Asia Pacific Science Publications Co., Ltd.
亞太科學出版社
APSP

亚太社会科学
ISSN(O) : 3080-2121
ISSN(P) : 3080-2113
2026 年第 5 期

数智时代生态文明研究的知识生产转型

赵奉禹　蒋亚楠　何蕾*
（西南林业大学经济管理学院，云南昆明，650224）

版权说明：本文是根据知识共享署名 – 非商业性使用 4.0 国际许可协议进行发布的开放获取文章。允许以任何方式分享与复制，只需要注明原作者和文章来源，并禁止将其用于商业目的。

摘要：数字智能技术的应用正在改变生态文明研究的数据库、分析方法和组织模式，但这些变化能否转化为知识获取还取决于证据的解读和检验。以数字生态文明、社会生态系统、计算社会科学、开放科学和人工智能治理为研究对象，通过概念辨析、规范分析和理论演绎，构建了“工具赋权、范式重塑、治理校准”的分析框架。多源数据、智能分析和网络协同拓展了自然和社会过程的观测范围，为研究对象的重新界定、机制识别和基于平台的科学研究提供了条件。因此，范式层面的调整是以技术为支撑的，范式的建立仍以数据的代表性、尺度的内聚性和解释的有效性为基础。保留本地知识、评估技术和环境成本以及明确判断责任构成了这一转变的治理要求。基于上述关系，本文将人机协同放在具体的研究过程中，探讨了重大生态问题牵引下的数据与方法选择、证据相互验证、模型治理和情景反馈，并分析了林业院校跨学科平台长期知识生产的组织支撑。

关键词：数字智能技术；生态文明研究；知识生产；人机协同；绿色发展；科研治理
DOI：https://doi.org/10.62177/apss.v2i5.1801

一、引言

生态监测、环境政策分析、资源配置和公众参与中形成的数字资料，为生态文明研究提供了新的观察条件。遥感影像、连续监测记录和网络平台资料被纳入分析，自然语言处理与生成式人工智能也开始用于资料整理和信息提取。相关政策为这一变化提供了制度背景。《数字中国建设整体布局规划》将数字技术与生态文明建设深度融合纳入总体布局，提出推动数字生态文明建设取得积极进展[1]；《关于全面推

作者简介：赵奉禹，（1992–），男，博士，讲师，西南林业大学经济管理学院工商管理系，研究方向：人工智能管理学应用、跨境电商研究，E-mail：zhaofengyu@swfu.edu.cn；蒋亚楠，（2002–），女，硕士研究生，西南林业大学经济管理学院农村发展专业，研究方向：乡村产业发展，E-mail：jiangyanan2026@126.com；通信作者：何蕾，（1994–），女，博士，讲师，西南林业大学经济管理学院农林经济管理系，研究方向：数字经济研究，E-mail：helei@swfu.edu.cn。
基金项目：云南省教育厅科学研究基金项目 2026J0720。

进美丽中国建设的意见》要求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[2]；《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》进一步部署全方位、全领域、全地域的绿色转型[3]。本文所称数字智能技术，涵盖数字化采集、网络化连接、算法化处理和智能化生成等技术形式。其应用使更多自然与社会现象能够被记录，也使不同时间和空间尺度上的联系进入研究视野。

观察范围扩大，并不直接说明解释能力已经提高。资料经过概念界定、质量审查和理论解释，才能成为支持判断的证据；由此形成的结论还须在明确范围内接受检验。对数智技术的评价因此需要超出处理效率，考察证据的形成条件、解释依据及责任归属。知识生产视角关注的，正是这些环节之间的关系。

现有数字生态文明研究讨论了数字化与绿色化相互融合的文明形态及其发展困境[4]，并从中国式现代化、制度协同和技术赋能等方面解释其建设逻辑[5-7]。生态价值与公共利益也被作为审视技术创新方向的重要依据[8]。计算社会科学研究则关注计算方法对观察视角、研究设计和伦理要求的影响[9]，有关大数据的讨论进一步涉及认识论与研究范式的变化[10-11]。这些研究为本文提供了基础。本文在文献梳理、规范分析与逻辑演绎的基础上，将讨论集中于数智技术改变研究条件之后，数据生成、证据解释与责任结构如何相互衔接。分析首先区分工具条件的改善与研究范式的调整，再考察治理约束在其中的作用，据此讨论可验证、可复现并能回应现实问题的知识生产机制。林业高校兼具生态科学、资源管理和人文社会科学基础，其组织条件也被纳入这一分析。

二、数智技术作用于生态文明知识生产的理论基础与分析框架

（一）生态文明研究的知识生产特征

生态文明研究中的自然变化，与生产生活方式、利益分配和治理制度相互关联。生态状态、资源环境与空间格局需要放在社会过程中解释，相关问题因而跨越生态科学、经济学、管理学、法学和哲学的边界。耦合人类与自然系统研究将人口、经济、技术、制度和自然过程联系起来，强调系统变化难以由其中一端单独解释[12]。社会生态系统框架进一步关注资源系统、资源单元、治理系统与行动者的多层互动[13]。沿着这一思路，知识形成涉及两种判断：自然与社会的联系如何获得证据支持，以及制度安排依据何种价值标准得到评价。前者要求资料与解释对应，后者需要说明评价立场，避免由经验事实直接推出规范结论。

