

谢晓琳, 向洋, 钱锋, 等. 基于 CiteSpace 分析的突发性环境污染应急技术研究进展 [J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(1): 314-321.

XIE X L, XIANG Y, QIAN F, et al. Research progress of emergency technology for sudden environmental pollution based on CiteSpace analysis [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(1): 314-321.

基于 CiteSpace 分析的突发性环境污染应急技术研究进展

谢晓琳^{1,2}, 向洋³, 钱锋^{1,2*}, 孙晨^{1,2}, 宋永会¹

1. 环境基准与风险评估国家重点实验室, 中国环境科学研究院

2. 中国环境科学研究院水环境治理研究室

3. 清华大学数学科学系

摘要 梳理我国环境污染应急处理技术领域的研究进展, 对我国突发环境事件应急的技术创新和科学管理具有重要意义。以 1995—2020 年中国知网数据库为数据源, 基于文献计量学分析方法, 应用 CiteSpace 软件对文献特征、研究热点和研究趋势等进行可视化研究。结果表明: 我国环境污染应急处理技术领域起步较晚, 文献数量不多, 研究基础较薄弱, 领军人物和核心研究团队还比较缺乏; 应急处理技术主要集中在水环境领域, 聚类分析发现, 应急处理技术研究主要围绕应急监测、技术筛选、活性炭吸附、混凝沉淀等方面开展, 关键词聚类时间线显示, 未来发展的方向主要是技术筛选、活性炭吸附和应急监测等。

关键词 环境污染; 应急处理; CiteSpace; 文献计量学; 研究进展

中图分类号: X507 文章编号: 1674-991X(2022)01-0314-08 doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20210436

Research progress of emergency technology for sudden environmental pollution based on CiteSpace analysis

XIE Xiaolin^{1,2}, XIANG Yang³, QIAN Feng^{1,2*}, SUN Chen^{1,2}, SONG Yonghui¹

1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

2. Department of Water Environment Governance, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

3. Department of Mathematical Sciences, Tsinghua University

Abstract It is of great significance for the technical innovation and scientific management to sort out the research progress in the field of emergency treatment technologies for environmental pollution in China. To analyze the research progress of emergency treatment technologies for environmental emergencies, the relevant literature collected in CNKI database from 1995 to 2020 was used as the data source and CiteSpace software was applied to visualize the literature characteristics, hot topics and research trends based on the bibliometric analysis method. The results showed that the field of environmental pollution emergency treatment technologies in China started late, the number of literature was small, the research foundation was relatively weak and there was still a lack of strong leaders and core research teams. The emergency treatment technologies were mainly concentrated in the field of water environment. The keyword cluster analysis found that the emergency treatment technology researches mainly focused on emergency monitoring, technology screening, activated carbon adsorption, coagulation precipitation and other aspects. The keyword clustering timeline showed that the future development directions should be mainly technology screening, activated carbon adsorption, emergency monitoring and so on.

Key words environmental pollution; emergency treatment; CiteSpace; bibliometrics; research progress

突发性环境污染事故是指在非正常的不可抗拒的时间、地点/场合, 排污方式、排污途径、排放种

类、排放量、污染物浓度等均难以预料的环境污染事故。不同于一般的环境污染, 它没有固定的排放

收稿日期: 2021-08-19

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07601-003, 2018ZX07601-001)

作者简介: 谢晓琳(1986—), 女, 助理研究员, 主要从事水环境治理研究, xiexl@caes.org.cn

* 责任作者: 钱锋(1981—), 男, 副研究员, 主要从事水污染控制技术研究, qianfeng@caes.org.cn

方式和排放途径,瞬间污染物排放量大,对环境影响较大且对生命与生产安全构成巨大威胁^[1]。因此,突发性环境污染事故的应急处理工作受到了世界各国政府的高度重视。

应急处理工作主要是指将突发事故对外环境造成的影响降低到最小的相关工作,事故爆发后最初一段时间内的处置措施得力与否,往往能决定整个事故全过程处置的成败。近年来,我国环境应急管理工作取得积极进展^[2],突发性环境污染事故发生次数总体呈下降趋势^[3-4],环境污染应急处理技术也受到了关注,学者们针对应急处理技术开展了一系列的相关研究。但目前关于环境污染应急处理技术方面的综述报道不多^[5],相关量化分析更是鲜见。

笔者利用文献计量学的方法,应用 CiteSpace 软件对我国 1995—2020 年环境污染应急处理技术领域相关文献进行量化分析,从宏观上展示该领域的研究现状,揭示研究热点及未来发展态势,以期为今后我国突发性环境污染事故的处理提供有效的科学支撑。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

利用中国知网(CNKI)数据库对我国环境污染事故应急处理技术的发展状况进行分析。CNKI 专业检索式为 SU=(“处理”+“工艺”+“处置”+“技术”) AND SU=“应急”AND SU=“污染”,时间跨度为 1995 年 1 月 1 日—2020 年 12 月 31 日(实际数据为 1996 年开始,1995 年无相关文献数据),来源类别选择全部期刊,共检索文献 397 篇,手动删除验收报告、指南等相关性较小的文献后筛选出 331 篇研究型论文。

