

破解“智能悖论”： 数智经济与绿色经济融合发展的范式重构

胡文涛, 庄贵阳

(中国社会科学院生态文明研究所, 北京 100710)

摘要: 数智经济在提升微观效率、赋能绿色发展的同时, 也伴随着因算力扩张和资源消耗反弹形成的“智能悖论”。破解该悖论的关键, 在于重构数智经济与绿色经济的关系, 将数智经济发展置于生态承载力约束之下, 推动二者深度融合。本文揭示了“智能悖论”的三重表现及深层根源, 即积累体制的扩张冲突、价值核算的定价失灵以及制度变迁的滞后错配, 并系统阐释了融合发展的内涵。理论分析表明, 二者融合发展有赖于价值重塑、制度创新与技术范式转型的协同作用; 通过生态成本内生、动态敏捷治理和单位能耗智能密度优化, 引导数智技术从算力堆叠转向绿色集约发展。据此, 本文构建了涵盖微观精益治理、中观网络共生、宏观空间适配的分层融合模式, 并提出确立刚性约束边界、实施全生命周期嵌入式规制、完善要素相对价格体系、驱动绿色数智技术范式跃迁以及培育多层级共生生态等政策建议。

关键词: 数智经济; 绿色经济; 智能悖论; 融合发展; 数字生态文明

中图分类号: F49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0566(2026)07-0040-12

Unraveling the “Smart Paradox”: Paradigm reconstruction for the convergent development of the digital-intelligent economy and the green economy

HU Wentao, ZHUANG Guiyang

(Research Institute for Ecological-civilization, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100710, China)

Abstract: While the digital-intelligent economy empowers green development by improving micro-level efficiency, it is also accompanied by a “Smart Paradox” arising from the expansion of computing power and the rebound effect in resource consumption. The key to resolving this paradox lies in reconstructing the relationship between the digital-intelligent economy and the green economy, placing the development of the former under the constraints of ecological carrying capacity, and promoting their deep integration. This study reveals the three manifestations and underlying causes of the “Smart Paradox,” namely the expansionary conflict of the accumulation regime, pricing failures in value accounting, and the lagged mismatch of institutional change. It also systematically clarifies the essential connotations of their convergent development. Theoretical analysis shows that the integration of the two depends on the synergistic effects of value reshaping, institutional innovation, and technological paradigm transformation. Specifically, by internalizing ecological costs, establishing dynamic and agile governance, and optimizing intelligence density per unit of energy consumption, digital-intelligent technologies can be guided away from computing-power stacking toward green and

基金项目: 中国社会科学院生态文明研究所创新工程项目“生态文明范式下协同推进降碳减污扩绿增长机制研究”(2023STSA01); 中国社会科学院“青启计划”项目“气候变化对企业绿色创新影响机制研究”(2024QQJH134)。

作者简介: 胡文涛(1993—), 男, 江西南昌人, 中国社会科学院生态文明研究所副研究员, 博士, 研究方向为绿色科技创新、气候变化经济学。

intensive development. Accordingly, this study constructs a stratified integration model encompassing micro-level lean governance, meso-level network symbiosis, and macro-level spatial adaptation. It further proposes policy recommendations, including establishing rigid constraint boundaries, implementing embedded regulation throughout the full life cycle, improving the relative factor price system, driving a paradigm leap toward green digital-intelligent technologies, and cultivating multi-level symbiotic ecosystems.

Key words: digital-intelligent economy; green economy; Smart Paradox; convergent development; digital ecological civilization

当前,全球经济正处于“数智化”和“绿色化”双重转型的交汇期。以人工智能、大数据、云计算为代表的数智技术正在深刻改变生产方式、生活方式和治理方式^[1]。资源环境约束的持续收紧则要求经济发展须在生态承载力内寻求新的增长空间。2023年7月,习近平总书记在全国生态环境保护大会上强调,要“深化人工智能等数字技术应用,构建美丽中国数字化治理体系,建设绿色智慧的数字生态文明”^[2]。党的二十届四中全会提出要坚持智能化、绿色化、融合化的发展方向。数字生态文明正是在数字化和生态化相互融合发展下产生的一种绿色智慧的高级生态文明形态^[3]。融合发展并非自动发生,相反数智经济扩张逻辑与绿色经济有限承载力之间存在着深刻的范式张力,如何使数智工具理性服从并服务于生态理性,是实现人与自然和谐共生的关键命题。

既有文献主要聚焦于数智技术对绿色发展的单向赋能效应。相关研究表明,数智资本的深化能够通过降低信息不对称^[4]、优化资源配置效率^[5],显著抑制企业污染排放^[6],并提升能源利用效率^[7],推动绿色低碳发展^[8]。这类研究总体上强调技术进步的效率收益,但相对忽视了数智产业作为指数型增长产业的物质属性与反弹效应。现实中,即便在电力清洁化水平提高,数据中心与大模型训练仍会带来硬件快速迭代、水资源消耗及电子废弃物堆积。若缺乏对技术扩张本身生态成本的考量,现有研究便难以解释为何单位效率提升的同时,宏观层面的资源消耗总量仍会攀升。

事实上,数据中心的能耗与大模型训练的碳足迹正在快速扩张。IEA报告显示,2025年全球数据中心用电量已达约485 TWh,较上年增长17%;预计到2030年将升至约950 TWh,占全球电力消耗的约3%。其中,AI型数据中心用电增长更为迅速,2025年同比增长50%,到2030年用电量

预计将较2025年增加两倍以上^[9]。2024年我国数据中心用电量达1660亿千瓦时,占全社会用电量的1.68%^[10]。在此背景下,有学者将这类依赖海量计算资源来提高精度而不顾生态成本的人工智能范式归类为“红色AI”^[11]。与之相反,可将在全生命周期中以低耗高效为核心特征、拒绝算力堆叠“规模暴力”的AI,定义为生态AI^[12]。当前数智经济面临着杰文斯悖论的智能化变体:算法效率提升降低算力的边际使用成本,却诱发了需求的指数级反弹,最终透支生态本底,导致发展不可持续。本文将这一现象界定为“智能悖论”,用以揭示数智经济扩张逻辑与绿色经济约束逻辑之间的底层冲突。

“智能悖论”并非技术中性的随机结果,而是资本增值逻辑与生态有限性冲突在数智领域的结构性呈现。这一悖论也体现了“科林格里奇困境”:技术早期因信息匮乏导致前置性规制缺位,成熟后又因技术路径锁定而导致治理成本高昂。破解这一悖论,不能仅依赖清洁能源替代,而应重构数智经济与绿色经济的底层关系。融合的本质,是确立生态理性的优先地位,使数智技术从只注重自我扩张回归为注重生态约束并服务于绿色治理的工具属性,在破解生态难题中形成新的增长空间。因此,本文关注的核心问题是:如何在理论上厘清从“悖论”走向“融合”的内在机理,并据此构建可操作的治理框架。

