.499	0.538	0.547	0.528
黄河中游	0.594	0.615	0.569	0.593
大西北	0.606	0.622	0.615	0.614

整体来看, 中国区域能源回弹效应均值的排序为: 大西北地区>东北地区>黄河中游地区>大西南地区>南部沿海地区>东部沿海地区>长江中游地区>北部沿海地区, 大致呈现“内陆向沿海递减”的分布特征。这种特征与中国自改革开放以来逐渐显现的东部、中部与西部区域发展差距的分布特征相一致。其中, 大西北地区、东北地区和黄河中游地区的能源回弹效应均值较大, 因为这三大区域以煤炭等传统化石能源为主的能源消费结构、产业结构单一且升级缓慢、经济水平较为落后、居民节能意识较为薄弱等。加之2013年8月, 中国国家发展改革委印发《2012年西部大开发工作进展情况和2013年工作安排》, 并推动实施《中西部地区外商投资优势产业目录》。这一系列政策推动了西部地区的数字产业发展、技术进步与经济增长, 促使西部地区城市能源回弹效应处于高回弹区间。尽管沿海地区数字经济发展, 推动经济增长, 在一定程度上扩大了能源回弹效应, 但其节能减排政策强度适宜、能源消费结构多元化和产业结构优化升级成效显著, 一定程度上对能源回弹效应产生了显著的抑制作用。虽然数字经济发展引致能源回弹效应扩增, 但不能因此放慢数字经济的发展步伐, 而应通过实施合理的节能碳减排政策、优化能源消费结构、加快产业转型升级以有效抑制能源回弹效应。

此外，经对比不难得出，本文针对城市能源回弹效应的测算结果与现有研究存在一定差异。其中最主要的原因在于对于数字经济这一关键碳排放驱动因素的考量。通过上述实证结果可以得出，数字经济对于能源再消费存在显著的刺激效果，在数字经济背景下，城市整体的能源再消费倾向更加明显，尤其是数字经济的发展需要一定的能耗支撑。因此，将数字经济纳入城市能源回弹效应的测算体系，所得出的测算结果与传统方法指标体系测算下的结果会有所差异，其所得结果更符合当前数字经济与实体经济深度融合的现实经济背景。此外，沿海地区相较于内陆地区，东部地区相较于中西部地区，其能源结构更加清洁绿色化^[29]、产业结构高级化水平与能源效率整体较高^[29]、节能减排技术更加先进^[30]、产业集群与生产规模效益更加突出^[31]，进而导致在相同能源再消费倾向下，内陆地区、中西部地区的能源再消费总量要大于沿海地区、东部地区，即中国城市能源回弹效应大致呈现“内陆向沿海递减”的空间分布特征。

为进一步解释城市能源回弹效应“由内陆向沿海递减”的空间分布特征，结合我国石油、天然气、煤炭等矿产资源丰裕程度自西部内陆向东部沿海递减的空间分布格局，本文以城市自然资源禀赋为切入点，分析其与能源回弹效应之间的关联关系。具体而言，本文采用采掘业就业人数占就业总人数的比重作为自然资源禀赋的代理变量，分析其对城市能源回弹效应的具体影响，回归结果如表4所示。结果显示，自然资源禀赋对城市能源回弹效应的影响显著为正。进一步说明了石油、天然气、煤炭等矿产资源丰裕程度越高，对传统化石能源依赖程度越高，则当地更加注重这种资源的开发和使用，相反资源匮乏的地区，当地可能更加注重能源节约和替代能源的发展。因此，内陆地区城市能源回弹效应相较于沿海地区更加显著。

表4 自然资源禀赋对城市能源回弹效应的影响

变量	R			
	(1)	(2)	(3)	(4)
NRE	0.266 8* (0.142 1)	0.099 8* (0.053 2)	0.277 5** (0.136 3)	0.272 0** (0.135 9)
控制变量	NO	YES	YES	YES
城市固定效应	YES	NO	YES	YES
时间固定效应	YES	YES	NO	YES
样本量	2 290	2 290	2 290	2 290
Within R ²	0.009 2	0.075 7	0.095 5	0.105 9