1.2 研究方法

采用 CiteSpace(5.5R2)软件对上述筛选的文献进行计量研究。CiteSpace 软件^[6]主要基于共引分析理论和寻径网络算法等对研究领域的相关文献进行计量建模,通过一系列可视化图谱探寻出研究领域的演化路径和发展前沿^[7]。

绘制作者共现图谱时,选择作者为网络节点,阈值选择 g-index, $k=25$,时间切片设置为 1 年,其余选择默认设置;绘制关键词共现和聚类时间线图时,选择关键词作为网络节点,节点阈值选择 Top50,时间切片设置为 1 年,其余选择默认设置。在软件输出的图谱中,节点与字体标签的大小表示分析对象所出现的频次;节点间的连线粗细与其合作或共现的强度成正比,连线的多少则表明其合作或共现关系的密切程度^[8]。

2 结果与分析

2.1 研究现状

2.1.1 发文量

为了系统分析我国环境污染应急处理技术领域研究历程,对历年的发文量进行了归纳分析,结果如图 1 所示。由图 1 可以看出,我国在环境污染应急处理技术领域研究起步较晚,具体可以划分为 3 个阶段:1)1995—2005 年是缓慢起步阶段,该阶段发文量极少,国内学者对该领域关注度不高。这可能与我国环境应急管理工作的开展不足有关,该阶段我国每年突发性环境污染事件发生的次数均在 1 400 次以上^[4],相关应急处理技术的研究也较少。2)2006—2016 年是快速增长阶段,该阶段的研究热度相对较高。2006 年我国出台了《国家突发环境事件应急预案》,标志着国家对突发环境事件的管控开

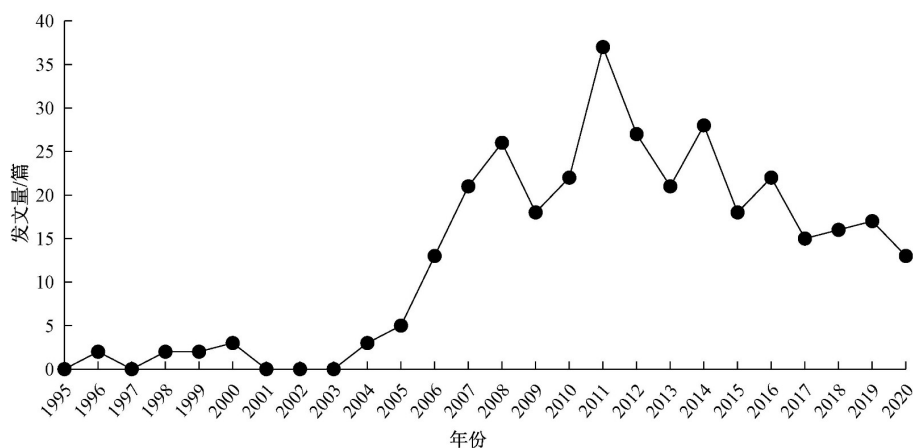


图 1 我国环境污染应急处理技术领域发文量年度分布

Fig.1 Statistics of papers published in the field of emergency treatment technologies for environmental emergencies in China

始加强,相关污染治理投入逐渐增加,应急处理技术的研究也开始增多。3)2017—2020 年为平稳发展阶段,该阶段发文量趋于平稳,表明该领域研究处于大体均衡的稳定发展状态,该阶段年均发文量约 15 篇,这也表明我国在该领域的研究较薄弱。

2.1.2 发文期刊

对发文期刊的分析,有助于了解相关领域的核心期刊群,为学者论文发表、资料收集等提供参考^[9]。我国环境污染应急技术发文量排名前 10 的期刊分布见图 2。过去 25 年,我国环境污染应急处理技术领域的 331 篇文献来自 175 种期刊,表明国内还没有该领域的专门期刊,相关研究的载文期刊比较分散。其中《中国给水排水》以 19 篇的发文量排名第一,占总发文量的 5.7%。排名比较靠前的期刊均以水环境研究为主体,这与我国突发性环境事件的受体主要为水体密切相关^[3,4,10-11]。

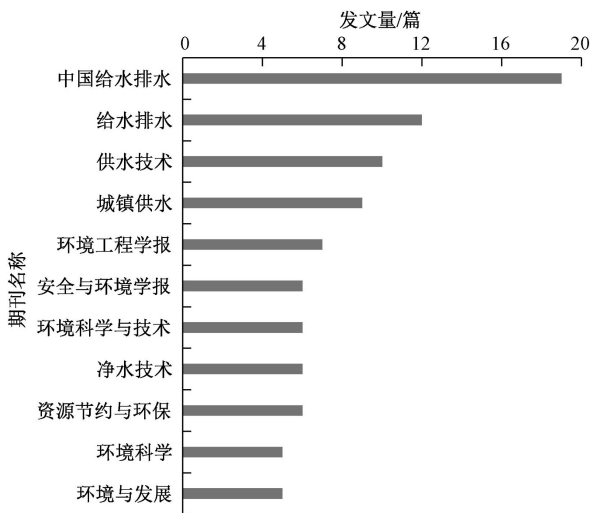


图 2 环境污染应急技术发文量排名前 10 的期刊名称

Fig.2 Top 10 journals of publications in the field of emergency treatment technologies for environmental emergencies