（二）生态文明知识生产的过程—层次模型

本文所称“知识生产”，涵盖问题提出、资料获取、概念建构、证据分析、解释形成、成果验证及社会转化。技术可介入其中任何环节，其影响却未必相同。“过程—层次”模型因此将知识形成的环节与技术作用的层次结合起来，考察影响发生的位置及其性质。

就过程而言，问题设定明确生态矛盾、时空范围与利益相关者，资料选择和数据生成据此展开。经过质量控制的资料被置于概念和理论框架中分析，经验关联才可能获得机制解释。解释再通过不同来源、方法和场景的比较接受检验。成果进入政策与社会实践后，新的观察和反馈可能暴露原有假设的局限，要求问题或解释得到修正。问题设定、证据形成、机制解释、结果检验和公共应用由此具有先后联系，也保留了返回前一环节的可能。

就作用层次而言，工具层涉及数据采集、信息处理和科研协作条件，影响观察与处理能力；范式层涉及对象界定、概念建构、解释逻辑和评价标准，关系到何种资料被视为证据，以及证据如何支持学术判断；治理层规定技术使用与成果应用的价值取向、伦理要求、权利边界和责任归属。三个层次在分析上可以区分，在研究中相互制约。工具条件影响可观察范围，认识规则决定解释方式，规范要求则持续约束问题选择、技术使用和结论应用。

这一模型考察技术条件经由研究过程转化为知识的方式。数据规模和模型性能表明处理能力的变化，却不足以证明解释成立。工具与问题的适配、材料对解释的支持及同行复核，是判断结论可信范围的依据；伦理审查则规定研究与应用的规范边界。知识质量需要在这些关系中评价，单项技术指标只能提供部分依据。

（三）数智技术介入生态文明知识生产的作用机理

工具性赋能向范式性重塑的转变，需要经过研究实践。资料、方法与协作条件改善，首先扩展了研究范围；当这些变化进一步影响问题提出、对象界定或解释规则时，范式调整才有具体内容。这里的“重塑”指研究方式及其规则的变化，并不意味着技术一经采用，既有范式便被整体替代。资料选择、模型解释及跨学科共同判断，构成两者衔接的实际过程。治理约束贯穿其中，既限定技术的使用方式，也影响哪些问题和后果受到关注。

三个层次的研究任务，可依其在知识形成中解决的问题加以区分。

工具层处理资料与方法的可获得性。多源数据、智能分析及网络化协作扩展了证据形成的条件，改变了可观察范围与可执行任务。

范式层处理证据的解释规则。自然与社会的耦合关系被纳入对象界定后，机制识别和平台协同需要围绕共同问题展开，概念、解释方式及组织规则也可能调整。

治理层处理判断与责任的配置。人机分工、证据互证、合规审查和场景反馈用于检验技术使用，使研究者、平台与应用主体的责任能够被追溯。

三个层次的联系也限定了转型的成效。概念口径不一致时，更多资料未必支持更好的解释；模型结果未经复核便被应用，处理效率提高还可能扩大偏差。知识增益应表现为证据与结论的联系更清楚、解释范围更明确，不能只由数据规模、模型精度或成果数量衡量。

知识质量评价可从问题的生态与社会意义出发，考察资料对关键主体和时空尺度的覆盖、关联与机制的区分，以及价值判断的依据，再以同行复核和实践反馈检验结论。图 1 概括了技术条件、研究对象、解释方式与组织形态的联系。图中的价值判断与治理约束贯穿研究各环节，并不限于成果应用。

