



矿区土壤重金属污染化学修复及强化方法研究进展

端爱玲, 杨树俊, 韩张雄, 张树雄, 王思远, 李敏

(江苏省地质工程勘察院, 江苏 南京 210012)

摘要: 随着开采活动的加剧, 矿区土壤污染问题日益突出。如今的修复方法主要有物理修复, 化学修复, 生物修复等。其中化学修复法效率高、修复快速, 但修复过程中容易造成矿区土壤环境的退化, 因此, 在利用化学修复方法的同时, 如果结合其他方法, 将会有更广泛的应用前景。本文通过对矿区土壤化学修复法的研究现状、存在问题进行分析, 同时总结了化学法联合其他方法的研究热点, 分析得出当前化学修复方法应当结合其他方法, 开展联合强化修复, 以确保修复过程减少化学物质对矿区土壤的二次污染。

关键词: 矿区土壤; 重金属污染; 修复; 强化修复

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.06.018

中图分类号: TD985; X751 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2022) 06-0104-06

随着我国工业的飞速发展, 尤其是金属矿的开采, 大量有害重金属被释放到环境中。作为生态系统基础的土壤也受到了不同程度的污染。土壤中的重金属不能被生物降解, 只能从一种形态转化为另一种形态, 具有持久污染的特性^[1-2], 因此恢复土壤生态环境非常困难, 尤其矿区附近的土壤重金属污染尤为严重。Liu 等^[3]研究发现, 我国第二大黄金矿区小秦岭地带, 由于污水灌溉, 粉尘沉降, 尾矿矿渣的浸出径流, Cu、Cd、Hg、Pb 和 Zn 严重污染周边土壤, 小麦和玉米等农作物也同样受到了不同程度的污染, 居民的健康受到了严重的威胁。由采矿而兴起的冶炼厂排放到包括土壤在内的环境中的铅、锌和镉等重金属, 更是占到人为排放总排放量的 40%~73%^[4]。中国是全球最大的有色金属生产国和消费国, 矿产开采活动带来的环境问题日益突出。因此, 必须关注全国矿区附近的金属污染情况, 制定合理的修复方法, 改善矿区环境。

为了有效减少重金属对土壤环境的危害, 研究者先后开发了许多修复方法, 其中包括物理

法, 化学法, 生物法等^[5-6]。污染场地修复, 尤其是已遭废弃的矿区土壤修复, 需要根据土壤污染程度、污染范围及日后利用方式, 选择经济有效的修复方法。本文综述了三种方法去除重金属的机理, 并着重介绍化学修复法及化学强化修复的最新的研究进展, 为矿区土壤修复提供新思路。

1 土壤修复方法

土壤修复途径主要有两种, 一是固定, 通过改变重金属在土壤中的存在形态来降低土壤环境中的迁移性和生物可利用性; 二是转移, 通过溶解、解吸、吸收等一系列作用将有害重金属从土壤中去^[5]。根据不同的修复地点, 土壤修复还可分为原位修复和异位修复。随着研究的不断深入, 土壤的修复技术划分越来越细, 根据技术类型的不同, 又可分为物理修复、化学修复、生物修复等, 但是往往先进的修复技术并不单一, 这就需要开发联合修复技术^[7]。孙伦涛等^[8]发现蚯蚓分泌液能溶解重金属化合物和含重金属的矿物,

收稿日期: 2021-03-09; 改回日期: 2021-09-02

基金项目: 江苏省地质工程勘察院测试中心科研基金 (2021-01); 陕西省自然科学基金项目 (2014JM5217)

作者简介: 端爱玲 (1977-), 女, 高级工程师, 主要从事化学检测及重金属污染治理研究。

通信作者: 李敏 (1972-), 女, 高级工程师 (研高), 主要从事实验测试工作。

提高土壤中重金属的生物有效性,此法与植物吸收修复结合,强化了重金属的去除。韩甘等^[9]发现土壤中化学试剂螯合剂的加入提高了植物根系Cd的有效含量,化学法的前处理强化了植物吸收。陈哲等^[10]利用化学改性的凹凸棒,大大降低了铅的生物有效性,化学改性强化了天然凹凸棒的钝化作用。化学处理在提高重金属活性,钝化生物有效性,强化植物吸收等方面,都有着一定效果。

