

## 铅锌矿区生态环境现状及其绿化修复研究进展

姚丰平<sup>1</sup>, 李贺鹏<sup>2</sup>, 吴益庆<sup>1</sup>, 张飞英<sup>2</sup>, 柏明娥<sup>2</sup>, 倪荣新<sup>3</sup>, 徐高福<sup>4</sup>, 张建和<sup>5</sup>

(1. 浙江省庆元县永青国有林场, 浙江 庆元 323800; 2. 浙江省林业科学研究院, 浙江 杭州 310023; 3. 丽水市林业技术推广总站, 浙江 丽水 323000; 4. 浙江省淳安县新安江开发总公司, 浙江 淳安 311700; 5. 浙江元成园林集团股份有限公司, 浙江 杭州 310016)

**摘要:** 为实现铅锌矿山开发利用与生态环境保护相协调发展, 为铅锌矿区重金属污染生态治理提供技术支持, 文章在综述了铅锌矿山开采及加工冶炼过程往往导致矿区地质环境恶化、土壤环境污染、水资源污染与破坏等问题, 对 Pb、Zn、Cr、Cu、Hg、As 等重金属具有超富集潜力的植物种类进行归类概括, 铅锌矿或尾矿环境中能够生长且对 Pb 有超富集潜力的植物有 30 种, 对 Zn 有超富集潜力的植物 14 种, 对 Pb、Zn 两种重金属同时具有超富集潜力的植物有 23 种, 有 14 种植物对 3 种及以上重金属元素有超富集潜力, 其中, 同时对 Pb、Zn、Cd 3 种重金属具有超富集潜力的植物有 10 种, 对其他重金属 (含 Pb 或 Zn) 的超富集潜力植物有 34 种。最后, 分析了铅锌矿山绿化与生态修复研究进展和存在问题, 提出分类指导铅锌矿山绿化、广泛选择生态绿化树种、注重乔灌木的有效配置、注意客土改良配套种植等措施, 是当前铅锌矿山绿化生态修复的发展治理方向。

**关键词:** 铅锌矿山; 重金属污染; 植物修复; 生态绿化

**中图分类号:** S731.6      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-3776 (2022) 03-0101-11

## Research Progress on Ecological Environment and Phytoremediation in Lead-zinc Mining Areas

YAO Feng-ping<sup>1</sup>, LI He-peng<sup>2</sup>, WU Yi-qing<sup>1</sup>, ZHANG Fei-ying<sup>2</sup>, BAI Ming-e<sup>2</sup>, NI Rong-xin<sup>3</sup>, XU Gao-fu<sup>4</sup>, ZHANG Jian-he<sup>5</sup>

(1. Qingyuan Yongqing State-owned Forest Farm of Zhejiang, Qianyan 323800, China; 2. Zhejiang Academy of Forestry, Hangzhou 310023, China; 3. Lishui Forestry Extension Station of Zhejiang, Lishui 323000, China; 4. Chun'an Xin'anjiang Development Corporation of Zhejiang, Chun'an 311700, China; 5. Yuancheng Garden Group Co. Ltd., Hangzhou 310016, China)

**Abstract:** Reviews were made on destruction of geological environment, heavy metal pollution of soil and water by exploitation of lead-zinc mine. Presentations were made on different plant species with potential hyper accumulation of heavy metal (such as Pb, Zn, Cr, Cu, Hg and As) for restoration of contaminated mining areas. Challenges of ecological restoration in lead-zinc mining areas were discussed. Countermeasures for phytoremediation of lead-zinc mining areas were proposed such as restoration with different site conditions, selection of ecological tree species, rational distribution of arbor-shrub-herb, improvement by transported soil.

**Key words:** lead-zinc mine; heavy metal pollution; phytoremediation; ecological greening

我国是铅锌矿生产大国, 2013 年, 铅、锌总产量共计 987 万 t, 铅、锌产量分别占世界总产量的 42.2% 和 40.3%<sup>[1]</sup>。全国有 2 347 处铅锌矿产地, 主要分布在河南、湖南、云南、湖北和江西 5 省<sup>[2]</sup>, 浙江、福建、海南、广东、广西、贵州、四川、辽宁、甘肃等省也产, 几乎遍及全国。铅锌矿产的开采利用给国民经济和社会发展

收稿日期: 2021-11-22; 修回日期: 2022-03-17

基金项目: 浙江省省属科研院所专项 (2016F30011) 资助

作者简介: 姚丰平, 工程师, 从事造林绿化技术研究; E-mail: qyfping@163.com。通信作者: 李贺鹏, 博士、副研究员, 从事植物多样性保护与植物生理生态研究; E-mail: 8656141@qq.com。

提供了大量的物质财富,同时也给生态环境带来了负面影响,不仅森林植被遭到破坏,景观破碎<sup>[3]</sup>,还会诱发塌陷等地质灾害及环境重金属污染等问题<sup>[4-7]</sup>。许多研究表明植物对重金属具有良好的富集和修复作用<sup>[8-10]</sup>,在铅锌矿区重金属耐性和富集植物筛选及植物修复研究也取得了一定的进展<sup>[11-12]</sup>。因此,利用绿色植物对铅锌矿区进行生态治理,不仅有利于恢复矿区森林植被和改善矿区绿化环境,而且也是实现对矿区重金属污染进行修复的一条有效路径。但是过量重金属污染的立地条件会引起植物生长不良或毒害作用<sup>[13-14]</sup>,这给铅锌矿区的绿化增加了很大的技术难度,甚至面临新的挑战。

为实现铅锌矿山开发利用与生态环境保护相协调发展,本文在分析铅锌矿山地质环境和重金属污染问题基础上,着重综述近 20 年来有关铅锌矿山绿化与生态修复的研究进展,以期对铅锌矿区重金属污染生态治理提供技术支持。

## 1 铅锌矿山主要生态环境问题

铅锌矿山开采及加工冶炼过程往往导致矿区地质环境恶化、土壤环境污染、水资源污染与破坏等,这一系列矿山环境问题已经成为制约矿区可持续发展、威胁人民生命财产安全的重大问题。

### 1.1 地质环境恶化

矿山地质环境问题是采矿活动对地质环境产生的破坏现象,主要包括矿区地面塌陷、地裂缝、崩塌、滑坡、泥石流、含水层破坏、地形地貌景观破坏等<sup>[15]</sup>。我国铅锌矿的开采多为硐采,也有露采。硐采的生产工艺一般为表土剥离、巷道掘进、钻孔、爆破、采掘及运输(包括井下运输和提升)、矿石堆场、外运至选矿厂;有些矿山为采选联合体,将矿石直接运送至选矿厂,并将尾矿排放于专门设置的尾矿库。由此带来一系列的地质环境问题,诸如采空区可能引发的地裂缝和地面塌陷,道路开拓和办公生活区等临时构筑物引起的表土剥离和植被破坏及地形地貌景观破坏,大量的废石堆场压占土地并破坏植被引起的水土流失,固体废矿渣堆放可能引发的滑坡和泥石流等地质灾害,开采时对地下水进行疏干排水引发地下水含水量和结构变化而导致地下水资源均衡失调,选矿生产加工产生的大量尾矿渣堆置在尾矿库中可能引发尾矿坝破损坍塌而影响下游农田和水利设施甚至威胁居民的生命财产安全等<sup>[16-19]</sup>;此外,还包括露天开采矿山导致边坡的崩塌、滑坡等地质灾害隐患和稳定性问题,以及采矿活动引发的水土体环境污染等生态问题<sup>[20-21]</sup>。

亢亢等<sup>[22]</sup>采用层次分析法(AHP)对位于云南省昭通市彝良县毛坪镇境内矿区面积为 14.41 km<sup>2</sup>的毛坪铅锌矿山进行地质环境质量的模糊评判,根据地质背景、地质灾害、水土环境破坏、矿产开发、水文植被五个因素的 23 个指标,将整个矿区的地质环境质量划分为好、较好、较差和差 4 个等级。刘玥等<sup>[23]</sup>以陕南铅锌矿为例,根据地质环境、地质灾害、环境污染、矿产开发、水文植被五个因素的 18 个指标进行地质环境质量的模糊评判,将陕南铅锌矿的 8 个矿点的地质环境质量分别划定 5 个优、1 个良和 2 个差。邓锟<sup>[24]</sup>利用遥感技术和人机交互式解译方法,对陕西省宝鸡市凤县铅锌矿区 33 处矿山的地质环境提取废渣和废石堆及尾矿库等固体废弃物堆场、泥石流和塌陷坑及滑坡等地质灾害点、挡墙和拦坝及排水沟渠治理三个方面的信息,进行了地质环境问题的调查研究。这些研究均为铅锌矿山地质环境保护和恢复治理规划提供了依据。

### 1.2 土壤污染

随着铅锌工业的高速发展,矿产资源的开采与加工往往使其周边土壤遭受 Pb、Zn、Cd 等重金属的严重污染<sup>[25-26]</sup>。黄顺红等<sup>[27]</sup>测得湖南某铅锌冶炼厂周边土壤 Pb、Cd、As 的平均含量分别达到 2 908.27、434.78、320.48 mg·kg<sup>-1</sup>,远超国家标准限值,污染程度为废渣堆场>住宅区>闲置区>菜地。孙建德<sup>[28]</sup>对湖南郴州某铅锌矿区 94 个表层土样的重金属含量进行分析,发现 Pb、Zn、Cd、As 的平均含量分别为 876.83、1 018.83、7.69、89.73 mg·kg<sup>-1</sup>,均存在较大的安全风险。张振磊等<sup>[29]</sup>测得海南省昌化铅锌矿 56 个废弃土地土壤样品的 Pb、Zn、Cd 含量分别达 3 222.50、1 849.02、18.17 mg·kg<sup>-1</sup>,均超过国家三级标准值。覃朝科等<sup>[30]</sup>测得广西某废弃铅锌矿区 73 个采样点的土壤 Pb、Zn、Cd、Hg、As 平均含量分别为 232.92、1 967.71、10.27、0.86、11.56 mg·kg<sup>-1</sup>,最大值分别达 3 099.6、19 093、100.7、5.76、68.2 mg·kg<sup>-1</sup>,污染非常严重。谢永等<sup>[31]</sup>在甘肃徽洛坝铅锌矿测得坑口废渣

