

引用格式:陈晓红, 欧阳长风, 张乘, 等. 资源环境数智协同管理的研究框架与未来展望[J]. 资源科学, 2024, 46(4): 657-670. [Chen X H, Ouyang C F, Zhang C, et al. Collaborative management of resources and environment enabled by digitalization and intellectualization: Research framework and prospects[J]. Resources Science, 2024, 46(4): 657-670.] DOI: 10.18402/resci.2024.04.01

资源环境数智协同管理的研究框架与未来展望

陈晓红^{1,2,3}, 欧阳长风^{1,2}, 张乘^{1,2}, 汪阳洁¹

(1. 中南大学商学院, 长沙 410083; 2. 湘江实验室, 长沙 410205;

3. 湖南工商大学前沿交叉学院, 长沙 410205)

摘要:【目的】旨在探讨资源环境数字化与智能化协同管理的内在机理, 为推动资源环境协同管理理论与数字技术深入融合、促进中国情境下的可持续发展研究提供有益启示。【方法】从资源环境协同管理的相关文献梳理出发, 归纳总结出资源环境数智协同管理的整合性研究框架, 阐释资源环境数智协同管理的概念内涵、关键问题、方法体系和实现路径, 展望未来研究方向以及明确中国情景下需要进一步强化研究的议题。【结果】资源环境数智协同管理的整合性研究框架包括资源环境数智协同管理的核心内涵, 机制标准、理论方法、产业模式相关的3个关键问题, 3类交叉研究方法, 以及通过数字技术、平台和模式创新实现资源环境协同发展的3个路径。未来研究的主要方向包括资源环境数智协同管理的驱动因素、过程机制和结果评估。【结论】需要突出资源环境数智化协同管理在中国情境中的本土特色, 并重点关注环境规制如何促进资源环境协同发展、智慧生态环境治理体系的架构与机制研究、数智化导致的潜在区域发展不平等研究问题, 为全球数字技术赋能可持续发展目标实现提供中国经验和启示。

关键词:数智化; 资源环境; 协同管理; 研究框架; 研究展望

DOI: 10.18402/resci.2024.04.01

1 引言

促进人与自然和谐共生是中国式现代化的本质要求^[1]。习近平总书记多次论述并强调能源资源节约和环境保护之间的关系, 提出了“绿水青山就是金山银山”“保护生态环境就是保护生产力, 改善生态环境就是发展生产力”等科学论断。党的二十大报告提出要“协同推进降碳、减污、扩绿、增长, 推进生态优先、节约集约、绿色低碳发展。”资源环境协同发展是人与自然和谐共生的根本保障^①, 也是国家经济高质量发展的必然要求。然而, 资源开发与环境保护的冲突依然严峻。随着社会进步与经济发展, 中国对自然资源的开采不断加剧, 传统资

源开发对生态环境和自然资源造成巨大威胁^[2]。要站在人与自然和谐共生的高度谋划发展, 就要立足新发展阶段, 统筹兼顾, 加强资源环境的协同管理。

随着大数据、人工智能、云计算、物联网、区块链、数字孪生等新一代信息与通信技术的快速发展, 数字经济日益成为重组全球要素资源的关键力量^[3]。数字经济的迅猛发展也催生新型数智化变革, 促使数字化、智能化和绿色化成为全球发展的趋势, 它们相互融合促进, 推动经济社会发展绿色转型与产业升级^[4]。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

收稿日期: 2023-10-25; 修订日期: 2024-02-02

基金项目: 国家自然科学基金基础科学中心项目(72088101); 湘江实验室重大项目(23XJ01006); 国家自然科学基金面上项目(72173139)。

作者简介: 陈晓红, 女, 湖南长沙人, 中国工程院院士、教授、博士生导师, 研究方向为资源能源环境智慧管理、生态文明与绿色发展等。E-mail: c88877803@163.com

通讯作者: 汪阳洁, 男, 湖北天门人, 教授、博士生导师, 研究方向为资源环境管理。E-mail: yangjie.wang@csu.edu.cn

① 资源环境指自然资源和生态环境, 包括土地资源、水资源、空气质量、生物多样性等。这些资源和环境元素在可持续发展的背景下需要被有效地管理和保护。

的数字生态文明^[5]。数字技术赋能的资源环境协同管理有望为破解双碳目标下的资源安全保障、生态环境保护等重大现实问题提供有效解决方案^[6]。如何把握新一轮科技革命和产业变革的新机遇,加速数智化绿色化协同发展,为加快形成新质生产力提供有力支撑,推动经济社会绿色高质量发展,成为数字经济时代亟需回答的重大课题。

从应用实践来看,大数据、人工智能等数字技术在资源与环境协同管理领域的应用日趋丰富。例如,在资源勘探与开采领域,人工智能和大数据技术被广泛应用于地质数据分析,促进勘探和开采计划优化,降低对生态环境的破坏^[7,8]。在场地或区域治理领域,构建矿产资源开发与生态环境安全仿真应用平台,实现数据的实时监测与时空大数据分析,及时解析资源开发与环境变化的互动关系,为安全态势评价、污染防治预警和灾害应急处置等精准化治理提供技术支持^[9,10]。在林业管理领域,使用遥感卫星影像和无人机配合人工智能分析,进行森林覆盖率监测和病虫害预警,平衡商业利用和生态保护,助力可持续林业管理^[11-13]。

在理论上,当前学术界对数字技术赋能资源环境协同管理尚缺乏系统阐释。已有不少文献就数字赋能生态环境治理能力现代化的问题开展探索,但这些文献大多来自对数智化典型案例的分析^[14,15],或从数字化效应视角实证分析数字经济发展对资源开发^[16]、环境污染^[17]、碳排放^[18]、能源效率^[19]的影响。这些研究主要关注数字化与单一资源(能源)或环境的关系,或探究数字技术对资源开发或环境保护的赋能效应,存在内容碎片化、问题视角单一、缺乏整合性框架等不足。尽管推动数字化绿色化协同发展,对加快形成绿色生产力意义重大,但数字技术赋能资源环境协同管理的理论框架和路径并不清晰,难以为资源环境数智化协同管理的政策制定与管理决策提供理论指导。

基于此,本文意在构建资源环境数智协同管理的整合性研究框架,系统阐释研究框架的内涵体系,为推动资源环境协同管理理论与数字技术深入融合、促进其中国情境研究和可持续发展管理提供有益启示。具体而言,首先对资源环境协同管理的相关研究进行梳理和述评;在此基础上,提炼出资

源环境数智协同管理的研究框架,阐释资源环境数智协同管理的概念内涵、关键问题、研究方法体系和实现路径;最后,展望未来研究方向以及明确中国情景下需要进一步强化研究的议题。本文旨在为国家资源环境可持续发展管理与数字生态文明建设的推进提供理论与政策支撑。

2 资源环境协同管理研究进展

资源环境协同管理是“协同理论”“可持续发展”“生态文明建设”的跨学科交叉管理创新实践,近年来逐渐进入研究者的视野,成为数字经济、低碳经济等新经济形态下理论界热议的话题之一。为展示数字化背景下资源环境及其协同管理相关主题的研究特点,本文聚焦矿产资源、能源和环境管理领域,对现有研究进展进行简要述评。具体而言,在文献检索上,本文以“协同管理”(Collaborative Management)、“资源管理”(Resource Management)、“能源管理”(Energy Management)、“环境管理”(Environmental Management)、“数字技术”(Digital Technology)等为关键词,在 Web of Science、中国知网数据库检索近 10 年(2014 年 1 月—2024 年 1 月)的文献。在筛选阶段,通过阅读文献标题、摘要、结论等内容,剔除与研究主题关联性较小的文献,共获得符合条件的文献 60 篇。

