

数字经济与能源高质量发展的时空演变与耦合协调实证分析

袁思雨¹, 舒晓惠^{2*}

¹吉首大学数学与统计学院, 湖南 吉首

²怀化学院商学院, 湖南 怀化

收稿日期: 2025年4月6日; 录用日期: 2025年4月27日; 发布日期: 2025年5月9日

摘要

推动数字经济与能源高质量发展的耦合协调对实现“碳达峰”、“碳中和”目标具有重要意义。本文采用投影寻踪模型对2013~2022年中国30个省份的数字经济和能源高质量发展指数进行测算, 并利用耦合协调度模型分析了两者在时空上的耦合协调发展特征。研究结果表明: (1) 2013~2022年间, 数字经济发展水平持续上升, 区域差异显著; 能源高质量发展水平上升幅度较小, 区域差异较小。(2) 各省份的耦合协调度均呈现上升态势, 但存在明显的梯度差异。针对以上研究, 文章提出加强政策支持与体制机制创新, 推动区域协调发展, 促进数字经济与能源高质量发展深度融合。

关键词

数字经济, 能源高质量发展, 投影寻踪模型, 耦合协调

The Spatiotemporal Evolution and Coupling Coordination Empirical Analysis of Digital Economy and High-Quality Energy Development

Siyu Yuan¹, Xiaohui Shu^{2*}

¹College of Mathematics and Statistics, Jishou University, Jishou Hunan

²Business School of Huaihua University, Huaihua Hunan

Received: Apr. 6th, 2025; accepted: Apr. 27th, 2025; published: May 9th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 袁思雨, 舒晓惠. 数字经济与能源高质量发展的时空演变与耦合协调实证分析[J]. 统计学与应用, 2025, 14(5): 1-10. DOI: 10.12677/sa.2025.145120

Abstract

The coupling coordination between digital economy and high-quality energy development plays a crucial role in achieving the “carbon peak” and “carbon neutrality” goals. This study employs the Projection Pursuit Model to calculate the digital economy and high-quality energy development indices for 30 provinces in China from 2013 to 2022. The Coupling Coordination Degree Model is then used to analyze the spatiotemporal coupling coordination characteristics of the two. The results of the study show the following: (1) Over the study period, the level of digital economy in China continuously improved, although there were significant regional disparities; the level of high-quality energy development exhibited an overall upward trend with relatively small differences across regions. (2) The coupling coordination degree of all provinces showed an upward trend, but there were noticeable gradient differences. Based on these findings, the paper suggests promoting regional coordinated development, deepening the integration of digital economy and high-quality energy development, and enhancing policy support and institutional innovation.

Keywords

Digital Economy, High-Quality Energy Development, Projection Pursuit Model, Coupling Coordination

Copyright © 2025 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

长期以来，中国一直高度重视气候变化问题，随着碳达峰碳中和目标的提出，应对气候变化已成为国家经济社会发展的重大战略。实现“双碳”目标的核心在于能源问题，在过去以传统能源为主的发展模式下，中国经济的高速增长伴随着资源过度消耗和环境污染的严峻问题。因此，为应对国内外形势的新发展需求，国家能源局发布了《关于促进新时代新能源高质量发展的实施方案》，明确提出要积极推动新时代能源高质量发展，着力构建“清洁、低碳、安全、高效”的能源体系[1]。能源高质量发展不仅是实现“双碳”目标的关键，也是保障经济持续健康发展的重要基础。

近年来，数字技术的迅猛发展及其在各行业的深度融合，为能源产业的高质量发展注入了新动能。数字经济通过大数据、区块链等技术的广泛应用，正在重塑能源生产、传输和消费的全流程，成为推动能源产业链现代化的重要动力源泉[2]。例如，数字经济能够提升城市对清洁能源的应用范围和效率[3]，并推动可再生能源的快速发展[4]。此外，研究表明推动数字经济与能源高质量发展的协同共振可以有效减少碳排放[5]。Jianda Wang [6]等的研究进一步证实，数字经济指数每增长 1%，将使能源高质量发展水平平均提升 0.191%。

