

垃圾填埋场地下水区综合治理与生态修复技术

李皓君 卢林* 宋培忠 秦玥 罗青
云南省设计院集团有限公司
DOI:10.32629/bd.v9i8.4631

[摘要] 生活垃圾填埋长期堆积会诱发渗滤液下渗问题,直接污染地下含水层,破坏地下水水文结构与原生生态体系,成为固废处置领域核心环境难题。本文结合地下水污染传播特征,剖析填埋场地下水污染形成机理,从污染溯源、分区管控、水质治理层面制定综合整治方案,多角度阐述物化、生物、复合生态修复技术,为填埋场地下水污染治理及生态系统重塑提供专业化技术参考。

[关键词] 垃圾填埋场; 地下水污染; 渗滤液; 综合治理; 生态修复

中图分类号: X523 **文献标识码:** A

Comprehensive Treatment and Ecological Restoration Technologies for Groundwater Zones at Landfills

Haojun Li Lin Lu* Peizhong Song Yue Qin Qing Luo
Yunnan Design Institute Group Co., Ltd.

[Abstract] Long-term accumulation of municipal solid waste in landfills can cause leachate infiltration, directly contaminating underground aquifers and disrupting groundwater hydrological structures and native ecosystems, making it a major environmental challenge in the field of solid waste disposal. Based on the characteristics of groundwater pollution migration, this paper analyzes the formation mechanisms of groundwater pollution at landfills and develops a comprehensive treatment plan from the perspectives of pollution source tracing, zoning control, and water quality treatment. Physicochemical, biological, and integrated ecological restoration technologies are discussed from multiple perspectives, providing professional technical references for groundwater pollution control and ecosystem restoration at landfills.

[Key words] landfill; groundwater pollution; leachate; comprehensive treatment; ecological restoration

引言

固废填埋是现阶段城乡废弃物处置的主流方式,填埋废弃物内部有机质降解产生的高污染性渗滤液,具备渗透性强、污染物组分复杂、降解周期长等特征。渗滤液穿透防渗结构侵入地下水圈层后,会改变水体理化指标,毒害水生微生物群落,且污染扩散后治理难度呈倍数增长。基于地下水圈层结构与污染扩散规律,整合治理与修复技术体系,是化解填埋场地下水污染、恢复水土共生生态的核心路径。

1 垃圾填埋场地下水污染成因及污染特征

垃圾填埋场的地下水污染问题,一般不会由单一因素造成,它往往是垃圾自身理化反应、场地水文地质条件、地层渗透作用互相结合后,所形成的复合型水体污染问题,这类污染和普通水体污染相比,会在污染范围、污染物成分以及破坏程度等方面,表现出不一样的特点;笔者将从污染来源、扩散途径、水质特征三个方面展开分析。从污染源层面来讲,填埋场内的生活垃圾不仅含有可快速分解的有机物、重金属颗粒,还包含各类新型微量污染

物,这些垃圾在缺氧、半缺氧的地层环境当中,会陆续发生水解、酸化以及产气反应,进而产生大量氨氮、挥发性有机酸与重金属络合物,上述物质也是填埋渗滤液内部最主要的污染成分。从污染物扩散角度来看,填埋场表层覆土的压实程度偏低,防渗层也会随着使用时间老化、破损,再加上地基沉降产生的裂缝,都会给渗滤液的向下渗透提供便捷通道;在地下水流向、岩层孔隙大小、岩土吸附能力等地质条件的加持下,污染物既能垂直向下渗入地层,也能顺着地下水横向扩散,逐步污染包气带和浅层地下水,部分稳定性较高的污染物,还会渗入深层承压水层,进而形成难以治理的持续性污染区域。结合水质检测数据能够发现,(见表1)受污染的地下水和天然原生地下水存在明显区别,水体内部化学需氧量、氨氮、总氮等基础指标,均超出水质标准限定值,水中重金属与盐分也会出现堆积现象,水体整体浑浊度升高且伴随异味;同时该污染具备隐蔽性与延迟性,工作人员很难在早期排查出污染问题,等到水质指标出现明显异常时,污染物早已完成大范围扩散,这也极大增加了地下水修复治理的整体难度^[1]。

表1 地下水检测数据分析表

水体类型	COD(mg/L)	氨氮(mg/L)	总硬度(mg/L)	重金属总含量(mg/L)	水体溶解氧(mg/L)
原生地下水	15~25	0.2~0.5	180~280	≤0.05	6.5~8.0
轻度污染地下水	60~120	1.5~3.0	350~450	0.15~0.30	3.5~5.5
重度污染地下水	>200	>8.0	>600	>0.60	≤2.0

2 垃圾填埋场地下水区综合治理方案

2.1 污染源头阻断处理

源头阻断是综合治理的基础环节，核心目的从根源减少渗滤液产生量，封堵渗滤液下渗通道，降低地下水受污染负荷。在废弃物表层管控层面，优化填埋场覆土结构，采用黏土、膨润土、土工膜复合覆土结构，替代传统单一覆土材料，提升表层结构的防水渗透能力，减少雨水入渗引发的渗滤液增量。同时优化废弃物堆叠方式，分层压实废弃物，缩小内部孔隙占比，削弱厌氧反应速率，从内部降低高污染渗滤液的生成规模。

