

超累积植物修复矿区土壤重金属污染研究进展

李吉锋^{1,2}

1. 渭南师范学院 化学与材料学院, 陕西 渭南 714099;
2. 陕西省河流湿地生态环境重点实验室, 陕西 渭南 714099

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2020)05-0138-06
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2020.05.019

摘要 介绍了矿区土壤重金属污染的修复方法, 重点介绍了植物修复概念和超累积植物。对国内矿区土壤重金属污染植物修复研究中发现的本土超累积植物进行了较为详细介绍, 梳理出部分适合推广应用的修复植物。对于发现的现有的超累积植物存在的问题进行了总结。

关键词 矿区; 重金属污染; 超累积植物; 研究进展

土壤是人类赖以生存和发展的基本条件, 也是农作物生长的重要基础条件, 影响着国家的食品安全和人们的生命健康。然而, 随着工业化的发展和城市化进程的加快, 各种污染对土壤的危害不断加重。近年来, 土壤重金属的累积已是客观存在的事实, 尤其是矿区土壤重金属污染近20年来备受关注^[1-2]。矿区土壤重金属污染主要来自金属矿山井下废水、选矿废水、冶炼厂废水、废弃矿井及用地、废弃低品质矿石等, 以重金属Hg、Pb、Cd、Cr、As、Cu、Zn、Mn等为主要特征。

1 土壤重金属污染修复方法及优缺点

重金属对土壤的危害是长期的、严重的、紧迫的, 急需修复, 但其修复难度又非常之大^[3]。目前矿区土壤重金属污染修复常用的技术主要有物理修复、化学修复和生物修复。

(1) 物理修复技术。主要有客土工程、电动修复、电热修复和土壤淋洗4种。客土工程通常使用肥力较高、质地较好、污染物质少的干净土壤替代已被污染的土壤, 并转运污染土壤, 使污染区域生态环境快速修复。电动修复技术是指在土壤中插入电极, 导入低强度直流电, 土壤重金属随着毛细孔溶液以电渗透方式定向移动至土壤表层, 从而将其从土壤中除去。电热修复技术主要是针对部分具有低熔点、易挥发特性的重金属, 利用高频电压对土壤加热, 使土壤重金属(如

Hg) 受热挥发离开土壤, 达到去除土壤中重金属的目的。电热修复仅对易挥发重金属效果好, 且挥发出的重金属易造成二次污染。土壤淋洗法主要采用淋洗剂与土壤重金属结合, 通过萃取、解吸、置换、活化等作用将重金属从土壤转移到溶液中, 再进行水土分离, 使重金属从土壤中洗脱、隔离、移除的办法。当污染土壤范围较小时可以采用物理方法修复, 污染面积大时无法采用物理修复技术。

(2) 化学修复技术。主要是指向污染土壤加入化学稳定药剂, 通过吸附、氧化还原、络合/螯合、共沉淀等作用, 调节和改变重金属在土壤中的赋存形态, 减弱其在土壤环境中的生物有效性和迁移性, 从而降低重金属对动植物的毒害作用的技术。化学修复法要严格控制好添加稳定剂量和实验条件, 否则反而容易造成二次化学污染, 另外, 化学修复法没有将重金属从土壤中完全去除, 只是改变了其形态以降低其危害。

(3) 生物修复技术。有植物修复、动物修复和微生物修复。植物修复技术是一种利用植物对某些化学元素的强忍耐、高积累或易分解的生理特性, 并结合与其共存微生物体系进行吸收、降解、挥发和富集环境污染物的技术方法; 动物修复技术是利用某些动物(如蚯蚓和鼠类) 富集土壤中的重金属, 从而在一定程度上降低污染土壤中重金属的含量。动物修复技术操作容易, 成本低, 但仅适用于低浓度重金属污染土壤, 治理

收稿日期: 2020-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(41401134); 渭南师范学院科研项目(2019JYKX020)。

作者简介: 李吉锋(1977-), 男, 汉族, 山东青岛人, 教授, 理学硕士, 主要从事环境分析。

效率低;微生物修复技术是由于微生物富含多种强有力的重金属螯合物质(如肽聚糖、脂多糖等),对重金属具有吸收、沉淀、氧化和还原等作用,可降低土壤中重金属的毒性。微生物修复技术对土壤扰动少,成本低,可一定程度改良土壤理化性质,但微生物易受各种环境因素的影响,培育、驯化难度大,周期长,且目前研究的微生物专一性强,对复合污染土壤难以推广应用。

