



水利水电国际资讯摘要

IWHR International Digest

中国水利水电科学研究院 主编：蒋云钟 执行主编：王妍炜 责编：何鑫 徐诗月

2026
7
总377期

旱灾风险研究、政策与实践：
十大关键认知与十项研究空白

人工智能能源使用的环境成本
碳足迹 水足迹 土地足迹



旱灾风险研究、政策与实践：十大关键认知与十项研究空白

干旱在时空层面与社会经济和生态系统深度交织。在气候变化和人类活动的双重压力下，干旱正变得愈加严重和频繁，对民生、经济及生态环境造成了全面影响。干旱应对既需要有能付诸行动的真知灼见，也需要有能统筹全局的研究议程。本文基于国际水文科学协会“人类世的干旱（Drought in the Anthropocene）”工作组及“干旱韧性+10”会议与会者的跨学科专业见解综合撰写。“干旱韧性+10”会议是 2013 年召开的国家干旱政策高级别会议后续行动。本文综合了过去十年干旱研究中形成的十项关键认识，并阐明其对政策与实践的相关意义。此外，我们还确定了未来十年必须解决的十大研究空白，以进一步指导干旱治理、加强干旱韧性并有效应对水危机。

人类活动已导致九项“地球系统安全与公正边界”中的六项被突破，其中包括气候变化和淡水边界。这使得干旱风险不断加剧，影响范围日益扩大。干旱是一种多层面的水文气象极端事件，其影响范围广，主要表现为积雪、河流、水库和湖泊、土壤水以及地下水等水资源的亏缺，导致可用水量暂时性减少。干旱加剧了生态系统与社会经济部门之间对淡水的竞争，使民生、社区和环境面临风险。干旱灾害、暴露度与系统脆弱性之间复杂的相互作用导致干旱风险不断加剧，日益引发社会关注。然而，现有工作尚不足以减少当

前及未来的干旱风险。

2013 年，首次召开的国家干旱政策高级别会议指出，此前的干旱风险应对方法在很大程度上是被动反应式，且侧重于灾害本身。近年来，关于干旱对生态系统、社会和经济影响的研究不断涌现，前瞻性和主动性风险管理的方法和研究成果也日益丰富。作为 2013 年国家干旱政策高级别会议的后续会议，2024 年召开的“干旱韧性+10”会议得出以下结论：加深对干旱的理解并改进干旱风险管理的科学研究仍需深化，但现有知识已足以立即采取行动，增强全球抗旱能力。然而，目前学界尚未对现有研究成果进行全面梳理，也未制定针对未来十年的研究议程。

本文提出过去十年关于干旱风险与韧性的十大关键认识，以及十项研究空白（图 1）。这两项成果均源自国际水文科学协会“人类世的干旱”工作组的工作成果，该工作组已形成全球网络，汇集了世界各地 300 多位干旱研究人员。本文提出的认识可为国际、国家层面的干旱政策制定提供参考，例如利雅得全球干旱韧性伙伴关系倡议，以及下一届国家干旱政策高级别会议。基于已确定的研究空白，我们提出了未来的重点研究领域，以指导国际、国家层面关于干旱的研究，以及国际水文科学协会“帮助十年（HELPING decade）”计划下的各项研究。本文旨在推动《联合国防治

荒漠化公约》第十七次缔约方大会的筹备工作，该会议将建立在近期第十六次缔约方大会期间“积极进程（Tafa’ul process）”的经验和讨论基础之上。“积极进程”将梳理第十七次缔约方大会关于干旱问题的谈判成果，促进各方合作并建立

信任，从而推动全球干旱韧性提升。期待这十大认识以及十项研究空白，将形成科学突破，为干旱综合管理计划的推进贡献力量，进而降低全球干旱风险。

议题	关键认识（过去十年）	研究空白（未来十年）
系统性风险	1. 干旱风险具有系统性	1. 界定与评估干旱风险的新方法
知识体系		2. 多元知识体系协同共创
气候变化、土地和水资源管理	2. 干旱灾害受人类活动影响 3. 气候变化使干旱更加频繁和复杂	3. 气候-人类-水系统之间的作用与反馈机制
损失与损害	4. 干旱导致水质恶化 5. 干旱对人类健康造成严重影响 6. 健康的生态系统对增强干旱韧性至关重要	4. 经济与非经济损失的评估方法 5. 人类及生态系统健康影响评估
研究不足地区		6. 山区与城市的干旱复杂性认知
监测与预警系统	7. 干旱监测与预警系统已取得显著进步	7. 干旱监测与预报准确性提升
干旱风险管理和适应	8. 干旱对弱势群体的影响尤为严重 9. 干旱风险管理的障碍更加明晰	8. 基于自然的适应措施局限性评估
水资源正义		9. 干旱风险管理与水资源正义之间的关联性评估
治理	10. 增强干旱韧性需要多层次治理	10. 前瞻性干旱风险管理的认知

