

# 华南铅锌尾矿生态恢复的理论与实践

束文圣<sup>1</sup>, 叶志鸿<sup>2</sup>, 张志权<sup>1</sup>, 黄铭洪<sup>2</sup>, 蓝崇钰<sup>1\*</sup>

(1. 中山大学生命科学学院, 生物防治国家重点实验室, 广州 510275; 2. 香港浸会大学生物系及自然资源与环境管理研究所, 九龙塘, 香港)

**摘要:**介绍了近年来有关华南地区 5 个铅锌尾矿生态恢复研究领域的主要研究成果。内容包括: 铅锌尾矿的理化性质和影响植物定居的限制因子; 尾矿酸化的预测与控制; 尾矿的基质改良; 尾矿自然定居植物的生态对策; 重金属耐性植物的筛选与耐性机理; 豆科植物在废弃地植被恢复中的作用; 尾矿湿地系统的重建及其废水处理效率; 土壤种子库在尾矿生态恢复中的作用; 尾矿植被恢复的野外中试研究等。同时, 也讨论了尾矿废弃地生态恢复的未来研究方向。

**关键词:** 铅锌尾矿; 生态恢复; 华南

## Restoration of lead and zinc mine tailings in South China

SHU Wen-Sheng<sup>1</sup>, YE Zhi-Hong<sup>2</sup>, ZHANG Zhi-Quan<sup>1</sup>, WONG Ming-Hung<sup>2</sup>, LAN Chong-Yu<sup>1</sup> (1. School of Life Science and State Key Laboratory for Bio-control, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China; 2. Department of Biology, and Institute for Natural Resources and Environmental Management, Hong Kong Baptist University, Hong Kong, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(8): 1629~1639.

**Abstract:** Continuing environmental damage arising from the disposal of contaminated solid wastes, such as mine tailings, is a feature of old mines all over the world. Physical and chemical methods of stabilization have been developed to meet the need for prevention of dust and pollution from mine tailings. Both physical and chemical stabilizations have been successful in the short-term. However, long-term solutions and visually acceptable methods for preventing pollution can only be achieved by establishment of plants in difficult situations.

Five lead/zinc (Pb/Zn) mine tailings in southern China were studied for revegetation purpose. They included Fankou and Lechang in Guangdong Province, Huangshaping, Shuikoushan and Taolin in Hunan Province. There were great variations of physico-chemical properties both between and within tailings ponds. In general, the five tailings ponds had high concentrations of heavy metals (Pb, Zn, Cu and Cd) and low concentrations of N, P and organic matter. Ecological survey, and pot and field experiments demonstrated that toxic levels of heavy metals and deficiency of major nutrients were the major constraints on revegetation of the tailings ponds, while the extreme acidity and salinity were the most important

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (39270149, 39470146, 39770154, 39870145, 30100024)

**收稿日期:** 2003-02-25; **修订日期:** 2003-05-10

**作者简介:** 束文圣 (1968~), 男, 安徽庐江人, 博士, 副教授, 主要从事污染与恢复生态学研究。E-mail: lssshuws@zsu.edu.cn

\* **通讯联系人** Author for correspondence, Email: ls04@zsu.edu.cn

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (39270149, 39470146, 39770154, 39870145, No. 30100024)

**Received date:** 2003-02-25; **Accepted date:** 2003-05-10

**Biography:** Shu Wen-Sheng, Ph. D., Associate professor, main research field: pollution and restoration ecology. E-mail: lssshuws@zsu.edu.cn

factors restricting plant growth on Lechang tailings which contained a high level of pyrite  $\text{FeS}_2$ .

Pyrite could be oxidized quickly when it was exposed to  $\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{O}_2$ , resulted in acidification of tailings and enhanced the mobility of heavy metals in tailings. The acid-forming potential of the five tailings ponds was studied using both net acid generation (NAG) and acid-base accounting (ABA) or net acid production potential (NAPP) methods, it was found that NAG test was more accurate than the NAPP test. The final NAG-pH gave a well defined demarcation between acid forming and non-acid forming material, and the cut-off values of NAG-pH in Pb/Zn mine tailings were: tailings with  $\text{NAG-pH} \geq 5$ , non-acid forming;  $2.5 < \text{NAG-pH} < 5$ , low to moderate acid forming;  $\text{NAG-pH} \leq 2.5$ , high acid forming.

The natural colonization of plants on the five tailings ponds was limited, with some small patches distributed mainly on the edge, and few patches occurred on the center of tailings. Toxicities of heavy metals in tailings had no effect on seed germination but resulted in failure of seedling establishment. There were totally 54 species among 51 genera and 24 families recorded on the five tailings ponds, of which 13 species belonged to Gramineae, and were the dominant components of the tailings flora. Three ecological strategies for plant establishment on tailings were defined: (1) microsite (avoidance strategy), (2) tolerance strategy, and (3) rhizome strategy. The dominant species growing on the tailings generally possessed high tolerance to the associated heavy metals in their growth substrate and could be potentially used for restoration of soils contaminated by heavy metals. Root elongation test indicated that the populations of *Paspalum distichum* and *Cynodon dactylon* naturally colonizing Lechang and Fankou tailings had evolved metal tolerant ecotypes, and possessed high co-tolerance to Pb, Zn and Cu. However, there were no significant differences between the tailings and normal populations of *Typha latifolia* and *Phragmites australis*, which were the dominant components of Fankou mine tailings, suggested that their tolerance to heavy metals were constitutional tolerance. Iron plaque on the root surface of *T. latifolia* and *P. australis* growing on wetland conditions played an important role on their metal tolerance. However, iron plaque did not affect metal accumulation by plants.

Organic wastes including domestic refuse, river sediment, sewage sludge and pig manure were proved to be very beneficial for plant growth on Pb/Zn mine tailings. Using organic wastes to improve physico-chemical properties also provided an alternative way for disposal of these wastes. For tailings containing a high level of pyrite, limestone was necessary for buffering the acidity released from oxidation of pyrite. Legume species were very useful for the long-term amelioration of edaphic conditions, especially in accumulation of N and organic matter. Effects of heavy metals (Zn and Cu) on the growth of *Rhizobia*, host plant (*Acacia auriculiiformis*) and rhizobia-host plant symbiotic association were assessed, the results indicated host plant was more sensitive to heavy metals and selection of tolerant legume species (ecotype) was important for revegetation. *Sesbania rostrata* was a fast-growing legume species, with both stem and root nodules, therefore, it had a higher N-fixing capability. Pot and field experiments demonstrated that *S. rostrata* could perform well on Pb/Zn mine tailings amended with domestic refuse or sewage sludge, which might play an important role in accumulation of N during the restoration of mine tailings.