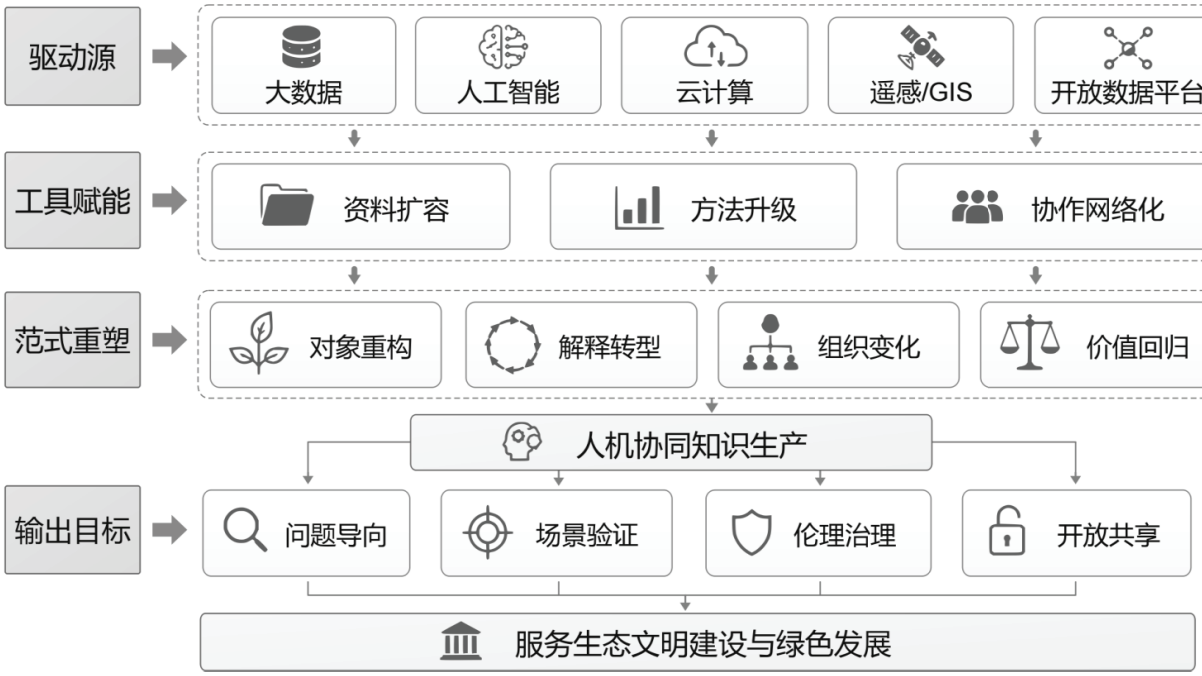


图 1　数智时代生态文明研究知识生产转型框架

三、数智技术对生态文明知识生产的工具性赋能

（一）资料基础由离散记录转向多源动态感知

统计年鉴、问卷访谈、样地调查、政策文本和阶段性环境监测，构成生态文明研究的重要资料来源。受调查周期和观测尺度限制，部分生态变化及其社会响应难以被连续记录。数智技术补充了这一观察条件。土地利用、植被覆盖和生态修复过程可通过卫星遥感与无人机影像追踪，空气、水体、土壤及生物多样性相关变化可由传感器和物联网持续监测。政务开放数据、企业环境信息与平台记录，则为政策执行、公众感知和绿色行为提供资料。不同来源相互补充后，自然变化与社会活动得以在更长时间和更精细空间尺度上被共同考察。

资料的互补性取决于各自能够回答的问题。遥感记录有助于识别空间格局，地方主体的行为选择却往往需要通过调查和访谈解释；政策文本与舆情资料反映了治理议程和社会认知，其含义又受到材料形成过程和平台用户结构的影响。因此，多源资料的整合需要先说明来源、适用问题及覆盖范围，再进行时间和空间匹配。若选题主要由现成数据决定，易于计算的现象可能被反复研究，难以标准化却具有解释价值的地方材料则容易被排除。

数据差异还需要与记录方式的变化相区分。同一地区的遥感记录发生变化，既可能源于生态过程，也可能由传感器、分辨率或分类规则的调整造成。行政统计口径、平台接口和推荐机制的变化同样会影响记录。多源资料被合并使用时，时间可比性与来源可追溯性因此成为证据审查的前提。除最终分析表格外，原始来源、采集时间、转换规则、缺失值处理及版本变化均应留有记录，并通过抽样核验、交叉比对和不确定性分析检查质量。这些记录使观测差异的来源可以被复核。

（二）分析方法由单一处理转向智能复合分析

智能分析已被用于地球系统和野生动物保护等研究。深度学习与过程模型相结合，使海量观测中的时空模式能够被识别，并在物理过程约束下解释[14]。机器学习也被用于传感器记录的物种识别和大尺度监测，但标签质量、误差来源与模型外推范围仍需由领域知识审查[15]。机器学习、自然语言处理、知识图谱、复杂网络和智能模拟由此扩展了大规模、非结构化及高维资料的处理能力。在哲学社会科学研究中，这些技术可辅助检索、编码、关系识别和假设生成；概念含义、机制解释与规范判断的依据，仍需在理论分析中确定。

政策议题可通过文本模型识别，生态效益与社会成本的区域差异可由空间模型比较，治理方案的后果可借助情景模拟考察。这些分析各有解释范围，预测准确并不等于因果机制得到确认，也不能直接支持价值选择。人工智能与可持续发展目标研究表明，技术在促进目标实现的同时，也受到能源消耗、偏见和治理问题的制约[16]。解释干预后果时，因果图、准实验、过程追踪或案例比较仍需按问题选择。时间序列因果研究同样要求审查时间结构、混杂因素与机制假设[17]。算法关联只有被置于这些条件中，其解释意义才能得到判断。

生成式人工智能可辅助文献初筛、摘要整理、编码建议和研究表达，也可能提示跨学科概念的联系。输出受到训练语料、提示方式和上下文窗口影响，表述连贯并不意味着事实和文献均可核实。关键概念、数据与引文应返回原始材料查证，自动分类结果还需接受人工复核和一致性检验。来源核查确认材料真实性，理论审查判断其能否支持研究问题。机器建议经过这些审查，才适合被纳入论证。

（三）科研协作由个体分工转向平台化协同

生态文明问题所需的资料与方法，常分散在自然科学、工程技术和人文社会科学之中。借助数字平台和共享数据库，遥感、生态学、经济学、法学、管理学及哲学研究可以围绕共同问题组织材料。版本