台地废弃 3 a 的土壤 Pb、Zn、Cd 含量分别达 6 298、13 420、2.078 mg·kg<sup>-1</sup>。王志国<sup>[32]</sup>对浙江省庆元县废弃铅锌矿地质环境综合治理前的 10 份土壤样品分析表明, 废土场和尾矿库土壤均有不同程度的 Pb、Zn、Cd 含量超标, 其中, Pb 含量平均超标 750%, Zn 含量平均超标 550%, Cd 含量平均超标 18 倍, 矿区泥石流流通区的 Pb 和 Cd 含量分别超标 6 倍和 10 倍, 污染十分严重。

### 1.3 水体污染

铅锌矿大规模开采会使周边水环境遭受不同程度的重金属污染。李永华等<sup>[33]</sup>从铅锌矿厂部开始沿小溪顺流而下采集了 3 个饮用和 9 个非饮用的地表水样进行重金属含量测定, 结果显示水样中的 Pb 含量为严重污染, Zn 含量为轻度污染, Hg 含量为中度污染。刘玥等<sup>[34]</sup>分别对铅锌矿区上游、中游和下游地表水中的 Pb、Zn、Cd、Cu、Cr 含量进行测定, 结果表明这 5 种重金属在上游地表水中的平均含量分别为 0.027、0.284 5、0、0.016 5、0.072 mg·L<sup>-1</sup>, 在中游地表水中的平均含量分别为 0.043、1.016、0.068、0.01、0.071 mg·L<sup>-1</sup>, 在下游地表水中的平均含量分别为 1.291、2.345 5、0.88、0.014、0.103 5 mg·L<sup>-1</sup>, 除 Cu 外, 其余重金属已严重污染下游地表水。王志国<sup>[32]</sup>在浙江省庆元县废弃铅锌矿区进行地质环境综合治理前对治理区 9 组地表水样的水化学分析表明, 仅两组水样为 V 类水质, 其他水样均有不同程度的 Pb、Zn、Cu、Cr 含量超标。铅锌矿山的开发不仅会引起周边水体中 Pb 和 Zn 含量超标, 而且还会导致其他重金属 (如 Cd、Cu、Cr 等) 污染。由于铅锌矿山的开采会不同程度地造成矿山周边水环境的重金属复合污染, 因此, 需要加大治理力度, 尤其是位于饮用水源地周边的矿区更亟需进行综合整治。

## 2 重金属的富集植物筛选与绿化植物修复研究

目前, 由铅锌矿山开采或加工冶炼等所造成的环境介质污染除了导致 Pb、Zn 含量超标外, 还会产生 Cd、Cu、Cr、As 等复合污染。为了减少重金属污染对生态系统的影响, 对重金属污染区进行生态治理显得尤为必要。目前, 有关环境 (土壤、沉积物、地表水和地下水) 重金属污染的修复技术主要包括化学法、物理法和生物法。传统的重金属修复方法包括化学淋洗、溶剂浸提、化学氧化/还原、原位玻璃化、改土法、冲洗络合法、物理分离、离子交换、土壤清洗、土壤冲洗、电动修复等<sup>[35-36]</sup>, 但是这些物理和化学方法往往投资昂贵、修复成本极高, 改变土壤性质和干扰土壤微生物区系等, 而且化学法也会造成二次污染等问题<sup>[37]</sup>。

广义的生物修复主要包括动物修复、植物修复和微生物修复, 而狭义的生物修复是指微生物修复。其中, 微生物修复包括原位修复 (包括投菌法、生物培养法和生物通气法等) 和异位修复 (包括预制床技术、生物反应器技术、厌氧处理和常规堆肥法)<sup>[38]</sup>; 动物修复主要是利用动物富集重金属, 相关研究证实蚯蚓 *Lumbricus* sp. 对 As<sup>[39]</sup>、Cu 和 Se<sup>[40]</sup>有较强的富集能力; 植物修复基本上是应用植物和相关的土壤微生物来减少环境中污染物的浓度或毒性<sup>[41]</sup>, 这是一种新兴、高效、环境和生态友好、就地适用、太阳能驱动的绿色生物技术, 通过植物根系直接吸收环境中大量重金属元素, 结合收获植物地上部分进而达到修复被污染环境的目的<sup>[37,42-43]</sup>。因此, 自 20 世纪 90 年代以来, 国内外学者在利用绿色植物修复环境重金属污染方面进行了大量研究, 植物修复已成为目前国际环境研究领域的热点。

### 2.1 重金属元素的富集植物筛选研究

植物具有积累或富集重金属的作用。许多研究通过对铅锌矿区自然生长植物的调查以寻找修复矿区污染的植物种类。植物地上部重金属含量的高低可作为鉴别植物是否具有植物修复最大潜力的重要标准<sup>[44]</sup>。超富集植物是指能超量吸收环境中的重金属并将其转运到地上部 (茎、叶), 而地上部能够较普通植物多累积 10 ~ 500 倍某种重金属元素的植物, 即植物叶片或地上部 (干质量) Cd、Se 含量达到 100 mg·kg<sup>-1</sup> 以上, Cu、Pb、Ni、Co、Cr、Fe 含量达到 1 000 mg·kg<sup>-1</sup> 以上, Mn 和 Zn 含量达到 10 000 mg·kg<sup>-1</sup> 以上的植物为超富集植物 (或超积累植物); 同时, 这些植物的转运系数 (TF: 地上部与地下部重金属含量的比值) > 1.0<sup>[35,45-46]</sup>。针对铅锌矿带来的环境重金属污染问题, 国内外学者从数千种植物中筛选出具有富集重金属潜力的 115 种植物<sup>[47-87]</sup>, 隶属于 47 科, 其中, 菊科 Asteraceae 植物最多, 达 24 种, 禾本科 Poaceae 植物次之, 有 12 种, 杨柳科 Salicaceae 和豆

科 Fabaceae 植物各有 5 种, 景天科 Crassulaceae、十字花科 Brassicaceae、石竹科 Caryophyllaceae 各有 4 种 (详见表 1 至表 5)。

铅锌矿或尾矿环境中能够生长且对 Pb 有超富集潜力的植物有 30 种 (表 1), 其中作为 Pb 超富集植物的分别是 *Scrophularia scoparia*<sup>[50]</sup>、长毛香薷 *Elsholtzia pilosa*<sup>[51]</sup>、水蓼 *Polygonum hydropiper*<sup>[54]</sup>、两面刺 *Cirsium chlorolepis*<sup>[51]</sup>、接骨草 *Sambucus javanica*<sup>[59]</sup> 等。对 Zn 有超富集潜力的植物有 14 种, 如鬼针草 *Bidens pilosa*<sup>[54]</sup>、滇紫草 *Onosma paniculatum*<sup>[55]</sup>、*Echinophora platyloba*<sup>[68]</sup>、雀苣 *Lactuca orientalis*<sup>[68]</sup> 等。对 Pb、Zn 两种重金属同时具有超富集潜力的植物有 23 种 (表 3)。有 14 种植物对 3 种及以上重金属元素有超富集潜力, 其中同时对 Pb、Zn、Cd 3 种元素具有超富集潜力的植物有 10 种, 而蜈蚣凤尾蕨 *Pteris vittata* 对 Pb、Cr、As 均有较强的富集和转运能力<sup>[50,57,77]</sup>, 苘麻 *Abutilon theophrasti*<sup>[79]</sup> 和野艾蒿 *Artemisia lavandulifolia*<sup>[64,81]</sup> 同时对 Pb、Zn、Cd、Cu 有较强的富集和转运能力, 大戟科的 *Euphorbia macroclada*<sup>[78]</sup> 对 Pb、Zn、Fe、Mn 等具有较强的富集能力 (表 4)。对其他重金属 (含 Pb 或 Zn) 有超富集潜力的植物有 34 种, 其中同时对 Pb、Cd 和 Zn、Cd 均有较好富集和转运能力的植物各有 4 种; 而对 Cd 有超富集潜力的植物种类较多, 有 18 种 (表 5)。

表 1 铅锌矿或尾矿环境中对 Pb 有超富集潜力的植物种类  
Table 1 Hyper accumulation of Pb in plants grown on lead-zinc mining or mine tailing area