The slow colonization of plants on mine tailings was not only due to the extreme edaphic conditions, but also the deficiency of plant propagates. Therefore, soil seed bank as an input seed source for revegetation of Pb/Zn mine tailings was also assessed. It was found that top 2-cm layer of topsoil (abandoned farmland) was sufficient to serve the purpose of provision of seeds for revegetation of mine tailings, and it was also contributed greatly to species richness and plant diversity.

万方数据 The long-term effectiveness and stability of constructed wetlands in treating heavy metal wastewater released from a Pb/Zn mine at Fankou mine were investigated. The results indicated that the Pb/Zn mine

wastewater could be effectively treated by the constructed wetland planted with *Typha latifolia*. Based on the ten-years monitoring results, it was revealed that the removal rates for Pb, Zn, Cu and Cd were 93.98%, 97.02%, 96.87% and 96.39%, respectively. It was also found that the effectiveness of wastewater purification was significantly improved with the wetland become mature.

The overall results indicated that the use of tolerant plant species, together with organic wastes amendment, provided a cost effective method for revegetation of Pb/Zn mine tailings. However, the stability, dynamics, and safety of the restored ecosystem; the succession and assembly rule, biological and soil thresholds in restoration processing should be further investigated, and the cost effectiveness should be assessed, in order to develop an integrated approach for restoratin of mine wastes.

**Key words:**Pb/Zn mine tailings; restoration; South China  
文章编号:1000-0933(2003)08-1629-11 中图分类号:Q948 文献标识码:A

环境与发展,是当前国际社会普遍关注的重大问题,而人类生产活动和经济增长所依赖的重要手段之一的矿产资源开发和利用,由此所引起的一系列生态、社会及经济等问题又是环境与发展的焦点。矿业废弃地是指因采矿活动所破坏和占用的,非经治理而无法使用的土地。它主要包括排土场、尾矿、废石堆、采空区和塌陷区等。采矿活动及其废弃物的排放不仅破坏和占用大量的土地资源,日益加剧人多地少的矛盾。而且,矿山废弃物的排放和堆存也带来一系列影响深远的环境问题,如区域性的重金属污染、土地退化、生物多样性丧失、农作物减产和品质下降、生态系统和景观受到破坏并危害到人体的健康等。矿业废弃地对土地的侵占和环境污染已成为区域性社会经济发展的制约因素<sup>[1~3]</sup>。中国现有国营矿山企业 8000 多个,个体矿山达到 23 万多个。如此数量众多的矿山开采对土地和环境的破坏是相当惊人的。据统计,全国矿区累计被破坏的土地面积达 288 万  $\text{hm}^2$ ,并且每年以大约 4.67 万  $\text{hm}^2$  的速度增长。矿业废弃地的生态恢复,旨在控制采矿业的环境污染,使部分土地复原,并服务一定的经济目的。矿业废弃地的复垦对于持续发展的采矿业和农业都有着深远的意义。因此,矿业废弃地的生态恢复已成为我国当前所面临的紧迫任务之一,也是我国实施可持续发展战略应优先关注的问题之一<sup>[4,5]</sup>。矿业废弃地生态恢复的也蕴涵着重大科学问题。主要体现在:矿业废弃地作为一种以重金属毒害为主要特征的极端裸地,其生态系统自然演替过程与机理研究将是原生演替理论的重要组成部分。同时,耐性种或生态型的形成与进化规律研究也将深刻揭示重金属污染的生态效应。生态系统中的种内、种间关系、多样性与稳定性关系、生态系统演替等重大理论问题,都可以通过废弃地的生态恢复的实践得到检验、发展和补充。自 20 世纪 50 年代从欧洲开始的矿业废弃地植被重建研究,直接推动了恢复生态学这一学科的诞生与发展,现已成为生态学科优先发展领域。此外,生态恢复也是生物多样性保护的一个重要途径<sup>[6~8]</sup>。本文初步总结了华南地区五个铅锌尾矿植被重建研究的阶段性成果,以期尾矿的复垦提供一些理论依据。

1 研究地点

研究地点包括广东省境内的凡口和乐昌铅锌尾矿,湖南省境内的水口山、黄沙坪和桃林铅锌尾矿。凡口尾矿包括 20 世纪 80 年代初已废弃的一号尾矿库,面积约 20  $\text{hm}^2$ ,以及正在运行的 2 号尾矿库,面积约 15 $\text{hm}^2$ ;乐昌尾矿废弃地主要包括 4 个较小的尾矿库,总面积约 10  $\text{hm}^2$ ,其中有 2 个尾矿库已废弃 6~8a;桃林铅锌尾矿占地 108  $\text{hm}^2$ ,其中一半以上的面积已干涸多年;黄沙坪尾矿库正在运行,面积约 30  $\text{hm}^2$ ;水口山已废弃尾矿库占地约 20  $\text{hm}^2$ ,大部分已复垦(覆土种植果树、蔬菜等),调查的是其没有覆土的尾矿区。

2 研究结果

2.1 铅锌尾矿的基本理化性质与植物毒性

深入了解尾矿的基本理化性质,是尾矿植被重建的最基本也是最关键的步骤之一。一般而言,包括尾矿在内的矿业废弃地植物定居的主要胁迫因子有:①物理结构不良,持水保肥能力差;②极端贫瘠,N、P、K 及有机质含量极低,或是养分的不平衡;③重金属含量过高,影响植物各种代谢途径,抑制植物对营养元素

的吸收及根的生长,加剧干旱;④极端 pH 值。强酸性会加剧重金属的溶出和毒害,并会导致养分不足。强碱性也会引起植物的养分不足以及酶的不稳定性等;⑤干旱或过高盐分引起的生理干旱;⑥松散易流动,风扬现象及表面温度过高等<sup>[9~11]</sup>。为确切了解尾矿的基本理化性质及其对植被重建的影响,分析了凡口、乐昌、黄沙坪、水口山和桃林 5 个铅锌尾矿的基本理化性质,结果见表 1。显而易见,不同的理化性质都有较大变异。总的说来,重金属毒性和极端贫瘠是铅锌尾矿植物的主要限制因素,而对乐昌尾矿而言,极高的酸度和盐度则是该尾矿限制植物生长的最主要因素。此后进行的生态学调查、栽培试验等也都证实这一观点<sup>[12~15]</sup>。