控制和远程协作工具，使数据使用、模型调整与研究过程中的分工得到记录。平台由此提供了跨学科协作的技术条件，研究成果也得以以多种形式保留。除论文外，数据集、代码、指标体系、模型文档和政策工具均可成为后续研究引用与复用的对象。

共同平台上的资料仍需经过概念和解释层面的协调。以生态恢复成效评价为例，植被与物种指标、成本收益、权责结构和公平性分别承载不同学科的关注，仅将这些数据汇集起来，尚不足以形成共同判断。研究问题的定义、概念口径、时空尺度和证据标准，需要在协作中得到明确。共同的数据字典与概念映射可减少材料解释的分歧，贡献说明和争议解决机制则用于处理判断权限及责任分配。协同质量因而取决于这些关系能否被协调，而不只是参与人数或学科数量。

平台的持续运行还受到项目周期的约束。生态监测资料与模型在结项后仍可能被使用，经费和人员安排若同步终止，数据更新、版本记录及责任追溯便难以维持，既有成果也可能失去复用条件。因此，数据策展、软件维护、权限管理和材料归档需要被纳入稳定的岗位与经费安排，相关贡献亦应在评价中得到承认。表 1 归纳了工具性赋能的主要表现及其发挥作用的边界。

表 1　数智技术对生态文明研究知识生产的工具性赋能

知识生产环节	数智技术介入方式	主要增益	主要边界与风险
资料获取	遥感、传感器、政务开放数据、平台数据、多模态采集	扩大时空尺度，形成连续观测，支持自然与社会数据匹配	代表性不足、尺度错配、平台依赖、敏感信息泄露
分析方法	机器学习、自然语言处理、知识图谱、因果分析、情景模拟	提升非结构化资料处理、模式识别、假设生成与方案比较能力	相关替代因果、模型黑箱、外推失效、技术环境成本
科研协作	共享数据库、云计算、版本控制、开放科学与跨机构平台	促进跨学科协同、材料复用、过程追踪和成果多样化	概念口径冲突、产权与责任不清、资源集中和能力分化

资料来源：根据相关文献整理。

四、数智技术对生态文明研究范式的重塑

（一）研究对象：由孤立环境要素转向自然与社会耦合系统

研究对象的调整，始于对自然变化与社会过程之间联系的重新界定。

污染、资源利用、产业发展和公众行为若被分离处理，其反馈与制约就难以得到完整解释。多源数智数据使自然过程、社会活动和政策干预能够在相近时空条件下被比较。国土空间规划研究已讨论数字生态文明背景下从静态用地配置向多源感知、动态评估和协同治理的拓展[18]。对生态文明研究而言，分析单位可由单个环境要素延伸到自然与社会的关系，并纳入跨区域、跨尺度联系。对象边界由研究问题和关系结构界定，不再仅由某类数据的覆盖范围决定。

对象界定也可能受到可计算性限制。传感器或平台记录的现象容易进入模型，生态文化、地方经验、代际责任与弱势群体的感受，却未必能被转为标准化数据。数字记录只是生态文明现实的部分呈现，其范围还受采集设备、分类规则和平台机制影响。田野调查、历史材料、公众参与与规范分析可补充数字证据难以覆盖的内容，使重要性判断不致被技术可见性替代。这些材料的价值应由解释需要确定，而非仅以是否适合计算衡量。

观察尺度的选择同时影响生态收益与转型成本的评价。同一项生态工程在流域尺度上可能表现为总体改善，在村庄和家庭层面却可能对应不同的生计成本与发展机会。区域平均值也未必反映边疆、山区和少数群体的具体处境。对耦合系统的解释因此需要保留分布差异，说明哪些地区和群体获得收益或承担成本，以及这种分布如何随时间变化。尺度在这里不仅是数据匹配问题，也关系到哪些主体的处境被

纳入研究判断。

（二）解释方式：由静态描述转向机制识别与动态反馈

机制识别要求说明观察到的关系在何种条件下成立。大规模时空数据可揭示生态变化的异质性，机器学习可筛选潜在关联，模拟模型可考察规则变化下的系统演化；这些结果为解释提供线索，却尚未充分说明变化的原因。算法识别的异常与关联需要被转化为理论问题，机制假设再通过适当的定量或定性设计接受检验。解释形成后，其适用范围还应在具体地区和群体中复核。模式发现、理论解释、因果检验与场景复核由此构成相互校验的关系，使描述性结果获得有条件的机制解释。

在这一过程中，规模化检索、特征提取、模式识别与情景计算可由机器辅助完成。公共价值的判断、概念界定、因果假设审查和反例处理则须由研究者承担，解释及其可能后果还应接受研究共同体与利益相关者的审议。技术可能强化工具理性、平台权力和效率偏好，明确判断责任因而具有规范意义。数字生态文明异化风险研究提出，应以人的全面发展和生态正义规范技术路径[19]。对应到知识生产，模型输出须被置于可讨论、可质疑的论证之中，结论责任也不能因计算任务交由机器处理而转移。