首先,能源领域的研究文献主要关注以下 3 个方面:①能源消耗、效率和可持续性研究。不少文献揭示了数智化促进企业绿色转型的规模效应和技术效应机制^[20]。例如,Yang 等^[21]检验了以工业机器人为表征的数字技术对能源效率的影响及机制,发现数字技术通过提高产业虚拟集聚度和增加对外直接投资的渠道提高能源效率;方冬莉^[22]从技术赋能和技术外溢的角度分析了数字经济对城市能源利用效率的影响,发现数字经济通过技术进步和技术外溢提升城市能源利用效率。②能源地理、网络系统模型研究。主要以资源分布及经济地理研究为起点,在能源环境问题的牵引下逐渐形成了能源生产网络与能源流动、能源地缘政治与能源安全、能源转型与气候治理、能源正义与能源贫困等多元研究议题^[23]。③有关大数据、区块链等技术应用于能源管理的研究。主要从生产、交换、分配、消费等层面剖析数字技术赋能现代能源体系构建的

2024年4月

理论机制^[24],探索大数据、人工智能、数字孪生等技术支撑能源行业碳中和目标实现的路径^[25-27],揭示区块链技术在新型电力系统市场化运行以及虚拟电厂交易中的作用^[28]。

其次,矿产资源相关研究文献主要关注以下4个方面:①矿产资源管理工程研究。现有研究着眼于梳理大数据技术应用于矿产资源安全管理领域的理论与工程实践^[29]。②传统矿业工程研究。着眼于对资源的物质流分析和生命周期评估,以揭示矿产资源的可持续性问题^[30]。③传统矿产产业的数字化转型研究。主要探索数字孪生、机器视觉、信息管理系统、传感器、智能设备、机器学习技术等在传统矿物加工过程中的应用和成效。研究发现,大数据的结合对中国企业矿产资源效率提升产生了积极和持久的影响^[31]。④矿业数字技术应用研究。数字化为实现采矿业安全、智能、绿色和气候智能(SIGCS)目标提供了技术援助,为实现全球碳中和作出了贡献^[32]。

最后,环境领域的研究文献主要涉及两类主题:①数字化可持续发展研究。如Xu等^[33]基于中国A股资源型上市企业的数据,实证检验了数字化转型对企业环境绩效的直接影响和传导机制,发现数字化转型通过刺激绿色技术创新、加大环境信息公开、加强环境治理等方式显著提升企业环境绩效。②生态和技术融合应用研究。有学者提出了结合虚拟地理环境和数字孪生技术的虚拟生态关键技术体系,并从应用场景角度分析了虚拟生态技术在大气污染分析中的应用能力,丰富了生态空间资源转型的研究文献^[34];还有学者探究了数字孪生在城市治理方面^[35]以及深度学习方法在山体滑坡预测方面^[36]的作用;Jay^[37]等揭示了人工智能和数据科学在改善环境可持续性方面的重要作用;Li等^[38]总结了大数据和数字孪生技术在地球系统科学研究中的应用进展。

总体而言,当前数字技术赋能资源环境领域的研究大多来自地球科学和工程等学科,对数字化与资源环境管理的交叉融合研究相对较少,特别是针对数字技术赋能资源环境协同管理的相关研究还远远不够。现有相关的管理学研究主要集中于数字技术在资源、环境单一领域的应用研究和影响评

估,尚缺乏对资源环境数智协同管理理论的分析。因此,亟需从理论上探究数智赋能资源环境管理的研究框架与发展方向,为数字技术赋能的资源环境协同管理创新与绿色生产力提升提供理论支撑。

3 资源环境数智协同管理研究框架

3.1 研究框架概况

围绕数字经济时代资源环境管理面临的问题以及理论研究滞后于实践的现实,本文构建了资源环境数智协同管理的“基础理论—关键问题—方法体系—实现路径”整合性研究框架(图1)。其中,“基础理论”主要是在概括总结相关主要理论的基础上,界定资源环境数智协同管理的科学内涵;“关键方法”涉及资源环境数智协同管理需要回答的3方面关键问题;“方法体系”概括了资源环境数智协同管理理论的研究方法体系,包括传统研究方法和新的交叉研究方法;“实现路径”包括技术、平台和模式创新3个层面。

3.2 基础理论与概念内涵

3.2.1 相关基础理论

在阐述本文关键核心概念之前,先简要概述相关的协同管理基础理论。协同管理理论是指基于复合系统的结构功能特征,运用协同学理论对系统实现有效管理,以实现系统协调并产生协同效应^[39]。协同管理理论通常是运用在系统外部与内部的价值创造、分配与评估协同过程中,意在突破孤岛现象,更高效整合利用资源,实现目标效益最大化。协同管理理论研究对象包含资源协同管理、组织协同管理、技术研发协同管理、人力资源协同管理、营销协同管理等内容^[40]。作为协同管理理论的目标延伸,可持续发展理论强调既满足当代人需要,又不对后代人满足其需要的能力构成危害的发展,并以达到协调、公平、高效、多维的发展作为最终目标^[41]。

从资源环境管理角度而言,协同管理理论为资源开发与环境保护的协同提供了理论基础和管理目标。但事实上,二者的冲突一直是全球可持续发展面临的关键障碍之一。特别是,随着全球气候变化日益严峻,工业化、城市化和经济全球化快速发展,资源环境协调与可持续发展管理的压力与日俱增。联合国最新发布的《2023年可持续发展目标报

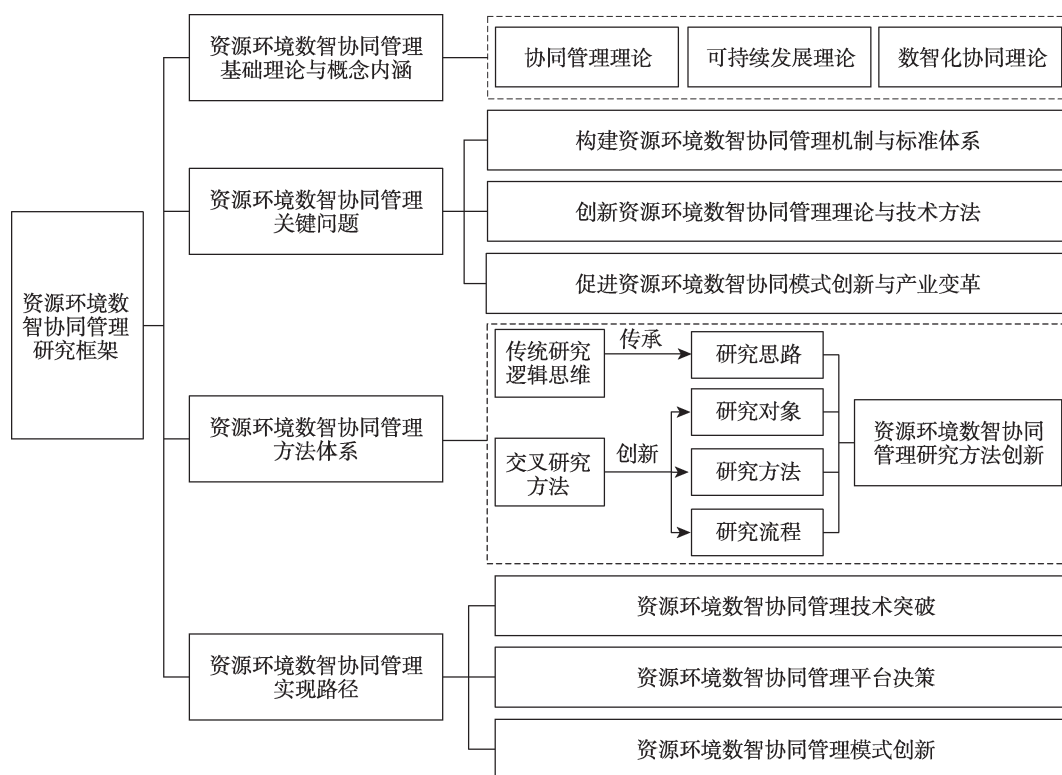


图1 资源环境数智协同管理研究框架

Figure 1 A research framework of digital and intelligent collaborative management of resources and the environment