图 1 | 应对干旱，以科学指导政策与实践。

本文数据收集于 2024 年 6 月至 9 月发放的在线调查问卷，调查对象为国际水文科学协会“人类世的干旱”工作组全球网络成员，以及世界气象组织、干旱综合管理计划、《联合国防治荒漠化公约》联合举办的“干旱韧性+10”会议的 150 余位参会者。共收到来自世界各地 82 份回复（非洲占 12%，亚洲占 22%，美洲占 13%，欧洲占 53%），回复者的工作领域涵盖干旱综合管理计划三大支柱所涉及的各专业领域及相关学科。2024 年 10 月，形成长清单并由“人类世的干旱”工作组的 35 位参与者进行归纳聚类、详细分析，并将它们与过去十年的科技文献建立联系，由此形成

20 份单页摘要，每页摘要分别阐释了一项重要的关键认识或研究空白。摘要由“人类世的干旱”工作组的 42 位研究人员及部分参与问卷调查的专家进行审阅。最后，由 44 位“人类世的干旱”工作组研究人员对内容进行了重组与凝练。

过去十年干旱科学的十项关键认识

基于收集并综合整理的信息，本节将阐述过去十年干旱科学领域的十项关键认识，及其对政策与实践的启示意义（表 1）。

表 1 | 过去十年已确定的研究认识概览及其政策相关性

科学认识	政策实践启示
1. 干旱风险具有系统性	应按系统性风险进行管理，以充分权衡各方利弊，避免在各行业中各自为政
2. 干旱灾害受人类活动影响	相关政策应考虑社会-水文相互作用，以防止不当适应措施和上下游冲突
3. 气候变化使干旱更加频繁和复杂	干旱的可预测性受到影响，需要采取新的监测与管理措施
4. 干旱导致水质恶化	在干旱风险管理和适应措施中，水质问题不应被忽视
5. 干旱对人类健康造成严重影响	干旱应被视为一个公共卫生议题加以应对和管理
6. 健康的生态系统对增强干旱韧性至关重要	在干旱风险管理和应对工作时，应考虑生态系统恢复和基于自然的解决方案
7. 干旱监测与预警系统已取得显著进步	实际应用仍然滞后
8. 干旱对弱势群体的影响尤为严重	减少社会经济不平等与不公正现象对降低干旱风险至关重要
9. 干旱风险管理的障碍更加明晰	这些知识应被运用于干旱风险管理计划及适应性措施的推广工作
10. 增强干旱韧性需要多层级治理	增强干旱韧性需要全社会共同参与，所有行动主体都应积极投入

1. 干旱风险具有系统性

干旱风险具有系统性特征，会在相互关联的区域、部门和系统之间扩散。自然—水—社会系统的相互作用深刻影响着干旱风险的表现形式，农业、生态系统、能源和人类用水对水资源的竞争，会产生叠加和连锁效应。

这些连锁效应包括，干旱引发的用水限制和能源削减导致灌溉不足，进而加剧作物歉收；干旱使内河航运中断，加剧粮食短缺，抬高粮价并使粮食安全状况恶化；干旱导致水质下降，加重健康问题，加剧社会动荡并可能引发冲突；通过虚拟水出口，干旱影响供应链，波及那些并未直接暴露于干旱的地区。

尽管干旱风险评估已取得重大进展，但这些远距离关联和遗留效应对传统风险评估和干旱风险管理构成了挑战。应对干旱，传统上往往采取各自为政的管理方式。政策不应再分别应对不同经济部门的干旱风险，更应依托水—粮食—能源—生态系统这组关系中的关键要素。系统性治理

方法有助于避免不当适应措施（即适应措施无意中造成了损害）和考虑不周全，例如一个部门的干旱风险管理措施有可能会引发另一个部门的水问题。因此，系统性干旱风险管理有望提升一个关联性系统在面对干旱时的整体韧性。

2. 干旱灾害受人类行为影响

尽管干旱常被视为一种自然灾害，但其时空特征及在水循环中的传播过程，均广泛受到人类活动的深刻影响。人类活动引发全球变暖、土地利用变化以及河流改道，城市化进程和日益增长的粮食需求导致土壤硬化和森林砍伐，进而扰乱入渗、径流和蒸散发过程。这些人类活动都会影响干旱的频率、发生时间和严重程度，导致干旱化和荒漠化加重。灌溉及其他用途的用水需求持续增长，使地下水消耗加剧、地表水取用量增加，这些因素都会使水文干旱进一步恶化，且对下游地区的影响尤为严重。

人类行为影响着水资源短缺发生的时间、地点和方式。人类与水系统之间的相互作用，包括

供需循环、灌溉矛盾以及风险意识变化等，具有高度动态和非线性的特征。政策制定应将这些社会-水文相互作用纳入考虑，并在前瞻性评估中将风险应对和适应性措施的水文效应一并进行考虑，以防止不当适应措施和上下游冲突。

3. 气候变化使干旱更加复杂和频繁

气候变化增加了干旱的频率、强度和持续时间，这挑战了传统认知，即干旱仅是暂时性降水短缺导致的缓发现象。大气升温后能够容纳更多水分，并通过改变大气环流机制，影响环流形态、降水季节性及空间分布。积雪和冰川传统上对季节性缺水起到缓冲作用，但随着积雪减少和冰川后退，这一缓冲功能正在减弱，威胁下游供水。