政策实施后的连续监测，使原有指标、机制假设和干预方案可以依据实际后果得到修正。知识生产由此延续至成果应用之后，解释也在新的情境中接受检验。不过，信息反馈的速度与生态恢复、制度变化的速度并不一致。短期波动可能尚不足以表明长期趋势，及时监测也不能代替对政策效果的持续观察。相应安排需要兼顾短期预警、中期评估和长期追踪，并保留记录非预期后果、重新审查解释的空间。

（三）组织载体：由个人化生产转向平台化有组织科研

数据更新、软件开发、伦理审查与政策沟通具有持续性，难以完全依赖个人承担的短期项目。跨机构平台和有组织科研为这些任务提供了相对稳定的分工条件，也使范式调整涉及研究组织及其评价规则。在平台内部，理论问题可由学术负责人统筹，资料标准与访问权限由数据策展人员维护，代码和计算环境由软件工程人员负责；隐私、安全与应用边界则由伦理及法务人员参与评估，地方部门与公众参与场景验证。分工的意义在于使各环节的专业判断能够衔接，同时保留相应的责任依据。

组织分工的稳定性还取决于评价与资源分配。除论文产出外，理论贡献、证据质量、开放程度和社会影响均需得到考察，资料可追溯性、模型适用范围及结论能否接受跨地区和跨方法检验，可为此提供依据。数字生态文明建设中的数据壁垒、技术鸿沟、制度衔接和协同能力问题，也可能在科研中延续[20]。当资源集中于少数平台，评价又偏重快速发表时，机构间的研究能力差距可能扩大，选题也更容易被现成数据所限定。平台建设因而需要与评价规则一并考虑。

支撑论文的工作也应被纳入成果认定。数据采集与整理、软件开发、模型验证、田野协调和伦理治理，未必直接表现为文字写作，却影响可复现性及研究连续性。若这些贡献缺乏认可，平台维护与协作也难以获得稳定支持。

贡献说明可分别记录概念提出、方法设计、数据维护、程序开发和成果解释，据此辨明技术服务与理论贡献。决策咨询成果则需要区分采用、效果与公共价值三个评价对象。成果被采用说明其进入了决策过程，是否产生实际效果仍需后续观察，效果的公共价值又涉及受益者、成本承担者及长期后果。仅以采用次数衡量学术质量，会省略这些必要的判断。

五、人机协同视域下的生态文明知识生产路径

（一）以重大生态问题牵引数据与方法

森林生态补偿、自然保护地治理、流域协同、生态旅游承载力和绿色产业转型，均涉及生态变化、利益分配、制度执行与地方知识。研究需要据此界定具体问题、空间范围、时间尺度、受影响群体及政

策用途，再选择数据与方法。人机协同设计应保留这些联系，避免完整问题被拆解为孤立的计算任务，或选题被可用技术反向限定。

技术复杂度应与解释需要相适应。已有统计分析和田野材料能够充分回答的问题，无须因技术更新而叠加模型。确有必要采用机器学习或生成式人工智能时，其承担的环节、人工复核方式与禁止用途应在研究计划中明确，使技术选择具有可说明的依据。

成果用途也应在研究设计阶段得到界定。用于学术解释的模型，与直接影响资源配置、风险预警或行政执法的模型，具有不同的责任范围。探索性分析主要用于形成假设，应与确认性检验区分；进入实际决策时，数据代表性、误差与可解释性需要接受更严格的审查，相关主体的申诉程序也须得到安排。模型的适用边界由此与可能产生的影响相联系，技术和治理要求可以按具体责任配置。

（二）构建前端、中端、后端衔接的研究流程

研究流程可分为前端准备、中端分析和后端验证，分别记录问题依据、分析过程与结论复核。

前端准备形成明确的问题界定、利益相关者范围和数据清单，伦理评估与分析计划在此基础上完成。

中端分析包括资料清洗、算法辅助分析和理论解释，人工校验与稳健性检验用于审查结果对材料和分析选择的依赖。

后端验证通过跨数据源互证、田野调查或专家复核考察结论的适用范围。成果发布依据场景影响评估安排，应用反馈用于修正解释与研究设计。

流程的可复核性需要制度支持。开放科学将透明度、开放性与可重复性纳入期刊和研究规范[21]，FAIR 原则提出数据可发现、可访问、可互操作和可重用的要求[22]。关于计算可复现性的经验研究表明，作者声明可以提供材料，并不必然使他人成功复现结果[23]。因此，数据、代码和计算环境需要得到制度化保存与管理，开放承诺也应有可检查的材料支撑。

开放范围应依据材料性质与风险确定。濒危物种位置、自然资源储量、企业排放记录、个人轨迹及社区敏感信息，可能涉及生态安全、商业秘密或个人权益，脱敏、分级授权、可信计算和访问控制需据此选用。数据说明书记录来源、采集目的、代表性、缺失情况、许可与使用限制[24]；模型卡说明训练资料、评价指标、适用与禁用场景、子群差异和人工监督要求[25]。使用者可据此判断数据与模型是否适合当前问题，并追溯使用中出现的偏差。