2.1.3 研究作者

对高产作者及其合作团队的分析有助于了解关于环境污染应急处理技术领域研究人员状况,还可以挖掘该领域有影响力的学者^[12]。我国环境污染应急处理技术作者网络合作图谱见图 3。图中显示的是发文量大于 2 篇的作者,且每个节点代表 1 名学者,节点的大小代表其发文量多少,节点间的连线反映出作者之间的合作情况。由图 3 可以看出,国内环境污染应急处理技术领域研究者相对较多,但个人发文量较少,发文量较高的几位作者为高乃云(9 篇)、刘学卿(9 篇)、陈蓓蓓(7 篇)、崔福义(6 篇)、张晓健(6 篇),其具体研究机构见表 1。高产

作者间主要形成了 3 个研究团队,团队内部网络连线较为紧密,但团队与团队之间基本没有连线链接,说明科研团队之间的学术交流相对较少,故图谱网络密度并不高,仅为 0.005 6,这也表明目前我国环境污染应急技术的研究仍缺乏较强的领军人物和核心研究团队。



图 3 我国环境污染应急处理技术作者网络合作图谱

Fig.3 Author's cooperation map of emergency treatment technologies for environmental emergencies in China

表 1 发文量排名前 10 的作者及其研究机构

Table 1 Top 10 authors and their research institutions with largest number of publications

排名	姓名	研究机构	发文量/篇
1	高乃云	同济大学	9
2	刘学卿	江苏科技大学	9
3	陈蓓蓓	同济大学	7
4	崔福义	哈尔滨工业大学	6
5	张晓健	清华大学	6
6	姚娟娟	同济大学	6
7	吕锡武	东南大学	6
8	尚亚波	镇江市自来水集团	6
9	秦祖群	镇江市自来水集团	5
10	唐玉斌	江苏科技大学	5

2.1.4 研究机构

各研究机构发文量排名如表 2 所示。由表 2 可见,研究机构主要由高校组成,排名前 3 位的分别为哈尔滨工业大学、华南理工大学和同济大学。其中哈尔滨工业大学的崔福义、同济大学的高乃云、清华大学的张晓健等发文量也排在前 10 位,这在一定程度表明以上研究机构在环境污染应急处理技术领域具备较强的科研基础,培养了一批专业的人才。

表 2 排名前 10 的研究机构发文数量

Table 2 Top 10 institutions with largest number of publications

排名	机构名称	发文量/篇	占比/%
1	哈尔滨工业大学	21	6.34
2	华南理工大学	14	4.23
3	同济大学	11	3.32
4	清华大学	10	3.02
5	沈阳建筑大学	7	2.11
6	镇江市自来水公司	7	2.11
7	东南大学	6	1.81
8	江苏科技大学	6	1.81
9	生态环境部华南环境科学研究所	6	1.81
10	镇江市环境监测中心站	6	1.81

2.2 研究热点

关键词是一篇论文的核心观点,是论文主题的高度概括,因此,对某一领域相关文献关键词的分析,有助于挖掘该领域的研究热点^[13]。选择关键词(Keyword)为网络节点运行 CiteSpace 软件。对应急处理、应急处置、活性炭、活性炭吸附等相似关键词进行合并处理,得到关键词共现图谱(图 4)。由图 4 可以看出,在我国环境污染应急处理技术领域,除了“应急处理”“污染”为检索的关键词外,其余的关键词主要代表了环境污染应急处理的对象和方法。如“突发性水污染”“饮用水”“松花江”等关键词显示出环境污染应急技术主要集中在水环境领域,这是因为我国突发性环境污染事件的主要受体为水环

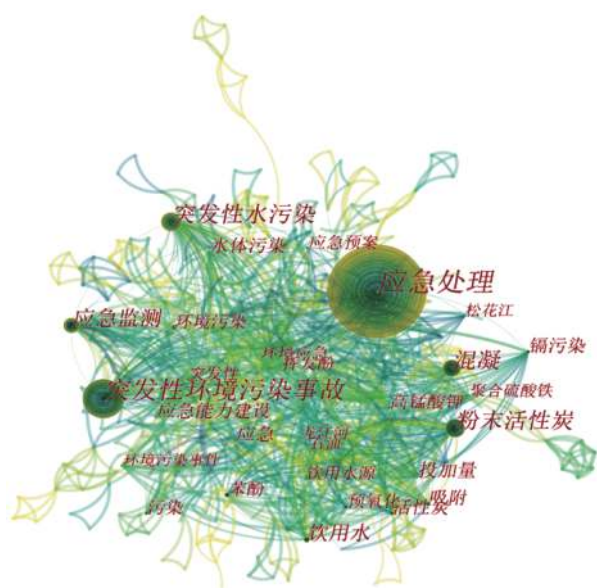


图 4 关键词共现图谱

Fig.4 Co-occurrence analysis of keywords

境^[10-11],总体的受关注度较高;“活性炭”“粉末活性炭”“投加量”“吸附”“混凝”“高锰酸钾”等关键词揭示了环境污染应急的主要技术手段;“镉污染”“苯酚”“危险化学品”“挥发酚”等关键词显示了环境污染事故主要的污染物种类。