告:特别版》警告称,受气候变化及各种因素叠加影响,全球可持续发展目标进程严重受阻。这促使社会各界反思,是否需要引入新的管理理念和变革手段来助力实现可持续发展目标。

数字技术是催生企业数字化转型升级的核心要素,也是推动社会经济变革的重要技术力量^[42]。随着数字技术高速发展,数智化协同理论应运而生。数智化协同理论是数字技术赋能协同管理的创新发展,强调数据是实现协同的基础要素,技术是实现协同的重要路径,模式创新是实现协同价值的重要方法^[43]。数据已成为继土地、劳动、资本之后的新生产要素,新兴数字技术作为手段和工具赋能协同理论发展,助力实现资源最优利用和减污降碳,促成经济与环境效益双赢。根据数字技术特征,数智化协同理论包含综合模式、开放模式、直连模式和联动模式4种协同模式^[44]。其中,综合模式强调聚合碎片空间,构建统一指挥能力;开放模式,强调吸纳多元参与,提升社会治理能力;直连模式,强调实现无缝沟通,完善互动回应能力;联动模式,强调集成治理工具,增强全面服务能力。

3.2.2 概念内涵

数智协同管理理论的创新发展,为开展资源环境数智化协同管理提供了基础。资源环境协同管理是双碳目标下为同时满足资源合理开发与生态环境保护要求而提出的^[45]。陈晓红等^[46]强调了资源环境协同管理在矿产资源、能源开采和环境保护过程中的必要性,是协同管理在管理学、环境学等跨学科领域交叉研究的应用拓展。随着数字化、智能化信息技术的跃升式发展,以新一代人工智能为代表的数字技术为资源环境协同管理提供了新的技术支撑手段。因此,结合上述协同管理理论与数智协同管理理论的扩展,本文提出,资源环境数智协同管理是指在数字经济时代,以协同管理理论为基础,针对资源与环境管理现实问题和制约可持续发展的难题,通过数智化技术赋能资源开发、生产与运营管理全过程,实现资源高效绿色开发、减污降碳协同增效的可持续发展管理理论。

3.3 关键问题

在可持续发展背景下,构建现代化、智慧化、精细化的资源环境协同管理体系是推进高质量发展

2024年4月

和数字生态文明建设的应有之义,这有赖于对关键问题的精准识别。尽管部分学者从历史进程和演化规律等方面对资源环境协同管理问题进行了分类,但因为不同学者学科背景和切入视角的不同而各有侧重^[47]。本文重点从资源环境数智协同管理技术赋能的角度着手。

通过对资源环境协同管理有关文献的整理剖析,本文给出构建资源环境数智协同管理研究框架中亟待解决的3个关键问题:①构建资源环境数智协同管理机制与标准体系。即通过构建多方利益主体协作共建、信息共享的管理机制,实现对传统资源开发与环境保护冲突的协调与科学统筹规划。②创新资源环境数智协同管理理论与技术方法。探讨数字化、智能化技术赋能传统资源环境协同管理的理论和方法体系,为数字生态文明建设提供科学决策支撑。③促进资源环境数智协同模式创新与产业变革。以数智化绿色化协同模式创新推进现代化产业体系建设,是加快形成新质生产力、推动高质量发展的内在需求。探究驱动产业创新与变革的数智协同新模式,揭示数字化转型在规模、效率和融合效应等维度的赋能效应,促进数字经济和绿色发展良性互动和“数绿融合”发展。

3.4 方法体系

随着数字技术的快速发展,多学科交叉研究方法逐渐被应用于协同管理研究全过程,这使得资源环境协同管理研究方法论不断创新,进而形成资源环境数智协同管理的研究方法体系。

3.4.1 资源环境数智协同管理研究方法论创新

传统资源环境协同管理研究方法因为受数据资源和技术手段限制,存在预测结果偏差较大、评价结果科学性较差等问题^[48]。特别是在数智时代,资源环境领域数据容量规模庞大、数据结构多源异构、变量维度高维复杂、数据噪声干扰增强等特征增加了研究难度。为消除传统资源环境协同管理研究方法存在的局限性,创新相关研究方法和方法论迫在眉睫。

相较于传统资源环境协同管理研究方法,以数据驱动和数字技术赋能为特征的创新研究方法,很大程度上克服了传统定性研究模式结果的低精确性。特别是,数智时代大数据与人工智能技术的发展影响了经济主体行为与市场运行方式,也改变了

传统经济学和管理学研究范式^[49]。例如,以 Chat GPT 及其大语言模型为代表的人工智能极大地丰富了资源环境协同管理的研究工具和方法体系。由于大模型可容纳高维潜在影响因素,允许模型参数具有时变性和存在非线性关系,因此能够显著减少模型偏差^[50]。此外,由于大量的经济与环境数据具有空间特性或与空间位置相关,这为将地理信息系统的空间分析模型方法(往往包含遥感大数据分析)与社会科学实证方法相结合提供了契机。

3.4.2 资源环境数智协同管理研究方法体系构建

目前,学界尚未构建系统的资源环境数智协同管理研究方法体系。本文针对资源环境数智协同管理发展的现实需求和关键问题,构建了包含研究思路、研究对象、研究方法论和研究流程四部分的资源环境数智协同管理研究方法体系(图2)。

在研究思路,遵循传统的明确目的、识别问题、选择方法、得出结论的逻辑思路开展。在研究对象上,分别从宏观、中观和微观层面探究资源环境数智化管理在国际/国内层面、地区/产业层面,以及企业/个体层面的实施机制。宏观层面的研究对象包括资源流动、资源供需匹配、减污降碳协同等;中观层面包含地区尺度的生态补偿、流域数智治理、环境发展不平等等问题,以及产业尺度的数智化转型升级、数字化基础设施建设等;微观层面主要涉及企业的环境意识、环境决策,个人的环境行为、用能行为等。由于不同研究尺度涉及的资源环境协同管理问题不同,需依赖不同的研究方法。在具体研究方法论上,重点聚焦传统资源环境协同管理方法的改进与优化、数字技术赋能的资源环境协同管理方法创新、资源环境数智协同管理研究范式拓展与应用等,以服务于不同的研究对象和内容。尤其是将大数据与人工智能催生的大模型系统分析方法,应用于资源环境复杂系统研究。例如,可在计量经济学建模中考虑大模型范式,有助于改进场地(如矿场)或流域的污染扩散预测预警与提升模型的解释力。在区域经济环境分析、保护规划决策中,可以建立传统经济模型和地理信息系统(GIS)空间分析模型相链接的分析模型,采用GIS工具可视化模拟分析各种资源开发活动对生态和环境的时空影响。在研究流程上,在既定研究目标