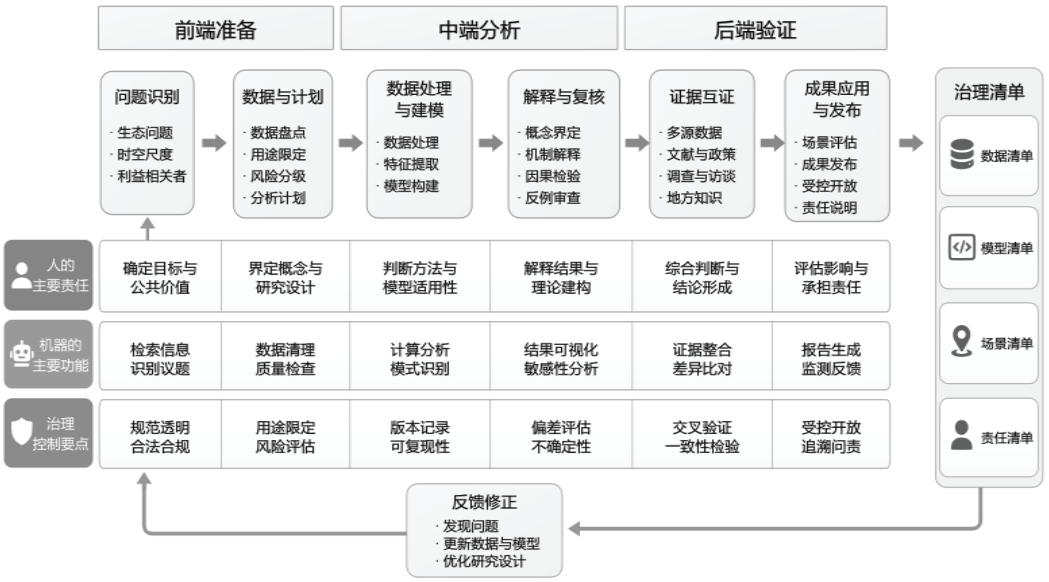


图 2　人机协同生态文明知识生产全过程闭环

结论形成的过程应在研究档案中得到保留。数据字典、变量构造表、分析脚本、提示词及版本、人工修订记录、稳健性检验和局限说明，可按研究性质归档。无法公开的材料，可在安全与权利允许的范围内提供元数据、访问条件和可验证的分析日志，使原始证据与模型输出能够被区分，也为人员更替后的维护提供依据。图 2 展示了人机协同生态文明知识生产各环节及其反馈关系。

（三）完善数据、模型与应用场景的分层治理

数智技术的使用受到科技伦理与数据治理规范的约束。《关于加强科技伦理治理的意见》要求伦理原则贯穿科技活动全过程，强调增进福祉、公平公正和合理控制风险 [26]。《数据安全法》与《个人信息保护法》分别规定数据分类分级及安全保护、个人信息处理的合法正当必要原则和权益保障要求 [27–28]。《生成式人工智能服务管理暂行办法》对其适用范围内的服务提出内容准确可靠、个人信息和知识产权保护、防范歧视等要求 [29]，具体科研活动应依据该办法的适用范围判断。在生态文明研究中，伦理评估还需覆盖敏感生态信息泄露、算法对地区和群体的差别影响、自动化决策越界，以及数字基础设施的能源资源消耗。个人隐私审查只是其中一部分。

数据、模型、场景和责任清单可用于记录上述要求。数据清单说明来源、权利与安全等级，模型清单保留版本、性能、局限和环境成本，场景清单界定可用、慎用及禁用范围，责任清单明确研究者、平台、合作机构和应用部门的职责。涉及资源配置、生态补偿或行政执法时，还需设置人工复核、结果解释、异议申诉和回滚程序，使统计概率在用于具体个体或地区之前受到情境核查，并保留提出异议的机会。

生态资料可能来自社区土地、生产活动和传统知识，其使用条件需由公众及地方主体参与讨论。技术授权不能涵盖全部社会协商问题。开展地方知识编码、社区画像或政策实验前，研究目的、潜在影响和退出方式应向参与者说明，知识贡献应得到承认。地方参与为资料使用提供协商基础，也使模型难以识别的情境进入解释，有助于结论在当地被理解和审议。

（四）发挥林业高校的跨学科平台优势

林业高校可依托自然科学、工程技术与人文社会科学基础，组织生态文明交叉研究。森林、草原、湿地、生物多样性和区域生态治理等长期问题，可作为持续合作的共同对象。计算资源、数据标准、协作安排和伦理审查据此纳入平台建设，使资料积累与研究任务保持稳定联系。

人才培养也需要连接技术能力与领域判断。哲学社会科学研究者对数据治理、统计推断和算法审查的理解，技术人员对生态价值、政策过程及地方情境的认识，共同影响协作质量。单项技术培训难以完成这种衔接。研究生课程和项目训练可将领域问题、数据方法与伦理治理安排在同一任务中，使学生经历数据登记、模型分析和政策沟通的完整过程，在理论与实践的联系中解释技术结果，为自主知识生产提供人才支持。