突现词(Brust Terms)是指短时间内使用频率骤增的关键词,强度越高代表短时间内出现的频次越高^[12]。突现词侧面也反映了当时该领域研究的热点。从突现词列表(表 3)可以看出:“应急监测”是最早出现的突现词,持续时间为 7 年,表明应急监测最早受到关注且保持了较长时间的研究热度;2006 年间的突现词有 2 个,分别为“松花江”和“硝基苯”,这主要与 2005 年发生的松花江污染事件有关;2007—2008 年的突现词为“预氧化”和“活性炭”,表明这一阶段研究的热点开始转移到具体技术层面上。“预氧化”的强度最高,表明这一阶段预氧化技术受到了广泛的关注;2011 年的突现词为“镉污染”,表明该时间段对镉污染关注较多。

表 3 突现词信息表

Table 3 Information Table of Brust Terms

关键词	强度	突现开始年份	突现结束年份
预氧化	3.206 7	2007	2010
苯酚	2.694 7	2007	2011
松花江	2.322 9	2006	2007
活性炭	2.263 7	2008	2013
镉污染	2.157 5	2011	2012
应急监测	2.149 4	2000	2006
硝基苯	2.030 5	2006	2008
突发性	2.017 3	2016	2018

2.3 研究趋势分析

为更好地在时间序列上勾勒聚类主题的历史跨度及聚类成员间的关联,直观地表征知识演进^[6],绘制了关键词聚类时间线图,选择前 7 个聚类结果进行展示,结果如图 5 所示。

一般认为图谱模块值(modularity, Q)大于 0.3 时,聚类是显著的;平均轮廓值(mean silhouette, S)大于 0.5 认为聚类是合理的, S 为 0.7 时,聚类是令人信服的^[7]。图 5 中 Q 为 0.695 8,表明聚类效果良好; S 为 0.916 6,表明聚类主题明确。

我国环境污染应急处理技术的各聚类持续期各不相同。应急监测、技术方法和活性炭吸附 3 个聚类中的相关研究从 1996 年一直持续到 2020 年。其余聚类主要在 2006 年以后研究比较集中。筛选、应

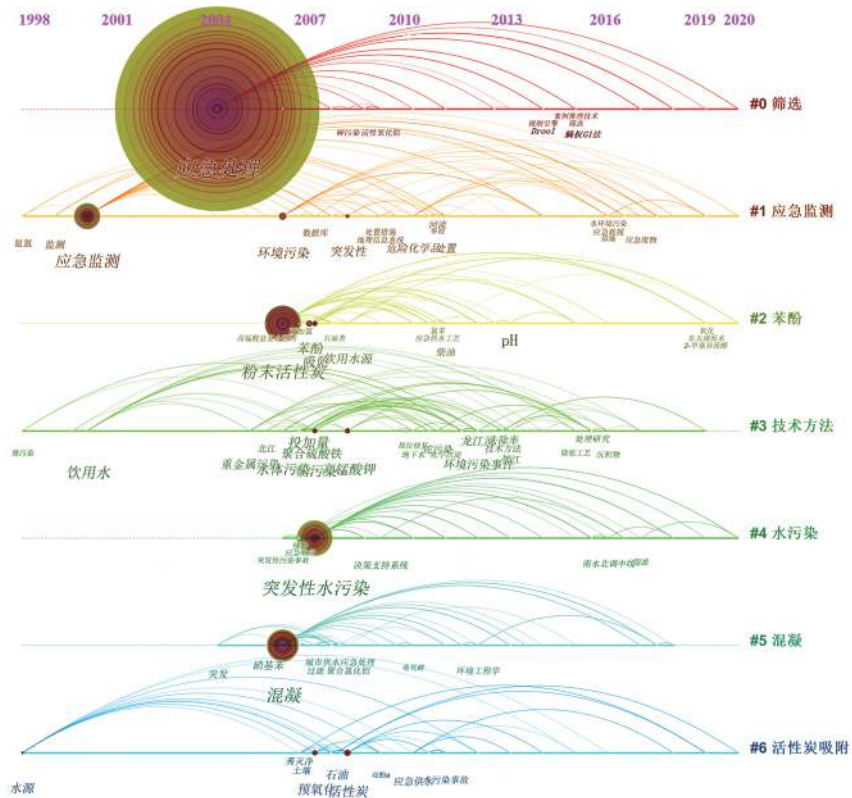


图 5 关键词聚类时间线视图

Fig.5 Timeline view of keywords clustering

急监测、活性炭吸附在 2020 年均有新的点出现,说明这可能是其今后发展的研究对象。图谱中混凝聚类的相关研究停留在了 2018 年,说明在我国环境污染应急处理领域混凝可能不再是研究热点。

根据聚类分析的结果,将环境污染应急处理技术的研究热点进一步总结为以下 3 个研究方向。

2.3.1 应急监测

突发性环境污染事故处理建立在准确的应急监测结果基础之上,只有准确判断出突发性环境污染事故的污染状况、污染类型,才能够提高处理效率,应急监测在突发性环境污染事故处理中具有极为重要的作用^[14]。图 5 显示应急监测这个聚类研究热度持续时间从 1996 年延续到 2020 年,足以看出研究人员对应急监测技术的重视。