此外，潜热效应会加剧大气-生物圈-陆地反馈，引起更多干旱，其中也包括骤发性干旱。这类干旱发展迅速，给减灾工作带来困难，对农业和环境的冲击尤为严重。这些反馈还可能使干旱状况持续，演变为多年特大干旱，对基础设施、生物多样性及城乡系统造成压力。

最后，气候变化加剧了复合事件的发生，例如干旱期间的热浪、山火及早涝急转事件。这进一步放大了干旱的风险和影响。不断变化的干旱模式使适应性工作更加复杂，也影响了干旱可预测性。因此，未来需要新型监测手段（追踪更多变量，如融雪或短期土壤湿度）并改进干旱风险管理（如重新审视预警的触发条件和发布时机，使其更具动态性）。

4. 干旱导致水质恶化

干旱期间，河流流量减少，水量下降削弱了水体的稀释能力，可能导致水体盐度升高、溶解氧浓度降低、点源污染物浓度上升。此外，干旱和热浪导致水体流动性减弱、水温升高，进而引发湖泊系统中藻类大量增殖。来自农业径流等的面

源污染物也会在土壤中累积，并在降雨过程中被冲刷释放，进一步加剧水质恶化，影响生态系统健康。因此，水质恶化会显著加剧干旱期间各部门的水资源短缺问题。例如，盐度升高可能限制灌溉并导致土壤退化，水温升高则可能限制发电厂的冷却用水。因此，干旱综合风险管理战略必须明确考虑水质因素。

5. 干旱对人类健康造成严重影响

据估计，过去五年全球因干旱而的死亡人数超过 2.5 万。干旱破坏粮食与水安全，引发营养不良、饥荒及其他公共健康问题。干旱还会导致水传染病、媒介传染病以及心血管疾病。干旱多与热浪、沙尘暴和山火相伴而生的，可能引发热应激和呼吸系统疾病等急慢性健康问题。

干旱对人类健康的影响容易被忽视，因为这些影响可能是延迟或间接的，在干旱发生后数天至数年才显现。这些影响对脆弱群体的冲击最为严重，如妇女、儿童、老年人、有基础疾病的人群和低收入人群等。干旱也影响了传统和现代医药的发展，进一步加剧了公共卫生风险。因此，干旱综合风险管理战略必须考虑对人的健康影响，同时医疗部门也应引入地球健康理念（planetary health thinking）。

6. 健康的生态系统对增强干旱韧性至关重要

健康的、物种丰富的生态系统对于降低干旱风险至关重要。碳封存、热缓解等生态系统服务有助于降低干旱严重程度并增强应对干旱的韧性。各种形式的生物多样性（包括遗传多样性、物种多样性、功能多样性）对极端气候事件具有缓冲作用，其中物种多样性有助于耐旱物种支撑脆弱物种共同抵御干旱。

干旱胁迫能改变水生、陆生及依赖地下水的生态系统。干旱阻碍植被生长，导致叶片面积减

小、光合作用减弱、植物发育受阻、养分缺乏，并使植物更易受病虫害侵袭，植被结构完整性也受到破坏。对生态系统的破坏，连同其引发的营养级联效应，可能削弱生态系统服务，延长干旱时间，加剧干旱影响，并导致生态系统长期退化乃至物种丧失等不可逆变化。应采用整体性干旱风险管理政策与规划，将生态系统恢复、含水层回补、基于自然的解决方案及生态系统维护等纳入综合考量，以促进长期韧性。

7. 干旱监测与预警系统已取得显著进步

干旱预警系统取得了实质性进展，已能够实现高分辨率监测并提前数月进行干旱预报。在遥感技术、季节性预报技术不断进步，及对骤发性干旱和生态干旱认识不断深化的前提下，干旱预警系统已可以支撑前瞻性行动，并增强对粮食与水安全前景的预判能力。近期，人工智能和机器学习方法正通过处理复杂数据推动干旱预警系统的变革，但潜力仍有待充分释放。

尽管取得了诸多成就，但当前的系统开发还未能充分满足用户需求，在预警系统中也缺乏评估干旱风险的系统性方法，政策框架之间整合不足，干旱预警系统的应用面临障碍。服务提供方应采用以最终影响为导向的监测与预报、多灾种预警系统等新兴方法，通过协同共创将旱灾风险数据与地方知识相融合，并关注权力失衡与公平问题，以打通“最后一公里”。

8. 干旱对弱势群体的影响更加严重

干旱对社会政治经济上处于弱势的群体与个体的影响尤为严重。妇女往往承受用水机会减少和工作负担加重的压力。小农户和原住民无法享有平等的能力和资金，可能阻碍措施的有效实施。在降低干旱风险的工作中，聚焦极端脆弱群体集中的区域，并解决社会经济和环境不公正问题至

关重要。通过教育、医疗和信息获取为社区赋能，可增强其适应能力。解决妇女在土地、教育和法律权利方面的机会受限等系统性障碍，有助于消除韧性建设中的阻力，并将干旱规划与可持续发展目标相衔接。

深化对“谁受干旱影响”及“谁从解决方案中获益”的认识，对于解决权力格局和旱灾影响不均衡的问题至关重要。将干旱风险管理纳入更广泛的社会经济和土地利用规划，认清发展规划可能在何处、以何种方式成为问题的一部分，并推动公平的适应措施，有助于解决深层的结构性不平等问题，并确保脆弱性问题不会发生转移。

