

文章编号: 2096-3424(2022)02-0124-07

DOI: 10.3969/j.issn.2096-3424.2022.02.004

地下水污染及修复技术的研究浅析

黄永军¹, 徐从海², 严冬冬², 薛建良³

(1. 山东君成环境检测有限公司, 山东 临沂 276000; 2. 临沂君和环保科技有限公司, 山东 临沂 276000;
3. 山东科技大学, 山东 青岛 266590)

摘要: 地下水污染主要指人类活动引起的地下水化学成分、物理性质和生物学特性发生改变而使质量下降的现象。目前我国地下水遭受不同程度的污染, 受污染面积大, 污染源复杂, 使得地下水污染修复工作开展困难。综述了地下水污染的类型和国内外常见的地下水污染修复技术, 并对在地下水污染修复过程中存在的问题和地下水污染防治未来的发展方向进行展望。

关键词: 地下水污染; 原位修复技术; 异位修复技术

中图分类号: X172 **文献标志码:** A

Analysis on Groundwater Pollution and Remediation Technologies

HUANG Yongjun¹, XU Conghai², YAN Dongdong², XUE Jianliang³

(1. Shandong Juncheng Environment Examination Co., Ltd., Linyi 276000, Shandong, China; 2. Linyi Junhe Environmental Protection Technology Co., Ltd., Linyi 276000, Shandong, China; 3. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China)

Abstract: Groundwater pollution mainly refers to the phenomenon of degradation of groundwater quality due to changes in its chemical composition, physical properties and biological characteristics caused by human activities. At present, China's groundwater suffers from different degrees of pollution, the contaminated area is large and the pollution sources are complex, making it difficult to carry out groundwater pollution remediation work. This paper reviews the types of groundwater pollution and common groundwater pollution remediation technologies at home and abroad, and provides an outlook on the problems existing in the process of groundwater pollution remediation and the future development direction of groundwater pollution prevention and control.

Key words: groundwater pollution; in-situ remediation technology; ex-situ remediation technology

近年来,随着工业、农业生产能力的快速提升,这些人类活动引发的的大量污染物质进入地下水的情况也不断增加^[1-4]。地下水污染是污染物质使

地下水的各种化学成分和物理性质发生变化,从而导致地下水水质下降的现象^[1-2]。当前,国内外均有不同程度的地下水污染问题,由于地下地层复杂、

收稿日期: 2021-09-16

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目(ZR2020ME224)资助

作者简介: 黄永军(1974-),男,高级工程师,主要研究方向为水质的检测与评价。E-mail: 709799151@qq.com

通信作者: 薛建良(1983-),男,副教授,博士,主要研究方向为污水处理。E-mail: LL-1382@163.com

引文格式: 黄永军,徐从海,严冬冬,等. 地下水污染及修复技术的研究浅析[J]. 应用技术学报, 2022, 22(2): 124-130.

Citation: HUANG Yongjun, XU Conghai, YAN Dongdong, et al. Analysis on Groundwater Pollution and Remediation Technologies[J].

Journal of Technology, 2022, 22(2): 124-130.



水流缓慢,导致地下水污染的监测与控制相对困难。以我国为例,地下水污染程度加重,呈现区域特征^[3-4],

例如从点状发展至带状和面状、北方重于南方等。部分地区的污染特征如表 1 所示。

表 1 我国部分地下水污染区域分布特征

Tab. 1 Regional distribution characteristics of groundwater pollution in China

地区	污染原因	污染物	特点
东北地区	重工业和油田开发	亚硝酸盐氮、氨氮、石油类、硝酸盐氮、挥发性酚类等	具有区域特征
华北地区	人口多,经济活动强烈,城市和农村的地下水污染比较普遍	硝酸盐氮、氧化物、锰、石油类	地下水总硬度和矿化度超标严重,大部分城市和地区的总硬度超标
西北地区	人口少,地下水污染总体较轻	硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、铬、铅	以点状、线状分布于城市和工矿企业周边地区
南方地区	局部污染严重	亚硝酸盐氮、氨氮、铁、锰、挥发性酚、汞、砷	西南地区污染组分呈点状分布于城镇、乡村居民点,污染程度较低,范围较小;中南地区污染程度较低;长江三角洲地区、珠江三角洲经济发达,浅层地下水污染普遍

