

铅锌尾矿上自然定居植物

孙庆业¹, 蓝崇钰², 黄铭洪³, 杨林章¹

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2. 中山大学生命科学院, 广州 510275; 3. 香港浸会大学生物系, 香港九龙塘)

摘要:在凡口 1[#] 铅锌尾矿库内共有 10 种植物自然定居, 这些植物主要生长在尾矿库的边缘区域。植物在尾矿上的生长、分布明显受到表层尾矿某些物理性质如稳定状况、含水量等的影响, 尾矿中的营养物质含量与植物的生长高度以及群落盖度有一定的关系。杜虹花(*Callicarpa pedunculata*)体内的 Pb、Zn、Cu 和 Cd 含量大小顺序为: 叶>根>茎, 而盐肤木(*Rhus chinensis*)和美丽胡枝子(*Lespedeza megacephala*)体内的 Pb、Zn 含量则为: 根>叶>茎。4 种重金属在植物体内的含量表现为: Zn>Pb>Cu>Cd。

关键词:尾矿; 重金属; 植物; 铅锌矿

Natural colonized plants on tailings of Lead-Zinc mine

SUN Qing-Ye¹, LAN Chong-Yu², WONG Ming-Hong³, YANG Lin-Zhang¹ (1. *Institute of Soil Science, Academia Sinica, Nanjing 210008*; 2. *School of Life Science, Zhongshan University, Guangzhou 510275*; 3. *Department of Biology, Hong Kong Baptist University, Kowloon Tong, Hong Kong*). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21 (9): 1457~1462.

Abstract: 10 species plant species naturally colonize in the tailings pool (number 1) of Fankou Lead-Zinc mine. Most plants grow on border district of tailings pool. The growth and distribution of plants were obviously determined by physical properties of upper tailings, such as stability, water content. There were correlation between the concentration of nutrition in tailings and the plants height and community coverage. The concentrations of Cu, Cd, Zn and Pb followed the order leaf>root>stem in *Callicarpa pedunculata* and the concentrations of Pb and Zn root>leaf>stem in *Rhus chinensis* and *Lespedeza formosa* and concentrations of heavy metals Zn>Pb>Cu>Cd in all plants.

Key words: tailings; heavy metals; plants; Lead-Zinc mine

文章编号: 1000-0933(2001)09-1457-06 中图分类号: Q948 文献标识码: A

铅锌尾矿是铅锌矿在浮选过程中所产生的矿业废弃物, 其主要理化性质表现为: 结构不良——干时疏松、风扬现象严重, 湿时粘重板结, 水蚀严重, 保水保肥能力差, 昼夜温差大; 极端贫瘠——有机质、氮、有效磷、速效钾含量低, 表现为营养不良或不平衡; 重金属含量高; 极端 pH; 盐分含量高等^[1,2,3], 凡口铅锌矿的尾矿也是如此。要在尾矿上进行植被重建工作, 选育出能够在尾矿上生长的耐性植物是非常重要的。在耐性植物的选育过程中, 调查尾矿上自然定居植物具有重要意义。一般说来, 这些自然定居植物多为耐性植物^[4~6]; 同时对于尾矿上植物群落的形成、发展和变化规律进行调查及其与尾矿基质之间的关系进行研究, 可为尾矿废弃地的人工植被重建提供参考。

1 自然概况

凡口铅锌矿 1[#] 尾矿库位于广东省北部仁化县境内, 于 1980 年代停用。该尾矿库是山谷型尾矿库, 占地面积 0.2 km², 海拔约 150m。尾矿表面疏松, 水蚀现象严重, 同时尾矿库内的部分尾矿形成较大面积的酸化

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(39470146)