(4)多种修复技术联用。基于土壤重金属污染面积广、污染元素种类复杂,单一使用某一种修复技术难以达到完全治理修复目的,联合使用多种修复技术可以弥补单一修复技术的不足,取长补短,充分发挥各技术的优势。

土壤重金属污染植物修复因具有治理效果永久、治理过程原位、治理成本低廉、环境兼容、后期处理简易等优点近些年来受到了广大科研工作者的关注。

2 土壤重金属污染的植物修复及超累积植物

植物修复是在 1977 年由 Brooks^[4] 提出超累积植物概念、1983 年 Chaney 提出利用超累积植物消除土壤重金属污染思想基础上发展起来的一种安全廉价的土壤污染治理技术,可以用于土壤有机污染物的治理,主要用于土壤重金属污染的治理,是通过植物对所生长的土壤中重金属的固定、吸收富集或者挥发等形式影响重金属在土壤中的迁移或者降低其在土壤中的含量,以达到恢复土壤正常功能目的。植物修复技术包括植物固定、植物挥发和植物萃取三种方式。植物固定是指通过植物根系的吸收、螯合、沉淀或还原作用,使金属污染物转变为低毒性形态,固定于根系和根际土壤中,降低其迁移作用和生物风险,而非降低其在土壤含量,用于植物固定的应该是对重金属污染有强忍耐的植物。植物挥发是利用植物将污染物(如 Hg 和 Se)吸收到体内后将其转化为气态物质释放到大气中从而减轻土壤污染的方法,植物挥发修复方法目前适用范围较窄;植物萃取是利用植物从土壤中吸收金属污染物并在植物地上部分富集,通过将收获后植物进行处理降低土壤中重金属的含量的方法,这种植物也叫重金属超累积植物或者重金属超富集植物。植物的重金属超富集能力一般用富集系数 *BAC* (biological accumulating coefficient) 或者转移系数 *BTC* (biological transfer coefficient) 描述。

$BAC = \text{植物体(或器官)内污染物浓度} / \text{土壤内污染浓度}$ (1)

$BTC = \text{地上部分重金属含量} / \text{根部重金属含量}$ (2)

富集系数越大,说明植物富集重金属的能力越强;转移系数越大,说明植物从根部向地上部分运输重金

属的能力越强,对植物的提取修复越有利。一般植物对某种重金属的富集系数和转移系数大于 1,认为该种植物对该重金属具有超累积能力。

除了富集系数和转移系数外,国际上一般要求超累积植物叶片或地上部干重含 Mn、Zn 达到 10 000 μg/g, Cd 达到 100 μg/g, Pb、Cu、Cr、Co、Ni 等达到 1 000 μg/g 及以上。

理想的重金属超累积植物应具备以下几个特性:是重金属耐受植物,能同时富集多种重金属,生长周期短且生物量大,抗虫抗病能力强。目前国内外发现的对重金属具有超积累能力的植物有约 700 多种,但是一般生物量小、生长缓慢,且非本土植物直接种植容易导致生物入侵危害。对于超富集植物的研究国外起步早,国内研究相对较少,国内学者对云贵川、湖南、两广一带矿区本土野生重金属超累积植物研究相对多一些,但是目前发现的富集效果比较好的本土野生植物仍旧太少。

3 国内矿区土壤重金属污染修复超累积植物的筛选

国内矿区土壤重金属污染修复超累积植物的筛选主要通过两种方式:盆栽实验或者矿区本土植物筛选。盆栽植物主要是对耐受植物或者超富集植物在人工条件下进行测试,分析其是否适合在某些重金属污染区域作为耐受植物推广种植或者用于某种或者某些重金属的富集,该方法所采用的实验室实验结果往往和野外实际应用结果存在一定差距,一般限于前期探索性实验。矿区本土筛选的植物因为适用性强、生物危害性小受到更多重视。

根据国内各地科技工作者相关调查研究结果汇总,结合各矿伴生元素情况,汇总以下常见矿区易产生的重金属污染,见表 1。常见的矿区重金属污染主要包括 Pb、Cd、Cr、As、Hg、Cu、Mn 和 Zn 等的污染。