1.1 物理修复

物理方法主要依靠物理原理,配合工程措施来对土壤进行修复。其中包括客土、电动修复、电热修复。客土包括换土、覆土、翻土,对污染面积小且严重的土壤,可直接利用换土法挖去原有的污染土壤,填上新鲜干净的土壤;对于一些污染程度小的区域,可采用翻土法,将表层的污染土壤与底层的干净土壤混合,降低重金属的浓度。电动修复主要是利用金属离子,在外加电场中迁移,达到富集去除的目的^[11]。电热修复主要利用外加热的方式,使得重金属从土壤中挥发出来。主要的加热方式有微波、蒸汽、红外辐射等^[12]。该法对挥发性的Hg、As污染去除较好,其他金属应用较少。

1.2 生物修复

生物修复主要是利用微生物、动物或植物削弱、降低重金属毒性^[13]。大量研究表明微生物可直接参与土壤重金属的修复,通过吸附、沉淀、络合、氧化还原、甲基化与去甲基化等作用,改变根际重金属的形态和生物有效^[14]。例如,环境中大量的细菌、真菌等微生物会与有害重金属发生离子交换、表面络合作用;另一方面通过分泌胞多糖、脂类、蛋白质等聚合物的方式,与重金属发生反应,起到固定作用^[15]。动物修复大多利用的是土壤中的蚯蚓,因为它是最重要的土壤生物之一,对改善土壤质量起着不可或缺的作用^[16]。蚯蚓通过取食、挖洞、排泄和代谢氧化还原物质,改善了土壤质地和营养含量。

植物修复法是利用植物根系对土壤中的污染物进行固定、吸收、转化、降解、挥发等来消除或削弱土壤中的污染物。植物修复技术分为植物吸收、植物稳定、植物挥发等。其中植物吸收的研究利用最多,主要用超累积的植物来吸收土壤中的重金属,达到转移的目的。相对而言,植物

吸收修复更加彻底和持久。但是植物吸收通常较慢,其需要多次种植,还需要与其他方式加以结合来提升吸收效率。

1.3 化学修复

化学修复主要是根据土壤的污染特点,施加不同的化学试剂,通过试剂与污染物直接的反应来达到钝化、降解或去除的目的。试剂的不同,产生的修复效果也不同,添加的化学试剂种类主要包括氧化剂、还原剂、改良剂、增溶剂和螯合剂等,见表1。化学试剂的对土壤本身的影响也非常重要,但有些试剂加入会破坏土壤的理化性质,达不到理想的效果^[17]。因此在选择化学试剂时,需综合考虑修复效果以及对土壤性质的影响。化学作用快而迅速的特点,易于和其他方法结合,作为强化手段,利用化学处理与其他方式的结合,可以利用各自优势,更好地对土壤进行修复。

1.3.1 化学淋洗

化学淋洗技术指向土壤添加淋洗剂,通过络合、溶解、置换、萃取等作用将重金属随淋洗剂流出土壤,本质是重金属转移的过程。常用的淋洗剂有水、有机/无机酸、盐溶液、螯合剂、表面活性剂等,见表1。好的淋洗剂,淋洗效率高、用量少、对环境污染小。研究发现盐酸对Cu、Cd、Pb、Zn及Ni污染土壤淋洗有很好的效果,但是盐酸淋洗的同时不可避免的破坏了土壤结构,降低了土壤肥力,对于矿区周边的耕作土壤并不适宜。相对于盐酸,柠檬酸对土壤的亲合力较小,易降解,但去除率较弱。既要高淋洗率,同时要考虑对土壤的二次污染,熊伟^[18]在柠檬酸为淋洗剂的基础上,施以超声强化,柠檬酸的淋洗效果提高16.18%。这种外加手段来强化淋洗效果的做法,也为化学淋洗提供了更多的提升空间。芮大虎等^[19]采用冻融-化学淋洗相结合的方式修复Cd和Pb污染性黏土,经过7次冻融后,Cd、Pb去除率分别达到77.24%、37.78%,该法利用寒区冻融的自然现象,来协同化学淋洗,大大减少了淋洗剂的用量。通过其他方法与化学淋洗的协同作用,能够有效降低淋洗产生的二次污染。薛清华等^[20]利用EDTA/DTPA与柠檬酸混合连续淋洗对Cd、Pb的淋洗率达61.4%和72.5%,但是淋洗后土壤有效磷、速效钾,碱解氮含量明显降低,影响土壤肥力。因此需重视淋洗后土壤质量

