

doi:10.3969/j.issn.1672-626x.2024.06.001

# 数字经济赋能碳解锁效率提升的空间异质性分析

米国芳<sup>a,b</sup>, 吕森鑫<sup>a</sup>, 王媛媛<sup>a</sup>

(内蒙古财经大学 a. 统计与数学学院; b. 内蒙古经济数据分析与挖掘重点实验室, 呼和浩特 010070)

**摘要:**数字经济是助力“双碳”目标实现的重要引擎,厘清数字经济赋能碳解锁路径是实现高质量发展的应有之义。以2012—2021年我国30个省份的面板数据为研究样本,构建时空地理加权回归模型解析数字经济赋能碳解锁效率提升的空间异质性。研究表明:数字经济能够有效提升碳解锁效率。其中,河南、湖北等省份数字经济回归系数呈“U”型变化;上海、浙江、福建、宁夏的影响效应呈现先平稳后上升的变化趋势;重庆、四川、贵州、云南等省份数字经济对碳解锁效率的影响效应不断递减;甘肃与青海的影响变动趋势处于高位增长,北京、天津等则处于低位增长。因此应加大数字经济发展力度,实行不同主体分类发展,因地制宜制定发展策略,赋能碳解锁效率提升。

**关键词:**碳解锁效率;数字经济;时空地理加权回归模型;空间异质性

**中图分类号:**F124.5;F49;X321

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-626X(2024)06-0005-12

## 一、引言

2009年11月25日国务院常务会议上提出,“到2020年我国单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降40%~45%”,这是我国政府首次正式对外宣布控制温室气体排放的行动目标,标志着我国正式进入碳总量的控制时代。“十四五”时期是确保我国如期实现碳达峰的关键期,也是实现绿色低碳转型的重要窗口期,党的二十大报告指出,“积极稳妥推进碳达峰碳中和”,这是建设人与自然和谐共生现代化的迫切需要。发展低碳经济已然成为我国转变经济发展模式的内在要求。传统高碳经济的根源在于“碳锁定”,因此发展低碳经济的核心在于“碳解锁”。而我国能源结构一直处于“多煤、缺油、少气”状态,特有的能源结构决定了我国将在相当长时期内依赖高碳化石能源,经济发展也将长期锁定在以高碳化石能源为基础的能源体系中。因此,要解决当前的碳锁定问题,必须找到碳解锁的方法,提高碳解锁的效率。

在新一轮科技革命浪潮席卷全球背景下,新的数字技术不断涌现,数字经济加速发展。能源革命和

**收稿日期:**2024-04-15

**基金项目:**内蒙古自然科学基金项目“内蒙古数字经济与实体经济融合发展驱动碳减排的非线性动态效应研究”(2023LHM S07007);内蒙古自治区高校科研人文社会科学一般项目“内蒙古数字经济对实体经济影响效应测度及融合发展路径研究”(NJSY23035);黄河流域高质量发展研究中心项目“数字经济赋能黄河流域生态环境治理的空间效应及治理策略研究”(24HND06);区域数字经济与数字治理研究中心项目“双碳目标下内蒙古数字经济抑制碳回弹效应的作用机制与实践路径”(szzl202403)

**作者简介:**米国芳(1981—),女,河北邢台人,内蒙古财经大学统计与数学学院教授,管理学博士,研究方向为能源统计与可持续发展;吕森鑫(1999—),女,吉林长春人,内蒙古财经大学统计与数学学院硕士研究生,研究方向为宏观经济统计;王媛媛(1998—),女,内蒙古巴彦淖尔人,内蒙古财经大学统计与数学学院硕士研究生,研究方向为宏观经济统计。

数字革命的深度融合,绿色低碳经济与数字经济的碰撞,为经济高质量发展指明了新方向。数字经济是未来发展的趋势所向,不仅可以推动我国经济的高质量发展,还可以起到减少碳排放的作用。其技术深入传统产业,减少传统产业生产制造阶段和运营阶段的碳排放,缓解传统产业碳锁定的困境,助力碳解锁效率得到提升。在“双碳”目标背景下,如何充分挖掘数字经济赋能碳解锁的潜力,使其在解锁过程中发挥“乘法”效应,加快提升碳解锁效率,是我国经济实现高质量发展的题中之义。为此,本文将数字经济与碳解锁效率纳入同一框架,实证分析数字经济对碳解锁效率的影响关系,为我国“双碳”目标的实现提供新思路和新途径。

## 二、文献综述

碳解锁的相关研究主要集中于碳解锁内涵的提出、碳解锁路径和驱动机制研究、碳解锁效率测度和影响因素分析。碳解锁的提出源于碳锁定。碳锁定最早由西班牙学者 Unruh(2000)提出,他认为制度与技术相互加强形成“技术-制度复合体”(TIC),致使现代工业经济“锁定”在碳基能源系统中,导致了持续的市场失灵和政策失灵,阻碍了低碳技术的应用和扩散<sup>[1]</sup>。Unruh(2002)提出现代工业发展必须突破当前的碳锁定状态,并进行“碳解锁”,其本质是对碳基技术体制进行替代或对其进行低碳化转型<sup>[2]</sup>。基于技术、制度角度的碳解锁路径方面,Sanya(2011)认为提高技术水平、优化市场结构能够帮助缓解美国电力市场的碳锁定困境<sup>[3]</sup>。Patrick(2014)研究发现政府可以通过制定相关政策对交通基础设施进行严格管制,以此打破交通行业的碳锁定现状<sup>[4]</sup>。Xu等(2021)认为技术进步可以通过直接或间接的手段实现碳解锁<sup>[5]</sup>。王岑(2010)认为碳解锁的关键在于技术创新及其体系的支持<sup>[6]</sup>。杨玲萍等(2011)从技术锁定和制度锁定视角对碳解锁进行分析,研究发现应从“技术-制度复合体”的基本要素出发,采取末端治理方法或连续性方法制定政策措施的解锁模式<sup>[7]</sup>。屈锡华等(2013)认为通过发展可再生能源,提高非化石能源利用比重,能够实现高碳能源结构向低碳能源结构的过渡,进而推动碳解锁<sup>[8]</sup>。郭进等(2015)认为制度创新和技术进步有利于实现碳解锁<sup>[9]</sup>。碳解锁驱动机制方面,梁中等(2019)聚焦于区域碳解锁的微观驱动机制,指出要完善治理驱动机制,设置区域统筹碳解锁机制,重视公众的监管驱动力,稳步推动碳解锁<sup>[10]</sup>。邹瞳等(2023)从时局、社会-技术体制、生态位三个层次剖析“高碳解锁”向低碳发展转型的内在机制,表明“高碳解锁”向低碳发展转型的实质是社会-技术体制由“高碳锁定”向“低碳锁定”转变的动态过程<sup>[11]</sup>。碳解锁效率测度方面,张济建等(2021)以长江经济带为研究对象,采用SE-DEA-Malmquist模型测算碳解锁效率<sup>[12]</sup>。郝亚男等(2023)采用SBM模型测算黄河流域碳解锁效率,研究发现黄河流域碳解锁效率逐年上升<sup>[13]</sup>。程娜等(2023)采用欧几里得距离法合成碳解锁指数,以此表征碳解锁水平<sup>[14]</sup>。碳解锁影响因素的研究相对较少,董碧滢等(2023)构建固定效应模型研究绿色技术创新对碳解锁的驱动效应,研究发现绿色技术创新存在显著的碳解锁效应<sup>[15]</sup>。

