

国内重金属污染土壤修复技术研究进展

张弛*, 苗雨

矿冶科技集团有限公司, 北京
Email: *zhangchiustb@foxmail.com

收稿日期: 2021年6月30日; 录用日期: 2021年7月30日; 发布日期: 2021年8月6日

摘要

随着工农业的发展, 土壤重金属污染问题日益严峻。土壤重金属污染具有持久性、无法自然降解、处理难度大等特点, 对于工农业生产和人类健康造成了巨大威胁。因此, 重金属污染土壤修复技术的发展显得尤为重要。土壤修复技术在国外发展较早, 在国内仍处于起步阶段。本文介绍了目前国内主流的重金属污染土壤修复技术, 阐明了各技术的优缺点, 综述了国内的研究进展情况。为以后土壤修复技术的研究提供借鉴。

关键词

土壤修复, 重金属

Research Progress of Domestic Heavy Metal Contaminated Soil Remediation Technology

Chi Zhang*, Yu Miao

BGRIMM Technology Group, Beijing
Email: *zhangchiustb@foxmail.com

Received: Jun. 30th, 2021; accepted: Jul. 30th, 2021; published: Aug. 6th, 2021

Abstract

With the development of industry and agriculture, the problem of heavy metal pollution in soil has become increasingly severe. Soil heavy metal pollution is persistent, cannot be degraded naturally, and is difficult to deal with. It poses a huge threat to industrial and agricultural production and human health. Therefore, the development of heavy metal contaminated soil remediation technology

*通讯作者。

gy is particularly important. Soil remediation technology developed earlier abroad and is still in its infancy in China. This article introduces the current mainstream domestic heavy metal contaminated soil remediation technologies, clarifies the advantages and disadvantages of each technology, and summarizes the domestic research progress, which provides reference for future research on soil remediation technology.

Keywords

Soil Remediation, Heavy Metal

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土壤是人类社会赖以生存的资源,但随着工农业的发展,土壤遭受到了不同程度的重金属污染。据报道,我国约有 20% 的农业耕地受到重金属污染,每年因重金属污染损失的粮食可达 1000 万吨,每年损失可达 200 亿元[1]。同时,土壤中的可溶态重金属可迁移至地下水,污染地下水资源,威胁人类的生存健康。因此,如何治理重金属污染土壤日益成为了研究热点。国家为了加强土壤修复工作,于 2016 年 5 月印发了《土壤污染防治行动计划》,于 2018 年 8 月 31 日通过了《中华人民共和国土壤污染防治法》[2]。

国外对于土壤修复技术的研究较早,美国 EPA 早在 1986 年就颁发了适用于商业化重金属污染土壤治理技术的规范。国内相对来说起步较晚,目前重金属污染土壤修复技术仍缺乏成套的设备技术和大规模的工程应用。根据国内外的研究进展,重金属污染土壤修复技术主要有以下三方面的原理:1) 将重金属从污染土壤中去,包括土壤淋洗技术、植物修复技术、热脱附技术等。2) 将重金属固定在土壤中,主要包括固化稳定化技术、玻璃化技术等。3) 将重金属污染土壤与外界进行隔离,主要包括客土法、阻隔填埋技术等[3]。本文综述了几种主要土壤修复技术的原理以及研究进展,旨在为以后的研究提供借鉴,为未来土壤修复技术的发展提供参考。

2. 重金属污染土壤修复技术

主流的几种土壤修复技术优缺点如下表 1 所示。

Table 1. Comparison of advantages and disadvantages of mainstream heavy metal soil remediation technologies

表 1. 主流重金属土壤修复技术优缺点比较

土壤修复技术类别	优点	缺点
固化稳定化技术	应用广泛、成本低、见效快	当环境变化时,重金属具有再溶出的风险
土壤淋洗技术	可用于大面积、重度重金属污染土壤	渗透性差的土壤效果不理想、易导致土壤中养分流失
植物修复技术	较为清洁和廉价、不会造成二次污染	修复周期较长
热脱附技术	工艺简单、处理后土壤可再利用	应用范围较窄,仅适用于易挥发重金属,易造成空气污染
电动修复技术	高效、无二次污染、原位修复	如果不能很好的控制土壤体系 pH,处理效率会较低