地下水污染引起的人体健康和生态问题引起了各国政府的高度重视,各国政府也开始投入资金和技术进行地下水水质监测和地下水污染控制。各国对地下水污染的研究起步不尽相同,我国从 20 世纪 80 年代才开始研究污染物在地下水中的迁移现象,当时的研究成果主要是建立了地下水水质模拟的计算方法和模型^[5]。而日、英、法、美等国则是于 1971 年便开始了有关水质资料数据库运转的报道,在这些水质档案中储存了地下水中生物污染、化学污染或放射性污染等 140 万个水样分析资料^[6]。与此同时,相关的地下水污染修复技术也在不断的发展。因此,本文浅析了我国地下水污染现状,总结了地下水污染类型及修复技术,并对地下水污染修复过程中的问题和未来发展方向进行了展望。

1 地下水污染类型

1.1 重金属污染

地下水重金属污染的原因相对较多,如矿区的开采和金属的冶炼等。另外,传统工业生产废水的排放、矿物和生活垃圾不分类的堆放也是引起重金属污染的重要原因^[7]。特别是,采矿、化工、造纸、电子等行业排放的重金属废水引发的环境问题逐渐凸显。这些工业废水、矿物等重金属成分渗入到土地中,由于地质条件的侵蚀和风化会使得重金属污染物质进入到地下水中,对人的生命健康和自然环境造成潜在的威胁^[8]。

地下水重金属污染导致污染物超标的报道增多,目前引起地下水污染的重金属主要包括铅(Pb)、锰(Mn)、铬(Cr)、镉(Cd)、砷(As)、汞(Hg)等^[9]。陈劲松等^[10]检测了某炼铁厂遗留污染场地地下水中的重金属含量,发现 As 浓度超标,超标倍数为 1.10。谭光超等^[11]对汉江油田地下水丰水期的取

样监测结果进行分析,结果表明部分水样中 Fe 平均值为 7.66 mg/L,是标准值的 25.52 倍;Mn 平均值为 0.415 3 mg/L,是标准值的 4.15 倍。

1.2 有机污染物污染

地下水的有机污染现象也是非常常见的地下水污染之一。地下水有机污染物的来源主要有天然来源和人为来源。天然来源的地下水有机污染物,是指绝大多数地下水层中或多或少都存在的天然有机污染物,主要是自然环境产生的多种腐殖酸。腐殖酸可以在各种层间水力的联系下进入地下水中,从而引起地下水污染^[12]。常见的地下水污染的人为来源,则包括工业固体废弃物不当处理、有机污水的排放、农业中农药或化肥随雨水淋溶下渗透到地下水层、石油煤气运输过程中原油煤气的泄漏以及管道破裂引发的石油污染等^[13-14],因此,有机污染地下水的情况较为复杂且污染物质众多。龚晓洁等^[15]对河南省浅层地下水微量有机污染物进行检测,检测出的有机污染物有单环芳烃、多环芳烃、卤代烃、氯代苯、有机氯农药等 5 大类 22 项。这些有机污染物通常引起“三致”效应(致癌、致畸、致突变),挥发性有机污染物(如苯、卤代烃等)危害较大,主要作用于人体神经系统、造血组织和神经系统^[16];持久性有机污染物导致出生体重降低、生长迟缓,损害神经系统,引起注意力障碍,抑制免疫系统的发病率^[17]。而大部分有机污染物由于其非水溶性和难降解性导致了其处理效果并不理想,袁巧灵等^[18]在其研究中提到三氯乙烯以重质非水相液体的形式存在于土地下水中,由于其密度大于水的密度,使其易向下迁移,因而使得修复过程极为困难。表 2 列出了地下水中有重金属污染物和有机污染物的离子和代表物质。

表 2 地下水中污染物类型及代表物质

Tab. 2 Types and representative substances of pollutants in groundwater

污染物	物质	浓度范围	来源	参考文献
重金属	As	0~0.01 mg/L	炼铁厂污染场地	
	Fe	1.81~10.83 mg/L	汉江油田地下水	[19-20]
	Mn	0.05~2.84 mg/L	汉江油田地下水	
有机	三氯乙烯	5.52~1 580 mg/L	浦东新区某镇	
	苯	0.17~11 134 μg/L	河南平原浅层地下水	[21-22]
	甲苯	0.10~32.11 μg/L	河南平原浅层地下水	
	三氯甲烷	0.24~4.68 μg/L	河南平原浅层地下水	

