



价格理论与实践

Price: Theory & Practice

ISSN 1003-3971, CN 11-1010/F

《价格理论与实践》网络首发论文

题目: 算力发展对降碳增效的影响效应研究——基于双重机器学习方法的检验
作者: 李宁, 陈亮, 孔德源, 万相昱
DOI: 10.19851/j.cnki.CN11-1010/F.2025.05.120
网络首发日期: 2025-06-23
引用格式: 李宁, 陈亮, 孔德源, 万相昱. 算力发展对降碳增效的影响效应研究——基于双重机器学习方法的检验[J/OL]. 价格理论与实践.
<https://doi.org/10.19851/j.cnki.CN11-1010/F.2025.05.120>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

算力发展对降碳增效的影响效应研究

——基于双重机器学习方法的检验

李宁 陈亮 孔德源 万相昱

内容提要：大数据时代,算力作为新型生产要素,对区域降碳增效的作用日益凸显。然而,其具体机制及影响路径尚缺乏系统研究。本文构建区域算力发展指标体系,基于中国 2011–2022 年省级数据,采用双重机器学习方法,实证分析算力发展对区域碳绩效的影响及作用机制。研究发现,算力发展显著提升区域碳排放经济绩效,并降低福利碳强度,形成降碳增效效应。机制分析表明:算力发展通过提升全要素能源利用效率和促进产业结构优化升级助力区域降碳增效。此外,区域、环境规制和政策支持等异质性因素对算力发展的降碳增效效应具有显著影响。本文进一步揭示算力发展在不同区域和情境下的差异化表现,并提出构建多元化算力供给体系、推进绿色算力一体化发展、深化算力赋能行业应用等建议,因地制宜地探索符合地方实际的低碳发展路径,构建算力驱动的绿色经济发展模式。

关键词：算力发展;降碳增效效应;双重机器学习

DOI: 10.19851/j.cnki.CN11-1010/F.2025.05.120

中图分类号: F124; X196 文献标志码: A

一、问题的提出

随着新一轮科技革命和产业变革加速演进,人工智能及其相关要素已成为驱动新质生产力的重要引擎。算力、算法和算料是人工智能的三大基石。其中,算力是保障算法运行、激活算料价值的枢纽,对促进科技进步和产业发展具有重要价值和作用。根据国际能源署(IEA)统计,目前全球数据中心超过 8000 座。其中,约 33%位于美国,16%位于欧洲,接近 10%位于中国^①。近年来,我国政府高度重视算力发展,作出了一系列工作部署。2023 年 10 月,工业和信息化部等六部委联合印发《算力基础设施高质量发展

行动计划》^②,为我国算力领域的发展提供了基础性规划与政策性指引;2025 年 3 月,《政府工作报告》提出要“扩大 5G 规模化应用,加快工业互联网创新发展,优化全国算力资源布局,打造具有国际竞争力的数字产业集群”^③。目前,我国算力结构不断优化,增长势头强劲。算力作为继热力、电力、网力之后的新型生产要素,正在成为第四次工业革命的基础。中国通信院发布的《中国综合算力指数(2024)》报告显示,截至 2023 年底,我国在用算力中心机架总规模已超过 830 万标准机架,算力规模达到 246EFLOPS (FP32),智算同比增速超过 65%^④,位居世界第二,处

①数据来源: Bloomberg.Electricity Demand at Data Centers Seen Doubling in Three Years [EB/OL].(2024-01-24). <https://www.bloomberg.com/news/articles/2024-01-24/cryptocurrency-ai-electricity-demand-seen-doubling-in-three-years>.

②文件来源: 工业和信息化部官网.工业和信息化部等六部门关于印发《算力基础设施高质量发展行动计划》的通知[EB/OL].(2023-10-08).https://www.miit.gov.cn/jgsj/txs/wjfb/art/2023/art_ed448f60021741729f7ee8e36aaafdd7.html.

③文件来源: 新华社.两会受权发布 | 政府工作报告[EB/OL].(2025-03-12).<https://www.news.cn/politics/20250312/a71e63d66967404e8e644f9753c65fc9/c.html>.

④数据来源: 河南省政府网.《中国综合算力指数报告(2024)》在郑发布[EB/OL].(2024-09-29).<https://www.henan.gov.cn/2024/09-29/3068502.html>.

基金项目：国家社会科学基金西部项目(24XGL026);中国社科院新疆智库重大课题(XJZK2025ZD007);四川省人文社会科学重点研究基地一般项目(SDJJ202304);四川省人文社会科学重点研究基地自筹项目(ZHJJ2025ZC001);四川省人文社会科学重点研究基地一般项目(DELL2024YB-13);成都理工大学珠峰科学研究计划 2.0 交叉项目。

作者简介：李宁(1985-),男,汉族,河南平顶山人,英国诺森比亚大学管理学博士,平顶山学院经济管理学院副教授,硕士生导师。研究方向:低碳发展、区域经济;陈亮(1983-),男,汉族,四川成都人,成都理工大学管理科学与工程博士后,成都理工大学教授,硕士生导师。研究方向:资源环境评价与管理、低碳城市建设、生态经济;孔德源(1998-),男,汉族,河南周口人,西华大学应用经济学硕士,西南交通大学希望学院助教。研究方向:数字经济,绿色经济,能源经济;万相昱(1978-),男,汉族,河北武安人,吉林大学应用经济学博士,中国社会科学院大学教授,博士生导师。研究方向:经济模型,政策评价,数字治理。

于领跑者国家行列。当前,全球正处于经济社会低碳化转型和寻找经济发展新动能的重要时期,绿色转型发展和生产力水平的跃升更是离不开算力的支撑。科学评估算力发展和碳排放的二元关系,既是放大、叠加和倍增算力经济新动能的客观需求,也是我国加快推进绿色低碳转型发展、抢占国际竞争战略高地的新机遇。本文立足研究算力发展对区域碳绩效的影响效应及内在作用机制,为算力发展促进降碳增效提供参考依据。