表 1 国内不同矿区常见的污染性重金属

矿区	常见污染性重金属
铅锌矿	Pb、Zn、Cd、Cu、Mn、Hg、Ni、Fe 等
煤矿	Cd、Cu、Pb、Zn、Cr、Co、Ni、Mn、V 等
锡矿	Sn、Sb、Cu、Zn、Pb、As、Cd、Cr、Mn、Hg 等
铜矿	Cu、Fe、Zn、Pb、Mn、As、Cd 等
铁矿	Cd、Zn、Cu、Mn、Cr、Pb、As、Ti、V、Co、Ni 等
金矿	As、Hg、Cu、Cd、Zn、Pb 等
钨矿	W、Sn、Cd、As、Cr、Pb、Cu、Zn、Mo 等
锰矿	Mn、Cd、Zn、Pb、Cu、Cr、As 等
锑矿	Sb、Cd、As、Hg、Pb、Cr、Zn、Cu 等
砷矿	As、Sb、Ni、Hg 等

本文主要针对国内矿区发现的对重金属能够超累积的本土野生植物进行总结。

3.1 铅锌矿区

刘影等^[5]用四川甘洛铅锌矿区土壤做盆栽试验,研究紫色皇竹草、甜象草、柳枝稷 3 种能源草对 Pb、Zn、Cd、Cu 的富集能力。研究发现 3 种能源草在铅锌矿区重金属污染土壤中具有较好的适应性;柳枝稷对 Pb、Zn 表现出较强的富集能力,虽然无法作为超富集植物,但是可作为先锋植物修复 Pb、Zn 污染土壤;紫色皇竹草和甜象草对 Cd 的转运系数和富集系数分别达到 0.956 5 和 1.021 4,可作为修复 Cd 污染土壤的先锋物种,而且以上植物收获后可直接应用于生物质产能,具有一定经济性。刘月莉等^[6]分析了四川凉山州甘洛县铅锌矿区生长的 13 种优势植物对 Pb、Zn、Cd、Cr、Cu 的富集能力及其富集特性,发现 13 种植物体内的 Pb 含量均高于普通植物 10 倍以上,具有修复矿区土壤铅污染的潜力。接骨草的转运系数和富集系数都大于 1,满足 Pb 超富集植物的基本特征。Zn 在凤尾蕨、细风轮菜、大火草、蔗茅、小飞蓬和牛茄子中含量较高。小飞蓬和紫茎泽兰的 Cd 含量较一般植物高出 17 ~ 61 倍,紫茎泽兰的转运系数与富集系数均大于 1,对 Cd 的吸收特性值得进一步研究。陈红琳等^[7]采取野外调查与实验分析相结合的方法,对四川汉源 3 个典型矿区内 17 种优势植物对 Pb 和 Zn 的吸收富集能力进行了分析。尽管所有植物均未达到超富集植物临界含量要求,但部分植物可以作为 Pb 和 Zn 的耐性植物,其中蔗茅、大乌泡、新樟、籽粒苋和曼陀罗 5 种植物,可以作为潜在的 Pb 和 Zn 污染修复物种。路畅等^[8]发现广西融安泗顶铅锌矿区优势植物对重金属元素的富集能力并不强,只有蜈蚣草对 Cr 的富集系数、转移系数大于 1,可作为潜在的超富集植物。杨肖娥等^[13]对浙江衢州某铅锌矿通过野外调查和温室实验发现景天科植物东南景天对土壤中高含量的 Zn 有很强的忍耐、吸收和积累能力,可以作为 Zn 超累积植物。原海燕等^[10]研究了南京市栖霞山铅矿区 4 种鸢尾属植物,发现马蔺地上部(叶、茎)Pb 质量分数达 $983 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,且转运系数大于 1,是潜在的 Pb 积累植物。邓小鹏等^[11]采集分析了湖南及江苏 8 个矿区或冶炼厂周边 4 种茄科植物的重金属富集能力,研究发现刺天茄对 Mn、Zn,尤其是 Cd 有较强的积累和转移能力;辣椒能将大部分 Cd 转移至地上部;龙葵对 Cd 有超积累能力,对 Pb、Mn 等重金属也具有较强的积累和转移能力。聂发辉等^[12]对湖南株洲市铅锌冶炼厂生产区生长的 8 种不同的植物进行了采样和调查,发现商陆体内 Cd 质量分数较高,生物量大,且呈现地上部的质量分数大于地下部的