9. 干旱风险管理的障碍更加明晰

全面的干旱风险管理对于减轻干旱影响十分关键，目前已经取得实质性进展。这些进展包括纳入基于自然的解决方案，以及借鉴原住民和地方知识来增强干旱韧性。尽管做出了这些努力，干旱风险管理计划的落实仍然滞后，在低收入国家和此前较少受干旱影响的地区，情况尤其如此。

适应措施在落实过程中面临多重障碍，涵盖政治、财政、文化、社会、经济和法律等多个维度，例如土地和水权制度不健全。行为因素，包括自身效能感知、社会规范、对干旱风险的抽象认知、具体情境判断、认知偏差等，既可能推动也可能阻碍适应行动的开展。机构间协调困难以及长期框架的缺失，制约了各项适应措施在横向和纵向上的推广与可持续性。

干旱风险管理计划应吸纳多元知识，并充分考虑影响适应行为的各种社会经济、心理、行为和政治驱动因素。这就要求加强机构和人员两方面的能力，以制定和实施多层级政策，建立能够在地方、国家乃至跨境等多个空间尺度上协调干旱风险管理的治理框架。

10. 增强干旱韧性需要多层次治理

增强干旱韧性需要创新、跨部门、全社会参与的方法。当前的治理体系难以跟上不断升级的风险，新问题的出现往往会分散对长期目标的关注。克服路径依赖对于促进创新至关重要。需要以最新的科学和政策认识为支撑，采取变革性方法，如调整制度安排，从各自为政的政策和部门管理，转向多政策框架并且跨部门、跨治理层级、跨行动主体的协作。

这一过程中，政府发挥着关键作用，有能力改革机构职能并促进协作，以实现韧性目标的落实。增强干旱韧性需要所有行动主体的积极参与，包括地方政府和脆弱群体。跨部门干旱委员会、干旱预警系统、前瞻性干旱风险管理、应急响应与恢复、绿色和灰色基础设施建设及联合水资源配置等各项治理体系，对于应对不断演变的干旱风险至关重要。

未来十年指导干旱科学、政策与实践的十项研究议程

尽管干旱研究取得了重大进展，但仍存在若干关键知识空白。下文概述了十项关键研究空白，为科学、政策与实践提出了前瞻性议程。

1. 界定与评估干旱风险的新方法

尽管人们已广泛认识到干旱风险本质上具有系统性，但关于有效的系统性评估与管理方法的研究仍然有限。当前方法看待干旱风险的角度过于狭窄，忽视了各行业、各系统和各尺度之间受政治和社会权力影响的反馈与相互依存关系，未能阐明干旱风险背后的社会生态和水驱动因素及其引发的连锁效应。人类活动与干旱之间相互作用的跨时空尺度的量化问题仍未得到解决，特别是人为造成的干旱过程，其中水土利用及管理活

动可能引发、恶化或缓解的相关风险。有关干旱应对和适应行为的数据仍十分匮乏，限制了对人类适应行为异质性及人-水耦合系统中动态反馈的研究与建模工作。

未来关于干旱风险系统性评估的研究，必须深入剖析“社会-水”反馈机制，并推动跨行业、跨系统（如水-粮食-能源-生态系统纽带关系）的风险建模。这些研究还应涵盖空间和时间尺度，例如流域间的相互关联，以及与虚拟水转移、能源安全、贸易和大宗商品市场相关的全球相互依存关系。从长远看，此类跨学科研究能够实现对不同系统及其要素之间关系的模拟。

2. 多元知识体系协同共创

管理干旱风险需要整合超越传统科学范畴的多元知识体系。社区是积极的行动主体，而非被动的接受者。认识到这一点，对于以可持续和包容性方式降低干旱风险至关重要。社区拥有宝贵的知识和经验，有助于预防、减轻及应对干旱影响并从中恢复。纳入原住民和地方知识，有助于提高干旱信息的可信度、针对性和合法性，这对于干旱预警系统有效发挥作用至关重要。原住民和地方知识还可为制定基于自然、切合当地实际的解决方案提供支撑，在维护生态平衡的同时带来适应措施的协同效益。

未来还需要进一步研究，以确定如何将原住民和地方知识定量地纳入模型，并在其文化和社会政治背景下探索原住民和地方知识，从而协同共创干旱评估与解决方案，使其能够赋能脆弱群体、契合当地价值观，并提升干旱韧性战略的包容性。应持续知识整合、改善数据主权和长期合作的制度路径。这需要基于多元知识体系开展多方参与的跨学科应用，使方法更加公平，最终促进科学进步和社会韧性。

3. 气候-人类-水系统之间的作用与反馈机制

气候变化加剧了自然和人为影响的陆地-大气反馈过程，并可能触发临界点和反复出现的复合事件。随着人类活动引发的全球变暖不断加剧，需要进一步认识这一变化如何影响特大干旱、零日干旱和骤发性干旱及其相关风险。

