

人工智能赋能碳治理体系的内在逻辑、现实困境与实现路径

尹舒蓉, 孙云萌, 张艺馨, 刘思馨, 刘雪凤*

中国矿业大学公共管理学院, 江苏 徐州

收稿日期: 2025年8月26日; 录用日期: 2025年9月15日; 发布日期: 2025年10月16日

摘要

当前气候问题形势严峻, 亟待解决。在全球协力应对气候变化、积极探索碳治理可行路径的时代背景下, 本研究通过对人工智能和碳治理体系发展的相关梳理, 构建人工智能赋能碳治理体系的内在逻辑, 在分析当下人工智能赋能碳治理体系存在困境的基础上, 从技术、政策、国际协作三个方面提出实现路径, 促进人工智能与能源等相关领域的进一步融合, 推动碳达峰碳中和目标的实现。

关键词

人工智能, 碳治理体系, 双碳目标, 绿色转型

The Internal Logic, Practical Dilemmas, and Implementation Paths of Artificial Intelligence Empowering Carbon Governance Systems

Shurong Yin, Yunmeng Sun, Yixin Zhang, Sifan Liu, Xuefeng Liu*

School of Public Policy & Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu

Received: August 26, 2025; accepted: September 15, 2025; published: October 16, 2025

Abstract

Against the severe and urgent backdrop of addressing climate change, as the global community joins forces to tackle climate issues and actively explore feasible paths for carbon governance, this study systematically sorts out the development of Artificial Intelligence (AI) and carbon governance systems. It constructs the internal logic of AI empowering carbon governance systems, and on the basis

*通讯作者。

文章引用: 尹舒蓉, 孙云萌, 张艺馨, 刘思馨, 刘雪凤. 人工智能赋能碳治理体系的内在逻辑、现实困境与实现路径[J]. 低碳经济, 2025, 14(4): 330-343. DOI: 10.12677/jlce.2025.144035

of analyzing the current dilemmas in this empowerment process, proposes implementation paths from three dimensions: technology, policy, and international cooperation. The aim is to promote the further integration of AI with energy and other related fields, and advance the achievement of the “dual carbon” goals (carbon peaking and carbon neutrality).

Keywords

Artificial Intelligence (AI), Carbon Governance System, Dual Carbon Goals, Green Transition

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

当前,随着工业化、城镇化进程加速推进,煤炭、石油等化石能源被大规模地开采与使用,致使大气中二氧化碳、甲烷等温室气体含量持续攀升,使得全球气候变暖趋势愈发显著。据世界气象组织最新发布的气候预测报告指出,在2025年至2029年间,全球气温预计将保持在或接近创纪录水平[1]。气候变化的危机形势,对经济、生态系统与可持续发展构成了严峻威胁。随着全球化的不断深入,气候变化已从单纯的环境问题演变为威胁全人类生存与发展的复合型危机,亟需国际社会凝聚共识,采取系统性、协同性的应对策略,共同破解这一关乎人类文明存续的重大课题。作为负责任大国,我国积极响应《巴黎协定》,在第七十五届联合国大会一般性辩论上提出,“中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”[2]。将“双碳”目标纳入“十四五”规划和2035年远景目标纲要,确立为国家战略发展的核心议题。出台《碳达峰碳中和工作意见》《2030年前碳达峰行动方案》等纲领性文件,构建起“1+N”的政策体系。在数字化新时代,我国秉持着创新、协调、绿色、开放、共享的新发展理念,将人工智能作为新一轮科技革命和产业革命的重要驱动力,致力于在能源结构转型、交易市场完善等领域进一步实施碳治理实践,推动经济、社会、环境向绿色低碳转型,向可持续发展的未来稳步迈进。

当前,国内外学者围绕人工智能赋能碳治理体系的研究已形成多维探索。已有研究的侧重点在于技术应用的实效性与异质性,既强调AI在提升能效、优化能源结构、创新治理模式等方面的显著效能,也客观分析其在不同行业、阶段、区域的作用差异及潜在风险。国内研究中,学者们从多方面研究了AI赋能碳治理的技术路径与实际效能。在工业领域,王灿认为人工智能通过优化生产流程、预测设备能耗及智能调度物流系统,可显著提升工业碳治理效率[3];刘芳等学者进一步指出,制造业借助数字孪生、智能调度与供应链优化等技术,能系统性降低生产端能耗与碳排放,推动传统能源高效替代[4]。在碳核算与监测层面,蒋金荷通过构建“数字MRV体系”,使跨境碳核算效率提升40%以上[5];谭腾则强调AI通过嵌入低碳治理关键环节,凭借数据智能分析与动态优化能力,能提升环境监测精准度、决策科学性 & 治理响应速度,增强整体治理效率[6]。城市层面,潘浩之等学者的研究表明,碳排放仿真系统通过动态耦合建筑、交通与能源系统,模拟精度较传统模型提升23%[7];王淼则提出区块链技术支撑的“城市数字碳账本”,为碳排放数据提供了可追溯的信任基础设施[8]。民生与治理模式创新方面,赵宏霞等证实,部署智能微电网与AI废弃物分拣系统的“物联网+AI”技术协同模式,可使居民人均碳足迹减少18%[9];杨博文的“四维赋能框架”揭示了数字技术对政府、市场与社会关系的重构潜力,其实证研究

表明智能合约技术能使碳交易执行成本降低 60%，为多元主体协同治理提供支撑[10]。

国外研究同样围绕技术应用的实效性与异质性展开深入探索。在行业针对性应用上，Qing 等发现人工智能对生产端和消费端碳排放均有降低作用，且对生产端影响更为明显，为差异化碳治理提供依据[11]；Hua 等提出 AI 可通过机器学习模型分析建筑设计、材料选择和能源消耗等因素，预测建筑碳足迹，助力减排策略制定[12]；Han 证实 AI 能降低工业碳排放强度，并通过产业结构优化和创新促进提升碳生产力[13]。在政策分析层面，Attard-Frost 等的研究侧重于伦理与多利益相关方决策，且相关政策框架通常涵盖伦理准则、安全保障、数据管理等关键方面[14]；Ezenkwu 等学者认为，人工智能技术能够辅助构建国家、区域以及跨国的碳减排协同策略，从而有效促进全球范围碳治理目标的实现[15]。在技术落地场景中，Makumbe 等的研究显示智能能源管理系统利用机器学习处理智能电表和传感器数据，可实现实时能耗监控并识别低效环节[16]；Flores-Lasluisa 等则发现 AI 能加速新型碳捕获材料开发，通过机器学习有效预测高效氧还原反应性能的锰基材料[17]。在城市与市场层面，Yan 等将 AI 与城市规划结合，为低碳城市发展提供创新方法以实现“双碳”目标[18]；Islam 提出 AI 可构建智能化碳市场，提升碳交易效率与透明度[19]；Guo 等则聚焦工业城市，指出 AI 能驱动低碳排放设计，优化城市规划与技术应用[20]。同时，国外研究也关注到潜在风险，Mu 等指出人工智能在碳减排中虽潜力巨大但存在潜在风险[21]；Dhar 进一步明确 AI 技术本身存在碳足迹问题，大型 AI 模型训练会消耗大量能源并产生显著碳排放[22]。

