

Overview of soil pollution risk control technology

Ting Zhou¹ Si Zhang² Hui Shen³

1. Hubei Gewu Ecological Environment Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

2. Wuhan Zhihuiyuan Environmental Protection Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

3. Beijing Jiangong Environmental Restoration Co., Ltd., Beijing, 100000, China

Abstract

Since the 18th National Congress of the Communist Party of China, the implementation of soil pollution risk management and remediation has seen continuous improvement. However, challenges persist including over-treatment, excessive resource consumption, and heightened risks of secondary pollution. This paper provides a comprehensive review of current soil pollution risk control technologies, offering a thorough comparison of their operational principles, advantages, and limitations. The study emphasizes that soil pollution risk management represents both a challenging endeavor and a promising field of development, playing an increasingly vital role in environmental governance and high-quality economic development.

Keywords

soil pollution; soil pollution risk control; green and low-carbon remediation

土壤污染风险管控技术综述

周婷¹ 张思² 沈慧³

1. 湖北格物生态环境科技有限公司, 中国·湖北 武汉 430000

2. 武汉智汇元环保科技有限公司, 中国·湖北 武汉 430000

3. 北京建工环境修复股份有限公司, 中国·北京 100000

摘要

党的十八大以来, 土壤污染风险管控与修复的实施成效日益精进, 但过程中仍存在过度修复、资源能源消耗和二次污染风险较高等问题。本文全面介绍了当前土壤污染风险管控技术, 并对各污染风险管控技术的原理、优缺点等进行了较全面的比对。文章认为, 土壤污染风险管控既是一项充满挑战的任务, 也是一项前景广阔的事业, 在环境治理与高质量发展中发挥更重要的作用。

关键词

土壤污染; 土壤污染风险管控; 绿色低碳修复

1 引言

土壤是陆地生态系统的核心载体, 其健康直接影响微生物群落、植物生长及动物栖息环境。土壤污染的健康暴露途径多样, 且污染物具有隐蔽性和长期性, 风险管控技术是降低健康威胁的关键。土壤污染风险管控技术是针对土壤中污染物迁移、转化及健康暴露风险的一系列预防、控制与治理手段, 其重要性贯穿于生态环境保护、公共健康维护、土地资源可持续利用及社会经济稳定发展等多个维度。

2 土壤污染风险管控的必要性

生态环境部《土壤污染源头防控行动计划》(环土壤〔2024〕80号)提出“农药原药制造等企业腾退重度污染

地块原则上优先拓展生态空间, 确需开展土壤污染风险管控和修复的工程, 应通过小范围开挖、负压收集等措施严防异味扩散”。

生态环境部在土壤污染防治领域发布的相关政策指出, 要避免过度修复、减少资源能源消耗、实现减污降碳协同增效和绿色低碳转型。《中共中央 国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》明确, 从严管控农药、化工等行业的重度污染地块规划用途, 确需开发利用的, 鼓励用于拓展生态空间。《土壤污染防治资金管理办法》规定, 支持开展土壤修复治理的项目应当充分考虑技术可行性和经济性, 避免不计成本、不顾技术可行性盲目推进大治理大修复。

因此, 发展与应用土壤污染风险管控技术不仅是降低土壤健康风险的有效手段, 还是绿色低碳修复的方式之一, 可以统筹污染治理与生态保护, 协同推进减污降碳。

【作者简介】周婷(1989-), 女, 中国湖北武汉人, 硕士, 工程师, 从事生态环境保护研究。

3 土壤污染风险管控案例

当前,我国部分地区已启动土壤污染防治与生态修复创新实践。以北京新东方化工厂为例,该区域通过环境友好型风险防控措施,在保障用地安全的前提下整体改造为城市生态公园,现已成为热门游览景点;上海桃浦工业区采取科学分区策略,将污染防控与景观营造相融合,打造出桃浦核心绿地,成功推动传统工业区生态转型;浙江省在杭钢半山基地开展污染治理综合改革,统筹安排修复工程与开发时序,最终建成具有工业文化特色的遗址公园,实现了工业遗产保护与现代文明发展的有机统一。

4 土壤污染风险管控技术

土壤风险管控技术是指采用阻隔、堵截、覆盖等工程措施,将污染物封闭于场地内,避免污染物对人体及周边环境造成危害,又抑制其随降水或地下水向周边环境迁移扩散的技术措施。土壤风险管控技术包括水平阻隔技术和垂直阻隔技术,其中水平阻隔技术主包括混凝土、沥青等硬化路面覆盖、清洁土壤覆盖、柔性膜覆盖等;垂直阻隔技术包括泥浆墙、灌浆墙、板桩墙、水泥搅拌桩墙、土工膜墙等^[1]。

4.1 水平阻隔技术

水平阻隔(又称表层阻隔)的核心作用在于:隔离污染物与人及动植物;通过抬高地面营造适宜坡度,促进地表水径流并降低其向地下渗透量,从而减少污染物随水迁移;同时控制污染物以气体形式逸散。常见的水平阻隔措施如下:

4.1.1 清洁土覆盖

清洁土水平阻隔技术依托低渗透性材料(如清洁土)的物理特性,通过形成致密、连续的物理屏障,阻断污染物迁移。其低渗透系数与致密结构可高效隔离污染物的向上挥发及向下渗透;施工时采用分层压实法和接缝处理,保障屏障的连续性与密实度,并通过监测维护确保长期稳定。作为天然材料技术,它兼具环保与经济优势,已在污染控制和环境保护中广泛应用。

4.1.2 防渗膜

防渗膜水平阻隔系统的核心构成包括防渗膜、保护层、支撑层及排水层。其中,防渗膜作为关键部件,多采用高密度聚乙烯(HDPE)等材料,承担污染物渗透阻隔功能;保护层铺设于防渗膜上方,避免其受机械损伤;支撑层提供结构支撑,确保系统在荷载下保持完整;排水层则负责收集并导排渗透液,防止积液。系统通常还配备锚固沟、焊接接缝及监测设施,以强化防渗效能并保障长期运行稳定性。

4.1.3 沥青路面、沥青屏障或沥青混凝土

沥青是由分级砂卵石与液体沥青混合而成的材料,通过成层铺设工艺施工,需借助专用建筑设备完成拌合。根据厚度差异,沥青可分为厚层(>5cm)与薄层(2.5-5cm)两类:厚层沥青可直接摊铺于自然地面;薄层沥青则通常需铺设在颗粒更粗的粒料基层上。

4.1.4 混凝土路面

混凝土是由分级砂卵石与水泥浆体混合而成的复合材料,主要用于建造水泥板或铺设道路,通常需浇筑在数厘米厚的砂石垫层上。为预防初期固化及后期塑性收缩、干燥收缩、热裂解等问题引发的裂缝,施工中常添加铁丝网、钢筋或其他掺合料。针对表面混凝土板,需掺入含空气吸附功能的添加剂,以降低严寒、霜冻环境下表层的腐蚀风险。”

4.1.5 石头覆盖

石头覆盖技术以小型石料或回用混凝土为主要材料,通过被动隔离方式防止皮肤直接接触污染土壤。主要适用于干旱条件下阻止污染物的暴露和腐蚀。

4.2 垂直阻隔技术

垂直阻隔系统借助地下连续墙体的建造,能够有效隔离有害物质或调整地下水运动路径,进而限制污染范围的扩大^[2]。

4.2.1 泥浆墙

泥浆墙是应用最广泛的地下阻隔技术之一。其施工流程通常包括:先开挖深沟形成基槽,再采用低渗透性材料回填并夯实,最终形成连续的低渗透墙体。材料方面,常用黏土、膨润土、水泥、混凝土、粉煤灰等材料,实际工程中常组合使用(如土壤-膨润土、水泥-膨润土等)以提升阻隔性能。

4.2.2 灌浆墙

灌浆技术指将适配材料注入砂土、岩石或人造建筑结构中,通过注入特定材料来减少孔隙率并提升结构稳定性。灌浆墙体与泥浆墙体的技术基础相似,主要区别体现在施工工艺上。根据浆液输送手段的不同,该技术可分为高压注浆、振荡梁式注浆以及高速喷射注浆等多种施工方法。

4.2.3 板桩墙

板桩防渗墙通过打桩机将钢板、预制混凝土、铝或木材等材料垂直打入地基,形成地下阻隔结构。连续的墙需要将板连接起来,其主要缺陷在于板桩连接部位强度较低,易发生渗漏。针对这一问题,除优化连接封口外,还发展出灌浆、粉煤灰填充、水泥密封等技术用于接头封闭。

4.2.4 土壤原位搅拌

土壤原位搅拌技术通过深层搅拌机机械组,将污染场地的土壤与固化剂(通常为膨润土或水泥浆)强制混合搅拌,利用二者间的物理化学作用,形成整体性强、水稳性佳、强度较高的连续阻隔墙。相较于泥浆墙等外部技术,该方法开挖产生的废弃土量更少。作为场地污染控制的常用手段,使用的泥浆材料主要为膨润土、水泥和石灰等,使用的添加剂主要为粉煤灰和矿渣等,通过调整配比可以优化材料的组成和耐性。

4.2.5 土工膜技术

土工膜作为环境工程领域的重要防渗材料,其核心功能在于通过特殊材质阻断污染物扩散路径。相较于传统的泥浆墙等垂直阻隔结构,该材料展现出更为优异的防渗性能,同时具备出色的接缝密闭特性。这项技术在污染治理领域的应

用历史已超过三个十年，其中高密度聚乙烯（HDPE）因其卓越性能成为主流选择材料。考虑到单张膜材的尺寸限制，施工过程中需要采用专业连接工艺来确保整体防渗系统的连续性。土工膜既可单独使用，也常与其他技术措施联合应用^[9]。