收稿日期: 1999-11-22 修回日期: 2000-08-05

作者简介: 孙庆业(1964~), 男, 安徽省长丰县人, 博士, 讲师。主要从事污染生态学和矿业废弃地生态恢复研究。

区域(约占尾矿库总面积的 1/5, pH3.5~5.5), 尾矿库内的尾矿表面大部分裸露, 只是在尾矿库的边缘区域的尾矿上有植物生长, 形成狭长的植物群落带。

尾矿库所在区域的年均气温为 19.7℃, 1 月份平均气温 9.2℃, 7 月份平均气温 28.8℃; 年平均降水量 1663mm, 降雨多集中于 4~9 月份, 无霜期 304d。尾矿库周围为低山, 山坡植被多为次生的马尾松-芒萁(*Pinus masoniana-Dicropiteris dichotoma*)群落, 山坡土壤为低山酸性红壤(pH4.9~5.3)。

2 研究方法

2.1 调查与采样

1994~1995 年在尾矿库的边缘地区(与山坡交界处)设置 4 个样条(I~IV), 见图 1。I 样条横穿盐肤木-蕨(*Rhus chinensis-Pteridium aquilinum*)群落; II 样条横穿白茅(*Impreta cylindracea*)群落; III 样条位于盐肤木(*Rhus chinensis*)幼苗处; IV 样条位于尾矿库一角的冲积土覆盖处。I~III 样条设置 4 个 1m×1m 的样方, 样方间隔 2m, 每样条的第一个样方(I-1, II-1, III-1)位于山坡底部, 其余位于尾矿上。IV 样条设 5 个 1m×1m 的样方, 样方间隔 2m, 样方全部位于尾矿库内的冲积土上。详细记录各样方内的植物种类、每种的高度、盖度及样方总盖度。I~III 样条的各个样方内采集了尾矿(或土壤)样本(0~30cm 深度); IV 样条内采集各个样方冲积土, 采集深度取决于各样方表面所覆盖冲积土的厚度。

2.2 样品处理

野外采回的尾矿或土壤样品, 放在实验室内自然风干, 用玛瑙研钵研磨、过筛, 用于分析化学性质。

2.3 样品分析

pH 尾矿(或土壤)水比为 1:2.5, pH 计测定;

总碳 尾矿中含有 S^{2-} , 不能采用重铬酸钾容量法-外加热法测定, 采用测定腐殖质总碳含量方法测定^[7];

总氮 凯氏定氮法测定;

总磷 H_2SO_4 (浓)- $HClO_4$ 消化, 钼锑抗比色法测定;

有效磷 $0.5mol L^{-1}NaHCO_3$ (液: 尾矿或土壤=10:1), 振荡 30min, 过滤, 钼锑抗比色法测定;

速效钾 $1mol L^{-1}NH_4Ac$ 提取(液: 尾矿或土壤=10:1), 20~25℃ 下振荡 30min, 过滤, 火焰光度计测定;

总 K、Pb、Zn、Cu、Cd: $HNO_3-HCl-HClO_4$ 消化, 钾用火焰光度计测定; Pb、Zn、Cu、Cd 用原子吸收分光光度计测定^[8];

有效态 Pb、Zn、Cu、Cd: $0.1mol L^{-1}HCl$ 提取(液: 尾矿或土壤=5:1), 振荡 90min, 过滤, 原子吸收分光光度计测定^[8];

植物样品用 $HNO_3:HCl:HClO_4=4:1:1$ 消化, Cu、Cd、Zn 和 Pb 用原子吸收分光光度计测定。

3 结果与分析

3.1 尾矿上自然定居的植物

在尾矿库内堆积的尾矿绝大部分区域是裸露的, 只是在边缘区域的尾矿上才有少数植物自然定居。自然定居的植物有 10 种, 见表 1。

在 10 种自然定居的植物中, 木本植物 4 种、草本植物 6 种; 1 年生植物仅小飞蓬 1 种、多年生草本植物 5 种; 依靠地下茎作为主要繁殖方式的草本植物 4 种。

