

# 防止土法炼锌废渣充填场地重金属污染复垦技术

敖子强<sup>1,2</sup>, 严重玲<sup>1\*</sup>, 林文杰<sup>2</sup>, 瞿丽雅<sup>2</sup>, 刘景春<sup>1</sup>, 关昕昕<sup>1</sup>, 吴桂容<sup>1</sup>

(1. 厦门大学生命科学学院, 厦门 361005; 2. 贵州省环境科学研究设计院, 贵阳 550002)

**摘 要:** 黔西北赫章县炼锌造成大量的废弃地, 土地复垦成为当地面临的主要问题。为大面积的土地复垦提供基础数据, 在平整的废渣堆上用 0、25 和 50 kg/m<sup>2</sup> 的碱石灰做隔离层, 然后在隔离层上覆以 30、45 和 60 cm 的非污染区土壤, 共 9 个处理; 选用当地的主要农作物红豆、白菜、玉米和马铃薯进行试验。通过近 2 a 对红豆、白菜、玉米和马铃薯可食部分和复垦土壤的重金属进行 One-Way ANOVA (LSD) 分析和富集系数比较得出碱石灰隔离层降低了农作物可食部分的重金属含量; 玉米是对重金属富集系数最小的农作物, 适合作为土地复垦的首选农作物, 而白菜对重金属的富集系数最大, 不适合在炼锌区复垦土壤种植; 经济有效的碱石灰隔离层厚度为 25 kg/m, 复垦土壤的厚度为 30 cm。

**关键词:** 碱石灰, 土地复垦, 重金属, 土法炼锌区, 富集系数

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.12.050

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-12-0285-06

敖子强, 严重玲, 林文杰, 等. 防止土法炼锌废渣充填场地重金属污染复垦技术[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 285—290.

Ao Ziqiang, Yan Chongling, Lin Wenjie, et al. Reclamation technology on preventing heavy metal pollution from landfill of indigenous zinc smelting areas[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 285—290. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

贵州省赫章县是中国著名的土法炼锌集散地, 地处贵州西北部, 辖内煤炭资源丰富, 境内榨子厂、猫猫厂、天桥的铅、锌矿(氧化矿)为“土法炼锌”提供了丰富的原料。其土法炼锌已有 300 多年的历史, 至 2000 年, 已有 1 000 多个土法炼锌“马槽炉”的规模<sup>[1]</sup>, 同时也造成大量的废弃地。杨元根等人对赫章县土法炼锌区重金属的污染进行调查分析, 研究表明矿渣、土壤和沉积物铅、锌、镉大大超过背景值, 对生态环境污染严重<sup>[1-2]</sup>。笔者也对该区进行了监测, 其结果与杨元根等人的结果基本一致, 在废渣上覆土 10~20 cm, 种植农作物, 最初种植的农作物基本上达到国家卫生标准, 第二、三季农作物大大超过国家卫生标准, 同时土壤中的重金属含量也在不断升高。中性的矿渣和强酸性的土壤混合, 导致废渣的 pH 值下降, 加速重金属向可溶态转化, 成为植物的有效态, 并不断释放到表土, 从而使农作物重金属的含量增加, 通过食物链进入人体后, 会对人的健康和安全造成危害。因而如何提高土壤 pH 值, 将可溶性的重金属进行固定是控制污染物向表土迁移的一条重要途径。重金属污染土壤的固定和稳定的化学修复技术, 是有效和实用的, 特别是在大面积污染地区。由于固定剂和稳

定剂的种类很多, 可以因地制宜地进行选择<sup>[3]</sup>。对于含有大量的重金属而具有明显植物毒性的土壤来说施加石灰在一系列化学、物理和生物学性质的积极变化上具有明显的保护作用<sup>[4]</sup>。赫章县有大面积的喀斯特地区, 碱石灰的来源广且相对比较经济, 本文拟探索碱石灰作为隔离层后植物体重金属的含量变化, 同时筛选出适合复垦栽培的农作物。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地的基本概况

试验地位于黔西北赫章县的草籽坪镇, 距离县城大约 10 km, 该地区为亚热带季风气候区, 年均温度为 11~15℃, 年降雨量为 1 000 mm, 主要集中在 5—10 月。海拔高度为 1 900~2 200 m, 土壤为典型的山地黄壤。曾是土法炼锌集散地, 土法炼锌导致土壤污染、植被破坏、水土流失严重<sup>[5]</sup>。2005 年 3 月对试验地复垦前进行了相关的调查, 得到的基础数据见表 1 和表 2。