碳绩效是衡量经济与环境协调发展的重要指标之一,在实现降碳增效过程中,研究发现,数字经济能够通过信息技术扩散和产业结构升级来实现碳排放与经济增长的脱钩(Zhao等,2024)。绿色技术创新通过优化能源效率和减少碳排放,实现经济与环境的双赢。绿色金融优化资源配置,提升区域碳绩效,并表现出显著的空间溢出效应(Chang等,2024)。高质量人力资本结构通过促进技术创新和产业升级,提升本地碳绩效的同时改善周边地区的碳排放(Zhang等,2024)。此外,碳排放权交易通过内化环境成本,推动企业低碳转型,提升碳绩效(王珮等,2023)。整体而言,数字经济发展、绿色技术创新、碳排放交易在实现降碳增效方面均发挥着重要作用。然而,就算力发展与降碳增效的关系研究尚需补充,现有文献主要集中探讨算力在助力提升效率、促进经济发展所发挥的作用。例如,边缘计算与云计算通过减少数据传输距离和优化资源配置,降低能源消耗和碳排放量(Gu等,2019);人工智能技术下的机器学习有效改进盐碱含水层中碳封存性能的预测效果,提升预测效率(Safaei等,2022),且算力的发展可通过推动农业科技创新与数字农业转型等促进农业强国建设(宋玉冰和罗敬蔚,2024);算力开发的优化算法得到的帕累托方案在光热和光伏技术与冷热电三联供系统中的应用,助力能源节约率、碳减排率以及能源效率的全面提升(Li等,2022)。

综上所述,现有研究成果为本文研究提供了重要启示,但关于算力发展与碳排放有强关联的研究尚缺。基于此,本文通过构建算力发展指标体系,测算中国省级算力发展水平,分析其对降碳增效的影响,并探讨其作用机制。本文的边际贡献:第一,补充现有理论研究的不足,通过构建算力发展指标体系,测算现有算力发展水平,提供实证证据;第二,采用双重机器学习方法,克服传统模型设定误差与维度诅咒,提升研究结论的可信度,丰富现有算力研究方法;第三,分析算力影响降碳增效的作用路径,探索算力助力降碳增效的作用机制。

二、算力发展对区域降碳增效影响的理论分析

(一)算力发展对区域降碳增效的直接影响

降碳增效是指通过技术创新、资源配置优化与制度创新等多种形式,实现单位碳排放的经济产出与

福利效益双重提升的动态过程。其核心目标是推动经济增长与碳排放的“脱钩”,即在降低碳排放强度的同时,提升单位碳排放对经济产出与居民福利的贡献。作为经济社会发展新动能,算力发展通过多维度显著改善碳排放经济绩效和福利绩效,实现降碳增效。具体而言,首先,算力产业形成的高性能计算机、节能芯片等产品,既有利于降低单位能耗,又有效提升经济产出(沈坤荣和林剑威,2025)。同时,算力产业在生态环保检测、医疗资源分配等公共福利领域的布局,既改善了环境质量,又提高了医疗服务水平,有效提升了居民碳排放福利绩效。其次,云计算、边缘计算以及人工智能等算力技术的迭代升级,使得社会各领域显著提升海量信息处理能力和效率、生产和管理流程更加高效,既实现社会高效发展,提升社会经济发展水平,又实现降污减排,提升公众福祉水平(尹龙和郭子彤,2024)。接着,在网络连接质量、数据传输速度及分布式计算能力的支持下,算力大环境使得企业能够实时处理海量数据,优化生产计划和资源配置(杨蕙馨等,2024),有效提升经济效率。此外,良好的算力环境赋能公众医疗健康服务,有效降低医疗健康行业能耗和污染物排放,提升公众健康预期(Aminizadeh等,2024)。最后,算力在生产制造中实现生产流程的优化,减少资源消耗和碳排放(Ma等,2022);算力在生态环保中实现动态监测污染物分布,及时对环境污染做出响应,降低呼吸疾病发生率,带来长期健康效应。整体而言,算力应用到社会发展多场景,为提升碳排放经济绩效和福利绩效提供支持。基于此,提出如下假设:

H1:算力发展有助于提升碳排放经济绩效和福利绩效,带来降碳增效效应。

(二)算力发展对区域降碳增效的作用机制

1.进步效应:提升全要素能源利用效率。算力发展通过资源优化、效率提升、智能化管理和新能源整合显著提升全要素能源利用效率。具体而言,高效能计算和大数据分析实时监测设备状态,动态调整能源分配,减少能源浪费,实现高效利用(杨岸,2025)。智能制造、物联网(IoT)等技术帮助企业实现了实时控制生产,减少人为误差,边缘计算则能够降低数据传输中的能耗,使企业在不增加总能耗的前提下提升产出效率(Nain等,2022)。同时,智能算力系统和大数据平台助力企业实现精细化管理,减少不必要的能耗浪费。算力发展下,智慧能源管理系统可以实现清洁能源的优先分配,动态调配能源供需,降低传统能源依赖,实现新能源和传统能源的有机整合(李丙金和李婧,2024)。整体看来,算力发展形成了进步效应,提升了全要素能源利用效率。

全要素能源利用效率的提升,进一步助力区域降碳增效。一方面,能源利用效率的提升不仅能降低能源消耗和碳排放,还有助于提高单位碳排放的经济回报,同时也能降低企业运营成本,增强低碳经济竞

争力(彭文斌和苏欣怡,2024);另一方面,能源利用效率的提升有效改善了公共设施的能源使用,对居民的生活环境与健康水平具有显著提升效应。例如,智能调控系统,既减少了无效能耗,又降低了室内环境污染,在优化室内空气质量的同时,提升居住舒适度,提升碳排放福利绩效。基于此,提出如下假设:

H2:算力发展通过提升全要素能源利用效率,进而助力区域降碳增效。

2.结构效应:促进产业结构优化升级。算力支撑高新技术产业发展,包括大数据分析、人工智能、云计算和物联网技术的广泛应用,助力新能源、新兴服务业等低碳产业的发展,实现高效运作,提升竞争力,扩大低碳经济规模(何琨琰等,2025)。同时,算力推动传统产业绿色化改造,智能制造和边缘计算优化生产流程,降低能源消耗和碳排放,加速传统产业向绿色方向升级发展(郭晗和侯雪花,2025)。例如,实时监控减少资源浪费,提升生产效率。此外,算力促进数字经济和共享经济的发展,优化资源配置与消费模式,推动区域产业结构向可持续方向调整。