本文的边际贡献在于:第一,在理论层面,系统解构了“智能悖论”的生成逻辑,将其归因为积累体制冲突、价值核算失灵以及制度变迁滞后的三重叠加;第二,在机制层面,提出了价值重塑、制度创新与范式转型“三位一体”的融合路径,为理解两种经济范式的关系提供了新视角;第三,在实践层面,构建了涵盖微观精益治理、中观网络共生、宏观空间适配的分层融合模式,为实现“双碳”

目标下的数智化转型提供政策参考。

一、数智经济与绿色经济融合发展的范式张力

(一) 数智经济的生态困境与“智能悖论”

数智经济的演进遵循着显著的“缩放定律”，为追求边际性能的微小提升，模型参数与训练算力往往呈现指数级增长，推动生产方式从“算力辅助”向“算力主导”跃迁。由于算力环境外部性未被内部化，数智资本的扩张路径呈现出显著的回弹效应，并引发了治理工具与治理对象间身份重叠、目标冲突的现实困境^[13]。这种微观数智技术优化与宏观资源透支之间的背离，构成了数智时代的典型生态困境。本文将这一现象界定为“智能悖论”。其理论内核源于杰文斯悖论，即技术进步带来的要素利用效率提升，反而因实际使用成本下降而加剧该要素的资源耗费^[14]。“智能悖论”揭示的并非一般性资源消耗反弹，而是既有市场竞争与激励结构下，数智企业技术选择与社会生态目标的系统性偏离。在数智经济背景下，这一悖论呈现出更为复杂的约束失效特征。

第一，“能源回弹”效应。尽管单位算力的碳强度因技术进步而下降，但由于数智资产具有自我强化与无限复制的特性，导致系统总体能源消耗呈现出与技术进步方向相反的“超指数增长”趋势。传统技术进步带来的效率提升和需求反弹是渐进式、线性的，而智能技术因其自我学习、快速迭代、网络效应等特性，其能耗增长和应用扩张是爆发式、指数级的，反弹效应来得更快、更猛烈、更难预测和控制。

第二，“物质熵增”效应。即使算力中心实现 100% 清洁能源供电，“智能悖论”也不会自动消解，而会转化为芯片、服务器等硬件快速迭代所带来的稀有金属消耗、水资源占用和电子废弃物压力。清洁能源本身也受土地和消纳边界制约，若数智产业以绿电为理由放松能效约束，本质上仍可能挤占全社会脱碳资源。

(二) “智能悖论”的三重表现

首先，智能悖论在生产端呈现出性能竞赛与生态成本的高速增长。随着 GPU 和 AI 加速器能效比提高，运行复杂模型的边际成本下降，但这并

未导致计算总量减少，反而在以参数规模、训练算力和基准测试得分为核心的竞争评价体系中，激励企业和研究机构开发参数量更大、训练时间更长、数据集更庞大的模型^[15]。效率提升未自动转化为资源节约，而是通过降低边际使用成本推动新一轮算力扩张。数据显示，2010 年以来人工智能模型训练算力约按年均 4.5 倍显著增长^[16]。当前人工智能领域以红色人工智能为主导范式，即以牺牲能源效率为代价追求最先进的结果^[12]。能耗、用水与硬件废弃等生态成本因外部性而部分游离于企业成本函数之外，私人收益的可见性与外部性的隐蔽性，使“红色 AI”在短期财务上反而成为更优策略。硬件快速迭代还会增加芯片、服务器等设备制造环节的资源消耗和电子废弃物压力^[17]，大量未达物理寿命终点但因性能落后被淘汰的硬件，加剧了电子废弃物的堆积，构成循环经济的巨大挑战^[18]。

其次，消费侧表现为交易成本降低与诱导性扩张。数智技术通过极低的人机交互门槛，大幅降低了信息获取与内容生成的交易成本，但使用成本的下降并未带来总量节约，反而通过创造新的需求规模引致超比例反弹。IEA 报告指出，尽管单次 AI 任务能耗效率近年来显著改善，但视频生成、复杂推理和智能体任务等新型应用的单次能耗可能达到简单文本生成的数百乃至数千倍^[9]。这表明，随着 AI 应用从简单文本交互向多模态生成、复杂推理和智能体协作扩展，推理端能耗可能成为消费侧资源反弹的重要来源。数智技术优化还降低了一系列高耗能、高排放行为的成本和门槛，反而刺激了其规模膨胀。智能广告投放通过用户画像精准触达，强化了“消费主义”。资本通过与数智技术的深度融合推动消费规模的几何式增长^[19]。杰文斯悖论在智能时代不仅是“效率提升→成本降低→需求增加”的简单重现，更是“智能优化→便捷性提升→需求创造→行为刺激”的复合效应。

最后，分配侧展现出收益私有化与成本社会化的错配。数智资本具有极强的规模报酬递增与赢家通吃属性，导致经济租金高度集中于少数技术持有者，引发了智能化革命与社会财富分化失

衡^[20]。数智技术带来的经济收益主要流向资本和技术所有者,生态成本和社会风险却由全社会承担,技术进步与预期环境效益之间出现系统性矛盾^[13]。在市场激励下,数智企业过度追求技术性能和商业规模,缺乏主动控制生态成本的动力,反而在逐利驱动下不断突破生态边界。更严重的是,数智技术带来的就业替代、技能鸿沟、数字鸿沟可能加剧社会不平等,损害社会凝聚力和代际公平。由此,企业追求私人收益最大化的理性行为,导致了社会整体福利的次优甚至负优化,技术进步创造的财富未公平分享,反而加剧了不平等和生态危机。

(三)“智能悖论”的深层根源

智能悖论的三重表现,集中体现了数智经济与绿色经济在底层逻辑上的张力。数智经济发展追求性能提升、边界突破、规模扩张和网络效应,商业模式又通过数据积累、用户锁定和平台控制形成自我强化循环^[21]。绿色经济则以资源有限性、生态承载力和气候安全为前提,强调在生态边界内优化发展方式,追求经济、社会与生态综合效益,而非单一经济指标的极大化。前者偏向持续扩张和效率,后者强调约束与可持续。当扩张逻辑碰撞刚性边界,结构性张力便集中显现出来。