气候变化与水资源管理、土地利用管理以及干旱风险之间的反馈机制仍未得到充分研究，在特定系统（如森林和积雪为主的环境）中尚存在知识空白。人类世干旱的复杂性研究应优先关注这些知识空白，为制定包括可持续土地与水资源管理战略在内的各种长期目标提供参考。

此外，水文非线性系统中的临界点也构成挑战，因为即便是渐进式的变化，也可能导致不可逆转的状态。持续干旱可能永久性改变流域的径流情势。山区冰冻圈的变化也可能从根本上改变生态系统。识别并预测这些永久性变化的后果，是推进干旱风险与韧性研究面临的重大挑战之一。

4. 经济与非经济损失的评估方法

人们往往低估了干旱造成的经济损失和损害，因为其影响会通过直接和间接渠道传导，并持续不同的时间。非经济损失，一般指难以用货币量化的不利影响，如生物多样性丧失、身体健康恶化、无形社会代价等，往往未被纳入评估之中。农业损失等直接影响较易量化，但失业、心理健康、营养不良和环境退化等间接影响仍难以得到充分量化。此外，我们对干旱引发的金融影响及其对经济系统的反馈机制，认识仍然十分有限。

需要在方法学上取得进展，以全面量化损失与损害、非经济损失，以及主动开展风险降低所带来的收益。呼吁采用系统化工具来收集干旱影响的定量数据，这将极大提升成本效益分析的能力，从而凸显干旱风险降低所带来的收益，激励

决策者从被动应对转向主动预防。

5. 人类及生态系统健康影响评估

干旱对健康影响的研究存在明显空白，在两方面尤为突出：一是对脱水、热应激等直接健康影响的量化分析不足；二是对水质恶化、人口流离失所以及由此引发的社会动荡等间接健康风险，缺乏有效的建模评估。当前面临的关键挑战主要有：干旱相关模型与健康模型未能有效融合、健康监测数据匮乏、心理健康相关评估存在明显缺失。为减少不利的公共卫生后果，需要建立标准化数据和流行病学框架，将干旱与人类健康联系起来，这一点在复合极端事件期间尤为重要。

同样，生态系统面临的干旱风险也需要更完善的定量工具和模型，以捕捉非线性响应并整合多重压力因素，从而全面地评估干旱对生物多样性、生态系统服务以及陆地与水生系统之间相互作用的影响。例如，探索干旱的遗留效应和灾后影响、生态临界点、干旱与热胁迫和二氧化碳施肥效应的相互作用。研究应优先着眼于整个生态系统，以及可能导致不可逆退化的长期变化。填补这些知识空白，对于推进基于生态系统的干旱风险管理和韧性战略至关重要。

6. 山区与城市的干旱复杂性认知

山区为下游地区提供关键的水资源，然而气候变化对山区的影响，包括关键季节性融雪补给的减少，正加剧干旱风险。理解非线性效应、融雪干旱和冰川退缩对水资源可利用量的影响，以及山区地下水的作用，对于制定有效的管理战略至关重要。明晰干旱从上游到下游的复杂传播特征，既能提升可预测性，也能促进依赖山区水资源的社区、部门开展可靠的风险评估。

城市地区正面临人口快速扩张和气候变化压力的双重挑战。干旱对城市产生了多方面的影响，

但相关研究仍然不足。例如，城市绿色基础设施与干旱之间存在着复杂的相互作用：绿色基础设施既能缓冲干旱影响，又依赖水资源供给。要确保水安全，就需要深入了解城市中正在出现的干旱风险，并弥补当前在模型和数据方面的不足，以有效应对城市复杂情景并满足极高空间分辨率的要求。改善城市水资源管理，需要创新的建模工具（如数字水利孪生系统），以评估蓝绿基础设施等基于自然的解决方案的有效性。

7. 干旱监测与预报准确性提升

尽管过去几年取得了显著进展，进一步加强干旱风险监测与预报能力，以支撑高效的干旱预警系统，仍然至关重要。在世界多个地区，干旱预测能力仍然相对薄弱，其性能因多模型预测系统各模拟结果之间的一致性不同而存在差异。增强预测能力的多种方法虽已经得到检验，但仍有大量工作有待开展。应优先加深在大尺度动态过程的认识，发展覆盖次季节至十年时间尺度的无缝衔接预测体系，以应对干旱复杂性不断增加所带来的挑战。

综合性的基于影响的干旱预警系统建设取得了一定进展，例如制定相关框架、整合基础暴露度和脆弱性信息、建立用于干旱影响监测的全球基线等。然而，由于干旱影响具有部门特异性并会产生连锁效应，对其进行监测和预报十分复杂，必须开发和维护标准化的数据集，包括充分利用公民科学的力量。此类数据应遵循 FAIR 原则，即具备可查找（Findable）、可访问（Accessible）、可相互兼容（Interoperable）和可复用（Reusable）。

此外，将更具针对性的原住民和地方知识纳入研究不断取得进展，为理解干旱风险如何在地方层面被识别、预测和管理提供了独特契机。这对于制定切合实际、可付诸行动的预报、预警和

响应措施至关重要。需要协同共创干旱预警系统，不仅将原住民和地方知识作为提升科学数据可信度的来源，更要将其作为理解地方决策背景、共同评估预报信息效益并构建包容性进程的框架。这将有助于改进干旱风险的早期识别和预报，并提升干旱预警系统的可信度、针对性和合法性。未来应重点投资于混合方法和可解释方法，将数值模型和统计模型的优势与人工智能相结合。

