



人工智能在环境工程中的应用：热点演化与未来趋势

杨静^{1,✉}, 张萌², 朱亮², 张伟军³, 徐明⁴, 王东升², 俞汉青⁵, 汪华林⁶, 吴明红⁷, 任洪强⁸

1. 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部, 北京 100085; 2. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058; 3. 中国科学院生态环境研究中心工业废水无害化与资源化国家工程研究中心, 北京 100085; 4. 清华大学环境学院, 北京 100084; 5. 中国科学技术大学环境科学与工程系, 合肥 230022; 6. 华东理工大学资源与环境工程学院, 上海 200237; 7. 福州大学环境与安全工程学院, 福州 350108; 8. 南京大学环境学院污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210023

摘要 环境工程学科面临新的挑战 and 机遇, 需要转变科学研究范式, 突破传统末端治理为主要目标的学科局限, 在应对全球生态环境问题中发挥更重要的功能。人工智能是当今颠覆性的技术之一, 是环境工程领域创新发展的关键方向。本研究采用文献计量学方法梳理了 1990—2023 年环境工程领域与人工智能相关的 24 000 余篇论文, 分析了全球范围内该领域的主要研究机构, 解析了人工智能在环境工程领域的研究方向现状, 探讨了研究热点的演化及未来发展趋势, 并提出了潜在的挑战。本研究可为人工智能在环境工程领域的研究与发展提供建议和思路, 助力我国环境工程学科的跨越式发展。

关键词 环境工程; 人工智能; 研究方向; 热点趋势; 研究挑战

联合国环境发展署在 2021 年发布《人与自然和谐共处：应对气候、生物多样性和污染危机的科学蓝图》，指出了气候变化、生物多样性损失及环境污染三大环境危机的严峻性，并提出了应对这些危机的具体措施。当前，环境问题的产生和演变已超越国家和地区的界限，对全球生态系统、人类健康和经济社会发展产生深远影响。因此，环境工程学科也需要转变科学研究范式，既要关注解决环境治理工程难题，也必须突破以末端治理为主要目标的学科局限，在应对全球生态环境问题中发挥更重要的功能。

我国环境工程学科经过几十年的发展，已经逐步在国际上站稳脚跟，多个领域已实现了国际并跑甚至领跑。“十四五”发展规划纲要对我国环境治理提出了更高的要求。面对我国生态文明建设、碳达峰碳中和两大战略任务，污染防治领域外延内涵已然改变，围绕生态安全、资源紧缺、新污染物治理等核心问题，从过去以“治污”为主的传统产业发展模式，通过汇聚新兴技术实现未来环境领域产业交叉融合，进入减污降碳协同增效，绿色生产、绿色生活和良好生态协同推进的新阶段。

人工智能 (artificial intelligence, AI) 是当今最具颠覆性的技术之一，其蓬勃发展给学术界和工业界都带来了革命性的变化^[1]。据推测^[2]，2024 年 AI 的市场规模预计将达到 $1\,840 \times 10^8$ 美元。预计 2024—2030 年的市场规模复合年增长率为 28.46%，到 2030 年 AI 市场规模将达到 $8\,267 \times 10^8$ 美元。习近平总书记 2023 年在全国生态环境保护大会上的重要讲话指出：“深化人工智能等数字技术应用，构建美丽中国数字化治理体系，建设绿色智慧的数字生态文明”。中共中央、国务院印发的《数字中国建设整体布局规划》将“推动生态环境智慧治理，加快构建智慧高效的生态环境信息化体系”确定为数字中国赋能经济社会发展的关键内容之一。值此人类社会跨越式发展的关键节点，人工智能及其应用是环境工程领域未来创新发展的关键方向之一^[3]。因此，探索人工智能技术在环境工程领域的赋能形态、拓展其应用边界，是环境工程学科发展的重要过程，是响应国家“建设绿色智慧的数字生态文明”重大需求的关键任务。

收稿日期：2024-10-24 录用日期：2024-11-19

第一作者：杨静 (1968—)，女，博士，研究员，yangjing@nsfc.gov.cn ✉通信作者

因此,为推动人工智能在环境工程领域的发展与应用,本研究基于文献计量学方法,系统梳理过去30多年环境工程领域与人工智能相关的24 472篇论文,分析了全球范围内该领域的主要研究机构,解析了人工智能在环境工程领域的研究方向现状,探讨了研究热点的演变和未来发展趋势,并提出了潜在的挑战。旨在为环境工程和人工智能等交叉领域研究人员提供建议和思路,推动环境工程科学进步和创新,以应对全球环境和可持续发展的复杂挑战。

1 材料与方法

1.1 数据来源与提取

本研究原始数据来源于 Web of Science 核心合集在线数据库。为获得准确数据结果,采用以下参数检索:TS (Topic, which consists of titles, abstracts, and keywords) = (“artificial intelligence” OR “AI” OR “machine learning” OR “deep learning”) AND SU (Research Area) = (“environment* science* ecolog*” OR “environment* engineer*”)。通过人工智能、机器学习、深度学习等关键词,对人工智能领域进行拓宽,出版物类型为“Article”或者“Review Article”;符合检索要求论文共计24 709篇。经重复记录剔除后,保留24 472条结果进一步分析。

