

基于BGE文本嵌入模型识别的数智赋能 绿色技术创新体系研究

谢家平¹, 叶逸晨¹, 谢吉青², 周昱希¹

(1. 上海财经大学 商学院, 上海 200433; 2. 上海对外经贸大学 工商管理学院, 上海 201620)

摘 要: 政府政策文件作为国家治理经验、制度认知、专家决策共识与实践反馈经验的制度化沉淀,是观察我国绿色技术创新体系政策设计逻辑和治理机制安排的重要文本入口,也是从中国实践中提炼绿色技术创新自主知识体系的重要素材。为了突破现有研究对绿色技术创新体系影响因素静态识别的局限,本文创新性地融合BGE文本嵌入模型和“输入—过程—输出”系统要素逻辑,构建“主题识别、语义向量化、方向性机制关系抽取、专家座谈校验与案例回访、政策语义有向网络生成”的分析框架。研究发现,当前政策设计呈现“重执行、轻反馈”的结构特征,目标导向、动力驱动、组织协同与过程运行之间已形成较为清晰的前向主干链条,而实践评估向目标优化、制度调整和过程改进的反馈连接相对薄弱。进一步看,数智赋能绿色技术创新超越了数智技术应用与政策工具供给的简单叠加,体现为多系统耦合形成的复杂治理体系。本文的贡献在于,从政策语义网络视角刻画数智赋能绿色技术创新体系的结构特征,提出识别复杂政策体系主干链条与反馈缺口的可操作方法,并通过人工智能语义识别与专家智慧校验的双源互动,结合案例实践回访的交叉印证,从中国政策实践中提炼具有本土解释力的绿色技术创新治理机制框架。

关键词: 数智技术;绿色技术创新体系;中国自主知识体系

中图分类号: F270 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4950(2026)09-0025-26

一、引 言

当前,全球产业体系正经历一场以数字化、智能化、绿色化为核心动力的深刻变革,生产力形态正加速向以高科技含量、高效能产出和高质量供给为本质特征的新质生产力跃迁。我国经

收稿日期: 2026-01-29

基金项目: 国家社科基金重大项目(20&ZD060); 国家社科基金后期资助项目(24FGLB052); 国家自然科学基金项目(72402126); 上海财经大学研究生创新基金项目(CXJJ-2025-442, CXJJ-2026-448)

作者简介: 谢家平(1963—),男,上海财经大学商学院/上海财经大学中国式现代化研究院教授,博士生导师;
叶逸晨(2002—),女,上海财经大学商学院博士研究生(通信作者, yycsavannah@163.com);
谢吉青(1992—),女,上海对外经贸大学工商管理学院讲师;
周昱希(1999—),女,上海财经大学商学院博士研究生。

济正处于由高速增长转向高质量发展的关键阶段,绿色发展已超越传统的环保范畴,成为破解资源环境约束、重塑产业竞争优势和培育新发展动能的重要路径。党的二十大报告明确提出“推动绿色发展,促进人与自然和谐共生”,并将科技自立自强置于现代化建设全局的核心位置。在此背景下,如何通过政策体系引导数智技术、绿色技术创新与产业转型深度耦合,成为推进生态文明建设、促进产业结构升级和提升国家竞争优势的重要议题。

尽管我国近年来在研发投入、数字基础设施和绿色转型政策供给方面持续加力,但绿色技术创新从研发形成、成果转化、市场应用到收益反哺之间仍存在链条阻滞与效率落差。大量绿色技术成果因缺乏有效的市场转化通道而难以充分释放价值,形成研发投入与市场收益之间的断裂(谢家平等,2019)。这种问题不仅体现为创新成果转化不足,也表现为“研发、成果、中试、投市、收益”链条中的价值传导不畅(谢家平等,2024)。从创新循环看,若绿色创新成果难以转化为实际经济收益,便难以形成由市场收益反哺自主研发的良性循环,进而削弱微观主体持续开展绿色技术创新的内生动力。与此同时,数智技术被广泛视为连接创新资源、提升协同效率和优化治理反馈的重要工具(孟炯等,2024)。但在政策体系中,数智技术究竟如何嵌入绿色技术创新链条,并在资源配置、组织协同、过程推进和反馈调适中发挥作用,仍有待进一步识别。

绿色技术创新并非微观企业孤立开展的技术研发活动,而是由政府政策、市场需求、研发机构、金融资本、产业组织和制度环境共同塑造的复杂系统过程。技术进步与制度环境之间存在协同演化关系,创新体系的动态适应能力是跨越新技术陷阱、推动产业转型升级的重要条件(黄凯南和乔元波,2018;戚聿东和朱正浩,2022)。相较于一般技术创新,绿色技术创新同时具有创新正外部性和环境效益正外部性,叠加其长周期、高风险和收益不确定等特征(余明桂等,2016),使市场机制在资源配置中更容易出现失灵,也使绿色创新体系在演化过程中面临更复杂的系统性约束。主要体现在三个层面:第一,宏观层面存在规制倒逼与动态适应之间的张力。环境规制对技术创新具有非线性影响,传统命令控制型规制虽然能够形成外部压力,但在信息不对称和技术不确定性较高的情境下,容易出现刚性有余而适应性不足的问题(蒋伏心等,2013;张成等,2011)。若缺乏有效的甄别、激励和风险补偿机制,企业可能在资源获取过程中产生策略性响应,进而弱化政策工具对实质性绿色创新的引导效果(董盈厚等,2021)。第二,中观层面存在多主体协同不足与信息孤岛问题。传统绿色创新载体往往依赖地理空间集聚,但若缺乏利益共享、网络信任和持续协作机制,政府、企业、高校院所、金融机构和中介组织之间仍可能处于信息隔离状态(谢家平等,2024),创新资源难以实现跨区域、跨部门和跨组织的高效整合(李响等,2013;程郁和王协昆,2010)。第三,微观层面存在从技术研发到产业化应用的死亡之谷。绿色技术从知识创造、研发中试到规模化量产,需要经历较长的验证周期和复杂的市场匹配过程,若缺乏动态反馈与协同转化通道,技术供给便容易与市场需求、制度安排和产业应用之间发生错位,进而导致创新链条断裂(Markard,2020;胡强等,2026)。

进一步看,绿色技术创新的系统性失效诱因并不只是单个企业创新能力不足或某一政策工具供给不足,而是表现为创新系统内部主体、过程和反馈之间的关系性失灵。在不确定环境中,创新活动已不再是依赖单一主体内部知识积累的过程,而是企业、高校、科研机构、政府、资本市场和中介组织等多元主体通过关系联结实现资源整合与合作的网络化过程(鲁若愚等,2021)。创新组织难以脱离特定创新系统而独立发展,网络成员之间的协同互动、资源共享、知识转移与学习直接影响创新网络的运行效率(全利平和蒋晓阳,2011)。由此,绿色技术创新中的双重外部性、长周期和高不确定性,往往会进一步放大跨主体协作不足、跨环节衔接不畅和反馈调适滞后等问题,使其失效形态呈现出明显的网络性和系统性。同样,治理手段也不能停留于单点资源补贴或单向环境规制,而需要通过网络化治理重构主体关系和协同机制。网络惯

例和合作规范有助于维系技术创新网络的稳定运行,并降低合作过程中的交易成本、投机风险和分歧冲突(徐可等,2014)。在此基础上,数智技术进一步为网络化治理提供了新的实现条件。一方面,企业数智化能够通过提升信息共享水平和知识整合能力促进绿色技术创新(宋德勇等,2022);另一方面,数智技术能够通过平台联结、数据贯通和全链协同提升产业链业务贯通能力与协同效率(江小涓和靳景,2022)。因此,系统性失效揭示了绿色技术创新治理中的主体、过程和反馈问题,数智化网络治理则为解决这些问题提供了组织基础与技术条件。

由此,绿色技术创新治理需要转向更加注重多主体协同、网络化组织和动态反馈的政策体系安排(洪银兴和任保平,2023)。网络治理理论强调,在高度不确定的创新环境中,契约关系、社会资本和长期互动所形成的网络惯例,有助于降低协同成本并促进知识共享(鲁若愚等,2021;徐可等,2014)。在此基础上,数智赋能为绿色技术创新体系的网络化协同提供了新的支撑条件。一方面,数据要素的高流动性、可复用性和算法匹配能力,有助于降低研发、转化和应用环节中的信息壁垒,推动创新方式由线性时序推进转向高频交互的并行协同(宋德勇等,2022)。另一方面,依托科创平台、产业互联网平台和专业化服务供应商等新型载体,创新主体能够在数字连接中突破物理空间限制,提升资源配置效率和价值共创能力(全利平和蒋晓阳,2011)。更为重要的是,数智技术还能够通过过程监测、数据追踪和效果评估,为政策体系提供动态调适和反馈纠偏的基础条件(丁志帆,2020)。因此,数智赋能绿色技术创新不仅是技术工具的叠加,更涉及政策体系如何组织资源、连接主体、重构过程并形成反馈闭环。

基于绿色技术创新的系统属性和数字化网络共治逻辑,本文将绿色创新政策体系理解为一个由多类政策要素连接构成的复杂系统结构。在中国政策牵引型创新体系中,政府政策文件既来源于长期治理实践、专家共识和地方试点反馈,也通过目标设定、资源配置、组织动员、制度供给和评价反馈持续塑造现实创新活动。因此,政策文本并不是外在于绿色技术创新体系的静态材料,而是创新体系运行机制的制度化表达和现实治理过程的重要组成部分。政策文本也是在中国制度背景、发展阶段、实践文化和国家战略定位下形成的治理知识载体,集中体现了国家对绿色转型、技术创新、数智赋能和体系治理问题的认知框架。因而,对政策文件进行系统解读,不仅有助于把握数智赋能绿色技术创新体系的政策结构和机制安排,也有助于从中国实践经验中提炼绿色技术创新治理的本土化解释框架,为构建中国自主知识体系提供经验材料与分析路径。因此,本文以政策文本为基础证据,结合专家座谈与业界回访,对政策语义结构所呈现的机制关系进行校验和现实对齐,提炼数智赋能绿色技术创新体系的现实治理机制解释框架。为刻画这一政策体系结构,本文同时开展主题建模,并将其作为政策文本结构识别与语义归并的分类参照文本。该框架并非对政策要素的简单罗列,而是围绕绿色技术创新链条中的系统性约束形成的功能划分。具体而言,目标导向子系统回应绿色技术创新的战略牵引与价值对齐问题,动力驱动子系统回应资源供给、技术支撑和动能激活问题,制度保障子系统回应环境规制、市场激励、风险补偿和规则协调问题,组织协同子系统回应多主体合作、平台联结与信息孤岛问题,过程运行子系统回应从知识创造、技术研发、成果孵化和产业转化之间的链条衔接问题,实践评估子系统则回应标准认证、绩效评价、市场验证和反馈纠偏问题(谢吉青等,2025)。由此,六大子系统共同构成了一个从战略牵引、资源动员、制度支撑、组织协同、过程推进到实践反馈的政策分析框架,为进一步识别政策文本中的机制流向提供了分类基础。

然而,现有研究在揭示数智赋能绿色技术创新政策体系时,仍存在理论解释和方法应用上的不足。在理论解释层面,既有研究多从政策工具、主题分布或要素构成出发,将政策体系视为若干政策主题或工具类型的集合,较多回答政策体系包含哪些要素的问题,而对不同要素之间如何发生关联、政策意图如何在体系内部流动、数智技术如何嵌入不同环节并推动链条协同等

问题关注不足。尤其是对实践评估如何向目标优化、制度调整和过程改进形成反馈,既有研究尚缺乏充分讨论。在方法应用层面,现有政策文本研究多采用Word2Vec、LDA、共词网络等方法构建主题结构或语义关联网络(姚芳等,2025),能够揭示政策文本中的高频主题与共现关系,但往往难以呈现政策要素之间的方向性关系,也难以进一步识别政策体系中的机制流向、反馈链条及其所反映的现实治理约束。

鉴于此,在继承既有要素识别与主题聚类研究的基础上,尝试将研究视角从政策主题识别推进到政策体系结构识别。具体而言,融合BGE文本嵌入模型(BAAI General Embedding, BGE)与“输入—过程—输出”(IPO)系统逻辑,通过高维语义表征政策文本中的关键要素,将非结构化政策文本转化为具有方向性与权重属性的政策语义网络。本文所识别的方向性关系,主要基于理论预设、语法规则和政策文本结构进行抽取,并通过专家座谈、人工校验和业界回访,对关键术语归并、子系统归属、方向性关系判定和异常路径进行复核,由此形成语义模型识别、理论规则约束、专家研判校准的双源互动分析框架,为从政策语义结构中提炼出体系的现实治理机制提供方法支撑。

本文的研究贡献主要体现在三个方面。第一,在研究对象上,将政府政策文件视为国家治理经验、专家决策共识和实践反馈经验等制度化知识的文本沉淀,进而从政策文本中识别数智赋能绿色技术创新体系的结构特征和治理机制,为从中国实践中提炼绿色技术创新自主知识体系提供了新的分析入口。第二,在方法上,将BGE语义识别与IPO系统逻辑相结合,在传统静态、无向语义关联分析的基础上,进一步构建具有方向性与权重属性的政策语义网络,推动政策文本分析从主题识别走向方向性机制关系识别和体系结构解释。第三,在理论解释上,从政策文本识别、专家座谈校验与案例回访对照的相互印证中,揭示数智技术在资源连接、组织协同、过程推进和反馈调适中的嵌入方式,基于政策文本证据,进一步提炼由前向推进向动态闭环演化的数智赋能绿色技术创新体系现实治理机制框架。

