

# 数字经济赋能全要素能源效率的效应研究

李灵心<sup>1</sup>, 吴亦琪<sup>1</sup>, 孙 涵<sup>2</sup>

<sup>1</sup>江苏大学数学科学学院, 江苏 镇江

<sup>2</sup>江苏大学管理学院, 江苏 镇江

收稿日期: 2026年3月2日; 录用日期: 2026年3月13日; 发布日期: 2026年4月13日

## 摘 要

在“双碳”目标与绿色转型的发展背景下, 数字经济对能源效率的影响具有重要研究价值。本文以2011~2023年中国30个省级行政区为样本, 采用DDF-SFA模型测度全要素能源效率, 经自适应弹性网筛选与熵权法测算数字经济综合指数, 通过基准回归、中介效应模型及异质性分析展开实证检验。结果表明, 数字经济对全要素能源效率具有显著正向净效应, 该结论通过内生性及稳健性检验; 技术研发能力与政府创新支持是数字经济赋能能源效率提升的关键中介路径。数字经济的正向赋能效应存在显著区域异质性, 仅在小省份、低经济水平省份、偏服务业省份显著。

## 关键词

数字经济, 全要素能源效率, 区域异质性

# A Study on the Effect of Digital Economy Empowering Total Factor Energy Efficiency

Lingxin Li<sup>1</sup>, Yiqi Wu<sup>1</sup>, Han Sun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Mathematical Sciences, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu

<sup>2</sup>School of Management, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu

Received: March 2, 2026; accepted: March 13, 2026; published: April 13, 2026

## Abstract

Against the backdrop of the dual-carbon goals and green transformation, the impact of the digital economy on energy efficiency carries important research value. This paper takes 30 provincial-level administrative regions in China from 2011 to 2023 as the research sample, and adopts the DDF-SFA model to measure total factor energy efficiency. The adaptive elastic net model is used for indicator screening and the entropy weight method for calculating the comprehensive digital economy index, with empirical tests conducted through benchmark regression, mediating effect model

and heterogeneity analysis. The results show that the digital economy exerts a significant positive net effect on total factor energy efficiency, a conclusion verified by endogeneity and robustness tests; technological research and development capability and government innovation support are the key mediating paths through which the digital economy boosts energy efficiency improvement. The positive enabling effect of the digital economy exhibits significant regional heterogeneity, being only prominent in small provinces, provinces with low economic development levels, and service-oriented provinces.

## Keywords

Digital Economy, Total Factor Energy Efficiency, Regional Heterogeneity

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在应对全球气候变化与实现“双碳”目标的时代背景下，提高能源效率已成为中国实现高质量发展、推动经济社会绿色转型的关键路径[1]。作为全球最大的能源消费国，中国长期面临能源利用效率偏低与资源约束趋紧的双重挑战，传统高能耗增长模式已难以适应发展需求，亟需实现“以更少的能源投入创造更高价值”的根本性转型。在此过程中，数字经济作为新一轮技术革命的核心驱动力，为这一转型提供了重要机遇。根据《中国数字经济指数(2023)》显示，数字经济正深刻重塑生产方式与资源配置结构，成为推动绿色转型的重要引擎[2]。

现有研究从数字基础设施、数字化转型、信息化发展水平等视角，探讨了数字经济对能源效率的影响，普遍认为数字技术进步可提升资源配置效率、缓解环境约束，但研究框架与方法仍有不足。其一，数字经济测度多依赖主观赋权或简单降维技术，难以客观筛选高维指标关键信息，影响测度稳健性[3]；其二，能源效率测度侧重经济产出与环境约束的权衡，忽视社会福利目标，无法全面反映综合绩效[4]；其三，作用机制研究仅停留于总体效应检验，缺乏中介效应视角下对传导路径的深入分析[5]。

针对上述不足，本文立足中国省级层面，系统考察数字经济对全要素能源效率的影响及内在机制。数字经济测度上，依据《中国数字经济指数(2023)》构建多维度指标体系，采用自适应弹性网筛选整合指标，提升客观性与有效性；能源效率测度上，构建兼顾能源、经济、环境、社会的E3S框架，采用方向性距离函数-随机前沿分析模型，精准刻画全要素能源效率；同时构建中介效应模型，系统识别内在传导机制，为数字经济赋能绿色低碳转型提供可靠经验证据。