随着产业结构的不断优化升级,区域碳绩效得到显著提升。一方面,高新技术产业的崛起和传统产业的绿色化转型降低了区域经济活动的碳排放强度,推动经济增长的绿色化发展(Xu和Lin,2018)。例如,新能源产业降低了化石能源的使用比例,高效算力技术减少单位经济产出的碳排放量。另一方面,产业结构的优化升级改善环境质量,从而显著提高碳排放福利绩效。例如,高污染产业的淘汰和低碳产业的崛起大大减少污染物的排放,为居民提供了更加健康的生活环境(Yang等,2023)。基于此,提出如下假设:

H3:算力发展通过促进产业结构优化升级,进而助力区域降碳增效。

综上所述,算力发展有助于区域降碳增效,理论框架见图1所示。

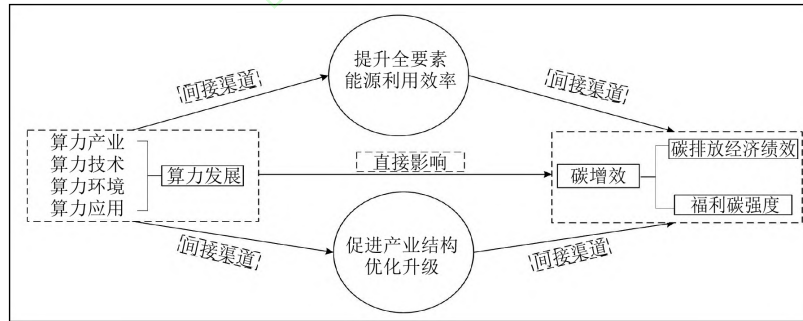


图1 算力发展对区域降碳增效的理论框架

三、算力发展对区域降碳增效影响的模型设定

(一) 模型设定

本文研究借助双重机器学习方法,探究算力发展对碳效益提升的影响,具体模型构建如下:

构建部分线性模型:

$$Y_{i,t} = \theta_0 DCP_{i,t} + g(X_{i,t}) + \varepsilon_{i,t} E(\varepsilon_{i,t} | X_{i,t}, DCP_{i,t}) = 0 \quad (1)$$

其中, i 代表省份, t 代表年份; $Y_{i,t}$ 是本文的被解释变量,即碳排放经济绩效和福利碳强度; $DCP_{i,t}$ 为本文的核心解释变量,即算力发展水平;作为通过函数 g 影响解释变量的协变量, $X_{i,t}$ 表示省份 i 在 t 年的多维控制变量; g 的具体形式是未知的,通过其学习模型获得其估计值 $\hat{g}$; $\varepsilon_{i,t}$ 是条件均值为0的误差项。

构建部分线性模型的辅助方程:

$$DCP_{i,t} = m(X_{i,t}) + \mu_{i,t} E(\mu_{i,t} | X_{i,t}) = 0 \quad (2)$$

估算步骤如下:第一,通过机器学习模型测算式(1)中 m 的估计值 $\hat{m}$,进而计算残差项 $\mu_{i,t}$ 的估计值 $\hat{\mu}_{i,t}$;第二,考虑将 $\hat{\mu}_{i,t}$ 作为 $DCP_{i,t}$ 的工具变量,并通过机器学习模型来估计函数 g 的估计值 $\hat{g}$,进而计算 θ_0 的估计值 $\hat{\theta}_0$ 。具体如下:

$$\hat{\theta}_0 = \left(\frac{1}{n} \sum \hat{\mu}_{i,t} DCP_{i,t} \right)^{-1} \frac{1}{n} \sum \hat{\mu}_{i,t} (Y_{i,t} - \hat{g}(X_{i,t})) \quad (3)$$

其中, n 是总样本。

在机制检验环节,本文研究选用双重机器学习模型,参照Chernozhukov等(2018)及江艇(2022)的研究方法,构建如下机制检验模型:

$$M_{i,t} = \theta_0 DCP_{i,t} + g(X_{i,t}) + \omega_{i,t} E(\omega_{i,t} | X_{i,t}, DCP_{i,t}) = 0 \quad (4)$$

$$DCP_{i,t} = m(X_{i,t}) + \mu_{i,t} E(\mu_{i,t} | X_{i,t}) = 0 \quad (5)$$

$$\hat{\theta}_0 = \left(\frac{1}{n} \sum \hat{\mu}_{i,t} DCP_{i,t} \right)^{-1} \frac{1}{n} \sum \hat{\mu}_{i,t} (M_{i,t} - \hat{g}(X_{i,t})) \quad (6)$$

其中, M 为机制变量。

(二) 变量说明

1.被解释变量。本文从碳排放经济绩效和福利绩效两方面来衡量区域降碳增效效果。卫星数据的发展为衡量区域碳排放量提供了很好的数据支撑。参考王守坤和范文诚(2024)的研究,使用CGER(Center for Global Environmental Research)数据库提供的碳排放数据,该数据库提供了1km×1km分辨率GeoTIFF格式的栅格数据,先将栅格数据按照我国省级行政区划进行裁剪,进而得到我国省级范围内的月度数据;再对数据按照省级区域进行分年度汇总,进而得到省份的碳排放量数据,数据单位为吨。基于此,本文立足福利经济学视角,充分考虑碳排放的经济产出与社会福利产出。其中,碳排放经济绩效(CEE)使用国内生产总值与区域碳排放量的比值衡量,碳排放福利绩效即福利碳强度(CIWB)使用人均碳排放量与区域人均预期寿命(岁)的比值进行衡量。具体计算公式如下:

碳排放数据,该数据库提供了1km×1km分辨率GeoTIFF格式的栅格数据,先将栅格数据按照我国省级行政区划进行裁剪,进而得到我国省级范围内的月度数据;再对数据按照省级区域进行分年度汇总,进而得到省份的碳排放量数据,数据单位为吨。基于此,本文立足福利经济学视角,充分考虑碳排放的经济产出与社会福利产出。其中,碳排放经济绩效(CEE)使用国内生产总值与区域碳排放量的比值衡量,碳排放福利绩效即福利碳强度(CIWB)使用人均碳排放量与区域人均预期寿命(岁)的比值进行衡量。具体计算公式如下:

(CEE)使用国内生产总值与区域碳排放量的比值衡量,碳排放福利绩效即福利碳强度(CIWB)使用人均碳排放量与区域人均预期寿命(岁)的比值进行衡量。具体计算公式如下:

$$CEE = GDP / CO_2 \quad (7)$$

$$CIWB = [Pco_2 / Life] \times 100 \quad (8)$$

其中, GDP 为区域国内生产总值, CO_2 为区域碳排放量, Pco_2 为区域人均碳排放量, $Life$ 为区域人均预期寿命, 数字 100 用来扩大比例。

2. 核心解释变量。核心解释变量为算力发展水平(DCP)。为全面、客观地测度算力发展水平, 本文在深入分析算力内涵特点的基础上, 参考中国信息通信研究院、中国算力大会等相关机构的研究, 考虑数据的可得性, 从算力产业、算力技术、算力环境和算力应用四个维度, 十个具体指标, 构建省级层面的算力发展指标体系, 见表 1 所示。

表 1 算力发展指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	指标含义	单位
算力发展水平	算力产业	计算设备	微型电子计算机产量	万台
		计算芯片	集成电路产量	万块
		计算软件	软件业务收入	万元
	算力技术	创新水平	国内发明专利申请数量	项
			国内发明专利申请授权量	项
		研发投入	规模以上工业企业 R&D 经费	万元
	算力环境	网络环境	互联网宽带接入端口	万个
			互联网普及率	%
		市场环境	软件业务出口	万美元
		政策环境	数字经济政策	/
	算力应用	消费应用	移动互联网接入流量	万 GB
		行业应用	电子商务销售额	万元
			数字金融发展水平	/

本文使用熵权法测算出算力发展综合指数, 其值在 0-1 之间, 值越大, 则表示算力发展水平越高; 反之, 则算力发展水平越低。

3. 机制变量。选取全要素能源利用效率(TFP)为机制变量。相较于传统数据包络模型(DEA), 基于非期望产出的超效率 SBM 模型具有双重优势: 一是能够有效解决投入产出松弛性问题; 二是可实现非期望产出情形下的效率分析。鉴于此, 本文研究采用该模型对全要素能源利用效率进行测算。区域全要素能源利用效率的指标体系详见表 2。其中, 资本存量以 2000 年为基期, 采用永续盘存法 $K_{it} = (1 - \delta)K_{it-1} + I_{it}$ 来计算; 能源消费总量通过区域所使用的煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气等八种能源的消耗量进行衡量; 废水排放量采用区域工业废水排放量来表示; 废气排放量采用区域二氧化硫、氮

表 2 全要素能源利用效率指标体系

指标类型	一级指标	具体指标/单位
要素投入	劳动投入	年末就业人数/万人
	资本投入	资本存量/亿元
	能源投入	能源消费总量/万吨标准煤
期望产出	经济效益	地区生产总值/亿元
非期望产出	环境污染	废水排放量/万吨
		废气排放量/万吨

氧化物以及工业烟尘的排放量来衡量。

产业结构升级(ISU)。本文参考汪伟等(2015)的研究, 采用产业结构层次系数来衡量产业结构升级水平, 公式如下:

$$ISU = \sum_{k=1}^3 X_k \times k \quad (9)$$

其中, X_k 为第 k 产业产值占总产值的比重。

4. 控制变量。为了更为准确评估算力发展对区域降碳增效的影响, 本文选取以下控制变量: (1) 经济发展水平($lngdp$): 经济发展水平对区域碳排放具有重要影响, 随着经济发展水平的提升, 一方面, 发展经济增加了碳排放; 另一方面, 发展经济促进了技术进步、产业优化等, 减少碳排放。本文使用地区生产总值的自然对数来表征。(2) 人口规模($lnpop$): 人口规模越大, 区域碳排放量越多, 进而使用地区年末总人口的自然对数来表征。(3) 绿化水平($green$): 地区绿化面积越大, 越有助于区域降碳增效, 进而本文使用区域人均绿地面积来衡量。(4) 人力资本($human$): 人才是社会经济发展中最活跃的生产要素, 人力资本水平的提升有助于区域算力更好发展以及开发降碳增效新技术, 进而本文使用地区在校大学生人数的自然对数来表征。(5) 产业结构(ind): 产业结构对区域碳排放和算力发展具有重要影响, 进而本文使用地区第三产业产值与第二产业产值的比重来表征。(6) 教育发展(edu): 教育发展水平的提升有助于人才培养, 助力算力发展和降碳增效, 进而本文使用地区教育支出的自然对数来衡量。

(三) 数据来源

基于数据可得性, 本文选取中国 2011-2022 年 30 个省(自治区、直辖市)为研究对象(排除西藏自治区、台湾省、香港和澳门地区)。本文研究数据主要源自 2011-2022 年中国各省份统计年鉴及省市统计公报; 其中, 数字金融数据取自北京大学数字金融研究中心与蚂蚁金服集团合作编制的中国省级数字普惠金融指数。此外, 对于少量缺失数据, 使用插值法进行补缺, 表 3 为各变量的描述性统计结果。

表 3 描述性统计

VarName	Obs	Mean	SD	Median	Min	Max
CEE	360	3.1510	1.8405	2.7875	0.5641	9.1615
CIWB	360	3.0215	1.7716	2.5315	0.9204	9.2338
DCP	360	0.0924	0.1009	0.0578	0.0030	0.6443
TFP	360	0.4920	0.1845	0.4620	0.1991	1.4664
ISU	360	2.3991	0.1231	2.3887	2.1323	2.8359
lngdp	360	10.8679	0.4610	10.8325	9.6819	12.1547
green	360	21.3955	11.7967	17.7222	6.3871	69.7374
ind	360	1.3572	0.7443	1.2017	0.5271	5.2440
human	360	4.3064	0.8053	4.4279	1.5195	5.6431
edu	360	6.6108	0.6728	6.6368	4.6349	8.2613
lnpop	360	8.2081	0.7415	8.2801	6.3421	9.4481

