

人工智能驱动科学研究范式下的国家创新体系变革： 机理、挑战与应对

赵彬彬^{1,2}, 陈凯华^{2,3}

- (1. 北京交通大学经济管理学院, 北京 100044;
2. 中国科学院大学国家前沿科技融合创新研究中心, 北京 100049;
3. 中国科学院大学公共政策与管理学院, 北京 100049)

摘要:人工智能驱动科学研究(AI4S)正加速渗透创新链各环节,推动国家创新体系向智能化转型的新阶段迈进。本文基于“活动与功能—主体与组织—条件与环境”三维分析框架,解析 AI4S 驱动国家创新体系结构性变革的作用机理,并结合中国情境识别转型过程中的主要挑战,提出相应对策建议。研究表明, AI4S 通过重构知识生产、扩散与应用机制,推动创新活动由线性推进转向循环迭代,创新主体由人力主导转向人机协同,并促进平台化、生态化枢纽主体的形成,同时对要素配置方式与制度运行机制提出了新的适配要求。然而,我国国家创新体系在转型过程中仍面临创新链各环节智能化推进不均衡、主体能力转型滞后、关键要素供给不足以及制度适配性不够等问题。针对上述挑战,提出从知识运行机制重构、主体协同模式优化及制度体系完善等方面协同推进国家创新体系转型。

关键词:人工智能;科研范式;国家创新体系;结构性变革

中图分类号:F204 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0566(2026)05-0212-13

Transformation of the national innovation system under the artificial intelligence for science paradigm: Mechanisms, challenges, and responses

ZHAO Binbin^{1,2}, CHEN Kaihua^{2,3}

- (1. School of Economics and Management, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. Research Center for National Frontier S&T, Integration and Innovation, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. School of Public Policy and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Artificial Intelligence for Science (AI4S) is rapidly permeating all stages of the innovation chain, driving national innovation systems (NIS) toward a new stage of intelligent transformation. Based on a three-dimensional analytical framework—activities and functions, actors and organizations, and conditions and environment—this study systematically analyzes the mechanisms through which AI4S induces structural transformation in NIS, and identifies key challenges and corresponding policy responses in the Chinese context. The findings show that AI4S restructures the core mechanisms of knowledge production, diffusion, and application, shifting innovation activities from linear processes to iterative cycles. It also transforms innovation actors from labor-dominated modes to human-machine collaboration, while

基金项目:国家杰出青年科学基金项目(72025403)。

作者简介:赵彬彬(1995—),男,河南济源人,北京交通大学助理教授,博士,研究方向为国家创新体系、创新政策与创新管理。通信作者:陈凯华。

fostering the emergence of platform-based and ecosystem-oriented hub actors. At the same time, it places new demands on factor allocation and institutional operating arrangements. However, China's NIS still faces several constraints in this transition, including uneven intelligentization across different stages of the innovation chain, lagging capability transformation of innovation actors, insufficient supply of key intelligent factors, and limited institutional adaptability. To address these challenges, this study proposes coordinated efforts to restructure knowledge operation mechanisms, optimize collaborative patterns among innovation actors, and improve institutional design.

Key words: artificial intelligence; scientific research paradigm; national innovation system; structural transformation

当前,人工智能正以前所未有的深度与广度引领新一轮科技革命与产业变革,推动全球创新格局加速演变。在此进程中,人工智能驱动科学研究(AI for Science, AI4S)迅速兴起,被视为推动国家创新体系智能化转型的重要力量^[1]。为把握这一范式变迁机遇,美国、欧盟、英国等主要创新型国家已从战略高度推进 AI4S 布局,我国也通过构建智能算力网络、推动科研数据开放共享等举措加快 AI4S 体系建设。为充分发挥 AI4S 对国家创新体系的赋能作用,亟须从理论层面厘清其作用机理,探索我国创新体系智能化转型的现实路径。

传统国家创新体系理论建立在人类认知主导的知识生产模式之上,创新活动主要嵌入边界相对清晰的组织体系中,并由以人际与组织互动为核心的制度结构提供支撑。然而, AI4S 的兴起正在推动知识生产、扩散与应用方式发生结构性变化,并驱动科研活动向智能体深度参与、平台化协同与算力驱动等新型运行模式演进^[2-3]。AI4S 通过变革科研范式与知识生产方式,不仅深刻影响科学研究系统本身,其影响还沿创新链条向技术开发、产业创新等环节持续传导,进而推动创新活动组织方式、主体协同关系以及制度运行机制逐步适应新的知识生产方式。这意味着,建立在人类认知主导知识生产基础上的经典国家创新体系理论,其既有分析维度与解释框架在 AI4S 范式下面临进一步拓展与深化的需求。

围绕 AI4S 如何影响国家创新体系转型,现有研究仍缺乏系统性的理论阐释。AI4S 并非仅作为外生技术工具发挥作用,而是通过智能体深度参与科研活动、科研基础设施的平台化演进,以及数据、模型与算力等关键创新资源重要性的提升,持续影响创新体系的运行条件与知识生产环境,并进一步推动创新活动组织方式、主体协同关系与

制度运行机制发生相应调整^[1]。然而,既有研究在解释这一变化过程时仍存在明显局限。一方面,数字创新与平台生态理论虽关注数字技术对创新过程效率、协同机制与价值创造模式的影响^[4-6],但其分析仍主要停留于技术的工具性角色,尚未充分揭示 AI4S 作为新型科研基础设施与关键创新资源,对国家创新体系运行方式与组织结构调整所产生的影响。另一方面,现有 AI4S 研究多聚焦于其在生物、材料等具体领域的应用突破,或局限于算法伦理、可解释性等微观治理议题^[7],尚未从国家创新体系视角出发,系统分析其对创新活动、创新主体以及制度环境等方面的影响机制。为此,本文旨在构建一个分析框架,以系统分析 AI4S 影响国家创新体系的作用机制,为我国创新体系智能化转型提供理论与实践参考。

本文旨在从知识生产范式变迁的视角,理论分析 AI4S 嵌入国家创新体系并推动其智能化转型的作用机制与演进方向,同时在实践层面识别我国国家创新体系在 AI4S 范式下的关键挑战与应对策略。首先,构建“活动与功能—主体与组织—条件与环境”三维分析框架,梳理国家创新体系在工业经济、知识与数字经济时代的演进路径及特征,提炼 AI4S 范式下国家创新体系发展的新特征与新要求。其次,在明确 AI4S 概念内涵与体系架构的基础上,依托上述三维分析框架,系统分析其对创新活动与功能、主体与组织以及条件与环境等方面的影响机制。最后,结合中国情境,识别国家创新体系在 AI4S 驱动转型过程中的关键挑战,并提出相应的应对策略。

