

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.06.020

王生晖, 杨宗帅, 陈粉丽, 等. 基于文献计量分析的地下水中氨氮污染去除研究. 土壤, 2022, 54(6): 1247–1256.

基于文献计量分析的地下水中氨氮污染去除研究^①

王生晖^{1,2}, 杨宗帅^{2,3}, 陈粉丽^{1*}, 宋 昕², 魏昌龙²

(1 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008;

3 长江大学农学院, 湖北荆州 451199)

摘 要: 本文利用 CiteSpace 和 VOSviewer 文献可视化软件, 分析了 Web of Science 数据库和 CNKI 数据库中已发表地下水中氨氮去除相关文献的发文数量、发文国家及机构、发文作者、载文期刊、关键词和共被引情况, 研究了 30 a 来地下水中氨氮污染去除的研究热点与发展趋势。结果表明: 2000 年之后, 地下水氨氮污染去除研究的发文数量不断增长, 中美两国在该领域的发文更多、联系更为紧密, 近年来在相关政策的推动下, 我国在该领域的研究成果明显增多; 中国地质大学是发文量最多的机构。目前研究热点集中在材料吸附、厌氧氨氧化、硝化反硝化作用等去除方式, 研究的污染介质较多关注浅层含水层、潜流带的地下水, 未来应加强新型吸附材料筛选及微生物脱氮等技术的研发。

关键词: 氨氮; 去除; 地下水; 文献计量

中图分类号: X52 **文献标志码:** A

Research on Removal of Ammonia Nitrogen Pollution from Groundwater Based on Bibliometric Analysis

WANG Shenghui^{1,2}, YANG Zongshuai^{2,3}, CHEN Fenli^{1*}, SONG Xin², WEI Changlong²

(1 College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2 CAS State Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3 College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 451199, China)

Abstract: In this study, CiteSpace and VOSviewer softwares were used to analyze the publications on the subject of ammonium removal from groundwater based on Web of Science (WoS) database and CNKI database, to explore the status quo and future research perspective in the past three decades. The bibliometric analysis results showed that the number of published papers has continued to increase since 2000, and China and USA have published more papers on the subject. China University of Geosciences was the institution with the largest number of published papers. At present, research focused on the removal methods, including adsorption, anammox, and nitrification /denitrification. The relevant research on the ammonium in groundwater mainly targeted those in shallow aquifers and hyporheic zones. In the future, more efforts should be made to develop new adsorbent and bioremediation technologies such as nitrification/denitrification processes.

Key words: Ammonium; Contamination removal; Groundwater; Bibliometric

生态环境部 2019 年发布的《中国生态环境统计年报》^[1]指出, 我国废水中氨氮排放量为 46.3 万 t, 主要来源有工业污染源、农业污染源、生活污染源和集中式污染治理设施等。近年来, 地下水氨氮污染逐渐成为关注重点^[2]。根据《中国生态环境状况公报(2020)》^[3], 地下水源监测点位主要超标指标包含氨氮。地下水氨氮污染途径主要包括土壤包气带中氨氮

通过淋滤作用渗入至地下水、氨氮污染地表水侧向补给地下水造成地下水的氨氮污染^[4], 地下水中氨氮主要以离子态的 NH_4^+ 与游离态的 NH_3 两种形态存在^[5], 影响生态健康和市政给水水质^[6-7], 且易被环境中存在的硝化菌转变为硝酸盐氮及亚硝酸盐氮, 危害人类身体健康^[8-9], 高浓度的氨氮具有人体非致癌风险^[10]。我国十二五、十三五规划对氨氮的排放量作了明确的

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1805100)资助。

* 通讯作者(chenfenli1102@163.com)

作者简介: 王生晖(1995—), 女, 甘肃张掖人, 硕士研究生, 主要研究方向为地下水氨氮污染修复。E-mail: shwang@issas.ac.cn

规定^[11],十四五规划提出了氨氮排放量较 2020 年减少 8% 的目标。当前我国出台的《地下水质量标准(GB/T 14848—2017)》^[12]规定地下水 IV 类水氨氮浓度限值为 1.5 mg/L。

目前,氨氮污染去除技术主要分为物理脱氮法、化学脱氮法和生物脱氮法^[13]。其中物理脱氮法主要包括氮吹脱^[14-15]、离子交换和反渗透等^[16];化学脱氮法主要包括折点加氯法^[17-18]、化学沉淀法^[19-20]、电化学法^[21]等;生物脱氮法主要为硝化-反硝化技术、厌氧氨氧化和各类新型生物脱氮技术^[22-26]。随着相关研究的深入,不同修复技术联用成为了氨氮污染去除研究的新路径^[27-28]。

近年来,国内外学者对地下水环境中氨氮污染去除的研究越来越多,但目前尚未有研究人员对该领域的研究现状、热点和发展趋势等进行归纳。文献计量分析是基于文献数据库,通过大数据分析来显示当前研究动态及预测未来发展趋势^[29]。利用文献计量分析地下水环境中氨氮污染去除研究有助于明确该领域的研究现状和发展趋势。因此,本文基于 Web of Science(WoS)数据库与中国知网(CNKI)数据库的文献数据,检索得到 1 413 篇文献,借助 CiteSpace 和 VOSviewer 软件将国内外过去 30 a 关于地下水环境中氨氮污染去除领域的发文数量、作者机构、发文国家、关键词等作了计量分析,并由此总结梳理该领域的研究热点及发展趋势,为初涉地下水氨氮污染治理工作的研究人员提供文献参考,也为我国地下水氨氮污染修复与风险管控提供数据参考和决策依据。