1.3 其他污染

地下水中的其他污染物主要包括病原微生物和无机有毒有害污染物等。人类活动所产生的生活污水、医疗废水中常含有各种病原微生物。自然

因素可以造成水体中无机的某些有毒有害物质含量超标,如岩石风化、土壤侵蚀、火山运动是地下水中砷的来源之一。而当人类饮用了被污染的地下水后,易引起白血病、高血压、动脉硬化和神经系统损伤等各类身体疾病。

2 地下水污染修复技术

随着地下水污染防治在全世界范围内开展,各种新型处理技术不断出现,按照处理区域的不同,可以将其分为原位修复技术和异位修复技术^[23]。原位修复技术是指不需要对受污染地下水进行搬运或运输,直接进行原地修复的方法。地下水异位修复技术是将被污染的地下水分离出来并转移到特定的区域进行修复处理的技术。原位修复和异位修复的差异如表 3 所示。

表 3 地下水污染修复技术

Tab. 3 Groundwater pollution remediation technology

名称	修复技术	优势	劣势
原位修复	电动修复技术、化学氧化修复技术、原位生物修复技术、多相抽提技术	有效减少对地层的扰动及污染物的暴露,同时处理费用低,设备简单,具有成本低和对环境干扰小等优点	—
异位修复	地下水抽出处理技术	该技术具有在短时间内修复效率高、修复量大的优势	在长期应用情况下,会有严重的污染物拖尾和反弹效应,最终降低修复效率

2.1 原位修复技术

2.1.1 电动修复技术

原位修复技术中的电动修复技术是一种绿色的修复技术,是指在电场作用下,目标污染物通过电迁移、电渗流和电泳等过程向电极附近移动,从而导出目标污染物,并用适当的方法处理,最终达到修复的目的。从国内外电动修复技术发展情况来看,电动修复技术最早是在欧美起源并逐步发展的,直至 2002 年,该项技术才在亚洲国家如日本、韩国和中国等得到应用,并在亚洲得到迅速发展^[23-26]。

电动修复技术有实用性较强、环境兼容性较好、选择性较高等优点^[24-27]。涂啸宇^[28]运用电动修复技术,通过施加 50 mA 的直流电流来修复污染地区土壤和地下水中的 Cl⁻,发现其修复效率可达 50%。时文歆等^[29]对 Pb 污染的地下水采用电动修复技术进行了治理,实现了铅的定向迁移,阳极区 Pb 浓度由 1 090 mg/L 下降至 240 mg/L。王加华^[30]在他的研究中采用了脉冲交替电压的电动与生物修复相结合的方式修复污染地下水,解决了传统修复技术中面临的阴阳两极酸化或碱化的问题,主要机理为通过电动力学效应,将污染物从土壤颗

粒物中分离出来,并将长链的污染物降解为短链的污染物从而被微生物降解,经过 5 个月的修复后,二甲苯等单苯环苯系物含量低于检出限,多环芳烃类有机物去除率达 90%。

但电动修复技术也面临着以下几个问题:①由于目标污染物的迁移需要在可以流动的体系内实现,故此法不适合用于水分质量分数低于 10% 的修复场地;②修复场地的矿物质含量如存在差异,可能引起电流异常,会导致修复效果波动;③二次污染的可能性是存在的,如阴极区域可能产生氯气,或修复后电极材料因腐蚀而残留于修复场地内。

2.1.2 原位化学氧化修复技术

原位化学氧化修复技术是将配制好的氧化剂通过钻孔或者注水井加入到受污染的地下水或土壤中,通过氧化剂把污染物降解或改变污染物的形态,从而净化受污染水体的技术^[30-41]。表 4 总结了一些常用氧化剂的修复效果,发现化学氧化修复技术对污染物的去除效率很高,均在 90% 以上。例如, Nelson 等^[32]研究了原位化学氧化修复地下水中的污染物,发现 O₃ 的通气时间达 40 h 后, TCE 和柴油的降解率分别达到 82% 和 98%。除此之外,如