二、融合扎根理论与BGE模型的混合驱动建模框架

为解决传统文本挖掘中存在的语义断层、同义词混淆及方向关系缺失等问题,本研究构建如图1所示的混合驱动建模框架。它引入高维向量空间模型(VSM),综合运用最大边际相关性算法(Maximal Marginal Relevance, MMR)、参数敏感性分析与系统要素逻辑,形成一套量化分析方法论,旨在从海量非结构化政策文本中自动识别政策文本体系结构与方向性机制表达。

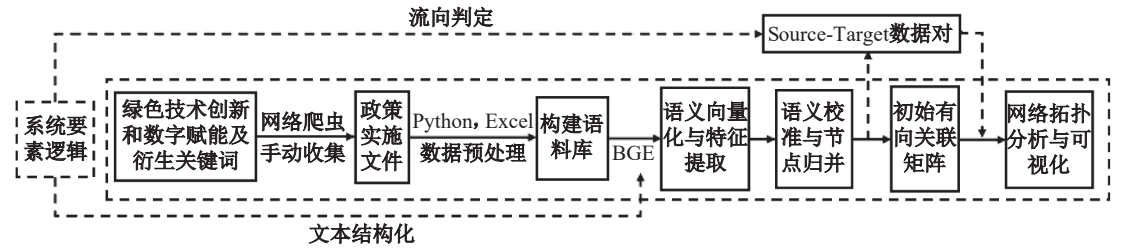


图1 机器学习流程

图1框架以扎根理论的系统逻辑为指导,以BGE文本嵌入模型的语义表征能力为技术底座,通过对关键维度的数智化解析,实现了从文本数据到政策语义网络的映射。

(一)方法模型选择

为突破传统词袋模型(Bag-of-Words)存在的语义断层与数据稀疏性局限,选用北京人工智能研究院(BAAI)发布的BGE-large-zh-v1.5模型作为语义向量化工具。它属于文本嵌入模

型,核心功能在于将政策文本、候选术语和分类参照文本映射为高维稠密语义向量,以支持后续语义相似度计算、功能范畴归类、实体标准化和政策语义网络构建。具体而言,首先对任意输入文本序列 x 进行分词和编码,并将其输入BGE-large-zh-v1.5模型,得到最后隐藏层的token级语义表示:

$$H_x = BGE_{\theta}(T(x)) \in \mathbb{R}^{L \times 1024}$$

其中, $T(x)$ 表示文本序列的分词与编码结果, L 表示编码后的序列长度。在此基础上,提取最后隐藏层[CLS]token对应的向量,并进行L2归一化,得到文本的1024维稠密语义向量:

$$h_x = H_x^{[CLS]}, \quad V_x = \frac{h_x}{\|h_x\|_2} \in \mathbb{R}^{1024}$$

归一化后的文本嵌入向量用于表征政策文本在语义空间中的相对位置,并为后续语义相似度计算、功能范畴匹配和实体标准化提供基础。该模型输出1024维文本嵌入向量,并在C-MTEB中文文本嵌入基准的检索、语义相似度、分类和聚类任务中表现出较好的综合性能,因而能够为政策文本的上下文语义表征及相近领域术语的识别提供技术支持。

不同于生成式大语言模型进行开放式文本生成、自动解释生成,BGE模型主要承担语义表征和相似度计算功能,方向性关系判定则由理论规则、文本结构规则和人工复核共同完成。

(二)余弦相似度

采用余弦相似度(Cosine Similarity)作为衡量政策文本与分类参照文本之间语义距离的核心指标。设文本向量为 A ,参照文本向量为 B ,其计算公式如下:

$$Sim(A, B) = \cos(\theta) = \frac{A \cdot B}{\|A\| \|B\|} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2}}$$

该指标计算结果取值范围为 $[-1, 1]$,值越接近1表示语义越相似。这一度量标准贯穿了文本分类、实体归并及网络构建的全过程,有效保障语义度量的一致性。

(三)最大边际相关性算法

在从海量文本中提取关键要素时,为解决高频词汇的语义冗余问题,如“专项资金”与“专项经费”,引入最大边际相关性(MMR)算法。在保证候选词与源文档相关性的同时,最大化关键词之间的差异性。其目标函数定义为:

$$MMR = \arg \max_{D_i \in R \setminus S} \left[\lambda Sim_1(D_i, Q) - (1 - \lambda) \max_{D_j \in S} Sim_2(D_i, D_j) \right]$$

其中, R 为初始候选关键词集合, S 为已选关键词子集(初始为空), Q 为通过BGE模型获得的体系核心语义向量^①, D_i 为候选关键词 i 的语义向量; Sim_1 表征相关性(Relevance),即候选词与文档的语义相似度; Sim_2 表征冗余度(Redundancy),即候选词与已选关键词的语义相似度。 λ 为相关性与冗余性之间的调节参数。参考Carbonell和Goldstein(1998)关于MMR参数设定的建议,探索性信息组织任务宜采用较低 λ 值(如0.3)以增强结果多样性。鉴于本文旨在全景式识别绿色技术创新体系的多维要素,政策语料中存在较多同义和近义的表达,则将 $\lambda=0.3$ 作为基准设定。此时,相关性项权重为0.3,冗余性惩罚项权重为0.7,有助于在保留子系统核心语义的同时,减少高频同义词和重复近义表达,提高各子系统核心词谱的语义覆盖范围。

具体迭代过程如下:第一阶段为初始化与首轮选择。计算所有候选词与体系质心 Q 的相似

^①鉴于单一子体系往往涵盖多个细分维度的参照文本,直接使用单一参照文本无法覆盖体系全貌。为此,本文对归属于同一子体系的所有参照文本向量执行平均池化(Mean Pooling)操作,计算生成代表该体系全局特征的质心向量 Q ,作为MMR算法的基准参照。

度 Sim_1 ,选择分数最高的词作为首个关键词加入已选集合 S 。此时 S 为空集,冗余性惩罚项为零,选择完全由相关性主导。第二阶段为迭代选择。对于后续每一轮,算法均在剩余候选词集合 $R \setminus S$ 中,依据上述公式重新计算每个词的MMR得分。该得分是当前词与文档的相关性奖励 $\lambda * Sim_1(D_i, Q)$ 减去其与已选集合 S 中所有词最大相似度构成的冗余性惩罚 $(1 - \lambda) \max_{D_j \in S} Sim_2(D_i, D_j)$ 得到。算法选出当前轮次MMR得分最高的词,将其加入集合 S 。重复第二阶段,直至已选集合 S 中的关键词数量达到预设数量 N 。例如,本文设定 $N=50$ 。如若首轮选中“数字化转型”,则候选词“数字转型”在后续轮次中,虽其与文档的 Sim_1 仍较高,但因其与已选词“数字化转型”的 Sim_2 极高,将导致巨大的冗余性惩罚,从而显著降低其MMR总分,使其难以被选中,因而有效避免了语义重复。 $\lambda=0.3$ 和 $N=50$ 作为候选核心词筛选的基准设置。其中,较低的 λ 值主要用于加强对同义词和重复近义表达的抑制。 $N=50$ 表示每个子系统保留50个候选核心词,目的在于为后续校验保留相对充分的语义覆盖范围。因此,这两个参数控制的是候选核心词谱的初始构成,并不直接等同于最终标准节点的数量和结构。本文也不将其视为当前政策语料下统计意义上的唯一最优参数。

在MMR筛选之后,候选核心词还需依次经过语义归并、专家核验与人工校准。语义归并用于识别和合并高度相近的术语,专家核验用于判断关键词的子系统归属及概念边界,人工校准则进一步剔除语义模糊、政策功能不明确或存在跨系统歧义的词项。只有经过上述校验后形成的标准节点集,才用于后续政策语义网络构建。由此,MMR参数对候选词谱的影响受到后续多重校验环节的进一步约束,最终网络节点并非由 λ 和 N 两个参数机械生成。

(四)参数敏感性分析

为克服传统文本挖掘中经验阈值设定可能导致的语义漂移(Semantic Drift)或概念碎片化问题,并确保同义词归并在精确度与召回率之间取得最佳平衡,本文采用全谱参数敏感性分析方法来确定最优的余弦相似度阈值。

1.验证集构建与对抗测试。构建了包含50条正样本对与50条负样本对的人工标注验证集^①,用于校准实体标准化阶段的余弦相似度阈值。其中,正样本对由语义等价或高度同义的政策表达构成,主要包括同一政策概念的近义表达,如“专项资金”与“专项基金”、“数字化转型”与“数字转型”等。负样本对则由语义相近但理论内涵不同的概念构成,如“产业集群”与“产业聚集”在向量空间中可能具有较高相似度,但前者更侧重组织形态,后者更侧重产业要素的空间集聚过程,因此被标记为负样本对(Negative Sample)。通过上述细粒度语义对抗验证(Fine-grained Adversarial Testing),以期在同义归并的覆盖度与概念区分的精确度之间取得平衡。

2.评价指标与目标函数。基于上一步所得的验证集,对区间[0.01,0.99]内的阈值进行全谱扫描,遵循向量空间模型的截断原则(Turney和Pantel,2010),在高置信度区间内寻找最优阈值是抑制语义漂移、平衡模型精确度与覆盖面的关键。在此基础上,通过参数敏感性分析测定不同阈值下的精确率(Precision, P)、召回率(Recall, R)与F1-Score(F_1)。其中,精确率 P 与召回率 R 的定义如下:

$$P = \frac{TP}{TP + FP}, R = \frac{TP}{TP + FN}, F_1 = \frac{2PR}{P + R}$$

其中, TP (True Positive)为正确归并的同义词对数量, FP (False Positive)为错误归并的非同义词对数量, FN (False Negative)为漏判的同义词对数量。 $F1$ -Score作为精确率与召回率的调和平均数,是衡量模型综合性能的核心指标。

^①限于篇幅,人工标注验证集未列示,详见附件,读者若需要可联系索取。

3.全局最优解的确定。目标函数设定为最大化 F_1 值,以寻找能够平衡查准率与查全率的全局最优阈值:

$$\tau^* = \arg \max_{\tau \in [0.01, 0.99]} F_1(\tau)$$

(五)创新要素逻辑驱动的机制流向网络构建

为突破传统文本挖掘方法主要依赖关联共现网络、难以刻画政策文本中方向性关系的局限,依据系统要素关系的输入、过程、输出(Input-Process-Output, IPO)逻辑,结合中国行政公文特有的科层制句法结构,构建了从非结构化文本到有向加权语义网络的映射规则。

1.公文句法结构与系统要素关系的理论映射。行政公文作为政策意图与管理指令的载体,其文本组织形式通常具有层级约束与功能指向特征。基于此,建立了文本结构与系统要素关系之间的映射假设,将政策文本中的静态层级结构转化为政策语义网络中的方向性机制连接。具体而言,将六大子体系划分为三个功能层级。Level 1为战略规约层,对应IPO逻辑中的输入端,包含目标导向体系与制度保障体系,主要体现政策目标设定、发展方向指引、规则约束和制度供给功能,更侧重政策过程中的战略规约性输入,而非生产函数意义上的资源投入;Level 2为运行转化层,对应IPO逻辑中的过程端,包含动力驱动体系、组织协同体系与过程运行体系,主要承载资源动员、主体协同、技术研发、成果转化和产业化应用等功能,更侧重资源被动员、配置、激励转化的运行机制;Level 3为评估反馈层,对应IPO逻辑中的输出端,包含实践评估体系,主要体现创新实践结果、绩效评价和反馈修正功能。基于上述层级划分,本文将政策语义网络的基础流向理解为由战略规约层向运行转化层、再向评估反馈层的前向传导,同时允许在特定语境下形成由实践评估体系回流至目标设定、制度优化或过程修正环节的反馈连接。

2.流向判定规则。针对政策文本中严谨层级结构与叙述性语境结构并存的特点,依据结构表达功能、语境指示方向的原则,建立了互补的流向提取规则。分别利用公文的层级化句法结构与自然语言的逻辑标记,识别政策文本中的显性层级指向与隐性语义指向。

(1)基于层级控制的显性流向。针对具有明确章节结构的政策文件,遵循上位概念统摄下位内容原则。将章节标题或小标题识别为方向性关系中的驱动源,由其下辖正文条款识别为承接对象。以国家发展改革委等部门于2019年4月印发的《关于构建市场导向的绿色技术创新体系的指导意见》(发改环资〔2019〕689号)为例,其第五章标题“五、优化绿色技术创新环境”及下辖小标题“(十五)强化绿色技术知识产权保护与服务”共同构成驱动源;对应正文中“推进建立绿色技术知识产权审查‘快速通道’……”等具体执行安排则构成承接对象。这种“标题层级—正文条款”的句法结构,反映出政策文本中由上层治理意图向具体执行安排的方向性传导关系。