目前,数字经济对于碳解锁效率的影响研究处于起步阶段,更多的研究聚焦于数字经济对碳排放的影响和“绿色悖论”两个方面。数字经济影响碳排放的研究是学术界的热点议题。谢云飞(2022)认为数字经济促进了产业结构的低碳转型,优化了传统产业生产方式,改善了以化石能源为主的能源利用结构,减少了碳排放<sup>[16]</sup>。邓荣荣等(2022)认为数字技术的应用有助于加强政府对能源的监管,提高能源监管的准确性和有效性,进而降低不同种类污染物的排放量<sup>[17]</sup>。徐维祥等(2022)认为数字技术的普及使城市资源配置更为有效,产生经济外部性,进而降低城市碳排放量<sup>[18]</sup>。缪陆军等(2022)认为数字经济打破了地域限制,降低了知识搜索和管理成本,提高了企业的创新效率,有助于加快企业绿色低碳技术的研发以及企业绿色环保材料的有效利用,从而减少碳排放<sup>[19]</sup>。韩晶等(2024)考察数字经济对低碳发展的赋能机制,研究表明数字经济通过提高资源配置效率、促进产业结构升级赋能城市低碳发展<sup>[20]</sup>。米国芳等(2024)认为数字经济与实体经济融合发展对碳排放的影响呈现倒“U”型非线性关系<sup>[21]</sup>。然而,数字经济中也存在一定的“绿色盲区”,会对

环境产生负外部性,导致碳排放增加,从而产生“绿色悖论”效应。Salahuddin等(2015)认为互联网技术的快速发展并未使电力效率提高,反而增加了电力消耗;电力的主要来源是火力发电,而火力发电消耗了大量的煤炭,导致碳排放不断增加<sup>[22]</sup>。Li等(2021)指出广泛应用数字技术会加剧能源资源的开发,引发一系列环境问题<sup>[23]</sup>。朱东波等(2022)认为数字经济发展的规模效应也会增加碳排放<sup>[24]</sup>。

梳理相关文献发现,国内外学者对碳解锁路径开展了广泛研究,形成了较为全面的理论体系框架,但是有关碳解锁的实证研究还不充分,数字经济背景下国内学者更倾向于研究碳减排效应,对数字经济的碳解锁效应及策略的研究较少。因此,相较于以往研究文献,本文的边际贡献在于:第一,丰富了碳解锁效率的测度方法;第二,提炼数字经济提升碳解锁效率的理论机制,并构建时空地理加权回归模型实证分析数字经济影响碳解锁效率的空间异质性,为数字经济赋能碳解锁效率提升及其作用路径提供新的研究视角,为政府制定数字经济赋能碳解锁效率策略提供理论支撑。

### 三、理论分析与研究假设

#### (一)数字经济赋能碳解锁效率提升

数字经济凭借其技术特点和合理配置资源的能力,在产业领域实现了减污降碳协同增效。从技术效应角度分析,数字经济领域的大数据、云计算、人工智能等技术可以改变传统行业的生产运行方式,使传统行业的能源效率大幅提升,从而提高碳解锁效率。具体来看,数字经济自身所具备的联通功能能够有效缓解信息不对称问题,使各主体之间信息高效流通和共享,有效减少要素搜索、交易、复制和匹配等过程的成本和时间,为政府、企业和公众及时调节要素持有量提供指导,为企业统筹制定合理有效的生产计划,引领企业不断进行低碳转型,从而降低碳排放,提高碳解锁效率。从资源配置效应角度分析,数字经济能够推动区域要素重新配置,提高资源配置效应,改善地区碳排放污染,进而提高碳解锁效率。具体来看,通过产业数字化的发展,能够吸纳行业创新型人才和高精尖技术人才,实现人才、资本等资源要素的重新配置。这不仅能够有效提高企业生产效率,还能促使产业结构向高端化、智能化、绿色化方向发展,以替代效应淘汰高耗能、高排放的污染产业,使碳排放污染得到有效改善,实现碳基技术体制的替代,进而为碳解锁提供可实现的路径。基于此,提出以下假设:

H1:数字经济赋能碳解锁效率的提升。

#### (二)数字经济对碳解锁效率的影响存在空间异质性

不同区域的经济活动发展过程存在客观差异,数字经济同样存在不平衡的空间异质性。潘为华等(2021)基于我国31个省份的面板数据,验证了数字经济发展处于“东高西低”的空间格局<sup>[25]</sup>。随着数字经济不断发展,不同区域数字鸿沟和数字红利不断显现,区域间的信息传递不断加深,有利于驱动能源利用结构向低碳转型,从而提高区域碳解锁效率。此外,各个区域所处地理位置不同,自然资源、经济发展速度均存在差异,碳解锁相关政策依据各个区域的地域特点而制定,因此,数字经济对各个区域碳解锁效率的影响程度不同。基于此,提出以下假设:

H2:数字经济对碳解锁效率的影响存在空间异质性。

### 四、研究设计

#### (一)模型构建

地理加权回归模型(GWR)将样本点的数据地理位置引入回归模型,补充了样本数据地理位置,模型形式如下:

$$\begin{aligned} eff_j = & \alpha_0(c_j, d_j) + indige_{j1}\alpha_1(c_j, d_j) + ind_{j2}\alpha_2(c_j, d_j) + open_{j3}\alpha_3(c_j, d_j) \\ & + ur_{j4}\alpha_4(c_j, d_j) + fina_{j5}\alpha_5(c_j, d_j) + \sigma_j \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中,  $eff$ 表示碳解锁效率,  $indige$ 表示数字经济。  $\alpha_0(c_j, d_j)$ 为时空截距项;  $(c_j, d_j)$ 表示样本点  $j$  的地理坐标系;  $\alpha_n(c_j, d_j)$ 表示样本点  $j$  的第  $n$  个变量的回归系数, 即模型地理坐标  $(c_j, d_j)$  的权重;  $x_{jn}$  是样本点  $j$  的第  $n$  个解释变量,  $\sigma_j$  为残差。

在地理加权回归模型的基础上, 考虑时间影响, 建立时空地理加权回归模型(GTWR), 更好地处理时间和空间同时作用时数据的非平稳性, 模型形式如下:

$$\begin{aligned} eff_j = & \alpha_0(c_j, d_j, t_j) + indige_{j1}\alpha_1(c_j, d_j, t_j) + ind_{j2}\alpha_2(c_j, d_j, t_j) + open_{j3}\alpha_3(c_j, d_j, t_j) \\ & + ur_{j4}\alpha_4(c_j, d_j, t_j) + fina_{j5}\alpha_5(c_j, d_j, t_j) + \sigma_j \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中,  $t$ 表示时间影响, 其他符号说明同式(1)。

## (二)变量选取与说明

### 1. 被解释变量——碳解锁效率( $eff$ )

本文在充分考虑“社会经济-生态环境”双重效益的基础上, 采用含非期望产出的超效率SBM模型测度碳解锁效率, 丰富了碳解锁的测度。其一, 传统的DEA模型基于生产理论, 一般情况下考虑同向增加产出或者同向减少投入, 因此效率值通常被高估。而超效率SBM模型充分考虑了投入和产出松弛变量对效率水平的影响, 准确衡量了决策单元的投入产出效率, 也可以对多个有效决策单元进行比较。其二, 本文基于经济发展和碳排放两个角度划分产出水平。经济发展水平的提高是我国低碳发展的理想状态, 因此将经济发展水平作为期望产出。而碳排放量的增加是我国低碳发展尽量避免的, 因此将碳排放量作为非期望产出。依据投入、期望产出以及非期望产出之间的作用联系, 构建含非期望产出的超效率SBM模型如下:

$$\rho = \min \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{x}_{ik}}{s_1 + s_2 \left( \sum_{l=1}^{s_1} \bar{y}_l^d + \sum_{k=1}^{s_2} \bar{y}_k^u \right)} \quad (3)$$

$$s.t. \begin{cases} \bar{x} \geq \sum_{j=1, j \neq j_0}^n x_{ij} \lambda_j; \bar{y}^d \leq \sum_{j=1, j \neq j_0}^n y_{ij}^d \lambda_j; \bar{y}^u \geq \sum_{j=1, j \neq j_0}^n y_{ij}^u \lambda_j \\ \bar{y}^d \leq y_{ij}^d; \bar{y}^u \geq y_{ij}^u \\ \lambda_j \geq 0, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; l = 1, 2, \dots, s_1; k = 1, 2, \dots, s_2 \end{cases} \quad (4)$$

式(3)和式(4)中,  $n$ 表示决策单元的个数, 即样本省份个数。  $m$ 表示投入;  $s_1$ 表示期望产出;  $s_2$ 表示非期望产出;  $x$ 为投入矩阵中的元素;  $y^d$ 为期望产出元素,  $y^u$ 表示非期望产出元素;  $\rho$ 为效率值,  $\rho$ 越大, 说明效率值越大, 即碳解锁效率值越大, 碳解锁水平就越高。

投入指标主要从制度和制度两个维度选取。制度投入方面, 选取了环境规制水平和制度质量水平两个指标。地方政府基于其治理环境的意愿选择环境规制策略, 用地区环境污染治理完成投资额表示政府治理环境的意愿, 以此刻画环境规制水平。参考刘伟丽等(2020)的做法<sup>[26]</sup>, 采用市场中介组织的发育和法治环境评分表示制度质量水平。技术投入选取技术经费、技术人才两个方面的投入。技术经费具体为地区规模以上工业企业开发新产品经费; 技术人才具体为地区规模以上工业企业R&D人员全时当量。期望产出采用各样本省份地区生产总值表示。非期望产出用地区碳排放量来表示, 根据《2006年IPCC国家温室气体清单指南》, 并参考于向宇等(2019)的做法<sup>[27]</sup>, 采用碳排放系数法计算样本省份碳排放量<sup>[28]</sup>。碳解锁效率评价指标体系如表1所示。

表1 碳解锁效率评价指标体系

指标	类别	具体指标构成		变量说明
投入指标	投入变量	制度投入	环境规制水平	地区环境污染治理完成投资额
			制度质量水平	市场中介组织的发育和法治环境评分
		技术投入	技术经费	地区规模以上工业企业开发新产品经费
			技术人才	地区规模以上工业企业 R&D 人员全时当量
产出指标	期望产出	经济发展水平		地区生产总值
	非期望产出	碳排放量		地区碳排放量

## 2. 解释变量——数字经济(*indige*)

本文参考刘军等(2020)<sup>[29]</sup>、王军等(2021)<sup>[30]</sup>、盛斌等(2022)<sup>[31]</sup>的研究,从数字基础设施、数字产业发展、数字技术应用和数字发展环境四个维度构建指标体系(见表2)。并采用熵值法进行测算。