恢复的问题，将研究中采取施肥等措施恢复土壤肥力作为一项重要考量依据。

表 1 修复重金属污染土壤的常用淋洗剂、优缺点及修复机制
Table 1 Commonly used eluents, advantages and disadvantages and repair mechanisms for the repair of heavy metal contaminated soil

类别	淋洗试剂	优缺点	淋洗机制	文献
无机淋洗剂	盐酸，硫酸，硝酸，磷酸等	√效果好、速度快、成本低 ×对土壤结构破坏严重，不易再生利用	酸解、离子交换	[21]
人工螯合剂	EDTA,DTPA, NTA等	√使用范围广、效率高 ×生物降解性差，二次污染风险大	络合反应	[22]
天然螯合剂	柠檬酸、草酸等	√可生物降、对土壤温和 ×淋洗效率低	络合反应	[23]
中性盐	NaCl CaCl ₂ FeCl ₃ 等	√化学性质较温和，对土壤破坏性较小	离子交换、络合反应	[24]
表面活性剂	SDBS、SDS、RL2、皂苷、皂角苷等	√种类多，环境的危害更小特别是生物表面活性剂，并具有良好的生物降解性 ×价格相对较高	离子交换、亲水和疏水基团共同作用、降低界面活化能、沉淀—溶解和离子结合	[25]
复合淋洗剂	以上试剂的混合/复配	√综合不同淋洗剂的优点淋洗效率高	以上机制的复合	[26]

1.3.2 化学钝化

化学钝化修复是指往土壤中加入钝化剂降低重金属在土壤环境中的可迁移性及生物有效性，从而减少这些重金属元素对动植物的毒性危害，本质是一种重金属固定的方法。该法操作简单，能够应用于大面积污染区域^[5]。目前有各种类型的钝化材料，碱性物质、磷酸盐、生物炭、赤泥和有机物料等，被应用到重金属的钝化实验中。不同的钝化剂与重金属的作用机制也不同。例如碱性石灰石的加入，提高土壤的 pH 值，一方面土壤表面负电荷增加，对重金属的亲性和增加；另一方面利于重金属离子形成氢氧化物或碳酸盐沉淀^[27]。LOMBI 等^[28]发现用石灰处理污染土壤后，显著降低了 Zn、Cd 可交换态，而 Zn、Cd 的碳酸盐结合态则增加了 2.8、2.1 倍。对于有机物料而言，由于有机官能团的存在，易与重金属发生络合作用。Jiang 等^[29]研究发现生物质炭对可变电荷土壤中 Pb 具有吸附作用，其吸附机理为生物质炭中的官能团与土壤中的 Pb 进行了表面络合。

以上的钝化反应机制主要为吸附、沉淀、络合等。但是钝化的持久性会随反应机制的不同而不一样。例如土壤在酸雨淋洗下，pH 值降低，土壤对重金属的吸附减弱，沉淀溶解，重金属会再次被释放出来。其次，土壤利用方式的改变，同样会影响钝化的持久性。土壤耕作不同的植物，植物会释放难以控制的有机酸来溶解或解析已被固定的重金属^[30]。Debela 等^[31]研究表明，在根分泌物中存在低分子量有机酸可以显著增加污染土壤中 Pb 的活性。单一的钝化也许无法达到长期的

效果，Zhai 等^[32]利用化学淋洗和原位钝化相结合，先以中性盐 FeCl₃ 淋洗，再用石灰、生物炭固定，复合修复后效果明显，减少的重金属总量，一定程度上延迟固定时间。复合协同作用时可利用各自的优势达到较好的修复效果。