## 2. 理论分析和研究假设

### 2.1. 数字经济对能源效率的直接影响

数字经济通过信息化、智能化手段深刻改变了传统生产方式和资源配置模式，对能源效率的影响呈现显著的双重性。一方面，数字经济能提升信息传递效率、优化要素配置，通过智能能源管理等数字技术应用，可直接提升能源系统整体效率[6]。另一方面，数据中心、通信网络等数字基础设施本身能耗高，且数字化带来的成本降低可能刺激生产规模和消费需求的扩张，从而带来能源消耗的增加[7]。

尽管存在双重效应，但已有研究普遍认为，在技术进步和政府支持等机制共同作用下，数字经济对能源效率的总体影响仍表现为正向促进作用。据此，本文提出以下假设：

假设 1 (H1): 数字经济发展水平对能源效率具有显著的促进作用。

## 2.2. 数字经济对能源效率的间接影响

在数字经济推动治理模式转型的背景下, 政府创新支持成为关键传导机制。数字经济通过赋能政府利用大数据等技术, 更精准地识别区域创新需求与技术短板, 从而优化财政科技支出结构与创新资源配置的针对性[8]。数字化治理工具的应用, 也进一步提升了政策实施的透明度与可预期性, 增强了创新支持体系的稳定性[9]。这种得到系统性增强的政府创新支持, 通过为绿色技术研发、节能技术推广提供稳定的资金与制度保障, 有效缓解了技术创新过程中的不确定性, 加快了高效技术的扩散与应用, 从而在数字经济与能源效率提升之间发挥桥梁作用[10]。

同时, 数字经济通过促进知识溢出与要素协同, 系统性地增强了技术研发能力。数字经济发展降低了区域间创新要素流动的壁垒, 推动了技术资源的跨区域整合与协同配置。数字环境下信息不对称程度下降, 科研资源配置效率改善, 技术创新的溢出效应与集聚效应更加突出[11]。区域整体技术研发能力的提升可推动能源利用领域的技术进步、生产工艺优化及产业结构向更加高效清洁的方向演进, 直接降低了单位产出的能源消耗[12]。据此, 本文提出以下假设:

假设 2 (H2): 数字经济发展通过增强政府创新支持来提升能源效率。

假设 3 (H3): 数字经济发展通过提升地区技术研发能力来提升能源效率。

## 3. 模型设计

### 3.1. 样本选择

本研究选取 2011~2023 年中国 30 个省级行政区作为研究主体, 重点探究数字经济对能源效率的影响。其中西藏自治区因数据可得性较差、核心指标存在较多缺失未纳入样本范围, 港澳台地区因统计口径与内地不一致未纳入研究。本文所使用的面板数据大多来源于《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》、中国碳核算数据库和国家统计局数据库等。针对某些年存在的缺失数据且难以通过其他途径获取的情况, 采用线性插值法进行补全以保证面板平衡。

### 3.2. 变量测算

#### 3.2.1. 被解释变量: 能源效率(Energy Efficiency, EE)

基于全要素能源效率的视角搭建 E3S 框架(能源、经济、环境、社会), 纳入了“社会福利”维度, 其测算核心在于优化经济产出、最小化环境污染, 最大化社会福利(如表 1) [13]。参考 Ren Wang 的文献, 采用方向性距离函数 - 随机前沿分析模型(DDF-SFA)测算能源效率[14]。其中生产总值以 2015 年为基期, 资本存量采用永续盘存法进行测算。

Table 1. Energy efficiency indicators

表 1. 能源效率指标

| 指标类别 | 一级指标 | 二级指标   | 指标类别 | 一级指标  | 二级指标      |
|------|------|--------|------|-------|-----------|
| 投入指标 | 劳动   | 从业人员数量 | 产出指标 | 期望产出  | 实际地区生产总值  |
|      | 资本   | 资本存量   |      | 非期望产出 | 居民人均可支配收入 |
|      | 能源   | 能源消费总量 |      |       | 二氧化碳排放量   |