四、区域算力发展及碳排放的时空分布及差异化特征

首先,本文使用 ArcGIS (10.8) 软件基于自然断点法对区域碳排放经济绩效现状进行分析^①。从 2011 年区域碳排放经济绩效的空间格局来看,整体呈现出南高北低的格局,南方地区以轻工业和服务业为主且清洁能源使用比例较高,因此单位碳排放的经济产出效益明显高于北方。而北方地区因重工业集中、能源结构中煤炭占比高以及冬季采暖需求大,碳排放经济绩效普遍偏低,尤其是资源型地区如内蒙古、山西等省(自治区)。2022 年,区域碳排放经济绩效依然表现为南高北低的分布格局,且全国碳排放经济绩效显著提升,南方地区依然保持较高水平,技术创新、产业结构优化和能源效率提升进一步巩固了其优势;而北方地区尽管有所改善,但受制于重工业占比大、能源结构转型缓慢,其碳排放经济绩效依然处于较低水平。

其次,分析区域福利碳强度的时空分布^②。2011 年区域福利碳强度总体上表现为“北高南低”的格局。其中,北方地区的福利碳强度普遍较高,尤其是东北和华北地区,这与其经济结构中重工业占比大、能源结构中煤炭为主以及环境污染较重密切相关。相比之下,南方地区的福利碳强度较低,以长三角和珠三角为代表的地区表现尤为突出。这得益于其经济结构较轻型化、清洁能源利用比例高以及更高的居民生活质量。截至 2022 年,北方地区依然是高值区域,尽管能源结构有所优化,但重工业和化石能源依赖较强,导致福利碳强度未能显著降低;南方地区的福利碳强度有所下降,这主要归因于经济持续发展、技术进步以及居民生活质量的进一步提升。总体来看,全国福利碳强度呈上升态势,反映了工业化和经济发展对能源消耗的持续需求,但区域间差异依然显著。

最后,分析区域算力发展的时空分布^③。2011 年,算力发展整体呈现从沿海向内陆逐步降低的趋势,主要原因在于沿海地区经济发达,具备较强的资金和技术支持,能够优先建设算力基础设施;同时,沿海地区吸引了更多的高科技企业和人才,推动算力需求和应用发展。而内陆地区经济相对落后,资金和技术支持有限,导致算力发展水平较低。2022 年,区域算力发展水平仍然表现为沿海高,内陆低的发展格局。但相比 2011 年,整体区域算力发展水平均有明显提升。这主要得益于国家政策对算力基础设施的支持,加快了各地区数据中心和网络设施的

建设。同时,随着新基建和云计算需求的增加,内陆地区也在积极推动算力发展,缩小与沿海地区的差距。

五、算力发展对区域降碳增效影响的实证结果分析

(一) 基准结果分析

本文研究采用基于监督学习的双重机器学习模型,对算力发展与区域碳绩效的影响关系展开实证检验。具体而言,模型选取随机森林算法,并运用 K=5 的交叉验证进行训练。具体回归结果如表 4 所示。第(1)和(3)列结果显示,算力发展的回归系数分别在 1%和 5%的显著性水平下呈现显著正相关与负相关,这表明算力发展能够显著提升碳排放经济绩效,并降低福利碳强度,进而形成降碳增效效应。进一步,考虑到回归模型中可能遗漏随时间而变的省份不可观测因素对结果产生影响,本文控制了省份与年份的交互固定效应,第(2)和(4)列的结果显示,算力发展的回归系数依然显著,进一步佐证了算力发展具有显著的降碳增效效应。本文 H1 得以验证。

表 4 基准回归

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	CEE	CEE	CIWB	CIWB
DCP	3.1896*** (2.8753)	3.3007*** (2.8244)	-2.5792** (-2.4175)	-2.6604** (-2.4945)
_cons	0.0127 (0.4787)	0.0368 (1.2803)	0.0225 (0.8951)	0.0256 (0.9289)
Controls	Yes	Yes	Yes	Yes
Id FE	Yes	Yes	Yes	Yes
Year FE	Yes	Yes	Yes	Yes
Id-Year FE	No	Yes	No	Yes
N	360	360	360	360

注:***、**、* 分别表示为在 1%、5%、10 显著性水平上显著;括号内为 t 值;下表同。

(二) 稳健性检验

1. 替换变量。考虑到不同测度方法可能会对研究结果产生重要影响,本文使用主成分分析法对算力发展进行重新测度,进而考察算力发展对碳绩效的影响。回归结果见表 5(1)–(2)列,从回归结果可以看出,在替换变量后,回归结果依然显著。

2. 剔除异常值影响。鉴于样本中若存在异常值可能干扰回归结果的无偏性,对控制变量进行 1%和 99%分位的缩尾处理。具体回归结果详见表 5 第(3)–(4)列。结果显示,在剔除异常值后,各变量系数仍保持显著,表明基准回归结果具备良好的稳健性。

3. 考虑加入控制变量的二次项。由于控制变量与核心自变量之间存在一定的非线性关系,通过引入控制变量二次项,能够更好地捕捉控制变量对被

① 注释:区域碳排放福利绩效空间分布格局详见《价格理论与实践》网站(<http://www.price-world.com.cn/>)附件。

② 注释:区域福利碳强度空间分布格局详见《价格理论与实践》网站(<http://www.price-world.com.cn/>)附件。

③ 注释:区域算力发展水平空间分布格局详见《价格理论与实践》网站(<http://www.price-world.com.cn/>)附件。

解释变量的影响,从而提升模型设定的准确性。基于此,本文引入控制变量的二次项,来确保实证结果的稳健性。回归结果见表 5 第(5)–(6)列,结果显示,在加入控制变量的二次项后,结果依然稳健。