“智能悖论”并非单纯由技术效率提升引发,而是数智企业在既定市场竞争、资本估值和制度约束条件下基于经济理性选择的均衡结果。当算力规模能够带来技术领先、融资溢价和市场份额,而能源消耗、碳排放、水资源占用和硬件废弃等生态成本又未被充分计入企业成本函数时,企业更倾向于扩大算力投入,而非压缩资源消耗。由此,微观主体的私人理性选择最终汇聚为宏观层面的资源消耗反弹,形成“微观效率提升—宏观生态负荷加重”的悖论结构。下面从积累体制、价值核算与制度规制3个维度展开分析。

首先,数智资本的积累体制内嵌扩张冲突,与生态系统有限承载边界之间形成结构性张力。当前数字文明仍深嵌于现代性构架,深受资本逻辑支配^[22],在数智产业中集中表现为围绕算力、模型能力和应用生态的持续竞赛。算力已兼具技术能

力、市场地位和资本预期信号功能,更强的算力与性能往往能增强用户黏性、生态控制力和融资能力。在赢家通吃的竞争格局下,企业即便实现局部能效提升,也缺乏主动收缩算力投入的激励,率先放缓扩张反而可能面临迭代落后、用户流失等风险。高盛研究指出,华尔街分析师对AI超大规模云厂商2026年资本开支的一致预期已上调至5270亿美元^[23],印证了AI算力基础设施竞争强度。这种扩张冲动容易使技术创新陷入“唯规模论”和“唯性能论”的路径依赖。生态系统的资源供给、能源转换和废弃物消纳能力均存在客观边界,当成本内部化机制不足时,资本便倾向于将生态成本外部化以维持积累率,形成“技术突破吸引资本投入→资本推动规模扩张→规模效应产生更高收益→更高收益吸引更多资本”的反馈链条,加速膨胀并在宏观层面加剧生态负荷。

其次,自然资本定价缺失导致价值核算失灵,并加剧数智扩张中的生态成本外部化。当数字技术进步被纳入资本再生产过程,会加剧人与自然之间的疏离,进一步弱化了人对自然本质和可持续性的关注^[24]。在现行国民经济核算体系与微观企业财务准则中,碳排放空间、清洁水源等自然资本长期处于“无价”或“低价”状态,未被充分纳入价格形成、成本核算和投资决策。这种价格信号的缺失,实质上反映了收益主体与成本主体的系统性不对称:算力扩张带来的性能提升、用户规模和平台租金主要由企业获得,而由此产生的碳排放、水资源消耗、电子废弃物和电力系统压力,却具有明显外部性,往往由社会承担。在收益私人化、成本社会化的激励结构下,企业更倾向于消耗廉价生态要素,换取数智资产增值收益,导致私人最优决策系统性偏离社会最优决策,削弱研发与采纳低碳技术的动力,形成了“非绿技术”对“绿色技术”的锁定效应。

最后,制度规制的滞后性使“智能悖论”陷入前期难以约束、后期难以纠偏的治理困境。制度变迁往往滞后于技术变迁,数智技术创新的非线性爆发与环境规制的线性演进之间存在显著时空错配,使治理陷入了典型的“科林格里奇困境”^[25]。发展初期,新兴技术的生态影响尚未显现,监管者难以准

确预测其能耗与碳排放等增长轨迹,往往采取“先鼓励、后规范”的宽松策略,导致了前置性环境约束的缺位。技术成熟与广泛应用后,随着“红色 AI”范式形成巨大的资本沉没成本与市场路径依赖,高能耗的技术架构已高度锁定,事后规制的社会成本和经济阻力显著上升。这种锁定不仅来自硬件投资,更来自技术栈的资产专用性。一旦数智产业围绕特定芯片架构、算法框架、数据中心设施与软件生态形成高度耦合的技术体系,再转向稀疏模型、存算一体、神经形态计算等低能耗路线时,不仅意味着设备淘汰更新,更涉及人才结构、研发流程、商业模式与供应链体系的系统性调整,从而形成“前期约束不足—中期路径锁定—后期纠偏困难”的治理链条。

市场机制本身难以自动解决这一外部性问题。若缺乏明确的环境规制、绿色核算和成本内部化机制,重视生态成本的企业可能因承担更高合规成本而处于竞争劣势,忽视生态成本的企业反而获得短期成本优势,形成“劣币驱逐良币”的逆向激励和“向下竞次”的恶性循环。可见,“智能悖论”的深层根源不在于技术本身,而在于数智资本扩张冲动、自然资本定价缺失和制度规制滞后之间的叠加作用。只有重塑这一激励结构,将生态成本纳入技术创新、企业决策和产业治理全过程,数智技术才可能真正从高能耗扩张逻辑转向绿色化、可持续的发展轨道。

(四)从“悖论”到“融合”的理论重构

尽管数智经济与绿色经济在当前制度下表现为范式张力,但二者在底层逻辑上并非完全不可调和的“二律背反”。破解“智能悖论”的关键,在于重构二者的结构性关系,确立生态理性的价值主导地位。二者融合发展是“目标—手段”嵌套式的系统重构:绿色确立发展的“价值理性”与“边界约束”,数智技术代表先进的“工具理性”,其演进应内嵌于生态承载力之中。具体而言,融合发展是指以数智技术为核心驱动、以绿色发展为核心价值导向,通过智能感知、智能决策、智能优化等技术能力与生态约束、总量控制、价值重塑等绿色要求深度耦合,推动经济社会在生态承载力约束下实现智能化、高效化、可持续化协同跃升的系统

性变革。其本质是让智能技术的优化目标从单纯的效率与成本最优,转向生态约束下的多目标协同优化;让绿色发展从更多依赖人工决策、经验判断,转向依靠智能感知、智能决策的精准高效实现。

这种从“悖论”走向“融合”的理论重构,包含以下双重逻辑的辩证统一。

一是,在约束维度确立“嵌入”逻辑,生态承载力是数智经济发展的刚性边界。旧范式下环境要素被视为外生的软约束,而在融合范式下,绿色经济为数智资本的扩张确立了刚性的物理边界条件,即算力扩张与技术迭代必须建立在生态安全底线之上。这种“嵌入”关系要求将生态阈值内化为数智发展的决策参数,任何技术方案寻优都须在环境容纳的可行域内进行。此时,绿色规制不再是阻碍发展的外部阻力,而是引导技术创新脱离粗放路径、转向低耗高效轨迹的导向参数,诱发数智技术演进回归集约化与高能效的良性轨道。