在防渗体系优化层面，定期排查底层防渗层、边坡防渗结构的破损、老化、开裂问题，针对微小裂隙采用膨润土注浆填充，针对大面积破损区域，重构双层HDPE防渗膜配套缓冲保护层的复合型防渗结构。除此之外，增设分布式渗滤液收集管网，调整管网排布密度与埋设深度，快速归集填埋层内部产生的渗滤液，避免污染物长期滞留并向下渗透，从源头切断地下水污染介质^[2]。

2.2 污染羽精准截控

污染羽横向扩散是地下水污染范围扩大的主要诱因，针对已形成污染羽的含水层区域，可通过物理拦截方式划定污染边界，限制污染物向外围清洁水体扩散。现阶段主流拦截模式分为竖向防渗帷幕与横向拦截井两种，两种技术适配场景存在明显差异，具体参数与适用条件如表2所示。

表2 竖向防渗帷幕与横向拦截井的具体参数与适用条件

拦截技术类型	拦截深度	核心材料	优势特性	适配污染区域
竖向防渗帷幕	5~30m	水泥-膨润土混合浆液	密闭性强、使用寿命长	固定形态重度污染羽
横向拦截井	2~15m	透水滤料、无缝井管	施工便捷、可动态调控	动态扩散轻度污染羽

实际作业过程中，可结合污染羽形态、含水层深度组合使用两类技术。在污染羽外围布设竖向防渗帷幕，构建封闭式污染隔离圈；在隔离圈内部布设多级拦截井，抽取扩散态污染水体，双重手段协同作用，既能锁定污染范围，也能为后续水质净化作业创造稳定的作业环境。

2.3 分区水质净化治理

依据前期水质检测结果完成区域等级划分，针对不同污染层级的地下水，匹配差异化净化手段。浅层包气带污染水体，污染物富集于岩土孔隙表层，可采用气相抽提技术，剥离孔隙内吸附态有机污染物，同步搭配原位淋洗技术，以低刺激环保淋洗剂

活化重金属污染物，提升污染物脱附效率。潜水层重度污染区域，采用异位处理模式，抽取污染水体至一体化净化装置，完成沉淀、降解、吸附多级处理后，再回灌至地下水圈层。轻度污染区域则采用原位钝化技术，投放钝化材料固定游离态污染物，降低污染物生物毒性。

2.4 动态监测与风险预警

完善地下水全域监测网络，是保障综合治理长效性的关键。依托填埋场地下水流向，网格化布设多层级监测点位，分别覆盖清洁区、过渡区、污染区三大区域，监测指标涵盖常规理化指标、重金属、有机微污染物三类核心参数。同步搭建动态数据更新机制，定期采集水质数据并分析污染羽扩散速率、污染物浓度变化趋势，预判污染演变方向。针对指标异常区域，及时调整拦截、净化方案，形成“监测-分析-调控-优化”的闭环治理模式，规避二次污染风险。

3 垃圾填埋场地下水区生态修复技术

3.1 原位物化修复技术

原位物化修复技术适配潜水层高浓度复合型污染区域，依托物理吸附、化学氧化还原反应，直接消解水体及岩土吸附态污染物，具备见效快、适配性广的特点，是重度污染区域初期修复的核心技术。常用技术包含活化氧化修复、吸附固化修复两大类，活化氧化修复主要通过向含水层注入改性氧化剂，靶向分解水体中难降解有机污染物，打破大分子污染物结构，将有毒有害物质转化为低毒、无毒小分子物质。该技术针对渗滤液中腐殖酸、芳香族有机物降解效果显著，能够快速改善水体发黑、发臭问题。

吸附固化修复则以多孔改性吸附材料为核心，材料经改性处理后具备超大比表面积与专属吸附位点，可精准捕获水体中游离态重金属与盐类离子，并将其固定于材料孔隙内部，阻断重金属生物富集链条。为规避吸附材料二次污染，作业时需严格控制材料投放剂量与埋设位置，优先选用沸石、生物炭、改性黏土等天然环保材料，修复完成后可直接留存于岩土内部，适配地下水密闭作业环境^[3]。

3.2 原位生物修复技术

原位生物修复属于绿色低碳修复技术，核心原理是依托驯化微生物的代谢作用，降解有机污染物、转化重金属形态，适合中轻度污染地下水的长效修复作业。该技术主要分为生物强化与生物刺激两种实施形式，技术综合性能对比见表3。

表3 原位生物修复技术综合性能对比

修复形式	作用原理	修复周期	运行成本	生态副作用	适配污染物
生物强化	投放外源高效降解菌种	2~4个月	中等	极低	复杂有机污染物
生物刺激	投放营养剂激活本土微生物	4~6个月	较低	无	氨氮、简单有机质

