

# 剑麻对铁矿尾矿库土壤修复的试验研究

吴其珍, 杨安富 (海南省环境科学研究院, 海南海口 570206)

**摘要** [目的] 评价尾矿库污染程度及剑麻对重金属污染的修复效果。[方法] 通过野外调查和实验室分析对海南省昌江石碌铁矿尾矿库污染程度进行评价, 并将2种剑麻品种 H. 11648 和毛里求斯分别种于对照土壤与2个尾矿库土壤上, 观察其对植株生长的影响。[结果] 参照土壤污染国家2级标准和该地区土壤污染背景值, 除 Cr、Ni、Pb 外, 所有重金属均存在不同程度的污染, 其中2个尾矿库 Cd、Fe 污染程度达到重度。种植剑麻后, 各处理条件下, 叶片吸收各重金属含量依次为 Mn、Fe、Zn, 其次为 Pb、Ni 和 Cu、Co、Cr、As 和 Hg 最低; 根系中, 以 Fe、Mn、Zn 含量较高, Cu、Pb、Ni 含量其次, As、Cr、Co、Hg 含量较低。[结论] H. 11648 修复污染土壤比毛里求斯更具有优势。

**关键词** 剑麻; 铁矿尾矿库; 污染土壤; 修复; 石碌

**中图分类号** X53 **文献标识码** A **文章编号** 0517 - 6611(2009)33 - 16490 - 04

## Research on Soil Remediation with Sisals in Iron Mine Tail Stock

WU Qi-zhen et al (Hainan Academy of Environmental Science, Haikou, Hainan 570206)

**Abstract** [Objective] The study aimed to evaluate the soil pollution degree of iron mine tail stock and the remediation effect of Sisals on heavy metal pollution. [Method] The soil pollution degree in Shilu Iron Mine Tail Stock in Changjiang City of Hainan Province was evaluated through field investigation and laboratory analysis and 2 Sisals varieties, H. 11648 and Mauritius, were planted in the soils of 2 mine tail stocks and CK soil to investigate their effects on the growth of Sisals plants. [Result] Referred to the national secondary standards on soil pollution and the soil background values in the area, except Ca, Ni and Pb, all the heavy metal had pollution to different degree, in which, Cd and Fe pollution in 3 mine tail stocks reached heavy pollution. After planting Sisals, under different treatments, as for various heavy metal contents absorbed by leaves, Mn, Fe and Zn contents were highest, Pb and Ni contents were next and Cu, Co, Cr, As and Hg contents were lowest; as for that in roots, Fe, Mn and Zn contents were higher, Cu, Pb and Ni contents were next and As, Cr, Co and Hg contents were lower. [Conclusion] H. 11648 had more advantages in repairing the contaminated soil than Mauritius.

**Key words** Sisal; Iron mine tail stock; Contaminated soil; Remediation; Shilu

昌江铁矿是我国铁矿石的重要基地之一, 它不仅拥有丰富的铁、钴、铜资源, 而且还有镍、硫、铝、金等多种矿产资源, 其中, 铁矿储量达数亿吨, 为我国数十家大型钢铁公司提供了优质的原料<sup>[1]</sup>。而随之带来的尾矿渣排放问题不容忽视。这些废弃物中含有浓度较高的有毒重金属, 尾矿中重金属元素的释放、迁移不仅会对附近土壤等地表生态环境产生严重的重金属污染, 还会通过接触、食物链等途径直接或间接地危害人类, 因此, 矿区植被恢复和土地复垦成为目前倍受关注的研究领域。

剑麻属龙舌兰属, 生长于热带, 为多年生、肉质、早生的草本植物<sup>[2]</sup>。极耐旱耐瘠, 生物量大、根系发达、生长速度快, 主产区平均年产量为 85.50 t/hm<sup>2</sup>, 有的高达 180 t/hm<sup>2</sup><sup>[3]</sup>; 剑麻纤维是一种优良的天然植物纤维, 其产品广泛应用于国防、交通、渔业、纺织、林牧等行业<sup>[4]</sup>, 由于其成品与食物链脱节, 使其在污染土壤修复中应用有了一定的优势<sup>[1]</sup>。目前利用有经济价值且不会对人体和动物造成伤害的作物来修复污染的土壤报道较少, 笔者对尾矿库污染程度及剑麻的重金属污染修复效果进行评价, 旨在为矿区土壤修复奠定基础。

## 1 材料与与方法

### 1.1 野外调查

尾矿库中重金属元素的释放、迁移会对附近土壤等地表生态环境产生严重的重金属污染, 因此对该地区矿产资源开采排放后的尾矿库进行调查分析, 其中主要有2个大型尾矿库, 分别为石碌镇铁矿新、老尾矿库(分别表示为 Fe1、Fe3、老尾矿库 1969 年投入使用, 1980 年停止使用, 新尾矿库 1982 年投入使用至今)和周边土壤(对照土壤

CK)。

### 1.2 试验材料

供试植物为剑麻, 品种为 H. 11648 和毛里求斯, 分别采自海南省昌江石碌镇和华南热带农业大学农学院苗圃; 土壤采自昌江县石碌镇 Fe1、Fe3 和 CK。

### 1.3 试验设计

2 种剑麻分别种于对照土壤与 2 个尾矿库土壤上, 设对照土壤、新尾矿库、旧尾矿库 3 个处理, 观察不同处理对植株生长的影响。整个生长期用霍格兰营养液做养分的补充, 保持盆内含水量为田间持水量的 60% 左右; 剑麻生长 7 个月后进行分析测试。田间试验于 2006 年 9 月种植于华南热带农业大学农学院苗圃土化试验网室 II, 2007 年 4 月收获。项目测定于华南热带农业大学农学院土壤化学与植物营养实验室和海南省地质测试研究中心进行。

### 1.4 分析方法

土壤容重采用环刀法; 含水量用烘干法; 土壤重金属全量用 HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub> 分解, 有效态用 EDTA 提取, 植物样品用湿法消解, 其中 As 用 HG-AAS 测定, Cd、Pb、Zn、Fe 用 AAS 法测定, Co、Cr、Mn、Ni 用 ICP-AES 测定, Cu 用 GF-AAS 测定, Hg 用冷原子荧光测定, pH 值用水浸提电位法。数据采用 SAS 和 Excel 进行统计分析; 尾矿库污染情况采用单项污染指数法和土壤综合污染指数法进行评价。

## 2 结果与分析

### 2.1 尾矿库各元素的环境化学特征

#### 2.1.1 尾矿库重金属含量。

经海南省地质测试研究中心分析, 铁矿尾矿库各重金属含量及其有效态见表 1。由表 1 可看出, 尾矿库各重金属含量均高于周边土壤; 就全量而言, 2 个采样点的污染土壤中都是全量 Fe 含量处于最高, Mn 其次, Hg 最低。Fe1 中 Mn、Fe、Cr 最高, 各金属全量均超出该地区土壤背景值的标准, 许多国内学者在矿区调查中早已发现类似的重金属污染问题<sup>[5-9]</sup>。

#### 2.1.2 尾矿库污染状况评价。

采用 GB15618-1995 国家《土

**作者简介** 吴其珍(1973-), 女, 海南乐东人, 工程师, 从事环境监测方面的研究工作。

**收稿日期** 2009-07-11

表 1 各尾矿库重金属元素含量

Table 1 The content of heavy metal elements in different tailings reservoir

样号 No. of samples	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn	Fe	pH
Fe1	47.00	4.24	27.50	52.10	475.40	0.48	1 778.00	20.40	68.70	172.00	23.00	8.07
Fe3	54.20	4.58	12.80	23.70	87.40	0.37	1 085.00	5.80	61.40	37.10	17.80	6.26
CK	0.87	2.16	6.12	1.48	2.31	3.62	1.06	5.73	4.88	3.36	1.22	6.20

注:除 Fe 单位为%,其余均为 mg/kg。

Note:Except that the unit of Fe is %,the unit of the others is mg/kg.

壤环境质量标准)2 级标准(适用于一般农田、蔬菜地)作为土壤污染评价标准。采用单项污染指数法和土壤综合污染指数法进行评价,方法如下: $P_i = C_i/S_i$ ,其中  $P_i$  为单项污染指数值, $C_i$  为土壤污染实测值, $S_i$  为某污染评价标准,当  $P_i \leq 1$  时,土壤未受污染; $1 < P_i \leq 2$  轻度污染; $2 < P_i \leq 3$  中污染; $P_i \geq 3$  为重污染。 $P_{\text{综}} = [(P_{\text{max}}^2 + P_{\text{ave}}^2)/2]^{1/2}$ ,其中  $P_{\text{ave}}$  为单项污染值数值的平均值, $P_{\text{max}}$  为单项污染指数值中最大的一项。 $P_{\text{综}} \leq 1$  为未污染; $1 < P_{\text{综}} \leq 2$  轻度污染; $2 < P_{\text{综}} \leq 3$  中污染; $3 < P_{\text{综}}$  重污染。统计得出 Fe1、Fe3 的综合污染指数分别为 3.1、11.0(Fe、Mn、Co 采用该地区土壤背景值作为评价标准)。证明该地区土壤环境污染状况相当严峻,需采取治理措施。该试验采用生物修复的方法,选取具有经济价值且断开食物链的作物——剑麻进行修复该地区的污染土壤。污染程度见表 2~3。

表 2 尾矿库金属污染及评价

Table 2 The evaluation on the pollution of tailings reservoir

样号 No. of samples	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni
	Fe1	1.9	4.2	0.2	2.4	0.5
Fe3	1.4	15.3	0.2	0.6	1.2	0.1
污染程度 Pollution degree	Fe1 轻	重	安全	中	安全	安全
	Fe3 轻	重	安全	安全	轻	安全

## 2.2 剑麻对尾矿库修复效果

### 2.2.1 剑麻各部分重金属含量。地上部重金属含量是衡量

一种植物修复污染土壤的重要指标。表 4、5 表征剑麻叶片在各处理下吸收的含量,其中较高的是 Mn、Fe 和 Zn,H.11648

表 3 尾矿库污染评价

Fig. 3 The evaluation on the pollution of tailings reservoir

样号	Pb	Zn	$P_{\text{综}}$	Co	Mn	Fe	
Pi	Fe1	0.2	0.6	3.1	2.0	5.0	11.3
	Fe3	0.2	0.2	11.0	0.9	3.0	8.8
污染程度	Fe1	安全	安全	重	轻	重	重
Pollution degree	Fe3	安全	安全	重	安全	中	重

在 Fe3 下的 Mn 含量可达 2 294.56 mg/kg,而 Hg 和 As 含量最低,H.11648 在 CK 下 Hg 含量最低为 0.010 mg/kg。各处理下 2 品种吸收各重金属的量依次 Mn、Fe、Zn 最高,Pb、Ni、Cu 其次,Co、Cr、As、Hg 最低。H.11648 和毛里求斯比较,CK 下 H.11648 中 Mn、Pb、Ni、Co、Hg、As 比毛里求斯低,其他元素均比其高,Fe1 下 H.11648 中 Zn、Mn、Co、Hg、As 比毛里求斯低,其余均高,Fe3 下 Cd、Pb、Ni、Cr、As 几种元素在 H.11648 中含量比在毛里求斯中含量低,Hg 相同,其余的都高。

植物根系是吸收矿质养分的主要部位,吸收的养分经过一定的转移,供给地上部分进行多种生理生化反应以达到植物自身的生理需求,但当土壤的供给超过植物自身的需求时,植物自身就会利用一些生理非活性部位进行储存或转移,同时将不必需的元素保存在根系和一些生理非活性部位,避免给植株造成危害。表 6、7 显示两品种根系在各处理

表 4 H.11648 叶片重金属含量

Table 4 The content of heavy metals in H.11648 leaves

处理 Treatments	As	Hg	Cr	Co	Ni	Pb	Cd	Fe	Cu	Mn	Zn
CK	0.020 A	0.010 A	0.084 A	0.13 A	9.49 A	9.65 A	0.85 A	352.39 B	8.69 B	67.65 A	67.65 A
Fe1	0.067 C	0.010 A	0.285 A	0.16 B	21.19 B	57.64 B	5.02 C	169.68 A	3.19 A	217.54 B	120.20 B
Fe3	0.066 B	0.015 B	0.370 B	2.33 C	30.04 C	57.77 B	2.10 B	353.69 C	9.35 C	2 294.56 C	145.31 C

注:表中相同字母表示  $P < 5\%$  差异不显著,不同字母代表  $P < 5\%$  下差异显著;下同。

Note:The same letters mean no significant difference at 0.05 level;Different letters mean significant difference at 0.05 level;The same as below.

表 5 毛里求斯叶片重金属含量

Table 5 The content of heavy metals in Mauritius leaves

处理 Treatments	As	Hg	Cr	Co	Ni	Pb	Cd	Fe	Cu	Mn	Zn
CK	0.070 B	0.013 B	0.023 A	0.16 B	10.00 A	12.78 A	0.75 A	80.2 A	1.48 A	607.32 C	58.33 A
Fe1	0.071 C	0.012 A	0.500 C	0.51 C	32.61 C	32.03 B	3.19 B	133.05 B	1.52 B	471.74 B	139.42 C
Fe3	0.069 A	0.015 C	0.380 B	0.15 A	30.57 B	80.25 C	3.64 C	301.08 C	1.81 C	279.19 A	136.28 B

下重金属含量,其中 Fe、Mn、Zn 含量处于较高,Cu、Pb、Ni 其次,As、Cr、Co、Hg 含量相对较低。H.11648 和毛里求斯相比:Fe1 下 H.11648 含 As、Cr、Co、Ni、Cd、Zn 量比毛里求斯低,而

Hg、Pb、Fe、Mn、Cu 比毛里求斯高,在 Fe3 下 H.11648 除 Cd 和 Zn 含量稍微比毛里求斯低,其他 9 种元素均高。

转运系数( $S/R$ )表示从地下部向地上部运输金属的能

表6 H.11648根系重金属含量  
Table 6 The content of heavy metals in H.11648 root

处理 Treatment	As	Hg	Cr	Co	Ni	Pb	Cd	Fe	Cu	Mn	Zn
CK	0.077 A	0.029 A	0.32 A	0.79 B	10.00 A	12.88 A	0.70 A	499.61 A	5.99 A	483.24 A	79.16 A
Fe1	0.270 B	0.027 A	0.51 B	0.41 A	34.78 B	41.81 C	4.16 B	2 057.17 B	15.96 B	710.82 B	180.11 C
Fe3	0.370 C	0.055 B	0.79 C	3.09 C	78.67 C	36.30 B	5.09 C	2 637.27 C	153.22 C	2 068.20 C	169.98 B

表7 毛里求斯根系重金属含量  
Table 7 The content of heavy metals in Mauritius root

处理 Treatment	As	Hg	Cr	Co	Ni	Pb	Cd	Fe	Cu	Mn	Zn
CK	0.14 A	0.025 C	0.61 C	0.48 B	36.55 A	19.44 B	0.79 A	716.2 A	23.55 C	168.30 A	85.04 A
Fe1	0.38 C	0.024 B	0.53 A	7.11 C	55.15 C	13.51 A	9.91 C	1 837 B	11.20 A	240.40 B	198.70 C
Fe3	0.18 B	0.022 A	0.58 B	0.22 A	48.21 B	22.39 C	8.44 B	1 944 C	23.25 B	541.80 C	176.40 B

力<sup>[9]</sup>,  $S/R = \text{剑麻地上部中重金属浓度} / \text{根部重金属浓度}^{[10]}$ 。重金属迁移总量也是用以评价植物修复重金属污染地潜力的一个非常重要的指标<sup>[11]</sup>。表9、10列举了在各处理下两剑麻品种的转移系数,其中毛里求斯在CK下转移Mn的能力最强,其转移系数高达3.61,其次是毛里求斯在Fe3下对Pb的转移能力可达3.58。毛里求斯除了在Fe1下对Pb和Mn转移系数大于1外,其余的都低,最小的为0.04;而H.11648

在Fe1、Fe3下对Pb、在CK和Fe1下对Cd、在CK下对Cu和在Fe3下对Mn的转移系数都大于1,而其他的相对较低,最低为0.06。

从转移系数来看,见表8和9,H.11648对各种元素的转移能力比较平均,而毛里求斯相差较大。各种元素对不同的作物来说其影响不同,产生拮抗作用强弱也不一样。

H.11648主要是热带麻业优良品种,在昌江叉河镇一代

表8 H.11648在各处理下的转移系数  
Table 8 The transfer coefficient of H.11648 under different treatments

处理 Treatments	As	Hg	Cr	Co	Ni	Pb	Cd	Fe	Cu	Mn	Zn
CK	0.26	0.34	0.26	0.16	0.95	0.75	1.22	0.71	1.45	0.14	0.85
Fe1	0.25	0.35	0.56	0.38	0.61	1.38	1.21	0.08	0.20	0.31	0.67
Fe3	0.18	0.26	0.47	0.75	0.38	1.59	0.41	0.13	0.06	1.11	0.85

表9 毛里求斯在各处理下的转移系数  
Table 9 The transfer coefficient of Mauritius under different treatments

处理 Treatments	As	Hg	Cr	Co	Ni	Pb	Cd	Fe	Cu	Mn	Zn
CK	0.50	0.52	0.04	0.33	0.27	0.66	0.94	0.11	0.06	3.61	0.69
Fe1	0.19	0.50	0.94	0.07	0.59	2.37	0.32	0.07	0.14	1.96	0.70
Fe3	0.38	0.68	0.66	0.68	0.63	3.58	0.43	0.15	0.14	0.52	0.77

普遍种植,该地区有亚洲最大的剑麻生产基地及其加工基地,而毛里求斯主要作为观赏植物,其成品质量不如H.11648。分析两品种各重金属含量发现,H.11648比毛里求斯对大多数重金属积累效果较好,综合考虑,选用H.11648对尾矿库修复具有更强的优势。

### 2.2.2 剑麻对尾矿库的修复潜力。

2.2.2.1 种植剑麻前后有效态重金属含量的变化。现代环境地球化学常把元素在土壤等介质中的赋存形态分为离子

交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态等5种形态,其中离子交换态最为活跃,能在水动力条件下随时迁移和被植物吸收,残渣态较为稳定;几种形态重金属相互依存、互相制约。作物吸收重金属也主要是靠吸收有效成分,其中有效态主要又以离子交换态形式存在,表10显示,种植剑麻除Zn活性有所增加外,其余各种元素有效态均有所降低,Zn活性增加是因为它是一种作物必需营养元素,当土壤有效态含量无法满足作物需求时,植物根系会分

表10 种植H.11648后土壤中有有效态重金属含量  
Table 10 The content of available heavy metals in the soil with planting H.11648

样点 Sample sites	Hg μg/kg	As mg/kg	Fe %	Mn %	Zn mg/kg	Co mg/kg	Cd mg/kg	Cu mg/kg	
种植前 Before planting	Fe1	1.15	0.11	0.025	0.051	5.29	4.26	0.10	48.46
	Fe3	1.33	0.44	0.32	0.013	11.43	16.80	0.26	117.20
种植后 After planting	Fe1	0.74	0.07	0.005	0.036	8.96	1.51	0.019	7.08
	Fe3	0.91	0.23	0.002	0.002	20.53	4.40	0.087	19.52

泌一些有机酸络合其他形态的 Zn,使其转变为有效态,从而满足作物生长需要。而对于其他作物不需要或有毒害的元素,作物则除无法避免吸收一些外,还会分泌一些物质对其进行固定和转移,降低毒害作用。

通过剑麻对各种重金属的吸收和固定,使得尾矿库中各种有效态金属含量大大降低,可使随水体流失的金属离子减少,对周边土壤和水环境造成的压力得到减缓,除 Zn 外,各元素在两处理中进行比较:其中 Cu 有效态降低最多,减少了 10 倍左右,对 As、Hg 有效态固定最为微弱。

**2.2.2.2 剑麻修复污染土壤年限计算。**以 GB15618-1995 国家《土壤环境质量标准》2 级标准(适用于一般农田、蔬菜地)作为土壤污染修复临界值。修复深度为 20 cm。

具体计算步骤:各处理下,选取植株正常生长处理建立方程,设土壤重金属浓度为  $x$ ,植物中含量为  $y$ ,利用 Excel 作出  $x$  与  $y$  的函数关系图,得出  $y$  是关于  $x$  的函数,记为:  $y = F(x)$ ,则某年从土壤中带走的重金属浓度为  $C_n = C_{n-1} - F(x_n) \times Q \times H \times R$ ,而生物量  $Q$  与  $x$  存在函数关系记为  $T = Q(x)$ ,在浓度梯度下求出  $y_1 \cdots y_n$ ,再利用  $y$  与  $n$  作曲线函数,则可在浓度梯度范围内求出某污染地所需修复年限(表 11)。

在上式中,土壤初始浓度为  $C_{初}$ (mg/kg),土壤某时间段浓度为  $C_n$ (mg/kg),生物量为  $Q$ (t/年),土壤容重为  $R$ (g/cm<sup>3</sup>),修复深度为  $H$ (cm),年限为  $n$ (年)。

表 11 修复年限  
Table 11 The repairing years 年

样号	Cd	Co	Cu	Hg	Mn	Zn
No. of samples						
Fe1	648	16	88	-	740	-
Fe3	583	-	-	44	634	-

注:“-”表示污染指数达到安全值,不需修复,Fe、As 修复时间长,需几万年到几十万年,故省略。

Note: - indicated that the pollution index reached the safety value and did not need to be repaired. The repairing time of Fe and As were too long, about several ten thousand years or hundred thousand years, so they were neglected.

### 3 结论与讨论

(1) 参照土壤污染国家 2 级标准和该地区土壤污染背景值,除 Cr、Ni、Pb 外,其余重金属都存在不同程度的污染,其中 2 个尾矿库 Cd、Fe 污染程度达到重度污染;综合评价污染情况,各尾矿库综合污染都达到重度污染,Fe1、Fe3 综合污染指数分别为 3.1、11.0(Fe、Mn、Co 采用该地区土壤背景值作为评价标准,除 Fe3 中 Co 达到安全,Fe1 中 Co 轻度污染和 Fe3 中 Mn 中度污染外,其余都为污染严重),证明尾矿库重金属污染是不可忽视的环境问题。

(2) 剑麻叶片在各处理下吸收的含量,其中较高的是 Mn、Fe 和 Zn, H. 11648 在 Fe3 下的含量可达 2 294.56 mg/kg,而 Hg 和 As 含量最低, H. 11648 在 CK 下 Hg 含量最低为

0.010 mg/kg。各处理下两品种吸收各重金属的量依次 Mn、Fe、Zn 最高, Pb、Ni、Cu 其次, Co、Cr、As、Hg 最低。H. 11648 和毛里求斯比较, CK 下 H. 11648 中 Mn、Pb、Ni、Co、Hg、As 比毛里求斯低,其他元素均比其高, Fe1 下 H. 11648 中 Zn、Mn、Co、Hg、As 比毛里求斯低,其余均高, Fe3 下 Cd、Pb、Ni、Cr、As 几种元素在 H. 11648 中含量比在毛里求斯中含量低, Hg 相同,其余的都比其高;根系在各处理下重金属含量,其中 Fe、Mn、Zn 含量处于较高, Cu、Pb、Ni 其次, As、Cr、Co、Hg 含量相对较低。H. 11648 和毛里求斯相比: Fe1 下 H. 11648 含 As、Cr、Co、Ni、Cd、Zn 量比毛里求斯低,而 Hg、Pb、Fe、Mn、Cu 比毛里求斯高,在 Fe3 下 H. 11648 除 Cd 和 Zn 含量稍微比毛里求斯低,其他 9 种元素均高。

(3) 毛里求斯在 CK 下转移 Mn 的能力最强,其转移系数高达 3.61,其次是毛里求斯在 Fe3 下对 Pb 的转移能力可达 3.58。毛里求斯除了在 Fe1 下对 Pb 和 Mn 转移系数大于 1 外,其余的都低,最小的为 0.04;而 H. 11648 在 Fe1、Fe3 下对 Pb、CK 和 Fe1 下对 Cd、CK 下对 Cu 和 Fe3 下对 Mn 的转移系数都大于 1,而其他的相对较低,最低为 0.06。

(4) 通过剑麻对各种重金属的吸收和固定,使得尾矿库中各种有效态金属含量大大降低,可使随水体流失的金属离子减少,对周边土壤和水环境造成的压力得到减缓。

(5) H. 11648 对 Cd、Mn 元素修复年限较长,尤其对 As 的修复年限高达几万年到几十万年。

### 参考文献

- [1] 海南石绿铁矿[EB/OL]. <http://baike.baidu.com/view/1891002.htm>.
- [2] 李福燕,张黎明,李许明,等. 剑麻对 Cu 的耐性与累积效应研究初探[J]. 中国农学通报,2006,22(12):417-420.
- [3] 李福燕,李许明,郭彬,等. 剑麻对锌的耐性与累积效应研究初探[J]. 农业环境与发展,2007(2):1-5.
- [4] 艾云航. 海南西部地区剑麻产业开发前景广阔[J]. 中国农业信息快讯,2002(10):20-21.
- [5] 范稚莲,莫良玉,陈同斌,等. 广西典型矿区中植物对 Cu、Mn 和 Zn 的富集特征与潜在的 Mn 超富集植物[J]. 地理研究,2007,26(1):125-131.
- [6] 廖晓勇,陈同斌,武斌,等. 典型矿业城市的土壤重金属分布特征与复合污染评价——以“镍都”金昌市为例[J]. 地理研究,2006,25(5):843-852.
- [7] 周建民,党志,司徒粤,等. 大宝山矿区周围土壤重金属污染分布特征研究[J]. 农业环境科学学报,2004,23(6):1176-1172.
- [8] 郑袁明,宋波,陈同斌,等. 北京市菜地土壤和蔬菜中铜含量及其健康风险[J]. 农业环境科学学报,2006,25(5):1093-1101.
- [9] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990:87-91.
- [10] CHALK S G, MILLER J F, WAGNER F W. Challenges for fuel cells in transport applications[J]. J Power Sources,2000,86:40-51.
- [11] MONNI S, SALEMAA M, WHITE C, et al. Copper resistance of Calluna vulgaris originating from the pollution gradient of a Cu-Ni smelter, in south West Finland[J]. Environmental Pollution,2000,109:211-219.
- [12] 车驰,齐伟,斯钧浪,等. 黄河三角洲道路沿线土壤中重金属污染物的分布与评价[J]. 安徽农业科学,2009,37(21):10067-10069.
- [13] 林云青,章钢娅,龚华. 添加钠基蒙脱石对重金属污染红壤的影响[J]. 安徽农业科学,2009,37(21):10090-10092,10114.
- [14] 王学锋,王磊,师东阳,等. 新乡市污灌区蔬菜地重金属污染状况调查分析[J]. 安徽农业科学,2007,35(36):11980-11981.
- [15] 茹淑华,张国印,孙世友,等. 河北省土壤重金属污染来源及研究现状[J]. 安徽农业科学,2007,35(28):13763-13764,13784.