规律。通过室外盆栽模拟试验验证,商陆茎及叶的 Cd 含量分别超过了 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 临界含量标准,富集系数和转移系数均大于 1,植物的生长未受到抑制。同时,利用吸收系数对商陆的 Cd 去除能力和富集特征进行了评价判断,证实商陆是一种 Cd 超积累植物。刘威等^[13]对湖南省郴州市桂阳县宝山矿区野外调查和温室试验,发现并证实宝山堇菜是一种 Cd 超富集植物。刘灿等^[14]调查了湖南湘西铅锌矿区植物组成,研究了尾矿区土壤及周围植物根部土壤的 Pb、Zn 和 Cd 含量,分析了在这些区域自然定居的 11 种优势植物体内的 3 种重金属元素的耐性、富集特性。结果表明,野菊花、狗尾巴草和五节芒 3 种植物地上部生物量较大且对某些重金属向地上部转运能力较强,对重金属污染土壤有一定的修复潜力;地枇杷的地上部 Cd 含量最大,达 152 mg/kg ,转运系数为 1.03,是潜在的 Cd 超富集植物。赵磊^[15]以内蒙古白音诺尔铅锌矿区生长的优势草本植物为筛选对象,通过野外调查和室内试验相结合方法,筛选出菊科蒿属中的密毛白莲蒿和白莲蒿是 Pb 超富集植物;自然条件下两种植物的地上部分对铅的积累量分别达到 $2\,264.47 \text{ mg/kg}$ 和 $1\,511.96 \text{ mg/kg}$,富集系数分别为 1.246 和 0.705;转运系数分别为 9.22 和 3.73。魏树和等^[16]对辽宁凤城青城子铅锌矿植物研究发现龙葵是一种 Cd 超富集植物。徐华伟等^[17]对甘肃省东南部某铅锌矿区野艾蒿重金属富集进行分析发现,野艾蒿对 Cu、Cd 富集、转运能力较强且耐重金属、生物量较大、生长速度快,作为重金属污染的修复植物具有较好的应用前景。Zhu 等^[18]对广西一铅锌矿研究发现野苘蒿、龙葵等对 Cd 有富集作用。Wan^[19]等对湖南铅矿在内的四个矿区研究发现,蜈蚣草和柔毛堇菜对多种重金属有较好的富集效果。

目前对铅锌矿区重金属污染植物修复研究较多,对铅锌矿重金属污染植物修复多集中在对矿区的 Pb、Zn、Cd、Cr 和 Cu 污染的修复,多数研究植物对目标重金属有一定富集或者转移能力,但是达不到作为超累积植物,能够作为超累积植物的有马蔺、接骨草、密毛白莲蒿和白莲蒿,对 Pb 有超富集能力;紫茎泽兰、宝山堇菜、龙葵和商陆对 Cd 有超富集能力;蜈蚣草对 Cr 有超富集能力;东南景天对 Zn 有超富集能力。

3.2 煤矿区

董祥英等^[20]对毕节市郊煤矿区排矸场的土壤优势木本植物进行了分析,发现亮叶桦和白杨对 Cd 修复能力强;白杨对 Cu、Co 修复能力强。亮叶桦和白杨对相应重金属的富集系数和转移系数均大于 1,可作为污染区土壤修复的优选木本植物。张前进等^[21]测定了淮南煤矿复垦区土壤中重金属含量,发现 12 种野生

草本植物对重金属富集系数加和值最高的为鬼针草、狗尾草及钻叶紫苑,除麦冬、狗尾草和钻叶紫苑外,其它9种植物对Cd、Cu、Cr、Ni、Zn和Pb都有较强的转移能力。综合富集系数、转运系数、物种组成、种间适应性、空间结构及植物组合的观赏性推荐菊芋和鬼针草为修复植物。陈昌东等^[22]测定河南省平顶山市某煤矿废弃地土壤重金属污染状况及优势植物对重金属元素的富集和转移能力。苍耳对Cd和Cu的生物富集系数和生物转移系数均大于1,对Cu的生物转移系数高达4.939。狗尾草对Cd、Cr、Pb的生物转移系数均大于1,且对Cr的生物富集系数大于1,对Pb的生物转移系数高达3.883。蒙古蒿对Cr和Pb的生物转移系数均大于3,且对Cd的生物富集系数大于1。猪毛蒿对Cd的生物富集系数和生物转移系数均大于1。苍耳、猪毛蒿、蒙古蒿和狗尾草具有较强的富集重金属的能力,可作为治理该地区环境污染的目标植物。