整体而言，现有研究已构建起 AI 优化碳治理体系的多维框架，呈现出从单一技术影响到系统融合创新、从工业生产端到城市居民端全场景覆盖的特征，体现了理论与实践结合、宏观与微观互构的研究视角。但现有研究仍有不充分之处。第一，缺乏 AI 与碳治理体系的深层因果逻辑挖掘。现有研究多将 AI 技术与碳治理环节拆解分析，未从生产要素维度来系统揭示 AI 赋能碳治理的内在作用机制，导致二者融合的理论链条断裂。第二，未将碳治理体系视为动态发展系统。现有研究多孤立分析政策工具、市场机制或单一技术的静态效果，忽视碳治理体系在技术迭代、制度演进、国际环境变化中的动态适应性，难以应对治理过程中的复杂矛盾。

劳动者和劳动工具在人工智能发展进程中承担着重要角色，对于数据的收集、分析和处理是人工智能得以发挥作用的基础；在碳治理的进程中，传统能源的转型问题和对新能源的不断探索，以及市场如何合理配置资本，一直是各界研究的重要方面。因此，基于上述研究不足，本文的创新点在于：第一，综合研究“人工智能”与“碳治理体系”之间的关系，依据生产要素理论，选取能源、资本、劳动、数据四个要素，形成整体运行框架，旨在从多维度揭示人工智能赋能碳治理体系的内在逻辑；第二，系统分析当前技术应用中的现实困境，最终从技术协同、政策保障、国际协作三个维度提出具有针对性的可行路径，为推动人工智能与碳治理深度融合、加速实现“双碳”目标提供理论参考。

2. 当代碳治理的困境

（一）能源结构转型欠动力

能源系统作为碳排放的主要来源，其结构的转型是当代碳治理的关键。一方面，传统能源结构以不可再生的化石燃料为主，其排放的有害物质对经济可持续发展、环境保护构成较大威胁，但传统能源结构转型至可再生能源面临技术、成本和基础设施等多重障碍[23]。人工智能通过收集和分析数据，为碳排放的各个环节提供科学决策支持，突破技术不足的局限，从源头控制碳排放，实现由传统能源向可再生能源、清洁能源的转型。另一方面，由于储能技术的发展和应用仍不成熟，可再生能源的间歇性和波动性对电网的稳定性构成挑战，使其无法完全代替传统能源[24]，导致能源转型过程中效率低下。通过人工智能，推动智能电网系统的构建和新型储能技术的发展，能够使可再生能源更好地在各个领域中发挥作用，提高能源的质量和利用效率，促进企业降本增效。

(二) 碳市场技术支持不足

碳交易市场中,碳排放权交易是碳治理的有效手段,但现有碳市场由于缺乏相关技术的引入,难以形成具有统筹作用的机制和完善的管理,导致现有市场存在覆盖范围窄、交易机制不灵活、价格波动大等问题,影响了企业减排的积极性和碳治理效果。针对碳交易市场问题,人工智能可以通过建立统一数据管理平台,实现数据共享和智能化管理,扩大交易空间和范围,实现碳资产管理与交易决策,让企业科学管理碳资产、灵活交易排放权。此外,人工智能技术的不充分利用导致绿色金融工具的单一局限性和绿色金融体系的不完备,绿色金融产品发展受到限制,造成绿色投资的损失和市场信心的下降。通过数据训练模型和自然语言处理等技术,能够创新多样化的绿色金融产品,促进市场在可再生能源等方面的绿色投资,提振市场信心。

(三) 劳动要素短板待弥补

劳动要素层面,劳动工具有待优化、劳动主体技能有待提升、劳动主体协同不足的短板是碳治理亟需解决的问题。其一,劳动工具层面。就监测工具而言,传统碳监测主要依靠人工巡检与单点数据采集,该方式的缺陷在于效率低下且精准度不足。而人工智能通过计算机视觉与大语言模型构建的多模态监测系统,可实时生成碳足迹图谱,替代传统人工流程,实现自动精准的数据测量。其二,劳动主体技能层面。碳治理对“复合型、动态化、智能化”技能的需求与从业者现有能力并不匹配,目前在岗的相关劳动者面临缺乏数据分析与模型应用能力、海量复杂信息整合能力、跨领域综合决策能力。从基层碳治理从业者到中高层决策者的能力更新速度都落后于碳治理发展的需求。而人工智能不仅可以作为劳动工具提高工作效率、减少失误,还可以充当学习工具。AI可以针对劳动者的岗位需求设计精准有效的个性化方案,开发相关课程,协助劳动者提高个人能力,夯实碳治理的人才基础。其三,劳动主体协同方面。碳治理涉及企业、环保部门、行业协会等多元主体。各主体的信息存储于独立系统,难以实时互通,信息沟通成本高。而人工智能可以通过构建跨主体信息共享平台,实现企业实时排放数据、核查结果等信息的同步更新,减少重复沟通。使各主体在信息共享和使用上,实现最大限度的协作效果。

(四) 碳排放数据管理不善

当下及未来,碳排放相关数据规模不断增长,数据应用场景也日益复杂,然而传统的碳排放管理和应用方法存在不足之处,面临巨大挑战。在数据采集方面,传统的监测方法难以覆盖所有排放源,且数据更新速度慢,无法满足需求。而人工智能能够整合卫星遥感数据、地面监测数据等多方面数据,利用机器学习算法进行数据融合和分析,提供精准的碳排放清单。在数据库方面,传统数据库既不会基于碳排放领域的历史查询特征自动优化,也无法针对碳排放数据的时序性等特征,动态优化数据存储结构。结果导致其无法适配碳排放数据的动态查询需求。但人工智能赋能的数据管理技术通过对查询负载、数据分布等进行特征抽取和建模,结合机器学习等技术,对数据库进行有针对性地优化。在数据应用方面,人工智能可以进一步激活数据,挖掘曾被忽视或无法察觉的价值。例如,在整理和汇总各区域、各行业的碳排放数据中,人工智能利用碳排放数据构建预测趋势的模型中发挥重要作用。因此,AI技术为碳排放数据管理带来了新的机遇,它可以优化碳治理在数据层面的问题,构建一个能够全覆盖、多层次、多类型的碳排放数据管理与应用体系。

3. 人工智能赋能碳治理体系的内在逻辑

自1956年达特茅斯会议中“人工智能”这一术语被首次提出算起,人工智能技术已经在六十多年的发展中成为了一门具有极强的学习、演化能力的技术科学,其概念也在符号主义、连接主义到行为主义的演进过程中不断得到丰富。迄今为止,人工智能的身份不再仅是许多采用新信息技术的活动领域的核心[25],其作用更延伸到了传统领域,这一“利用技术手段学习、模拟或超越人的综合智能的技术,使机

器具备感知、决策和行动的能力”的新型学科交叉技术[26],在以智能机器开发机器智能,以人类、理性和道德的方式感知、推理、学习、发现、优化、行动、交流和反思的目标引导下[27],为解决社会发展问题不断提供强大助力。在可持续发展理念进一步深化的大背景下,人工智能正通过系统性重构能源、数据、劳动、资本等要素配置的方式,深度融入碳治理体系。

(一) 人工智能赋能能源要素

在当代社会,能源作为基础性生产要素,在人们生产生活过程中发挥着基础性作用。根据国家统计局数据,截至2024年,我国能源消费结构仍以化石能源为主导,清洁能源消费量占能源消费总量比重仅为28.6% [28]。这使我国各行业在推进碳中和的过程中,依然面临着一系列减排挑战。而人工智能能够推动能源结构转型,在碳治理过程中促进能源提质增效。首先,通过构建数据分析模型和机器学习技术,人工智能能推动传统能源结构转型,提高能源利用效率。德国 Windnode 示范项目利用人工智能优化风电和光伏发电的并网规划与调度,有效解决了新能源的不稳定难题,使德国东北部地区的可再生能源发电量占据了电力消耗的56.5% [29]。这种引入人工智能辅助新能源稳定供能的方式不仅为我国提供了借鉴,也成为了人工智能赋能能源要素发展的优秀案例。人工智能强大的数据处理和分析能力,使其能够精细化能源生产流程和分配流程,点对点地满足不同用户的实际需求,最大程度地提高能源使用效率,减少能源的不合理损耗[30]。2024年,阿里云构建的机器学习模型在一中型园区投入使用,与传统的静态能源管理策略相比,这种采用机器学习技术的动态能源管理策略能够使园区整体能源利用率提高15% [31]。人工智能与新型能源管理模式相结合并投入使用,能够减少能源损耗。