二是,在功能维度上,融合发展要求强化数智对绿色的赋能作用,以及绿色对数智经济的需求创造。数智技术作为高效的工具,能够解决绿色经济面临的复杂性与信息不对称;利用其全域感知与全局优化能力,为绿色转型提供从微观精准计量到宏观系统调度的技术支撑,提升绿色经济的运行效率。同时,绿色经济提出的约束条件与转型需求,倒逼并催生了对绿色算法、智慧能源、碳资产管理等领域的巨大市场需求。数智技术以工具理性赋能绿色发展的价值理性,绿色发展则以其广阔场景反哺数智经济,使其在解决生态难题的过程中完成价值实现与空间拓展。

二、数智经济与绿色经济融合发展的实现机理

化解悖论、推动融合需在价值目标、制度规则和技术路径之间建立递进衔接的传导机制。价值重塑是逻辑起点,重在改变数智经济的目标函数,将生态成本、资源消耗和碳排放约束从外部变量转化为经济发展内生变量;制度创新是规则保障,重在通过产权界定、信息披露、动态定价和敏捷监管,把生态价值要求转化为可执行、可监督、可激励的行为规则;范式转型是实现路径,重在引导数

智技术由算力堆叠、参数扩张和性能竞赛,转向绿色算法、能效优化和全生命周期低碳管理。三者由此形成“价值目标重构—激励约束转换—技术路径跃迁”的递进链条。

(一)价值重塑:生态要素的数字化内生

资本追求无限增殖的本质,使其在缺乏约束时更倾向于推动数智技术沿着规模扩张与性能极致路径演进,并将生态成本系统性地外部化。社会主义市场经济的优势在于能够驾驭资本^[26],引导资本服务于人民福祉和生态安全。因此,化解悖论、推动融合,关键在于从根本上重塑经济活动的目标函数,实现从资本单一逻辑向生态文明逻辑的转变,即推动生态价值从游离于经济核算之外的“负外部性”,转变为经济决策中必须考量的“内生变量”。这一过程循着以下层次展开。

第一,数智技术赋能生态价值发现与度量。价值重塑的首要前提,是化解生态价值“不可见、不可算”的困境,包括将调节服务、支持服务、文化服务等纳入经济核算^[27],以及生态系统生产总值核算。根据科斯定理,外部性无法被市场解决的根源在于产权界定的高昂交易成本,而数智技术正是为此提供关键赋能。以卫星遥感、物联网传感器、大数据分析和人工智能为代表的数智技术,构建了一套全新的“度量衡”体系^[28],使固碳、涵养水源、生物多样性维护等生态服务,从定性的描述转变为定量核算,也使经济活动的碳足迹、水足迹得以实时监测与追溯^[29],大幅降低了生态要素的度量成本,为生态价值进入经济决策提供了坚实基础。

第二,绿色发展导向下的生态价值共识与定价。“可见”只是第一步,价值“显性化”还须导向价值“内生性”,即解决“不核算、不付费”的难题。这并非靠市场自发完成,而需通过制度设计强力构建:当社会共识要求为生态成本付费时,相应市场机制便被创造出来。在精确计量的基础上,碳市场、生态产品交易、绿色金融等机制开始为显性化的生态价值进行市场化定价,绿色发展就由此成为直接影响企业估值的核心变量。一方面,高碳排放被计入财务成本,迫使企业面临资产搁浅风险;另一方面,低碳表现通过“绿色溢价”降低融

资成本。数智技术在此充当价格发现的助推器,确保价格信号能够灵敏反映生态资源的稀缺程度与环境风险,从而将生态价值从一种外部的道德呼吁转变为企业估值模型中的内生变量。

第三,融合发展的价值创造协同效应。价值重塑目标旨在突破传统经济增长与环境保护之间的权衡取舍,拓展生产可能性边界,最终实现“ $V(\text{总}) > V(\text{经济}) + V(\text{生态}) + V(\text{社会})$ ”的协同价值。数智技术通过全要素生产率提升,重构了包含环境要素的生产函数。平台经济与算法匹配降低了绿色资产的搜寻与交易成本,使得零散的碳汇、废弃物等闲置生态资源得以进入循环经济体系,转变为可运营的“绿色资产”。这种机制不仅实现了成本的内部化,更推动生产可能性边界的外移,实现了经济价值与生态价值的帕累托改进。

总之,价值重塑机理的深层作用是改变价值增值的内在路径。当生态价值被纳入企业估值模型、影响融资成本、成为新的价值储藏手段,资本就会主动流向绿色领域。这不是对资本的外部约束,而是改变了资本的增值函数。当绿色成为价值创造而非价值损耗,资本逻辑与生态逻辑即实现了内在统一。需指出的是,价值目标重构并不会自动改变企业行为,只有通过产权界定、价格机制和监管规则将生态价值转化为稳定的制度约束,新的价值信号才能真正进入企业决策过程。

(二)制度创新:从静态规制走向动态敏捷治理

新制度经济学强调,制度是影响经济绩效的决定性因素^[30]。如果仅有价值共识而缺乏制度保障,经济主体仍会陷入“囚徒困境”,最终导致集体非理性的“公地悲剧”。面对“科林格里奇困境”,制度创新的核心目标不仅在于解决外部性问题,更在于构建一套能够适应技术快速迭代变革的动态敏捷治理体系。这要求突破“先发展、后治理”的惯性思维,将环境约束、价格机制和信息披露嵌入数智技术研发、部署和应用全过程,推动治理方式由事后纠偏的静态管理转向前置约束、实时反馈和动态调适相结合的制度体系。

第一,从事后补救转向源头嵌入,基于新型产

权界定的前置规制。破解治理困境的前提是清晰的产权界定,这是解决“公地悲剧”的基石。制度设计需首先对算力使用权与碳排放权进行确权,将模糊的减排责任转化为可量化的标准化资产,在此基础上将规制关口前移至算法设计的策划期。通过建立算法环境影响评估制度,要求在模型训练立项阶段就明确其碳权配额与能耗预算。这种将生态硬约束嵌入技术生命周期源头的做法,确保了数智技术在诞生之初便服从于生态底线,从而有效规避后期的路径锁定效应。

第二,从静态定价转向动态内生性,完善反映真实生态成本的激励相容机制。价格信号是引导资本流向的核心。传统的差别电价等手段虽然有效,但面对高频迭代、负荷波动和跨区域调度的数智产业,易出现响应滞后、约束粗放和激励不足。为此,需完善“算力—能源—碳排放”联动的价格机制:一方面,优化分时电价、容量电价、需求响应补偿和绿色电力交易,提高高能耗、低能效算力的真实使用成本;另一方面,探索绿色算力认证、碳减排收益核算和绿色算力交易机制,使采用低碳能源、高效冷却、负荷调节和模型压缩等技术的企业获得可见收益。通过持续改变绿色技术与高能耗技术的相对收益率,推动企业从被动合规转向主动优化。