1.4 化学强化修复

1.4.1 化学强化植物修复

植物修复相对于其他方法时间更长。而化学修复，特别是淋洗作用迅速，但是产生的大量试剂，易发生二次污染。利用化学试剂来强化植物吸收修复，可以解决大量淋洗剂溢流的问题，同时提高植物的吸收率。目前常用的化学强化试剂和淋洗剂类似,主要有螯合剂、有机酸、腐殖酸、植物激素和表面活性剂等。研究发现易降解的天然螯合剂，能够有效促进植物对重金属的累积。周宽等^[33]发现，施加螯合剂谷氨酸 N，N-二乙酸（GLDA）后，葎草地上和地下部分 Cd 含量是原土栽培的 1.07 和 1.67 倍。傅校锋等^[34]发现，施加柠檬酸，混匀后平衡两周处理可显著增加青苜蓿各部分生物量。螯合剂加入使得重金属与螯合剂发生络合作用，活化重金属，提高了生物可利用性。但是人工螯合剂难以降解，不易淋溶降解，天然螯合剂、小分子有机酸易降解作用时间短，修复期间需多次施加。刁静茹等^[35]采用新型螯合型表面活性剂 N-十二酰基乙二胺三乙酸钠 (LED3A) 强化黑麦草修复 Cd 污染水体，发现 LED3A 添加量为 50 mg/L 时，黑麦草的累积量提高了 74.39%。

对于一些矿区，土壤污染严重，其毒性会危

害植物生长。贫瘠的矿区，则可以加入改良剂或有机物料以抑制金属对植物根系的危害，促进植物的生长，提高植物根部的固定或吸收作用。赵述华等^[36]以粉煤灰、干化污泥、粉碎花生壳、硫酸亚铁和磷酸二氢钾为组合稳定剂，对矿区土壤进行稳定处理，发现不同程度地提高了蜈蚣草、香根草、苎麻3种植物的生物量，增加了对砷的累积。彭桂香等^[37]在土壤中添加赤泥、污泥和沸石，促进了土壤微生物的繁殖，进一步促进东南景天植株的生长，提高了土壤中的Zn、Cd的吸收率。

1.4.2 化学强化物理电动修复

电动修复技术本是基于物理学家 Reuss 发现的电动现象发展起来的，其本质是离子的运动。当然这本身离不开电化学的解析、电离过程，本质上是化学物理的复合过程。电动修复过程，最重要的是金属离子的运动，但大多的金属离子在土壤中较为稳定，在电场驱动下，迁移能力也相对较弱，实践中需要化学辅助剂来活化金属离子，提升离子的迁移率。周鸣等^[38]研究发现，使用EDTA作为阴极电解液可以提高受污土壤中Pb、Cu、Cr的去除效率。随着电动的进行，H⁺离子会在阴极会反应生成H₂，阴极区pH值上升。土壤pH值的改变会影响金属离子在土壤中的溶解度，控制pH值也非常重要，吴桐^[39]发现盐酸和醋酸作为阴极区电解液的pH值调节剂，可以很好地提高Cr的去除率。近年来，有些学者发现电极材料也会影响重金属的去除率，利用化学涂层去优化电极材料也可以强化电动修复^[40]。

2 结论与展望

矿区土壤的污染类型比较复杂，单一类型的修复方法往往难以达到，因此，必须多种方法联合使用，才能解决当前的土壤污染问题。

化学修复方法比较高效简便，但是也难以避免对土壤的破坏。通过化学方法处理结合与其他较为温和的方法，特别是化学方法与植物吸附方法的结合，可以降低二次污染的产生，并提高修复效率。

所有的修复方法，都不可避免地会损害土壤的质量，而对土壤质量的恢复研究还开展较少。因此，今后矿区土壤修复方法的研究过程中，既要考虑对土壤的修复效率，同时也要恢复土壤的质量。