8. 基于自然的适应措施局限性评估

尽管基于自然的解决方案日益被纳入干旱韧性战略，但对其局限性、有效性和可扩展性的认识仍存在不足，尤其是在非平稳气候条件和多灾种风险不断加剧的背景下。气候带的迁移可能改变基于自然的解决方案的长期适用性，而越过临界点则可能改变其功能。理解、检验并量化这些局限性，对于制定可持续且有效的战略至关重要。

干旱适应融资仍然严重不足，尤其是在全球南方地区，这些地区的资源绝大部分流向了应急响应，而非主动性的灾害风险管理。灾前现金转移、信贷获取和保险等金融工具在干旱风险评估与适应研究中的探索仍然不足。评估这些工具需要新一代的综合模型，实现金融和经济要素与生物物理要素的动态耦合。

9. 干旱风险管理与水资源正义之间的关联性评估

干旱风险管理框架往往未能充分关注社会正义、水资源正义和环境正义等关键交叉议题，因此在相关领域仍存在明显的研究空白。全球战略常常忽视地方实际情况，导致不公正现象持续存在。因此，需要进一步研究如何有效建立多层次且公正的治理体系。

尽管以正义为导向的诊断分析方法和参与式方法在解决不平等问题、促进认知正义方面具有巨大潜力，但尚未得到充分应用。现有框架缺乏

具体机制，难以将包容性的水法与治理、政治生态学、性别研究和人文地理学等理念落实到实践中，同时也未能充分探讨现行政策如何在无意中加剧既有的不平等。

通过弥补这些不足并采用以正义为中心的框架，干旱风险管理能够更好地支持脆弱群体、保护生态资产，从而确保在不同区域和人群中制定更具包容性和公平性的战略。

10. 前瞻性干旱风险管理的认知

干旱风险治理仍然各自为政，缺乏跨部门跨政策的框架。短期研究目标包括：识别干旱风险降低与气候变化减缓、生物多样性保护之间的协同效应，以及跨学科合作等杠杆手段。迈向主动和前瞻性治理，还需要研究因地制宜的成功因素、潜在的利弊权衡和不当适应措施的后果等，建立包容性框架，让边缘化群体等不同部门和社区参与其中。

从长远看，应加强对前所未有的极端事件发生时复杂格局的研究，以及明晰推动转型变革的驱动因素，将干旱风险管理纳入学校课程，完善公平的水资源分配机制。未来还应进一步探索干旱政策委员会等创新治理架构，以建立协调一致的多层级决策进程。

结论与展望

本文是对干旱风险与韧性相关研究、政策与实践的一次科学梳理。基于过去十年的研究，总结了十项可供政策与实践参考的关键科学认识，并进一步概述了未来十年可指导干旱研究、增强干旱韧性的十项关键研究空白。这一梳理工作得益于拥有 300 名成员的国际“人类世的干旱”工作组参与。研究的局限性在于，回复主要来自欧洲参与者，这可能对最终结论产生了一定影响。

过去十年来，人们日益认识到，干旱通过减少水量和降低水质，对多个相互关联的部门造成影响，需要创新方法来量化系统性风险，并为政策制定提供有效参考。虽然研究重点正逐步转向人类和生态健康，但开展全面的定量评估仍然面临挑战，尤其是在评估连锁性的经济和非经济损失与损害等方面。未来十年的研究还必须聚焦于理解复杂环境（如城市和山区）中的干旱风险动态，以改进被忽视地区的适应性策略。

以三大支柱（即监测与预警、风险与影响评估、减灾备灾与响应）为支撑的干旱风险管理方法，首次在国家干旱政策高级别会议上提出后，推动了监测、预警、风险评估相关探究以及多层级风险治理等领域的创新。然而，要进一步加强干旱备灾和预见性行动，仍需在开发可落地、基于影响的预警系统方面持续取得进展。

过去十年来，在评估人为气候变化对干旱的影响方面取得了重大进展。然而，在全面理解大气和水文循环的反馈机制方面仍存在若干空白。深化对人类-环境-水相互作用的认知，并将干旱视为受人类活动影响的现象，为加强主动性干旱风险管理提供了契机。同时仍需开展研究，评估在气候变暖、干旱日益频繁且极端化的背景下，干旱适应政策的潜力与局限性，以避免不当适应措施带来的后果。

此外，还需进一步开展研究，以深入理解干旱风险、水安全与环境正义之间的交叉关系。加强跨学科研究方法，并通过 FAIR 原则确保透明度。敦促研究人员和决策者开展跨学科、跨境合作，充分认识干旱及其影响超越地缘政治和部门的边界。

本文提出的科学认识和研究空白，系统概述了当前的知识进展和尚待解决的挑战，有助于推动未来十年的研究与实践。这一综述可促进国际

水文科学协会“HELPING 十年”计划等科学倡议开展更具针对性的研究，并为国际抗旱联盟、利雅得全球干旱韧性伙伴关系以及《阿联酋全球气候韧性框架》等政策倡议提供知识支撑。本文所做的梳理工作，有助于构建稳健的全球干旱韧性框架，为 2026 年 8 月召开的《联合国防治荒漠化