表 5 稳健性检验一

变量	替换核心解释变量		控制变量缩尾		控制变量二次项	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	CEE	CIWB	CEE	CIWB	CEE	CIWB
DCP	0.1302*** (2.7487)	-0.1759** (-2.2798)	3.2939*** (2.7154)	-2.5333** (-2.5146)	3.2230*** (2.6868)	-2.8941*** (-2.6105)
_cons	0.0454 (1.5759)	0.0185 (0.7125)	0.0406 (1.4073)	0.0230 (0.8622)	0.0311 (1.0918)	0.0306 (1.1380)
Controls	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
IdFE	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Year FE	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Id-Year FE	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Controls ²	No	No	No	No	Yes	Yes
N	360	360	360	360	360	360

4. 改变样本分割比例。对双重机器学习模型的 K-fold 交叉拟合设置进行调整。在基准回归中,主样本与辅助样本按 1:4 的比例划分(对应 K=5);在此基础上,将 K 值分别设定为 4 和 8,使样本分割比例变为 1:3 和 1:7。具体回归结果列于表 6 第(1)至(4)列。结果表明,变更样本分割比例后,研究结论未发生实质性改变,验证了基准回归结果的稳健性。

表 6 稳健性检验二

变量	1:4		1:8	
	(1)	(2)	(3)	(4)
	CEE	CIWB	CEE	CIWB
DCP	3.4028** (2.5713)	-2.4426** (-2.4534)	2.5912** (2.4011)	-1.6922*** (-2.7094)
_cons	0.0625* (1.8066)	0.0390 (1.4185)	0.0455* (1.6906)	0.0241 (1.1904)
Controls	Yes	Yes	Yes	Yes
Id FE	Yes	Yes	Yes	Yes
Year FE	Yes	Yes	Yes	Yes
Id-Year FE	Yes	Yes	Yes	Yes
N	360	360	360	360

5. 改变算法。双重机器学习可采用多种算法开展计算。考虑到本文基准回归中运用了随机森林法,为探究不同算法是否会对研究结论造成影响,现将机器学习算法替换为支持向量机与梯度提升算法。相关回归结果列于表 7 第(1)至(4)列。回归结果显示,更换算法后并未对本文的核心结论产生影响。

6. 内生性检验。为解决潜在的内生性问题,本文研究采用工具变量法进行估计。历史基础设施的空间分布通常对当代经济活动存在长期外生性影响。以历史通信网络为例,其布局在很大程度上决定了当代城市间通信网络的拓扑结构,进而影响算力发展的路径形成,与核心解释变量(算力发展)存在显著相关性;且历史通信网络的分布主要由历史时期

的政治战略和军事需求所决定,与当代经济活动无直接关联,因此相关指标具备较强的外生性。鉴于此,本文参考马述忠等(2025)的研究,使用光绪三十三年(1907 年)全国有线电报局数量数据作为本文的工具变量。由于此变量为截面数据,不能相匹配,因此,本文以光绪三十年全国有线电报局数量与算力发展的一阶滞后项的交互项作为算力发展的工具变量。结果见表 7 第(5)–(6)列所示,结果与基准结果一致,进一步印证了基准回归结果。

表 7 稳健性检验三

变量	向量机(Svm)		梯度提升 (Gradboost)		内生性检验	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	CEE	CIWB	CEE	CIWB	CEE	CIWB
DCP	5.3010*** (3.5049)	-3.4096*** (-3.2364)	2.7655** (2.3005)	-2.2904* (-1.9414)	5.2338** (2.5517)	-3.2769* (-1.7293)
_cons	0.6216*** (4.7501)	0.1512* (1.9067)	-0.0106 (-0.4482)	0.0210 (0.9117)	0.0540* (1.8064)	0.0161 (0.6183)
Controls	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Id FE	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Year FE	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Id-Year FE	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
N	360	360	360	360	330	330

(三) 机制分析

基于上述理论分析,本文研究进一步运用含监督学习的双重机器学习模型展开机制分析,表 8 中第(1)列的结果显示,算力发展的回归系数显著为正,说明算力发展显著提升全要素能源利用效率,本文的研究假设 2 得以验证。表 8 中第(2)列的结果显示,算力发展对产业结构升级的回归系数显著为正,表明算力发展有效助力区域产业结构优化升级,研究假设 3 得以验证。同时,为了保证机制检验的可靠性,本文进一步将主回归中的随机森林算法替换为梯度提升算法进行稳健性检验,表 8 中第(3)–(4)列的结果显示,算力发展依然显著提升全要素能源利用效率和促进产业结构升级。整体而言,算力发展有助于提升全要素能源利用效率、促进产业结构优化升级,进而促进区域降碳增效。

表 8 机制检验

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	TFP	ISU	TFP	ISU
DCP	0.7923** (2.5577)	0.2771*** (3.9588)	0.6622** (2.0723)	0.1097* (1.8277)
_cons	0.0055 (0.9664)	-0.0019 (-1.1266)	0.0037 (0.7125)	0.0007 (0.5161)
Controls	Yes	Yes	Yes	Yes
IdFE	Yes	Yes	Yes	Yes
Year FE	Yes	Yes	Yes	Yes
Id-Year FE	Yes	Yes	Yes	Yes
算法	随机森林	随机森林	梯度提升	梯度提升
N	360	360	360	360

六、算力发展对区域降碳增效影响的异质性分析

1.区域异质性。由于区域的资源禀赋以及地理位置的差异，算力发展对区域碳绩效的影响可能存在区域异质性。一方面，本文将样本分为沿海和内陆地区，表 9 结果显示，沿海地区算力发展对碳排放经济绩效具有显著正向影响，但对福利碳强度的影响不显著，可能因沿海地区在福利改善方面已达到较高水平，算力发展的边际贡献有限。内陆地区因资金、技术和政策支持不足，算力发展在降碳增效方面效果较弱，回归系数均不显著。这可能源于内陆地区算力基础设施与应用水平较低，难以在短期内实现降碳增效。