一、国家创新体系的理论溯源、历史演进与面向 AI4S 范式的转型

(一) 国家创新体系的理论溯源与历史演进

国家创新体系理论兴起于 20 世纪 80 年代末,

旨在从制度与结构视角解释不同国家在技术创新与经济增长方面的差异。Freeman^[8]、Lundvall^[9]与 Nelson^[10]虽分析切入点不同,但均将创新视为嵌入制度环境的系统性过程,强调多元主体围绕知识生产、扩散与应用形成互动网络。这一以知识循环为核心的系统观,构成了国家创新体系理论的基本分析范式^[11-12]。

从历史演进看,国家创新体系并非静态结构,而是随技术经济范式更替持续调整的动态系统。工业经济时期,依托机械化与电气化技术的发展,国家创新体系整体呈现以“研究—开发—生产”为主线的线性推进结构,知识生产主要集中于专业科研机构,创新活动在边界清晰、层级分明的组织体系内展开,并以物质资本与基础设施为核心支撑,制度安排强调集中协调与规模效率^[8,10]。进入知识经济时代,国家创新体系由封闭走向开放,知识生产由单一主体主导转向多主体参与,创新活动更加依赖互动学习与跨组织协同,组织边界趋于开放,人力资本与信息基础设施成为关键支撑,制度安排更加注重知识流动与协同效率^[13-14]。步入数字经济时代,数字技术推动国家创新体系向数据化、平台化与生态化方向演进,知识生产日益依赖数据资源与数字工具,平台型主体在资源整合与创新协同中发挥枢纽作用,数据逐步成为关键生产要素,并与算法和算力共同构成新的基础设施体系,制度环境也相应向数据治理与平台规则转型^[15-17]。总体而言,国家创新体系在不同阶段均围绕技术经济范式变革对知识生产、扩散与应用方式的影响进行适应性调适。

由此可见,国家创新体系的演进,本质上是技术经济范式更替驱动下知识生产方式及其组织实现形式持续调整的过程。不同技术范式通过改变知识生成、扩散与应用的基本机制,重塑创新活动与功能、主体与组织以及条件与环境,推动国家创新体系动态演化。基于这一认识,本文从知识生产、扩散与应用的核心逻辑出发,构建“活动与功能—主体与组织—条件与环境”的三维分析框架,以系统刻画国家创新体系的结构构成与运行机制^[18]。其中,“活动与功能”对应知识生产、扩散

与应用的实现过程,“主体与组织”体现创新活动的参与主体及其互动关系,“条件与环境”则界定创新体系运行所依赖的要素基础与制度边界。

(二) AI4S 范式驱动智能经济时代的国家创新体系加速转型

国家创新体系理论为理解不同技术经济范式下创新活动的形成与演进提供了基础性分析框架。从工业经济时代以线性分工与科层组织为特征的组织模式,到知识经济时代的网络化协同结构,再到数字经济时代的平台生态体系,创新体系在组织形态与协同方式上持续演进,体现了技术变迁对创新活动运行逻辑、主体关系结构及制度条件配置的重要影响。然而,尽管国家创新体系在不同阶段不断吸纳新要素、拓展分析边界,但其基本前提总体保持稳定,即创新活动始终建立在人类认知主导的知识生产模式之上,技术主要发挥能力增强与效率提升的工具性作用。因此,既有范式下国家创新体系的演进,本质上是在“人类主导知识生产”的前提下,对创新活动组织方式与协同机制的持续优化。

AI4S 范式的重要特征,在于以数据、模型与算力为支撑的智能系统,正由辅助性工具逐步转变为深度参与知识生成过程的认知性基础设施,从而推动传统以人类认知为中心的知识生产模式发生变化。它标志着智能体开始以认知代理角色,深度参与假设生成、实验设计与结果推理等知识生产核心环节,推动科研活动由传统“假设驱动”模式逐步向“数据与模型驱动”的协同探索模式演进^[19]。与此同时,知识生产、知识扩散与知识应用过程的运行方式也在发生变化:知识生产过程更加依赖自动化与高通量迭代,知识扩散过程更加依赖模型接口与平台化共享,知识应用过程则更加注重场景嵌入与动态优化^[20]。

由于国家创新体系本质上是围绕知识生产、扩散与应用过程形成的组织与制度安排,知识生产范式的变化意味着创新体系运行所依赖的基础条件与约束结构正在发生调整。既有建立在人类认知主导基础上的活动组织方式、主体分工结构与制度运行机制,需要逐步适应以智能体深度参

与为特征的新型知识生产模式。在此背景下, AI4S 所带来的不仅是既有创新体系的技术优化, 也将推动创新活动组织方式、主体协同关系与制度环境的持续调整。这种影响将沿创新链条逐步传导, 并推动国家创新体系在“活动与功能—主体与组织—条件与环境”等维度发生适应性转型^[1]。

二、人工智能驱动科学研究范式下国家创新体系的结构变革

(一)人工智能驱动科学研究的内涵界定与体系架构

现有研究对人工智能驱动科学研究(AI for Science, AI4S)的理解, 大体可从工具性应用与科研范式演进两个层面加以界定。狭义上, AI4S 是指人工智能技术嵌入科学研究全流程的功能性应用, 覆盖数据处理、知识发现、假设生成、实验设计与优化以及结果分析等关键环节, 其核心在于通过提升信息处理与问题求解能力, 推动科研活动由经验驱动逐步向数据与算法驱动转变。广义上, AI4S 则体现为以数据、模型与算力为核心支撑的新型科研范式, 其影响不仅体现在科研效率与知识发现能力的提升, 更在于推动知识生产方式、科研组织形态与协同机制发生变化, 并对相应的制度安排与治理模式提出新的适应性要求^[21-22]。因此, AI4S 的意义不仅在于科研工具体系的升级, 更体现为知识生产运行方式的智能化演进。

具体而言, AI4S 虽直接应用并嵌入科学研究体系与知识生产过程, 但其影响并不局限于科研系统内部。随着人工智能深度参与知识生成、实验验证、成果扩散与技术应用等环节, AI4S 正在推动知识创新活动运行方式发生变化。这种变化不仅体现为知识生产逻辑、科研组织形态与知识流通机制的调整, 更在于其改变了科学知识进入技术开发与产业应用的方式和路径。随着数据集、算法模型与自动实验流程等逐渐成为知识生产的重要载体, 科学知识不再仅仅以论文和理论成果的形式被动扩散, 而是以可计算、可复用的能力形态嵌入技术研发与产业创新过程。由此, AI4S 通过改变知识形态、缩短科学发现与技术开发之间的转化周期, 并依托平台化工具与基础设施实现

能力扩散, 持续影响创新链中的技术开发、产业创新与组织协同等环节。

从运行结构看, AI4S 本质上是由多要素、多环节与多主体耦合运作的智能科研系统(如图1所示), 其体系架构可概括为资源层、功能层与应用层三个相互贯通的层级。三者通过需求牵引与能力反馈形成动态循环: 应用需求驱动功能演进, 功能升级反向促进资源扩展, 并共同拓展应用边界, 从而构成资源供给、能力生成与场景演化相互耦合的运行机制。