该聚类下的研究主要基于突发环境污染的特点,对如何实现快速检测的应急检测技术与设备的内容及方法进行分析和探讨。如曲茉莉等^[15]介绍了无人遥感检测技术、无人船监测等新型的监测手段;徐亮等^[16]以移动监测车为载体集成了 VOCs 在线质谱仪、GPS 信息记录仪和气象参数仪等设备的 VOCs 走航观测系统,实现了 VOCs 污染物的高时空分辨率的走航观测,并在“3·21”响水特大爆炸事故

中开展了探索性的应用;王有家等^[17-18]对常规性应急监测技术与装备、便携式仪器监测技术、生物监测技术以及定性和定量监测技术等进行了阐述。

在该聚类主题下的研究主要基于现有监测手段的梳理总结,但是由于事故处置现场情况复杂、时间紧迫,如何实现快速准确的监测尚缺乏统一的技术指导。

2.3.2 技术筛选

应急处理技术的选择对于整个事故处置具有重要的影响,应急处理技术应该具有处理效果显著、实施快速,易于操作、费用成本适宜等特点^[19]。对突发环境污染事件进行应急处理时,适宜的应急处理技术或技术组合至关重要^[20]。精准的应急处理措施一般要根据事故的具体情景态势来确定,通常采用“情景—应对”模式来解决事故中的应急处理问题^[21]。图 5 显示,环境污染应急处理技术的筛选虽起步较晚,但受到的关注度较高,且研究热度一直持续到 2020 年,表明该方向是应急处理技术领域研究的重点,也是未来重要的研究对象。

刘仁涛等^[20]基于推理技术(CBR)和模糊多属性群决策模型(MADM)的优势,建立了环境污染应急处理技术的 CBR-MADM 两步筛选法模型。张江石

等^[21]以天津港“8·12”事故为例,结合动态贝叶斯网络构建情景推演模型,来实现危险化学品事故中关键情景的推演。罗玉兰等^[22]针对突发化学品污染事故建立了基于 Dempster-Shafer 证据理论和改进层次分析法的应急处理技术动态优选体系。Shi 等^[23]使用事件树方法创建 54 种不同的化学品污染事故场景,建立了基于群体决策改进层次分析法(AHP)的技术评价指标体系,并用于山西长治浊漳河苯胺污染事件的应急处理技术筛选中,取得了一定的效果。Liu 等^[24]针对化学品泄漏应急技术筛选,建立了基于动态模糊 GRA 方法的评价框架,提出了应急技术筛选的优化方案。Liu 等^[25]针对应急材料的筛选,建立了基于差异驱动修正策略的多案例推理模型方法(DDRS-MCBR),并以 2012 年的实际环境污染事故为案例,对材料库、案例库、筛选模型进行了验证。张茉莉等^[26]通过基于案例推理的结构化层次存储和搜索技术,构建应用管理案例库,为决策者提供相对优化的解决方案工具。

目前对于技术筛选的研究主要是基于模型的推演和案例库的设计,在实际的应用过程中对于应急技术库、案例库等的建设仍需进一步丰富推演情景,提高技术筛选的速度。

2.3.3 技术方法

该聚类主要对应急处理的具体技术进行了归纳。目前,环境污染应急处理技术主要有吸附法、混凝沉淀法、氧化分解法等^[5]。

(1) 吸附法

吸附法主要是利用活性炭等吸附材料去除水体中的污染物。活性炭吸附具有广谱性^[27],几乎能吸附去除水中大部分的污染物,适宜处理污染变化大的废水,特别适用于突发性污染事件^[28]。活性炭对水体中的有机污染物^[29]、重金属^[30]等均有较好的吸附效果。于吉亭^[31]比较了粉末活性炭和水厂常规处理工艺在去除石油类有机污染处理能力上的差别,发现粉末活性炭对石油类有机污染物的处理能力(2.1~2.3 mg/L)远大于常规混凝工艺的处理能力(0.15 mg/L),适合在突发污染时使用。刘韵达等^[32]研究表明,粉末活性炭投加量为 20 mg/L,可使超标 15 倍的酚污染原水沉淀后达标,酚去除率为 20.5%~44%。刘成等^[33]研究发现,活性炭对太湖藻类爆发的污染事件中的致臭物质,包括 1-甲醛基-2,6,6 三甲基-1-环己烯、辛醛、环己硫、环己酮等均有良好的去除效果。在 2005 年松花江水污染事故应急处理中,采用粉末活性炭吸附水源水硝基苯及净水厂砂滤池新增颗粒活性炭滤层双重安全屏障的

应急处理工艺,处理后硝基苯浓度满足水质标准^[34]。2019 年响水“3·21”特别重大爆炸事故中,科研人员采用活性炭好氧强曝气工艺对爆炸大坑废水进行了预处理,保证了后续工艺处理的效果。