复垦土壤取自距离试验地大约 1 km, 周围的人为污染相对少, 与中国土壤二级标准限值(Pb: 200 mg/kg, Zn: 250 mg/kg, Cd: 0.6 mg/kg)(GB15168-1995)<sup>[6]</sup>相比较, 非污染区土壤 Pb 和 Zn 没有超标, 但 Cd 的质量分数超标; 废渣和污染区的土壤 Pb、Zn、Cd 的质量分数都大大超过了中国土壤二级标准限值; 背景土壤取自离污染区 5 km 以外的地区, 土壤 Pb、Zn、Cd 的含量均没有超过中国土壤二级标准限值。废渣的 pH 值高是矿石含有 CaCO<sub>3</sub>, 燃烧后含有 CaO 溶于水呈碱性, 背景土壤为山地黄壤, 复垦土壤为偏酸性的黄壤, 污染土壤的 pH 值低是土法炼锌的煤炭是大于 3% 的高硫煤, 大气沉降导致土壤酸化<sup>[5]</sup>。

收稿日期: 2009-03-02 修订日期: 2009-11-02

基金项目: 国家自然科学基金(30530150, 40673064); 福建省高校创新团队培育计划; 贵州省科学技术基金(20062014)

作者简介: 敖子强(1975—), 贵州德江人, 男, 博士生, 主要从事生态环境和污染生态学研究。福建 厦门大学生命科学学院, 361005。

Email: aoziqiang628@163.com

\*通信作者: 严重玲(1959—), 贵州贵阳人, 男, 教授, 主要从事污染生态学研究。福建 厦门大学生命科学学院, 361005。Email: ycl@xmu.edu.cn

表 1 草籽坪试验地土壤的重金属质量分数和 pH 值

Table 1 Soil heavy metal contents and pH values of experimental plots in Caoziping County

基质	Pb 质量分数/(mg · kg <sup>-1</sup> )	Zn 质量分数/(mg · kg <sup>-1</sup> )	Cd 质量分数/(mg · kg <sup>-1</sup> )	pH 值
背景土壤	81	86	0.58	5.39
复垦土壤	110	167	1.65	6.18
废渣	4 634	11 625	31.75	8.10
污染区土壤	261	407	7.60	4.50
土壤二级标准	200	250	0.60	6.50~7.50

表 2 土壤的基本理化性质

Table 2 Basic physicochemical properties of substrates

基质	阳离子交换量 CEC/ (cmol · kg <sup>-1</sup> )	电导率 EC (mS · cm <sup>-1</sup> )	总碳 TC/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全氮 TN/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全磷 TP/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全钾 TK/ (g · kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效磷/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	碳氮比 C/N
废渣	3.4	2.85	142.0	0.5	1.0	1.1	5.3	12.5	73.3	284
污染土壤	12.5	0.15	14.8	1.1	0.8	6.3	75.8	0.5	91.0	13
背景土壤	14.1	0.07	12.2	1.0	1.0	4.5	55.3	1.1	61.7	12
复垦土壤	15.2	0.18	15.5	1.2	1.1	6.7	80.1	1.6	72.5	13

1.2 试验地的设计

田间复垦试验地共设计 9 个处理，每个处理的面积为 3 m×3 m：在平整的废渣上每平方米覆盖 0、25、50 kg 的碱石灰隔离层（简称为 A0、A25、A50）各 3 个，然后上面覆盖非污染区的土壤，复垦土壤的厚度分别为 30、45、60 cm（简称为 S30、S45、S60）各 3 个。

选择当地主要的农作物，以红豆（*Phaseolus angularis*）、白菜（*Brassica chinensis*）、玉米（*Zea mays*）和土豆（*Solanum tuberosum*）作为试验农作物，在 2005 年 4 月种植红豆，2005 年 8 月收割；在 2005 年 9 月种植白菜，2006 年 1 月收割；2006 年 2 月种植玉米和马铃薯，2006 年 6 月收割。

