

人工智能对中国电力行业碳排放的影响机制研究

张谦 高一帆

河北省保定市华北电力大学大学经济与管理学院, 河北省保定市, 071000;

摘要: 为探究人工智能对电力行业碳排放的影响效应与作用机制, 以2011—2022年中国除港、澳、台及西藏外30个省级行政区面板数据为样本, 构建双向固定效应模型与门槛效应模型, 实证检验人工智能对电力系统碳排放的影响及区域异质性、非线性特征。研究发现: 人工智能发展显著促进电力行业碳减排, 该结论经替换变量、增加控制变量等稳健性检验后依然成立; 人工智能的碳减排效应存在明显区域异质性, 东部地区减排效果显著, 中西部地区暂未体现显著作用; 二者之间存在单门槛效应, 当人工智能发展水平跨越阈值后, 其对电力行业碳减排的促进作用进一步增强。基于研究结论, 提出加大人工智能在电力行业的应用力度、因地制宜制定区域差异化政策、推动人工智能技术绿色低碳发展等对策建议, 为电力行业实现“双碳”目标提供实证支撑与决策参考。

关键词: 中国电力行业; 人工智能; 碳排放; 碳减排; 门槛效应; 区域异质性

DOI: 10.69979/3029-2727.26.04.071

引言

在环境污染加剧与资源约束趋紧的双重压力下, 绿色可持续发展成为全球共同的战略选择, 我国向国际社会郑重提出“碳达峰、碳中和”目标, 并出台系列政策部署推动落地实施。电力行业作为我国碳排放的核心来源, 2024年其碳排放占能源领域总排放的44%, 尽管清洁能源占比逐步提升, 但火力发电仍占主导地位, 其低碳转型成效直接决定我国“双碳”目标的实现进程。

人工智能作为全球科技竞争与产业变革的核心领域, 美、德、日等23个国家已将其纳入国家战略规划, 其在生态环境保护与低碳发展领域的应用兼具机遇与挑战。在我国新型电力系统建设进程中, 南方电网先后发布数字电网白皮书、推出行业首个自主可控电力大模型“大瓦特”, 人工智能技术在电力系统对新能源“可观、可测、可控”的环节中应用价值日益凸显。

现有研究多聚焦人工智能对经济增长、收入分配、劳动力市场等领域的经济效应, 针对其环境效应尤其是电力行业碳减排影响的研究相对匮乏, 且鲜有将人工智能纳入电力碳排放研究框架的定量实证成果。为填补这一研究空白, 本文选取2011—2022年中国30个省份面板数据, 运用双向固定效应模型与门槛效应模型, 实证检验人工智能对电力行业碳排放的影响, 揭示其区域异质性与非线性作用特征, 旨在为电力行业绿色低碳发展与人工智能技术的合理应用提供科学支撑。

1 理论分析与研究假设

人工智能技术深度渗透电力生产、调度、运维、监管等全产业链环节, 从多维度推动行业碳减排。在生产端, 可实时监控发电设备运行状态, 实现发电资源智能优先级排序, 在保障能源供应的前提下优先消纳风电、光伏等可再生能源, 降低火力发电占比; 在调度端, 通

过智能电网优化电力分配路径, 减少能源传输过程中的损耗, 同时提升可再生能源发电预测的准确性与能源转换效率; 在运维端, 能快速识别电网异常与故障, 降低电力中断频率, 减少因电网事故引发的额外温室气体排放。人工智能通过全方位提升电力行业运营效率, 直接推动碳减排进程, 据此提出假设人工智能发展对电力行业碳减排具有显著的促进作用。

2 研究设计

2.1 样本选择与数据来源

考虑到统计数据的连贯性与可获取性, 本文选取2011—2022年中国除中国香港地区、中国澳门地区、中国台湾地区及西藏自治区外的30个省级行政区为研究样本, 构建平衡面板数据。研究基础数据来源于《中国碳排放核算数据库》《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》及各省份统计年鉴, 对于数据中存在的少量缺失值, 采用插值法进行填补, 保证数据的完整性。

2.2 变量定义

(1) 被解释变量: 电力系统CO₂排放量(Inco₂)。本文仅核算电力生产环节中火力发电产生的碳排放, 假设风电、水电、核能等清洁能源发电为零碳排放过程, 采用联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)推荐的排放因子法计算碳排放总量, 并对计算结果进行对数处理以消除异方差影响, 计算公式为:

$$CEC = \sum_{j=1}^J E_j \times NVC_j \times CC_j \times O_j \times \frac{44}{12} \quad (1)$$

式中, E_j 为第 j 种化石燃料消耗量, NVC_j 为第 j 种化石燃料平均低位发热量, CC_j 为第 j 种化石燃料单位热值含碳量, O_j 为第 j 种化石燃料碳氧化率, 44/12 为二氧化碳与碳的分子量之比。