科名	种名	富集特征	参考文献
蹄盖蕨科 Athyriaceae	华中蹄盖蕨 <i>Athyrium wardii</i>	根中 Pb 含量在 5 月和 8 月分别为 15 542、10 720 mg·kg <sup>-1</sup>	[47]
里白科 Gleicheniaceae	芒萁 <i>Dicranopteris dichotoma</i>	植物体内 Pb 含量为 59.6 mg·kg <sup>-1</sup>	[48]
香蒲科 Typhaceae	香蒲 <i>Typha orientalis</i>	根部、地上部 Pb 含量分别为 1 233、619 mg·kg <sup>-1</sup>	[49]
眼子菜科	尖叶眼子菜	根部、茎部 Pb 含量最高值分别为 4 620、4 210 mg·kg <sup>-1</sup>	[50]
Potamogetonaceae	<i>Potamogeton oxyphyllus</i>		
禾本科 Poaceae	羊茅 <i>Festuca ovina</i>	根部、茎部 Pb 含量分别为 5 588.6、2 023.1 mg·kg <sup>-1</sup>	[51]
莎草科 Cyperaceae	旋鳞莎草 <i>Cyperus michelianus</i>	地上部和地下部 Pb 含量分别为 25.85 和 20.60 mg·kg <sup>-1</sup> , TF 为 1.255	[52]
鸭跖草科 Commelinaceae	鸭跖草 <i>Commelina communis</i>	植物体内 Pb 含量为 308 mg·kg <sup>-1</sup>	[49]
灯心草科 Juncaceae	灯心草 <i>Juncus effusus</i>	地上部和根部 Pb 含量分别为 1 446.5、190.5 mg·kg <sup>-1</sup> ; TF 为 7.593	[53]
百合科 Liliaceae	薤白 <i>Allium macrostemon</i>	植物体内 Pb 含量为 33.5 mg·kg <sup>-1</sup>	[49]
蓼科 Polygonaceae	水蓼	根系、茎叶中 Pb 含量分别为 998.64、1 036.57 mg·kg <sup>-1</sup> , TF 为 1.04	[54]
	酸模 <i>Rumex acetosa</i>	根系和茎叶中 Pb 含量分别为 209.40、538.30 mg·kg <sup>-1</sup> , TF 为 2.57	[54]
石竹科 Caryophyllaceae	细蝇子草 <i>Silene gracilicaulis</i>	茎中 Pb 含量为 1 837 mg·kg <sup>-1</sup> , TF 为 1.9	[55]
	篝姑草 <i>Stellaria vestita</i>	根部、茎部 Pb 含量分别为 7 456.5、3 141.2 mg·kg <sup>-1</sup>	[51]
	圆叶无心菜 <i>Arenaria orbiculata</i>	根部、茎部 Pb 含量分别为 2 317.5、1 873.1 mg·kg <sup>-1</sup>	[51]
蔷薇科 Rosaceae	地榆 <i>Sanguisorba officinalis</i>	根系和茎叶中 Pb 含量分别为 609.93、662.98 mg·kg <sup>-1</sup> , TF 为 1.09	[54]
豆科 Fabaceae	百脉根 <i>Lotus corniculatus</i>	根部、地上部 Pb 含量分别为 1 576.0、1 363.7 mg·kg <sup>-1</sup> ;	[53]
酢浆草科 Oxalidaceae	红花酢浆草 <i>Oxalis corymbosa</i>	根部、茎部 Pb 含量分别为 1 836.1、1 689.1 mg·kg <sup>-1</sup>	[51]
大戟科 Euphorbiaceae	白背叶 <i>Mallotus apelta</i>	植物体内 Pb 含量为 146 mg·kg <sup>-1</sup>	[49]
堇菜科 Violaceae	匍匐堇菜 <i>Viola pilosa</i>	根系和茎叶中 Pb 含量分别为 415.91、469.05 mg·kg <sup>-1</sup> , TF 为 1.13	[54]
茜草科 Rubiaceae	假繁缕 <i>Theligonum macranthum</i>	地上部 Pb 含量为 728.3 mg·kg <sup>-1</sup>	[56]
唇形科 Lamiaceae	<i>Vitex ambigua</i>	根部、茎部 Pb 含量分别为 143.00、217.50 mg·kg <sup>-1</sup>	[58]
	长毛香薷	茎部和根部中 Pb 含量分别为 1 015.4、1 341.4 mg·kg <sup>-1</sup>	[51]
玄参科 Scrophulariaceae	<i>Scrophularia scoparia</i>	根部、茎部 Pb 含量分别为 577、6 270 mg·kg <sup>-1</sup>	[50]
	密蒙花 <i>Buddleja officinalis</i>	根、茎、叶片中 Pb 含量分别达 792.8、495.0、305.3 mg·kg <sup>-1</sup>	[57]
车前科 Plantaginaceae	车前 <i>Plantago asiatica</i>	根部、地上部 Pb 含量分别为 7 034.7、1 864.2 mg·kg <sup>-1</sup> ;	[53]
五福花科 Adoxaceae	接骨草	根部、地上部 Pb 含量分别为 2 238、2 409 mg·kg <sup>-1</sup> , BCF 和 TF 均>1.0	[59]
菊科	野菊 <i>Chrysanthemum indicum</i>	根部、地上部 Pb 含量分别为 36.30、52.00 mg·kg <sup>-1</sup> ; TF 为 1.433	[52]
	淡黄香青 <i>Anaphalis flavescens</i>	根部、地上部 Pb 含量分别为 734.5、526.9 mg·kg <sup>-1</sup> ; 根部、地上部 BCF 分别为 2.560、1.788	[53]
	两面刺	根部、茎部 Pb 含量分别为 629.3、1 198.8 mg·kg <sup>-1</sup> , TF 为 1.90	[51]
	熊耳草 <i>Ageratum houstonianum</i>	根部、茎部 Pb 含量最高值分别为 1 160、1 130 mg·kg <sup>-1</sup>	[50]

注: \*指参考文献; BCF 为富集系数, TF 为转运系数。下同。

表 2 铅锌矿或尾矿环境中对 Zn 有超富集潜力的植物种类  
Table 2 Hyper accumulation of Zn in plants grown on lead-zinc mining or mine tailing area

科名	种名	富集特征	参考文献
禾本科	雀稗 <i>Paspalum thunbergii</i>	根中 Zn 含量为 331.9 mg·kg <sup>-1</sup>	[60]
百合科	萱草 <i>Hemerocallis fulva</i>	Zn 含量为 1 650.27 mg·kg <sup>-1</sup>	[61]
杨柳科 Salicaceae	旱柳 <i>Salix matsudana</i>	茎枝和叶片最高 Zn 含量分别为 729、1 153 mg·kg <sup>-1</sup>	[62]
	<i>Salix</i> sp.	叶片中 Zn 含量为 375 mg·kg <sup>-1</sup>	[63]
商陆科 Phytolaccaceae	美洲商陆 <i>Phytolacca americana</i>	Zn 含量为 2 590 mg·kg <sup>-1</sup>	[64]
罂粟科 Papaveraceae	博落回 <i>Macleaya cordata</i>	根系和茎叶中 Zn 含量分别为 422.36、752.87 mg·kg <sup>-1</sup> , TF 为 1.78	[54]
豆科	吊裙草 <i>Crotalaria retusa</i>	根部和茎部 Zn 含量分别为 170.15、360.24 mg·kg <sup>-1</sup>	[58]
锦葵科 Malvaceae	野葵 <i>Malva verticillata</i>	对 Zn 有较强转运能力, 其 TF 为 4.12	[65]
紫草科 Boraginaceae	滇紫草	茎中 Zn 含量为 8 748 mg·kg <sup>-1</sup> , TF 为 1.5	[55]
茄科 Solanaceae	曼陀罗 <i>Datura stramonium</i>	地下部、地上部 Zn 含量分别为 659.32、646.93 mg·kg <sup>-1</sup> , TF 为 0.98	[66]
	番茄 <i>Lycopersicon esculentum</i>	叶片最高 Zn 含量为 1 620 mg·kg <sup>-1</sup>	[67]
菊科	鬼针草	根系和茎叶中 Zn 含量分别为 504.54、1 043.04 mg·kg <sup>-1</sup> , TF 为 2.07	[54]
	<i>Echinophora platyloba</i>	根部、茎部 Zn 含量分别为 1 925、2 150 mg·kg <sup>-1</sup>	[68]
	雀苣	根部、茎部 Zn 含量分别为 1 429、35 385 mg·kg <sup>-1</sup>	[68]

表 3 铅锌矿或尾矿环境中对 Pb 和 Zn 有超富集潜力的植物种类  
Table 3 Hyper accumulation of Pb and Zn in plants grown on lead-zinc mining or mine tailing area