表2 数字经济评价指标体系

目标	一级指标	二级指标	单位	变量属性	权重(%)
数字经济	数字基础设施	移动电话普及率	部/百人	+	2.69
		人均互联网宽带接入端口数	万个/万人	+	1.93
		人均互联网网页数	万个/万人	+	22.75
		人均互联网域名数	万个/万人	+	11.39
	数字产业发展	人均软件业务收入	万元/万人	+	14.64
		电子信息制造业企业数	个	+	7.95
	数字技术应用	人均快递业务收入	万元/万人	+	15.55
		有电子商务交易活动的企业数	个	+	14.14
	数字发展环境	数字经济就业人员比例	%	+	5.05
		数字经济专利申请比例	%	+	2.16
		数字普惠金融指数	—	+	1.73

## 3. 控制变量

影响碳解锁效率的因素是多维的。本文选取的控制变量包括:产业结构(*ind*)、对外开放程度(*open*)、城镇化水平(*ur*)和政府干预(*fina*)。其中,借鉴秦炳涛等(2023)的做法<sup>[32]</sup>,以第二产业增加值与地区生产总值之比作为衡量产业结构的指标;借鉴吴传清等(2023)的做法<sup>[33]</sup>,采用外商直接投资与地区生产总值的比值刻画对外开放程度;借鉴王喜莲等(2024)的做法<sup>[34]</sup>,采用城镇常住人口占总常住人口的比重表征城镇化水平;借鉴赵晓春等(2023)的做法<sup>[35]</sup>,采用一般预算内支出与地区生产总值的比值度量政府干预。具体变量的描述性分析见表3。

### (三)数据来源

在样本选取方面,基于数据的科学性与可得性,本文以2012—2021年为样本时期。由于西藏自治区以及港澳台地区数据缺失严重,并未列入研究范畴,最终以我国30个样本省份为研究对象,具有较强的代表性。原始数据来源于2013—2022年的《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国科技统计年鉴》《中国分省份市场化指数报告》以及各省份统计年鉴,部分缺失数据由线性插值法填补。

表3 变量的描述性分析

变量	平均值	标准差	最小值	最大值
<i>eff</i>	0.5368	0.3360	0.1093	2.7145
<i>indige</i>	0.0950	0.0993	0.0084	0.6846
<i>ind</i>	0.4016	0.0786	0.1597	0.5865
<i>open</i>	0.0193	0.0175	0.0001	0.1210
<i>ur</i>	0.6023	0.1181	0.3630	0.8960
<i>fin</i>	0.2626	0.1125	0.1050	0.7583

## 五、实证分析

### (一)碳解锁效率的时空特征分析

借助 matlab2020 软件,测算得到 2012—2021 年我国 30 个样本省份碳解锁效率值,并绘制折线图分析我国碳解锁效率总体发展情况(见图 1)。

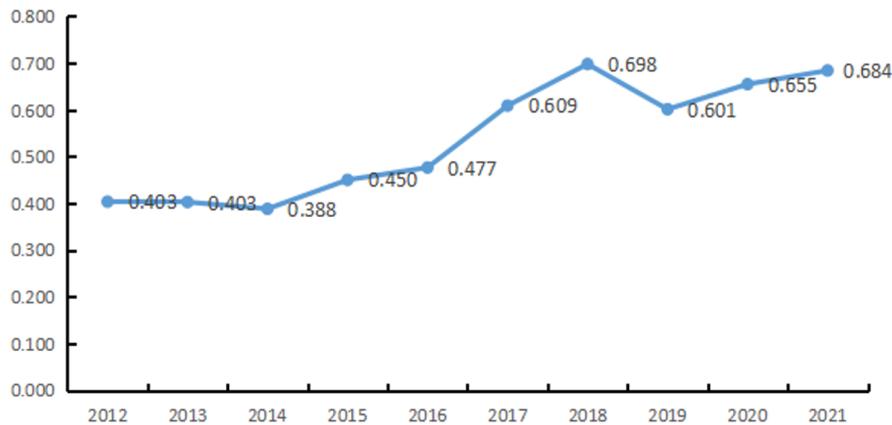


图1 2012—2021年碳解锁效率平均值

从整体时间演进来看,2012—2021年我国碳解锁效率平均值总体呈现先下降后升高、再下降再升高的状态,2012—2014年我国碳解锁效率总体均值为0.398,碳解锁效率由2012年的0.403下降到2014年的0.388,究其原因,可能在于我国工业发展正处于转型初期,伴随着能源消耗过大、环境污染严重等问题,使得碳解锁效率持续下降。2015—2018年碳解锁效率总体均值为0.559,碳解锁效率由2015年的0.450上升至2018年的0.698,2018年迎来碳解锁效率的峰值。究其原因,可能在于相关环境政策的颁布。2014年1月,国家环保部与全国31个省份签署了《大气污染防治目标责任书》,2016年3月,《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》发布,强调要加大环境综合治理力度。这些政策的颁布有利于碳解锁效率的提高。2019—2021年碳解锁效率总体均值为0.647,2019年碳解锁效率短暂下降,可能与经济发展以及相关产业发展所需的能源需求有关。2020—2021年碳解锁效率开始稳步提高,表明“十三五”期间我国污染防治力度加大,生态环境明显改善。整体来看,我国碳解锁效率总体较低,但呈现出良好的发展势头,发展空间较大。

空间莫兰指数用来反映所有空间单元在整个区域上与周边地区的平均关联程度,本文借助 Stata 软件绘制碳解锁效率的局部莫兰指数(见图 2),从空间角度分析碳解锁效率的区域关联性与空间异质性。