(2)基于语境标记的隐性流向。对于缺乏明确标题层级的叙述性段落,通过识别句式中的目的状语、工具状语和连接标记,定位句子内部的驱动源与承接对象。具体包括两类场景。一是目标导向型语境。对于包含“为了”“面向”“旨在”等目的性表达的语句,将目标语境识别为政策指向,将具体行动、工具或要素识别为支撑路径,从而建立行动要素—目标语境的方向性连接,用以表征底层行动对上层目标的支撑关系。二是工具驱动型语境。对于包含“通过”“利用”“依托”等工具性表达的语句,将工具性要素识别为驱动源,将其作用的核心行动或对象识别为承接对象,从而建立从工具语境到核心实体的指向关系,表征关键资源对系统运行的赋能作用。

(3)层级校正与反馈识别。通过上述机制生成初始方向性连接后,仅对存在方向歧义的跨层级连接,结合战略规约、运行转化和评估反馈的功能层级进行复核。首先是顺流保留,凡符合预设功能层级前向传导方向的连接均予以保留;其次,对于不具备反馈含义、但在文本表述中呈现逆向关系的连接,结合上下文语义和章节结构进行方向校正,以避免因公文表述习惯或句

式倒装造成机制流向误判;最后,对于由Level 3评估反馈体系指向Level 1战略规约层或Level 2运行转化层的连接,若其语义上涉及绩效评价、经验反馈、目标调整、标准优化或政策修正,则识别为反馈连接,用以表征实践结果对目标设定、制度安排和运行过程的调适作用。

3.网络定义与边权度量。基于上述规则,本研究构建了数智赋能绿色技术创新体系的有向网络 $G=(V,E,W)$ 。其中,节点集合 V 由经语义校准后的标准术语构成,并依据BGE语义相似度识别划分至目标导向、动力驱动、组织协同、过程运行、实践评估、制度保障六大子体系。边集合 E 表示经上述功能层级校正后确定的有向连接,代表机制间的作用路径。边权度量 W 采用绝对频次作为有向连接强度的度量标准。需要说明的是,绝对频次并不直接等同于实际政策效果,而是在一定程度上反映政策注意力、文本强调程度和语义共识强度。某一方向性连接出现频次越高,说明该机制链条在政策文本中被反复提及,其在政策语义网络中具有越高的结构显著性。在此基础上,为避免高频体系在网络呈现中占据过度优势,进一步计算跨体系连接的相对频次,并将其作为主干机制路径筛选的依据;而绝对频次仍用于表示连接强度和线条粗细。由此,既要能够保留政策文本中机制关系的实际表达强度,也要能够识别各体系对外作用的相对主导方向,为后续网络结构分析和机制解释提供基础。

三、多维文本挖掘识别创新系统要素与网络拓扑构建

数据挖掘与机理重构过程主要包含数据采集与清洗、结构化语义提取、实体标准化校准以及网络拓扑构建四个核心阶段。具体流程及技术细节如下。

(一)文本数据来源与多维清洗

1.政策文本来源与采集策略。本研究以国家层面发布的纲领性政策文件作为把握政策演进脉络的解析起点。在绿色技术创新领域,以2019年4月印发的《关于构建市场导向的绿色技术创新体系的指导意见》和2022年12月印发的《关于进一步完善市场导向的绿色技术创新体系实施方案(2023—2025年)》为核心政策依据;在数字化赋能领域,以2023年2月发布的《数字中国建设整体布局规划》和2024年8月发布的《数字化绿色化协同转型发展实施指南》为重要参照。上述文件共同勾勒出绿色技术创新与数字中国建设深度交汇的政策背景,也为界定“数智赋能绿色技术创新体系”的研究对象提供了基本依据。基于此,本文将数据采集时间窗口设定为2019年4月至2025年10月,以系统考察这一关键政策演进阶段内国家与地方层面相关政策文本对数智赋能绿色技术创新议题的响应、扩散与具体化过程。

在数据采集阶段,采用程序化采集与人工补充相结合的策略,以提升样本覆盖的完整性与来源的权威性。程序化采集方面,以中国政府网为核心数据源,围绕“数智赋能”和“绿色技术创新体系”两类主题构建检索词库。其中,“数智赋能”主题包括“数据要素、数据资源、数据资产、数字技术、数字化转型、数字基础设施、数字经济”等衍生关键词;“绿色技术创新体系”主题包括“绿色技术、绿色创新、绿色制造、绿色转型、绿色低碳”等衍生关键词。在此基础上,采集研究时段内发布的政策文件、政策解读及权威媒体解读报道等文本资料。人工补充方面,同步检索除港澳台地区外全国31个省级行政区划单位的政府门户网站,依据相同关键词体系,手动收集地方层面同期发布的相关政策文件、政策解读及报道材料,以弥补单一数据源和程序化采集可能存在的遗漏。

2.多级文本清洗与标准化。考虑到关键词提取与方向性关系抽取需求不同,分设两条管线。词项清洗用于核心词提取,其去除文本标签、网络链接、异常字符和冗余空白,结合词典和停用词表,保留领域术语、外文简称和数字组合,纯年份、孤立数字及无独立语义符号不作为候选词。语句结构化用于关系抽取,保留政策标题、正文原句、层级编号及方向标记,标点和换行

符仅作为语句边界。由此避免过度清洗影响政策功能与层级信息。其次,开展初级内容清洗,剔除中国政府网与地方政府网站之间的重复转载样本,以及视频、图片、附件目录等非文本格式材料。

在此基础上,依据绿色低碳场景、技术创新要素、数智赋能要素三维标准进行主题相关性筛选。具体而言,保留同时涉及绿色低碳场景与技术创新活动的文本,以及数智技术嵌入绿色低碳治理、绿色制造、节能降碳、绿色技术研发和成果转化等场景的文本;同时剔除与研究主题关联较弱的机构职能说明、一般性会议报道和无实质政策内容文本。对于仅涉及数字化应用但脱离绿色技术创新场景的文本,如数字化阅读、数字化课堂、数字文旅、智慧广播、文物数字化保护等,不纳入分析;对于仅涉及一般绿色概念但缺乏技术研发、成果转化、产业化应用或数智赋能要素的文本,如绿色食品、绿色旅游、一般生态农业和生物多样性保护等,也予以排除。对于边界模糊样本,设置待复核标记,并结合标题、正文语境和来源渠道进行二次核验,以保证样本筛选过程的透明性和可复现性。

经过上述采集、清洗与主题相关性过滤,最终获得由4792份有效样本组成的政策语料库,总规模为30468549字。为提高样本构成的透明度与代表性,进一步对有效样本的文本类型和政策层级进行统计,正式政策文件3167份,占66.1%;政策解读、媒体解读报道及相关辅助性文本1625份,占33.9%,用于补充政策语境、呈现政策扩散过程和增强文本覆盖范围。从政策层级看,国家层面文本2876份,占60%;地方层面文本1916份,占40%。

(二)文本数据结构化切分与特征提取

为将非结构化政策文本转化为可计算、可归类、可连接的结构化语义单元,通过精细化清洗、语义映射以及语义阈值截断三阶段处理流程,将原始语料库转化为具备扎根理论属性的结构化语义单元。

1.领域自适应分词与形态学过滤。为提高政策文本切分与词项识别的准确性,构建了数字绿色创新领域专用词典,并结合jieba分词工具对政策文本进行分词和切分处理,避免“新质生产力”“碳足迹”“绿色技术创新”等专有表达被错误拆分。同时,综合使用多源中文停用词表(哈尔滨工业大学停用词表、百度停用词表、中国人民大学停用词表、四川大学机器智能实验室停用词表),并结合政策文本特点补充自定义停用词,剔除机构名称、格式化用语及低信息量词项。在此基础上,保留具有实质语义的名词性词项,并将长文本切分为相对独立的政策语句,为后续语义归类和关系抽取提供基础文本单元。

2.语义特征映射。在六大子系统^①及其细分功能范畴基础上,构建了标准化的分类参照文本,用以表征不同功能范畴的核心语义。分别生成政策语句与分类参照文本的向量表示,并通过余弦相似度计算二者之间的语义接近程度。每一政策语句根据相似度结果被归入最匹配的功能范畴,从而实现从原始政策语句到结构化功能类别的转换。需要说明的是,分类参照文本是将前文六大子系统及细分功能范畴转化为机器可识别语义标准的操作化工具,其功能在于提供语义匹配参照,而非构成新的模型训练标签或算法模块。该过程既依赖人工智能模型的语义向量表征能力,也通过专家智慧对功能范畴的理论边界进行校准,体现了机器识别与人类经验认知研判之间的双源互动。

3.基于IPO逻辑的方向性机制关系抽取。在完成政策语句功能归类后,进一步依据政策文本的层级结构与语言标记识别方向性机制关系。对于具有明确章节结构的政策文本,识别“章—条—款”等层级关系,将章节标题或上位政策目标视为方向性机制关系的来源,将其下条款或具体措施视为作用对象,以提取政策文本中自上而下的目标引导与任务落实关系。对于

^①限于篇幅,六大子系统的主题识别与聚类校验未列示,详见附件,读者若需要可联系索取。

缺乏显性层级结构的叙述性语句,结合IPO逻辑和介词标记判断语义流向,当语句包含“为了、面向、针对”等目的性表达时,侧重识别政策措施指向目标或问题情境的关系;当语句包含“通过、依托、借助、利用”等工具性表达时,侧重识别资源、技术或制度安排对创新过程和实践结果的支撑关系。由此,本文提取的并非严格意义上的因果关系,而是政策文本中具有方向指向的机制关系。

4.语义阈值筛选。为降低弱相关语句、背景性表述和通用政策措辞对网络结构的干扰,在政策语义归并与方向性机制关系中设置语义准入阈值。其中,政策语句与分类参照文本之间的主准入阈值 $\tau_{main} = 0.5$,仅将余弦相似度高于此阈值时纳入后续分析。此外,方向性机制关系抽取中的语境筛选阈值设为 $\tau_{ctx} = 0.5$,用于筛选目标性、工具性和反馈性语言中具有明确功能指向的语句。

对低分语句的文本回溯发现,相似度低于0.5的内容主要表现为宏观背景介绍、原则性宣示、通用工作要求,以及与六大子系统相关但缺乏明确功能指向的文本。结果显示,不同阈值下六大子系统归类、主干路径排序和反馈弱连接识别结果未发生实质性改变。

(三)语义校准与实体标准化

1.最优阈值测定。为避免在同一批样本上选择和评价阈值可能产生的性能高估,首先采用分层五折交叉验证,对阈值选择方法进行折外评价。每轮以其中四折共80对样本作为阈值校准集,在0.01~0.99范围内以0.01为步长进行阈值扫描,并根据训练子集的F1确定该折阈值。固定阈值,在剩余20对未参与阈值选择的样本上计算识别性能。五个训练子集确定的阈值分别为0.88、0.88、0.88、0.86和0.88,其中第四折的并列最优区间为0.86~0.88。五折阈值中位数为0.88。Precision、Recall、F1和Accuracy分别为0.9615、1.0000、0.9804和0.9800,说明阈值选择方法具有较好的折外识别性能,且0.88在不同训练子集中表现出较高稳定性。

完成折外评价后,本文进一步使用全部100对人工标注样本进行最终应用阈值校准。不同阈值下Precision、Recall和F1的变化轨迹如图2所示。当 $\tau=0.88$ 时,F1达到峰值。该阈值能够较好兼顾正样本识别与负样本区分,减少语义相关但概念边界不同的术语被错误归并的风险。因此,将 $\tau=0.88$ 确定为后续核心词语义归并的应用阈值。

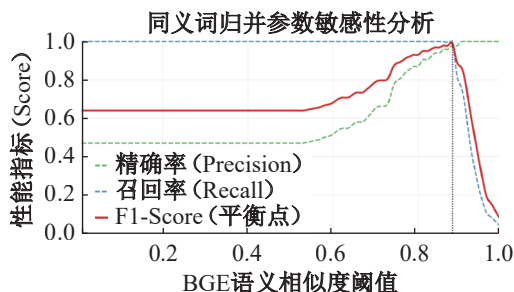


图2 敏感性分析

2.自动化归并。计算候选术语与标准术语库之间的余弦相似度,并将相似度高于 τ^* 的候选术语映射至语义最近的标准节点。考虑到政策术语中仍存在简称、指标转译和语境依赖型归并情形,对于未达到阈值但具有较高理论相关性的边界概念,则结合上下文语境进行人工复核。通过该处理,将同义异名表述归并为统一节点,同时避免将理论含义相近但机制功能不同的概念误合并,从而为后续政策语义有向网络构建提供更加稳定和可解释的节点基础。

(四)政策语义有向网络的构建与机制流向识别

进一步构建了六大子系统之间的政策语义有向网络。网络节点包括目标导向、制度保障、动力驱动、组织协同、过程运行和实践评估;有向边表示基于章节层级、语言标记和IPO逻辑识别出的方向性机制关系。为避免不同子系统因文本出现频次差异而影响流向判断,同时采用了绝对频次和相对频次衡量机制间连接强度。其中,绝对频次用于反映体系间关系在政策文本中

的总体表达规模,相对频次则用于识别各体系对外作用的主导方向。

设体系*i*指向体系*j*的关系频次为 F_{ij} ,体系*i*内部自连接频次为 F_{ii} ,则体系*i*指向体系*j*的相对频次定义为:

$$R_{ij} = \frac{F_{ij}}{F_{ii}}, \quad i \neq j$$

其中, R_{ij} 表示体系*i*相对于自身内部强化而言,对体系*j*的外溢作用强度。结合绝对频次和相对频次共同判断政策体系中的主导机制流向,前者反映关系表达的规模基础,后者揭示不同体系对外连接的相对倾向。