第三,从单向披露转向以数治绿,构建标准化、可核验的智能监管闭环。针对数智产业生态影响识别难、核算难和监管难的问题,须首先建立统一的能耗、碳排放和资源消耗披露标准,将数据中心电能利用效率、可再生能源使用比例、单位算力服务能耗、单位推理任务能耗、碳排放强度和水资源使用强度等指标纳入重点披露范围,逐步形成覆盖训练、推理、存储、冷却和硬件更新的全链条核算框架。更关键的是利用数智技术反哺绿色监管,通过在线监测、数据交叉验证、第三方认证和异常预警机制,提高披露数据的真实性和可比性,既增强监管部门对高能耗环节的识别能力,也使高能效企业获得信用、融资和市场评价优势,压缩“漂绿”和选择性披露空间。

因此,制度创新的作用并不止于强化监管约束,更在于通过改变要素相对价格、信息披露规则

和合规收益结构,重塑企业技术选择的激励环境。当高能耗路径的真实成本被显性化,绿色技术路线的预期收益被制度化,企业创新方向才会从被动合规转向主动寻优,推动数智技术从高能耗扩张逻辑逐步转向绿色、低碳和可持续的发展轨道。

(三) 范式转型:从规模扩张转向绿色集约的诱导性技术变迁

对于数智技术形成的高能耗锁定,范式转型不是压缩技术发展空间,而是通过改变技术进步的激励结构和演化方向,引导数智创新从外延式算力扩张转向内涵式绿色集约发展。其本质是在生态刚性约束下重新定义技术“先进性”:真正的领先不只是参数规模更大、推理速度更快、应用范围更广,更应体现为单位能耗下更高的智能产出、更强的绿色适配能力。

第一,重构创新目标函数,确立生态阈值在技术决策中的前置约束地位。在传统数智创新范式下,数智创新的目标函数被简化为参数规模、模型精度和推理性能的持续提升,能源消耗、碳排放和资源占用则被置于相对次要的位置,这易导致对算力资源的过度堆砌并使高能耗技术路径自我强化。在融合发展的新范式下,生态承载力不再是外生的软约束,而应成为技术演进的硬边界。创新活动需要从单一性能最大化转向生态约束下的多目标优化,即在控制碳排放、能源消耗、水资源占用和硬件废弃风险的前提下,追求模型能力、应用效率和社会价值的综合最优。这种重构迫使研发主体将能效置于与精度同等甚至更高的位置,从而在微观决策层面内生出对“绿色算法”的刚性需求。

第二,纠偏技术进步方向,推动数智创新从“红色 AI”转向“绿色 AI”。根据希克斯诱导性技术变迁理论,要素相对价格变化会引导技术创新朝着节约昂贵要素的方向演进。当能源、碳排放、水资源和关键硬件的真实成本逐步被内部化,算力扩张的影子价格将相应上升,依赖硬件堆叠和规模扩张的边际收益下降,而通过算法优化、模型压缩和系统架构改进提升能效的边际收益则会相对提高。这一机制诱导技术范式从依赖硬件堆叠的外延式增长,转向依赖模型剪枝、知识蒸馏、参

数高效微调 (PEFT) 等内涵式集约路径。此时“极致”不再仅仅表现为绝对算力和速度的提升,而更体现为单位能耗、单位碳排放和单位资源消耗条件下的智能产出能力。

第三,释放创新补偿效应,将生态约束转化为绿色竞争优势。范式转型能否持续推进,关键在于生态约束能否通过技术创新转化为新的竞争空间。波特假说表明,合理而有效的环境规制并不必然削弱企业竞争力,反而可能通过倒逼创新形成补偿效应。生态优先在初期虽会增加合规成本和技术转换成本,但也促使企业加快低能耗模型、高效芯片、绿色数据中心、智能能碳管理和柔性算力调度等融合创新。一旦绿色数智技术在全生命周期成本、能效和合规收益上优于传统高能耗路径,先行企业便能够通过低碳算力供给、绿色模型服务和可信环境绩效建立新优势,整个产业生态将最终实现从高碳锁定向低碳稳态的系统性跃迁,在服务绿色发展的过程中获得更长久的增长动能。

由此,价值重塑、制度创新与范式转型构成了从价值校准、规则重塑到技术跃迁的内在链条:生态价值进入经济核算,改变了数智扩张的目标函数;制度规则的动态调整,重塑了企业技术选择的激励环境;技术范式的绿色转向,则推动数智经济从规模驱动转向效率驱动、从外延扩张转向内涵提升。在此过程中,“智能悖论”所体现的价值核算失灵、积累体制冲突与制度规制滞后逐步化解,融合也由外部约束转化为内生动力。

三、数智经济与绿色经济融合发展的主要模式

数智经济与绿色经济的融合在实践中并未停留在概念层面,而是已经演化出微观、中观、宏观 3 个维度且相互支撑的典型运作模式。3 类模式相互嵌套、共同演化,构成破解“智能悖论”的现实路径。

(一)微观层面:生态约束导向的全链条精益治理模式

微观层面的融合实践,本质是企业生态约束下利用数智技术重构生产、研发和管理的过程。在价值重塑与制度创新的双重倒逼下,企业不再只是将绿色转型视为外部负担,而是将其作为内

在要求,通过数智化手段推动绿色治理从“末端治理”转向“源头减量”与“全过程控制”,在降低生态成本的同时拓展高质量发展的新空间。

一是约束导向的“绿色数智”创新模式。针对数智技术本身带来的高能耗属性,企业需在算法研发、模型训练与产品设计源头确立能效约束。与单纯追求参数规模和算力堆叠不同,模型剪裁、知识蒸馏、稀疏化架构、参数高效微调等技术,可以在维持模型性能的同时降低算力消耗和碳排放。例如,DeepSeek-V3 技术报告披露,该模型通过混合专家架构、多头潜在注意力等算法设计,在完整训练中使用约 278.8 万 H800 GPU 小时;按每 GPU 小时 2 美元估算,训练成本约 557.6 万美元,并在多项基准测试中达到或接近领先模型水平^[31]。这说明,算法架构优化能够在一定程度上缓解单纯依赖算力扩张的路径。同时,AI 还可用于绿色材料筛选、产品结构优化和可回收性设计,使低碳属性在研发阶段即被嵌入产品基因,推动绿色转型由末端治理前移至原生设计。

