

广西思荣锰矿复垦区的重金属污染影响与生态恢复探讨

李 艺, 李明顺, 赖燕平, 杨胜香, 李 晖

(广西师范大学环境与资源学院, 广西 桂林 541004)

摘 要:思荣锰矿区是我国著名的广西八一锰矿的两大矿区之一, 历经近 50 a 露天开采, 生态环境破坏严重。通过对思荣复垦区的甘蔗园、柑桔园和茶园区土壤及其部分植物进行采样和分析, 探讨了复垦区的重金属污染影响及生态恢复途径。结果表明, 该复垦区土壤 Cd 含量超过土壤三级标准值的 30 多倍, Cd、Pb、Cr 及 Mn 等是复垦区土壤和植物的主要毒害元素, 在甘蔗茎、花生仁和茶叶中的 Cd、Cr、Pb 的含量均严重超过食品中污染物限量标准。因此, 该矿区受 Mn、Cd、Pb、Cr 复合污染严重的废弃地一般不宜种植食用农作物和水果, 应发展当地传统种植且有较大经济效益的非食用性经济作物, 如剑麻、黄麻、红麻及作乙醇原料的玉米、木薯作物等, 此外也应重视利用植物修复技术治理重金属元素污染废弃地, 以促进恢复土壤的生态功能和永续利用。

关键词:锰矿区复垦区; 重金属污染影响; 生态恢复; 思荣锰矿区; 广西

中图分类号:X53 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)06-2172-06

Impact of Heavy Metal Contamination in the Reclaimed Mn Mineland in Si-rong, Guangxi and Suggestions for Ecological Restoration

LI Yi, LI Ming-shun, LAI Yan-ping, YANG Sheng-xiang, LI Hui

(School of Environment and Resources, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

Abstract: Si-rong manganese mineland is one of the two sub-regions constituting the famous Bayi Manganese Mine, China. Through nearly 50-year opencast mining, the natural environment and ecological equilibrium have been severely disturbed in this mineland. Extensive soil sampling was made in the reclaimed sugarcane field, orange field and tea garden, and meanwhile, the major plants were also collected for determination of heavy metals. The results showed that the soil Cd concentration was over 30 times the Soil Quality Standard value (Class III). Cd, Pb, Cr and Mn were the main toxic metal elements in soil and for higher plants in this region. The Cd, Cr and Pb levels in sugarcane, peanut and tea leaf exceeded the maximum allowable limits of contaminants in food. Therefore, this mine wasteland was contaminated by multiple metals and could not meet the requirements of soil for agricultural cultivation, unsuitable for plantation of edible crops and fruits. However, other agronomic fiber crops, such as sisal, jute, and ambary, and fuel crops (for alcohol production) like maize and cassava can be used for cultivation. In addition, new phytoremediation techniques should be used to remediate the heavy-metal contaminated wasteland before the agricultural utilization, thus, the soil functions can be restored and a sustainable utilization can be achieved.

Keywords: reclaimed manganese mineland; heavy metal contamination; ecological restoration; Si-rong manganese mine; Guangxi

我国矿山的生态恢复治理工作起步于二十世纪 60 年代, 在 80 年代后期至 90 年代进展较快。与国外相比, 我国矿区生态治理工作起步晚, 缺乏科学化、规范化指导和实施生态环境恢复与治理工作。从矿山的生态治理和复垦技术及利用模式来看, 美国的矿山生态恢复后并不强调农用, 而是强调恢复破坏

前的地形地貌和生态状态^[1], 其复垦率超过 85%; 英国研究者根据污染土地的污染物浓度与引起人体健康与环境危害的风险性之间的关系, 提出“土壤污染物指导限值(SGV)”, 用以指导污染土地的修复利用^[2], 国外大多先进工业化国家所采取的矿山生态恢复特点之一是采用综合模式, 实现土地、环境和生态的综合恢复^[1]。目前我国矿山生态恢复治理率也仅为 5%~6% 左右^[3-4], 而且主要是进行单一用途的生态治理和恢复, 如地质灾害治理、水土流失治理、植被生态恢复、矿区废弃地的复垦和土壤改良。近年关注更多的是植物修复, 通过开展重金属元素超富集植物的筛选, 采

收稿日期: 2008-01-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30560032); 广西科学基金资助项目(桂科基 0575047)

作者简介: 李 艺, 男, 教授, 研究方向为矿产资源与环境。
E-mail: liyi03@sina.com

用种植这些植物“吸取”土壤中的重金属元素以达到恢复土壤功能的目的^[5-8],而对于重金属元素对生态及植物的毒害机理,特别是对食用农作物的毒害影响和食用安全的研究是较为薄弱的环节。

广西的矿区生态恢复重建工作基本处于零星、分散状态,矿山生态恢复治理率则 $<3\%$,矿山环境问题十分严重,制约了矿区的工农业与环境保护相协调的可持续发展。广西八一锰矿为我国三大锰矿区之一,位于来宾、柳江两县境内,由凤凰、思荣两大矿区组成。该锰矿自 1959 年开发建设,历经数十年的露天开采,形成采空区面积及尾矿库面积已达 17 km^2 (其中思荣矿区达 5 km^2 以上),占矿区面积的 70% 以上。所在矿区土地、植被和地貌景观遭到严重破坏,土壤中 Cd、Cr 元素含量高,对该地区的生态环境、矿山企业生产、农业生产和群众生命财产安全造成重大不利影响。

广西八一锰矿企业在 2004 年曾对矿区部分采矿废弃地进行复垦治理,分片种植了甘蔗、花生、柑桔及茶叶等多种农作物,矿区生态环境得到一定程度的恢复。凤凰锰矿区位于来宾市境内,主要对老尾矿区土地进行复垦和土壤改良,复垦面积超过 50 hm^2 ,主要是连片种植当地的传统作物——甘蔗;思荣锰矿区位于柳江县境内,在矿区道路两侧对部分露天山坡及老尾矿库区也进行了复垦,主要种植茶叶、柑桔、甘蔗及花生等多种经济农作物。但是,对于该矿区废弃地复垦区土壤的受污染状况、植物的适生性、农果作物的品质优良性及其食用安全性等,均缺乏开展相关研究或跟踪研究,复垦种植具有极大盲目性,生态恢复治理综合效益较差,甚至还由于农作食物的污染而给人体健康造成较大危害。为此,我们专题组对八一锰矿区的土壤和主要农作物的重金属含量进行了一些初步分析^[9-10],重点研究了矿区优势植物对重金属元素的富集状况,指出在矿区废弃地应谨慎考虑以农业利用进行生态恢复的模式,在该矿山生态恢复的早期一般不宜直接种植果树和其他食用经济作物,以免矿区重金属元素通过食物链危害人体健康。在此,我们根据对思荣复垦区的甘蔗园区、柑桔园区和茶园区进行土壤及其部分植物的重金属元素的含量状况,重点对其污染影响和复垦治理进行探讨分析。

1 思荣锰矿区复垦概况

思荣锰矿区位于广西柳江县境内,主要由产于二迭统孤峰组的原生含锰灰岩经次生氧化淋积富集而

形成第三系残积和第四系堆积锰矿床。该矿区为一向南、南西倾没的向斜盆地,矿区范围面积约 7.6 km^2 。基岩主要为石灰岩、硅质岩构成,局部为粘土页岩及砂质页岩,主要形成岩溶和丘陵两类地貌。

该矿区历经近 50 a 的露天开采,现遗留数米至数十米深、大小不等的矿坑遍布,选矿尾矿库大面积坦露微细沙土,采矿区原有生态环境和自然景观已遭受严重破坏,地表裸露光秃,水土流失严重,耕地贫脊化,重金属元素污染土壤,农作物生长受较大不良影响。

为治理恢复矿区生态环境,在 2004 年国家及矿山企业投入 512.5 万元对八一锰矿区进行地质环境和复垦治理工程。在思荣矿区,主要对道路沿线两侧的部分采矿废弃地及尾矿库区进行复垦治理。原尾矿库区主要是堆积锰矿洗选排放的沙土泥浆,排放量较大,一般选择在原低凹洼地筑坝集中堆放,堆放占地面积也较大,形成表面相对平整的小区域。露天采空区形成的废弃地为深浅不一的矿坑。该矿区的复垦主要是对山坡的露采矿坑用挖掘推土机进行推平整地,形成平缓山坡地;对老尾矿库区的拦土石坝体进行加固维修和进行排洪道整改,固化库区土壤,对矿区道路塌陷区进行填土砌石处理。一些较深的采矿坑则仍保留为自然蓄水坑、塘。

该矿区数百亩山坡和老尾库区复垦地,因属传统缺水岩溶地区,且复垦土地固水能力差,主要被用作种植旱作经济农作物。该区经多年种植茶叶、柑桔、甘蔗及花生等多种经济农作物,矿区土地得到部分恢复利用,并获得较好的农业经济效益,生态环境也得到一定程度的恢复。

2 复垦区的重金属污染影响分析

2.1 土壤的重金属污染影响状况分析

思荣复垦区土壤类型主要有棕红土壤、黄褐色粘土、亚粘土土壤,缺少有机质,肥力较低,土质松散透水性较强。经对复垦种植茶树、柑桔和甘蔗园区按梅花型布点法进行系统采集土壤样品,每个采样区取 3 个组合样,对土壤样品经自然晾干后磨碎,过 100 目尼龙筛,筛下样品经 $\text{HCl}(\text{浓})+\text{HF}+\text{HCl}_4$ 消解后作金属元素含量全量测定,用 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 HCl 作浸提剂提取后进行金属元素有效态含量分析。采用原子吸收分光光谱法(AAS)进行测定分析,数据处理分析用 SPSS11.5 完成,其平均结果见表 1、表 2。

从表 1 分析结果看,该矿区复垦茶园、柑桔园区

土壤呈弱酸性,甘蔗园区土壤呈弱碱性,基本符合植物正常生长的要求。EC(电导率)值是反映土壤中盐度的指标,采用 DDS-11C 型电导率仪进行测定,该复垦区土壤的 EC 值平均为 0.94 dS·m⁻¹。采用重铬酸钾容量-稀释热法测定土壤的有机质,根据土壤肥力分级参考指标^[1],该复垦区 3 个种植园区土壤有机质(OM)平均含量达 3.03%,高于(旱地)Ⅱ级指标(1.0%~1.5%);全氮含量除茶园区土壤较高外,柑桔园区和甘蔗园区土壤的全氮含量则低于(旱地)Ⅲ级指标(<0.08%),全磷含量则低于植物正常生长所需最低磷量(0.08%~0.1%),因此,该复垦区土壤的肥力较低。

表 1 思荣锰矿复垦区土壤肥力元素分析结果

Table 1 Concentration of fertilizer elements in Mn-mine soil of Si-rong						
采样地点	pH	P/%	N/%	EC/dS·m ⁻¹	TOC/%	TOM/%
茶园区	6.20	0.018	0.123 4	0.66	2.13	3.67
柑桔园区	6.14	0.026	0.069 6	0.94	2.02	3.47
甘蔗园区	7.53	0.035	0.075 0	1.23	1.13	1.94
3 个园区平均	6.62	0.026	0.089 3	0.94	1.76	3.03

表 2 分析结果表明,该矿区复垦区土壤的 Mn、Cd、Pb、Zn、Cu、Cr 等金属元素含量远高于广西和全国土壤背景值,但其中 Pb、Zn、Cu、Cr 含量均低于土壤二级标准值,Mn 含量无标准规定,但其含量明显偏高并对土壤质量有一定不利影响,而有害元素 Cd 含量

与土壤三级标准值^[12]相比则严重超标 30 倍以上。

金属元素有效态含量是易为植物吸收的部分。从土壤重金属的有效态含量上来看,复垦区的 Mn、Pb、Zn、Cu、Cr 的平均有效态含量较低,而 Cd 的平均有效态含量较高,在茶园区为 1.228 mg·kg⁻¹,柑桔园区为 1.113 mg·kg⁻¹,甘蔗园区为 3.249 mg·kg⁻¹,是土壤三级标准值的 1~3 倍多。因此,该矿区复垦区土壤已受 Cd 的污染,并且其含量较高,是污染该矿区土壤的主要毒害元素。

2.2 植被的重金属污染影响状况分析

该矿区属亚热带气候区,气候温暖、雨量充沛,地带性植被属于南亚亚热带季风常绿阔叶林。由于该锰矿区露天开采,对生态环境已造成严重破坏,原生常绿阔叶林破坏殆尽,所见仅为稀疏草皮为主的植被,人工种植乔木主要有马尾松;次生灌木有桉木、桃金娘、三叉苦等;草本植物有铁芒萁、黄茅草、四脉金茅、画眉草、野古草等。农作物主要有水稻、玉米、甘蔗、木薯、红薯、花生、黄豆、芋头、茶叶和黄麻、红麻等。

对该复垦区的部分种植食用植物和优势野生植物进行采样,样品按根、茎、叶分开,经处理烘干后粉碎过 80 目尼龙筛,粉碎样品经化学处理消解,用原子吸收分光光谱法测定 Pb、Cr、Zn、Cu、Cd、Mn 含量,分析结果见表 3。从表 3 可以看出,该复垦区 6 种主要优势植物体内重金属含量与植物中金属元素正常含量^[13]比较,植物中有毒元素 Cd、Cr 的含量均已大大超

表 2 思荣锰矿复垦区土壤金属元素含量(mg·kg⁻¹)

Table 2 Concentration of heavy metal elements in soil of the Si-rong Mn mineland(mg·kg ⁻¹)							
采样地点	含量	Mn	Cd	Cr	Pb	Zn	Cu
茶园区	含量范围	707.08~1 095.12	28.9~32.69	104.67~183.95	147.98~204.77	73.09~115.37	39.31~45.24
	平均含量	850.30	31.42	140.52	172.72	87.75	41.64
	有效态范围	75.9~218.35	1.06~1.41	2.76~5.03	5.45~7.19	4.55~6.90	1.02~2.22
	平均有效态	133.65	1.228	4.082	6.17	5.35	1.42
柑桔园区	含量范围	1 792.34~2 978.55	34.53~39.81	99.02~206.34	143.63~300.31	105.69~120.95	44.14~51.21
	平均含量	2 430.32	36.62	149.86	220.54	115.27	46.68
	有效态范围	114.19~177.05	1.06~1.16	2.90~4.60	1.74~3.49	3.26~6.70	1.53~2.00
	平均有效态	136.64	1.113	3.893	2.83	4.58	1.69
甘蔗园区	含量范围	16 087.15~18 746.69	44.76~47.72	31.22~150.07	248.46~313.50	151.56~203.09	85.48~98.51
	平均含量	17 152.32	46.5	99.09	289.04	181.10	90.69
	有效态范围	377.94~578.51	1.75~5.31	3.19~4.88	2.29~4.03	14.44~31.82	2.33~2.97
	平均有效态	449.01	3.249	3.846	3.09	20.27	2.60
广西土壤背景值		176.00	0.07	65.30	19.50	51.80	23.10
全国土壤背景值		103~342	0.07	53.90	23.60	67.70	20.00
土壤质量二级标准		(170~1 200)	0.30	150.00	250.00	200.00	150.00
土壤质量三级标准			1.0	300.00	500.00	500.00	400.00
三级标准超标状况			严重超标	未超标	未超标	未超标	未超标

表 3 思荣锰矿复垦区部分植物重金属元素含量(mg·kg ⁻¹)								
Table 3 Concentration of heavy metal elements of plants in the Si-rong Mn mineland(mg·kg ⁻¹)								
采样地点	植物名称	Mn	Pb	Cd	Cr	Cu	Zn	
茶园区	茶叶	2 691.01	54.17	3.23	31.06	7.68	23.27	
	标准限量(≤)	5		0.2	0.5	10	20	
	超标(倍)	—	9.83	15.15	61.12	—	0.16	
柑桔园区	野菊	根	490.18	77.10	4.84	32.59	5.32	66.33
		茎	282.44	40.92	4.45	24.78	5.11	43.74
		叶花	607.22	57.68	4.54	30.19	12.50	65.34
	花生	花生	37.07	60.13	3.72	31.68	7.70	42.39
		标准限量(≤)	—	0.2	0.5	1.0	20	100
		超标(倍)		299.65	6.44	30.68	—	—
		甘蔗园区	野艾	根	167.98	44.81	3.73	39.53
茎	143.85			58.50	4.42	32.71	4.79	44.87
叶	519.44			75.77	5.03	30.72	14.88	71.04
甘蔗茎	甘蔗茎		58.49	62.83	3.57	30.09	5.64	8.77
	标准限量(≤)		—	0.1	0.05	0.5	10	5
	超标(倍)		—	627.3	70.4	59.18	—	0.75
	地瓜榕		根	408.01	76.67	5.65	30.02	2.52
茎		1 966.80	96.99	7.38	42.07	6.19	108.89	
叶		1 472.95	90.90	5.45	35.83	3.66	94.92	
植物正常含量 ^[13]		1~700	0.1~41.7	0.2~0.8	0.2~8.4	0.4~45.8	1~160	

过其正常生长范围;Pb 的含量也已超过其正常范围;Mn 含量较高,对茶和地瓜榕的生长有一定不利影响,对甘蔗生长也有一些不利影响,而对其他如野菊、野艾和花生等植物的影响不大。因此,该矿区植物已严重遭受土壤中 Cd、Cr、Pb 等重金属元素的污染毒害,Mn 对部分植物也产生有一定的不利影响。

从食物食用安全性来看,根据食品中污染物限量标准^[14],思荣锰矿复垦区现种植产出的茶叶、花生和甘蔗等食用植物含 Pb、Cd、Cr 有害元素的量已超过食品污染物限量值数倍至数百倍,特别是该区作为主要传统经济作物所种植的甘蔗,其甘蔗茎食用部分含 Pb 超标高达 627 倍,含 Cr、Cd 超标 60~70 倍(注:无甘蔗限量标准,在此取水果标准作参照),花生含 Pb、Cr 超标也很高(见表 3),由此可见,在该复垦区种植这些作物是不适宜食用的,否则,将对人体健康产生较大危害。

3 重金属污染治理与生态恢复探讨

3.1 Cd、Pb、Cr 及 Mn 等是矿区废弃地的主要毒害元素

从思荣锰矿区土壤及其植物的研究分析结果来看,该矿区土壤呈弱酸性至弱碱性,肥力较低;复垦区土壤已遭受 Cd、Pb、Cr 及 Mn 等重金属元素的污染,其中特别是 Cd 的有效态含量较高,并超过土壤三级

标准值 Cd 含量的 30 倍以上;植物中有毒元素 Cd、Cr、Pb 的含量均已超过其正常生长范围^[13],在甘蔗茎、茶叶和花生仁中的 Cd、Cr、Pb 等 3 种有毒元素的含量均有较大程度的超标,会对人体健康产生较大危害。

该复垦区土壤中的 Cd 含量较高,达 31.42~46.5 mg·kg⁻¹,特别是甘蔗地中的有效态 Cd 含量较高(3.249 mg·kg⁻¹,占全量约 7%),对土壤及植物的污染影响较大。由于缺乏对该区的成矿、成土背景进行采样分析,其中 Cd 的部分来源或许与该区处于冶炼重工业区受其污染影响,以及与施用矿质肥料和农药等有关,有待进一步研究,以便从污染源上减少 Cd 等有害元素的毒害。

3.2 调整复垦区土壤 Eh-pH 等性状,减少有害元素的有效态和毒害性

思荣矿区的生态环境破坏一方面是由于其含 Mn、Cd、Pb、Cr 等较高,另一方面也因为该土壤中缺乏有机质和呈弱酸性,重金属元素在土壤中吸附、络合作用较弱,形成矿物态含量较少,导致呈游离状态的金属离子较多,并且该区土壤的 Fe-Mn 氧化物含量较高,对 Cd、Cr 及 Pb 有较强的吸附作用,导致 Mn-Cd-Cr-Pb 的协同效应被植物吸收而产生较大的重金属元素复合污染。对这些复垦区土壤的耕种,如欲降低 Mn、Cd、Pb、Cr 等重金属元素的污染危害,应

通过增施有机肥料、石灰等改善土壤的有机质和适当提高其 pH 值,并以种植坡地旱作植物为主,减少这些毒害元素的有效态含量或降低其活性,可望在一定程度上减少对植物的危害,提高农业耕种的经济效益和植物的食用安全性。

3.3 调整农业生产结构,因地制宜优先种植非食用性经济作物

根据思荣锰矿区复垦土壤及其植物被污染受损状况,对于已遭受 Cd、Cr、Pb 等重金属元素较严重污染毒害的局部区域,其复垦区土地不宜种植食用农作物和水果,因此,应通过调整农业生产结构,优先发展种植当地传统种植且有较好经济效益的剑麻、黄麻、红麻以及广西目前大力发展的作乙醇原料的玉米、木薯等经济作物,此外还可种植一些经济林木及观赏性商品花木,以充分利用复垦耕地资源,提高农业生产经济效益。

3.4 重视利用植物修复技术治理重金属元素污染废弃地

思荣锰矿区土壤中遭受 Mn、Cd、Pb、Cr 等重金属元素的污染毒害已较为严重,并对其上生长的植物受到毒害。为恢复该矿区土壤的生态功能,必须对该土壤进行功能性恢复治理。在治理土壤污染的各种方法中,植物修复技术是最重要和具有巨大应用前景的土壤治理技术之一。目前,在许多矿区已发现一大批 Cd、Pb、Cr 和 Mn 的富集、超富集植物^[15-20],如天蓝遏菜、早柳、蒲公英、狼把草、龙葵、羽叶鬼针草、酸模、土荆芥、芦竹、李氏禾、双穗雀稗、商陆、鼠麴草等,它们都可作为潜在修复土壤 Cd、Pb、Cr、Mn 污染的植物品种。

在思荣锰矿区废弃地的生态环境恢复治理工程中,针对该矿区土壤受 Mn、Cd、Pb、Cr 等重金属元素污染毒害的状况,应切实加强研究分析及试验筛选出适合该区地理、气候、土壤等环境生长的重金属元素富集、超富集植物进行反复多轮迴种植,“吸取”土壤中的各种有害元素,以促进恢复土壤的生态功能和永续利用。

4 结论

广西八一锰矿思荣锰矿区废弃地复垦区土壤 Cd 含量严重超标,Pb、Cr、Mn 的含量也偏高,并且在甘蔗茎、花生仁和茶叶等食用植物中的 Cd、Cr、Pb 的含量均严重超过食品中污染物的限量标准。因此,该矿区受 Mn、Cd、Pb、Cr 复合污染严重的废弃地一般不宜

种植食用农作物和水果,应以发展当地传统种植且有较大经济效益的非食用性经济作物如剑麻、黄麻、红麻及作乙醇原料的玉米、木薯作物等,以充分利用复垦耕地资源,提高农业生产经济效益,并通过在耕作中增施有机肥料、石灰等改善土壤的有机质和适当提高其 pH 值,以减少这些毒害元素的有效态含量或降低其活性,此外也应重视利用植物修复技术治理重金属元素污染废弃地,以促进恢复土壤的生态功能和永续利用。

参考文献:

- [1] 胡明忠,汤 杰,王小雨. 矿山生态恢复与重建存在的问题及对策[J]. 中国环境管理, 2003, 22(3): 7-9.
HU Ming-zhong, TANG Jie, WANG Xiao-yu. Problems and counter-measures of ecological restoration in mine[J]. *China Environmental Management*, 2003, 22(3): 7-9.
- [2] 刘志全,石利利. 英国的污染土地风险管理修复技术[J]. 环境保护, 2005(10): 69-73.
LIU Zhi-quan, SHI Li-li. Risk management of contaminated land and its remedial measures in UK [J]. *Environmental Protection*, 2005 (10): 69-73.
- [3] 鲍爱华. 生态矿山建设的几点思考[J]. 矿业研究与开发, 2005, 25(3): 1-4.
BAO Ai-hua. Some considerations about ecological mine construction[J]. *Mining R & D*, 2005, 25(3): 1-4.
- [4] 谢宏全,胡振琪,陈秋计. 4D 在金属矿山尾矿库复垦中应用模式初探[J]. 矿业研究与开发, 2004, 24(5): 80-82.
XIE Hong-quan, HU Zhen-qi, CHEN Qiu-ji. A preliminary investigation of 4D application modes in Tailing depot reclamation of metal mine[J]. *Mining R & D*, 2004, 24(5): 80-82.
- [5] 王晓辉,谢贤政,潘成荣. 安徽矿区生态破坏现状及生态恢复与建设[J]. 环境与可持续发展, 2006(6): 47-49.
WANG Xiao-hue, XIE Xian-zheng, PAN Cheng-rong. Ecological damages of mining areas in Anhui Province and measures of ecological restoration and reconstruction[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2006(6): 47-49.
- [6] 牛一乐,刘云国,路 培,等. 中国矿山生态破坏及治理技术研究进展[J]. 环境科学与管理, 2005, 30(5): 59-60, 66.
NIU Yi-le, LIU Yun-guo, LU Pei, et al. The current situation of ecological damages of China and progress of research on ecological restoration technologies[J]. *Environmental Science Management*, 2005, 30(5): 59-60, 66.
- [7] 周连碧. 我国矿区土地复垦与生态重建的研究与实践[J]. 有色金属, 2007, 59(2): 90-94.
ZHOU Lian-bi. Investigation and practice on mining land rehabilitation and ecological reconstruction in China[J]. *Nonferrous Metals*, 2007, 59(2): 90-94.
- [8] 魏 艳,侯明明,卿 华,等. 矿业废弃地的生态恢复与重建研究[J]. 矿业工程, 2007, 5(1): 52-55.

WEI Yan, HOU Ming-ming, QING Hua, et al. Study on ecological restoration and reconstruction in mining wasteland[J]. *Mining Engineering*, 2007, 5(1):52-55.

- [9] 赖燕平, 李明顺, 杨胜香, 等. 广西八一锰矿区土壤和主要农作物重金属含量的研究[J]. *矿产与地质*, 2006, 20(6):651-655.

LAI Yan-ping, LI Ming-shun, YANG Sheng-xiang, et al. Heavy metal concentrations in soils and main agronomic crops in restored Bayi manganese mine, Guangxi[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2006, 20(6):651-655.

- [10] 杨胜香, 李明顺, 赖燕平, 等. 广西锰矿废弃地优势植物及其土壤重金属含量[J]. *广西师范大学学报:自然科学版*, 2007, 25(1):108-112.

YANG Sheng-xiang, LI Ming-shun, LAI Yan-ping, et al. Dominant plants and their heavy metal concentrations in manganese mine wastelands, Guangxi[J]. *Journal of Guangxi Normal University: Natural Science Edition*, 2007, 25(1):108-112.

- [11] NT/Y391-2000, 绿色食品 产地生态环境质量标准[S].

NT/Y391-2000, Environmental technical terms for green food production area[S].

- [12] GB15618-1995, 土壤环境质量标准[S].

GB15618-1995, Environmental quality standard for soil[S].

- [13] 曹鉴燎, 池柏良, 等. 都市生态走廊[M]. 北京:气象出版社, 2001. 51-52.

CAO Jian-liao, CHI Bo-liang, et al. Urban ecological corridor[M]. Beijing: Meteorological Press, 2001. 51-52.

- [14] GB2762-2005, 食品中污染物限量[S].

GB2762-2005, Limits of contamination in food[S].

- [15] 周 琼. 我国超富集·富集植物筛选研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2005, 33(5):910-912, 916.

ZHOU Qiong. Filtrations for hyperaccumulators and accumulators of

heavy metal in contaminated soil[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2005, 33(5):910-912, 916.

- [16] 张美钦. 南方重金属矿区重金属污染现状及治理[J]. *亚热带农业研究*, 2006, 2(3):212-215.

ZHANG Mei-qin. The state of heavy metal pollution and its control in them ining districts of south China[J]. *Subtropical Agriculture Research*, 2006, 2(3):212-215.

- [17] 韩志萍. 铬铜镍在芦竹中的富集与分布[J]. *环境科学与技术*, 2006, 29(5):106-108.

HAN Zhi-ping. Accumulation and distribution of chromium, copper and nickel in arundo donax linn[J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, 29(5):106-108.

- [18] 张学洪, 罗亚平, 黄海涛, 等. 一种新发现的湿生铬超积累植物-李氏禾(*Leersia hexandra Swartz*) [J]. *生态学报*, 2006, 26(3):950-953.

ZHANG Xue-Hong, LUO Ya-Ping, HUANG Hai-Tao, et al. *Leersia hexandra Swartz*: a newly discovered hygrophyte with chromium hyper-accumulator properties[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3):950-953.

- [19] 张学洪, 罗亚平, 黄海涛, 等. 某电镀厂土壤重金属污染及植物富集特征[J]. *桂林工学院学报*, 2005, 25(3):289-292.

ZHANG Xue-hong, LUO Ya-ping, HUANG Hai-tao, et al. Electroplating factory heavy metal pollution in soil and characteristics of plant accumulation[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2005, 25(3):289-292.

- [20] 潘静娴, 戴锡玲, 陆劭俊. 菱蒿重金属富集特征与食用安全性研究[J]. *中国蔬菜*, 2006(1):6-8.

PAN Jing-xian, DAI Xi-ling, LU Meng-jun. Absorption to heavy metal and edible safety of seleng wormwood[J]. *China Vegetables*, 2006(1):6-8.