1.2 研究方向现状分析

1) 以文章发表数量为指标,分析揭示人工智能在环境工程领域中研究的贡献分布。采用 ScientoPy (版本1.4.0) 软件^[4]对1990—2023年期间文章年发表量、主要发表国家和研究机构进行统计分析,揭示环境工程领域人工智能相关研究的贡献时空分布情况。

2) 通过关键词演变分析,揭示人工智能在环境工程领域中研究方向的现状。采用 ScientoPy (版本1.4.0) 软件^[4]对1990—2023年期间发表文章的关键词出现频次进行统计分析,揭示该时期内主流关键词的增长动态。从人工智能和环境两个学科领域中,筛选出现频率最高的25个关键词,分析其随时间的演变及发展趋势。根据出现频率前500的关键词,提取环境领域相关名词,并与国家自然科学基金委学科分类代码进行比对归类。

3) 通过术语共现分析,揭示人工智能在环境工程领域中研究热点的演变。采用 VOSviewer (版本1.6.17) ^[5-6],从文献数据的标题、关键词和摘要中提取出现特定频次的词语,即术语用于共现分析。本研究提取的术语出现频次为200次以上。去除语法常用语后,保留人工智能领域与环境领域的术语共61个。统计术语之间的共现次数(两个术语在同一篇论文中出现的次数)及每个术语的平均出现时间(包含该术语文献的平均发表时间),利用 VOSviewer 生成术语共现网络图^[7-8]。

1.3 研究方向趋势分析

1) 增长趋势分析。根据 RUIZ-ROSETO 等^[4]提出的公式(1),计算论文发表的平均增长率(AGR),以从学科、期刊和作者的角度阐明了人工智能在环境领域研究的发展趋势。对于某一对象而言,趋势性属性可通过 AGR 来反映其所具有的较高研究论文增长率。

$$AGR = \frac{\sum_{i=Y_s}^{Y_e} P_i - P_{i-1}}{(Y_e - Y_s) + 1} \quad (1)$$

式中:AGR 表示平均增长率;Y_s和Y_e分别表示所选时期的起始年和终止年;P_i表示第*i*年的发文量。

2) 演变趋势分析。为揭示人工智能在环境工程领域研究方向随时间的演变规律,选择环境领域出现频率较高的关键词进一步分析。对筛选的关键词采用标准化累积关键词频率(NCF)和趋势因子(Trend factor)可视化探讨研究方向的演变过程^[9]。标准化累积关键词频率为在一定时期内每1 000篇出版物中关键词的平均出现次数,可根据公式(2)和(3)计算某时间段或当年的数据;趋势因子通过标准化累积关键词频率在近3年与2018—2020年的比例反映,采用公式(4)计算获得。

$$F_{n(Y_c-Y_s)} = \frac{\sum_{i=Y_s}^{Y_c} f_i}{\sum_{i=Y_s}^{Y_c} P_i} \times 1000 \quad (2)$$

$$F_{\text{nyr}} = \frac{f_{\text{yr}}}{P_{\text{yr}}} \times 1000 \quad (3)$$

$$\text{Trend factor} = \log \left(\frac{F_{n(2021 \sim 2023)}}{F_{n(2018 \sim 2020)}} \right) \quad (4)$$

式中： $F_{n(Y_c-Y_s)}$ 表示年份 Y_s 与 Y_c 之间的NCF； F_{nyr} 表示年份yr的NCF； F_i 表示关键词的出现次数。

2 人工智能在环境工程领域的应用现状

2.1 环境工程领域人工智能相关论文情况

对环境工程领域与人工智能相关的论文进行分析。如图1所示，在该领域论文的发表数量逐年递增，从1990年15篇·a⁻¹增加至2023年7005篇·a⁻¹。需要指出，以2018年为时间节点，与人工智能相关的环境工程领域论文呈指数增长，年均增长率为56.01%。截至2023年底，论文发表总数已达24472篇，表明该研究领域在全球范围内广受关注，重要性和发展速度日益增加。

对论文通讯作者所在的国家或机构发文数进行分析，排名前五的国家或地区如图2(a)所示，排名前五的国家分别为中国（8614篇）、美国（4836篇）、印度（1662篇）、英国（1535篇）和德国（1347篇）。值得注意，不同国家的环境工程人工智能随时间的发展呈现差异化。在论文发表上，中国是目前环境工程人工智能发展最快的国家，尤其在2018年以后，至2023年论文发表数量已超过3000篇·a⁻¹。美国环境工程领域人工智能相关的论文发表数量低于中国，在2023年为1069篇。但需指出美国在该领域的学术探索起步较早。在环境工程人工智能领域的发展规律方面，英国与美国相仿，即研究起步较早，但近些年来发展速度有所放缓；而中国与印度等新兴经济体虽然研究起步较晚，但发展速度较快。

在研究机构方面，中国的高校院所在环境工程人工智能领域表现亮眼。在发表论文最多的前20个研究机构中，中国占75%。从发文总数和年均增长率来说，中国科学院优势明显，达到1420篇，2018—2023年

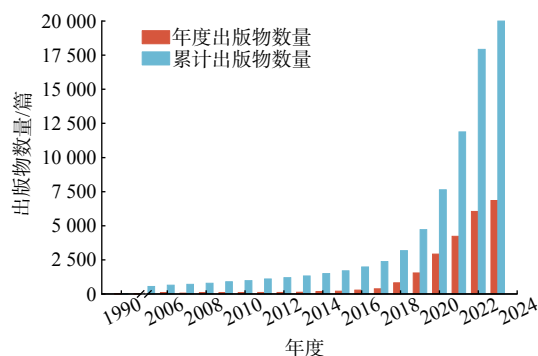
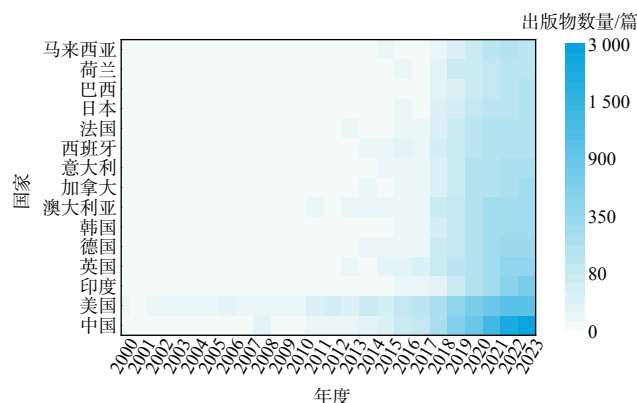


图1 环境工程领域人工智能相关论文发表情况
(1990—2023年)

Fig. 1 Publications related to artificial intelligence in environmental engineering (1990—2023)



(a) 国家发文量

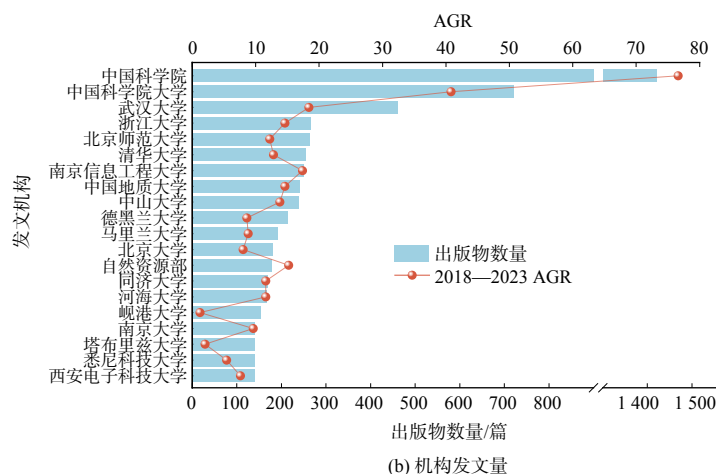


图2 环境工程领域人工智能相关论文的主要发表国家和机构

Fig. 2 Main countries and institutions where papers related to artificial intelligence in environmental engineering are published

期间论文的年均增长率达 76.6%；此外，中国科学院大学（40.8%）、武汉大学（18.4%）、南京信息工业大学（17.4%）和浙江大学（14.6%）等在环境工程人工智能领域发展快速。但需要指出，除学术机构外，工业界是人工智能发展过程中不可忽视的重要推动力。这可以从 2010—2024 年期间，不同机构类型在人工智能模型开发中的贡献情况反映（图 3）。据报道，2023 年开发的著名机器学习模型中工业界贡献了 51 个，与此对比学术界仅贡献 15 个^[10]。此外，工业企业与学术机构的产学研合作也是人工智能在未来的重要发展模式^[11]。

2.2 人工智能在环境工程领域研究方向现状分析

随着技术的不断发展和应用场景的不断拓展，人工智能在基金委各学科发展中的作用日益显著。由文献计量分析知（图 4(a)），人工智能在环境工程（E10）、生态学（C03）、环境地球科学（D07）和地理学（D01）等学科发展中应用广泛。具体而言，水

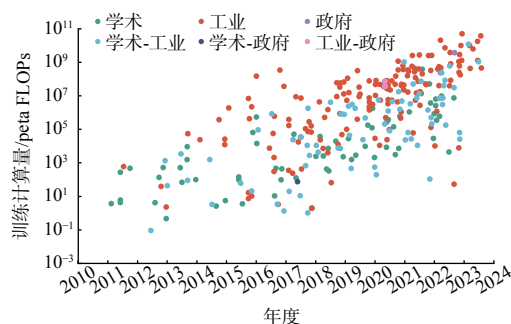
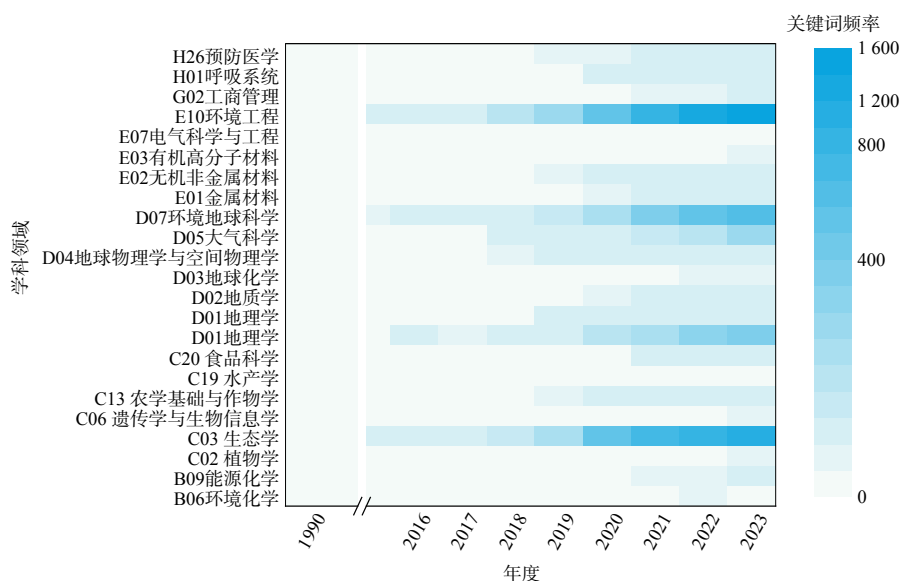


图3 机构类型对人工智能模型开发随时间的贡献情况（2010—2024 年）^[12]

Fig. 3 Contribution of institution type to AI model development over time (2010—2024)^[12]



(a) 人工智能在基金委各学科上应用情况

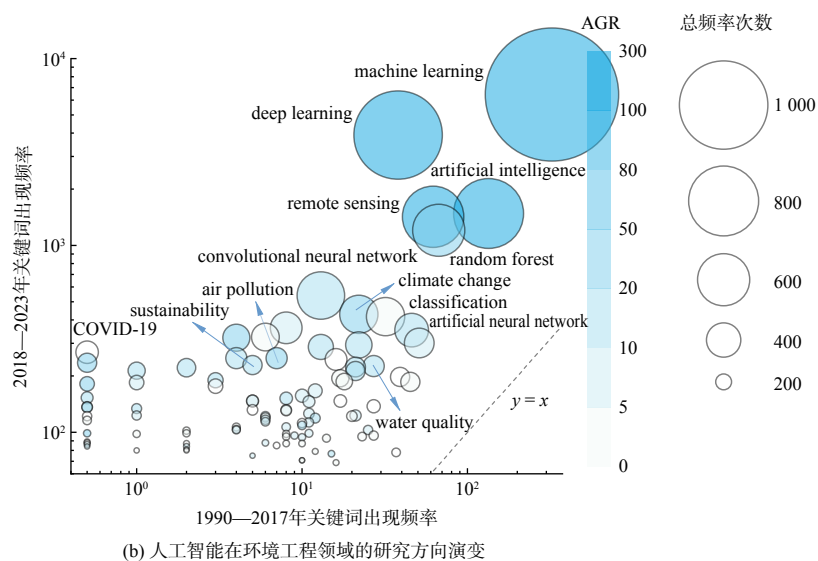


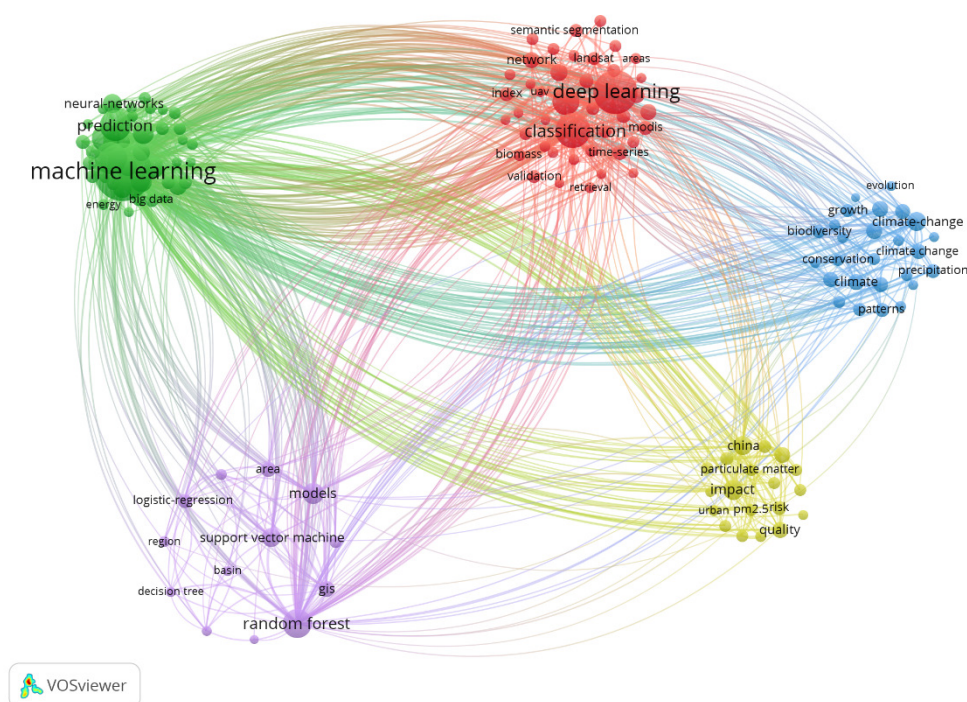
图 4 人工智能在基金委各学科及其在环境工程领域的研究方向演变

Fig. 4 The evolution of research directions in AI across various disciplines at the NSFC and in the field of environmental engineering

环境质量 (E1001、E1002、E1003)、空气污染 (E1005)、可持续发展与气候变化 (E1008)、环境健康 (E1009) 等细分领域是人工智能在环境工程领域发展较快研究方向。

对人工智能在环境工程领域论文中出现频率前 100 的关键词进一步统计分析, 结果如图 4(b) 所示。图中关键词大多出现于 $y=x$ 上方, 即表明 2018 年后人工智能在环境工程领域的应用进入快速发展阶段, 呈数量级差异。其中气候变化、空气污染、可持续性、水质等是人工智能的热点研究方向。该结果与人工智能在环境工程学科的发展方向分析 (图 4(a)) 相一致。此外, 随着机器学习、深度学习、生成式人工智能等相关领域的快速发展, 人工智能在环境工程学科发展中的作用将会进一步凸显^[13]。

根据出现频率, 从发表论文的标题、关键词和摘要中共提取了 61 个最相关术语, 并形成了共现网络。如图 5 结果所示, 气泡的大小反映了出现的频次高低, 颜色代表基于共现分析划分的不同类别。提取的术语



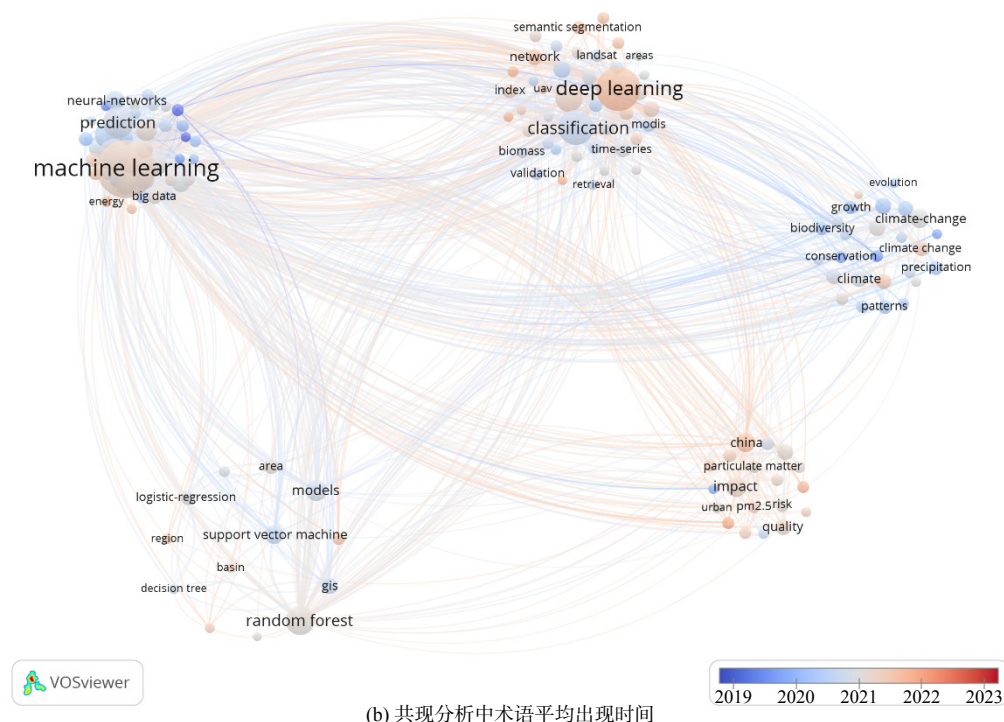


图 5 标题、关键词、摘要中频繁出现共现网络图及共现分析中术语平均出现时间

Fig. 5 Frequent appearance of co-occurrence network diagrams and average appearance time of terms in co-occurrence analysis in titles, keywords, and abstracts

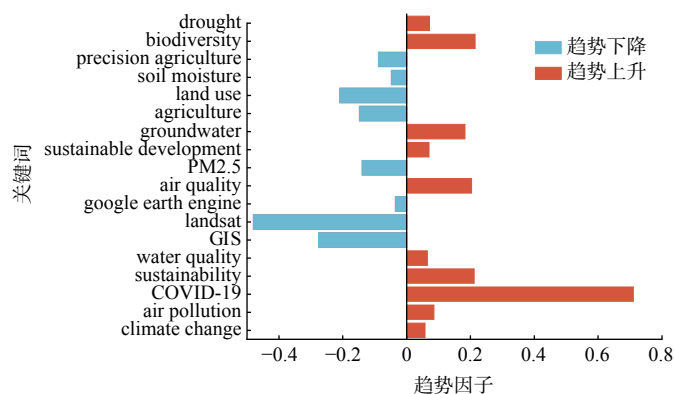
可分为五个明显的类别，以五种颜色表示，包括机器学习（绿色）、深度学习（红色）、模型（紫色）、生态与气候变化（蓝色）和环境质量与风险（黄色）。对上述分类进一步分析可知，人工智能在环境领域的应用过程可分为人工智能自身发展与其在环境中的应用两大方面。结合术语出现的平均时间（图 5(b)）可知，在过去 30 多年中，人工智能领域的发展处于不断迭代当中；其在生态与气候变化中的应用存在一定滞后性，在环境质量与风险中的应用具有前沿性。据此，分析认为可加强环境工程细分领域与人工智能的交叉融合，推动学科的稳步和超前发展，使人工智能更好的服务于环境工程领域的发展。

3 人工智能在环境工程领域的应用趋势与挑战

3.1 人工智能在环境工程领域研究方向趋势分析

基于文献计量方法中趋势因子结果，分析了人工智能在环境工程领域研究方向的发展情况。研究方向的趋势因子随时间推移呈正值，表明研究热度不断上升，发展趋势日益明显。从 24 472 篇论文中筛选出现频率最高的 100 个研究方向，对其中与环境工程领域相关的 18 个细分研究方向进行趋势因子分析。由图 6(a) 结果知，10 个研究方向的趋势因子为正值，显示了人工智能在未来环境领域发展中的广泛应用潜力。具体而言，COVID-19 的趋势因子达 0.71，但考虑到其在 2020—2022 年出现的短期流行性，未来发展潜力不在考虑范围内；生物多样性、地下水、空气质量、可持续发展等相关研究方向的趋势因子为 0.2 左右，表明其具有较大的发展潜力；水环境质量、空气污染、气候变化相关研究方向趋势因子约为 0.05~0.1，显示了一定的未来发展潜力。

对 18 个细分研究方向的标准化累积关键词频率进行分析，结果如图 6(b) 所示。自 2020 年以来，包括地表水、空气质量、水环境质量、空气污染、气候变化、可持续发展等 10 个方向在文献报道中出现的频率日益增加，表明其具有明显的发展趋势和潜力。这可能与人工智能在新污染物预测、环境功能材料设计、生物信息学、大数据处理等环境领域的迁移应用有关^[14-15]。



(a) 重要研究方向趋势分析

3.2 人工智能在环境工程领域的挑战

近年来,人工智能在环境工程领域研究和应用取得了快速发展,加快了水污染控制、空气污染治理、可持续发展与环境健康等环境问题的解决。然而,环境是典型的复杂系统,环境工程面对的是复杂的现实问题,需要多学科交叉支撑。因此,为推动环境工程智能化发展,人工智能在环境工程领域的应用尚需突破以下诸多挑战。

1) **环境工程与生成式人工智能。**机器学习是人工智能的子集,生成式模型是机器学习的主要方法^[16]。传统机器学习方法多面向单一任务、具有一定的局限性,难以解决环境工程面临的复杂性、交叉性等现实问题^[17]。部分人工智能工具的缺点在于随机权重和偏差导致的可重复性差,这可能导致局部最优解,或是由于缺乏足够的数据集^[18],数据的可用性较弱,在完善数据集后,应用选择上需要结合具体应用场景^[19]。与此同时,以 ChatGPT 为代表的基于大量学习理解内容模式创造新内容的生成式人工智能 (generative artificial intelligence) 技术迅速发展,成为是当前最具有应用前景的人工智能技术,为人工智能在环境工程领域的应用带来新的机遇^[20]。借助生成式人工智能技术高效的信息处理与分析能力和强大的多模态信息处理能力,环境工程领域发展可基于“AI for Science”的理念^[21],在高复杂度、高知识密度、高重复性等研究工作场景下助力科学家做出更快、更准确的决策,推动科学进步和创新。为实现上述目标,尚需突破环境工程领域的生成式人工智能模型专业化,生成式人工智能场景下环境工程领域人机边界划分^[22],以及面向通用人工智能 (artificial general intelligence, AGI) 的环境工程复杂任务智能体构建等重大挑战^[16]。

2) **环境工程与可解释人工智能。**在环境工程领域,人工智能的应用与政策密切相关^[23]。随着 AI 在碳足迹估算、水环境监测和大气环境监测等具体方向的广泛应用,利益相关者对算法预测及其可信度的质疑日益增加,AI 模型所带来的决策面临透明度问题^[24]。为进一步提升决策支持系统的科学性和透明性,可引入可解释人工智能 (xAI) 作为独立的分析模块嵌入,通过提供交互式可视化和情境敏感的解释工具,使政策制定者能够查看特征因素的动态影响。通过集成特征敏感性分析和不确定性评估等功能,提升模型解释的可靠性,识别关键风险因素。结合反馈学习,不断优化系统的预测和解释能力,辅助政策制定者和工程师制定更稳健的科学决策。大多数 xAI 模型在经过训练后进行分析。全局 xAI 方法则通过生成变量重要性来总结模型^[25],或通过使用可解释模型对原始模型进行近似以简化模型。需要指出,xAI 已经成为处理机器学习模型不可或缺的工具,但这些方法在特征共线性情况下的可靠性仍有待提高^[26];此外,适用于环境工程领域的专门 xAI 方法开发亦是需要解决的关键问题^[27]。

3) **环境工程与人工智能环境效应。**人工智能的快速发展促使算力需求呈指数级增长,由此引发了人们对能源消耗和碳排放增加的环境效应担忧^[28-29]。据相关量化分析表明^[30],2020—2024 年间全球发布的 79 个重要人工智能系统中,碳排放量排名前 20% 的人工智能系统每年将产生高达 1.026×10^8 tCO₂ 当量的碳足迹,由此可能产生超过 100×10^8 美元的碳税,对环保市场产生重要影响。此外,未来 5~10 年内,人工智能服务的需求将以每年 30%~40% 幅度递增,引发人工智能系统的持续迭代、算力的指数级增长、能源消耗和碳排放的不断提高^[28]。因此,在推进人工智能发展的同时,须重视其引发的碳排放问题。为此,在加强人工智能和环保领域间数据共享、开发碳排放量化分析方法、设定与人工智能系统相匹配的碳排放限制 (包括总碳排放量和碳排放强度)^[31]、提高可持续能源使用比例等方面,需要交叉领域间的共同协作,以应对可能出

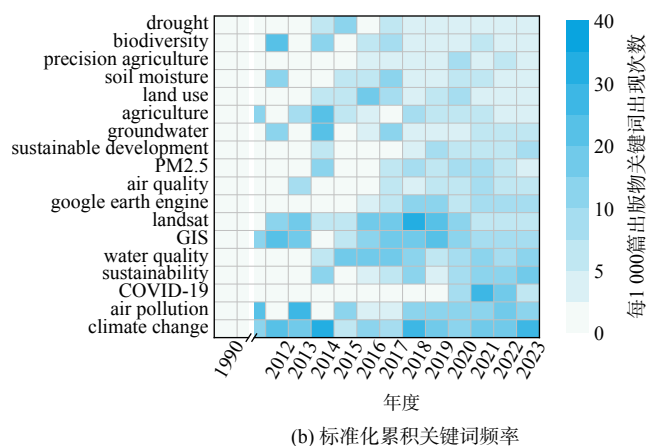


图6 人工智能在环境工程领域重要研究方向趋势分析及其标准化累积关键词频率

Fig. 6 Evolution trend of the top 18 research directions of artificial intelligence application within the field of environmental engineering based on trend factor and normalized cumulative frequency

现的矛盾和挑战, 构建更加低碳可持续的 AI 未来。

4) **环境工程与人工智能应用的政策与监管。**健全的政策和监管框架不仅有助于促进 AI 技术的研发和应用, 而且可确保其在应用中的合理性和规范性。首先, 政策制定要求 AI 系统的算法具有透明性和可解释性, 便于监管机构和公众对其决策过程进行监督。其次, 政策制定要求 AI 系统的算法具有公正性, 以防止因算法偏见带来的伦理问题。例如, AI 系统应用于环境工程领域污染物排放预测或水质监测时, 算法的差异会影响决策的准确性和公正性^[32]。另一方面, 在基于历史数据训练 AI 模型时, 数据样本的偏差可能会导致 AI 系统对某些地区或群体环境风险的放大, 导致资源分配不公^[32-33]。因此, AI 应用于环境工程领域过程中, 有必要通过政策制定和监管实施, 确保高质量数据的采集、共享以及处理过程中的平衡性与公正性。综上, 可考虑引入第三方监管决策机构, 在 AI 发展的合理范围内增加伦理和规范化的考量, 通过多方共同努力, 提高 AI 在环境工程领域应用的有效性。

此外, 人工智能在环境工程领域的应用, 也面临着模型构建所需的数据获取、训练数据集构建、模型开发和使用过程中的准确输出、多组分信息融合技术的优化等操作层面的诸多现实问题。

4 结论

人工智能作为新兴颠覆性技术, 在环境工程领域中的重要性日益增加。近年来, 人工智能领域在我国发展迅速, 其在环境工程学科中水环境质量、空气污染、可持续发展与气候变化和环境健康等研究方向的迁移应用展现出潜力。未来, 为应对多发的复合环境问题和灵活快速响应新的环境挑战, 尚需在生成式人工智能、可解释人工智能、人工智能环境效应、政策与监督等方面迎接挑战, 在人工智能辅助的环境工程基础科学问题解决、人工智能+环境工程 (AI+Environmental Engineering) 研究范式的建立等方面实现突破, 支撑我国环境工程学科的智能化和跨越式发展。

参考文献

- [1] HOLZINGER A, KEIBLINGER K, HOLUB P, et al. AI for life: Trends in artificial intelligence for biotechnology[J]. *New Biotechnology*, 2023, 74: 16-24.
- [2] Statista. Artificial Intelligence: Global Investment and Trends [EB/OL]. [2024-11-10] <https://www.statista.com/outlook/tmo/artificial-intelligence/worldwide#market-size>.
- [3] ZHONG S, ZHANG K, BAGHERI M, et al. Machine learning: new ideas and tools in environmental science and engineering[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(19): 12741-12754.
- [4] RUIZ-ROSETO J, RAMIREZ-GONZALEZ G, WILLIAMS J M, et al. Internet of things: A scientometric review[J]. *Symmetry*, 2017, 9(12): 301.
- [5] VANECK N, WALTMAN L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping[J]. *Scientometrics*, 2010, 84(2): 523-538.
- [6] ZHU J J, DRESSEL W, PACION K, et al. ES&T in the 21st century: A data-driven analysis of research topics, interconnections, and trends in the past 20 years[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(60): 3453-3464.
- [7] MARCAL J, BISHOP T, HOFMAN J, et al. From pollutant removal to resource recovery: A bibliometric analysis of municipal wastewater research in Europe[J]. *Chemosphere*, 2021, 284: 131267.