3.3 锡矿区

米艳华等^[23]在云南个旧锡矿区利用大田种植蜈蚣草、糯玉米、板蓝根和高粱,研究其对重金属As、Pb、Cd复合污染土壤的修复作用。蜈蚣草对As富集系数为 (1.74 ± 0.16) ,表现出较好富集特性。高粱秸秆、玉米秸秆、板蓝根Cd富集系数均大于1。综合考虑生物量和重金属吸收量,高粱秸秆对土壤中As、Pb、Cd的提取效率均高于其它3种植物。除Cd外,蜈蚣草对土壤重金属As、Pb的提取效率与高粱相当。综合修复效果、健康风险以及经济效益,建议引导种植较高抗性的高粱品种以及套种低累积高粱品种与蜈蚣草,作为滇南矿区重金属复合污染耕地边生产、边修复的土地安全利用模式。邱媛等^[24]对广西河池大厂锡矿区内的植被进行调查分析,通过测定植物叶片重金属Mn、Zn、Cu、As、Cd、Sn、Sb、Pb含量,综合考虑生物量和食品健康风险建议选择拐枣和樟树作为该矿区的植物修复的优选树种。吴桂容等^[25]研究发现广西水岩坝钨锡矿废弃地烂头山矿区芥菜对As、Cd、Pb富集系数均远大于1,不考虑经济效益,芥菜可以用于3种重金属的富集。

3.4 铜矿区

束文圣等^[26]对湖北铜绿山古冶炼渣堆进行了植被和土壤调查,首次报道了鸭跖草是Cu的超富集植物,Cu在地上部分和根部的质量浓度分别为1 034和1 224 mg·kg⁻¹。魏俊杰等^[27]研究了冀中某铜矿废弃地9种优势植物重金属富集特征。刺儿菜、虎尾草、葎草地下部分对Cu和As的富集能力较强,且在铜矿废弃地的长势表现很好,可作为Cu、As复合污染土壤的

生态恢复植物;狗尾草对Pb、野西瓜苗对Zn的富集能力和转运能力均较强,可作为铜矿区中Pb、Zn重金属离子污染的修复潜力植物;藜、鹅绒藤、益母草、甘菊对不同重金属离子分别表现为抗性或者耐性。Zhenghai Wang等^[28]发现马尾松和滇重楼对Cd富集能力较强,可作为潜在超累积植物进一步研究。

3.5 铁矿区

刘维涛等^[29]研究了南京某铁矿区11种树木的重金属吸收和分布特征,发现法国冬青对Cd、Zn的富集能力相对其它树木高,可用于修复土壤Cd、Zn污染。张晓薇等^[30]调查了辽阳弓长岭铁矿区土壤重金属污染情况以及当地自然生长优势植物对重金属的富集转移能力以及耐受性。根据调查结果,Cd、Cu和Zn为主要污染重金属,综合各采样点不同植物对以上重金属的富集系数和转移系数分析,桃叶蓼、狗尾草、鬼针草、茵陈蒿、小藜、三裂叶豚草具有较强修复Cd污染的潜能,其中以桃叶蓼修复能力最强(富集系数最高,为2.1636;转移系数最高,为15.20),桃叶蓼是一种新发现的Cd富集植物。一年蓬、狗尾草、山杨、三裂叶豚草具有修复Cu污染土壤的潜能,旱柳具有修复Zn污染土壤的潜能。

3.6 金矿区

李冰等^[31]对贵州烂泥沟金矿区生长的紫茎泽兰的重金属富集特性进行了分析,发现紫茎泽兰根、茎、叶对Cr的富集系数分别为3.286、9.532、8.191,转运系数为2.7;对Cd的富集系数分别为2.95、1.66、3.73,转运系数0.91;对其它重金属元素也有不同程度的吸收。紫茎泽兰对Cd、Cr具有超累积作用,可作为重金属污染修复超累积植物深入研究。

3.7 钨矿区

阳雨平等^[32]对湘南某钨矿区研究发现,一年蓬对Cd表现出较强的富集能力,对As、Cr、Cd、Zn、Pb存在一定转移能力;五节芒对Cd、Cr、Zn有一定富集能力,对Cd、Cr有较强的转移能力;小蓬草对Cd、Zn表现出较强的富集能力,对Zn、Cr有一定转移能力,但是没有发现对该地重金属具有明显超累积作用植物。结合土壤污染情况和现有野生植物修复能力,建议尾矿库、塘下河区域利用小蓬草和一年蓬进行原位修复,选厂和废石坝区域利用一年蓬和五节芒进行原位修复。