1.3 分析方法

污染土壤的各项化学性质测定参照农业化学常规分析方法<sup>[7-8]</sup>，具体的方法如下：总碳（TC）采用重铬酸钾氧化法；全氮（TN）采用开氏法；全磷（TP）采用酸溶钼锑抗比色法；全钾（TK）采用醋酸铵提取-火焰光度法；碱解氮采用碱解扩散法；速效磷采用碳酸氢钠法氟化铵法；速效钾采用醋酸铵提取-火焰光度法；阳离子交换量（CEC）采用乙酸铵法和氯化铵-乙酸铵法。污染土壤样品 pH 值和电导率（EC）的测定采用 1：5 土液比，pH 计和电导仪测定<sup>[9]</sup>。污染土壤重金属总量测定采用 HCl+HNO<sub>3</sub>+HClO<sub>4</sub> 消解。随机从试验地的各个处理取样，白菜地上部分用自来水冲洗 3~5 遍，再用去离子水冲洗 2~3 遍。用 105℃进行 20 min 杀青，然后用 65~70℃烘 24 h 左右；红豆、玉米和马铃薯成熟后随机取样选取红豆、玉米的籽实和马铃薯的块根用自来水冲洗 3~5 遍，再用去离子水冲洗 2~3 遍，马铃薯用不锈钢刀切碎，然后 65~70℃烘干至恒质量。粉碎后用 HNO<sub>3</sub>+HCl+HClO<sub>4</sub> 消化，原子吸收分光光度计火焰法测定重金属质量分数。数据用 SPSS12.0 软件进行统计检验，One-Way ANOVA 分析，在 P=0.05 水平上进行显著性比较。

2 结果与分析

2.1 土法炼锌区土地复垦的限制因子

废渣中主要的污染重金属 Pb、Zn、Cd 质量分数均较高，分别为背景土壤的 57、70 和 40 倍，表明土法炼锌时有大量的 Pb、Zn、Cd 残留在废渣中（表 1）。污染土壤的 Pb、Zn、Cd 含量分别为背景土壤的 3.2、4.7、13 倍，表明冶炼过程中产生了大量的重金属累积在土壤中，其污染的途径主要是大气沉降<sup>[5]</sup>。

废渣的结构疏松，保水能力较差，CEC（表 2）明显低于其他处理，表明废渣保肥能力极差，易导致养分缺失，对植物生长不利<sup>[10]</sup>。废渣 EC（表 2）显著大于污染土壤和背景土壤，表明废渣的盐分含量较高，从而降低了植物的吸水能力，植物表现为干旱时的症状或由于本身干旱，使植物长势不好。

2.2 各处理重金属动态变化

经过近 2 a 的时间，3 次取样，复垦土壤重金属 Pb、Zn、Cd 的含量通过 One-Way ANOVA（LSD）分析，在 P=0.05 水平上进行显著性比较（表 3 和表 4）。当复垦土壤厚度为 30 cm 时，A0、A25、A50 处理三者的 Pb、Zn 和 Cd 之间没有显著性差异；当复垦土壤厚度为 45 cm 时，A0、A25、A50 处理三者的 Pb 和 Cd 之间没有显著性差异，A0 和 A25，A0 和 A50 之间 Zn 没有显著性差异，但 A25 和 A50 处理之间 Zn 存在显著性差异；当复垦土壤厚度为 60 cm 时，A0、A25、A50 处理之间的 Zn 和 Cd 没有显著性差异，A0、A25、A50 处理的 Pb 两两之间存在显著性差异。因此，不论复垦土壤的厚度是 30、45 cm 还是 60 cm，土壤重金属 Pb、Zn 和 Cd 在 A0、A25、A50 处理的情况下大多数没有显著变化，从经济的角度覆土厚度为 30 cm 就能满足要求。

在没有加碱石灰隔离的情况下，S30 和 S60 处理的 Pb 之间存在显著性差异，S30 和 S45、S45 和 S60 处理的 Pb 之间没有显著性差异；S45 和 S60 处理的 Zn 之间存在

显著性差异，S30 和 S45、S30 和 S60 处理的 Zn 没有显著性差异；S30 和 S45、S30 和 S60 处理的 Cd 存在显著性差异，S45 和 S60 处理的 Cd 没有显著性差异；当碱石灰的厚度 25 kg/m<sup>2</sup> 时，S30、S45 和 S60 处理的 Pb 和 Cd 两两之间没有显著性差异，S30 和 S60 之间的 Zn 存在显著性差异，S30 和 S45，S45 和 S60 之间的 Zn 没有显著性差异；当碱石灰的厚度 50 kg/m<sup>2</sup> 时，S30、S45 和 S60 处理的 Pb、Zn 和 Cd 两两之间没有显著性差异。因此，没有加碱石灰隔离的时候，不同覆土厚度之间的重金属