表 1 华南 5 个铅锌尾矿的基本理化性质

项目 Parameter	研究地点 Research site				
	凡口	乐昌	黄沙坪	水口山	桃林
	Fankou (n=15)	Lechang (n=18)	Huangshaping (n=7)	Shuikousshan (n=7)	Taolin (n=7)
沙粒 Sand(%)	57	39	52	56	63
粉粒 Silt(%)	15	43	31	30	23
粘粒 Clay(%)	28	18	17	14	14
pH	6.88	5.47	7.71	7.59	8.24
电导率 EC (dS/m)	2.09	4.09	1.16	1.10	0.50
总 N Total N (mg/kg)	399	429	228	414	324
总 P Total P (mg/kg)	695	552	804	1463	249
总 K Total K (mg/kg)	7125	1562	2001	1287	2605
有机质 Organic matter(%)	0.54	0.69	0.45	0.43	0.27
总 Pb* Total Pb (mg/kg)	18423	3051	11558	2462	1120
有效 Pb* Extractable Pb (mg/kg)	385	196	419	257	113
总 Zn Total Zn (mg/kg)	16745	3655	10011	1794	833
有效 Zn Extractable Zn (mg/kg)	336	79.29	375	181	24.40
总 Cu Total Cu (mg/kg)	710	160	204	106	197
有效 Cu Extractable Cu (mg/kg)	31.53	5.04	5.77	10.37	2.94
总 Cd Total Cd (mg/kg)	76.53	21.96	134	21.27	5.09
有效 Cd Extractable Cd (mg/kg)	2.54	0.83	5.49	1.22	0.16
总 Mn Total Mn (mg/kg)	764	325	23528	5956	257
有效 Mn Extractable Mn (mg/kg)	4.54	34.17	11.42	14.43	9.71

\* 总量的重金属(HNO<sub>3</sub>+HCl+HClO<sub>4</sub> 消化),有效态的重金属(DTPA 提取)Total metal (digested by HNO<sub>3</sub>+HCl+HClO<sub>4</sub>), extractable metal (extracted by DTPA)

虽然尾矿的重金属含量很高,但对种子萌发的影响不大。十种植物的种子萌发试验表明,尾矿对种子萌发率无影响,但抑制蔬菜等敏感种子的发芽势和下胚轴的伸长。尾矿的浸出液和淋溶液都显著抑制种子的根伸长,进一步的试验表明,尾矿对植物的毒性主要是表现在幼苗生长阶段,从而限制了植物在尾矿上的自然定居<sup>[16]</sup>。

2.2 尾矿的酸化问题

矿业废弃物的酸化而导致的矿业酸性废水(Acid Mine Drainage,简称 AMD)是矿山环境污染的主要问题之一,酸化引起的极强的酸性也是废弃地植被重建的限制因素。酸化源于废弃物中硫化物(主要是黄铁矿,FeS<sub>2</sub>)暴露于空气中,加上天然淋滤作用,硫化物被水和氧气在细菌的催化下被氧化,产生了大量酸,并促进了矿石中金属的溶解,因而形成了富含重金属离子的酸性废水<sup>[17~20]</sup>。矿业废弃物的酸化是一个较为普遍的现象。为了防止 AMD 的产生,就要尽早预测从废矿物产酸潜力。酸-碱度的估算(Net Acid Producing Potential,APP)和净酸产生的测试(Net Acid Generation Test,简称 NAG)是广泛应用的预测酸化的方法<sup>[21,22]</sup>。

同时应用了 NAPP 和 NAG 方法研究了 5 个尾矿的酸化潜力。结果表明:乐昌尾矿的黄铁矿硫的含量高达 12.5%,产酸潜力极大;凡口尾矿的黄铁矿硫的含量为 8.72%,部分尾矿有产酸的可能;水口山、桃林和黄沙坪尾矿的含硫量较低,无产酸危险。实验发现 NAG-pH 可以作为判定铅锌尾矿酸化强度的一个指标。铅锌尾矿的 NAG-pH 阈值为:  $\text{NAG-pH} \geq 5$ , 不产酸;  $\text{NAG-pH} \leq 2.5$ , 中度或高度产酸;  $2.5 < \text{NAG-pH} < 5$ , 低产酸。这个结果与研究油页岩、煤矸石、铜尾矿、硫铁矿尾矿得出的 NAG-pH 阈值是一致的<sup>[23]</sup>。

NAG 方法较 NAPP 方法更为准确地预测尾矿的产酸潜力。NAPP 方法不足之处在于把全部硫化物及碱性物质均视为有活性的,这将使废矿物酸化潜力预测产生偏差。NAG 是测定产酸潜力更直接的方法,其原理是通过  $\text{H}_2\text{O}_2$  氧化废矿物,产生的酸量作为废矿物产酸的潜在能力。废矿物中的碱性物质在此过程中已被消耗,故完全反应后,pH 值可作为判断该废矿物的酸化潜力的依据。研究还发现酸化主要发生在尾矿表层 0~30cm,对底层的影响不大。但酸化一旦发生,pH 会迅速降低到 2 左右,重金属离子的溶出显著提高,电导率也随之急剧上升,酸化层也会逐渐板结。随着酸化而发生的一系列理化反应,不仅加剧尾矿对环境的污染,也使植物在尾矿的自然定居更加困难<sup>[24,25]</sup>。

2.3 尾矿的基质改良

由于重金属毒性和极端贫瘠是铅锌尾矿植物的主要限制因素,因此基质改良必须达到两方面的目的:既要提高尾矿的养分状况,同时又要降低尾矿的重金属毒性<sup>[9]</sup>。盆栽试验证实添加河塘底泥、生活垃圾等可显著提高尾矿的物理性质、养分状况、并可缓解尾矿的重金属毒性。在尾矿中混入 30%~60%底泥或 60%~90%的垃圾均可显著促进植物在尾矿中的生长,而野外实验也表明:蘑菇房废料、猪粪等也是较好的基质改良物质<sup>[26~28]</sup>。试验同时证实有机废弃物一方面改善了尾矿理化性质,降低了重金属毒性;另一方面,它的添加会促进植物对重金属的吸收,其证据是添加生活垃圾和底泥会显著提高重金属在尾矿植物系统中的富集因子(concentration factors,植物体内重金属含量与尾矿中的重金属含量之比),而富集因子与有机质的含量显著相关,说明有机质促进了植物对重金属的吸收<sup>[26]</sup>。