1. 资源层

资源层构成 AI4S 体系运行的基础支撑, 由数据、模型与算力三类核心要素协同构成^[23]。其中, 数据提供规模化知识输入, 模型提供知识发现与推理能力, 算力提供大规模计算支撑。三者之间形成相互约束与相互强化的耦合关系: 数据质量决定模型能力边界, 模型需求牵引算力配置, 而算力供给反过来拓展数据处理与模型迭代能力, 共同构成 AI4S 持续演化的技术基础。

2. 功能层

作为承接资源层与应用层的关键枢纽, 功能层的核心在于将数据、模型与算力等基础要素转化为面向科研流程的系统性能力。从结构上看, 智能系统通常可抽象为“感知—推理—行动”的闭环过程, 而科学研究亦可理解为围绕“假设生成—实验验证—知识迭代”展开的循环机制^[24-25]。二者在过程结构上的对应关系, 使 AI4S 体系的功能层可归纳为覆盖知识生产、扩散与应用全过程的五项核心能力, 即智能感知、智能认知、智能创造、智能验证与智能协作。

具体而言, 智能感知对应科研数据与信息的获取与结构化处理, 为知识生产提供基础输入^[26]; 智能认知侧重于模式识别与关联推理, 支撑对科学问题的理解与解释^[27]; 智能创造则面向新假设、新方案与新路径的生成, 拓展知识探索空间; 智能验证通过模拟与实验反馈对方案进行评估与优化, 推动知识迭代^[28]; 智能协作则通过跨主体的信息共享与任务协同, 促进知识扩散与联合创新。总体来看, 上述能力通过持续反馈构成“感知—认

知—创造—验证—协作”的闭环 workflow,推动科研活动由离散分段走向连续化、智能化与协同化。

3. 应用层

应用层是 AI4S 体系与国家创新体系发生实际耦合的实践界面,其核心在于将资源层与功能层形成的能力嵌入具体科研与创新活动,并转化为创新主体可直接调用的实践能力。这一过程主

要通过场景嵌入与主体赋能两条路径实现:一方面, AI4S 以科研任务为牵引,将数据、模型与算法集成为面向特定领域的问题解决方案,贯穿基础研究、技术开发与产业创新全过程;另一方面,通过平台化与服务化接口,为高校、科研机构与企业等主体提供可复用的能力支持,推动其围绕任务需求整合与重组智能科研能力。

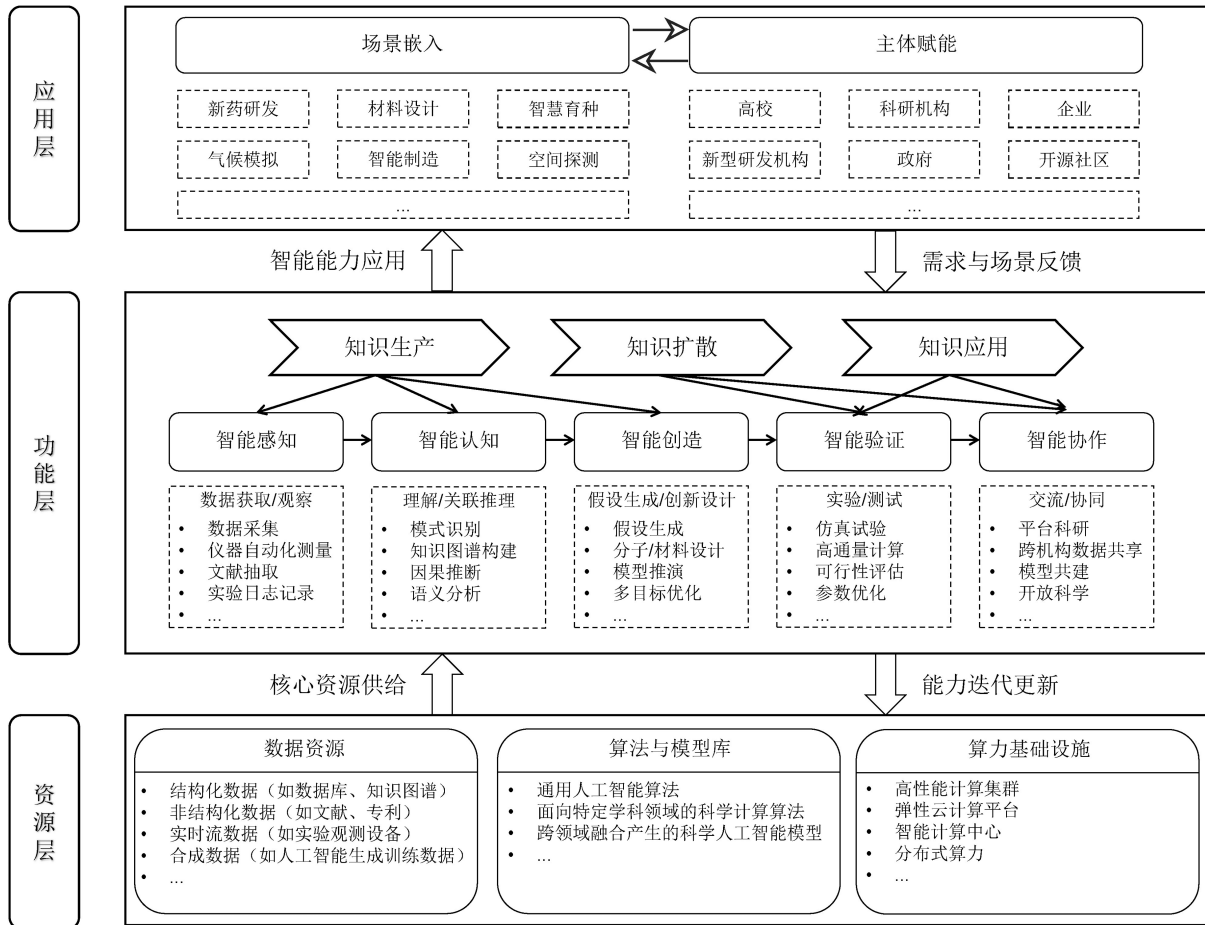


图 1 AI4S 体系架构

(二)人工智能驱动科学研究范式下国家创新体系的结构性变革

与以往信息技术主要作为提升科研流程效率的工具性力量不同, AI4S 通过深度参与知识生产、扩散与应用过程,对国家创新体系运行方式产生了更为内生的影响。传统信息技术主要作用于信息处理与传播环节,其影响更多体现为既有创新模式下的效率提升与规模扩展;而在 AI4S 体系中,数据、模型与算力等要素的重要性不断提升,并逐渐成为支撑科学发现与知识生成的重要科研