（三）稳健性检验

为了进一步检验数字经济与能源回弹效应的关联关系，本文通过更换替换核心解释变量、剔除特定样本、排除政策干扰、构建动态面板、工具变量-两阶段最小二乘法（IV-2SLS）等方法进行稳健性检验，同时使用以地级市为聚类变量的聚类稳健标准误。经过一系列稳健性检验后，数字经济对能源回弹效应的显著促增作用依然成立^①。

五、数字经济诱发并扩大城市能源回弹效应的形成机制

（一）机制假说

考虑数字经济的城市能源回弹效应表现为部分回弹效应，数字经济显著促进了城市能源回弹效应的提升。因此，有必要对数字经济诱发并扩大城市能源回弹效应的形成机制进行系统考察。

① 由于篇幅限制，具体稳健性检验结果未列出，可联系作者索取。

技术进步推动能源效率提升,是实现能源节约的重要途径之一,但能源效率提升造成能源服务成本与价格下降反而会增加能源消费需求,造成能源消费总量回升。技术进步推动经济增长,提升经济生产规模与居民消费水平,能源要素投入与能源消费需求上升,成为能源消费回升的另一个重要因素。政府研发支持为技术创新与进步提供外在动能,其对于数字经济与能源回弹效应关系的影响也应重点考虑。此外,上文分析得出资源禀赋与能源回弹效应存在显著的正向关系,其在数字经济与能源回弹效应之间亦发挥着重要的调节效应。

1. 数字经济促进技术进步与创新,提升能源效率进而诱发并扩大城市能源回弹效应。首先,数字经济通过数字技术的关联效应和互动效应,催生技术溢出,促进能源技术进步,提升能源传输系统的智能化程度,提高能源利用效率。其次,数字经济凭借数字平台加快资源共享和优化要素配置,推动信息知识的传递与共享,促进技术创新^[32],进一步推动能源效率提升^[33]。尽管技术进步创新与能源效率提升将促使企业在生产经营过程中,保持既定产出不变的情况下,降低能源投入,但技术进步创新与能源效率提升亦将使得单位产出的能源投入成本下降,引起了生产要素相对价格的变化。对于企业与居民等消费者而言,某种特定能源服务价格下降,意味着消费者对特定能源服务的实际购买力提升,消费者的实际收入相对提升,进而导致企业与居民等消费者对特定能源的消费需求与消费能力提升,即通过“收入效应”增加对能源产品与服务的消费需求,引致能源消费回升。同时,由于生产厂商更倾向于选择成本较低的生产投入要素,技术进步创新与能源效率提升,既减少了既定产出下的特定能源投入量,又降低了单位产出的特定能源消耗成本,将有效增加生产厂家对特定能源产品的需求进而替代其他种类能源投入要素^[34],即通过“替代效应”增加对能源产品与服务的消费需求。因此,数字经济将促进技术进步创新,提升能源效率,引致能源服务价格与成本下降,进而诱发并扩大城市能源回弹效应。

2. 数字经济促进经济增长进而诱发并扩大城市能源回弹效应。宏观视角来看,数字经济通过创新要素投入、提高要素配置效率和提升全要素生产率来促进经济增长。微观视角来看,数字经济催生规模经济、范围经济以及长尾效应有利于供给双方提高匹配效率,从而促进经济发展^[35]。对于企业而言,数字经济促进全要素生产率提升,从而推动企业的生产可能性边界向外扩张,企业生产规模扩大,进而增加能源消费。对于消费者而言,数字经济推动经济增长,从而增加就业机会、缩小收入差距^[36]、加快城镇化进程,使得社会基础设施建设愈加完善、居民消费水平不断提高。然而建筑领域、消费领域以及交通运输领域均需要消耗大量的钢筋水泥、农副产品、燃油等高能耗材料,进而推动能源再消费与消费总量回升。因此,数字经济发展将促进经济增长,扩大全社会生产规模,并提升居民消费水平,通过“产出效应”增加能源消费需求,进而诱发并扩大城市能源回弹效应。