2.4 植物自然定居及其生态对策

有色金属矿业废弃地尤其是尾矿对于植物定居而言,是一种极端的生境,植物在废弃地上的自然定居过程极其缓慢,要达到良好的植被往往需要几十年、甚至数百年时间,其演替过程也是基质的缓慢改良和耐性物种的逐渐形成过程<sup>[29~31]</sup>。从实质上来说,废弃地植被重建就是复制其自然演替,并加快其自然演替过程<sup>[32]</sup>。因此,有色金属矿业废弃地的植被研究有着很高的理论意义和应用价值,可以指导废弃地植被重建中的基质改良、物种选择和群落配置。

尾矿的植被自然定居极为缓慢,只有一些较小的斑块分布于尾矿的边缘,偶见于尾矿的中部,主要为单个种类组成的单优群落。5 个尾矿(不包括凡口尾矿宽叶香蒲湿地)上共记录有 54 种植物,分属 51 属 24 科。禾本科的植物有 12 种,并且是尾矿植被的优势成份。其次是菊科植物,共有 10 种。尾矿植被的总盖度都在 3%以下。从生活习性来看,草本植物占优势,灌木次之,木本植物最少。值得注意的是,54 种植物中共有 17 种植物是依赖根茎繁殖的,而且这些植物往往是尾矿植被的优势成分。另一些植物一般都具有较小的或易传播的种子,具有很强的迁移能力。根据野外生态学调查,土壤理化性质分析和植物的重金属耐性测定,并综合前人的研究成果,定义了尾矿自然定居植物的 3 种生态对策,即:微生境(逃避)对策、忍耐对策和根茎对策<sup>[33]</sup>。微生境(逃避)对策是指植物局限生长于尾矿中重金属含量低,毒性小,而养分相对较高的局部地区。这些微生境一般来源于人为或自然因素,典型的如尾矿外围的土壤被冲刷到尾矿上、垃圾的堆放、动物粪便、枯枝落叶的自然堆积等。忍耐对策是指植物因为本身具有或业已形成重金属耐性,因而在重金属毒性很高且极端贫瘠的尾矿上能正常生长定居。如宽叶香蒲(*Typha latifolia*),狗牙根(*Cynodon dactylon*),双穗雀稗(*Paspalum distichum*)。根茎对策是指植物本身不具有重金属耐性,它们一般先生长在尾矿的微生境中,但与微生境(逃避)对策不同的是,这些植物根茎的繁殖和延伸,可以大面积扩展到尾矿上生长定居。尾矿数据植物有盐肤木(*Rhus chinensis*),白茅(*Imperata cylindrica* var. *major*)。正常土壤中的盐肤木是没有根茎繁殖特性的。



2.5 重金属耐性植物的筛选与植物的耐性机理

重金属耐性植物是指在具重金属毒性的土壤中能正常生长、定居乃至繁殖后代的植物。自 1952 年 A. D. Brashaw 发现重金属耐性植物以来,其生理、生态、遗传、进化等方面的研究取得很大进展<sup>[34]</sup>。重金属耐性植物不仅能耐重金属毒性,往往还可以适应废弃地的极端贫瘠、土壤结构不良等恶劣环境,部分耐性植物能富集高浓度的重金属,因而被广泛地用于废弃地的植被重建和重金属污染土地的植物修复。目前,国际上已陆续报道数百种重金属耐性植物,并有多耐性品种(如 *Festuca rubra*, *Agrostis tenuis* 和 *Agrostis stolonifera*)已经商品化,供废弃地的复垦之需<sup>[8]</sup>。考虑到引种可能会带来的生态问题,且乡土植物能适应当地的气候条件,因此,立足本地筛选重金属耐性植物十分必要。对幅员广阔的中国尤为重要。

根据一系列的废弃地生态学调查,重点选择宽叶香蒲、芦苇(*Phragmites australis*)、双穗雀稗和狗牙根等 4 种植物进行了重金属耐性的研究。在国内外第一次利用宽叶香蒲的种苗,比较了它的不同种群对 Zn、Pb、Cd 的金属耐性。供试的宽叶香蒲是用采自英国和凡口尾矿的不同种群的种子萌发培育的。结果显示,虽然原生长基质的重金属含量有很大的不同,但各种群间的重金属耐性并无显著差异,世界各地分布的香蒲植物都具先天的金属耐性(constitutional tolerance)。芦苇和宽叶香蒲一样,也是具有先天的金属耐性<sup>[35-36]</sup>。与之相反,定居于乐昌尾矿上的狗牙根和双穗雀种群,以及凡口尾矿上的双穗雀种群对 Pb、Zn 和 Cu 的耐性都显著高于生长在正常土壤上的对照种群,可见生长于尾矿上的双穗雀稗和狗牙根都已形成重金属耐性生态型<sup>[37]</sup>。这 4 种植物都可作为尾矿植被重建的先锋植物。

生长在尾矿上的宽叶香蒲根表面有一层很明显的黄色外鞘,这种由铁氧化物或氢氧化物沉积在植物根的表面形成的一层外套被称之为“铁鞘(iron plaque)”。野外经常可以看到湿地植物根上的铁鞘。较长期的水培试验结果证明,对于金属耐性来说,无论是在金属培养液中,还是在对照组中,对宽叶香蒲的种苗的生长,“铁鞘”都没有有利的作用。“铁鞘”的出现既不能影响 Cu 的吸收与传输也不能增加 Ni 的吸收与传输。但是,具有“铁鞘”的根比没有“铁鞘”的根吸收较少的 Pb 和 Cd。在营养液中培养的香蒲种苗,铁鞘的出现并不影响 Zn、Pb、Cd 的传输。但是,所吸收的绝大多数 Pb 和 Cd 被留在根中,而 Zn 则多数留在茎中。这一结果显示,对于 Pb 与 Cd 的传输来说,根组织比根表面与铁鞘起到更主要的屏障作用。而且,铁鞘可能起着铁的储存库的作用,可以使细胞增加铁离子的浓度以降低金属的毒性<sup>[38,39]</sup>。