尽管现有研究已从碳排放、能源消费等角度探讨了数字经济与能源发展的关系，但仍存在以下不足：第一，多数研究局限于单一视角，缺乏对数字经济与能源高质量发展耦合协调关系的系统性分析；第二，关于二者耦合协调的时空格局及动态演进的研究较为匮乏；第三，现有文献在定量研究方法上仍有待深化[7]-[9]。为此，本文采用基于遗传算法的投影寻踪模型测算数字经济与能源高质量发展水平，并通过构建耦合协调模型，测度并分析数字经济与能源高质量发展的耦合协调度，进一步揭示二者的互动机制。

本文的边际贡献主要体现在以下三个方面：第一，拓展了数字经济与能源高质量发展耦合协调关系的定量研究，丰富了二者互动机制的理论理解；第二，通过时空格局分析，揭示了二者耦合协调度的区域差异及动态演进特征；第三，基于遗传算法的投影寻踪模型为相关研究提供了新的方法论支持。

2. 能源高质量发展与数字经济的耦合机理

2.1. 数字经济对能源高质量发展的作用机理

数字经济为能源高质量发展创造条件。第一，数字经济推动了能源行业的高效发展。通过大数据、物联网、人工智能等技术，可以实时监测能源的使用情况和帮助优化能源资源配置，减少能源浪费的环节进而提高能源利用效率。第二，数字经济促进了能源行业的创新发展[5]。加速了清洁能源技术的研发与应用，如智能电网、储能技术和电动汽车等，推动了能源结构的绿色低碳转型。同时，数字平台的应用促进了全球能源互联网的建设，加强了跨国能源合作与交易，从而推动了全球范围内的能源创新。第三，数字经济推动了能源政策的智能化与精准化。大数据技术使得政府能够实时掌握能源生产、消费和碳排放情况，从而制定更为精准的政策。

2.2. 能源高质量发展对数字经济的作用机理

能源高质量发展为数字经济提供了有力支撑。第一，能源高质量发展为数字经济提供稳定的能源供给。数字经济的快速发展依赖于大量的能源消耗，尤其是云计算、大数据中心等行业，能源高质量发展通过优化能源生产、提升能源效率、推动清洁能源的应用等手段，确保能源的持续稳定供应。第二，能源高质量发展通过技术创新和产业协同，为数字技术的研发和应用开辟了新的场景和动力源泉。数字技术与能源领域的深度融合不仅加速了技术创新，还推动了产业的跨界融合。以智能城市建设为例，其发展既离不开数字技术的驱动，也依赖于高质量的能源供给来支撑其智能化运作。第三，能源高质量发展能够降低数字经济的发展成本。高效的能源系统减少了能源浪费，降低数字经济的运营成本。同时推动能源结构向清洁低碳转型，减少数字经济的碳排放，降低环境成本。

在碳中和背景下，能源高质量发展与数字经济之间的深度耦合已经成为新时代经济社会发展的重要趋势。能源高质量发展为数字经济发展提供能源保障，数字经济为能源高质量的创新发展提供科技支撑，二者相互促进，共同发展。

3. 评价指标体系和研究方法

3.1. 评价指标体系及研究对象

本文研究的对象为中国 30 个省份的能源高质量发展水平和数字经济发展水平(港澳台及西藏数据缺失)。基于数据的可得性和准确性原则，研究时段为 2013~2022 年。参考相关文献构建了能源高质量发展水平、数字经济发展水平指标体系。数据来源为《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国环境统计年鉴》、各省级行政区统计年鉴和社会经济发展统计公报，其中数字经济普惠金融指数来自北京大学数字金融研究中心，二氧化碳排放量来源于中国碳排放数据库 CEADs。

3.1.1. 数字经济

随着数字经济内涵的不断深化，学者们在测度数字经济发展水平方面进行了广泛的研究。本文综合参考相关研究成果[5] [10]，遵循数据的可获得性、科学性原则，从以下四个维度构建数字经济指标评价体系(表 1)。