1 材料与方法

1.1 数据收集

本研究的外文数据以 Web of Science 核心合集数据库为检索源,以(“ground water” OR “groundwater”) AND(removal OR adsorpt* OR degrad* OR treat* OR remediation)AND(“ammonia nitrogen” OR “ammonium”)为主题进行检索,时间跨度为 1991—2021 年,文献类型为 Article 和 Review。中文数据以 CNKI 为检索源,以(地下水)*(去除+吸附+降解+处理+修复)*(氨氮)为主题进行检索,检索对象为北大核心中文学术期刊,时间跨度为 1991—2021 年;数据最后更新时间为 2022 年 1 月 28 日,检索时间为 2022 年 1 月 28 日。共得到相关文献 1 413 篇,其中外文文献 1 298 篇,中文文献 124 篇。

1.2 数据分析

采用 CiteSpace (5.8.R3)和 VOSviewer (1.1.16)科

学知识图谱分析工具,对来自 WoS 数据库和 CNKI 数据库氨氮去除领域的文献进行发文作者(Authors)、来源国家及机构(Countries and institutions)、载文期刊(Journals)、共被引(Co-cited)和关键词(Key words)等分析,以研究不同时间段该领域的热点及发展趋势。

2 结果与讨论

2.1 国内外研究的发文量及发文国家分析

年度发文量在一定程度上能代表该领域受到的关注度^[30],能够反映专题研究的不同发展历程。如图 1 所示,2000 年前研究人员在该领域发文较少,21 世纪以来,该领域整体发展较快,我国发文量增长迅速。过去 30 a 间该领域在 WoS 检索发文 1 289 篇,是 CNKI 发文 124 篇的 10.4 倍,1991—2000 年间 CNKI 数据库在共检索到 2 篇相关论文发布, WoS 数据库则检索到 131 篇。2000 年后, CNKI 数据库和 WoS 数据库中相关文献逐渐增多, CNKI 的相关年发文量维持在每年 10 篇左右, WoS 数据库相关年发文量从 29 篇左右增长到 117 篇。表明该领域仍处于发展阶段,更多研究人员关注并推动着该领域的发展。

通过分析 WoS 数据库中文章来源国家发现,美国(351 篇)和中国(294 篇)的总发文量占该领域全部发文量的 50%,德国(66 篇)、加拿大(61 篇)等依次排列其后。由图 1 可知,2011 年之前,美国在该领域的发文量独占鳌头,2011 年后我国的发文量开始超过美国,2015 年成为该领域全球发文最多的国家,与此同时 CNKI 中的文章量也在迅速增长,相较而言, CNKI 数据库中该领域的发文量远小于 WoS 数据库。近年来,随着我国十二五规划对氨氮污染治理的高度重视,关注该领域的科研工作者也逐渐增加。

采用 VOSviewer 获取国家/地区合作网络,结果如图 2 所示。国家/地区合作网络图能够识别出该领域国家间的合作关系,中节点大小表示发文量多少,节点间连线粗细表示合作紧密关系。目前共有 138 个国家/地区参与了该领域的研究工作,其中美国与世界各国在各领域的合作最紧密。我国与多个国家在该领域建立了合作关系,合作较为紧密的有美国、德国等国家。结合不同国家发文量分析结果,中美两国在该领域的研究具有一定的主导作用。

2.2 外文文献发文机构分析

分析相关发文机构有助于了解目前地下水氨氮污染去除领域研究最具权威性的机构^[31]。根据 WoS 数据库扩展信息可知,全球共有 1 497 家机构发表过该领域论文;其中发文量排名前 10 位的机构如表 1 所示,中

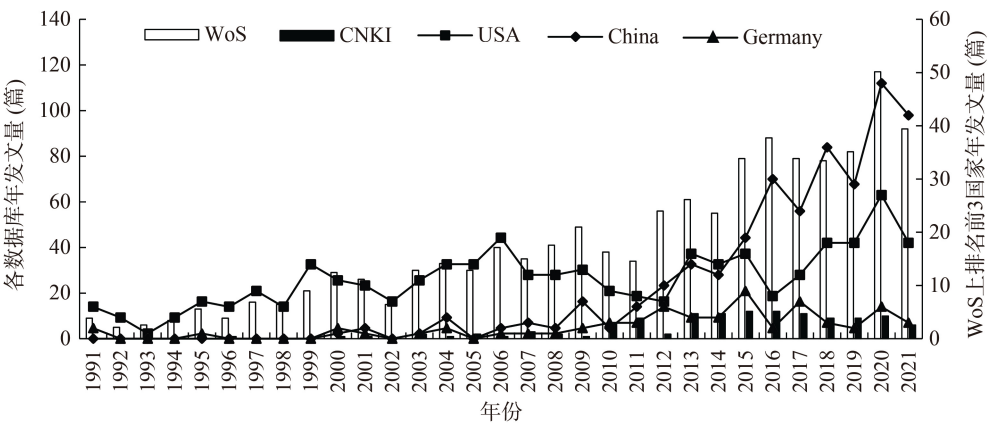


图 1 1991—2021 年 WoS 与 CNKI 年发文量和 WoS 排名前 3 位国家年发文量

Fig. 1 The annual number of articles published in WoS and CNKI and those of the top 3 countries in WoS from 1991 to 2021