林业高校与自然资源、林草、生态环境部门，以及保护地、社区和企业的长期合作，可为持续研究提供资料和实践场景。合作中仍应保障学术判断独立，使不确定性与负面结果能够被如实报告，研究结论不被委托目标预先限定。区域观察站、案例库和受控数据空间有助于将一次性咨询资料转化为长期积累。表 2 概括了相应任务与保障要求。

表 2　人机协同生态文明知识生产的实施路径与保障机制

环节	核心任务	人的主要责任	机器的主要功能	治理要点
前端准备	问题界定、数据清单、伦理评估、分析计划	确定公共价值、概念口径、因果假设与利益相关者	辅助检索、资料盘点、格式转换和初步分类	目的限定、最小必要、风险分级、禁止用途

环节	核心任务	人的主要责任	机器的主要功能	治理要点
中端分析	数据处理、模型分析、理论解释、稳健性检验	审查数据质量，解释机制，处理反例与规范冲突	特征提取、模式识别、情景模拟和敏感性分析	人工复核、版本记录、子群评测、环境成本
后端验证	多源互证、田野复核、场景评估、成果发布	判断外部效度，组织公众参与，承担结论责任	生成可视化、复现包和监测反馈信息	受控开放、异议申诉、回滚机制、责任追踪
组织支撑	跨学科平台、人才培养和评价改革	统筹学科协作、制定规则并维护学术共同体	提供计算环境、协作工具和过程审计	贡献说明、长期维护、数据与软件评价

资料来源：根据相关文献和本文分析框架整理。

六、结论与建议

本文以知识形成过程为线索，考察了数智技术引入生态文明研究后，工具条件、研究范式和治理约束之间的关系。

多源数据、智能算法与网络协作扩展了资料获取、信息分析和科研合作的条件，自然与社会的互动因此能够在更广的时空范围内被观察。其直接作用是提供新的研究可能，能否形成可信的解释仍需在具体问题中判断。

当这些条件影响对象界定、机制识别、动态反馈和研究组织时，工具层面的变化才进一步涉及范式调整。该转变依赖概念、证据与解释之间的衔接，平台协同则为不同学科持续形成共同判断提供组织条件。

治理约束决定上述过程的责任边界。资料如何形成、理论假设如何检验、价值立场如何说明及成果如何应用，均会影响知识增益。计算任务可以由技术辅助完成，结论的学术责任仍需由研究者承担。

“过程—层次”模型的作用，是将知识形成的环节与技术影响的性质联系起来，说明工具改进在何种条件下可能影响认识规则，以及这种影响如何受到治理约束。相较于分别讨论技术能力和应用风险，这一框架将两者放回证据形成与解释检验的过程中，使人机协同能够被具体表述为可记录、可复核和可追责的研究安排。

围绕上述衔接条件，研究组织与制度建设可作以下安排。

数据基础设施建设宜围绕美丽中国建设和全面绿色转型的重大问题展开。跨部门、跨地区资料的统计口径、尺度匹配及长期序列应优先协调，使后续分析具备可比较的基础。

人机协同规范应与具体理论问题相联系。人工智能所承担的任务、人工复核方式、模型适用边界和环境成本，均应在研究计划中说明，以便技术选择及其后果受到审查。

项目管理与成果评价可将可复现性和伦理合规转化为有记录可查的要求。数据说明书、模型卡、预分析计划和受控开放制度，为相关判断提供材料依据，也便于后续研究复核和使用。

林业高校可依托生态学科与区域实践积累，联合自然科学、人文社会科学和治理部门建设长期研究平台。相对稳定的组织支持有助于维持资料更新、跨学科协作及研究成果的后续检验。

本文提出的框架基于规范分析与理论推演，尚未通过具体学科、地区或项目的经验研究检验。因此，框架所区分的层次及其衔接条件，仍需结合研究实践考察，不能据此推定特定技术或平台的实际成效。后续可在自然保护地、林草碳汇和生态旅游等场景开展比较，分析资料条件、组织方式及治理安排如何影响证据形成和解释检验，从而进一步明确框架的适用范围。

利益冲突

作者声明，在发表本文方面不存在任何利益冲突。

参考文献

[1] 中共中央 , 国务院 . 数字中国建设整体布局规划 [EB/OL]. (2023–02–27)[2026–07–13]. https://www.cac.gov.cn/2023–02/27/c_1679136694986243.htm.

[2] 中共中央 , 国务院 . 关于全面推进美丽中国建设的意见 [EB/OL]. (2023–12–27)[2026–07–13]. https://www.mee.gov.cn/zcwj/zyygwj/202401/t20240111_1063458.shtml.

[3] 中共中央 , 国务院 . 关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见 [EB/OL]. (2024–07–31)[2026–07–13]. https://www.mee.gov.cn/zcwj/zyygwj/202409/t20240911_1085676.shtml.

[4] 张妍 , 李紫伊 . 数字生态文明的内涵、发展困境和实践路径 [J]. 长沙理工大学学报 (社会科学版), 2024, 39(5): 30–35.

[5] 孙博文 . 面向中国式现代化的数字生态文明建设的三重逻辑 [J]. 改革 , 2024(10): 62–77.

[6] 施志源 , 景池 . 数字生态文明制度化 : 时代意蕴、发展困局与破局策略 [J]. 中国地质大学学报 (社会科学版), 2024, 24(2): 117–130.