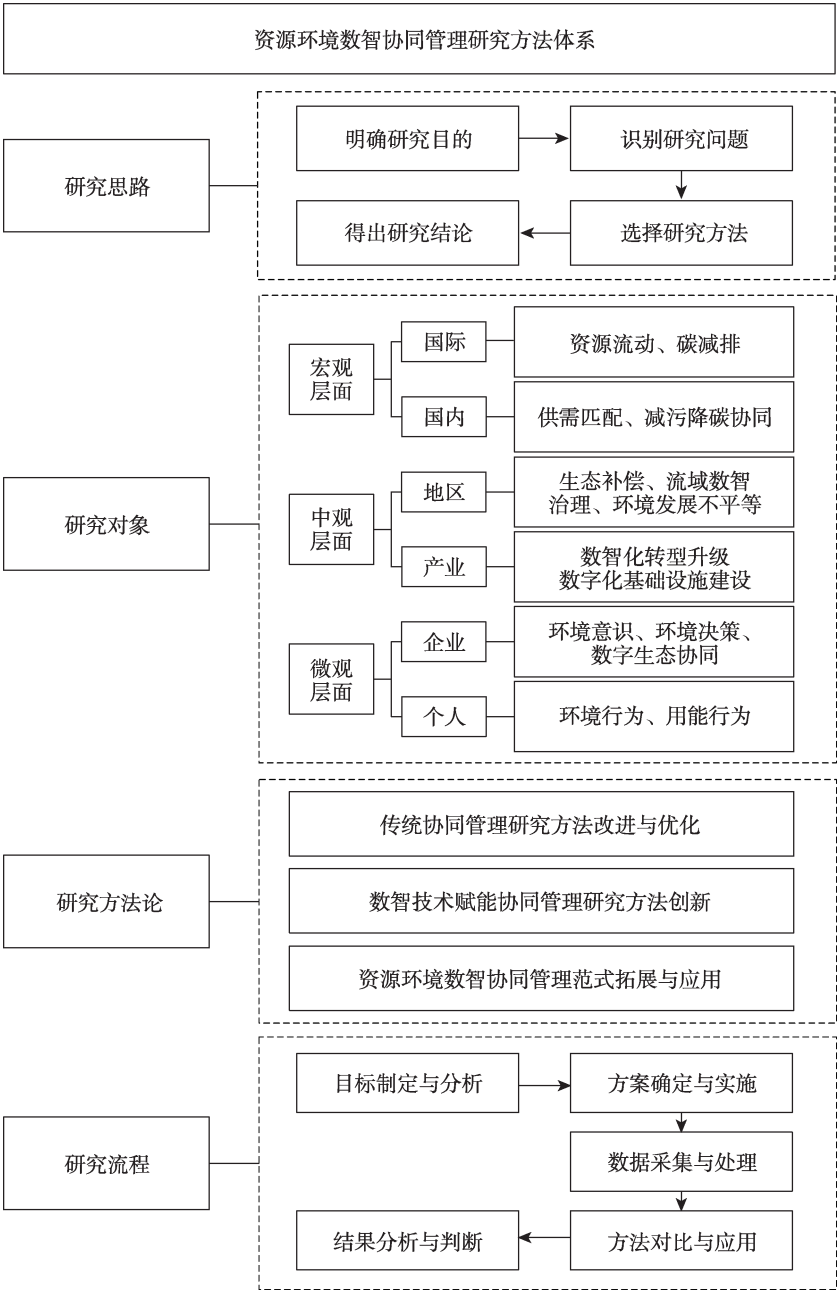


图2 资源环境数智协同管理研究方法体系

Figure 2 Research methodology of digital and intelligent collaborative management of resources and the environment

和方案设计下,通过数据采集与处理、方法对比和应用,实现研究结果的分析与研判。总体而言,数字技术在资源环境协同管理中的应用是对传统资源环境协同管理的创新与演进,通过构建数智赋能的研究方法体系,进一步支撑资源环境数智协同管理理论体系的完善。

3.5 实现路径

资源环境数智协同管理主要依托关键的技术

与方法创新支撑。在数字技术赋能作用下,预期目标上可设立精度更高的预测结果和考虑更全面的研究假设;研究分析上依靠大数据分析、机器学习或数字孪生模型等新方法进行研究;结果呈现上利用智能优化算法和数字处理技术对资源环境协同结果进行可视化表达与智能决策。

3.5.1 资源环境数智协同管理技术突破

实现矿产资源、能源与生态环境智能协同管

2024年4月

理,需要一系列协同管理相关技术支撑。根据已有文献及应用案例,至少包括如下管理技术方法:

(1)数据自动采集。数字技术可以用于自动收集与资源环境相关的数据。通过传感器、遥感技术、物联网等手段,实时、准确获取大量数据,包括资源利用情况、环境质量监测、生态系统变化状况等^[51]。

(2)数智化建模和仿真。数字技术可以将资源环境的复杂系统转化为数字模型,进行仿真和预测^[52]。通过建立资源环境数智化模型,模拟不同的管理策略、政策措施等对资源利用和环境影响的作用效果。

(3)数据的智能化分析和决策支持。数字技术可以为资源环境管理提供智能化分析和决策支持^[53]。基于长期监测的资源环境数据,使用大数据、机器学习等数字技术手段实现对资源利用和环境管理过程的智能化分析和预测,分析结果为管理者的科学决策提供支撑。

(4)信息共享和协同工作。数字技术可以促进信息的共享和协同^[54]。通过建立资源环境的数智化平台和云计算系统,实现数据的共享、交换和整合,方便各个部门和相关利益方之间的沟通与协作。

3.5.2 资源环境数智协同管理平台决策

在协同管理系统开发方面,针对矿产、能源、环境多源异构海量数据的采集、存储、计算,以及提供开放式数据服务的需求,构建资源环境智慧协同管理平台,支撑相关领域资源环境大数据分析和智能

决策。图3展示了资源环境智慧协同管理平台的总体构架,由资源环境大数据信息情报中枢系统和资源环境大数据辅助决策平台构成。资源环境大数据信息情报中枢系统解决资源环境多模态数据存储、处理、共享难题,形成多源异构海量数据资源池,核心是研发数据混合存储体系,构建集元数据管理、数据清洗、数据处理(对齐、融合等基础处理能力)、虚拟数据视图等能力的数智中台,为资源环境大数据辅助决策提供数据支撑。

在信息情报中枢系统的基础上,如图3所示,通过联邦学习、算法引擎等算法模型执行方式,进一步构建集仿真推演、监控预警、决策分析、政策评估等于一体的资源环境大数据辅助决策平台。辅助决策平台由算法中台和模型中台组成:算法中台包括多方安全计算、联邦学习等子系统,模型中台包括模型解析、生成。其中,根据数据的接入方式选择相应的算法模型执行方式,如针对通过接口访问的数据,可采用算法引擎直接计算;而对于域内不能直接访问的数据,则通过联邦学习和多方安全计算方式进行处理。为了强化平台对复杂问题的处理能力,提供算法编排能力将模型算法根据需求编排组合。

平台的主要功能包括资源能源环境安全态势实时监测、突发事件预警追踪、重大决策问题仿真分析、效果评估与方案生成等,通过设计具体应用场景下的“数智化-绿色化”协同路径,为建设绿色

