

地下水重金属污染来源解析与修复技术综述

杨秀娟

辽宁昌鑫环境工程咨询有限公司 辽宁 沈阳 110000

摘要：地下水重金属污染来源广泛，涵盖自然与人为因素。迁移转化特征多样，受地下水环境因素影响显著。修复技术分为物理、化学、生物三类，各有原理与适用场景。本文指出，现有修复技术正朝优化、新型研发及集成化方向发展。优化聚焦高效经济环保，新型研发注重绿色智能高效，集成化结合不同技术优势，构建复合修复体系，提升复杂污染场景修复效果，推动地下水重金属污染治理进步。

关键词：地下水；重金属污染；迁移转化；修复技术；集成化发展

引言：地下水作为重要水资源，其质量关乎生态与人类健康。当下，重金属污染问题日益凸显，来源多样，自然与人为因素交织。重金属在地下水环境中迁移转化复杂，影响范围广。有效修复污染地下水迫在眉睫，物理、化学、生物修复技术各具特点。深入研究污染来源、迁移转化特征及修复技术，对保护地下水环境、保障水资源安全、推动可持续发展意义重大。

1 地下水重金属污染主要来源

1.1 自然来源

地质背景因素是自然来源的核心，不同区域地质构造与地层组成存在显著差异，部分地层本身就富含铅、镉、汞等重金属元素，这些元素以固有矿物形态稳定存在于岩石和土壤中，构成了地下水重金属的天然本底值，当地层环境因地质活动发生细微变化时，会缓慢释放到周围水体中^[1]。如地震、断层活动、地壳升降等地质运动，会直接打破地层原有稳定性，加速岩石破碎分解进程，大幅提升重金属元素的释放速率，使地下水中重金属含量在短时间内出现小幅升高。自然风化与物质循环持续影响地下水重金属含量，岩石经过长期的物理风化和化学风化作用逐渐破碎分解，其中蕴含的重金属元素会被释放出来，进入土壤和地下水系统。生态系统的物质循环过程中，重金属元素会在水、土壤、大气之间迁移转化，部分元素通过地表渗透、地下径流补给等作用进入地下水，形成范围有限、浓度较低的自然污染，通常不会对地下水环境造成严重危害。

1.2 人为来源

工业生产相关排放是人为污染的主要途径，各类涉重金属工业生产过程中，会产生含有重金属的废水、废渣和废气，未经规范处理的废水直接排放或渗透，废渣随意堆放后经雨水淋溶，废气沉降后渗入地下，都会将重金属带入地下水系统，造成污染。其中冶金、电镀、化

工等行业是重点污染源，其排放的重金属种类多、浓度高，对地下水的污染具有隐蔽性强、治理难度大的特点。农业生产相关输入会间接引发地下水重金属污染，农业生产中使用的化肥、农药以及畜禽养殖产生的废弃物，含有一定量的重金属成分，这些物质经过农田灌溉渗透、地表径流补给等过程，逐步渗入地下含水层，导致地下水重金属含量升高。生活活动相关污染同样不可忽视，日常生活产生的垃圾中含有多种重金属，垃圾填埋场渗滤液会携带这些重金属渗入地下，生活污水未经彻底处理就进行排放或回灌，也会将重金属带入地下水，对地下水环境造成影响。其他人为活动影响也会造成地下水重金属污染，矿产资源开采过程中，会破坏地层结构，导致地下水中重金属元素迁移扩散，交通运输过程中产生的重金属污染物沉降后，经雨水渗透进入地下，同样会加剧地下水重金属污染程度。

2 地下水重金属污染迁移转化特征

2.1 重金属在地下水环境中的迁移形式

重金属在地下水环境中的迁移形式具有多样性，且与地下水理化性质密切相关^[2]。溶解态迁移是常见形式之一，重金属元素在地下水中解离形成离子或络合离子，随地下水流向实现远距离迁移，迁移范围受地下水流速和渗透系数影响较大。这种迁移形式下的重金属易随地下水流动扩散，是造成大面积地下水污染的主要迁移途径。吸附态迁移依托地下水系统中的悬浮颗粒和岩土介质，重金属离子被颗粒表面吸附后，随颗粒移动完成迁移，迁移速率相对缓慢且范围有限。沉淀态迁移则发生在重金属浓度过高或地下水环境发生变化时，重金属与水中其他离子结合形成难溶性化合物，以沉淀形式存在于岩土孔隙中，迁移能力大幅降低，仅在环境条件改变时可能重新释放并继续迁移。