其次,随着全球科技的快速发展,人工智能正成为能源这一传统生产要素低碳化、智能化转型的强大驱动力。通过与物联网的深度融合,人工智能能够实时、全面地采集能源数据,为碳治理过程中的优化决策奠定坚实的数据基础,并在此基础上,深度作用于能源的生产、分配与消费环节,推动实现我国能源系统的智能化重构与动态优化。在与物联网深度融合后,人工智能将根据所得到的数据构建起高精度能源供需模型,为能源预测与分配提供科学依据。在实际应用中,人工智能可通过实时监测能源数据,帮助供能企业预测新能源发电量,辅助相关部门依据用户信息实现不同时段电力的精准调配。这一阶段不仅为后续决策奠定了可靠基础,更为能源需求的精准预测和合理的供给分配提供了支持[32]。这种“有效检测-精准预测-优化决策”的动态系统,推动人工智能能够优化能源生产与分配流程,切实提高能源使用效率;而能源使用效率的提升又能反向促进能源消耗与碳排放的减少,为碳治理体系发展提供核心支撑。

(二) 人工智能赋能资本要素

一方面,碳交易市场的核心目标是通过通过对各类资源进行统一聚合调控实现碳中和。传统交易方式难以实现精准监测、溯源及高效管理,同时无法保证碳排放权市场化运作的公平性与透明度。另一方面,传统金融模式难以实时把控绿色行业风向,也无法高效实现对企业的政策激励与业绩评价,导致资本配置效率不高,绿色金融难以有效发展。因此,将人工智能引入资本要素,通过元赋能碳交易机制与绿色金融,实现对“监测-预测-决策”动态系统的再赋能,能够有效实现碳治理的目标。第一,人工智能赋能碳交易机制优化,促进碳交易市场降本增效。以软江图灵为例,通过集成AI大模型与能源大数据技术,建立数智能碳管理平台,构建覆盖预测、分析、优化全链条的智能碳管理体系,为相关行业和城市碳治理提出了创新解决方案。平台通过四大功能模块实现能碳管理的全流程智能化。实时监测与多维统计方面,检测范围涵盖六类碳源实现全要素覆盖,通过可视化看板洞悉企业能耗,倒逼企业通过技术改造降低能耗。智能预警与根因分析方面,根据生产负荷、季节因素等进行动态阈值设定,通过根因推理引擎结合知识图谱,实现“症状-原因-解决方案”的智能关联。碳资产管理与交易支持方面,基于相关算法模型预测碳配额,合理控制年度碳成本,同时通过集成碳市场历史数据与宏观经济指标,优化交易策

略。节能降碳路径规划方面,建立包含多项节能技术的数据库,计算相关指标进行技术经济性评估,利用政策模拟器模拟碳税、绿电交易等政策影响下的企业影响。

另一方面,人工智能赋能绿色金融工具的创新,优化资本配置,完善绿色金融体系。依靠数据挖掘技术、数据训练模型、自然语言处理技术,民生银行发布的“民生碳e贷”产品,通过“低碳普惠”“降碳融链”“减碳通关”“节碳科创”四大服务场景,将碳评价体系融入银行信用评级体系中,构建融合“碳能力”评价维度的全新评价体系,并据此提供差异化的全周期、多场景、定制化的综合碳金融产品和生态圈服务,实时监测和把控企业发展状况与低碳转型进程,为碳治理表现出色的企业提供优惠直通,通过决策精准引导中小微企业绿色低碳转型。中小银行体系内,石家庄分行基于相关算法模型和计算机视觉技术推出的“民生光伏贷”“碳e贷”等创新产品,成为首批服务全国碳市场的系统结算银行,全国碳市场会员服务覆盖率达80%以上[33]。通过大力投资支持风力发电、太阳能、抽水蓄能等清洁能源项目,更新贷款政策助力传统产业的绿色转型和企业低碳转型,增强绿色金融体系应对市场变化的能力,助力“双碳”目标实现。

(三) 人工智能赋能劳动要素

一方面,传统劳动工具存在功能局限,向着更加智能、更加高效转变需要人工智能技术;另一方面,现代社会对劳动者提出了更加多维的需求,以适应数字时代发展。因此,将人工智能引入劳动要素,能够创新劳动工具、提升劳动者数字技能,以促进碳治理发展。首先,在监测阶段,人工智能通过创新劳动工具形态与辅助劳动者技能应用实现赋能。第一,人工智能大语言模型、计算机视觉算法与物联网技术深度融合,构建起基于大语言模型的多模态数据分析工具等智能监测工具体系。其中计算机视觉技术可自动识别工业排放源位置与污染物浓度,大语言模型则能整合能源消耗、设备运行等多源异构数据并生成可解读的实时碳足迹图谱,打破传统技术壁垒对普通劳动者的操作限制,让一线劳动者无需复杂技术背景就能直观掌握碳排放现状。第二,在钢铁、化工等工业领域,工人借助人工智能无监督学习算法解析出的设备运行参数与能耗曲线,能实时识别碳排放热点区域,替代传统人工巡检的繁琐流程,显著提升监测精准度与效率。同时,基于监督学习训练的异常识别模型的人工智能辅助系统帮助劳动者快速定位碳排放异常信号,进一步强化监测效能。此外,人工智能还依托自然语言处理的个性化内容生成技术,依据岗位需求开发碳核算、趋势分析等个性化培训课程,帮助劳动者初步学习与智能工具相关的基础技能,为后续深度应用做好准备。

其次,在预测阶段,人工智能通过优化劳动工具与提升劳动者预测能力推动赋能。人工智能算法依托历史排放数据与能源需求波动规律,构建区域碳排放趋势预测模型,借助时序分析能力预判能源需求峰值,助力企业提前调整生产计划。同时,其还能精准预测国家电网电力供需,加强可再生能源调度,减少化石能源消耗,从供需两侧实现碳减排[34]。这种工具创新显著降低了人力资源浪费与预测误差,使劳动者可以从重复的数据统计工作中解放出来,提高碳治理预测效率。通过个性化推荐技术提供的定制化学习方案,依据岗位需求开发个性化的碳核算、趋势分析等培训课程,帮助劳动者快速掌握预测工具的使用方法,提升其运用模型进行预测的能力,让碳治理预测阶段从经验判断转向数据驱动。

最后,在决策阶段,人工智能通过赋能智能工具应用与推动劳动者角色转型实现赋能。AI依托自然语言处理的知识图谱构建技术整合行业法规、技术标准及历史案例库,形成碳排放决策知识库,辅助管理者快速响应合规问题。智能化技术所引致的自我感知与学习能力,可以对工厂的生产环境优劣进行自主感应,判断其生产环节中的耗能及污染情况,进行实时分析并提出解决方案[35]。智能制造工厂的工程师借助基于数字孪生与强化学习的人工智能模拟平台,可仿真不同生产流程调整方案的能耗与碳排放结果,进而优化生产流程,降低关键工序能耗。利用大数据分析或多目标优化算法技术以减少信息不对称性,使决策者能够基于海量数据制定高质量决策,而劳动者通过掌握智能化工具的逻辑与参数调整方法,