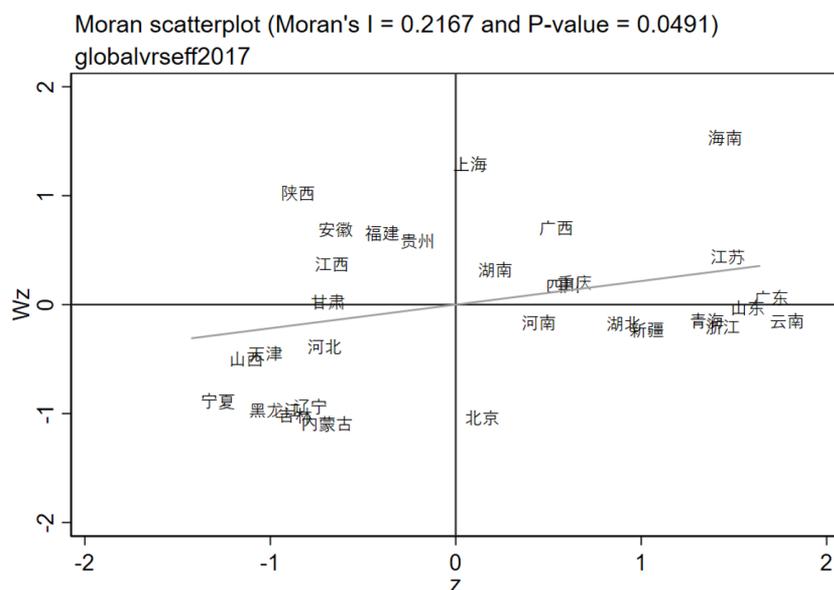


图2 碳解锁效率局部莫兰指数

由图2可知,莫兰指数为0.2167,通过了显著性检验,说明碳解锁效率的空间分布存在显著的正相关特征,碳解锁效率易受其周边地区影响,与邻近地区的碳解锁效率较为接近。整体分析来看,我国30个样本省份碳解锁效率有所差异,可能是由于一些地区受自身经济发展水平的限制,各地区资源禀赋不同,生态环境承载力存在差异,因地制宜地实施相关法律政策等原因,导致不同地区碳解锁效率具有较大差距。碳解锁效率的空间集聚分为四种:第一象限为高-高集聚区,表示碳解锁效率高的省份其周边省份的碳解锁效率也高;第二象限为低-高集聚区,表示碳解锁效率低的省份其周边省份碳解锁效率高;第三象限为低-低集聚区,表示碳解锁效率低的省份其周边省份碳解锁效率也低;第四象限为高-低集聚区,表示碳解锁效率高的省份其周边省份碳解锁效率低。高-高集聚区包括湖南、广西、四川、重庆、江苏、海南、广东、山东8个样本省份,这些省份地处中南地区和西南地区。中南地区制造业等传统产业产生的碳排放量相对较低,生产过程中使用清洁能源,西南地区大力推行清洁能源交易,加快实现动能转换,因此这些省份的碳解锁效率较高。低-高集聚区包括甘肃、江西、贵州、上海、福建、安徽、陕西7个样本省份,分布较为分散,其自身的碳解锁效率较低,但相邻地区碳解锁效率较高。低-低集聚区包括北京、天津、河北、山西、宁夏、黑龙江、内蒙古、吉林、辽宁9个样本省份,这些省份地处我国华北地区和东北地区。华北地区是国家污染治理的重点地区,其煤炭消费总量较大,因此碳解锁效率相对处于较低水平。而作为典型老工业基地的东北地区,工业进程加快,能源消耗和碳排放强度高于全国平均水平,技术发展滞后,环保压力较大,在实施碳减排政策时面临诸多困难。高-低集聚区包括河南、湖北、新疆、青海、浙江、云南6个样本省份。新疆与青海地处西北,自然资源较为丰富,不仅能够充分满足自身需要,还能够通过大规模输送和调度,一定程度上解决我国其他地区可再生能源替代传统化石能源的转型难题。

## (二)GWR模型与GTWR模型回归结果对比分析

本文使用GWR模型和GTWR模型对比分析数字经济对碳解锁效率的影响,从中选择合适的模型对其进行空间差异分析,表4为两个模型估计结果对比。

表4 GWR和GTWR模型对比

模型	AIC	R <sup>2</sup>	调整后的R <sup>2</sup>	Sigma
GWR	-103.6690	0.7301	0.7255	0.1746
GTWR	-135.3980	0.7939	0.7904	0.1525

由表4可知,GTWR模型与GWR模型相比具有较高的拟合程度,GTWR模型修正后的 $R^2$ 为0.7904,明显高于GWR模型。GTWR的AIC值为-135.3980,低于GWR模型的AIC值。GTWR的Sigma值为0.1525,明显低于GWR模型的Sigma值。因此,与GWR模型相比,GTWR模型可以更好地拟合数字经济对碳解锁效率的影响。GTWR模型回归系数的显著比例如表5所示。

表5 GTWR模型回归系数的显著比例

变量	显著比例(%)
<i>indige</i>	95.67
<i>ind</i>	67.00
<i>open</i>	74.33
<i>ur</i>	83.67
<i>fina</i>	72.00
常数	86.33

数字经济影响碳解锁效率的回归系数在所有样本区间(所有年份及所有地区)内的显著比例为95.67%,意味着数字经济对碳解锁效率影响显著。假设H1得到验证。产业结构、对外开放程度、城镇化水平、政府干预影响碳解锁效率回归系数的显著比例处于67.00%~83.67%,可以认为这四个变量是碳解锁效率的重要影响因素。

### (三)数字经济对碳解锁效率的影响

本文借助Arcgis10.8软件对2012—2021年30个样本省份数字经济的回归系数进行估计,并选择2012、2015、2018和2021年为代表年份,分析GTWR模型中各样本省份数字经济回归系数变化规律(见表6),从而更清晰地对比各省份不同时期数字经济对碳解锁效率的影响程度。