由图3可知,六大子系统之间的政策语义流向呈现出明显的非均衡结构。目标导向体系、动力驱动体系、组织协同体系和过程运行体系之间形成较强连接,说明政策文本中的主导表达集中于目标牵引、资源配置、协同组织和过程推进等环节。相比之下,实践评估体系相关连接整体较弱,特别是过程运行体系、组织协同体系指向实践评估体系的流向强度较低,表明政策文本中关于后端评价反馈、实践检验和机制修正的表达相对不足。

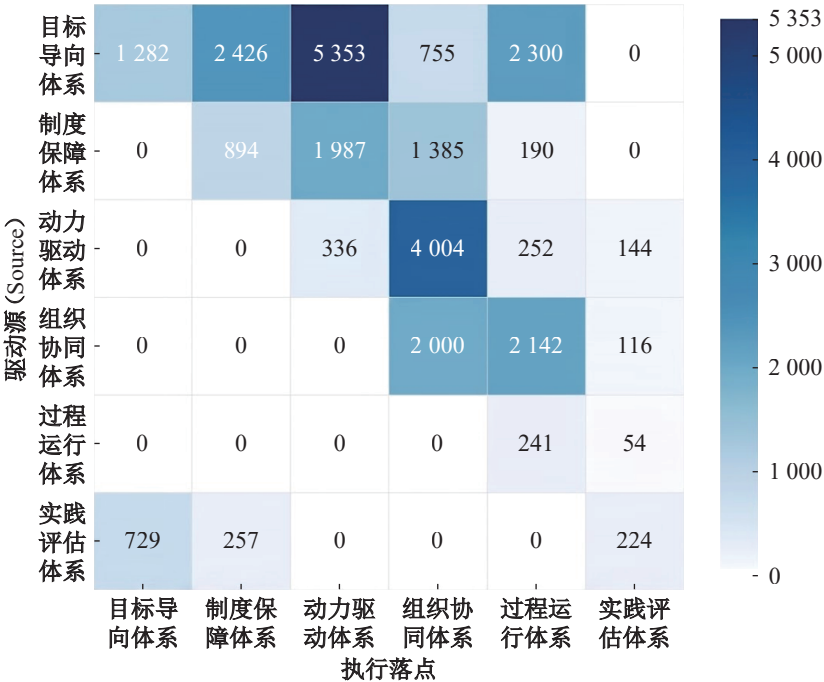


图3 数智赋能绿色技术创新体系: 机制间流向强度热力图

为进一步呈现政策语义网络的主干结构,在绝对频次边权矩阵的基础上进一步计算跨体系连接的相对频次,并据此构建机制路径图,如图4所示。具体而言,按照相对频次对跨体系连接进行排序,选取相对频次较高的前12条连接作为网络骨架路径,并以实线表示。该处理能够避免绝对频次较高的体系在网络图中占据过度优势,更突出各体系对外作用的相对强度和主导方向。绝对频次用于反映体系间连接的总体表达规模,相对频次用于识别各体系对外作用的相对倾向。两种设定下,前向主干链条均具有结构显著性,实践评估体系相关连接的相对强度亦显著低于前向链条。由此体现了跨设定的稳健性。同时,考虑到仅保留前12条高频路径可能导致低频但具有闭环意义的连接被忽略,又设置弱连接补充机制。对于在主干网络中流入或流出不节的节点,通过回溯完整关系矩阵和原始政策文本,识别与该节点相关的最高权重有效连

接;随后,组织专家座谈,3名公共政策研究领域的专家学者(2名教授、1名副教授)对候选路径的文本依据、功能范畴归属、方向性判定和机制解释合理性进行复核,重点判断该连接是否属于政策文本中的有效机制表达。进一步,结合课题组成员在江苏、浙江两地3个绿色技术创新园区的实地调研与业界访谈,考察该类连接是否能够在地方绿色技术创新实践中得到现实情境验证,尤其是否体现为评价反馈、标准认证、过程修正或资源再配置等治理环节。^①经文本回溯、专家复核和业界回访共同确认后的弱连接不参与主干路径排序,也不改变频次统计结果,仅在图4中以虚线形式呈现,用以展示政策体系中潜在但尚不充分的反馈关系。

如图4所示,实线部分反映相对频次排名靠前的主干机制路径,线条粗细反映其在政策文本中的绝对出现频次,主要集中于目标导向体系、动力驱动体系、组织协同体系、过程运行体系的流向关系。虚线部分则表示未进入高频主干路径,但经过原始文本回溯、专家座谈校验和园区业界回访后仍具有闭环意义的弱连接路径,主要用于呈现实践评估体系与主干链条之间尚不充分但不可忽视的反馈关系。由此可见,当前政策语义网络已形成较为清晰的目标牵引和过程推进结构,但实践反馈环节仍相对薄弱,整体呈现出重执行、轻反馈的特征。

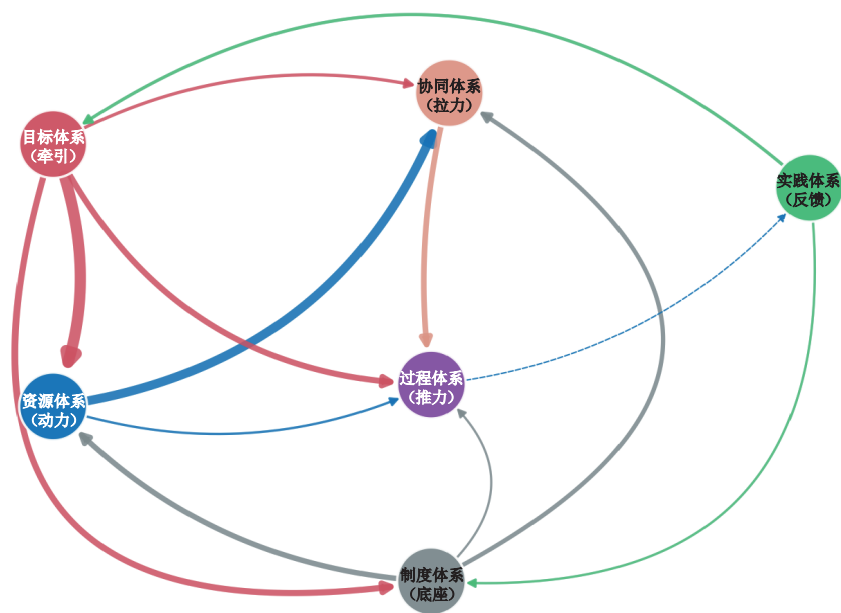


图4 基于双尺度映射的绿色技术创新体系机理路径图

基于图3和图4的网络发现,主要体现为以下三个方面:第一,政策体系的主导流向集中于目标导向引领动力驱动、调整动力配置实现组织协同、保障过程平稳运行的前向链条。其中,目标导向体系到动力驱动体系的关系频次最高,表明政策文本中大量条款通过目标设定牵引数智资源、创新资源和基础资源配置;动力驱动体系到组织协同体系连接强度突出,说明资源、数据和技术要素主要通过平台建设、主体联结和协同机制进入组织层面;组织协同体系到过程运行体系则进一步体现了组织协同对研发、孵化和产业转化过程的推动作用。第二,制度保障体系主要通过资源配置和组织协同发挥支撑作用。从网络流向看,制度保障体系与动力驱动体系、组织协同体系之间的连接较为明显,说明制度政策更多通过财政激励、环境规制、开放服务和平台支持等方式影响资源供给与协同组织,而不是直接构成技术研发和成果转化的主轴。这表明制度保障体系在政策语义网络中主要承担支撑性和保障性功能。第三,反馈链条相对薄

^①限于篇幅,相关专家座谈程序、园区选择依据、业界回访未列示,详见附件,读者若需要可联系索取。

弱,主要表现为过程运行和组织协同向实践评估的连接不足。与目标牵引、资源配置和协同推进等主干路径相比,实践评估体系相关连接整体偏弱,说明当前政策文本更加重视前端目标设定、中端资源投入和过程推进,而对后端评价反馈、实践检验和机制修正的表达仍不充分。这也意味着,数智赋能绿色技术创新体系虽然已形成较为清晰的正向推进链条,但从实践评估回流至目标调整、制度优化和过程修正的闭环机制仍有待进一步强化。

四、数智赋能绿色技术创新体系的解释性机理逻辑

基于前文主题识别、聚类校验与政策语义有向网络分析,进一步对数智赋能绿色技术创新体系的结构逻辑进行解释性归纳。政府政策文本是国家治理经验、专家决策共识与实践反馈经验等制度化知识的沉淀。在中国政策牵引创新体系中,政策文本不仅反映绿色技术创新体系的政策设计逻辑,也通过目标设定、资源配置、组织动员、制度供给和评价反馈参与塑造现实治理过程。因而结合政策语义网络识别结果、专家座谈校验与业界回访,将政策文本呈现的方向性机制关系进一步提炼为数智赋能绿色技术创新体系的治理机制解释框架。

(一)六大子系统的划分逻辑、功能边界与结构关系

基于上述分析,据此构建的数智赋能绿色技术创新体系解释性机理如图5所示。

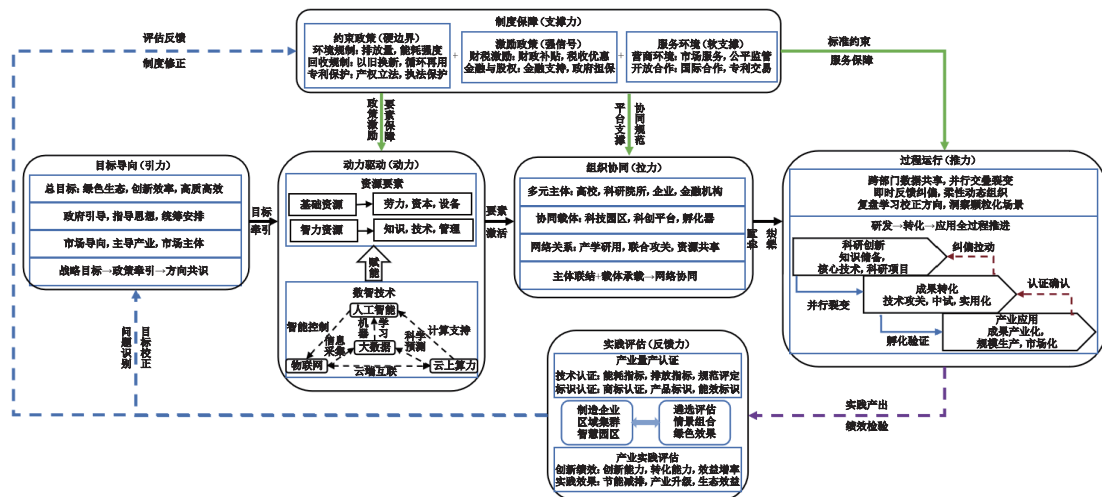


图5 数智赋能绿色技术创新体系解释性机理

图5中,本文将数智赋能绿色技术创新体系解构为目标导向、动力驱动、组织协同、制度保障、过程运行和实践评估六大子系统,分别对应于体系运行中的方向设定、要素供给、主体联结、规则保障、过程推进与反馈修正功能。该划分既承接了国家创新系统、绿色技术创新等理论对目标、资源、主体、制度、过程与绩效的共同关注,也结合数智赋能情境,进一步揭示数据要素、数字平台、智能算法和反馈机制对绿色技术创新体系运行方式的重塑作用。本文未将数智技术设置为与六大子系统并列的独立维度,并非弱化其作用,而是基于数智技术的功能属性与作用方式作出的结构安排。一方面,数据要素作为新型生产要素,已经成为绿色技术创新资源体系的重要组成部分,与资金、人才、知识、基础设施等共同构成创新活动的动力来源,因此在结构上被纳入动力驱动体系。另一方面,数字平台、智能算法、工业互联网、数字孪生和大数据分析等数智技术贯穿资源识别、主体连接、过程优化和反馈修正等多个环节,具有明显的跨系统赋能属性。若将数智技术单独设为并列子系统,容易割裂其对其他子系统的嵌入式支撑作用。因此,将数据要素作为动力驱动体系的重要内容,将数智技术理解为贯穿六大子系统的赋

能机制,能够更准确反映数智技术在绿色技术创新体系中的基础性、渗透性和协同性作用。

从划分逻辑来看,六大子系统是围绕绿色技术创新活动的系统演进过程形成的功能性归纳。其中,目标导向体系锚定发展方向,动力驱动体系集聚资源与技术要素,组织协同体系联结多元主体并塑造协同模式,制度保障体系提供规则约束、政策激励与环境支撑,过程运行体系推动绿色技术从研发迈向产业化,实践评估体系则承担成效检验、问题识别与反馈校正功能。由此,目标导向、动力驱动、组织协同与过程运行之间形成较为清晰的前向推进链条,制度保障主要以嵌入方式支撑主干链条运行,而实践评估的反馈连接仍相对有限。

(1)目标导向体系位于体系运行前端,主要发挥战略牵引与方向塑造功能。它通过绿色生态、创新效率和高质高效等目标设定,明确数智赋能绿色技术创新的价值取向与发展边界,引导资源配置、组织协同和过程运行向绿色化、高效化和高质量化方向展开。不同于动力驱动体系的要素供给属性,目标导向体系更侧重通过任务规划和战略部署形成方向约束;相较于实践评估体系的事后检验与反馈修正,目标导向体系更强调事前引领。