Table 1. Digital economy indicator evaluation system table
表 1. 数字经济指标评价体系表

系统层	指标层	单位	属性	权重
数字基础设施	互联网宽带端口接入端口数	万个	+	0.1033
	网页数	万个	+	0.2730
	域名数	万个	+	0.2581
	移动电话用户数	万户	+	0.1797
	光缆线路长度	公里	+	0.0724
	移动电话普及率	部/百人	+	0.1742
数字产业化发展	信息传输、软件和信息技术服务业年末人数	人	+	0.3748
	电信业务总量	亿元	+	0.1258
	软件业务收入	万元	+	0.2758
产业数字化发展	有电商交易活动的企业占比	%	+	0.1166
	企业电子商务销售额	亿元	+	0.3093
	企业电子商务采购额	亿元	+	0.3176
	企业中每百人使用计算机数	台	+	0.2212
	企业中每百家企业拥有网站数	个	+	0.2160
	数字普惠金融指数	无	+	0.0989
数字创新发展	人均科技财政支出	万人/亿元	+	0.3083
	R&D 经费投入强度	%	+	0.2996
	R&D 人员全时当量	人年	+	0.2185

3.1.2. 能源高质量发展

参考学者们对能源高质量发展内涵的剖析[11]-[13]，本文从能源创新、能源协调、能源绿色、能源开放和能源共享五个方面来构建能源高质量发展的评价指标体系，具体见表 2。

Table 2. Energy high-quality development indicator evaluation system table
表 2. 能源高质量发展指标评价体系表

系统层	指标层	指标说明	单位	属性	权重
能源创新	研发经费投入强度	R&D 经费内部支出/GDP	%	+	0.3212
	科技投入强度	科技预算支出/财政预算总支出	%	+	0.4037
	人均专利授权量	专利授权数量/总人口	件/万人	+	0.3789
	研发人员投入强度	R&D 人员全时当量/总人口	%	+	0.3320
能源协调	能源效率	GDP/能源消耗量	亿元/万吨标准煤	-	0.0367
	能源自给率	地区能源生产总量/能源消费总量	%	+	0.0480
	人均能源消费量	能源消费总量/总人口	万吨标准煤/万人	-	0.1816
	第三产业比重	第三产业增加值/GDP	%	+	0.2275

续表

能源绿色	工业烟(粉)尘排放量	工业烟(粉)尘排放量	万吨	—	0.2094
	单位 GDP 废气排放量	二氧化硫排放总量/GDP	万吨/亿元	—	0.0263
	清洁能源发电量	(核能、风能、太阳能、水力)发电量	亿千瓦/小时	+	0.1086
	工业污染治理完成投资	工业污染治理完成投资	万元	+	0.1616
	一般工业固体废物处置量	一般工业固体废物处置量	万吨	—	0.1971
能源开放	外贸依存度	进出口总额/GDP	%	+	0.2030
能源共享	天然气普及率	天然气用气人口/总人口	%	+	0.3581
	天然气消耗比重	天然气消耗量/能源消耗总量	%	+	0.2700
	电力消耗比重	居民用电量/能源消耗总量	%	+	0.1671

3.2. 研究方法

3.2.1. 投影寻踪模型

投影寻踪是一种用来分析高维数据的统计方法，具有稳健性、抗干扰性和高精度等优点，且能够直接根据已有样本进行计算，客观确定指标权重。本文采用基于遗传算法的投影寻踪模型计算各省域数字经济和能源高质量发展水平综合指数，公式详见文献[14]。本文通过加速遗传算法求解最优投影方向向量(结果见表 1 和表 2 的“权重”列)。

3.2.2. 耦合协调度模型

耦合协调度模型可以用来刻画两个或多个系统间相互作用的程度。本文采用耦合协调度模型分析数字经济与能源高质量发展之间的耦合协调关系，参考已有研究[5]将耦合协调关系划分为 10 个类别，具体分类见表 3。

$$C = 2 \left[(U_1 \times U_2) / (U_1 + U_2)^2 \right]^{1/2}$$
 (1)

$$T = \alpha_1 U_1 + \alpha_2 U_2$$
 (2)

$$D = \sqrt{C \times T}$$
 (3)