逐步从流程执行者转变为创新决策者。企业的碳管理团队利用多方案对比模型，可快速评估不同减排策略的成本效益，推动决策效率与科学性的双重提升。

(四) 人工智能赋能数据要素

随着数智时代的到来，数据作为一种新型生产要素，是碳治理体系的核心资源与关键支撑。碳治理涉及碳排放监测、碳足迹核算、碳政策制定与评估等多个环节，每个环节都依赖于准确、全面、实时的数据。数据要素贯穿于碳治理的全过程，从能源生产、消费到碳排放的各个环节，都需要数据来反映实际情况，为治理决策提供依据。人工智能凭借强大的数据处理与分析能力，深度融入碳治理的各个环节，在数据要素的获取、加工以及应用方面发挥着不可替代的作用，实现对数据要素的元赋能。在此基础上，又可以实现对碳治理体系的再赋能即通过“AI+ 数据”实现碳治理过程中有效监测、精准预测和优化决策(图 1)。

首先，人工智能技术能够赋能数据要素实现更高效、精准的数据采集与整理。在数据获取环节，人

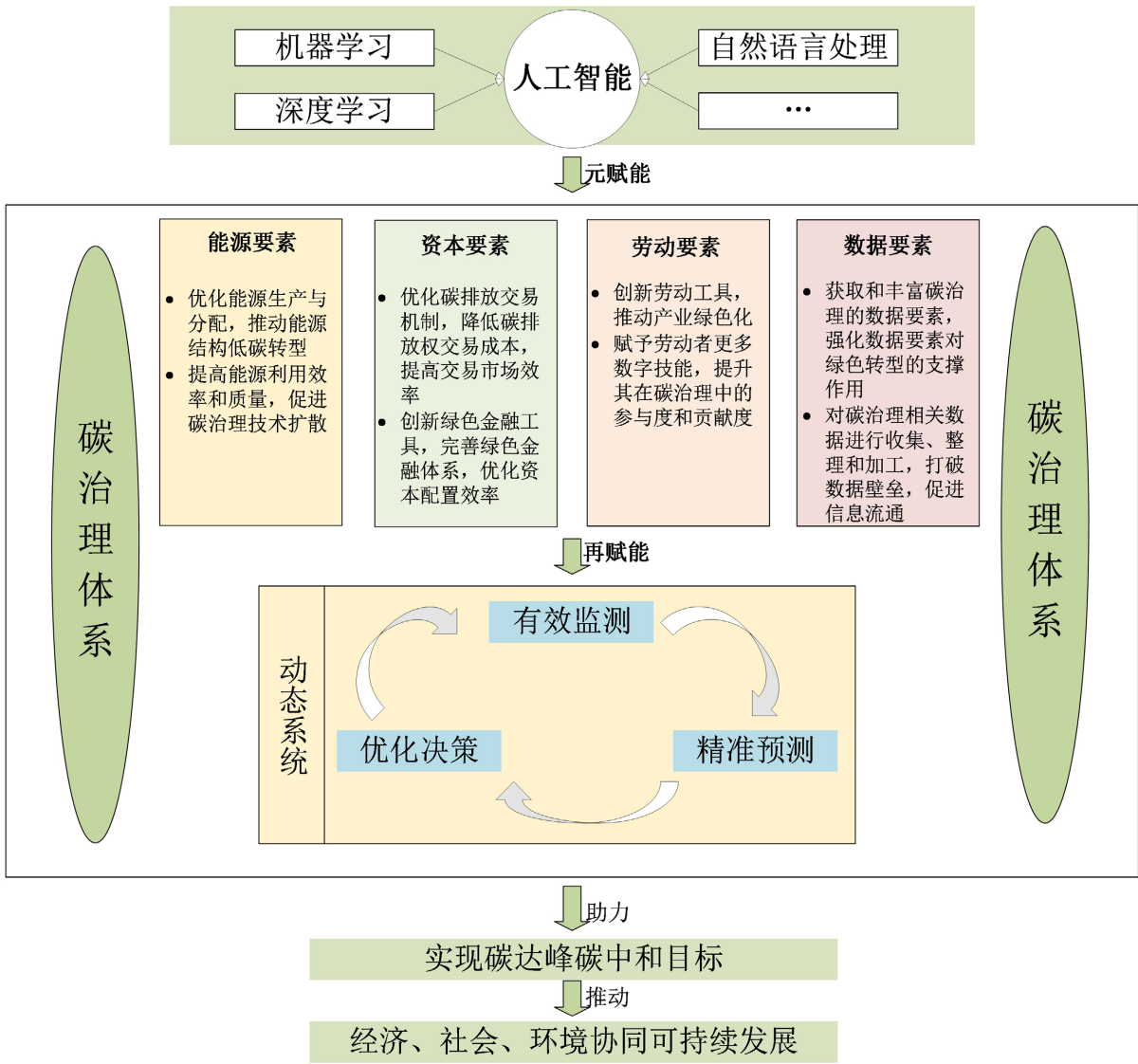


Figure 1. Internal logic operation of carbon governance system empowered by Artificial Intelligence
图 1. 人工智能赋能碳治理体系内在逻辑运行

工智能极大地拓展了数据采集的广度与深度[36]。碳治理场景中,人工智能通过机器学习算法可以对工业、交通、能源等各个领域的传感器、智能设备进行优化,提高数据采集的准确性和实时性。例如,利用图像识别技术可以自动识别工业排放源的污染物种类和浓度。在数据库管理环节中,人工智能可以优化数据的存取。在传统数据库场景下,索引维护与数据分区往往依赖数据库管理员的个人经验或启发式规则。而人工智能驱动的数据存取优化,会将历史查询负载与数据分布特征作为输入条件,借助机器学习及数据挖掘技术,合理开展数据分区、选择列索引建立对象,或用机器学习模型替代传统索引结构[37]。这种智能化的数据采集与存取,为碳治理提供了丰富、准确的数据基础,使得治理主体能够全面掌握碳排放的动态情况。

其次,人工智能能够对碳数据进行深度地处理与分析,挖掘数据背后的价值,促进决策的优化。前期数据采集与整理为数据进一步发挥作用奠定坚实的基础。利用深度学习和机器学习算法,管理者能够从数据中挖掘出更深层次的信息,为碳治理决策提供更全面、准确的依据[38]。神经网络等技术能够对这些数据进行建模和分析,建立碳排放预测模型,结合历史数据预测未来的碳排放趋势。例如,有学者采用 LSTM 神经网络动态预测 2020~2040 年中国及各省份的碳达峰路径,并根据各省份碳排放强度、累积碳排放量和达峰时间三因素分析了其适合的达峰路径,为碳政策的制定提供科学依据[39]。此外,人工智能还能够对碳治理政策的实施效果进行评估,通过对比分析不同政策下的碳排放数据,找出政策的优势与不足,为政策的调整和优化提供支持。这种深度的数据处理与分析,使得数据要素能够更有效地服务于碳治理决策,提升治理的科学性和合理性。