(2)动力驱动体系主要承担要素供给与数智赋能功能。它不仅涵盖研发资金、创新人才、技术知识和基础设施等传统创新资源,也纳入数据资源、数字平台、智能算法和数字基础设施等新型生产要素与技术条件。在数智赋能情境下,动力驱动体系的核心增量并不只是扩大资源投入规模,而是通过数据识别、平台连接和智能调度提升资源配置效率,推动创新要素由静态供给转向动态匹配和精准配置。它与目标导向体系的边界在于,目标导向体系侧重发展方向和目标约束,动力驱动体系侧重资源和技术条件供给;它与组织协同体系的边界在于,动力驱动体系提供创新要素,组织协同体系则负责将分散要素嵌入多主体协同网络。

(3)组织协同体系主要聚焦主体联结与协同转化。绿色技术创新涉及政府、企业、高校、科研机构、金融机构和中介组织等多元主体,单一主体难以独立完成从知识创造到产业应用的全过程转化。组织协同体系通过平台化组织、产学研金介联动、跨区域协作和多层级治理,将分散主体整合为持续运行的创新网络。相较于动力驱动体系对要素供给的关注,组织协同体系更强调要素如何通过主体关系实现组合与转化;相较于过程运行体系对具体创新环节的关注,组织协同体系更偏重主体结构、协作方式和治理关系。

(4)制度保障体系旨在构筑规则约束、政策激励与环境支撑。它通过环境规制、标准规范、财政激励、绿色信贷、开放合作、营商环境和知识产权保护等制度安排,为数智赋能绿色技术创新提供稳定的行为预期和运行边界。制度保障体系并不直接替代技术研发和成果转化,而是通过硬约束、强激励和软环境嵌入资源配置与组织协同过程,从而降低创新不确定性并提升体系运行稳定性。相较于目标导向体系的战略性,制度保障体系更强调规则性与操作性;相较于过程运行体系的实践性,制度保障体系主要提供外部制度边界和环境支撑。

(5)过程运行体系承载研发、孵化、转化和产业化推进功能,是目标、资源、主体和制度最终落地的关键载体。绿色技术创新并非单向线性过程,而是知识创造、技术开发、成果孵化、场景验证和产业转化之间并行交叠、试错迭代的螺旋推进过程。在数智技术支撑下,研发端、生产端、市场端和治理端能够通过数据流实现高频连接,从而提升技术供给与应用场景之间的适配效率。组织协同体系主要回答“谁来协同”以及“如何协同”的问题,过程运行体系则进一步回答协同之后创新链、孵化链和产业链如何耦合演进的问题。

(6)实践评估体系兼具成效检验、价值筛选与反馈修正功能。它通过技术认证、量产验证、绿色绩效评价、市场应用反馈和标准动态更新,检验系统运行是否偏离预期目标,并将评估结果反向传导至目标调整、制度优化、资源重配与过程修正之中。实践评估体系与目标导向体系共同构成系统运行的首尾两端。目标导向体系提供事前牵引,实践评估体系提供事后检验与反

馈修正,二者之间能否形成稳定连接,决定了数智赋能绿色技术创新体系能否实现自适应演化。

综上,目标导向引领方向,动力驱动激活要素,组织协同联结主体,制度保障稳定秩序,过程运行承载转化,实践评估推动修正。六大子系统并非割裂的政策工具分类,而是共同交织成一个具有方向性特征的机制网络。

(二)目标牵引与资源驱动下的主干链条形成

前文政策语义有向网络分析表明,数智赋能绿色技术创新体系已形成较为清晰的前向传导链条,其主导流向主要集中于由目标导向到动力驱动,再到组织协同,最后到过程运行体系。这一拓扑结构说明,政策文本的核心表达并未停留在绿色创新目标的宏观宣示层面,而是进一步展开为目标如何牵引资源配置、资源如何支撑组织协同、组织协同如何推动过程运行的递进逻辑。上述四大子系统共同构成政策语义网络中的主干机制链条,映射出数智赋能绿色技术创新体系在创新实践中的基本路径。

首先,目标导向体系是主干链条的逻辑起点。绿色生态、创新效率与高质高效等目标,是对要素配置方向、主体行动边界和创新过程取向的前置约束。政策文本中目标导向体系指向动力驱动体系的连接强度较高,表明目标设定在体系运行中承担着要素动员与方向牵引功能。绿色发展目标通过政策规划、重点工程、任务清单和考核评价等机制,引导数据资源、传统创新资源和基础设施资源进入绿色技术创新领域,使抽象战略进一步转化为明确的要素投入方向与技术布局重点。

其次,动力驱动体系是战略目标转化为创新效能的关键中介。绿色技术创新具有周期长、风险高、融合性强和转化难度大等特征,单纯依靠传统要素的规模扩张,容易面临资源错配和信息不对称等问题。数智技术的深度介入重塑了动力驱动体系的运行方式(谢家平等,2025)。数据资源、数字基础设施、智能算法和平台工具的融入,能够提升要素识别、精准匹配与过程监测能力。由此,动力驱动体系不仅提供资金、人才和技术等基础条件,更通过数智技术激活要素势能,推动资源配置由静态供给转向动态调配和精准配置。

再次,动力驱动体系进一步指向组织协同体系,表明资源与技术要素只有嵌入多主体协同网络,才能转化为体系化创新能力。绿色技术创新跨越基础研究、工程开发、中试验证、场景应用和产业扩散等多个环节,高度依赖政府、企业、高校、科研机构、金融机构和中介组织等多元主体的稳定联结(谢家平等,2022)。数字平台、数据共享与算法匹配能够降低主体间的信息壁垒,提升合作机会识别与资源对接效率。因此,动力驱动体系并非直接生成创新成果,而是需要通过组织协同体系,将分散的要素资源转化为跨主体、跨环节、跨区域的协同创新动能。

最后,组织协同体系最终指向过程运行体系,表明多主体协同并非体系运行的最终目的,而是服务于绿色技术研发、成果孵化与产业转化的关键组织条件。过程运行体系承接目标牵引、资源驱动与组织协同形成的叠加合力,并将其落实为知识创造、技术创新、成果孵化和产业转化等具体实践(谢家平等,2022)。区别于传统线性创新模式,数智赋能下的绿色技术创新更强调并行交叠、实时反馈与螺旋迭代(江小涓和靳景,2022)。研发端、生产端、市场端和治理端依靠数据流实现持续连接,使应用场景、产业需求和绿色绩效要求能够在技术开发早期被导入,从而提升技术供给与市场需求的适配度,并降低后期转化风险(权小锋和李静蕾,2025)。

整体而言,目标导向、动力驱动、组织协同、过程运行体系之间形成了目标牵引、资源配置、主体协同、过程推进的前向传导结构。这一结构揭示了当前政策体系的核心运行逻辑,即以目标设定启动要素动员,以要素配置支撑组织联结,以组织协同推动创新链、孵化链和产业链耦合演进。它不仅体现出政策体系较强的前向推进特征,也构成数智赋能绿色技术创新体系多维耦合的主干骨架。

(三)制度保障与组织协同中的支撑机制嵌入

在目标导向、动力驱动、组织协同、过程运行的主干链条之外,制度保障体系构成数智赋能绿色技术创新体系稳定运行与自适应演化的重要支撑。政策语义有向网络结果表明,制度保障体系与动力驱动、组织协同体系之间存在较为明显的连接关系。制度政策通过形塑资源配置流向、规范主体行为边界、重构协同秩序和支撑过程转化,以嵌入性方式作用于体系的关键环节。

第一,制度保障体系通过硬约束锚定绿色技术创新的行为边界。环境规制、碳排放约束、技术标准和准入规则等制度工具,能够将宏观绿色发展目标转化为微观主体必须回应的外部压力,推动企业及产业部门将低碳要求嵌入研发、孵化与转化全过程(熊婷燕和徐晔,2025)。相较于一般技术创新,绿色技术创新具有更强的外部性,其生态效益与社会效益难以完全通过市场价格机制实现内部化。制度硬约束的价值正在于纠正这一市场缺陷,通过刚性规则供给强化绿色导向并稳定微观主体预期。同时,环境规制、能耗标准和技术规范也为技术研发、成果转化和产业应用提供了基本规则边界。

第二,制度保障体系通过强激励对冲创新风险并激活主体意愿。绿色技术创新具有高投入、长周期、收益不确定和融资约束较强等特征,若缺乏相应的风险分担与收益补偿机制,微观主体容易出现投入不足或参与意愿下降。财政补贴、税收优惠、绿色信贷、政府采购和风险补偿等制度安排,能够分担试错成本、降低融资壁垒并改善资本收益预期。在数智赋能情境下,制度激励的作用范围不再局限于单个主体扶持,也可以通过数据共享、平台建设、公共服务和试点示范等方式促进跨主体资源流动,推动分散要素向协同创新网络汇聚,进而为动力驱动向组织协同转化提供制度性条件。

第三,制度保障体系通过软环境建设强化信任基础并提升组织协同效率。绿色技术创新涉及多元主体,协同障碍不仅源于资源异质性和能力差异,也源于信息不对称、信任不足、产权边界模糊和收益分配不清所引致的摩擦成本。营商环境优化、知识产权保护、开放合作机制、公共服务平台和标准认证体系,能够降低多主体合作中的制度性交易成本与契约风险。制度保障体系通过高质量规则供给与环境塑造,为组织协同网络提供更稳定的合作预期和更持续的运行条件(焦豪和杨季枫,2022)。标准认证、知识产权保护和公共服务供给还能够支撑创新成果从研发环节向应用环节转化,使制度保障进一步嵌入过程运行体系。

综上,制度保障体系以结构性嵌入和关系性嵌入的方式融入动力驱动、组织协同和过程运行环节。一方面,它通过约束与激励双重机制引导要素流向,使资源更多进入绿色低碳和高质量创新领域;另一方面,它通过规则重塑与服务供给稳定主体关系,促进要素在协同网络中持续流动与优化组合。同时,标准约束、产权保护和认证服务,为技术研发、成果孵化和产业化应用提供制度支撑。因此,制度保障体系构成主干链条稳定运行的制度支撑,重点作用于增强前向主干链条的可执行性、稳定性和转化效率。

(四)实践评估与反馈修正中的动态闭环及其不足

若目标导向、动力驱动、组织协同、过程运行共同构成数智赋能绿色技术创新体系的前向推进链条,那么实践评估体系则是识别运行成效、发现体系偏差、进行反馈校正的关键环节。实践评估主要体现为对目标导向和制度保障的有限反馈。它既包括对创新成效的事后测度,也包括通过绩效检验、价值筛选与问题识别,将实践结果反向传导至目标校正和制度修正环节。资源配置、组织协同和过程改进则更多通过目标调整与制度优化间接受到影响。由此,实践评估体系不仅关系到绿色技术创新成效能否被准确识别,也关系到整个体系能否在运行过程中形成政策学习与有效纠偏能力。

从功能结构看,实践评估体系主要承担三方面作用。第一,实践评估体系承担目标映射与

绩效检验功能,用以弥合政策目标与现实成效之间的偏差。它旨在检验绿色技术创新是否真正达成绿色生态、创新效率与高质高效等目标,避免政策目标停留在文本宣示层面。绿色技术创新的价值不应仅体现为研发投入规模、项目申报数量或政策覆盖范围等投入指标,更应体现为环境绩效改善、技术转化效率提升和产业高质量发展等实际结果。第二,实践评估体系承担多维价值筛选功能,为制度工具优化和后续资源配置提供依据。绿色技术创新存在多种技术路径和应用场景,不同路径在生态效益、经济价值与产业适配上存在差异。因此,实践评估体系需要通过技术认证、量产验证、市场应用表现和环境绩效评价等多维标准,识别真正具有推广价值和生态经济价值的技术路径,并为后续资源配置提供依据。第三,实践评估体系承担反馈修正功能,推动目标设定与制度安排的适应性调整(洪银兴和王坤沂,2024)。对于绿色技术创新这一复杂系统而言,政策目标与工具组合不可能在初始阶段一次性达到最优状态。只有将实践结果适度反馈至目标设定、制度安排和政策执行过程,才能有助于识别目标偏差、制度失灵、要素错配与转化堵点。

数智技术的深度融入,为实践评估体系发挥反馈功能提供了新的技术条件(洪银兴和王坤沂,2024)。区块链、物联网、工业互联网、数字孪生和大数据分析等技术,能够对研发、生产、交易、应用和排放等数据进行持续采集、动态追踪和可信记录,使实践评估由滞后的人工统计和阶段性检查,逐步转向更及时的数据回流和过程监测。这有助于降低政策调整的时滞,提高系统问题识别、风险预警和制度修正能力。不过,技术条件只是反馈发挥作用的基础。评估结果能否稳定进入目标调整和制度优化过程,才决定反馈机制能否真正运转。

然而,政策语义有向网络结果也显示,实践评估体系与前向主干链条之间的连接整体偏弱。尤其是过程运行体系、组织协同体系指向实践评估体系的流向强度不足,说明当前政策文本更加重视前端目标设定、中端资源配置和过程推进,而对后端评价反馈、实践检验和机制修正的表达仍不充分。换言之,现有政策体系较为清楚地回答了如何设定目标、配置资源、组织协同和推进过程,却尚未充分回答创新结果如何通过目标校正和制度修正反向影响体系运行。实践评估在政策语义网络中更多表现为弱反馈节点。