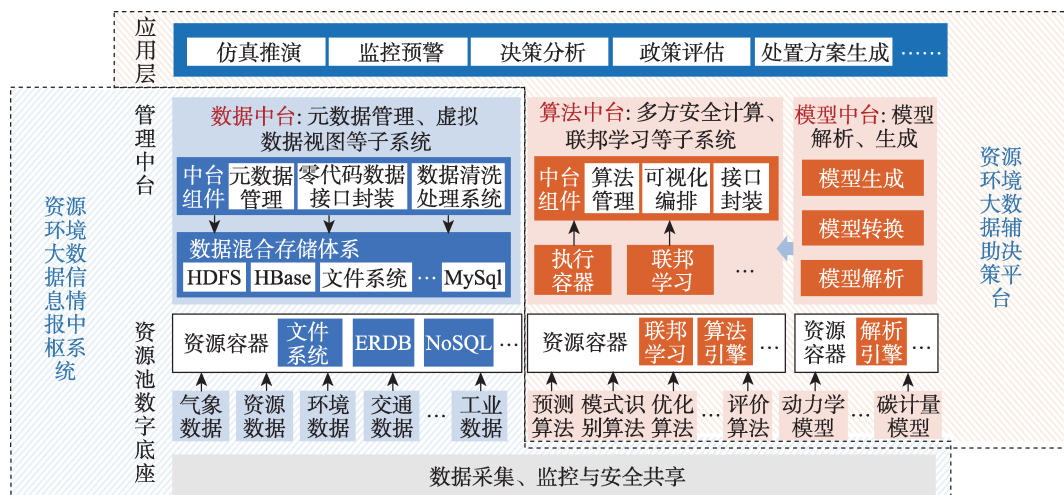


图3 资源环境大数据信息情报中枢系统与辅助决策平台

Figure 3 Resource and environment big data information center system and auxiliary decision platform

智慧的数字生态文明提供全链条决策支撑。

3.5.3 资源环境数智协同管理模式创新

在资源环境数智协同管理技术变革的基础上,构建智能决策平台支持管理研究与决策,进而推进管理模式创新与产业变革。具体模式创新内容包括:

(1)革新资源开发与环境保护的交易模式。基于物联网、区块链等新一代信息技术,革新资源开发与交易市场,实现用能权、碳排放权、排污权、资源配额等去中心化的智能交易模式。建设数字化安全运行体系,保障安全可靠的生态权益交易和资源配额交易,促进生态产品价值实现。

(2)融合创新服务业态。通过数字技术的革新与应用,对资源开发与环境保护服务业务进行优化整合,实现跨区域、跨部门、跨企业协同智能决策,提高资源利用效率。基于资源环境数智协同管理服务创新,实现多能融合与环境可持续发展,促进产业变革与整个产业链的协同创新,提高资源优化配置能力与资源环境相关产业链供应链的韧性。

(3)构建资源环境优化网络。从消费模式上升到产业服务业态,而后构建资源环境协同管理集成优化网络,适应多元需求。以城镇/园区为资源单元体,依托物联网等数字技术,精准预测单元需求,实现资源系统供需平衡。

3.6 实践案例:企业电力能源与环境数智协同管理

双碳目标下确保中国能源和环境安全对国家可持续发展的重要性愈发凸显。中国已成为世界上最大的能源生产国和能源消费国,同时以煤电为主的能源结构,带来了低碳环保需求和能源安全供应的巨大压力。有效破解能源开发利用与生态环境保护的冲突、协同实现能源行业减碳降污成为亟待解决的重大需求。针对以电力供应为核心的能源管理和以低碳减排为核心的环境管理之间存在的冲突,中国大唐集团有限公司、国网湖南省电力有限公司等能源企业研发了面向电能供应的数智协同管控技术,构建“源、网、荷、储”各方与环保之间的多方协同联动机制,以实现能源与环境协同发展。具体表现在以下4个方面:

(1)针对电能供应与环境保护中内在属性关系难描述、演化规律难预测问题,提出了时空信息融

合与深度强化学习的能源环境大数据高效预测方法。通过建立基于能源环境时空大数据的多尺度表达与分析模型,研发区域电能智能调度、能耗与绿色通信综合优化、电能生产大群体应急管理高效预测算法,以实现对能源与环境相互影响规律的智能分析与预测。

(2)针对传统大数据平台技术与方法在能源环境应用构建中的不足,构建了能源环境数智管理大数据存储与分析基座。以云计算资源管理、混合储存体系、区块链服务网络为平台支撑,融合能源环境协同数智管控的算法与模型资源,形成多运行时微服务构架,开展能源与环境大数据存储与分析。

(3)针对电能供应过程的智能调度难题和低碳环保效能弱的问题,构建了电力生产、传输、存储、使用全过程与低碳减排多方联动的协同数智机制。利用系统运行、环境监测、污染排放和经济技术等相关数据,运用多元动态估计、图神经网络、深度强化学习等人工智能方法,实现机组、电网、排污等环节的协同调度、评价预警、异常监控及态势预测等。

(4)针对能源环境协同中异构跨域终端通信量大、安全性差的问题,基于数字技术集成,研发应用跨域云-边协同的能源环境一体化数智管理平台,实现了能源环境协同决策和联动预测。该数智管理平台能够对企业的能源和环境大数据进行状态检测、实时分析、趋势预测,并给出能源生产、传输、存储和使用过程中与环境保护协同管控的优化方案^[55]。

企业通过数字技术赋能,大幅提高了各种高耗能设备的节能减排效果,实现了电力能源生产传输使用的全过程环境智能管控、污染物的协同末端治理以及清洁能源的综合利用。例如,2018—2020年中国大唐集团有限公司通过数字技术赋能实现了每年平均煤耗下降0.6 g/kWh。

4 未来研究展望与中国情景下的研究议题

4.1 未来研究展望

4.1.1 资源环境数智协同的驱动因素研究

资源环境数智协同的驱动机制分析是提升资源环境数智治理决策能力的关键。首先,伴随数字技术的飞速发展,新兴技术如何赋能资源环境协同管理及如何推动该领域治理能力的提升值得进一

2024年4月

步探究^[56,57]。其次,生态环境保护并不意味着经济的负增长,社会经济发展如何促进资源开发与环境保护的协同,两者之间存在怎样的耦合关联,均需要进一步梳理^[58]。最后,全球可持续发展目标进程严重受阻,有半数可持续发展具体目标出现中度或严重偏离预期,超过30%的具体目标与2015年相比毫无进展,一些脆弱地区的可持续发展目标甚至出现倒退^[59,60]。因此,面对全球可持续发展的新一轮机遇与挑战,到底哪些因素会影响国家和地区的资源环境数智协同、进而对可持续发展的各领域产生哪些影响是进一步需要研究的重要议题。整体上,从国内外宏观环境变化、资源能源安全态势、制度建设与技术发展等方面全面揭示资源环境协同发展的驱动因素,能够厘清资源环境协同管理的系统发展方式,有助于明晰多种影响因素相互作用下的协同治理路径。

4.1.2 资源环境数智协同的过程机制研究

数字技术赋能资源环境智慧协同管理的发展模式与具体路径需要进一步研究。首先,大数据、人工智能、区块链、物联网、数字孪生等不同类型的数字技术对资源环境协同管理的赋能机制是否存在区别?在不同管理过程和阶段的作用机制是否也存在不同?其次,尽管已有研究指出构建数智化平台是创新资源环境协同管理模式的重要内容^[61],但是除了搭建集成协同管理平台与管控系统外,不同技术与不同协同过程间的逻辑关联依旧不清楚,缺乏从理论和实证全方位剖析资源环境数智协同管理模式体系的研究。最后,有必要从市场和政府的视角,进一步开展关于资源环境数智协同管理模式创新与实现路径的研究,揭示资源环境数智协同的过程演变、智慧协同的动态发展机制等,为资源环境协同管理实践提供科学的决策参考。

4.1.3 资源环境数智协同的结果评估研究

成效评估是检验数字技术赋能资源环境协同管理效果并帮助进一步调整完善政策举措的重要内容。首先,从供给角度,数字技术赋能的资源高效绿色开发与生态环境保护的协同效果需要定量评估,技术作用下的减污降碳效果评价研究需要更加科学的指标和方法^[62]。从需求角度,消费者环保意识变化、生活与消费方式的变革创新、消费者福