最后,人工智能赋能数据要素实现了数据在碳治理中的智能化应用。在碳交易市场中,人工智能可以根据实时的碳排放数据和市场供需情况,自动匹配交易双方,优化交易流程,提高市场效率。在企业生产中,通过构建数字化平台,人工智能技术驱动的物联网传感器集群成为碳排放监测的有力工具。“实现碳排放可视化监测与智能化管理,挖掘数据价值辅助实现实时灵活的监管调度及优化决策。”[40]正如智能电网利用 AI 算法对电力供应进行动态调整,实时平衡供需波动,提高可再生能源的接入比例,通过灵活的管理方式避免了能源浪费,减少了发电成本。可见,AI+ 数据可以为企业提供个性化的碳减排方案,结合企业的生产流程、能源使用情况等数据,制定能源利用策略和减排措施,帮助企业及时调整生产工艺和任务,从而更好地进行碳治理。

4. 人工智能赋能碳治理体系的现实困境

(一) AI 技术创新不足

碳治理体系的高效构建离不开人工智能技术创新,其数据驱动决策、系统优化调控、动态监测分析等核心优势,成为赋能碳治理各环节的关键支撑。然而,人工智能技术创新能力供给不足,在赋能碳治理体系的过程中受到技术路径依赖与人才供给匮乏层面的双重制约,致使其无法对各要素进行有效赋能,难以满足碳治理体系构建过程中对人工智能技术的需求。

第一,在数据、能源等领域,技术路径依赖问题显著,致使技术创新与应用受限,难以契合碳治理对人工智能技术的需求。数据模拟计算领域因关键模拟计算软件自主化程度不足,对国外技术体系标准存在依赖,在碳数据建模、能源系统仿真等核心环节面临自主化创新不足困境,进而导致具体项目的模型构建停留在表层,难以实现精准模拟与深度分析。哈尔滨经济技术开发区在建设碳排放核算平台时,虽实现了碳排放数据的可视化展示,但在核心算法模型与预测分析功能上仍依赖国外成熟条件,制约了监管治理的智能化水平提升。与此同时,推进碳治理的制度路径创新亦显不足,当前低碳转型议题的制度扩散仍延续传统路径依赖,即借助行政体制的惯有压力,以正式制度规范作为行动重要依据,通过自上而下的方式推动低碳治理目标的达成,缺乏创新性的制度路径设计[41]。在现有的政策体系中,侧重于

技术应用的合规性要求,经济激励类政策仅占少数,导致企业缺乏应用 AI 技术优化碳管理的内生动力。同样以哈尔滨经开区举例,虽然搭建起“双碳”数智监管平台,但平台运行仍主要依赖行政考核压力,未能有效结合碳市场价格信号形成智能化决策,反映出制度设计与技术应用之间的协同不足。这种制度路径依赖使得 AI 技术在碳监测、碳核算等领域的创新应用难以获得持续的政策支持与市场回报,制约了技术赋能的深度融合。

第二,当前我国人工智能复合型人才培养未能满足“双碳”目标需要,而人才供给的匮乏则直接导致了相关技术发展滞后。教育部数据显示,2024 年全国高校新增“碳中和科学与工程”“碳储科学与工程”等碳相关专业,但“十四五”期间我国“双碳”领域人才缺口仍接近百万,而目前相关从业者仅 10 万人左右,供需矛盾极为突出。作为技术研发核心阵地的高校及科研机构,尚未构建起系统完善的人工智能赋能碳治理研究体系,在关键技术攻关中创新能力不足,原创性技术成果转化效率低下。这种创新能力的滞后,直接造成人工智能与碳治理融合的关键技术供给不足。人工智能赋能碳治理催生出的复合型人才,对从业者的能力提出了多维度要求,但具备 AI 技术与碳治理知识的跨界人才供给严重不足。智联招聘数据中显示,2025 年算法工程师、机器学习等 AI 相关岗位招聘需求同比增速分别达 46.8%和 40.1%,但在能源企业的实际招聘中,能同时满足“碳足迹核算经验 + 智能算法开发能力”的候选人占比不足 5%,形成明显的人才供需错配。传统能源与环境领域人才队伍面临严峻的技能转型挑战,其数字技术素养与智能化治理能力明显滞后于产业变革需求。在应对碳治理场景中复杂决策、动态建模等非常规任务时,普遍存在技术应用断层。武汉“双碳”产业研究院的调研显示,现有能源行业从业人员中,仅不足 20%接受过系统的 AI 技术培训,导致智能电厂、碳监测平台等先进设施的应用效果大打折扣。高校跨学科培养机制的普遍缺失加剧了这一困境,尽管武汉大学、华中科技大学等高校已开设碳中和试验班,但兼具技术跨界性与领域专业性人才的培养并非一蹴而就,通常面临培养周期长、规模小的现实问题,短期内难以满足产业实际需求,极大延缓人工智能的赋能进程。

(二) 算法缺陷制约实践

人工智能通过重塑能源、数据、劳动、资本四大要素的配置方式,推动治理模式的智能化转型,实现对碳治理体系的赋能。然而,由于算法自身的高风险性、不明确性和高能耗,使得技术与治理体系融合带来巨大便利,也产生了深层次的难题。首先是算法“黑箱”引发一系列问题,影响了碳治理的公信力。人工智能的核心即机器学习,尤其是其深度学习模型所具有的“黑箱”特性,决定了其决策过程的不可追溯和不可解释。这意味着在碳治理的关键领域,如区域碳排放指标分配、企业碳配额核定或某些重大项目碳影响的评估中, AI 模型虽然可以输出一个“最优解”,但是却无法为决策者提供可供理解和推理的逻辑链条。当 AI 模型的测算结果与传统测算方式或各利益方的预期不符时,该结果极易遭到质疑,并影响决策者的公信力。算法“黑箱”带来的另一个问题是责任归属难。当一项基于 AI 的碳核算或减排决策出现偏差甚至错误时,又因算法黑箱模糊了责任“链条”,结果是无人能为之负责,也无法进行问责。由于基于算法的决策属于人机混合模式形成的,责任主体不清晰。当决策或治理出错后,算法“黑箱”和算法本身容易被作为规避责任的对象,导致无法确定责任主体。并且算法“黑箱”致使决策主体难以依靠自身直接获取算法,而提供算法技术的平台企业,常以知情同意原则、技术中立主义或商业秘密[42]等为借口拒绝提供,进而导致算法审查工作难以推进。

其次,算法碳足迹与减排效益之间存在矛盾。近年来,运行人工智能训练所需的算力呈指数级上升,但伴随发生的是持续增长的能源消耗。除了运行 AI 技术产生的能耗,相关大型基础设施和设备造成的碳排放也是应对气候变化的隐患[43]。据《麻省理工技术评论》报道,训练一个 AI 大模型可以排放 626,000 磅以上的二氧化碳当量,相当于普通乘用车一生碳排放量的 5 倍。所以,尽管技术进步提高了数据处理的效率,但为了实现更强大的 AI 能力,整体上对于算力和能源的需求也在持续增长,最终导致资源消耗

总量增加。这与其赋能减排的初衷形成尖锐的矛盾。

最后, 数据质量问题间接导致算法失效和算法歧视。数据是算法的根本。人工智能算法是由人类生成的数据集所塑造的, AI 算法尤其是机器学习、深度学习算法本质是“数据驱动的学习模型”, 需要通过分析大量数据, 自动调整内部参数, 才能掌握规律。数据虽是算法的“养料”, 但算法在训练过程中不可避免地会继承数据固有的偏见和成见[44]。因此, 当数据出现质量问题又被输入算法中训练, 就会导致一系列问题。诸如标注错误、测量偏差、异常值等数据错误, 会让算法将错误信息当作真实规律学习, 造成整体系统偏差, 最终输出与实际脱节的决策。数据残缺则会导致样本不完整, 让算法无法捕捉完整的问题规律, 只能基于局部信息决策, 导致结果片面或错误。而数据错误或残缺若集中在某一特定群体, 会让算法对该群体产生误判, 导致算法不公平的问题。在碳治理中, 就会出现“减排责任分配不公”或“监管针对性差异”的算法结果。