基础设施,使技术作用由流程优化进一步延伸至知识生产过程本身,并对创新体系运行方式产生持续影响。此外,相较于人工智能通过广泛嵌入生产制造、商业运行与社会治理等领域,并对创新活动形成普遍赋能与协同优化, AI4S 对国家创新体系的影响更具源头性与传导性特征。 AI4S 的影响并非直接作用于创新链的所有环节,而是以创新链上游的知识生产活动为起点,通过深度融入科学研究过程并推动科研范式与知识生产方式的变革,进一步向技术开发、产业创新与制度运行等

环节传导与扩散。

具体而言, AI4S 推动知识生产由传统以人类认知为主导的模式, 逐步向人机协同的计算生成模式演进。知识生产方式的变化首先影响科研活动的运行结构, 并进一步向创新主体层面传导, 推动主体能力结构、组织分工关系以及协同方式发生调整, 进而对资源配置方式与制度运行机制产生影响。因此, AI4S 所带来的变化, 并不仅限于创新要素的增加或组织形式的局部优化, 而是随着知识生产方式与运行逻辑的调整, 推动国家创新体系在活动与功能、主体与组织以及条件与环境等维度发生适应性转型。基于此, 本文将从上述三个维度系统分析 AI4S 影响国家创新体系转型的作用机制与具体表现(见图 2)。

1. 创新活动与功能变革

AI4S 通过影响知识生产、扩散与应用过程的运行方式, 推动知识生成活动由相对分离逐步走向协同联动, 并由此改变创新活动的组织逻辑。在这一过程中, 国家创新体系在活动与功能层面, 正由依赖阶段划分与顺序衔接的线性运行模式, 逐步向以持续反馈、动态优化和多环节协同为特征的循环式运行结构演进。

具体而言, AI4S 通过引入大规模数据、算力基础设施以及算法模型工具, 推动形成“人—数据—模型—算力”深度协同的知识创新模式。在知识生产环节, 知识生成方式由传统以人类认知与经验判断为主导的模式, 逐步向数据与模型驱动的计算生成模式转变。借助生成式模型与计算实验等手段, 知识探索过程更加依赖模型推演、并行计算与自动化筛选^[29-30], 知识生产活动呈现出更强的自动化与规模化特征。在知识扩散环节, 知识传播方式由相对线性的链式传递, 逐步向网络化协同扩散演进。随着数据平台与模型工具的发展, 知识载体由以论文、专利为代表的静态文本, 逐步扩展至算法模型、数据接口与可执行代码等动态能力形态^[31], 并依托平台化工具实现多主体之间更加频繁的知识互动与协同流动, 从而提升

知识的可获取性与可复用性。在知识应用环节, 知识应用方式则由阶段性成果转化逐步向场景化嵌入演进。依托模型驱动的决策体系与实时反馈机制, 知识不再局限于成果转化阶段的单次应用, 而是持续嵌入产品研发、技术优化与场景测试等具体过程^[32], 呈现出动态响应与持续迭代的运行特征。

在此基础上, AI4S 对知识生产、扩散与应用方式的变革, 将进一步影响创新活动之间的衔接关系与组织方式, 并推动国家创新体系运行结构发生调整。在传统国家创新体系中, 知识生产、技术开发与产业创新等活动通常对应相对独立的运行环节, 其组织方式更多依赖明确的阶段划分与顺序衔接, 科学研究、技术开发与产业应用之间呈现出边界相对清晰的线性推进结构。在 AI4S 驱动下, 随着知识过程日益呈现出可计算、可联通与可反馈等特征, 不同创新活动之间的互动关系不断增强, 原有基于阶段划分与顺序推进的组织模式开始发生变化, 创新活动逐步转向以持续反馈、动态优化与多主体协同为特征的循环式运行结构。

2. 创新主体与组织变革

AI4S 通过影响创新活动的的能力基础、资源依赖与协作方式, 推动创新主体的能力结构、角色分工与组织形态发生变化, 具体体现为既有主体能力体系调整、新型主体发展以及协作模式演进。

首先, AI4S 通过改变创新活动的的能力需求结构, 推动既有创新主体能力体系发生调整。在传统科研范式下, 创新能力主要依赖人力资本、经验积累与物质设施; 而在 AI4S 驱动下, 数据处理能力、模型构建能力与算力获取能力的重要性不断提升, 数据质量、算法性能以及算力可获得性逐渐成为影响主体创新能力的重要因素。相应地, 研究者的核心职能由直接开展分析推理, 逐步扩展至问题界定、模型设计与结果解释等环节^[33]; 科研机构与企业的能力体系, 也由以人员与设备为基础的科层化结构, 逐步向整合数据、模型与算力资源的复合型能力体系演进。