表 9 异质性检验一

变量	沿海地区		内陆地区	
	(1)	(2)	(2)	(4)
	CEE	CIWB	CEE	CIWB
DCP	3.6191*** (4.7861)	-0.1504 (-0.1921)	-0.2618 (-0.1581)	-0.1130 (-0.1212)
_cons	0.0063 (0.1766)	0.0094 (0.2898)	0.0307 (0.7086)	0.0196 (0.5319)
Controls	Yes	Yes	Yes	Yes
IdFE	Yes	Yes	Yes	Yes
Year FE	Yes	Yes	Yes	Yes
Id-Year FE	Yes	Yes	Yes	Yes
N	132	132	228	228

另一方面，本文将样本分为东中西三个地区，表 10 的结果显示，东部地区算力发展对碳排放经济绩效具有显著的正向影响，表明其完善的基础设施和较高的技术创新能力有效促进降碳增效,而对福利碳强度的影响不显著。西部地区，算力发展对碳排放经济绩效和福利碳强度的影响均显著，且分别为正向和负向，显示出算力发展显著提升碳排放经济绩效和福利绩效，可能的原因是算力在该地区的投入，促使西部地区逐步释放算力发展的低碳和福利增效潜力。

表 10 异质性检验二

变量	东部		中部		西部	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	CEE	CIWB	CEE	CIWB	CEE	CIWB
DCP	3.9104*** (4.9901)	-0.6067 (-1.3008)	-8.6335*** (-3.0281)	4.1637*** (4.6465)	21.0843*** (6.1627)	-11.5343** (-2.0800)
_cons	0.0098 (0.3028)	0.0117 (0.7004)	-0.0245 (-0.4469)	-0.0088 (-0.5691)	-0.0441 (-1.0364)	0.0658 (0.8169)
Controls	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
IdFE	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Year FE	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Id-Year FE	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
N	132	132	96	96	132	132

2.环境规制的异质性。现实中不同区域面临的环境规制强度不同，而环境规制对区域碳排放具有重要影响。因此，本文进一步考虑不同环境规制条

件下的异质性特征。本文参考王杰和刘斌(2014)的研究，以各省政府工作报告中关于“环保”相关词汇词频，表征省级层面的环境规制强度。结果显示，环境规制强度差异对算力影响碳绩效具有显著差异(见表 11)。对于环境规制高水平地区，算力发展对福利碳强度有显著的负向影响，表明在环境规制严格的地区，算力发展显著改善了福利碳绩效，提升了碳排放带来的福利效应。而在环境规制低水平地区，算力发展对碳排放经济绩效的正向影响还有较大提升空间。另外，算力发展对福利碳强度有显著的负向影响，说明算力发展能显著改善福利碳绩效，可能因算力带来的经济活动增加在一定程度上促进了居民福利的提升。

表 11 异质性检验三

变量	环境规制高水平地区		环境规制低水平地区	
	(1)	(2)	(3)	(4)
	CEE	CIWB	CEE	CIWB
DCP	1.4083 (1.2281)	-3.0332** (-2.2327)	-1.4183*** (-2.7404)	-3.8319*** (-2.6464)
_cons	-0.0094 (-0.2150)	0.0876** (2.4346)	-0.0103 (-0.4575)	0.0210 (0.7784)
Controls	Yes	Yes	Yes	Yes
IdFE	Yes	Yes	Yes	Yes
Year FE	Yes	Yes	Yes	Yes
Id-Year FE	Yes	Yes	Yes	Yes
N	123	237	123	237

七、结论与政策建议

本文聚焦算力发展对区域碳绩效的影响，深入分析了算力发展的降碳增效效应。研究表明，算力发展提升了区域碳绩效，同时对区域降碳增效具有进步效应和结构效应“双重”影响，一方面，算力发展通过提升区域全要素能源利用效率，形成了降碳增效效应；另一方面，算力发展通过促进产业结构优化升级，形成降碳增效效应。值得注意的是：算力发展对区域降碳增效的影响存在基于不同区域、不同环境规制水平的异质性特征。

基于研究结果，为算力发展推进区域增效提出以下建议：

1.加快构建多元化算力供给体系。建议优化算力资源科学布局，紧扣“东数西算”工程规划，有序引导新增算力资源向国家枢纽节点集聚，推动东部算力需求与中西部算力供给的协同联动。在东部发达地区利用完善的数字基础设施和高质量数字人力资本优势，实施技术与组织互补发展路径；在中部地区重点加强数字金融与技术基础设施的协同发展，弥补技术应用不足的短板；在西部地区充分发挥风光水电等清洁能源优势，承接东部地区中高延时业务需求，因地制宜

宜地探索符合地方实际的低碳发展路径。推进多元异构算力发展,强化新型算力基础设施建设,以更灵活的运营模式响应快速迭代的算力需求,打造融合“通用计算、智能计算、超级计算”的一体化算力中心,进而实现不同精度算力资源服务的高效协同。提高算力服务普惠水平,进一步完善算力服务平台建设和数据采集机制,有效降低算力使用成本,提供易用、灵活配置、按需收费的算力服务。构建跨区域算力调度机制,利用国家枢纽节点资源,联动调度中西部绿色能源富集地区算力资源,促进全国算力资源供给均衡。培育专业化算网运营商,构建覆盖算力运行、网络管理、设备维护的全周期服务体系,打造供给高效化、调度机制化、运营周期化的算力发展新生态。

2.统筹推进绿色算力一体化发展。建议加快推进数据中心节能降耗,对标国家发展改革委等四部委在《数据中心绿色低碳发展专项行动计划》中提出的“到2025年底,全国数据中心布局更加合理,整体上架率不低于60%,平均电能利用效率降至1.5以下,可再生能源利用率年均增长10%,平均单位算力能效和碳效显著提高”^①的发展目标,合理谋划新建数据中心与可再生能源发电协同布局,推动高效制冷散热绿色低碳技术应用,提高自然冷源利用率,促进绿色电力转换成为绿色算力。谋划编制“十五五”算力与绿色电力一体化发展规划,发挥好政府投资带动放大效应,鼓励民间资本参与绿色算力重大项目。发展绿色金融产品服务体系,鼓励金融机构向算力中心节能降碳升级和设备更新提供资金支持。加强创新载体建设,推进政产学研纵深发展,集中攻关一批绿色算力关键共性技术,一体化推进科学研究、技术创新和人才培养,增强自主创新技术供给能力,共同推动算力核心技术的创新和突破。