3.8 锰矿区

李有志等^[33]对湘潭锰矿区的野生植物资源进行调查,发现莎草地上、地下部分Mn含量均大于超富集

植物 $10\ 000\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的临界浓度,富集系数与转移系数均大于 1,具有超强的富集锰能力,可以作为 Mn 超富集修复植物。

3.9 铈矿区

余玮等^[34]通过野外调查分析了湖南冷水江铈矿区土壤的重金属含量以及矿区苎麻对 Sb、Cd、As 和 Pb 四种重金属的吸收与富集能力。苎麻叶和花混合样中的 Sb 最高达到 $1\ 103\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;苎麻体内的 Cd 含量均高于一般植物 2~10 倍,Cd 富集系数最高为 2.1,转运系数最高为 3;As 富集系数最高为 1.04,转运系数最高为 12.42。苎麻对复合重金属具有一定的耐性,可以作为复合污染修复植物潜在资源进行深入研究。

3.10 砷矿区

陈同斌等^[35]在湖南常德雄黄矿发现了蜈蚣草对 As 有超富集作用。中科院韦朝阳等^[36]在湖南砷矿区

也发现 As 超累积植物—大叶井口边草。

此外,白宏锋等^[37]通过野外调查发现自然条件下壶瓶碎米荠地上部 Cd 含量高且地上部与地下部 Cd 含量的比值为 1.13,富集系数的平均值为 209.10,而且壶瓶碎米荠生物产量高,因而其可以作为 Cd 超积累植物。张学洪等^[38]通过对广西某电镀厂附近的植物和土壤的野外调查,发现了李氏禾对铬具有超积累作用。多年生禾本科李氏禾叶片内平均铬含量达 $1\ 786.9\ \text{mg/kg}$,叶片内铬含量/根部土壤中铬含量最高达 56.83mg/kg 。结合李氏禾生长快、地理分布广、适应性强的特点,可以将其作铬污染环境超富集植物。薛生国等^[39]通过盆栽试验发现了垂序商陆对 Mn 有超累积作用。

表 2 总结了以上研究中有明确超累积作用的修复植物及对应的重金属,遗憾的是目前国内对于 Hg、Ni、Tl、Mo、Sn、Sb、V、Th、U 等污染性重金属具有明确修复作用植物研究较少。

表 2 有明确超累积作用的修复植物及对应的重金属

Table 2 The plants which have accumulation ability for heavy metals in the mine at home (BCF and TF > 1)

As	蜈蚣草(凤尾蕨科) 芥菜(十字花科) 大叶井口边草(凤尾蕨科) 苎麻(荨麻科)
Pb	接骨草(忍冬科) 芥菜(十字花科) 马蔺(鸢尾科) 密毛白莲蒿(菊科) 白莲蒿(菊科)
Cd	紫茎泽兰(菊科) 亮叶桦(桦木科) 芥菜(十字花科) 龙葵(茄科) 商陆(商陆科) 宝山堇菜(堇菜科) 苎麻(荨麻科) 桃叶蓼(廖科) 苍耳(菊科) 猪毛蒿(菊科) 菊芋(菊科) 鬼针草(菊科) 壶瓶碎米荠(十字花科)
Cr	紫茎泽兰(菊科) 蜈蚣草(凤尾蕨科) 李氏禾(禾本科) 狗尾草(禾本科)
Cu	白杨(杨柳科) 鸭拓草(鸭拓草科) 苍耳(菊科)
Zn	东南景天(景天科)
Mn	商陆(商陆科) 莎草(莎草科) 木荷(山茶科)
Co	白杨(杨柳科)

4 结论

通过以上对国内部分研究人员的工作总结及表 2 发现,虽然近些年来国内对于矿区本土重金属修复植物研究逐渐增多,但是获得的真正有超富集能力的本土野生植物还是太少。目前发现的 Cd 的超富集植物最多,其次是 As 和 Pb,可能跟这 3 种重金属污染危害相对大、研究人员开展的研究相对较多有关系。Cu、Cr、Mn 的超富集本土野生植物发现其次多,Zn 和 Co 的超富集本土野生植物发现更少,一般来说 Zn 污染的危害相对较小。Hg、Ni、Tl、Mo、Sn、Sb、V、Th、U 等重金属超累积植物研究工作非常少。目前发现的重金属超富集植物一般是对一种或者几种重金属富集能力较强,对复合重金属污染超富集能力强的植物相对较少,这会影响到修复时的难度,需要增加种植植物种类。部分获得的重金属超富集植物虽然超富集能力和转移能力较强,但是有的生物量较小或者生长缓慢,实际重金属治理效果受到影响。另外,具有一定经济效益的重