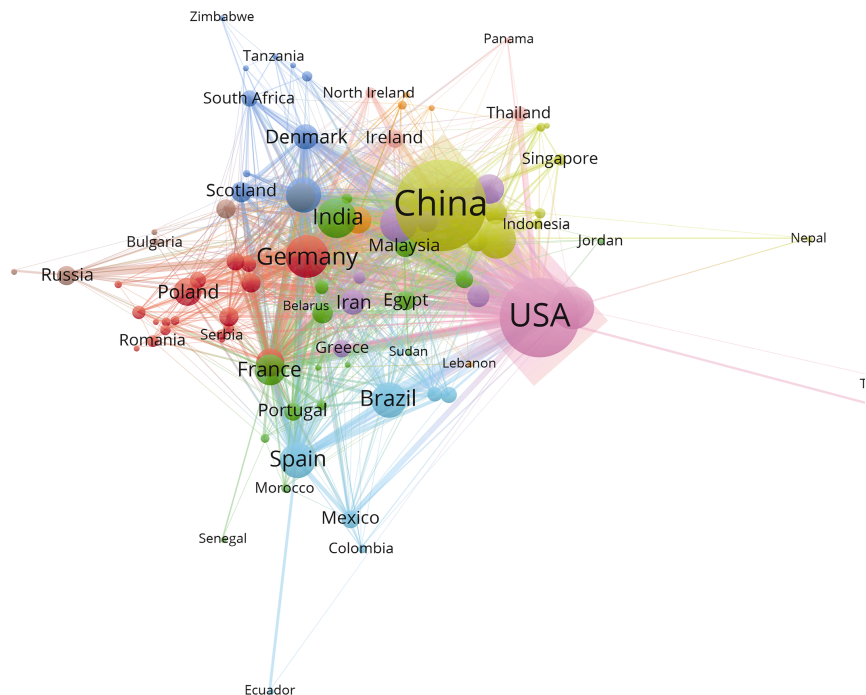


图 2 基于 WoS 文献计量分析的地下水氨氮去除研究领域的国家/地区合作网络

Fig. 2 Collaborations in the field of ammonium removal from groundwater among countries/regions in the world

表 1 1991—2021 年 WoS 数据库地下水氨氮去除领域发文量前 10 位机构

Table 1 Top 10 institutions in terms of paper numbers on ammonium removal from groundwater in WoS database from 1991 to 2021

排名	机构	国家	发文量(篇)	总被引频次	<i>h</i> -index
1	中国地质大学	中国	48	654	14
2	美国农业部	美国	33	1 235	17
3	佛罗里达州立大学系统	美国	31	541	13
4	中国科学院	中国	28	644	14
5	美国内政部	美国	24	1 327	15
6	美国地质勘探局	美国	24	1 327	15
7	西安建筑科技大学	中国	22	231	9
8	法国国家科学研究中心	法国	21	720	13
9	加州大学系统	美国	20	808	10
10	佛罗里达大学	美国	20	360	11

注：*h*-index 值是基于以“被引频次”计数降序排列的出版物列表，值为 *h* 的索引表明有 *h* 篇文献已被引用至少 *h* 次。

国地质大学发文最多(48 篇),美国农业部(33 篇)、佛罗里达州立大学系统(31 篇)和中国科学院(28 篇)等紧随其后。美国机构的总被引频次都相对较高,说明美国学者在该领域的研究受认可度高,研究工作具有一定的引领性。发文量前 5 位的机构均来自中美两国,也反映了中美两国在该领域的主导作用。

2.3 作者耦合分析

作者耦合是指 n 个著者在文献中同时引证了某一个著者所发表文献的情况,则称这 n 个作者具有耦合关系,反映了各个作者间的客观联系^[32]。对 WoS 数据库中检索到的文献进行作者耦合分析,得到 1 289 篇

相关文献,4 504 位相关文献作者。表 2 列出了当最小发文阈值为 5 时发文量前 10 位的作者,我国西安建筑科技大学与中国地质大学共有 7 位学者进入发文量前 10 位的名单,体现出两所高校在地下水氨氮去除领域的工作量。图 3 展示了该领域各作者的合作关系,圆圈大小表示参与合作的发文数量,距离远近代表合作的紧密程度,来自西安建筑科技大学的黄廷林(Huang T L)拥有较高发文量的同时也拥有最高的总联系强度,说明该学者在该领域与其他专家学者的交流合作较多。从全球范围来看,研究人员以团队独立研究为主,团队间的合作较少,团队独立性较强。

表 2 1991—2021 年地下水中氨氮去除领域发文量前 10 位作者(WoS)
Table 2 Top 10 authors in terms of paper numbers on ammonium removal from groundwater from 1991 to 2021(WoS)

排名	作者	国家机构	发文量(篇)	总联系强度
1	Huang T L	西安建筑科技大学	20	24
2	Cheng Y	西安建筑科技大学	11	11
3	Kadar I	匈牙利土壤科学与农业化学研究所	10	5
4	Feng C P	中国地质大学	9	8
5	Ma T	中国地质大学	8	15
6	Liu F	中国地质大学	8	11
7	Huang G X	北京食品科学研究院	7	10
8	Zhang R F	西安建筑科技大学	7	10
9	Du Y	中国地质大学	6	14
10	Fenton O	爱尔兰约翰斯顿堡环境科学研究中心	6	10

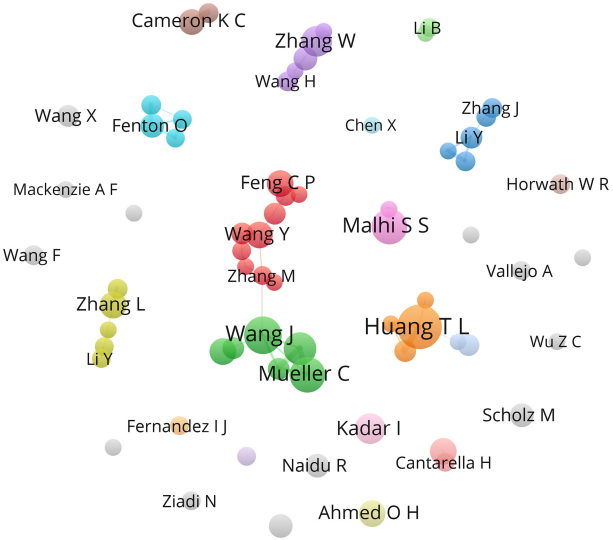


图 3 基于 WoS 文献计量的地下水中氨氮去除领域作者合作关系

Fig. 3 Author cooperation in ammonium removal from groundwater(WoS)