二是生产制造的“精益智能”降碳模式。智能制造以数据算法为核心,在自动化基础上实现资源、计划、生产全链协同优化,并同步提升质量、能效与信息透明度,为企业绿色转型提供资金与数据双重支撑^[32],塑造良好可持续形象。该模式通过将数据要素注入生产函数实现工艺流程的极致优化。企业依托工业互联网平台与数字孪生技术,构建“虚拟工厂”进行仿真试错,大幅减少物理试错带来的原料与能源浪费,并利用强化学习算法对高炉、电解槽等高能耗设备进行实时参数调优,在保障产出质量的前提下实现能耗最小化。这将传统的经验决策转变为数据驱动的精准决策,提升了资源利用效率和生产过程的绿色化水平。

三是价值链协同的“全景碳治理”模式。针对产品全生命周期环境影响难以识别、难以核算、难以追踪的问题,企业通过部署区块链与物联网技术,建立覆盖原材料获取、生产制造、物流运输至废弃回收的全链路碳足迹管理体系,破解供应链上下游的碳排放信息不对称问题,从而精准识别高排放节点并靶向治理。进一步看,AI 算法还可

以用于物流路径优化、供应商选择和库存调度,推动企业减排从单一环节扩展到供应链协同治理。

(二)中观层面:平台连接驱动的产业网络化共生模式

数智经济与绿色经济融合所追求的系统效率最优,无法仅靠分散企业的个体决策实现,还需要在产业链、产业集群和区域生态层面进行协同重构。中观层面的融合实践,核心在于突破单个组织边界,依托工业互联网、能源互联网和产业数字平台,构建“能源—物质—信息”深度耦合的产业共生网络。数智技术在这一层面发挥连接、匹配和优化功能,可降低传统循环经济中的信息摩擦和交易成本,推动废弃物循环利用、能源梯级共享和供应链协同减排。其典型模式如下:

一是能源系统的“源网荷储”智能协同模式。AI 是构建以新能源为主体的新型电力系统核心技术。针对风光能源出力波动性与工业用能稳定性之间的错配,该模式利用 AI 技术重构产业能源网络原有逻辑。以智慧能源系统为例,它通过构建能源互联网,利用 AI 预测算法预测风光出力与用户负荷、以智能调度算法优化“源网荷储”协同,再结合需求响应、峰谷电价等市场机制,使高比例可再生能源的消纳这一系统性难题得以在“能效优先”的原则下被智能破解,并显著降低了产业集群的整体用能成本与碳排放强度。

二是循环经济的“平台撮合”价值闭环模式。针对废弃物回收利用中存在的高昂交易成本与信息摩擦,该模式推动了从“线性处置”向“闭环循环”的转变。基于计算机视觉和机器人的 AI 系统(如 AMP Robotics、Greyparrot),能以超越人工的速度和精度识别传送带上的废弃物。如 Greyparrot 系统可识别 111 类废弃物,AMP ONE 可通过气流分拣实现每分钟数千件处理能力^[33]。在产业园区层面,平台还可以利用大数据和 AI 算法,将一家企业的“废弃物”与另一家企业的“原材料”需求进行智能匹配,降低循环利用的搜寻成本和交易成本,使传统上因信息不对称而难以形成的物质闭环变得更具经济可行性,显著提升了整个园区的资源利用效率和绿色发展水平。

三是产业链的“链主驱动”生态治理模式。针

对中小企业绿色转型动力不足与能力不足,该模式确立了“链主牵头、全链协同”的雁阵升级路径。“链主”将其自身的绿色目标转化为对供应商的能效、碳排放和数据披露要求,并通过识别供应链数字化运营网络、动员数字化关系网络、聚合数字化知识网络和促成数字化价值网络 4 个环节赋能供应商,助推供应链碳减排^[34],带动整个产业链实现梯次数智化与绿色化升级。例如,海尔“可持续灯塔工厂”动态运用工业互联网平台的数字技术可供性,通过“生态牵引普惠”的关系机制促成工业互联网产业绿色创新生态组织良性发展^[35],并依托大数据和人工智能构建设备电力负荷模型与能耗优化调度方案,使能源消耗降低了 35%、碳排放降低了 36%^[36]。

(三)宏观层面:空间优化导向的系统化配置模式

宏观层面的融合实践,体现的是国家和区域治理主体利用数智工具优化经济地理布局、资源配置结构和生态治理体系的能力。其核心逻辑是利用数智产业的高连接性、可调度性和空间可转移性,缓解资源禀赋、能源供给、产业布局和生态承载力之间的空间错配。宏观治理通过将制度性公共品与智能化手段相融合,引导分散的微观行为和中观协同向社会整体福利最优收敛,实现经济社会系统对生态承载力的动态适配。宏观层面的融合模式在实践中典型表现为:

一是城市系统的“全域感知”与全局优化模式。针对城市这一能源消费、产业活动和居民生活高度集聚的复杂系统,该模式通过构建“城市大脑”实现从局部治理向全局优化的跃迁。城市大脑作为类脑仿生技术架构,能够发挥感知、思维、反馈等核心功能^[37]。宏观协同模式下的“城市大脑”,通过打通并集成交通、能源、建筑、环境、水务等城市子系统数据,对城市整体的能源流、物质流与碳流进行全局优化,实现跨部门的协同减排,这是宏观层面独有的系统涌现能力。

二是生态监管的“天空地”一体化精准治理模式。针对生态环境监测中存在的时空盲区、数据滞后和执法成本高等问题,该模式需构建立体化、连续化和智能化的生态监管体系。生态监测能为

生态环境管理与政策制定提供基础数据和决策支撑^[38]。通过卫星遥感、无人机、地面传感器实时采集环境数据,形成覆盖重点区域、重点行业 and 重点生态空间的生态监测网络。数据汇入国家级的决策支持系统后,可借助大数据和 AI 技术开展污染溯源、风险预警、政策模拟、减排路径优化和执法辅助。这极大地降低了环境监管的信息成本,提高了生态治理的精准性、及时性和协同性,推动环境治理从经验驱动转向数智驱动。

三是基于资源禀赋的“算能互补”空间重组模式。面对算力需求与绿色能源分布的空间错配,该模式通过优化算力基础设施布局,推动算力需求与可再生能源、气候条件、电网承载力和区域发展需求协同匹配。“东数西算”工程正是典型实践,其关键不只是将数据中心由东部转向西部,而是通过跨区域算力调度,把东部地区的数据计算和大模型训练等需求,与西部地区相对丰富的清洁能源、土地空间和气候条件结合起来。“十四五”以来,我国超过七成新增算力来自西部,约八成智能算力来自“东数西算”枢纽节点;同时,内蒙古和林格尔数据中心集群 2025 年前 11 个月绿电使用占比达 86%,显示“东数西算”的绿色化水平正在持续提升^[39]。这表明,宏观层面的“算能协同”正在推动算力基础设施从分散建设转向跨区域系统配置,从单纯扩大算力供给转向兼顾供需平衡、绿色集约和互联互通。