2.2 影响重金属迁移的地下水环境因素

地下水pH值是影响重金属迁移的关键因素,不同pH条件下重金属的形态存在差异,酸性环境下重金属更易解离形成溶解态离子,迁移能力较强;碱性环境下则易形成沉淀,抑制迁移过程。地下水pH值的波动还会影响岩土介质的吸附性能,间接改变重金属的迁移轨迹和速率。地下水氧化还原电位直接改变重金属价态,价态变化会影响重金属的溶解性和吸附性,进而改变迁移特性。地下水的离子强度和有机质含量也会产生影响,离子强度升高会加剧离子竞争吸附,降低重金属吸附量,促进溶解态迁移;有机质可与重金属形成稳定络合物,增强重金属溶解性,推动迁移进行。岩土介质的孔隙结构和粒径大小则影响地下水渗透速度,间接调控重金属迁移速率和范围。

2.3 重金属在地下水-岩土界面的转化机制

地下水-岩土界面是重金属转化的核心区域,各类转化反应在此有序发生,界面处的理化性质和微生物活动共同调控着重金属的形态变化和迁移能力,也是重金属在地下水系统中富集或去除的关键环节。吸附-解吸转化最为普遍,岩土介质表面存在大量活性位点,可吸附地下水中的重金属离子,形成吸附态重金属;当地下水环境发生波动时,吸附在介质表面的重金属离子会重新释放到地下水中,完成解吸过程,实现形态转化。氧化还原转化依托界面处的微生物活动和理化反应,重金属离子发生价态变化,价态转变会直接改变重金属的毒性和迁移能力。沉淀-溶解转化与界面处的离子浓度和pH值密切相关,重金属离子与岩土介质中的阴离子结合形成难溶性沉淀,积累在界面区域;当界面环境满足溶解条件时,沉淀会逐步溶解,释放重金属离子进入地下水,参与后续迁移转化过程。

3 地下水重金属污染修复核心技术分类及原理

3.1 物理修复技术

核心技术类型涵盖抽水排水修复、隔离屏蔽修复、膜分离修复等,各类技术依托物理作用实现地下水重金属净化,操作流程相对简便,对环境扰动较小,适用于不同污染程度和范围的地下水修复场景^[3]。抽水排水修复核心原理是通过抽水设备将受污染地下水抽出地表,经后续处理去除重金属后再回灌地下,逐步降低地下水中重金属浓度,适用于污染范围较广、浓度较低的区域。隔离屏蔽修复核心原理是利用防渗材料构建隔离层或屏蔽结构,阻断重金属污染物迁移路径,防止污染范围进一步扩大,减少重金属对未污染区域地下水的影响。膜分离修复核心原理是借助膜的选择透过性,让地下水通过膜组件,截留水中重金属离子,实现固液分离,从而达

到净化地下水的目的,净化效率较高。

3.2 化学修复技术

核心技术类型包括化学沉淀修复、化学还原修复、化学吸附修复等,技术核心是通过化学反应改变重金属存在形态,降低重金属毒性和迁移性,修复效率高、见效快,是当前处理高浓度重金属污染地下水的主流技术之一。化学沉淀修复核心原理是向受污染地下水中投放化学药剂,使药剂与水中重金属离子发生反应,生成难溶性化合物,经沉淀分离后去除重金属,适用于重金属浓度较高的地下水修复。化学还原修复核心原理是利用还原型药剂将地下水中高价态重金属离子还原为低价态,降低重金属溶解性和毒性,再通过后续处理将其去除,提升地下水净化效果。化学吸附修复核心原理是向地下水系统中投加吸附剂,吸附剂与水中重金属离子发生吸附作用,将重金属固定在吸附剂表面,通过分离吸附剂实现重金属去除,吸附剂可重复利用,经济性较强。

3.3 生物修复技术

核心技术类型主要有植物修复、微生物修复、生物吸附修复等,依托生物自身代谢作用或生理特性去除地下水重金属,具有环境友好、无二次污染的优势,契合绿色环保的修复理念,近年来得到广泛研发与应用。植物修复核心原理是筛选对重金属具有富集能力的植物,将植物种植在受污染区域,植物通过根系吸收地下水中重金属离子,转移并积累在植株体内,定期收割植株即可将重金属从地下水系统中去除。微生物修复核心原理是利用微生物代谢活动改变重金属离子价态或形态,微生物通过吸附、转化等作用降低地下水中重金属浓度,同时微生物代谢产物可促进重金属沉淀或吸附,增强修复效果。生物吸附修复核心原理是利用生物体内的活性物质吸附地下水中重金属离子,通过固定化生物材料或生物制剂投放,实现重金属富集与去除,适配多种污染场景。