(三) 资源配置难以均衡

人工智能在赋能碳治理体系过程中尽管潜力巨大, 但也存在碳治理过程中的资源配置不均衡问题, 进而影响碳治理效果和公平性。由于不同地区之间存在的差异, 在应用人工智能技术于碳治理进程中不可避免地存在资源配置不均问题, 导致碳治理进程协同发展困难。中国省级“双碳”指数报告(2022~2024)中, 将碳排放作为评价指标的分析结果显示: 得益于长三角地区先进的能源清洁化进程和多元化产业结构, 使其碳排放强度较低而在京津冀地区, 河北省作为传统重工业基地, 以 79%的绝对占比成为主要排放源, 远高于天津(14%)和北京(7%)的碳排放总量; 将能源低碳化作为评价指标的分析结果显示, 由于天津市与河北省因装备制造、钢铁等重工业占比突出(河北省重工业占比超 60%), 导致能源强度持续高位运行, 京津冀地区单位 GDP 能耗维持在 0.48 万吨标煤/亿元水平, 较长三角地区(0.32 万吨标煤/亿元)和粤港澳地区(0.24 万吨标煤/亿元)更高[45]。地区之间产业结构和能源消费模式的差异导致资源配置不均衡, 一定程度上减缓了人工智能技术赋能碳治理进程。

当前竞争展开的碳减排行动, 在地区间也隐含“碳不公平”状况。内蒙古、山西及河北作为能源输出型省份, 在长期向外省提供能源密集型产品过程中, 已成为碳排放输入型省份。而在广东、江苏、浙江等制造业发达地区, 则能够通过消费其他省份的高碳产品, 将部分碳排放净转移出去。东部沿海部分城市虽走在减排前列, 但有的是真正通过人工智能技术的升级改造和节能水平的提升, 以及大力发展可再生能源等方式减少碳排放; 但有些地区仅仅依靠单纯地转移相关高碳排放产业, 粗暴地达成目标。人工智能赋能碳治理过程中, 地区发展差异造成的资源配置不均衡和隐形不公等问题, 成为阻碍碳治理的现实困境。人工智能赋能碳治理体系进程中, 我国“双碳”目标的实现面临人才资源断层挑战。传统产业绿色转型和新型绿色产业发展过程中, 绿色技术研发、智能制造与数字化融合等岗位的需求激增, 众多省份出台相应政策, 打造“人才库”以吸引交叉复合型人才。但目前许多高校教学体系的滞后性与师资力量存在“绿色知识盲区”的现状, 导致在碳治理实际过程中, 教学与就业资源不能精准对接, 阻碍了“双碳”目标进程。

(四) 国际竞争与外部压力

随着全球化和技术水平的发展, 人工智能已然成为国家科技竞争的焦点之一。在这一全球博弈的大背景下, 我国碳治理体系中的各个要素在发展过程中会不可避免地受到外部的制约, 人工智能在赋能碳治理体系的过程中依然面临挑战。首先, 在科技领域, 欧美许多发达国家已在人工智能领域取得了显著进展, 在国际上形成了一定程度的竞争态势[46]。由于开发、训练和部署生成式人工智能的过程将产生对能源的巨量需求, 欧美国家在能源领域的优势地位很可能会对我国人工智能的铺开发展产生影响。从全球视角看, 任何国家在国际贸易中的选择都可能对国际能源市场造成改变[47], 进而影响我国能源安全转型与碳治理过程所需的稳定能源供应[48]。

其次，数据层面，全球“数字鸿沟”的存在会导致数据资源分配的不均，发达国家凭借其先进的数据处理技术和基础设施，在一定程度上掌握了对数据分析与解读的主导权，而我国由于仍处于发展中国家阶段，国内依然存在发展不均衡、地区技术能力和基础设施建设差异化大的现象，在数据质量、标准化体系建设上仍面临挑战。此外，数据隐私与安全问题近年来也受到了更多关注，并在一定程度上影响了国际协作——这种现象增加了我国碳治理数据跨境共享的成本与风险，更阻碍了国际间的数据合作与技术交流。这一问题不仅可能影响我国人工智能模型的训练质量，也有可能削弱我国在全球碳治理中的参与力度。

再次，作为人工智能发展的核心驱动力，人才的流动与聚集将大大影响人工智能的发展程度及其对其他产业赋能的效果。因此，在科技竞争的大背景下，人才的国际流动尤其值得关注。部分发达国家会凭借自身完善的科研体系、充足的资金投入和人才政策，吸引全球顶尖人才。为应对这些举动，我国持续强化人才强国战略，政策激励与服务保障共同发力，为吸引、集聚、留住海内外优秀人才提供了坚实保障。最后，资本要素同样会受到国际环境的影响。我国碳治理相关企业在海外融资时，常常会面临更严格的审查：由于环境标准及技术能力存在差异，在这类审查中，我国企业的相关活动可能因此受到限制。这种情况无疑增加了该类企业的融资难度和运营成本，也会延缓人工智能赋能碳治理的规模化进展。

5. 人工智能赋能碳治理体系的实现路径

人工智能跨界融合的新特征^[49]与碳治理体系的复杂性决定了人工智能赋能碳治理体系是一项系统性工程，需要政府部门、市场主体、社会组织等多主体共同发力，需要从技术加持、政策引导、国际协作维度着手，构建统筹规划、精准对接、动态优化的复合治理路径，探索构建碳治理体系的新思路。

（一）技术路径

当前，人工智能虽然进入新发展阶段，在碳治理领域也呈现出数据挖掘与收集处理、模式预测与辅助决策等潜力，但其较为单一的技术路径难以系统性应对碳治理体系的复杂性，需要其他技术的加持，共同丰富碳治理体系的内涵。实现协同发展。第一，人工智能与物联网协同，对能源、化工等碳排放关键行业进行部署并对其能耗、污染物浓度等数据进行实时采集，通过机器学习优化数据与校准机制，为碳减排奠定数据分析基础；同时，利用大数据汇集碳数据，打破地区、企业之间的“数据孤岛”，利用深度学习、自然语言处理等技术加工数据，挖掘能耗与碳排放间的关联规律，分析各行业特征，构建相关预测模型，助力实现差异化碳治理策略。第二，人工智能与区块链技术协同，实现碳数据和有关交易记录全周期可追溯，同时优化碳交易流程，实现供需自动匹配、动态价格调整，降低成本与风险，保护知识产权。人工智能与其他技术的协同发展，能拓展和深化技术应用场景，带动相关产业生态协同发展，推动全球碳治理进程，助力“双碳”目标实现。第三，人工智能与信息通信技术、能源储存技术协同，推进智能电网建设，促进新型储能技术的研发，解决能源结构转型过程中新能源发电的不稳定性、传统调度模式不适应、储能设施不足、电网承载能力有限等问题。人工智能与其他技术的协同，在能源结构转型、碳交易市场优化、数据处理与保护等碳治理的多个领域中发挥重要作用，在碳治理的未来进程中，多种技术的协同治理能够更加高效、系统地应对种种难题，进一步完善碳治理运行框架，为相关研究提供思路和借鉴。

（二）制度路径

完善的机制安排是 AI 赋能碳治理的基础保障。因此针对算法固有的困局，从制度层面先行，充分和有效运用政策工具，并构建相关的制度体系来减少算法黑箱、碳足迹的负面影响以及数据质量问题，保证人工智能赋能碳治理得以有效发挥作用。首先，推动算法公开。寻求算法机构信息披露和商业机密保护之间的平衡，通过立法明确算法机构的披露义务边界，区分核心商业机密与公共利益相关信息。同时，