科名	种名	富集特征	参考文献
木贼科 Equisetaceae	笔管草 <i>Equisetum ramosissimum</i> subsp. <i>debile</i>	地上部 Pb 和 Zn 含量分别达 2 137.11 mg·kg <sup>-1</sup> 和 1 294 mg·kg <sup>-1</sup>	[69]
禾本科	五节芒 <i>Miscanthus floridulus</i>	地上部和地下部 Pb 含量分别为 42.80 和 15.80 mg·kg <sup>-1</sup> ; TF 为 2.709。	[52]
		地上部和根部 Zn 含量分别为 2 053、1 606.75 mg·kg <sup>-1</sup> ; TF 为 1.28	[69]
	蔗茅 <i>Saccharum rufipilum</i>	地上部和地下部 Pb 含量分别为 46.12、445.75 mg·kg <sup>-1</sup> ;	[66]
		地上部和地下部 Zn 含量分别为 397.74、1 317.62 mg·kg <sup>-1</sup>	
	芦苇 <i>Phragmites australis</i>	根和茎中 Pb 含量分别为 148.45、93.12 mg·kg <sup>-1</sup> ; 根和茎中 Zn 含量分别为 1 310.91、	[64]
		1 462.53 mg·kg <sup>-1</sup> ;	
	白茅 <i>Imperata cylindrica</i>	根和茎中 Pb 含量分别为 758.60、186.64 mg·kg <sup>-1</sup> ; 根和茎中 Zn 含量分别为 3 989.00、	[70]
		1 516.05 mg·kg <sup>-1</sup> ; Pb 含量为 687 mg·kg <sup>-1</sup> ; 茎部 Pb、Zn 含量分别为 301、361 mg·kg <sup>-1</sup> ,	[71]
		根部 Pb、Zn 含量分别为 595、1027 mg·kg <sup>-1</sup>	
	双穗雀稗 <i>Paspalum distichum</i>	根中 Zn 含量为 344.2 mg·kg <sup>-1</sup> ; 茎部 Pb、Zn 含量分别为 706、817 mg·kg <sup>-1</sup> , 根部 Pb、	[60]
		Zn 含量分别为 899、1 865 mg·kg <sup>-1</sup>	[71]
	香根草 <i>Chrysopogon zizanioides</i>	根部 Zn、Pb 含量 1 162.21、720.81 mg·kg <sup>-1</sup>	[72]
	类芦 <i>Neyraudia reynaudiana</i>	茎部 Pb、Zn 含量分别为 445.996 mg·kg <sup>-1</sup> , 根部 Pb、Zn 含量分别为 1 303、1 483 mg·kg <sup>-1</sup>	[71]
	马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i>	茎部 Pb、Zn 含量分别为 286、471 mg·kg <sup>-1</sup> , 根部 Pb、Zn 含量分别为 743、1 938 mg·kg <sup>-1</sup>	[71]
莎草科	亲族薹草 <i>Carex gentilis</i>	地上部分平均含量分别为 358.47、76.33 mg·kg <sup>-1</sup> , 对 Pb、Zn 的 TF 分别为 1.39 和 0.93,	[73]
		BCF 分别为 11.79 和 1.78	
桦木科 Betulaceae	垂枝桦 <i>Betula pendula</i>	叶片中 Zn、Pb 含量最大值分别为 3 100、530 mg·kg <sup>-1</sup>	[74]
荨麻科 Urticaceae	糯米团 <i>Gonostegia hirta</i>	根系和茎叶中 Pb 含量分别为 635.45、635.48 mg·kg <sup>-1</sup> , TF 为 1.00; 根系和茎叶中 Zn	[54]
		含量分别为 672.38、919.51 mg·kg <sup>-1</sup> , TF 为 1.37	
苋科	千穗谷	地上部和地下部 Pb 含量分别为 226.44、26.84 mg·kg <sup>-1</sup> , TF 为 8.44; 地上部和地下部	[66]
Amaranthaceae	<i>Amaranthus hypochondriacus</i>	Zn 含量分别为 552.01、149.93 mg·kg <sup>-1</sup> , TF 为 3.68	
樟科	新樟 <i>Neocinnamomum delavayi</i>	地上部和地下部 Pb 含量分别为 47.93、45.44 mg·kg <sup>-1</sup> , TF 为 1.05; 地上部分和地下	[66]
Lauraceae		部分 Zn 含量分别为 460.36、1 068.4 mg·kg <sup>-1</sup>	
十字花科 Brassicaceae	科圆锥南芥 <i>Arabis paniculata</i>	茎部和根部中 Pb 含量分别为 1 711.8、1 963.2 mg·kg <sup>-1</sup> ; 茎部和根部中 Zn 含量分别为	[51]
		15 632.8、4 508.7 mg·kg <sup>-1</sup>	
	<i>Alyssum wulfenianum</i>	根部 Pb、Zn 最大值含量分别为 1 504、5 670 mg·kg <sup>-1</sup> , 茎部 Pb、Zn 含量最大值分别	[75]
		为 826、1 934 mg·kg <sup>-1</sup>	
	<i>Biscutella laevigata</i> subsp. <i>laevigata</i>	根部 Pb、Zn 含量最大值为 1 939、5 692 mg·kg <sup>-1</sup> , 茎部 Pb、Zn 含量最大值分别为 874、	[75]
		2 980 mg·kg <sup>-1</sup>	
蔷薇科	大乌泡 <i>Rubus pluribracteatus</i>	地上部 Pb 和 Zn 含量分别为 673.52、893.34 mg·kg <sup>-1</sup>	[66]
豆科	加拿大紫荆 <i>Cercis canadensis</i>	根系 Pb 和 Zn 含量最高水平分别为 1 803、2 120 mg·kg <sup>-1</sup>	[62]
漆树科	盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	茎枝 Pb、叶片 Pb 和 Zn 含量分别为 280、546 和 1 507 mg·kg <sup>-1</sup>	[62]
Anacardiaceae			
菊科	花叶滇苦菜 <i>Sonchus asper</i>	根部和茎部 Pb 含量分别为 4 560.8、2 193.7 mg·kg <sup>-1</sup> , 根部和茎部 Zn 含量分别为	[51]
	<i>Bidens triplinervia</i>	茎中 Pb、Zn 含量可达 5 180、9 900 mg·kg <sup>-1</sup>	[76]
	<i>Senecio</i> sp.	茎中 Pb、Zn 含量可达 4 250、3 870 mg·kg <sup>-1</sup> , 且 TF 均>1.0	[76]

表 4 铅锌矿或尾矿环境中对 3 种及以上重金属有超富集潜力的植物种类

Table 4 Hyper accumulation of 3 kinds of heavy metal in plants grown on lead-zinc mining or mine tailing area

科名	种名	重金属元素	富集特征	参考文献
凤尾蕨科 Pteridaceae	蜈蚣凤尾蕨 <i>Pteris vittata</i>	Pb、Cr、As	根和茎叶中 Pb 含量分别为 467.9、729.9 mg·kg <sup>-1</sup> , TF 为 1.56; 根和茎叶中 Cr 含量分别为 141.7、152.3 mg·kg <sup>-1</sup> , 其 BCF 和 TF 分别为 2.27、1.08; 根部、茎部 Pb 含量最高值分别为 12 700、1 020 mg·kg <sup>-1</sup> , 根部、茎部 As 含量最高值分别为 1 740、3 750 mg·kg <sup>-1</sup>	[50] [57] [77]
禾本科	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	Pb、Zn、Cd	对 Pb、Zn 和 Cd 有较强转运能力, 其 TF 分别为 4.91、1.49、1.33; 茎部 Pb、Zn 含量分别为 351、689 mg·kg <sup>-1</sup> , 根部 Pb、Zn 含量分别为 645、1 015 mg·kg <sup>-1</sup>	[65] [71]
莎草科	具芒碎米莎草 <i>Cyperus microiria</i>	Pb、Zn、Cd	植物体内 Cd、Pb 和 Zn 含量分别为 105、1 200、5 778 mg·kg <sup>-1</sup> ; 其 Cd 的 BCF 为 1.58	[65]
石竹科	粘萼蝇子草 <i>Silene viscidula</i>	Pb、Zn、Cd	茎中 Pb、Zn、Cd 含量分别为 3 938、11 155、236 mg·kg <sup>-1</sup> , 其 TF 分别为 1.2、1.8、1.1	[55]
十字花科	<i>Thlaspi rotundifolium</i> subsp. <i>cepaefolium</i>	Pb、Zn、Cd	根部 Pb、Zn、Cd 含量最大值分别为 14 435、11 548、49.7 mg·kg <sup>-1</sup> , 茎部 Pb、Zn、Cd 含量最大值分别为 2 817、11 573、78 mg·kg <sup>-1</sup>	[75]
景天科 Crassulaceae	珠芽景天 <i>Sedum bulbiferum</i>	Pb、Zn、Cd	体内 Zn、Pb、Cd 含量分别为 13 568、614、349 mg·kg <sup>-1</sup> , 其对 Zn 的 BCF 为 1.37	[49]
大戟科	<i>Euphorbia macroclada</i>	Pb、Zn、Fe、Mn	根部、茎部 Pb 含量分别为 3 804、88 867 mg·kg <sup>-1</sup> , Zn 含量分别为 3 783、8 771.6 mg·kg <sup>-1</sup> , Fe 含量分别为 8 943.3、69 556.6 mg·kg <sup>-1</sup> , Mn 含量分别为 1 394、6 767 mg·kg <sup>-1</sup>	[78]
锦葵科	苘麻	Pb Zn Cd Cu	对 4 种金属均有较强的富集和转运能力	[79]
杜鹃花科 Ericaceae	桃叶杜鹃 <i>Rhododendron annae</i>	Pb、Zn、Cd	叶片 Pb、Cd、Zn 含量分别为 353.82、1 140.99、23.87mg·kg <sup>-1</sup> , 其 TF 均>1.0	[80]
菊科	野艾蒿	Pb、Zn、Cd、Cu	根系对 Pb 有弱的滞留效应为 36.59%; 叶 Cd 含量 125 mg·kg <sup>-1</sup> ; 植物对 Zn 和 Pb 的富集量较大, 对 Cd、Cu 转运能力较强	[64] [81]
	苍耳 <i>Xanthium strumarium</i>	Pb、Zn、Cd	叶 Cd 含量 133 mg·kg <sup>-1</sup> , Zn 含量 3 450 mg·kg <sup>-1</sup> ; 茎部 Pb、Zn 含量分别为 208、954 mg·kg <sup>-1</sup> , 根部 Pb、Zn 含量分别为 407、710 mg·kg <sup>-1</sup>	[64] [71]
	一年蓬 <i>Erigeron annuus</i>	Pb、Zn、Cd	体内 Pb 含量为 52 mg·kg <sup>-1</sup> ; 地上部、根部 Cd 含量分别为 119.51、92.23 mg·kg <sup>-1</sup> , TF 为 1.3; 地上部、根部 Pb 含量分别为 162.06、59.17 mg·kg <sup>-1</sup> , TF 为 2.74; 地上部、根部 Zn 含量分别为 1656、499.48 mg·kg <sup>-1</sup> , TF 为 3.32	[49] [69]
	小蓬草 <i>E. canadensis</i>	Pb、Zn、Cd	地上部的 Pb、Zn、分别 589.8、663.8、9.208 mg·kg <sup>-1</sup>	[82]
	蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>	Pb、Zn、Cd	根、茎、叶中 Pb 含量分别为 23.22、35.84、86.03 mg·kg <sup>-1</sup> , TF 为 2.62; 根、茎、叶中 Zn 含量分别为 125.00、263.94、875.03 mg·kg <sup>-1</sup> , TF 为 4.56; 茎、根中 Pb 含量分别为 1 065.0、1 016.4 mg·kg <sup>-1</sup> 。根、叶中 Cd 含量分别为 2.20、5.17 mg·kg <sup>-1</sup> , 其 BCF 分别为 1.68 和 3.95	[51] [65] [83]