4 地下水重金属污染修复技术发展趋势

4.1 现有修复技术的优化方向

现有修复技术优化聚焦高效性、经济性和环境相容性提升,针对各类技术现存的短板和不足开展针对性改进,通过技术升级、工艺优化,降低修复成本、缩短修复周期,提升技术的实用性和推广性,满足不同场地、不同污染类型的修复需求^[4]。优化过程中注重兼顾修复效果与生态环境影响,避免因技术优化导致二次污染,同时着力简化操作流程,降低施工难度,减少人力、物力投入,让修复技术更贴合实际工程应用需求,推动现有技术的规模化、标准化应用。物理修复技术重点优化设备

能耗与处理效率,简化操作流程,降低施工成本,同时改进材料性能,减少修复过程中对地下水环境和周边岩土介质的扰动。化学修复技术侧重药剂改良,研发高效低毒、易降解的修复药剂,减少药剂投放量,降低二次污染风险,优化药剂投放方式,提升药剂与受污染地下水的反应效率。生物修复技术着力培育高效功能菌株和富集植物,缩短修复周期,提升重金属去除效率,完善修复过程中的环境调控方法,为生物生长繁殖提供适宜条件,增强技术稳定性和适用性。

4.2 新型修复技术的研发重点

新型修复技术研发围绕绿色化、智能化和高效化展开,聚焦低扰动、无二次污染的技术路径,依托纳米材料、大数据、物联网等新材料、新技术,突破传统修复技术的局限,为地下水重金属污染治理提供更高效、更环保、更便捷的新方案、新路径。研发过程中注重技术的实用性和安全性,既要提升修复效率、缩短修复周期,也要降低研发和应用成本,同时加强技术的安全性评估,避免新型材料或技术对地下水环境和生态系统造成潜在危害,推动新型技术从实验室研发走向工程化应用。纳米修复技术成为研发热点,利用纳米材料的高比表面积和强吸附性,实现重金属离子的快速富集与去除,探索纳米材料的安全投放与回收方法,提升技术实用性。智能化修复技术依托大数据、物联网等技术,构建地下水污染监测与修复一体化系统,实现修复过程的实时监控、动态调控,精准把握修复进度与效果,减少人力投入。绿色修复技术注重利用天然材料和可再生能源,研发环境友好型修复材料和工艺,实现修复过程与生态环境的协调发展,降低技术对生态系统的负面影响。

4.3 修复技术的集成化发展思路

修复技术集成化发展核心是结合不同修复技术的优势,规避单一技术的局限性,构建高效协同的复合修复体系,破解单一技术在复杂污染场景中的修复局限,提升多类型、高浓度、大范围地下水重金属污染的修复效果,是当前地下水重金属污染修复技术的重要发展方向。

集成化发展并非简单的技术叠加,而是根据污染程度、污染物类型、场地条件等因素,对各类技术进行优化组合、流程适配,实现优势互补、协同增效,同时兼顾修复效率、治理成本和生态环保要求,打造精准化、个性化的修复方案。物理-化学集成模式通过物理技术实现地下水预处理,去除悬浮颗粒和部分重金属,再采用化学技术深度净化,实现重金属高效去除,适配重金属浓度高、成分复杂的污染区域^[5]。化学-生物集成模式利用化学药剂预处理降低重金属毒性和浓度,为生物修复创造适宜条件,通过生物作用实现重金属深度净化和环境修复,兼顾修复效率与生态友好性。多技术协同集成则整合物理、化学、生物等多种技术优势,根据污染程度、污染物类型和场地条件,优化组合技术流程,实现地下水污染的精准修复,推动修复技术向高效、全面、可持续方向发展。

结束语

地下水重金属污染修复技术不断演进,现有技术优化、新型技术研发以及集成化发展成为主要趋势。通过提升技术的高效性、经济性和环境相容性,研发绿色智能高效的新型技术,结合不同技术优势构建复合修复体系,能够更好地应对复杂多变的地下水重金属污染问题。在实际应用中,需根据具体情况选择合适技术,实现精准修复,保障地下水环境安全与生态健康。

参考文献

- [1]金孝文,丁廉超,孙楠,等.初探地下水重金属污染修复技术[J].地下水,2024,46(3):37-41.
- [2]杨宇.地下水重金属污染及其防治措施[J].中国公共安全,2023(4):163-165.
- [3]朱素芳,张秋华,许冠英,等.工业园区地下水重金属污染特征及来源解析[J].环境科学研究,2025,38(3):610-621.
- [4]田鹏州,李爱勤,张晓偲,等.河南省浅层地下水重金属污染特征研究[J].能源与环保,2023,45(7):50-56.
- [5]龚之倩.金属矿区域浅层地下水重金属污染分布特征研究[J].中国金属通报,2025(19):94-96.