利提升等均有待纳入到协同管理的成效评估体系中。特别是,从数字技术发展的角度,需要在传统评价指标体系中融入数智技术,并且重视人工智能等新型技术方法与传统方法(如基于机器学习的因果推断方法)之间的融合^[63]。其次,开展基于环境、社会和治理(ESG)评价体系的资源环境数智协同管理绩效研究,通过宏微观视角与定性定量方法相结合,评估资源环境数智化协同管理对企业ESG表现、区域可持续发展及社会福利的综合影响。最后,就数智化赋能资源环境协同管理的成本与效益开展量化评估。尽管数字技术可能助力提升资源环境协同管理绩效,但是技术本身需要投入大量成本;这一定程度上解释了为何数字技术并未在资源能源行业内全面采用。因此,如何平衡成本与效益之间的关系是政府和企业开展数智化转型政策/战略制定需要考量的关键。

4.2 中国情景下的研究议题

针对中国情境,有必要更进一步探讨如下议题:

(1)中国独特的环境规制如何促进资源环境协同发展,进而促进实现双碳战略目标。比如,环境规制政策推动了哪些行业的数智化转型与绿色技术融合发展,这些转型如何影响污染型企业(比如一些传统资源型企业)的数智化转型路径。特别是,数字技术的创新以及采用均需要较高的成本投入,如何在产生过高成本的前提下促进企业开展数字技术融合创新以及数智化转型,都需要进行更深入探讨^[64]。此外,还需关注制度规制如何通过数字技术赋能实现污染型企业的减污降碳协同发展目标,这对研究中国通过数智化赋能实现绿色高质量发展、加快形成新质生产力(绿色生产力)具有重要理论和实践意义。

(2)中国情境下智慧生态环境治理体系的架构与机制研究。在数智化和绿色化发展背景下,生态环境智慧治理是未来智慧社会建设的必然结果。随着各类数字技术与传统高能耗产业及环境治理手段的不断融合,需要重新构建新的生态环境智慧治理体系理论,探讨新的发展路径与模式,助力提升治理水平和治理能力现代化^[65]。资源开发与生态环境保护涉及政府、企业、公众、社会组织等多个利益主体,数智化发展如何更好地提供连接性以促进

各方利益主体共同商讨资源环境协同发展模式,如何助力构建以政府为主导、企业为主体、公众与社会组织共同参与的资源环境协同治理体系等问题,仍有待在理论和实证层面进一步研究。

(3)中国在数智化赋能中可能产生新一轮的不平等问题。中国地域辽阔、人口众多,自然环境、资源禀赋与经济条件区域之间差异大。随着数字技术及其赋能的差异化发展,是否会加剧区域之间的发展差距,导致数字鸿沟问题?因此,需要依据区域自然资源与经济社会特征,探索公平的数智化赋能机制与智慧协同管理路径^[66]。此外,还需要考虑中国数字技术需求的迅猛增长对电力能源需求及碳排放的潜在影响。有研究指出,人工智能技术具有双重属性,其广泛应用可能导致对能源需求的增加^[67]。目前随着ChatGPT的发展,以大模型为代表的生成式人工智能(AIGC)对算力需求的持续增长可能引致新的环境不公平问题(算力供给与需求存在错位)^[68],二者之间的关系尚需深入探究。

5 结论

在梳理总结已有文献的基础上,本文构建了一个资源环境数智协同管理的整合性研究框架,系统阐述了该框架体系的核心内容及其逻辑内涵与关联关系,展望未来研究方向以及明确中国情景下需要进一步强化研究的议题。主要研究结论包括:

(1)系统归纳总结了资源环境数智协同管理理论的内涵、关键问题、方法体系以及实现路径,构建了基于“基础理论—关键问题—方法体系—实现路径”的整合性研究框架,并给出了一个数智赋能企业资源环境协同管理的实践案例,弥补了对以往文献对资源环境数智化协同的系统性阐释不足的缺憾。

(2)分别从资源环境数智协同管理的驱动因素、过程机制及其效果评估3个维度提出了未来研究建议。在驱动机制维度,应关注国内外宏观环境变化、资源能源安全态势、制度建设与技术发展等因素的影响;在过程机制维度,应重点探究资源环境数智协同的过程演变、智慧协同的动态发展机制等;在协同管理效果评估维度,除了关注数智赋能资源环境管理带来的生态环境效应外,更应该重视其对宏观层面福利均等化、环境区域不平等及整体可持续发展的影响。

(3)中国本土情景下的研究议题主要包括:中国各类环境规制对资源环境协同发展的影响、中国情境下智慧生态环境治理体系的架构与机制、数智化赋能对地区发展差距的影响及环境不公平等问题。突出资源环境数智协同管理在中国情境中的本土特色,可为全球数字技术赋能可持续发展目标实现提供更多中国经验和启示。

参考文献(References):

- [1] 李湖. 促进人与自然和谐共生是中国式现代化的本质要求[J]. 红旗文稿, 2023, (3): 45-48. [Li H. Promoting harmonious coexistence between man and nature is an essential requirement of Chinese modernization[J]. Red Flag Manuscript, 2023, (3): 45-48.]
- [2] 马丽, 田华征, 康蕾. 黄河流域矿产资源开发的生态环境影响与空间管控路径[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 137-149. [Ma L, Tian H Z, Kang L. Eco-environmental impact and spatial control of mineral resources exploitation in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 137-149.]
- [3] Lee C C, Yuan Z H, Wang Q R. How does information and communication technology affect energy security? International evidence [J]. Energy Economics, 2022, DOI: 10.1016/j.eneco.2022.105969.
- [4] 戴翔, 杨双至. 数字赋能、数字投入来源与制造业绿色化转型[J]. 中国工业经济, 2022, (9): 83-101. [Dai X, Yang S Z. Digital empowerment, source of digital input and green manufacturing[J]. China Industrial Economics, 2022, (9): 83-101.]
- [5] 刘国菊. 数字生态文明建设的内在逻辑与实践路径[J]. 人民论坛·学术前沿, 2023, (18): 87-91. [Liu G J. The internal logic and practical path of digital ecological civilization construction[J]. Frontiers, 2023, (18): 87-91.]
- [6] Xu Q, Li X, Guo F. Digital transformation and environmental performance: Evidence from Chinese resource-based enterprises[J]. Corporate Social Responsibility and Environmental Management, 2023, DOI: 10.1002/esr.2457.
- [7] Zuo R G. Machine learning of mineralization-related geochemical anomalies: A review of potential methods[J]. Natural Resources Research, 2017, 26(4): 1-8.
- [8] Jooshaki M, Nad A, Michaux S. A systematic review on the application of machine learning in exploiting mineralogical data in mining and mineral industry[J]. Minerals, 2021, DOI: 10.3390/min11080816.
- [9] Boone S C, Dalton H, Prent A, et al. AusGeochem: An open platform for geochemical data preservation, dissemination and synthesis[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2022, DOI: 10.1111/ggr.12419.
- [10] Dou Y Y, Guo C Q, Kuang W H, et al. The massive expansion and

2024年4月

- spatial transformation of potentially contaminated land across China in 1990–2020 observed from remote sensing and big-data[J]. *Chinese Geographical Science*, 2022, 32(5): 776–791.
- [11] Jiang S, Li J Y, Zhang S, et al. Landslide risk prediction by using GBRT algorithm: Application of artificial intelligence in disaster prevention of energy mining[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 166: 384–392.
- [12] Roslim M H M, Juraimi A S, Che' Ya N N, et al. Using remote sensing and an unmanned aerial system for weed management in agricultural crops: A review[J]. *Agronomy*, 2021, DOI: 10.3390/agronomy11091809.
- [13] Himeur Y, Rimal B, Tiwary A, et al. Using artificial intelligence and data fusion for environmental monitoring: A review and future perspectives[J]. *Information Fusion*, 2022, 86: 44–75.
- [14] Olsen T L, Tomlin B. Industry 4.0: Opportunities and challenges for operations management[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2020, DOI: 10.1287/msom.2019.0796.
- [15] 陈剑, 刘运辉. 数智化使能运营管理变革: 从供应链到供应链生态系统[J]. *管理世界*, 2021, 37(11): 227–240. [Chen J, Liu Y H. Operations management innovation enabled by digitalization and intellectualization: From supply chain to supply chain ecosystem[J]. *Journal of Management World*, 2021, 37(11): 227–240.]
- [16] Chaudhuri A, Subramanian N, Dora M. Circular economy and digital capabilities of SMEs for providing value to customers: Combined resource-based view and ambidexterity perspective[J]. *Journal of Business Research*, 2022, 142: 32–44.
- [17] Xu S, Yang C H, Huang Z H, et al. Interaction between digital economy and environmental pollution: New evidence from a spatial perspective[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, DOI: 10.3390/ijerph19095074.
- [18] Wang L L, Chen L Y, Li Y S. Digital economy and urban low-carbon sustainable development: The role of innovation factor mobility in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, DOI: 10.1007/s11356-022-19182-2.
- [19] Thanh T T, Ha L T, Dung H P, et al. Impacts of digitalization on energy security: Evidence from European countries[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2023, DOI: 10.1007/s10668-022-02545-7.
- [20] 李婉红, 李娜. 绿色创新、数字化转型与高耗能企业碳减排绩效[J]. *管理工程学报*, 2023, 37(6): 66–76. [Li W H, Li N. Green innovation, digital transformation and energy-intensive enterprises carbon emission reduction performance[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2023, 37(6): 66–76.]
- [21] Yang S, Han M Y, Zhang X W. Assessing the impact of digital technologies on energy efficiency: The role of OFDI and virtual agglomeration[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2024, 15(1): 117–129.
- [22] 方冬莉. 数字经济对中国城市能源利用效率的影响: 基于技术赋能和技术外溢视角[J]. *资源科学*, 2023, 45(2): 296–307. [Fang D L. Impact of digital economy on energy utilization efficiency of Chinese cities from the perspective of technology empowerment and spillover[J]. *Resources Science*, 2023, 45(2): 296–307.]
- [23] 杨宇, 郭越, 樊杰, 等. 能源地理研究的发展与展望[J]. *地理学报*, 2024, 79(1): 147–170. [Yang Y, Guo Y, Fan J, et al. The development and prospects of the study of energy geographies[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(1): 147–170.]
- [24] Lyu W J, Liu J. Artificial intelligence and emerging digital technologies in the energy sector[J]. *Applied Energy*, 2021, DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117615.
- [25] Zhou C L, Lin X Q, Wang R H, et al. Real-time carbon emissions monitoring of high-energy-consumption enterprises in Guangxi based on electricity big data[J]. *Energies*, 2023, DOI: 10.3390/en16135124.
- [26] Huang W H, Zhang Y J, Zeng W. Development and application of digital twin technology for integrated regional energy systems in smart cities[J]. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2022, DOI: 10.1016/j.suscom.2022.100781.
- [27] Chen S Q, Zhang S Y F, Zeng Q H, et al. Can artificial intelligence achieve carbon neutrality? Evidence from a quasi-natural experiment[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2023, DOI: 10.3389/fevo.2023.1151017.
- [28] 魏之千, 华昊辰, 王同贺, 等. 新基建下我国“区块链+能源互联网”工程建设现存难点综述及应对措施[J]. *南方电网技术*, 2023, 17(10): 152–169. [Wei Z Q, Hua H C, Wang T H, et al. Review of difficulties in China's "blockchain+energy internet" project construction and corresponding countermeasures under the new infrastructure construction[J]. *Southern Power System Technology*, 2023, 17(10): 152–169.]
- [29] 彭忠益, 孙立明. 大数据驱动下国家矿产资源安全战略管理现代化的研究框架与主要议题[J]. *资源科学*, 2023, 45(2): 322–332. [Peng Z Y, Sun L M. The research framework and main topics of the modernization of national mineral resources security strategic management driven by big data[J]. *Resources Science*, 2023, 45(2): 322–332.]
- [30] Ali S H, Giurco D, Arndt N, et al. Mineral supply for sustainable development requires resource governance[J]. *Nature*, 2017, 543: 367–372.
- [31] Wang J, Yu H Y, Ren D W, et al. Promoting mineral resources consumption efficiency: Evidence from technology of big data[J]. *Resources Policy*, 2023, DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.104210.
- [32] Jiskani I M, Zhou W, Hosseini S, et al. Mining 4.0 and climate neutrality: A unified and reliable decision system for safe, intelli-

- gent, and green & climate-smart mining[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137313.
- [33] Xu Q, Li X, Guo F. Digital transformation and environmental performance: Evidence from Chinese resource-based enterprises[J]. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 2023, 30(4): 1816–1840.
- [34] 谢潇, 伍庭晨, 曹蓓蕾, 等. 虚拟生态技术: 概念、体系与应用展望[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(8): 2297–2304. [Xie X, Wu T C, Cao B L, et al. Virtual ecological technology: Concepts, systems, and application perspectives[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(8): 2297–2304.]
- [35] Tzachor A, Sabri S, Richards C E, et al. Potential and limitations of digital twins to achieve the Sustainable Development Goals[J]. *Nature Sustainability*, 2022, 5: 822–829.
- [36] Mondini A C, Guzzetti F, Melillo M. Deep learning forecast of rainfall-induced shallow landslides[J]. *Nature Communications*, 2023, DOI: 10.1038/s41467-023-38135-y.
- [37] Jay C, Yu Y R, Crawford I, et al. Prioritize environmental sustainability in use of AI and data science methods[J]. *Nature Geoscience*, 2024, DOI: 10.1038/s41561-023-01369-y.
- [38] Li X, Feng M, Ran Y H, et al. Big data in earth system science and progress towards a digital twin[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, DOI: 10.1038/s43017-023-00409-w.
- [39] Tschacher W, Haken H. Intentionality in non-equilibrium systems? The functional aspects of self-organized pattern formation [J]. *New Ideas in Psychology*, 2007, 25(1): 1–15.
- [40] Haken H. *Synergetics: An Introduction*[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1983.
- [41] Bansal S, Singh S, Nangia P. Assessing the role of natural resource utilization in attaining select sustainable development goals in the era of digitalization[J]. *Resources Policy*, 2022, DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.103040.
- [42] Bharadwaj A S, El Sawy O A, Pavlou P, et al. Digital business strategy: Toward a next generation of insights[J]. *MIS Quarterly*, 2013, 37(2): 471–482.
- [43] Luo X W, Yu S C. Relationship between external environment, internal conditions, and digital transformation from the perspective of synergetics[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2022, DOI: 10.1155/2022/6756548.
- [44] 黄璜, 谢思娟, 姚清晨, 等. 数字化赋能治理协同: 数字政府建设的“下一步行动”[J]. *电子政务*, 2022, (4): 2–27. [Huang H, Xie S X, Yao Q C, et al. Digital enabling governance collaboration: The “next step” in the construction of digital government[J]. *E-Government*, 2022, (4): 2–27.]
- [45] Chen K, Chen Y L. Coordinated development of population, resources, environment, economy, and society under engineering management combined with bilevel optimization model[J]. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, DOI: 10.1155/2022/8589396.
- [46] 陈晓红, 张威威, 易国栋, 等. 新一代信息技术驱动下资源环境协同管理的理论逻辑及实现路径[J]. *中南大学学报(社会科学版)*, 2021, 27(5): 1–10. [Chen X H, Zhang W W, Yi G D, et al. The theory logic and realization path of resource and environment coordinated management driven by new generation information technology[J]. *Journal of Central South University(Social Sciences)*, 2021, 27(5): 1–10.]
- [47] Yi P, Dong Q, Li W, et al. Assessment of city sustainability with the consideration of synergy among economy-society-environment criteria[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2023, DOI: 10.1007/s10668-022-02364-w.
- [48] Ha L T, Huong T T L, Thanh T T. Is digitalization a driver to enhance environmental performance? An empirical investigation of European countries[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2022, DOI: 10.1016/j.spc.2022.04.002.
- [49] 洪永森, 汪寿阳. 大数据如何改变经济学研究范式? [J]. *管理世界*, 2021, 37(10): 40–55. [Hong Y M, Wang S Y. How is big data changing economic research paradigms? [J]. *Journal of Management World*, 2021, 37(10): 40–55.]
- [50] 洪永森, 汪寿阳. 人工智能新近发展及其对经济学研究范式的影响[J]. *中国科学院院刊*, 2023, 38(3): 353–357. [Hong Y M, Wang S Y. Impacts of cutting-edge artificial intelligence on economic research paradigm[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, 38(3): 353–357.]
- [51] Guo H D, Liang D, Sun Z C, et al. Measuring and evaluating SDG indicators with big earth data[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(17): 1792–1801.
- [52] Fu G T, Jin Y W, Sun S A, et al. The role of deep learning in urban water management: A critical review[J]. *Water Research*, 2022, DOI: 10.1016/j.watres.2022.118973.
- [53] Galaz V, Centeno M A, Callahan P W, et al. Artificial intelligence, systemic risks, and sustainability[J]. *Technology in Society*, 2021, DOI: 10.1016/j.techsoc.2021.101741.
- [54] 姜德义, 魏立科, 王翀, 等. 智慧矿山边缘云协同计算技术架构与基础保障关键技术探讨[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 484–492. [Jiang D Y, Wei L K, Wang C, et al. Discussion on the technology architecture and key basic support technology for intelligent mine edge-cloud collaborative computing[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 484–492.]
- [55] Chen X H, Wu M J, Tan C Q, et al. A random intuitionistic fuzzy factor analysis model for complex multi-attribute large group decision-making in dynamic environments[J]. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 2021, DOI: 10.1007/s10700-020-09334-9.