CNKI 数据库中检索到 124 篇文献,共 424 位作者,当最小发文阈值为 5 时,发文量前 5 位的作者如表 3 所示,北京工业大学、西安建筑科技大学各有两

位学者上榜。图 4 展示了 CNKI 数据库中各作者的合作关系,作者间具有明显的聚类关系,其中张杰、黄廷林两位学者的合作作者较多,同时也拥有相对较高的总联系强度。

表 3 1991—2021 年氨氮去除研究领域发文量前 5 位作者(CNKI)

Table 3 Top 5 authors in terms of paper numbers on ammonium removal from 1991 to 2021(CNKI)

排名	作者	国家机构	发文量(篇)	总联系强度
1	李冬	北京工业大学	16	58
2	黄廷林	西安建筑科技大学	13	25
3	张杰	哈尔滨工业大学	10	54
4	曾辉平	北京工业大学	10	34
5	程亚	西安建筑科技大学	8	18

2.4 载文期刊与学科门类分析

对 WoS 文献出版物来源进行分析,共有 1 289 篇文献刊登在 353 种不同的期刊上,载文量前 10 位的期刊共发表文章 339 篇,占发表总文献的 26.3%(表 4);其中载文最多的期刊是 *Water Research*(63 篇),其次有 *Science of the Total Environment*(40 篇)、

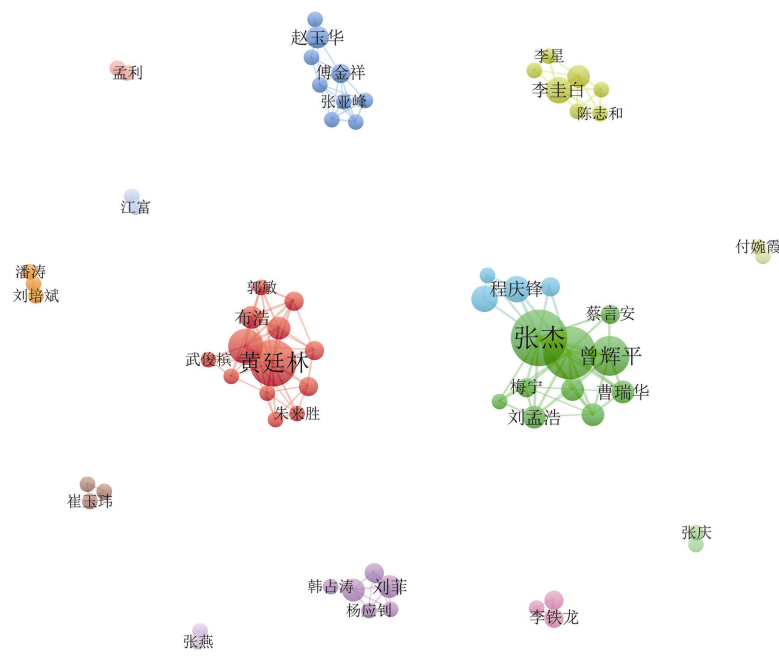


图 4 基于 CNKI 文献计量的地下水氨氮污染去除领域的作者合作关系
Fig. 4 Author cooperation in the field of ammonium removal from groundwater(CNKI)

表 4 1991—2021 年氨氮去除研究领域 WoS 数据库载文量前 10 位的期刊

Table 4 Top 10 institutions in terms of paper numbers on ammonium removal in WoS from 1991 to 2021

排名	期刊名称	发文量(篇)	影响因子(2020 年)
1	Water Research	63	11.236
2	Science of the Total Environment	40	7.963
3	Environmental Science Technology	36	9.028
4	Journal of Environmental Quality	36	2.751
5	Environmental Science and Pollution Research	34	4.223
6	Water, Air, and Soil Pollution	29	2.52
7	Chemosphere	27	7.086
8	Desalination and Water Treatment	26	1.254
9	Ecological Engineering	26	4.035
10	Journal of Environmental Management	22	6.789

注：WoS 中的影响因子是 2020 年的综合影响因子。

Environmental Science & Technology(36 篇)、*Journal of Environmental Quality*(36 篇)等。发文量排名前 10 位的期刊中，2020 年影响因子大于 5 的有 5 个，表明相关成果拥有较高的质量及影响力。CNKI 数据库中(表 5)，载文较多的期刊有《中国环境科学》(10 篇)、《环境科学》(8 篇)、《农业环境科学学报》(5 篇)等。

发表文章涉及的学科门类如图 5 所示，该领域已刊出的中文及外文文献的学科门类基本一致；环境科学是该领域外文发文较多的学科，环境科学与资源利用是该领域中文发文较多的学科，其他学科还包括农业工程、资源利用、化工等，说明地下水中氨氮污染问题涉及农业、化工、水处理和生态修复等学科领域。

表 5 1991—2021 年地下水氨氮污染去除研究领域 CNKI 数据库载文量前 5 位的期刊

Table 5 Top 5 journals in terms of paper numbers on ammonium removal from groundwater in CNKI database from 1991 to 2021