引入算法披露激励机制，对主动提高披露透明度且符合标准的算法机构，在碳治理项目合作、政策补贴等方面给予优先支持，形成“公开有益、保密有度”的良性导向。其次，明确规定政府、算法机构、使用单位彼此的责任，构建清晰的责任体系。算法机构需在初期明确算法研发、运维、迭代过程中的责任边界；算法使用单位需建立如算法应用台账等工作内容，记录决策发起、模型调用、结果核验等全流程信息，保证决策落地后的监督与复核；政府监管部门负责制定责任划分细则，对因算法缺陷导致的碳治理失误，根据“谁研发谁负责、谁使用谁把关”的原则追责。同时，将算法责任纳入企业 ESG 评价体系，对存在责任规避行为的平台企业，限制其参与碳治理相关项目投标资格。最后，针对 AI 赋能与减排效益的矛盾，可以制定算法能效的准入标准，将碳排放纳入 AI 研发的硬性约束，也将有助于推动企业开发更为高效、低能耗的算法。除此之外，还可探索算力资源共享平台，整合政府、企业、科研机构的闲置算力，用于碳治理算法的小规模测试与验证，避免重复建设导致的能源浪费。

为了避免数据错误或残缺而导致的算法问题，也需要推动数据要素制度的完善：首先，加快统一数据要素标准。尝试建立跨部门、跨行业的碳数据采集与治理标准，推动电力、交通、工业等重点碳治理行业数据标准的协同统一。其次，促进数据确权。加快建立数据所有权的归属认定的制度，明确数据确权后，可通过“授权使用”机制，如企业保留所有权，授权算法用于碳核算来提升数据共享意愿，增加数据供给。在此基础上还可通过区块链技术的加持实现数据权属登记，明确算法数据来源，减少数据篡改导致的错误。最后，推动数据的安全保护。继续完善数据分级分类保护制度，防范数据泄露与滥用风险。

(三) 国际协作路径

当前国际环境错综复杂，地缘争夺法已经无法满足当今各国的政治问题[50]，未来各国的发展与竞争方向必将会转向文化、科技、环境等领域。而人工智能因其在碳治理过程中展现出的广阔前景，势必也会成为各个实力大国争相占领的高地。面对复杂形势，我国需主动构建国际协作机制，将能源、资本、人才、数据等要素结合起来，推动能源自主化、数据共享化、人才国际化与资本多元化四维联动，将外部压力转化为协同治理动能。在能源领域，面对能源的紧缺，我国可进一步推动西部风力发电的发展，加速清洁能源的研发，构建多元化能源供应链以确保我国在该方面的稳定发展；进一步深化“东数西算”的格局，在西部地区建立人工智能训练基地，降低人工智能能耗，减少在技术手段方面被“卡脖子”的可能性。在资本领域，我国应根据国内国际形势，建立相对应的适应性机制，例如开发基于数字人民币的碳交易结算系统等，不仅能够激发更多国家参与到国际性的碳交易体系中，也能减轻我国相关企业的融资压力与发展压力，激发市场活力。在人才方面，我国可建立“人工智能 + 碳治理”专属科技园，为相关人才提供集成化、便利化、基础设施完备的高新技术产业开发区，依靠良好的文化环境和与国际接轨的研发环境留住人才、吸引人才，同时为人工智能赋能碳治理体系的发展进程提供产业聚集的优势。在数据方面，我国可联合金砖国家和友好国家建立区域性数据共享机制，制定数据的统一采集标准，促进数据资源更加公平合理的流动与取用，推动世界各国在数据领域的发展；引入区块链技术对数据池中的数据进行保密，建立跨境核查机构，进一步提升数据存储与流动的安全性，为国际间数据合作与技术交流奠定良好根基。当下，将相关技术的探索研究假手于人、针对单一技术闭门造车都不可取，只有在提升自身的同时向外寻求合作、用多边协作替代单边依赖，才能强化我国在全球碳治理的能力与韧性，为我国人工智能与碳治理体系的深度融合发展营造出有利的外部环境与良好的发展氛围。

基金项目

2025 年度教育部人文社会科学研究规划基金“生成式人工智能应用中知识产权安全风险的生成机理与治理路径研究”；中国矿业大学“大学生创新创业训练计划”省级校企合作项目(X202510290510)。

参考文献

- [1] 联合国新闻网. 世界气象组织: 未来五年全球气温将持续接近或刷新纪录[EB/OL]. 2025-05-28. <https://news.un.org/zh/story/2025/05/1139061>, 2025-09-08.
- [2] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2020(28): 5-7.
- [3] 王灿. 人工智能助力工业领域碳中和的机制与关键[J]. 人民论坛·学术前沿, 2025(2): 36-44.
- [4] 刘芳, 陈积志. “双碳”目标下制造业数字化转型碳减排路径研究[J]. 市场瞭望, 2025(2): 72-74.
- [5] 蒋金荷. 全球碳治理体系新特征及完善中国碳治理的策略展望[J]. 价格理论与实践, 2024(1): 29-36, 101.
- [6] 谭腾. 绿色智治: 人工智能嵌入绿色治理的存在样态、技术风险与应对策略[J]. 新疆社会科学, 2025(2): 157-169.
- [7] 潘浩之, 施睿, 杨天人. 人工智能在城市碳达峰、碳中和规划与治理中的应用[J]. 国际城市规划, 2022, 37(6): 26-34.
- [8] 王淼. 人工智能助力城市“双碳”目标达成的路径及建议[J]. 中国经贸导刊, 2024(5): 50-53.
- [9] 赵宏霞, 龚中英, 张曼莉. 数智技术促进低碳社区建设的资源编排机制研究[J]. 软科学, 2025, 39(3): 114-120.
- [10] 杨博文. 我国实施碳排放“双控”的渐进逻辑、转型部署及制度取向[J]. 当代经济研究, 2024(7): 105-116.
- [11] Luo, Q. and Wang, J. (2025) The Impact of Artificial Intelligence Development on Embodied Carbon Emissions: Perspectives from the Production and Consumption Sides. *Energy Policy*, **199**, Article ID: 114535. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2025.114535>
- [12] Hua, J., Wang, R., Hu, Y., Chen, Z., Chen, L., Osman, A.I., et al. (2025) Artificial Intelligence for Calculating and Predicting Building Carbon Emissions: A Review. *Environmental Chemistry Letters*, **23**, 783-816. <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01799-z>
- [13] Han, P., He, T., Feng, C. and Wang, Y. (2024) Research on Whether Artificial Intelligence Affects Industrial Carbon Emission Intensity Based on the Perspective of Industrial Structure and Government Intervention. *Sustainability*, **16**, Article 9368. <https://doi.org/10.3390/su16219368>
- [14] Attard-Frost, B., Brandusescu, A. and Lyons, K. (2024) The Governance of Artificial Intelligence in Canada: Findings and Opportunities from a Review of 84 AI Governance Initiatives. *Government Information Quarterly*, **41**, Article ID: 101929. <https://doi.org/10.1016/j.giq.2024.101929>
- [15] Ezenkwu, C.P., Cannon, S. and Ibeke, E. (2024) Monitoring Carbon Emissions Using Deep Learning and Statistical Process Control: A Strategy for Impact Assessment of Governments' Carbon Reduction Policies. *Environmental Monitoring and Assessment*, **196**, Article No. 231. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12388-6>
- [16] Tapiwa, R.M. and Didymus, T.M. (2025) The Role of Artificial Intelligence in Energy Efficiency Optimization. *International Journal on Science and Technology*, **16**, 1-26. <https://doi.org/10.71097/ijst.v16.i2.6125>
- [17] Flores-Lasluisa, J.X., Huerta, F., Cazorla-Amorós, D. and Morallón, E. (2022) Manganese Oxides/LaMnO₃ Perovskite Materials and Their Application in the Oxygen Reduction Reaction. *Energy*, **247**, Article ID: 123456. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123456>
- [18] Yan, F. and Qi, X. (2024) Application and Prospect of Artificial Intelligence Technology in Low-Carbon Cities—From the Perspective of Urban Planning Content and Process. *Land*, **13**, Article 1834. <https://doi.org/10.3390/land13111834>
- [19] Islam, F.A.S. (2025) Artificial Intelligence-Powered Carbon Market Intelligence and Blockchain-Enabled Governance for Climate-Responsive Urban Infrastructure in the Global South. *Journal of Engineering Research and Reports*, **27**, 440-472. <https://doi.org/10.9734/jerr/2025/v27i71585>
- [20] Guo, J. and Xu, T. (2021) Intelligent Low-Carbon Emission Design Concept for Industrial Cities Driven by Artificial Intelligence. 2021 5th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), Madurai, 6-8 May 2021, 1123-1126. <https://doi.org/10.1109/iciccs51141.2021.9432226>
- [21] Mu, H., Lu, Y., Lepre, C., Lightfoot, C., Smiley, C. and Crenshaw, R. (2025) Artificial Intelligence and Its Carbon Footprint. 2025 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS), Charlottesville, 2 May 2025, 31-35. <https://doi.org/10.1109/sieds65500.2025.11021149>
- [22] Dhar, P. (2020) The Carbon Impact of Artificial Intelligence. *Nature Machine Intelligence*, **2**, 423-425. <https://doi.org/10.1038/s42256-020-0219-9>
- [23] Pourrahmani, H., Amiri, M.T., Madi, H. and Owusu, J.P. (2025) Revolutionizing Carbon Sequestration: Integrating IoT, AI, and Blockchain Technologies in the Fight against Climate Change. *Energy Reports*, **13**, 5952-5967. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.05.042>
- [24] Tabaku, E., Vyshka, E., Kapciu, R., Shehi, A. and Smajli, E. (2025) Utilizing Artificial Intelligence in Energy Management Systems to Improve Carbon Emission Reduction and Sustainability. *Jurnal Ilmiah Ilmu Terapan Universitas Jambi*,