(2) 核心解释变量: 人工智能发展水平(AI)。

参考《中国人工智能产业发展指数》等权威评价框架，结合现有研究成果，从环境支撑、产业竞争力、核心组成要素三大准则层出发，构建包含互联网宽带接入端口数、人工智能专利申请数、算力规模等12项二级指标的人工智能发展水平评价体系，通过综合打分法得到各省份年度人工智能发展水平指标值。

(3) 控制变量：为控制省份个体特征对电力行业碳排放的影响，选取4项控制变量：产业结构（IS），用第三产业产值与第二产业产值的比值表示；城镇化率（UR），用城镇居民人数占总人口数的比重表示；环境规制（ER），用工业污染治理完成投资额与工业增加值的比值表示；对外开放水平（OD），用货物进出口总额按当年汇率换算为人民币后与地区生产总值的比值表示。

(4) 模型设定：双向固定效应模型：为检验人工智能对电力行业碳排放的基准影响效应，结合面板数据特征，构建省份与时间双向固定效应模型，具体设定如下：

$$\text{Carbon} - \text{Emission}_{it} = \text{cons} + \alpha_1 \text{AI}_{it} + \sum \gamma_n \text{X}_{it} + \tau_i + \pi_t + \epsilon_{it} \quad (2)$$

式中，i表示省份，t表示年份，cons为常数项，AI_{it}为核心解释变量，X_{it}为控制变量组合，α₁为人工智能发展水平的影响系数，γ_n为各控制变量的影响系数，τ_i、π_t分别为省份个体固定效应与时间固定效应，ε_{it}为随机误差项。

3 实证结果与分析

3.1 基准回归与多重共线性检验

基准回归结果显示，未引入控制变量时，人工智能发展水平（AI）的系数为-2.1838且在1%的统计水平上显著；引入产业结构、城镇化率等控制变量后，AI系数为-2.1397，仍在1%的统计水平上显著为负。这表明人工智能发展每提升1个单位，电力行业碳排放将显著降低2.1397个单位，验证了假设人工智能发展对电力行业碳减排具有显著的促进作用。

表1 基准回归

变量	Inco2 计算	Inco2 计算
AI	-2.1838*** (0.5817)	-2.1397*** (0.5939)
UR		1.7152** (0.8295)
IS		-0.0123 (0.0336)
ER		-0.0007 (0.0015)
观测数	360	360
Adjusted R-squared	0.870	0.870
固定效应	YES	YES

3.2 稳健性检验

为确保基准回归结论的可靠性，本文采用三种方法开展稳健性检验：一是替换被解释变量，将电力系统碳排放总量替换为电力碳排放与地区生产总值的比值；二是替换核心解释变量，将人工智能综合发展指标替换为人工智能专利申请数量；三是增加控制变量，在模型中纳入经济发展水平、信息化水平等指标。

三次稳健性检验的回归结果均显示，人工智能发展水平相关系数均在1%的统计水平上显著为负，与基准回归结论一致，表明人工智能对电力行业碳减排的显著促进作用具有稳健性，不受变量设定与模型调整的影响。

表2 稳健性分析

变量	替换 co2	Inco2 计算	Inco2 计算
AI	-1.2361**		-2.5526***
	-0.5763		-0.7512
UR	-0.253	1.5563*	2.4424***
	-0.8049	-0.8336	-0.8849
IS	-0.0237	-0.0047	-0.0021
	-0.0326	-0.0335	-0.0337
ER	-0.0030**	-0.0009	-0.0005
	-0.0014	-0.0015	-0.0015
PR			0.0028*
			-0.0017
GDP			-0.0000*
			0
OD			-0.2237
			-0.3128
人工智能专利申请数		-0.0000***	
		0	
观测数	360	360	360
Adjusted R-squared	0.894	0.87	0.871
固定效应	YES	YES	YES

3.3 区域异质性分析

按我国地理区划标准，将研究样本分为东部、中部、西部地区，开展区域异质性分析。回归结果显示：东部地区人工智能发展水平的系数为-2.1880且在1%的统计水平上显著，表明东部地区人工智能对电力行业碳减排的促进作用显著；中部、西部地区人工智能发展水平的系数未通过显著性检验，暂未体现出显著的减排效应。

表3 异质性分析

变量	Inco2 计算	Inco2 计算	Inco2 计算
AI	-2.1880***	0.7552	-1.4491
	-0.6802	-4.2974	-1.1007
IS	0.0535	-0.1069	0.0233
	-0.0484	-0.0941	-0.0561
UR	2.1123***	-1.2367	-3.2361
	-0.8017	-7.1924	-2.5952
ER	0.0018	-0.005	-0.0015
	-0.0022	-0.0044	-0.0016
观测数	132	96	132
Adjusted R-squared	0.932	0.387	0.943
固定效应	YES	YES	YES