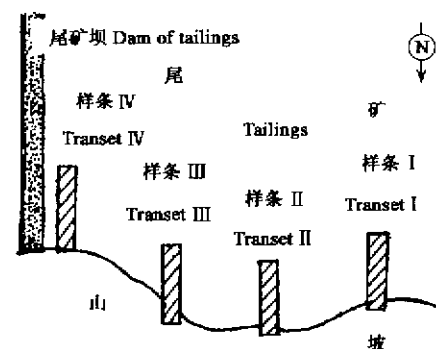


图 1 样条的位置

Fig. 1 Location of transects

表 1 铅锌尾矿上自然定居植物

Table 1 Natural colonized plants on tailings of Lead-Zinc mine

中文名 Chinese name	学名 Scientific name
蕨	<i>Pteridium aquilinum</i>
白茅	<i>Impreta cylindracea</i>
水蜡烛	<i>Typha latifolia</i>
高秆珍珠茅	<i>Scleria terrestris</i>
类芦	<i>Neyrudiar eynaudiana</i>
小飞蓬	<i>Conyza canadensis</i>
大头艾纳香	<i>Blumea megacephala</i>
美丽胡枝子	<i>Lespedeza formosa</i>
杜虹花	<i>Callicarpa pedunculata</i>
盐肤木	<i>Rhus chinensis</i>

虽然在潮湿季节,尾矿的表面上能够见到许多来自于周围山坡植物种类的繁殖体萌发所形成的幼苗,但是绝大部分的幼苗很快死亡。死亡的原因或由于干旱或由于贫瘠、极端的 pH(如酸化区域)以及重金属毒性或由于尾矿的水蚀风蚀。具有地下茎的多年生草本植物,由于具有营养繁殖及耐贫瘠、干旱,耐风蚀水蚀及耐重金属毒性,使得它们在某些区域能够生长、形成群落,表现出对于尾矿基质良好的适应性。几种木本植物虽然在重金属含量较高的情况下能够生长,但是一般仅生长在尾矿库边缘区域的营养条件较好处,除盐肤木外,其他几种木本植物均不能生长在尾矿库的中央区域。雨水充足季节,尾矿库内有大量的种子萌发,说明了尾矿对于植物种子的萌发并不造成较大的影响,也说明了尾矿本身的种子库的存在。

生长在尾矿上的植物与生长在正常土壤上的同种植物相比,生长较差,表现为生长高度较低、叶色较淡、根系生长不良,盐肤木幼苗的主根伸长生长受到明显抑制,水平伸展的侧根数量多且生长较长,其他植物种类的根部表现为根毛较少。

3.2 尾矿上的植物群落

在尾矿库边缘处的尾矿上,由白茅、蕨和盐肤木等几种植物形成植物群落(表 2)。

表 2 样条 I、II 的植物和植物群落					
Table 2 Plants and plant communities in transects I and II					
样条 Transect	样方 Sample	种数 Number of species	主要植物及盖度/高度 Main plants and their coverage/height	群落总盖度(%) Total coverage of communities	伴生植物 Company plants
I	1	5	①盐肤木 30%/1.5m,②蕨 90%/0.9m	95	④类芦,小飞蓬,⑥大头艾纳香
	2	3	盐肤木 5%/0.6~0.8m,蕨 80%/0.7~0.8m	80	小飞蓬
	3	1	盐肤木<5%/0.05~0.07m	<5	
	4	0			
II	1	2	③白茅 30 / 0.95m	30	盐肤木
	2	1	白茅 < 5% /0.6 m	<5	
	3	0			
	4	0			

①盐肤木 *Rhus chinensis* ②蕨 *Pteridium aquilinum* ③白茅 *Impreta cylindraca* ④类芦 *Neyrudia reynaudiana* ⑤小飞蓬 *Conyza canadensis* ⑥大头艾纳香 *Blumea megacephla*

表 2 可以看出,在 I、II 样条中,由样方 1 到样方 4,即从尾矿库边缘到尾矿库中央,定居植物种类逐渐减少,样方植被总盖度和植被高度逐渐降低。表 3 是各个样方基本化学性质分析。

由表 2 和表 3 可看出,在 I、II 样条中,尾矿的营养状况与植物群落之间存在着明显的相关关系,营养状况好,则植被盖度大、植物生长高。在 IV 样条中也表现出这种趋势。