- 9, 393-405. <https://doi.org/10.22437/jiituj.v9i1.38665>
- [25] Barredo Arrieta, A., Díaz-Rodríguez, N., Del Ser, J., Benetot, A., Tabik, S., Barbado, A., *et al.* (2020) Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, Taxonomies, Opportunities and Challenges toward Responsible AI. *Information Fusion*, **58**, 82-115. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2019.12.012>
- [26] 姜鑫, 石宝刚. 人工智能导论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2024: 5.
- [27] Cao, L. (2022) A New Age of AI: Features and Futures. *IEEE Intelligent Systems*, **37**, 25-37. <https://doi.org/10.1109/mis.2022.3150944>
- [28] 黄润秋. 国务院关于 2024 年度环境状况和环境保护目标完成情况的报告[EB/OL]. 2024-08-22. http://www.npc.gov.cn/c2/c30834/202504/t20250428_444977.html, 2025-09-08.
- [29] 陈什么夏. 能源转型数字化进行时——德国能源互联网示范项目跟踪解析(下) [EB/OL]. 2020-06-19. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/149320615>, 2025-06-30.
- [30] 刘中民. 人工智能技术在能源化工行业的应用现状及未来趋势[J]. 人民论坛·学术前沿, 2025(2): 20-25.
- [31] 阿里云开发者社区. 利用机器学习技术优化数据中心能效[EB/OL]. 2024-05-11. <https://developer.aliyun.com/article/1506443#>, 2025-06-30.
- [32] 赵威逊. “双碳”目标下能源转型赋能新质生产力现实逻辑、作用机制与推进路径[J]. 中国矿业大学学报(社会科学版), 2025, 27(2): 140-153.
- [33] 燕赵晚报. 民生银行石家庄分行做好“五篇大文章”, 书写服务实体经济新篇章[EB/OL]. 2025-07-17. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1837857453929170881&wfr=spider&for=pc>, 2025-09-08.
- [34] 薛飞, 刘家旗, 付雅梅. 人工智能技术对碳排放的影响[J]. 科技进步与对策, 2022, 39(24): 1-9.
- [35] 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(1): 130-140.
- [36] 唐萍萍, 任保平. 数字经济赋能我国生态现代化的机制、路径与政策[J]. 烟台大学学报(哲学社会科学版), 2024, 37(5): 85-99.
- [37] 孙路明, 张少敏, 姬涛, 等. 人工智能赋能的数据管理技术研究[J]. 软件学报, 2020, 31(3): 600-619.
- [38] 吴彤, 甄峰, 孔宇, 等. 人工智能技术赋能城市空间治理的模式与路径研究[J]. 规划师, 2024, 40(3): 14-21.
- [39] 章高敏, 王腾, 姜渊雨, 关忠诚, 郑海军, 李强, 武佳倩. 基于 LSTM 神经网络的中国省级碳达峰路径分析[J]. 中国管理科学, 2025, 33(3): 339-350.
- [40] 李毅仁, 李梦龙, 侯长江, 等. 面向钢铁碳中和的数字化碳管理体系构建与实施[J]. 钢铁, 2024, 59(9): 13-21
- [41] 刘雅静, 王铭铭. 碳达峰碳中和背景下的低碳治理体系: 要素建构、挑战审视与实践理路[J]. 成都行政学院学报, 2022(2): 5-14, 116.
- [42] 黄新华, 王力超. 公共管理中的算法治理: 兴起、风险与规制[J]. 北京行政学院学报, 2025(1): 64-72.
- [43] Maslej, N., Fattorini, L., Brynjolfsson, E., *et al.* (2023) Artificial Intelligence Index Report 2023. AI Index Steering Committee, Institute for Human-Centered AI, Stanford University, 23. https://hai.stanford.edu/assets/files/hai_ai-index-report_2023.pdf
- [44] 董青岭. 人工智能时代的算法黑箱与信任重建[J]. 人民论坛·学术前沿, 2024(16): 76-82.
- [45] 公众环境研究中心. 中国省级双碳指数报告(2022-2024) [EB/OL]. 2025-07-24. <https://oaallfile.oss-cn-qingdao.ali-yuncs.com/20250807/2025080704105682156c63c4f9c5254508acd54447c8b1cc93.pdf>, 2025-09-08.
- [46] 彭绪庶. 中美人工智能创新比较研究——国家创新能力理论视角的分析[J]. 当代经济管理, 2024, 46(5): 1-12.
- [47] Smith Stegen, K. (2011) Deconstructing the “Energy Weapon”: Russia’s Threat to Europe as Case Study. *Energy Policy*, **39**, 6505-6513. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.07.051>
- [48] 李坤泽. 人工智能对美国能源产业发展的影响[J]. 现代国际关系, 2025(4): 49-68, 138-139.
- [49] 国务院. 国务院关于印发新一代人工智能发展规划的通知[Z]. 国发〔2017〕35号, 2017-07-20.
- [50] 唐永胜. 2024 年国际安全形势评析: 动荡风险加剧治理需求上升[J]. 当代世界, 2025(1): 27-33.