表 4 原位化学修复技术的应用

氧化剂	污染物	去除效率/%	参考文献
过氧化氢	2-甲基苯酚	97.60	[34]
	3,4-甲基苯酚	99.80	
	2,4-甲基苯酚	95.30	
芬顿试剂	1,2,4-TCB	97.80	[35-37]
	聚乙烯醇	99.10	
高锰酸钾	四氯乙烯	95.00	[38-39]
	三氯乙烯	90.00	
	化学需氧量	64.57	
臭氧	苯胺	99.15	[40-41]
	四溴双酚A	100.0	

过硫酸盐等作为氧化剂的化学氧化技术也有相关报道,李坡等^[34]研究了过硫酸盐对苯胺的去除效果,并通过 3 种活化方式(碱活化、铁活化和过氧化氢活化)进行了活化研究,4 天内对苯胺的去除率可以达到 60%。

综上所述,原位化学氧化修复技术具有快速反应和彻底治理的优点,是目前我国常用的一种原位修复技术。然而,原位化学氧化技术有一定的局限性,例如,在渗透性差的区域(如黏土层),氧化剂的渗透速度可能很慢,甚至不能注入。此外,氧化过程是非选择性的,地下水中的还原物质较多会带来氧化剂的用量大的问题。除此之外,原位化学氧化修复技术本身存在一定的缺陷并且污染场地通常具有一定的复杂性,因此,在实际应用过程中该技术往往与其他修复技术联合使用。

2.1.3 原位生物修复技术

原位生物修复技术主要适应于一些有机污染物污染的修复中。其主要是利用微生物的分解作用,实现被污染地下水中有机的分解,进而去除污染物^[42-43]。原位生物修复地下水的作用机制主要是将微生物所需的空气、养分和能量注入地下水,充分发挥微生物的降解作用,其中,微生物的位置不是固定的,它们会随着污染物移动^[44-45]。这种方法有利于对其他修复技术难以到达的位置进行地下水修复^[46-49],例如利用原位生物修复技术对地下水中苯系污染物进行修复,对苯胺的降解率可达 99.99%^[46]。Goltz 等^[49]采用原位生物修复法处理地下水中的三氯乙烯,去除效率达到了 60% 以上。丁琳洁等^[47]发现产乙烯脱卤球菌能通过将三氯乙烯依次脱氯为二氯乙烯、氯乙烯,最终完全还原为无毒的乙烯。但是,地下水中并不是所有的有机污染物能够被微生物降解,有些物质甚至能抑制微生物的活性。因此,原位生物修复技术往往会结合其他技术联合修复地下水。

2.1.4 多项抽提技术

多项抽提技术是指把污染区域的土壤气体、地下水 and 自由相等多相态污染介质同时抽提到地表,然后进行多相分离及净化处理的污染场地原位修复技术^[50-55]。多相抽提技术修复效果也受到很多因素的影响,包括场地的渗透系数、土壤含水率、有机质含量、土壤结构以及污染物的生物可降解性等。一般来说,当污染区域的渗透系数在 0.1~10 $\mu\text{m/s}$ 、水的质量分数在 40%~60%、由砂土至黏土组成且均质时,多相抽提技术处理效果更佳。在多相抽提的过程中,抽提井中氧气含量会上升,好氧微生物获得适宜的生存条件,若同时对土壤温度、pH 等条件加以控制,将会强化该项技术的处理效果,通常 pH 控制在 6~8、温度控制在 5~45 $^{\circ}\text{C}$ 较为适宜^[53]。张云达等^[55]采用多相抽提技术处理了受污染土壤和地下水中的二氯乙烯、四氯乙烯和二甲苯,结果表明处理污染物均达标。

多相抽提技术与其他地下水修复技术相比,具有可同时处理多种相态的污染物,且抽提半径大、修复范围更广等优点,不足之处是不适用于地下水位变化大的区域,应用深度有所限制,所抽提出污染物需要进行分类后才可进行处理。

2.2 异位修复技术

地下水异位修复技术,是指将受污染的地下水从原场地分离到特定区域,再进一步采用如吹脱、氧化或者直接进入管网进行进一步处理等修复处理的技术。这种技术具有在短时间内修复效率高、修复量大的优势,但在长期应用情况下,会有严重的污染物拖尾和反弹效应,最终降低修复效率。