表 5 铅锌矿或尾矿环境中对其他重金属(含铅或锌)有超富集潜力的植物种类

Table 5 Hyper accumulation of other heavy metal (including Pb or Zn) in plants grown on lead-zinc mining or mine tailing area

科名	种名	重金属元素	富集特征	参考文献
禾本科	芨芨草 <i>Achnatherum splendens</i>	Pb、Cd	Pb、Cd 含量分别为和 2 045、110 mg·kg <sup>-1</sup> ; 其 Cd 的 BCF 为 1.71	[65]
三白草科 Saururaceae	蕺菜 <i>Houttuynia cordata</i>	As	根部、茎部 As 含量最高值分别为 1 080、1 140 mg·kg <sup>-1</sup>	[50]
杨柳科	加拿大杨 <i>Populus × canadensis</i>	Cd	叶片 Cd 含量 231 mg·kg <sup>-1</sup>	[64]
	<i>Salix atrocinerea</i>	Zn、Cd	地上部的 Zn 含量为 543 mg·kg <sup>-1</sup> , 其对 Zn 和 Cd 的 BCF 最高分别为 2.35 和 4.17	[84]
桑科	中华柳 <i>S. cathayana</i>	Cd	叶片 Cd 含量为 11.6 mg·kg <sup>-1</sup> , 对 Cd 的 TF 为 1.82	[80]
Moraceae	构树 <i>Broussonetia papyrifera</i>	Cd	叶 Cd 含量 158 mg·kg <sup>-1</sup>	[64]
苋科	土荆芥 <i>Dysphania ambrosioides</i>	Cd	体内 Cd 含量达 112 mg·kg <sup>-1</sup> , TF 为 2.48	[65]
罂粟科	翅瓣黄堇 <i>Corydalis pterygotpetala</i>	Zn、Cd	根部、茎部 Zn 含量分别为 5 402.3、5 959.9 mg·kg <sup>-1</sup> , TF 为 1.10; 根部、茎部 Cd 含量分别为 311.5、215.0 mg·kg <sup>-1</sup>	[51]
	岩生紫堇 <i>C.petrophila</i>	Cd	根部、茎部 Cd 含量分别为 301.0、329.8 mg·kg <sup>-1</sup>	[51]
景天科	四芒景天 <i>Sedum tetractinum</i>	Zn、Cd	体内 Zn、Cd 含量分别为 13 665、568 mg·kg <sup>-1</sup> , 其对 Zn 和 Cd 的 BCF 分别为 20.60 和 194.0	[49]
	东南景天 <i>S. alfredii</i>	Zn、Cd	体内 Zn、Cd 含量分别为 1 099、43.5 mg·kg <sup>-1</sup> 。茎中 Zn、Cd 含量分别为 11 116、1 090 mg·kg <sup>-1</sup> , 最高 BCF 分别为 4.40、57.01, 最高 TF 分别为 1.32、2.81	[49] [85]
	伴矿景天 <i>S.plumbizincicola</i>	Cd	地上部 Cd 含量为 571.2 mg·kg <sup>-1</sup> ; 其 BCF 为 13.58, TF 为 1.02	[86]
蔷薇科	西南委陵菜 <i>Potentilla lineata</i>	Cd	根部、茎部 Cd 含量分别为 320.1、214.0 mg·kg <sup>-1</sup>	[51]

表 5 (续)

科名	种名	重金属元素	富集特征	参考文献
旋花科 Convolvulaceae	东京银背藤 <i>Argyrea pierreana</i>	Cd	体内 Cd 含量为 46.4 mg·kg <sup>-1</sup> , BCF 为 2.78	[49]
豆科	距瓣豆 <i>Centrosema pubescens</i>	Cd	根部、茎部 Cd 含量分别为 170.90、50.55 mg·kg <sup>-1</sup>	[58]
大戟科	<i>Euphorbia platyloba</i>	Pb、Mn	根部、茎部 Pb 含量分别为 1 515、10 126.3 mg·kg <sup>-1</sup> , 根部、茎部 Mn 含量分别为 2 614、6 339.3 mg·kg <sup>-1</sup>	[78]
冬青科 Aquifoliaceae	<i>Llex plyneura</i>	Pb、Cd	叶片 Pb、Cd 含量分别为 304.39、25.18 mg·kg <sup>-1</sup> , 对 Pb、Cd 的 TF 均>1.0	[80]
野牡丹科 Melastomataceae	地蕊 <i>Melastoma dodecandrum</i>	Pb、Cd	叶 Pb 含量为 1 100 mg·kg <sup>-1</sup> , 叶 Cd 含量 212 mg·kg <sup>-1</sup>	[64]
五加科 Araliaceae	天胡荽 <i>Hydrocotyle sibthorpioides</i>	Cd	叶 Cd 含量 310 mg·kg <sup>-1</sup>	[64]
报春花科 Primulaceae	三角叶过路黄 <i>Lysimachia deltoidea</i>	Cd	茎中 Cd 含量为 212 mg·kg <sup>-1</sup> , TF 为 3.2	[55]
唇形科	紫花香薷 <i>Elsholtzia argyi</i>	Cd	地上部 Cd 含量为 218.7 mg·kg <sup>-1</sup> ; 其 BCF 为 1.38, TF 为 1.78	[86]
茄科	地笋 <i>Lycopus lucidus</i>	Cr	Cr 含量为 37.78 mg·kg <sup>-1</sup> , BCF 为 0.591	[61]
车前科	龙葵 <i>Solanum nigrum</i>	Cd	根部、地上部 Cd 含量分别为 1 845.8、1 436.6 mg·kg <sup>-1</sup> ; TF 为 2.91	[69]
桔梗科	<i>Plantago erosa</i>	Cd	根部、茎部 Cd 含量分别为 231.4、164.8 mg·kg <sup>-1</sup>	[51]
Campanulaceae	半边莲	Cd	地上部 Cd 含量 148 mg·kg <sup>-1</sup>	[64]
菊科	<i>Lobelia chinensis</i>			
	鳢肠 <i>Eclipta prostrata</i>	Cd	叶 Cd 含量 164 mg·kg <sup>-1</sup> ; 叶 Cd 含量为 102.0 mg·kg <sup>-1</sup> , BCF 为 22.3	[87]
	紫茎泽兰 <i>Ageratina adenophora</i>	Pb、Cd	根部、茎部 Pb 含量分别为 1 845.8、1 436.6 mg·kg <sup>-1</sup> ; 根部、地上部 Cd 含量分别为 13.7、48.5 mg·kg <sup>-1</sup> , BCF 和 TF 均>1.0	[64] [59]
	全叶马兰 <i>Aster pекinensis</i>	Cd	根、茎、叶中的 Cd 含量分别为 1.36 ~ 1.87、1.42 ~ 2.00、2.16 ~ 2.61 mg·kg <sup>-1</sup> , 其 BCF 分别为 1.64 ~ 2.05、1.71 ~ 2.20、2.60 ~ 2.87	[83]
	婆婆针 <i>Bidens bipinnata</i>	Pb Cd	叶 Pb 含量为 790 mg·kg <sup>-1</sup> , 叶 Cd 含量 119 ~ 196 mg·kg <sup>-1</sup> ; 根、茎、叶中的 Cd 含量分别为 2.46、6.26、7.72 mg·kg <sup>-1</sup> , 其 BCF 分别为 0.57、1.46、1.80	[64] [83]
	<i>Picris heracioides</i>	Cd	根部、茎部 Cd 含量分别为 345.5、145.2 mg·kg <sup>-1</sup>	[51]
	<i>Centaurea virgata</i>	Zn、Mn	根部、茎部 Zn 含量分别为 762、3 155 mg·kg <sup>-1</sup> , 根部、茎部 Mn 含量分别为 156、1 220 mg·kg <sup>-1</sup>	[68]
	<i>Cirsium congestum</i>	Mn	根部、茎部 Mn 含量分别为 459、538 mg·kg <sup>-1</sup>	[68]
	<i>Centaurea virgate</i>	Pb、Mn	根部、茎部 Pb 含量分别为 1 123.7、1 950.6 mg·kg <sup>-1</sup> , 根部、茎部 Mn 含量分别为 2 823.6、12 118 mg·kg <sup>-1</sup>	[78]
	雀苣 <i>Lactuca orientalis</i>	Pb、Mn	根部、茎部 Pb 含量分别为 7 834.3、9 654.3 mg·kg <sup>-1</sup> , 根部、茎部 Mn 含量分别为 3 796、2 675 mg·kg <sup>-1</sup>	[78]