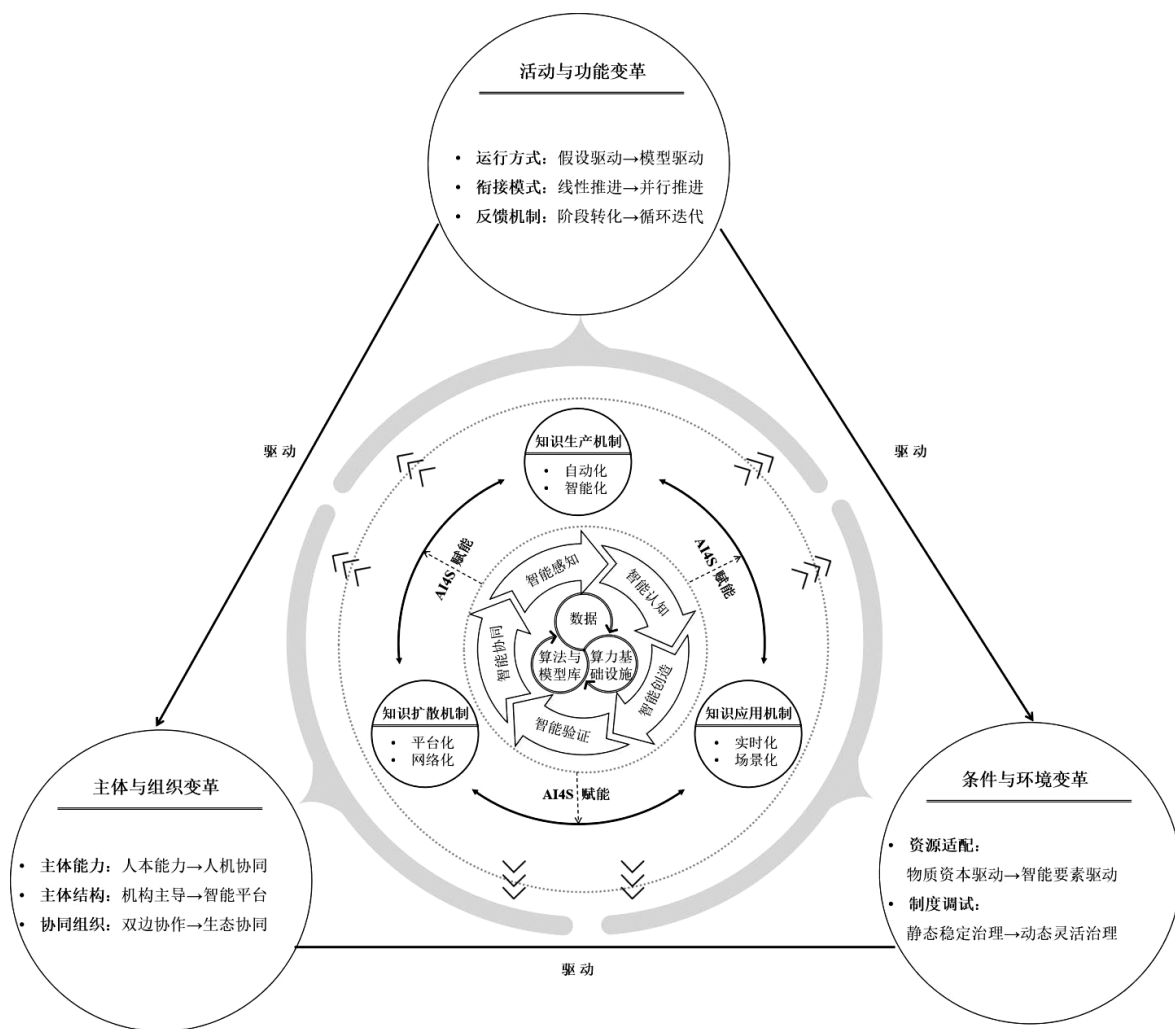


图2 AI4S 范式下国家创新体系的结构变革

其次, AI4S 通过改变创新活动的资源依赖方式, 推动新型创新主体的发展。在传统创新体系中, 科研资源相对分散于不同主体内部, 其影响力主要来源于知识积累与组织能力; 而在 AI4S 情境下, 数据、模型与算力等资源的重要性持续提升, 使得可整合并提供相关资源与服务的主体在创新体系中的作用不断增强。平台型企业、算法研究机构以及新型科研组织由此逐渐成为创新活动的重要支撑者与协同组织者, 通过提供数据服务、模型接口与算力平台等基础能力, 支撑多元主体开展研究与开发活动。例如, 国内以中国科学院 ScienceOne、北京智源人工智能研究院“九鼎智算平台”以及上海人工智能实验室 DeepLink 等为代表的新型科研基础设施平台, 正通过构建开放共

享的“数据—模型—算力”体系, 逐步成为连接多元创新主体的重要协同节点。

最后, AI4S 通过改变创新活动的交互方式与协同需求, 推动创新主体间组织关系发生调整。在传统模式下, 创新协作主要依赖组织内部的分工体系以及跨组织之间相对稳定的合作关系; 而在 AI4S 驱动下, 随着模型接口、数据协议与平台工具的普及, 创新活动逐步转向以持续交互与实时反馈为特征的协同模式。依托开放科研平台与数字基础设施, 多元主体能够通过标准化接口实现动态连接与协同互动, 协作关系也由传统“主体—主体”模式, 逐步向“主体—平台—模型”协同网络演进。在此基础上, 虚拟团队、分布式协作网络以及人机协同组织等新型组织形式不断出现, 推动

国家创新体系由以机构边界划分为基础的组织模式,逐步向以网络连接与生态协同为特征的组织逻辑转型。

3. 创新条件与环境变革

AI4S 不仅影响创新活动的运行方式与主体结构,还通过改变创新资源需求与运行约束条件,对国家创新体系所依赖的资源条件与制度环境产生持续影响。

在创新条件层面, AI4S 通过改变创新活动的资源需求结构,推动创新要素体系发生调整。在传统国家创新体系中,创新活动主要依赖知识、人力资本与物质资源等要素,其配置过程更多基于经验判断与组织边界,呈现相对稳定的运行特征。而在 AI4S 驱动下,随着知识生产逐步由认知驱动向计算驱动演进,数据、算法与算力等资源的重要性不断提升,并逐渐成为支撑知识生产与科研活动的重要基础条件^[34]。相应地,创新要素配置方式也由经验主导的静态匹配,逐步转向依托数据分析与算法优化的动态配置过程。同时,传统创新要素在智能技术赋能下,其功能边界不断拓展,并与数据、模型和算力形成更加紧密的协同关系,推动创新要素体系由相对分散运行逐步向多要素协同演进。

在制度环境层面, AI4S 所带来的创新活动方式、主体结构与资源条件变化,使既有制度安排与创新实践之间的适配压力逐渐显现。传统创新制度体系主要建立在线性推进、边界相对清晰以及低频互动的创新逻辑之上,而 AI4S 驱动下的创新过程则更加体现出高频迭代、跨主体协同与持续反馈等特征,二者在运行方式上存在一定差异。在此背景下,以项目周期、论文产出与阶段流程为基础的制度安排,面临适应开放化、并行化与平台化创新活动的新需求,科研资助、成果评价、数据治理与科研伦理等制度领域均需要进行相应调整。同时,随着平台型主体与数据中介不断嵌入创新过程,传统基于组织边界的治理模式在主体

界定、责任划分与协同机制等方面,也面临新的协调需求。总体而言, AI4S 正在推动制度环境由相对稳定的规则治理,逐步向更加注重灵活适配与动态协同的治理模式演进。

然而, AI4S 在推动国家创新体系转型的同时,也可能带来新的治理挑战。在创新活动与功能层面,随着算法模型深度参与知识生产过程,科研活动对模型输出的依赖程度不断提高,这可能对知识生成的可解释性与可追溯性提出新的要求;在创新主体与组织层面,人机协同关系的深化使责任界定与成果归属问题更加复杂,传统以单一主体为基础的责任认定框架面临新的适配需求;在创新条件与环境层面,数据、算法与算力等关键资源的集中化趋势,可能进一步增强平台型主体的资源优势,并对创新体系的开放性与公平性带来一定影响。总体而言,上述风险表明,在推动 AI4S 赋能国家创新体系变革的过程中,有必要同步关注其可能引发的治理挑战。

三、人工智能驱动科学研究范式下我国国家创新体系的挑战与应对

(一) 关键挑战

1. 创新活动与功能:知识生产、扩散与应用环节的智能化进程失衡

在 AI4S 范式下,知识生产、扩散与应用过程更加依赖数据驱动、高频迭代与跨环节协同。然而,当前我国国家创新体系在上述环节的智能化转型过程中,仍存在一定程度的发展不协调问题,主要表现为知识生产环节的制度安排与 AI4S 运行需求之间尚未完全适配,以及知识扩散与应用环节的数据流通与场景协同仍存在一定障碍。

一方面,知识生产环节面临科研组织模式与 AI4S 运行方式之间的适配压力。传统以固定周期、预设目标和阶段考核为特征的项目制科研管理体系,更适用于相对稳定和线性的科研组织模式,而对于 AI4S 所强调的敏捷探索、动态迭代与快速试错等研究方式,其适配性仍有待提升^[35]。在