2.2.1 抽出处理修复技术的概念及应用

异位修复技术主要以抽出处理修复技术为主^[56]。地下水抽出处理技术是利用抽水井提取受污染水体,然后使用设备在地上处理污染水体,最后把修复水体回灌或排入管网的技术^[56-58]。图 1 对抽出处理技术处理地下污水的工艺流程进行了描述。在许多污染场地,由于污染物与地下水密度的不同,两者也会发生不同的混合性变化。因此在前期需根据污染物性质的不同,开展对污染羽状体范围的调查,然后通过水泵及抽提井,将含有污染物质的水体抽出到地表,进而根据污水处理技术对抽出水体进行处理^[59]。经处理后的地下水可以直接被工农业生产使用,也可以直接回灌地下水,其中多用于回灌地下水,这样有利于地下水稀释加速地下水循环及防止地面塌陷或海水入侵。

异位修复技术在国内外均有应用,也是较为常

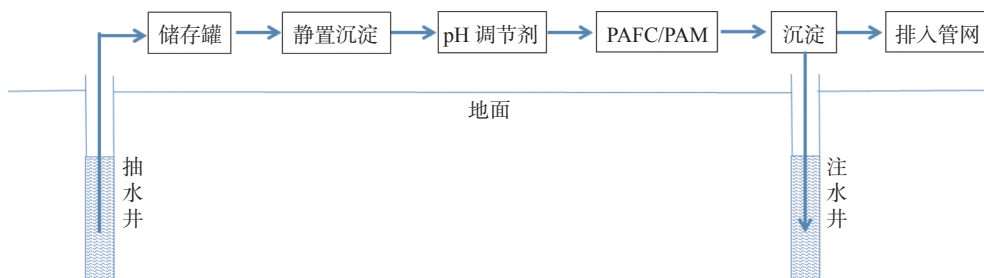


图 1 某典型的异位修复地下水工艺处理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a typical groundwater treatment process for heterotopia remediation

用的方法。根据美国超级基金场地在 1982 年—1999 年对 787 个含地下水修复场地的统计^[49], 95% 以上的场地均采取抽出处理、原位处理和监测自然衰减 3 种最常用的技术, 其中抽出处理技术最为常用, 比例高达 86%。付微^[60]对上海某污染地块地下水进行了修复, 首先经过背景调查, 发现该地区地下超标点位共计 13 个, 其中镍、砷、镉和总石油烃等 4 项因子检出值超标, 采用抽出处理技术为主, 化学氧化技术为辅的方式对地下水进行修复处理。抽出处理技术对石油烃类污染物和砷类污染物的降解效果较好^[29-31, 60-61]。表 5 总结了地下水抽出处理技术对不同污染物的去除效果, 发现对 1,2-二氯乙烯、石油烃、氰化物和砷等的去除效率均在 88% 以上, 达到了地下水的排放标准。

表 5 地下水抽出处理技术修复效率

Tab. 5 Groundwater extraction treatment technology repair efficiency

污染物	修复效率	参考文献
1,2-二氯乙烯	99.8%	[29]
硝酸盐	达到《地下水环境质量标准》 (GB/T 14848—93)Ⅲ类水体标准	[30]
石油烃、氰化物、砷	88.6%、93%、99.6%	[31]

2.2.2 抽出处理修复技术的特点

抽出处理技术的优点是所需设备简单便于操作、适用范围广, 特别是对于污染羽状体较大、污染晕埋藏较深的地下水污染, 修复效果明显并且见效快。但这种处理技术也存在一定的局限性: 在抽出处理技术实施过程中常常会遇见拖尾与回弹的现象, 需要及时封闭污染源。此外, 在系统运行过程中, 往往需要连续供能, 同时抽出处理系统设备需要定期地维护与监控, 运行成本较高。

3 结 语

目前, 我国对“绿水青山就是金山银山”的环保意识不断加强, 工业场地污染地下水的修复工作对

人们的生活安全具有非常重要的现实意义。在总结国内外地下水修复技术研究进展的基础上, 结合我国地下水污染现状, 对地下水修复提出了一些展望。

(1) 地下水体的污染往往并不是单一污染源引起的, 而是多种污染源的混合污染, 因此在修复过程中应使用多种修复技术联合修复, 如原位修复为主, 辅助异位修复的方法。而在多种修复过程中, 重视原位生物修复技术对环境可持续发展的优势。