这一结构特征表明,数智赋能绿色技术创新体系目前仍更突出前向推进逻辑,动态闭环机制仍有待强化。实践评估体系的弱连接并不意味着其功能无关紧要,反而说明它是体系由多维耦合走向动态闭环的关键短板。若缺乏稳定的评价反馈机制,目标牵引可能停留于战略宣示,制度工具也难以及时修正。资源配置、组织协同和过程运行则会缺少基于实践结果的校正依据。因此,实践评估体系能否有效连接目标导向和制度保障,直接影响绿色技术创新体系能否由政策推动型系统转向具备学习、纠偏和迭代潜力的政策调适系统。

综上,动态闭环并不会随着六大子系统的并列呈现而自然生成,它依赖实践评估体系的持续反馈。其反馈能力只有当实践评估能够通过问题识别推动目标导向校正,并通过评估反馈促进制度保障修正,才能发挥作用。当前政策语义网络中实践评估弱连接的存在,揭示了系统优化的重要方向,即在持续强化前向推进链条的同时,需要进一步补强后端评价反馈、实践检验与机制修正能力,推动实践评估由末端检验环节逐步转化为有限但关键的反馈校正机制。

(五)数智赋能绿色技术创新体系的机制归纳

数智赋能绿色技术创新体系的复杂演化逻辑可以归纳为三个方面:

第一,前向主干链条基本形成。政策语义网络表明,目标导向、动力驱动、组织协同、过程运行体系之间已形成较强的拓扑联结,勾勒出由战略目标牵引资源配置、由资源配置支撑主体协同、由主体协同推动过程运行的前向传导结构。这一结构不仅构成创新体系多维耦合的主干骨架,反映出政策语义网络中较为稳定的前向传导关系,也说明我国绿色创新政策文本已经较为

清晰地呈现出从宏观战略愿景向具体创新实践延展的方向性路径。

第二,制度保障体系的结构性嵌入持续深化。制度保障体系通过硬约束、强激励和软环境三重机制,作用于动力驱动与组织协同环节。它并非孤立悬浮于系统之外的规则板块,而是通过嵌入资源流向、主体行为与网络秩序,为主干链条稳定运行提供制度支撑。因此,制度保障体系构成绿色技术创新由目标规划走向实体运行的关键支撑,也为不同要素向协同创新网络汇聚、创新成果向产业应用转化提供契约基础与环境条件。

第三,反馈闭环的自适应机制仍待强化。实践评估体系在理论上承担成效检验、路径筛选与反向修正的负反馈功能,然而政策语义网络结果显示,其与主干链条之间的连接整体相对薄弱。这表明反馈关系虽已出现,但尚未形成与前向链条同等强度的闭合循环。数智赋能绿色技术创新体系目前仍处于由多维耦合向动态闭环演进的过程中,实践评估体系正是推动这一转化的关键短板。结合图5,实践评估的反馈作用主要体现为对目标导向的校正和对制度保障的修正。其对动力驱动、组织协同和过程运行的影响,则更多需要通过目标调整和制度优化间接发生。

综合来看,数智赋能绿色技术创新体系是一个以目标导向为逻辑起点、以动力驱动与组织协同为主干骨架、以制度保障为嵌入性支撑、以过程运行为核心载体、以实践评估为有限反馈节点的复杂演化系统。其中,数据要素作为新型生产要素进入动力驱动体系,数智技术则作为跨系统赋能机制贯穿资源配置、主体协同、过程运行和实践评估全过程。其当前运行特征表现为前向推进链条较为清晰,后向反馈链路相对薄弱。未来体系优化的关键,不仅在于持续强化目标、资源、组织与过程之间的协同关系,更在于利用区域一体化扩容带来的要素协调集聚效应(孔令丞等,2022),进一步补强实践评估对目标校正、制度修正以及由此带来的资源重配和过程纠偏的反哺能力。由此,数智赋能绿色技术创新体系才能从政策推动型的多维耦合结构,进一步转向更具学习能力、纠偏能力和迭代能力的动态调适系统。

五、全链协同数智赋能绿色创新生态系统的策略建议

(一)全链多维耦合协同绿色技术创新体系的规范性机理

结合专家座谈、园区实地调研和业界回访,对解释性机理进行规范性转化,进一步提炼出全链多维耦合协同的绿色技术创新体系规范性机理。该机理是对未来治理优化的理想型运行框架,强调通过数智技术打通绿色技术创新中的感知、配置、协同、转化、评价与反馈机制,推动绿色技术创新体系由前向链式推进转向动态闭环演化。

如图6所示,数字时代全链多维耦合协同的绿色技术创新生态体系,应以战略目标为牵引,以数据贯通和智能调度为基础,以平台化组织和团簇式创新网络为载体,以研发、中试、转化和应用的过程联动为核心,以动态评估和标准迭代优化为反馈枢纽,最终形成可感知、可调度、可协同、可评估、可迭代的数智赋能绿色创新生态系统。由此,实践评估不再只是末端验收环节,而应成为连接过程运行、制度优化、资源重配和目标校正的关键反馈节点。数智技术也不再只是外在工具,而是贯穿资源配置、主体协同、过程优化和反馈修正全过程。

(二)数字时代全链协同绿色创新生态体系的实践策略建议

据此,进一步提出全链协同数智赋能绿色创新生态系统构建路径,如图7所示。该路径围绕策略实施、实施边界与效能释放三个层次展开。在策略实施层面,应通过建设全域感知与智能调度的资源配置底座、推行虚实联动与并行交叠的团簇生态创新组织、健全由数字信任支撑的动态评估与标准迭代优化机制,推动绿色技术创新从要素配置、主体协同、过程转化到实践反馈的全链条贯通。在实施边界层面,应把握政府引导与市场主导的动态平衡,补齐数智能力短

板,优化多维协同环境,防止数智赋能治理陷入技术工具依赖、平台建设悬浮和数据治理空转。在效能释放层面,应进一步激活微观主体的激励相容与信任机制,重构中观层面的要素配置秩序与平台生态,提升宏观层面的系统韧性与穿透治理能力。由此,绿色技术创新体系能够由传统链式推进模式,进一步迈向全链协同、动态反馈和自适应演化的数智赋能创新生态系统。

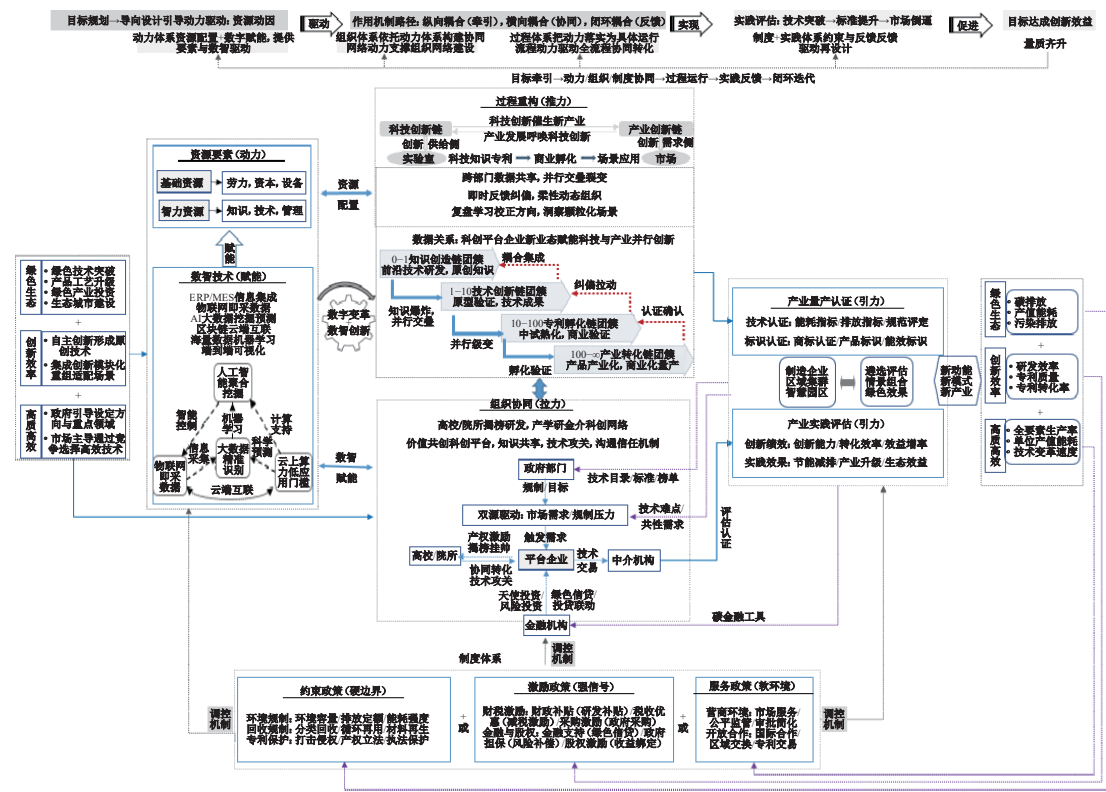


图 6 数字时代全链多维耦合协同的绿色技术创新生态系统

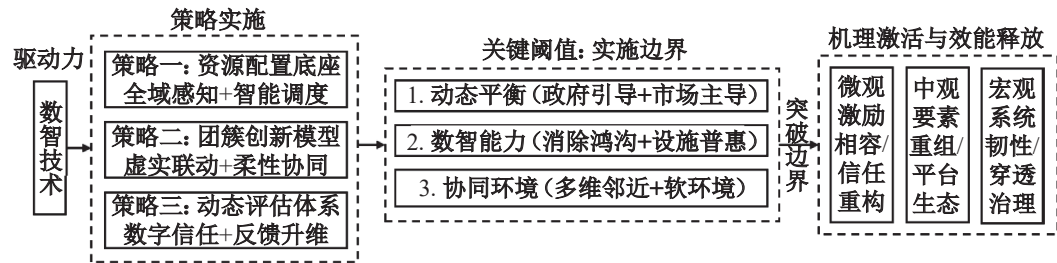


图 7 全链协同数智赋能绿色创新生态系统构建路径

1. 建设全域感知与智能调度的资源配置底座

绿色技术创新体系的高质量运行,首先取决于目标导向能否有效转化为动力驱动。战略目标、规划任务和政策导向只有进一步落实为精准的要害识别、资源匹配和动态调度,才能真正激活绿色技术创新的内生动能。绿色技术创新具有高投入、高不确定性、长周期和跨领域融合等特征(Wang等,2021;Fu等,2024),既需要资金、人才、知识、技术、数据和基础设施等多类要素共同支撑,也需要在研发攻关、中试验证、产业转化、场景应用和绩效反馈之间形成连续稳定的资源供给链条。若缺乏全域感知和数据贯通,政策目标容易在执行过程中转化为粗放式投入、分散化配置和重复性建设(Li等,2024),进而导致创新资源难以精准流向关键技术、关键主

体和关键场景(孟庆时等,2021;张明超等,2021)。因此,构建全域感知与智能调度的资源配置底座,是将目标牵引转化为动力驱动的基础性工程,也是提升绿色技术创新体系资源配置效率和系统响应能力的关键环节。

具体而言,应围绕绿色技术创新全链条建设多源异构数据贯通、跨主体协同和智能化调度的资源配置体系。一方面,需要整合研发投入、技术供给、人才结构、产业基础、市场需求、供应链协同、绿色绩效、碳排放数据和政策执行信息,形成覆盖研发端、生产端、市场端和治理端的绿色技术创新数据资源池,将分散在企业、高校、科研机构、金融机构、园区平台和政府部门中的数据资源转化为可识别、可分析、可匹配和可追踪的创新资源(谢康等,2023)。另一方面,应依托算法匹配、动态监测和智能辅助决策工具,识别不同区域、不同行业 and 不同主体在技术需求、资金需求、人才需求、场景需求和政策需求上的差异,推动创新资源由部门分割配置和项目制分散投入转向面向全链条的协同配置(安同良和闻锐,2024;陈博潮和王贤彬,2025)。对于地方政府而言,资源配置底座不宜停留在项目申报系统或数据展示平台层面,而应更多服务于区域绿色技术需求识别、产业场景开放、企业能力画像和政策资源精准投放,使国家层面的战略目标与地方产业结构、资源禀赋和绿色转型任务有效衔接。由此,资源配置底座不仅能够减少政策供给与创新需求之间的错配,降低重复建设和低效供给,还能够提升绿色技术创新体系对战略目标、产业需求和环境约束变化的敏捷响应能力(杨震宁和袁梓晋,2025),为后续组织协同、过程运行和实践评估提供稳定的数据基础与资源支撑。

2. 推行虚实联动与并行交叠的团簇生态创新组织

绿色技术创新体系的持续运行,不仅取决于动力驱动体系能否形成充足的资源供给,更取决于这些资源能否嵌入高效的组织协同网络,并进一步转化为过程运行能力。绿色技术创新具有跨学科、跨主体、跨场景和跨周期特征,单一企业、单一高校或单一科研机构难以独立完成从基础研究、技术开发、中试验证到产业化应用的全过程转化。若管理实践仍停留在支持单个项目、单个主体或单一研发环节,容易造成资源供给与转化需求脱节,难以形成持续性的创新合力。因此,应推动绿色技术创新组织方式由单点突破和线性推进,转向多主体参与、多环节并行和多链条耦合的团簇式生态创新组织,使资金、人才、技术、数据和场景资源在组织协同中实现再组合、再配置和再增值(Kivimaa等,2019)。