金属超富集植物太少,如果超富集植物本身具有较大的经济价值,这会增加环境治理者选用该植物的动力,因而希望研究工作者在重视植物的超累积能力和生物量、生长习性等关注点同时,一定要重视植物本身的经济性。

参考文献:

- [1] 甘风伟,王菁菁. 有色金属矿区土壤重金属污染调查与修复研究进展[J]. 矿产勘查,2018,9(5):1023-1030.
- [2] 刘敬勇,赵永久. 矿山资源开发引起的环境污染效应及其控制对策[J]. 矿产保护与利用,2007(5):47-50.
- [3] 李若愚,侯明明,卿华,等. 矿山废弃地生态恢复研究进展[J]. 矿产保护与利用,2007(1):50-54.
- [4] BAKER A J M, BROOKS R R, PEASE A J, et al. Studies on copper and cobalt tolerance in three closely related taxa with in the genus *Silene* L. (Caryophyllaceae) from Zaire[J]. Plant and Soil,1983,73:377-385.
- [5] 刘影,伍钧,杨刚,等. 3 种能源草在铅锌矿区土壤中的生长及其对重金属的富集特性[J]. 水土保持学报,2014,28(5):291-296.
- [6] 刘月莉,伍钧,唐亚,等. 四川甘洛铅锌矿区优势植物的重金属含量[J]. 生态学报,2009,29(4):2020-2026.
- [7] 陈红琳,张世熔,李婷,等. 汉源铅锌矿区植物对 Pb 和 Zn 的积累及耐性研究[J]. 农业环境科学学报,2007,26(2):505-509.