此背景下, AI 技术往往仍被嵌入传统“申报—立项—结题”的线性流程, 其在大规模假设生成、动态路径优化以及持续反馈调整等方面的潜力尚未得到充分发挥, 从而在一定程度上影响知识生产活动的灵活性与效率提升。近年来, 我国科研资助体系已开始探索“AI for Science”等专项布局, 但整体上针对高风险、高不确定性探索性研究的支持机制仍有进一步完善空间, 对过程性、迭代性成果的评价与认可相对不足。

另一方面, 知识扩散与应用环节仍面临数据壁垒与场景协同不足等问题, 对“可计算知识”的持续流动与迭代优化形成一定制约。一方面, 科研机构与高校较难持续获取产业场景中的高质量数据, 用于模型训练与算法优化; 另一方面, 产业界的真实需求与应用反馈也尚未有效嵌入前沿算法研发与知识生产过程之中。在缺乏稳定数据流通机制与合理利益共享模式的情况下, 知识扩散仍较多依赖科技成果转让等传统方式, 知识生产与产业场景之间的协同程度仍有待提升, 从而在一定程度上削弱 AI4S 在知识应用环节的效能发挥。

2. 创新主体与组织: 主体转型迟滞、枢纽发育不足与协同机制失配

我国国家创新体系在面向 AI4S 范式转型过程中, 仍面临主体能力结构调整、新型平台功能培育以及跨主体协同机制完善等方面的挑战, 尚未完全形成与智能化科研范式相适应的主体生态体系。

首先, 传统主体的智能化能力转型相对迟滞。高校、科研院所及企业等核心主体的组织模式与能力体系仍深度嵌入传统科研范式, 其人工智能技术应用多停留于文献分析、数据处理等辅助环节, 在研究问题形成、实验路径设计与科学理论构建等核心科研活动中的介入深度有限。这导致主体的技术吸收与能力再造进程缓慢, 难以支撑研发流程与组织模式的系统性重构。

其次, 新型平台主体的枢纽功能与支撑机制有待完善。掌握数据、模型与算力等关键资源的智能科研平台与算法机构, 本应承担资源汇聚、服务供给与协同调度的枢纽功能, 然而其发展面临服务接口不一、治理规则模糊、与既有科研机构协作关系松散等制度性约束, 导致资源开放共享不足、服务稳定性欠缺, 难以形成规模化、可复用的体系化支撑能力。

最后, 跨主体协同机制与智能科研范式存在结构失配。AI4S 内在要求构建开放、高频、动态的跨组织协同网络, 而我国现有科研协作实践仍主要依托行政隶属、项目契约等传统纽带, 呈现出组织边界刚性、流程固化、响应迟缓等特点。在数据共享、模型互操作、成果权益分配等方面缺乏统一规则与可信执行机制, 进一步推高了协同成本与交易风险, 制约了跨学科、跨机构敏捷创新共同体的形成。

3. 创新条件与环境: 智能要素体系化支撑薄弱, 制度生态结构性适配滞后

在 AI4S 范式下, 国家创新体系既要具备对数据、算力与模型等关键智能要素的体系化供给能力, 也需要相应的制度环境提供稳定且可预期的治理与激励支撑。然而, 从我国现实情况来看, 现有体系仍以传统科技范式为主导, 在要素供给与制度适配层面均难以有效回应 AI4S 所要求的数据驱动与平台协同逻辑, 呈现出要素支撑不足与制度滞后并存的结构约束。

在创新条件层面, 关键智能要素的体系化供给能力仍显不足。总体来看, 数据、算力与模型等核心要素在资源整合、结构配置与协同供给方面均存在明显短板: 高质量科研数据仍呈分散与封闭特征, 跨机构共享在标准规范与治理机制上支撑不足, 难以满足大模型训练与跨学科研究需求^[36-37]; 算力资源在区域布局与调度机制上存在不均衡与割裂问题, 尚未形成统一高效的算力供给体系; 面向基础科学与重点领域的专用模型及

工具链供给不足,制约了 AI4S 在关键领域的深入应用。同时,具备人工智能方法与领域知识融合能力的复合型人才供给不足,跨学科协同能力有待提升^[38]。总体而言,创新要素体系仍停留在分散供给阶段,尚未形成支撑智能科研的系统化能力结构。

在创新环境层面,面向数据、模型与算力等新型要素的治理体系仍不健全,成为制约国家创新体系有效运行的关键制度约束。当前智能创新要素治理在产权界定、流通规则与责任边界等方面缺乏统一规范,导致数据跨主体共享与流通面临较高制度不确定性,模型应用缺乏稳定的安全与透明性标准,算力资源在开放共享与协同调度方面亦缺乏制度支撑。在此背景下,智能创新要素难以实现高效流动与优化配置,削弱了创新主体之间的资源整合能力与协同效率。同时,跨部门、跨领域的协同治理框架尚未形成,不同要素治理规则之间存在割裂与冲突,进一步推高了制度协调成本。在此约束下,国家创新体系难以形成稳定、可预期的制度环境,从而制约了基于高频交互与持续迭代的创新活动组织方式,这一制度缺位成为 AI4S 赋能国家创新体系发展的重要瓶颈。

(二) 对策建议

1. 重塑知识生产、扩散与应用运行机制,构建 AI4S 赋能的知识创新模式

针对当前知识生产、扩散与应用在运行节奏及环节衔接上存在的匹配性问题,需围绕科研资助与评价机制调整、知识流通机制完善以及应用反馈机制构建三个方向发力,推动知识创新模式从分段推进转向具有持续反馈与动态调整特征的协同运行。

首先,在知识生产环节,为缓解固定项目周期与快速试错需求之间的适配矛盾,应推动科研资助方式从单一周期导向转变为“长期稳定支持与滚动资助相结合”的模式,以增强研究过程的连续性与灵活性。同时,深化评价机制改革,将高质量

数据集、开源模型、可复现代码及具有启发意义的负结果纳入评价体系,强化对过程性与迭代性成果的认可,促进知识生产向可复用、可积累方向发展。

其次,在知识扩散环节,为破解知识在不同主体与应用场景间的流通壁垒,应加快建立分级分类的数据共享制度,明确数据使用权限与流通规则;同时,依托数据托管与隐私计算等可信技术,降低跨主体数据融合成本。在此基础上,推进国家级科研协同平台建设,推动数据、模型与算力资源的标准化接入与开放调用,通过统一接口与服务化供给机制,促进知识从成果传递转向持续流动。

最后,在知识应用环节,为弥补研发过程与应用场景之间的反馈缺口,应在新药研发、材料创制等重点领域推行场景驱动的研究组织模式,促进科研机构与企业形成稳定协同关系。通过构建标准化数据接口与平台化回流机制,实现应用数据向模型优化与算法研发的实时反馈,形成“问题定义—算法研发—场景验证—模型迭代”的快速闭环,进而提升知识生产、扩散与应用之间的协同效率。