式中 C 为耦合度， T 为综合评价指数， D 为协调发展度， U_1 、 U_2 为数字经济、能源高质量发展水平， α_1 、 α_2 为权重，各取 0.5。

Table 3. Coupling and coordination type classification
表 3. 耦合协调类型划分

耦合协调度	耦合协调等级	耦合协调度	耦合协调等级
0~0.09	极度失调	0.50~0.59	勉强协调
0.10~0.19	严重失调	0.60~0.69	初级协调
0.20~0.29	中度失调	0.70~0.79	中级协调
0.30~0.39	轻度失调	0.80~0.89	良好协调
0.40~0.49	濒临失调	0.90~0.10	优质协调

4. 结果与分析

4.1. 数字经济发展水平时空分布特征

如图 1 所示，2013~2022 年我国省域数字经济发展水平稳步增长，地区间数字经济发展水平具有明显差异，绝大部分地区 10 年间的平均增长率高于 5%。东部地区处于数字经济发展的“第一梯队”，如北京、广东、上海等地的数字经济发展水平显著高于其他地区，平均增长率也处于全国中上水平。重庆、贵州、四川等地的平均增长率处于全国前列，但数字经济发展水平一般。新疆、青海等地数字经济发展水平和平均增长率都很低，说明这些地区数字经济发展非常缓慢。

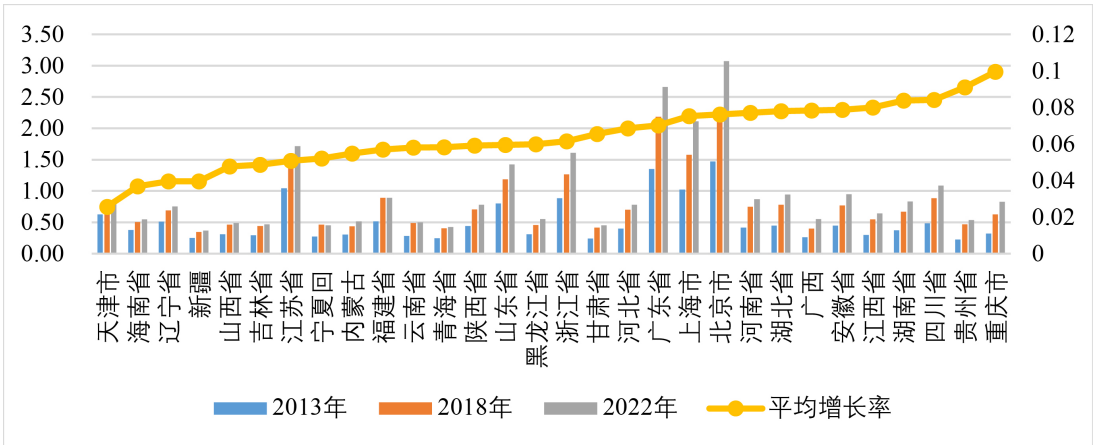


Figure 1. Digital economy development levels and average growth rates by province from 2013 to 2022
图 1. 2013~2022 年各省域数字经济发展水平和平均增长率

4.2. 能源高质量发展水平时空分布特征

如图 2 所示，2013~2022 年间大部分地区的能源高质量发展水平呈现上升趋势，但地区间的发展水平差异不大。除内蒙古外，其他地区的能源高质量发展水平平均增长率为正，但增长趋势较为平缓。中部地区如湖北、安徽等地增长率排在全国前列。内蒙古、新疆、山西等地的能源高质量发展水平不升反降，这些地区长期依赖煤炭产业，煤炭在能源消费中的比重过高，导致能源结构转型缓慢。