大多数差异显著，而当碱石灰的厚度 25、50 kg/m<sup>2</sup> 都能使 S30、S45 和 S60 处理的 Pb 和 Cd 之间没有显著性差异，说明了碱石灰隔离层对重金属有很好的固定作用，而且从经济的角度来考虑 25 kg/m<sup>2</sup> 就能满足要求了。

土壤 pH 值的变化范围为 5.79~6.31，不论复垦土壤的厚度是 30、45、60 cm 还是在 A0、A25、A50 处理之间没有显著性差异，说明 pH 值在近 2 a 的时间内变化不大，不是影响不同处理土壤重金属变化的主要因子。

表 3 各处理重金属质量分数和 pH 值的动态变化

Table 3 Dynamic changes of heavy metals and pH values under different treatments

mg · kg<sup>-1</sup>

处理	Pb 质量分数			Zn 质量分数			Cd 质量分数			pH		
	Pb <sub>1</sub>	Pb <sub>2</sub>	Pb <sub>3</sub>	Zn <sub>1</sub>	Zn <sub>2</sub>	Zn <sub>3</sub>	Cd <sub>1</sub>	Cd <sub>2</sub>	Cd <sub>3</sub>	pH <sub>1</sub>	pH <sub>2</sub>	pH <sub>3</sub>
A0+S30	101.0	154.0	105.0	189	185	132	1.91	2.64	2.44	5.96	6.01	5.84
A25+S30	103.0	115.0	94.0	254	197	208	1.78	2.19	2.07	6.31	6.12	5.93
A50+S30	83.9	129.0	111.0	154	188	159	1.43	2.35	2.08	6.16	6.05	6.00
A0+S45	115.0	92.0	109.0	200	240	183	1.85	1.83	1.19	6.10	5.93	5.79
A25+S45	81.2	108.0	100.0	209	213	206	1.54	1.84	1.69	6.25	6.14	6.04
A50+S45	91.7	108.0	99.1	181	170	173	1.83	1.71	1.68	6.20	6.14	6.11
A0+S60	84.3	82.0	76.6	144	165	156	1.65	1.53	1.46	6.08	5.89	5.85
A25+S60	87.1	94.0	87.3	168	176	185	1.44	1.91	1.76	6.23	6.08	6.13
A50+S60	93.6	99.0	97.8	167	194	170	1.63	1.96	1.68	6.22	6.11	5.99

注：Pb<sub>1</sub>、Zn<sub>1</sub>、Cd<sub>1</sub>、pH<sub>1</sub> 表示 2005 年 8 月的；Pb<sub>2</sub>、Zn<sub>2</sub>、Cd<sub>2</sub>、pH<sub>2</sub> 表示 2006 年 1 月的；Pb<sub>3</sub>、Zn<sub>3</sub>、Cd<sub>3</sub>、pH<sub>3</sub> 表示 2006 年 6 月的。

表 4 各处理重金属取样平均值比较

Table 4 Comparison of mean contents of heavy metals under different treatments

处理		Pb 质量分数/(mg · kg <sup>-1</sup> )	Zn 质量分数/(mg · kg <sup>-1</sup> )	Cd 质量分数/(mg · kg <sup>-1</sup> )	pH 值
S30	A0+S30	120.0±17.00a	169±18.40 a	2.33±0.22 a	5.94±0.05 a
	A25+S30	104.0±6.08a	220±17.50 a	2.01±0.12 a	6.12±0.11 a
	A50+S30	108.0±13.10a	167±10.60 a	1.95±0.27 a	6.07±5.94 a
S45	A0+S45	105.0±6.89 a	208±16.90 ab	1.62±0.22 a	5.94±0.09 a
	A25+S45	96.4±7.94 a	209±2.03 a	1.69±0.09 a	6.14±0.06 a
	A50+S45	99.6±4.71 a	174±3.28b	1.74±0.05 a	6.15±0.03 a
S60	A0+S60	80.9±2.28 a	155±6.10 a	1.55±0.06 a	5.94±0.04 a
	A25+S60	89.4±2.26b	176±4.91 a	1.70±0.14 a	6.14±0.04 a
	A50+S60	96.8±1.64c	177±8.54 a	1.75±0.10 a	6.10±0.07 a
A0	A0+S30	120.0±17.00 a	169±18.40ab	2.33±0.22a	5.94±0.05a
	A0+S45	105.0±6.89ab	208±16.90a	1.62±0.22b	5.94±0.04a
	A0+S60	80.9±2.28b	155±6.10b	1.55±0.06b	5.94±0.04a
A25	A25+S30	104.0±6.08 a	220±17.50a	2.01±0.12a	6.12±0.11a
	A25+S45	96.4±7.94 a	209±2.03ab	1.69±0.09a	6.14±0.06a
	A25+S60	89.4±2.26 a	176±4.91b	1.70±0.14a	6.14±0.04a
A50	A50+S30	108.0±13.10 a	167±10.60a	1.95±0.27a	6.07±0.05a
	A50+S45	99.6±4.71 a	174±3.28a	1.74±0.05a	6.15±0.03a
	A50+S60	96.8±1.64 a	177±8.54a	1.75±0.10a	6.10±0.07a

