

湖南柿竹园矿区土壤重金属含量及植物吸收特征

雷 梅¹, 岳庆玲^{1,2}, 陈同斌^{1,*}, 黄泽春¹, 廖晓勇¹, 刘颖茹¹, 郑国砥¹, 常庆瑞²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复中心, 北京 100101; 2. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100)

摘要: 矿区重金属污染十分严重, 寻找和发现适合当地气候与土壤条件的重金属耐性植物是矿区植被恢复和污染土壤修复的前提。对我国湖南柿竹园有色金属矿区调查发现, 该地区选矿厂的重金属污染问题普遍比尾砂库严重。选矿厂土壤砷、镉、铅、锌严重超标, 尾砂库周围也受到不同程度的重金属污染。土壤重金属胁迫效应影响着植物物种分布, 选矿厂物种分布较少, 相比之下尾砂库的植物多样性较为丰富。柿竹园矿区植物对重金属的吸收表现为富集型(如蜈蚣草 *Pteris Vittata* L. 和芒麻 *Boehmeria nivea* (L.) Gaud.)、根部囤积型(如攀倒甍 *Patrinia villosa* 和木贼 *Equisetum hyemale*)和规避型(如蔓出卷柏 *Selaginella davidii* Franch 和芒草 *Miscanthus sinensis* Andlerss)等 3 种类型。

关键词: 重金属; 土壤; 植物; 矿区

文章编号: 1000-0933(2005)05-1146-06 **中图分类号:** Q948, X171 **文献标识码:** A

Heavy metal concentrations in soils and plants around Shizhuyuan mining area of Hu'nan Province

LEI Mei¹, YUE Qing-Ling^{1,2}, CHEN Tong-Bin^{1,*}, HUANG Ze-Chun¹, LIAO Xiao-Yong¹, LIU Ying-Ru¹, ZHENG Guo-Di¹, CHANG Qing-Rui² (1. Laboratory of Environmental Remediation, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Resource and Environment College, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shannxi, 712100, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1146~1151.

Abstract: Land contaminated by high levels of heavy metals in mining area is urgent to be remediated. To find out the tolerant plants, which can adapt to the local climate and the soil conditions, is the premise of vegetation reconstruction. Field survey was carried out in the Shizhuyuan mining area of Hunan Province, which is the national largest nonferrous mine in China. Fifteen soil samples and 72 samples of 48 plants were collected during the field surveys at 5 contaminated sites, including the Caishan Smelter, the Caishan Tailing Pond, the Muchang New Tailing Pond, the Muchang Old Tailing Pond and the Bailutang Tailing Pond. The concentrations of heavy metals in soils and plants, including As, Cu, Cd, Pb, and Zn, were analyzed.

The results showed that the soil pollution in the metal smelter was more severe than that in the tailing area. The concentrations of As, Cd, Pb and Zn in all the soil samples collected from smelter sites were dramatically higher than the national soil limitation values for the plant growth (30 mg/kg, 1 mg/kg, 400 mg/kg, 500 mg/kg and 500 mg/kg). The highest concentrations in the soil samples of the smelter sites were 11,299 mg/kg, 236 mg/kg, 29,702 mg/kg and 24,333 mg/kg, respectively. Same as the smelter sites, the soil samples taken from all of the tailing ponds contained high concentrations of As, Cd, Cu, Pb and Zn as well.

基金项目: 北京市科技新星计划资助项目(2003A48); 国家重大基础研究前期研究专项资助项目(2002CCA03800); 国家自然科学基金重点基金资助项目(40232022); 国家基础研究发展规划资助项目(G1999011808)

收稿日期: 2004-07-09; **修订日期:** 2005-03-15

作者简介: 雷 梅(1973~), 女, 畚族, 浙江人, 博士, 副研究员, 主要从事污染环境修复研究。E-mail: leim@igsnr.ac.cn

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: chentb@igsnr.ac.cn

Foundation item: Science and Technology Nova Plant Beijing Municipal (No. 2003A48), the National Basic Science Research Program (No. 2002CCA03800), National Natural Science Foundation of China (No. 40232022) and the State Key Basic Research Plan of China (No. G1999011808)

Received date: 2004-07-09; **Accepted date:** 2005-03-15

Biography: LEI Mei, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in remediation of contaminated environment. E-mail: leim@igsnr.ac.cn

The diversity of the plant species might be influenced by the heavy metal existence in the soils. Owing to the high level of the heavy metal content in the soil of the metal smelter, less species of plants were found in this area than the plants in the tailing ponds. There were totally 48 species among 16 families recorded in the metal smelter and the tailing ponds, of which 13 species botanically belonged to the Compositae, and were the dominant components of the tailings flora. Eight species belonged to Pteridaceae were naturally colonizing this area. The uptake of heavy metals by the plants can be classified into three types according to the metal concentrations in the plant shoots and roots: the accumulator, eg. *Pteris vittata* L. and *Boehmeria nivea* (L.) Gaud., which absorbed a large amount of heavy metals by the roots and transported to shoot; the root compartment, eg. *Patrinia villosa* and *Equisetum hiemale*, which also absorbed a large amount of heavy metals but mainly held in the roots; and the excluder, eg. *Selaginella davidii* Franch and *Miscanthus sinensis* Anderss., which absorbed less heavy metals than the accumulators.

Key words: heavy metal; soil; plant; mining area

矿区开采严重破坏生态系统,导致土壤质量的恶化和野生植物资源数量的减少,使土地失去利用价值。如露天开采会直接摧毁地表土层和植被,地下开采可能导致地表塌陷,从而引起土地和植被的破坏;此外,矿山开发过程中的废弃物(如尾矿、废石等)需要大面积的堆置场地,从而导致对土地的大量占用和对堆置场原有生态系统的破坏,引起生态环境恶化^[1]。因此,矿区植被恢复和土地复垦是目前备受关注的研究领域,也是退化生态系统和恢复生态学研究的重要内容之一^[2]。

矿产开采和冶炼产生的废水、废气和固体废弃物所导致的重金属污染对生态系统的破坏尤为严重。这种污染在土壤中残留期长,土壤微生物不能将其分解,甚至可能通过食物链传递,严重影响人类健康。2000年,湖南郴州炼砷区因废渣污染井水,当地农民利用污染的水源灌溉,致使 40 hm² 农田抛荒^[3];研究表明,该砷污染区的蔬菜可食部分砷含量范围为 0.04~2.64 mg/kg、平均为 0.74 mg/kg,54%的蔬菜可食部分含砷量超过《蔬菜卫生标准》规定的最大允许量(MPC $\geq$ 0.5 mg/kg)^[4]。尽快进行植被重建以减少矿区重金属对环境的污染,是矿区生态恢复的最佳策略^[5, 6]。

在重金属污染的环境中可以发现一些超富集植物(hyperaccumulator)和重金属耐性植物,人们利用植物对重金属的耐性和超富集能力,并结合其共生的微生物体系可以实现对重金属污染环境的修复。耐性植物作为污染区植被恢复的先锋植物,对矿区的生态重建有着重要作用。在铜官山野外调查发现,铜尾砂库自然定居的 34 种高等植物耐贫瘠、对环境适应性较强,改善了污染矿区的自然景观^[7];海州香薷(*Elsholtzia haichowensis*)能够耐受高浓度铜,并对铜矿具有指示作用^[8]。此外,利用超富集植物可提取污染土壤中的重金属,降低土壤中的重金属污染。现有的超富集植物中,蜈蚣草(*Pteris vittata* L.)对砷有极强的忍耐能力和富集能力,且具有生长快、生物量大、适应性强等特点,显示出巨大的修复潜力^[9, 10];另外,东南景天(*Sedum alfredii*)长期生长在重金属污染的生境中,逐渐进化成不同的生态型,矿山生态型东南景天具有极强的锌耐性和超积累特性^[11]。将重金属耐性植物和超富集植物用于矿区土地恢复和植被重建,已成为国际研究前沿。

矿区植被恢复与重建的基础在于耐性植物的筛选与生长介质的改良^[12, 13]。调查矿区土壤重金属污染状况,寻找和发现适合当地气候条件与土壤条件的重金属耐性植物是矿区植被恢复和污染土壤修复的前提。我国湖南柿竹园矿区拥有全球第二大有色金属矿床,矿产资源相当丰富,地形复杂,这为植物多样性的形成提供良好的条件。本文通过对该矿区进行野外调查,分析土壤和植物体内的重金属,寻找和筛选重金属的耐性植物,为尾矿治理和植被恢复提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 调查区概况

柿竹园钨锡铋钼矿区位于湖南省郴州市,地理位置为东经 112°13'~114°14',北纬 24°53'~26°50',海拔高度 186~500 m。该地区年均气温 15.4~18.3℃,年均降雨量 1 250~1 700 mm,无霜期长,适合植物生长。柿竹园有色金属矿拥有 143 种矿产资源,被誉为“世界有色金属博物馆”,其主要伴生矿种为砷、镉、铜、银,是我国最大的有色金属矿床。在开采矿产资源带来经济效益的同时,也破坏了周围的生态环境。本研究对才山选矿厂、才山尾砂库、牧场新尾砂库、牧场旧尾砂库和白露塘尾砂库 5 个典型地区土壤和植物重金属污染状况进行了详细调查。

1.2 样品采集

根据 5 个典型地区各自的面积和污染特征布置 2~5 个样点(表 1),采集各样点 1 m² 内优势植物物种,同时采集植物根系周围 0~20 cm 土壤,在室内风干,除去土壤中的石块、植物根系和凋落物等,过 2 mm 筛,用于测定土壤 pH 值。用四分法取部分土壤过 0.6 mm 筛用于测定土壤重金属含量。植物分成地上部和地下部两部分,用自来水清洗植物表明粘附的土壤之后,再用去离子水淋洗 3 遍,80℃烘干、粉碎,用于重金属含量测定。

1.3 室内分析

土壤 pH 采用土 : 水 = 1 : 2.5 测定。土壤重金属全量采用浓 HNO₃-H₂O₂ 消煮 (EPA3050B)^[11]。植物用 HNO₃-HClO₄ 联合消煮 (GB/T 5009.11-15-2003)^[15]。用原子吸收-光谱法测定镉、铜、铅和锌等重金属浓度 (德国 Analytic Jena 公司, Vario 6.0 AAS), 原子荧光法测定砷浓度 (北京海光仪器公司, AFS 2202)。

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属污染特征

表 1 列出了各样点的土壤重金属 (砷、镉、铜、铅、锌) 含量。总体而言, 调查区域内重金属含量普遍较高, 而且各重金属含量变化范围较大。其中, 砷的变化范围为 25.4~11 299 mg/kg; 镉的变化范围为 0.08~236 mg/kg; 铜的变化范围为 27.9~3 974 mg/kg; 铅的变化范围为 80.1~29 702 mg/kg; 锌的变化范围为 126~24 333 mg/kg。与国家 3 级标准^[16] (为保障农林生产和植物正常生长的土壤临界值) 相比, 砷、镉、铅、锌的最高含量分别为国家 3 级标准的 376.6 倍、236 倍、59.4 倍和 48.7 倍; 铜的含量相对较低, 最高含量仅为国家 3 级标准的 9.9 倍 (表 1)。

表 1 柿竹园矿区土壤的重金属含量

Table 1 Heavy metal concentration of soils in Shizhuyuan Mining area								
污染区 Polluted site	面积 Area (m ²)	编号 No.	pH	重金属含量 concentration of heavy metal (mg/kg)				
				砷 As	镉 Cd	铜 Cu	铅 Pb	锌 Zn
才山选矿厂	8000	506	7.72	11299	227	736	29702	24333
Caishan Smelter		507	7.10	4616	236	209	9785	22203
平均值 Average				7958	231	472	19743	23268
才山尾砂库	20000	501	5.74	1531	19.8	3974	1089	1702
Caishan Tailing Pond		502	7.59	332	7.38	43.3	598	507
		503	7.78	375	7.42	39.4	535	464
		504	8.14	3229	55.2	134	5029	4893
		505	7.80	999	32.1	102	2391	2953
平均值 Average				1293	24.4	859	1928	2104
牧场新尾砂库	8500	514	7.75	54.6	8.07	53.8	709	383
Muchang New Tailing Pond		516	7.82	25.4	66.2	34.0	1663	353
平均值 Average				40.0	37.1	43.9	1186	368
牧场旧尾砂库	12000	509	5.79	76.8	5.65	40.4	194	249
Muchang Old Tailing Pond		510	4.45	49.2	2.99	38.5	116	155
		512	6.09	40.7	4.19	35.1	126	211
		513	—	59.7	3.86	88.2	219	126
平均值 Average				56.6	4.18	50.6	164	185
白露塘尾砂库	10000	519	7.93	227	7.01	58.4	440	345
Bailutang Tailing Pond		520	8.29	38.2	6.18	29.1	260	177
平均值 Average				133	6.60	43.8	350	261
土壤环境质量国家标准值(3级)								
National Standards for Environment Quality of Grade Three Soil				30	1	400	500	500

才山选矿厂土壤重金属污染十分严重, 柿竹园矿区砷、镉、铅、锌含量最高的土壤均分布在才山选矿厂。Cu 污染相对较轻, 平均含量仅为国家 3 级标准的 1.18 倍。选矿厂土壤 pH 变化范围较小, 基本呈中性。

与才山选矿厂相比, 才山尾砂库重金属含量相对较低, 5 种重金属含量均低于才山选矿厂。尽管如此, 才山尾砂库的土壤已受到严重污染, 砷、镉、铅、锌的平均含量为国家 3 级标准的 20 多倍。其中, pH 值最高的 504 号样点这 4 种元素的含量达到才山尾砂库的最高值。pH 值最低的 501 号样点位于尾砂库排水沟附近, 铜的含量达到 3 974 mg/kg, 为所有样点中铜含量最高。

牧场和白露塘的 3 个尾砂库重金属污染程度相对较轻, 铜和锌的平均含量均低于国家 3 级标准, 牧场旧尾砂库和白露塘尾砂库的铅平均含量也低于国家标准。其中的原因可能是在这 3 个尾砂库中有经济价值铜、铅和锌等元素经开采冶炼后提取完全, 而伴生元素砷、镉较多地残留于土壤, 因此含量较高, 所有样点的镉含量均超过国家 3 级标准。白露塘尾砂库土壤 pH 较高, 呈碱性状态, 而牧场旧尾砂库土壤 pH 较低, 呈酸性。

2.2 矿区主要物种分布

在柿竹园矿区共采集 72 个高等植物植物样本, 分属 48 种 16 个科, 其中菊科种类最多, 共 13 种; 其次为凤尾蕨科, 共 8 种, 主要以 1 年生和多年生的草本植物为主。优势种主要包括: 蜈蚣草、芒麻 (*Boehmeria nivea* (L.) Gaud.)、攀倒甍 (*Patrinia villosa*)、木贼 (*Equisetum hyemale*) 和蒿 (*Compositae Artem* sp.) 等。

柿竹园矿区植物物种的分布可能与矿区土壤重金属含量有关。在重金属污染最为严重的才山选矿厂,受土壤高浓度重金属胁迫效应影响,仅有凤尾蕨科的蜈蚣草、荨麻科的苎麻、木贼科的木贼零星分布,植被覆盖度约为 5%。已有报道表明,蜈蚣草可以耐受高浓度的砷,在砷含量高达 23 400 mg/kg 的矿渣中也能正常生长^[9]。苎麻对砷和镉也具有较高的耐性,已被用于改良镉污染土壤。在污染程度较轻的尾砂库区,发现有禾本科、菊科、蹄盖蕨科、凤尾蕨科、败酱科、苦苣苔科等多种植物生长,植被覆盖度在 50%~90%,表明重金属含量较低的土壤环境利于物种的成活与繁殖,物种多样性更加丰富。

2.3 植物体内重金属含量分布特征

植物重金属含量分析结果见表 2,图表中所列植物为调查区域内的优势物种。5 种元素中,砷和铅在植物体内的含量变化较大,镉、铜和锌的含量变化相对较小。砷的最高含量达到 2 298 mg/kg,铅在植物体内的最高含量为才山选矿厂 506 号样点木贼根部的铅含量,达到 3 419 mg/kg。砷和铅在植物体内的最低含量接近普通植物的正常含量。除蜈蚣草根部分积累了高浓度的镉之外,植物体内镉、铜和锌的最大含量和最小含量之间相差不超过 10 倍,但平均含量较高,锌在植物地上部和根部的平均含量分别达到 275 mg/kg 和 349 mg/kg。

在矿区重金属污染土壤上生长的植物对重金属污染均具有一定的耐性。不同的耐性机制使植物对重金属的吸收、转移和积累特征表现出较大的差异。本研究的调查区域内植物对重金属的吸收机制大致可分富集型(Accumulators)、根部囤积型(Root Compartments)和规避型(Excluders)3 类。富集型植物能够从土壤中主动吸收并富集金属元素,同时将大量重金属转移到地上部,与 Baker^[17]和 Punz 等^[18]提出的富集型植物概念类似。505 样点蜈蚣草羽叶砷含量达 2 298 mg/kg,根部砷含量达 1 582 mg/kg(表 2),再一次证明蜈蚣草是砷的超富集植物,具有很强的修复砷污染土壤的能力。此外,蜈蚣草对镉、铅和锌 also 具有很高的耐性,在才山选矿厂被高浓度镉、铅、锌污染的土壤上蜈蚣草也有分布。安志装的盆栽试验曾证实蜈蚣草对铅、锌的耐性较强^[19]。因此,蜈蚣草可用于修复砷、镉、铅、锌等重金属复合污染土壤。除蜈蚣草之外,苎麻对重金属也有一定的富集能力,其地上部和根部铅含量分别为 680 mg/kg 和 444 mg/kg(表 2),对铅的富集能力明显高于其它植物。据报道^[20],苎麻对砷也具有极强的耐性,高砷区苎麻叶、茎、根中的砷含量分别为 536 mg/kg、103 mg/kg 和 69 mg/kg。此外,苎麻还具有很强的富集镉的能力^[21],在含镉 10 mg/kg 的污染农田土壤上,其地上部含量就能达到 15 mg/kg,可见苎麻属于富集型植物,在修复土壤复合污染上具有潜在应用价值。富集型植物对高浓度重金属的耐受和富集机理至今仍是研究热点之一。对蜈蚣草的研究表明,蜈蚣草叶片上的表皮毛可能与蜈蚣草耐受和富集高浓度砷有直接关系^[22];表皮毛具有大量富集砷的能力,蜈蚣草能将吸收的砷转移和贮存到表皮毛中,从而减轻砷对蜈蚣草的毒害作用。

表 2 柿竹园矿区优势植物体内重金属含量分布
Table 2 Heavy metal concentration of the dominant plants in Shizhuyuan mining area

样品编号 Sample No.	植物名称 Plant	重金属含量(mg/kg)Heavy metal concentration									
		砷 As		镉 Cd		铜 Cu		铅 Pb		锌 Zn	
		地上部 Shoot	根部 Root	地上部 Shoot	根部 Root	地上部 Shoot	根部 Root	地上部 Shoot	根部 Root	地上部 Shoot	根部 Root
P505-2	蜈蚣草 <i>Pteris vittata</i> L.	2298	1582	1.70	365	10.9	15.0	167	171	146	175
P504-1	蒿 <i>Compositae artem</i> sp.	82.8	188	8.05	5.02	23.9	26.4	265	309	350	372
P505-1	芒草 <i>Miscanthus sinensis</i> Anderss	4.87	27.1	1.00	0.77	6.36	8.38	37.0	77.8	50.3	483
P505-4	疏叶蹄盖蕨 <i>Athyrium dissitifolium</i> (Bak.) C. Chr.	11.9	27.5	2.28	0.80	9.53	13.5	104	72.0	138	112.5
P504-3	攀倒甍 <i>Patrinia villosa</i>	202	809	4.91	2.22	18.6	11.0	342	14.4	423	213
P506-1	木贼 <i>Equisetum hyemale</i>	38.2	23.1	5.23	16.2	12.0	17.3	357	3419	684	1099
P506-4	苎麻 <i>Boehmeria nivea</i> (L.) Gaud.	117.9	9.74	10.4	4.54	31.6	13.6	680	444	780	236
P508-4	斜方复叶耳蕨 <i>Arachniodes rhombordea</i> (Wall. ex Mett.) Ching	40.1	18.1	4.56	5.78	13.4	27.9	279	315	512	1708
P508-5	蔓出卷柏 <i>Selaginella davidii</i> Franch.	41.0	14.9	3.64	1.96	12.1	8.87	185	66.3	284	142
P510-1	小苜蓿 <i>Medicago polymorpha</i> L. var. <i>minima</i> L.	4.70	1.36	4.21	1.30	8.08	10.2	153	28.6	76.2	41.4
P512-2	紫杆 <i>Scutellaria</i> Linn. sp.	7.48	3.25	5.17	1.17	17.9	16.3	173	23.8	152	63.7
P513-1	车前 <i>Plantago asiatica</i> L.	37.0	51.8	5.52	2.94	19.6	25.2	121	103	151	393
P514-1	短毛蓼 <i>Polygonum pubescens</i> Blume	19.3	0.79	7.41	0.58	13.7	19.0	375	180	224	43.2
P514-3	蚊蒿 <i>Chenopodium</i> sp.	2.16	2.00	6.97	3.70	7.71	11.0	216	337	80.4	120
P519-1	苏铁蕨 <i>Brainia insignis</i> (Hook.) J. Sm	6.38	0.88	2.92	0.11	9.17	2.88	114	57.9	71.4	31.3
	最大值 Maximun	2298	1582	10.4	365	31.6	27.9	680	3419	146	175
	最小值 Minimum	2.16	0.79	1.00	0.11	6.36	2.88	37.0	14.4	50.2	31.3
	平均值 Average	194	184	4.93	27.5	14.3	15.1	238	375	275	349

根部囤积型植物对土壤中的重金属具有被动吸收的特征,能将重金属吸收至体内,但金属元素大量囤积于根部,只有少量向地上部运移,减少对光合、呼吸、生殖系统的伤害。攀倒甌根部砷含量为 809 mg/kg,而叶片中砷含量仅为 202 mg/kg;木贼根部铅含量为 3 419 mg/kg,叶片中铅含量为 357 mg/kg(表 2),表明攀倒甌和木贼能够适应不同程度的污染土壤,并将重金属吸收到地下部根系中,属于根部囤积型植物。

规避型植物则能抵制植物根系对重金属的吸收,并常常将土壤重金属沉淀在根系表面,而植物体内只吸收很少量的重金属。此类植物摄入体内的重金属含量甚少。对柿竹园矿区调查发现,在污染土壤重金属含量超标的情况下,芒草(*Miscanthus sinensis* Andersson)、小苜蓿(*Medicago polymorpha* L. var. *minima* L.)、紫杆(*Scutellaria* Linn. sp.)等植物根系中重金属含量较少,根部砷、镉、铜含量仅有 10 mg/kg 左右,铅、锌含量在 50~300 mg/kg 之间(表 2)。本研究还发现,某些植物如蔓出卷柏(*Selaginella davidii* Franch)、小苜蓿、紫杆、短毛蓼(*Polygonum pubescens* Blume)等,尽管向地上部转运的重金属浓度较少,但是地上部含量大于根部。如代表性植物蔓出卷柏,其地上部和根部砷浓度分别为 41.0 mg/kg 和 14.9 mg/kg,镉分别为 3.64 mg/kg 和 1.96 mg/kg,铜、铅、锌也有同样特征(表 2),表明在根系重金属含量较低时,仍有将根部吸收的重金属向地上部转运的能力。

矿区植被恢复过程中,可根据植物对重金属的不同耐性特征采取相应的植被恢复措施。蜈蚣草等富集型植物与其他两种类型的耐性植物相比对重金属的耐性较高,可作为先锋物种在重金属含量高的冶炼厂和尾砂库地区栽种,并有利于提高富集型植物地上部重金属含量,目前国际上已开展利用重金属含量较高的植物进行植物冶炼,提取植物体内重金属。在矿区边缘居民生活区和农田附近,应尽量扩大根部囤积型和规避型植物的栽种面积,减少重金属通过食物链对家畜和人产生毒害。矿区植被恢复不能破坏该地区生态平衡,了解矿区植物重金属耐性特征之后,可根据其特点,利用污染区自然定居的植物物种合理制定植被恢复措施。

3 结论

研究表明,湖南柿竹园矿区土壤重金属污染严重,尤以选矿厂污染最为严重,尾砂库污染相对较轻。砷、镉、铜、铅、锌含量最大值分别为 11 299 mg/kg、236 mg/kg、3 974 mg/kg、29 702 mg/kg 和 24 333 mg/kg。当地的植被分布情况与土壤重金属含量高低的规律性基本一致:选矿厂物种分布稀疏,仅有耐性较强的植物生长;相比之下,尾砂库物种多样性较为丰富。柿竹园矿区植物对重金属的吸收表现出 3 种特征:将重金属累积于体内的富集型(如蜈蚣草和苎麻),吸收了大量重金属但地上部重金属含量较少的根部囤积型(如攀倒甌和木贼),和少量吸收重金属的规避型(如蔓出卷柏和芒草)。

References:

- [1] Wang H X ed. *Pollution Ecology*. Beijing: Higher Education Press, 2000. 189.
- [2] Peng S L. Restoration ecology and vegetation reconstruction. *Ecologic Science*, 1996, **15**(2): 26~31.
- [3] Liao X Y, Chen T B, Xiao X Y, et al. Spatial distributions of arsenic in contaminated paddy soils. *Geographical Research*, 2003, **22**(5): 635~643.
- [4] Cai B S, Chen T B, Liao X Y, et al. Arsenic concentrations in soils and vegetables and their risk assessments in highly contaminated area in Hunan Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(4): 711~717.
- [5] Jager D A. Bioremediation of agriculture and forestry soil with symbiotic microorganisms. *Australian Journal of Soil Research*, 1994, **32**: 1301~1319.
- [6] Liu H L. Ecological restoration and sustainable landscape design of mining wastelands. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(2): 323~329.
- [7] Wang Y B, Liu D Y, Zhang L, et al. Vegetation state and soil enzyme activities of copper tailing yard on Tongguan mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, **14**(5): 757~760.
- [8] Ke W S, Xi H A, Yang Y, et al. Analysis on characteristics of phytogeochemistry of *Elsholtzia haichowensis* in Daye Tonglushan copper mine. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(6): 907~912.
- [9] Chen T B, Wei C Y, Huang Z C, et al. Arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and its arsenic accumulation. *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47**(11): 902~905.
- [10] Chen T B, Fan Z L, Lei M, et al. Effect of phosphorus on arsenic accumulation in As-hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and its implication. *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47**(22): 1876~1879.
- [11] Yang X E, Long X X, Ni W Z, et al. Zinc tolerance and hyperaccumulation in a new ecotype of *Sedum Alfredii* Hance. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, **25**(6): 665~672.
- [12] Su W S, Ye H Z, Zhang Z Q, et al. Restoration of lead and zinc mine tailings in South China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(8): 1629~1639.

- [13] Liu D Y, Xie J C, Yang S Y, *et al.* Effects of copper mine tailings on growth and development and physiological function of wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, **12**(1): 126~128.
- [14] USEPA. EPA 3050B (revision 2). www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/test/main.htm, 1996. 1~12.
- [15] Chinese Standards: GB/T 5009. 11-15-2003.
- [16] Xia J Q ed. *Explication on Quality Standards of Soil Environment*. Beijing: China Environmental Science, 1996. 53.
- [17] Baker A J M. Accumulators and excluders——strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition*, 1981, **3**: 643~654.
- [18] Punz W F, Sieghardt H. The response of roots of herbaceous plant species to heavy metals. *Environmental and Experiment Botany*, 1993, **33**(1): 85~98.
- [19] An Z Z, Chen T B, Lei M, *et al.* Tolerance of *Pteris vittata* L. to Pb, Cu and Zn. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(12): 2594~2598.
- [20] Wei C Y, Chen T B. The ecological and chemical characteristics of plants in the areas of high arsenic levels. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, **26**(6): 695~700.
- [21] Dai J P, Jie Y C, Len J, *et al.* Study on the cadmium distributing regulation in different parts of plant of different ramie germplasms. *Plant Fiber and Products*, 2003, **25**(6): 279~293.
- [22] Li W X, Chen T B, Chen Y, *et al.* Role of trichome of *Pteris vittata* L. in arsenic hyperaccumulation. *Science in China (Ser. C)*, 2005, **48**(2): 148~154.

参考文献:

- [1] 王焕校主编. 污染生态学. 北京: 高等教育出版社, 2000. 189.
- [2] 彭少麟. 生态恢复学与植被重建. 生态科学, 1996, **15**(2): 26~31.
- [3] 廖晓勇, 陈同斌, 肖细元, 等. 污染水稻田中土壤含砷量的空间变异特征. 地理研究, 2003, **22**(5): 635~643.
- [4] 蔡保松, 陈同斌, 廖晓勇, 等. 土壤砷污染对蔬菜砷含量及食用安全性的影响. 生态学报, 2004, **24**(4): 711~717.
- [6] 刘海龙. 采矿废弃地的生态恢复与可持续景观设计. 生态学报, 2004, **24**(2): 323~329.
- [7] 王友保, 刘登义, 张莉, 等. 铜官山铜尾矿库植被及土壤酶活性研究. 应用生态学报, 2003, **14**(5): 757~760.
- [8] 柯文山, 席红安, 杨毅, 等. 大冶铜绿山矿区海州香薷 *Elsholtzia haichowensis* 植物地球化学特征分析. 生态学报, 2001, **21**(6): 907~912.
- [9] 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. 科学通报, 2002, **47**(3): 207~210.
- [10] 陈同斌, 范稚莲, 雷梅, 等. 磷对超富集植物蜈蚣草吸收砷的影响及其科学意义. 科学通报, 2002, **47**(15): 1156~1159.
- [11] 杨肖娥, 龙新宪, 倪吾钟, 等. 古老铅锌矿山生态型东南景天对锌耐性及超积累特性的研究. 植物生态学报, 2001, **25**(6): 665~672.
- [12] 束文圣, 叶志鸿, 张志权, 等. 华南铅锌尾矿生态恢复的理论与实践. 生态学报, 2003, **23**(8): 1629~1639.
- [13] 刘堯义, 谢建春, 杨世勇, 等. 铜尾矿对小麦生长发育和生理功能的影响. 应用生态学报, 2001, **12**(1): 126~128.
- [15] 中华人民共和国国家标准. GB/T 5009. 11-15-2003.
- [16] 夏家淇. 土壤环境质量标准详解. 北京: 中国环境科学出版社, 1996. 53.
- [19] 安志装, 陈同斌, 雷梅, 等. 蜈蚣草耐铅、铜、锌毒性和修复能力的研究. 生态学报, 2003, **23**(12): 2594~2598.
- [20] 韦朝阳, 陈同斌. 高砷区植物的生态与化学特征. 植物生态学报, 2002, **26**(6): 695~700.
- [21] 代剑平, 揭雨成, 冷鹏, 等. 镉污染环境中镉在苎麻植株各部分分布规律的研究. 中国麻业, 2003, **25**(6): 279~293.
- [22] 李文学, 陈同斌, 陈阳, 等. 蜈蚣草毛状体对砷的富集作用及其意义. 中国科学(C辑), 2004, **34**(5): 402~408.