参考文献：

- [1] 李瑞娟, 周冰. 安徽铜陵铜尾矿土壤污染评价及综合利用研究[J]. *矿产综合利用*, 2021(4):36-40.
- [2] LI R J, ZHOU B. Study on soil pollution evaluation and comprehensive utilization of Tongling tailings in Anhui[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(4):36-40.
- [3] 罗妍, 黄艺, 余大明, 等. 东北典型煤矿区重金属环境评价与分析[J]. *矿产综合利用*, 2021(4):50-58.
- [4] LUO Y, HUANG Y, YU D M, et al. Environmental assessment of heavy metals in typical coal mining areas in Northeast China[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(4):50-58.
- [5] [3] Liu Ruiping, Xu Youning, Zhang Jianghua, et al. Effects of heavy metal pollution on farmland soils and crops: A case study of the xiaoqinling gold belt[J]. *China Geology*. 2020, 3(3): 402-410.
- [6] [4] Xiao R, Shen F, Du J, et al. Screening of native plants from wasteland surrounding a zn smelter in feng county china, for phytoremediation[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 162:178-183.
- [7] [5] 邓敏, 程蓉, 舒荣波, 等. 攀西矿区典型重金属污染土壤化学-微生物联合修复技术探索[J]. *矿产综合利用*, 2021(4):1-9.
- [8] DENG M, CHENG R, SHU R B, et al. Exploration of chemical-microbial remediation technology for soil contaminated by typical heavy metals in Panxi mining area[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(4):1-9.
- [9] [6] Xu D M, Fu R B, Liu H Q, et al. Current knowledge from heavy metal pollution in chinese smelter contaminated soils, health risk implications and associated remediation progress in recent decades: A critical review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020.
- [10] [7] 朱桂芬, 王莉, 田野, 等. 化学淋洗联合油葵植物修复土壤中cd[J]. *河南师范大学学报*, 2016, 44(1):101-104.
- [11] ZHU G F, WANG L, TIAN Y, et al. Chemical leaching combined with oil sunflower phytoremediation of cd in soil[J]. *Journal of Henan Normal University*, 2016, 44(1):101-104.
- [12] [8] 孙伦涛, 储燕, 邵将, 等. 蚯蚓分泌液在植物修复重金属污染土壤中的应用[J]. *安徽农业通报*, 2020, 26(6):155-157.
- [13] SUN L T, CHU Y, SHAO J, et al. Application of earthworm secretion in phytoremediation of heavy metal contaminated soil[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2020, 26(6):155-157.
- [14] [9] 韩甘, 黄益宗, 魏祥东, 等. 螯合剂对油葵修复镉砷复合污染土壤的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(8): 1891-1900.
- [15] HAN N, HUANG Y Z, WEI X D, et al. Effects of chelating agents on oil sunflower remediation of soil contaminated by

cadmium and arsenic [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8): 1891-1900.

[10] 陈哲, 冯秀娟, 朱易春, 等. 天然及改性凹凸棒对稀土尾矿土壤中重金属铅的钝化效果研究[J]. *岩矿测试*, 2020, 39(6):847-855.

CHEN Z, FENG X J, ZHU Y C, et al. Study on the passivation effect of natural and modified attapulgite on the heavy metal lead in the soil of rare earth tailings[J]. *Rock and Mineral Testing*, 2020, 39(6):847-855.

[11] Rahman Z, Jagadheeswari, Mohan A, et al. Electrokinetic remediation: An innovation for heavy metal contamination in the soil environment [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020.

[12] Kunkel A M, Seibert J J, Elliott L J, et al. Remediation of elemental mercury using in situ thermal desorption (istd) [J]. *Environmental Science & Technology: ES&T*, 2006, 40(7): 2384-2389.

[13] 赵首萍, 叶雪珠, 张琪, 等. 重金属污染土壤几种生物修复方式比较[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(20):83-91.

ZHAO S P, YE X Z, ZHANG Q, et al. Comparison of several bioremediation methods of heavy metal contaminated soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(20):83-91.

[14] Yang G, Wagg C, Veresoglou S D, et al. How soil biota drive ecosystem stability[J]. *Trends Plant Sci*, 2018, 23(12):1057-1067.

[15] 段桂兰, 崔慧灵, 杨雨萍, 等. 重金属污染土壤中生物间相互作用及其协同修复应用[J]. *生物工程学报*, 2020, 36(3):455-470.

DUAN G L, CUI H L, YANG Y P, et al. Interaction between organisms in heavy metal contaminated soil and their cooperative remediation application[J]. *Chinese Journal of Biological Engineering*, 2020, 36(3):455-470.

[16] Wu G, Kang H, Zhang X, et al. A critical review on the bio-removal of hazardous heavy metals from contaminated soils: Issues, progress, eco-environmental concerns and opportunities[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 174(1-3):1-8.