2.2 铅锌矿山绿化和植物生态修复研究

铅锌矿山的生态修复主要是在消除矿区可能产生的地面塌陷、崩塌滑坡及泥石流等地质灾害隐患基础上进行地貌景观修复, 主要包括矿区绿化及其水体、土壤污染治理。受有效营养 (N、P、K 等) 和有机质含量低以及多种重金属污染等特殊立地条件的制约, 废弃铅锌矿山的地质环境往往不利于植物生长, 这给矿区绿化带来了很大的难度。尽管有关铅锌矿区重金属富集植物的调查研究较多, 但在铅锌矿区成功应用的案例仍然较少, 大多数局限于调查、试验分析及设计探讨等方面。如谢永等<sup>[88]</sup>对甘肃省徽县洛坝铅锌矿废弃 3 a、6 a 和 11 a 坑口弃渣台地自然植被演替进行了调查, 发现 3 a 弃渣台地有物种 12 种, 盖度为 5.5% ~ 10.5%, 优势种为北艾 *Artemisia vulgaris*; 6 a 弃渣台地有物种 17 种, 盖度为 18.5% ~ 20.0%, 优势种为北艾、碱菀 *Tripolium vulgare* 和商陆 *Phytolacca acinosa* 等; 11 a 弃渣台地有物种 40 种, 盖度为 25.0% ~ 30.0%, 优势种为北艾、碱菀和一年蓬等, 还有灌木茅莓 *Rubus parvifolius* 及乔木臭椿 *Ailanthus altissima* 等树种。齐丹卉等<sup>[89]</sup>对云南兰坪铅锌矿区植被恢复期土壤种子库和植被进行了调查, 结果表明, 在恢复初期魁蒿 *Artemisia princeps* 群落和草地早熟禾 *Poa pratensis* 人工草地群落的土壤种子库较地上植被多样性高, 优势种主要是由易于风播、种子繁殖的菊科、禾本科为主的植物组成, 这些植物在尾矿区植被恢复初期起重要作用。施祥等<sup>[90]</sup>对浙江富阳的废弃铅锌尾矿库进行了人工植被恢复试验, 发现紫穗槐 *Amorpha fruticosa*、截叶铁扫帚 *Lespedeza cuneata*、紫苜蓿 *Medicago sativa* 和柃木 *Alnus cremastogyne* 等固氮植物在尾矿库区生长良好, 盐肤木、旱柳等对 Pb、Zn 积累能力较强的树种可以用于废弃铅锌尾矿库的治理。原海燕等<sup>[91]</sup>利用 4 种鸢尾属 *Iris* 植物对南京市栖霞山铅锌矿区工业污水地表排污口 1 km 处的排污渠底泥进行了重金属修复试验, 发现马蔺 *Iris lactea* var. *chinensis*、黄菖蒲 *I. pseudacorus*、

花蔺蒲 *I. ensata* 和溪荪 *I. sanguinea* 能明显降低土壤重金属质量分数, 其中, 马蔺对 Pb、Cd 的吸收能力最强, 其茎叶中的 Pb 质量分数达  $983 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 转运系数大于 1.0, 是一种潜在的 Pb 积累植物; 黄蔺蒲、花蔺蒲和溪荪对 Zn 的吸收能力较强, 但主要积累在根系。

Yang 等<sup>[92]</sup>在广东乐昌铅锌尾矿利用香根草、长喙田菁 *Sesbania rostrata*、印度田菁 *S. sesban* 进行 5 个月的野外恢复研究, 结果表明, 添加单独生活垃圾或同时添加生活垃圾和人工肥料的方法可以促进植物成活率和生长速率, 但单独添加人工肥料不能促进植物成活率和生长速率; 长喙田菁和印度田菁的茎部对 Pb、Zn、Cu、Zn 的富集量明显高于香根草的茎部, 而香根草对重金属元素主要积累在根部。高喜等<sup>[93]</sup>利用盆栽方法研究了香根草在不同环境(铅锌尾矿、尾矿+复合肥、尾矿+腐殖质+复合肥和广西阳朔地带性红壤)的生长及光合生理特点, 发现复合肥和腐殖质的综合使用可提高香根草对铅锌尾矿的适应性。李正强等<sup>[94]</sup>以云南省某铅锌矿开采区的尾矿砂为基质并掺入不同数量的红壤、猪粪进行盆栽试验, 发现尾砂对银合欢 *Leucaena leucocephala* 的生长具有明显的抑制作用, 重金属含量过高显著降低株高、根长和生物量。Titshall 等<sup>[95]</sup>利用营养含量低、含碱性和高 Zn 含量的尾砂(铅锌矿)进行 5 种草本植物的种植试验, 发现施肥促进了植物生长, 其中 *Cenchrus ciliaris* 在足量肥料下产量最高, *Digitaria eriantha* 次之; *Cenchrus ciliaris*、*D. eriantha*、*Eragrostis superba*、*Fingeruthia africana* 对 Zn 有一定的去除效果, 但对 Pb 的去除有限。

李贵等<sup>[96]</sup>采用多种植物栽培和径流小区收集水样的方法研究了铅锌矿区植物原位阻截土壤废渣重金属效果, 发现 3 a 后构树等可降低地表径流水中 Pb、Cd 和 Cu 负荷输出分别为 9.04% ~ 9.64%、67.0% ~ 75.86% 和 52.64% ~ 70.97%, 女贞 *Ligustrum lucidum* 等可降低地表水中 Zn 负荷输出 74.99% ~ 78.35%; 女贞还可使铅锌尾矿区尾沙中 Pb、Zn、Cd 和 As 分别降低 27.31%、27.59%、39.52% 和 33.47%, 构树则分别降低 31.87%、38.45%、41.28% 和 29.48%。林庆富<sup>[97]</sup>采用一年生东京银背藤(葛藤)袋苗在具有成片土壤堆积或较宽的石缝处的铅锌矿弃渣场上部及边坡进行种植试验, 发现 3 a 后主蔓长为 14.18 m、单株覆盖面积达  $14.27 \text{ m}^2$ 。

此外, 王志国<sup>[32]</sup>、罗刚<sup>[98]</sup>、刘欢欢等<sup>[99]</sup>分别对浙江庆元铅锌矿废弃矿山、内蒙古自治区科尔沁右翼前旗巴根黑格其尔铅锌矿区、湖南宁远九嶷山铅锌矿区固废堆场封场进行绿化设计研究, 主要绿化内容包括撒播草籽、种植绿化、喷播绿化等方法; 郭维君等<sup>[100]</sup>、陆东辉<sup>[101]</sup>、张月峰等<sup>[102]</sup>分别针对铅锌矿山地质和生态环境恢复治理及土地复垦方法等提出相应的对策措施。

### 3 铅锌矿山绿化修复研究展望

我国铅锌矿山资源量大, 开采点多、面广, 环境影响面也大, 因此, 针对铅锌矿山的地质环境问题深入开展矿山绿化与生态修复相结合的植被恢复研究, 实现矿山开发利用与自然生态环境保护相协调发展, 对于建设绿色矿山、发展绿色矿业、促进现代生态文明建设等具有非常重要的意义, 一些研究<sup>[88-102]</sup>初步证实对铅锌矿山实施生态绿化是有效可行的。鉴于有关研究进展, 提出以下关于铅锌矿山绿化修复的四点展望:

(1) 分类指导铅锌矿山绿化。铅锌矿山可绿化的区域通常包括露天开采的岩质边坡、硐采的硐口区域、废弃矿石堆场及其形成的堆场边坡、选矿厂废弃的尾矿堆场(尾矿库)和尾矿坝及其坝体坡面、运输道路两侧及其受损的山体边坡, 另外, 办公生活区和选厂、炸药库和配电房及机修车间旁、沉淀池周边、排污沟渠旁等可绿化区, 以及其他可绿化的区域。由于生产功能和立地条件及环境污染程度的不同, 应该实行分类指导, 特别是针对重金属污染程度的不同, 选择适宜的绿化树种(包括草本、藤本植物)、配置方法和种植技术, 实现矿山可绿化区域系统性地全面绿化, 努力建设绿色矿山。

(2) 广泛选择生态绿化树种。铅锌矿区通常受到重金属的污染, 特别是废渣堆场和尾矿库, 在雨水淋滤和尘埃飘浮影响下可引发面源污染, 需要选择耐重金属和富集重金属的适宜绿化树种。综合上述耐重金属和富集重金属的 115 种植物<sup>[47-87]</sup>, 但多数为草本, 而木本植物种类偏少, 目前仅发现密蒙花、白背叶、新樟、加拿大杨、某种柳 *Salix* sp.、旱柳、*S. atrocinerea*、中华柳、垂枝桦、构树、盐肤木、桃叶杜鹃、*Vitex ambigua*、大乌泡、加拿大紫荆等。修复研究中大多也为草本植物, 如香根草<sup>[92,93]</sup>、草地早熟禾<sup>[89]</sup>、紫苜蓿<sup>[90]</sup>等, 木本植物构



树等,但这些树种通常与周边自然植被不够一致,葛藤虽然长得快,但被认定为有害植物<sup>[97]</sup>。因此广泛选择适宜铅锌矿山生态绿化树种,特别是地带性建群树种,是铅锌矿山生态绿化研究的重要任务。

(3) 注重乔灌木的有效配置。研究表明<sup>[88-89]</sup>,在废弃铅锌矿渣堆场和尾矿库上,植被自然恢复的 10 a 内仍然是以草本植物为主,10 a 后可能会偶见臭椿、茅莓等落叶木本植物,但植被的覆盖度仍然较低,绿化效果差。为提升铅锌矿山的绿化质量,特别是堆渣边坡等特殊困难立地条件下的生态绿化,可遵循自然植被的演替规律,根据绿化植物的生理生态特性,结合当地自然地理和周边自然植被的群落结构特征,采取人工促进自然演替的方法,合理配置乔、灌、草立体结构,实现以草养灌、以灌促乔,短时间构建乔灌木复合的绿化群落结构,多层次地改良并修复重金属对环境的污染,不断降低矿山重金属的负荷输出。

(4) 注意客土改良配套种植。盆栽试验表明<sup>[92-95]</sup>,植物生长辅助材料的综合使用可促进植物生长,促进铅锌矿山地质环境的改善,从而有效缩短矿山植被群落演替时间。但直接撒播草籽<sup>[27]</sup>、直接挖穴种植<sup>[60]</sup>和间接覆土种植<sup>[61]</sup>等绿化设计,可能对铅锌矿山的污染土壤治理效果有限,然而废弃矿渣堆场及其边坡进行客土回填可避免根系与矿渣直接接触,是值得采纳的一项配套种植技术,在客土中混合一定数量的腐化秸秆或枯草等有机物对于促进植物生长具有积极的作用,这些铅锌矿山客土改良配套种植技术值得进一步地深入研究,以开创铅锌矿山生态绿化新局面。