(2) 地下水污染的修复工作其实是一个系统工程, 即一方面重视地下水的修复, 不能忽视污染场地土壤和地下水密不可分的特点。因此, 地下水污染修复同时要考虑场地土壤污染修复。另一方面, 重视地下水的修复还应注重地下水动力学模型的建立, 通过结合污染物在地下水迁移的模拟, 寻找适于最佳技术/技术组合和最佳工程参数创造条件。

(3) 在建立并完善我国地下水污染风险管控体系的过程中, 需要不断积累并总结经验规律, 为地下水污染修复活动提供指导。

参考文献:

- [1] HILILI J M, ONUORA D I, HILILI R U, *et al.* Groundwater contamination: Effects and remedies [J]. *Asian Journal of Environment & Ecology*, 2021, 10: 39-58.
- [2] 王瑶, 王若帆. 探讨区域地下水污染现状及污染途径 [J]. *西部探矿工程*, 2020, 32 (7): 150-152.
- [3] 董璟琦. 污染场地绿色可持续修复评估方法及案例研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2019.
- [4] 刘春华. 鲁北平原人口聚集区与非聚集区地下水污染特征识别及对策 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2014.
- [5] 杜东, 马震, 方成. 国内外地下水污染研究的现状及发展趋势 [J]. *山西建筑*, 2007, 2: 194-195.
- [6] RAST J. Sources of groundwater pollution [J]. *Hydrology: Current Research*, 2021, 12 (9): 1-1.
- [7] 黄燕平. 城市地下水污染治理与防治对策探究 [J]. *智能城市*, 2021, 7 (10): 119-120.
- [8] 杜亚鲁. 土壤地下水重金属污染特征与评价研究 [J].