排名	期刊名称	发文量(篇)	影响因子(2021 年)
1	中国环境科学	10	2.068
2	环境科学	8	2.954
3	农业环境科学学报	5	2.221
4	哈尔滨工业大学学报	4	0.994
5	环境科学学报	3	1.868

注：CNKI 中的影响因子是 2021 年综合影响因子。

2.5 关键词共现分析

关键词出现的频次和关键词间的联系在一定程度上能反映该领域的研究热点^[33]。WoS 数据库中

学等。该聚类组集合了不同吸附材料对氨氮去除的效果与机理研究, 吸附剂包括生物质炭、活性炭、沸石等; 生物降解和生物修复等作为绿色的修复技术也有较多研究; 同时还包括对地下水中氨氮去除机制的研究。聚类 3(Cluster3)与聚类 4(Cluster4)主要包括氨氮在环境介质中的污染来源及去除工艺。聚类 3 的核心词汇包括土地利用、灌溉、地下水质量、化肥施用、污染迁移等, 这说明污水灌溉、化肥过度施用和不规范土地利用会增加土壤中氨氮浓度, 土壤中氨氮可通过淋滤作用进入到地下水中, 导致地下水氨氮污染。聚类 4 则聚焦于硝化反硝化技术和厌氧氨氧化工艺

对地下水中氨氮的去除。

CNKI 数据库中 124 篇相关文献共包含 501 个关键词(图 7), 其中出现较多的关键词为地下水(57 次)、锰(14 次)、铁(10 次)、吸附(7 次)、溶解氧(6 次)、沸石(5 次)等, 关键词未形成较独立的聚类。但从图 7 中可以看出国内对氨氮污染去除的研究同时还伴随着去除共污染(如铁、锰), 修复手段也包括利用改性沸石和活性炭吸附、硝化反硝化、接触氧化、膜生物反应器、纳米铁、PRB(可渗透反应墙)等, 研究尺度包括实验室批试验、土柱模拟试验和中试试验。

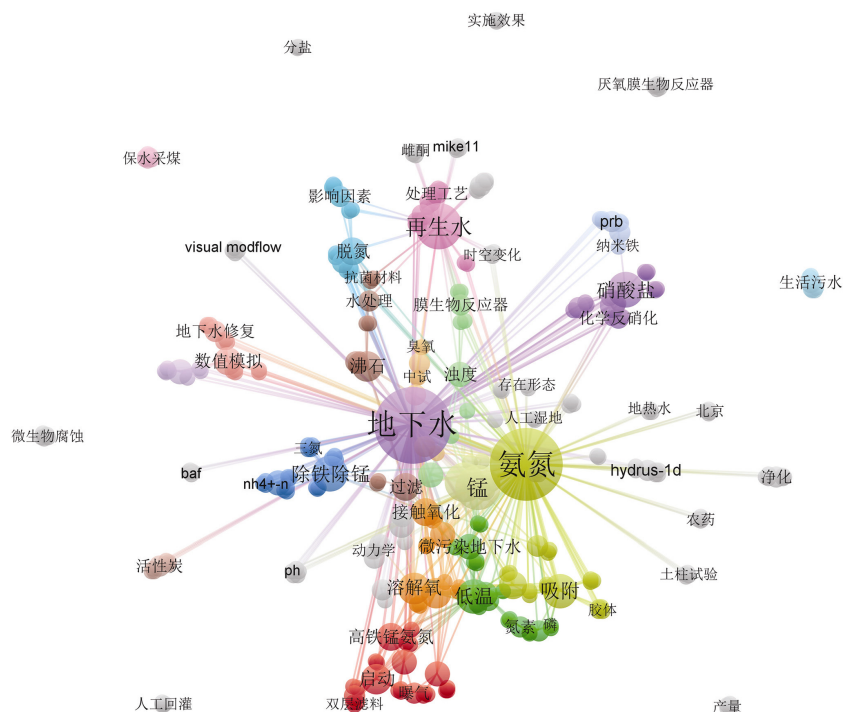


图 7 CNKI 数据库关键词聚类
Fig. 7 Key words clustering from CNKI database

2.6 文獻共被引分析

文献共被引(co-citation)是指两篇文献共同出现在第三篇施引文文献目录中,可以反映发表文献之间的紧密关系^[34]。地下水氨氮污染去除领域的文献共被引情况如图 8 所示,共被引次数较多的文章都集中在近 10 a,且大部分文章为我国学者所发表,在近 5 a 来,部分学者之间的交流合作增多,这些作者的文献共被引次数也相对较高。

由表 6 可知,共被引前 10 位的文献多来自 *Water Research* 杂志,膜生物过滤器的研究占比较大^[35-40],其次是对吸附技术的研究^[41-42],材料吸附容量及长效性等问题是吸附技术的应用瓶颈,研发高容量、低成本、易制备的氨氮吸附材料是该技术的发展趋势^[43],

同时对硝化反硝化与同位素示踪技术的研究也同样受到关注^[44-45]。

研究的知识基础由被引文献(共引网络)所组成,而施引文献是被引文献的延续,由施引文献中提取的关键词(文献共被引聚类命名)被认为是研究前沿的领域^[31]。以共被引文献中的关键词为依据,对近 30 a 该领域内的共被引文献聚类进行分析,能够识别该领域不同时期的研究热点及趋势(图 9),图 9 中圆圈被称为引文年环,年轮的大小代表共被引频次高低。图 9 能够识别该领域不同时期的研究热点及趋势。近 10 a 来,生物质炭(biochar)、吸附(adsorption)、碳固定(carbon sequestration)和厌氧氨氧化(anammox)是研究的热点内容,近 5 a,国内外学者更加聚焦到生物质炭和吸附技术方面上。