2.6 豆科植物在废弃地植被恢复的作用

在矿业废弃地的植被恢复中氮素及氮循环常常处于关键的地位,因为它的状况在很大程度上反映出系统中的养分状况。在废弃地系统中,植物可利用形态的氮素来源于有机质的分解、土壤中固氮微生物的固氮作用以及降雨中的 NO<sub>3</sub> 和 NH<sub>3</sub>。在废弃地植被恢复中种植豆科植物至少有两方面的重要作用:其一是多年生的豆科植物能够与根瘤菌共生,从而有效地把大气中的 N<sub>2</sub> 固定成 NH<sub>3</sub>。枯死植株为废弃地提供大量的土壤有机物质,而这类有机物质中的 C/N 比较低,从而在分解后可以有效地增加土壤中氮素的累积;第二个作用是它们在废弃地植被恢复中对其它幼苗不但可以提供额外的氮素,而且还起到了遮荫等保护作用。但是在矿业废弃地环境条件下,作为寄主的豆科植物本身能否生存与生长;根瘤菌本身能否生存与繁衍,并且是否仍具有感染寄主使之结瘤的能力;所形成的根瘤是否还具有固氮作用,即根瘤是否有效;这三个环节中任何一环如果在矿业废弃地环境,尤其是被重金属污染的环境的影响之下而失败的话,那么豆科植物在废弃地植被恢复中所起的促进氮素累积与循环作用也就成为不可能了<sup>[40]</sup>。

研究了这三个环节在不同的 Zn 浓度环境中所受到的影响:(1)将作为寄主植物的大叶相思(*Acacia auriculiformis*)幼苗在完全培养液中加入不同 Zn 浓度进行水培试验;(2)从大叶相思根瘤中分离的根瘤菌在含有不同锌浓度的酵母汁甘露醇培养基(YAM)上;(3)在砂培条件下,供给含有不同的锌浓度的培养液,接种根瘤菌的大叶相思幼苗培养 3 个月后,被感染结瘤和结瘤植株平均每株的根瘤数以及根瘤的形态等,并测定在不同锌环境中所结根瘤的固氮酶活性。结果表明,以根瘤菌的耐性最大,其 EC<sub>10</sub> 值和 EC<sub>50</sub> (Effective concentration to reduce by 10% and 50%)最高,分别超过 300 mg/L 和 600 mg/L,而以寄主植物大叶相思的耐性最低,其 EC<sub>10</sub> 值和 EC<sub>50</sub> 分别在 1 mg/L 和 20 mg/L 以下。因此,寄主植物的耐性是根瘤菌-豆科植物共生体在受污染的退化地上定居和生长的限制性因素。所以,问题的重点是在选择耐性寄主

豆科植物<sup>[41]</sup>。然而,许多调查却显示,豆科植物并不是矿业废弃地上的重要入侵种,或者不是植被早期演替阶段中的主要植被组成成分。在比较了十多种豆科植物的重金属耐性后发现,大叶相思的重金属耐性指数最高。在捐赠土壤种子库在尾矿植被重建中的作用的研究发现,银合欢(*Leucaena leucocephala*)亦具有很强的重金属耐性<sup>[40]</sup>。此外,长喙田菁(*Sesbania rostrata*)因其独特的茎固氮作用,以及较快的生长速度,可用于尾矿生态恢复中 N 和有机质的积累。虽然这种植物对重金属的耐性程度不高,但可以在改良后的尾矿上生长良好<sup>[42~44]</sup>。

2.7 尾矿湿地系统的重建及其废水处理效率

尾矿的废水排放一直是倍受关注的主要环境问题之一。由于其排放量大,固体悬浮物、重金属等严重超标,污水处理的难度很大。随着人们对高等水生植物废水处理效能的认识,自然或人工湿地近 30a 来迅速发展成为一种新兴的污水处理系统。目前国内外研究和应用得较多的是利用湿地系统处理生活污水,而对尾矿的废水处理研究相对较少。本课题组自 20 世纪 80 年代中期起,在凡口铅锌矿正在运行的 2 号尾矿库上种植宽叶香蒲,经过人工扩种和自然繁殖,到 20 世纪 80 年代末,已形成了一个以宽叶香蒲为主体的湿地污水处理系统。其总面积约为 10hm<sup>2</sup>,日处理废水为 3.2~3.8 万 t,废水在湿地内滞留时间为 5~6d。监测结果表明宽叶香蒲湿地生态系统能有效地净化铅/锌矿废水的 COD、悬浮物、Pb、Zn、Cu、Cd。经湿地处理的废水可达到国家工业废水排放标准<sup>[45]</sup>。1996~1999 年,再次对宽叶香蒲湿地生态系统及其废水净化效能进行了详尽调查。结果表明:(1)宽叶香蒲湿地仍能有效地净化铅/锌矿废水。经宽叶香蒲湿地系统处理后,COD、悬浮物、Pb、Zn、Cu、Cd 的去除率分别为 92.19%、99.62%、93.98%、97.02%、96.87%、96.39%。并且湿地系统的废水净化功能是伴随湿地生态系统恢复而增强。(2)以宽叶香蒲为优势种的湿地生态系统主要植物有 98 种,隶属 44 科 86 属。次优势种有:芦苇、茭苳(*Cyperus malaccensis*)等。植物群落外貌单调而整齐,层次分化不明显,植物群落呈集群分布格局。地上部分的生物量垂直分布呈金字塔形,主要集中在 0~0.5m。随湿地系统的恢复演替进程,植物种类、生物量及生物多样性都呈上升趋势。(3)随湿地系统的恢复演替进程,表现为土壤肥力提高,土壤有机质、N、P 和 K 的含量分别从 0.54%、0.040%、0.069%和 0.71%提高到 1.17%、0.082%、0.141%和 0.82%<sup>[46,47]</sup>。