表 3 尾矿/土壤的基本理化性质										
Table 3 Chemical properties of tailings / soil										
样条号 样 方	Number of transect Sample	I~III 平均值 Average				IV				
		1	2	3	4	1	2	3	4	5
PH		7.5	7.8	7.8	7.8	7.4	8.1	8.1	7.9	8.2
含碳量	Concentration of carbon (g · kg ⁻¹)	58.0	14.0	9.0	7.0	15.3	34.1	6.8	20.5	14.8
总氮	Total nitrogen(g · kg ⁻¹)	0.3	0.6	0.1	—	0.03	0.09	0.12	0.48	0.05
有效磷	Active phosphorus (mg · kg ⁻¹)	44.3	12.0	11.6	0.6	35.1	29.3	—	—	—
速效钾	Available potassium (mg · kg ⁻¹)	43.3	33.3	26.7	23.3	40.0	40.0	20.0	40.0	40.0
有效铜	Active copper (mg · kg ⁻¹)	5.21	0.52	0.30	0.67	9.50	7.21	4.20	15.29	6.30
有效镉	Active cadmium (mg · kg ⁻¹)	8.70	6.80	6.29	8.11	0.60	1.31	0.50	3.21	4.52
有效锌	Active zinc (mg · kg ⁻¹)	1298.7	1170.0	760.5	1548.7	126.3	404.0	429.3	767.5	1212.0
有效铅	Active lead (mg · kg ⁻¹)	30.00	1.11	1.19	1.70	115.00	204.29	59.50	208.90	221.41

方方数据

“—”未检出

表 4 样条 IV 的植被
Table 4 Vegetation in transect IV

样方号 Number of sample	1	2	3	4	5
植被盖度 Vegetation coverage (%)	80	40	20	<5	0
植物种数 Number of species	4	3	2	1	0
覆土厚度 Soil depth covered on tailings (cm)	20	15	12	8	2

根,侧根也只能沿缝隙向周围伸展,尾矿这种物理结构使得其他植物无法定居、生长。

3.3 植物的重金属含量

表 5 是生长在尾矿上的几种植物的重金属含量分析。
根据表 5 可知,生长在尾矿上的不同植物,Cu、Cd、Zn 和 Pb 等重金属的含量无论在地上部分还是地下部分都存在着很大差异。草本植物根中重金属 Cu、Cd 和 Pb 的含量一般高于木本植物;在 3 种木本植物中,盐肤木的 Cu、Cd、Zn 和 Pb 含量高于美丽胡枝子和杜虹花。在 7 种植物中,根部 4 种重金属含量的差异(同种金属在 7 种植物中的最高值/最低值)是不同的,表现为:Zn(9.2 倍)>Cd(5.8 倍)>Pb(4.9 倍)>Cu(3.6 倍),说明了不同植物对于 Zn 的吸收存在较大的差异。

表 5 植物的重金属含量(mg·kg⁻¹)
Table 5 concentration of heavy metal in plants

植物种类 Species	器官 Organ	Cu	Cd	Zn	Pb
木本植物 Wood					
盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	根 Root	30.9	2.5	1548.5	526.8
	茎 Stem	18.2	2.7	284.4	109.4
	叶 Leaf	14.3	3.4	418.6	264.5
美丽胡枝子 <i>Lespedeza formosa</i>	根 Root	17.1	1.6	339.5	191.3
	茎 Stem	5.7	1.2	53.0	67.5
	叶 Leaf	10.5	2.4	153.0	69.0
杜虹花 <i>Callicarpa pedunculata</i>	根 Root	17.6	1.8	522.2	189.0
	茎 Stem	8.0	1.2	177.2	70.9
	叶 Leaf	19.4	3.0	704.5	208.7
草本植物 Herb					
蕨 <i>Pteridium aquilinum</i>	地上部分 Shoot	8.1	1.4	138.6	5.2
	地下部分 Root	56.0	3.9	3127.3	589.9
白茅 <i>Impreta cylindracea</i>	地上部分 Shoot	6.6	1.2	40.6	5.0
	地下部分 Root	62.2	2.4	782.6	823.8
类芦 <i>Neyrudia reynaudiana</i>	地上部分 Shoot	15.8	7.8	575.8	81.1
	地下部分 Root	22.3	7.0	882.4	297.1
高杆珍珠茅 <i>Scleria terrestris</i>	地上部分 Shoot	15.9	6.8	285.8	66.7
	地下部分 Root	57.9	9.3	1070.4	939.1