- 环境与发展, 2020, 32 (4): 174-176.
- [9] VERMA C, HUSSAIN A, MADAN S, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in groundwater with respect to distance from ash pond by using heavy metal evaluation index [J]. *Applied Water Science*, 2021, 11 (3): 58-58.
- [10] 陈劲松, 张颖, 蒲生彦. 某炼铁厂遗留场地重金属污染空间分布特征及风险评价 [J]. *安全与环境工程*, 2021, 28 (3): 162-169.
- [11] 谭光超, 李姗姗, 李智民, 等. 江汉油田孔隙承压水重金属富集特征及成因分析研究 [J]. *资源环境与工程*, 2020, 34 (S2): 101-105.
- [12] 齐劲乾, 安迪. 河北省重金属污染土壤修复技术及其修复实践 [J]. *世界有色金属*, 2021, 3: 215-216.
- [13] 高芳, 潘志平. PRB技术处理重金属污染地下水的研究综述 [J]. *广东化工*, 2014, 41 (17): 80-81.
- [14] YU S Y, LEE P K, HWANG S I, *et al.* Groundwater contamination with volatile organic compounds in urban and industrial areas: Analysis of co-occurrence and land use effects [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74 (4): 3661-3677.
- [15] 龚晓洁, 王豫飞, 田源等. 河南平原浅层地下水有机污染物污染特征研究 [J]. *环境科学与管理*, 2019, 44 (11): 152-156.
- [16] 宋晓薇, 张立宏, 赵侣璇. 地下水有机污染研究进展 [C] //湖泊湿地与绿色发展——第五届中国湖泊论坛论文集, [S.1]: 中国科学技术协会, 2015: 253-257.
- [17] KURWADKAR S, KANEL S R, NAKARMI A, *et al.* Groundwater pollution: Occurrence, detection, and remediation of organic and inorganic pollutants. [J]. *Water Environment Research*, 2020, 92 (10): 1659-1668.
- [18] 袁巧灵, 郭昊, 李志萍. 三氯乙烯污染土壤研究 [J]. *广州化工*, 2021, 49 (6): 24-26+29.
- [19] 姚旭初, 王广才, 汪琪, 等. 北京西郊砂石坑蓄洪工程场地环境质量现状评价 [J]. *资源环境与工程*, 2016, 30 (3): 458-463.
- [20] 董敬. 某氯碱厂污染场地土壤-地下水典型污染物污染特征及风险评估 [D]. 济南: 济南大学, 2017.
- [21] 陈敏. 地下水污染修复技术综述 [J]. *云南化工*, 2020, 47 (11): 12-14.
- [22] ZHANG M, FENG M Y, BAI X, *et al.* Chelating surfactant N-lauroyl ethylenediamine triacetate enhanced electrokinetic remediation of copper and decabromodiphenyl ether co-contaminated low permeability soil: Applicability analysis [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 301: 113888.
- [23] 郭帅, 陈栋, 许倩, 等. 污染土壤电动修复专利技术综述 [J]. *化工管理*, 2015, 23: 154-155.
- [24] SONG Y, LEI C, YANG K, *et al.* Iron-carbon material enhanced electrokinetic remediation of PCBs-contaminated soil [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 290: 118110.
- [25] SPROCATI R, ROLLE M. Integrating process-based reactive transport modeling and machine learning for electrokinetic remediation of contaminated groundwater [J]. *Water Resources Research*, 2021, 57 (8): 029959.
- [26] LI Y F, WANG D B, YANG G J, *et al.* Comprehensive investigation into in-situ chemical oxidation of ferrous iron/sodium percarbonate (Fe (II)/SPC) processing dredged sediments for positive feedback of solid-liquid separation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 425: 130467.
- [27] MA J, MA Y, RONG X, *et al.* Persulfate-based controlled release beads for in situ chemical oxidation of common organic pollutants [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9 (5): 105627.
- [28] 涂啸宇. 原位电动修复技术在无机氯离子污染土壤修复工程中的应用研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- [29] 时文歆, 于水利, 邱晓霞, 等. 动电修复铅污染土壤和地下水的初步研究 [J]. *环境科学与技术*, 2005 (1): 21-23+115.
- [30] 王加华. 原位土壤地下水电动-微生物协同修复技术及其应用 [J]. *中国资源综合利用*, 2019, 37 (4): 8-12.
- [31] 崔朋, 刘骁勇, 刘敏, 等. 原位化学氧化技术在苯酚类污染场地修复中的应用 [J]. *山东化工*, 2020, 49 (9): 242-244.
- [32] NELSON C H, BROWN R A. Adapting ozonation for soil and groundwater clean up [J]. *Chemical Engineering*, 1994, 10: 18-24.
- [33] 张超. 地下水中1, 2, 4-TCB污染的原位化学氧化修复技术实验研究 [D]. 南京: 南京大学, 2018.
- [34] 李坡, 张珊珊, 施锦秋, 等. 活化过硫酸盐修复苯胺污染地下水及其环境风险 [J]. *化工进展*, 2022, 41(5): 2753-2760.
- [35] 陈龙辉. 探究芬顿试剂对偏光片生产加工行业聚乙烯醇废水处理效果的试验研究 [J]. *广东化工*, 2021, 48 (3): 91-93.
- [36] 陈蒙亮, 井柳新. 芬顿试剂处理含四氯乙烯废水的试验 [J]. *城镇供水*, 2020, 3: 81-85+80.
- [37] 陈艳美. 油相相分离法制备缓释型高锰酸钾去除地下水中TCE污染 [D]. 福州: 福州大学, 2010.
- [38] 周江宏. 高锰酸钾酸化法处理树脂清洗废水的实验研究 [J]. *资源节约与环保*, 2018, 9: 111+114.
- [39] 宋立杰. Fenton及臭氧氧化法处理苯胺污染地下水的对比 [J]. *净水技术*, 2020, 39 (8): 102-108.
- [40] 仪修玲, 余波平, 金兴良, 等. 四溴双酚A的臭氧氧化降解研究 [J]. *广东化工*, 2021, 48 (12): 35-37.
- [41] 陆大玮, 孟红雁, 梁兴印, 等. 水体内源污染原位生物修复技术探讨 [J]. *中国给水排水*, 2021, 37 (16):