#### 3.2.2. 解释变量: 数字经济(Digital Economy, DG)

参考《中国数字经济指数(2023)》确立一级指标, 结合 Lei Wu 等相关文献确定二级指标, 共计 4 个一

级指标, 25 个二级指标[15]。参考 Hui Zou 的文献, 利用自适应弹性网模型在处理多重共线性问题的优势进行指标筛选[16]。筛选后共计 13 个二级指标(如表 2)。再运用熵权法得出数字经济综合指数。

**Table 2.** Digital economy indicators  
**表 2.** 数字经济指标

| 一级指标 | 二级指标       | 自适应系数   | 入选 | 一级指标 | 二级指标       | 自适应系数   | 入选 |  |
|------|------------|---------|----|------|------------|---------|----|--|
| 基础设施 | 互联网域名数     | 0.0042  | 是  | 产业融合 | 电信业务量      | 9.9E-05 | 是  |  |
|      | 移动互联网用户    | 0.01040 | 是  |      | 企业拥有网站数    | -0.0063 | 是  |  |
|      | 移动电话普及率    | -0.0103 | 是  |      | 快递业务收入     | 0.0101  | 是  |  |
|      | 移动电话基站     | 0.0064  | 是  |      | 软件业务收入     | -0.0118 | 是  |  |
|      | 互联网宽带接入用户  | 0       | 否  |      | 高技术产业利润    | -0.0120 | 是  |  |
|      | 互联网宽带接入端口  | 0       | 否  |      | 信息技术服务收入   | 0       | 否  |  |
|      | 移动互联网接入流量  | 0       | 否  |      | 邮政业务量      | 0       | 否  |  |
|      | 长途光缆线路长度   | 0       | 否  |      | 快递业务量      | 0       | 否  |  |
|      | 数字技术相关专利   | 0       | 否  |      |            |         |    |  |
|      | 互联网企业研发经费  | 0       | 否  |      |            |         |    |  |
| 投融资  | 数字普惠金融指数   | 0.0046  | 是  | 数字治理 | 政府开放数据平台数量 | 0.0115  | 是  |  |
|      | R&D 人员全时当量 | 0       | 否  |      | 国家大数据综合试验区 | -0.0221 | 是  |  |
|      | R&D 经费     | 0       | 否  |      | 国家数字乡村试点   | -0.0102 | 是  |  |
|      |            |         |    |      | 宽带中国示范城市   | 0       | 否  |  |

### 3.2.3. 中介变量

(1) 技术研发能力(Technology Research and Development Capacity, TRDC)。参考 Ke Li 等的研究, 本文以规模以上工业企业研究与事业发展的 R&D 经费支出作为其代理变量, 反映各省份在研究与开发活动中的资金投入强度[17]。

(2) 政府创新支持(Government Innovation Support, GIS)。参考 Fang Liu 等的研究, 本文以财政支出中的科学技术支出占 GDP 的比值作为衡量指标。经 GDP 平减处理消除省份经济规模干扰, 以捕捉其在数字经济与能源效率间的传导路径[18]。

### 3.2.4. 控制变量

控制变量包括影响能源效率的其他因素。根据现有研究, 本研究的控制变量包括: 经济增长(Economic Growth, EG): 选取人均 GDP 反映经济增长状况; 产业结构(Industrial Structure, IND): 选取第二产业 GDP 占 GDP 比值作为衡量指标; 城镇化(Urbanization Level, UL): 选用城镇人口占总人口数的比值作为衡量指标; 对外开放(Openness, OP): 选用进出口 GDP 比值占总 GDP 比值作为衡量指标; 外资(Foreign Direct Investment, FDI): 参考各省统计年鉴, 选用实际利用外商直接投资占 GDP 比值作为衡量指标; 人口规模(Population, POP): 选取年末人口数, 运用常住人口数取对数作为最终衡量指标; 政府因素(Government Intervention, GI): 选取分地区财政支出中的科学技术支出占 GDP 比值作为衡量指标。

## 3.3. 模型设计

### 3.3.1. 基准回归模型

为检验数字经济对能源效率的影响, 构建如下基准模型[19]:

$$Y_{it} = \alpha + \sum_{k=0}^7 \beta_k X_{k,it} + \mu_i + \lambda_t + \epsilon_{it} \quad (1)$$