在 4 种草本植物中,它们地上部分 Cu、Cd、Zn 和 Pb 含量都表现为:高杆珍珠茅>类芦>蕨>白茅。在 3 种木本植物中,茎部的 Cu、Cd、Zn 和 Pb 含量总是盐肤木最高、美丽胡枝子最低;在叶部,Zn 和 Cd 含量表现为:盐肤木>杜虹花>美丽胡枝子,而 Zn 和 Cu 的含量则表现为:杜虹花>盐肤木>美丽胡枝子。

在同一种植物体内,4 种重金属含量基本表现为:Zn>Pb>Cu>Cd。重金属含量分析表明,同种植物生长在尾矿的不同处,Cu、Cd、Zn 和 Pb 含量也存在着差异,造成这种现象的原因与各处尾矿本身的理化性质差异以及植物本身特性有关。

重金属 Cu、Cd、Zn 和 Pb 在植物体内不同部位的分布,在所分析的 7 种植物中,除杜虹花外,Cu、Zn 和 Pb 含量表现为:地下部>地上部;而杜虹花中的 Cu、Cd、Zn 和 Pb 含量表现为:叶>根>茎;盐肤木和美丽胡枝子体内的 Pb、Zn 含量表现为:根>叶>茎。

4 讨论

4.1 自然定居植物对重金属的耐性

重金属在植物体内的分布除了与各种金属本身的活动性差异有关外,还与各种植物的适应(对重金属的耐性)机制有关。在植物对重金属的适应机制中,植物或是通过根部一定的结构或生理特性限制有害重金属离子由根部向地上部转移,保持地上部分较低的重金属含量,使植物地上部分具有较高的生理活性,或是采取将有害重金属积累到容易脱落部分,通过这些部分的脱落,使有害重金属离开植物体^[9]。表 6 分析了 7 种在尾矿上自然定居植物体内不同部分的 Cu、Cd、Zn 和 Pb 含量差异,揭示了植物体内的重金属的转移特征。

表 6 植物体内重金属转移分析
Table 6 Analysis of heavy metal move in plants

重金属 Heavy metals	Cu	Cd	Zn	Pb
地下部:地上部(root/shoot)=100:				
蕨 <i>Pteridium aguilinum</i>	14	35	4	<1
白茅 <i>Impreta cylindraca</i>	11	50	5	<1
类芦 <i>Neyrudia reynaudiana</i>	71	110	65	27
高杆珍珠茅 <i>Scleria terrestris</i>	27	73	27	7
根部:茎部(root/stem)=100:				
盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	59	108	18	21
美丽胡枝子 <i>Lespedeza formosa</i>	33	75	16	35
杜虹花 <i>Callicarpa pedunculata</i>	45	66	34	38
茎部:叶部(stem/leaf)=100:				
盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	79	126	147	242
美丽胡枝子 <i>Lespedeza formosa</i>	184	200	298	274
杜虹花 <i>Callicarpa pedunculata</i>	218	250	398	293

从表 6 可看出,在 7 种自然定居植物中,大部分植物采用了限制地下部分的重金属向地上部分转移的策略,但是不同重金属之间有所差异,Zn 和 Pb 受到的限制作用明显高于 Cu 和 Cd,说明了 Cu 和 Cd 这 2 种重金属的活动性高于 Zn 和 Pb。在 7 种植物中,蕨和白茅在限制 Zn 和 Pb 由地下部分向地上部分转移最为明显,说明这 2 种植物对于 Zn、Pb 的耐性主要是通过限制它们向地上部分转移实现的,而在木本植物中,这种限制作用不如草本强。分析 3 种木本植物的茎叶之间的重金属转移,可以发现 Cu、Cd、Zn 和 Pb 的转移率都高,尤其是杜虹花,说明了这 3 种植物主要采用将重金属聚集到叶,然后通过叶的脱落,使得有害重金属离开植物,减少植物重金属负荷这种适应策略。这种耐性(适应性)策略可能是与它们是落叶木本植物有关。综合这 2 方面的适应机制来看,盐肤木和杜虹花对于尾矿的适应性较美丽胡枝子强。