(四)跨层级融合的系统涌现与共同演化

微观、中观、宏观 3 个层面的融合模式并非彼此孤立,而是共同构成一个嵌套式的复杂适应系统。不同层级通过垂直制度互补与水平技术扩散,驱动经济系统从“高碳数智”向“绿色数智”演化。

一方面,垂直传导机制体现为“自下而上的诱导”与“自上而下的规制”相结合。微观企业的绿色数智创新与中观产业链协作,是新范式的试验场与创新源。零碳数智工厂、虚拟电厂与绿色供应链平台等实践,为宏观政策制定提供了可行性验证与数据支撑,推动国家标准与法律法规的迭代。反过来,碳市场、绿色电力交易和“东数西算”等宏观制度和基础设施安排,对企业和产业链绿色转型形成激励约束。通过这种双向互动,宏观

系统降低微观转型的外部成本,中观网络放大微观创新的扩散效应,分散的市场行为方能逐步收敛于绿色发展目标。这种跨层级的制度互补性,消除了单一层级改革可能面临的锁定效应。

另一方面,水平维度扩散机制体现为网络外部性、学习效应和制度同构共同推动新范式扩散。在同一层级内,先行企业、试点园区和示范城市的成功实践,会通过竞争压力、合法性压力和专业网络传播产生示范效应。后发主体为获取竞争优势、政策支持,往往加速模仿并采纳绿色数智模式,推动融合模式由单点突破走向多点扩散。随着采用绿色数智技术的节点增多,网络的整体价值呈指数级上升。例如,接入智慧能源系统的用户越多,系统的削峰填谷能力越强,单位能耗成本越低。这种正反馈机制加速了旧范式的淘汰与新范式的生成。

当垂直传导的制度效力与水平扩散的市场规模达到临界阈值时,数智经济与绿色经济的融合将从局部的修补演化为稳定的技术—经济范式。此时,数智技术不再只是能源消耗和环境压力的新增来源,更成为提升资源配置效率、促进绿色创新和增强生态治理能力的重要工具。

四、结论和政策建议

(一)研究结论

本文基于“范式张力—融合机理—实践模式”的逻辑框架,系统研究了数智经济与绿色经济融合发展的内在逻辑。研究发现:第一,“智能悖论”不仅表现为能耗反弹,更深层体现为数智经济“无限扩张”冲动与生态系统有限承载力之间的结构性冲突;第二,破解这一悖论在于确立生态理性优先于工具理性的理念,并通过价值重塑、制度创新与范式转型推动二者内在融合;第三,在实践层面,融合发展已演化为约束导向的微观精益治理、服务导向的中观网络共生,以及空间适配导向的宏观系统配置等典型模式。

(二)政策建议

一是强化战略统筹,将生态约束前置嵌入数智经济发展规划。应加强数智化战略与“双碳”战略、数字中国建设与美丽中国建设之间的协同,将绿色低碳要求嵌入数字基础设施建设、人工智能

产业发展和数据要素市场建设全过程。《数字中国建设整体布局规划》虽已提出“建设绿色智慧的数字生态文明”,但尚缺乏专门针对数智经济与绿色经济融合的系统规划。需制定融合发展规划,明确将碳排放双控与资源环境承载力作为数智基础设施建设的前置约束。在“东数西算”等重大工程中,不仅考核能源效率,也应引入水资源效率与碳利用效率等复合指标,建立强制性的可再生能源消纳与硬件回收标准。

二是构建全生命周期敏捷治理机制,破解“科林格里奇困境”。针对制度时滞导致的监管真空,应摒弃“先发展、后治理”的惯性思维,转向创新与规制同步的敏捷治理范式。统筹建立算法环境影响评估制度,将规制关口移至模型训练与数据中心立项阶段。同时,建立数据中心和重点 AI 企业能耗、绿电使用、碳排放和资源消耗的在线监测与核验机制,推动监管从周期性报送转向实时感知、异常预警和动态调控。

三是完善绿色价格与核算机制,实现生态成本动态内生。破解价值核算失灵,关键在于让能源消耗、碳排放、水资源占用和硬件废弃等生态成本更充分进入数智企业成本结构和投资决策。应加快建立算力行业的碳排放核算标准,将数据中心与大型 AI 企业等算力行业逐步纳入全国碳排放权交易市场,探索建立“算力—电力—碳权”联动的定价机制。对绿色算力给予绿色电力交易、需求响应补偿、绿色金融和公共采购支持;对高能耗、低效率、低上架率的数据中心,则通过差别电价、能耗约束和标准退出机制强化约束。

四是实施诱导性创新政策,驱动技术范式向绿色集约跃迁。应重构创新政策的激励导向,设立或整合绿色数智技术专项,重点支持模型压缩、脉冲神经网络、存算一体架构等低能耗技术,以及芯片级液冷、废热回收等技术。对具有重大公共价值和能效优势的绿色 AI 技术,可通过首台套应用、场景开放、政府采购和示范工程提供早期市场空间。政府和公共部门在采购智能化系统、云服务和大模型服务时,也可逐步建立“性能—能效—碳效”综合评价标准。

五是培育多层次共生生态,拓展融合发展的

应用场景和增长空间。微观层面,遴选并推广“数字化绿色化协同转型”标杆企业,鼓励企业将合规成本转化为发展红利,发挥示范效应;中观层面,打造“源网荷储”一体化的零碳算力园区,利用产业集聚降低基础设施共享成本;宏观层面,深化“东数西算”节点绿色配套改革,探索跨区域的碳汇补偿与算力交易机制,提升跨区域资源配置效率和绿色发展效能。

参考文献:

- [1] 吴越. 数智经济与中国超越的机会窗口:理论逻辑与实践路径[J]. 经济学家,2025(10):79-88.
- [2] 习近平. 全面推进美丽中国建设加快推进人与自然和谐共生的现代化[N]. 人民日报,2023-07-19(1).
- [3] 韩先锋,勾亚楠,肖远飞,等. 数字生态文明建设中制度创新的力量:政策协同赋能的视角[J]. 中国工业经济,2024(11):62-80.
- [4] 曹裕,李想,胡韩莉,等. 数字化如何推动制造企业绿色转型:资源编排理论视角下的探索性案例研究[J]. 管理世界,2023,39(3):96-112,126.
- [5] 钞小静,沈路. 创新价值链视角下人工智能技术对制造业企业绿色创新效率的影响[J]. 经济学动态,2025(4):50-67.
- [6] 韩峰,黄敏,姜竹青. 企业数字化、网络地位与污染减排[J]. 世界经济,2024,47(2):204-232.
- [7] 屠西伟,史丹. 数字产业集聚与企业能源效率改进[J]. 数量经济技术经济研究,2025,42(10):70-89.
- [8] 孔晓瑞,周静,李凯. 数字化转型赋能制造业绿色低碳发展的机理与效应研究[J]. 软科学,2025,39(10):68-75,82.
- [9] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Key questions on energy and AI[R/OL]. Paris: IEA,2026:9-10. [2026-05-12]. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/3179f7f8-01f6-4dd6-bffa-c9f7b73f1dc9/KeyQuestionsonEnergyandAI.pdf>.
- [10] 中国信息通信研究院. 绿色算力发展研究报告[R/OL]. 北京:中国信息通信研究院,2025:[2025-11-18]. https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202507301718364942_1.pdf.
- [11] 吴红,姜惠. 从“红色 AI”到“绿色 AI”:人工智能的生态范式转换[J]. 探索与争鸣,2025(5):99-110,178-179.
- [12] 杨开忠. 以新质生产力引领工业文明向生态文明跃迁[J]. 中国人口·资源与环境,2026,36(1):1-17.
- [13] 李文卿. 论算力基建的数字环境治理悖论及其破解:技术反弹效应下的法治进路探索[J]. 中国科技论坛,2025(10):143-151.
- [14] JEVONS W S. The coal question: an inquiry concerning

- the progress of the nation, and the probable exhaustion of our coal-mines[M]. London: Macmillan and Co., 1866:140-142.
- [15] GREENSTEIN S. Artificial intelligence and the Jevons paradox[J/OL]. IEEE micro, 2025(2)[2026-05-12]. <https://www.computer.org/csdl/magazine/mi/2025/02/10989062/26uKESOI29i>.
- [16] EPOCH AI. Trends in artificial intelligence[DB/OL]. (2025)[2026-04-15]. <https://epoch.ai/trends>.
- [17] KANDEMIR M. Why AI uses so much energy—and what we can do about it[EB/OL]. (2025-04-08)[2026-05-12]. <https://iee.psu.edu/news/blog/why-ai-uses-so-much-energy-and-what-we-can-do-about-it>.
- [18] Retronix. Building a circular economy for AI hardware: Why CPUs and supporting chips deserve a second life[EB/OL]. (2025-10-08)[2026-05-12]. <https://retronix.com/circular-economy-for-ai-hardware-why-cpu-gpu-deserve-a-second-life/>.
- [19] 吕晓琴, 吴学琴. 价值虚无主义的资本逻辑检视[J]. 思想教育研究, 2025(10):75-82.
- [20] 徐景一. 马克思机器体系理论视域下人工智能技术资本主义应用困境研究[J]. 马克思主义研究, 2025(9):70-80, 144.
- [21] 周文, 杨正源. 论智能经济:内涵特征、发展态势与战略选择[J]. 改革, 2025(9):1-15.
- [22] 邓佳. 数字文明主体性的理论审视[J]. 马克思主义研究, 2025(10):134-144.
- [23] GOLDMAN SACHS. Why AI companies may invest more than \$500 billion in 2026[EB/OL]. [2026-05-12]. <https://www.goldmansachs.com/insights/articles/why-ai-companies-may-invest-more-than-500-billion-in-2026>.
- [24] 李嘉良, 拉帕维萨斯. 数字资本主义的生态悖论:逻辑生成、内在机制与治理路径[J]. 海派经济学, 2025, 23(3):168-179.
- [25] 宋亚辉. 数字经济创新中的“科林格里奇困境”及其规制[J]. 武汉大学学报(哲学社会科学版), 2023, 76(3):151-162.
- [26] 郝戈. 马克思的资本理论和市场理论及其当代价值[J]. 马克思主义研究, 2025(10):88-98, 152.
- [27] COSTANZA R, DE GROOT R, SUTTON P, et al. Changes in the global value of ecosystem services[J]. Global environmental change, 2014, 26:152-158.
- [28] JOMIR F. The utilization of artificial intelligence in measuring, accounting and reporting for ecosystem services[J]. Journal of financial and monetary economics, 2024, 12(1):212-226.
- [29] RAFIQ K, BEERY S, PALMER M S, et al. Generative AI as a tool to accelerate the field of ecology[J]. Nature ecology & evolution, 2025, 9:378-385.
- [30] NORTH D C. Institutions, institutional change and economic performance[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [31] DEEPSEEK-AI. DeepSeek-V3 technical report[R/OL]. arXiv:2412.19437, 2024[2026-05-12]. <https://arxiv.org/abs/2412.19437>.
- [32] 毛其淋, 石步超. 通向绿色发展之路:智能制造与企业绿色转型[J]. 世界经济, 2024, 47(9):152-182.
- [33] Lamont-doherty Earth Observatory. How AI is revolutionizing the recycling industry[EB/OL]. (2025-11-18)[2026-05-12]. <https://lamont.columbia.edu/news/how-ai-revolutionizing-recycling-industry>.
- [34] 宋华, 韩梦玮, 于亢亢, 等. 数字技术如何助力供应链碳减排:基于国网浙江电力的案例研究[J]. 南开管理评论, 2024, 27(1):27-41.
- [35] 张延平, 郭波武, 李世杰, 等. 链主企业如何牵引产业绿色低碳发展:基于海尔“可持续灯塔工厂”建设的案例研究[J]. 管理世界, 2025, 41(6):199-227.
- [36] 天津市工业和信息化局. 灯塔工厂 照亮天津制造[EB/OL]. (2026-04-15)[2026-05-12]. https://gyxxh.tj.gov.cn/gllm/gabsycs/gxdtgh/202604/t20260415_7282049.html.
- [37] 万劲波, 何乐乐, 宋艳秋. 未来城市的数字基础设施:体系构成与建设路径[J]. 中国软科学, 2025(3):103-114.
- [38] 何廷美, 王树锋, 吴凡, 等. 科技赋能生态监测创新驱动保护发展:以卧龙世界生物圈保护区为例[J]. 中国科学院院刊, 2025, 40(9):1586-1595.
- [39] 中央网络安全和信息化委员会办公室. “东数西算”落子成局 有力支撑高质量发展[EB/OL]. (2025-12-24)[2026-05-12]. https://www.cac.gov.cn/2025-12/24/c_1768304095033748.htm.