5 风险管控技术比对

风险管控技术在具体应用要综合考虑修复目标、土壤

风险管控技术的成熟可靠性、管控成本、管控工期、管控工程的环境影响等因素，因此需要结合地块的实际污染情况，选择合适的风险管控技术，设计符合污染地块需求的土壤污染风险管控方案。

下面对常用风险管控技术的施工方式、场地条件以及优、缺点等进行比对分析。

表 1 水平阻隔技术比对一览表

序号	项目	场地条件	施工方式	主要缺点	主要优点
1	清洁土覆盖	平整即可，不受限制	黏土摊铺，机械分层压实	要求防渗系数达到 $1\times 10^{-7}\text{cm/s}$ ，对土质有一定的要求，黏土资源比较缺乏	不需要开挖；工人暴露风险小；价格便宜
2	HDPE 膜覆盖	平整即可，不受限制	场地粘土压实后，人工铺设 HDPE 膜，双轨热熔焊接	合成材料存在老化问题	不需要开挖；工人暴露风险小；防渗成熟技术，防渗效果好
3	沥青覆盖	平整即可，不受限制	场地初步平整后，沥青洒布车喷洒沥青，机械分层摊铺压实，养护	时间久后易开裂，覆盖不严	不需要开挖；工人暴露风险小；道路施工常规技术
4	混凝土覆盖	平整即可，不受限制	场地初步平整后，输送混凝土浆液，机械分层摊铺压实，养护	时间久后易开裂，覆盖不严	不需要开挖；工人暴露风险小；道路施工常规技术

表 2 垂直阻隔技术比对一览表

序号	项目	场地条件	施工方式	主要缺点	主要优点
1	水泥灌浆墙	场地土壤和污染物影响泥浆材料的选择，场地地形影响施工方式	开挖回填，需要泥浆混合区域	需要开挖，废物处理量大，工人存在暴露风险；需要对槽孔采用泥浆固壁，堤身土质量差时容易引起堤身裂缝，防渗效果受地质条件影响很大；施工周期较长，钻孔作业难度大，造价较高	深度可到 60m 以下，施工技术成熟；建设快速
2	水泥高压喷浆墙	土壤类型和密度影响灌浆能力	压力灌浆；喷射灌浆；化学灌浆	造价较高。遇到砂层、卵砾石层、含块石人工填海地层、混凝土旧基础、基岩等复杂地层时无法钻进或产生桩位偏移；当钻深较大时，成孔垂直度偏差较大；施工期间孔口处返出大量废浆，废浆中含大量水泥，其外运消纳难度大；适用于染地块临时性阻隔、应急阻隔，长期防渗效果不能得到保证。	深度可达 45~60m；不需要开挖，工人暴露风险小；适应多种类型的土壤；在狭小区域也能安装
3	钢板桩墙	密实的土壤和坚硬的岩石区域难以施工	打桩或钻孔机器将板桩打入土壤	板桩连接处容易渗透；施工噪音较大；比其他垂直阻隔墙成本高	深度可达 30~45m；不需要开挖；工人暴露风险小；可建成不规则形状的墙体；抗化学腐蚀
4	水泥搅拌桩墙	密实的土壤和坚硬的岩石区域限制钻探能力	原位施工，使用深层搅拌机混合	土柱较小，难以保证墙体的连续性；污染物、岩石混合进入墙体可能导致建设问题；适用于染地块临时性阻隔、应急阻隔	深度可达 35m，原位施工，开挖量很小；工人暴露风险小造价低廉，效率高，适用性强
5	土工膜墙	与泥浆墙配合使用时，场地条件影响施工方式	挖沟机，振动梁，泥浆支撑等	深度有限；需要开挖工人存在暴露风险；受安装方式的限制。需要与泥浆墙配合施工，施工专业性强，难度较大，施工成本高	渗透性远低于其他墙体；抗腐蚀性强；理论上的使用寿命为 300 年

6 结语

土地是不可再生资源，污染地块的闲置或低效利用会造成巨大经济损失。风险管控技术通过“分类施策”激活土地价值，支撑城市更新与乡村振兴。土壤污染风险管控技术的前景广阔，既受政策、市场、技术创新驱动，也因全球可持续发展需求而不可或缺。其核心优点体现在生态修复、健康保障、经济增效、社会和谐、绿色低碳五大维度，是实现“净土保卫战”、推动人与自然和谐共生的关键技术支撑。未来，

随着技术进一步集成创新与政策完善，风险管控技术将在我国环境治理与高质量发展中发挥更重要的作用。

参考文献

[1] 郭杰.风险管控思路下土壤污染防治的研究[J].资源节约与环保, 2021(1): 31-32.

[2] 代海波.探析土壤污染风险管控和修复现状及发展[J].区域治理, 2021（7）: 164-165.

[3] 陶玲.污染土壤修复技术研究现状与趋势探索[J].农家参谋, 2019（20）: 168.