2.8 土壤种子库在尾矿生态恢复中的作用

矿业废弃地上植被自然恢复是十分缓慢的,向这种生境人为引入更多植物种类,对于增加矿业废弃地上植物物种的多样性及地面覆盖是十分重要的。土壤种子库含有许多在植被演替中起重要作用的乡土植物先锋种类,它们对于恶劣环境具有特别的耐性和适应力。另外土壤覆盖层对于改善废弃地理化条件,为种子萌发、幼苗定居后期生长提供良好环境条件<sup>[48,49]</sup>。1998 年在乐昌铅锌尾矿建立了一个试验小区系统研究了土壤种子库对尾矿废弃地植被恢复作用及其影响因素。结果表明土壤种子库中 75.8%的种子和 92.7%的种类都集中在 0~2cm 表层。在覆土试验中,只有覆土层厚度达 8cm 小区实现植被恢复,一年后成功定居率达 73%左右。但覆土层太薄(4cm)无法有效阻隔尾矿与大气所接触导致的酸化影响,在利用土壤种子以促进矿业废弃地植被恢复过程中,适当选取一些无毒“阻隔”物质,如淤泥、生活垃圾等,这不仅减少了对植被的影响,还可减少城市垃圾对土地的压力,并降低这一技术实施成本,对其推广使用具有积极意义<sup>[50]</sup>。

2.9 尾矿植被恢复的野外中试研究

用于改良废弃地的材料极其广泛,表土、化学肥料、有机废弃物、绿肥、固氮植物都被用于废弃地的改良。基于盆栽试验的结果,1996 年在乐昌铅锌尾矿建立了一个试验小区,系统研究不同的植物种类和基质改良措施在铅锌尾矿植被重建中的实际效果。所选用的乡土种有:狗牙根、双穗雀稗、类芦(*Neyraudia reynaudiana*)、芒(*Miscanthus sinensis*)、蟛蜞菊(*Wedelia chinensis*)、银合欢、台湾相思(*Acacia confusa*)、盐肤木、桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、长喙田菁、黑麦草(*Lolium multiflorum*)、高麦草(*Agropyron elongatum*)、剪股颖(*Agrostis tenuis*)、白车轴草(*Trifolium repens*)、马占相思(*Acacia mangium*)、百喜草(*Paspalum* 万寿菊根草(*Vetiveria zizanioides*)等。基质改良的主要措施有:①加不同量的石灰及石灰渣,②埋 1kg 营养袋,③加 10cm 或 20cm 垃圾,④加 3cm 垃圾、土壤和塘泥,⑤加 15cm 石块,铺不同厚

度土壤(30cm),⑥加不同厚度表土(3~8cm),⑦挖 30×30×30cm<sup>3</sup> 坑填土。试验结果表明,狗牙根、双穗雀稗、香根草和银合欢对尾矿的适应性较强,并且能适应当地的气候状况,适宜在铅锌尾矿上种植。基质改良试验的主要结果有:乐昌尾矿由于黄铁矿含量高于 15%,尾矿在耕作后一个月内迅速发生酸化,导致种子不能萌发或萌发后立即死亡。因此,石灰是植物在酸性铅锌尾矿上生长所必需的,石灰渣的施用量为 200t/hm<sup>2</sup> 为宜。塘泥、生活垃圾的改良效果比土壤好。在各种处理中,以覆盖 30cm 土壤,石块+30cm 土壤,100t/hm<sup>2</sup> 或 200t/hm<sup>2</sup> 石灰渣+10cm 或 20cm 生活垃圾等几种处理的效果最好,半年内植物被盖度都可达到 100%,完全可以控制酸性尾矿的环境污染问题。双穗雀稗在覆盖 5cm 的土壤或垃圾的尾矿中生长良好;狗牙根在施用有废石灰(100 或 200t/hm<sup>2</sup>)以及覆盖有 10~20cm 的生活垃圾的尾矿上能形成较好的植被,并且可以在一定程度上控制酸化的发生<sup>[28,51~54]</sup>。

3 展望

虽然在过去 10 余年里,铅锌尾矿的生态恢复研究取得一些阶段性的理论与应用成果,但还不足以全面指导尾矿的生态恢复工作。对于发展中国家的中国来说,现阶段无法仿效欧美等国的耗资巨大的生态恢复措施,因此,应致力寻找经济、有效、符合中国国情的生态恢复措施。重金属耐性植物和废弃物的结合使用,就是一种经济有效地在铅锌尾矿上植被恢复技术体系,但仍有很多理论与技术问题有待更深入的研究,诸如:

(1)矿业废弃地的生态系统自然演替过程与机理。重金属耐性植物的形成与演化的分子机制;植物自然定居的生态对策;群落建成的速度及其与废弃地营养元素的积累的关系;恢复过程中微生物、动物和植物重建的影响;重金属胁迫对群落结构和动态的影响;顶级群落的类型与立地条件的关系;生态恢复的土壤与生物阈值;生态恢复过程中的群落集合规则等。

(2)生态系统恢复的技术与方法。物理、化学和生物的基质改良方法与实施效果;酸化控制的技术与机理;耐性物种的选择;种类配置方案;土壤种子库在生态恢复中的作用;生态恢复过程中的与植物的重建植被后期管理与调控。

(3)重建生态系统的动态与稳定性。系统研究重建植被的动态与种类组成与配置、物种多样性、基质改良措施、废弃地生态恢复中营养元素的积累与循环规律、重金属含量等的关系;揭示控制群落动态和稳定性的主要因素,为建立自维持的生态系统提供理论基础。

(4)重建生态系统的安全性。基于现已建立的矿业废弃地人工生态系统,重点研究几种主要重金属在土壤-植被系统中的迁移转化规律;重金属在食物链中的积累规律。据此评价各种重建生态系统的生态安全性。

(5)废弃地生态恢复的技术、效益评价体系。从生态价值、环境(污染控制效能)与经济效益为指标,评价不同类型重建生态系统的投入产出效益;建立相应的废弃地生态恢复的技术、效益评价体系。

References:

[ 1 ] Lan C Y, Shu W S, Sun Q Y. Reclamation of mining lands. In: Chen C D, ed, *Sustainable Development and Ecology*. Beijing: Science and Technology Press of China, 1993. 132~138.

[ 2 ] Dudka S and Adriano D C. Environmental impacts of metal ore mining and processing: a review. *Journal of Environmental Quality*, 1997, **26**: 590~602.

[ 3 ] Wong M H. Environmental impacts of iron ore tailings, the case of Tolo Harbour, Hong Kong. *Environmental Management*, 1981, **5**: 135~145.