- [8] 路畅,王英辉,杨进文,等. 广西铅锌矿区土壤重金属污染及优势植物筛选[J]. 土壤通报,2010,41(6):1471-1475.
- [9] 杨肖娥,龙新宪,倪吾钟,等. 东南景天(*Sedum alfredii*H) - 一种新的锌超累积植物[J]. 科学通报,2002,47(13):1003-1006.
- [10] 原海燕,黄苏珍,郭智. 4种鸢尾属植物对铅锌矿区土壤中重金属的富集特征和修复潜力[J]. 生态环境学报,2010,19(7):1918-1922.
- [11] 邓小鹏,彭克俭,陈亚华,等. 4种茄科植物对矿区污染土壤重金属的吸收和富集[J]. 环境污染与防治,2011,33(1):46-51.
- [12] 聂发辉. 镉超富集植物商陆及其富集效应[J]. 生态环境,2006,15(2):303-306.
- [13] 刘威,束文圣,蓝崇任. 宝山董菜(*Viola boashanensis*) - 一种新的福超富集植物[J]. 科学通报,2003,48(19):2046-2049.
- [14] 刘灿,邹冬生,朱佳文. 湘西铅锌矿区土壤和植物重金属污染现状[J]. 安徽农业科学,2011,39(35):21743-21746.
- [15] 赵磊. 白音诺尔铅锌矿区超富集植物筛选及其耐性研究[D]. 内蒙古农业大学,2009.
- [16] 魏树和,周启星,王新. 超累积植物龙葵及其对镉的富集特征[J]. 环境科学,2005,26(3):167-171.
- [17] 徐华伟,张仁陟,谢永. 铅锌矿区先锋植物野艾蒿对重金属的吸收与富集特征[J]. 农业环境科学学报,2009,28(6):1136-1141.
- [18] ZHU GX, XIAO HY, GUO QJ, et al. Heavy metal contents and enrichment characteristics of dominant plants in wasteland of the downstream of a lead-zinc mining area in Guangxi, Southwest China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018,15130(4):266-271.
- [19] WAN XM, LEI M, YANG JX, et al. Two potential multi-metal hyperaccumulators found in four mining sites in Hunan Province, China[J]. *Catena*, 2017, 148(1): 67-73.
- [20] 董祥英,邓锋,文竹,等. 毕节煤矸石污染地优势木本植物土壤修复能力研究[J]. 环境科学与技术,2016,39(12):173-177.
- [21] 张前进,陈永春,安士凯. 淮南矿区土壤重金属污染的植物修复技术及植物优选[J]. 贵州农业科学,2013,41(4):164-167.
- [22] 陈昌东,张安宁,腊明,等. 平顶山矿区矸石山周边土壤重金属污染及优势植物富集特征[J]. 生态环境学报,2019,28(6):1216-1223.
- [23] 米艳华,雷梅,黎其万,等. 滇南矿区重金属污染耕地的植物修复及其健康风险[J]. 生态环境学报,2016,25(5):864-871.
- [24] 邱媛,何际泽,杨汉彬,等. 矿区常见乔木叶片重金属特征及其修复应用[J]. 生态环境学报,2013,22(1):151-156.
- [25] 吴桂容,解庆林,曲芬霞,等. 广西水岩坝钨锡矿废弃地重金属污染与生态修复[J]. 贵州农业科学,2012,10(1):171-174.
- [26] 束文圣,杨开颜,张志权,等. 湖北铜绿山古铜矿冶炼渣植被与优势植物的重金属含量研究[J]. 应用与环境生物学报,2001,7(1):7-12.
- [27] 魏俊杰,张妍,曹柳青,等. 冀中某铜矿废弃地土壤及优势植物重金属特征评价[J]. 矿产保护与利用,2017(1):90-97.
- [28] WANG ZH, LIU XY, QIN HY. Bioconcentration and translocation of heavy metals in the soil-plants system in Machangqing copper mine, Yunnan Province, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, 200(5):159-166.
- [29] 刘维涛,张银龙,陈喆敏,等. 矿区绿化树木对镉和锌的吸收与分布[J]. 应用生态学报,2008,19(4):752-756.
- [30] 李晓薇,王恩德,吴瑶. 辽阳弓长岭铁矿区优势植物的重金属耐性评价[J]. 金属矿山,2018,(2):172-178.
- [31] 李冰,张朝晖. 烂泥沟金矿区紫茎泽兰对重金属的富集特性及生态修复分析[J]. 黄金,2008,29(8):47-50.
- [32] 阳雨平,杨田杰,陈国国. 湘南某钨矿区土壤重金属污染评价与植物修复研究[J]. 安全与环境学报,2019,19(5):1752-1760.
- [33] 李有志,罗佳,张灿明,等. 湘潭锰矿区植物资源调查及超富集植物筛选[J]. 生态学杂志,2012,31(1):16-22.
- [34] 余玮,揭雨成,邢虎成,等. 湖南冷水江铋矿区苎麻对重金属的吸收和富集特性[J]. 农业环境科学学报,2010,29(1):91-96.
- [35] 陈同斌,韦朝阳,黄泽春,等. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征[J]. 科学通报,2002,47(3):207-210.
- [36] 韦朝阳,陈同斌,黄泽春,等. 大叶井口边草 - 一种新发现的富集砷的植物[J]. 生态学报,2002,22(5):777-778.
- [37] 白宏锋,李晓明. 超累积植物壶瓶碎米荠的镉富集[J]. 江苏农业学报,2012,28(1):76-79.
- [38] 张学洪,罗亚平,黄海涛,等. 一种新发现的湿生铬超累积植物 - 李氏禾(*Leersia hexandra* Swartz) [J]. 生态学报,2006,26(3):950-953.
- [39] 薛生国,刘丰豪,吴川,等. 超富集植物垂序商陆的锰吸收动态研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2012,43(2):424-428.

Research Progress of Heavy Metal Pollution Hyperaccumulator in Mining Area at Home

LI Jifeng^{1,2}

1. College of Chemistry and Material Science, Weinan Normal University, Weinan 714099, Shaanxi, China;

2. Key Laboratory for Eco-environment of Multi-River Wetlands in Shaanxi Province, Weinan 714099, Shaanxi, China

Abstract: The restore methods of heavy metal pollution in mining area are reviewed. The plant restore method and hyperaccumulator are introduced on emphases. The hyperaccumulator of native country is discussed. Some hyperaccumulators suit for extension planting are given. The questions on the hyperaccumulators which have been found are put forward.

Key words: mining area; heavy metal; hyperaccumulator; reseach progress

引用格式:李吉锋. 超累积植物修复矿区土壤重金属污染研究进展[J]. 矿产保护与利用,2020,40(5):138-143.

Li JF. Research progress of heavy metal pollution hyperaccumulator in mining area at home[J]. *Conservation and utilization of mineral resources*, 2020, 40(5): 138-143.

投稿网址: <http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn