

## 供排水企业运行及管理成果专栏

纪洪艳. 水务行业人工智能应用的文献计量分析[J]. 净水技术, 2024, 43(12): 205-212.

Ji H Y. Bibliometric analysis of the artificial intelligence application in water industry[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(12): 205-212.

## 水务行业人工智能应用的文献计量分析

纪洪艳\*

(上海城投水务<集团>有限公司, 上海 200082)

**摘要** 研究梳理了国内外水务行业应用人工智能(AI)的研究进展, 重点关注了中国和其他国家水务行业人工智能应用的范围, 并探究了未来人工智能在本领域的发展潜力。使用文献计量学方法, 以中国知网和 Web of Science 数据库中 2003 年—2023 年的研究作为数据来源, 基于 CiteSpace 软件的数据分析结果, 对水务行业人工智能的研究热点、发展历程和研究趋势进行可视化分析。通过国内外发展历程的对比分析, 表明我国水务行业人工智能起步与国外接近, 但研究侧重点有所不同, 国内研究偏向于智慧水务的整体解决方案, 主要目的是降本增效, 对于以提高污染物去除率和提高水处理效率等核心技术的渗透略浅于国外研究; 聚类分析发现国内对于人工智能的研究主要分为智慧水务与数字孪生、优化调度与资源回收、处理技术提升与机理研究, 相较于国外, 针对具体水处理技术的算法优化与改进的研究略少。传统水务行业必将成为集化学、生物、计算机等多学科的交叉领域, 利用人工智能合成环保材料、设计绿色工艺将成为未来国内外的主流研究方向。

**关键词** 人工智能 水务行业 文献计量 研究进展 智慧水务 绿色工艺

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2024)12-0205-08

**DOI:** 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.12.023

## Bibliometric Analysis of the Artificial Intelligence Application in Water Industry

Ji Hongyan\*

(Shanghai Chengtuo Water <Group> Co., Ltd., Shanghai 200082, China)

**Abstract** This study sorts out the research progress in applying artificial intelligence (AI) in water industry at home and abroad, focuses on the scope of AI application in the water industry in China and other countries, and explores the future development potential of AI in this field. Using bibliometric methods, studies from 2003 to 2023 in the China Knowledge and Web of Science databases were used as data sources, and the results of data analysis based on CiteSpace software were used to visualize and analyze the research hotspots, development history and research trends of AI in water industry. Through the comparative analysis of the development history at home and abroad, it showed that China's artificial intelligence in the water industry started with foreign countries but the focus of the research was different, the domestic research was biased towards the overall solution of intelligent water services, the main purpose was to reduce costs and increase efficiency, and the penetration of the core technology of improving the pollutant removal rate and improving the efficiency of water treatment was slightly shallower than that of the foreign research; clustering analysis reveals that the domestic research on AI is mainly classified into Intelligent water and digital twin, optimal scheduling and resource recovery, treatment technology enhancement and mechanism research, compared with foreign countries, the algorithm optimization and improvement of specific water treatment technology is slightly less research. The traditional water industry will become a multidisciplinary cross-field of chemistry, biology, computers and other disciplines, and the use of artificial intelligence to synthesize environmentally friendly materials and design green processes will become the mainstream research direction at home and abroad in future.

**Keywords** artificial intelligence water sector bibliometrics research progress smart water green process

[收稿日期] 2024-10-08

[基金项目] 上海市科委科技创新计划(20DZ1204601)

[通信作者] 纪洪艳(1981—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为企业科技与信息化管理, E-mail: 398034494@qq.com

当今水处理面临工业化进程加快和人口增长带来的严峻挑战<sup>[1]</sup>,过去的几十年,围绕开发高效、经济的新型水处理技术以及优化供水配置的研究层出不穷<sup>[2-4]</sup>,同时各种用于评估性能和降本增效的优化与建模方法也得到广泛应用<sup>[5-7]</sup>。

人工智能(AI)是计算机科学领域的分支,近几年由于机器学习<sup>[8]</sup>、大预言模型<sup>[9-10]</sup>的兴起而广受关注,凭借自主学习、逻辑推理和决策能力,AI已成为解决现实问题的有力工具,并几乎适用于所有的交叉学科领域。

水务领域作为传统行业的典型代表,正逐步引入AI为优化水处理工艺、水资源调控等提供可行方案,根据美国和加拿大的市场调查预测,2030年水务行业在AI上的投资将达到63亿美元,通过优化处理工艺可帮助节省20%~30%的运营输出<sup>[11]</sup>。以智慧水务、数字孪生为代表,AI在我国水务行业也有显著的应用,然而运用AI提高污染物去除率、设计环保水处理材料等方面的研究相对落后于国外研究。结合AI的发展历程,梳理和总结国内外水务行业AI的研究进展,对比分析中外研究侧重点,并揭示未来的发展方向,为国内研究者提供技术突破的思路。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 数据来源

使用Web of Science(WOS)作为国外研究数据库,使用中国知网作为国内研究数据库,对AI在国内外水务行业的发展状况进行分析。WOS专业检索式为"artificial intelligence \*","AI","algorithm"(Topic),"water treatment","water process","sewage treatment","water plant"(Topic),数据库限制WOS核心数据库,共检索出文献1354篇;中国知网专业检索式为SU%=("AI"+"算法"+"模型"+"机器学习"+"数字")\*("水处理"+"水厂"+"水务"+"水工艺"),时间为2003年1月1日—2023年12月31日,共有2305篇,经人工验收筛除相关性较小的文献后选出2121篇研究型论文。

### 1.2 研究方法

采用CiteSpace软件<sup>[12]</sup>对筛选后的文献数据库进行计量研究,利用pathfinder、prune split networks和prune merge network算法绘制图谱,g-index中 $k=25$ ,Top N设置为50。国外WOS数据得到612个节

点;中国知网数据得到542个节点,时间轴为2003年—2023年,时间切片为1年,其他设置为默认值,图谱中连线的粗细代表关键词之间的关联程度,关键词的出现频率决定标题的尺寸,关键词的共现程度由连线数量表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 国内外水务AI的发展历程对比

#### 2.1.1 发文量

AI诞生于20世纪40年代—50年代<sup>[13]</sup>,伴随算法开发与改进、底层逻辑结构的优化、硬件设备的进步,在近几十年广泛应用到其他领域中。文章将2003年—2023年的文献样本进行归纳分析,结果如图1所示,将近20年来的相关研究分为4个阶段。

#### 2.1.2 起步阶段(2003年—2007年)

21世纪初AI领域以Hinton<sup>[14]</sup>提出的深度学习为代表,掀起了第3次浪潮期。此阶段的水务行业仍然是传统技术主导市场,国内外对于AI应用于水务行业都处于探索阶段,停留在理论研究和有限的试验中。此阶段国外发表文献共86篇,同阶段国内发表文献共246篇。国内外关于AI与水处理结合的研究在不同的应用场景中各有侧重。

国外研究更多基于实际工艺的智能优化,此阶段国外的研究重心为算法创新与控制系统优化。研究领域主要集中在算法与模型优化、智能控制与系统开发、水处理技术改进与应用、污染物处理与环境监测方面,通过各种AI算法,如神经网络、模糊系统和遗传算法,提升污水处理的自动化和智能化水平,同时探索实际工艺流程如活性污泥法、生物处理等领域的应用场景。

国内则侧重于水务系统的调度优化和仿真模拟,此阶段国内研究重心为自动化管理水处理系统。研究集中在系统优化与仿真建模、神经网络与AI应用、工艺性能与污染物去除效果评估,通过仿真和优化调度技术提高供水和污水处理系统的运行效率,结合神经网络等AI算法,推动自动化控制技术的发展。

#### 2.1.3 发展阶段(2008年—2013年)

此时期AI在多个领域展现出解决复杂问题的能力<sup>[15]</sup>。第二阶段开始,国内发文数量开始逐年增加,并涉及到多个方向,如模型构建、预测控制、工艺评估等,自2009年起每年发文增加10篇以上,共计476篇,同期国外发表论文188篇,体现了2007年

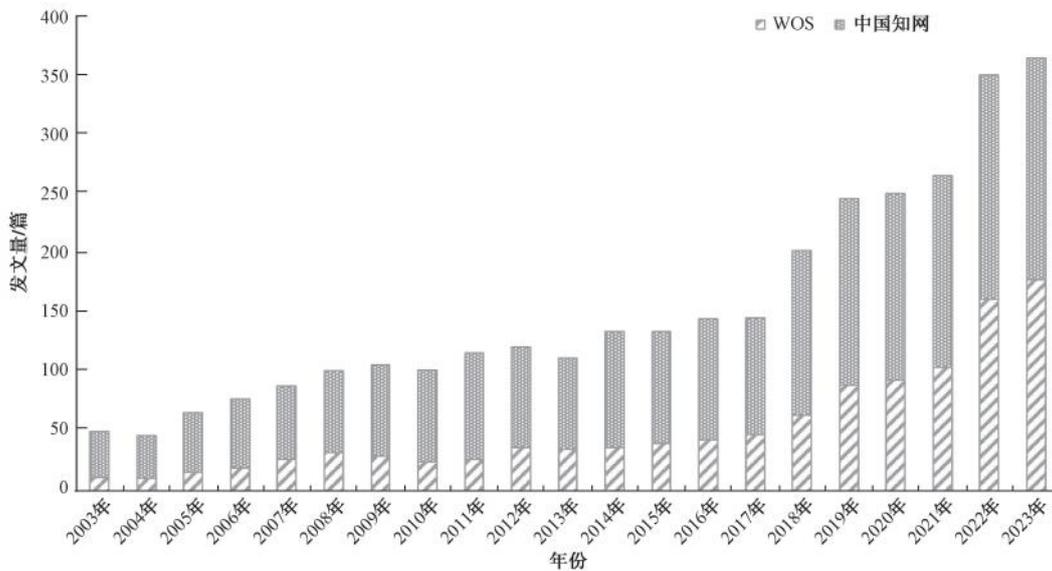


图1 国内外水处理领域AI发文量年度分布

Fig. 1 Comparison of Annual Publications on AI in Water Treatment at Home and Abroad

以后国内外水务行业 AI 领域的快速发展与广泛应用。国外的研究中大量运用深度学习模型,对水处理过程进行模拟与优化,如使用神经网络预测不同环境变量和运行条件下的水质、使用改进遗传算法、粒子群算法等寻找降本增效的工艺参数,此外贝叶斯统计、方向传播算法也在水质预测、污染物去除和系统控制方面具有探索性应用。国内研究中 AI 模型的应用更多与实际工程结合,多为支持决策和优化控制系统,解决供水系统的优化设计和调度、特定区域水资源管理和工程优化问题。

#### 2.1.4 拓展阶段(2014年—2019年)

此阶段得益于大数据和计算机技术的快速发展,机器学习技术广泛渗透到工业、经济社会、科学研究等多个领域<sup>[16]</sup>,例如生态学模型训练、疾病预测及新药研发等。此阶段尤其是2016年以后,发文数量显著增长,国内共发文690篇,当期国外文献数量达到325篇,AI在水处理行业从早期的实验室研究走向实际应用,智能水务系统、数字孪生系统等技术开始落地。此期间国外侧重AI技术开发与应用,例如使用优化相应面算法、人工蜂群算法、蚁群算法等与水处理结合,设计纳米吸附材料、构建生物膜反应器、活性污泥模型等;智慧水厂、智慧水务等关键词则表明国内侧重行业实践,重点围绕利用大数据、云计算技术建设智慧水务系统,应对特定应用需求,如供水压力优化和加药系统智能管理等。

#### 2.1.5 应用阶段(2020年—2023年)

2020年以OpenAI发表的GPT-3为代表,AI技术迎来了前所未有的应用暴发期<sup>[17]</sup>,水务行业开始利用数字化技术实现智能决策、远程管理等,水务行业开始利用数字化技术实现智能决策、远程管理等, AI技术已涉及到水务行业的多个核心环节,发文数量快速攀升,国外期刊共计发表541篇,国内期刊发表期刊共计697篇。国外研究集中在通过AI提升污染物去除技术和水质优化,在深度污染处理、资源利用效率提升等领域表现出更深入的探索,例如使用EEM-PARAFAC等结合的分析方法<sup>[17-19]</sup>,并通过“深度学习”模型实现水质预测与实时监测的结合,实现对复杂水质数据的高效解读,提高水务管理的反应速度与精度;国内的研究多关注城市内涝防治、污水处理厂优化、水质监测和智慧水务系统的集成应用,侧重在将多种AI技术集成应用到大型复杂的水务系统中,实现高效调度和管理。这4个阶段国内外在相关领域的出版数量和关键词如表1所示。

未来国内外在“AI+水务”的研究方向可能会进一步融合,预计国内将在污染物治理技术上提高精度,而国外也可能逐步提升对智慧水务的系统集成与AI优化的关注度,诸如数字孪生、大数据处理、智能监控与自动化决策等领域的突破将会推动整个行业的智能化升级, AI将渗透至水务的更多核心业务。

表 1 国内外水务行业 AI 研究阶段性分析

Tab. 1 Analysis of Stages of AI Research in Domestic and International Water Sector

阶段	年份	关键词(国外)	关键词(国内)	发表文献数量/篇
起步阶段	2003 年—2007 年	deep learning, intelligent optimization, control systems, automation	深度学习、智能优化、控制系统、自动化	国外:86 国内:246
发展阶段	2008 年—2013 年	deep learning, model construction, predictive control, process evaluation, genetic algorithm, particle swarm algorithm	深度学习、模型构建、预测控制、工艺评估、遗传算法、粒子群算法	国外:188 国内:476
拓展阶段	2014 年—2019 年	big data, digital twin system, artificial bee colony algorithm, ant colony algorithm, smart water plants, nanomaterial design, biofilm reactors, activated sludge models	大数据、数字孪生系统、人工蜂群算法、蚁群算法、智慧水厂、纳米吸附材料、生物膜反应器、活性污泥模型	国外:325 国内:690
应用阶段	2020 年—2023 年	digitization, smart decision-making, remote management, water quality optimization, pollutant removal, smart water systems, flood prevention, wastewater treatment plant optimization, water quality monitoring	数字化、智能决策、远程管理、水质优化、污染物去除、智慧水务、城市内涝防治、污水处理厂优化、水质监测	国外:541 国内:697

## 2.2 国内外研究热点对比

### 2.2.1 国内外水务 AI 领域共词分析

共词分析是常见的内容分析方法,通过关键词出现频率计算其权重,用于展现此领域内不同

专业词汇的共现情况,反映此领域的主要研究方向和热点问题<sup>[20]</sup>。研究利用 CiteSpace 软件对国内外文献进行数据分析,构建高频关键词网络知识图谱(图 2)。

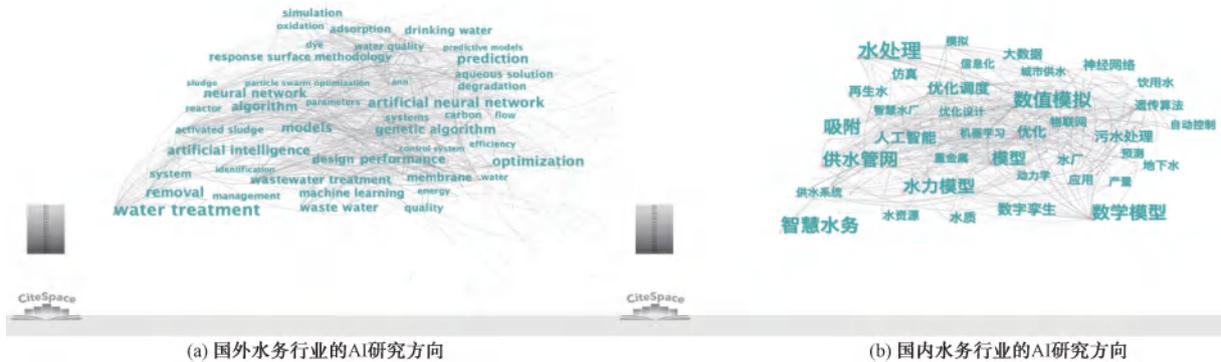


图 2 国内外水务 AI 关键词共现图谱

Fig. 2 Co-Occurrence Map of AI Keywords for the Water Sector at Home and Abroad

图 2(a)中,国外水务行业的 AI 研究主要分为 4 个方向。(1)系统优化与性能提升:主要在水务领域应用各种改进算法,优化控制系统、提升水质处理和管理效率。(2)AI 应用场景开发:主要投入在人工神经网络、机器学习和深度学习的应用方面,用于建立预测模型、提高水质管理、污染物去除等方面的效率。(3)仿真模型构建:主要利用建模方法并内嵌其他计算模型,用于调试系统性能、复现不同条件下的水质变化。(4)水质管理与优化:主要针对分离技术(如膜分离、

反渗透和微滤等)及其他污染物去除技术(氧化、吸附和降解),通过利用 AI 改进传统处理工艺来提升水质。

图 2(b)中,国内水务行业的 AI 研究主要分为 3 个方向。(1)智慧水务与数字孪生:涉及传感器网络、物联网等智能化技术的应用,侧重于通过数字孪生技术实现水务行业的智能管理。(2)优化调度和资源回收:国内同样重视仿真技术的应用,尤其是水务系统的动态模拟和水力模型的构建,计算管网压力和优化调度方案;同时关注再生水利用和中水回

收,以实现水资源的可持续利用。(3)处理技术提升和机理研究:有关污染物去除方向,国内研究集中在吸附机理探究、膜技术改进,并重点关注重金属去除等领域。

### 2.2.2 国内外水务 AI 领域聚类分析

聚类分析是根据研究对象之间的相似性,利用

多种聚类算法,将相似度较大的对象聚为一类,有助于理解全局特征分布、识别特殊类别<sup>[21]</sup>。由于软件限制,中外数据不能同时编码,因此将簇重新编号为#0~#19,其中#0~#9为国外数据编码,#10~#19为国内数据编码,生成关键词聚类网络(图3)和聚类词表(表2)。

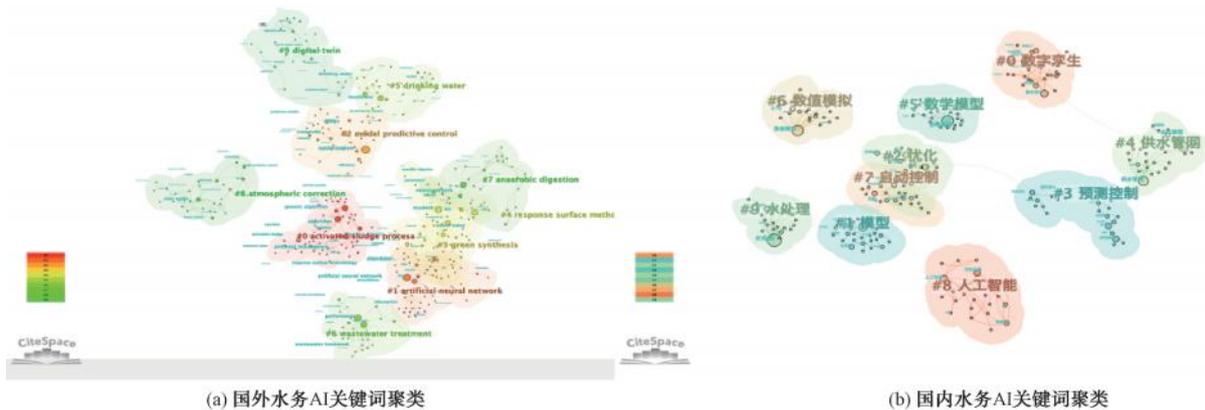


图3 国内外水务 AI 关键词聚类分析图谱

Fig. 3 Cluster Analysis Map of AI Keywords for the Water Sector at Home and Abroad

如图3与表2所示,国外研究在预测控制与优化技术、绿色与可持续利用技术和新兴污染物与环境监

测方面有突出亮点。国内研究则突出在智慧水务与数字孪生、健康风险评估和模型构建与数值模拟方面。

表2 国内外水务 AI 研究关键词聚类表

Tab. 2 Clustering Table of Keywords for AI Research in Water Sector at Home and Abroad

聚类代码 (国外)	年份 (国外)	聚类名称 (国外)	WOS: Clustering contains 关键词(国外数据)	聚类代码 (国内)	年份 (国内)	聚类名称 (国内)	中国知网: Clustering contains 关键词(国内数据)
#0	2009年	activated sludge process	activated sludge, process, synthetic, dye, adsorption, image recognition	#10	2013年	数字孪生	数字孪生,再生水,饮用水,健康风险评估,智慧水厂
#1	2012年	artificial neural network	artificial neural network, modeling and simulation, simulation, advanced oxidation process, numerical simulation	#11	2009年	模型	模型,纳滤膜,分离机理,污水,水污染
#2	2013年	model predictive control	model predictive control, artificial intelligence, multi-objective optimization, recycle, networks	#12	2012年	优化	优化,温室,预测,水质
#3	2015年	green synthesis	green synthesis, industry, hazard indicators, sustainable utilization	#13	2009年	预测控制	预测控制,仿真,pH,综合节能,CFD设计
#4	2015年	response surface methodology	response surface methodology, water distribution system, adsorption, artificial neural networks (ANNS), methylene blue	#14	2011年	供水管网	供水管网,水力模型,水质模型,引水工程,微观模型
#5	2013年	drinking water	drinking water, coagulation, drinking water treatment, seawater desalination, fomode	#15	2011年	数学模型	数学模型,物理模型,现场总线,电磁场,机理法
#6	2008年	wastewater treatment	Wastewater treatment, sewage treatment plant, sewage treatment, bioassay, multilayer perceptron	#16	2014年	数值模拟	数值模拟,地下水,visual mudflow,工艺优化,海绵城市

(续表2)

聚类代码 (国外)	年份 (国外)	聚类名称 (国外)	WOS: Clustering contains 关键词(国外数据)	聚类代码 (国内)	年份 (国内)	聚类名称 (国内)	中国知网: Clustering contains 关键词(国内数据)
#7	2016年	anaerobic digestion	Anaerobic digestion, inverse modeling, emerging pollutants, metabolomics, tabu search	#17	2012年	自动控制	自动控制,应用,水厂,混凝,信息化
#8	2013年	atmospheric correction	Atmospheric, correction, nonpoint, source pollution, water quality, constructed, wetlands, heavy metals	#18	2016年	人工智能	人工智能,物联网,污水处理,智慧排水,专家系统
#9	2015年	digital twin	digital twin, process design, conventional waterworks, vinegar, adsorption process	#19	2012年	水处理	水处理,三维,影响因素,评价,水力空化

通过共词分析与聚类分析可以看出,虽然国内外在水务行业中都注重优化和智能化技术的应用,但国内更偏向于智慧水务的整体解决方案,而国外则更专注于具体技术的优化和创新。

### 2.2.3 国内外水处理行业 AI 突显词分析

突显词 (burst terms) 是由根据时间跨度

和出现频率计算划分的词汇,往往和当期政策、法规以及新兴技术等具有较高关联性,能较高程度地反映出当前的研究热点,并对预测未来热点出现具有参考性作用<sup>[22]</sup>,通过绘制国外水务行业 AI 的突显词列表(表3)可以得出。

表3 国内外研究突显词表

Tab. 3 Domestic and International Research Burst Terms List

关键词(国外)	强度(国外)	突显开始年份 (国外)	突显消失年份 (国外)	关键词	强度(国内)	突显开始年份 (国内)	突显消失年份 (国内)
systems	3.79	2010年	2013年	水力模型	5.38	2014年	2016年
genetic algorithm	3.42	2017年	2019年	水处理	4.09	2014年	2015年
coagulation	3.45	2018年	2019年	遗传算法	2.54	2016年	2020年
support vector machine	3.63	2020年	2023年	模型	3.99	2018年	2019年

(1)系统相关的研究在2010年—2013年成为国外研究热点,这可能与当期水处理、污水处理系统优化与自动化管理的需求增加相关,研究者关注如何构建与优化科学系统用于协调水处理过程。

(2)水力模型在2014年—2016年成为国内研究热点,此期间高频关键词例如供水管网、调度优化等都反映出当期国内研究者对供水管网、水力仿真和水资源调度较为重视。

(3)遗传算法几乎在同一时间段成为国内外的突显词汇,此阶段使用优化算法优化水处理工艺、构建模型预测水质参数等研究成为国内外的共同焦点。

(4)支持向量机与响应面算法作为机器学习算法,先后成为国外(2020年—2023年)和国内(2018年—2020年)的关注重点,表明国内外研究者开始重点使用机器学习进行水质预测、水资源管理,机器

学习方法逐渐在水处理行业得到快速应用。

(5)数字孪生和智慧水务是近年(2022年—2024年)国内的研究重点,这标志着国内在水务管理系统的智能化和信息化方向上的快速发展,智慧水务集成了物联网(IoT)技术、大数据分析、数字孪生等多种新兴技术,助力提升水资源管理的效率和智能化水平。

突显词的时间轴表明水处理与水资源管理领域正在经历将新兴技术融入传统工艺的重大转变,未来随着水资源管理的复杂性增加,必然会扩大数字孪生的应用范围,例如将数字孪生技术用于全生命周期管理,涵盖设计、运行、维护等阶段;同时近年来有关“绿色合成”“新兴污染物”“可持续性利用”等关键词的出现也表明,未来新型环保材料、绿色工艺(如光催化、膜分离技术)将广泛应用于水处理和资源回收。