公约》第十七次缔约方大会的筹备做出贡献，并为下一届国家干旱政策高级别会议召开前的相关讨论提供参考。

本文摘编自 Nature Water 第四卷（711-721），(2026)。

人工智能能源使用的环境成本

碳足迹 水足迹 土地足迹

执行摘要



由人工智能生成的概念图，展示了人工智能的环境足迹。（根据测算，生成一张上述图像，其环境足迹为：耗电 2.9 瓦时，碳排放 1.22 克二氧化碳当量，水足迹 28.6 毫升，土地足迹 0.45 平方厘米。

人工智能（AI）已成为第四次工业革命的一项标志性技术，推动人类社会超越数字化阶段，迈向复杂系统的优化与自动化。具备学习、感知、推理和内容生成能力的人工智能系统，如今已深度融入经济活动和日常生活中，并广泛应用于翻译、金融、医疗、能源和交通运输等领域。

人工智能的普及速度可谓惊人。到 2025 年年中，全球约有 7 亿人使用 ChatGPT 人工智能工具，每周发送约 180 亿条消息。生成式人工智能工具正迅速拓展至文本、图像、代码生成以及多模态应用等领域。市场预测显示，人工智能将在未来十年内发展成为一个万亿美元级的产业，到本世纪 30 年代初，全球人工智能市场规模预计将达到 2.4 万亿至 4.8 万亿美元。

然而，这一繁荣背后所需的基础设施及其带来的红利分布并不均衡。前沿人工智能严重依赖高端算力、专用芯片和超大规模数据中心，而这些资源高度集中在少数地区。许多国家缺乏本国基础设施，无法大规模训练或运行前沿模型，不得不依赖外部供应商获取先进算力。这种集中格局，决定着谁能掌握战略与经济优势，也决定着由谁来制定接入条件、定价规则与数据标准。其结果是，开发并控制人工智能系统的国家，与单纯消费人工智能算力的国家之间，既有的数字鸿沟正进一步扩大。

当一项技术以如此惊人的速度扩张时，其背后的社会、经济、地缘政治及环境后果可能会悄然累积。一旦相关系统、投资和依赖格局形成锁定效应，再加以改变会变得十分复杂，且难以实现公平。公众讨论聚焦于人工智能带来的偏见、隐私、虚假信息、就业冲击和不平等等风险。相较于这些议题，人工智能另一个影响深远的维度，环境足迹以及人工智能基础设施扩张所引发的公平正义问题，仍未得到充分重视。人工智能不仅

仅是计算机代码，它还涉及实体基础设施和供应链，包括数据中心、芯片、发电设施、冷却系统、水资源取用、土地占用、关键矿产以及最终产生的电子废弃物。

联合国大学水、环境与健康研究院在建院 30 周年之际发布的这份报告，旨在通过评估人工智能的环境足迹，弥补当前环境治理领域的空白。此项调查突破了以往的单一碳排放视角，转而审视人工智能通过能源使用产生的间接环境足迹，量化了大规模运行人工智能所需电力造成的碳足迹、水足迹和土地足迹，并揭示其因地理位置、电力供给结构等因素而存在显著差异。这一点值得关注，因为“低碳”并不自动等同于低耗水、低土地占用，仅凭单一指标评估是否具有环境可持续性，可能会掩盖此消彼长的平衡关系，将负担转嫁给那些已面临水资源紧张或土地压力的地区。这种不对等现象，在人工智能的战略优势转移的同时，还可能加剧当地社区的环境问题。

本研究报告揭示了一些令人震惊的数字。2025 年，作为人工智能物理基石的数据中心大约消耗了 448 太瓦时的电力。如果将数据中心视为一个国家，其用电量将位列全球第 11 位。按照当前趋势，到 2030 年，数据中心的电力需求或将翻番，达到 945 太瓦时，近乎巴基斯坦、孟加拉国和尼日利亚三国年用电量总和的三倍，这三国总人口超过 6.5 亿。生产如此规模庞大的电力将产生 3.99 亿吨二氧化碳当量的碳足迹，需用 10 年时间种植 67 亿棵树才能抵消。与之相应的水足迹高达 9.3 万亿升，相当于撒哈拉以南非洲全部 13 亿居民的年生活用水需求量的总和。与这部分电力相关的土地足迹将超过 1.45 万平方公里，面积近墨西哥城的 10 倍。

人工智能如今已成为推动数据中心增长的最重要驱动力之一。2025 年，仅人工智能负载就占

到数据中心总用电量的约 20%。若如预测所示，到 2030 年这一比例升至 40%，其电力需求或将达到约 378 太瓦时，可以满足撒哈拉以南非洲全部居民两年以上的生活用电需求。