表6 数字经济对碳解锁效率的回归系数

省份	2012	2015	2018	2021	省份	2012	2015	2018	2021
北京	0.871	1.183	1.223	1.123	河南	0.594	0.488	0.439	0.899
天津	0.856	1.137	1.131	0.993	湖北	2.208	1.852	1.603	2.331
河北	0.584	0.877	0.930	0.955	湖南	2.783	2.451	2.070	2.385
山西	0.429	0.665	0.716	0.757	广东	3.432	2.863	2.572	2.954
内蒙古	0.546	0.866	1.082	1.078	广西	3.965	2.816	2.383	2.998
辽宁	0.950	1.308	1.428	1.407	海南	2.325	1.192	1.343	3.394
吉林	1.087	1.496	1.677	1.888	重庆	2.386	1.605	0.870	0.437
黑龙江	1.163	1.605	1.822	2.014	四川	2.992	2.275	2.160	2.040
上海	1.595	1.763	1.846	2.605	贵州	2.739	2.013	1.113	0.509
江苏	1.214	1.221	1.152	1.720	云南	4.694	2.999	1.332	0.348
浙江	1.979	1.975	2.018	2.850	陕西	0.660	0.637	0.562	0.710
安徽	1.475	1.337	1.212	1.852	甘肃	7.339	13.008	16.690	18.624
福建	3.080	2.992	3.094	3.801	青海	11.404	16.545	18.954	19.625
江西	2.803	2.569	2.432	3.204	宁夏	2.937	2.864	2.998	3.380
山东	0.554	0.759	0.719	0.798	新疆	33.656	-29.959	-71.035	-68.691

由表6可知,数字经济对样本省份碳解锁效率的回归系数除了新疆有负值之外,其他省份均为正值,说明数字经济对于碳解锁效率呈现出显著的正向影响,假设H1得到验证。数字经济回归系数绝对值越大,说

明数字经济对样本省份碳解锁效率的正向影响或者负向影响就越大。数字经济回归系数为正的省份,数字经济发展的带动效应对本地区碳解锁效率产生正向作用。究其缘由,一方面,数字经济利用其大数据、云计算、人工智能的数字化技术对传统产业的生产方式进行改造,推动传统产业向智能化、数字化发展,逐步降低高耗能产业的比重,进而促进碳解锁效率的提升;另一方面,数字经济有利于能源结构的优化,数字经济全面推进能源消费方式变革,提高清洁能源和非化石能源的比重,推动绿色用能的多渠道智能互动,加快实现能源消费环节的节能增效,从源头上解除碳锁定,促使碳解锁效率不断提升。

#### (四)数字经济影响碳解锁效率的空间异质性对比分析

由于区域经济基础、资源禀赋、发展阶段等因素的差异,数字经济对碳解锁效率的作用具有明显的空间异质性。本文通过分析各省份数字经济回归系数变化趋势,将具有相似变动趋势的省份进行归类分组,进一步分析数字经济对碳解锁效率影响的空间异质性(见表7)。

表7 不同地区数字经济回归系数变动趋势

数字经济回归系数变动趋势	地区
“U”型	河南、湖北、湖南、广东、广西、海南、江苏、安徽、江西
先平稳后上升	上海、浙江、福建、宁夏
不断递减	重庆、四川、贵州、云南
低位增长	北京、天津、河北、山西、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、山东、陕西
高位增长	甘肃、青海

河南、湖北、湖南、广东、广西、海南、江苏、安徽、江西9个省份数字经济对碳解锁效率的回归系数呈现“U”型变化。其中,河南、湖北、湖南、广东、广西和海南属于中南地区,处于“承东启西”的地理位置。同时,受益于华东地区优势要素溢出的红利和西南地区政策导向延伸带来的机遇,为数字经济的发展提供了有利的外部条件。在自身特有禀赋方面,中南地区基于海量的数据、规模庞大的算力中心、完善的产业配套设施,以及丰富的绿色电力资源,可以在新一轮的数字经济发展浪潮中迅速响应和提高碳解锁效率。

上海、浙江、福建、宁夏4个省份数字经济回归系数在样本期内呈现先平稳后上升的变化趋势,具体来说,2012—2018年基本趋于平稳,从2018年开始迅速上升。上海、浙江和福建属于华东地区,3个省份充分利用海量数据优势,推动数字技术与实体经济深度融合,赋能传统产业数字化转型升级,催生新产业、新业态模式,同时重视环境与经济的双重效益,有效提高碳解锁效率。“十三五”以来,宁夏数字经济赋能碳解锁效率的提升效应不断上升,可能的原因在于,一方面宁夏利用数字技术严格控制能源消费总量、监控重点领域的节能减排效果,有效缓解了生产过程中能源的过度消耗,进而提升碳解锁效率;另一方面,宁夏数字经济优化了能源结构,推动了煤炭供给侧改革,打造了清洁绿色高效的能源消费模式,从而在实现经济发展的同时有效降低了碳排放水平,使得碳解锁效率快速提升。

重庆、四川、贵州和云南都属于西南地区,4个省份数字经济对碳解锁效率的提升效应不断减弱,2012—2021年始终处于边际效用递减阶段,但4个省份数字经济增长率都处于全国领先水平,其智能制造和电子信息等新兴产业发展速度较快。因此,处于边际效用递减的原因可能是其更注重推动数字经济在减污降碳方面更广泛和更深度的应用,对于数字经济新兴产业的环境效益考虑较少,没能进一步激发数字经济减污降碳的活力。

北京、天津、河北、山西、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、山东、陕西10个省份数字经济回归系数整体呈现出低位增长且增幅较小的变化趋势,其中吉林、黑龙江、河北、山西数字经济回归系数呈现持续增长态势,而辽宁、北京、内蒙古、天津的数字回归系数在2018年前后都出现小幅度下降。具体来看,东北地区由于地

理位置不佳、人口流失严重、产业结构固化、高新技术产业缺失等原因,严重阻碍了数字经济发展潜力的充分释放,因此对碳解锁效率的提升效果较为平缓。天津、河北和山东相较于其他地区,产业结构较为单一,大大限制了数字经济对碳解锁效率的带动作用。山西、陕西、内蒙古都属于能源资源大省,产业结构都以煤炭等重工业为主,对碳基能源系统依赖性很强,碳解锁难度较大;并且数字经济发展相对滞后,以煤炭行业为代表的能源行业生产和管理环节还存在数字经济“真空区”,因此数字经济对碳解锁效率的提升效应较小。

甘肃、青海两省份数字经济回归系数呈现出高位增长,并逐渐趋于平缓的变化趋势。甘肃、青海属于西北地区,由于能源消费结构主要以煤炭为主,并且缺乏技术创新与投资,工业与能源利用效率较低,形成了粗放型经济发展模式,而技术落后导致的高能耗高排放式发展使得碳排放量保持在较高水平,因此,大力推进数字经济可以推动技术创新大幅度进步,提升以煤炭为主的能源利用效率,并且大力推广风力发电站、光伏发电站,降低火力发电对传统化石能源的消耗。