注：对于处理 S30、S45、S60、A0、A25 和 A50 来说同一元素不同字母表示多重比较显著（P=0.05）。

2.3 红豆、白菜、玉米和马铃薯中重金属质量分数

从表 5 可以得出，对于 Pb 来说，红豆、白菜、玉米和马铃薯中重金属质量分数的平均值分别是 1.01、9.03、0.59、0.46 mg/kg，白菜>红豆>玉米>马铃薯；对于 Zn 来说，红豆、白菜、玉米和马铃薯中重金属质量分数的平均值分别是 31.23、62.44、19.92、13.09 mg/kg，白

菜>红豆>玉米>马铃薯；对于 Cd 来说，红豆、白菜、玉米和马铃薯中重金属质量分数的平均值分别是 0.49、1.19、0.14、0.56 mg/kg，白菜>马铃薯>红豆>玉米，根据无公害食品标准（GB/T5009.15-2003）白菜、马铃薯、红豆、玉米的 Cd 质量分数分别不能超过 0.05、0.05、0.3、0.2 mg/kg，在土壤 Cd 超标的情况下，白菜和马铃薯 Cd

质量分数严重超标, 玉米 Cd 质量分数没有超标, 红豆有些超标但不大。

2.4 红豆、白菜、玉米和马铃薯重金属富集系数

富集系数又称吸收系数, 是指作物体某部位某一元

素的含量与土壤中该元素含量的百分比<sup>[11]</sup>。它可以表示土壤作物系统中不同重金属元素迁移的难易程度, 是表示不同元素间差异的较为合适的指标。红豆、白菜、玉米和马铃薯对重金属的富集系数如表 6 所示。

表 5 红豆、白菜、玉米和马铃薯中重金属质量分数

Table 5 Contents of heavy metals in the bean (*Phaseolus angularis*), Chinese cabbage (*Brassica chinensis*), maize (*Zea mays*) and potato(*Solanum tuberosum*)

mg · kg<sup>-1</sup>

处理	2005 年 8 月(红豆)			2006 年 1 月(白菜)			2006 年 6 月(玉米)			2006 年 6 月(马铃薯)		
	Pb	Zn	Cd	Pb	Zn	Cd	Pb	Zn	Cd	Pb	Zn	Cd
A0+S30	0.868	29.5	0.48	10.94	66	1.57	1.51	20.9	0.104	1.98	12.9	0.6
A25+S30	0.920	25.9	0.53	8.13	53	1.82	0.41	17.4	0.107	0.18	15.3	0.52
A50+S30	0.855	26.7	0.37	11.48	72	1.25	0.49	18.1	0.174	0.13	11.5	0.48
A0+S45	0.716	33.8	0.41	12.45	88	1.86	0.15	22.2	0.190	0.76	13.8	0.74
A25+S45	1.080	27.4	0.78	8.33	62	1.11	1.21	19.9	0.141	0.20	12.4	0.48
A50+S45	1.371	35.7	0.29	12.09	55	1.55	0.77	20.1	0.130	0.24	12.6	0.55
A0+S60	1.192	28.8	0.77	6.40	36	0.68	0.59	22.8	0.171	0.08	14.2	0.62
A25+S60	1.004	29.8	0.36	3.79	54	0.86	0.008	17.2	0.147	0.06	11.6	0.50
A50+S60	1.042	43.5	0.46	7.69	76	1.05	0.18	20.7	0.170	0.54	13.5	0.57

表 6 红豆、白菜、玉米和马铃薯的重金属富集系数

Table 6 Enrichment factor of heavy metals in the bean(*Phaseolus angularis*), Chinese cabbage (*Brassica chinensis*), maize (*Zea mays*) and potato (*Solanum tuberosum*)