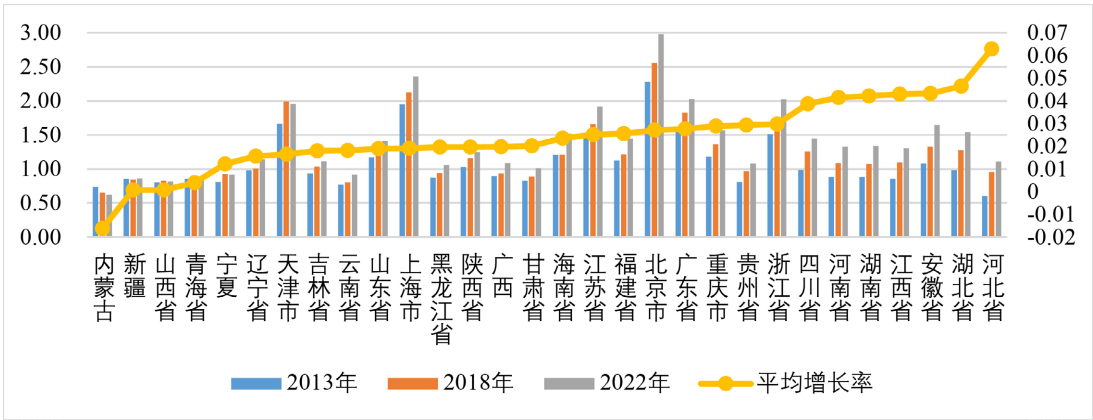


Figure 2. Energy high-quality development levels and average growth rates by province from 2013 to 2022
图 2. 2013~2022 年各省域能源高质量发展水平和平均增长率

4.3. 耦合协调度的时序特征

基于耦合协调度的标准进行划分，绘制了 2013 年、2018 年和 2022 年的数字经济与能源高质量发展耦合协调度的空间演化格局表，见表 4。总体来看，2013~2022 年数字经济与能源高质量发展的耦合协调度普遍提高，表明区域协调发展取得了显著成效。空间上呈现东高西低的发展态势，但中西部地区的协调度逐步改善，与东部沿海地区的差距进一步缩小。具体而言，2013 年，耦合协调水平总体偏低，处于耦合失调的省份占比达 80%，其中贵州省为极度失调，表明全国范围内在实现协调发展上有较大的提升空间，处于协调状态的省份均为东部地区，表明区域发展不平衡问题较为突出。2018 年，各省份的耦合协调度普遍有所提升，处于耦合失调的省份占比降至 73.3%，没有省份处于极度失调和严重失调状态，北京市由中级协调提升至良好协调。2022 年，耦合协调水平明显提高，处于耦合失调的省份占比降至 53.3%，大多数省份从失调状态逐步提升至协调状态，表明全国范围内的协调发展政策取得显著成效，部分地区 2018~2022 年间协调程度未提升，如内蒙古、新疆等地。同时期发展最为滞后的省份依旧集中在中西部地区，整体上东高西低的空间分布格局未发生变化。

Table 4. Spatial evolution pattern of coupling and coordination degree
表 4. 耦合协调度的空间演化格局

年份	2013	2018	2022
极度失调	贵州		
严重失调	河北、甘肃、青海、新疆		
中度失调	山西、内蒙古、吉林、黑龙江、江西、湖南、广西、云南、宁夏	内蒙古、新疆	内蒙古、新疆
轻度失调	辽宁、安徽、福建、河南、湖北、海南、重庆、四川、陕西	山西、吉林、黑龙江、江西、广西、贵州、云南、甘肃、青海、宁夏	山西、吉林、黑龙江、广西、贵州、云南、甘肃、青海、宁夏
濒临失调	山东	河北、辽宁、安徽、福建、河南、湖北、湖南、海南、重庆、陕西	河北、辽宁、江西、海南、陕西
勉强协调	天津、江苏、浙江	天津、山东、四川	天津、安徽、福建、河南、湖北、湖南、重庆、四川
初级协调	上海、广东	江苏、浙江	山东
中级协调	北京	上海、广东	江苏、浙江
良好协调		北京	上海、广东
优质协调			北京

进一步采用高斯核密度[10]估计方法分析我国能源高质量发展与数字经济之间的耦合协调时序特征，见图 3。随着时间的推移，核密度曲线不断右移，表明我国能源高质量发展与数字经济的耦合协调度持续提升；2013 年和 2018 年的核密度曲线主峰高度不变，但 2022 年主峰高度降低，且波峰变宽，反映出我国各省域能源高质量发展与数字经济的耦合协调度存在空间分布不均和分散性的特点；2013 年的核密度曲线图存在一个明显的主峰，随着时间的推移，另一个较弱的波峰逐渐消失，表明我国能源高质量发展与数字经济的耦合协调度并未出现多级分化现象。