#### 参考文献:

- [1] 娄永刚,彭涛. 铅锌工业喜中有忧[J]. 中国有色金属, 2014 (9): 77-79.
- [2] 刘晓,张宇,王楠,等. 我国铅锌矿资源现状及其发展对策研究[J]. 中国矿业, 2015, 24 (S1): 6-9.
- [3] 陈丽,黎良财,王昆,等. 基于 TM 影像的泗顶铅锌矿区森林景观动态分析[J]. 广东农业科学, 2012, 39 (9): 144-147.
- [4] 何绪文,王宇翔,房增强,等. 铅锌矿区土壤重金属污染特征及污染风险评价[J]. 环境工程技术学报, 2016, 6 (5): 476-483.
- [5] 姚柏华,唐名富,周洁军,等. 广西某铅锌矿区水文地质及地下水重金属污染途径分析[J]. 矿产与地质, 2015, 29 (1): 110-113.
- [6] LI Z, MA Z, VAN DER KUIJP TJ, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment[J]. Sci Total Environ, 2014, 468-469: 843-853.
- [7] 熊万胜. 凡口铅锌矿地质环境综合治理方法[J]. 现代矿业, 2014 (12): 145-146, 151.
- [8] 杜博涛,李华翔,苏绘梦,等. 土壤重金属污染的植物修复技术综述[J]. 湖南生态科学学报, 2016, 3 (2): 32-37.
- [9] RASCIOA N, NAVARI-IZZO F. Heavy metal hyper accumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting[J]. Plant Sci, 2011, 180 (2): 169-181.
- [10] 钟斌,陈俊任,彭丹莉,等. 速生林木对重金属污染土壤植物修复技术研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2016, 33 (5): 899-909.
- [11] 邢丹,刘鸿雁. 铅锌矿区重金属耐性植物与超富集植物筛选研究进展[J]. 安徽农业科学, 2009, 37 (7): 3208-3209, 3329.
- [12] 刘庆,吴晓芙,陈永华,等. 铅锌矿区的植物修复研究进展[J]. 环境科学与管理, 2012, 37 (5): 110-114.
- [13] 文晓慧. 重金属胁迫对植物的毒害作用[J]. 农业灾害研究, 2012, 2 (11-12): 20-21, 27.
- [14] 吴际友,王旭军,程勇,等. 铅胁迫对 4 种苗木叶片过氧化物酶和超氧化物歧化酶的影响[J]. 中国城市林业, 2011, 9 (5): 9-12, 16.
- [15] 国土资源部. 矿山地质环境保护与恢复治理方案编制规范: DZ/T 0223-2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [16] 赖荣福. 福建尤溪梅仙铅锌矿地质环境现状及防治建议[J]. 福建地质, 2007, 26 (1): 47-51.
- [17] 谢东兵. 铅锌矿采矿工程生态环境影响的评价及环境保护措施[J]. 海峡科学, 2009 (6): 46-47.
- [18] 陈诗太. 金属矿山生态环境问题与环保管理对策—以福建尤溪铅锌矿为例[J]. 中国高新技术企业, 2013 (29): 71-73.
- [19] 陈孟利,曹净,李育红. 兰坪铅锌矿南大沟排土场稳定性分析研究与应用[J]. 科学技术与工程, 2010, 10 (22): 5493-5498.
- [20] 陈明,曹净,陈孟利,等. 兰坪金鼎铅锌矿改扩建边坡稳定性研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10 (24): 6075-6078, 6083.
- [21] 何九军. 甘肃成县石坝铅锌矿区铅锌矿产资源的开采对区域生态效应的影响及治理措施[J]. 山东化工, 2015, 44 (13): 165-166, 168.
- [22] 亢亢,赵晓林,高建国. 毛坪铅锌矿矿山地质环境质量的模糊评判[J]. 矿产保护与利用, 2012 (4): 48-52.
- [23] 刘玥,牛宏. 基于模糊综合评判法的矿山地质环境质量评价——以陕南铅锌矿为例[J]. 环境保护科学, 2013, 39 (5): 63-66.
- [24] 邓锟. 凤县铅锌矿区矿山地质环境遥感调查研究[J]. 地理空间信息, 2015, 13 (4): 104-105.
- [25] 杨刚,沈飞,钟贵江,等. 西南山地铅锌矿区耕地土壤和各类产品重金属含量及健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2011, 31 (9): 2014-2021.
- [26] 覃朝科,农泽喜,黄伟,等. 广西某废弃铅锌矿重金属污染调查及治理对策[J]. 有色金属工程, 2016, 6 (3): 87-92.
- [27] 黄顺红,杨伊,李倩,等. 铅锌矿区土壤重金属空间分布及生态风险评价[J]. 环境科学与技术, 2016, 39 (2): 186-192.
- [28] 孙建德. 湖南某铅锌矿区土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 湖南有色金属, 2013, 29 (4): 57-60.

- [29] 张振磊, 袁建平, 吴丹, 等. 海南昌化铅锌矿废弃地重金属污染评价及其空间分布特征[J]. 湖北农业科学, 2016, 55 (12): 3031–3035
- [30] 覃朝科, 农泽喜, 黄伟, 等. 广西某废弃铅锌矿重金属污染调查及治理对策[J]. 有色金属工程, 2016, 6 (3): 87–92.
- [31] 谢永, 张仁陟, 董博, 等. 徽县洛坝铅锌矿废渣地植被及优势种竞争强度研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27 (5): 1764–1768.
- [32] 王志国. 庆元县铅锌废弃矿山地质环境综合治理方法初探[J]. 中国水运, 2012, 12 (A01): 36–38.
- [33] 李永华, 姬艳芳, 杨林生, 等. 采选矿活动对铅锌矿区水体中重金属污染的研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26 (1): 103–107.
- [34] 刘玥, 薛喜成, 何勇. 灰色关联分析在铅锌矿区地表水重金属污染评价中的应用[J]. 能源环境保护, 2009, 23 (2): 55–57, 59.
- [35] SHEORAN V, SHEORAN AS, POONIA P. Role of hyperaccumulators in phytoextraction of metals from contaminated mining sites: a review [J]. Crit Rev Environ Sci Technol, 2011, 41 (2): 168–214
- [36] WUANA RA, OKIEIMEN FE. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation[J]. ISRN Ecol, 2011, 2011: 1–20.
- [37] ALI H, KHAN E, SAJA MA. Phytoremediation of heavy metals-concepts and applications[J]. Chemosphere, 2013, 91 (7): 869–881.
- [38] 徐应明. 污染土壤修复、诊断与标准体系建立的探讨[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26 (2): 413–418
- [39] LANGDON CJ, PEARCE TG, MEHARG AA, et al. Interactions between earthworms and arsenic in the soil environment: a review[J]. Environ Pollut, 2003, 124 (3): 361–373.
- [40] 戈峰, 刘向辉, 潘卫东, 等. 蚯蚓在德兴铜矿废弃地生态恢复中的作用[J]. 生态学报, 2001, 21 (11): 1790–1795.
- [41] GREIPSSON S. Phytoremediation[J]. Nature Education Knowledge, 2011, 3 (10): 7.
- [42] LONE M, HE Z, STOFFELLA PJ, et al. Phytoremediation of heavy metal polluted soils and water: Progresses and perspectives[J]. J Zhejiang Univ: Science B, 2008, 9 (3): 210–220.
- [43] SINGH A, PRASAD SM. Reduction of heavy metal load in food chain: technology assessment[J]. Rev Environ Sci Bio/Technol, 2011, 10 (3): 199–214.
- [44] REEVES RD. Hyperaccumulation of trace elements by plants[A]. Morel JL, Echevarria G, Goncharova N (Eds.), Phytoremediation of Metal-Contaminated Soils[C]. Springer, Netherlands, 2006: 25–52.
- [45] REEVES RD, BAKER AJM. Metal-accumulating plants[A]. Raskin I, Ensley BD (Eds.), Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean up the Environment[C]. John Wiley and Sons Inc., New York, 2000: 193–229.
- [46] Brooks RR. Plants that hyperaccumulate heavy metals[M]. CAB International, Wallingford, 1998.
- [47] ZOU T, LI T, ZHANG X. et al. Lead accumulation and phytostabilization potential of dominant plant species growing in a lead-zinc mine tailing[J]. Environ Earth Sci, 2012, 65 (3): 621–630.
- [48] 毕德, 吴龙华, 骆永明, 等. 浙江典型铅锌矿废弃地优势植物调查及其重金属含量研究[J]. 土壤, 2006, 38 (5): 591–597.
- [49] 李永丽, 李欣, 李硕, 等. 东方香蒲(*Typha orientalis* Presl)对铅的富集特征及其 EDTA 效应分析[J]. 生态环境, 2005, 14 (4): 555–558.
- [50] NGUYEN TH, SAKAKIBARA M, SANO S, et al. Uptake of metals and metalloids by plants growing in a lead-zinc mine area, Northern Vietnam[J]. J Hazard Mater, 2011, 186 (2–3): 1384–1391.
- [51] ZU Y, LI Y, CHEN J, et al. Hyper accumulation of Pb, Zn and Cd in herbaceous grown on lead-zinc mining area in Yunnan, China[J]. Environ Int, 2005, 31 (5): 755–762.
- [52] 孙健, 铁柏清, 秦普丰, 等. 铅锌矿区土壤和植物重金属污染调查分析[J]. 植物资源与环境学报, 2006, 15 (2): 63–67.
- [53] 胡宇. 毕节铅锌矿区优势植物的铅超富集特性[J]. 贵州农业科学, 2012, 40 (3): 220–223.
- [54] 任秀娟, 朱东海, 吴大付, 等. 湖南南部铅锌矿区铅锌富集植物筛选研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23 (4): 669–672.
- [55] WANG S, LIAO W, YU F. et al. Hyper accumulation of lead, zinc, and cadmium in plants growing on a lead/zinc outcrop in Yunnan Province, China[J]. Environ Geol, 2009, 58 (3): 471–476.
- [56] 辉建春, 蒋小军, 杨远祥, 等. 四川汉源铅锌矿区铅锌富集植物筛选[J]. 水土保持研究, 2009, 16 (5): 233–236.
- [57] 王英辉, 陈学军, 赵艳林, 等. 铅锌矿区土壤重金属污染与优势植物累积特征[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36 (4): 487–493.
- [58] OGBONNA CE, UGBOGU AE, OTUU FC, et al. Phytoremediation potential of some plants in the Ishiagu lead-zinc mining area, Nigeria[J]. World J Phytoremediat Earth Sci, 2015, 2 (2): 99–108.
- [59] 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.
- [60] 张志权, 束文圣, 蓝崇钮, 等. 土壤种子库与矿业废弃地植被恢复研究: 定居植物对重金属的吸收和再分配[J]. 植物生态学报, 2001, 25 (3): 306–311.
- [61] 吴迪, 邓琴, 耿丹, 等. 贵州废弃铅锌矿区优势植物中铅、锌、铬含量及富集特征[J]. 湖北农业科学, 2015, 54 (10): 2363–2366, 2371
- [62] 施翔, 陈益泰, 王树凤, 等. 废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb, Zn 的积累和养分吸收[J]. 环境科学, 2012, 33 (6): 2021–2027.
- [63] PUGH RE, DICK DG, FREDEEN AL. Heavy metal (Pb, Zn, Cd, Fe, and Cu) contents of plant foliage near the Anvil Range lead/zinc mine, Faro, Yukon Territory[J]. Ecotoxicol Environ, 2002, 52 (3): 273–279.
- [64] 刘益贵, 彭克俭, 沈振国. 湖南湘西铅锌矿区植物对重金属的积累[J]. 生态环境, 2008, 17 (3): 1042–1048.
- [65] 秦丽, 祖艳群, 李元, 等. 会泽铅锌矿渣堆周边 7 种野生植物重金属含量及积累特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32 (8): 1558–1563.
- [66] 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.