%

处理	2005 年 8 月(红豆)			2006 年 1 月(白菜)			2006 年 6 月(玉米)			2006 年 6 月(马铃薯)		
	Pb	Zn	Cd	Pb	Zn	Cd	Pb	Zn	Cd	Pb	Zn	Cd
A0+S30	0.9	15.6	25.1	7.1	35.7	59.5	1.4	15.8	4.3	1.9	9.8	24.6
A25+S30	0.9	10.2	29.8	7.1	26.9	83.1	0.4	8.4	5.2	0.2	7.4	25.1
A50+S30	1.0	17.3	25.9	8.9	38.3	53.2	0.4	11.4	8.4	0.1	7.2	23.1
A0+S45	0.6	16.9	22.2	13.5	36.7	101.6	0.1	12.1	16.0	0.7	7.5	62.2
A25+S45	1.3	13.1	50.6	7.7	29.1	60.3	1.2	9.7	8.3	0.2	6.0	28.4
A50+S45	1.5	19.7	15.8	11.2	32.4	90.6	0.8	11.6	7.7	0.2	7.3	32.7
A0+S60	1.4	20.0	46.7	7.8	21.8	44.4	0.8	14.6	11.7	0.1	9.1	42.5
A25+S60	1.2	17.7	25.0	4.0	30.7	45.0	0.0	9.3	8.4	0.1	6.3	28.4
A50+S60	1.1	26.0	28.2	7.8	39.2	53.6	0.2	12.2	10.1	0.6	7.9	33.9
处理平均值	1.1	17.4	29.9	8.3	32.3	65.7	0.59	11.7	8.9	0.5	7.6	33.4

对于 Pb 来说, 富集系数马铃薯<玉米<红豆<白菜; 对于 Zn 来说, 富集系数马铃薯<玉米<红豆<白菜; 对于 Cd 来说, 富集系数玉米<红豆<马铃薯<白菜。不同植物种类对重金属的吸收、积累差异很大。例如, 蕨类植物吸收 Cd 的量特别多, 体内含 Cd 量可高达 1 200 mg/kg; 双子叶植物吸镉量也相当高, 如向日葵、菊花体内含镉的量可高达 400 和 180 mg/kg; 单子叶植物含镉量比双子叶植物少<sup>[12]</sup>。玉米为单子叶植物, 其他的为双子叶植物。通过比较, 在 Pb、Zn、Cd 3 种重金属中富集系数最大的是 Cd, 同时 Cd 又是危害最大的重金属元素, 因此在土法炼锌区复垦土地最不适合种植的农作物是白菜, 比较适合种植的农作物是玉米, 其次是红豆。

在 9 种处理中, 各种植物富集系数平均值最小的为处理 A25+S60, 富集系数是 14.7%, 最大的为处理 A0+S45, 富集系数是 24.2%。根据覆土厚度 30、45、60 cm 分为 3 类, 其富集系数的平均值分别是 16.7%、20.5%、17.2%, 覆土厚度为 30 cm 处理的富集系数最小, 根据一

般农作物的根系在 0~25 cm 深度, 同时从经济的角度出发, 覆土厚度为 30 cm 比较合适。同时根据没有加碱石灰, 以及覆盖 25 和 50 kg/m<sup>2</sup> 碱石灰分为 3 类, 其富集系数平均值分别是 19.8%、16.6%、18%, 碱石灰处理的富集系数较小, 说明了碱石灰隔离层能够减少进入植物体重金属的质量分数, 而且覆盖 25 kg/m<sup>2</sup> 碱石灰就能很好地满足要求。碱石灰隔离层一方面 pH 值呈碱性能够吸附通过毛细管向上迁移的重金属, 同时能够形成 1 个相对隔水层, 可以防止水分快速的渗出, 提高了土壤的持水保肥能力。

3 讨论

碱石灰隔离层处理与没有碱石灰隔离层处理进行对比, 农作物的 Pb、Zn、Cd 质量分数分别降低了 17.4%、3.4%和 12.1%, 这主要是碱石灰会改变土壤固相中吸收性阳离子的组成: 氢在相当大的程度上为钙取代, 土壤阳离子代换量增加, 能提高土壤的 pH 值。与此同时, 环境

被中和, 土壤溶液中存在的大多数重金属形成氢氧化物胶体。土壤对阳离子的吸附能力有所增大。其次, 土壤环境被中和或呈近中性反应, 这将增强细菌区系的生命活动, 使微生物的数量明显增多, 其中有些微生物可吸收重金属构成其细胞组成, 同时还增强了生物对重金属的吸收过程。如果吸收过程的强度大于土壤有机质的矿化过程, 则可以发现重金属的活性降低。再次, 碱石灰可使土壤富集钙, 钙可促进土壤的凝聚, 增强土壤团聚性, 改善土壤结构, 间接影响氧化还原电位, 加速氧化过程, 对土壤中的重金属起到沉淀作用<sup>[4]</sup>。有研究表明, 经过石灰固化后的沉积物中 80% 的离子都呈稳定状态<sup>[2]</sup>。