[7] 陈伟雄 , 李宝银 , 杨婷 . 数字技术赋能生态文明建设 : 理论基础、作用机理与实现路径 [J]. 当代经济研究 , 2023(9): 99–109.

[8] 黄爱宝 . 数字生态文明的理论蕴涵、实践机理与建设价值 [J]. 南京工业大学学报 (社会科学版), 2024, 23(2): 12–22, 109.

[9] Lazer D M J, Pentland A, Watts D J, et al. Computational social science: Obstacles and opportunities[J]. Science, 2020, 369(6507): 1060–1062. DOI: 10.1126/science.aaz8170.

[10] Kitchin R. Big Data, new epistemologies and paradigm shifts[J]. Big Data & Society, 2014, 1(1): 1–12. DOI: 10.1177/2053951714528481.

[11] Boyd D, Crawford K. Critical questions for Big Data[J]. Information, Communication & Society, 2012, 15(5): 662–679. DOI: 10.1080/1369118X.2012.678878.

[12] Liu J, Dietz T, Carpenter S R, et al. Complexity of coupled human and natural systems[J]. Science, 2007, 317(5844): 1513–1516. DOI: 10.1126/science.1144004.

[13] Ostrom E. A general framework for analyzing sustainability of social–ecological systems[J]. Science, 2009, 325(5939): 419–422. DOI: 10.1126/science.1172133.

[14] Reichstein M, Camps–Valls G, Stevens B, et al. Deep learning and process understanding for data–driven Earth system science[J]. Nature, 2019, 566(7743): 195–204. DOI: 10.1038/s41586–019–0912–1.

[15] Tuia D, Kellenberger B, Beery S, et al. Perspectives in machine learning for wildlife conservation[J]. Nature Communications, 2022, 13: 792. DOI: 10.1038/s41467–022–27980–y.

[16] Vinuesa R, Azizpour H, Leite I, et al. The role of artificial intelligence in achieving the Sustainable Development Goals[J]. Nature Communications, 2020, 11: 233. DOI: 10.1038/s41467–019–14108–y.

[17] Runge J, Bathiany S, Bollt E, et al. Inferring causation from time series in Earth system sciences[J]. Nature Communications, 2019, 10: 2553. DOI: 10.1038/s41467–019–10105–3.

[18] 冯文利 , 张辉 , 陈美景 , 等 . 数字生态文明时代国土空间规划转型 [J]. 中国土地科学 , 2024, 38(3): 1–9.

[19] 李培鑫 , 李全喜 . 数字生态文明的理论意涵、异化风险与规范进路 : 政治哲学视域内的考察 [J]. 青海社会科学 , 2024(2): 52–60.

[20] 王丹 , 王闻萱 . 数字生态文明建设 : 现实功效、卡点瓶颈及因应路径 [J]. 哈尔滨工业大学学报 (社会科学版), 2024, 26(4): 117–124.

[21] Nosek B A, Alter G, Banks G C, et al. Promoting an open research culture[J]. Science, 2015, 348(6242): 1422–1425. DOI: 10.1126/science.aab2374.

[22] Wilkinson M D, Dumontier M, Aalbersberg I J, et al. The FAIR guiding principles for scientific data management and stewardship[J]. Scientific Data, 2016, 3: 160018. DOI: 10.1038/sdata.2016.18.

[23] Stodden V, Seiler J, Ma Z. An empirical analysis of journal policy effectiveness for computational reproducibility[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(11): 2584–2589. DOI: 10.1073/pnas.1708290115.

[24] Gebru T, Morgenstern J, Vecchione B, et al. Datasheets for datasets[J]. Communications of the ACM, 2021, 64(12): 86–92. DOI: 10.1145/3458723.

[25] Mitchell M, Wu S, Zaldivar A, et al. Model cards for model reporting[C]//Proceedings of the Conference on Fairness, Accountability, and Transparency. New York: Association for Computing Machinery, 2019: 220–229. DOI: 10.1145/3287560.3287596.

[26] 中共中央办公厅 , 国务院办公厅 . 关于加强科技伦理治理的意见 [EB/OL]. (2022–03–20)[2026–07–13]. https://www.most.gov.cn/xxgk/xinxifenlei/fdzdgknr/fgzc/gfxwj/gfxwj2022/202203/t20220321_179899.html.

[27] 全国人民代表大会常务委员会 . 中华人民共和国数据安全法 [EB/OL]. 2021–06–10[2026–07–13]. https://www.cac.gov.cn/2021–06/11/c_1624994566919140.htm.

[28] 全国人民代表大会常务委员会 . 中华人民共和国个人信息保护法 [EB/OL]. 2021–08–20[2026–07–13]. https://www.cac.gov.cn/2021–08/20/c_1631050028355286.htm.

[29] 国家互联网信息办公室 , 国家发展和改革委员会 , 教育部 , 等 . 生成式人工智能服务管理暂行办法 [EB/OL]. 2023–07–10[2026–07–13]. https://www.cac.gov.cn/2023–07/13/c_1690898327029107.htm.