- [8] MORAL-MUÑOZ J A, HERRERA-VIDEIRA E, SANTISTEBAN-ESPEJO A, et al. Software tools for conducting bibliometric analysis in science: An up-to-date review[J]. *Profesional de la Información*, 2020, 29(1): e290103.
- [9] YU Y, WANG S, YU P, et al. A bibliometric analysis of emerging contaminants (ECs)(2001-2021): Evolution of hotspots and research trends[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 907: 168116.
- [10] PERRAULT R, CLARK J. Artificial intelligence index report 2024[J]. 2024, arXiv: 2405. 19522.
- [11] BIAN Y, LU Y, LI J. Research on an artificial intelligence-based professional ability evaluation system from the perspective of industry-education integration[J]. *Scientific Programming*, 2022(1): 4478115.
- [12] Epoch AI. Compute trends across three eras of machine learning[EB/OL]. [2024-8-31]. <https://epochai.org/blog/compute-trends>.
- [13] LIU X, LU D, ZHANG A, et al. Data-driven machine learning in environmental pollution: gains and problems[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(4): 2124-2133.
- [14] 李佳礼, 刘杰, 胡承志, 曲久辉. 人工智能驱动的可持续环境基础研究系统[J]. *环境工程学报*, 2024, 18(5): 1205-1218.
- [15] MORGAN D, JACOBS R. Opportunities and challenges for machine learning in materials science[J]. *Annual Review of Materials Research*, 2020, 50: 71-103.
- [16] 齐剑川, 史文杰, 徐常青, 等. 生成式人工智能在环境工程中的应用前瞻[J]. *环境工程学报*, 2024, 18(9): 2375-2380.
- [17] MALVIYA A, JASPAL D. Artificial intelligence as an upcoming technology in wastewater treatment: A comprehensive review[J]. *Environmental Technology Reviews*, 2021, 10(1): 177-187.
- [18] XU Y, WANG Z, NAIRAT S, et al. Artificial intelligence-assisted prediction of effluent phosphorus in a full-scale wastewater treatment plant with missing phosphorus input and removal data[J]. *ACS ES& T Water*, 2023, 4(3): 880-889.
- [19] ALAM G, IHSANULLAH I, NAUSHAD M, et al. Applications of artificial intelligence in water treatment for optimization and automation of adsorption processes: Recent advances and prospects[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 427: 130011.
- [20] WU YP, XU M, LIU SM. Generative artificial intelligence: a new engine for advancing environmental science and engineering[J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58: 17524-17528.
- [21] LAWRENCE N D, MONTGOMERY J. Accelerating AI for science: open data science for science[J]. *Royal Society Open Science*, 2024, 11(8): 231130.
- [22] MARGULIES F, ZEMANEK H. Man's role in man-machine systems[J]. *Automatica*, 1983, 19(6): 677-683.
- [23] LIEBIG L, GÜTTEL L, JOBIN A, et al. Subnational AI policy: shaping AI in a multi-level governance system[J]. *AI & Society*, 2024, 39(3): 1477-1490.
- [24] PICHLER M, HARTIG F. Machine learning and deep learning-A review for ecologists[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2023, 14(4): 994-1016.
- [25] MINH D, WANG H X, LI Y F, et al. Explainable artificial intelligence: A comprehensive review[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2022, 55(5): 3503-3568.
- [26] LINARDATOS P, PAPASTEFANOPOULOS V, KOTSIANTIS S. Explainable ai: A review of machine learning interpretability methods[J]. *Entropy*, 2020, 23(1): 18.
- [27] NALLAKARUPPAN M K, GANGADEVI E, SHRI M L, et al. Reliable water quality prediction and parametric analysis using explainable AI models[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 7520.
- [28] LUERS A, KOOMEY J, MASANET E, et al. Will AI accelerate or delay the race to net-zero emissions?[J]. *Nature*, 2024, 628(8009): 718-720.
- [29] TADDEO M, TSAMADOS A, COWLS J, et al. Artificial intelligence and the climate emergency: Opportunities, challenges, and recommendations[J]. *One Earth*, 2021, 4(6): 776-779.
- [30] YU Y, WANG JH, LIU Y, et al. Revisit the environmental impact of artificial intelligence: the overlooked carbon emission source[J]. *Frontier in Environmental Science & Engineering*, 2024, 18(12): 1-5.
- [31] CHIEN A A, LIN L, NGUYEN H, et al. Reducing the Carbon Impact of Generative AI Inference (today and in 2035)[C]//Proceedings of the 2nd workshop on sustainable computer systems. 2023: 1-7.
- [32] BAUM S D, OWE A. Artificial intelligence needs environmental ethics[J]. *Ethics, Policy & Environment*, 2023, 26(1): 139-143.
- [33] NISHANT R, KENNEDY M, CORBETT J. Artificial intelligence for sustainability: Challenges, opportunities, and a research agenda[J]. *International Journal of Information Management*, 2020, 53: 102104.

(责任编辑: 金曙光)

Application of artificial intelligence in environmental engineering: Hotspots evolution and future trends

YANG Jing^{1,*}, ZHANG Meng², ZHU Liang², ZHANG Weijun³, XU Ming⁴, WANG Dongsheng², YU Hanqing⁵, WANG Hualin⁶, WU Minghong⁷, REN Hongqiang⁸

1. Department of Engineering and Material Science, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China; 2. College of Environmental and Resources Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. National Engineering Research Center of Industrial Wastewater Detoxication and Resource Recovery, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 4. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 5. Department of Environmental Sciences and Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230022, China; 6. School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 7. College of Environment and Safety Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 8. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China

*Corresponding author, E-mail: yangjing@nsfc.gov.cn

Abstract Environmental engineering is confronted with new challenges and prospects. It necessitates a shift in the paradigm of scientific research, and transcending the disciplinary confinement of end-management as the primary objective. This shift is crucial for enabling environmental engineering to play a more pivotal role in addressing global ecological and environmental challenges. On the other hand, artificial intelligence (AI) stands as one of today's innovative technologies, with its application in environmental engineering marking a pivotal direction for future innovation. This study employed bibliometric methods to sift through an extensive collection of over 24 000 papers related to AI and environmental engineering, spanning from 1990 to 2023. It analyzed the prominent institutions globally involved in this field, illustrated the current research directions of AI in environmental engineering, and discussed the evolution and future trends of research hotspots. Additionally, the potential challenges were also raised. Consequently, this study aims to provide suggestions and insights for the research and development of AI in environmental engineering, facilitating the rapid advancement of China's environmental engineering disciplines.

Keywords environmental engineering; artificial intelligence; research directions; trend analysis; challenges