式(1)中,  $Y_{it}$ 表示省份  $i$  在年份  $t$  的能源效率;  $X_{0,it}$ 表示省份  $i$  在年份  $t$  的数字经济发展水平,  $X_{k,it}$  ( $k=1, \dots, 7$ )表示省份  $i$  在年份  $t$  的其他控制变量水平;  $\beta_k$ 为回归系数;  $\mu_i$ 和  $\lambda_t$ 分别为省份和年份固定效应;  $\epsilon_{it}$ 表示随机扰动项;  $\alpha$ 为模型截距项。

### 3.3.2. 中介效应模型

在检验数字经济对能源效率直接影响的基础上, 本文借鉴 Qizhen Wang 的中介效应检验方法, 考查数字经济能源效率的影响作用机制[20]。基于前文理论分析, 使技术研发能力(TRDC)与政府创新支持(GIS)作为中介变量, 建立模型:

$$M_{it} = \alpha_1 + \gamma_0 X_{0,it} + \sum_{k=0}^7 \beta_k X_{k,it} + \mu_i + \lambda_t + \epsilon_{2,it} \quad (2)$$

$$Y_{it} = \alpha_2 + \beta'_0 X_{0,it} + \sum_{k=0}^7 \beta_k X_{k,it} + \delta_0 M_{it} + \mu_i + \lambda_t + \epsilon_{2,it} \quad (3)$$

式(2)、(3)中  $M_{it}$  为中介变量, 表示省份  $i$  在年份  $t$  的技术研发能力或政府创新支持。

## 4. 结果与分析

### 4.1. 描述性统计

表 3 显示能源效率(EE)整体取值相对集中, 说明样本间能源效率虽有差异但波动幅度较小。数字经济发展水平(DE)取值范围介于 0.007 至 0.764 之间, 表明不同样本间数字经济发展水平差异较大, 部分地区已具备较高的数字经济发展基础, 而部分地区仍处于起步阶段。

Table 3. Descriptive statistics of variables

表 3. 变量描述性统计

| 变量类型  | 变量名称 | 变量符号 | 样本数 | 均值     | 标准差    | 最小值    | 最大值     |
|-------|------|------|-----|--------|--------|--------|---------|
| 被解释变量 | 能源效率 | EE   | 360 | 0.897  | 0.079  | 0.741  | 0.999   |
| 解释变量  | 数字经济 | DE   | 360 | 0.151  | 0.144  | 0.007  | 0.764   |
|       | 经济增长 | EG   | 360 | 10.977 | 0.443  | 9.889  | 12.207  |
|       | 产业结构 | IND  | 360 | 41.332 | 8.567  | 14.912 | 57.688  |
|       | 城镇化  | UL   | 360 | 61.247 | 11.628 | 36.41  | 89.600  |
| 控制变量  | 对外开放 | OP   | 360 | 25.899 | 26.994 | 0.765  | 144.086 |
|       | 外资   | FDI  | 360 | 1.649  | 1.769  | 0.001  | 21.192  |
|       | 人口规模 | POP  | 360 | 8.211  | 0.740  | 6.351  | 9.450   |
|       | 政府因素 | GI   | 360 | 0.479  | 0.272  | 0.151  | 1.405   |

### 4.2. 能源效应和数字经济的特征事实

#### 4.2.1. 能源效率的特征事实

图 1 展示了 2012~2023 年各省级行政区能源效率的特征事实, 其时空演变凸显三大核心特征: 一是波动中节奏分化, 各省效率并非单向变化, 而是呈现阶段性波动, 且不同省份的波动节奏存在明显差异。例如, 黑龙江、吉林在 2018 年后效率回升、颜色加深, 而山西、甘肃则在部分年份效率回落、颜色变浅。二是省际差异趋于收敛, 2012 年各省颜色跨度极大, 从最浅的黄色到最深的蓝色, 极值差异突出; 到 2023 年, 各省颜色分布更集中, 整体差距明显缩小。三是高效区分布局部化, 2012 年高效区在黑龙江、云南



### 4.3. 基准回归及内生性检验

表4的基准回归结果显示,在不同模型设定下,数字经济对能源效率的影响方向与显著性存在差异,这可能与数字经济兼具能耗扩张与效率提升的双重作用机制有关。未引入双向固定效应时,无论是否加入控制变量,数字经济发展伴随的高能耗投入,使其对能源效率表现出显著负向影响。而这些投入在不同地区往往与既有的发展模式和产业结构高度相关,因此引入双向固定效应但未加入控制变量时,地区长期结构差异被剔除,两种效应或相互抵消,导致结果不显著。在双向固定效应框架下加入控制变量后,数字经济通过优化资源配置、提升生产效率等路径带来的效率改善效应得以显现,其对能源效率的影响转为显著正向,这提示阶段性的波动并未改变其长期正向作用的趋势。该结果表明,在充分控制地区异质性和关键经济因素后,数字经济对能源效率的净效应表现为正向,前述负向或不显著结果主要反映了能耗扩张效应的影响。

**Table 4.** Benchmark regression and endogeneity test results

**表 4.** 基准回归及内生性检验结果

|                | 固定效应                   |                       |                        |                       | 工具变量                  |                       |
|----------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                | (1)<br>EE              | (2)<br>EE             | (3)<br>EE              | (4)<br>EE             | (5)<br>EE             | (6)<br>EE             |
| DE             | -0.2246***<br>(0.0762) | 0.0759<br>(0.0509)    | -0.6975***<br>(0.1430) | 0.1866***<br>(0.0660) | 0.3228<br>(0.2251)    | -0.0819<br>(0.3173)   |
| EG             |                        |                       | -0.0697<br>(0.1900)    | 0.1531<br>(0.1172)    | 0.1917<br>(0.1512)    | 0.0769<br>(0.1068)    |
| IND            |                        |                       | -0.0483<br>(0.0936)    | -0.0918<br>(0.0668)   | -0.0833<br>(0.0626)   | -0.1085*<br>(0.0652)  |
| UL             |                        |                       | 0.2653<br>(0.2130)     | 0.5375***<br>(0.1406) | 0.5856***<br>(0.1552) | 0.4426***<br>(0.1600) |
| OP             |                        |                       | -0.2582*<br>(0.1364)   | 0.1561*<br>(0.0854)   | 0.2318<br>(0.1578)    | 0.0070<br>(0.2007)    |
| FDI            |                        |                       | -1.2494***<br>(0.3507) | -0.1215**<br>(0.0594) | -0.0916<br>(0.0822)   | -0.1804*<br>(0.0953)  |
| POP            |                        |                       | 0.5200***<br>(0.0892)  | -0.5904<br>(0.5121)   | -0.8703<br>(0.7121)   | -0.0386<br>(0.8319)   |
| GI             |                        |                       | 0.5022***<br>(0.1043)  | 0.1553***<br>(0.0399) | -0.8703**<br>(0.7121) | 0.1963***<br>(0.0603) |
| Constant       | 0.6461***<br>(0.0230)  | 0.5890***<br>(0.0098) | 0.3737***<br>(0.0850)  | 0.5976**<br>(0.2789)  | 0.6837**<br>(0.0505)  | 0.4279<br>(0.3593)    |
| 第一阶段系数         |                        |                       |                        |                       | 0.4659***<br>(0.1322) | -0.0410<br>(0.0566)   |
| 第一阶段 F 值       |                        |                       |                        |                       | 19.284                | 17.576                |
| 个体固定           | NO                     | YES                   | NO                     | YES                   | YES                   | YES                   |
| 时间固定           | NO                     | YES                   | NO                     | YES                   | YES                   | YES                   |
| N              | 360                    | 360                   | 360                    | 360                   | 360                   | 360                   |
| R <sup>2</sup> | 0.0198                 | 0.0075                | 0.2176                 | 0.2014                | 0.1775                | 0.1719                |

注: (1) 括号内为标准误; (2) \*、\*\*、\*\*\*分别表示在 10%、5%、1% 水平下显著。下同。

为避免潜在的内生性问题, 本文采用工具变量法进行回归。选取如下两个工具变量: ① 历史邮电业务量(Historical Post and Telecommunication Business Volume, POST)。选取 1988 年各省份的邮电业务量, 并与样本期互联网普及率构造交互项。② 到杭州的运输成本(Transportation Cost, TRANS)。选取各省会城市到杭州的地理距离, 与国际原油价格的交互项, 并取其倒数。表 4 (5)、(6)列分别以 POST 和 TRANS 作为工具变量进行回归。第一阶段 F 值均大于 10, 说明工具变量不存在弱相关问题。对数字经济(DE)进行 Durbin-Wu-Hausman 检验, 得到的 p 值分别为 0.5378 和 0.3865, 均大于 0.05, 表明数字经济变量的内生性不显著, 验证了其作为解释变量的有效性。

#### 4.4. 稳健性检验

为确保基准回归结果的稳健性, 本文对样本进行了如下两个维度的调整(如表 5)。样本调整类: (1) 缩尾处理。将被解释变量(EE)与核心解释变量(DE)同时进行 3%双边缩尾处理。(2) 剔除特殊城市。与省辖市相比, 我国直辖市在行政级别、经济引领等方面具有一定优势, 通过剔除直辖市样本再次进行回归, 提升样本的同质性。(3) 剔除特殊年份。为排除公共卫生事件期间特殊因素的干扰, 本文剔除 2020 年样本数据重新进行回归; 变量设定类。(4) 变量滞后。将解释变量(DE)滞后一期, 以缓解反向因果和同期干扰的问题。(5) 模型替换。用 SBM 模型再次计算被解释变量(EE), 在无分布假设方面互补, 排除单一测度方法导致结果偏差。表 5 结果显示解释变量 DE 系数方向均和基准模型保持一致均为正, 且所有检验中, DE 的系数均在至少 5%的水平上显著, 由此证实了回归结论具有高度稳健性。

Table 5. Results of robustness test by sample adjustment

表 5. 样本调整类稳健性检验结果

|                | (1)<br>双边缩尾 3%<br>EE  | (2)<br>剔除直辖市<br>EE   | (3)<br>剔除疫情年份<br>EE   | (4)<br>变量滞后<br>EE    | (5)<br>模型替换<br>EE    |
|----------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| DE             | 0.1566***<br>(0.0521) | 0.1591**<br>(0.0461) | 0.1775***<br>(0.0674) | 0.1324**<br>(0.0539) | 0.1233**<br>(0.0482) |
| 控制变量           | YES                   | YES                  | YES                   | YES                  | YES                  |
| 个体固定           | YES                   | YES                  | YES                   | YES                  | YES                  |
| 时间固定           | YES                   | YES                  | YES                   | YES                  | YES                  |
| N              | 360                   | 312                  | 330                   | 330                  | 360                  |
| R <sup>2</sup> | 0.1902                | 0.1841               | 0.1934                | 0.1904               | 0.1123               |

#### 4.5. 异质性检验

鉴于中国省份在人口规模、经济发展水平、产业结构及地理区位上存在显著差异, 数字经济对能源效率的影响可能具有异质性。本文从上述四维度分组回归(如表 6): 人口规模、经济发展水平、产业结构按样本期指标中位数分组, 地理区位按胡焕庸线分为东南侧与西北侧。结果显示, 数字经济对能源效率的显著正向影响仅存在于小省份、低经济水平省份、偏服务业省份及东南侧省份, 其余组别效应不显著。可能的原因在于, 小省份、低经济水平及偏服务业地区凭借后发优势和跨越式发展, 可以直接借鉴先进经验、压缩传统工业化的高能耗阶段, 实现从传统经济向数字绿色经济的技术跃迁[21]。同时, 这些地区恰好处于数字经济发展水平的“门槛区域”, 边际改善空间最大, 因而数字经济的效率提升效应最为显著[22]。而大省份、高经济水平及偏工业地区, 能源需求基数大、产业结构刚性强, 数字经济的效率提升效应易被能耗扩张效应抵消。

**Table 6.** Results of heterogeneity test  
**表 6.** 异质性检验结果

|                | (1)<br>小省份<br>EE     | (2)<br>大省份<br>EE   | (3)<br>低经济<br>EE      | (4)<br>高经济<br>EE    | (5)<br>偏服务业<br>EE    | (6)<br>偏工业<br>EE   |
|----------------|----------------------|--------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| DE             | 0.1792**<br>(0.0895) | 0.0707<br>(0.0814) | 0.3143***<br>(0.0988) | -0.0249<br>(0.1001) | 0.1966**<br>(0.0869) | 0.0468<br>(0.0812) |
| Constant       | 0.5303**<br>(0.2617) | 0.4092<br>(0.4927) | 0.8171**<br>(0.3807)  | 0.3149<br>(0.2982)  | 0.5765**<br>(0.2728) | 0.3642<br>(0.3745) |
| 控制变量           | YES                  | YES                | YES                   | YES                 | YES                  | YES                |
| 个体固定           | YES                  | YES                | YES                   | YES                 | YES                  | YES                |
| 时间固定           | YES                  | YES                | YES                   | YES                 | YES                  | YES                |
| N              | 360                  | 360                | 360                   | 360                 | 360                  | 360                |
| R <sup>2</sup> | 0.2043               | 0.1534             | 0.2902                | 0.1675              | 0.1937               | 0.3053             |

## 5. 结论与建议

随着双碳政策深入推进，数字经济快速发展为提升能源效率提供了新机遇，本文以 2011~2023 年中国 30 个省为研究对象，实证检验了数字经济对全要素能源效率的影响及作用机制，主要得出以下结论：① 研究期内我国能源效率呈波动中节奏分化、省际差异趋敛、高效区局部化特征；数字经济则全域持续跃升、省际梯度分化强化、高值区空间集聚。二者时空演变既体现发展不平衡，也为后续协同提升提供了现实基础。② 数字经济对能源效率存在显著正向影响，该结论经内生性及一系列稳健性检验验证，且存在明显的区域异质性，小省份、低经济水平、偏服务业省份因其能源效率起点低，边际改善空间大，可通过技术跨越实现赶超，东南省份则受益于技术扩散与产业协同。③ 机制层面，数字经济主要通过两条路径传导对能源效率的正向影响，一是数字经济撬动地区研发经费投入，从技术层面优化能源利用方式；二是数字经济推动地方政府科技支出，为节能技术推广提供政策保障，放大政策对能源效率的正向激励。

基于上述研究结论，为进一步发挥数字经济对能源效率的提升作用，提出如下建议：一是推进数字经济高质量发展，加大 5G、工业互联网等数字基建投入，结合区域特征实施精准策略，对小省份、低经济水平地区等拓宽数字经济覆盖广度，对高经济水平、偏工业地区等强化技术产业融合，规避能耗扩张效应、释放效率提升效应；二是强化政府支持与技术创新协同，加大数字经济领域政策资金支持，倾斜核心数字技术与能源技术研发，完善知识产权保护，推动产学研协同加速技术融合转化；三是推动数字经济与能源效率提升深度融合，引导传统高耗能产业数字化转型，培育智慧能源等绿色数字新业态，同时培育居民数字素养与绿色低碳意识，开展相关培训，引导全民参与节能降耗，形成全域赋能格局。

## 基金项目

江苏大学科研立项项目 Y24A054。

## 参考文献

- [1] Song, M., Pan, H., Vardanyan, M. and Shen, Z. (2023) Evaluating the Energy Efficiency-Enhancing Potential of the Digital Economy: Evidence from China. *Journal of Environmental Management*, 344, Article ID: 118408. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118408>
- [2] Wan, G., Yang, L., Hao, Y. and Geng, Y. (2025) Assessing the Impacts of Digital Economy on Urban Green Development

- Efficiency. *Sustainable Futures*, **10**, Article ID: 100910. <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2025.100910>
- [3] Nie, Z. and Li, H. (2024) How Does the Digital Economy Improve Energy Eco-Efficiency? Evidence from Provincial Panel Data in China. *Polish Journal of Environmental Studies*, **34**, 2819-2834. <https://doi.org/10.15244/pjoes/188253>
- [4] Wang, J. and Wang, J. (2024) “Booster” or “Obstacle”: Can Digital Transformation Improve Energy Efficiency? Firm-Level Evidence from China. *Energy*, **296**, Article ID: 131101. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131101>
- [5] Zhao, C., Su, J. and Zhang, B. (2024) Digital Economy Agglomeration and Energy Efficiency Gain: Evidence from China. *Journal of Environmental Planning and Management*, **68**, 2348-2372. <https://doi.org/10.1080/09640568.2024.2313185>
- [6] Wang, Q., Zhu, Y., Zhang, Y. and Chang, C. (2025) Impact of Digital Economy on Energy Efficiency: Role of Emerging Technologies Such as Ai. *Energy Economics*, **150**, Article ID: 108840. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2025.108840>
- [7] Belkhir, L. and Elmeligi, A. (2018) Assessing ICT Global Emissions Footprint: Trends to 2040 & Recommendations. *Journal of Cleaner Production*, **177**, 448-463. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.239>
- [8] Mergel, I., Gong, Y. and Bertot, J. (2018) Agile Government: Systematic Literature Review and Future Research. *Government Information Quarterly*, **35**, 291-298. <https://doi.org/10.1016/j.giq.2018.04.003>
- [9] Grimmelikhuijsen, S.G. and Feeney, M.K. (2016) Developing and Testing an Integrative Framework for Open Government Adoption in Local Governments. *Public Administration Review*, **77**, 579-590. <https://doi.org/10.1111/puar.12689>
- [10] Wei, L., Lin, B., Zheng, Z., Wu, W. and Zhou, Y. (2023) Does Fiscal Expenditure Promote Green Technological Innovation in China? Evidence from Chinese Cities. *Environmental Impact Assessment Review*, **98**, Article ID: 106945. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106945>
- [11] Jiang, L., Li, B. and Zhang, M. (2025) The Impact of Digital Transformation on the Efficiency of Corporate Resource Allocation: Internal Mechanisms and External Environment. *Technological Forecasting and Social Change*, **215**, Article ID: 124107. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2025.124107>
- [12] Tsai, J. and Ho, C. (2025) Impact of Digital Economy on Energy Consumption and Energy Efficiency. *Sustainability*, **17**, Article 10831. <https://doi.org/10.3390/su172310831>
- [13] Ahn, K., Chu, Z. and Lee, D. (2021) Effects of Renewable Energy Use in the Energy Mix on Social Welfare. *Energy Economics*, **96**, Article ID: 105174. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105174>
- [14] Wang, R. and Duan, Y. (2023) Dynamic Comparison on the Technical Efficiency between China’s Epes and Pes: Two-Dimensional Measurement Based on SFA. *Journal of Cleaner Production*, **406**, Article ID: 136986. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136986>
- [15] Wu, L., Zhu, C. and Wang, G. (2024) The Impact of Green Innovation Resilience on Energy Efficiency: A Perspective Based on the Development of the Digital Economy. *Journal of Environmental Management*, **355**, Article ID: 120424. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120424>
- [16] Zou, H. and Zhang, H.H. (2009) On the Adaptive Elastic-Net with a Diverging Number of Parameters. *The Annals of Statistics*, **37**, 1733-1751. <https://doi.org/10.1214/08-aos625>
- [17] Li, K., Wang, H. and Xie, X. (2025) Mechanism and Spatial Spillover Effect of the Digital Economy on Urban Carbon Productivity: Evidence from 271 Prefecture-Level Cities in China. *Journal of Environmental Management*, **382**, Article ID: 125435. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125435>
- [18] Liu, F., Zhou, D. and Ding, H. (2026) How Digitalization Affects Energy Technology Innovation: The Role of Government Digital Regulation. *Energy Policy*, **209**, Article ID: 114982. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2025.114982>
- [19] Qiu, Y., Gao, C. and Song, N. (2025) Trickle-Down or Siphon: The Spillover Effects of the Digital Economy on Green Innovation from the Perspective of the Circular Economy. *Socio-Economic Planning Sciences*, **102**, Article ID: 102328. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2025.102328>
- [20] Wang, Q. and Gao, G. (2025) Impact of Digital Economy on Carbon Emission Efficiency: Evidence from a Quasi-Natural Experiment in “Broadband China” Pilot Cities. *Sustainable Futures*, **10**, Article ID: 101025. <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2025.101025>
- [21] Yi, G., Gao, J., Yuan, W., Zeng, Y. and Liu, X. (2025) Digital Economy, R&D Resource Allocation, and Convergence of Regional Green Economy Efficiency. *Sustainability*, **17**, Article 384. <https://doi.org/10.3390/su17020384>
- [22] Kong, X., Guo, J., Wang, Q. and Li, C. (2024) Exploring the Impact of Digital Economy on Energy Transition: Insights from Natural Resource Rent Dynamics. *Energy Economics*, **136**, Article ID: 107952.