- [67] JUNG MC, THORNTON I. Heavy metal contamination of soils and plants in the vicinity of a lead-zinc mine, Korea[J]. App Geochem, 1996, 11 (1): 53–59.
- [68] NOURI J, LORESTANI B, YOUSEFI N, et al. Phytoremediation potential of native plants grown in the vicinity of Ahangaran lead-zinc mine (Hamedan, Iran)[J]. Environ Earth Sci, 2011, 62 (3): 639–644.
- [69] 王学礼, 常青山, 侯晓龙, 等. 三明铅锌矿区植物对重金属的富集特征[J]. 生态环境学报, 2010, 19 (1): 108–112.
- [70] 尹仁湛, 罗亚平, 李金城, 等. 泗顶铅锌矿周边土壤重金属污染潜在生态风险评价及优势植物对重金属累积特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27 (6): 2158–2165.
- [71] SHU W, YE Z, ZHANG Z, et al. Natural colonization of plants on five lead/zinc mine tailings in Southern China[J]. Restor Ecol, 2005, 13 (1): 49–60.
- [72] 杨兵, 蓝崇钊, 束文圣. 香根草在铅锌尾矿上生长及其对重金属的吸收[J]. 生态学报, 2005, 25 (1): 45–50.
- [73] 金倩, 杨远祥, 朱雪梅. 汉源普陀山铅锌矿区优势植物铅锌富集特性研究[J]. 西南农业学报, 2010, 23 (6): 1976–1979.
- [74] MARGUÍ E, QUERALT I, CARVALHO ML, et al. Assessment of metal availability to vegetation (*Betula pendula*) in Pb-Zn ore concentrate residues with different features[J]. Environ Pollut, 2007, 145 (1): 179–184.
- [75] FELLETT G, POŠČIĆ F, CASOLO V, et al. Metallophytes and thallium hyperaccumulation at the former Raibl lead/zinc mining site (Julian Alps, Italy)[J]. Int J Phytoremediat, 2012, 146 (4): 1–14.
- [76] BECH J, DURAN P, ROCA N, et al. Accumulation of Pb and Zn in *Bidens triplinervia* and *Senecio* sp. spontaneous species from mine spoils in Peru and their potential use in phytoremediation[J]. J Geochem Explor, 2012, 123 (7): 109–113.
- [77] WANG Y, ZHAN M, ZHU H, et al. Distribution and accumulation of metals in soils and plant from a lead-zinc mineland in Guangxi, South China[J]. Bull Environ Contam Toxicol, 2012, 88 (2): 198–203.
- [78] LORESTANI B, CHERAGHI M, YOUSEFI N. The potential of phytoremediation using hyperaccumulator plants: a case study at a lead-zinc mine site[J]. Int J Phytoremediat, 2012, 14 (8): 786–795.
- [79] CUI S, ZHOU Q, CHAO L. Potential hyperaccumulation of Pb, Zn, Cu and Cd in enduring plants distributed in an old smeltery, northeast China[J]. Environ Geol, 2007, 51 (6): 1043–1048.
- [80] ZU Y, LI Y, CHRISTIAN S, et al. Accumulation of Pb, Cd, Cu and Zn in plants and hyperaccumulator choice in Lanping lead-zinc mine area, China[J]. Environ Int, 2004, 30 (4): 567–576.
- [81] 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.
- [82] 杨刚, 伍钧, 唐亚, 等. 铅锌矿业废弃地草本植物重金属耐性研究[J]. 四川环境, 2006, 25 (4): 18–21, 38.
- [83] 魏树和, 周启星, 王新, 等. 某铅锌矿坑口周围具有重金属超积累特征植物的研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, 5 (3): 33–39.
- [84] MONTERROSO C, RODRÍGUEZ F, CHAVES R, et al. Heavy metal distribution in mine-soils and plants growing in a Pb/Zn-mining area in NW Spain[J]. App Geochem, 2014, 44: 3–11.
- [85] DENG D, DENG J, LI J, et al. Accumulation of zinc, cadmium, and lead in four populations of sedum alfredii growing on lead/zinc mine spoils[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2008, 50 (6): 691–698.
- [86] 李思亮, 杨斌, 陈燕, 等. 浙江省铅锌矿区土壤重金属污染及重金属超富集植物筛选[J]. 环境污染与防治, 2016, 38 (5): 48–54.
- [87] 彭克俭, 刘益贵, 邓小鹏, 等. 湘西铅锌矿区的菊科植物及其对重金属的积累[J]. 亚热带资源与环境, 2009, 4 (4): 11–19.
- [88] 谢永, 张仁陟, 周书灵, 等. 洛坝铅锌矿废弃不同时间渣地植被恢复演替动态[J]. 环境科学研究, 2009, 22 (11): 1312–1316.
- [89] 齐丹卉, 刘文胜, 李世友, 等. 兰坪铅锌矿区植被恢复初期土壤种子库与地上植被关系的研究[J]. 西北植物学报, 2013, 33 (11): 2317–2325.
- [90] 施翔, 陈益泰, 王树凤, 等. 废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收[J]. 环境科学, 2012, 33 (6): 2021–2028.
- [91] 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.
- [92] YANG B, SHU W, YE Z, et al. Growth and metal accumulation in vetiver and two *Sesbania* species on lead/zinc mine tailings[J]. Chemosphere, 2003, 52 (9): 1593–1600.
- [93] 高喜, 张佩, 曹建华. 香根草对铅锌尾矿生长的适应性[J]. 中国资源综合利用, 2011, 29 (11): 27–30.
- [94] 李正强, 杨继刚, 熊俊芬. 铅锌矿尾砂对银合欢生长的影响[J]. 农业科技通讯, 2013 (2): 95–100.
- [95] TITSHALL L, HUGHES J, BESTER H. Characterization of alkaline tailings from a lead/zinc mine in South Africa and evaluation of their revegetation potential using five indigenous grass species[J]. S Afric J Plant Soil, 2013, 30 (2): 97–105.
- [96] 李贵, 童方平, 刘振华, 等. 植物原位阻截铅锌矿区土壤重金属效果和配置模式研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28 (31): 61–64.
- [97] 林庆富. 野葛在铅锌矿弃渣场植被恢复中的应用初报[J]. 林业勘察设计, 2015 (2): 106–108.
- [98] 罗刚. 巴根黑格其尔铅锌矿森林植被恢复对生态环境的影响及综合评价[J]. 内蒙古林业调查设计, 2014, 37 (5): 7–9.
- [99] 刘欢欢, 李阳, 周沛, 等. 宁远县九嶷山原铅锌矿区区域采矿固废综合治理工程封场绿化设计[J]. 环境卫生工程, 2016, 24 (1): 47–48, 51.
- [100] 郭维君, 陈学军, 崔晓艳. 广西泗顶铅锌矿生态恢复与重建研究[J]. 中国矿业, 2010, 19 (5): 44–46, 54.
- [101] 陆东辉. 铅锌矿采选项目对环境影响与治理措施[J]. 北方环境, 2012, 24 (1): 135–136.
- [102] 张月峰, 李俊, 孙明书, 等. 小送归铅锌矿矿区土地复垦和生态重建研究[J]. 安徽农业科学, 2016, 44 (14): 87–89.
- [103] 戴丽, 陶慧萍, 曾祥福, 等. 林业有害植物葛藤风险分析[J]. 中国森林病虫, 2011 (1): 19–23.