吸附法可快速清除水体中的污染物,但该方法面临着诸多问题,如吸附材料多为颗粒状或者粉末状,直接投放于污染水域存在不易回收的问题,已吸附饱和的活性炭增加了污泥的处理成本和难度,如不妥善处理,易引起二次污染^[28]。吸附材料一般要固定在编织网袋中,但是固定使得吸附材料紧密堆积,导致吸附材料与水体接触的比表面积减小,降低了其去污效能,另外该种方式会阻碍水体的流动^[5]。

(2) 化学混凝

化学混凝沉淀是通过调整 pH、投加沉淀剂或是改变污染物离子的价态,使重金属离子污染物或非金属离子污染物生成金属氢氧化物或碳酸盐等沉淀形式,再通过铝盐、铁盐等絮凝及沉淀去除的工艺^[5]。根据具体工艺又可分为碱性化学沉淀法、硫化物沉淀法和其他化学沉淀法^[29]。张晓健等^[35]研究了弱碱性化学沉淀法去除镉离子的原理,明确了饮用水中镉离子去除的要点,并在龙江河镉污染事件进行了成功应用。姚娟娟等^[36]研究表明,在原水中的砷离子浓度超标 50 倍时,可以通过增加聚合硫酸铁的投加量实现出水达标,当砷离子浓度超标 100 倍时,需要进一步结合膨润土吸附来实现水质的达标。刘学卿等^[37]研究发现投加聚合氯化铝可以实现饮用水中铅离子的去除。

在实际应急处理的过程中,混凝沉淀法需要将污染水域隔离开,以便于进行 pH 调节,混凝沉淀物的回收及混凝沉淀后水体的后续处理等都十分繁琐,对于流动水体,该方法的使用更加有局限性。化学混凝沉淀法主要适合水中重金属的应急去除。

(3) 氧化分解

氧化分解法是采用高锰酸钾、臭氧等氧化剂将水中有机污染物氧化去除的方法^[29]。刘韵达等^[32]研究发现,高锰酸钾和臭氧具有很好的应急除酚效果,3 mg/L 的臭氧可使 0.2 mg/L 的苯酚原水沉淀后达标,0.5 mg/L 的高锰酸钾可去除 50% 的苯酚。王新刚等^[38]研究发现,粉末活性炭吸附-KMnO₄ 氧化联用技术可大大提高除酚效能,投加 50 mg/L 粉末活性炭,2 mg/L 的 KMnO₄ 可将初始浓度为 250 和 500 μg/L 的含酚原水分别处理至 18 和 66 μg/L。Xu 等^[39]认为高铁酸钾氧化沉淀工艺更适合水环境中铈离子应急处理。韩瑾等^[40]采用高锰酸盐复合药剂(PPC)预氧化/混凝沉淀工艺对饮用水中的镉进行去

除,结果表明该技术对镉离子的去除率为 95.2%。

氧化分解法向水体中投加化学药剂,容易造成水体二次污染,且残留的化学药剂需要进行后处理,使得该方法工艺复杂,操作繁琐,因此其用于自然水体污染的应急处理还有待于进一步研究。

3 结论

(1)我国环境污染应急处理技术研究起步较晚,在 2005 年之前,相关研究的论文极少;2006—2016 年是发文量快速增长阶段,表明我国对应急管理工作不断加强;2017 年后趋于平稳,表明国内该领域研究处于大体均衡的稳定发展状态。总体而言我国在该领域发文量不足,研究基础相对薄弱。

(2)我国环境污染应急处理技术研究领域相关学者较多,主要团队的内部联系较为紧密,但是各团队之间尚未建立广泛的合作关系,应进一步加强学术交流。

(3)我国环境污染应急处理技术主要围绕水环境领域,研究热点主要是技术筛选、应急监测以及活性炭吸附和混凝等。这也反映出适宜的应急技术和快速的监测手段是该领域内亟需解决的问题。