[ 4 ] Bai Z K, Zhao J Q. *Ecological Construction and Reclamation of Industrial and Mining Wastelands*. Beijing: China Agricultural Press, 2000.

[ 5 ] Shu W S, Zhang Z Q, Lan C Y. Strategies for restoration of mining wastelands in China (I). *Ecological Science*, 2000, **19**(2): 25~29.

[ 6 ] Dobson J, Shaw A D and Baker A J M. Hopes for further, restoration ecology and conservation biology. *Science*, 1997, **277**: 515~522.



- [7] Jordan W R III, Gilpin M E and Aber J D. *Restoration Ecology :A Synthetic Approach to Ecological Research*. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
- [8] Bradshaw A D and Chadwick M J. *The Restoration of Land, the Ecology and Reclamation of Derelic and Degraded Land*. Berkeley:University of California Press,1980.
- [9] Wong M H. Reclamation of wastes contaminated by copper, lead and zinc. *Environmental Management*, 1986, **10**: 707~713.
- [10] Ritcey G M. *Tailings Management: Problems and Solutions in the Mining Industry*. Amsterdam: Elsevier, 1989.
- [11] Johnson M S, Cooke J A and Stevenson J K W. Revegetation of metalliferous wastes and land after metal mining. In: Hester and Harrison R M eds. *Mining and Its Environmental Impact*. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 1994. 31~48.
- [12] Shu W S, Lan C Y, Zhang Z Q. Analyzing of the major constraints on the colonization on Fankou pb/Zn mine tailings. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, **8**(3):314~318.
- [13] Ye Z H, Shu W S, Zhang Z Q, *et al*. Evaluation of major constraints on revegetation at Lechang lead/zinc mine tailings using bioassays. *Chemosphere*, 2002, **47**: 1103~1111.
- [14] Sun Q Y, Lan C Y, Wong M H, *et al*. Natural colonized plants on tailings of lead-zinc mine. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(9): 1457~1462.
- [15] Lan C Y, Shu W S and Wong M H. Reclamation of a Pb/Zn mine tailings in Guangdong Province, P. R. China: The phytotoxicity of the tailings. In: Wise D L ed. , *Global Environmental Biotechnology*. New York: Elsevier, 1997. 119~130.
- [16] Zhang Z Q, Lan C Y and Wong M H. Revegetation of Pb/Zn mine tailings: germination and seedling establishment of plants. *Land Contamination and Reclamation*, 1997, **4**: 269~280.
- [17] Robbed G A and Robison J D F. Acid drainage from mines. *Geographical Journal*, 1995, **161**: 47~54.
- [18] Williamson N A, Johnson M S and Bradshaw A D. *Mine Wastes Reclamation*. London: Mining Journal Books Ltd. , 1982.
- [19] Hossner L R. *Reclamation of Surface-Mined Lands*, Vol. 1. Florida: CRC Press, 1988.
- [20] Lan C Y, Shu W S, Zhang Z Q. Acid leaching effects in heavy metal mobility of Pb/Zn tailings and the phytotoxicity of leachate. *Chinese Environment Science*, 1996, **15**(6):461~465.
- [21] Ferguson K D and Erickson P M. Pre-mine prediction of acid mine drainage. In: Salomons W, Förstner U eds. *Chemistry and Biology of Solid Waste*. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 24~43.
- [22] Finkelman R B and Giffin D E. Hydrogen peroxide oxidation: an improved method for rapidly assessing acid-generating potential of sediments and sedimentary rocks. *Recreation and Revegetation Research*, 1986, **5**: 521~534.
- [23] Shu W S, Huang L N, Zhang Z Q, *et al*. The acid producing potential of some mine wastes. *Chinese Environmental Science*, 1999, **19**(5):402~405.
- [24] Shu W S, Ye Z H, Lan CY, *et al*. Acidification of lead/zinc mine tailings and its effect on heavy metal mobility. *Environment International*, 2001, **26**: 389~394.
- [25] Wong J W C, Ip C M and Wong M H. Acid forming capacity of lead-zinc mine tailings and its implications for mine rehabilitaiton. *Environmental Geochemistry & Health*, 1998, **20**(3):149~155.
- [26] Lan C Y, Shu W S and Wong M H. Reclamation of a Pb/Zn mine tailings in Guangdong Province, P. R. China: the role of river sediment and domestic refuse. *Bioresource Technology*, 1998, **65**: 117~124.
- [27] Ye Z H, Wong J W C and Wong M H. Vegetation response to lime and manure compost amendments on acid lead/zinc mine tailings: a greenhouse study. *Restoration Ecology*, 2000, **8**: 289~295.
- [28] Ye Z H, Wong J W C, Wong M H, *et al*. Revegetation of Pb/Zn mine tailings, Guangdong Province, China. *Restoration Ecology*, 2000, **8**: 87~92.
- [29] Gemmell J. *Natural Colonization of Industrial Wasteland*. London: Edward Arnold, 1977.
- [30] Wu L. Colonization and establishment of plants in contaminated environments. In: Shaw A J ed. *Heavy Metal*

*Tolerance in Plants: Evolutionary Aspects*. Florida: CRC Press Inc, 1990. 269~284.