所谓虚实联动,并不是简单建设线上平台或数字系统,而是推动线下实体创新载体与线上数智协同空间深度耦合。线下层面,应依托产业园区、创新联合体、重点实验室、中试基地、应用场景和示范工程,形成真实技术攻关、工艺验证、场景试验和产业应用的实体支撑。线上层面,应依托数字平台、数据空间、数字孪生系统、协同研发平台和智能合约机制,提升任务分解、需求匹配、过程监测、成果确权和风险共担能力(Lumineau等,2021)。通过虚实联动,绿色技术创新可以突破传统“研发—转化—产业化”的单向递进逻辑,形成研发端、产业端、资本端、场景端和治理端同步参与、实时反馈、动态调整的并行交叠机制,从而提高创新过程对市场需求、技术瓶颈和绿色绩效约束的响应速度(谢家平等,2017)。

在具体推进中,应围绕绿色技术创新链条,促进创新链、产业链、资金链、人才链和应用场景链协同耦合。政府可通过揭榜挂帅、联合攻关、场景开放、中试平台建设和绿色金融工具,引导企业、高校、科研院所、金融机构、中介组织和应用场景方围绕关键绿色技术形成任务共同体。企业应发挥需求牵引、场景验证和产业转化主体作用,高校与科研机构应强化基础研究和供给,金融机构应围绕绿色技术研发、中试和产业化阶段提供分层次风险支持,中介组织和平台机构则应承担技术评估、成果对接、标准认证和知识产权服务等功能(冯启良等,2025)。对于地方层面而言,产业园区、科创平台和城市群协同网络可以成为团簇生态创新组织的重要

载体,但其功能不应局限于空间集聚和平台展示,而应进一步承担场景开放、数据协同、中试验证、供需匹配和成果扩散等系统性功能。由此,组织协同不再停留于主体聚集和资源拼接,而是进一步服务于研发攻关、成果孵化、技术转化和规模化应用全过程,推动动力驱动体系中的资源投入转化为组织协同能力,并最终转化为过程运行效率。

3. 健全数字信任支撑的动态评估与标准迭代优化机制

数智赋能绿色创新生态系统能否形成闭环运行,关键在于实践评估体系能否从事后验收环节转变为全过程反馈枢纽。前文政策语义网络显示,实践评估体系与主干链条之间的连接相对不足,表明当前政策体系仍更重视前端目标部署、中端资源投入和过程推进,而对后端评价反馈、绩效验证和动态修正的关注仍显不足。若实践评估仅停留在项目结题、指标验收和阶段性检查层面,绿色技术创新就容易陷入“重立项、轻转化”“重投入、轻绩效”“重建设、轻反馈”的路径惯性。因此,未来应将实践评估嵌入绿色技术创新全过程,使其不仅检验创新结果,更能够反向作用于目标调整、制度优化、资源重配和过程纠偏,推动体系形成自我诊断、自我修正和自我迭代能力。

动态评估机制的核心,不在于简单增加评价指标数量,而在于推动评价逻辑由投入导向转向绩效导向和反馈导向。未来的实践评估不应仅关注项目数量、平台数量、研发投入、专利产出等显性指标,更应聚焦绿色技术创新是否真正形成环境绩效、经济绩效和产业绩效的协同改善(Yan等,2023)。具体而言,应重点考察技术应用是否有效降低碳排放和资源消耗,是否提升绿色生产效率和创新转化效率,是否形成可复制、可推广、可规模化的产业应用场景,是否能够获得市场认可并实现持续扩散。只有将市场应用、绿色绩效、碳足迹、技术认证、产业转化和政策执行结果纳入统一评价框架,实践评估才能从静态结果测度转变为动态过程监测,从单向绩效考核转变为支撑政策学习和系统优化的反馈机制。

数字信任机制的引入,则是提升实践评估可信度和反馈效能的重要支撑。绿色技术创新评价往往面临数据不透明、绿色绩效难核验、企业漂绿行为难识别、跨主体协作责任难追溯以及标准更新滞后等问题,容易削弱评价结果的公信力和政策反馈价值。对此,应依托区块链可信存证、物联网动态监测、碳足迹追踪、绿色认证和数据共享治理机制,建立覆盖研发、中试、生产、应用和回收环节的可信数据链条,使绿色绩效可记录、可追溯、可核验(谢家平等,2015)。更重要的是,评价结果不应停留于合规证明或绩效排名,而应进一步嵌入标准迭代优化和政策迭代过程。对于实践中证明有效的绿色技术路径,应及时转化为技术标准、认证规范和推广目录;对于评估中暴露出的制度失灵、资源错配和转化堵点,应反向推动政策工具优化、资金支持调整和资源配置重构(安同良和闻锐,2024)。地方政府可在此过程中承担试点探索和场景反馈功能,通过园区、产业集群和重点企业的持续监测,将地方实践中的有效经验和共性问题及时反馈至标准制定、政策修订和资源调度过程。由此,数字信任支撑的动态评估与标准迭代优化机制,能够将实践评估从末端验收工具升级为连接过程运行、目标调整、制度优化和资源重配的关键枢纽,进而弥补数智赋能绿色技术创新体系由单向推进变为动态闭环的薄弱环节。

4. 把握政府—市场关系,提升数字能力并优化协同环境

全链协同的数智赋能绿色创新生态系统并不会因数智技术嵌入而自动形成,其有效运行还取决于制度安排、主体能力与协同环境之间的匹配程度。绿色技术创新具有外部性强、周期较长、不确定性高和公共属性突出的特点,完全依靠市场机制容易导致基础研究投入不足、绿色收益内部化不足和长期技术攻关激励不足;但若政府过度替代市场,又可能引发资源配置行政化、项目选择同质化和创新效率下降等问题。因此,应在政府有为引导与市场有效主导之间形成动态平衡。政府主要承担战略方向设定、规则标准供给、公共平台建设、基础能力培育和风

险分担功能,市场则应在需求发现、价值筛选、资源配置、商业化验证和产业扩散中发挥决定性作用。只有避免政府替代市场和市场失灵无人修正两个极端,才能为绿色技术创新体系提供稳定而富有弹性的制度保障(戚聿东和朱正浩,2022;贾利军和陈恒烜,2021)。

同时,数智赋能绿色创新生态系统的建设必须充分关注数字能力边界。数智技术能否真正转化为绿色技术创新效能,并不只取决于平台建设和技术工具供给,还取决于企业、园区、产业链和区域层面的数据采集能力、数据治理能力、算法应用能力、平台接入能力和数字化吸收能力(He和Sun,2025;Wang和Cui,2026)。若底层数字基础设施不完善、数据标准不统一、主体数字能力差异过大,数智赋能不仅难以有效发生,甚至可能进一步扩大地区之间、企业之间和产业链环节之间的能力差距。因此,未来应同步推进数字基础设施普惠化、公共数据资源规范开放、企业数据治理能力提升和中小企业数字化转型支持,避免数智赋能治理停留于高端平台建设和示范工程展示,而难以真正嵌入绿色技术创新的日常运行过程。

此外,还需要进一步优化支撑多主体长期协作的协同环境。绿色技术创新不仅依赖地理集聚和产业集群,更依赖制度邻近、组织邻近、认知邻近与信任基础(张利飞,2009)。若缺乏稳定的知识产权保护、清晰的数据共享规则、合理的收益分配机制、统一的技术标准体系和有效的跨区域协作机制,即便主体在空间上集聚,也难以形成真正意义上的协同创新生态。因此,数智赋能绿色创新生态系统建设不能停留在建园区、建平台、上系统的表层推进,而应更加重视规则相容、目标一致、标准互认、信任稳定和利益协调。在中央与地方关系上,应避免简单“一刀切”的平台建设和指标考核,而应在国家统一标准、数据规范和制度框架下,允许地方结合产业基础、资源禀赋和绿色转型压力开展差异化试点。只有在制度环境、主体能力和协同条件共同完善的基础上,数智赋能才能从技术工具转化为系统治理能力,推动绿色技术创新体系实现更加稳定、持续和高效的全链协同(Lee和Lee,2021)。

5. 释放微观、中观与宏观层面的系统效能

全链协同数智赋能绿色创新生态系统的建设,最终目标并不只是提升某一环节的运行效率,而是推动数智赋能绿色技术创新体系从要素投入型、项目驱动型运行模式转向能够自我诊断、自我修正和自我迭代的动态演化系统。其系统效能并非单纯体现为技术工具的应用扩展,而是通过数据贯通、平台协同、可信评价和制度反馈,在微观主体、中观网络与宏观治理三个层面形成联动释放。

在微观层面,全链协同有助于重塑创新主体的激励相容与信任机制。绿色技术创新主体往往面临投入周期长、收益不确定、绿色绩效难以核验和合作风险较高等现实约束,容易削弱企业持续投入绿色创新的积极性。通过数据透明、碳足迹记录、绿色认证、可信存证和智能合约等机制,可以降低信息不对称和机会主义行为空间,增强绿色创新投入、绿色绩效产出与市场回报、政策支持和金融资源之间的可验证连接(Lumineau等,2021)。由此,绿色技术创新不再只是政策压力下的被动响应,而能够逐步转化为企业提升竞争优势、获取资本支持和塑造绿色声誉的主动选择。在中观层面,全链协同有助于重构要素配置秩序与平台生态。传统绿色技术创新容易受制于技术供给、资本投入、产业场景和服务支撑之间的分割状态,导致创新成果难以跨越从实验室到市场应用的转化断点。依托数字平台、团簇式生态创新组织和跨主体数据协同机制,可以推动技术、资本、人才、数据、场景和专业服务机构之间形成高效连接,促进产学研金介深度耦合。由此,绿色技术创新能够由单个主体的孤立突破,转向多主体共同参与、资源动态匹配和链群协同演进的平台化生态重构,进一步提升创新链、产业链、资金链、人才链和场景链之间的耦合效率(谢家平等,2017;吴超楠等,2024)。在宏观层面,全链协同有助于提升绿色技术创新体系的系统韧性与穿透治理能力。面对技术路线不确定、市场需求波动、产业链风险传

导和政策执行偏差等复杂情境,传统静态治理方式往往难以及时识别问题并作出动态调整。通过跨区域数据平台、产业链运行监测、绿色绩效追踪和政策反馈机制,可以增强政府部门对绿色技术创新全过程的态势感知、风险识别和政策校准能力,使政策资源能够更加精准地投向关键领域、薄弱环节和战略性场景。由此,宏观治理不再仅仅依赖事前规划和事后评估,而能够形成事前预警、事中调适和事后反馈相结合的穿透式治理能力。

总体来看,微观层面的激励相容与信任重塑,中观层面的要素配置与平台生态重构,以及宏观层面的系统韧性与穿透治理能力提升,共同构成全链协同数智赋能绿色创新生态系统的效能释放路径。数智赋能绿色技术创新的关键并非单纯扩大技术应用范围,也不是简单提高某一环节效率,而是通过全链条数据贯通、组织协同、过程反馈和制度校准,推动绿色技术创新体系从线性推进转向动态闭环,从局部优化转向系统跃迁,从政策推动型系统转向自适应演化系统。因此,构建全链协同的数智赋能绿色创新生态系统,关键并不在于数智技术应用范围的简单扩张,也不在于政策工具数量的机械叠加,而在于围绕绿色技术创新体系的主干传导链条与反馈薄弱环节,推动资源配置、组织协同、过程运行、实践评估与制度保障之间形成更高水平的动态耦合。未来治理应以数据贯通夯实资源配置基础,以平台协同重塑多主体组织关系,以过程联动提升成果转化效率,以可信评价强化反馈修正能力,以制度保障稳定系统运行预期,从而推动绿色技术创新体系由“目标牵引—资源投入—过程推进”的前向链式运行,进一步转向“数据贯通—协同联动—评价反馈—动态修正”的闭环演化模式。

六、研究结论与未来展望

本文基于2019—2025年国家及地方层面数智赋能绿色技术创新相关政策文本,综合运用主题识别、语义归类与方向性机制关系抽取方法,构建了数智赋能绿色技术创新体系的政策语义有向网络。研究发现,数智赋能绿色技术创新并非数智技术应用与政策工具供给的简单叠加,而是由目标导向、动力驱动、组织协同、过程运行、实践评估和制度保障等子系统共同构成的复杂治理体系。从网络结构看,目标导向引领动力驱动,调整动力配置实现组织协同,保障过程平稳运行,表明现有政策体系已形成由战略目标牵引资源配置、主体协同与创新过程推进的前向主干链条。相比之下,实践评估体系与其他子系统之间的连接相对不足,说明评价反馈、数据回流与动态修正机制尚未充分嵌入绿色技术创新全过程。由此可见,当前数智赋能绿色技术创新体系呈现较为明显的重执行、轻反馈的结构性特征,也就是说,政策语义网络已形成较强的前向推进链条,但尚未形成以实践评估为支点的反馈调适和闭环演化机制。