参考文献

- [1] WIENS J A, PARKER K R. Analyzing the effects of accidental environmental impacts: approaches and assumptions[J]. *Ecological Applications*, 1995, 5(4): 1069-1083.
- [2] 符志友,张衍桑,冯承莲,等.我国水环境风险管理进展、挑战与战略对策研究[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(7): 1532-1541.
FU Z Y, ZHANG Y S, FENG C L, et al. Progress, challenge and strategic countermeasures of Chinese pollution risk management of water environment[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(7): 1532-1541.
- [3] 丁镛,黄亚林,刘云浪,等.1995—2012年中国突发性环境污染事件时空演化特征及影响因素[J]. *地理科学进展*, 2015, 34(6): 749-760.
DING L, HUANG Y L, LIU Y L, et al. Spatiotemporal variability of sudden environmental pollution incidents and influencing factors in China, 1995-2012[J]. *Progress in Geography*, 2015, 34(6): 749-760.
- [4] 李旭,吕佳佩,裴莹莹,等.国内突发环境事件特征分析[J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11(2): 401-408.
LI X, LÜ J P, PEI Y Y, et al. Analysis of the characteristics of environmental emergencies in China[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11(2): 401-408.
- [5] 李青云,赵良元,林莉,等.突发性水污染事故应急处理技术研究进展[J]. *长江科学院院报*, 2014, 31(4): 6-11.
LI Q Y, ZHAO L Y, LIN L, et al. Review of emergency treatment technologies for sudden water pollution accidents[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2014, 31(4): 6-11.
- [6] CHEN C M. Science mapping: a systematic review of the literature[J]. *Journal of Data and Information Science*, 2017, 2(2): 1-40.
- [7] 陈悦,陈超美,刘则渊,等.CiteSpace知识图谱的方法论功能[J]. *科学学研究*, 2015, 33(2): 242-253.
CHEN Y, CHEN C M, LIU Z Y, et al. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains[J]. *Studies in Science of Science*, 2015, 33(2): 242-253.
- [8] 朱正如,湛雅琪,姜俊超,等.国内外资源环境承载力文献计量对比分析:现状与热点[J]. *辽宁师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 43(4): 532-542.
ZHU Z R, ZHAN Y Q, JIANG J C, et al. Research progress and hotspot analysis of resource environmental carrying capacity based on bibliometrics[J]. *Journal of Liaoning Normal University (Natural Science Edition)*, 2020, 43(4): 532-542.
- [9] 张春博,丁堃,曲昭,等.基于文献计量的我国创新驱动研究述评[J]. *科技进步与对策*, 2015, 32(9): 152-160.
ZHANG C B, DING K, QU Z, et al. A review of the literature of innovation-driven research in China based on bibliometric analysis[J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 2015, 32(9): 152-160.
- [10] 李静,吕永龙,贺桂珍,等.我国突发性环境污染事故时空格局及影响研究[J]. *环境科学*, 2008, 29(9): 2684-2688.
LI J, LÜ Y L, HE G Z, et al. Spatial and temporal changes of emerging environmental pollution accidents and impact factors in China[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(9): 2684-2688.
- [11] 赵雪雁,王蓉,王晓琪,等.基于多尺度的中国环境污染事件时空分布及其影响因素[J]. *地理科学*, 2019, 39(9): 1361-1370.
ZHAO X Y, WANG R, WANG X Q, et al. Spatio-temporal distribution and influencing factors of environmental pollution incidents based on multi-scales in China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(9): 1361-1370.
- [12] 何雪,李威,刘克.2000—2020年我国镉吸附-解吸的文献计量研究:基于CiteSpace的计量分析[J]. *安徽农业科学*, 2021, 49(8): 240-245.
HE X, LI W, LIU K. Research progress of cadmium adsorption-desorption in 2000-2020 in China: quantitative analysis based on CiteSpace[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2021, 49(8): 240-245.
- [13] 曹文杰,赵瑞莹.国际农业面源污染研究演进与前沿:基于CiteSpace的量化分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(7): 1-9.
CAO W J, ZHAO R Y. Evolution and frontiers of international agricultural diffused pollution research: quantitative analysis based on CiteSpace[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(7): 1-9.
- [14] 陈顺利.浅析应急监测在突发性环境污染事故处理中的作用[J]. *科技风*, 2018(7): 146-147.
- [15] 曲茉莉,王强,邢洁,等.新型应急技术在突发环境污染中的应用[J]. *科技创新导报*, 2015, 12(14): 93-94.
- [16] 徐亮,宋兴伟,梁宵,等.VOCs走航系统在响水环境应急监测中的探索应用[J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(7): 66-71.
XU L, SONG X W, LIANG X, et al. Exploratory application of VOCs navigation system in environmental emergency monitoring in Xiangshui[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 43(7): 66-71.
- [17] 王有家.水体突发性环境污染事故应急监测技术研究[J]. *环境与发展*, 2020, 32(12): 75-76.
WANG Y J. Research on emergency monitoring technology for sudden environmental pollution accident of water body[J]. *Environment and Development*, 2020, 32(12): 75-76.