人工智能对环境的影响，不仅取决于数据中心的生长和电力供给结构，还受到模型规模不断扩大所带来成本攀升的影响。例如，GPT-3 模型在 34 天的训练时间内消耗了约 1.3 吉瓦时的电力，而 GPT-4 模型在 100 天的训练时间内消耗了 50 至 70 吉瓦时，耗电量约为 GPT-3 模型的 40 至 55 倍。然而，模型训练耗电只是问题的一部分，因为人工智能的运行足迹正日益受到推理环节的驱动。模型部署之后，数以十亿计的日常交互构成了能耗的主体，据估算，推理环节约占人工智能总能耗的 80% 至 90%。

仅 ChatGPT 一个应用，据估算每天处理约 25 亿条提示词请求。当规模扩大到一定程度时，单次任务看似微小的成本会累积为巨量的基础设施级别的负荷：按每条文本提示词耗电 0.42 瓦时的保守估算，ChatGPT 量级的应用每年耗电约 383 吉瓦时。为抵消这一过程产生的碳排放，需要 260 万棵树生长 10 年，这些树木足以覆盖一片与美国曼哈顿面积相当的土地。其水足迹相当于撒哈拉以南非洲地区约 50 万人一年的最低生活用水需求，土地足迹则相当于 800 多个足球场的面积。

一旦将人工智能嵌入大众化的搜索平台，相关数字便会急剧攀升。尤为关键的是，不同模式和输出长度下，单次使用的能耗可能相差几个数量级，这意味着产品默认设置和用户选择都是决定环境足迹大小的关键因素。一次典型的搜索式查询，其能耗大约是基本文本类任务的 200 倍；而长文本回复的能耗则可达文本类任务的约 1000 倍；人工智能生成图像的能耗，更是文本类任务的约 1450 至 2000 倍。视频生成已成为新的

能耗前沿：一段由 AI 生成的短视频，其耗电量堪比 20 万次垃圾信息分类或数百张 AI 生成图像的能耗总和。较长回复和更丰富的媒体形式，其能耗远高于轻量级文本任务。这意味着，在图像或视频优先的分发策略下，电力需求以及与之相关的碳足迹、水足迹和土地足迹都将实质性增加。效率提升固然重要，但仅靠效率提升还不够：如果单次使用能耗的降低反而推动了使用量的大幅增长，总环境影响仍可能持续上升，这种反弹效应通常被称为“杰文斯悖论 (Jevons Paradox)”。

尽管联合国大学水、环境与健康研究院的这份报告聚焦于人工智能在能源消耗方面的环境足迹，但人工智能还有其他重大的环境影响。人工智能硬件依赖关键矿物，其开采和加工可能造成环境破坏和社会危害，这些问题往往集中在全球南方国家及监管薄弱的地区。人工智能的硬件进入废弃阶段后，管理不善的电子废弃物会使受到影响的社区暴露于有害物质之中。到 2030 年，人工智能基础设施每年可能产生多达 250 万吨的电子废弃物，大致相当于每年丢弃 250 座埃菲尔铁塔的重量。这些影响表明，负责任的人工智能发展需要全价值链的治理，涵盖从矿产开采到回收利用及安全处置的每个环节。

为应对这些挑战，报告呼吁建立一个以六项可操作原则为基石的负责任人工智能生态系统，即：透明、高效、公平与环境正义、全生命周期责任、全球合作、可持续利用。对碳足迹、水足迹和土地足迹进行量化，使环境影响看得清、可比较、能落地，从而为跨辖区治理提供支撑，并促进责任落实。通过正视人工智能的环境影响并实施严格的全生命周期管理，国际社会能够确保技术进步始终不超出环境的承载力范围。

报告明确了各关键利益相关方应优先关注的事项。政府必须将人工智能基础设施纳入能源系

统规划、碳核算、水治理和土地使用许可体系。这要求建立标准化的环境足迹报告制度，使不同供应商和辖区之间的环境影响可核查、可比较。产业界与人工智能开发者应将模型选择、默认输出方式等视为环境足迹的决定因素，不断强化设计之初即追求效率的理念与实践。

用户及部署机构同样通过使用量、使用频率和模式选择影响着环境足迹。应采用“够用即可”的使用原则，选择能够满足任务需求的最轻量模型和最低能耗模式，并在非必要时限制高成本功能的使用。数据中心运营商和公共事业机构应将选址与采购视为环境足迹决策的一部分，开展环境影响筛查和评估，并在数据中心扩张区域实施一定的缓解措施与社区保障机制。投资者和金融机构应将电力、碳、水及土地足迹视为人工智能基础设施投资组合的重大风险，并在尽职调查中采用可比较的环境足迹指标。

社区与民间组织应在选址决策的早期阶段即参与其中，并建立具有强制执行力和透明度的协商及申诉机制，在环境压力较大的地区尤应如此。国际机构应支持建立统一的计量标准和信息披露规范，减少对跨境负担转移的激励，并为人工智能算力薄弱地区提供支持和能力建设。综上所述，本研究提倡将人工智能的环境因素纳入电力、碳排放、水资源及土地利用等方面的规划，有助于在环境承载力范围内推动创新，避免将环境负担转嫁给全球脆弱社区。

本文摘编自 UNU-INWEH, *Environmental Cost of AI's Energy Use*, (2026).



欢迎关注中国水科院微信公众
本刊联系方式：中国水科院国际合作处
地址：北京市海淀区复兴路甲一号
联系邮箱：dic@iwhr.com
2026 年 7 月