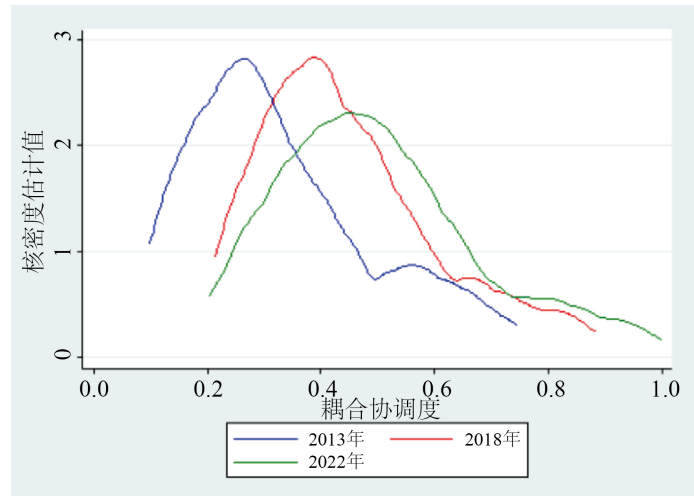


Figure 3. Kernel density distribution map of coupling and coordination degree between energy high-quality development and digital economy in China

图 3. 我国能源高质量发展与数字经济耦合协调度核密度分布图

5. 结论与建议

5.1. 结论

本文采用投影寻踪模型测算 2013~2022 年我国 30 个省域的数字经济和能源高质量发展指数，借助耦合协调度模型对二者耦合协调关系的时空格局、动态演进及区域差异进行分析，得出的主要结论如下：

第一，研究期内我国数字经济发展水平持续上升，但地区间差异大，北京、上海、广东和江苏的数字经济发展水平显著高于其他地区。主要原因是这些地区在数字基础设施(如高速网络、云计算平台等)上的投资力度较大，并且这些地区的互联网企业有较强的创新能力和市场占有率，推动了数字经济的飞速发展。与数字经济相比，能源高质量发展水平整体呈现上升态势，但各地区之间差异不大；除内蒙古外，其他地区的能源高质量发展水平平均增长率均为正。

第二，各省份的耦合协调度均呈现上升态势，但存在明显的梯度差异。从时间上看，2013~2022 年，处于耦合失调的省份占比由 80%降至 53.3%，说明在这期间，数字经济与能源高质量发展之间的协同程度有所提升。从空间分布上看，耦合协调度呈现由西部、中部、东部逐步递增的趋势，表明东部地区在推动数字经济与能源高质量发展的协同进程中相对更为领先，而西部地区则面临更多的挑战。

第三，北京、上海、江苏等地在数字经济发展与能源高质量发展上都位于全国前列，表现出较强的协同发展优势。这说明数字经济的快速发展为能源高质量发展提供了强有力的支撑，而能源领域的高质量发展也为数字经济提供了更为稳定的基础设施与资源保障。相比之下，部分中西部省份的数字经济与能源高质量发展的协同效应较弱，仍面临协调困难的问题。如陕西、内蒙古等在政府的大力推动下进行数字化转型，在数字经济发展方面得到了快速提升。作为中国的重要能源基地，这些地区煤炭、天然气等资源丰富，但由于过度依赖传统能源的开采和利用，在推动能源结构转型和提高能源效率方面相对滞后，能源高质量发展水平较低，使得两者的协同效应较弱。

5.2. 建议

针对上述结论，为促进我国数字经济和能源高质量协同发展提出以下建议：

第一，加大东部地区数字经济与能源高质量发展的联动支持。进一步加强东部地区数字经济与能源

高质量的协同发展, 发挥其领先优势。具体可表现为: 鼓励东部地区加大对数字技术创新的投入, 尤其是针对能源领域的数字化转型, 推动智慧能源、数字能源基础设施的建设, 增强能源资源的优化配置。提高对绿色能源企业的财政补贴、税收减免等支持, 推动东部地区在能源结构优化和低碳技术的应用上走在前列。