- [18] 李倩倩, 谢超, 唐海龙. 水体突发性环境污染事故应急监测技术研究[J]. 环境与发展, 2019, 31(1): 123.
LI Q Q, XIE C, TANG H L. Research on emergency monitoring technology for sudden environmental pollution accidents in water bodies[J]. Environment and Development, 2019, 31(1): 123.
- [19] 张晓健, 陈超, 林鹏飞. 应对水源突发污染的城市供水应急处理技术研究与应用[J]. 中国应急管理, 2013(10): 11-17.
- [20] 刘仁涛, 郭亮, 姜继平, 等. 环境污染应急处置技术的CBR-MADM两步筛选法模型[J]. 中国环境科学, 2015, 35(3): 943-952.
LIU R T, GUO L, JIANG J P, et al. A CBR-MADM based two-step screening model of emergency disposal technology for chemical spills[J]. China Environmental Science, 2015, 35(3): 943-952.
- [21] 张江石, 冯娜娜. 基于动态贝叶斯网络情景推演的危化品事故应急处置研究[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(4): 1420-1426.
ZHANG J S, FENG N N. On the emergency disposal of the hazardous chemical accidents based on the dynamic Bayesian network scenario deduction[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(4): 1420-1426.
- [22] 罗玉兰, 刘颖, 陈青松, 等. 基于IAHP-DS的流域突发化学品污染事故应急处置技术动态优选体系研究[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(3): 97-103.
LUO Y L, LIU Y, CHEN Q S, et al. Dynamic optimization system of emergency treatment technology for sudden chemical pollution accidents in drainage basin based on IAHP-DS[J]. Safety and Environmental Engineering, 2020, 27(3): 97-103.
- [23] SHI S G, CAO J C, FENG L, et al. Construction of a technique plan repository and evaluation system based on AHP group decision-making for emergency treatment and disposal in chemical pollution accidents[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 276: 200-206.
- [24] LIU J, GUO L, JIANG J P, et al. Evaluation and selection of emergency treatment technology based on dynamic fuzzy GRA method for chemical contingency spills[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 299: 306-315.
- [25] LIU R T, JIANG J P, GUO L, et al. Screening of pollution control and clean-up materials for river chemical spills using the multiple case-based reasoning method with a difference-driven revision strategy[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(11): 11247-11256.
- [26] 张茉莉, 袁鹏, 宋永会, 等. 基于案例推理的突发环境事件应急管理案例库构建技术研究[J]. 环境工程技术学报, 2015, 5(5): 386-392.
ZHANG M L, YUAN P, SONG Y H, et al. Development of establishing technology of abrupt environment accident case library for emergency management based on case-based reasoning[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2015, 5(5): 386-392.
- [27] 姜春明, 张宏哲, 张海峰, 等. 功能性多孔炭材料在突发性环境污染事故中的应用[J]. 新型炭材料, 2007, 22(4): 295-301.
JIANG C M, ZHANG H Z, ZHANG H F, et al. Application of functional and porous carbon materials for emergency pollution accidents[J]. New Carbon Materials, 2007, 22(4): 295-301.
- [28] 王斌. 突发性污染的粉末活性炭应急广谱性研究[J]. 甘肃科技纵横, 2017, 46(11): 33-37.
- [29] 张晓健, 陈超. 应对突发性水源污染的城市应急供水的进展与展望[J]. 给水排水, 2011, 47(10): 9-18.
ZHANG X J, CHEN C. Emergency drinking water supply against water pollution accidents in China: progress and prospect[J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 47(10): 9-18.
- [30] KADIRVELU K, THAMARASELVI K, NAMASIVAYAM C. Removal of heavy metals from industrial wastewaters by adsorption onto activated carbon prepared from an agricultural solid waste[J]. Bioresource Technology, 2001, 76(1): 63-65.
- [31] 于吉亭. 水源突发有机污染应急处理技术[J]. 水利技术监督, 2020, 28(2): 140-145.
YU J T. Discussion on emergency treatment technology of sudden organic pollution of water source[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2020, 28(2): 140-145.
- [32] 刘韵达, 胡勇有, 何向明, 等. 饮用水源突发酚污染应急处理中试研究[J]. 环境科学学报, 2008, 28(12): 2503-2508.
LIU Y D, HU Y Y, HE X M, et al. Pilot study on emergent treatments of raw water suddenly polluted by phenols[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(12): 2503-2508.
- [33] 刘成, 高乃云, 卢宁, 等. 太湖蓝藻暴发应急处理方案研究[J]. 给水排水, 2007, 33(8): 7-10.
- [34] 张晓健. 松花江和北江水污染事件中的城市供水应急处理技术[J]. 给水排水, 2006, 32(6): 6-12.
ZHANG X J. Emergent drinking water treatment in water pollution accidents in Songhuajiang River and Beiji River[J]. Water & Wastewater Engineering, 2006, 32(6): 6-12.
- [35] 张晓健, 陈超, 米子龙, 等. 饮用水应急除镉净水技术与广西龙江河突发环境事件应急处置[J]. 给水排水, 2013, 49(1): 24-32.
ZHANG X J, CHEN C, MI Z L, et al. Emergent cadmium removal technology for drinking water and measures for environmental accident in Guangxi Longjianghe River[J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 49(1): 24-32.
- [36] 姚娟娟, 高乃云, 尚亚波, 等. 砷污染原水的应急处理工艺研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(21): 15-18.
YAO J J, GAO N Y, SHANG Y B, et al. Study on emergent treatment process of raw water polluted by arsenic[J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(21): 15-18.
- [37] 刘学卿, 丁文婧, 赵一亮. 饮用水源突发铅污染的应急处理技术研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2015, 29(5): 507-510.
LIU X Q, DING W J, ZHAO Y L. Study on emergency treatment for lead pollution in drinking water source[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 29(5): 507-510.
- [38] 王新刚, 刘学卿, 陈芳艳, 等. 吸附-氧化法应急处理饮用水源突发苯酚污染的研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(11): 2417-2422.
WANG X G, LIU X Q, CHEN F Y, et al. Research on emergency treatment of accidental phenol pollution of drinking source water by adsorption-oxidation process[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(11): 2417-2422.
- [39] XU H Y, LUO Y L, WANG P, et al. Removal of thallium in water/wastewater: a review[J]. Water Research, 2019, 165: 114981.
- [40] 韩瑾, 李星, 杨艳玲, 等. 饮用水源突发镉污染的应急处理技术研究[J]. 中国给水排水, 2012, 28(21): 1-4.
HAN J, LI X, YANG Y L, et al. Emergency treatment of source water after cadmium pollution accident[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(21): 1-4. ⊗