玉米和红豆对 Pb、Zn、Cd 的相对富集系数小。有研究表明, 玉米对土壤中 Pb 吸收最强的是根系, 根系中铅含量大约是秸秆的 4~60 倍、是籽实的 100~1 000 倍。玉米根系可以作为一种屏障或过滤器, 来阻止 Pb 进一步向其秸秆和籽实中迁移, 从而减少其毒害效应<sup>[13]</sup>。其次, 玉米秸秆中 Pb 含量大约是籽实的 20 倍, 说明除根系外, 秸秆也是阻碍 Pb 进入籽实的二次重要屏障<sup>[12]</sup>。玉米对 Cd 生理耐受性也较强<sup>[14]</sup>, 同时也是当地人们的主要粮食作物。红豆能够与根瘤菌共生, 从而有效地把大气中的 N<sub>2</sub> 固定成 NH<sub>3</sub>。土法炼锌废弃地最重要的限制因子是重金属毒性和养分不足, 而 N 素的极端不足又是养分不足中的核心问题<sup>[15-16]</sup>。因此, 在土法炼锌废弃地土地复垦过程中如何促进废弃地养分循环和营养元素的累积, 包括利用豆科植物根瘤菌共生体的固氮作用来加速废弃地有机质及 N 素的积累, 是解决土地复垦过程中熟化土壤的重要问题<sup>[17]</sup>。

## 4 结 论

1) 4 种试验农作物在土壤 Cd 超标的情况下只有玉米符合无公害食品标准, 红豆超标不大, 且玉米和红豆对 Pb、Zn、Cd 的相对富集系数小, 可以选为土法炼锌区土地复垦农作物, 白菜和马铃薯对 Pb、Zn、Cd 的富集系数大, 不适合选为土地复垦的农作物。

2) 土法炼锌区废弃地复垦利用碱石灰作为隔离层可以降低进入农作物 Pb、Zn、Cd 质量分数, 经济有效的碱石灰隔离层厚度为 25 kg/m<sup>2</sup>, 复垦土壤的厚度为 30 cm 左右。

## [参 考 文 献]

- [1] 杨元根, 刘丛强, 吴攀, 等. 贵州赫章土法炼锌导致的重金属积累[J]. 矿物学报, 2003, 23(3): 255—262.  
Yang Yuangen, Liu Congqiang, Wu Pan, et al. Zinc smelting: An important factor to heavy metal accumulation in soils and sediments in Hezhang County, Guizhou Province[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2003, 23(3): 255—262. (in Chinese with English abstract)
- [2] 杨元根, 刘丛强, 张国平, 等. 铅锌矿山开发导致的重金属在环境介质中的积累[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 24(3): 305—309.  
Yang Yuangen, Liu Congqiang, Zhang Guoping, et al. Heavy metal accumulations in environmental media induced by lead