通过上述分析可知,数字经济对碳解锁效率的影响呈现出显著的空间异质性,假设H2得到验证。

### (五)稳健性检验

本文采用缩小样本容量的方式进行稳健性检验,对2015—2021年30个样本省份数字经济赋能碳解锁效率进行分析,使用Arcgis10.8软件,仅利用2015—2021年的面板数据进行时空地理加权回归,回归结果如表8所示。

表8 缩小样本容量后的GTWR模型回归结果

变量	显著比例(%)
<i>indige</i>	90.48
<i>ind</i>	70.48
<i>open</i>	69.52
<i>ur</i>	80.00
<i>fina</i>	74.29
常数	84.76

数字经济对碳解锁效率的回归系数在所有样本区间内的显著比例为90.48%,产业结构、对外开放程度、城镇化水平、政府干预回归系数的显著比例为69.52%~80.00%,可以认为这四个因素对碳解锁效率的影响显著,通过稳健性检验,说明GTWR模型的研究结果可靠。

## 六、结论与建议

### (一)研究结论

数字经济和碳解锁效率作为中国实现经济高质量发展的重要命题,二者的关系值得探究。本文基于2012—2021年我国30个样本省份的面板数据,建立时空地理加权回归模型,研究数字经济影响碳解锁效率的空间异质性。得到如下研究结论:(1)时间上,样本期内碳解锁效率存在波动,但整体呈现不断上升的趋势。空间上,碳解锁效率存在正向的空间集聚性,易受周边地区的影响。具体来看,高-高集聚样本省份有8个,低-低集聚样本省份有9个,正相关程度达56.67%。(2)除新疆外其他样本省份数字经济对碳解锁效率的回归系数均为正数,说明数字经济有利于碳解锁效率的提高。(3)样本期内,数字经济对碳解锁效率的影响存在空间异质性,中南地区省份数字经济对碳解锁效率的回归系数呈现先减小后增大的趋势,西南地区省份数字经济的回归系数始终处于边际效用递减阶段,华北、东北地区省份回归系数都处在低位增长阶段,西北地区甘肃、青海两省份回归系数都处在高位增长阶段。

## (二)提升碳解锁效率的建议

### 1. 大力发展数字经济,赋能碳解锁效率提升

一是优化升级数字基础设施建设,重点关注云计算、大数据、人工智能、5G等新一代信息技术建设,全方位、深层次、多领域推进低碳转型。二是大力发展数字经济核心产业,培育壮大人工智能、大数据、区块链等新兴数字产业,提升通信设备、核心电子元器件、关键软件等产业的发展水平。三是加强数字技术的创新与应用,注重基础研究和原始创新,加快数字技术领域关键核心技术和基础前沿技术突破,增强自主可控能力。同时促进数字技术与实体经济的深度融合,推动传统产业生产方式、组织方式向数字化转型,扩大数字技术的应用范围。四是培育良好的数字发展环境,建立与数字经济持续健康发展相适应的治理方式,加快建设全方位、多层次、多维度的监管体系,营造科学、高效、有序的数字经济发展环境。统筹开展数字中国发展综合试点,开展综合集成改革试验。

### 2. 不同主体分类发展数字经济,助力低碳发展

政府层面,应充分发挥政府对数字经济发展的统筹和引领作用,推进数字中国建设。一是建立健全数字中国建设统筹协调机制,及时研究解决数字经济发展中的重大问题,促进跨部门协作联动,确保重大任务和重大项目督办落实。二是建立健全政策体系,包括财政、税收、金融等方面的政策支持,鼓励数字经济与低碳发展的深度融合。同时,建立数字化碳管理体系,搭建数字化碳排放数据测量、监测和分析系统,加快数字化、网络化、智能化发展,推动企业更科学、合理、准确地控制碳排放,坚持不懈提升节能环保效率。企业层面,充分利用数字经济在绿色低碳产业转型中的节能减排作用,持续深入推进数字经济与产业发展的渗透融合,利用数字技术扩大资源要素配置,提高生态环境治理效率,加快转变能源消费结构,提高企业在绿色低碳发展过程中的质量和效率。

### 3. 因地制宜发展数字经济,赋能区域低碳协同发展

通过低碳协同和数字经济促进区域间联动发展,在产业转移、功能疏解、对口支援等基础上开拓新型区域经济联系通道。通过低碳协同,加快新能源研发、制造、供应全产业链区域间合作,培育跨区域低碳产业集群,增强区域间经济联系。在数字经济发展和“东数西算”工程实施的背景下,西南地区的数据要素市场有待进一步健全和完善,聚焦西南地区的特色产业,培育符合西南地区发展的新市场主体,促进元宇宙、云计算、云购物、数字医疗等数字经济的发展,同时结合西南地区的经济发展水平,大力推进数字技术、业态和模式的应用,持续推进本地区数字经济发展,使数字经济的渗透作用得到最大程度的发挥。中南地区依托现有算力中心和产业配套设施,在数字经济发展浪潮中持续推进。对于华北地区的山西、陕西、内蒙古等煤炭资源丰富的地区,其数字经济发展与华东地区之间仍存在明显的数字鸿沟,市场的积极性无法充分发挥。因此,这些地区在发展煤炭产业、石化产业等传统产业时,要发挥国有资本优势,构建以数字基础设施和数字技术应用为核心的数字经济发展环境和产业转型环境,进一步提高碳解锁效率。东北地区依托产业互联网,将数字经济与农业、工业和服务业进行多层次多频率的渗透,促进产业数字化与低碳化发展。华东地区在既有的区位优势、经济体量优势、政策持续支持下,推动数字技术与实体经济的深度融合,赋能传统产业数字化转型升级,催生新产业、新业态模式。考虑到数字经济对西北地区的甘肃、青海碳解锁效率的赋能作用更为显著,政府应加大对西北地区数字经济基础设施建设的投入,形成数字基础设施的一体化布局,推动华东、华北地区的部分数字经济资源向西北地区倾斜,并提供政策和制度支持。

#### 参考文献:

- [1] UNRUH G C. Understanding Carbon Lock-in[J].Energy Policy,2000(28):817-830.
- [2] UNRUH G C. Escaping Carbon Lock-in[J].Energy Policy,2002(30):317-325.
- [3] SANYA C. Historical Analysis of U.S. Electricity Markets:Reassessing Carbon Lock-in[J].Energy Policy,2011,39(2):

720-732.