4.2 尾矿的物理性质与自然定居植物的分布

尾矿的物理性质,如含水状况、表层尾矿的稳定性或板结状况等,对于自然定居植物在尾矿上的生长分布产生很大影响。尾矿是直径微小的石质粉末,颗粒直径一般小于 0.15mm,湿时粘重板结,干时极为松散。降雨稀少时,尾矿极易干旱,造成植物繁殖体难以萌发。在雨水充足的季节,大多数植物繁殖体可以萌发。1994 年对尾矿所进行的调查发现,在较为低洼处,春季有大量的幼苗出现,每平方米最高

达 200 多株幼苗,2 个月后的调查发现,这些幼苗已经不复存在,这些幼苗或被雨水冲走、或为别处随雨水带来的尾矿所掩埋;调查还发现,许多在表层较为稳定区域(例如轻微水蚀或较为板结处)萌发形成的植物幼苗,由于表层尾矿水分的蒸发,绝大部分死亡了,这些现象在后来对铜陵的几个铜尾矿上所做的调查也被观察到^[3,4]。对于自然定居植物来说,它们基本上是针对高重金属含量的化学性质已经适应,所以对于尾矿中重金属的含量反应不敏感,这些植物只有在表层尾矿稳定的区域才能生存。当它们处于风蚀、水蚀强烈的不稳定区域时,植物的幼苗,由于风蚀水蚀作用,或根系暴露而死、或被尾矿掩埋而死,幼苗无法长成为成体。因此,对于自然定居植物来说,表层尾矿的含水量及其物理稳定性对于它们的生长、分布起到了限制作用。

因此,对于尾矿的生态恢复来说,选择耐性物种,并为它们提供合适的基质物理条件,才能获得成功,而这种物理条件的提供是需要采取一定的工程措施才能实现的。提供怎样的物理条件和采取怎样的工程措施与尾矿本身的生态恢复目标直接相关。就该尾矿库内的尾矿生态恢复来说(除酸化区域外),由于年降雨量充沛,采取一定措施,例如在尾矿的表面覆盖一层植物凋落物,保持表层尾矿的稳定性和减少水分蒸发,并选用蕨、白茅、盐肤木等植物种类,将能够获得较好的生态恢复效果。

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:中国科学技术出版社,1993. 132~138.

[2] Gemmell R P 著,倪彭年,李玲英译. 工业废弃地上的植物定居. 北京:科学出版社,1987.

[3] 孙庆业,刘付程. 铜陵铜尾矿理化性质的变化对植被重建的影响. 农村生态环境,1998 , 14(1):21~23,60.

[4] 孙庆业,蓝崇钰,廖文波. 尾矿植被法治理初探. 国土与自然资源研究, 1999,(3):58~60.

[5] Williamson A & Johnson M S Reclamation of metalliferous mine waste . In: Lepp N. W. ed. *Effect of heavy metal pollution on plants*; Vol. 2. Metals in the environment. London and New Jersey: Applied Science Publishers Ltd,1981. 185~212.

[6] Baker A J M. Metal tolerance. *New Phytol.* , 1987, **106**(suppl.):93~111.

[7] 南京农学院 主编. 土壤农化分析. 北京:农业出版社,1980.

[8] 中国环境监测总站 编. 土壤近现代分析方法. 北京:中国环境科学出版社,1992.

[9] Baker A J M & Proctor J. The influence of Cadmium ,Copper , Lead and Zinc on the distribution and evolution of metallophytes in British Isles. *Plant Syst. Evol.* ,1990 **173**:91~108.