区域异质性的成因主要在于东部地区经济发展水平高、人工智能技术研发与应用基础好,电力行业数字化、智能化转型进程更快,能充分发挥人工智能的减排作用;而中西部地区人工智能技术落地条件相对薄弱,电力行业仍以传统火电为主,清洁能源配套设施不完善,人工智能的减排效应尚未有效释放。

4 对策建议

基于上述研究结论,为充分发挥人工智能在电力行业碳减排中的作用,推动电力行业实现绿色低碳转型,助力我国“双碳”目标实现,提出以下对策建议:

(1) 加大人工智能在电力行业的全领域应用力度:推动人工智能技术与电力生产、调度、运维、交易等各环节深度融合,重点研发电力大模型、智能调度系统、设备智能监控等技术产品,提升电力系统智能化水平;加大对电力行业人工智能技术应用的政策支持与资金投入,鼓励电力企业与高校、科研机构合作,开展人工智能减排技术的联合研发与成果转化。

(2) 因地制宜制定区域差异化人工智能应用政策:东部地区依托技术与产业优势,进一步深化人工智能在清洁能源消纳、智能电网建设等领域的应用,打造人工智能赋能电力碳减排的示范标杆;中西部地区加快完善人工智能基础设施建设,加强技术引进与人才培养,结合本地能源结构特征,优先推动人工智能在火电节能改造、新能源场站智能化运营等领域的落地,逐步释放减排效应;建立东西部人工智能技术交流与合作机制,推动东部先进技术与经验向中西部转移。

(3) 推动人工智能技术自身的绿色低碳发展:针对人工智能技术应用初期的碳排放问题,优化人工智能基础设施的能源结构,采用风电、光伏等清洁能源为数据中心、算力中心供电,降低能源消耗与碳排放;建立人工智能产业绿色环保评估与认证体系,引导企业研发低能耗、高效率的人工智能技术与产品,实现人工智能技术发展碳减排的协同推进。

(4) 完善人工智能赋能电力碳减排的配套体系:加强电力行业与人工智能领域的复合型人才培养,高校增设相关交叉专业,企业开展定向人才培养;建立全国统一的电力碳排放数据平台,为人工智能技术的应用提供数据支撑;完善电力行业低碳发展的激励政策,将人工智能技术应用纳入碳减排奖励范围,激发企业应用人工智能技术减排的积极性。

5 研究局限与展望

本文通过实证研究揭示了人工智能对中国电力行业碳排放的影响效应与作用机制,但仍存在一定的研究

局限:一是在人工智能发展水平测度方面,采用的综合打分法虽兼顾多维度指标,但未能充分考虑指标间的横向交互影响;二是研究样本为省级面板数据,未能深入至城市或企业层面,难以反映微观主体的差异;三是研究时间区间为2011—2022年,未能涵盖更长的时间维度,对长期趋势的分析不足。

未来可从三方面开展进一步研究:一是优化人工智能发展水平测度方法,引入更科学的赋权方式,充分考虑指标间的交互作用,提升测度准确性;二是采用城市或企业层面的微观数据,深入分析人工智能对不同规模、不同类型电力企业碳排放的异质性影响;三是延长研究时间区间,结合人工智能技术与电力行业的发展趋势,分析二者关系的长期演变特征,为人工智能赋能电力行业长期低碳发展提供更具针对性的参考。

参考文献

- [1] 邵帅,范美婷,杨莉莉.经济结构调整、绿色技术进步与中国低碳转型发展——基于总体技术前沿和空间溢出效应视角的经验考察[J].管理世界,2022,38(02):46-69+4-10.
- [2] Tanveer Ahmad, Hongyu Zhu, Dongdong Zhang. Energetics Systems and artificial intelligence: Applications of industry 4.0[J]. Energy Reports, 2022, 8: 334-361.
- [3] 杨光,侯钰.工业机器人的使用、技术升级与经济增长[J].中国工业经济,2020(10):138-156.
- [4] 徐国泉,刘则渊,姜照华.中国碳排放的因素分解模型及实证分析:1995-2004[J].中国人口·资源与环境,2006(06):158-161.
- [5] 王艳秋,陶思佳.工业智能化对中国工业碳排放效率的影响及空间效应研究[J].技术经济,2023,42(01):130-140.
- [6] 陈晓红,唐润成,胡东滨,等.电力企业数字化减污降碳的路径与策略研究[J].中国科学院院刊,2024,39(02):298-310.

作者简介:张谦(1977-),性别男,河北省保定市人,华北电力大学经济管理系副教授,硕士生导师,管理学博士,从事能源经济管理与低碳经济研究。

高一帆(2001-),性别女,河北省保定市人,华北电力大学经济管理系硕士,从事能源经济管理与低碳经济研究。

基金项目:河北省自然科学基金项目(项目编号G2024502001),河北省社会科学基金项目专项项目(编号HB24ZT026)