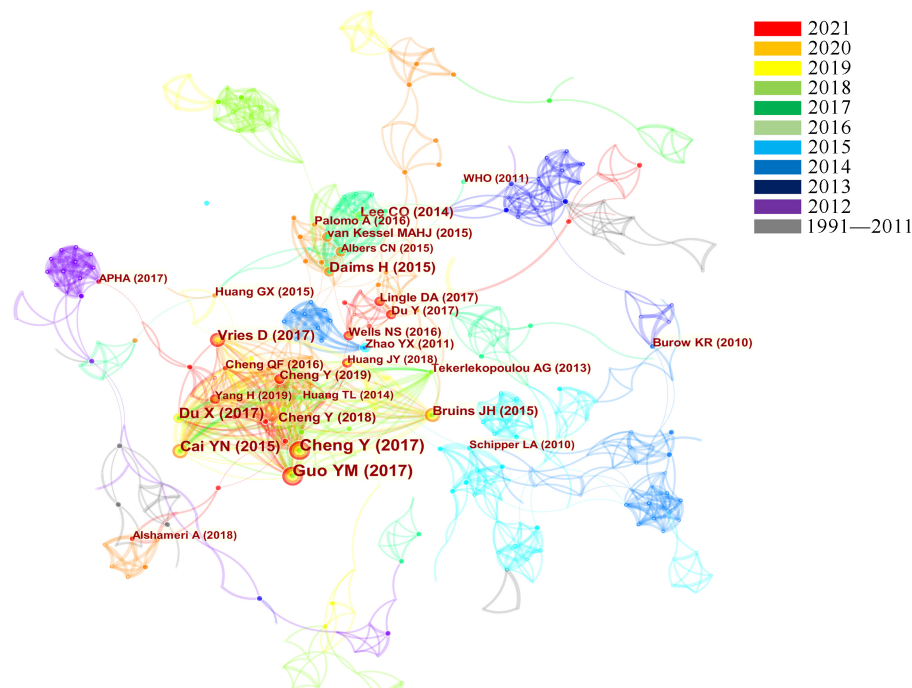


图 8 外文文献共被引图
Fig. 8 Key words clustering of WoS database

表 6 1991—2021 年氨氮去除研究领域 WoS 数据库相关文献共被引前 10 位
Table 6 Top 10 co-cited papers in terms of paper numbers on ammonium removal in WoS database from 1991 to 2021

排名	题目	年份	第一作者	国家	共被引次数	期刊
1	Catalytic oxidation removal of ammonium from groundwater by manganese oxides filter: Performance and mechanisms	2017	Cheng Y	中国	19	<i>Chemical Engineering Journal</i>
2	Understanding the deactivation of K ₂ CO ₃ /AC for low-concentration CO ₂ removal in the presence of trace SO ₂ and NO ₂	2017	Guo Y F	中国	18	<i>Chemical Engineering Journal</i>
3	Removal of iron, manganese and ammonia from groundwater using a PAC-MBR system: The anti-pollution ability, microbial population and membrane fouling	2016	Du X	中国	13	<i>Desalination</i>
4	Effective start-up biofiltration method for Fe, Mn, and ammonia removal and bacterial community analysis	2014	Cai Y A	中国	11	<i>Bioresource Technology</i>
5	Iron and manganese removal: Recent advances in modelling treatment efficiency by rapid sand filtration	2016	Vries D	荷兰	11	<i>Water Research</i>
6	Complete nitrification by Nitrospira bacteria	2016	Daims H	澳大利亚	10	<i>Nature</i>
7	Effects of dynamic operating conditions on nitrification in biological rapid sand filters for drinking water treatment	2014	Carson O L	丹麦	9	<i>Water Research</i>
8	A comparison study of the start-up of a MnO _x filter for catalytic oxidative removal of ammonium from groundwater and surface water	2017	Cheng Y	中国	9	<i>Journal of Environmental Sciences</i>
9	Biological and physico-chemical formation of Birnessite during the ripening of manganese removal filters	2014	Jantinus H B	荷兰	8	<i>Water Research</i>
10	Use of nitrogen isotopes and other geochemical tools to evaluate the source of ammonium in a confined glacial drift aquifer, Ottawa County, Michigan, USA	2017	Derrick A L	美国	8	<i>Applied Geochemistry</i>

氨氮作为地下水中比较常见的一类污染物,从利用单一化学法、物理法脱氮除氨,到利用微生物脱氮,到现在的复合脱氮技术,氨氮污染去除技术不断向绿色高效的方向发展,基于对地下水中氨氮去除领域相关文献的调研,本研究发现:①单一去除氨氮的方式逐渐被复合系统脱氮的方式所取代;②随着同步硝化反硝化技术、厌氧氨氧化技术的快速发展,筛选新型

菌株高效脱氮的研究不断增多,利用复合菌群脱氮的研究也日益增强,并且利用基因组学和蛋白质组学等进行多水平的机制研究;在后续的研究中,人工驯化不同新型菌株或将成为新的研究方向;③在考虑现场环境及施工、造价方面的影响后,针对一些需要高效快速去除氨氮的应用场景,吸附作为一种相对环保的方式被广泛选择,研发高效、可持续的吸附材料成为

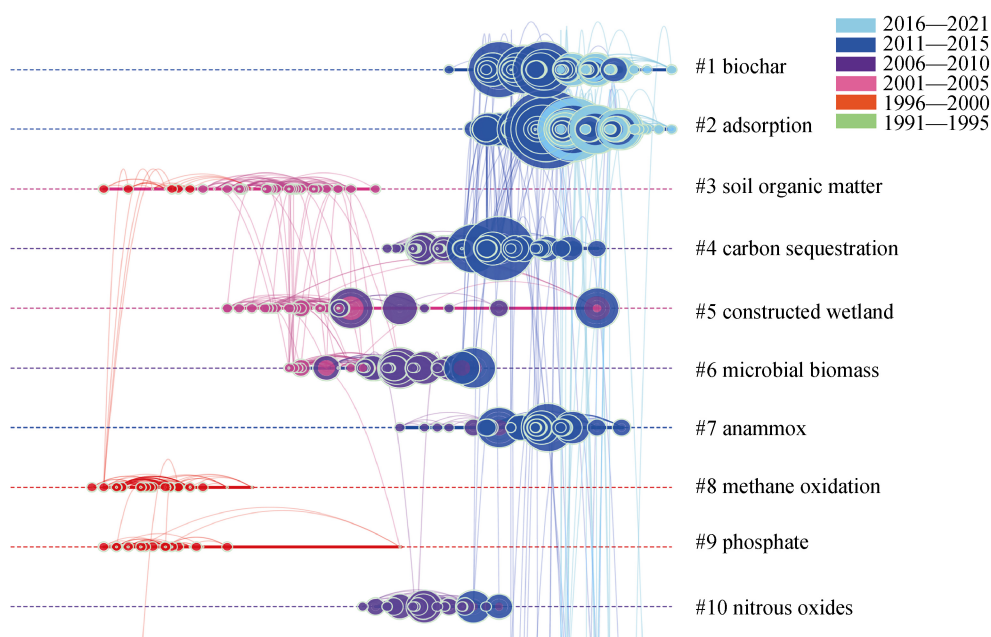


图 9 文献共被引聚类
Fig. 9 Co-citation clustering

研究热点,在此基础上如何延长吸附剂的使用年限、提高吸附能力及吸附剂的绿色再生将成为未来的研究重点。此外如何将氨氮污染地下水进行资源再利用也可能成为新的研究方向。

3 结论

1)21 世纪以来,随着人们关注度的提高,国内外学者在地下水氨氮污染去除领域的研究逐年增多,其中美国、中国和德国是发表文献量前 3 位的国家,我国在该领域的年发文量呈上升趋势。

2)中国地质大学是地下水氨氮污染去除领域发文量最多的机构,《Water Research》是该领域载文量最多的期刊,对于地下水中氨氮去除的研究涉及多个学科,中国地质大学及西安建筑科技大学在该领域发表成果的学者较多。

3)目前地下水氨氮污染去除研究热点主要以吸附技术及微生物硝化反硝化作用为主,同时加强了复合技术的研究。

参考文献:

- [1] 生态环境部. 2019 年全国生态环境质量简况[R/OL]. [2020-5-7]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk15/202005/t20200507_777895.html.
- [2] 韩智勇, 许模, 刘国, 等. 生活垃圾填埋场地下水污染物识别与质量评价[J]. 中国环境科学, 2015, 35(9): 2843-2852.
- [3] 生态环境部. 2020 年中国生态环境统计年报[R]. [2022-2-18]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtnb/>

202202/W020220218339925977248.pdf.

- [4] Puigagut J, Salvadó H, García J. Short-term harmful effects of ammonia nitrogen on activated sludge microfauna[J]. Water Research, 2005, 39(18): 4397-4404.
- [5] 杨成荫, 陈杨, 欧阳坤, 等. 氨氮废水处理技术的研究现状及展望[J]. 工业水处理, 2018, 38(3): 1-5.
- [6] 胡雪飞, 黄万抚. 氨氮废水处理技术研究进展[J]. 金属矿山, 2017(8): 199-203.
- [7] 朱志. 高浓度氨氮废水处理技术及发展[J]. 环境科学导刊, 2008, 27(1): 60-61, 71.
- [8] 汪超, 冯晓西, 顾印玉, 等. 沸石在废水脱氨氮中的应用: (I)沸石离子交换脱氨氮[J]. 化学世界, 2002, 43(S1): 60-62.
- [9] 徐国兴. 天然沸石用于蒸馏水生产中除氨[J]. 水处理技术, 1990, 16(6): 456-459.
- [10] de la Hoz R E, Schlueter D P, Rom W N. Chronic lung disease secondary to ammonia inhalation injury: A report on three cases[J]. American Journal of Industrial Medicine, 1996, 29(2): 209-214.
- [11] 闫楠, 贾滨洋, 江河. 《“十三五”生态环境保护规划》内涵分析[J]. 环境保护, 2017, 45(9): 48-51.
- [12] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 地下水质量标准: GB/T 14878—2017[S]. 北京: 中国标准出版社. 2017.
- [13] 王琳, 牟春霞, 王丽. 高氨氮含量废水的处理方法及研究现状[J]. 水处理技术, 2021, 47(5): 1-5, 10.
- [14] Diamadopoulos E. Characterization and treatment of recirculation-stabilized leachate[J]. Water Research, 1994, 28(12): 2439-2445.
- [15] 刘文龙, 钱仁渊, 包宗宏. 吹脱法处理高浓度氨氮废水[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2008, 30(4): 56-59.
- [16] 郑巧巧, 张一敏, 黄晶, 等. 吹脱—离子交换耦合工艺处