- 35-40.
- [42] 樊华. 缓流水体污染复合生物原位修复技术研究[R]. 四川省, 四川省自然资源科学研究院, [2020-06-17].
- [43] 桑建伟, 黄家榜, 朱守诚, 等. 组合生物技术对黑臭水体底泥原位修复的研究 [J]. *安徽化工*, 2019, 45 (4): 80-85+88.
- [44] JAIN K R, DESAI C, VAN HULLEBUSCH E D, *et al.* Editorial: Advanced bioremediation technologies and processes for the treatment of synthetic organic compounds [J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2021, 9: 721319.
- [45] KARIMI H, MAHDAVI S, LAJAYER B A, *et al.* Insights on the bioremediation technologies for pesticide-contaminated soils. [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, 44: 1329-1354.
- [46] 姚德俊, 岳昌盛, 吕建国, 等. 我国工业场地污染地下水修复技术研究进展 [J]. *现代化工*, 2020, 40 (12): 45-49.
- [47] 丁琳洁, 黄冬侠, 宋纪斌, 等. 三氯乙烯污染地下水的原位修复技术研究进展 [J]. *环境污染与防治*, 2021, 43 (5): 631-637.
- [48] 潘澄. 地下水有机污染的原位生物修复技术 [J]. *节能与环保*, 2020, 9: 56-57.
- [49] GOLTZ M N, GANDHI R K, GORELICK S M, *et al.* Field evaluation of in situ source reduction of trichloroethylene in groundwater using bioenhanced in-well vapor stripping [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39 (22): 8963-8970.
- [50] 杨贞, 张振师. 国内外地下水修复技术应用现状及发展趋势 [C] //2020中国环境科学学会科学技术年会论文集 (第三卷), 2020: 594-597.
- [51] 陈政. 原位修复技术在地下水污染中的应用研究 [J]. *化工管理*, 2019 (34): 146-147.
- [52] 袁英英, 胡浩丽. 抽出处理技术在地下水污染修复工程中的应用 [J]. *环境与发展*, 2019, 31 (7): 73+75.
- [53] 曹斌. 水泥窑协同处置、异位化学氧化及抽出-处理技术联合应用——修复某重金属及有机物复合污染场地工程案例 [J]. *广东化工*, 2021, 48 (7): 124-129.
- [54] 朱瑞利, 顾晓晨. 异位热脱附修复技术对高浓度多环芳烃污染土壤的修复应用实例 [J]. *云南化工*, 2021, 48 (6): 38-40.
- [55] 张云达, 顾春杰, 何健, 等. 多相抽提技术在有机复合污染场地治理中的应用 [J]. *上海建设科技*, 2018, 1: 71-74.
- [56] 徐浩天. 异位土壤淋洗技术修复污染场地的分析——某重金属污染场地土壤修复方案设计 [J]. *皮革制作与环保科技*, 2021, 2 (9): 95-96+98.
- [57] 郑伟, 梅浩, 陈敬仁. 原位化学氧化技术在地下水修复工程中的应用 [J]. *资源节约与环保*, 2018, 10: 23-25.
- [58] 杨宾, 伍斌, 曹云者, 等. 十二烷基苯磺酸钠强化抽出处理对地下水中1, 2-二氯乙烷的去除效果 [J]. *环境科学研究*, 2016, 29 (10): 1527-1536.
- [59] 冯雪, 董磊, 李青云, 等. 凹凸棒石纳米铁复合材料的制备及应用探讨 [J]. *长江科学院院报*, 2016, 33 (7): 18-22.
- [60] 付微. 上海市某污染地块地下水异位修复案例分析 [J]. *上海建设科技*, 2020, 5: 62-65.
- [61] 梁竞, 王世杰, 张文毓, 等. 美国污染场地修复技术对我国修复行业发展的启示 [J]. *环境工程*, 2021, 39 (6): 173-178.

(编辑 张永博)

《应用技术学报》征稿简则

《应用技术学报》是上海应用技术大学、上海科学院、上海化工研究院有限公司共同主办的专业性学术刊物,主要刊登材料科学与工程、化学工程与技术、机械与电气工程等领域的国内外最新科学技术研究与应用技术创新等的学术论文、研究报告、综合评述、快报等。主要读者对象为高等院校师生员工及有关科研院所、企事业单位的科研、科技工作者。本刊为季刊,国内外公开发行人。热忱欢迎各高等院校师生及科研单位的科技工作者踊跃投稿。请登录 <http://xuebao.sit.edu.cn> (或<http://www.manuscripts.com.cn/yyjsxb>), 注册投稿。