2.1. 固化稳定化

固化稳定化技术是目前较为成熟, 应用比较广泛的一种处理土壤中重金属污染的技术, 是美国超级基金修复污染场地中最主要的一种技术[4]。其原理是向污染土壤中添加固化剂或者稳定化药剂, 经充分混合后, 使得污染土壤变为低渗透性的固化体, 或者将污染土壤中的重金属元素转变为化学不活泼形态, 以达到降低重金属迁移性和流动性的目的[5]。常用的固化稳定化药剂有水泥、粉煤灰、石灰、有机物料(秸秆、禽畜粪便、城市堆肥等)、稳定化药剂(化学药剂硫酸亚铁, 硫酸钠等)、矿物材料等。水泥是最常见的固化材料, 美国超级基金项目中有 80% 的项目采用水泥作为固化材料[6]。水泥对于多种重金属均有良好的固化作用, 稳定剂的选用则是根据污染土壤中不同的重金属类型来确定。固化稳定化具有成本低、工期短等优点, 缺点为当环境改变时, 重金属有再溶出的隐患。

杨卓悦等开展了砷污染土壤的固化/稳定化研究, 利用水泥作为固化剂, 黄砂和粉煤灰作为辅助剂, 按照土壤: 水泥: 黄砂: 粉煤灰 = 0.5:0.35:0.075:0.075 的比例进行配比, 经养护后固化体强度可以达到 8.5 MPa, 符合填埋的要求[7]。张志红利用稳定剂 SR(Na_2S 和赤泥按一定比例配置而成)协同硅酸盐水泥处理铅锌重金属污染土壤, 实验发现最优配比为向污染土壤中加入 SR 2.5% 和 8% PC, 铅锌浸出浓度分别降低 97.5% 和 74.5%, 低于危险废物标准, 养护 28 天后抗压强度可达到 1080 kPa [8]。张文等探索了铬渣堆场中六价铬污染土壤的固化稳定化方法, 其利用硫酸亚铁、氧化钙、水泥作为固化稳定化药剂, 发现硫酸亚铁投加量达到六价铬 6.5 倍时, 六价铬未检出。氧化钙可抑制水溶六价铬的浸出, 而水泥可使 3880 mg/kg 的土壤中六价铬浓度降低至 19.9 mg/L [9]。

2.2. 土壤淋洗技术

土壤淋洗技术是当今修复重金属污染土壤一种常用的方法, 相比于固化稳定化法, 其能彻底的去除掉土壤中的重金属, 从根本上解决重金属对土壤的危害, 具有操作简单、去除率高等优点[10]。淋洗技术的关键是淋洗剂的选择, 需根据土壤中不同的重金属类型、污染程度等来确定[11]。土壤淋洗技术具有可彻底去除重金属、工期短等优点, 缺点为可能把土壤中的营养物质一起溶出。

陈灿等研究了针对砷污染土壤的淋洗技术, 通过实验筛选出了高效的淋洗剂磷酸钾, 优化了淋洗条件, 最佳淋洗条件下, 土壤中砷去除率可达 74%。当将磷酸钾和氢氧化钠作为联合淋洗剂时, 去除率可达 82.6% [12]。李世业等以某铬渣污染场地污染土壤为实验对象, 研究了去除铬的淋洗技术。其利用水、磷酸、柠檬酸、盐酸、EDTA 等作为淋洗剂, 分别实验了淋洗效果, 发现 EDTA 对铬的淋洗效果最佳, 在最优条件土液比为 1:10, 淋洗时间为 1h 时, 六价铬去除率可达 98.5% [13]。姚振楠等研究了 Cd、As、Pb 复合污染土壤的淋洗技术, 其选用 Na_2EDTA 作为淋洗剂, 最优条件为浓度 1 mmol/L, 固液比为 1:4 时, 土壤中重金属含量可达到修复目标值[10]。