- 理页岩提钼高浓度氨氮废水研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(6): 67–71.
- [17] 宋卫锋, 骆定法, 王孝武, 等. 折点氯化法处理高 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含钴废水试验与工程实践[J]. 环境工程, 2006, 24(5): 12–13, 2.
- [18] 张胜利, 刘丹, 曹臣. 次氯酸钠氧化脱除废水中氨氮的研究[J]. 工业用水与废水, 2009, 40(3): 23–26.
- [19] 陈祥, 陈英文, 彭慧, 等. 磷酸铵镁沉淀法处理氨氮废水及沉淀剂的回用[J]. 化工环保, 2008, 28(1): 16–19.
- [20] 马倩玲, 林星杰, 肖沃辉. 化学沉淀法处理含氨氮废水的研究[J]. 矿冶, 2008, 17(4): 71–74.
- [21] 李小明, 王敏, 矫志奎, 等. 电解氧化处理垃圾渗滤液研究[J]. 中国给水排水, 2001, 17(8): 14–17.
- [22] 贺琳杰, 屈撑囤. 水体中氨氮去除技术研究进展[J]. 广州化工, 2021, 49(8): 17–19, 42.
- [23] 周钦茂, 郑德聪, 杨暖, 等. 微生物电化学法处理氨氮废水研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(3): 779–786.
- [24] Rusten B, Hem L J, Ødegaard H. Nitrogen removal from dilute wastewater in cold climate using moving-bed biofilm reactors[J]. Water Environment Research, 1995, 67(1): 65–74.
- [25] Siegrist H, Reithaar S, Koch G, et al. Nitrogen loss in a nitrifying rotating contactor treating ammonium-rich wastewater without organic carbon[J]. Water Science and Technology, 1998, 38(8/9): 241–248.
- [26] 刘柴变, 孙亚玲, 张永发, 等. A/O 生物法脱除焦化废水中氨氮的工艺及影响因素[J]. 煤化工, 1994, 22(3): 52–57.
- [27] 汪超, 冯晓西, 顾印玉, 等. 沸石在废水脱氨氮中的应用: (II)沸石化结合脱氨氮[J]. 化学世界, 2002, 43(S1): 63–65.
- [28] 王皓辉, 郝林林, 李桂菊. 吸附-超滤组合工艺对低浓度氨氮废水的处理研究[J]. 天津科技大学学报, 2020, 35(6): 37–43.
- [29] Coble K H, Mishra A K, Ferrell S, et al. Big data in agriculture: A challenge for the future[J]. Applied Economic Perspectives and Policy, 2018, 40(1): 79–96.
- [30] 郑梅迎, 林伟, 徐茜, 等. 基于 CNKI 数据库的土壤酸化文献计量分析[J]. 土壤, 2020, 52(4): 811–818.
- [31] 王晴, 杨宗帅, 尹立普, 等. 有机污染土壤和地下水生物修复研究热点和趋势——基于 Web of Science 数据库的文献计量学分析[J]. 生物工程学报, 2021, 37(10): 3549–3564.
- [32] 史方颖, 张凤宝, 杨明义. 基于文献计量分析的土壤有机碳矿化研究进展与热点[J]. 土壤学报, 2022, 59(2): 381–392.
- [33] 刘杏梅, 赵健, 徐建明. 污染农田土壤的重金属钝化技术——基于 Web of Science 数据库的计量分析[J]. 土壤学报, 2021, 58(2): 445–455.
- [34] 李国旗, 谢博勋, 解盛, 等. 基于文献计量学的土壤种子库研究进展分析[J]. 土壤, 2022, 54(1): 103–113.
- [35] Cheng Y, Huang T L, Sun Y K, et al. Catalytic oxidation removal of ammonium from groundwater by manganese oxides filter: Performance and mechanisms[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 322: 82–89.
- [36] Du X, Liu G Y, Qu F S, et al. Removal of iron, manganese and ammonia from groundwater using a PAC-MBR system: The anti-pollution ability, microbial population and membrane fouling[J]. Desalination, 2017, 403: 97–106.
- [37] Cai Y A, Li D, Liang Y W, et al. Effective start-up biofiltration method for Fe, Mn, and ammonia removal and bacterial community analysis[J]. Bioresource Technology, 2015, 176: 149–155.
- [38] Lee C O, Boe-Hansen R, Musovic S, et al. Effects of dynamic operating conditions on nitrification in biological rapid sand filters for drinking water treatment[J]. Water Research, 2014, 64: 226–236.
- [39] Cheng Y, Li Y, Huang T L, et al. A comparison study of the start-up of a MnO_x filter for catalytic oxidative removal of ammonium from groundwater and surface water[J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, 65: 327–334.
- [40] Bruins J H, Petrusevski B, Slokar Y M, et al. Biological and physico-chemical formation of Birnessite during the ripening of manganese removal filters[J]. Water Research, 2015, 69: 154–161.
- [41] Guo Y F, Li C H, Lu S X, et al. Understanding the deactivation of $\text{K}_2\text{CO}_3/\text{AC}$ for low-concentration CO_2 removal in the presence of trace SO_2 and NO_2 [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 301: 325–333.
- [42] Vries D, Bertelkamp C, Kegel F S, et al. Iron and manganese removal: Recent advances in modelling treatment efficiency by rapid sand filtration[J]. Water Research, 2017, 109: 35–45.
- [43] Fu H L, Li Y, Yu Z Y, et al. Ammonium removal using a calcined natural zeolite modified with sodium nitrate[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 393: 122481.
- [44] Daims H, Lebedeva E V, Pjevac P, et al. Complete nitrification by *Nitrospira* bacteria[J]. Nature, 2015, 528(7583): 504–509.
- [45] Lingle D A, Kehew A E, Krishnamurthy R V. Use of nitrogen isotopes and other geochemical tools to evaluate the source of ammonium in a confined glacial drift aquifer, Ottawa County, Michigan, USA[J]. Applied Geochemistry, 2017, 78: 334–342.