## 2.3 未来机遇与挑战

当前 AI 领域大模型技术的兴起,具有强大分析、处理以及推理能力的大型语言模型,降低了非计算机专业人员运用 AI 辅助解决实际生产问题的门槛,给包括水务行业在内的传统行业带来了巨大的机遇和挑战。

### 2.3.1 水务行业的机遇

以机器学习为代表的 AI 技术,在进行数据学习前,需要进行过程较为复杂的数据预处理,随后对数据进行拟合和解释,此过程既要求操作者对水务相关参数具有足够的敏感性,还要求其具备一定的数据处理基础,对算法的选择和机器学习相关参数的调整具有足够的经验,一定程度上拉高了运用 AI 解决实际水务问题的门槛。大型语言模型则打破了以往人们解决问题的方式,水务工作者可通过对话的方式告知其基本信息和场景,并上传例如实时用水数据、气象数据等多源多样式数据,利用其本身的学习推理能力,给出初步的决策方案。通过知识库插件(RAG 技术)、微调等方式,打造适用于特定领域的专家大模型,不仅可以服务于水务日常生产,还可以提高全水务行业的知识管理水平。

### 2.3.2 水务行业的挑战

AI 技术应用离不开高质量的数据库,水务行业数据相较于传统算法开发中所使用的开源图片、文本数据集,具有一定的敏感性,且完整的水务流程涉及原水、制水、供水、排水等多家公司,这为收集齐全水务数据、打造水务领域的数据云端带来了一定程度的挑战。除了数据带来的阻碍,水务领域应尽快健全 AI 的法规和问责制度,以大模型为例,尽管当前国内外的商用大模型层出不穷,但其功能局限于文本、图片及视频生成等方面,尚未有能指导实际生产的大模型案例,AI 提供的决策结果需要有严格的专家监督与审核流程,确保其数据和方案的隐私保护和合规,充分发挥 AI 技术,推动水务行业的智能化和可持续发展。

## 3 结论

研究总结了国内外过去 20 年 AI 在水务行业发展的趋势,对比分析了国内外研究的发展历程和侧重点,相较于国外运用 AI 提升具体水处理技术,国内研究中 AI 侧重于辅助人工进行管理操作与决策。未来国内研究的发展趋势,强调集成多种模型与算

法,以满足水务行业的应用需求,通过遵循这一趋势,研究人员、政策制定者和从业者可注重对水务核心工艺与技术的模拟和整合,提升智慧水务对水务行业核心技术的驱动力,最大限度地利用 AI 为传统工艺和行业赋能。

## 参考文献

- [1] ABBOTT B W, BISHOP K, ZARNETSKE J P, et al. Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions [J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12: 533 - 540. DOI: 10.1038/s41561-019-0374-y.
- [2] BASAR I A, STOKES A, ESKICIOGLU C. Evaluation of on-site biological treatment options for hydrothermal liquefaction aqueous phase derived from sludge in municipal wastewater treatment plants [J]. *Water Research*, 2024, 252: 121206. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121206.
- [3] HOSSEINIPOUR E, DAVIES P A. Effect of Membrane properties on the performance of batch reverse osmosis (RO): The potential to minimize energy consumption [J]. *Desalination*, 2024, 577: 117378. DOI: 10.1016/j.desal.2024.117378.
- [4] QIN W, DONG Y, JIANG H, et al. A New approach of simultaneous adsorption and regeneration of activated carbon to address the bottlenecks of pharmaceutical wastewater treatment [J]. *Water Research*, 2024, 252: 121180. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121180.
- [5] SALAHSHOORI I, NOBRE M A L, YAZDANBAKHSI A, et al. Navigating the molecular landscape of environmental science and heavy metal removal: A simulation-based approach [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2024, 410: 125592. DOI: 10.1016/j.molliq.2024.125592.
- [6] MALEKAHMADI S, YOUSEFNEZHADAZI A, ASKARIPOUR H. Simulation of anaerobic biodegradation process in a tubular bioreactor with a biofilm layer: Steady-state and unsteady-state conditions [J]. *Heliyon*, 2024, 10 ( 15 ): e35397. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e35397.
- [7] VAZQUEZ S A Y, LIMA E C, ABATAL M, et al. Biosorption of Pb(II) using natural and treated *Andropogon compressus* K. leaves: Simulation framework extended through the application of artificial neural network and genetic algorithm [J]. *Molecules*, 2023, 28 ( 17 ): 6387. DOI: 10.3390/molecules28176387.
- [8] LI N, MA L, YU G, et al. Survey on evolutionary deep learning: Principles, algorithms, applications, and open issues [J]. *Acm Computing Surveys*, 2024, 56 ( 2 ): 10658. DOI: 10.48550/arXiv.2208.10658.
- [9] YUSSUF R O, ASFOUR O S. Applications of artificial intelligence for energy efficiency throughout the building lifecycle: An overview [J]. *Energy and Buildings*, 2024, 305:

113903. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.113903.
- [10] KRESEVIC S, GIUFFRE M, AJCEVIC M, et al. Optimization of hepatological clinical guidelines interpretation by large language models: A retrieval augmented generation-based framework [J]. NPJ Digital Medicine, 2024, 7(1): 102. DOI: 10.1038/s41746-024-01091-y.
- [11] STAFF W. Report: Data demand will drive \$92 billion in investment by 2030 [R]. WFM STAFF, 2020.
- [12] CHAOMEI C. Science mapping: A systematic review of the literature [J]. Journal of Data and Information Science, 2017, 2(2): 1-40.
- [13] KAPLAN A, HAENLEIN M. Siri, siri, in my hand; Who's the fairest in the land? on the interpretations, illustrations, and implications of artificial intelligence [J]. Business Horizons, 2019, 62(1): 15-25.
- [14] HINTON G E. Learning multiple a layers of representation [J]. Trends in Cognitive Sciences, 2007, 11(10): 428-434.
- [15] MARKRAM H, MULLER E, RAMASWAMY S, et al. Reconstruction and simulation of neocortical microcircuitry [J]. Cell, 2015, 163(2): 456-492.
- [16] MANYIKA J. Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity [R]. Chicago: McKinsey Global Institute, 2011.
- [17] LI L, WANG Y, ZHANG W J, et al. New advances in fluorescence excitation-emission matrix spectroscopy for the characterization of dissolved organic matter in drinking water treatment: A review [J]. Chemical engineering journal, 2020, 381: 122676. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122676.
- [18] CHEN Q, TANG B, MIAO J F, et al. Water sample classification and fluorescence component identification based on fluorescence spectrum [J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(6): 0630001. DOI: 10.3788/AOS221518.
- [19] CHEN W M, HE C, GU Z P, et al. Molecular-level insights into the transformation mechanism for refractory organics in landfill leachate when using a combined semi-aerobic aged refuse biofilter and chemical oxidation process [J]. Science of the Total Environment, 2020, 741: 740502. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140502.
- [20] 陆泉, 曹越, 陈静. 基于语义关联与模糊聚类的共词分析方法 [J]. 情报学报, 2022, 41(10): 1003-1014.  
LU Q, CAO Y, CHEN J. A co-word analysis method based on semantic relevance and fuzzy clustering [J]. Journal of the China Society for Scientific and Technical Information, 2022, 41(10): 1003-1014.
- [21] 华旦草, 安培浚, 肖仙桃. 基于文本内容的科学前沿探测方法研究进展 [J]. 现代情报, 2021, 41(1): 169-177.  
HUA D C, AN P J, XIAO X T. Research progress of scientific frontier detection methods based on text content [J]. Journal of Modern Information, 2021, 41(1): 169-177.
- [22] 黄明祥, 张健钦, 杨毅, 等. 1989—2022 年生态环境中人工智能应用的研究综述——基于 CiteSpace 的知识图谱分析 [J]. 环境保护科学, 2024, 50(2): 8-16.  
HUANG M X, ZHANG J Q, YANG Y, et al. Artificial intelligence applications in ecological environments from 1989 to 2022——Knowledge graph analysis based on CiteSpace [J]. Environmental Protection Science, 2024, 50(2): 8-16.

## (上接第 6 页)

- [5] 李庆臻. 科学技术方法大辞典 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.  
LI Q Z. Dictionary of science and technology methods [M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [6] 卢静, 辛璐, 徐志杰, 等. 污水处理 PPP 项目绩效评价难点分析与指标构建 [J]. 中国给水排水, 2022, 38(24): 29-34.  
LU J, XIN L, XU Z J, et al. Difficulty analysis and construction of performance evaluation index system for sewage treatment PPP projects [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(24): 29-34.