2.3. 植物修复技术

植物修复技术是近几年发展起来的新技术, 此技术是通过在污染土壤上种植特定的植物, 通过植物对重金属元素的吸收以及通过根系微生物群落的固定和富集作用, 将重金属元素从土壤中除去。植物修复技术可从根本上消除土壤中重金属的危害, 并且具有清洁、环保, 不会对土壤本身的功能性造成损害等优势, 是一种极具潜力的技术[14]。可以在重金属污染土壤上生长的植物被称为超积累植物, 不同的植物对于重金属具有不同的选择性, 因此, 筛选特定的超积累植物和耐性植物对于植物修复具有重要的意义[14]。常见的超积累植物有富集 As 的蜈蚣草、富集 Cu 的海州香薷、富集 Cd 的龙葵, 富集 Zn 的东南景天等[15]。植物修复具有经济、环保、不破坏土壤结构等优点, 缺点为修复周期较长。

国内学者对于利用超积累植物修复污染土壤做了大量研究。杨卓悦等利用蜈蚣草、玉米和玉龙草在东北地区开展了低砷污染土壤($<50\text{ mg/L}$)的植物修复研究。发现蜈蚣草富集砷最主要的部位为根部, 东北严寒天气影响了其富集效果, 玉龙草富集效果佳但生物量低, 玉米有一定吸附能力, 适合东北高寒天气的生长[7]。殷永超利用龙葵作为超积累植物, 对 Cd 污染农田土壤进行了两年的场地实验, 发现龙葵对于表层和亚表层的 Cd 具有明显的吸收作用, 对于表层 Cd 的吸收率可达 6.3%~16.8%, 对于 20~80 cm 的亚表层吸收率可达 49.5%~80.7%, 对于轻、中度 Cd 污染土壤具有良好的修复效果[16]。

2.4. 热脱附技术

热脱附法是一种比较成熟、可靠的方法。热脱附技术是通过直接或间接加热污染土壤, 使得土壤中的污染物经过热解、相变等过程从而与土壤分离的方法, 常用于有机物(多氯联苯、农药、杀虫剂等)污染土壤的处理[17]。由于重金属中汞的沸点较低, 具有挥发性, 也可选用热脱附的技术进行处理。热脱附技术被美国 EPA (美国国家环保署)推荐为适合处理较高汞浓度($\text{Hg} > 260\text{ mg/kg}$)污染土壤的方法。热脱附技术优点为成本低、工期短等优势, 缺点为只能处理挥发性的污染物, 局限性较大。

赵涛等研究了氯盐对汞污染土壤低温热脱附效率的影响, 发现 MgCl_2 可以有效降低土壤中汞污染物的初始热脱附温度, 可将污染土壤中汞的去除率从 65.67%~70.74% 提升至 81.35%~84.91% [18]。杨乾坤等探索了汞污染土壤热脱附的影响因素, 分别在不同温度、不同停留时间和不同氯盐的影响下进行低温热脱附, 发现添加了 FeCl_3 的汞污染土壤在 300°C 下停留 25 min, 去除率可达 96.1~96.2% [19]。

2.5. 电动修复技术

电动修复技术是 20 世纪 80 年代兴起的一项修复技术, 主要是利用电渗透和电迁移作用, 使得土壤中的重金属向电极两端移动, 从而在电极两端进行富集, 然后进行集中处置。电动修复技术是一种极具潜力的修复技术, 不用扰动土壤, 可以有效的去除土壤中的重金属。

樊广萍等在传统电动修复重金属技术的基础上, 研究了添加不同增强试剂对于电动修复效果的影响。以某电镀厂重金属污染土壤作为实验对象, 加入 EDTA、乳酸、柠檬酸和硝酸等显著增强了土壤中铜、镍、铅和六价铬的去除效果。其中, 阴极加入硝酸后, 六价铬的去除率可达 93.3%, 加入乳酸, 对于铜的去除率可达 78.7% [20]。

3. 结论

目前我国土壤污染问题日益突出, 土壤环境质量越来越受到重视, 未来国内土壤修复领域具有广阔的前景。国内土壤修复技术的研究在近几年发展迅速, 但相比国外来说还有一定的差距, 仍存在许多问题亟待解决:

- 1) 开发高效、成本低、有潜力的土壤修复技术, 例如微生物修复技术、植物修复技术。
- 2) 需要建立完善的土壤修复评估体系, 减少过度修复或修复不足的发生。
- 3) 基于国内外研究技术, 开发高效多种重金属协同处置的稳定化药剂。

参考文献

- [1] 秦樊鑫, 魏朝富, 李红梅. 重金属污染土壤修复技术综述与展望[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(S2): 199-208.
- [2] 王兴利, 王晨野, 吴晓晨, 王晶博, 穆晓东, 杨晓姝, 胡小飞, 高静. 重金属污染土壤修复技术研究进展[J]. 化学与生物工程, 2019, 36(2): 1-7, 11.
- [3] 王洪才. 重金属污染土壤淋洗修复技术和固化/稳定化修复技术研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2014.

- [4] 宋云, 李培中, 郝润琴. 我国土壤固化/稳定化技术应用现状及建议[J]. 环境保护, 2015, 43(15): 28-33.
- [5] 李向阳. 固化稳定化技术处理重金属类污染土壤效果及应用前景[J]. 环境与生活. 2014(22): 402.
- [6] 夏威夷, 丁亮, 王栋, 朱迟, 曲常胜, 王水, 蔡光华, 郭乾. 重金属有机物复合污染土壤固化稳定化技术研究进展[J]. 绿色科技, 2021, 23(6): 16-19, 22.
- [7] 杨卓悦. 砷污染土壤的修复——固化/稳定化及植物修复[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [8] 张志红, 陈家煜, 郭观林, 张琢, 王梅, 张朝. 稳定剂协同水泥固化/稳定化重金属污染土壤的工程特性[J]. 环境工程学报, 2017, 11(5): 3172-3178.
- [9] 张文, 杨勇, 马泉智, 朱文会. 铬污染土壤还原——固化稳定化过程研究[J]. 环境工程, 2014, 32(S1): 1028-1030, 1032.
- [10] 姚振楠, 钮恺之, 李明, 徐子茜. 化学淋洗法修复土壤中 Cd、Pb、As 的工程研究[J]. 广东化工, 2021, 48(12): 154-156.
- [11] 钮恺之, 姚振楠, 徐子茜, 张汝壮. Cu、Pb、As 的淋洗修复技术研究进展[J]. 广东化工, 2021, 48(11): 122-123.
- [12] 陈灿, 陈寻峰, 李小明, 杨麒, 钟振宇, 谢伟强, 邓琳静. 砷污染土壤磷酸盐淋洗修复技术研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(8): 2582-2588.
- [13] 李世业, 成杰民. 化工厂遗留地铬污染土壤化学淋洗修复研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 869-878.
- [14] 赵云峰, 张涛, 田志君, 吴大鹏, 梁凯旋, 韩娟娟. 矿区周边重金属污染土壤植物修复技术研究进展[J]. 城市地质, 2020, 15(1): 22-33.
- [15] 石润, 吴晓芙, 李芸, 冯冲凌, 李韵诗. 应用于重金属污染土壤植物修复中的植物种类[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(4): 139-146.
- [16] 殷永超, 吉普辉, 宋雪英, 张薇, 董欣欣, 曹秀凤, 宋玉芳. 龙葵(*Solanum nigrum* L.)野外场地规模 Cd 污染土壤修复试验[J]. 生态学杂志, 2014, 33(11): 3060-3067.
- [17] 李爱民, 杨福胜, 郝帅, 郭焱. 基于热脱附法的汞污染土壤修复研究进展[J]. 土壤, 2020, 52(3): 433-438.
- [18] 赵涛, 王兴润, 杨晓进, 颜湘华. 氯盐对汞化合物污染土壤热脱附过程的影响[J]. 环境科学研究, 2015, 28(3): 425-430.
- [19] 杨乾坤. 氯盐协同热脱附含汞土壤实验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2014.
- [20] 樊广萍, 朱海燕, 郝秀珍, 仓龙, 王宇霞, 周东美. 不同的增强试剂对重金属污染场地土壤的电动修复影响[J]. 中国环境科学, 2015, 35(5): 1458-1465.