[17] S Tampouris, N Papassionpi, I Paspaliaris. Removal of contaminant metals from fine grained soils, using agglomeration, chloride solutions and pile leaching techniques [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2001, 84(2/3): 297-319.

[18] 熊伟. 超声强化柠檬酸淋洗修复镉污染土壤的研究[J]. *湖南有色金属*, 2020, 36(4):62-65.

XIONG W. Study on remediation of antimony contaminated soil by ultrasonic enhanced citric acid leaching[J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 2020, 36(4):62-65.

[19] 芮大虎, 武智鹏, 武迎飞, 等. 冻融_化学淋洗法协同修复重金属 Cd 和 Pb 污染黏性土[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(23):199-205.

RUI D H, WU Z P, WU Y F, et al. Freeze-thaw chemical

leaching method for synergistic repair of heavy metal Cd and Pb contaminated clay[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(23):199-205.

[20] 薛清华, 黄凤莲, 梁芳, 等. EDTA/DTPA 与柠檬酸混合连洗土壤中镉铅及其对土壤肥力的影响[J]. *矿冶工程*, 2019, 39(5):74-78.

XUE Q H, HUANG F L, LIANG F, et al. Mixing EDTA/DTPA and citric acid to wash soil cadmium and lead and its effect on soil fertility[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2019, 39(5):74-78.

[21] Makino T, Sugahara K, Sakurai Y, et al. Remediation of cadmium contamination in paddy soils by washing with chemicals: Selection of washing chemicals[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144(1):2-10.

[22] 陈晓婷, 王欣, 陈新. 几种螯合剂对污染土壤的重金属提取效率的研究[J]. *江苏环境科技*, 2005, 18(2):9-10+3.

CHEN X T, WANG X, CHEN X. Study on the extraction efficiency of heavy metals from contaminated soil by several chelating agents[J]. *Jiangsu Environmental Science and Technology*, 2005, 18(2):9-10+3.

[23] Bassi R, Prasher S O, Simpson B K. Extraction of metals from a contaminated sandy soil using citric acid[J]. *Environmental Progress*, 2000, 19(4):275-282.

[24] 李婷, 蔡莞缤, 方圣琼, 等. 淋洗修复重金属 Pb 污染土壤技术研究[J]. *环保技术*, 2020(4):62-65.

LI T, CAI Y B, FANG S Q, et al. Study on technology of leaching and remediation of heavy metal Pb contaminated soil[J]. *Environmental Protection Technology*, 2020(4):62-65.

[25] Ji W, Abou Khalil C, Parameswarappa Jayalakshamma M, et al. Behavior of surfactants and surfactant blends in soils during remediation: A review[J]. *Environmental Challenges*, 2021:2.

[26] 鲍根莲, 邓欢欢, 李少君, 等. 生物表面活性剂和化学螯合剂强化无柄小叶榕修复 Cd、Cu 重金属污染盐碱地[J]. *环境化学*, 2019, 38(7):1498-1506.

BAO G L, DENG H H, LI S J, et al. Biosurfactants and chemical chelating agents enhance the restoration of Cd and Cu heavy metal polluted saline-alkali soils by *Ficus sessileum*[J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(7):1498-1506.

[27] Hale B, Evans L, Lambert R. Effects of cement or lime on cd, co, cu, ni, pb, sb and zn mobility in field-contaminated and aged soils[J]. *J Hazard Mater*, 2012, 199-200:119-127.

[28] Enzo, Lombi, Rebecca E, Hamon, Steve P, et al. Lability of Cd, Cu, and Zn in polluted soils treated with lime, beringite, and red mud and identification of a non-labile colloidal fraction of metals using isotopic techniques[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(5):979-984.

[29] Jiang T Y, Jang J, Xu R K, et al. Adsorption of Pb(ii) on variable charge soils amended with rice-straw derived

biochar[J]. *Chemosphere*, 2012, 89(3):249-256.

[30] Wang Y, Xu Y, Li D, et al. Vermicompost and biochar as bio-conditioners to immobilize heavy metal and improve soil fertility on cadmium contaminated soil under acid rain stress[J]. *Sci Total Environ*, 2017, 621:1057-1065.