- and zinc mine development in northwestern Guizhou Province, China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2003, 24(3): 305—309. (in Chinese with English abstract)
- [3] 黑亮, 胡月明, 陈启堂, 等. 用固定剂减少污泥中重金属污染土壤的研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 205—209.  
Hei Liang, Hu Yueming, Chen Qitang, et al. Fixing heavy metals in sludge and reducing pollution to soil using heavy metal stabilizers[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(8): 205—209. (in Chinese with English abstract)
- [4] 杜彩艳, 祖艳群, 李元. 石灰配施猪粪对 Cd、Pb 和 Zn 污染土壤中重金属形态和植物有效性的影响[J]. 武汉植物学研究, 2008, 26(2): 170—174.  
Du Caiyan, Zu Yanqun, Li Yuan. Effects of lime with pig manure on fractions of Cd, Pb and Zn in soil and phytoavailability[J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 2008, 26(2): 170—174. (in Chinese with English abstract)
- [5] 林文杰, 肖唐付, 敖子强, 等. 黔西北土法炼锌废弃地植被重建的限制因子[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 631—635.  
Lin Wenjie, Xiao Tangfu, Ao Ziqiang, et al. Limiting factors of waster land revegetation in indigenous zinc smelting area of western Guizhou[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(3): 631—635. (in Chinese with English abstract)
- [6] 国家环保总局 GB15168-1995. 土壤环境质量标准[S], 1996.
- [7] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [8] 鲁如坤. 农业土壤化学分析方法[M]. 北京: 中国农业技术出版社, 2000: 24—196.
- [9] 刘广明, 杨劲松, 姚荣江. 影响土壤浸提液电导率的盐分化学性质要素及其强度研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(2): 247—252.  
Liu Guangming, Yang Jingsong, Yao Rongjiang. Chemical conductivity of soil extract and their intensity[J]. Institute of Soil Science, 2005, 42(2): 247—252. (in Chinese with English abstract)
- [10] 刘世全, 蒲玉林, 张世熔, 等. 西藏土壤阳离子交换量的空间变化和影响因素研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 1—5.  
Liu Shiquan, Pu Yulin, Zhang Shirong, et al. Spatial change and affecting factors of soil cation exchange capacity in Tibet[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(5): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王新, 贾永锋. 紫花苜蓿对土壤重金属富集及污染修复的潜力[J]. 土壤通报, 2009, 40(4): 932—935.  
Wang Xin, Jia Yongfeng. Heavy metals accumulation and phytoremediation of Alfalfa in contaminated soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(4): 932—935. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王焕校. 污染生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 25—28.
- [13] 匡少平, 徐仲, 张书圣. 玉米对土壤中重金属铅的吸收特

- 性及污染防治[J]. 安全与环境学报, 2002, 2(1): 28—31.
- Kuang Shaoping, Xu Zhong, Zhang Shusheng. Phytoavailability of corns to heavy metal Pb content in the soils and its benefit to the environmental amelioration[J]. Journal of Safety and Environment, 2002, 2(1): 28—31. (in Chinese with English abstract)
- [14] 薛萃琦, 温子若, 陈希. 镉胁迫对玉米生理生化特性及品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(24): 11482—11483.
- Xue Luoqi, Wen Ziruo, Chen Xi. Effects of Cd stress on physiological and biochemical traits and quality of maize[J]. Journal of Anhui Agri, 2009, 37(24): 11482—11483. (in Chinese with English abstract)
- [15] Bradshaw A D, Chadwick M J. The restoration of land: the ecology and reclamation of derelict and degraded Land[M]. Oxford, Blackwell Scientific Publications, 1980.
- [16] Li R W, Daniels W L. Nitrogen accumulation and form over time in young mine soils[J]. Journal of Environmental Quality, 1994, 23(1): 166—172.
- [17] Harris J A, et al. Land restoration and reclamation: Principles and practice[M]. Singapore: Longman, 1996.

## Reclamation technology on preventing heavy metal pollution from landfill of indigenous zinc smelting areas

Ao Ziqiang<sup>1,2</sup>, Yan Chongling<sup>1\*</sup>, Lin Wenjie<sup>2</sup>, Qu Liya<sup>2</sup>, Liu Jingchun<sup>1</sup>, Guan Xinxin<sup>1</sup>, Wu Guirong<sup>1</sup>

(1. School of Life Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Guizhou Research and Designing Institute of Environmental Science, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** Due to indigenous zinc smelting, lots of lands were polluted and abandoned in Hezhang County, Guizhou Province. The reclamation of polluted soils is becoming more important to improve environmental protection and to prompt agricultural production in these areas. In the present study, total of nine treatments of different amount of lime (0, 25 and 50 kg/m<sup>2</sup>) was used as isolation layer in the flat slag heap, and then the isolation layer was covered with different amount of non-contamination soil (30, 45 and 60 cm), respectively. During the following two years, bean (*Phaseolus angularis*), Chinese cabbage (*Brassica chinensis*), maize (*Zea mays*) and potato (*Solanum tuberosum*) were planted, concentrations of some metals (Zn, Pb, Cd) in soils and the edible part of the crops were determined to assess the effects of reclamation by statistical analysis of One-Way ANOVA (LSD). The results indicated that metal concentrations in edible part of the crops were decreased by the treatments of limestone isolation layer; maize had the lowest enrichment factor of heavy metals among the four crops, while Chinese cabbage had the highest content, demonstrating that maize was more suitable to be cultivated compared with the others, lime as isolation layer could significantly reduce the accumulation of heavy metals in the edible part of the crops, and 25 kg/m<sup>2</sup> lime isolation layer combined with 30 cm non-contamination soil cover showed the effective reclamation result.

**Key words:** lime, land reclamation, heavy metals, indigenous zinc smelting area, enrichment factor