生物强化技术通过筛选、驯化耐污型降解菌群，经扩培处理后注入污染含水层，外源菌种可快速富集于污染区域，针对性降

解渗滤液衍生的有机污染物。生物刺激技术无需引入外源菌种,通过向地下水投放碳源、氮源、微量元素等营养基质,优化本土微生物生存环境,提升土著菌群繁殖速率与代谢效率,依托原生微生物群落完成污染净化。实际修复作业中,多结合两类技术优势协同使用,兼顾修复效率与生态安全性。

3.3 异位净化修复技术

异位修复技术适用于污染集中、水体更新难度大的核心重污染区,通过水力抽取的方式将受污染地下水输送至地面一体化净化设备,完成多级净化处理后,检测达标再回灌至原有含水层。该技术不受地下地质结构限制,可灵活调整净化工艺,便于污染物集中处置与管控。整套净化流程分为预处理、深度净化、水质调质、水体回灌四个环节,预处理阶段通过沉淀池、过滤装置去除水体悬浮颗粒物与胶体杂质;深度净化阶段整合吸附、氧化、生化处理单元,同步降解有机物、固化重金属;水质调质环节调节水体pH值、溶解氧浓度,匹配原生地下水水质特征;最终通过专用回灌井匀速返还水体,维持含水层水压平衡。

相较于原位修复,异位修复技术能够彻底移除水体内部污染物,规避污染物长期潜伏复发问题,但整体能耗与运维成本相对较高,因此仅建议在污染核心区小范围使用,搭配原位修复技术实现高低成本区域互补,优化整体修复性价比^[4]。

3.4 植物协同生态修复技术

植物协同修复模式,大多作用于垃圾填埋场的包气带以及浅层地下水区域,该技术能够依托富集类植物的吸附、积累与转化能力,再配合植物根系周边的微生物菌群,以此搭建出水土相结合的生态净化系统;该修复方式不仅可以处理水体污染,还能够重塑区域生态景观。工作人员需要挑选适配高污染、盐碱场地的耐污本土植被,常见品种有芦苇、香蒲、黑麦草,这类植物根系发育旺盛,能够吸附水里的重金属、氮磷污染物,后续我们只需要定期收割植株,就能彻底清除污染物。

同时植物根系会形成特殊的根际微环境,为厌氧、好氧微生物提供附着载体,强化根际区域污染物降解效率,形成“植物吸收+微生物降解”的协同修复模式。除此之外,植被覆盖能够降低表层土壤水分蒸发速率,减少雨水冲刷引发的污染物下渗,同步改善填埋场表层生态风貌,弥补单一工程化修复生态属性缺失的短板。

3.5 复合集成修复技术

单一修复技术均存在固有短板,物化修复易造成局部水土介质扰动,生物修复见效速度偏慢,植物修复仅能作用于浅层区域,无法满足全域、多层级的修复需求。复合集成修复技术以各

类单一技术为基础,结合污染区域层级、污染组分、修复周期需求,优化组合不同修复单元,打造一体化综合修复体系,是现阶段填埋场地下水生态修复的主流发展方向。

常见集成组合模式为“物化预处理+生物深度修复+植物稳态养护”,首先采用活化氧化技术快速消减高浓度有毒污染物,降低水体生物毒性,为后续生物菌群生存创造基础条件;其次依托原位生物修复技术,深度降解残余低浓度有机污染物,优化水体内部生态环境;最后搭配浅层植物群落,稳固水土结构,维系地下水生态系统稳定性,逐步恢复圈层自净能力。该组合模式兼顾修复效率、生态安全性与长效性,适配绝大多数垃圾填埋场地下水修复场景^[5]。

4 结束语

垃圾填埋场地下水污染结构复杂、扩散周期漫长,治理与修复作业具备极强系统性与长期性。本文结合污染形成机理,构建源头管控、边界拦截、分区治理的综合治理体系,多角度阐释适配不同场景的生态修复技术。只有统筹工程治理与生态修复两类手段,优化技术组合方案,兼顾短期降污与长期稳态养护,才能高效解决地下水污染问题,重塑填埋场水土共生的原生生态环境。

【参考文献】

- [1]李子豪.垃圾填埋场地下水区综合治理与生态修复技术[J].中文科技期刊数据库(全文版)自然科学,2026(1):114-116.
- [2]陈彦美,张玉,李锐颖.非正规生活垃圾填埋场污染地下水修复的PRB反应介质试验研究[J].安全与环境工程,2023,30(2):203-215.
- [3]熊正文.生活垃圾填埋场地下水污染控制措施探讨[J].中国科技期刊数据库工业A,2025(12):182-184.
- [4]张卓,齐坤,董耀.OCTEM技术在城市生活垃圾填埋场的应用研究——以豫西地区为例[J].地质找矿论丛,2025,40(3):364-371.
- [5]胡红岩,陈鸿汉,陈正国.论含水层非均质性对地下水污染特征的控制——以某山谷型垃圾填埋场为例[J].环境保护科学,2024,50(3):135-140+159.

作者简介:

李皓君(1990--)女,汉族,云南人,研究生,高级工程师,研究方向:生态环境工程设计与咨询相关工作。

*通讯作者:

卢林(1989--)男,汉族,云南人,研究生,高级工程师,研究方向:市政给排水及水环境综合治理项目的策划与设计。