- [31] Kimmerer R W. Natural revegetation of abandoned lead and zinc mines (Wisconsin). *Restoration and Management Notes*, 1981, **1**: 20.
- [32] Bradshaw A D. Restoration of mined lands——using natural process. *Ecological Engineering*, 1997, **8**: 255~269.
- [33] Shu W S, Lan C Y, Zhang Z Q *et al*. Natural colonization of plants on five Pb/Zn mine tailings in South China. *Proceedings of the 7th Tnternational Congress of Ecology*, Florence, Italy, 1998. 390.
- [34] Baker A J M. Metal tolerance. *New Phytologist*. 1987, **106**: 93~111.
- [35] Ye Z H, Baker A J M, Wong M H, *et al*. Zinc, lead and cadmium tolerance, uptake and accumulation by *Typha latifolia*. *New Phytologist*, 1997, **136**: 469~480.
- [36] Ye Z H, Baker A J M, Wong M H, *et al*. Zinc, lead and cadmium tolerance, uptake and accumulation by the common reed, *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steudel. *Annual Botany*, 1997, **80**: 363~370.
- [37] Shu W S, Ye Z H, Zhang Z Q, *et al*. Lead, zinc and copper accumulation and tolerance in populations of *Paspalum distichum* and *Cynodon dactylon*, *Environmental Pollution*, 2002, **120**: 445~453.
- [38] Ye Z H, Baker A J M, Wong M H, *et al*. Zinc, lead and cadmium accumulation and toleranc in *Typha latifolia* as affected by iron plaque on the root surface. *Aquatic Botany*, 1998, **61**:55~67.
- [39] Ye Z H, Baker A J M, Wong M H, *et al*. Copper and nickel uptake, accumulations and tolerance in *Typha latifolia* with and without iron plaque on the root surface. *New Phytologist*, 1997, **136**: 481~488.
- [40] Zhang Z Q, Shu W S, Liao W B, *et al*. Deficiency of nutrients and the role of legume species in restoration of mine wastelands. In: Lu X *et al*. eds. *Mine Land Reclamation and Ecological Restoration for the 21 Century*. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2000. 514~520.
- [41] Zhang Z Q, Wong M H, Nie X P, *et al*. Effects of zinc (zinc sulfate) on rhizobia-earleaf Acacia (*Acacia auriculaeformis*) symbiotic association. *Bioresource Technology*, 1998, **64**: 97~104.
- [42] Yang Z Y, Yuan J G, Xin G R, *et al*. Germination, growth and nodulation of *Sesbania rostrata* in lead/zinc mine tailings. *Environmental Management*, 1997, **21**: 617~622.
- [43] Ye Z H, Yang Z Y, Chan Y S G, *et al*. Growth response of *Sasbania rostrata* and *S. cannabina* on pure and sludge-amended lead/zinc mine. *Environment International*, 2001, **26**: 449~454.
- [44] Jian S G, Yang Z Y. The role of stem nodule in the adaptation of *Sesbania rostrata* to Pb/Zn tailings environment II. The effect of stem nodule on nitrogen and heavy metal accumulation of *Sesbania rostrata*. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2002, **26**(2):209~215.
- [45] Lan C Y, Chen G Z, Li L C, *et al*. Use of cattails in treating wastewater form a Pb/Zn mine. *Environmental Management*, 1992, **16**(1):75~80.
- [46] Yang C S, Lan C Y, Shu W S. Purification of Pb/Zn mine wastewater with *Typha latifolia* man-made wetland. *Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)*, 2000, **17**(2~3):51~57.
- [47] Yang C S, Lan C Y, Shu W S, *et al*. Restoration of wetland communities dominated by *Typha latifolia*. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2002, **26**(1):101~108.
- [48] Zhang Z Q. Soil seed bank. *Chinese Journal of Ecology*, 1996, **15**(6):36~42.
- [49] Ash H J, Gemmel R P and Bradshaw A D. The introduction of native plant species on industrial waste heaps; a test of immigration and factors affecting on primary succession. *Journal of Applied Ecology*, 1994, **31**: 74~84.
- [50] Zhang Z Q, Shu W S, Lan C Y, *et al*. Soil seed bank as an input of seed source in revegetation of lead/zinc mine tailings. *Restoration Ecology*, 2001, **9**:378~385.
- [51] Shu W S, Zhang Z Q, Huang L N, *et al*. Use of tolerant population of *Paspalum distichum* for revegetation of a Pb/Zn mine tailings at Lechang: field experiment. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2000, **39**(4): 94~98.
- [52] Xia H P, 万方数据 Resistance and uptake of heavy metals by *Vertiver zizanioides* and *Paspalum notatum* from lead/zinc mine tailings. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(7):1121~1129.

[53] Shu W S, Xia H P, Zhang Z Q, *et al.* Use of vetiver and three other grasses for revegetation of Pb/Zn mine tailings: field experiment. *International Journal of Phytoremediation*, 2002, **4**: 47~58.

[54] Hu H W, Jiang B L, Lan C Y, *et al.* Effects of different improvements on controlling acidification of Pb/Zn mine tailings. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1998, **38**(3): 68~71.

参考文献:

[1] 蓝崇钰, 束文圣, 孙庆业. 采矿地的复垦. 见: 陈昌笃主编. 持续发展与生态学. 北京: 中国科技出版社, 1993. 132~138.

[4] 白中科, 赵景逵. 工矿土地复垦与生态重建. 北京: 中国农业科学出版社, 2000.

[5] 束文圣, 张志权, 蓝崇钰. 中国矿业废弃地的复垦对策研究(I). 生态科学, 2000, **19**(2): 25~29.

[12] 束文圣, 蓝崇钰, 张志权. 凡口铅锌尾矿影响植物定居的主要因素分析. 应用生态学报, 1997, **8**(3): 314~318.

[14] 孙庆业, 蓝崇钰, 黄铭洪等. 铅锌尾矿自然定居的植物. 生态学报, 2001, **21**(9): 1457~1462.

[20] 蓝崇钰, 束文圣, 张志权. 酸性淋溶对铅锌尾矿金属行为的影响及植物毒性. 中国环境科学, 1996, **16**(6): 461~465.

[23] 束文圣, 黄立南, 张志权, 等. 几种矿业废物的酸化潜力. 中国环境科学, 1999, **19**(5): 402~405.

[44] 简曙光, 杨中艺. 茎瘤对长喙田菁在铅锌尾矿环境适应中的意义 II. 茎瘤对长喙田菁固氮和积累重金属的影响. 植物生态学报, 2002, **26**(2): 209~215.

[45] 阳承胜, 蓝崇钰, 束文圣. 宽叶香蒲人工湿地对铅/锌矿废水净化效能. 深圳大学学报(理工版), 2000, **17**(2~3): 51~57.

[46] 阳承胜, 蓝崇钰, 束文圣, 等. 凡口宽叶香蒲湿地植物群落恢复的研究. 植物生态学报, 2002, **26**(1): 101~108.

[47] 张志权. 土壤种子库. 生态学杂志, 1996, **15**(6): 36~42.

[52] 夏汉平, 束文圣. 香根草和百喜草对铅锌尾矿重金属的抗性与吸收差异研究. 生态学报, 2001, **21**(7): 1121~1129.

[54] 胡宏伟, 姜必亮, 蓝崇钰, 等. 广东乐昌铅锌尾矿废弃地酸化控制研究. 中山大学学报, 1998, **38**(3): 68~71.