3. 政府研发支持对数字经济与城市能源回弹效应的调节效应。政府研发支持在一定程度上能为地区技术创新与进步提供强大动能^[37]。在政府研发支出较高的地区,其技术水平与能源效率往往更高。同时,政府研发支出通过促进技术进步亦显著带动地区经济增长^[38]。由于政府研发支出对于地区技术进步与经济增长的驱动效果,在政府研发支出较高的地区,数字经济通过提升能源效率,并推动经济增长,通过“替代效应”“收入效应”与“产出效应”增加能源消费需求,进而诱发并扩大城市能源回弹效应的效果将更加显著,即政府研发支出在数字经济与城市能源回弹效应之间存在正向调节效应。

4. 自然资源禀赋对数字经济与城市能源回弹效应的调节效应。首先,地区自然资源禀赋将显著影响当地的能源消费总量。资源丰富的地区,能源供应相对充足,能源消费总量往往较高,例如煤炭资源丰富的地区,煤炭在能源消费中的比重可能较高。其次,地区自然资源禀赋将显著影响当地的能源消费结构^[39]。石油、天然气、煤炭等化石能源资源丰富的地区,化石能源在能源消

费结构中的比重较高^[40]。如果能源资源种类单一,且不可替代性强,那么该地区的能源消费总量可能更多地依赖于这种资源。当前,我国大规模用能行为的来源仍旧依赖传统化石能源,这使得在数字经济驱动的能源消费需求上升与回升的过程中,各地区对传统化石能源的消费总量与依赖程度将继续上升。因此,自然资源禀赋在数字经济与城市能源回弹效应之间存在正向调节效应。

(二) 机制检验

1. 模型设定。基于前文对城市能源回弹效应影响机制的分析,为进一步检验数字经济通过何种路径来引致能源回弹效应,通过两步法构建机制检验模型,具体如下:

$$\ln M_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln dig_{it} + \beta_2 CV_{it} + \mu_i + \delta_t + \epsilon_{it} \quad (9)$$

其中, M 表示为中介变量,分别为能源效率、技术进步与创新、经济增长。能源效率是指消耗一单位能源所获得的产出,因此用国内生产总值与能源消耗总量的比值(ee_{it})来衡量能源效率;技术进步采用全要素生产率(TFP_{it})衡量;技术创新采用专利申请数量(pg_{it})衡量;经济增长用人均GDP来衡量(gdp_{it})。 CV_{it} 代表控制变量, i 与 t 分别表示城市与年份, μ_i 代表城市固定效应, δ_t 代表年份固定效应, ϵ_{it} 表示随机误差项。 β_1 表示数字经济对机制变量的影响。

为检验政府研发支持与自然资源禀赋对数字经济与城市能源回弹效应的调节效应,本文构建调节效应模型:

$$R_{it} = \gamma_0 + \gamma_1 \ln dig_{it} + \gamma_2 \ln Mo_{it} + \gamma_3 CV_{it} + \mu_i + \delta_t + \epsilon_{it} \quad (10)$$

$$R_{it} = \gamma_0 + \gamma_1 \ln dig_{it} + \gamma_2 \ln Mo_{it} + \gamma_3 (\ln dig_{it} \times \ln Mo_{it}) + \gamma_4 CV_{it} + \mu_i + \delta_t + \epsilon_{it} \quad (11)$$

其中, Mo 表示为调节变量,分别为政府研发支持与自然资源禀赋。政府研发支持采用地级市R&D内部经费支出($R\&D_{it}$)衡量;自然资源禀赋采用采掘业就业人数占就业总人数的比重(NRE_{it})衡量。 γ_3 表示调节效应,即表示调节变量对数字经济与城市能源回弹效应关系的影响。

2. 结果分析。表5中第(1) — (3)列显示,数字经济对能源效率、技术进步与技术创新的系数均显著为正,进而有效验证了数字经济将促进技术进步创新,提升能源效率,通过“收入效应”与“替代效应”扩大城市能源回弹效应。表5第(4)列显示,经济增长对能源回弹效应的系数在1%显著性水平下为正,验证了数字经济通过推动经济增长对能源回弹效应的促增作用。数字经济推动经济增长,扩大城市生产规模与经济总量,同时提升居民消费水平,通过“产出效应”增加能源消费需求,加剧能源回弹效应。通过表6可知,数字经济与调节变量的交互项($\ln digital \times \ln R\&D$ 与 $\ln digital \times \ln NRE$)均显著为正,表明调节变量在数字经济与城市能源回弹效应之间存在显著的正向调节效应,即政府研发支出与自然资源禀赋显著扩大了数字经济对城市能源回弹效应的正向作用。

表5 作用机制检验结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	$\ln ee$	$\ln TFP$	$\ln pg$	$\ln gdp$
$\ln digital$	0.0303** (0.0150)	0.0226* (0.0129)	0.165*** (0.0739)	0.2537*** (0.0456)
控制变量	YES	YES	YES	YES
城市固定效应	YES	YES	YES	YES
时间固定效应	YES	YES	YES	YES
样本量	2493	2493	2493	2493
Within- R^2	0.8918	0.1834	0.7759	0.7135

表6 调节效应检验结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	R	R	R	R
<i>ln</i> digital	0.2593*** (0.0284)	-0.0568 (0.0738)	0.1924*** (0.0208)	0.2369*** (0.0217)
<i>ln</i> R&D	0.0199** (0.0092)	-0.0336*** (0.0128)		
<i>ln</i> digital× <i>ln</i> R&D		0.0280*** (0.0059)		
<i>ln</i> NRE			0.2907* (0.1583)	1.1721*** (0.2049)
<i>ln</i> digital× <i>ln</i> NRE				0.5539*** (0.0831)
控制变量	YES	YES	YES	YES
城市固定效应	YES	YES	YES	YES
时间固定效应	YES	YES	YES	YES
样本量	2304	2304	2290	2290
Within- <i>R</i> ²	0.1399	0.1525	0.1420	0.1606

六、研究结论与政策启示

(一) 主要结论

本文在选取了传统城市能源消费影响因素的基础上，进一步将数字经济这一宏观经济要素纳入能源回弹效应的测算框架，利用2013—2021年中国地级及以上城市层面数据，构建改进的能源需求SFA模型测算城市能源回弹效应，分析其时空演变趋势，并进一步探究数字经济诱发城市能源回弹效应的形成机制。研究发现如下。

第一，在数字经济发展情景下，中国城市能源回弹效应整体偏高。将数字经济作为能源消费影响因素纳入能源回弹效应测算框架，可得2013—2021年中国城市能源回弹效应均值为0.562，表明中国城市的实际能源节约量仅为预期的40%左右，约60%的预期能源节约量被折抵。

第二，数字经济对城市能源回弹效应存在显著的促增作用，表明数字经济是诱发城市能源回弹效应的重要驱动要素，产业结构、人力资本、能源结构以及低碳城市试点政策对城市能源回弹效应具有一定的抑制作用。能源消费强度约束政策的系数显著为正，意味着数字经济新形势下，中国实施的节能政策存在进一步的优化空间。

第三，在时间维度上，中国城市能源回弹效应在数字经济和节能政策的双重作用下呈现周期性波动特征。在空间维度上，中国城市能源回弹效应呈现“由内陆向沿海递减”的分布特征，各区域城市的自然资源禀赋差异是导致这种空间分布特征的主要原因，这与中国改革开放以来逐渐形成的东、中、西部区域发展差距的分布特征较为吻合。

第四，机制分析发现，数字经济促进技术进步与创新，提升能源效率，引致能源服务价格与成本下降，导致消费者对能源产品或服务的消费需求与消费能力提升，通过“收入效应”“替代效应”诱发并扩大城市能源回弹效应。同时，数字经济改变传统经济发展模式，推动经济增长，扩大生产规模，提升居民消费水平，通过“产出效应”增加能源消费需求，进而扩大城市能源回弹效应。此外，政府研发支出与自然资源禀赋亦显著扩大了数字经济对城市能源回弹效应的正向作用。

(二) 政策启示

第一，应将能源回弹效应问题纳入数字经济发展和能源消费约束政策的决策框架，保证数字经

济的节能减排效应得以最大程度地实现。数字经济新形态下，中国城市能源回弹效应处于60%左右的高回弹区间，表明数字经济和能源消费约束政策未能达到预期的节能效果。因此，应保持数字经济的平稳发展，制定相应的能源消费总量约束目标以及一系列辅助政策，对能源回弹效应加以限制，推动能源消费强度和能源消费总量同步下降，加快数字经济发展与化石能源消费“脱钩”。

第二，推动产业数字化和数字产业化的协同发展，加快数字经济赋能产业结构优化。研究发现，产业结构优化和人力资本水平提升对能源回弹效应具有抑制作用，但现阶段其抑制作用十分有限。应加快数字经济与传统产业的渗透和有机融合，充分发挥数字经济的绿色技术创新效应，以高新技术产业发展引领产业结构优化。同时，运用数字平台大力推介低能耗、高附加值产品，助力居民消费方式的转变，实现生产生活方式的绿色节能转型。

第三，建立健全数字经济发展和碳减排的区域协作机制，形成规避能源回弹效应的区域合力。数字经济发展过程中的“数字鸿沟”、多层次分化趋势和“马太效应”加剧了能源回弹效应向高水平跃升的极化效应。因此，通过搭建跨区域数字网络平台建立区域协商机制，发挥数字经济优化要素配置的优势，降低生产要素跨区域流动壁垒，消除“数字鸿沟”，发挥中心城市、沿海城市在区域能源回弹效应协同规避中的引领作用。

第四，加快数字经济与能源生产及消费的深度融合，推动能源结构低碳化、清洁化、可再生化，注重能源节约和替代能源的发展。能源效率提升是数字经济诱发并扩大能源回弹效应的重要机制，因此能源效率提升对于提升能源节约总量的作用有限，应更加注重有效的前端治理。深化“互联网+”智慧能源，在运用数字技术和网络手段提升能源利用效率的同时，借助数字平台组建全国性的智能化能源市场，完成能源资源的及时调度与精准匹配。建立健全可再生能源的市场机制，发挥能源市场、可再生能源市场、碳交易市场的市场导向型属性，促进数字产业与可再生能源的协同发展，扩大可再生能源市场化交易的范围，优化能源消费结构，有效抑制城市整体能源回弹效应。

参考文献

- [1] 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(1).
- [2] Xu, Q., M. R. Zhong, X. Li. How does digitalization affect energy? International evidence[J]. *Energy Economics*, 2022, 107.
- [3] Wu, L. P., Y. Chen, M. R. Feylizadeh, et al. Estimation of China's macro-carbon rebound effect: Method of integrating data envelopment analysis production model and sequential malmquist-luenberger index[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 198.
- [4] Chen, Z., P. Song, B. L. Wang. Carbon emissions trading scheme, energy efficiency and rebound effect: Evidence from China's provincial data[J]. *Energy Policy*, 2021, 157.
- [5] Lin, B. Q., Y. F. Chen, G. L. Zhang. Technological progress and rebound effect in China's nonferrous metals industry: An empirical study[J]. *Energy Policy*, 2017, 109.
- [6] Yang, L. S., Z. Li. Technology advance and the carbon dioxide emission in China: Empirical research based on the rebound effect[J]. *Energy Policy*, 2017, 101.
- [7] 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[J]. 管理世界, 2020(10).
- [8] Chai, J., M. F. Du, T. Liang, et al. Coal consumption in China: How to bend down the curve?[J]. *Energy Economics*, 2019, 80.
- [9] Moyer, J. D., B. B. Hughes. ICTs: Do they contribute to increased carbon emissions?[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2012(5).
- [10] Salahuddin, M., K. Alam. Internet usage, electricity consumption and economic growth in Australia: A time

- series evidence[J]. *Telematics and Informatics*, 2015(4).
- [11]Chen, Y. M. Improving market performance in the digital economy[J]. *China Economic Review*, 2020, 62.
- [12]Xin, Y. R., H. Song, Z. Y. Shen, et al. Measurement of the integration level between the digital economy and industry and its impact on energy consumption[J]. *Energy Economics*, 2023, 126.
- [13]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.
- [14]Wang, B., J. D. Wang, K. Y. Dong, et al. Is the digital economy conducive to the development of renewable energy in Asia?[J]. *Energy Policy*, 2023, 173.
- [15]Yu, H. Y., J. C. Wang, J. J. Xu. Assessing the role of digital economy agglomeration in energy conservation and emission reduction: Evidence from China[J]. *Energy*, 2023, 284.
- [16]Ren, S. Y., Y. Hao, L. Xu, et al. Digitalization and energy: How does internet development affect China's energy consumption?[J]. *Energy Economics*, 2021, 98.
- [17]Zhou, X., D. Zhou, Q. Wang. How information and communication technology drives carbon emissions: A sector-level analysis for China[J]. *Energy Economics*, 2018, 81.
- [18]Li, X., D. Lepour, F. Maréchal. Electrification and digitalization effects on sectoral energy demand and consumption: A prospective study towards 2050[J]. *Energy*, 2023, 279.
- [19]Zhao, H. R., S. Guo. Analysis of the non-linear impact of digital economy development on energy intensity: Empirical research based on the PSTR model[J]. *Energy*, 2023, 282.
- [20]Lin, B. Q., C. C. Huang. How will promoting the digital economy affect electricity intensity?[J]. *Energy Policy*, 2022, 173.
- [21]Heddeghem, W. V., S. Lambert, B. Lannoo, et al. Trends in worldwide ICT electricity consumption from 2007 to 2012[J]. *Computer Communications*, 2014, 50.
- [22]Shao, S., L. F. Guo, M. L. Yu, et al. Does the rebound effect matter in energy import-dependent megacities? Evidence from Shanghai (China)[J]. *Applied Energy*, 2019, 241.
- [23]贾锐宁, 邵帅, 杜克锐, 等. 中国碳回弹效应的时空格局、动态演进及驱动因素——基于改进的碳排放随机前沿模型的实证考察[J]. *中国软科学*, 2022(12).
- [24]杨莉莉, 邵帅. 能源回弹效应的理论演进与经验证据: 一个文献述评[J]. *财经研究*, 2015(8).
- [25]Lin, B. Q., P. H. Zhu. Measurement of the direct rebound effect of residential electricity consumption: An empirical study based on the China family panel studies[J]. *Applied Energy*, 2021, 301.
- [26]Adetutu, M. O., A. J. Glass, T. G. Weyman-jones. Economy-wide estimates of rebound effects: Evidence from panel data[J]. *Energy Journal*, 2016(3).
- [27]Orea, L., M. Llorca, M. Filippini. A new approach to measuring the rebound effect associated to energy efficiency improvements: An application to the US residential energy demand[J]. *Energy Economics*, 2015, 49.
- [28]涂正革, 王昆, 湛仁俊. 经济增长与污染减排: 一个统筹分析框架[J]. *经济研究*, 2022(8).
- [29]徐泽水, 常梅, 缙迅杰. 基于多时期交叉效率模型的中国省际碳排放效率及影响因素分析[J/OL]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2024.0626>, 2024-11-14.
- [30]谢里, 陈宇. 节能技术创新有助于降低能源消费吗? ——“杰文斯悖论”的再检验[J]. *管理科学学报*, 2021(12).
- [31]汪晓文, 陈明月, 陈南旭. 数字经济、绿色技术创新与产业结构升级[J]. *经济问题*, 2023(1).
- [32]杜爽, 曹效喜. 企业数字化转型能否促进绿色创新——来自中国上市公司的证据[J]. *中国地质大学学报(社会科学版)*, 2023(4).
- [33]韩先锋, 李佳佳. 数字金融发展的动态减污降碳效应——基于二元环境约束的新视角[J]. *中国地质大学学报(社会科学版)*, 2024(5).