[31] F. Debela J M A, R. W. Thring, T. Whitcombe. Organic acid-induced release of lead from pyromorphite and its relevance to reclamation of pb-contaminated soils[J]. *Chemosphere*, 2010, 80(4):450-456.

[32] Zhai X, Li Z, Huang B, et al. Remediation of multiple heavy metal-contaminated soil through the combination of soil washing and in situ immobilization[J]. *Sci Total Environ*, 2018, 635:92-99.

[33] 周宽, 皇甫卓曦, 钟承韡, 等. 可生物降解螯合剂 GLDA 诱导菰草修复镉污染土壤[J]. *环境工程*, 2020, 41(2):483-489.

ZHOU K, HUANGFU Z X, ZHONG C W, et al. Biodegradable chelating agent GLDA induces *Humulus japonicus* to remediate cadmium contaminated soil[J]. *Environmental Engineering*, 2020, 41(2):483-489.

[34] 傅校锋, 刘杰, 龙玉梅, 等. 强化青菰修复镉污染土壤的柠檬酸施用方式优化试验研究[J]. *土壤*, 2020, 52(1):153-159.

FU X F, LIU J, LONG Y M, et al. An experimental study on the optimization of citric acid application method for strengthening the argentea remediating cadmium contaminated soil[J]. *Soil*, 2020, 52(1):153-159.

[35] 刁静茹, 赵保卫, 马锋锋, 等. 螯合型表面活性剂强化黑麦草修复 Cd 污染水体[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(5):2238-2245.

DIAO J R, ZHAO B W, MA F F, et al. Chelating surfactants

strengthen ryegrass to repair Cd polluted water bodies[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(5):2238-2245.

[36] 赵述华, 张太平, 陈志良, 等. 稳定化处理砷污染土壤对 3 种修复植物的生态效应[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(9):3925-3932.

ZHAO S H, ZHANG T P, CHEN Z L, et al. Ecological effects of stabilizing arsenic-contaminated soil on three remediation plants[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(9):3925-3932.

[37] 彭婧, 蔡婧, 林初夏. 超积累植物和化学改良剂联合修复锌镉污染土壤后的微生物特征[J]. *生态环境*, 2005, 14(5):654-657.

PENG J, CAI J, LIN C X. Microbial characteristics of hyperaccumulators and chemical amendments combined to remediate soil contaminated by zinc and cadmium[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(5):654-657.

[38] 周鸣, 汤红妍, 朱书法, 等. EDTA 强化电动力学修复重金属复合污染土壤[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(3):1198-1202.

ZHOU M, TANG H Y, ZHU S F, et al. EDTA enhanced electrokinetics to remediate soil contaminated by heavy metals[J]. *Environmental Engineering Journal*, 2014, 8(3):1198-1202.

[39] 吴桐. 电动修复铬污染高岭土及铬渣污染土试验研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2013.

WU T. Experimental study on electric remediation of chromium-contaminated kaolin and chromium-contaminated soil [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.

[40] Yuan L, Li H, Xu X, et al. Electrokinetic remediation of heavy metals contaminated kaolin by a cnt-covered polyethylene terephthalate yarn cathode[J]. *Electrochimica Acta*, 2016, 213:140-147.

Research Progress on Chemical Remediation and Strengthening Methods of Heavy Metal Contaminated Soil in Mining Areas

Duan Ailing, Yang Shujun, Han Zhangxiong, Zhang Shuxiong, Wang Siyuan, Li Min
(Geological Engineering Exploration Institute of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu, China)

Abstract: With the intensification of mining activities, the problem of soil pollution in mining area becomes more and more serious. Nowadays, the main methods include physical remediation, chemical remediation, bio-remediation and so on. Among them, chemical remediation method is efficient, fast, easy to combine with other methods to strengthen remediation, and has a good application prospect in synergistic effect. Based on the research status and existing problems of chemical remediation, this paper summarizes the research hotspots of chemical remediation combined with other methods, and concludes that current chemical remediation should be combined with other methods to strengthen remediation, so as to ensure that the remediation process can reduce the secondary pollution of soil caused by chemical substances.

Keywords: Mine soil; Heavy metal pollution; Pollution remediation; Strengthen remediation