第二, 强化中西部地区数字经济与能源高质量发展的同步推进。缩小中西部地区与东部地区的差距, 推动中西部地区数字经济与能源高质量发展同步提升。增加对中西部地区的基础设施投入, 特别是在云计算、大数据等数字经济发展所需的基础设施方面。支持中西部地区高校和企业开展数字技术人才培养, 特别是能源行业中的数字化技术人才, 吸引高端人才向这些地区流动。对中西部地区的能源企业提供绿色转型奖励, 支持其从传统能源向新能源的转型。

第三, 优化资源型省份的能源高质量发展。提高资源型省份数字经济与能源高质量发展的协同效应, 推动能源结构转型与数字化升级。加大对传统能源资源依赖地区的政策扶持, 推动这些地区的传统能源向清洁能源转型, 制定清洁能源发展规划, 并鼓励与数字技术相结合的创新应用。支持建设数字化能源管理平台, 利用数字技术优化能源生产、传输和消费环节, 推动智慧能源系统建设, 提升能源管理的智能化水平。

第四, 加强区域合作与政策协调。促进地区间的协同合作, 共享数字经济与能源高质量发展的经验与成果。充分发挥耦合协调度较高地区的辐射带动作用, 推动区域间能源资源共享和互补, 建立跨区域能源协同发展机制, 提升整体能源高质量发展水平。加强地方政府间的政策协调, 制定更具区域适应性的政策, 构建完善的数字经济与能源高质量发展的监测评估体系, 定期评估各地区的实际发展情况, 及时发现问题并调整相关政策措施, 确保政策执行的灵活性和效果。

基金项目

湖南省社科基金西部项目, 编号 23YBX004; 吉首大学研究生校级科研项目, 编号 Jdy24036。

参考文献

- [1] 章建华. 全面构建现代能源体系推动新时代能源高质量发展[N]. 中国电力报, 2022-05-20(1).
- [2] Zhu, S., Song, M., Lim, M.K., Wang, J. and Zhao, J. (2020) The Development of Energy Blockchain and Its Implications for China's Energy Sector. *Resources Policy*, **66**, Article 101595. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101595>
- [3] Chen, P. (2022) Is the Digital Economy Driving Clean Energy Development? New Evidence from 276 Cities in China. *Journal of Cleaner Production*, **372**, Article 133783. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133783>
- [4] Wang, B., Wang, J., Dong, K. and Dong, X. (2023) Is the Digital Economy Conducive to the Development of Renewable Energy in Asia? *Energy Policy*, **173**, Article 113381. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113381>
- [5] 王淑贺. 数字经济与能源高质量发展的动态耦合及碳减排效应[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2025, 27(1): 75-87.
- [6] Wang, J., Wang, B., Dong, K. and Dong, X. (2022) How Does the Digital Economy Improve High-Quality Energy Development? The Case of China. *Technological Forecasting and Social Change*, **184**, Article 121960. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121960>
- [7] 周四军, 刘宁, 胡凌一. 基于 TOWA 算子的中国区域能源高质量发展测度研究[J]. 贵州商学院学报, 2023, 36(1): 52-65.
- [8] Liu, B. and Matsushima, J. (2019) Annual Changes in Energy Quality and Quality of Life: A Cross-National Study of 29 OECD and 37 Non-OECD Countries. *Energy Reports*, **5**, 1354-1364. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.09.040>
- [9] 曹予凝. 中国能源高质量发展水平测度及驱动因素分析[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津商业大学, 2023.
- [10] 李朋林, 候梦莹. 数字经济与清洁能源发展时空耦合及其驱动因素[J]. 地理与地理信息科学, 2024, 40(6): 135-142.
- [11] 唐葆君, 吴郢, 王崇州, 等. 省级能源高质量发展指数研究(2012-2022 年) [J]. 北京理工大学学报(社会科学版),

2023, 25(2): 17-23.

[12] 连樱洵, 林向义, 罗洪云. 中国能源高质量发展的空间溢出效应及驱动因素[J/OL]. 环境科学, 1-15.
<https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjlx.202405280>, 2024-11-12.

[13] 赵巍. 我国能源高质量发展水平测度及时空演变分析[D]: [硕士学位论文]. 大连: 东北财经大学, 2023.

[14] 黄勇辉, 朱金福. 基于加速遗传算法的投影寻踪聚类评价模型研究与应用[J]. 系统工程, 2009, 27(11): 107-110.