本文理论贡献主要体现在两个方面。一方面,将数智赋能绿色技术创新置于多子系统耦合的政策语义网络中加以理解,突破了既有研究中对数智技术赋能效应的单点化解释,有助于从系统结构层面揭示数智技术、资源配置、组织协同、过程运行与制度保障之间的内在关联。另一方面,在政策文本研究中引入“主题识别—语义归并—方向性机制关系抽取—专家座谈校验与案例回访—有向网络构建”的分析路径,形成由人工智能语义计算与专家智慧校验共同支撑的双源互动识别路径。不仅关注政策文本“说了什么”,也进一步揭示不同政策功能范畴之间“如何连接”与“如何传导”。这一方法为识别复杂政策体系中的主干链条、结构性弱连接和潜在反馈缺口提供了可操作的分析框架。进一步看,本文以政策文件作为基础材料,从中国制度背景、发展阶段、治理经验和实践中提炼数智赋能绿色技术创新体系的结构逻辑。由此,政策文本不仅是研究对象,更是从制度设计层面建构中国自主知识体系的重要素材,对其进行系统解读,有助于将中国绿色转型与数智治理实践转化为具有本土解释力的学术概念和理论框架。

基于上述发现,未来数智赋能绿色技术创新政策的优化重点不应停留于增加数智技术应

用或强化单一政策工具供给,而应转向构建全链协同、动态反馈和持续修正的数智赋能绿色创新生态系统。具体而言,应进一步推动数字基础设施、数据要素流通和智能算法嵌入资源配置、组织协同与过程运行环节,提升创新链条的协同效率;同时,应重点补强实践评估体系,建立覆盖绿色技术研发、成果转化、应用扩散和绩效反馈全过程的数据监测与评价机制,使末端实践结果能够及时回流至前端目标设定与政策调整之中,推动绿色技术创新体系由前向执行型向反馈闭环型转变。未来研究可进一步结合地方政策绩效数据、典型案例或动态仿真方法,考察不同地区数智赋能绿色技术创新体系的运行差异和政策优化路径。

主要参考文献

- [1]安同良, 闻锐. 以互联式创新网络枢纽节点为靶向的中国创新激励政策——基于组合式知识生产函数的探讨[J]. 经济研究, 2024, 59(10): 94-112.
- [2]陈博潮, 王贤彬. 创新网络、关键核心技术与研发资源配置——基于跨区域跨技术知识溢出网络模型[J]. 数量经济技术经济研究, 2025, 42(9): 157-179.
- [3]程郁, 王协昆. 创新系统的治理与协调机制——芬兰的经验与启示[J]. 研究与发展管理, 2010, 22(6): 112-120.
- [4]丁志帆. 数字经济驱动经济高质量发展的机制研究: 一个理论分析框架[J]. 现代经济探讨, 2020, (1): 85-92.
- [5]董盈厚, 马亚民, 董馨格, 等. 金融资产配置与盈余价值相关性——“有效市场”抑或“功能锁定”[J]. 会计研究, 2021, (9): 95-105.
- [6]冯启良, 安琪, 方炜. 数字技术赋能中国高技术制造企业关键核心技术创新的影响研究[J]. 管理学报, 2025, 22(4): 690-699.
- [7]洪银兴, 任保平. 数字经济与实体经济深度融合的内涵和途径[J]. 中国工业经济, 2023, (2): 5-16.
- [8]洪银兴, 王坤沂. 新质生产力视角下产业链供应链韧性和安全性研究[J]. 经济研究, 2024, 59(6): 4-14.
- [9]胡强, 谢吉青, 张广思, 等. 政府激励科创平台协同创新的契约设计——基于双重信息不对称视角[J]. 中国管理科学, 2026, 34(1): 153-166.
- [10]黄凯南, 乔元波. 产业技术与制度的共同演化分析——基于多主体的学习过程[J]. 经济研究, 2018, 53(12): 161-176.
- [11]贾利军, 陈恒桓. 数字技术助力中国技术赶超: 理论逻辑与政策取向[J]. 政治经济学评论, 2021, 12(6): 135-157.
- [12]蒋伏心, 王竹君, 白俊红. 环境规制对技术创新影响的双重效应——基于江苏制造业动态面板数据的实证研究[J]. 中国工业经济, 2013, (7): 44-55.
- [13]江小涓, 靳景. 数字技术提升经济效率: 服务分工、产业协同和数实共生[J]. 管理世界, 2022, 38(12): 9-25.
- [14]焦豪, 杨季枫. 数字技术开源社区的治理机制: 基于悖论视角的双案例研究[J]. 管理世界, 2022, 38(11): 207-231.
- [15]孔令丞, 王悦, 谢家平. 长三角区域一体化扩容、协调集聚与区域创新[J]. 财经研究, 2022, 48(12): 34-47.
- [16]李响, 严广乐, 蔡靖婧. 多层次治理框架下的区域科技创新系统治理——理论、实践比较及对中国的启示[J]. 研究与发展管理, 2013, 25(1): 104-114.
- [17]鲁若愚, 周阳, 丁奕文, 等. 企业创新网络: 溯源、演化与研究展望[J]. 管理世界, 2021, 37(1): 217-233.
- [18]孟炯, 田雪, 郭春霞. 实现价值共创的C2B数智定制协同治理路径研究[J]. 南开管理评论, 2024, 27(6): 62-73.
- [19]孟庆时, 余江, 陈凤, 等. 数字技术创新对新一代信息技术产业升级的作用机制研究[J]. 研究与发展管理, 2021, 33(1): 90-100.
- [20]戚聿东, 朱正浩. Malerba产业创新系统理论述评及中国情境下的研究展望[J]. 当代经济科学, 2022, 44(1): 39-54.
- [21]全利平, 蒋晓阳. 协同创新网络组织实现创新协同的路径选择[J]. 科技进步与对策, 2011, 28(9): 15-19.
- [22]权小锋, 李静蕾. 人工智能与企业协同创新——基于国家新一代人工智能创新发展试验区的准自然实验[J]. 经济研究, 2025, 60(8): 72-93.
- [23]宋德勇, 朱文博, 丁海. 企业数字化能否促进绿色技术创新?——基于重污染行业上市公司的考察[J]. 财经研究, 2022, 48(4): 34-48.
- [24]吴超楠, 袁野, 陈燕华, 等. 数字技术创新链与产业链的融合升级研究——以新一代人工智能为例[J]. 科学管理研究, 2024, 42(1): 74-84.
- [25]谢吉青, 周昱希, 谢家平. 市场导向下数字赋能绿色创新体系构建——多政策文本扎根与机器学习聚类研究[J]. 上海财经大学学报, 2025, 27(5): 108-122.

- [26]谢家平, 孔詠炜, 梁玲, 等. 自主创新的科创平台治理因素机理: 扎根理论质性研究[J]. *上海财经大学学报*, 2019, 21(6): 64-80.
- [27]谢家平, 孔詠炜, 张为四. 科创平台的网络特征、运行治理与发展策略——以中关村、张江园科技创新实践为例[J]. *经济管理*, 2017, 39(5): 36-49.
- [28]谢家平, 孔令丞, 梁玲. 数字时代市场导向下中国绿色技术创新体系构建研究[J]. *当代经济管理*, 2022, 44(12): 18-26.
- [29]谢家平, 梁玲, 龚海涛. 物联网环境下面向客户价值的商业模式变革[J]. *经济管理*, 2015, 37(11): 188-199.
- [30]谢家平, 张广思, 胡强, 等. 科创平台服务供应链定价策略——平台“烧钱”还是引流联盟?[J]. *管理科学学报*, 2024, 27(8): 23-45.
- [31]谢家平, 赵俊杰, 谢吉青. 数智化转型与企业新质生产力发展[J]. *经济经纬*, 2025, 42(1): 93-105.
- [32]谢康, 胡杨颂, 刘意, 等. 数据要素驱动企业高质量数字化转型——索菲亚智能制造纵向案例研究[J]. *管理评论*, 2023, 35(2): 328-339.
- [33]熊婷燕, 徐晔. 碳排放权交易政策对减排效应的影响研究——数字经济和地方政府环境注意力的调节作用[J]. *数量经济研究*, 2025, 16(4): 135-160.
- [34]徐可, 何桢, 王瑞. 技术创新网络的知识权力、结构权力对网络惯例影响[J]. *管理科学*, 2014, 27(5): 24-34.
- [35]杨震宇, 袁梓晋. 数字创新网络嵌入与关键核心技术攻关[J]. *中国工业经济*, 2025, (5): 156-173.
- [36]姚芳, 赵锴, 夏俊馨. 数字经济赋能绿色发展的可持续性机制研究[J]. *当代经济科学*, 2025, 47(4): 36-50.
- [37]余明桂, 范蕊, 钟慧洁. 中国产业政策与企业技术创新[J]. *中国工业经济*, 2016, (12): 5-22.
- [38]张成, 陆阳, 郭路, 等. 环境规制强度和生产技术进步[J]. *经济研究*, 2011, 46(2): 113-124.
- [39]张利飞. 高科技产业创新生态系统耦合理论综评[J]. *研究与发展管理*, 2009, 21(3): 70-75.
- [40]张明超, 孙新波, 钱雨. 数据赋能驱动智能制造企业C2M反向定制模式创新实现机理[J]. *管理学报*, 2021, 18(8): 1175-1186.
- [41]Carbonell J, Goldstein J. The use of MMR, diversity-based reranking for reordering documents and producing summaries[A]. *Proceedings of the 21st annual international ACM SIGIR conference on research and development in information retrieval*[C]. Melbourne: Association for Computing Machinery, 1998.
- [42]Fu T, Qiu Z X, Yang X Y, et al. The impact of artificial intelligence on green technology cycles in China[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2024, 209: 123821.
- [43]He Z W, Sun X B. How does data empower SMEs to achieve continuous innovation? Implications from China[J]. *Group & Organization Management*, 2025, 50(3): 756-798.
- [44]Kivimaa P, Boon W, Hyysalo S, et al. Towards a typology of intermediaries in sustainability transitions: A systematic review and a research agenda[J]. *Research Policy*, 2019, 48(4): 1062-1075.
- [45]Lee J, Lee K. Is the fourth industrial revolution a continuation of the third industrial revolution or something new under the sun? Analyzing technological regimes using US patent data[J]. *Industrial and Corporate Change*, 2021, 30(1): 137-159.
- [46]Li H C, Su Y Q, Ding C J, et al. Unveiling the green innovation paradox: Exploring the impact of carbon emission reduction on corporate green technology innovation[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2024, 207: 123562.
- [47]Lumineau F, Wang W Q, Schilke O. Blockchain governance—a new way of organizing collaborations?[J]. *Organization Science*, 2021, 32(2): 500-521.
- [48]Markard J. The life cycle of technological innovation systems[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2020, 153: 119407.
- [49]Turney P D, Pantel P. From frequency to meaning: Vector space models of semantics[J]. *Journal of artificial intelligence research*, 2010, 37(1): 141-188.
- [50]Wang K H, Umar M, Akram R, et al. Is technological innovation making world “Greener”? An evidence from changing growth story of China[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2021, 165: 120516.
- [51]Wang X Y, Cui H X. Digital empowerment for manufacturing enterprises transformation: An SAO framework analysis of legitimacy, availability and governance mechanisms[J]. *Industrial Management & Data Systems*, 2026, 126(5): 1509-1536.
- [52]Yan Z M, Sun Z, Shi R, et al. Smart city and green development: Empirical evidence from the perspective of green technological innovation[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2023, 191: 122507.

Research on the Digital-Intelligence-Empowered Green Technology Innovation System Identified via the BGE Text Embedding Model

Xie Jiaping¹, Ye Yichen¹, Xie Jiqing², Zhou Yuxi¹

(1. College of Business, Shanghai University of Finance and Economics, Shanghai 200433, China; 2. School of Management, Shanghai University of International Business and Economics, Shanghai 201620, China)

Abstract: As an institutionalized condensation of national governance experience, institutional cognition, expert decision-making consensus, and practical feedback, government policy documents provide an important textual entry point for observing the policy design logic and governance mechanism arrangements of China's green technology innovation system. They also constitute essential source materials for developing an independent knowledge system of green technology innovation grounded in Chinese practice. To move beyond the limitations of existing studies that mainly identify relevant influencing factors in a static manner, this paper integrates a text embedding model, namely BAAI General Embedding, with the Input-Process-Output system logic. It constructs an analytical framework that combines topic identification, semantic vectorization, directional mechanism relationship extraction, expert panel validation and case revisiting, and policy semantic directed network generation. The results show that the current policy system exhibits a structural pattern of "strong execution but weak feedback". A relatively clear forward backbone chain has formed among goal orientation, driving forces, organizational coordination, and process operation, whereas feedback connections from practical evaluation to goal optimization, institutional adjustment, and process improvement remain comparatively weak. Furthermore, digital-intelligence-empowered green technology innovation extends beyond the simple combination of digital-intelligence technology applications and policy instrument provision. It represents a complex governance system formed through the coupling of multiple subsystems. The contribution of this paper lies in characterizing the structural features of the digital-intelligence-empowered green technology innovation system from the perspective of policy semantic networks, proposing an operational method for identifying the backbone chains and feedback gaps of complex policy systems, and extracting from China's policy practice a governance mechanism framework for green technology innovation with local explanatory power.

Key words: digital-intelligence technologies; green technology innovation system; China's independent knowledge system

(责任编辑: 宋澄宇)