3.深化算力赋能千行百业新应用。立足算力需求旺盛行业的实际需求,探索“算力+”场景体系建设,打造低成本、高品质、易使用的算力服务,提升算力应用在不同行业领域中的渗透率。差异化建设行业特征鲜明的数据集群,激活数据要素市场,加快数据要素流通,打破“数据孤岛”,释放数据要素价值。建议加快培育算力产业生态,不断延链、强链、补链,做大芯片制造、服务器、网络设备等上游产业环节;做优电信运营商、互联网企业、互联网数据中心服务商等中游产业主体;做精由政府、金融、能源、工业等终端用户构成的下游市场。这些不仅能够促进区域内的产业结构优化,还能在发展算力产业中打造新的经济增长点,更能有效地实现社会福利最大化。

参考文献:

[1]王珮,黄珊,王瑶,等.碳排放权交易对企业碳绩效的影响研究[J].科研管理,2023,44

(12):158-169.

[2]宋玉冰,罗敬蔚.算力推动农业强国建设的理论逻辑与践行路径[J].价格理论与实践,2024(12):47-53.

[3]沈坤荣,林剑威.人工智能赋能产业变革的机制与推进路径[J].经济纵横,2025(1):55-65+136.

[4]尹龙,郭子彤.数字经济对生态福利绩效的影响研究——基于中介效应和门槛效应的实证检验[J].调研世界,2024(7):27-39.

[5]杨惠馨,齐超,冯文娜.“两业”融合背景下大数据何以驱动产品与服务质量双提升:海尔案例[J].宏观质量研究,2024,12(5):102-115.

[6]杨岸.数据要素价值释放:理论逻辑、困境透视与突破策略[J].征信,2025,43(2):56-68.

[7]李丙金,李婧.5G技术应用于新能源产业发展影响研究——基于我国新能源汽车产业[J/OL].工程管理科技前沿,2024:1-9.http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1013.N.20241128.0953.010.html.

[8]彭文斌,苏欣怡.长三角地区数字经济发展对碳排放效率的影响——基于产业集聚的门槛效应[J].当代财经,2024(12):126-139.

[9]何琨琰,张文彬,张楠.数智赋能与中国节能降碳效率:机制与效应[J].中国地质大学学报(社会科学版),2025,25(1):82-99.

[10]郭聆,侯雪花.数字新质生产力推动新型工业化:内在机理与策略选择[J].改革,2025(2):77-87.

[11]江艇.因果推断经验研究中的中介效应与调节效应[J].中国工业经济,2022(5):100-120.

[12]王守坤,范文斌.金融可得性与碳排放——来自金融地理结构的宏观与微观证据[J].数量经济技术经济研究,2024,41(1):67-89.

[13]汪伟,刘玉飞,彭冬冬.人口老龄化的产业结构升级效应研究[J].中国工业经济,2015(1):47-61.

[14]马述忠,张道涵,胡增玺.数字知识流动如何促进区域协调发展——兼论经济增长和平衡发展双重目标[J].中国工业经济,2025(2):80-98.

[15]王杰,刘斌.环境规制与企业全要素生产率——基于中国工业企业数据的经验分析[J].中国工业经济,2014(3):44-56.

[16]Zhao Z,Zhao Y,Shi X,et al.Green innovation and carbon emission performance: The role of digital economy[J].Energy Policy,2024,195:114344.

[17]Chang M,Xu Z,Gou X.Does advanced human capital structure improve carbon emission performance in China? Empirical research from a spatial spillover perspective[J].Journal of Cleaner Production,2024,481:144152.

[18]Zhang W,Liu X,Zhao S,et al.Does green finance agglomeration improve carbon emission performance in China? A perspective of spatial spillover [J].Applied Energy,2024,358:122561.

[19]Gu L,Cai J,Zeng D,et al.Energy-efficient task allocation and energy scheduling in green energy-powered edge computing[J].Future Generation Computer Systems,2019,95:89-99.

[20]Safaei-Farouji M,Vo T H,Dai Z,et al.Exploring the power of machine learning to predict carbon dioxide trapping efficiency in saline aquifers for carbon geological storage project[J].Journal of Cleaner Production,2022,372:133778.

[21]Li L,Ren X Y,Tseng M L,et al.Performance evaluation of solar hybrid combined cooling, heating and power systems: A multi-objective arithmetic optimization algorithm[J].Energy Conversion and Management,2022,258:115541.

[22]Aminizadeh S,Heidari A,Dehghan M,et al.Opportunities and challenges of artificial intelligence and distributed systems to improve the quality of healthcare service[J].Artificial Intelligence in Medicine,2024,149:102779.

[23]Ma S,Ding W,Liu Y,et al.Digital twin and big data-driven sustainable smart manufacturing based on information management systems for energy-intensive industries[J].Applied Energy,2022,326:119986.

[24]Nain G,Pattanaik K K,Sharma G K.Towards edge computing in intelligent manufacturing: Past, present and future[J].Journal of Manufacturing Systems,2022,62:588-611.

[25]Xu B,Lin B.Investigating the role of high-tech industry in reducing China's CO₂ e-missions: A regional perspective[J].Journal of Cleaner Production,2018,177:169-177.

[26]Yang S,Jahanger A,Hossain M R.How effective has the low-carbon city pilot policy been as an environmental intervention in curbing pollution? Evidence from Chinese industrial enterprises[J].Energy Economics,2023,118(1):106523.

[27]Chernozhukov V,Chetverikov D,Demirer M,et al.Double/debiased machine learning for treatment and structural parameters[J].CeMMAP working papers,2018,21(1):C1-C68.

(作者单位:李宁,平顶山学院经济管理学院;陈亮,成都理工大学环境与土木工程学院/地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室;孔德源,西南交通大学希望学院;万相昱,中国社会科学院数量经济与技术经济研究所、中国社会科学院大学应用经济学院)

①文件来源:国家发展改革委官网.关于印发《数据中心绿色低碳发展专项行动计划》的通知[EB/OL].(2024-07-23).https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202407/t20240723_1391895.html.