2. 赋能传统主体、培育枢纽节点、融通协作网络,构建开放协同的创新主体与组织生态

针对创新主体能力转型迟滞、枢纽型主体支撑不足以及跨主体协同机制不适配等问题,需从主体能力重构、枢纽主体培育与协同机制优化三方面协同推进,推动创新主体体系向平台化、网络化与生态化方向演进。

首先,在传统创新主体转型层面,推动高校、科研院所与企业从以工具性应用为主,转向将人工智能能力嵌入科研全过程,重点强化其在研究问题界定、实验设计与结果验证等关键环节的应用。同时,通过建设智能实验室、数据平台与模型服务体系,完善支撑智能科研运行的基础能力结构,提升传统主体对 AI4S 能力的吸收、整合与扩散

效能。

其次,在枢纽型主体培育层面,明确智能科研平台、大模型研发机构与算法服务组织在国家创新体系中的枢纽功能,推动其从资源占有向能力供给转变。围绕数据、模型与算力等关键资源,建立稳定的服务接口与标准化供给机制,完善接口规范与协作协议,促进其与高校、科研机构及企业形成可持续、可复用的协同关系,进而提升其在资源整合与协同组织中的支撑作用。

最后,在跨主体协同机制层面,推动科研协作从依赖项目周期的阶段性合作,转向以任务为导向的持续性协同,依托国家级科研协同平台或行业创新网络,夯实跨机构、跨学科与跨区域协作的组织基础^[39]。同时,围绕数据共享、模型调用与成果分配等关键环节,逐步建立统一规范与可信执行机制,明确主体权责与利益分配规则,从而降低协同不确定性并增强合作稳定性。

3. 完善要素供给、优化制度安排、营造协同生态,构建适配 AI4S 的基础条件与治理体系

针对智能要素匮乏与制度适配滞后并存的结构制约,需围绕要素供给、制度优化和生态培育三个维度协同推进,构建支撑 AI4S 运行的基础条件与治理体系。

首先,在要素供给维度,提升数据、算力和模型等关键要素的体系化供给能力。具体而言,应推动科研数据由分散封闭状态向标准化、可共享状态转变,完善跨部门、跨领域的数据治理准则;同时,促进科研算力与产业算力的协同调度,构建统一高效的算力供给体系;加强基础模型与领域专用模型的协同研发和开放应用,形成覆盖多学科、多场景的模型资源体系,从而实现要素供给从分散化支撑向体系化支撑的转变^[40-41]。

其次,在制度安排维度,完善面向新型要素的治理体系,以提高要素流动效率并支撑国家创新体系的协同运行。围绕数据、模型和算力等关键要素,需加快明确产权边界和责任划分,完善分类

分级管理和流通规则,构建统一、规范的要素治理框架,降低跨主体要素流通的不确定性。

最后,在协同生态维度,营造支持开放协作和持续创新的制度环境。应围绕数据、模型和代码的共享与复用,推动形成统一的技术标准和协同规则,完善知识产权和利益分配机制,明确人工智能生成成果的权属和价值认定方式;同时,通过构建跨部门协同治理机制和包容审慎的监管框架,在兼顾创新激励和风险控制的基础上,形成稳定、可持续的协同生态。

四、研究总结与未来展望

(一) 研究总结

本文基于“活动与功能—主体与组织—条件与环境”的三维分析框架,从知识生产、扩散与应用方式变化的视角,对人工智能驱动科学研究(AI4S)影响国家创新体系的作用机制展开系统分析。与既有研究更多聚焦于技术应用效率提升或组织形态变化不同,本文将 AI4S 视为推动知识运行方式变化的重要技术范式,重点分析其如何通过影响知识生成、扩散与应用过程,进一步推动国家创新体系运行方式与组织结构发生调整。

研究表明,AI4S 所带来的影响并不仅限于国家创新体系内部单一要素或局部环节的技术优化,而是随着知识生产、扩散与应用方式的变化,逐步推动国家创新体系运行逻辑发生适应性转型。具体而言,AI4S 推动知识生产由传统以人类认知为主导的探索模式,逐步向模型驱动与计算生成相结合的人机协同模式演进;知识扩散由依赖线性传递的成果流通方式,逐步向基于平台与模型接口的网络化共享方式扩展;知识应用则由阶段性成果转化,逐步向面向场景的持续嵌入与动态优化演进。在此基础上,国家创新体系在多个维度呈现出新的发展趋势:创新活动由线性推进逐步向循环迭代演进,创新主体更加体现人机协同特征,组织模式由相对稳定的科层结构逐步向平台化与网络化协同形态拓展,数据、模型与算

力等资源的重要性不断提升,并进一步推动资源配置方式与制度运行机制发生相应调整。

基于中国情境的分析表明,国家创新体系在面向 AI4S 范式转型过程中,仍面临创新活动智能化协同不足、主体能力与组织结构适配性有待提升,以及要素供给与制度环境支撑仍需完善等方面的挑战。针对上述问题,需要围绕知识生产、扩散与应用方式的变化,协同推进创新活动运行模式优化、主体能力与组织形态调整,以及要素配置与制度体系完善,从而推动国家创新体系更好适应 AI4S 范式下的智能化转型需求。

(二) 未来展望

尽管本文初步探讨了 AI4S 对国家创新体系的影响,但围绕智能科研范式下国家创新体系的演进与治理,仍有若干关键议题有待进一步深化。未来研究可从发展机制与治理体系两个方面展开。

一方面,在发展机制层面,需进一步揭示 AI4S 驱动下国家创新体系的演化规律。重点可从三个方向推进:其一,分析人机协同条件下创新主体边界与组织结构的重构机制;其二,探讨创新活动由线性推进向循环迭代转型的运行逻辑及其对创新效率的影响;其三,研究数据、模型与算力等新型要素与传统创新要素的协同配置机制及其对资源配置效率的影响^[42]。在此基础上,还应结合不同区域与产业情境,深入考察上述变化对知识生产质量、知识扩散效率及系统整体绩效的差异化影响,从而深化对智能时代国家创新体系演进规律的系统性认识。

另一方面,在治理体系层面,需进一步关注 AI4S 背景下国家创新体系面临的新型治理问题。未来研究可围绕算法不透明性对科研规范与评价体系的影响、人机协同条件下责任划分与行为规制问题,以及数据与模型资源集中化所引发的公平性与安全性挑战展开。同时,有必要从制度适配角度,系统探讨数据流通规则、模型治理框架、

人机协作责任界定及创新收益分配机制的演进路径,以推动国家创新体系在开放协同与风险可控之间实现动态平衡。

参考文献:

- [1] 中国科学院创新范式研究组. 加快人工智能驱动的知识创新体系建设[J]. 中国科学院院刊, 2025, 40(10): 1709-1719.
- [2] 沈志锋, 李静, 李智慧. 人工智能参与下的创新生态系统构建研究[J]. 科研管理, 2024, 45(10): 12-23.
- [3] 中国人工智能产业发展联盟科学智能工作组. 科研智能(AI4R&D):人工智能驱动的研发新范式[R]. 北京: 中国人工智能产业发展联盟, 2024.
- [4] 陈凯华. 国家创新体系整体效能的理论基础与系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2025.
- [5] 唐任伍, 温馨, 武天鑫. 国家创新体系的数字化重构: 新型举国体制驱动的机理与路径[J]. 经济与管理研究, 2024, 45(1): 3-15.
- [6] 张超, 陈凯华, 穆荣平. 数字创新生态系统: 理论构建与未来研究[J]. 科研管理, 2021, 42(3): 1-11.
- [7] JUMPER J, EVANS R, PRITZEL A, et al. Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold [J]. Nature, 2021, 596(7873): 583-589.
- [8] FREEMAN C. Technology policy and economic performance: lessons from Japan[M]. London: Pinter Publishers, 1987.
- [9] LUNDEVALL B Å. National systems of innovation: towards a theory of innovation and interactive learning[M]. London: Pinter Publishers, 1992.
- [10] NELSON R R. National innovation systems: a comparative analysis[M]. New York: Oxford University Press, 1993.
- [11] OECD. National innovation systems[R]. Paris: OECD Publishing, 1997.
- [12] OECD. Managing national innovation systems[R]. Paris: OECD Publishing, 1999.
- [13] CHESBROUGH H W. Open innovation: the new imperative for creating and profiting from technology[M]. Boston: Harvard Business Press, 2003.
- [14] ETZKOWITZ H, LEYDESDORFF L. The dynamics of innovation: from national systems and "Mode 2" to a triple helix of university-industry-government relations[J]. Research policy, 2000, 29(2): 109-123.

- [15] GAWER A, CUSUMANO M A. Industry platforms and ecosystem innovation [J]. *Journal of product innovation management*, 2014, 31(3): 417-433.
- [16] NAMBISAN S, WRIGHT M, FELDMAN M. The digital transition of innovation and entrepreneurship [J]. *Research policy*, 2019, 48(8): 103773.
- [17] TEECE D J. Profiting from innovation in the digital economy [J]. *Research policy*, 2018, 47(8): 1367-1387.
- [18] 陈凯华. 创新计量学:理论、方法与实践 [R]. 2012.
- [19] 张越, 郭玥, 余江. 通用人工智能驱动的科研新范式:理论与实践 [J]. *科学学研究*, 2025, 43(4): 673-682.
- [20] 米加宁, 李大宇, 董昌其. 大语言模型引致知识生产方式变革与决策范式的重构 [J]. *管理世界*, 2025, 41(7): 40-59.
- [21] 鄂维南. AI 助力打造科学研究新范式 [J]. *中国科学院院刊*, 2024, 39(1): 10-16.
- [22] 胡志坚. AI4S: 重塑科学发现的新范式 [J]. *科学学研究*, 2026, 44(1): 1-2.
- [23] STEVENS R, TAYLOR V, NICHOLS J, et al. AI for science: DOE town halls report [R]. Washington, D. C. : U. S. Department of Energy, 2020.
- [24] OECD. Artificial intelligence in science: challenges, opportunities and the future of research [R]. Paris: OECD Publishing, 2023.
- [25] RUSSELL S, NORVIG P. Artificial intelligence: a modern approach [M]. 4th ed. Hoboken: Pearson, 2020.
- [26] BUEHLER M J. Accelerating scientific discovery with generative knowledge extraction, graph-based representation, and multimodal intelligent graph reasoning [J]. *Machine learning: science and technology*, 2024, 5(3): 035083.
- [27] LAVIN A, KRAKAUER D, ZENIL H, et al. Simulation intelligence: towards a new generation of scientific methods [EB/OL]. (2021-12-06) [2025-09-15]. <https://arxiv.org/abs/2112.03235>
- [28] SZYMANSKI N J, RENDY B, FEI Y, et al. An autonomous laboratory for the accelerated synthesis of novel materials [J]. *Nature*, 2023, 624(7990): 86-91.
- [29] BÜTTNER B, FIRAT M, RAITERI E. Patents and knowledge diffusion: the impact of machine translation [J]. *Research policy*, 2022, 51(10): 104584.
- [30] 李拓宇, 吴佳一. 人工智能赋能科学研究的机制与模式分析:基于知识生产模式视角 [J]. *科学学研究*, 2026, 44(2): 235-244.
- [31] LAWRENCE N D, MONTGOMERY J. Accelerating AI for science: open data science for science [J]. *Royal society open science*, 2024, 11(8): 231130.
- [32] PRADEEP A K, APPEL A, STHANUNATHAN S. AI for marketing and product innovation [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2018.
- [33] Lawrence Berkeley National Laboratory. Harnessing artificial intelligence for high-impact science [EB/OL]. (2025-04-29) [2025-09-15]. <https://newscenter.lbl.gov/2025/04/29/harnessing-artificial-intelligence-for-high-impact-science/>
- [34] HAUSCHKE C, NAZAROVETS S, ALTEMEIER F, et al. Roadmap to FAIR research information in open infrastructures [J]. *Journal of library metadata*, 2021, 21(1/2): 45-61.
- [35] 杜鹏, 赵秉钰, 孙粒, 等. 新时代科研范式变革的内涵及应对 [J]. *中国科学院院刊*, 2023, 38(7): 991-1000.
- [36] 林韬. 我国 AI 训练数据生产流通的制约因素与应对策略研究 [J]. *中国科学院院刊*, 2025, 40(4): 672-680.
- [37] 汪洋, 周园春, 王彦桐, 等. 适度超前推动科研基础平台建设支撑我国高水平科技自立自强 [J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(5): 652-660.
- [38] 人力资源和社会保障部. 新职业人工智能工程技术人员就业景气现状分析报告 [R]. 北京: 人力资源和社会保障部, 2020.
- [39] 毛进, 周凡倩, 王卓昊. AI for Science 推动科研范式革新:创新知识服务视角下的“平台科研”范式 [J]. *情报学报*, 2025, 44(2): 132-142.
- [40] 杨小康, 许岩岩, 陈露, 等. AI for Science:智能化科学设施变革基础研究 [J]. *中国科学院院刊*, 2024, 39(1): 59-69.
- [41] 周代数, 魏杉汀. 人工智能驱动的科学研究的第五范式:演进、机制与影响 [J]. *中国科技论坛*, 2024(12): 97-107.
- [42] 经济合作与发展组织. 科学中的人工智能:挑战、机遇和未来展望 [M]. 陈凯华, 等译. 北京: 科学出版社, 2024.