- [4] PATRICK A D. Breaking Carbon Lock-In: Path Dependencies in Large-Scale Transportation Infrastructure Projects[J]. Planning Practice and Research, 2014, 29(3): 317-330.
- [5] XU Y Z, DONG B Y, CHEN Y, et al. Effect of Industrial Transfer on Carbon Lock-in: A Spatial Econometric Analysis of Chinese Cities[J]. Journal of Environmental Planning and Management, 2021(4): 1-32.
- [6] 王岑.“碳锁定”与技术创新的“解锁”途径[J]. 中共福建省委党校学报, 2010(11): 61-67.
- [7] 杨玲萍, 吕涛. 我国碳锁定原因分析及解锁策略[J]. 工业技术经济, 2011(4): 151-157.
- [8] 屈锡华, 杨梅锦, 申毛毛. 我国经济发展中的“碳锁定”成因及“解锁”策略[J]. 科技管理研究, 2013(7): 201-204.
- [9] 郭进, 徐盈之. 基于技术进步视角的我国碳锁定与碳解锁路径研究[J]. 中国科技论坛, 2015(1): 113-118.
- [10] 梁中, 胡俊康. 多主体合作的“碳解锁”治理: 价值逻辑与行动策略[J]. 社会科学, 2019(8): 36-45.
- [11] 邹瞳, 郭丕斌, 吴青龙. 中国能源系统“高碳解锁”向低碳转型机制研究——基于社会-技术转型视角[J]. 中北大学学报(社会科学版), 2023(2): 33-39.
- [12] 张济建, 刘清, 丁绪辉. 长江经济带碳解锁效率研究——基于SE-DEA-Malmquist指数[J]. 华东经济管理, 2021(6): 1-10.
- [13] 郝亚男, 张景哲, 贾颖旭, 等. 黄河流域碳解锁效率及其驱动因素分解[J]. 内蒙古统计, 2023(2): 36-40.
- [14] 程娜, 桑一铭, 李博文. “双碳”目标下中国“碳解锁”发展研究[J]. 改革, 2023(12): 151-162.
- [15] 董碧滢, 徐盈之, 孙文远. “调结构”视角下绿色技术创新的碳解锁路径研究——环境规制的调节效应[J]. 研究与发展管理, 2023(4): 34-49.
- [16] 谢云飞. 数字经济对区域碳排放强度的影响效应及作用机制[J]. 当代经济管理, 2022(2): 68-78.
- [17] 邓荣荣, 张翱翔. 中国城市数字经济发展对环境污染的影响及机理研究[J]. 南方经济, 2022(2): 18-37.
- [18] 徐维祥, 周建平, 刘程军. 数字经济发展对城市碳排放影响的空间效应[J]. 地理研究, 2022(1): 111-129.
- [19] 缪陆军, 陈静, 范天正, 等. 数字经济发展对碳排放的影响——基于278个地级市的面板数据分析[J]. 南方金融, 2022(2): 45-57.
- [20] 韩晶, 姜如玥. 数字经济赋能低碳发展: 理论逻辑与实践路径[J]. 统计研究, 2024(4): 54-67.
- [21] 米国芳, 吕淼鑫, 苏坤荣. 数字经济与实体经济融合的碳减排效应——来自我国省域的经验证据[J]. 统计学报, 2024(2): 12-26.
- [22] SALAHUDDIN M, ALAM K. Internet Usage, Electricity Consumption and Economic Growth in Australia: A Time Series Evidence[J]. Telematics and Informatics, 2015, 32(4): 862-878.
- [23] LI X, LIU J, NI P. The Impact of the Digital Economy on CO<sub>2</sub> Emissions: A Theoretical and Empirical Analysis[J]. Sustainability, 2021, 13(13): 1-15.
- [24] 朱东波, 张相伟. 中国数字金融发展的环境效应及其作用机制研究[J]. 财经论丛, 2022(3): 37-46.
- [25] 潘为华, 贺正楚, 潘红玉. 中国数字经济发展的时空演化和分布动态[J]. 中国软科学, 2021(10): 137-147.
- [26] 刘伟丽, 刘宏楠. 要素市场扭曲和制度质量对研发投入的影响——基于中国高技术产业的实证分析[J]. 财经问题研究, 2020(6): 32-39.
- [27] 于向宇, 李跃, 陈会英, 等. “资源诅咒”视角下环境规制、能源禀赋对区域碳排放的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2019(5): 52-60.
- [28] 米国芳, 长青. 能源结构和碳排放约束下中国经济增长“尾效”研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017(2): 50-55.
- [29] 刘军, 杨渊望, 张三峰. 中国数字经济测度与驱动因素研究[J]. 上海经济研究, 2020(6): 81-96.
- [30] 王军, 朱杰, 罗茜. 中国数字经济发展水平及演变测度[J]. 数量经济技术经济研究, 2021(7): 26-42.
- [31] 盛斌, 刘宇英. 中国数字经济发展指数的测度与空间分异特征研究[J]. 南京社会科学, 2022(1): 43-54.
- [32] 秦炳涛, 俞勇伟, 葛力铭, 等. 智慧降碳: 数字经济发展对城市碳排放影响的效应与机制[J]. 广东财经大学学报, 2023(3): 4-23.
- [33] 吴传清, 邓明亮. 数字经济发展对中国工业碳生产率的影响研究[J]. 中国软科学, 2023(11): 189-200.
- [34] 王喜莲, 翟桢桐, 贾县民. 数字经济、绿色创新对碳排放强度的影响[J]. 西安科技大学学报, 2024(1): 185-193.
- [35] 赵晓春, 龙来春, 周瑛. 绿色金融、政府干预与区域碳排放效率[J]. 统计与决策, 2023(10): 149-154.

(责任编辑: 彭晶晶)