- [34] Sorrell, S., J. Dimitropoulos. The rebound effect: Microeconomic definitions, limitations and extensions[J]. *Ecological Economics*, 2008(3).
- [35] Yin, Z. C., X. Gong, P. Y. Guo, et al. What drives entrepreneurship in digital economy? Evidence from China[J]. *Economic Modelling*, 2019(3).
- [36] Zhang, X. Income disparity and digital divide: The internet consumption model and cross-country empirical research[J]. *Telecommunications Policy*, 2013(6-7).
- [37] 李娟伟, 任保平, 刚翠翠. 异质型文化资本与中国经济增长方式转变[J]. 中国经济问题, 2014(2).
- [38] 李世杰, 校亚楠. 财政支持、银行信贷与城市经济增长——基于中国 247 个城市的经验研究[J]. 经济管理, 2016(7).
- [39] 谭娟, 陈鸣. 基于多区域投入产出模型的中欧贸易隐含碳测算及分析[J]. 经济学家, 2015(2).
- [40] 赵晓梦, 魏婷, 朱俊鹏. 从排污费到环保税: 绿色税制改革视阈下的减污降碳协同治理研究[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2024(3).

A Study of Urban Energy Rebound Effect Considering the Digital Economy: Empirical Measurements and Formation Mechanism

ZHU Yu-ke, SONG Yi-chun

Abstract: Incorporating the digital economy into the measurement framework of energy rebound effect holds significant theoretical and practical implications for the accurate assessment of the energy rebound effect in Chinese cities under the macro-environment of deep integration of the digital and real economies. Based on a comprehensive selection of traditional energy consumption influencing factors, this study innovatively incorporates the digital economy as a macroeconomic element. Using data from 277 prefecture-level and above cities in China from 2013 to 2021, the study measures the urban energy rebound effect under the digital economy through the improved stochastic frontier model (SFA) of energy demand, analyzes its spatial and temporal evolution trends, and further explores the formation mechanism of the digital economy that induces and expands the urban energy rebound effect. When the digital economy is integrated into the measurement framework of the energy rebound effect, the energy rebound effect of Chinese cities ranges from 37% to 98.4%, with a mean value of 56.2%, indicating that the actual energy savings in Chinese cities under the digital economy is only approximately 40% of that expected. Meanwhile, the energy rebound effect of Chinese cities is characterized by cyclical fluctuations and a spatial distribution pattern of “inland to coastal decreasing”, and the polarization effect gradually appears. More notably, the digital economy significantly amplifies urban energy rebound effect. Digital economy promotes technological progress and innovation, enhances energy efficiency and promotes economic growth, which increases energy consumption through the “substitution effect” “income effect” and “output effect”, thus inducing and expanding the urban energy rebound effect. Meanwhile, government R&D expenditure and natural resource endowment also significantly expand the positive effect of digital economy on urban energy rebound effect. The study provides a methodological reference for accurately measuring the urban energy rebound effect under the scenario of digital economy development, and offers a theoretical basis and empirical reference for optimizing the implementation of digital economy to effectively curb the urban energy rebound effect in China.

Key words: energy rebound effect; digital economy; stochastic frontier model; spatial and temporal evolution; formation mechanism

(责任编辑 孙洁)