2024年4月

- [56] Lin B Q, Zhang Q X. Corporate environmental responsibility in polluting firms: Does digital transformation matter?[J]. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 2023, DOI: 10.1002/csr.2480.
- [57] 陈晓红, 李杨扬, 宋丽洁, 等. 数字经济理论体系与研究展望[J]. *管理世界*, 2022, 38(2): 208–224. [Chen X H, Li Y Y, Song L J, et al. Theoretical framework and research prospect of digital economy[J]. *Journal of Management World*, 2022, 38(2): 208–224.]
- [58] Lee C C, Wang C S. Financial development, technological innovation and energy security: Evidence from Chinese provincial experience [J]. *Energy Economics*, 2022, DOI: 10.1016/j.eneco.2022.106161.
- [59] Mondejar M E, Avtar R, Diaz H L B, et al. Digitalization to achieve sustainable development goals: Steps towards a Smart Green Planet [J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148539.
- [60] Del R C G, Gonzalez Fernandez M C, Uruburu C A. Unleashing the convergence amid digitalization and sustainability towards pursuing the Sustainable Development Goals (SDGs): A holistic review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122204.
- [61] 肖振红, 李炎. 绿色技术创新模式、环境规制与产学研协同绿色创新[J]. *管理工程学报*, 2023, 37(4): 16–29. [Xiao Z H, Li Y. Green technology innovation model, environmental regulation and industry–university–research collaboration green innovation[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2023, 37(4): 16–29.]
- [62] 陈晓红, 张嘉敏, 唐湘博. 中国工业减污降碳协同效应及其影响机制[J]. *资源科学*, 2022, 44(12): 2387–2398. [Chen X H, Zhang J M, Tang X B. Synergistic effect of industrial air pollution and carbon emission reduction in China and influencing mechanism[J]. *Resources Science*, 2022, 44(12): 2387–2398.]
- [63] 李振东, 张冬冬, 朱子钦, 等. 数字化情境下的协同创新: 理论框架与研究展望[J]. *科学学与科学技术管理*, 2022, 43(8): 47–65. [Li Z D, Zhang D D, Zhu Z Q, et al. Collaborative innovation in the digital context: Theoretical framework and research prospects [J]. *Science of Science and Management of S.&T.*, 2022, 43(8): 47–65.]
- [64] Borowski P. Digitization, digital twins, blockchain, and Industry 4.0 as elements of management process in enterprises in the energy sector[J]. *Energies*, 2021, DOI: 10.3390/en14071885.
- [65] 罗丽, 赵新. 论制度协同框架下生态环境治理现代化之创新[J]. *环境保护*, 2023, 51(8): 42–45. [Luo L, Zhao X. Innovation in modernization of ecological environment governance under the framework of institutional coordination[J]. *Environmental Protection*, 2023, 51(8): 42–45.]
- [66] 江永红, 刘梦媛, 杨春. 数字化对经济增长与生态环境协调发展的驱动机制[J]. *中国人口·资源与环境*, 2023, 33(9): 171–181. [Jiang Y H, Liu M Y, Yang C. Driving mechanisms of digitalization on the coordinated development of economic growth and the ecological environment[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2023, 33(9): 171–181.]
- [67] Wang H C, Fu T F, Du Y Q, et al. Scientific discovery in the age of artificial intelligence[J]. *Nature*, 2023, 620: 47–60.
- [68] Zhu J J, Jiang J Y, Yang M Q, et al. ChatGPT and environmental research[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57: 17667–17670.

Collaborative management of resources and environment enabled by digitalization and intellectualization: Research framework and prospects

CHEN Xiaohong^{1,2,3}, OUYANG Changfeng^{1,2}, ZHANG Cheng^{1,2}, WANG Yangjie¹

(1. School of Business, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Xiangjiang Laboratory, Changsha 410205, China;

3. School of Frontier Crossover Studies, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to explore the intrinsic mechanisms of intelligent collaborative management of resources and the environment, providing valuable insights to advance the integration of collaborative management theory and smart technologies in the field of resource and environmental management. The objective was to facilitate research in the Chinese context and promote green sustainable development. [Methods] Starting with a review of relevant literature in collaborative resource and environmental management, we synthesized an integrated research framework for intelligent collaborative management of resources and the environment. The framework elucidates the conceptual content, key issues, methodological systems, and implementation pathways of intelligent collaborative management, offering a forward-looking perspective on future research directions and emphasizing topics that need further exploration in the Chinese context. [Results] The proposed integrated research framework encompasses the core content of intelligent collaborative management of resources and the environment, addressing three key issues related to mechanism and standards, theories and methods, and industrial models. Three intersecting research methods are delineated, along with three pathways for achieving collaborative development through the innovation of intelligent technologies, platforms, and models. [Conclusion] There is a need to emphasize the indigenous characteristics of intelligent collaborative management of resources and the environment in the Chinese context. The study underscored the importance of exploring how environmental regulations can promote collaborative development of resources and the environment, researching the architecture and mechanisms of intelligent ecological governance systems, and addressing potential regional development inequalities resulting from digitalization and intellectualization. This research provides valuable Chinese experiences and insights to empower global sustainable development goals through intelligent technologies.

Key words: digitalization and intellectualization; resources and environment; collaborative management; research framework; research prospects